B I B L I O G R A P H Y

REV. NO.	DATE	DESCRIPTION	REMARK	
P1	2023.10.30	초기 검토용 도서로 작성함.		
P2	2023.11.15	외부 전문가 위원회에 의해 검토되었음.		

TOTAL (288) SHEET WITH A COVER

PROJECT **수소선박 안전기준 개발 사업**

TITLE

수소연료 추진선
벙커링 안전운용 절차서

DATE	SCALE	DWG. NO.	REV. NO.
2023. 10. 30.	NONE	-	P2

KOMAC

주식회사 한 국 해 사 기 술
KOREA MARITIME CONSULTANTS CO., LTD

E&CO
E.P.C for a Better Future.

주식회사 이앤코
E&CO LTD.

목 차

1. 수소의 물리적 특성 및 연소 특성 6
1.1 수소의 물리적 특성 6
1.1.1 기체수소(GH_2) 6
1.1.2 액체수소(LH_2) 7
1.1.3 극저온 유출 8
1.1.4 침투성 8
1.1.5 수소취성 9
1.2 수소의 연소 특성 9
1.2.1 자연발화 10
1.2.2 화재 11
1.2.3 액면화재 11
1.2.4 물리적 폭발과 화학적 폭발 12
1.2.5 폭연에서의 폭발전이 13

2. 기체수소(GH_2) 벙커링 시스템 운용절차 15
2.1 개요 15
2.2 GH_2 Bunkering System Block Diagram 16
2.3 Equipment Specifications 18
2.4 GH_2 Bunkering Operation 의 절차 및 소요 시간 19
2.5 Preparation 21
2.5.1 Connecting 22
2.5.2 Line Inerting-1 24
2.5.3 Gassing Up 26
2.6 Normal Operation 28
2.6.1 Preparation 29
2.6.2 Line Depressurizing 31

2.6.3 Line Inerting-2 33
2.6.4 Disconnecting 35
2.6.5 Operating 37
2.6.6 Re-connecting 39
2.6.7 Re-Loading (Filling) 41
2.7 For Maintenance 43
2.7.1 Depressurizing 44
2.7.2 Inerting 46
2.7.3 Aeration 48

3. 액체수소(LH_2) 벙커링 시스템 운용절차 50
3.1 개요 50
3.2 LH_2 Bunkering System Block Diagram 51
3.3 Equipment Specifications 53
3.4 LH_2 Bunkering Operation 의 절차 및 소요 시간 54
3.5 Preparation 56
3.5.1 Connecting 57
3.5.2 Line Inerting 59
3.5.3 Gassing Up 61
3.6 Normal Operating 63
3.6.1 Cool Down 64
3.6.2 Loading (Filling) 66
3.6.3 Liquid Line Stripping 68
3.6.4 Liquid Line Inerting 70
3.6.5 Disconnecting 72
3.6.6 Operating 74
3.6.7 Re-Connecting 76

3.6.8 Line Cool Down 78
3.6.9 Re-Loading (Filling) 80
3.7 For Maintenance 82
3.7.1 Depressurizing 83
3.7.2 Warm Up & Inerting 85
3.7.3 Aeration 87

4. 고체수소(MH) 벙커링 시스템 운용절차 89
4.1 개요 89
4.2 MH Bunkering System Block Diagram 91
4.3 Equipment Specifications 93
4.4 MH Bunkering Operation 의 절차 및 소요 시간 94
4.5 Preparation 96
4.5.1 Connecting 97
4.5.2 Line Inerting-1 99
4.5.3 Line Gassing Up 101
4.6 Normal Operating 103
4.6. 1 Loading (Filling) 104
4.6. 2 Line Depressurizing 106
4.6. 3 Line Inerting-2 108
4.6. 4 Disconnecting 110
4.6. 5 Operating 112
4.6. 6 Re-Connecting 114
4.6. 7 Re-Loading (Filling) 116

[부록 1] 수소 벙커링 체크리스트 118

[부록 2] 수소 사고 사례 158

[부록 3] 위험성 연료 안전관리를 위한 규정/국제기준/가이드라인 분석 .. 200

[부록 4] 수소추진선박 벙커링 위험도 평가 HAZOP REPORT 208

1 수소의 물리적 특성 및 연소 특성

상용되고 있는 메탄(천연가스의 주요 성분인 CH_4)의 물리적 특성 및 연소특성과의 비교를 통하여, 수소 벙커링 시스템 운용 시 운용 안전성을 높이고 각 상태별 수소의 물리적 특성의 이해를 높이기 위하여 이 장을 서술하였다.

1.1 수소의 물리적 특성

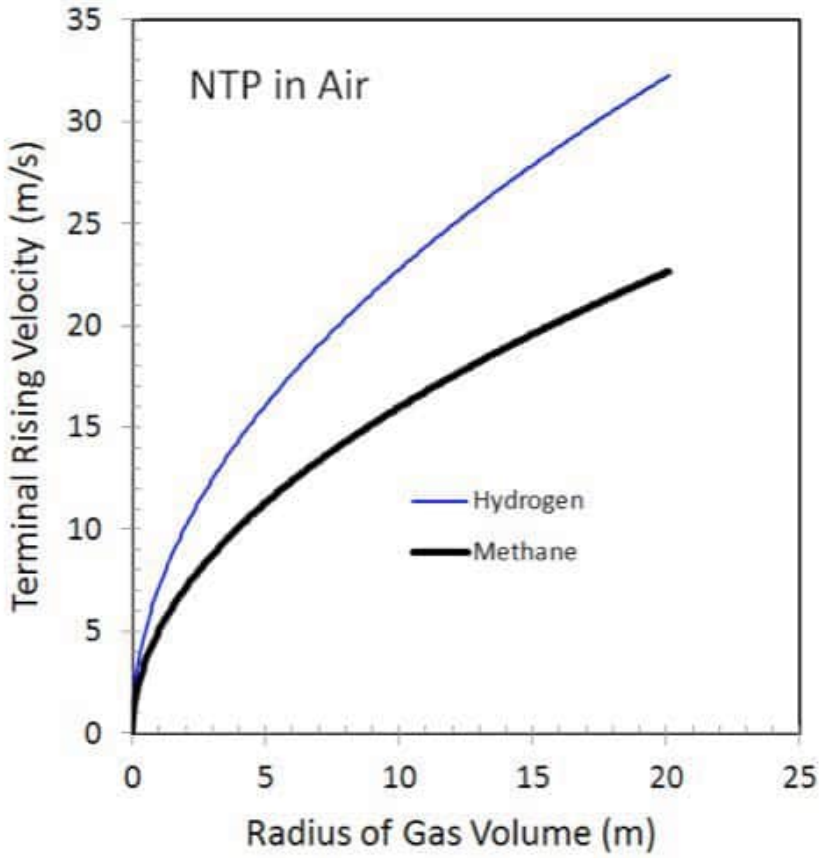
1.1.1 기체수소(GH_2)

수소는 정상온도와 압력(이하 NTP), 293.15K, 1기압에서 0.08376kg/m^3의 밀도로 가장 가벼운 기체다. 그에 비해 메탄은 NTP에서 0.65119kg/m^3의 밀도로 상당히 무겁다. 메탄 원자의 80%가 수소 원자라는 점에 유의해야 한다. NTP에서 두 기체는 모두 NTP 밀도가 1.204kg/m^3인 공기보다 부력이 높다. 종말 상승 속도는 상승함에 따라 부력(위쪽으로 향함), 중력(아래로 향함), 대기 항력(아래로 향함)의 균형으로 설정되기 때문에 일반적으로 실제 수소나 메탄 방출의 "상승 속도"를 정확하게 명시하는 것은 불가능하다. 대기 항력은 방출된 가스 부피의 형태와 단면적에 따라 달라지는데, 실제 방출에서는 알 수 없으며 방출의 초기 조건, 난류 및 바람 조건에 따라 달라질 수 있다. 게다가, 공기의 밀도는 상대 습도에 따라 달라진다. 바람이나 난류가 없을 때 방출된 가스의 구형 부피에 대한 NTP의 수소와 메탄에 대한 상대적인 상승 속도를 감지하기 위해 <그림1>에 구 반경의 함수로서 두 기체에 대한 (이 가정 하에서) 공기 중 종말 상승 속도의 그림을 보여준다. 1200kg의 수소 연료의 경우, NTP에서 이 질량의 수소는 반경 15.07m의 구를 차지하며 종말 상승 속도는 27.92m/s이다. 같은 질량의 메탄은 13.93m/s의 종말 상승 속도로 반경 7.61m의 구역을 차지할 것이다. 분명히, 수소는 메탄보다 훨씬 더 가볍지만 둘 다 NTP에서 공기 중에 빠르게 상승한다.

동질 이 원자 분자인 수소는 쌍극자 모멘트가 없으며, 분자의 진동은 결합 축을 따라 전하 분리를 발생시킬 수 없다. 결과적으로 수소는 적외선과 상호 작용하지 않으며 열포집 가스가 아니다. 이와는 대조적으로, 메탄(CH_4)은 서로 다른 원소가 결합한 이질성 분자이므로 결합은 본질적으로 극성이며 C-H 결합의 스트레칭과 굴곡은 적외선 전자기 복사에 결합될 수 있는 전하 변동을 생성한다. 이 특성은 메탄을 강력한 열포집 가스로 만들며, 이산화탄소보다 대기 중 열을 최대 23 배 더 잘 포집할 수 있다. 수소와 메탄의 근본적인 차이로 인해 LNG 인프라에서 발생하는 메탄 누출

은 환경, 안전 및 경제적 관점에서 심각한 문제가 되고 수소 인프라에서 발생하는 누출은 환경 영향 없이 안전 및 경제적 문제를 발생시킨다.

<그림 1> NTP(293.15K, 1 기압)에서 공기 중 수소와 메탄의 구형 부피에 대한 종말상승속도



1.1.2 액체수소(LH_2)

수소를 다량 저장하는 가장 부피적으로 효율적인 방법은 액체이며 수소의 경우 극저온성 액체이다. 분자 수소의 결정적인 특징은 H_2 분자 사이의 매우 약한 인력의 반데르발스 상호작용이다. 수소의 정상 비등점은 매우 차가운 20K 이고, LCH_4의 정상 비등점은 111K 이다. 끓는점의 차이에 대한 중요한 결과는 끓는점에서 비등점에 있는 액체 메탄이 공기를 액화할 수 없는 반면 LH_2는 성분 N_2와 O_2가 77.3K 와 90.2K 에서 응축되는 공기를 액화할 수 있다는 것이다. 고체 N_2 및 고체 O_2 의 융점이 각각 63.3K 및 54.8K 이기 때문에, 이러한 대기 가스는 LH_2에 노출 될 때 빙결될 수 있다. 공기의 액화 또는 빙결 가능성은 응축된 공기로 수소 배관을 막음으로써 발생하는 안전 문제와 응축된 산소에서 발생하는 반응성에 대한 우려를 초래한다. 실질적으로, 이러한 공기 응축 문제는 LH_2 배관 라인을 수소 또는 헬륨 (보다 일반적으로

현장에서의 가용성 및 저렴한 비용으로 인해 warm-up 된 수소를 사용)으로 제거함으로써 LH_2 연료 공급 작업에서 일상적으로 처리된다.

수소와 메탄은 모두 상온과 압력에서 공기보다 밀도가 낮다. 안전과 관련된 중요한 문제는 이러한 액체가 증발하여 20K 에서 차가운 수소 가스를 생성하거나 111K 에서 차가운 메탄 가스를 생성했을 때, 이들 가스가 대기보다 부력이 커지기 전에 얼마나 따뜻하게 해야 하는가? 작은 누출의 경우 주변 공기가 너무 냉각되지 않고 NTP 근처에 머문다고 가정할 경우, 수소는 22.07K 에서 NTP 공기(밀도 1.204kg/m^3)보다 부력이 더 높아진다. 즉, LH_2 에서 방출되는 작은 수소들은 NTP 조건에서의 공기보다 부력이 커지기 위해서는 최대 2K 정도의 예열만 하면 된다.

이와는 대조적으로, 메탄은 가스 밀도가 NTP 공기의 밀도와 같기 전에 111K 에서 164.3K 로 53.3K 를 예열해야 한다. 결과적으로, LCH_4 가 111K 에서 증발할 때, 차가운 메탄가스가 LH_2 보다 훨씬 오랫동안 비 부력 상태를 유지한다. 주어진 질량이 정상 끓는점(NBP)에서 NTP 로 데워 질 때 수소의 부피 팽창 계수는 847.6 이고 메탄의 부피 팽창 계수는 648.0 이다.

1.1.3 극저온 유출

수소 분자들 사이의 약한 분자간 인력은 LH_2 의 기화 엔탈피를 ΔH_{vap} 값이 8.5kJ/mole 인 LCH_4 보다 9.2 배 낮은 0.92kJ/mole 로 매우 낮다. 비교를 위해, 액체 상태의 물의 ΔH_{vap} 는 물 분자 사이에서 발견되는 강한 수소 결합으로 인해 40.66kJ/mole 이다. 수소의 ΔH_{vap} 값이 매우 낮다는 것은 수소를 증발시키는 데 에너지가 거의 들지 않는다는 것을 의미하며, 그 결과 LH_2 유출은 지속 시간이 매우 짧다는 것이다. 이론적 모델들은 LH_2 의 2,800kg 을 흘리면 수명이 최대 13 초의 액면을 생성할 것으로 예상된다.

1.1.4 침투성

수소 침투는 금속과 산화물 표면의 분자 수소가 수소 원자로 분리되면서 발생하며, 이후 수소 원자가 수소 저장과 배관 라인에 관여하는 물질을 통해 확산되면서 발생한다. 이런 방식으로 생성되는 수소 원자는 또한 수소 취성으로 이어질 수 있으며, 이는 재료과학에서 매우 중요한 현상이다. 많은 사람들이 수소 침투(취화가 없는 경우에도)를 누출 위험으로 잘못 해석한다. 문제는 스테인리스 강 관 및 기타 피팅을 통해 확산되는 수소가 재료를 통과하여 수소 가스로 빠져 나와 누출을 구성 할 수 있다는 것이다. 누출원으로서의 침투는 이러한 방식으로 배출되는 가스의 양이 극미

하기 때문에 선박에 적용된 스테인리스 강 관, 밸브 또는 기타 하드웨어의 실제 성능에는 문제가 되지 않는다.

1.1.5 수소취성

누출 관점에서 소량의 수소를 포함하더라도 수소 용액, 투과 및 확산은 수소 취성 현상의 주요 요소이다. 수소 취성은 재료 과학의 중요한 영역이다. 금속 표면에서 H_2의 분리에 의해 생성된 수소 원자는 물질의 대부분으로 확산 될 수 있고 물질 변형이 존재하는 경우 결함 부위에 축적될 수 있다. 기존의 결함 및 변형의 조합으로 인해, 수소 원자는 결함 부위에 축적되어 재료를 국부적으로 약화시키고 균열 성장을 촉진시킬 수 있다.

이는 페라이트 계(체심 입방구조, bcc) 강은 심각한 문제가 되지만, 오스테나이트 계(면심 입방구조, fcc) 강 또는 구리 및 알루미늄은 페라이트 계 강에 비해 문제는 훨씬 작다.

실질적으로 모든 수소 저장 시스템 및 배관에 SUS304 또는 SUS316, 알루미늄 또는 구리를 사용하여 수소 취성을 피할 수 있다. 수십 년간의 산업 경험에 따르면 이러한 물질은 수소 취성에 강하다. 이 재료 선택은 전기 배선 제조에서 철보다 구리를 선택하는 것과 유사하다. 구리는 철보다 전기 및 열 전도성이 높으며 구리를 사용하면 저항 손실이 줄어들고 열 제어가 촉진한다. 마찬가지로 수소 사용을 위해 올바른 재료를 선택해야 한다. 가스 공급 업체의 실질적인 경험은 SUS316 또는 SUS304 타입의 스테인리스 강 재료 선택이 제대로 이행 될 때 수소 취화가 LH_2 또는 기타 수소 배관 (튜브, 배관)의 유지 관리 문제가 아니라는 점이다. 대부분의 상업용 LH_2 탱크의 내부 라이너는 SUS304 로 제작된다.

1.2 수소의 연소 특성

수소와 메탄에 대해 앞에서 논의한 물리적 특성은 이 두 연료의 연소 특성에 대한 논의의 기초가 된다. 표 1)은 수소와 메탄의 물리적 및 연소 특성에 대한 값을 보여주고 있다.

특정 발화원에 의해 발생하는 연소를 논의하기 위해 다음과 같은 정의가 필요하다.

1) 약한(열) 발화원: 시작 에너지가 50MJ 미만인 성냥, 불꽃, 뜨거운 표면, 화염을 "약한"또는 "열" 발화원이라고 한다. 이것이 발화원이다.
2) 강력한(충격파) 발화원: 블라스팅 캡, TNT, 고전압 캐패시터 단락(폭발 와이어), 번개는 모두 시작 에너지가 4MJ 이상인 "강력한" 발화원의 예다. 강한 발화원은 약한 발화원보다 약 108 배 강하다는 점에 유의해야 한다. 이것은 발화 시작 에

너지의 엄청난 차이점이다. 번개 외에 강한 발화원은 우발적 발화가 아닌 의도적 발화의 원인이다.

3) 화재: 화재는 불연속 연료/공기 혼합을 통해 불꽃이 저속(20m/s 이하)으로 전파되는 일상 생활에서 익숙한 일반적인 연소의 용어이다. 화재는 시끄럽지 않고, 주변 공기에 무시할만한 과압을 발생시킨다. 가연성 연료 및 공기 혼합물과 접촉하는 약한 발화원에 의해 화재가 발생한다. 익숙함에도 불구하고 화재는 위험하다는 것을 기억하는 것이 안전의 관점에서 중요하다.

4) 폭연: 불꽃이 연소되지 않은 연료/공기 혼합을 통해 빠르게 전파되지만 아음속으로 빠르게 연소된다. 폭연은 시끄러울 수 있고 고막이 파열되고 다른 부상을 일으킬 수 있는 과도한 압력을 발생시킬 수 있다. 일반적인 조건에서 폭연은 약한 발화원에 의해 개시된다. 안전의 관점에서 볼 때, 폭연은 매우 위험하다.

5) 물리적 폭발 또는 화학적 폭발: 기술적으로 폭발은 화염이 초음속으로 연소되지 않은 연료/공기 혼합물을 통해 확산되는 초고속 연소 사건에 대해 보다 적절하게 정의된 용어다. 물리적 폭발은 아음속에서 연소되지 않은 연료/공기 혼합을 통해 불꽃이 전파되는 빠른 연소 사건을 느슨하게 사용하여 큰 타격과 매우 위험한 과압을 일으킬 수 있다. 물리적 폭발 또는 화학적 폭발이라는 용어는 종종 서로 교환하여 사용되어 왔으며, 여기에서 그렇게 사용될 것이다. "직접" 폭발은 연료/공기 혼합 및 제한이 있는 특정 조건을 가진 강한 발화원에 의해 발생하는 순간적인 사건이다. 안전 측면에서 볼 때 물리적 폭발 또는 화학적 폭발은 매우 위험하다.

명시적 발화원에 의한 이러한 연료의 연소를 논의하기 전에, 특정 발화원이 없어도 이러한 가스의 방출이 자생적으로 발화할 수 있는 현상을 고려하여야 한다.

1.2.1 자연발화

수소는 갑자기 방출될 때 최대 41bar 이상의 압력에 대해 "자연발화"를 겪을 수 있다. 자연 발화는 수소와 관련된 특정 용도의 설계에서 모든 명백한 발화원을 성공적으로 제거한 경우에도 지속될 수 있는 발화 경로를 나타내기 때문에 특히 검토되어야 할 안전 문제이다. 자연발화는 기체수소추진선박에 사용되는 것과 같은 고압(350bar, 700bar) 수소 시스템의 문제일 수 있지만, 액체수소추진선박 연료 시스템의 수소 압력이 10bar 미만인 LH_2 저장 수소를 사용한다는 것을 알 수 있으며, 이는 LH_2 탱크 벤트의 압력 완화에 해당한다. 결과적으로 수소추진선박의 전체 수소 시스템 압력이 너무 낮아 수소의 자연발화가 시작되지 않는다. 자연 발화의 기계적인 원인은 확실하게 알려지지 않았으며 계속해서 활발한 연구 주제가 되고 있다.

1.2.2 화재

공기를 포함한 H_2 와 CH_4 혼합물은 모두 약한 발화원을 사용하여 쉽게 발화되어 화재를 발생시킨다.

화재 규제는 볼륨 백분율(vol%)로 표현되는 "하위 가연성 한계"(LFL)에 초점을 맞춘다.

vol% = [용량(연료)/용량(연료 + 공기)] x 100

LFL 은 화재의 위험이 일반적으로 초기 깨끗한 공기에 가연성 가스가 축적되어 있기 때문에 안전 규제의 초점이다. H_2 = 298K 에서 4.0~75.0%의 인화성 범위 LFL 에서 상한 인화성 한계치(UFL)에 대한 고전적 값이다(표 1 참조). 실온에서 메탄의 LFL ~ UFL 은 5.3 ~ 15.0%이다. 맥락상 LFL-휘발유의 UFL 값은 1~7.6%이다. 따라서 수소가 메탄(불의 위험을 증가시키는 것)보다 가연성 범위가 훨씬 넓지만, 초기 청정 환경에서 가연성 가스를 축적한다는 관점에서 볼 때 수소와 메탄은 유사한 LFL 을 가지고 있으며, 발화가 가능한 임계 가스 축적이 유사하다.

부력 효과는 이들 기체의 LFL 을 약간 변형시킬 수 있다. 예를 들어, 대기 혼합물의 지속적인 수소 화재의 경우, 연소가 연료의 완전한 연소로 세 방향으로 모두 확산되려면 수소/공기 혼합물이 최대 8%가 되어야 한다. 수소의 활성 혼합은 수소에 대해 LFL 을 4%로 되돌린다. H_2 의 최소 발화 에너지는 0.020MJ 이고, CH_4 의 최소 발화 에너지는 0.29MJ 이다. 인간의 정전기 방전은 약 10MJ 이므로 LFL ~ UFL 한계 사이에 있을 때 CH_4 와 H_2 모두 일반적인 (약한) 발화원에 노출되면 쉽게 발화된다. 표 1)에는 수소와 메탄의 연소 특성이 나열되어 있다.

전반적으로 연료 방출에서 초기 깨끗한 공기로의 화재 위험의 관점에서, 수소와 메탄의 LFL 은 비슷하기 때문에 발화 위험이 매우 유사하다.

1.2.3 액면화재

수소와 천연가스의 현저한 차이점 중 하나는 화재의 복사 특성이다. 수소가 연소할 때 연소 생성물은 주로 수증기로서 -OH 및 -H 라디칼과 같은 다른 종과 미량 (<1 %)의 양으로 생성된 HO_2 및 H_2O_2 가 생성된다. 그 결과, 수소 화재에서 발생하는 대부분의 열 복사는 진동으로 활성화된 물 분자에서 발생한다. 이와는 대조적으로 메탄이 연소할 때 일부 물이 생성되기는 하지만 대부분의 복사열은 탄소를 함유한 종에서 발생하며, 특히 탄소 그을음은 열 에너지의 효율적인 방열기 역할을 한다. 그 결과 메탄 화재에서 방출되는 복사열은 수소 화재보다 2 ~ 3 배 높다(연료 LHV 기준).

따라서 더 적은 열 에너지를 방출하기 때문에 수소 화재에 가까워질 수 있다. 게다가, 수소 화재로 인한 복사열의 대기 흡수가 더 많다. 수소 화재는 열로 가열되는 수증기의 진동(벤딩, 스트레칭) 모드에서 적외선(IR) 복사를 방출하기 때문에 대기 중 수증기(습도)가 수소 화재로부터 복사를 일부 흡수해 복사열의 공급을 줄일 수 있다.

반경 4.7m 이상의 거리에서 수소 화재에서 발생하는 복사열의 30%가 대기 수증기에 의해 효과적으로 차단된다. 방출되는 방열이 감소하고 대기 흡수율이 높은 두 가지 효과는 메탄(표 1)에 비해 수소의 불꽃 온도가 약간 높은 것을 보상하는 것보다 더 높기 때문에 메탄 화재보다 주변 구조물과 인력에 대한 복사 에너지의 측면에서 수소 화재의 피해가 적다.

복사 에너지의 이러한 차이는 화재가 주변 구조물과 인원에 영향을 미친다. 1982 년 연구에서 AD Little 은 LH_2 및 LCH_4 의 액면 화재에 가장 근접한 접근 방식을 계산했지만 다양한 연료 연소량에 대해 열 표면 손상 (임계값이 5kW/m^2 로 가정 됨)을 입지 않았다. LH_2 1,200kg 과 LCH_4 3198.9kg 에 해당하는 144GJ 의 연료 열 함량에 대해 등급에서 수평 방향으로 화재에 가장 가깝게 접근하여 계산했다. 1,200kg 의 연소 수소의 경우 가장 가까운 접근은 최대 19m 이다. LCH_4 의 경우 가장 가까운 접근은 최대 58m 이다. 수소 화재는 열에너지를 덜 발산하고 열 복사의 대기 흡수가 더 많기 때문에 수소 화재에 더 가까이 갈 수 있다. 이 두 가지 효과는 메탄에 비해 수소의 약간 높은 화염 온도를 보상하는 것보다 더 크다.

1.2.4 물리적 폭발과 화학적 폭발

수소와 메탄은 연료/공기 혼합물, 밀폐 및 강한 발화원의 적절한 조건을 감안할 때 둘 다 폭발할 수 있다. 상온(부피 기준 %)에서 H_2 의 폭발 하한(LEL)에서 H_2 의 폭발 상한(UEL)까지는 18.3 ~ 59.0%이다. 실온에서 메탄 LEL 에서 UEL 까지는 6.3 ~ 13.5% 이다. 따라서 수소는 메탄보다 폭발 범위가 훨씬 넓어 전반적으로 폭발 위험이 더 크다. 초기에 깨끗한 환경에서 가연성 가스가 누출되는 관점에서 메탄의 LEL(6.3%)은 수소(18.3%)보다 상당히 빨리 도달한다.

Klebanoff 등이 검토한 바와 같이, A.D. Little Company 는 1960~1982 년 동안 미 공군과 NASA 루이스 연구 센터에 대한 일련의 실험 및 모델링 연구에서 제한 및 제한되지 않은 환경에서 대규모 수소 방출로 인한 실제 폭발 위험을 평가했다. 이 연구의 결론은 폭발이 즉각적으로 발생하는 제한된 수소/공기 혼합물의 직접 폭발에 대한 구속(예: 풍선 저장)과 폭발 개시(예: 송풍 캡 사용)가 모두 필요하다는 것이다. 게다가, Little work 에 따르면 수소 증기 구름이 폭발 전하에 의해 시작되어도 폭발할

수 없다는 것을 보여 주었다. 이러한 관찰 결과 저자들은 "충격파가 시작되더라도 대규모 유출로 인한 수소-공기 구름의 폭발 가능성은 낮다"는 결론을 내렸다. 실제적인 수소 연소 위험에 대한 이러한 초기 테스트를 요약하면 직접 폭발은 LEL - UEL 범위 내에서 강한 발화원, 밀폐 및 수소/공기 혼합물을 필요로 한다. 약한 발화원(사고 원인)은 수소/공기 혼합물이 폭발 범위 내에 있고 밀폐되어 있어도 화재를 발생시킨다.

1.2.5 폭연에서의 폭발전이(DDT)

<표 1>에 열거된 LEL-UEL 범위는 밀폐 및 강한 발화원의 사용을 가정하여 가스 혼합물을 직접 폭발시키기 위한 것이다. 강력하고 의도적인 발화원이 없기 때문에 사고 시나리오에서 수소와 메탄의 직접적인 폭발을 방지할 수 있다. 그러나 특정 상황에서 장애물이나 내부 구조가 제한된 반응 부피 내에 존재하는 경우 <표 1>의 LEL 아래에서도 연료/공기 혼합에 대한 폭발이 발생할 수 있다.

강력한 발화원이 필요한 직접 폭발과는 달리, 이러한 유형의 폭발은 정상적인 화재로 시작할 수 있다. 밀폐/폐쇄된 환경에서, 연소 속도는 장애물 근처에서 연소되지

않은 연료-공기 혼합물의 난류로 인해, 시간과 거리에 따라 폭연까지 가속된다. 추가 가속으로, 폭연은 폭발로 전환되어 폭발 전이(DDT)를 생성한다. H_2 의 경우 DDT 는 12% 연료/공기 혼합 이상에서만 발생할 수 있다. 수소와 메탄 둘 다 DDT 를 경험할 수 있지만 수소가 더 쉽다.

장애물이 있으면 H_2/공기 농도에서 불꽃 속도가 가속화될 수 있으며 그렇지 않으면 불꽃 가속이 발생하지 않을 수 있다. 장애물의 역할은 연료/공기 혼합물을 개선하고 불꽃 면적을 증가시킬 수 있는 난류 구조물의 형성 속도를 높이는 것이다. 진화하는 불꽃은 복사에 의해 화염 앞에 있는 연소되지 않은 유동장에 영향을 미치며, 진화하는 불꽃이 난류 지역을 통과할 때 불꽃 내부의 연소를 변화시키는 장애물에 난류를 발생시킨다. 장애물과 10m 이상의 발생 거리를 감안할 때, 12% 이상의 수소 농도의 불꽃 속도는 정상 화재 속도에서 탈화 속도로 가속된다.

15.5%의 낮은 혼합물에서도 DDT 에 해당하는 장애물이 있을 경우 700m/s 의 매우 빠른 폭연 속도가 관찰된다.

<표 1> 수소 및 메탄의 물리적 및 연소 특성 값

	수소	메탄
Molecular Weight	2.016	16.043
Density of Gas at NTP, kg/m^3	0.08376	0.65119
Temperature to Achieve NTP Neutral Buoyancy in Air (1.204 kg/m3), K	22.07	164.3
Normal Boiling Point (NBP), K	20	111
Liquid Density at NBP, g/L	71	422
Enthalpy of Vaporization at NBP, kJ/mole	0.92	8.5
Lower Heating Value, MJ/kg	119.96	50.02
Limits of Flammability in Air, vol%	4 ~ 75	5.3 ~ 15
Explosive Limits in Air, vol%	18.3 ~ 59.0	6.3 ~ 13.5
Minimum Spontaneous Ignition Pressure, bar	~ 41	~ 100
Stoichiometric Composition in Air, vol%	29.53	9.48
Minimum Ignition Energy, J	0.02	0.29
Flame Temperature in Air, K	2318	2148
Auto-ignition Temperature, K	858	813
Burning Velocity in NTP Air, m/s	2.6 ~ 3.2	0.37 ~ 0.45
Diffusivity in Air, cm^2/s	0.63	0.2

2 기체수소(GH_2) 벙커링 시스템 운용절차

2.1 개요

기체수소(GH_2)추진선박(이하 수취선박)의 Bunkering 환경은 LNG 추진선박과 유사하게 해상에서 급유를 받을 수 있다고 가정 하였으며, 공정 입장에서 Bunkering 시에 Gas Handling 은 Bunkering 선박(이하 급유선박)에서 주관한다.

수취선박의 초기 상태 Receiving Tank 내부는 질소로 채워져 있으며, 급유선박은 따로 존재한다. 급유선박은 액체수소(LH_2) 운송선박으로, 장비를 다르게 배치함으로써, 기체수소(GH_2)와 액체수소(LH_2)를 모두 Bunkering 할 수 있다.

급유선박의 일반적인 장비 구성은 아래와 같다.

- 액체수소(LH_2) Tank
- Feed Pump
- High Pressure Pump
- H_2 Heater
- Buffer Tank
- Valve
- QC/DC
- Hose

급유선박은 기체수소(GH_2) 공급 시 Bunkering 할 수 있도록 Gassing Up 이 완료 된 상태로, Buffer Tank 에 기체수소(GH_2)가 채워져 있다.

본 Operating Manual 은 Gas Hydrogen 의 Bunkering 을 다루고 있으며, 작업들에 대한 이유, 목적, 운전 및 완료 기준에 대해 설명한다.

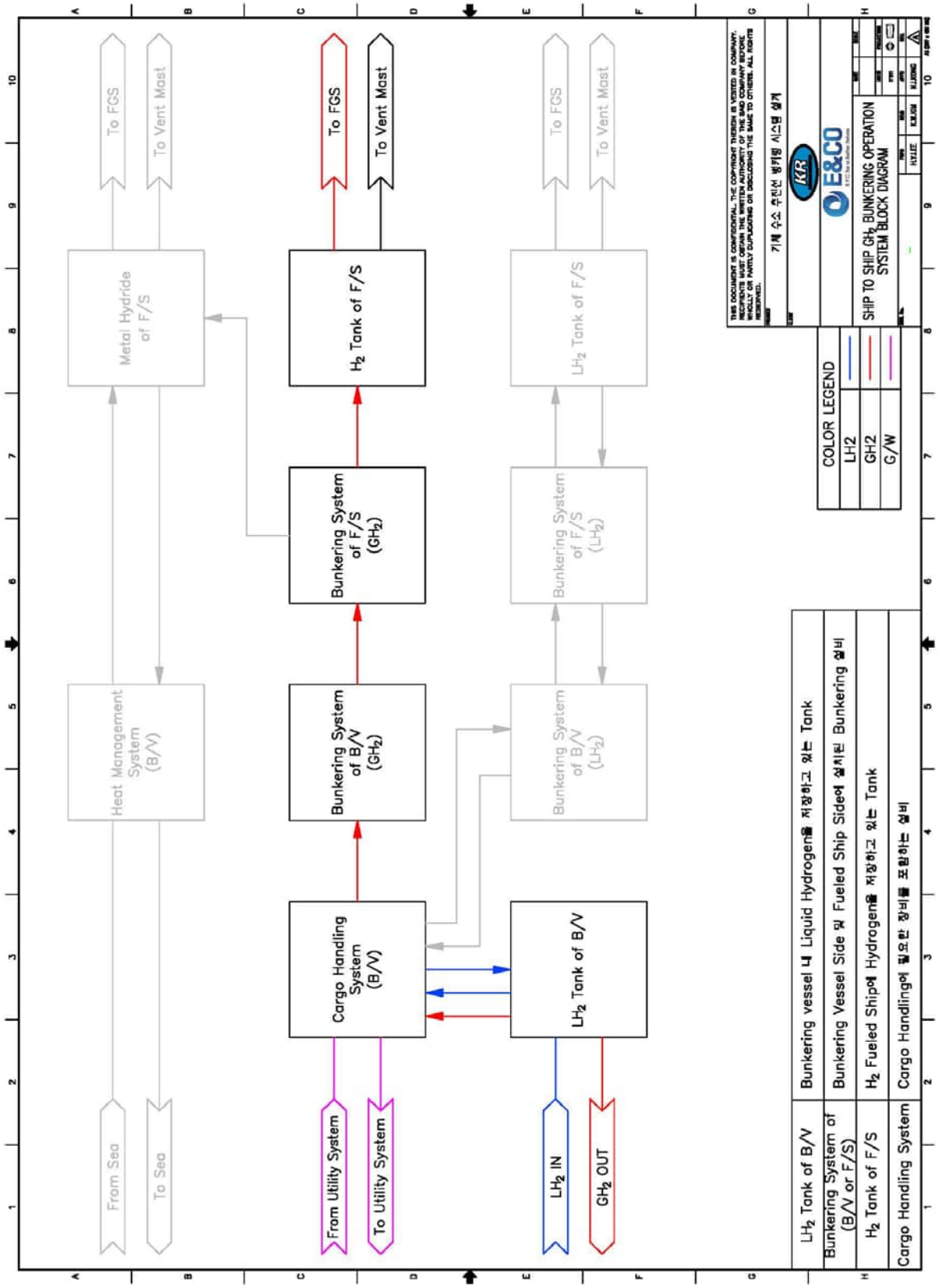
Bunkering 작업에 앞서 아래 사항이 선행되어야 한다.

1) 선급에서 요구하는 재료 선정 및 충격시험 등은 수행되어야 한다. *2-1)
2) 다양한 로드 케이스를 조합한 배관응력해석 수행은 검토되어야 한다. (저인화점 연료선박규칙 제7장_제3절_304_5 / 액화산적운반규칙 제7장_제5절_511_5) *2-2)
3) 용접부, 이음부, 밸브 등은 적합한 매체(헬륨, 또는 5% 수소와 95% 질소 혼합물)와 장비를 이용한 밀폐 및 누설 시험이 수행되어야 한다. *2-3)
4) LH_2 밸브는 극저온용 밸브 및 적합한 단열재를 적용해야 한다. *2-4)

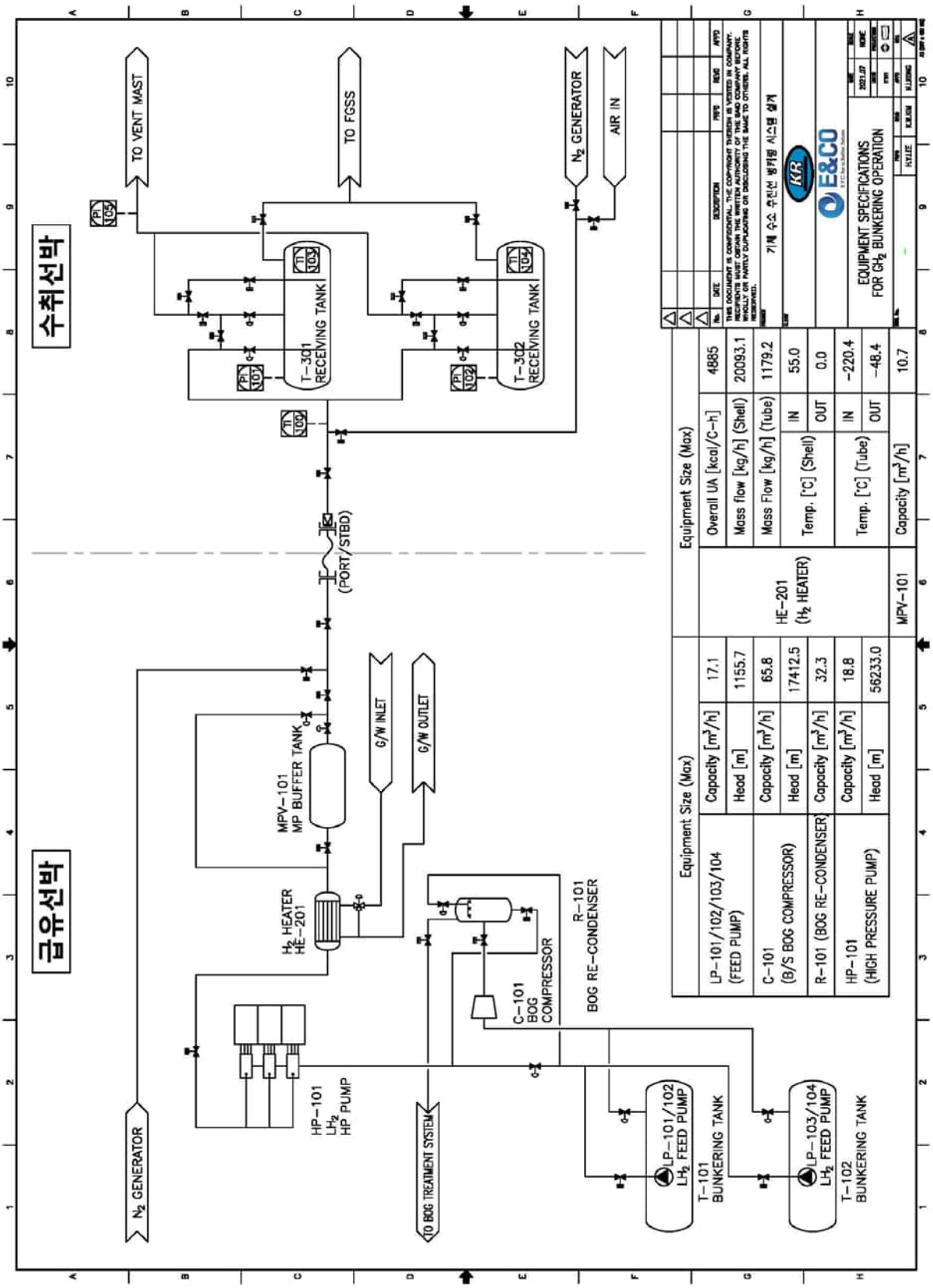
*2-1) HAZOP Worksheet 1-7
*2-2) HAZOP Worksheet 1-8
*2-3) HAZOP Worksheet 1-9
*2-4) HAZOP Worksheet 1-10

2.2 GH_2 Bunkering System Block Diagram

- LH_2 Tank of B/V: 급유선박 내 Liquid Hydrogen 를 저장하는 Tank
- Cargo Handling System (B/V): Cargo Handling 에 필요한 장비를 포함하는 설비
- Bunkering System of B/V (GH_2): 급유선박 쪽에 설치된 Bunkering 설비
- Bunkering System of F/S (GH_2): 수취선박 쪽에 설치된 Bunkering 설비
- H_2 Tank of F/S: 수취선박에 Hydrogen 을 저장하고 있는 Tank


To FGS
To Vent Mast
Metal Hydride of F/S
H_2 Tank of F/S
Bunkering System of F/S (GH_2)
Heat Management System (B/V)
Bunkering System of B/V (GH_2)
Cargo Handling System (B/V)
From Sea
To Sea
From Utility System
To Utility System
To FGS
To Vent Mast
LH_2 Tank of F/S
Bunkering System of F/S (LH_2)
Bunkering System of B/V (LH_2)
LH_2 Tank of B/V
LH_2 IN
GH_2 OUT
COLOR LEGEND
LH2
GH2
G/W
SHIP TO SHIP GH_2 BUNKERING OPERATION SYSTEM BLOCK DIAGRAM
E&CO
KR
LH_2 Tank of B/V
Bunkering vessel 내 Liquid Hydrogen을 저장하고 있는 Tank
Bunkering System of (B/V or F/S)
Bunkering Vessel Side 및 Fueled Ship Side에 설치된 Bunkering 설비
H_2 Tank of F/S
H_2 Fueled Ship에 Hydrogen을 저장하고 있는 Tank
Cargo Handling System
Cargo Handling에 필요한 장비를 포함하는 설비

2.3 Equipment Specifications

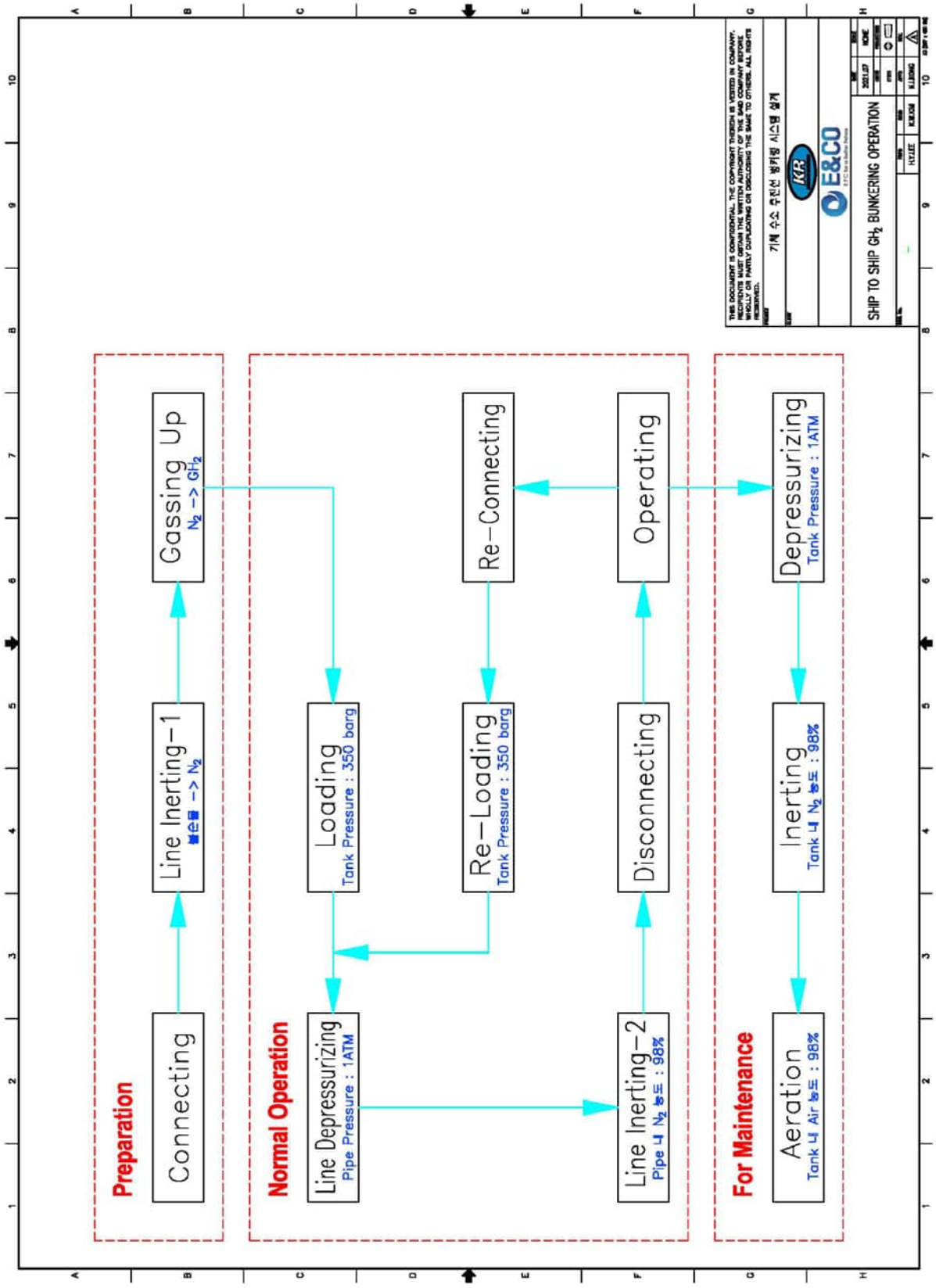


2.4 GH_2 Bunkering Operation 의 절차 및 소요 시간

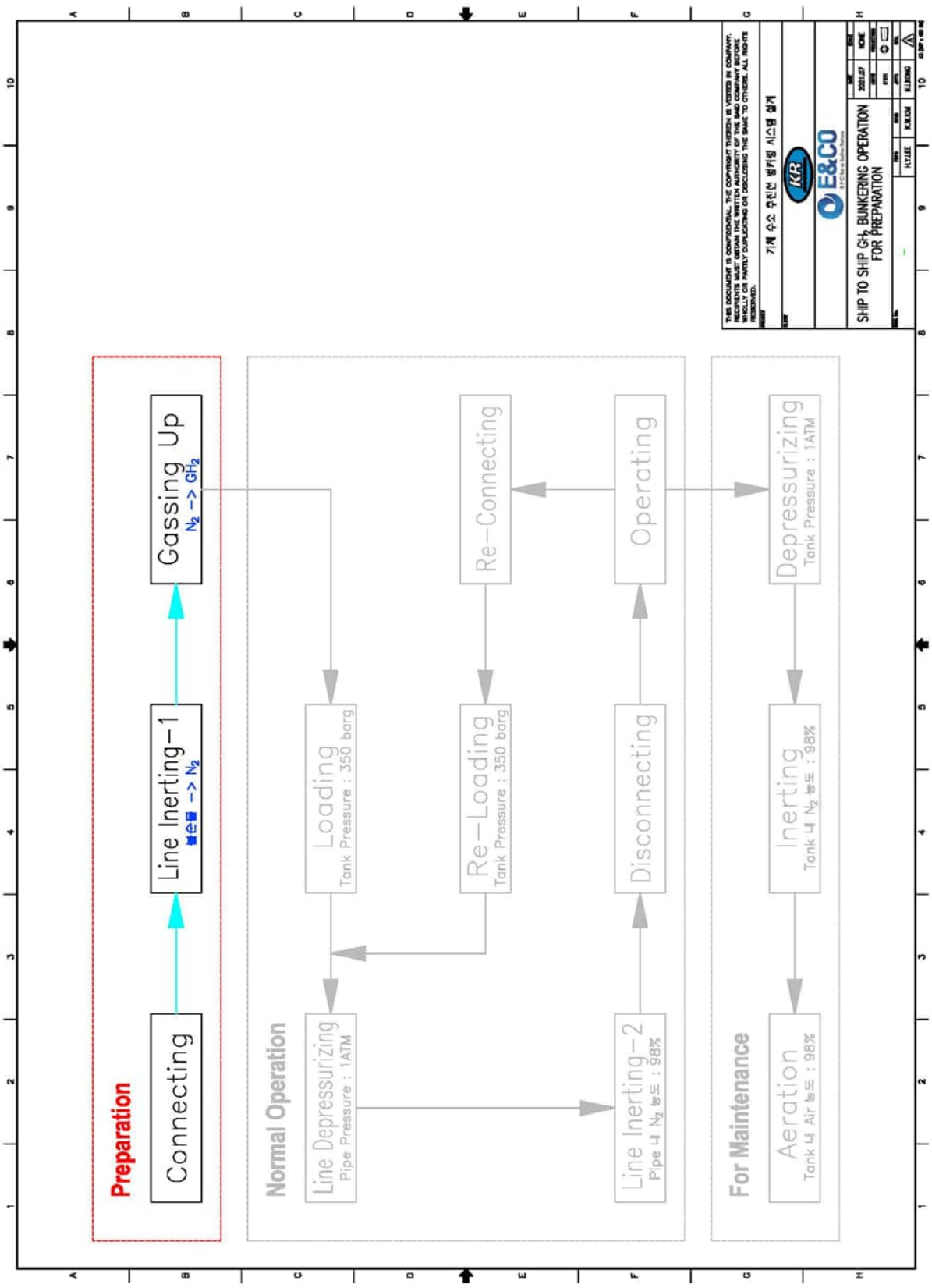
- 각각의 Operation 의 소요 시간은 대체로 다음과 같다.

Title		Purpose	Operating Duration
Preparation	Connecting	GH_2 Loading 을 위해 급유선박과 수취선박 연결	-
	Line Inerting-1	배관 내 불순물 제거	1 시간 이내
	Gassing Up	Tank 내 N_2 를 GH_2 로 치환	1 시간 이내
Normal Operation	Loading (Filling)	Receiving Tank 내 GH_2 충전	6 시간
	Line Depressurizing	배관 내 압력 감압 및 잔여 GH_2 Vent	1 시간 이내
	Line Inerting-2	배관 내 GH_2 를 N_2 로 치환	1 시간 이내
	Disconnecting	급유선박과 수취선박 연결 해제	-
	Operating	GH_2 를 추진 연료로 사용하기 위해 FGS 로 GH_2 공급	-
	Re-Connecting	GH_2 Re-Loading 을 위해 급유선박과 수취선박 재연결	-
	Re-Loading (Filling)	Receiving Tank 내 GH_2 재충전	6 시간
Maintenance	Depressurizing	Receiving Tank 내 압력을 상압으로 만듦	1 시간 이내
	Inerting	Receiving Tank 내 GH_2 를 N_2 로 치환	1 시간 이내
	Aeration	Receiving Tank 내 N_2 를 Dry Air 로 치환	1 시간 이내

- GH_2 Bunkering Operation 의 절차는 다음과 같다



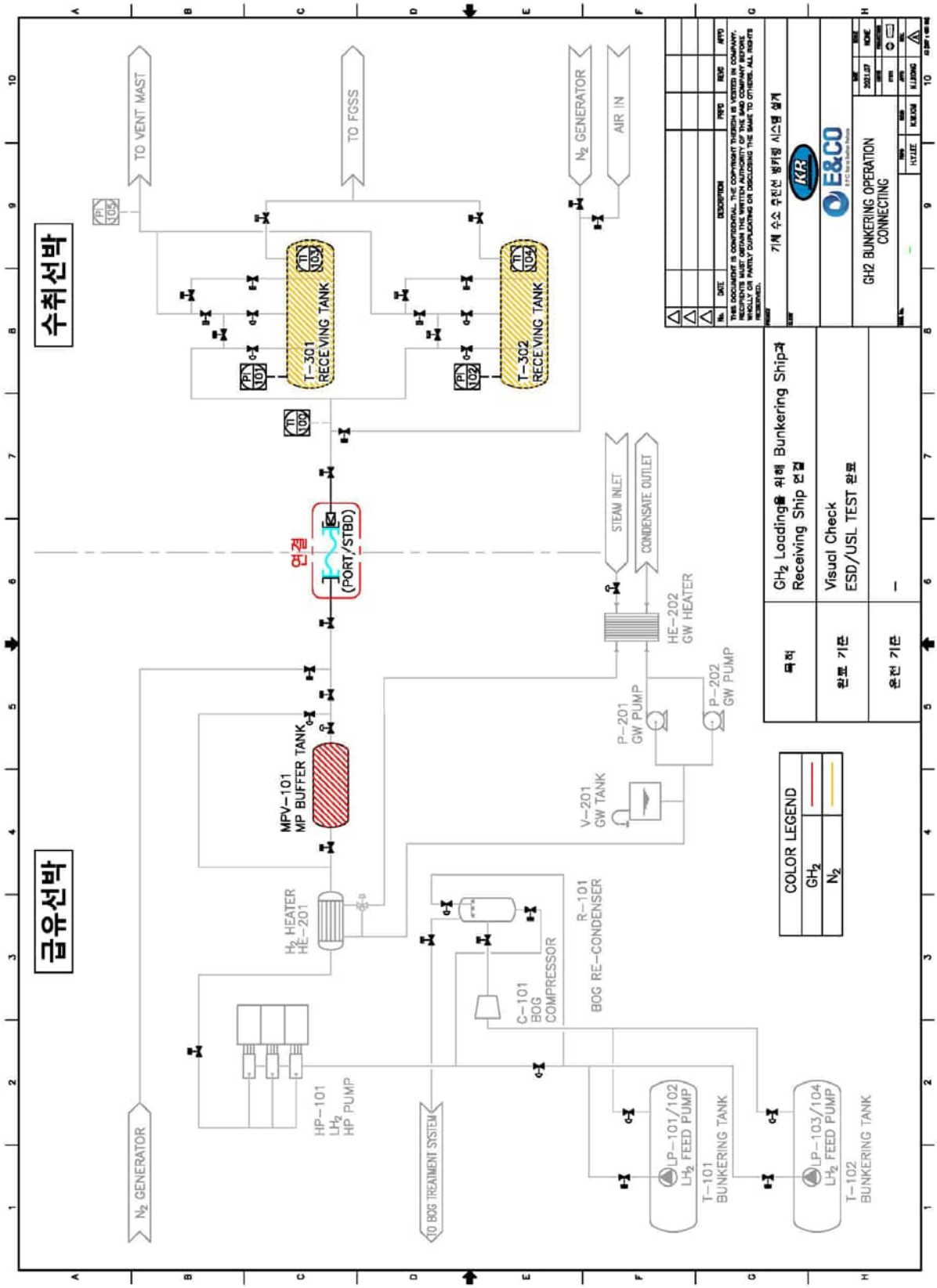
2.5 Preparation



2.5.1 Connecting

1) Bunkering Tank(T-101, T-102)와 Receiving Tank(T-301, T-302)를 연결하기 위한 작업을 시작한다.
2) 모든 이송을 위한 밸브는 닫혀 있는 상태이며, 급유선박과 수취선박의 QC/DC 를 활용하여 Bunkering Hose 를 연결 시킨다. 이는 각 Manifold 에 연결되며 Manifold 를 통하여 Receiving Tank 로 H_2 Gas Hydrogen 을 전달하게 된다.
3) Bunkering Hose 연결 후, ESD / USL TEST 를 하여 이상이 없음을 확인하고 Bunkering Mode 로 전환 한다. *2-5)

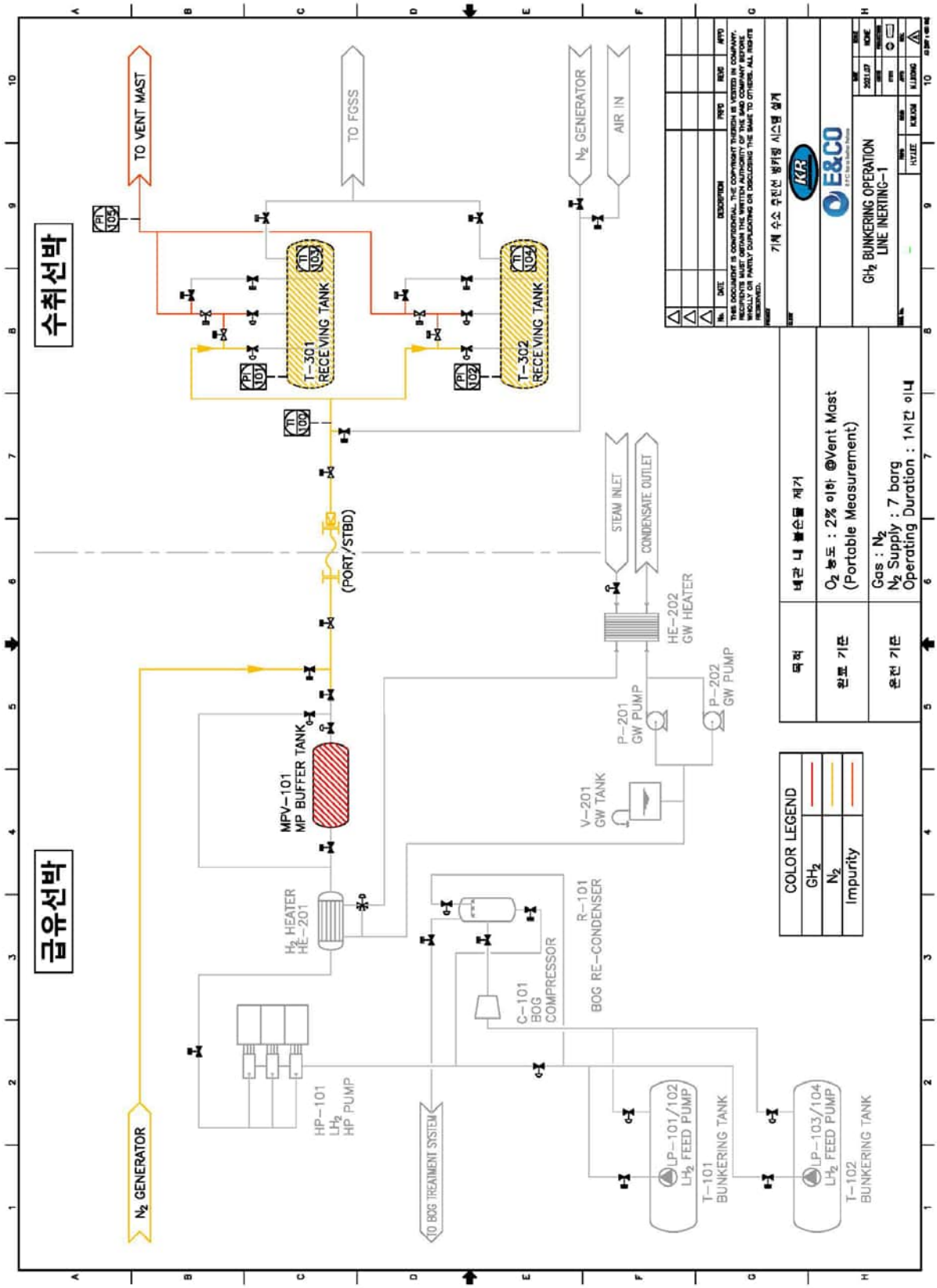
*2-5) HAZOP Worksheet 1-1


수취선박
급유선박
TO VENT MAST
TO FGSS
N2 GENERATOR
AIR IN
T-301 RECEIVING TANK
T-302 RECEIVING TANK
연결
(PORT/STBD)
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
V-201 GW TANK
MPV-101 MP BUFFER TANK
H2 HEATER HE-201
C-101 BOG COMPRESSOR
R-101 BOG RE-CONDENSER
HP-101 LH2 HP PUMP
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
TO BOG TREATMENT SYSTEM
N2 GENERATOR
COLOR LEGEND
GH2
N2
목적
GH2 Loading을 위해 Bunkering Ship과 Receiving Ship 연결
완료 기준
Visual Check
ESD/USL TEST 완료
운전 기준
–
GH2 BUNKERING OPERATION CONNECTING
E&CO

2.5.2 Line Inerting-1

1) Connecting 후, 배관 내에 존재하는 Air 및 불순물을 제거하기 위해 N_2로 치환하는 작업이다. 기존 배관 내에 존재하는 Air 및 불순물은 Vent mast 로 방출된다.
2) 수소와 산소의 혼합 가스는 550℃ 이상으로 가열하거나 발화하면 폭발할 위험이 있으므로 Vent mast 로 방출되는 Air 중 O_2 의 농도가 1% 이하[*2-6)]가 되도록 Generator 를 통해 N_2를 공급해 준다.

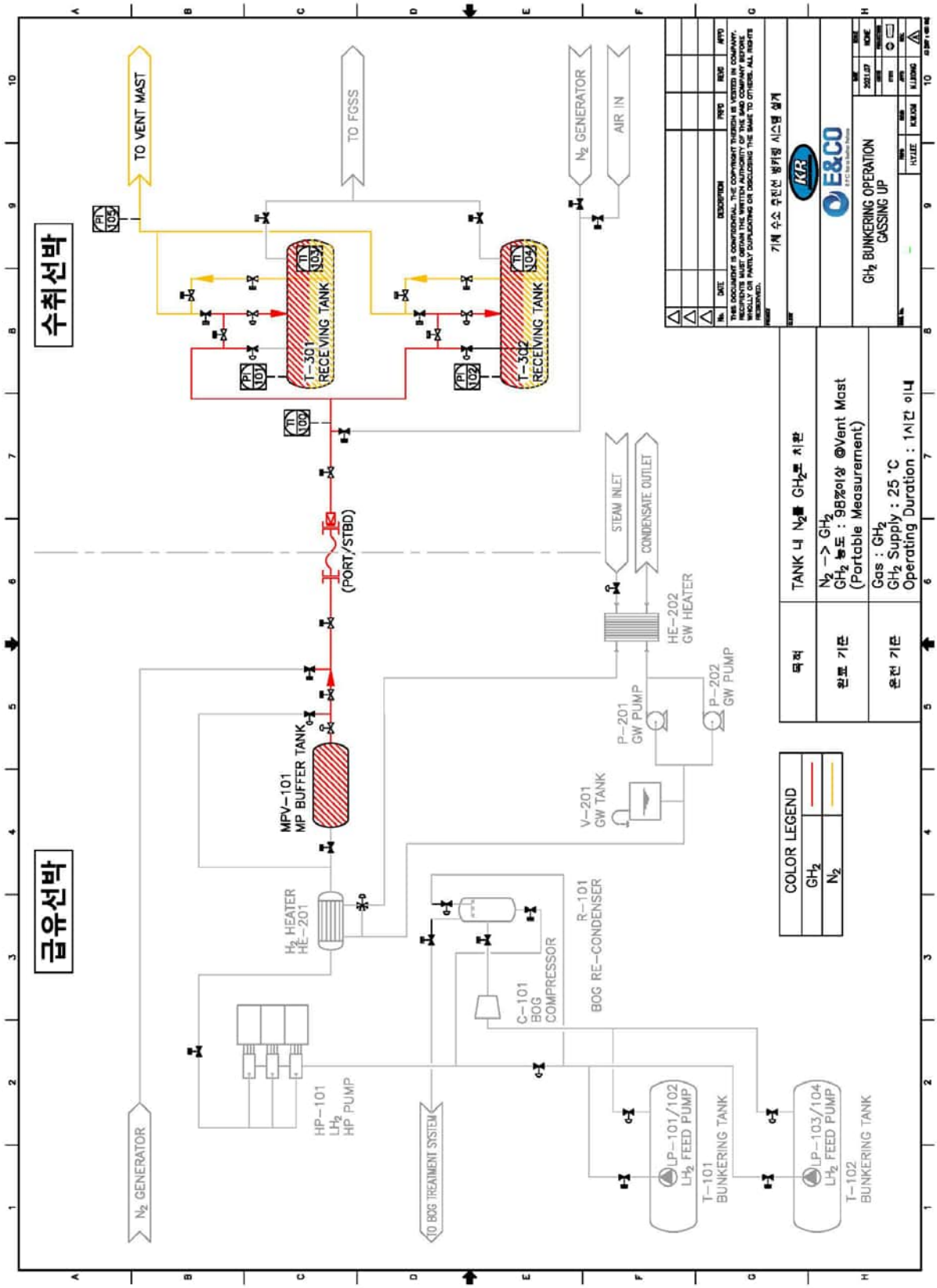
*2-6) HAZOP Worksheet 1-16



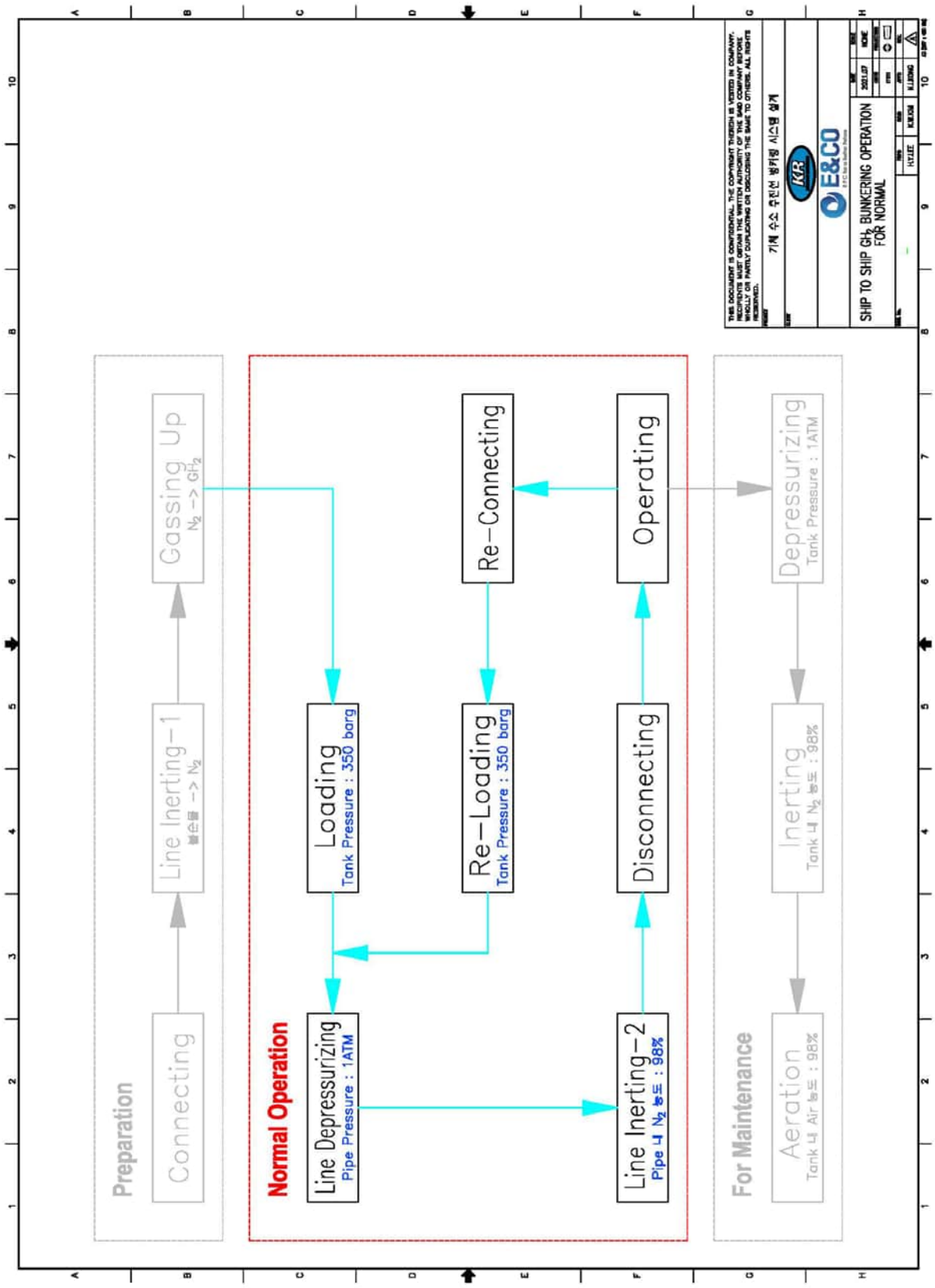
수취선박
급유선박
TO VENT MAST
TO FGSS
N2 GENERATOR
AIR IN
T-301 RECEIVING TANK
T-302 RECEIVING TANK
(PORT/STBD)
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
V-201 GW TANK
MPV-101 MP BUFFER TANK
H2 HEATER HE-201
R-101 BOG RE-CONDENSER
C-101 BOG COMPRESSOR
HP-101 LH2 HP PUMP
TO BOG TREATMENT SYSTEM
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
COLOR LEGEND
GH2
N2
Impurity
목적
완료 기준
운전 기준
내관 내 불순물 제거
O2 농도 : 2% 이하 @Vent Mast (Portable Measurement)
Gas : N2
N2 Supply : 7 barg
Operating Duration : 1시간 이내
기체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계
GH2 BUNKERING OPERATION LINE INERTING-1

2.5.3 Gassing Up

1) 배관 및 Receiving Tank(T-301, T-302) 내에 존재하는 질소 가스를 수소 가스로 치환한다.
2) 급유선박의 Buffer Tank(MPV-101)에서 수소 가스를 공급하여 질소 가스를 Vent mast 로 방출한다.
3) 수소가스가 질소가스 비중 대비 가벼우므로, Receiving Tank 내에서 수소가스는 위쪽으로, 질소 가스는 아래쪽으로 모이게 된다.
4) 질소 가스는 Receiving Tank(T-301, T-302) 내부의 아래쪽에서 올라가는 배관을 통해 Vent mast 로 방출하게 된다.
5) Vent mast 에서 방출되는 가스가 수소 농도 98% 이상이 되면 작업을 완료 한다.


수취선박
급유선박
TO VENT MAST
TO FGSS
N2 GENERATOR
AIR IN
T-301 RECEIVING TANK
T-302 RECEIVING TANK
(PORT/STBD)
MPV-101 MP BUFFER TANK
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
V-201 GW TANK
H2 HEATER HE-201
C-101 BOG COMPRESSOR
R-101 BOG RE-CONDENSER
HP-101 LH2 HP PUMP
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
TO BOG TREATMENT SYSTEM
N2 GENERATOR
COLOR LEGEND
GH2
N2
목적
TANK 내 N2를 GH2로 치환
원료 기준
N2 -> GH2
GH2 농도 : 98%이상 @Vent Mast
(Portable Measurement)
운전 기준
Gas : GH2
GH2 Supply : 25 °C
Operating Duration : 1시간 이내
E&CO
GH2 BUNKERING OPERATION
GASSING UP
기체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계

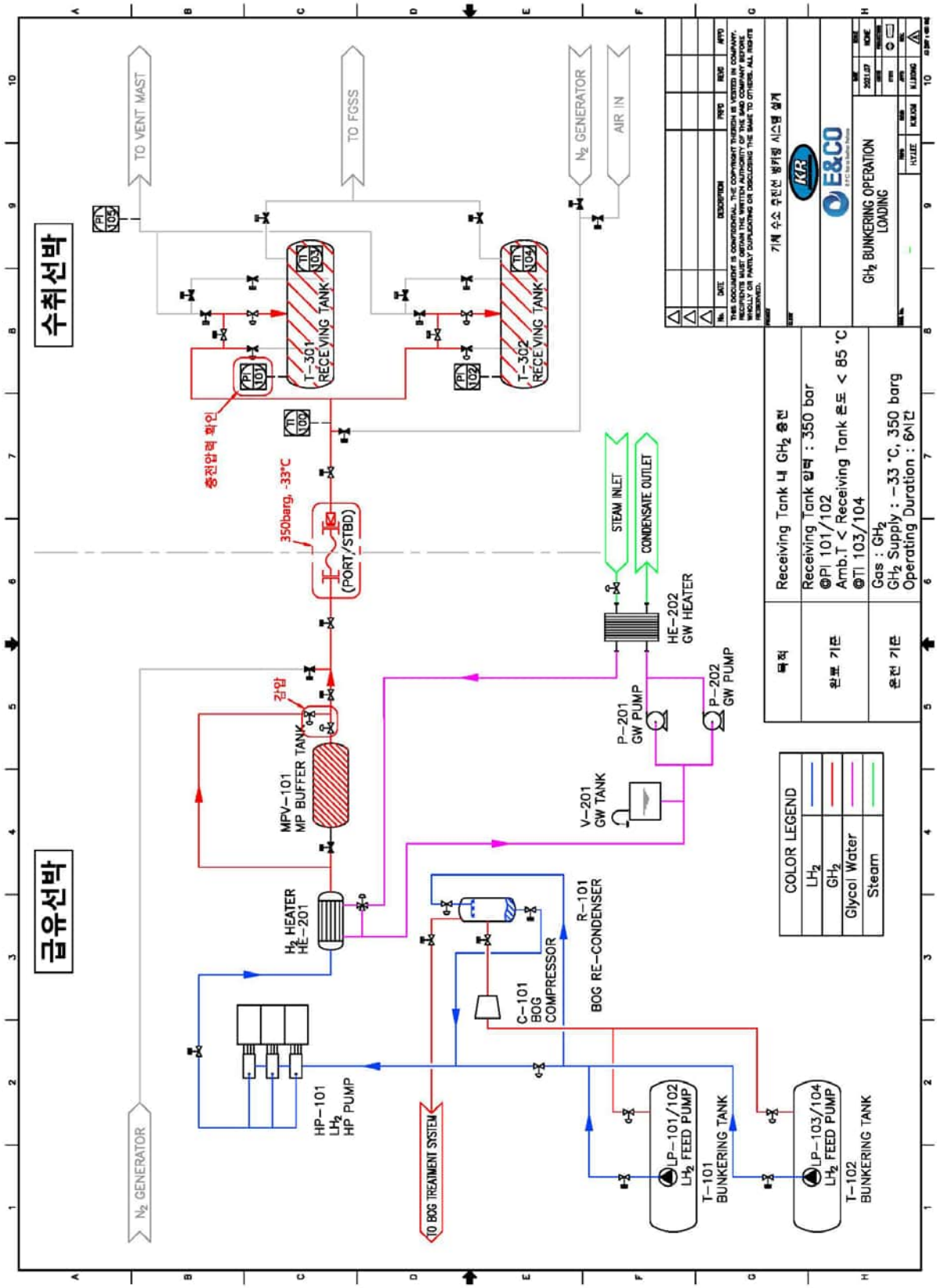
2.6 Normal Operation



2.6.1 Loading (Filling)

1) Loading 작업전에 Bunkering, Receiving Tank 의 압력 및 온도를 확인한다. *2-7)
2) 급유선박에서 공급되는 수소는 High Pressure Pump(HP-101)와 Heater(HE-201)를 사용하여 350barg, -33℃ 의 압력 및 온도조건을 형성 후 수취선박의 Receiving Tank 로 공급된다.
3) 온도는 Buffer Tank (MPV-101)에서 나오는 GH_2 와 Heater(HE-201)에서 나오는 GH_2 를 Mixing 하여 -33℃ 의 온도를 맞춘다.
4) 압력은 Mixing 하기 전 Buffer Tank (MPV-101)에서 나오는 GH_2 와 Heater(H2-201)에서 나오는 GH_2 를 Control Valve 를 통해 350bar 로 감압하여 Mixing 후, Receiving Tank(T-301, T-302)로 Filling 한다.
5) 충전 시간은 6 시간이며, 수취선박의 Receiving Tank 압력이 350bar 에 도달하면 충전은 완료된다. Receiving Tank(T-301, T-302)의 충전 압력은 PI 101, PI 102 를 통해 확인이 가능하다.

*2-7) HAZOP Worksheet 6-5

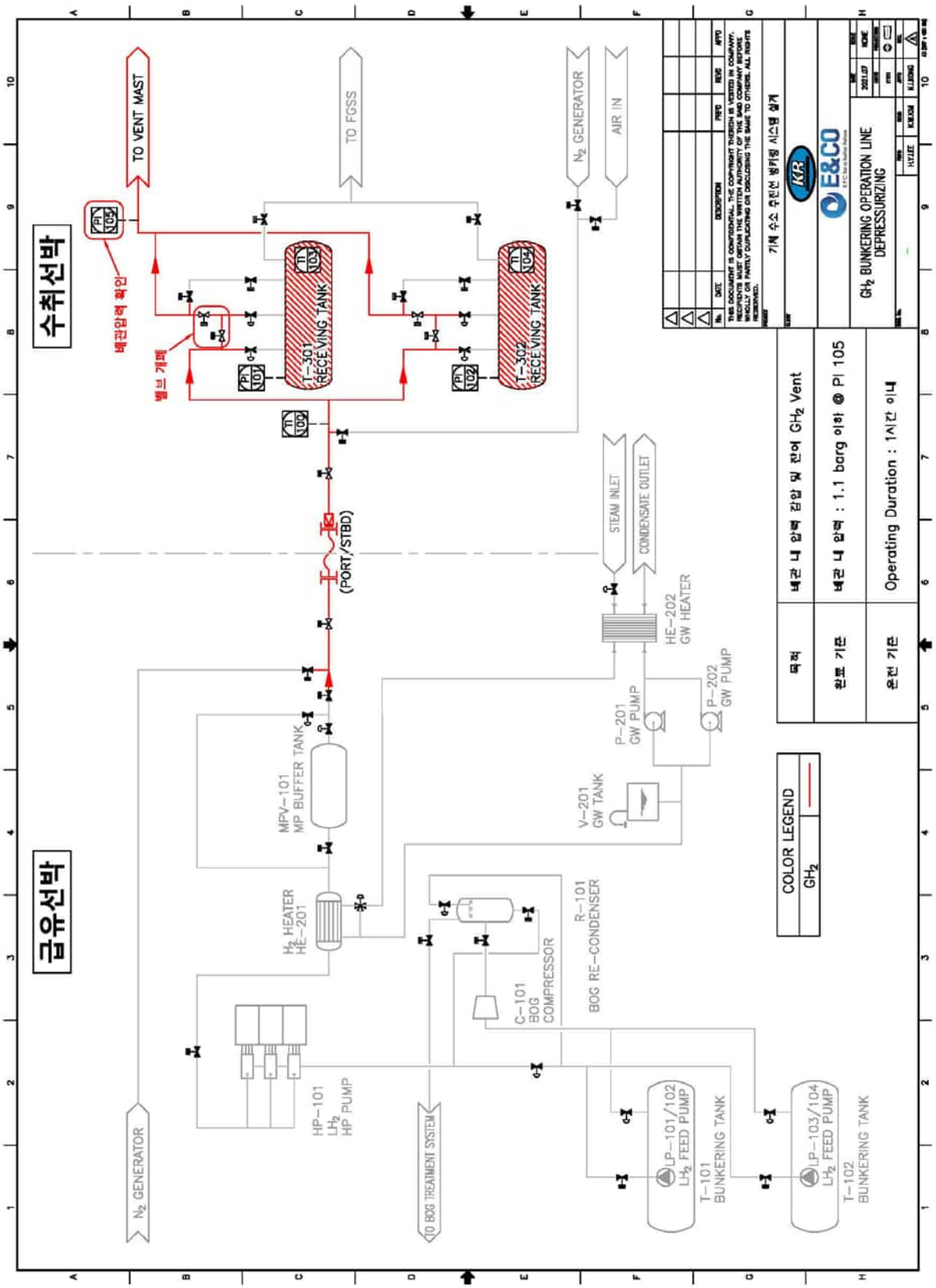

수취선박
급유선박
TO VENT MAST
TO FGSS
N2 GENERATOR
AIR IN
T-301 RECEIVING TANK
T-302 RECEIVING TANK
충진압력 확인
350barg, -33°C
(PORT/STBD)
감압
MPV-101 MP BUFFER TANK
H2 HEATER HE-201
HP-101 LH2 HP PUMP
C-101 BOG COMPRESSOR
R-101 BOG RE-CONDENSER
TO BOG TREATMENT SYSTEM
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
V-201 GW TANK
COLOR LEGEND
LH2
GH2
Glycol Water
Steam
목적 Receiving Tank 내 GH2 충전
완료 기준 Receiving Tank 압력 : 350 bar @PI 101/102 Amb.T < Receiving Tank 온도 < 85 °C @TI 103/104
운전 기준 Gas : GH2 GH2 Supply : -33 °C, 350 barg Operating Duration : 6시간
E&CO
GH2 BUNKERING OPERATION LOADING

2.6.2 Line Depressurizing

1) 충전 완료 후, Valve 를 개폐해서 배관에 존재하는 수소 가스를 감압 및 Vent mast 로 방출한다.
2) Vent Mast 는 정전기로 인해 스스로 발화되는 경우를 방지하기 위해 Vent Mast 의 끝 단에 정전기 방지링을 설치한다. *2-8)
3) 배관 내 압력이 1.1bar 이하를 완료 기준으로 하며, 배관의 압력은 PI 105 로 확인이 가능하다.

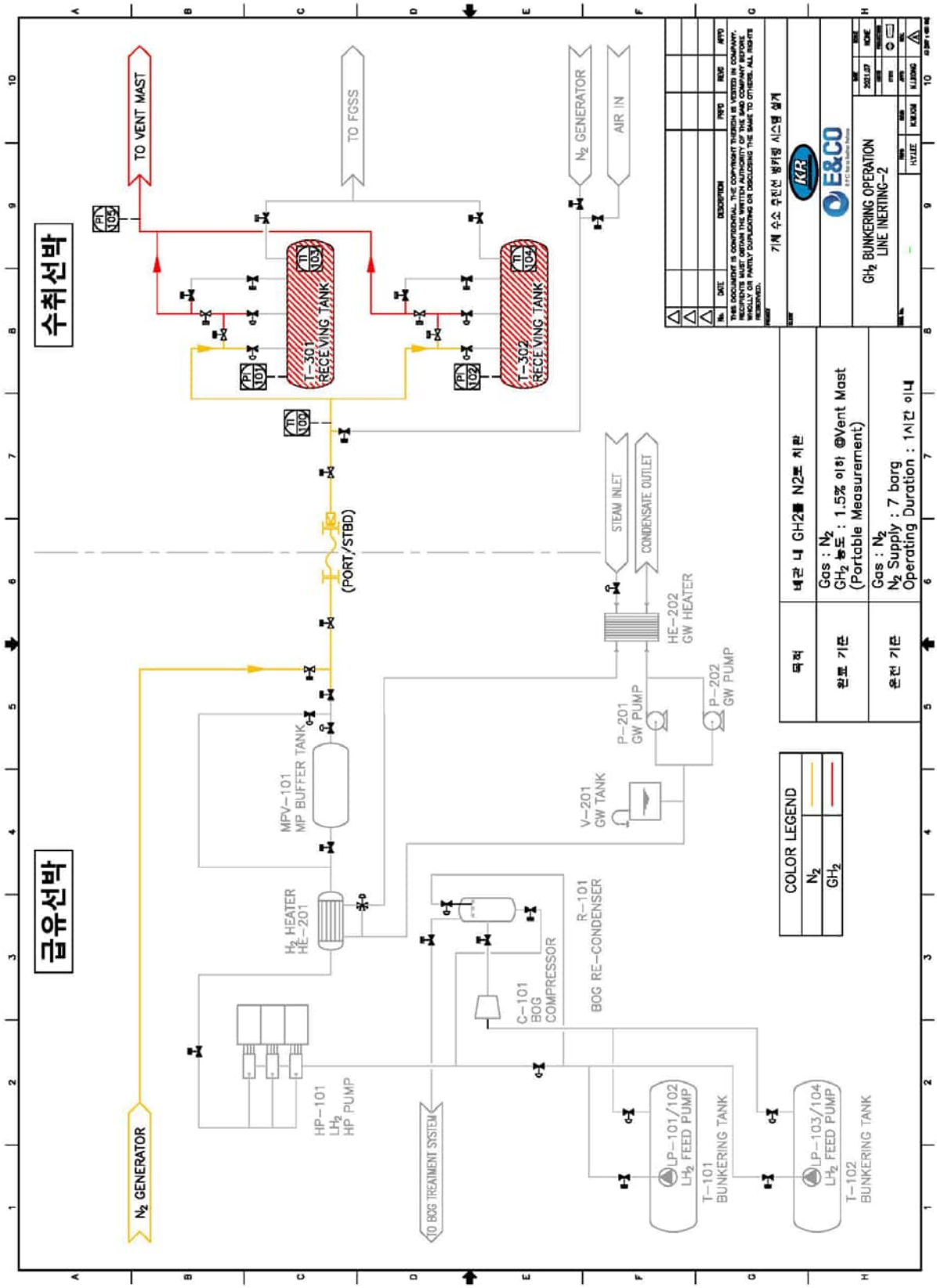
---

*2-8) KOSHA GUIDE D-42-2012 참고


수취선박
급유선박
TO VENT MAST
TO FGSS
N2 GENERATOR
AIR IN
배관압력 확인
밸브 개폐
T-301 RECEIVING TANK
T-302 RECEIVING TANK
(PORT/STBD)
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
V-201 GW TANK
MPV-101 MP BUFFER TANK
H2 HEATER HE-201
R-101 BOG RE-CONDENSER
C-101 BOG COMPRESSOR
HP-101 LH2 HP PUMP
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
TO BOG TREATMENT SYSTEM
N2 GENERATOR
COLOR LEGEND
GH2
목적
배관 내 압력 감압 및 잔여 GH2 Vent
원프 기준
배관 내 압력 : 1.1 barg 이하 @ PI 105
운전 기준
Operating Duration : 1시간 이내
GH2 BUNKERING OPERATION LINE DEPRESSURIZING
기체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계
E&CO
KR

2.6.3 Line Inerting-2

1) 배관 내에 잔여 수소 가스를 질소 가스로 치환하며 Receiving Tank(T-301, T-302)로 질소가 들어가지 않도록, Valve 로 차단한다.
2) 수소는 가연성이 크고 산소와 결합 시 폭발적으로 반응하며 이는 폭발의 위험을 일으킨다. 그렇기 때문에 배관 내 수소를 제거 후 Bunkering Hose 를 제거 해야 한다.
3) Generator 를 통해 질소를 공급하여 수소가스를 Vent mast 로 밀어낸 후, 수소가스 농도가 1.5% 이하가 되면 완료한다.

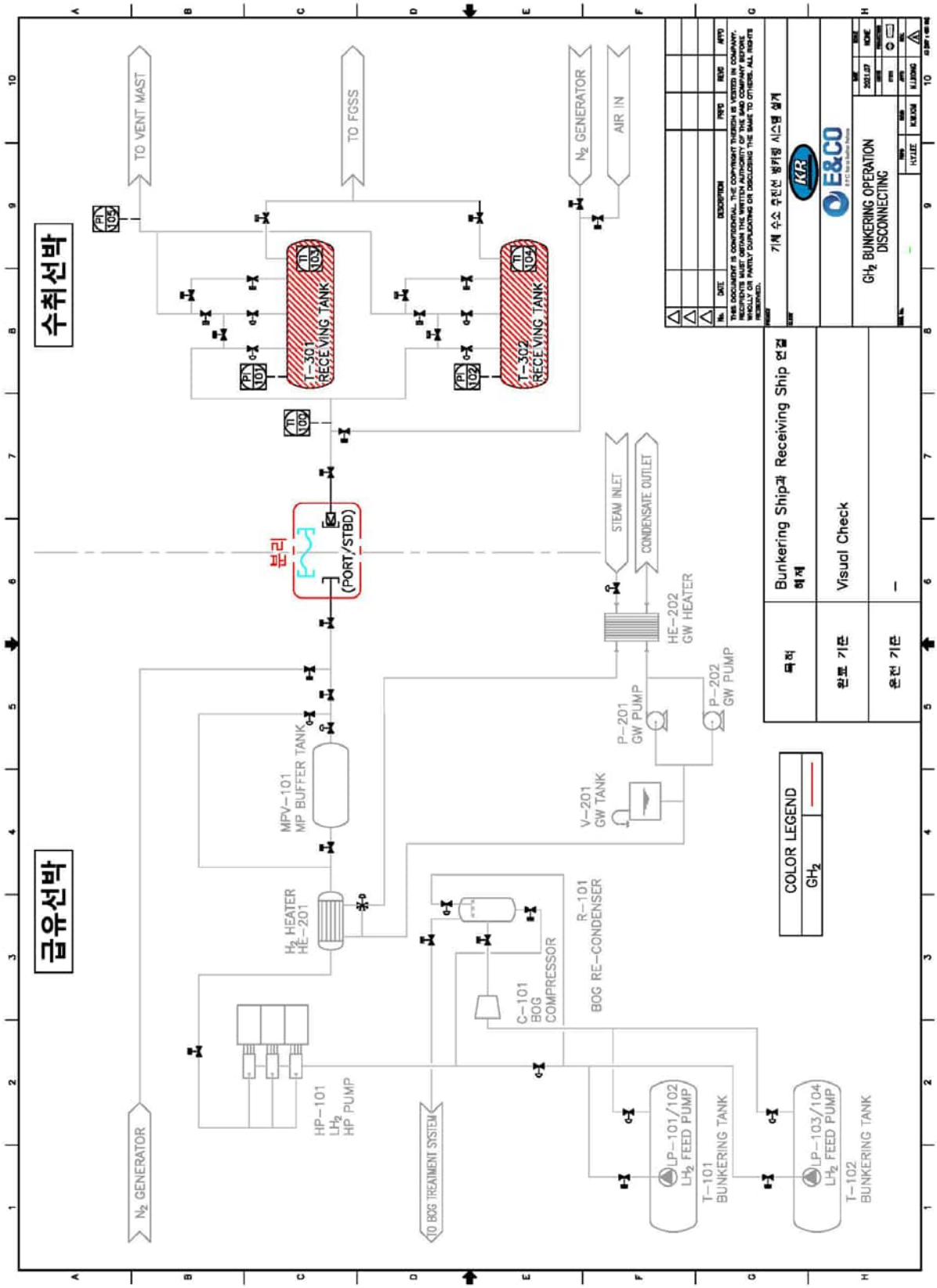


수취선박
급유선박
TO VENT MAST
TO FGSS
N2 GENERATOR
AIR IN
T-301 RECEIVING TANK
T-302 RECEIVING TANK
(PORT/STBD)
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
V-201 GW TANK
MPV-101 MP BUFFER TANK
H2 HEATER HE-201
R-101 BOG RE-CONDENSER
C-101 BOG COMPRESSOR
HP-101 LH2 HP PUMP
TO BOG TREATMENT SYSTEM
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
COLOR LEGEND
N2
GH2
목적
완료 기준
운전 기준
네간 내 GH2를 N2로 치환
Gas : N2
GH2 농도 : 1.5% 이하 @Vent Mast
(Portable Measurement)
Gas : N2
N2 Supply : 7 barg
Operating Duration : 1시간 이내
기체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계
GH2 BUNKERING OPERATION LINE INERTING-2

2.6.4 Disconnecting

1) N_2 Purging Valve 를 통해 불활성 가스를 주입한다. 잔여액이 있는지 Drain Valve 를 통해 확인한다. *2-9)
2) 배관 내 모든 가스가 불활성 가스인 질소 가스로 치환 되어 있는지 Gas Sampling 하여 확인 한다.
3) 수소는 질소보다 가벼우므로 Gas Sampling 은 배관 라인의 Highest Point 에서 수행한다.
4) 불활성 가스는 반응성이 적으므로, 폭발의 위험성이 적고 대기에 누출되어도 이상이 없기 때문에, 배관 내 가스가 질소 가스임을 확인하고 연결 부위를 해제한다.

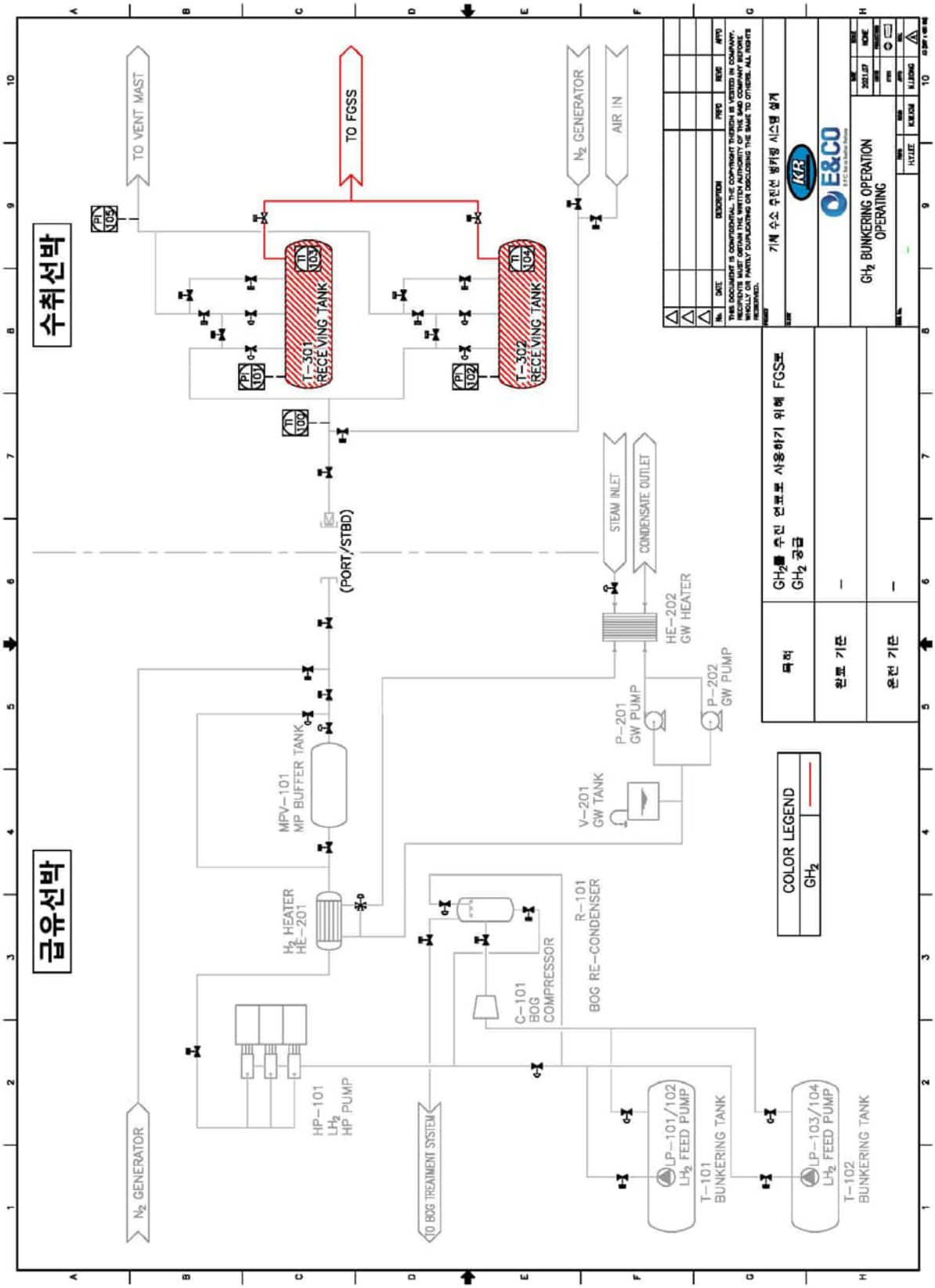
*2-9) HAZOP Worksheet 6-1



수취선박
급유선박
TO VENT MAST
TO FGSS
N2 GENERATOR
AIR IN
T-301 RECEIVING TANK
T-302 RECEIVING TANK
분리
(PORT/STBD)
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
V-201 GW TANK
MPV-101 MP BUFFER TANK
H2 HEATER HE-201
R-101 BOG RE-CONDENSER
C-101 BOG COMPRESSOR
HP-101 LH2 HP PUMP
TO BOG TREATMENT SYSTEM
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
COLOR LEGEND
GH2
Bunkering Ship과 Receiving Ship 연결 해제
Visual Check
GH2 BUNKERING OPERATION DISCONNECTING

2.6.5 Operating

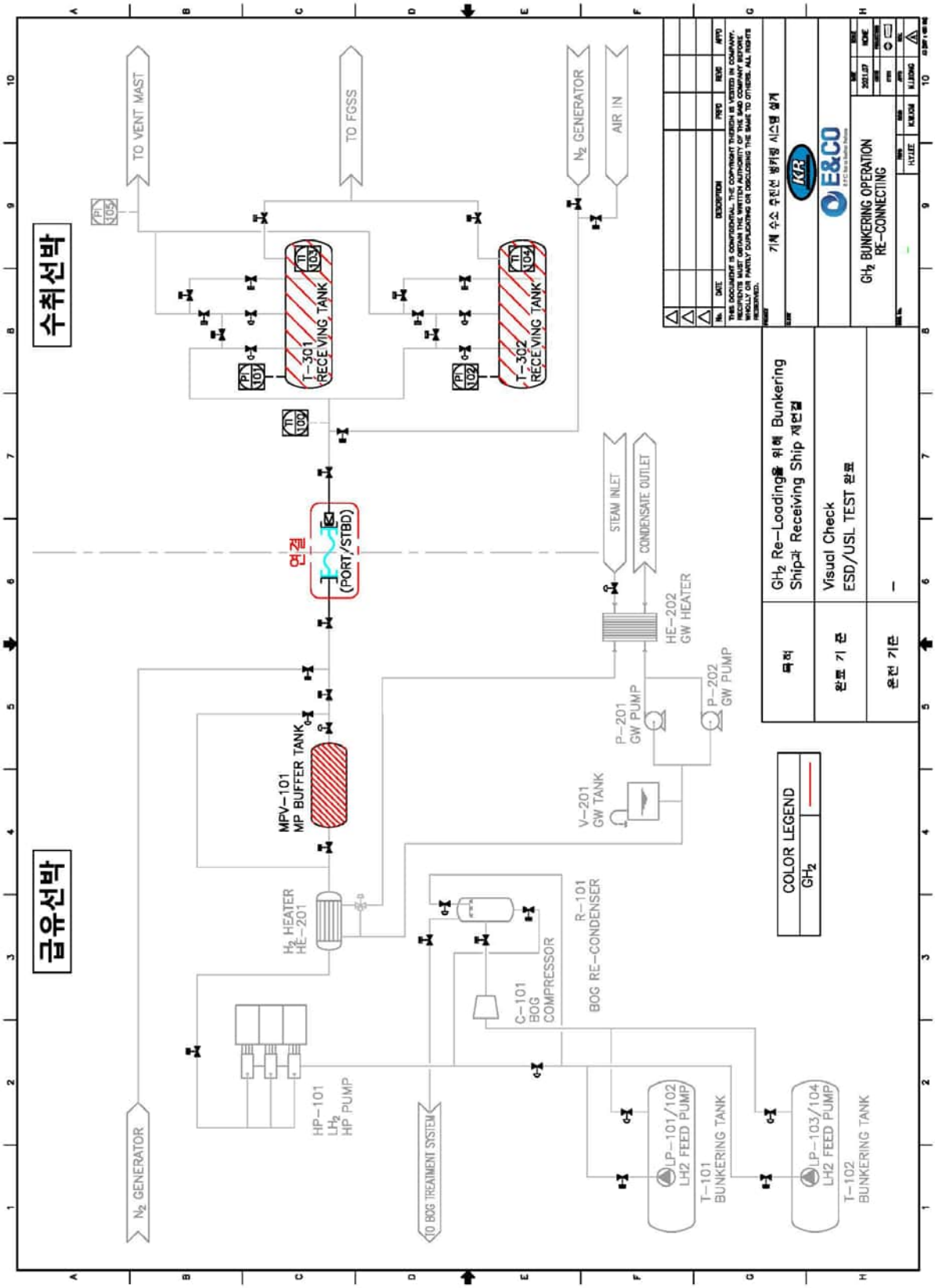
1) Bunkering Tank(T-101, T-102)와 Receiving Tank(T-301, T-302)가 연결 해제 되었으며, Receiving Tank(T-301, T-302)는 정상적으로 GH_2를 추진 연료로 사용하기 위해 FGS 로 GH_2를 공급한다.


수취선박
급유선박
TO VENT MAST
TO FGSS
N2 GENERATOR
AIR IN
T-301 RECEIVING TANK
T-302 RECEIVING TANK
(PORT/STBD)
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
V-201 GW TANK
MPV-101 MP BUFFER TANK
H2 HEATER HE-201
C-101 BOG COMPRESSOR
R-101 BOG RE-CONDENSER
HP-101 LH2 HP PUMP
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
TO BOG TREATMENT SYSTEM
N2 GENERATOR
COLOR LEGEND
GH2
GH2 BUNKERING OPERATION OPERATING
E&CO

2.6.6 Re-Connecting

1) Bunkering Tank(T-101, T-102)와 Receiving Tank(T-301, T-302)를 연결하기 위한 작업을 시작한다.
2) 모든 이송을 위한 밸브는 닫힌 상태이며, 운송선과 추진선의 QC/DC 를 활용하여 Bunkering Hose 를 연결 시킨다.
3) 이는 각 Manifold 에 연결되며 Manifold 를 통하여 Receiving Tank(T-301, T-302)로 H_2 Gas Hydrogen 을 전달하게 된다.
4) Bunkering Hose 연결 후, ESD/USL TEST 를 하여 이상이 없음을 확인하고 Bunkering Mode 로 전환 한다. *2-10)

*2-10) HAZOP Worksheet 1-1

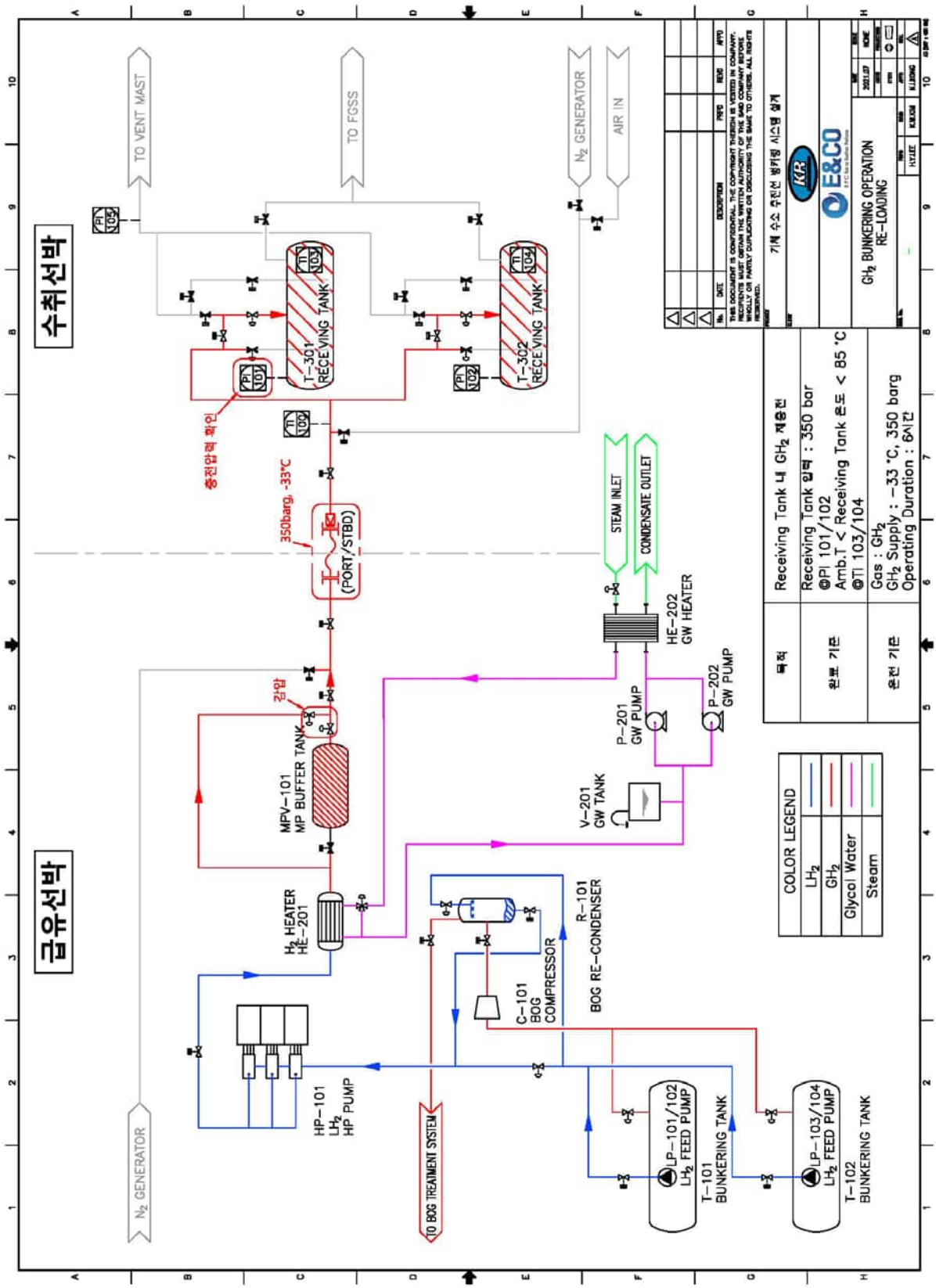

수취선박
급유선박
TO VENT MAST
TO FGSS
N2 GENERATOR
AIR IN
T-301 RECEIVING TANK
T-302 RECEIVING TANK
연결
(PORT/STBD)
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
V-201 GW TANK
MPV-101 MP BUFFER TANK
H2 HEATER HE-201
C-101 BOG COMPRESSOR
R-101 BOG RE-CONDENSER
HP-101 LH2 HP PUMP
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
TO BOG TREATMENT SYSTEM
N2 GENERATOR
COLOR LEGEND
GH2
목적
GH2 Re-Loading을 위해 Bunkering Ship과 Receiving Ship 계연결
완료 기준
Visual Check
ESD/USL TEST 완료
운전 기준
–
GH2 BUNKERING OPERATION
RE-CONNECTING

2.6.7 Re-Loading (Filling)

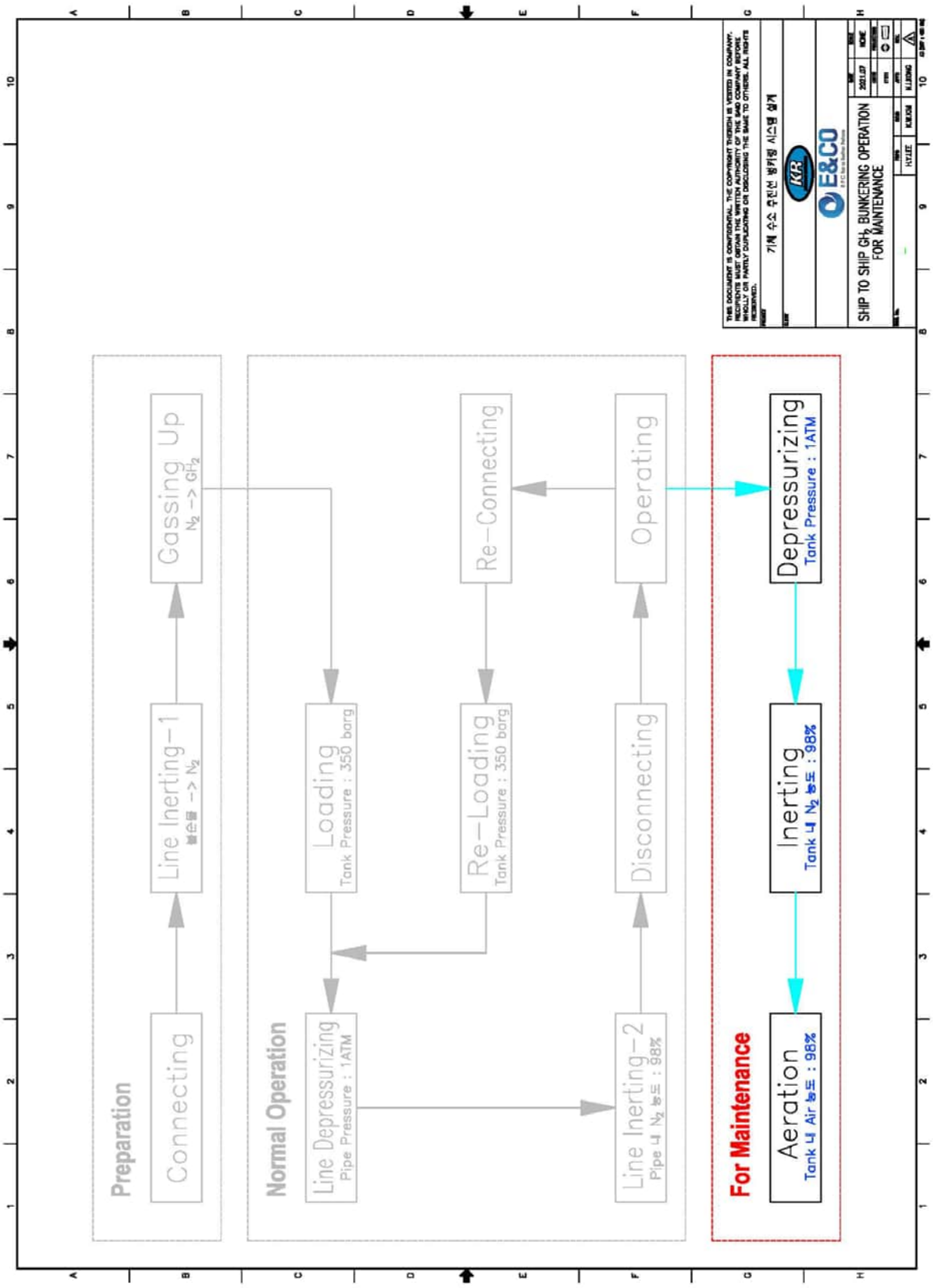
1) Loading 작업 전에 Bunkering, Receiving Tank 의 압력 및 온도를 확인한다. *2-11)
2) Bunkering Tank 에서 공급되는 수소를 High Pressure Pump(HP-101)와 Heater(HE-201)를 사용하여 350barg, -33℃ 의 압력 및 온도조건을 형성 후 수취선박의 Receiving Tank 로 재 공급된다.
3) 온도는 Buffer Tank (MPV-101)에서 나오는 GH_2 와 Heater(HE-201)에서 나오는 GH_2 를 Mixing 하여 -33℃ 의 온도를 맞춘다.
4) 압력은 Mixing 하기 전 Buffer Tank (MPV-101)에서 나오는 GH_2 와 Heater(H2-201)에서 나오는 GH_2 를 Control Valve 를 통해 350bar 로 감압하여 Mixing 후, Receiving Tank(T-301, T-302)로 Filling 한다.
5) 충전 시간은 6 시간이며, 완료 기준은 Receiving Tank(T-301, T-302) 내부 압력이 350bar 이다. Receiving Tank(T-301, T-302)의 내부 압력은 PI 101, PI 102 를 통해 확인이 가능하다.

---

*2-11) HAZOP Worksheet 6-5


수취선박
급유선박
TO VENT MAST
TO FGSS
N2 GENERATOR
AIR IN
T-301 RECEIVING TANK
T-302 RECEIVING TANK
충진압력 확인
350barg, -33°C
(PORT/STBD)
감압
MPV-101 MP BUFFER TANK
H2 HEATER HE-201
HP-101 LH2 HP PUMP
C-101 BOG COMPRESSOR
R-101 BOG RE-CONDENSER
TO BOG TREATMENT SYSTEM
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
V-201 GW TANK
COLOR LEGEND
LH2
GH2
Glycol Water
Steam
목적 Receiving Tank 내 GH2 제충전
완료 기준 Receiving Tank 압력 : 350 bar @PI 101/102 Amb.T < Receiving Tank 온도 < 85 °C @TI 103/104
운전 기준 Gas : GH2 GH2 Supply : -33 °C, 350 barg Operating Duration : 6시간
E&CO
GH2 BUNKERING OPERATION RE-LOADING

2.7 For Maintenance

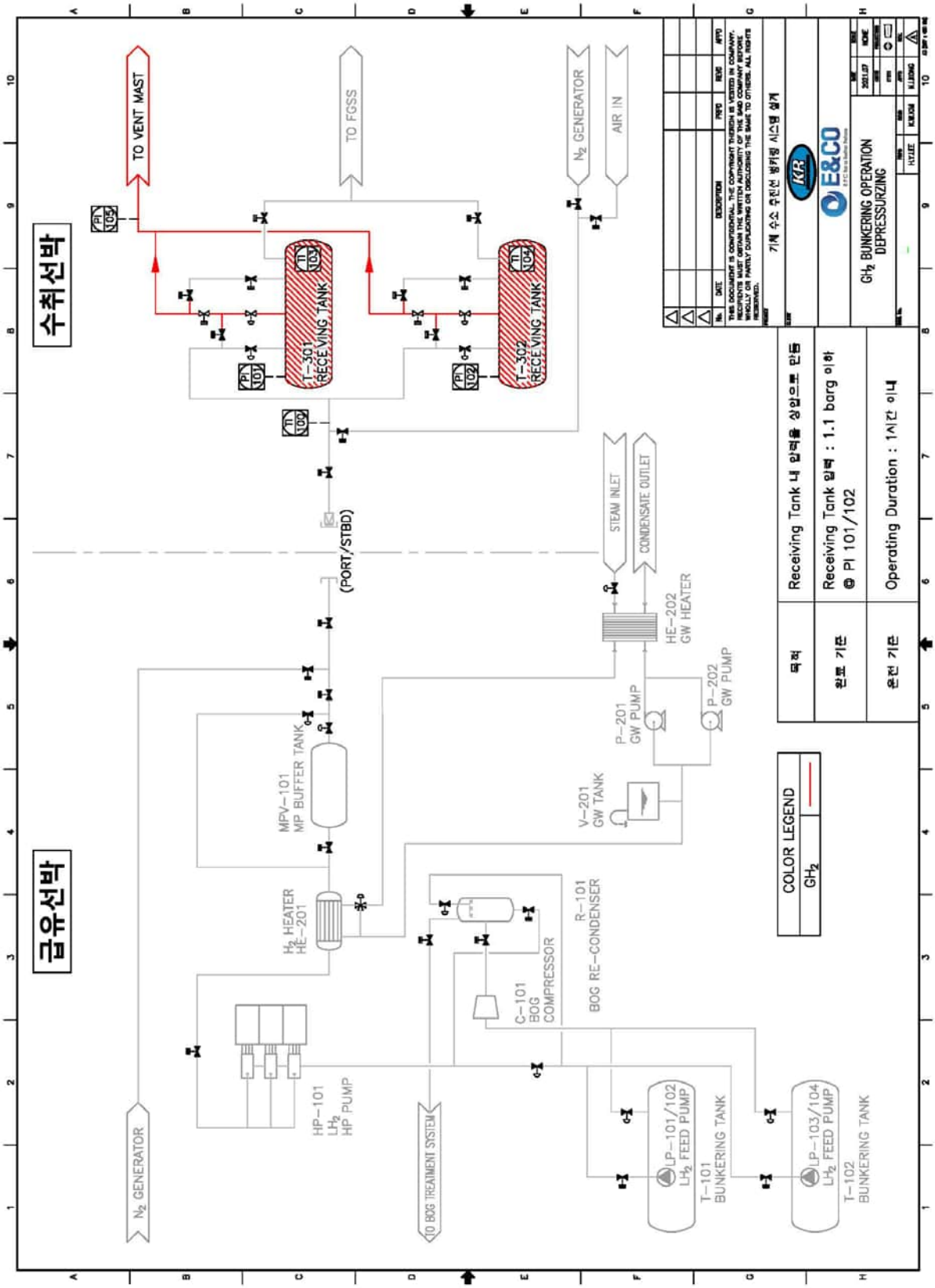


2.7.1 Depressurizing

Maintenance 를 목적으로, Receiving Tank(T-301, T-302)를 최종 Air 로 치환하는 것을 목표로 둔다.

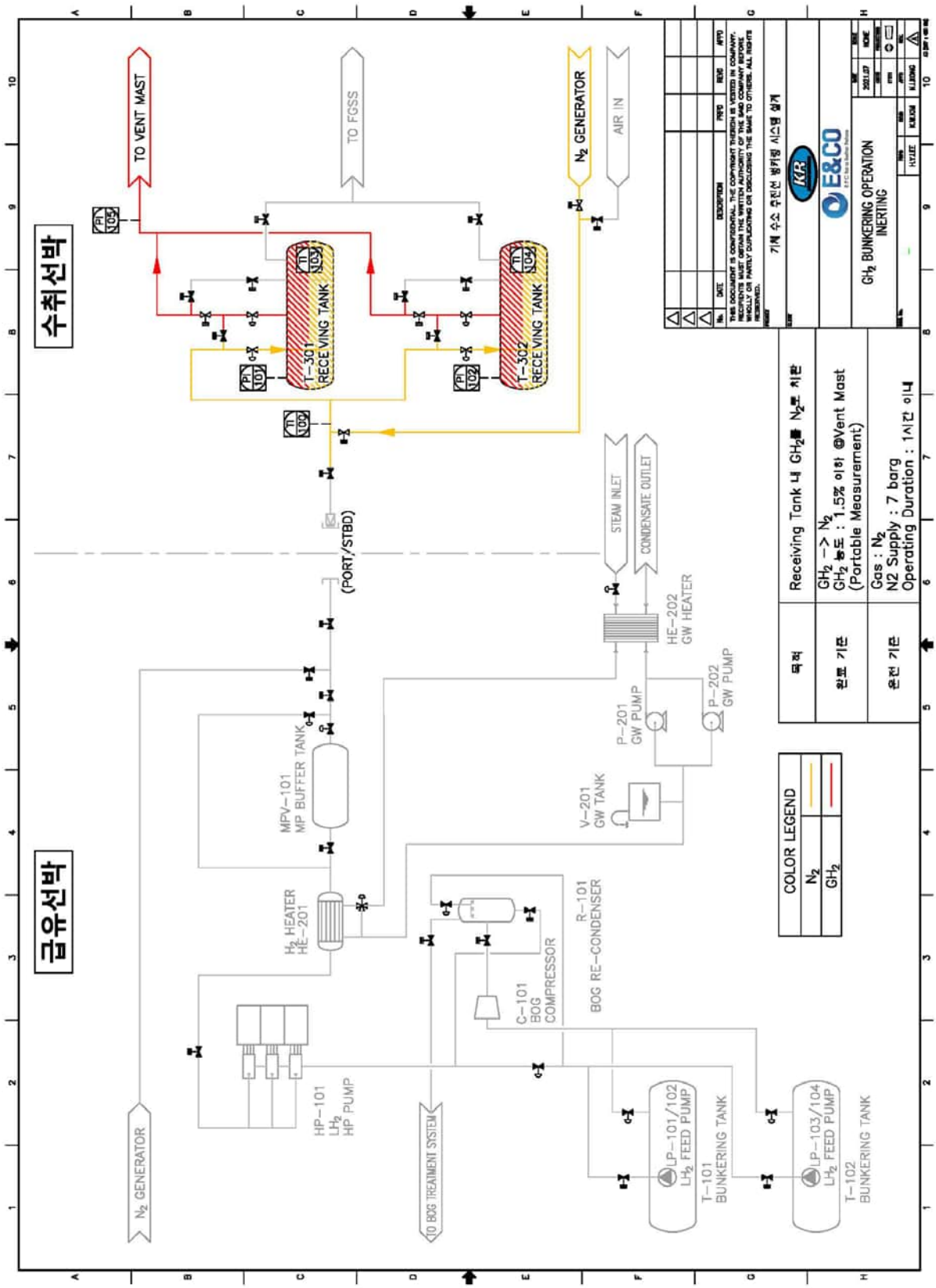
1) 먼저 Receiving Tank(T-301, T-302) 내에 수소 가스를 Vent mast 로 방출하여 Receiving Tank(T-301, T-302) 내 압력을 상압으로 만든다.
2) Vent mast 는 정전기로 인해 스스로 발화되는 경우를 방지하기 위해 Vent mast 의 끝단에 정전기 방지링을 설치한다. *2-12)
3) Receiving Tank(T-301, T-302) 내 압력이 1.1bar 이하를 완료 기준으로 하며, Receiving Tank(T-301, T-302)의 압력은 PI 101, PI 102 로 확인이 가능하다.

*2-12) KOSHA GUIDE D-42-2012 참고


수취선박
급유선박
TO VENT MAST
TO FGSS
N2 GENERATOR
AIR IN
T-301 RECEIVING TANK
T-302 RECEIVING TANK
(PORT/STBD)
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
V-201 GW TANK
MPV-101 MP BUFFER TANK
H2 HEATER HE-201
C-101 BOG COMPRESSOR
R-101 BOG RE-CONDENSER
HP-101 LH2 HP PUMP
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
TO BOG TREATMENT SYSTEM
N2 GENERATOR
COLOR LEGEND
GH2
목적
Receiving Tank 내 압력을 상압으로 만듦
완료 기준
Receiving Tank 압력 : 1.1 barg 이하
@ PI 101/102
운전 기준
Operating Duration : 1시간 이내
E&CO
GH2 BUNKERING OPERATION
DEPRESSURIZING
기체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계

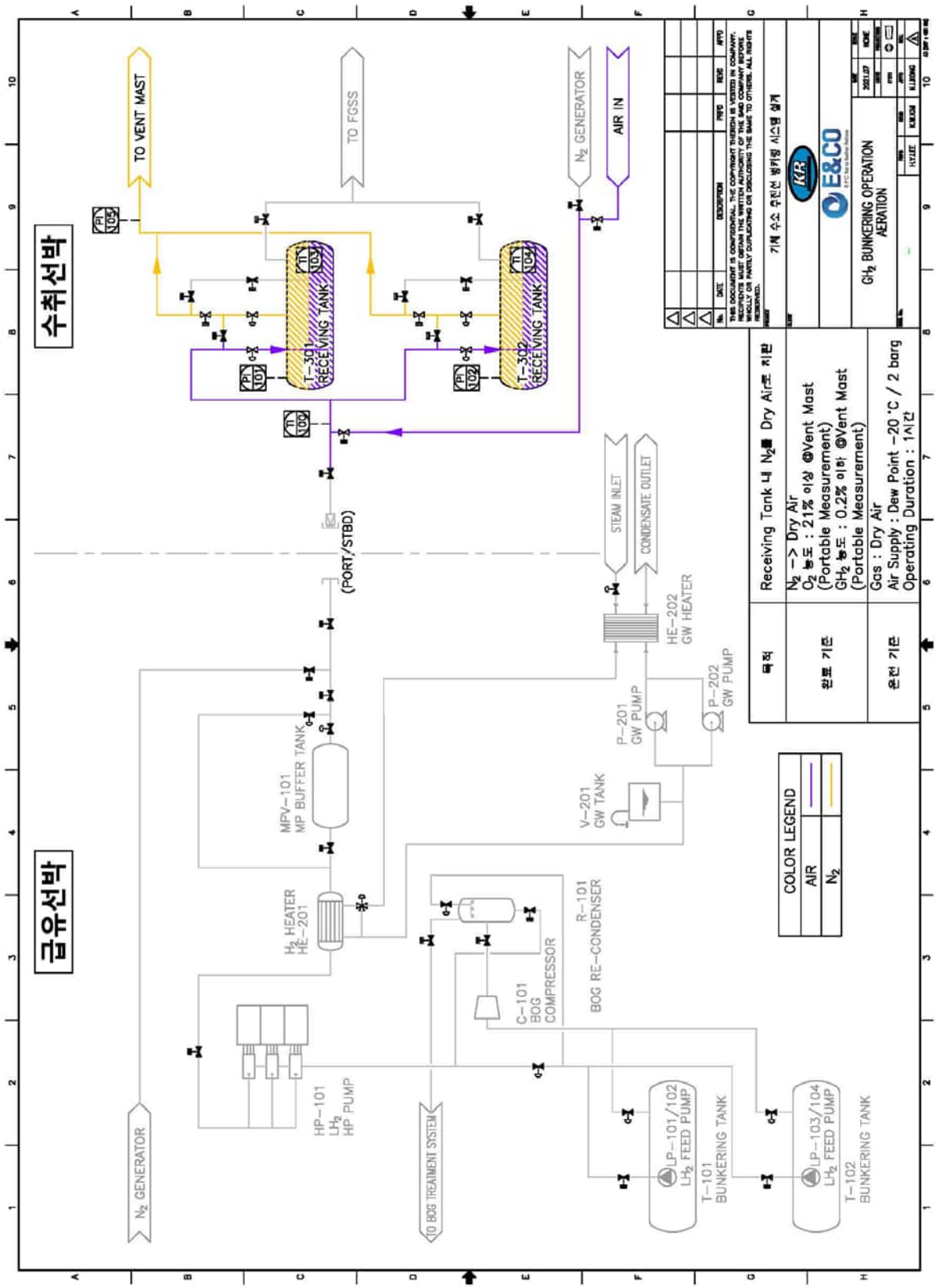
2.7.2 Inerting

1) Receiving Tank(T-301, T-302) 내에 수소 가스를 질소 가스로 치환하는 작업으로, 추진선에 있는 Generator 를 통해 질소를 공급하여 수소가스를 Vent mast 로 밀어 낸다.
2) 질소 가스는 수소 가스에 비해 비중이 크므로, Receiving Tank(T-301, T-302) 내부에 질소 가스가 Tank 바닥부터 채워 질 것이며, 수소 가스는 Tank 상부 배관을 통해 Vent mast 로 방출된다.
3) 잔여 질소 가스가 Loading 시 얼음형성이 되지 않도록 충분히 제거 해야 하며, 수소 가스 농도가 1.5% 이하가 되면 작업을 종료한다.


수취선박
급유선박
TO VENT MAST
TO FGSS
N2 GENERATOR
AIR IN
T-301 RECEIVING TANK
T-302 RECEIVING TANK
(PORT/STBD)
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
V-201 GW TANK
MPV-101 MP BUFFER TANK
H2 HEATER HE-201
C-101 BOG COMPRESSOR
R-101 BOG RE-CONDENSER
HP-101 LH2 HP PUMP
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
TO BOG TREATMENT SYSTEM
N2 GENERATOR
COLOR LEGEND
N2
GH2
목적
Receiving Tank 내 GH2를 N2로 치환
원료 기준
GH2 -> N2
GH2 농도 : 1.5% 이하 @Vent Mast
(Portable Measurement)
운전 기준
Gas : N2
N2 Supply : 7 barg
Operating Duration : 1시간 이내
E&CO
GH2 BUNKERING OPERATION
INERTING

2.7.3 Aeration

1) Receiving Tank(T-301, T-302) 내에 질소 가스를 Air 로 치환하는 작업이며 수취선박에서 Receiving Tank(T-301, T-302)로 Air 를 공급해 준다.
2) Air 는 질소 가스에 비해 비중이 크므로, Receiving Tank(T-301, T-302) 내부에 Air 가 바닥부터 채워 질 것이며, 질소 가스는 Tank 상부 배관을 통해 Vent mast 로 방출된다.
3) 산소 농도가 21% 이상이 되면 작업을 종료한다.


수취선박
급유선박
TO VENT MAST
TO FGSS
N2 GENERATOR
AIR IN
T-301 RECEIVING TANK
T-302 RECEIVING TANK
(PORT/STBD)
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
V-201 GW TANK
MPV-101 MP BUFFER TANK
H2 HEATER HE-201
C-101 BOG COMPRESSOR
R-101 BOG RE-CONDENSER
HP-101 LH2 HP PUMP
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
TO BOG TREATMENT SYSTEM
N2 GENERATOR
COLOR LEGEND
AIR
N2
GH2 BUNKERING OPERATION AEROATION
기체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계
E&CO
목적
Receiving Tank 내 N2를 Dry Air로 치환
완료 기준
N2 -> Dry Air
O2 농도 : 21% 이상 @Vent Mast
(Portable Measurement)
GH2 농도 : 0.2% 이하 @Vent Mast
(Portable Measurement)
운전 기준
Gas : Dry Air
Air Supply : Dew Point -20 'C / 2 barg
Operating Duration : 1시간

3 액체수소(LH_2) 벙커링 시스템 운용절차

3.1 개요

액체수소(LH_2) 추진선박(이하 수취선박)에서 Bunkering 환경은 LNG 추진선박과 유사하게 해상에서 급유를 받을 수 있다고 가정 하였으며, 공정 입장에서 Bunkering 시에 LH_2 Handling 은 Bunkering 선박(이하 급유선박)에서 주관한다.

수취선박의 초기 상태의 Receiving Tank 내부는 질소로 채워져 있으며, 급유선박은 따로 존재한다. 급유선박은 액체수소(LH_2) 운송선박으로, 벙커링 시 발생되는 수소기체는 BOG Re-Condenser 를 통해 재 액화시키거나, BOG Treatment System 으로 주입된다. 급유선박은 Bunkering 할 수 있도록 Gassing Up 이 완료된 상태이다.

본 Operating Manual 은 Liquid Hydrogen 의 Bunkering 을 다루고 있으며, 작업들에 대한 이유, 목적, 운전 및 완료 기준에 대해 설명한다.

Bunkering 작업에 앞서 아래 사항이 선행되어야 한다.

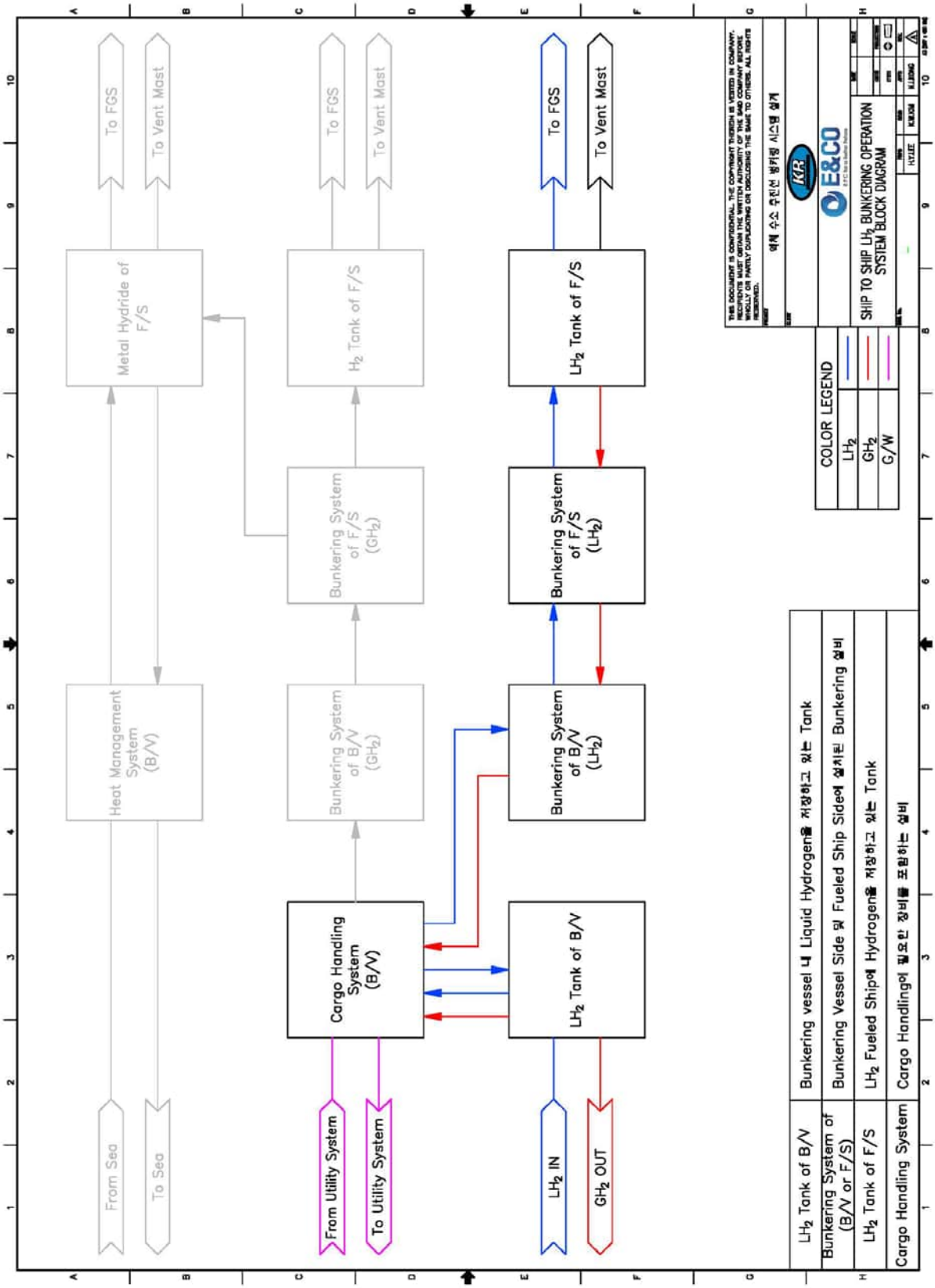
1) 선급에서 요구하는 재료 선정 및 충격시험 등은 수행되어야 한다. *3-1)
2) 다양한 로드 케이스를 조합한 배관응력해석 수행은 검토되어야 한다. (저인화점 연료선박규칙 제7장_제3절_304_5 / 액화산적운반규칙 제7장_제5절_511_5) *3-2)
3) 용접부, 이음부, 밸브 등은 적합한 매체(헬륨, 또는 5% 수소와 95% 질소 혼합물)와 장비를 이용한 밀폐 및 누설 시험이 수행되어야 한다. *3-3)
4) LH_2 밸브는 극저온용 밸브 및 적합한 단열재를 적용해야 한다. *3-4)
5) 로딩 및 벙커링 수행 전, 액체수소의 Ortho비율을 확인해야 한다. *3-5)

---

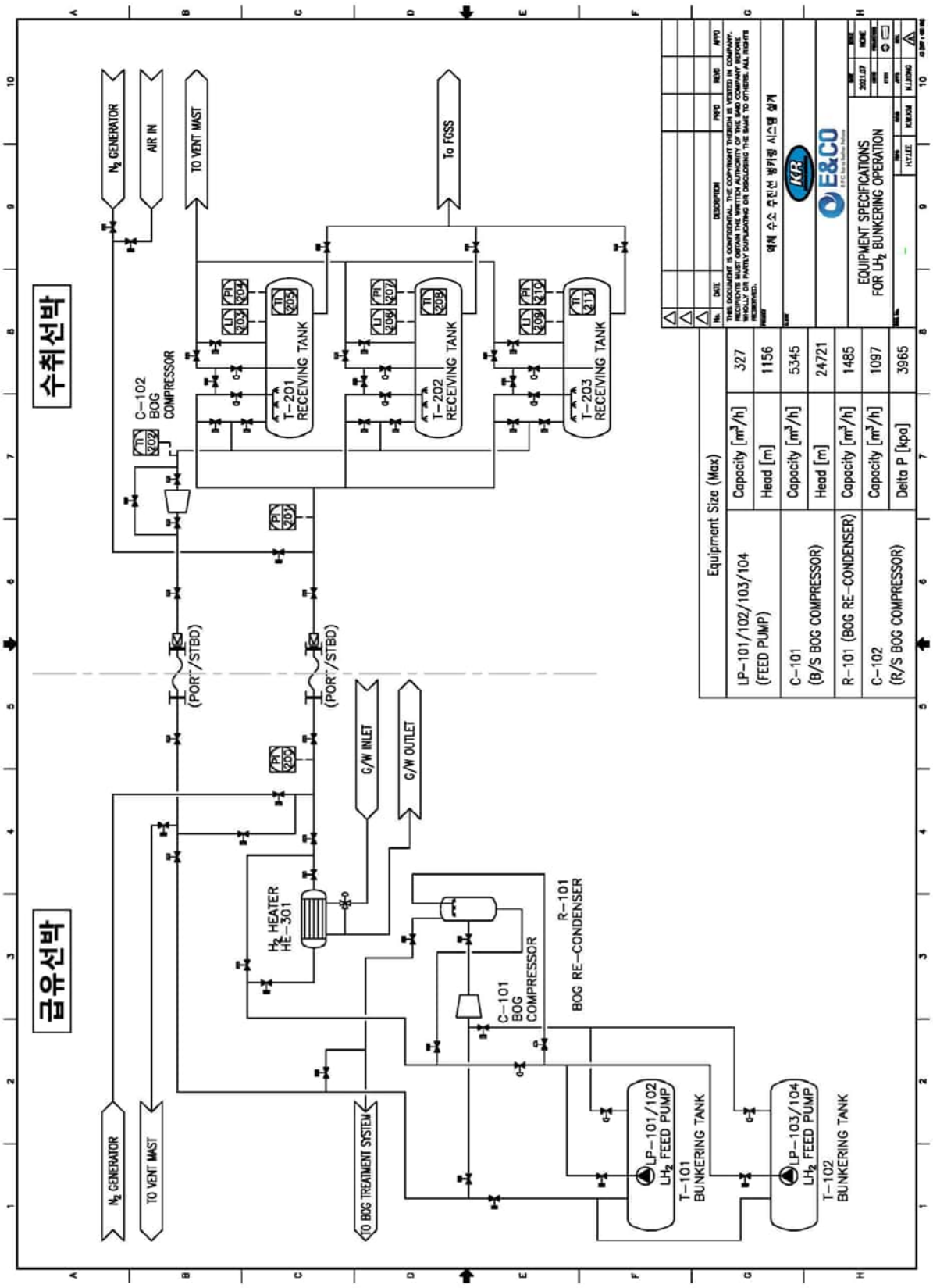
*3-1) HAZOP Worksheet 1-7
*3-2) HAZOP Worksheet 1-8
*3-3) HAZOP Worksheet 1-9
*3-4) HAZOP Worksheet 1-10
*3-5) HAZOP Worksheet 1-12

3.2 LH_2 Bunkering System Block Diagram

- LH_2 Tank of B/V: 급유선박 내 Liquid Hydrogen 를 저장하는 Tank
- Cargo Handling System (B/V): Cargo Handling 에 필요한 장비를 포함하는 설비
- Bunkering System of B/V (LH_2): 급유선박 쪽에 설치된 Bunkering 설비
- Bunkering System of F/S (LH_2): 수취선박 쪽에 설치된 Bunkering 설비
- LH_2 Tank of F/S: 수취선박에 Hydrogen 을 저장하고 있는 Tank


To FGS
To Vent Mast
Metal Hydride of F/S
Heat Management System (B/V)
From Sea
To Sea
To FGS
To Vent Mast
H_2 Tank of F/S
Bunkering System of F/S (GH_2)
Bunkering System of B/V (GH_2)
To FGS
To Vent Mast
LH_2 Tank of F/S
Bunkering System of F/S (LH_2)
Bunkering System of B/V (LH_2)
Cargo Handling System (B/V)
From Utility System
To Utility System
LH_2 Tank of B/V
LH_2 IN
GH_2 OUT
COLOR LEGEND
LH_2
GH_2
G/W
SHIP TO SHIP LH_2 BUNKERING OPERATION SYSTEM BLOCK DIAGRAM
E&CO
KR
LH_2 Tank of B/V
Bunkering vessel 내 Liquid Hydrogen을 저장하고 있는 Tank
Bunkering System of (B/V or F/S)
Bunkering Vessel Side 및 Fueled Ship Side에 설치된 Bunkering 설비
LH_2 Tank of F/S
LH_2 Fueled Ship에 Hydrogen을 저장하고 있는 Tank
Cargo Handling System
Cargo Handling에 필요한 장비를 포함하는 설비

3.3 Equipment Specifications

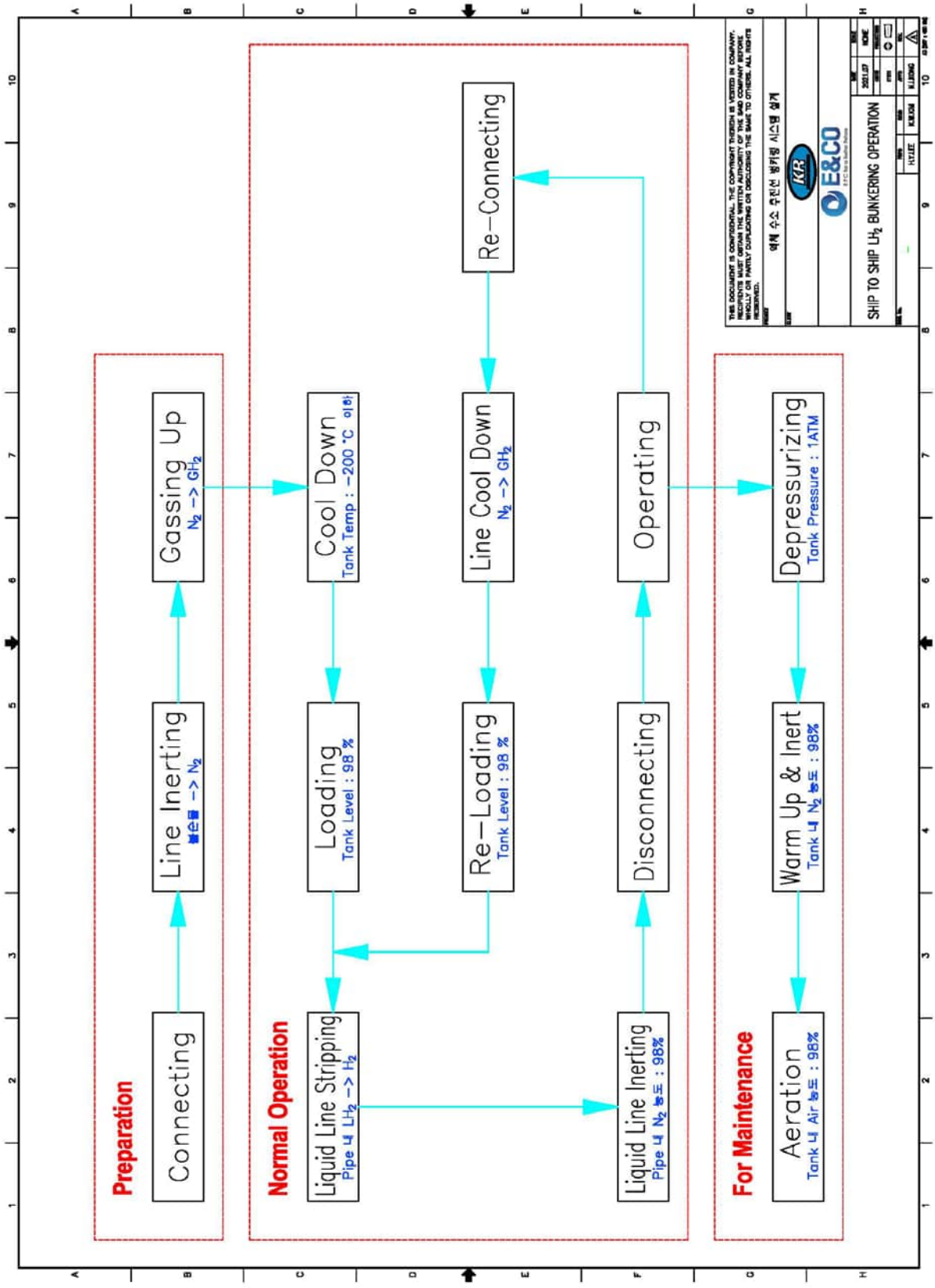


3.4 LH_2 Bunkering Operation 의 절차 및 소요 시간

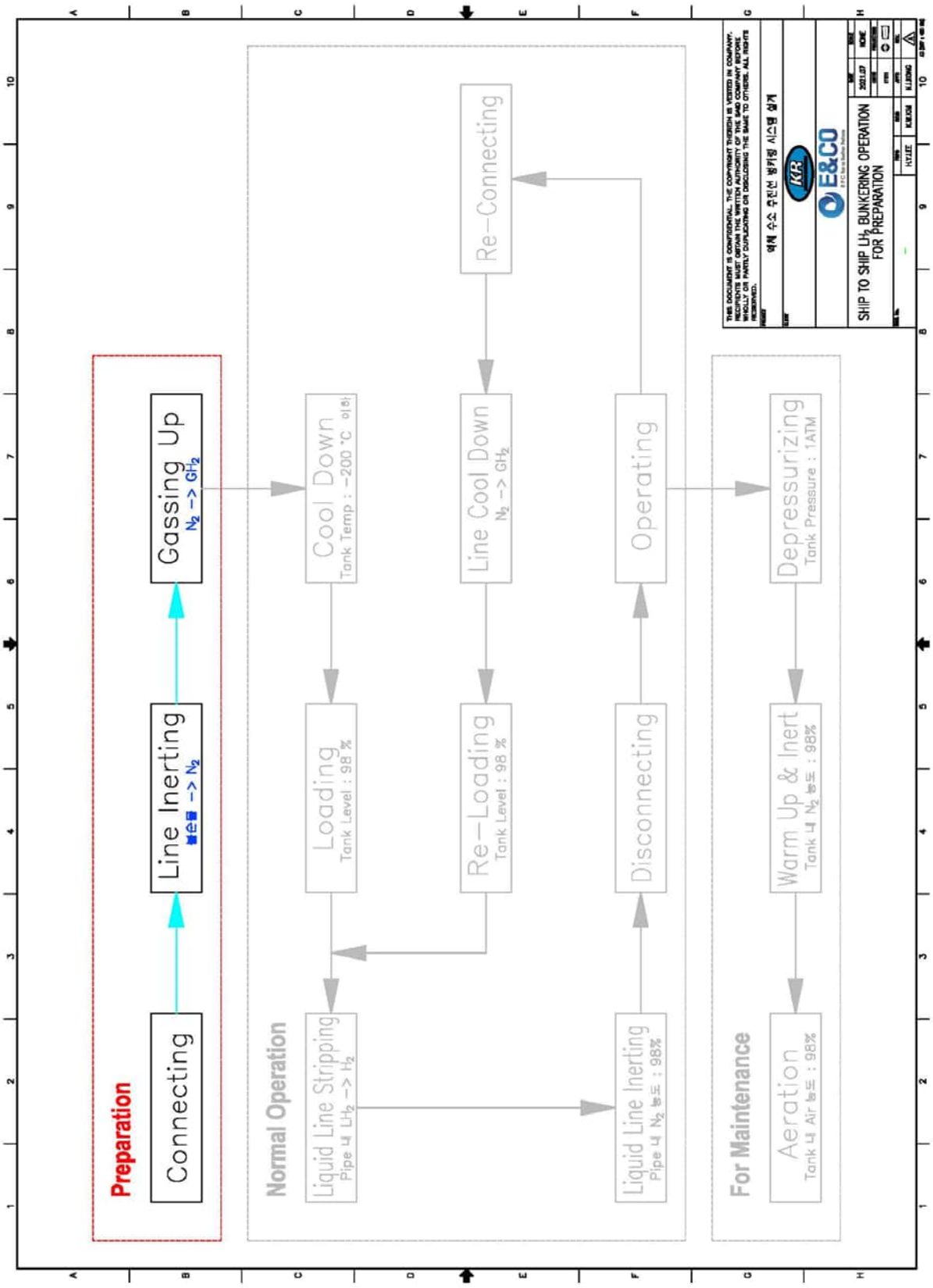
- 각각의 Operation 의 소요 시간은 대체로 다음과 같다.

Title		Purpose	Operating Duration
Preparation	Connecting	LH_2 Loading 을 위해 급유선박과 수취선박 연결	-
	Line Inerting	배관 내 불순물 제거	1 시간 이내
	Gassing Up	Tank 내 N_2 를 GH_2 로 치환	1 시간 이내
Normal Operation	Cool Down	Receiving Tank 및 배관 온도 하강	1 시간 이내
	Loading (Filling)	Receiving Tank 내 LH_2 충전	2 시간
	Liquid Line Stripping	배관 내 잔여 LH_2 를 기화시켜 Tank 에 주입	1 시간 이내
	Liquid Line Inerting	배관 내 GH_2 를 N_2 로 치환	1 시간 이내
	Disconnecting	급유선박과 수취선박 연결 해제	-
	Operating	LH_2 를 추진 연료로 사용하기 위해 FGS 로 LH_2 공급	-
	Re-Connecting	LH_2 Re-Loading 을 위해 급유선박과 수취선박 재연결	-
	Line Cool Down	Re-Loading 을 위한 Pipe 온도 하강	1 시간 이내
	Re-Loading (Filling)	Receiving Tank 내 LH_2 재충전	2 시간
Maintenance	Depressurizing	Receiving Tank 내 압력을 상압으로 만듦	1 시간 이내
	Warm Up & Inerting	Receiving Tank 내 GH_2 를 N_2 로 치환 및 내부 온도 상승	3 시간 이내
	Aeration	Receiving Tank 내 N_2 를 Dry Air 로 치환	1 시간 이내

- GH_2 Bunkering Operation 의 절차는 다음과 같다



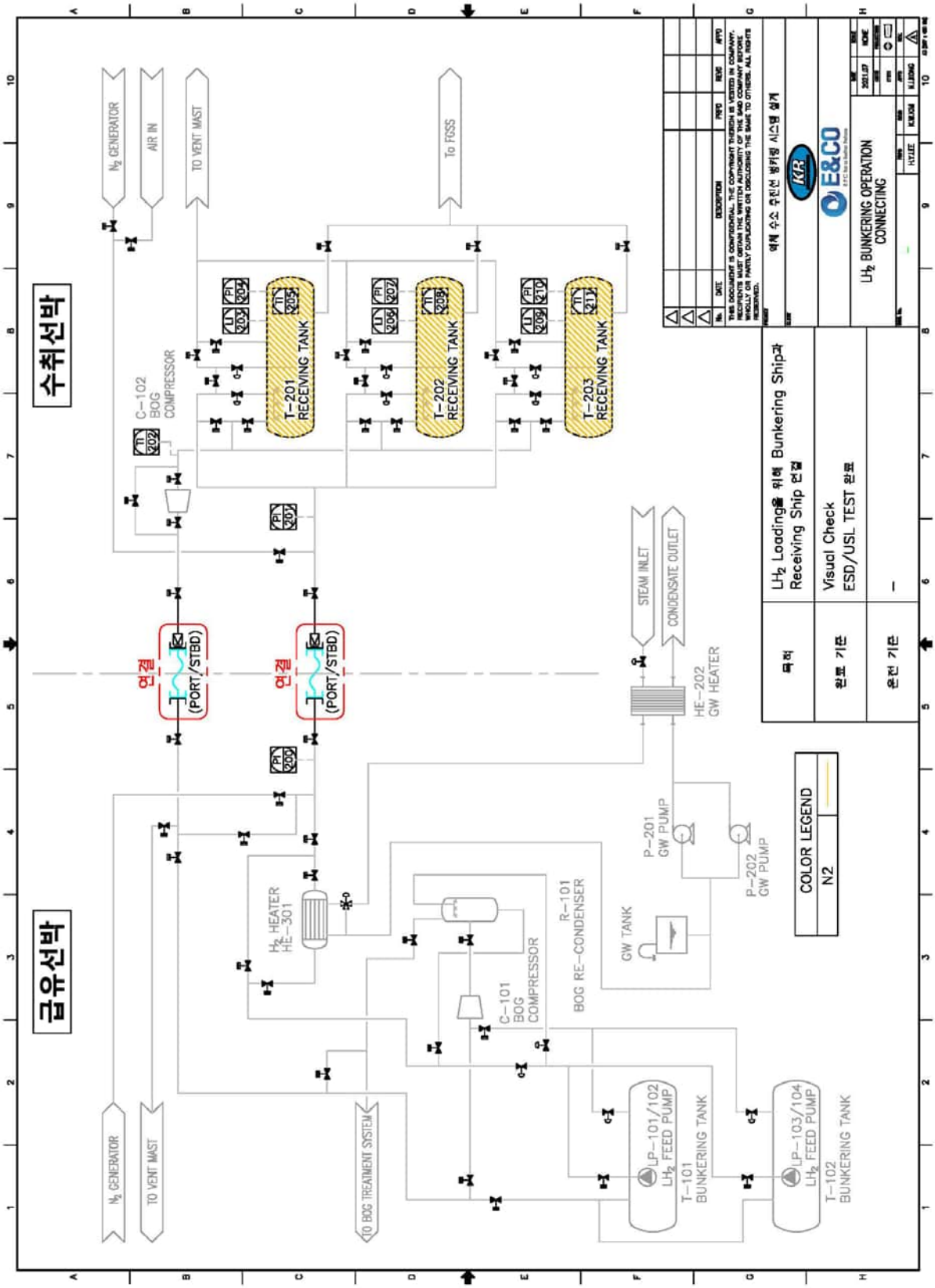
3.5 Preparation



3.5.1 Connecting

1) Bunkering Tank(T-101, T-102)와 Receiving Tank(T-201, T-202, T-203)를 연결하기 위한 작업을 시작한다.
2) 모든 이송을 위한 밸브는 닫힌 상태이며, 운송선과 추진선의 QC/DC 를 활용하여 Liquid Line 과 Gas Line 의 Bunkering Hose 를 연결 시킨다. 이는 각 Manifold 에 연결되며 Manifold 를 통하여 Receiving Tank(T-201, T-202, T-203)로 LH_2 Hydrogen 을 전달하게 된다.
3) Bunkering Hose 연결 후, ESD/USL TEST 를 하여 이상이 없음을 확인하고 Bunkering Mode 로 전환 한다. *3-6)

*3-6) HAZOP Worksheet 1-1


수취선박
급유선박
N2 GENERATOR
AIR IN
TO VENT MAST
To FGSS
C-102 BOG COMPRESSOR
T-201 RECEIVING TANK
T-202 RECEIVING TANK
T-203 RECEIVING TANK
연결 (PORT/STBD)
연결 (PORT/STBD)
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
H2 HEATER HE-301
C-101 BOG COMPRESSOR
R-101 BOG RE-CONDENSER
GW TANK
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
TO BOG TREATMENT SYSTEM
COLOR LEGEND
N2
목적
LH2 Loading을 위해 Bunkering Ship과 Receiving Ship 연결
완료 기준
Visual Check
ESD/USL TEST 완료
운전 기준
–
LH2 BUNKERING OPERATION CONNECTING
액체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계
E&CO
KR

3.5.2 Line Inerting

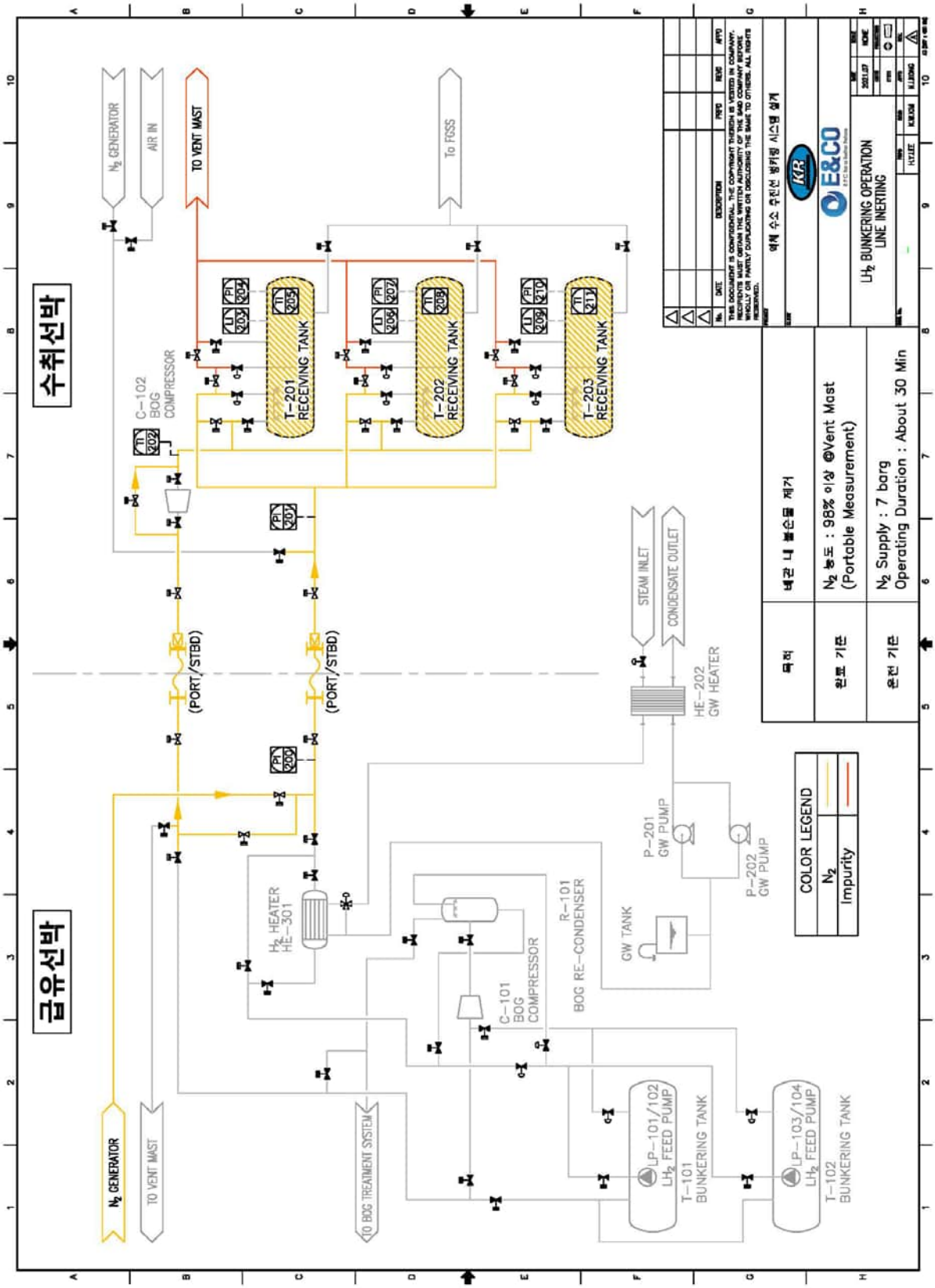
Connecting 후, 배관 내에 존재하는 Air 및 불순물을 제거하기 위해 N_2 로 치환하는 작업이다.

1) 기존 배관 내에 존재하는 Air 및 불순물은 Vent mast 로 방출된다.

2) 수소와 산소의 혼합 가스는 550℃ 이상으로 가열하거나 발화시키면 폭발할 위험이 있으므로 Vent mast 로 방출되는 Air 중 O_2 의 농도가 1% 이하[*3-7)]가 되도록 Generator 를 통해 N_2 를 공급해 준다.

---

*3-7) HAZOP Worksheet 1-16



수취선박
급유선박
N2 GENERATOR
AIR IN
TO VENT MAST
To FGSS
C-102 BOG COMPRESSOR
T-201 RECEIVING TANK
T-202 RECEIVING TANK
T-203 RECEIVING TANK
(PORT/STBD)
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
GW TANK
R-101 BOG RE-CONDENSER
C-101 BOG COMPRESSOR
H2 HEATER HE-301
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
TO BOG TREATMENT SYSTEM
COLOR LEGEND
N2
Impurity
목적
완료 기준
운전 기준
배관 내 불순물 제거
N2 농도 : 98% 이상 @Vent Mast (Portable Measurement)
N2 Supply : 7 barg
Operating Duration : About 30 Min
LH2 BUNKERING OPERATION LINE INERTING

3.5.3 Gassing Up

배관 및 Receiving Tank(T-201, T-202, T-203) 내에 존재하는 질소 가스를 수소 가스로 치환한다.

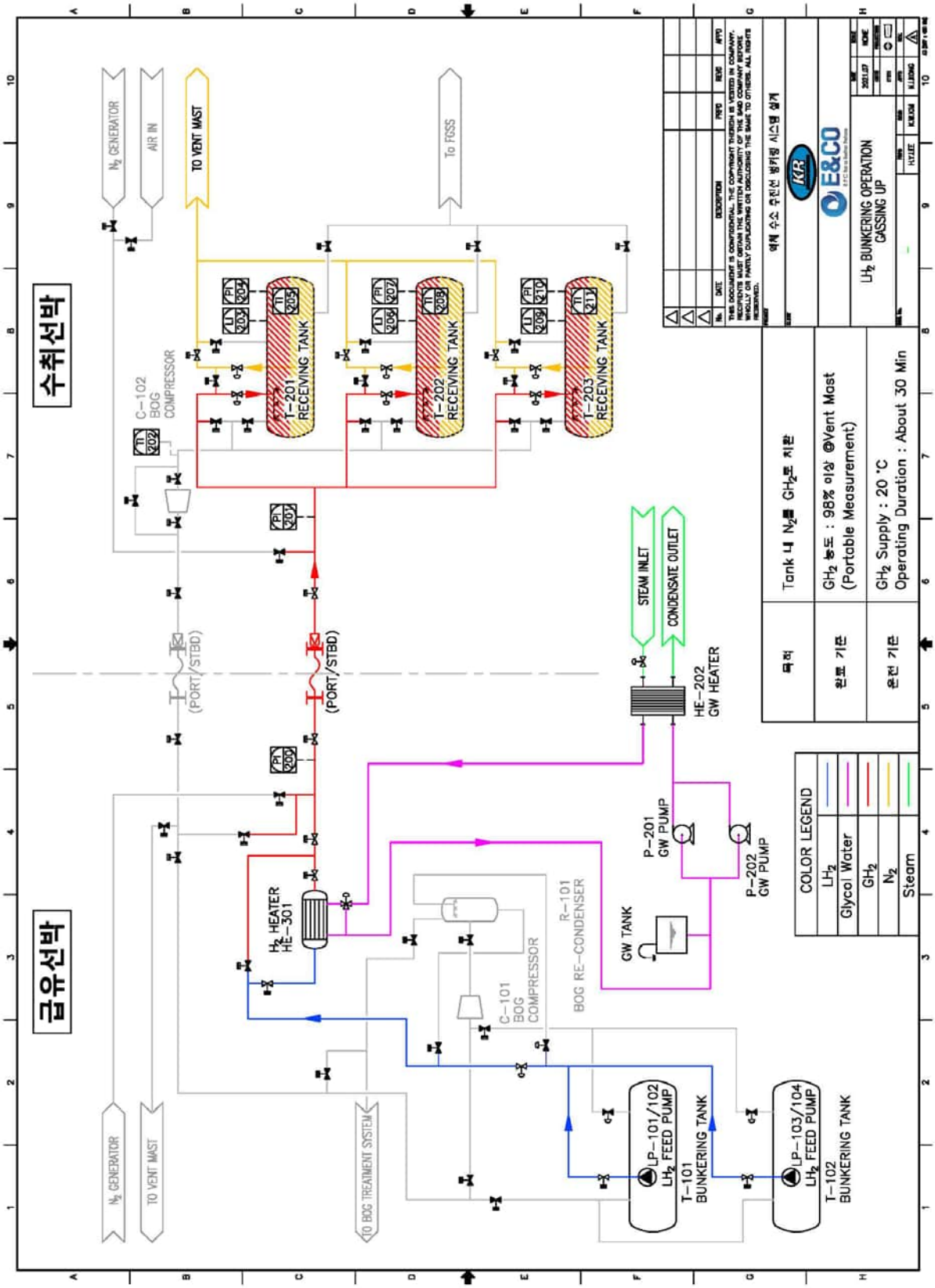
1) Bunkering Tank(T-101, T-102)에서 소량으로 나온 LH_2 를 Heater(HE-301)를 통해 기화 시켜 공급하여, 질소 가스를 Vent mast 로 방출한다.

2) 수소 가스가 질소 가스 비중 대비 가벼우므로, Receiving Tank(T-201, T-202, T-203) 내에서 수소 가스는 위쪽으로, 질소 가스는 아래쪽으로 모이게 되며, Receiving Tank(T-201, T-202, T-203) 내부의 아래쪽에서 올라가는 배관을 통해 Vent mast 로 방출하게 된다.

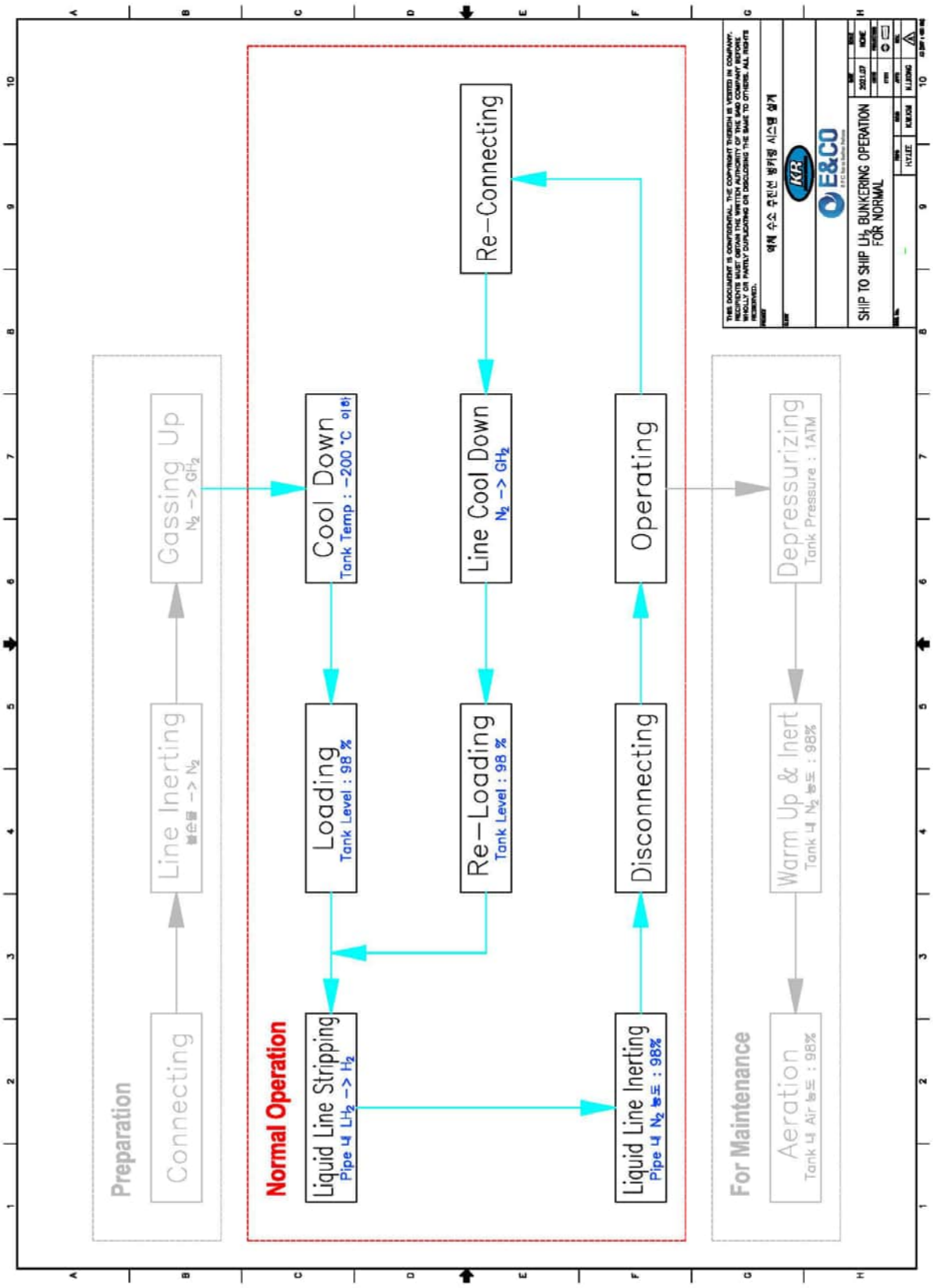
3) Loading 시, 잔여 질소 가스가 얼음 형성이 되지 않도록 충분히 질소 가스를 제거해야 하며[*3-8)], Vent mast 에서 방출되는 가스가 수소 농도 98% 이상이 되면 작업을 종료 한다.

---

*3-8) HAZOP Worksheet 1-5


수취선박
급유선박
N2 GENERATOR
AIR IN
TO VENT MAST
To FGSS
C-102 BOG COMPRESSOR
T-201 RECEIVING TANK
T-202 RECEIVING TANK
T-203 RECEIVING TANK
(PORT/STBD)
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
H2 HEATER HE-301
GW TANK
C-101 BOG COMPRESSOR
R-101 BOG RE-CONDENSER
TO BOG TREATMENT SYSTEM
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
COLOR LEGEND
LH2
Glycol Water
GH2
N2
Steam
목적
Tank 내 N2를 GH2로 치환
완료 기준
GH2 농도 : 98% 이상 @Vent Mast (Portable Measurement)
운전 기준
GH2 Supply : 20 °C
Operating Duration : About 30 Min
LH2 BUNKERING OPERATION CASSING UP
액체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계
E&CO

3.6 Normal Operation

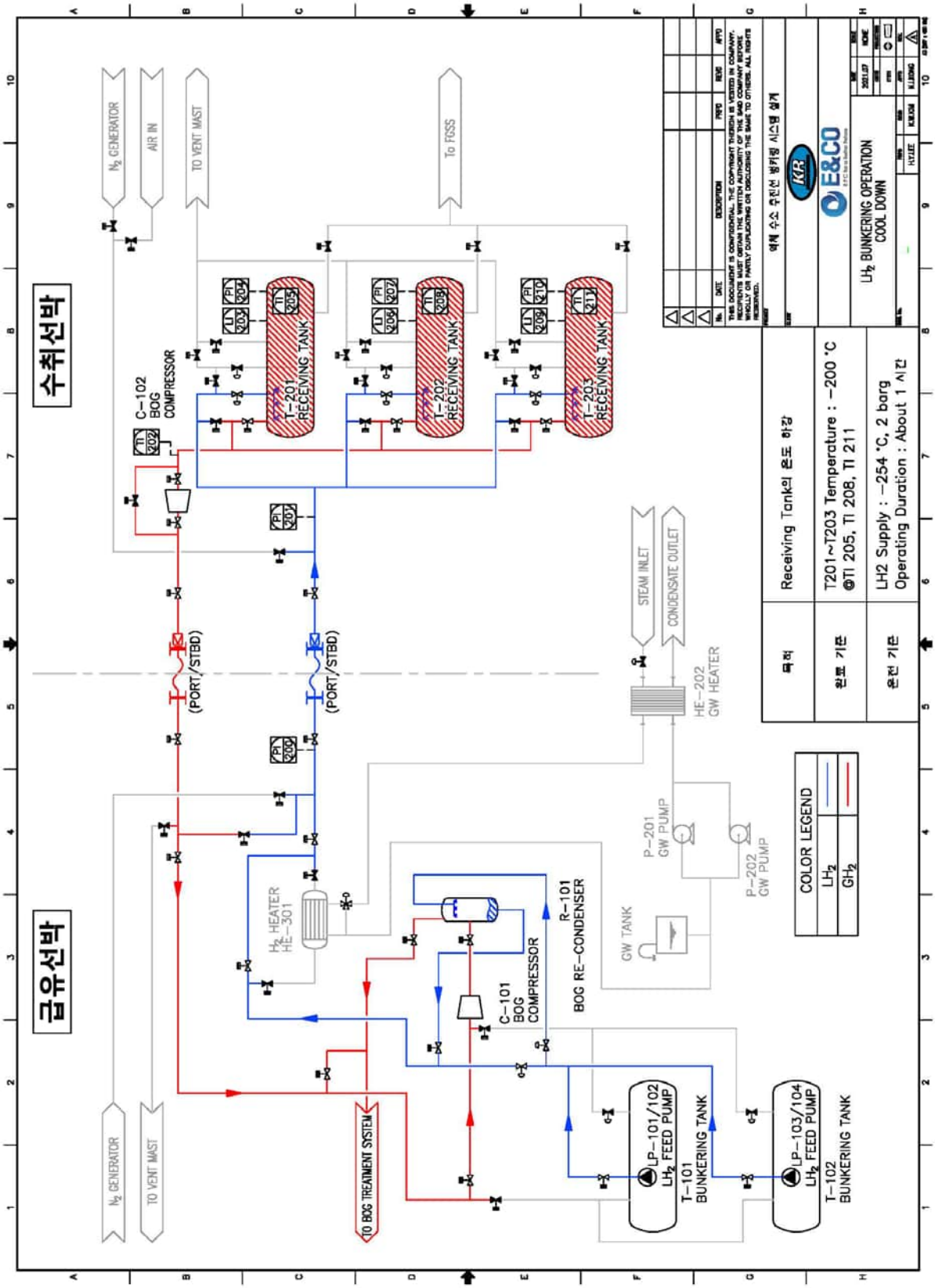


3.6.1 Cool Down

극저온의 Liquid Hydrogen 이 배관과 Bunkering Hose 를 통해 흐르기 때문에 사전에 Cool Down 을 하지 않으면 배관과 Bunkering Hose 및 장비 손상을 야기 할 수 있으므로 사전 Cooling 을 필요로 한다.

1) 배관 내 소량의 Liquid Hydrogen 을 흘려 기화한 Gas 로 서서히 온도를 낮춘다.

2) Receiving Tank(T-201, T-202, T-203) 내부 온도가 -200°C 을 완료기준으로 한다. 이때, Receiving Tank(T-201, T-202, T-203)의 내부 온도는 TI 205, TI 208, TI 211 로 확인이 가능하다.


수취선박
급유선박
N2 GENERATOR
AIR IN
TO VENT MAST
To FGSS
C-102 BOG COMPRESSOR
T-201 RECEIVING TANK
T-202 RECEIVING TANK
T-203 RECEIVING TANK
(PORT/STBD)
(PORT/STBD)
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
GW TANK
H2 HEATER HE-301
C-101 BOG COMPRESSOR
R-101 BOG RE-CONDENSER
TO BOG TREATMENT SYSTEM
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
COLOR LEGEND
LH2
GH2
목적
Receiving Tank의 온도 하강
완료 기준
T201~T203 Temperature : -200 'C @TI 205, TI 208, TI 211
운전 기준
LH2 Supply : -254 'C, 2 barg
Operating Duration : About 1 시간
LH2 BUNKERING OPERATION
COOL DOWN
액체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계
E&CO
KR

3.6.2 Loading (Filling)

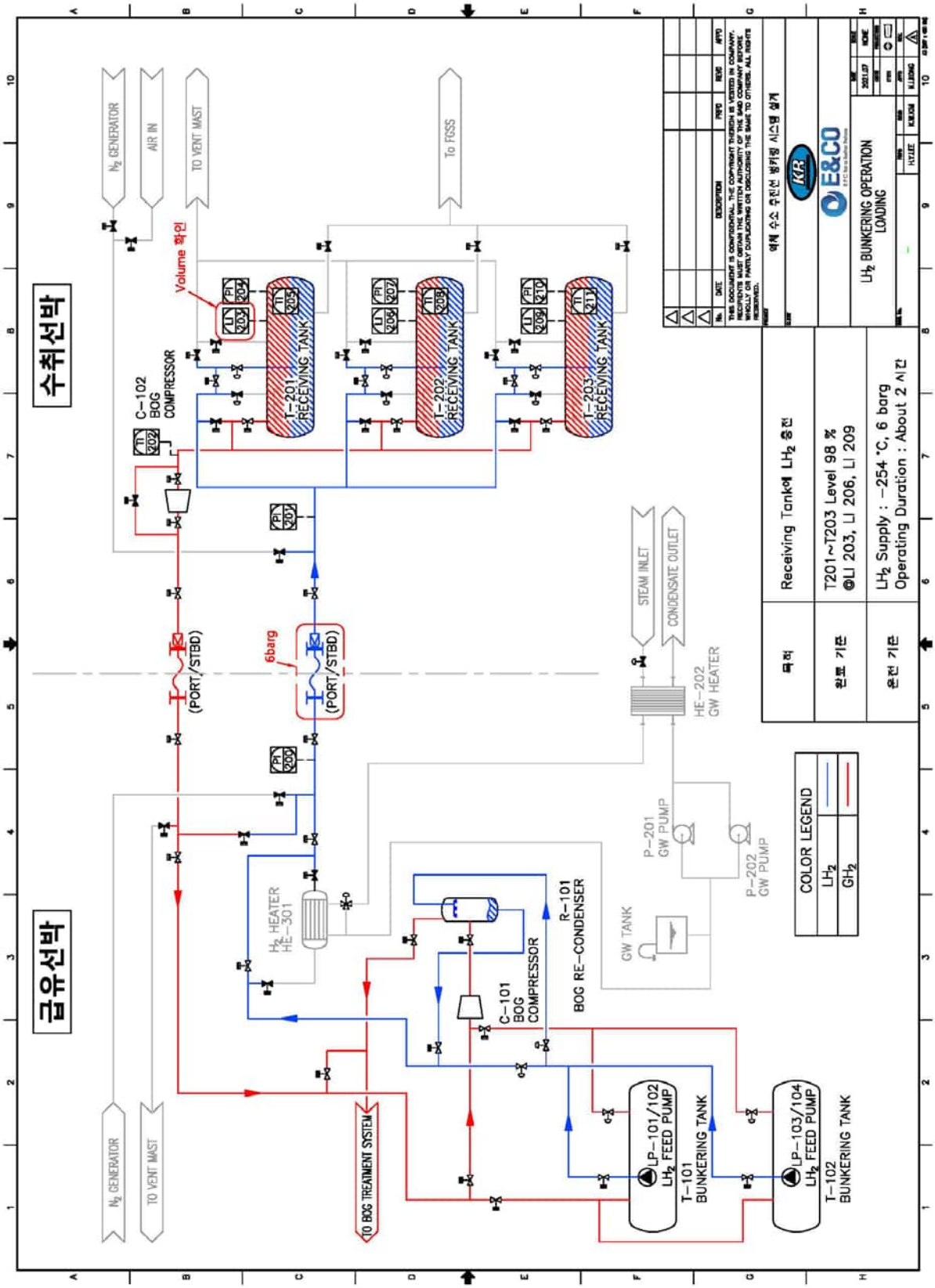
1) Loading 작업 전에 Bunkering, Receiving Tank 의 압력 및 온도를 확인한다. *3-9)
2) 급유선박(T-101, T-102)에 저장되어 있는 LH_2 는 Feed Pump 를 통해 6bar 로 수취선박의 Receiving Tank(T-201, T-202, T-203)에 공급된다.
3) Receiving Tank(T-201, T-202, T-203) 내부에 있던 수소 가스는 Compressor(C-102)를 거쳐 Bunkering Tank(T-101, T-102), BOG Re-Condenser(R-101), BOG Treatment System 으로 주입된다.
4) 충전 시간은 2 시간이며, Receiving Tank(T-201, T-202, T-203) Volume 이 Loading Limit *3-10)에 도달하면 충전은 완료된다.
5) 선급 규칙에 따라서 계산된 Loading Limit 에 따른 적재가 되어야 하며, *3-11) 이때 Receiving Tank(T-201, T-202, T-203)의 Volume 은 LI 203, LI 206, LI 209 로 확인 가능하다.

---

*3-9) HAZOP Worksheet 6-5

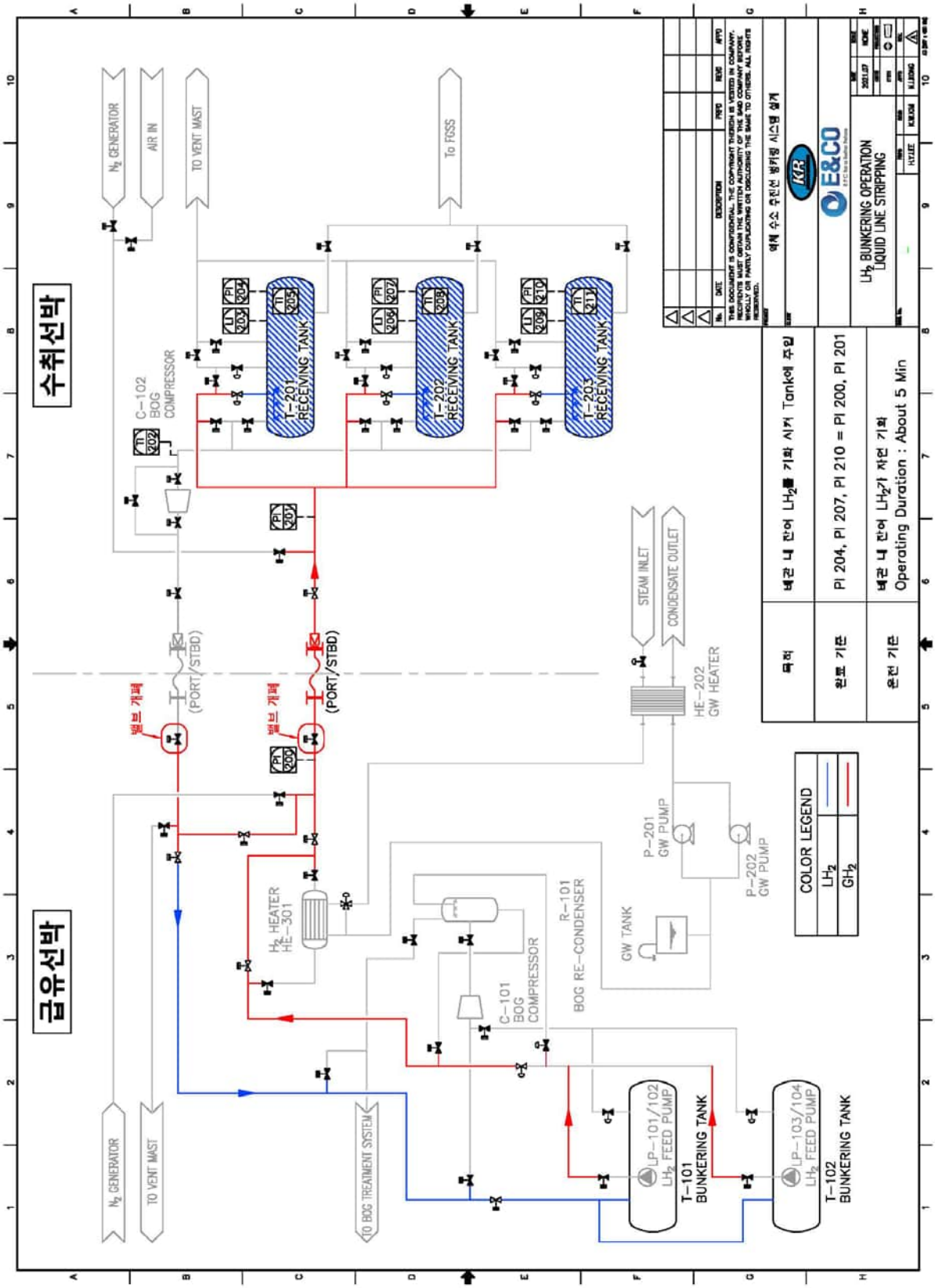
*3-10) HAZOP Worksheet 6-6

*3-11) HAZOP Worksheet 1-14


수취선박
급유선박
N2 GENERATOR
AIR IN
TO VENT MAST
To FGSS
Volume 확인
C-102 BOG COMPRESSOR
T-201 RECEIVING TANK
T-202 RECEIVING TANK
T-203 RECEIVING TANK
(PORT/STBD)
6barg
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
GW TANK
H2 HEATER HE-301
C-101 BOG COMPRESSOR
R-101 BOG RE-CONDENSER
TO BOG TREATMENT SYSTEM
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
COLOR LEGEND
LH2
GH2
목적 Receiving Tank에 LH2 충전
완료 기준 T201~T203 Level 98 % @LI 203, LI 206, LI 209
운전 기준 LH2 Supply : -254 °C, 6 barg Operating Duration : About 2 시간
LH2 BUNKERING OPERATION LOADING
액체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계
E&CO
KR

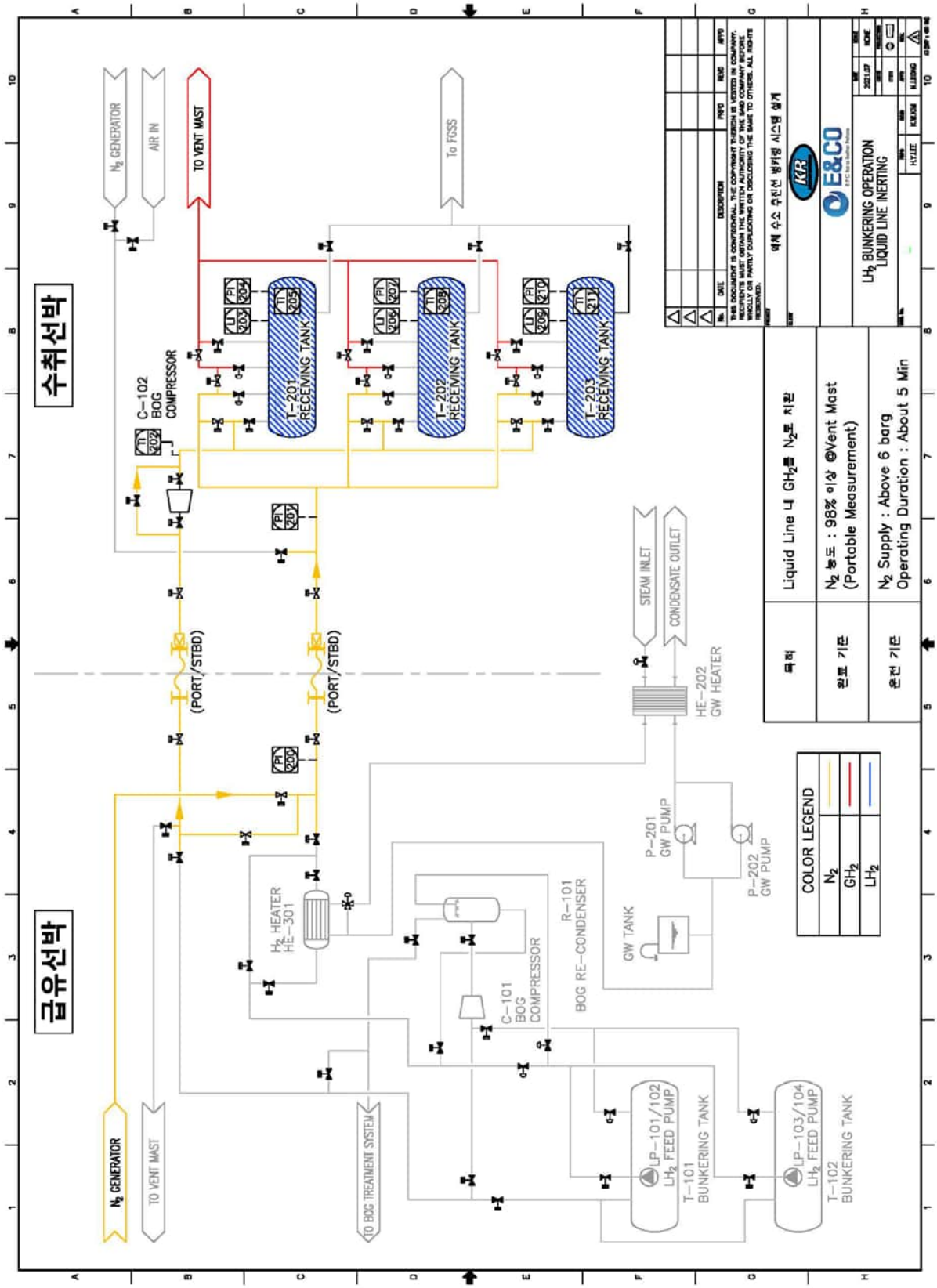
3.6.3 Liquid Line Stripping

1) 충전 완료 후, 배관에 존재하는 잔여 Liquid Hydrogen 을 자연 기화 시켜 그 압력을 이용해 Liquid Hydrogen 이 양 쪽 Tank 로 주입된다.
2) 급유선박의 배관에 잔류해 있는 Liquid Hydrogen 은 Bunkering Tank(T-101, T-102)로 주입되며(Bunkering Hose 포함), 수취선박 배관의 Liquid Hydrogen 은 Receiving Tank(T-201, T-202, T-203)로 주입된다.
3) 배관 내 압력을 확인 할 수 있는 PI 200, PI 201 이 Receiving Tank(T-201, T-202, T-203)의 압력과 동일시, 완료 기준으로 한다.


수취선박
급유선박
N2 GENERATOR
AIR IN
TO VENT MAST
To FGSS
C-102 BOG COMPRESSOR
T-201 RECEIVING TANK
T-202 RECEIVING TANK
T-203 RECEIVING TANK
(PORT/STBD)
밸브 개폐
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
GW TANK
H2 HEATER HE-301
C-101 BOG COMPRESSOR
R-101 BOG RE-CONDENSER
TO BOG TREATMENT SYSTEM
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
COLOR LEGEND
LH2
GH2
목적
배관 내 잔여 LH2를 기화 시켜 Tank에 주입
완료 기준
PI 204, PI 207, PI 210 = PI 200, PI 201
운전 기준
배관 내 잔여 LH2가 차단 기화
Operating Duration : About 5 Min
LH2 BUNKERING OPERATION
LIQUID LINE STRIPPING
E&CO
KR

3.6.4 Liquid Line Inerting

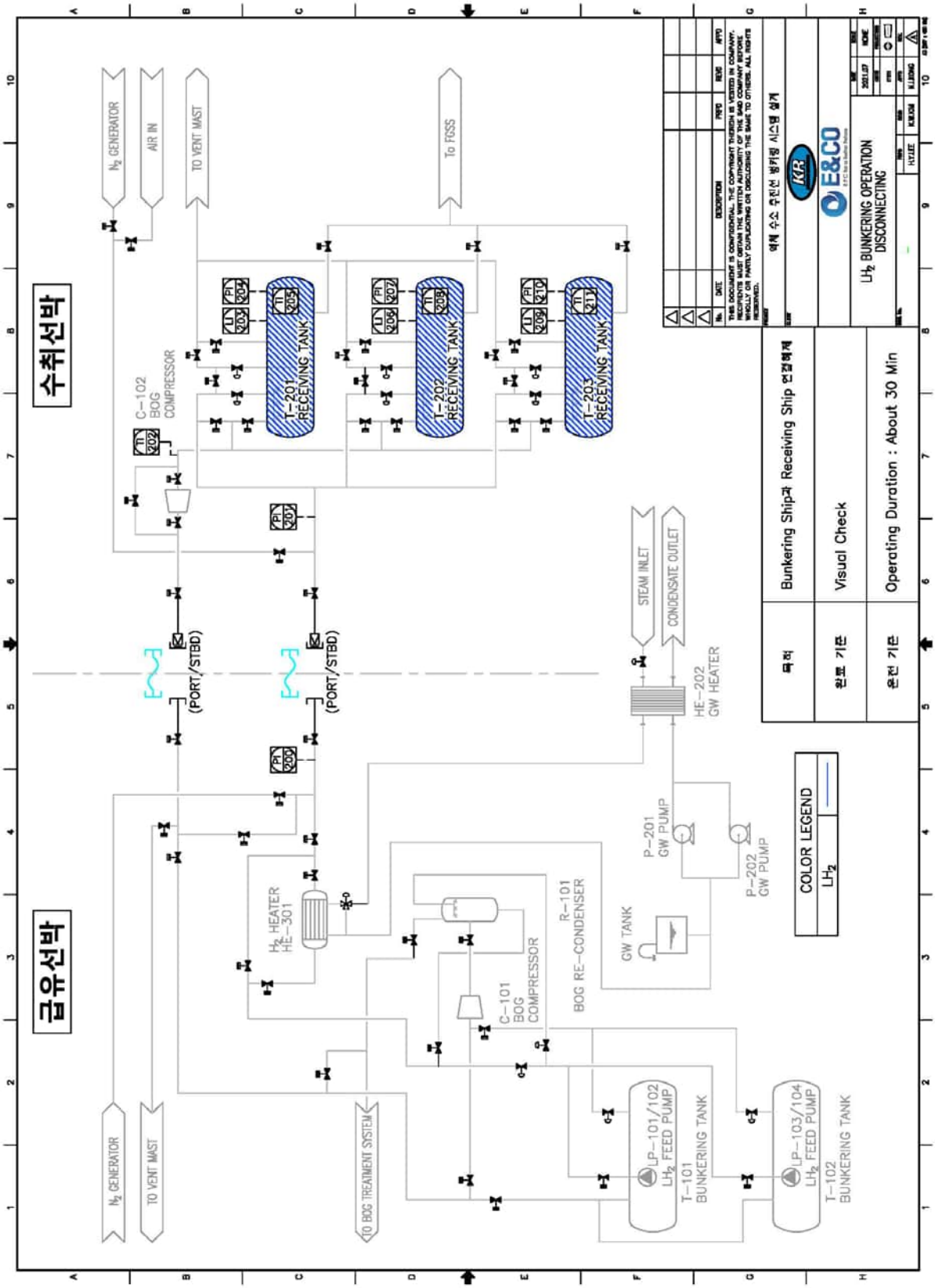
1) 배관 내에 잔여 수소 가스를 질소 가스로 치환하며 Receiving Tank(T-201, T-202, T-203)로 질소가 들어가지 않도록, Valve 로 차단한다.
2) 수소는 가연성이 크고 산소와 결합 시 폭발적으로 반응하며 이는 폭발의 위험을 일으킨다. 그렇기 때문에 배관 내 수소를 제거 후 Bunkering Hose 를 해제한다.
3) Generator 를 통해 질소를 공급하여 수소가스를 Vent mast 로 밀어낸 후, 질소가스 농도가 98% 이상이 되면 완료 한다.


수취선박
급유선박
N2 GENERATOR
AIR IN
TO VENT MAST
To FGSS
C-102 BOG COMPRESSOR
T-201 RECEIVING TANK
T-202 RECEIVING TANK
T-203 RECEIVING TANK
(PORT/STBD)
(PORT/STBD)
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
GW TANK
H2 HEATER HE-301
C-101 BOG COMPRESSOR
R-101 BOG RE-CONDENSER
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
TO BOG TREATMENT SYSTEM
COLOR LEGEND
N2
GH2
LH2
LH2 BUNKERING OPERATION
LIQUID LINE INERTING
E&CO
목적 Liquid Line 내 GH2를 N2로 치환
원료 기준 N2 농도 : 98% 이상 @Vent Mast (Portable Measurement)
운전 기준 N2 Supply : Above 6 barg
Operating Duration : About 5 Min

3.6.5 Disconnecting

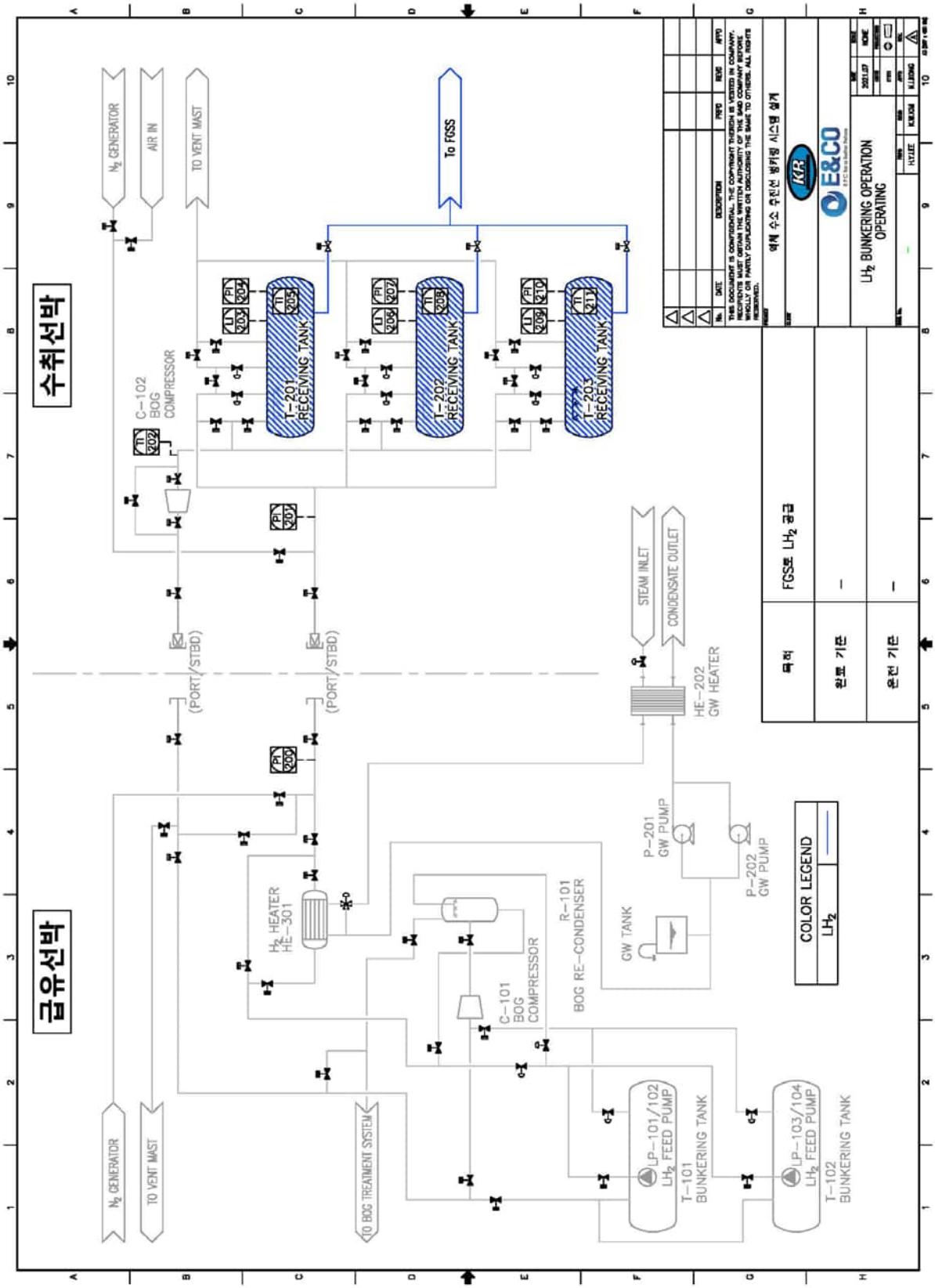
1) N_2 Purging Valve 를 통해 불활성 가스를 주입한다. 잔여액이 있는지 Drain Valve 를 통해 확인한다. *3-12)
2) 배관 내 모든 가스가 불활성 가스인 질소 가스로 치환되어 있는지 Gas Sampling 하여 확인 한다.
3) 수소는 질소보다 가벼우므로 Gas Sampling 은 배관 라인의 Highest Point 에서 수행한다.
4) 불활성 가스는 반응성이 적으므로, 폭발의 위험성이 적고 대기에 누출되어도 이상이 없기 때문에, 배관 내 가스가 질소 가스임을 확인하고 Liquid Line 과 Gas Line 의 연결 부위를 해제한다.

*3-12) HAZOP Worksheet 6-1


수취선박
급유선박
N2 GENERATOR
AIR IN
TO VENT MAST
To FGSS
C-102 BOG COMPRESSOR
T-201 RECEIVING TANK
T-202 RECEIVING TANK
T-203 RECEIVING TANK
(PORT/STBD)
(PORT/STBD)
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
GW TANK
H2 HEATER HE-301
C-101 BOG COMPRESSOR
R-101 BOG RE-CONDENSER
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
TO BOG TREATMENT SYSTEM
COLOR LEGEND
LH2
목적 Bunkering Ship과 Receiving Ship 연결해제
완료 기준 Visual Check
운전 기준 Operating Duration : About 30 Min
LH2 BUNKERING OPERATION DISCONNECTING
액체 수소 추진선 벙커링 시스템 실기

3.6.6 Operating

Bunkering Tank(T-101, T-102)와 Receiving Tank(T-201, T-202, T-203)가 연결 해제 되었으며, Receiving Tank(T-201, T-202, T-203)는 정상적으로 LH_2를 추진 연료로 사용하기 위해 FGS 로 LH_2를 공급한다.

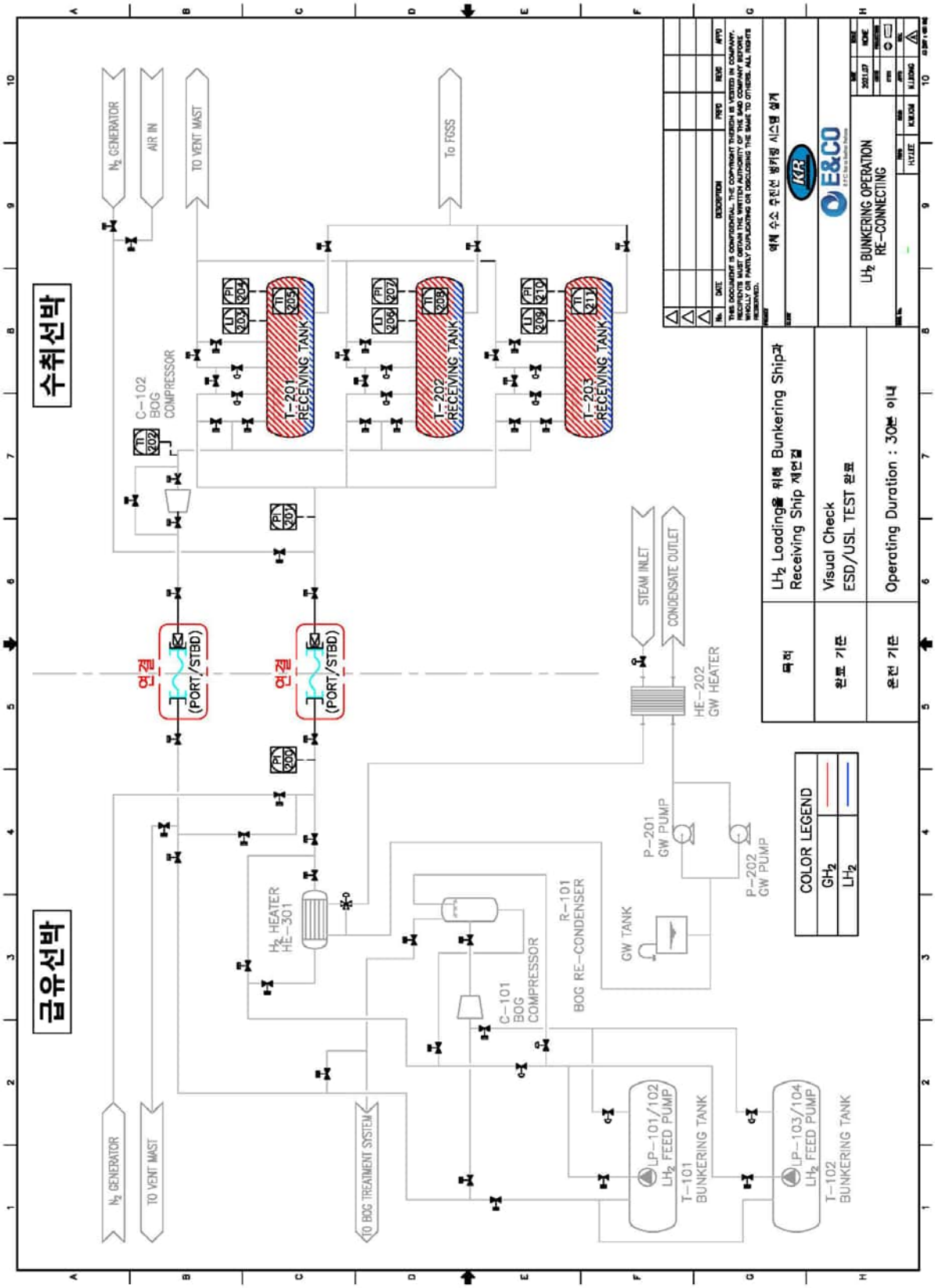


수취선박
급유선박
N2 GENERATOR
AIR IN
TO VENT MAST
To FGSS
C-102 BOG COMPRESSOR
T-201 RECEIVING TANK
T-202 RECEIVING TANK
T-203 RECEIVING TANK
(PORT/STBD)
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
GW TANK
R-101 BOG RE-CONDENSER
C-101 BOG COMPRESSOR
H2 HEATER HE-301
TO BOG TREATMENT SYSTEM
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
COLOR LEGEND
LH2
FGSS로 LH2 공급
LH2 BUNKERING OPERATION OPERATING

3.6.7 Re-Connecting

1) Bunkering Tank(T-101, T-102)와 Receiving Tank(T-201, T-202, T-203)를 연결하기 위한 작업을 시작한다.
2) 모든 이송을 위한 밸브는 닫혀 있는 상태이며, 급유선박과 수취선박의 QC/DC 를 활용하여 Liquid Line 과 Gas Line 의 Bunkering Hose 를 연결 시킨다. 이는 각 Manifold 에 연결되며 Manifold 를 통하여 Receiving Tank(T-201, T-202, T-203)로 LH_2 Hydrogen 을 전달하게 된다.
3) Bunkering Hose 연결 후, ESD/USL TEST 를 하여 이상이 없음을 확인하고 Bunkering Mode 로 전환 한다. *3-13)

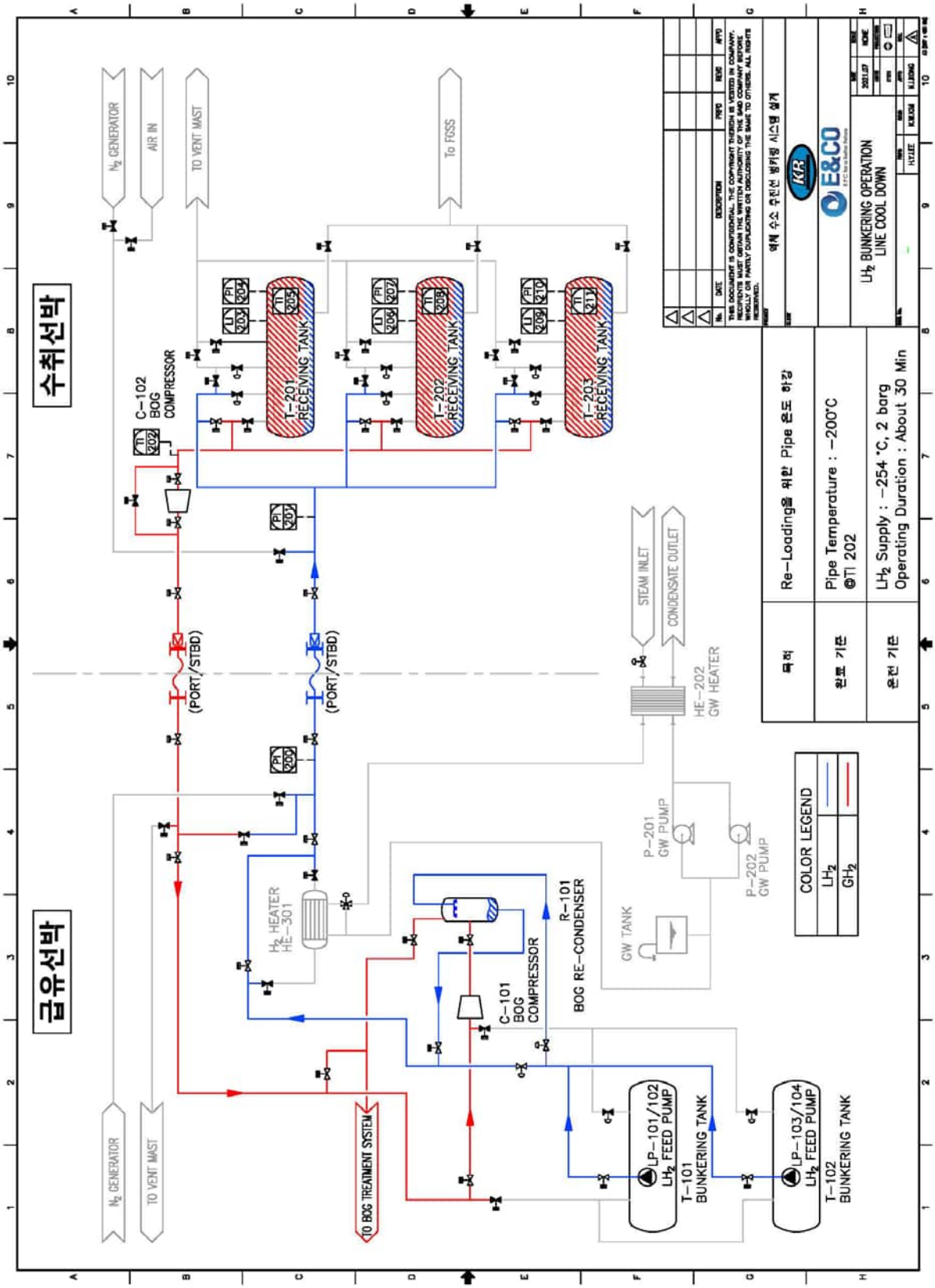
*3-13) HAZOP Worksheet 1-1


수취선박
급유선박
N2 GENERATOR
AIR IN
TO VENT MAST
To FGSS
C-102 BOG COMPRESSOR
T-201 RECEIVING TANK
T-202 RECEIVING TANK
T-203 RECEIVING TANK
연결 (PORT/STBD)
연결 (PORT/STBD)
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
H2 HEATER HE-301
C-101 BOG COMPRESSOR
R-101 BOG RE-CONDENSER
GW TANK
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
TO BOG TREATMENT SYSTEM
COLOR LEGEND
GH2
LH2
목적
LH2 Loading을 위해 Bunkering Ship과 Receiving Ship 계선갈
완료 기준
Visual Check
ESD/USL TEST 완료
운전 기준
Operating Duration : 30분 이내
LH2 BUNKERING OPERATION RE-CONNECTING
액체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계
E&CO
KR

3.6.8 Line Cool Down

극저온의 Liquid Hydrogen 이 배관과 Bunkering Hose 를 통해 흐르기 때문에 사전에 Cooling 을 하지 않으면 배관과 Bunkering Hose 및 장비 손상을 야기 할 수 있으므로 사전 Cooling 을 필요로 한다.

1) 배관 내 소량의 Liquid Hydrogen 을 흘려 기화한 Gas 로 서서히 온도를 낮춘다.
2) Receiving Tank(T-201, T-202, T-203)는 Liquid Hydrogen 이 저장되어 있었으므로, Cool Down 에서 제외 한다.
3) 배관 내 온도가 -200°C 을 완료기준으로 하며, TI 202 를 통해 온도 확인이 가능하다.


수취선박
급유선박
N2 GENERATOR
AIR IN
TO VENT MAST
To FGSS
C-102 BOG COMPRESSOR
T-201 RECEIVING TANK
T-202 RECEIVING TANK
T-203 RECEIVING TANK
(PORT/STBD)
(PORT/STBD)
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
GW TANK
H2 HEATER HE-301
C-101 BOG COMPRESSOR
R-101 BOG RE-CONDENSER
TO BOG TREATMENT SYSTEM
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
COLOR LEGEND
LH2
GH2
목적
Re-Loading을 위한 Pipe 온도 하강
완료 기준
Pipe Temperature : -200℃ @TI 202
운전 기준
LH2 Supply : -254 ℃, 2 barg
Operating Duration : About 30 Min
LH2 BUNKERING OPERATION
LINE COOL DOWN
E&CO

3.6.9 Re-Loading (Filling)

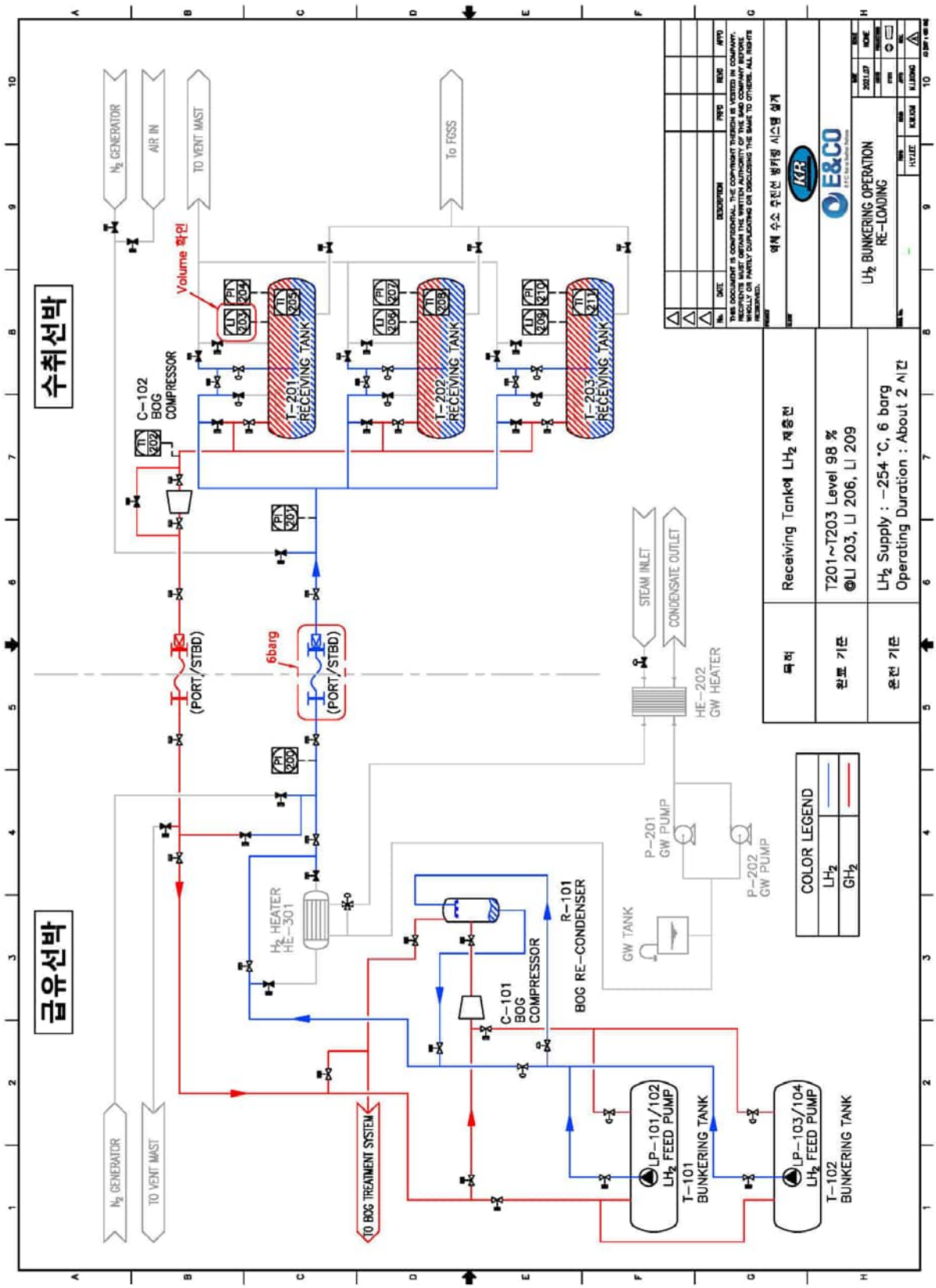
1) Loading 작업 전에 Bunkering, Receiving Tank 의 압력 및 온도를 확인한다. *3-14)
2) 급유선박(T-101, T-102)에 저장되어 있는 LH_2 를 Feed Pump 를 통해 6barg 로 수취선박의 Receiving Tank(T-201, T-202, T-203)에 재 공급된다.
3) Receiving Tank(T-201, T-202, T-203) 내부에 있던 수소 가스는 Compressor(C-102)를 거쳐 Bunkering Tank(T-101, T-102), BOG Re-Condenser(R-101), BOG Treatment System 으로 주입된다.
4) 충전 시간은 2 시간이며, Receiving Tank(T-201, T-202, T-203) Volume 이 Loading Limit *3-15)에 도달하면 충전은 완료된다.
5) 선급 규칙에 따라서 계산된 Loading Limit 에 따른 적재가 되어야 하며*3-16), 이때 Receiving Tank(T-201, T-202, T-203)의 Volume 은 LI 203, LI 206, LI 209 로 확인 가능하다.

---

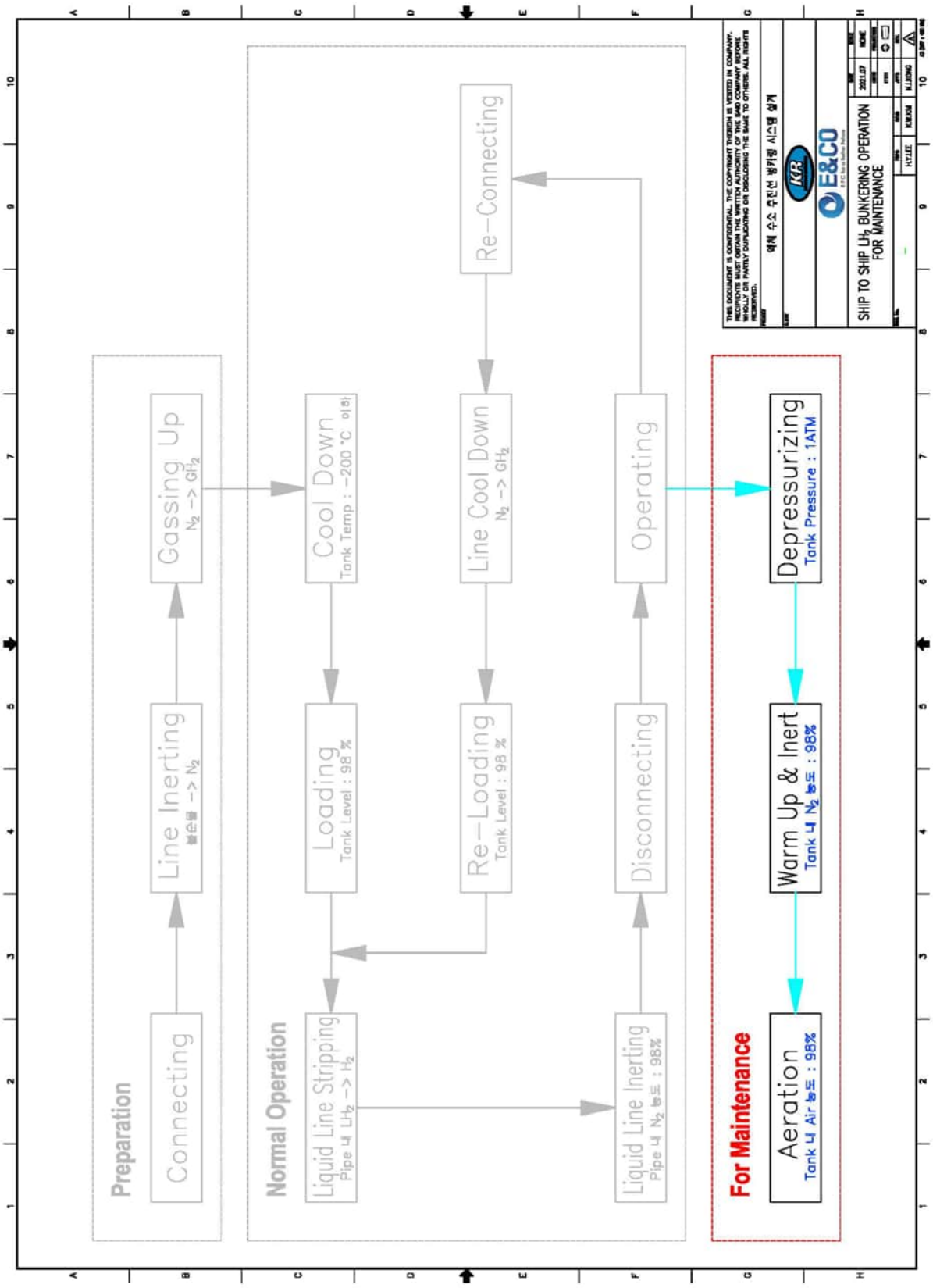
*3-14) HAZOP Worksheet 6-5

*3-15) HAZOP Worksheet 6-6

*3-16) HAZOP Worksheet 1-14


수취선박
급유선박
N2 GENERATOR
AIR IN
TO VENT MAST
To FGSS
Volume 확인
C-102 BOG COMPRESSOR
T-201 RECEIVING TANK
T-202 RECEIVING TANK
T-203 RECEIVING TANK
(PORT/STBD)
6barg
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
GW TANK
H2 HEATER HE-301
C-101 BOG COMPRESSOR
R-101 BOG RE-CONDENSER
TO BOG TREATMENT SYSTEM
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
COLOR LEGEND
LH2
GH2
목적 Receiving Tank에 LH2 적재
완료 기준 T201~T203 Level 98 %
@LI 203, LI 206, LI 209
운전 기준 LH2 Supply : -254 °C, 6 barg
Operating Duration : About 2 시간
액체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계
E&CO
LH2 BUNKERING OPERATION
RE-LOADING

3.7 For Maintenance



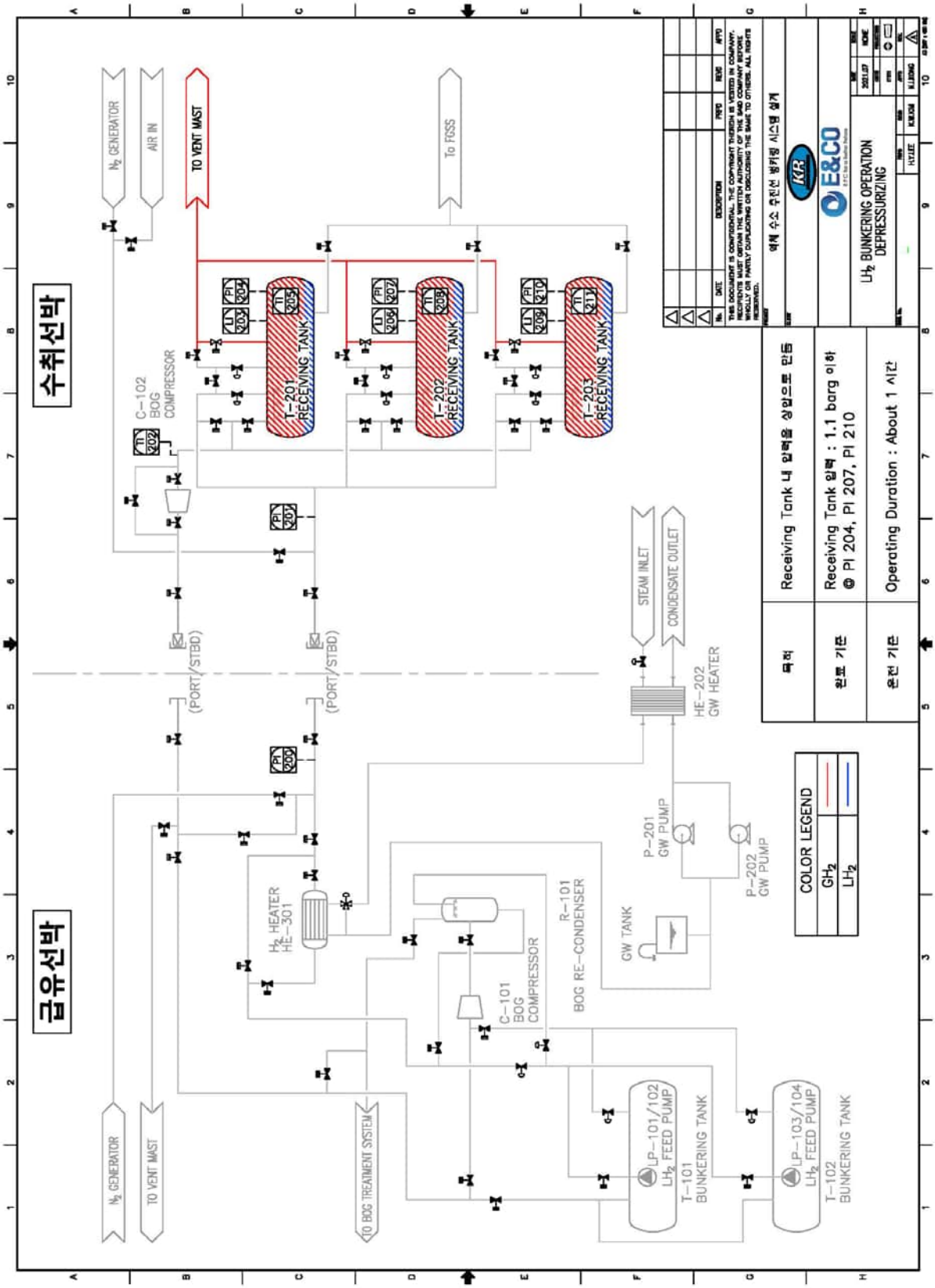
3.7.1 Depressurizing

Maintenance 를 목적으로, Receiving Tank(T-201, T-202, T-203)를 최종 Air 로 치환하는 것을 목표로 둔다.

1) Receiving Tank(T-201, T-202, T-203) 내 수소 가스를 Vent mast 로 방출하여 Receiving Tank(T-201, T-202, T-203) 내 압력을 상압으로 만든다.
2) Vent mast 는 정전기로 인해 스스로 발화되는 경우를 방지하기 위해 Vent mast 의 끝 단에 정전기 방지링을 설치한다. *3-17)
3) Receiving Tank(T-201, T-202, T-203) 내 압력이 1.1bar 이하를 완료 기준으로 한다. Receiving Tank(T-201, T-202, T-203)의 압력은 PI 204, PI 207, PI 210 으로 확인이 가능하다.

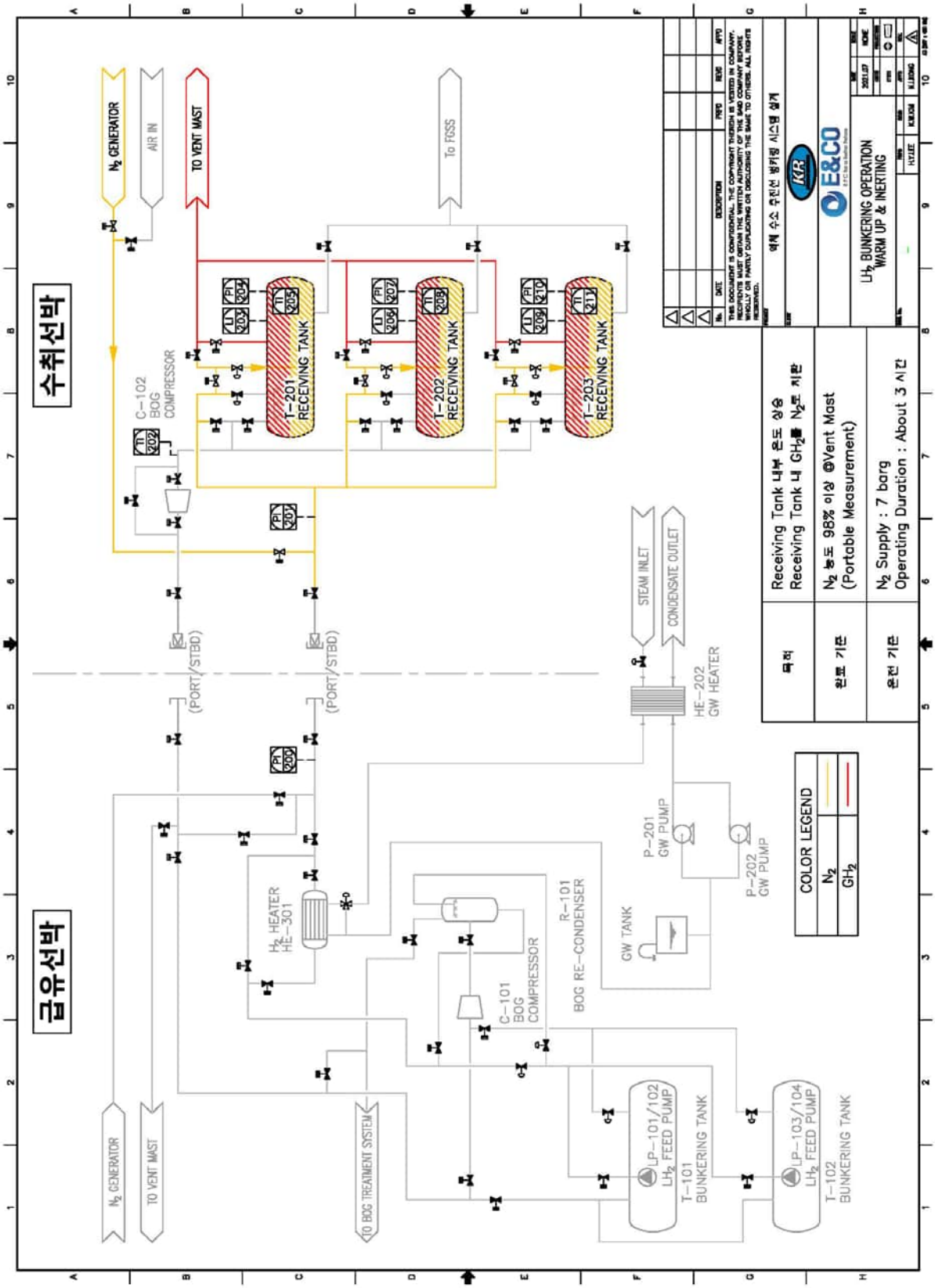
---

*3-17) KOSHA GUIDE D-42-2012 참고


수취선박
급유선박
N2 GENERATOR
AIR IN
TO VENT MAST
To FGSS
C-102 BOG COMPRESSOR
T-201 RECEIVING TANK
T-202 RECEIVING TANK
T-203 RECEIVING TANK
(PORT/STBD)
(PORT/STBD)
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
GW TANK
H2 HEATER HE-301
C-101 BOG COMPRESSOR
R-101 BOG RE-CONDENSER
TO BOG TREATMENT SYSTEM
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
COLOR LEGEND
GH2
LH2
목적 Receiving Tank 내 압력을 상압으로 만듦
완료 기준 Receiving Tank 압력 : 1.1 barg 이하 @ PI 204, PI 207, PI 210
운전 기준 Operating Duration : About 1 시간
LH2 BUNKERING OPERATION DEPRESSURIZING
E&CO
KR

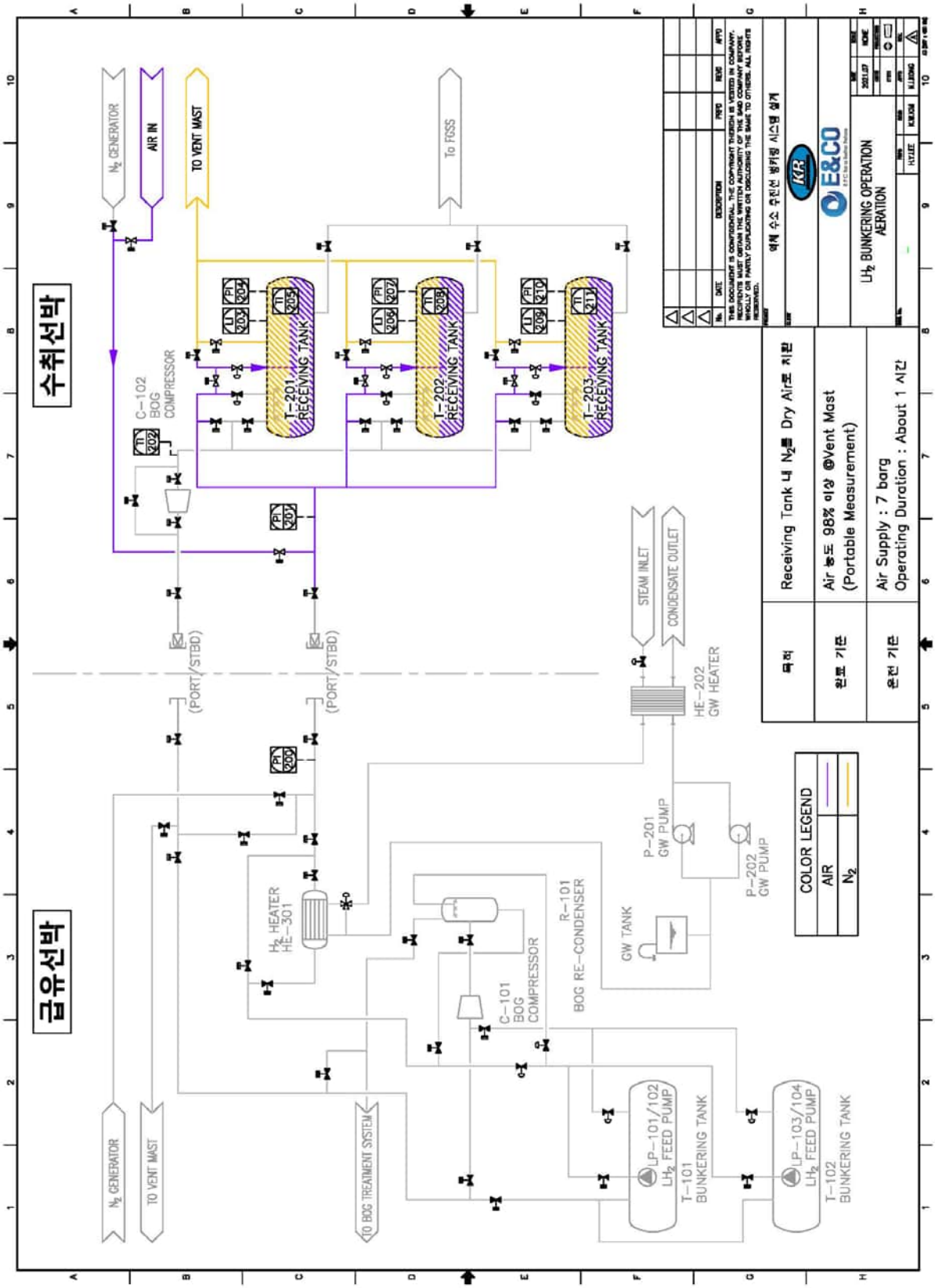
3.7.2 Warm Up & Inerting

1) Receiving Tank(T-201, T-202, T-203) 내에 수소 가스를 질소 가스로 치환한다.
2) 수취선박에 있는 Generator 를 통해 질소를 공급하여 수소가스를 Vent mast 로 밀어낸다.
3) 질소 가스는 수소 가스에 비해 비중이 크므로, Receiving Tank(T-201, T-202, T-203) 내부에 질소 가스가 Tank 바닥부터 채워 질 것이며, 수소 가스는 Tank 상부 배관을 통해 Vent mast 로 방출된다.
4) 질소 가스 농도가 98% 이상이 되면 작업을 종료 한다.


수취선박
급유선박
N2 GENERATOR
AIR IN
TO VENT MAST
To FGSS
C-102 BOG COMPRESSOR
T-201 RECEIVING TANK
T-202 RECEIVING TANK
T-203 RECEIVING TANK
(PORT/STBD)
(PORT/STBD)
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
GW TANK
H2 HEATER HE-301
C-101 BOG COMPRESSOR
R-101 BOG RE-CONDENSER
TO BOG TREATMENT SYSTEM
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
COLOR LEGEND
N2
GH2
목적
Receiving Tank 내부 온도 상승
Receiving Tank 내 GH2를 N2로 치환
완료 기준
N2 농도 98% 이상 @Vent Mast
(Portable Measurement)
운전 기준
N2 Supply : 7 barg
Operating Duration : About 3 시간
LH2 BUNKERING OPERATION
WARM UP & INERTING
액체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계
E&CO
KR

3.7.3 Aeration

1) Receiving Tank(T-201, T-202, T-203) 내에 질소 가스를 Air 로 치환하는 작업이며 수취선박에서 Receiving Tank(T-201, T-202, T-203)로 Air 를 공급해 준다. Air 는 질소 가스에 비해 비중이 크므로, Receiving Tank(T-201, T-202, T-203) 내부에 Air 가 바닥부터 채워 질 것이며, 질소 가스는 Tank 상부 배관을 통해 Vent mast 로 방출된다.
2) 산소 농도가 21% 이상이 되면 작업을 종료 한다.


수취선박
급유선박
N2 GENERATOR
AIR IN
TO VENT MAST
To FGSS
C-102 BOG COMPRESSOR
T-201 RECEIVING TANK
T-202 RECEIVING TANK
T-203 RECEIVING TANK
(PORT/STBD)
(PORT/STBD)
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
GW TANK
H2 HEATER HE-301
C-101 BOG COMPRESSOR
R-101 BOG RE-CONDENSER
TO BOG TREATMENT SYSTEM
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
COLOR LEGEND
AIR
N2
목적 Receiving Tank 내 N2를 Dry Air로 치환
완료 기준 Air 농도 98% 이상 @Vent Mast (Portable Measurement)
운전 기준 Air Supply : 7 barg Operating Duration : About 1 시간
LH2 BUNKERING OPERATION AERATION
액체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계

4 고체수소(MH) 벙커링 시스템 운용절차

4.1 개요

고체수소(MH)추진선박(이하 수취선박)의 Bunkering 환경은 LNG 추진선박과 유사하게 해상에서 급유를 받을 수 있다고 가정 하였으며, 공정 입장에서 Bunkering 시에 Gas Handling 은 Bunkering 선박(이하 급유선박)에서 주관한다.

수취선박의 초기 상태 Metal Hydride Cylinder 는 수소저장합금으로 구성되어 있다. 급유선박은 액체수소(LH_2) 운송선박으로, 장비를 다르게 배치함으로써, 기체수소(GH_2)의 형태로 Bunkering 한다.

급유선박의 일반적인 장비 구성은 아래와 같다.

- 액체수소(LH_2) Tank
- Feed Pump
- High Pressure Pump
- H_2 Heater
- Buffer Tank
- Valve
- QC/DC
- Hose

급유선박은 Bunkering 할 수 있도록 Gassing Up 이 완료 된 상태로, Buffer Tank 에 기체수소(GH_2)가 채워져 있다.

본 Operating Manual 은 Metal Hydride 의 Bunkering 을 다루고 있으며, 작업들에 대한 이유, 목적, 운전 및 완료 기준에 대해 설명한다.

Bunkering 작업에 앞서 아래 사항이 선행되어야 한다.

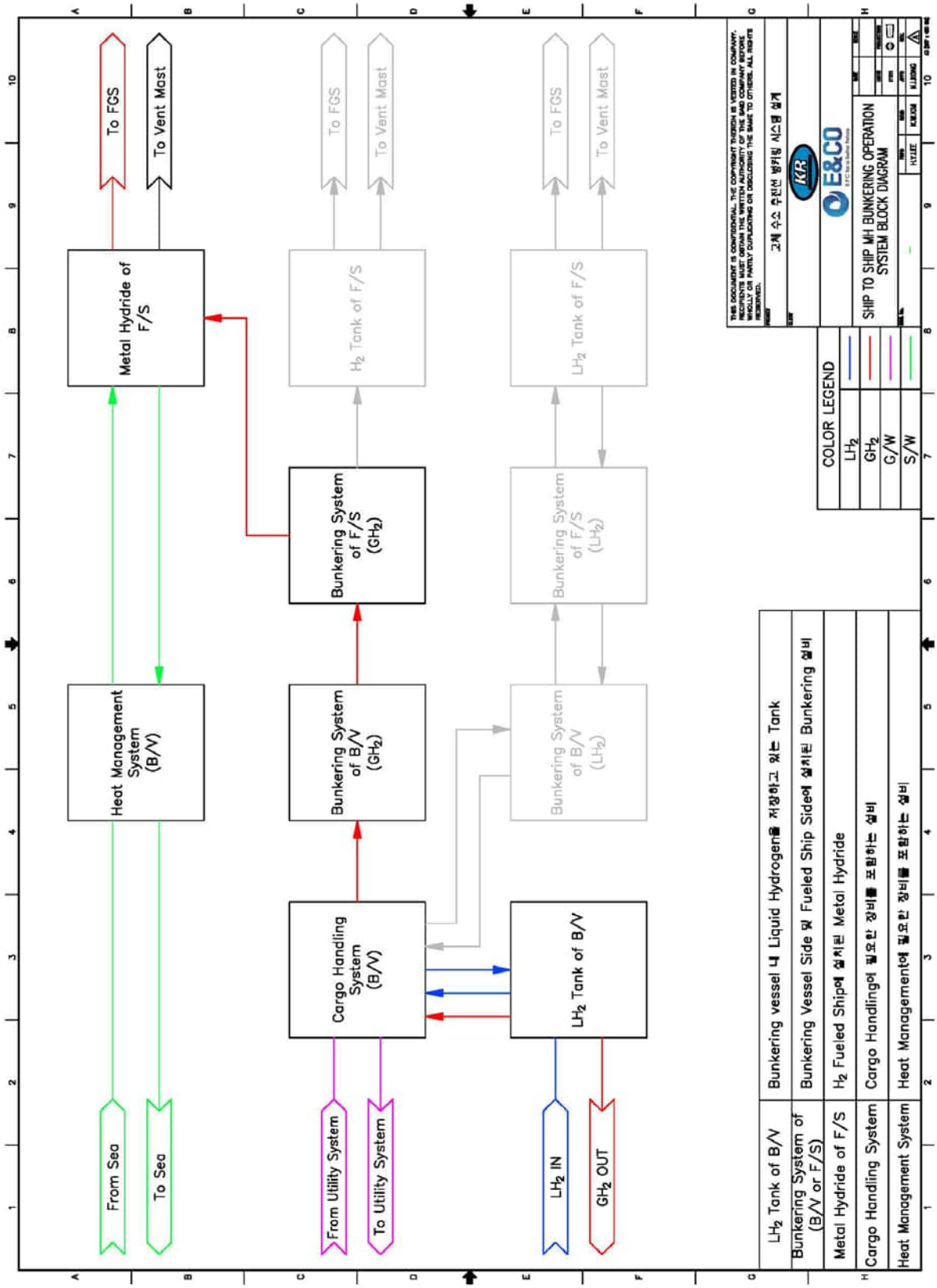
1) 선급에서 요구하는 재료 선정 및 충격시험 등은 수행되어야 한다. *4-1)
2) 다양한 로드 케이스를 조합한 배관응력해석 수행은 검토되어야 한다. (저인화점연료선박규칙 제7장_제3절_304_5 / 액화산적운반규칙 제7장_제5절_511_5) *4-2)
3) 용접부, 이음부, 밸브등은 적합한 매체(헬륨, 또는 5% 수소와 95% 질소 혼합물)와 장비를 이용한 밀폐 및 누설 시험이 수행되어야 한다. *4-3)
4) LH_2 밸브는 극저온용 밸브 및 적합한 단열재를 적용해야 한다. *4-4)

5) 로딩 및 벙커링 수행 전, 액체수소의 Ortho비율을 확인해야 한다. *5-5)

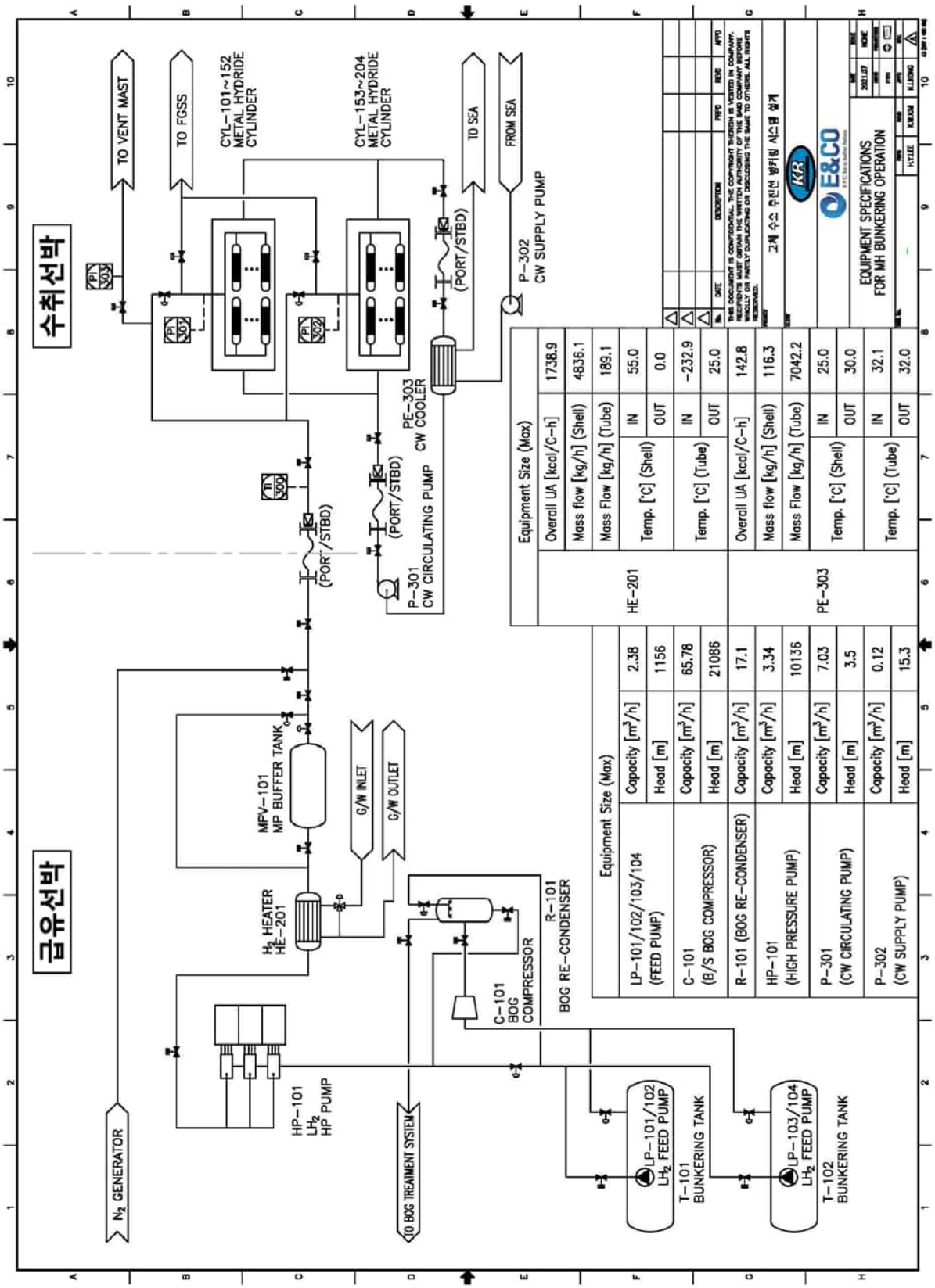
*4-1) HAZOP Worksheet 1-7
*4-2) HAZOP Worksheet 1-8
*4-3) HAZOP Worksheet 1-9
*4-4) HAZOP Worksheet 1-10
*4-5) HAZOP Worksheet 1-12

4.2 MH Bunkering System Block Diagram

- LH_2 Tank of B/V: 급유선박 내 Liquid Hydrogen 를 저장하는 Tank
- Cargo Handling System (B/V): Cargo Handling 에 필요한 장비를 포함하는 설비
- Bunkering System of B/V (GH_2): 급유선박 쪽에 설치된 Bunkering 설비
- Bunkering System of F/S (LH_2): 수취선박 쪽에 설치된 Bunkering 설비
- Metal Hydride of F/S: 수취선박에 설치된 Metal Hydride
- Heat Management System (B/V): Heat Management 에 필요한 장비를 포함하는 설비


To FGS
To Vent Mast
Metal Hydride of F/S
Heat Management System (B/V)
Bunkering System of F/S (GH_2)
Bunkering System of B/V (GH_2)
Cargo Handling System (B/V)
From Sea
To Sea
From Utility System
To Utility System
H_2 Tank of F/S
Bunkering System of F/S (LH_2)
Bunkering System of B/V (LH_2)
LH_2 Tank of B/V
LH_2 IN
GH_2 OUT
LH_2 Tank of B/V
Bunkering System of (B/V or F/S)
Metal Hydride of F/S
Cargo Handling System
Heat Management System
Bunkering vessel 내 Liquid Hydrogen을 저장하고 있는 Tank
Bunkering Vessel Side 및 Fueled Ship Side에 설치된 Bunkering 설비
H_2 Fueled Ship에 설치된 Metal Hydride
Cargo Handling에 필요한 장비를 포함하는 설비
Heat Management에 필요한 장비를 포함하는 설비
COLOR LEGEND
LH_2
GH_2
G/W
S/W
고체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계
E&CO
SHIP TO SHIP MH BUNKERING OPERATION SYSTEM BLOCK DIAGRAM

4.3 Equipment Specifications



Equipment Size (Max)		
LP-101/102/103/104 (FEED PUMP)	Capacity [m³/h]	2.38
	Head [m]	1156
C-101 (B/S BOG COMPRESSOR)	Capacity [m³/h]	65.78
	Head [m]	21086
R-101 (BOG RE-CONDENSER)	Capacity [m³/h]	17.1
HP-101 (HIGH PRESSURE PUMP)	Capacity [m³/h]	3.34
	Head [m]	10136
P-301 (CW CIRCULATING PUMP)	Capacity [m³/h]	7.03
	Head [m]	3.5
P-302 (CW SUPPLY PUMP)	Capacity [m³/h]	0.12
	Head [m]	15.3

HE-201			
Equipment Size (Max)			1738.9
Overall UA [kcal/C-h]			4836.1
Mass flow [kg/h] (Shell)			189.1
Mass Flow [kg/h] (Tube)			55.0
Temp. [℃] (Shell)	IN		0.0
	OUT		-232.9
Temp. [℃] (Tube)	IN		25.0
	OUT		142.8
Overall UA [kcal/C-h]			116.3
Mass flow [kg/h] (Shell)			7042.2
Mass Flow [kg/h] (Tube)			25.0
Temp. [℃] (Shell)	IN		30.0
	OUT		32.1
Temp. [℃] (Tube)	IN		32.0
	OUT		

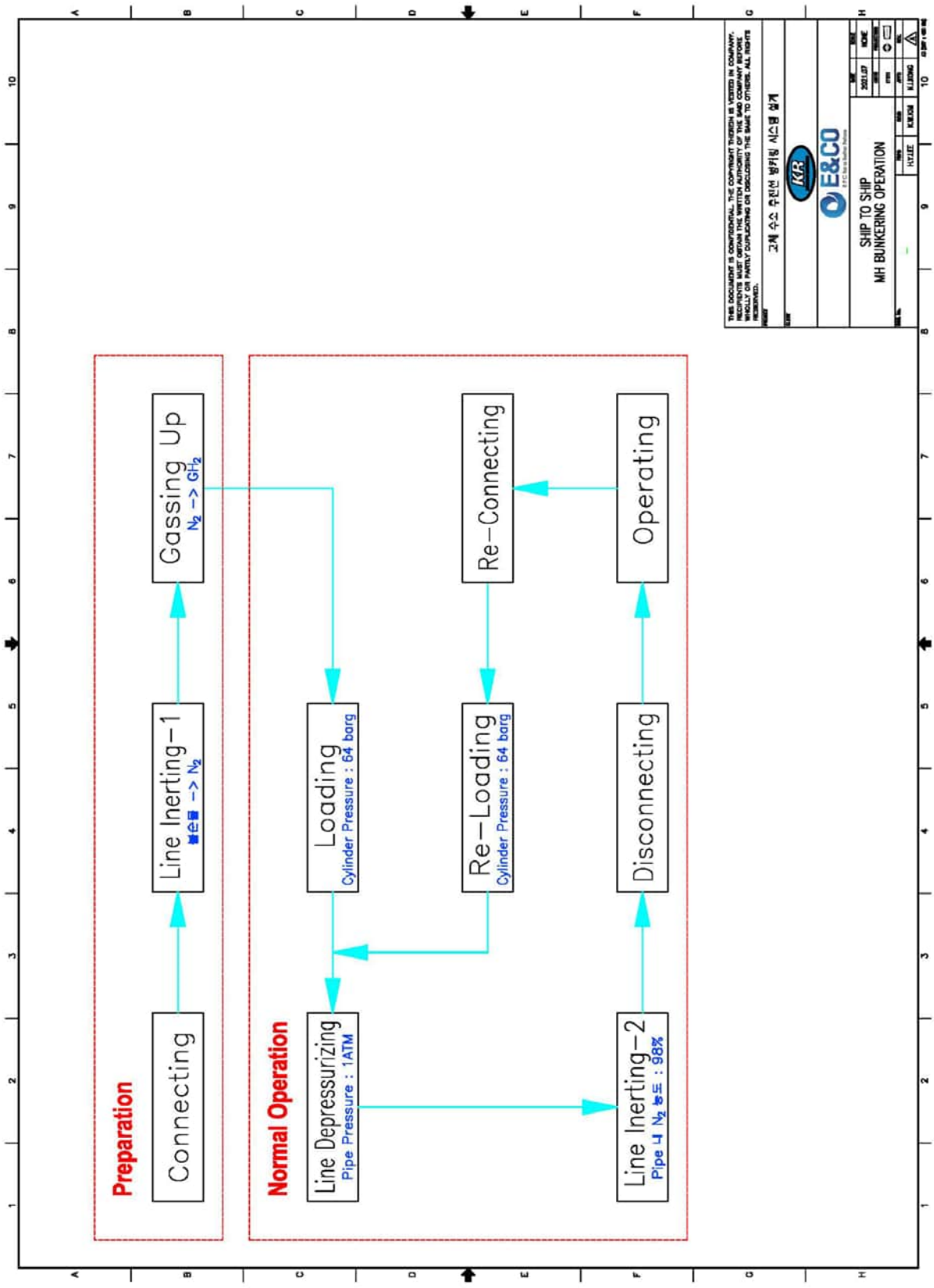
PE-303	
Equipment Size (Max)	
Overall UA [kcal/C-h]	
Mass flow [kg/h] (Shell)	
Mass Flow [kg/h] (Tube)	
Temp. [℃] (Shell)	IN
	OUT
Temp. [℃] (Tube)	IN
	OUT

4.4 MH Bunkering Operation 의 절차 및 소요 시간

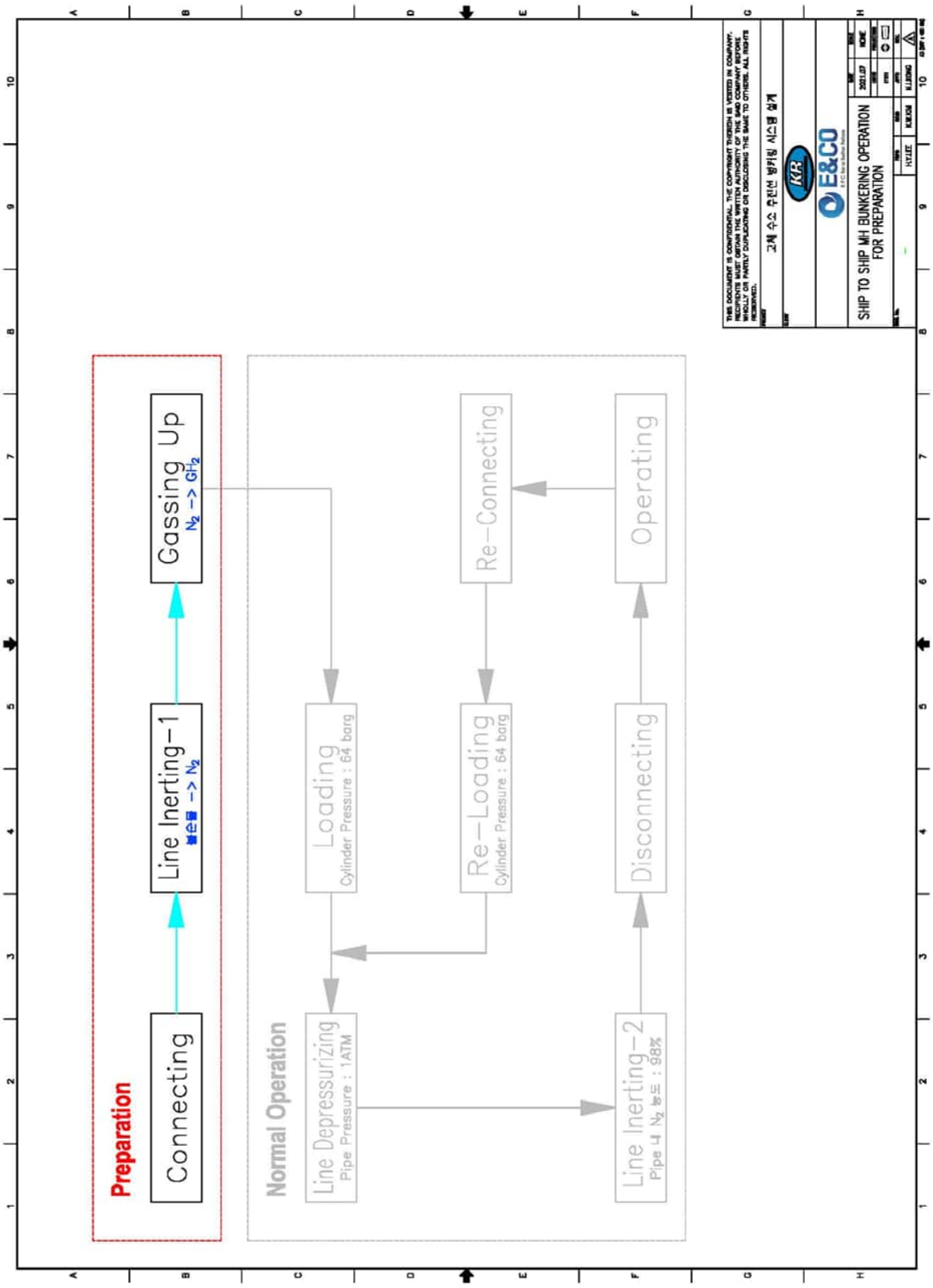
- 각각의 Operation 의 소요 시간은 대체로 다음과 같다.

Title		Purpose	Operating Duration
Preparation	Connecting	GH_2 Loading 을 위해 급유선박과 수취선박 연결	-
	Line Inerting-1	배관 내 불순물 제거	1 시간 이내
	Line Gassing Up	배관 내 N_2 를 GH_2 로 치환	1 시간 이내
Normal Operation	Loading (Filling)	Metal Hydride Cylinder 내 GH_2 충전	33 시간
	Line Depressurizing	배관 내 압력 감압 및 잔여 GH_2 Vent	1 시간 이내
	Line Inerting-2	배관 내 GH_2 를 N_2 로 치환	1 시간 이내
	Disconnecting	급유선박과 수취선박 연결 해제	-
	Operating	GH_2 를 추진 연료로 사용하기 위해 FGS 로 GH_2 공급	-
	Re-Connecting	GH_2 Re-Loading 을 위해 급유선박과 수취선박 재연결	-
	Re-Loading	Metal Hydride Cylinder 내 GH_2 재충전	33 시간

- MH Bunkering Operation 의 절차는 다음과 같다.



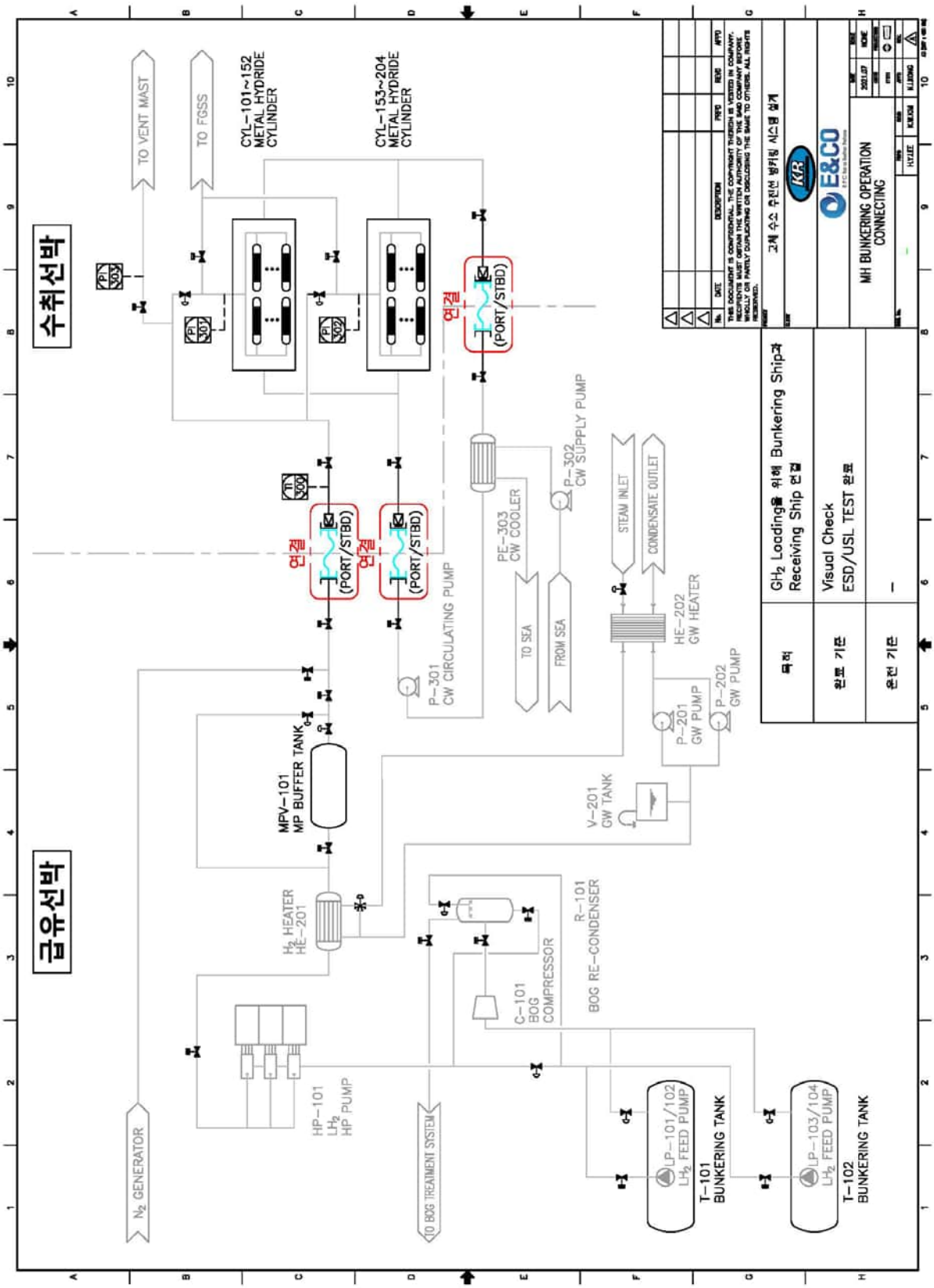
4.5 Preparation



4.5.1 Connecting

1) Bunkering Tank(T-101, T-102)와 Metal Hydride Cylinder(CYL-101~152, CYL-153~204)를 연결하기 위한 작업을 시작한다.
2) 모든 이송을 위한 밸브는 닫혀 있는 상태이며, 급유선박과 수취선박의 QC/DC 를 활용하여 Bunkering Hose 를 연결 시킨다. 이는 각 Manifold 에 연결되며 Manifold 를 통하여 Metal Hydride Cylinder 로 H_2 Gas Hydrogen 을 전달하게 된다.
3) Bunkering Hose 연결 후, ESD/USL TEST 를 하여 이상이 없음을 확인하고 Bunkering Mode 로 전환 한다. *5-6)

*5-6) HAZOP Worksheet 1-1


수취선박
급유선박
TO VENT MAST
TO FGSS
CYL-101~152
METAL HYDRIDE
CYLINDER
CYL-153~204
METAL HYDRIDE
CYLINDER
연결
(PORT/STBD)
P-301
CW CIRCULATING PUMP
PE-303
CW COOLER
P-302
CW SUPPLY PUMP
TO SEA
FROM SEA
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202
GW HEATER
P-201
GW PUMP
P-202
GW PUMP
V-201
GW TANK
MPV-101
MP BUFFER TANK
H2 HEATER
HE-201
C-101
BOG
COMPRESSOR
R-101
BOG RE-CONDENSER
HP-101
LH2
HP PUMP
N2 GENERATOR
TO BOG TREATMENT SYSTEM
LP-101/102
LH2 FEED PUMP
T-101
BUNKERING TANK
LP-103/104
LH2 FEED PUMP
T-102
BUNKERING TANK
목적
GH2 Loading을 위해 Bunkering Ship과 Receiving Ship 연결
완료 기준
Visual Check
ESD/USL TEST 완료
운전 기준
–
고체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계
MH BUNKERING OPERATION
CONNECTING
E&CO
KR

4.5.2 Line Inerting-1

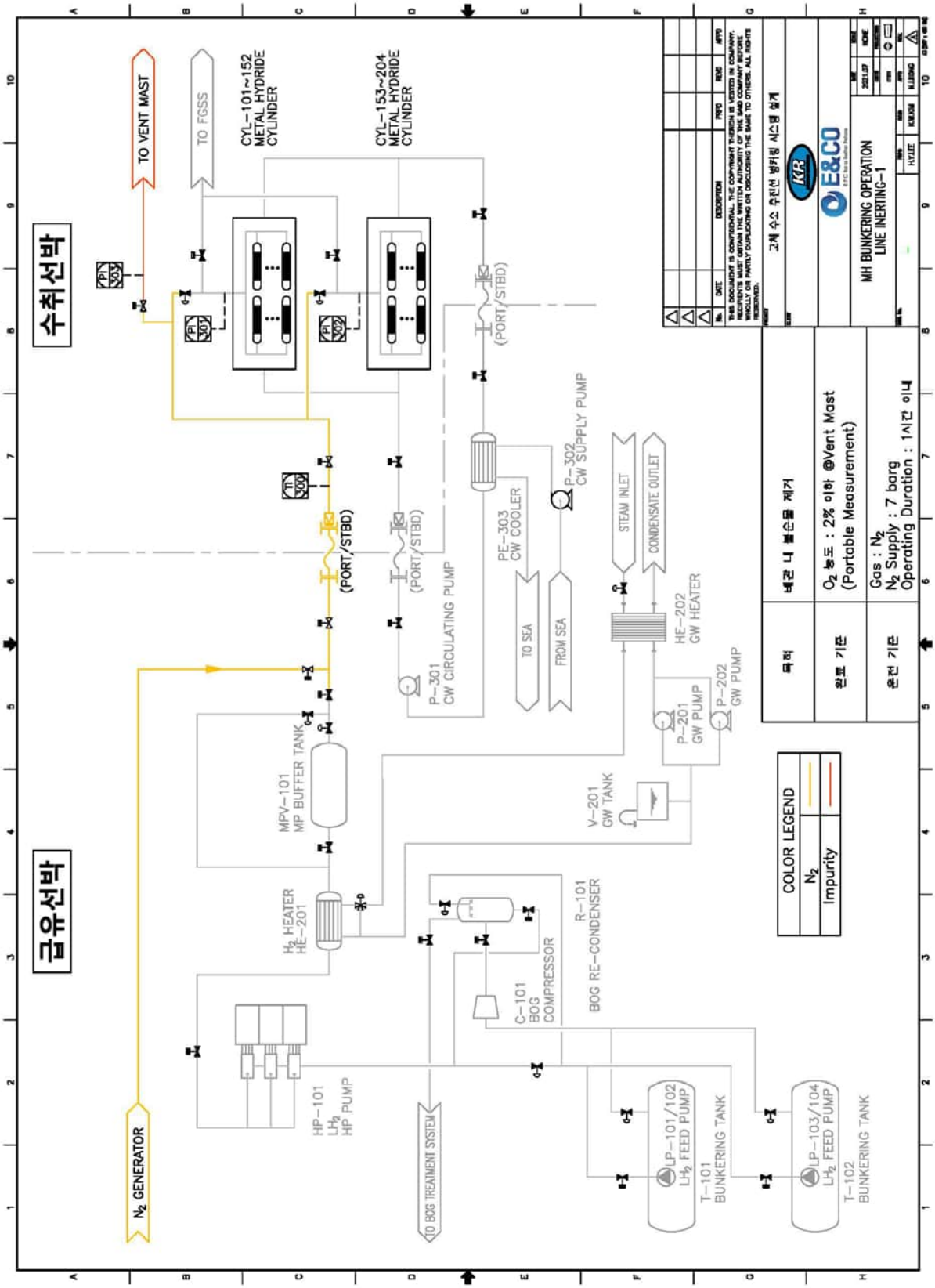
Connecting 후, 배관 내에 존재하는 Air 및 불순물을 제거하기 위해 N_2 로 치환하는 작업이다.

1) 기존 배관 내에 존재하는 Air 및 불순물은 Vent mast 로 방출된다.

2) 수소와 산소의 혼합 가스는 550℃ 이상으로 가열하거나 발화시키면 폭발할 위험이 있으므로 Vent mast 로 방출되는 Air 중 O_2 의 농도가 1% 이하[*5-7)]가 되도록 Generator 를 통해 N_2 를 공급해 준다.

---

*5-7) HAZOP Worksheet 1-16

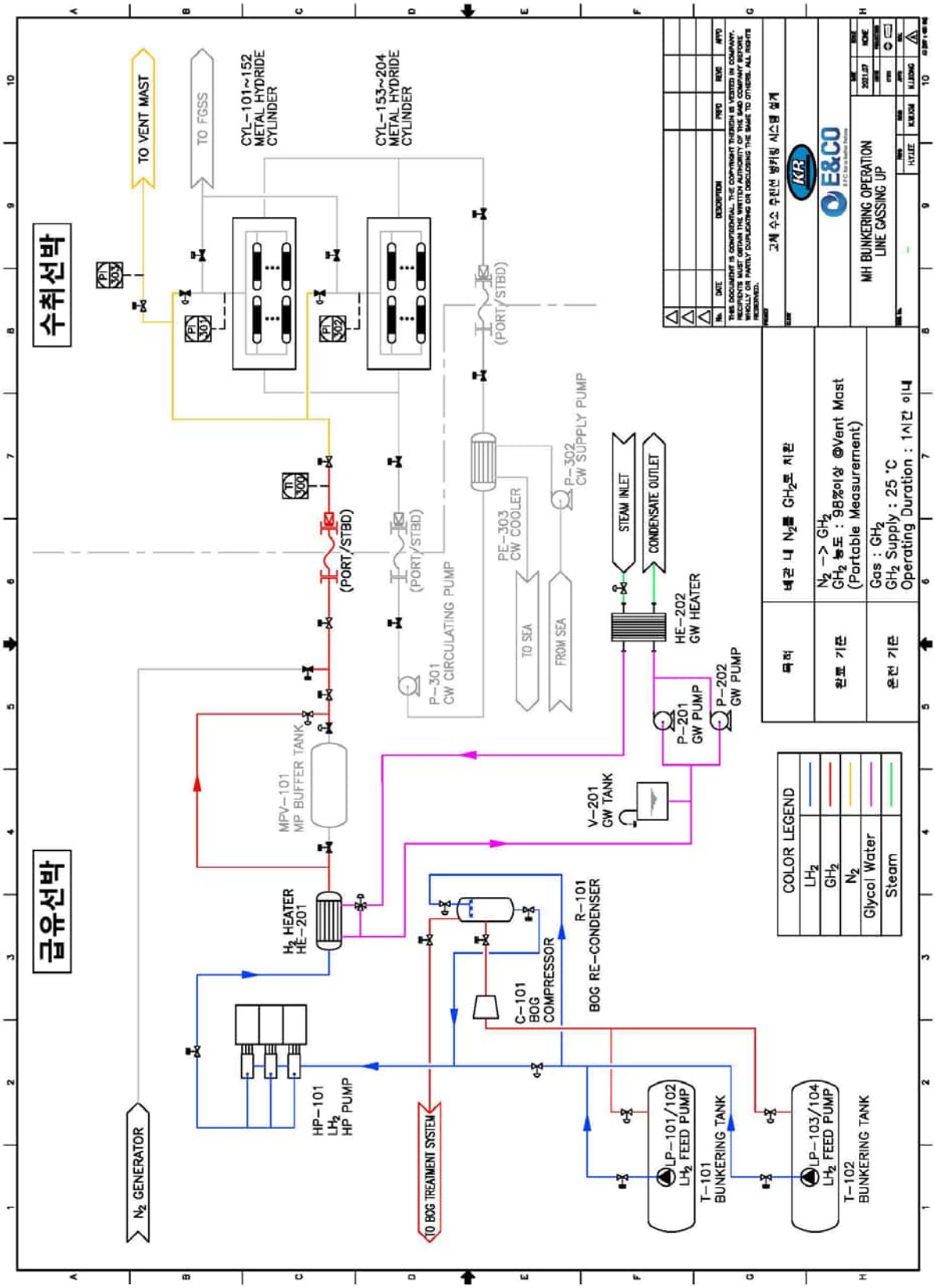

수취선박
급유선박
TO VENT MAST
TO FGSS
CYL-101~152
METAL HYDRIDE
CYLINDER
CYL-153~204
METAL HYDRIDE
CYLINDER
(PORT/STBD)
P-301
CW CIRCULATING PUMP
PE-303
CW COOLER
P-302
CW SUPPLY PUMP
TO SEA
FROM SEA
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202
GW HEATER
P-201
GW PUMP
P-202
GW PUMP
V-201
GW TANK
MPV-101
MP BUFFER TANK
H2 HEATER
HE-201
R-101
BOG RE-CONDENSER
C-101
BOG
COMPRESSOR
HP-101
LH2
HP PUMP
TO BOG TREATMENT SYSTEM
N2 GENERATOR
LP-101/102
LH2 FEED PUMP
T-101
BUNKERING TANK
LP-103/104
LH2 FEED PUMP
T-102
BUNKERING TANK
COLOR LEGEND
N2
Impurity
목적
내관 내 불순물 제거
원료 기준
O2 농도 : 2% 이하 @Vent Mast
(Portable Measurement)
운전 기준
Gas : N2
N2 Supply : 7 barg
Operating Duration : 1시간 이내
고체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계
MH BUNKERING OPERATION
LINE INERTING-1
E&CO
KR

4.5.3 Line Gassing Up

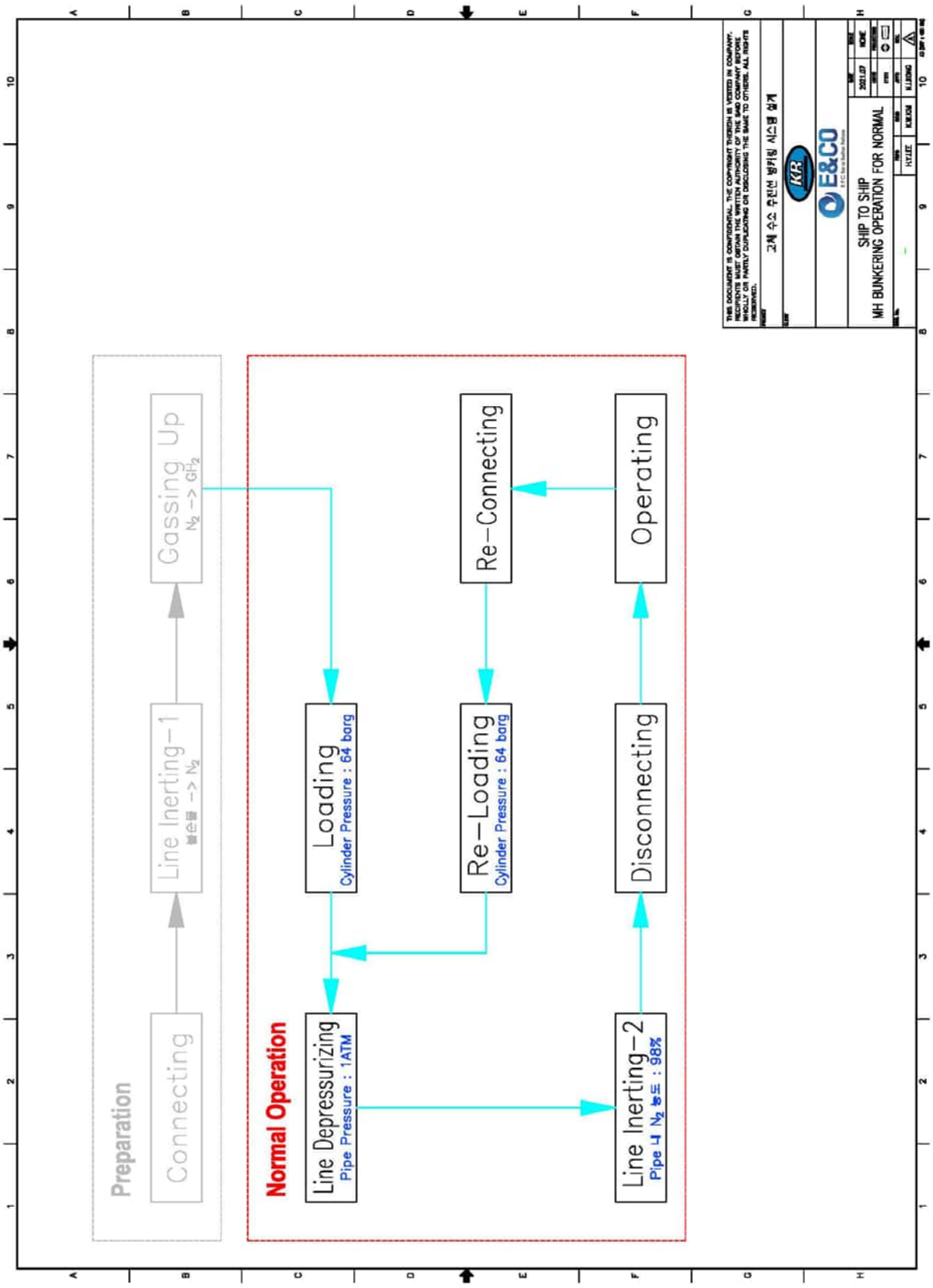
1) 배관 내에 존재하는 질소 가스를 수소 가스로 치환한다.
2) Bunkering Tank(T-101, T-102)에서 액화 수소를 Heater(HE-201)를 통해 기화시켜, 수소 가스를 공급하여 질소 가스를 Vent mast 로 방출한다.
3) Loading 시, 잔여 질소 가스가 얼음 형성이 되지 않도록 충분히 질소 가스를 제거해야 하며[*5-8)], Vent mast 에서 방출되는 가스가 수소 가스 농도 98% 이상이 되면 작업을 종료 한다.

---

*5-8) HAZOP Worksheet 1-5


수취선박
급유선박
TO VENT MAST
TO FGSS
CYL-101~152
METAL HYDRIDE
CYLINDER
CYL-153~204
METAL HYDRIDE
CYLINDER
(PORT/STBD)
P-301
CW CIRCULATING PUMP
PE-303
CW COOLER
P-302
CW SUPPLY PUMP
TO SEA
FROM SEA
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202
GW HEATER
P-201
GW PUMP
P-202
GW PUMP
V-201
GW TANK
MPV-101
MP BUFFER TANK
H2 HEATER
HE-201
C-101
BOG
COMPRESSOR
R-101
BOG RE-CONDENSER
HP-101
LH2
HP PUMP
LP-101/102
LH2 FEED PUMP
T-101
BUNKERING TANK
LP-103/104
LH2 FEED PUMP
T-102
BUNKERING TANK
N2 GENERATOR
TO BOG TREATMENT SYSTEM
COLOR LEGEND
LH2
GH2
N2
Glycol Water
Steam
MH BUNKERING OPERATION
LINE CASSING UP
E&CO
KR

4.6 Normal Operation



4.6.1 Loading (Filling)

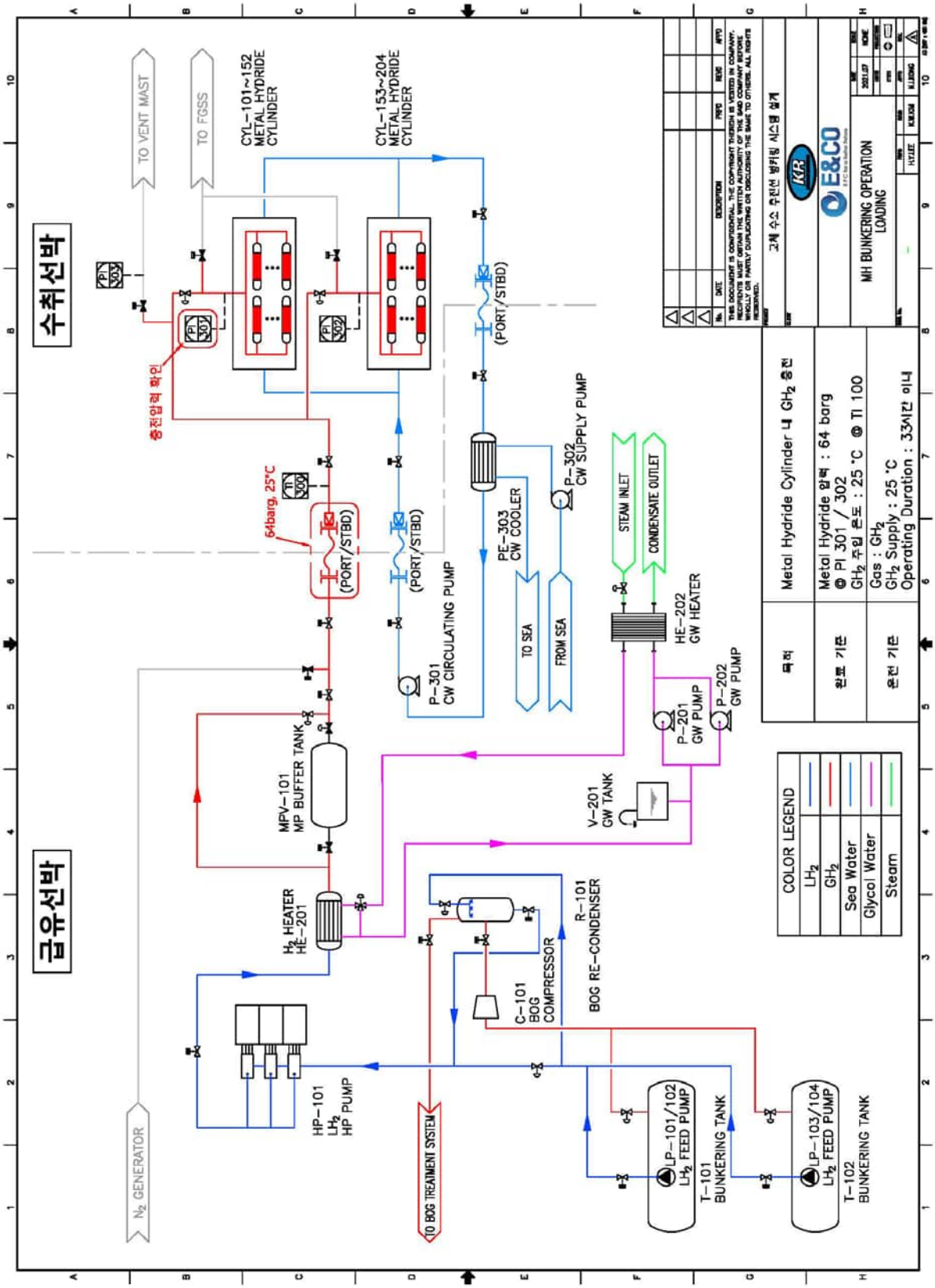
1) Loading 작업 전에 Bunkering, Receiving Tank 의 압력 및 온도를 확인한다. *5-9)

2) Bunkering Tank 에서 공급되는 수소는 High Pressure Pump(HP-101)와 Heater(HE-201)를 통해 64barg, 25°C 의 조건을 형성 후, 추진선의 Metal Hydride Cylinder(CYL-101~152, CYL-153~204)로 공급된다. 이때 상온으로 충전하므로, 온도 제어를 위한 Mixing 없이 Buffer Tank(MPV-101)를 거치지 않고 바로 Filling 한다.

3) Metal Hydride Cylinder(CYL-101~152, CYL-153~204)의 금속수소저장합금은 온도가 높으면 수소를 방출하고, 낮으면 흡수하는 성질을 가지고 있으며, 원활한 수소 흡장 및 흡장 시 발생되는 반응열을 식히기 위해 해수를 이용하여 Metal Hydride Cylinder(CYL-101~152, CYL-153~204)의 온도를 32°C 로 일정하게 유지시켜야 한다.

4) 충전 시간은 33 시간이며, 완료 기준은 Metal Hydride 전단 배관 압력이 64bar 이다. 배관 압력은 PI 301, PI 302 를 통해 확인이 가능하다.

*5-9) HAZOP Worksheet 6-5

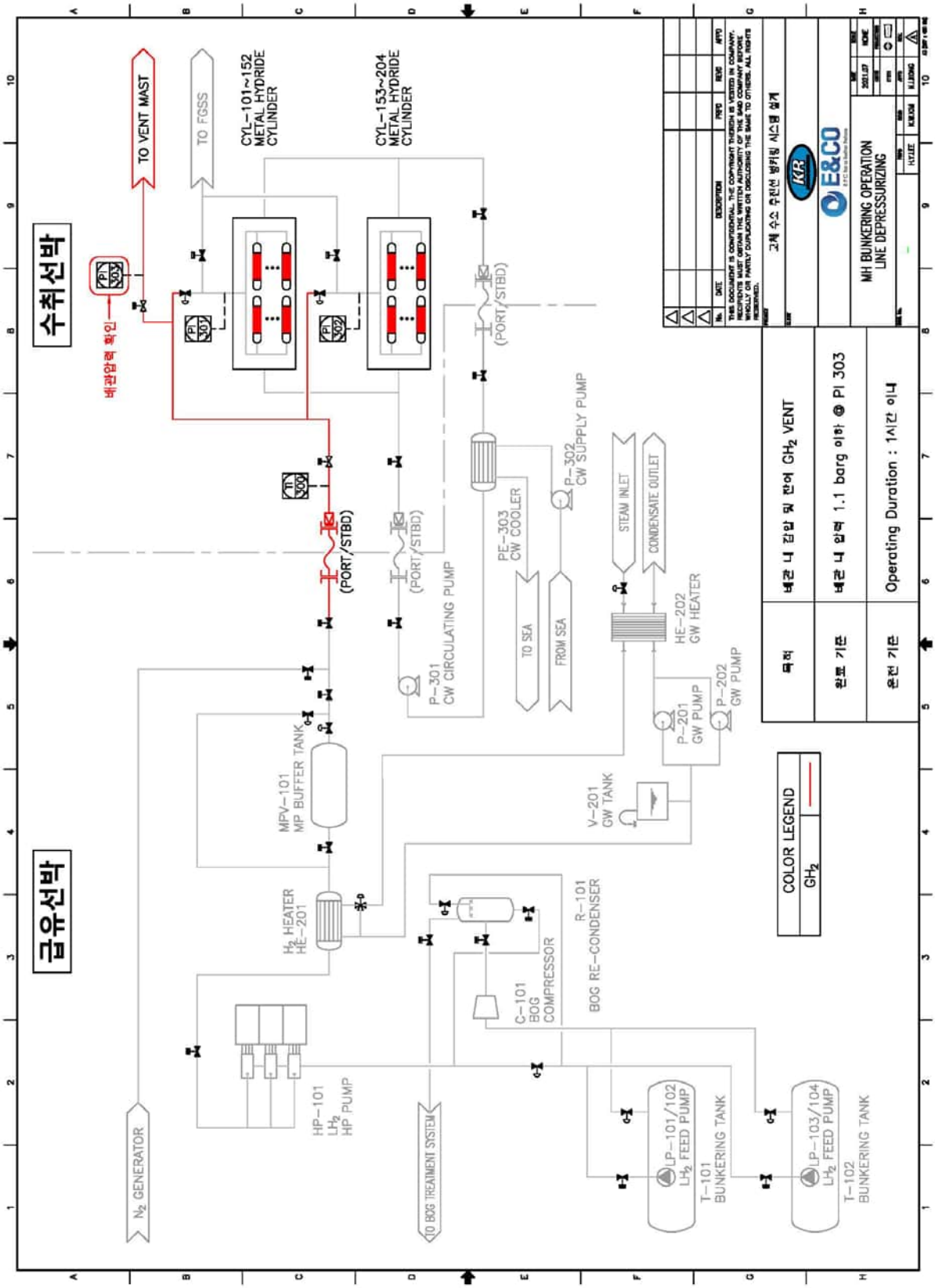

수취선박
급유선박
TO VENT MAST
TO FGSS
CYL-101~152
METAL HYDRIDE
CYLINDER
CYL-153~204
METAL HYDRIDE
CYLINDER
충전압력 확인
64barg, 25°C
(PORT/STBD)
(PORT/STBD)
(PORT/STBD)
P-301
CW CIRCULATING PUMP
PE-303
CW COOLER
P-302
CW SUPPLY PUMP
TO SEA
FROM SEA
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202
GW HEATER
P-201
GW PUMP
P-202
GW PUMP
V-201
GW TANK
MPV-101
MP BUFFER TANK
H2 HEATER
HE-201
C-101
BOG
COMPRESSOR
R-101
BOG RE-CONDENSER
HP-101
LH2
HP PUMP
LP-101/102
LH2 FEED PUMP
T-101
BUNKERING TANK
LP-103/104
LH2 FEED PUMP
T-102
BUNKERING TANK
TO BOG TREATMENT SYSTEM
N2 GENERATOR
COLOR LEGEND
LH2
GH2
Sea Water
Glycol Water
Steam
목적
Metal Hydride Cylinder 내 GH2 충전
운전 기준
Metal Hydride 압력 : 64 barg
@ PI 301 / 302
GH2 주입 온도 : 25 °C @ TI 100
운전 기준
Gas : GH2
GH2 Supply : 25 °C
Operating Duration : 33시간 이내
고체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계
E&CO
MH BUNKERING OPERATION
LOADING

4.6.2 Line Depressurizing

1) 충전 완료 후, Valve 를 개폐해서 배관에 존재하는 수소 가스를 감압 및 Vent mast 로 방출한다.
2) Vent mast 는 정전기로 인해 스스로 발화되는 경우를 방지하기 위해 Vent mast 의 끝 단에 정전기 방지링을 설치한다. *5-10)
3) 배관 내 압력이 1.1bar 이하를 완료 기준으로 하며, 배관의 압력은 PI 303 으로 확인이 가능하다.

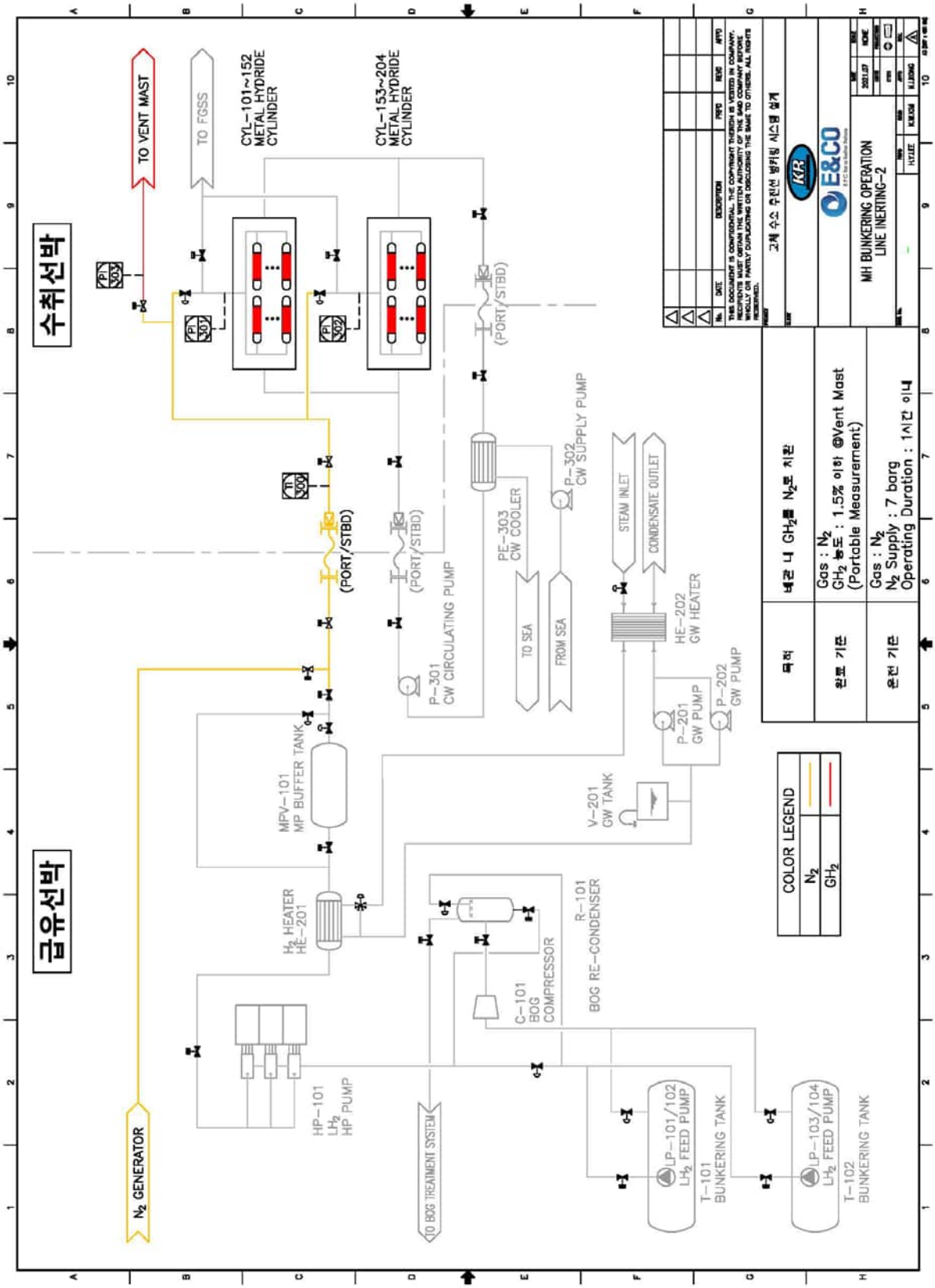
---

*5-10) KOSHA GUIDE D-42-2012 참고


수취선박
급유선박
TO VENT MAST
TO FGSS
CYL-101~152 METAL HYDRIDE CYLINDER
CYL-153~204 METAL HYDRIDE CYLINDER
배관압력 확인
(PORT/STBD)
P-301 CW CIRCULATING PUMP
PE-303 CW COOLER
P-302 CW SUPPLY PUMP
TO SEA
FROM SEA
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
V-201 GW TANK
MPV-101 MP BUFFER TANK
H2 HEATER HE-201
C-101 BOG COMPRESSOR
R-101 BOG RE-CONDENSER
HP-101 LH2 HP PUMP
N2 GENERATOR
TO BOG TREATMENT SYSTEM
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
COLOR LEGEND
GH2
목적
배관 내 잔압 및 잔여 GH2 VENT
완료 기준
배관 내 압력 1.1 barg 이하 @ PI 303
운전 기준
Operating Duration : 1시간 이내
고체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계
MH BUNKERING OPERATION
LINE DEPRESSURIZING
E&CO
KR

4.6.3 Line Inerting-2

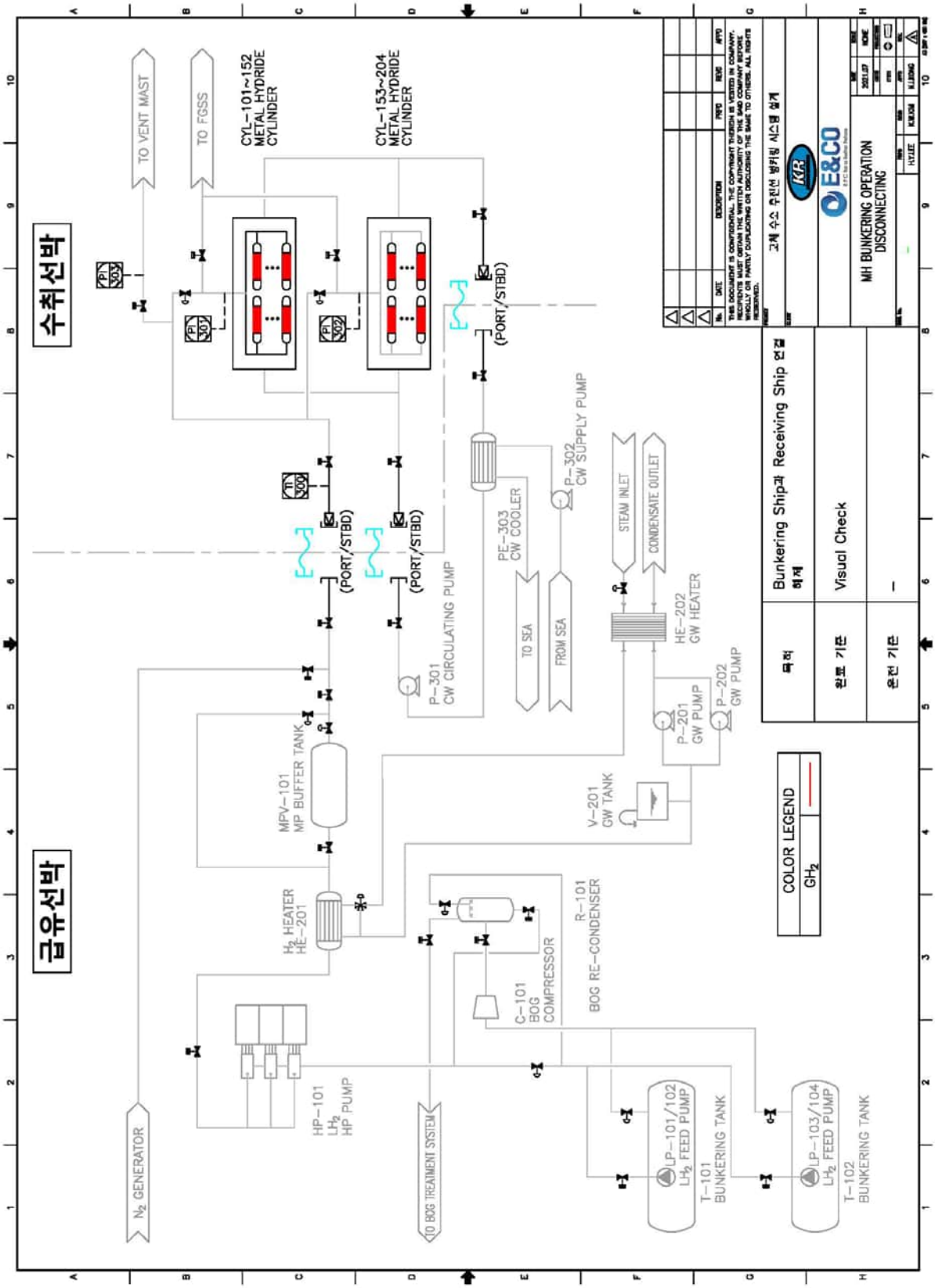
1) 배관 내에 잔여 수소 가스를 질소 가스로 치환하며 Metal Hydride Cylinder(CYL-101~152, CYL-153~204)로 질소가 들어가지 않도록, Valve 로 차단한다.
2) 수소는 가연성이 크고 산소와 결합 시 폭발적으로 반응하며 이는 폭발의 위험을 일으킨다. 그렇기 때문에 배관 내 수소를 제거 후 Bunkering Hose 를 제거해야 한다.
3) Generator 를 통해 질소를 공급하여 수소가스를 Vent mast 로 밀어낸 후, 수소가스 농도가 1.5% 이하가 되면 작업을 종료한다.


수취선박
급유선박
TO VENT MAST
TO FGSS
CYL-101~152
METAL HYDRIDE
CYLINDER
CYL-153~204
METAL HYDRIDE
CYLINDER
(PORT/STBD)
P-301
CW CIRCULATING PUMP
PE-303
CW COOLER
P-302
CW SUPPLY PUMP
TO SEA
FROM SEA
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202
GW HEATER
P-201
GW PUMP
P-202
GW PUMP
V-201
GW TANK
MPV-101
MP BUFFER TANK
H2 HEATER
HE-201
C-101
BOG
COMPRESSOR
R-101
BOG RE-CONDENSER
HP-101
LH2
HP PUMP
TO BOG TREATMENT SYSTEM
N2 GENERATOR
LP-101/102
LH2 FEED PUMP
T-101
BUNKERING TANK
LP-103/104
LH2 FEED PUMP
T-102
BUNKERING TANK
COLOR LEGEND
N2
GH2
목적
배관 내 GH2를 N2로 치환
완료 기준
Gas : N2
GH2 농도 : 1.5% 이하 @Vent Mast
(Portable Measurement)
운전 기준
Gas : N2
N2 Supply : 7 barg
Operating Duration : 1시간 이내
MH BUNKERING OPERATION
LINE INERTING-2
E&CO
KR

4.6.4 Disconnecting

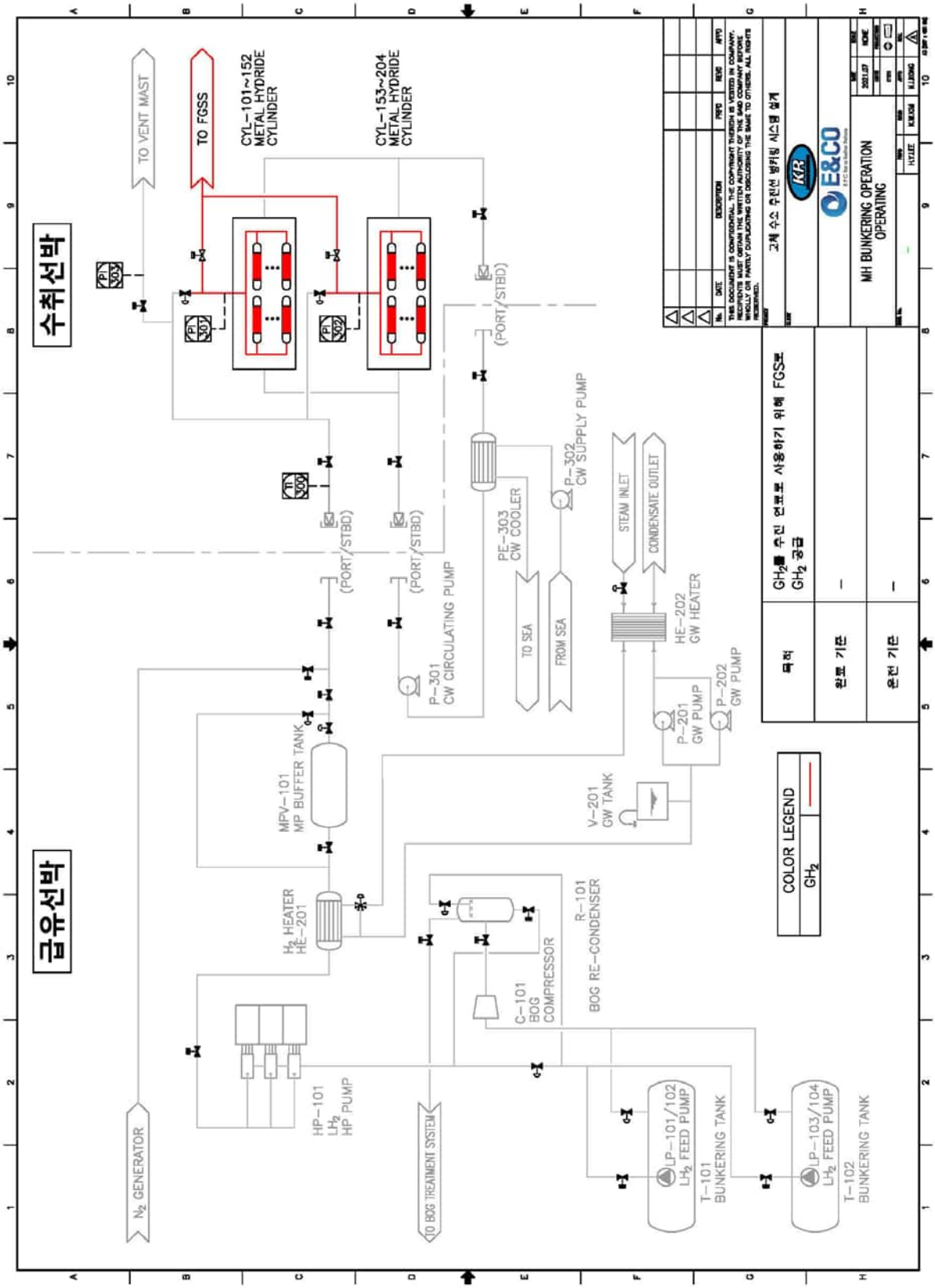
1) N_2 Purging Valve 를 통해 불활성 가스를 주입한다. 잔여액이 있는지 Drain Valve 를 통해 확인한다. *5-11)
2) 배관 내 모든 가스가 불활성 가스인 질소 가스로 치환되어 있는지 Gas Sampling 하여 확인한다.
3) 수소는 질소보다 가벼우므로 Gas Sampling 은 배관 라인의 Highest Point 에서 수행한다.
4) 불활성 가스는 반응성이 적으므로, 폭발의 위험성이 적고 대기에 누출되어도 이상이 없으므로, 배관 내 가스가 질소 가스임을 확인하고 연결 부위를 해제한다.

*5-11) HAZOP Worksheet 6-1


수취선박
급유선박
TO VENT MAST
TO FGSS
CYL-101~152
METAL HYDRIDE
CYLINDER
CYL-153~204
METAL HYDRIDE
CYLINDER
(PORT/STBD)
(PORT/STBD)
(PORT/STBD)
P-301
CW CIRCULATING PUMP
PE-303
CW COOLER
P-302
CW SUPPLY PUMP
TO SEA
FROM SEA
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202
GW HEATER
P-201
GW PUMP
P-202
GW PUMP
V-201
GW TANK
MPV-101
MP BUFFER TANK
H2 HEATER
HE-201
R-101
BOG RE-CONDENSER
C-101
BOG
COMPRESSOR
HP-101
LH2
HP PUMP
N2 GENERATOR
TO BOG TREATMENT SYSTEM
LP-101/102
LH2 FEED PUMP
T-101
BUNKERING TANK
LP-103/104
LH2 FEED PUMP
T-102
BUNKERING TANK
COLOR LEGEND
GH2
목적
Bunkering Ship과 Receiving Ship 연결 해제
완료 기준
Visual Check
운전 기준
–
E&CO
MH BUNKERING OPERATION
DISCONNECTING
고체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계

4.6.5 Operating

Bunkering Tank(T-101, T-102)와 Metal Hydride Cylinder(CYL-101~152, CYL-153~204)가 연결 해제 되었으며, Metal Hydride Cylinder(CYL-101~152, CYL-153~204)는 정상적으로 GH_2를 추진 연료로 사용하기 위해 FGS 로 GH_2를 공급한다.

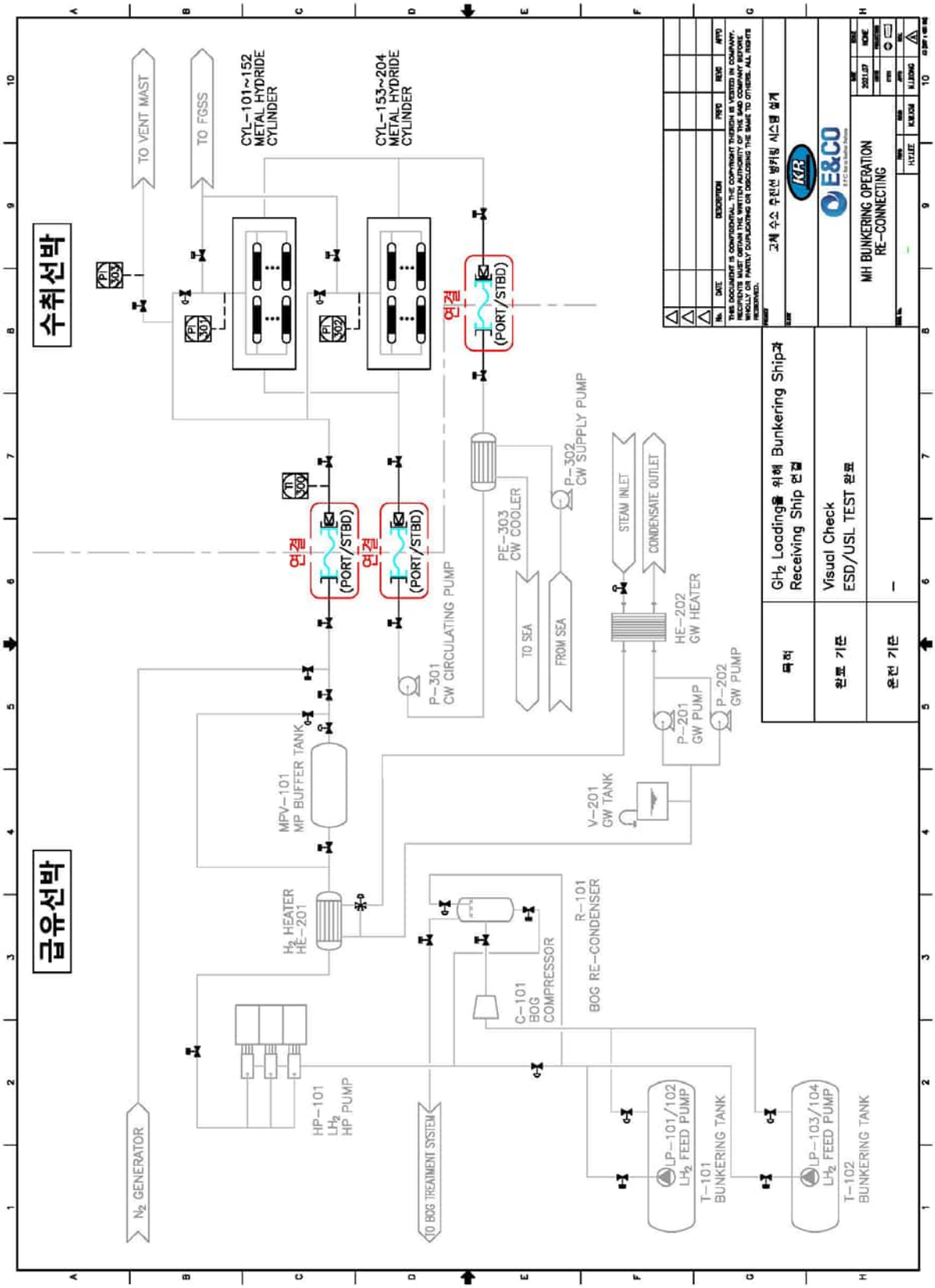


수취선박
급유선박
TO VENT MAST
TO FGSS
CYL-101~152 METAL HYDRIDE CYLINDER
CYL-153~204 METAL HYDRIDE CYLINDER
(PORT/STBD)
P-302 CW SUPPLY PUMP
PE-303 CW COOLER
P-301 CW CIRCULATING PUMP
TO SEA
FROM SEA
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202 GW HEATER
P-201 GW PUMP
P-202 GW PUMP
V-201 GW TANK
MPV-101 MP BUFFER TANK
H2 HEATER HE-201
R-101 BOG RE-CONDENSER
C-101 BOG COMPRESSOR
HP-101 LH2 HP PUMP
N2 GENERATOR
TO BOG TREATMENT SYSTEM
LP-101/102 LH2 FEED PUMP
T-101 BUNKERING TANK
LP-103/104 LH2 FEED PUMP
T-102 BUNKERING TANK
COLOR LEGEND
GH2
GH2를 추진 연료로 사용하기 위해 FGS로 GH2 공급
목적
완료 기준
운전 기준
고체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계
MH BUNKERING OPERATION OPERATING

4.6.6 Re-Connecting

1) Bunkering Tank(T-101, T-102)와 Metal Hydride Cylinder(CYL-101~152, CYL-153~204)를 연결하기 위한 작업을 시작한다.
2) 모든 이송을 위한 밸브는 닫혀 있는 상태이며, 급유선박과 수취선박의 QC/DC 를 활용하여 Bunkering Hose 를 연결시킨다.
3) 이는 각 Manifold 에 연결되며, Manifold 를 통하여 Metal Hydride Cylinder(CYL-101~152, CYL-153~204)로 H_2 Gas Hydrogen 을 전달하게 된다.
4) Bunkering Hose 연결 후, ESD/USL TEST 를 하여 이상이 없음을 확인하고 Bunkering Mode 로 전환한다. *5-12)

*5-12) HAZOP Worksheet 1-1


수취선박
급유선박
TO VENT MAST
TO FGSS
CYL-101~152
METAL HYDRIDE
CYLINDER
CYL-153~204
METAL HYDRIDE
CYLINDER
연결
(PORT/STBD)
P-301
CW CIRCULATING PUMP
PE-303
CW COOLER
P-302
CW SUPPLY PUMP
TO SEA
FROM SEA
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202
GW HEATER
P-201
GW PUMP
P-202
GW PUMP
V-201
GW TANK
MPV-101
MP BUFFER TANK
H2 HEATER
HE-201
C-101
BOG
COMPRESSOR
R-101
BOG RE-CONDENSER
HP-101
LH2
HP PUMP
N2 GENERATOR
TO BOG TREATMENT SYSTEM
LP-101/102
LH2 FEED PUMP
T-101
BUNKERING TANK
LP-103/104
LH2 FEED PUMP
T-102
BUNKERING TANK
목적
GH2 Loading을 위해 Bunkering Ship과 Receiving Ship 연결
완료 기준
Visual Check
ESD/USL TEST 완료
운전 기준
–
고체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계
MH BUNKERING OPERATION
RE-CONNECTING
E&CO
KR

4.6.7 Re-Loading (Filling)

1) Loading 작업 전에 Bunkering, Receiving Tank 의 압력 및 온도를 확인한다. *5-13)

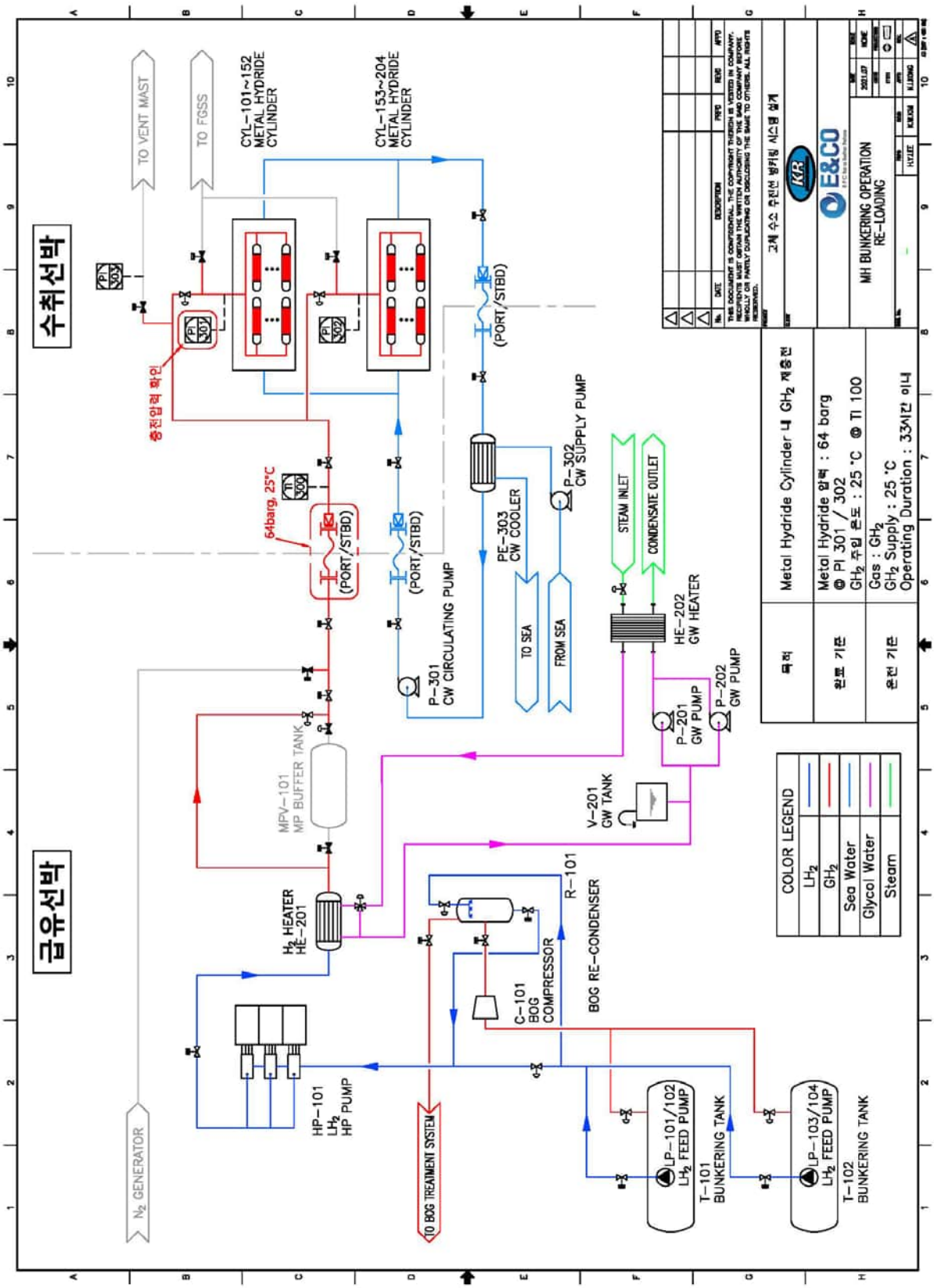
2) Bunkering Tank 에서 공급되는 수소를 High Pressure Pump(HP-101)와 Heater(HE-201)를 사용하여 64barg, 25°C 의 압력, 온도조건을 형성 후, 수취선박의 Metal Hydride Cylinder(CYL-101~152, CYL-153~204)로 재 공급된다. 이때 상온으로 충전하므로, 온도 제어를 위한 Mixing 없이 Buffer Tank(MPV-101)를 거치지 않고 바로 Filling 한다.

3) Metal Hydride Cylinder(CYL-101~152, CYL-153~204)의 금속수소저장합금은 온도가 높으면 수소를 방출하고, 낮으면 흡수하는 성질을 가지고 있으며, 원활한 수소 흡장 및 흡장 시 발생하는 반응열을 식히기 위해 해수를 이용하여 Metal Hydride Cylinder(CYL-101~152, CYL-153~204)의 온도를 32°C 로 일정하게 유지시켜야 한다.

4) 충전 시간은 33 시간이며, 완료 기준은 Metal Hydride 전단 배관 압력이 64bar 이다. 배관 압력은 PI 301, PI 302 를 통해 확인이 가능하다.

---

*5-12) HAZOP Worksheet 6-5


수취선박
급유선박
TO VENT MAST
TO FGSS
CYL-101~152
METAL HYDRIDE
CYLINDER
CYL-153~204
METAL HYDRIDE
CYLINDER
충전압력 확인
64barg, 25°C
(PORT/STBD)
(PORT/STBD)
(PORT/STBD)
P-301
CW CIRCULATING PUMP
PE-303
CW COOLER
P-302
CW SUPPLY PUMP
TO SEA
FROM SEA
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
HE-202
GW HEATER
P-201
GW PUMP
P-202
GW PUMP
V-201
GW TANK
MPV-101
MP BUFFER TANK
H2 HEATER
HE-201
R-101
BOG RE-CONDENSER
C-101
BOG
COMPRESSOR
HP-101
LH2
HP PUMP
LP-101/102
LH2 FEED PUMP
T-101
BUNKERING TANK
LP-103/104
LH2 FEED PUMP
T-102
BUNKERING TANK
TO BOG TREATMENT SYSTEM
N2 GENERATOR
COLOR LEGEND
LH2
GH2
Sea Water
Glycol Water
Steam
목적
Metal Hydride Cylinder 내 GH2 제충전
원료 기준
Metal Hydride 압력 : 64 barg
@ PI 301 / 302
GH2 주입 온도 : 25 °C @ TI 100
운전 기준
Gas : GH2
GH2 Supply : 25 °C
Operating Duration : 33시간 이내
E&CO
MH BUNKERING OPERATION
RE-LOADING

[부록 1] 수소 벙커링 체크리스트

수소의 상태별(기체/액체/고체) 안전한 수소 벙커링을 위해 각 작업 단계별 다음과 같은 안전사항을 체크하여야 한다.

1 기체수소(GH_2) 벙커링 체크리스트

1.1 Part A: 계획단계 체크리스트 (Planning Stage Check-list)

본 체크리스트는 GH_2연료 벙커링 작업의 계획단계에서 완료가 되어야 하며, 실제 작업 준비에 필요한 정보를 사전에 교환하기 위한 지침이다.

- 계획된 날짜 및 시간 :
- 지정된 GH_2 bunkering 위치 :
- GH_2 수취 선박 :
- GH_2 bunkering vessel :

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
1	해당관청이 특정 위치 및 시간에 대한 GH_2 운송 작업에 대한 권한 부여 여부 확인?			P	
2	터미널의 특정 위치 및 시간에 대한 GH_2 운송 작업에 대한 권한부여 여부 확인?			P	
3	해당관청은 규정에 따라 GH_2 벙커링 작동 시작을 통보 받았는지 확인?				통보날짜/시간:
4	해당관청의 요구 사항이 준수되고 있는지 확인?				
5	현지 터미널 요구 사항이 준수되고 있는지 확인?				
6	GH_2 벙커링 운영에 관련된 모든 직원은 적절한 교육을 받고 특정 GH_2 벙커링 장비 및 절차에 대해 교육을 받았는지 확인?				
7	수취선박과 급유선박의 선급 승인된 벙커링 계획 및 운영 매뉴얼을 사용할 수 있는지 확인?				

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
8	수취선박과 급유선박의 계류 및 펜더 배치가 동의되었는지 확인?				
9	수취선박과 급유선박이 나란히 가기 위해 필요한 허가를 받았는지 확인?				
10	벙커링 작동 영역을 충분히 조명(Illumination) 이 되는지 확인?				
11	모든 GH_2 운송 및 가스 감지 장비는 양호한 상태이며 인증된 서비스에 적합한지 확인?				
12	벙커링 및 퍼지 작업 절차가 수취선박과 급유선박 사이에 합의되었는지?			A	절차:
13	전기 절연 시스템 및 방법은 수취선박과 급유선박에 의해 합의되었는지?			A	방법:
14	제한구역이 합의되고 지정되었는지?			A	안전구역 _____ m
15	발화원에 관한 규정을 준수 할 수 있는지?				
16	현지 요구사항에 따라 필요한 소방 장비를 즉시 사용할 수 있는지?				

계획에 관련된 담당자의 등록 (For registration involved representatives in the planning)

구분	수취선박 (Receiving Vessel)	급유선박 (Bunkering Vessel)	터미널 (Terminal)
이름 (Name)			
직급 (Rank)			
날짜 (Date)			
시간 (Time)			

1.2 Part B: 계획된 동시 작업 체크리스트 (Planned Simultaneous Activities Check-list)

본 내용은 실제 전송 작업이 시작되기 전에 완료되어야 한다.

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
17	계획된 다른 연료 벙커링이 GH_2 벙커링 중에 실시될 경우 승인된 운영지침을 만족하는지?				해당되는 경우
18	계획된 화물이송작업이 GH_2 벙커링 중에 실시될 경우 승인된 운영지침을 만족하는지?			A	해당되는 경우
19	관할 당국이 GH_2 벙커링 중에 다른 연료 벙커링/또는 화물 작업을 동시에 실시하는 것을 승인하였는지?			P	해당되는 경우
20	수취선박의 승인된 운영지침에 언급된 바와 같이 동시 작업에 대한 안전 절차와 완화 조치는 모든 관련 당사자가 동의하고 준수하는지?			A R	해당되는 경우

1.3 Part C: 사전이송단계 체크리스트 (Pre Transfer Check-list)

본 내용은 실제 전송 작업이 시작되기 전에 완료되어야 한다.

- 날짜 및 시간 :
- 지정된 GH_2 bunkering 위치 :
- GH_2 수취 선박 :
- GH_2 bunkering vessel :

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
21	파트 A 계획단계 체크리스트는 실제 작동 이전 및 준비에 사용되는지?				
22	해당 관청은 현지 규정에 따라 벙커링 작업 시작을 통보 받았는지 확인?				
23	터미널은 터미널 규정에 따라 벙커 운영 시작을 통보 받았는지 확인?				
24	현재 날씨 및 파도 조건이 합의 된 한계 내에 있는지?			A R	
25	수취선박과 급유선박이 안전하게 계류되어 있고, 계류 장치에 관한 규정이 준수되고, 펜더가 충분한지 확인?			R	
26	수취선박과 급유선박 사이에는 안전한 접근 방법이 있는지?			R	
27	모든 필수 소방 장비는 즉시 사용할 수 있는지?				
28	벙커링 작동영역의 밝기가 충분한지?			A R	
29	수취선박과 급유선박은 안전하게 방해 받지 않는 방향으로 자신의 힘으로 움직일 수 있는지?			R	

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
30	책임자에 의한 벙커링 작업에 대한 적절한 감독이 수취선박과 급유선박에서 이루어지고 있는지?				
31	수취선박과 급유선박에서 담당 운영자와 감독자 간의 효과적인 의사소통 수단이 확립되고 테스트되었는지? 그리고 통신 언어가 동의되었는지?			A R	VHF/UHF channel: 언어: Primary & backup system:
32	비상 정지 신호 및 종료 절차는 모든 관련 인원에게 합의, 테스트 및 설명되었는지? 비상 절차, 계획 및 연락처는 담당자에게 통보하였는지?			A	비상정지신호:
33	미리 정해진 제한 구역이 설정되었는지? 그리고 표지판에 영역 표시가 되어 있는지?			A	
34	제한 구역에는 다른 선박, 승인되지 않은 사람, 물건 및 발화원이 없는지?			R	
35	낙하물 방지를 위한 안전 절차 및 완화 조치가 협의되고, 모든 관련 당사자가 준수하고 있는지?			R	
36	수취선박에는 갑판 당직원이 배치가 되어 있는지?				갑판 당직원은 계류, 펜더 및 동시 작업에 특히 주의를 기울일 것.

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
37	수취선박과 급유선박 모두에 GH_2 벙커링 담당자가 배치되어 있는지?				벙커링 담당자는 호스, 매니폴드 및 벙커 제어에 특히 주의를 기울일 것.
38	외부 도어, 포트홀 및 거주구역 환기구는 작동 지침서에 따라 닫혀 있는지?			R	No lock
39	가스 감지 장비는 작동 테스트를 거쳤으며 정상적으로 작동하는지?				
40	공급된 GH_2 연료에 대한 물질 안전 보건 자료 (MSDS)가 비치되었는지?			A	
41	발화원에 관한 규정이 준수되고 있는지?			R	
42	적절하고 충분한 보호복과 장비는 즉시 사용할 수 있는지?				
43	벙커링 호스의 연결 및 분리에 관련된 인원과 이러한 작업 근처에 있는 인원은 충분하고 적절한 보호복과 장비를 사용하고 있는지?				
44	동력의 비상 풀림 커플링 (Powered Emergency Release Coupling, PERC)이 설치되어 빠르게 작동되는 ESD 밸브와 함께 즉시 사용할 수 있는지 확인?				적용된 경우
45	물 분무 시스템이 테스트 되었으며 즉시 사용할 수 있는지?				적용된 경우
46	벙커링 장치(펌프, 컴프레서 등)의 작동 상태가 양호한지?			A	적용된 경우

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
47	모든 제어 밸브는 잘 관리되고 작동 상태가 양호한지?				
48	벙커링 시스템 게이지 및 고압 경보가 작동하고 올바르게 설정되어 있으며 양호한 작동 상태인지 확인?				
49	수취선박의 벙커링 탱크는 항상 실수로 인하여 넘치지 않도록 보호되며 탱크 내용물은 지속적으로 모니터링 되며 경보가 올바르게 설정되고 동작되는지 확인?			R	
50	GH_2 시설의 모든 안전 및 제어 장치를 점검하고 테스트한 결과 작동 상태가 양호한지?				
51	압력 제어 장비의 작동상태가 양호한지?				
52	Vapour 연결부가 올바르게 연결되고 지지되어 있는지?				적용된 경우
53	수취선박과 급유선박에서 ESD, 자동 밸브 또는 이와 유사한 장치가 테스트되고 작동 상태가 양호하며 사용 준비가 되었는지? ESD의 closing rate가 상호간 합의되었는지?			A	본선ESD: Bunkering station ESD:
54	초기 GH_2 벙커링 라인업이 점검되고, 사용하지 않는 연결구들은 닫히고 비워졌으며 완전히 볼트로 고정되었는지?				

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
55	GH_2 벙커링 호스, 고정 파이프 라인 및 매니폴드는 상태가 양호하고, 적절하게 준비되어 있고, 지지되며, 올바르게 연결되어 있으며, 누출 테스트 및 GH_2 이송에 문제가 없는지?				
56	수취선박과 급유선박 사이 GH_2 벙커링 매니폴드에 건식분리형 커플링(Dry Disconnection Coupling, DDC)이 제공되었는지?				적용된 경우
57	수취선박과 급유선박 사이의 GH_2 벙커링 연결 부에는 적절한 전기 절연 수단이 제공되었는지?				
58	GH_2 벙커 연결부의 건식 브레이크 커플링 (Dry breakaway coupling)이 위치하여 있고, 육안으로 작동하는지 검사한 결과 작동 상태가 양호한지?			A	
59	수취선박의 비상 화재 관리 계획 (Ship's emergency fire control plan)이 비치되어 있는지?				적용된 경우 위치:
60	국제육상시설연결구 (International shore connection)가 공급되었는지?				적용된 경우
61	GH_2 연료 벙커링 운송 작업이 시작되고 근처에 있는 다른 선박에 정보를 제공하였는지 확인?				통보날짜/시간:

1.4 Part D: GH_2 연료 이송 데이터 (GH_2 fuel Transfer Data)

합의된 GH_2 벙커링 시작온도 및 압력 (Agreed starting temperature and pressure of GH_2)

합의된 수량 단위: □ m^3□ Tones □ _____

구분	수취선박 (Receiving Vessel)		급유선박 (Bunkering Vessel)		비고
GH_2 연료탱크 시작 온도					°C/°F
GH_2 연료탱크 시작 압력					kg/cm^2, bar, psi
GH_2 연료탱크 벙커링 가능용량					PQU

* PQU: Physical Quantity Unit

합의된 GH_2 벙커링 작업(Agreed bunker operations of GH_2)

합의된 수량 단위: □ m^3□ Tones □ _____

구분	GH_2 연료탱크 No.1	GH_2 연료탱크 No.2	비고
합의된 이송 수량			PQU
매니폴드에서 시작 압력			kg/cm^2, bar, psi
이송시작속도			PQU per hour
최대이송속도			PQU per hour
Topping up 속도			PQU per hour
매니폴드에서 최대 압력			kg/cm^2, bar, psi

합의된 GH_2 연료 최대 및 최소(Agreed maximum and minimum)

구분	최대 (Maximum)	최소 (Minimum)	비고
벙커링 중 압력			kg/cm^2, bar, psi
GH_2 연료탱크내부 압력			kg/cm^2, bar, psi
GH_2 온도			°C
GH_2 연료탱크 Filling limit			%

합의된 GH_2 벙커링/오일 벙커링 동시작업 (Agreed simultaneous GH_2 bunker / Oil bunker operations)

오일 벙커링 작업의 경우 별도의 체크리스트를 작성해야 한다.

Oil bunkering 작업	수취선박 (Receiving Vessel)	급유선박 (Bunkering Vessel)	터미널 (Terminal)

합의된 GH_2 벙커링/화물 동시작업 (Agreed simultaneous GH_2 bunker / Cargo operations)

화물 작업	수취선박 (Receiving Vessel)	급유선박 (Bunkering Vessel)	터미널 (Terminal)

GH_2 벙커링/화물작업 제한 (Restrictions in GH_2 bunker / Cargo operations)

제한 작업 내용	수취선박 (Receiving Vessel)	급유선박 (Bunkering Vessel)	터미널 (Terminal)

선언 (Declaration)

아래 서명한 사람들은 지침에 따라 Part A, B, C 및 D의 위 항목을 확인했으며 입력한 내용을 확인하였습니다.

또한 필요에 따라 반복적인 점검을 수행할 것이며, 체크리스트 목록에 'R'로 표시된 항목은 ____ 시간을 초과하지 않는 간격으로 다시 점검해야 한다는 데 동의했습니다.

품목의 상태가 변경되면 즉시 상대방에게 알리도록 하겠습니다.

구분	수취선박 (Receiving Vessel)	급유선박 (Bunkering Vessel)	터미널 (Terminal)
이름 (Name)			
직급 (Rank)			
날짜 (Date)			
시간 (Time)			

반복점검기록 (Record of repetitive checks)								
날짜 (Date)								
시간 (Time)								
서명 (본선)								
서명 (벙커링 선박)								
서명 (터미널)								

1.5 Part E: GH_2 연료 이송 후 체크리스트 (After GH2 fuel Transfer Check-list)

GH_2연료 이송작업 이후에 작성이 되어야 한다

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
62	GH_2 벙커링 호스, 고정 파이프 라인 및 매니폴드가 퍼지되어 분리할 준비가 되었는지?			A	
63	원격 및 수동 제어 밸브가 닫히고 분리할 준비가 되었는지?			A	
64	연결 부를 분리한 후 GH_2 이송 안전구역이 비활성화되어 표시가 제거되었는지?			A	
65	GH_2 벙커링 작업이 완료되고 인근에 있는 다른 선박들에게 정보를 제공하였는지?				시간:
66	GH_2 벙커링 작업이 완료되었다고 터미널에 통보하였는지?				시간:
67	해당되는 경우 실수 및 사고들을 해당관청에 보고가 되었는지?				Report No.:

선언 (Declaration)

아래 서명한 사람들은 지침에 따라 Part D의 위 항목 및 입력한 내용을 확인하였습니다.

구분	수취선박 (Receiving Vessel)	급유선박 (Bunkering Vessel)	터미널 (Terminal)
이름 (Name)			
직급 (Rank)			
날짜 (Date)			
시간 (Time)			

2 액체수소(LH_2) 벙커링 체크리스트

2.1 Part A: 계획단계 체크리스트 (Planning Stage Check-list)

본 체크리스트는 LH_2연료 벙커링 작업의 계획단계에서 완료가 되어야 하며, 실제 작업 준비에 필요한 정보를 사전에 교환하기 위한 지침이다.

- 계획된 날짜 및 시간 :
- 지정된 LH_2 bunkering 위치 :
- LH_2 수취 선박 :
- LH_2 bunkering vessel :

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
1	해당관청이 특정 위치 및 시간에 대한 LH_2 운송 작업에 대한 권한부여 여부 확인?			P	
2	터미널의 특정 위치 및 시간에 대한 LH_2 운송 작업에 대한 권한부여 여부 확인?			P	
3	해당관청은 규정에 따라 LH_2 벙커링 작동 시작을 통보 받았는지 확인?				통보날짜/시간:
4	해당관청의 요구 사항이 준수되고 있는지 확인?				
5	현지 터미널 요구 사항이 준수되고 있는지 확인?				
6	LH_2 벙커링 운영에 관련된 모든 직원은 적절한 교육을 받고 특정 LH_2 벙커링 장비 및 절차에 대해 교육을 받았는지 확인?				
7	수취선박과 급유선박의 선급 승인된 벙커링 계획 및 운영 매뉴얼을 사용할 수 있는지 확인?				

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
8	수취선박과 급유선박의 계류 및 펜더 배치가 동의되었는지 확인?				
9	수취선박과 급유선박이 나란히 가기 위해 필요한 허가를 받았는지 확인?				
10	벙커링 작동 영역을 충분히 조명(Illumination) 이 되는지 확인?				
11	모든 LH_2 운송 및 가스 감지 장비는 양호한 상태이며 인증된 서비스에 적합한지 확인?				
12	벙커링, 냉각 및 퍼지 작업 절차가 수취선박과 급유선박 사이에 합의되었는지?			A	절차:
13	전기 절연 시스템 및 방법은 수취선박과 급유선박에 의해 합의되었는지?			A	방법:
14	제한구역이 합의되고 지정되었는지?			A	안전구역 _____ m
15	발화원에 관한 규정을 준수 할 수 있는지?				
16	현지 요구사항에 따라 필요한 소방 장비를 즉시 사용할 수 있는지?				

계획에 관련된 담당자의 등록 (For registration involved representatives in the planning)

구분	수취선박 (Receiving Vessel)	급유선박 (Bunkering Vessel)	터미널 (Terminal)
이름 (Name)			
직급 (Rank)			
날짜 (Date)			
시간 (Time)			

2.2 Part B: 계획된 동시 작업 체크리스트 (Planned Simultaneous Activities Check-list)

본 내용은 실제 전송 작업이 시작되기 전에 완료되어야 한다.

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
17	계획된 다른 연료 벙커링이 LH_2 벙커링 중에 실시될 경우 승인된 운영지침을 만족하는지?				해당되는 경우
18	계획된 화물이송작업이 LH_2 벙커링 중에 실시될 경우 승인된 운영지침을 만족하는지?			A	해당되는 경우
19	관할 당국이 LH_2 벙커링 중에 다른 연료 벙커링/또는 화물 작업을 동시에 실시하는 것을 승인하였는지?			P	해당되는 경우
20	수취선박의 승인된 운영지침에 언급된 바와 같이 동시 작업에 대한 안전 절차와 완화 조치는 모든 관련 당사자가 동의하고 준수하는지?			A R	해당되는 경우

2.3 Part C: 사전이송단계 체크리스트 (Pre Transfer Check-list)

본 내용은 실제 전송 작업이 시작되기 전에 완료되어야 한다.

- 날짜 및 시간 :
- 지정된 LH2 bunkering 위치 :
- LH_2 수취 선박 :
- LH_2 bunkering vessel :

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
21	파트 A 계획단계 체크리스트는 실제 작동 이전 및 준비에 사용되는지?				
22	해당 관청은 현지 규정에 따라 벙커링 작업 시작을 통보 받았는지 확인?				
23	터미널은 터미널 규정에 따라 벙커 운영 시작을 통보 받았는지 확인?				
24	현재 날씨 및 파도 조건이 합의 된 한계 내에 있는지?			A R	
25	수취선박과 급유선박이 안전하게 계류되어 있고, 계류 장치에 관한 규정이 준수되고, 펜더가 충분한지 확인?			R	
26	수취선박과 급유선박 사이에는 안전한 접근 방법이 있는지?			R	
27	모든 필수 소방 장비는 즉시 사용할 수 있는지?				
28	벙커링 작동영역의 밝기가 충분한지?			A R	
29	수치선박과 급유선박은 안전하게 방해 받지 않는 방향으로 자신의 힘으로 움직일 수 있는지?			R	

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
30	책임자에 의한 벙커링 작업에 대한 적절한 감독이 수취선박과 급유선박에서 이루어지고 있는지?				
31	수취선박과 급유선박에서 담당 운영자와 감독자 간의 효과적인 의사소통 수단이 확립되고 테스트되었는지? 그리고 통신 언어가 동의되었는지?			A R	VHF/UHF channel: 언어: Primary & backup system:
32	비상 정지 신호 및 종료 절차는 모든 관련 인원에게 합의, 테스트 및 설명되었는지? 비상 절차, 계획 및 연락처는 담당자에게 통보하였는지?			A	비상정지신호:
33	미리 정해진 제한 구역이 설정되었는지? 그리고 표지판에 영역 표시가 되어 있는지?			A	
34	제한 구역에는 다른 선박, 승인되지 않은 사람, 물건 및 발화원이 없는지?			R	
35	낙하물 방지를 위한 안전 절차 및 완화 조치가 협의되고, 모든 관련 당사자가 준수하고 있는지?			R	
36	수취선박에는 갑판 당직원이 배치가 되어 있는지?				갑판 당직원은 계류, 펜더 및 동시 작업에 특히 주의를 기울일 것.

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
37	수취선박과 급유선박 모두에 LH_2 벙커링 담당자가 배치되어 있는지?				벙커링 담당자는 호스, 매니폴드 및 벙커 제어에 특히 주의를 기울일 것.
38	외부 도어, 포트홀 및 거주구역 환기구는 작동 지침서에 따라 닫혀 있는지?			R	No lock
39	가스 감지 장비는 작동 테스트를 거쳤으며 정상적으로 작동하는지?				
40	공급된 LH_2 연료에 대한 물질 안전 보건 자료 (MSDS)가 비치되었는지?			A	
41	발화원에 관한 규정이 준수되고 있는지?			R	
42	적절하고 충분한 보호복과 장비는 즉시 사용할 수 있는지?				
43	벙커링 호스의 연결 및 분리에 관련된 인원과 이러한 작업 근처에 있는 인원은 충분하고 적절한 보호복과 장비를 사용하고 있는지?				
44	동력의 비상 풀림 커플링 (Powered Emergency Release Coupling, PERC)이 설치되어 빠르게 작동되는 ESD 밸브와 함께 즉시 사용할 수 있는지 확인?				적용된 경우
45	물 분무 시스템이 테스트 되었으며 즉시 사용할 수 있는지?				적용된 경우

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
46	적절한 용량을 가진 유출 방지 장치 (Drip tray)가 제 위치에 있으며 비어 있는지 확인?				
47	극저온에 대한 선체 및 갑판 보호 기능이 있는지?				적용된 경우
48	벙커링 장치(펌프, 컴프레서 등)의 작동 상태가 양호한지?			A	적용된 경우
49	모든 제어 밸브는 잘 관리되고 작동 상태가 양호한지?				
50	벙커링 시스템 게이지, 고액면 경보 및 고압 경보가 작동하고 올바르게 설정되어 있으며 양호한 작동 상태인지 확인?				
51	수취선박의 벙커링 탱크는 항상 실수로 인하여 넘치지 않도록 보호되며 탱크 내용물은 지속적으로 모니터링 되며 경보가 올바르게 설정되고 동작되는지 확인?			R	
52	LH_2 시설의 모든 안전 및 제어 장치를 점검하고 테스트한 결과 작동 상태가 양호한지?				
53	압력 제어 장비 및 Boil Off Gas처리장치가 작동상태가 양호한지?				
54	Vapour 연결부가 올바르게 연결되고 지지되어 있는지?				적용된 경우
55	수취선박과 급유선박에서 ESD, 자동 밸브 또는 이와 유사한 장치가 테스트되고 작동 상태가 양호하며 사용 준비가 되었는지? ESD의 closing rate가 상호간 합의되었는지?			A	본선ESD: Bunkering station ESD:

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
56	초기 LH_2 벙커링 라인업이 점검되고, 사용하지 않는 연결구들은 닫히고 비워졌으며 완전히 볼트로 고정되었는지?				
57	LH_2 벙커링 호스, 고정 파이프 라인 및 매니폴드는 상태가 양호하고, 적절하게 준비되어 있고, 지지되며, 올바르게 연결되어 있으며, 누출 테스트 및 LH_2 이송에 문제가 없는지?				
58	수취선박과 급유선박 사이 LH_2 벙커링 매니폴드에 건식분리형 커플링(Dry Disconnection Coupling, DDC)이 제공되었는지?				적용된 경우
59	수취선박과 급유선박 사이의 LH_2 벙커링 연결 부에는 적절한 전기 절연 수단이 제공되었는지?				
60	LH_2 벙커 연결부의 건식 브레이크 커플링 (Dry breakaway coupling)이 위치하여 있고, 육안으로 작동하는지 검사한 결과 작동 상태가 양호한지?			A	
61	수취선박의 비상 화재 관리 계획 (Ship's emergency fire control plan)이 비치되어 있는지?				적용된 경우 위치:
62	국제육상시설연결구 (International shore connection)가 공급되었는지?				적용된 경우
63	LH_2 연료 벙커링 운송 작업이 시작되고 근처에 있는 다른 선박에 정보를 제공하였는지 확인?				통보날짜/시간:

2.4 Part D: LH_2 연료 이송 데이터 (LH_2 fuel Transfer Data)

합의된 LH_2 벙커링 시작온도 및 압력 (Agreed starting temperature and pressure of LH_2)

합의된 수량 단위: □ m^3□ Tones □ _____

구분	수취선박 (Receiving Vessel)		급유선박 (Bunkering Vessel)		비고
LH_2 연료탱크 시작 온도					°C/°F
LH_2 연료탱크 시작 압력					kg/cm^2, bar, psi
LH_2 연료탱크 벙커링 가능용량					PQU

* PQU: Physical Quantity Unit

합의된 LH_2 벙커링 작업(Agreed bunker operations of LH_2)

합의된 수량 단위: □ m^3□ Tones □ _____

구분	LH_2 연료탱크 No.1	LH_2 연료탱크 No.2	비고
합의된 이송 수량			PQU
매니폴드에서 시작 압력			kg/cm^2, bar, psi
이송시작속도			PQU per hour
최대이송속도			PQU per hour
Topping up 속도			PQU per hour
매니폴드에서 최대 압력			kg/cm^2, bar, psi

합의된 LH_2 연료 최대 및 최소(Agreed maximum and minimum)

구분	최대 (Maximum)	최소 (Minimum)	비고
벙커링 중 압력			kg/cm^2, bar, psi
LH_2 연료탱크내부 압력			kg/cm^2, bar, psi
LH_2 온도			°C
LH_2 연료탱크 Filling limit			%

합의된 LH_2 벙커링/오일 벙커링 동시작업 (Agreed simultaneous LH_2 bunker / Oil bunker operations)

오일 벙커링 작업의 경우 별도의 체크리스트를 작성해야 한다.

Oil bunkering 작업	수취선박 (Receiving Vessel)	급유선박 (Bunkering Vessel)	터미널 (Terminal)

합의된 LH_2 벙커링/화물 동시작업 (Agreed simultaneous LH_2 bunker / Cargo operations)

화물 작업	수취선박 (Receiving Vessel)	급유선박 (Bunkering Vessel)	터미널 (Terminal)

LH_2 벙커링/화물작업 제한 (Restrictions in LH_2 bunker / Cargo operations)

제한 작업 내용	수취선박 (Receiving Vessel)	급유선박 (Bunkering Vessel)	터미널 (Terminal)

선언 (Declaration)

아래 서명한 사람들은 지침에 따라 Part A, B, C 및 D의 위 항목을 확인했으며 입력한 내용을 확인하였습니다.

또한 필요에 따라 반복적인 점검을 수행할 것이며, 체크리스트 목록에 'R'로 표시된 항목은 ____ 시간을 초과하지 않는 간격으로 다시 점검해야 한다는 데 동의했습니다.

품목의 상태가 변경되면 즉시 상대방에게 알리도록 하겠습니다.

구분	수취선박 (Receiving Vessel)	급유선박 (Bunkering Vessel)	터미널 (Terminal)
이름 (Name)			
직급 (Rank)			
날짜 (Date)			
시간 (Time)			

반복점검기록 (Record of repetitive checks)								
날짜 (Date)								
시간 (Time)								
서명 (본선)								
서명 (벙커링 선박)								
서명 (터미널)								

2.5 Part E: LH_2 연료 이송 후 체크리스트 (After LH_2 fuel Transfer Check-list)

LH2연료 이송작업 이후에 작성이 되어야 한다

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
64	LH_2 벙커링 호스, 고정 파이프 라인 및 매니폴드가 퍼지되어 분리할 준비가 되었는지?			A	
65	원격 및 수동 제어 밸브가 닫히고 분리할 준비가 되었는지?			A	
66	연결 부를 분리한 후 LH_2 이송 안전구역이 비활성화되어 표시가 제거되었는지?			A	
67	LH_2 벙커링 작업이 완료되고 인근에 있는 다른 선박들에게 정보를 제공하였는지?				시간:
68	LH_2 벙커링 작업이 완료되었다고 터미널에 통보하였는지?				시간:
69	해당되는 경우 실수 및 사고들을 해당관청에 보고가 되었는지?				Report No.:

선언 (Declaration)

아래 서명한 사람들은 지침에 따라 Part D의 위 항목 및 입력한 내용을 확인하였습니다.

구분	수취선박 (Receiving Vessel)	급유선박 (Bunkering Vessel)	터미널 (Terminal)
이름 (Name)			
직급 (Rank)			
날짜 (Date)			
시간 (Time)			

3 고체수소(MH) 벙커링 체크리스트

3.1 Part A: 계획단계 체크리스트 (Planning Stage Check-list)

본 체크리스트는 MH연료 벙커링 작업의 계획단계에서 완료가 되어야 하며, 실제 작업 준비에 필요한 정보를 사전에 교환하기 위한 지침이다.

- 계획된 날짜 및 시간 :
- 지정된 MH bunkering 위치 :
- MH 수취 선박 :
- bunkering vessel :

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
1	해당관청이 특정 위치 및 시간에 대한 MH 운송 작업에 대한 권한부여 여부 확인?			P	
2	터미널의 특정 위치 및 시간에 대한 MH 운송 작업에 대한 권한부여 여부 확인?			P	
3	해당관청은 규정에 따라 MH 벙커링 작동 시작을 통보 받았는지 확인?				통보날짜/시간:
4	해당관청의 요구 사항이 준수되고 있는지 확인?				
5	현지 터미널 요구 사항이 준수되고 있는지 확인?				
6	MH 벙커링 운영에 관련된 모든 직원은 적절한 교육을 받고 특정 MH 벙커링 장비 및 절차에 대해 교육을 받았는지 확인?				
7	수취선박과 급유선박의 선급 승인된 벙커링 계획 및 운영 매뉴얼을 사용할 수 있는지 확인?				

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
8	수취선박과 급유선박의 계류 및 펜더 배치가 동의되었는지 확인?				
9	수취선박과 급유선박이 나란히 가기 위해 필요한 허가를 받았는지 확인?				
10	벙커링 작동 영역을 충분히 조명(Illumination)이 되는지 확인?				
11	모든 MH 운송 및 가스 감지 장비는 양호한 상태이며 인증된 서비스에 적합한지 확인?				
12	벙커링 및 퍼지 작업 절차가 수취선박과 급유선박 사이에 합의되었는지?			A	절차:
13	전기 절연 시스템 및 방법은 수취선박과 급유선박에 의해 합의되었는지?			A	방법:
14	제한구역이 합의되고 지정되었는지?			A	안전구역 _____ m
15	발화원에 관한 규정을 준수 할 수 있는지?				
16	현지 요구사항에 따라 필요한 소방 장비를 즉시 사용할 수 있는지?				

계획에 관련된 담당자의 등록 (For registration involved representatives in the planning)

구분	수취선박 (Receiving Vessel)	급유선박 (Bunkering Vessel)	터미널 (Terminal)
이름 (Name)			
직급 (Rank)			
날짜 (Date)			
시간 (Time)			

3.2 Part B: 계획된 동시 작업 체크리스트 (Planned Simultaneous Activities Check-list)

본 내용은 실제 전송 작업이 시작되기 전에 완료되어야 한다.

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
17	계획된 다른 연료 벙커링이 MH 벙커링 중에 실시될 경우 승인된 운영지침을 만족하는지?				해당되는 경우
18	계획된 화물이송작업이 MH 벙커링 중에 실시될 경우 승인된 운영지침을 만족하는지?			A	해당되는 경우
19	관할 당국이 MH 벙커링 중에 다른 연료 벙커링/또는 화물 작업을 동시에 실시하는 것을 승인하였는지?			P	해당되는 경우
20	수취선박의 승인된 운영지침에 언급된 바와 같이 동시 작업에 대한 안전 절차와 완화 조치는 모든 관련 당사자가 동의하고 준수하는지?			A R	해당되는 경우

3.3 Part C: 사전이송단계 체크리스트 (Pre Transfer Check-list)

본 내용은 실제 전송 작업이 시작되기 전에 완료되어야 한다.

- 날짜 및 시간 :
- 지정된 MH bunkering 위치 :
- MH 수급 선박 :
- Bunkering vessel :

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
21	파트 A 계획단계 체크리스트는 실제 작동 이전 및 준비에 사용되는지?				
22	해당 관청은 현지 규정에 따라 벙커링 작업 시작을 통보 받았는지 확인?				
23	터미널은 터미널 규정에 따라 벙커 운영 시작을 통보 받았는지 확인?				
24	현재 날씨 및 파도 조건이 합의된 한계 내에 있는지?			A R	
25	수취선박과 급유선박이 안전하게 계류되어 있고, 계류 장치에 관한 규정이 준수되고, 펜더가 충분한지 확인?			R	
26	수취선박과 급유선박 사이에는 안전한 접근 방법이 있는지?			R	
27	모든 필수 소방 장비는 즉시 사용할 수 있는지?				
28	벙커링 작동영역의 밝기가 충분한지?			A R	
29	수취선박과 급유선박은 안전하게 방해 받지 않는 방향으로 자신의 힘으로 움직일 수 있는지?			R	

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
30	책임자에 의한 벙커링 작업에 대한 적절한 감독이 수취선박과 급유선박에서 이루어지고 있는지?				
31	수취선박과 급유선박에서 담당 운영자와 감독자 간의 효과적인 의사소통 수단이 확립되고 테스트되었는지? 그리고 통신 언어가 동의되었는지?			A R	VHF/UHF channel: 언어: Primary & backup system:
32	비상 정지 신호 및 종료 절차는 모든 관련 인원에게 합의, 테스트 및 설명되었는지? 비상 절차, 계획 및 연락처는 담당자에게 통보하였는지?			A	비상정지신호:
33	미리 정해진 제한 구역이 설정되었는지? 그리고 표지판에 영역 표시가 되어 있는지?			A	
34	제한 구역에는 다른 선박, 승인되지 않은 사람, 물건 및 발화원이 없는지?			R	
35	낙하물 방지를 위한 안전 절차 및 완화 조치가 협의되고, 모든 관련 당사자가 준수하고 있는지?			R	
36	수취선박에는 갑판 당직원이 배치가 되어 있는지?				갑판 당직원은 계류, 펜더 및 동시 작업에 특히 주의를 기울일 것.

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
37	수취선박과 급유선박 모두에 MH 벙커링 담당자가 배치되어 있는지?				벙커링 담당자는 호스, 매니폴드 및 벙커 제어에 특히 주의를 기울일 것.
38	외부 도어, 포트홀 및 거주구역 환기구는 작동 지침서에 따라 닫혀 있는지?			R	No lock
39	가스 감지 장비는 작동 테스트를 거쳤으며 정상적으로 작동하는지?				
40	공급된 MH 연료에 대한 물질 안전 보건 자료 (MSDS)가 비치되었는지?			A	
41	발화원에 관한 규정이 준수되고 있는지?			R	
42	적절하고 충분한 보호복과 장비는 즉시 사용할 수 있는지?				
43	벙커링 호스의 연결 및 분리에 관련된 인원과 이러한 작업 근처에 있는 인원은 충분하고 적절한 보호복과 장비를 사용하고 있는지?				
44	동력의 비상 풀림 커플링 (Powered Emergency Release Coupling, PERC)이 설치되어 빠르게 작동되는 ESD 밸브와 함께 즉시 사용할 수 있는지 확인?				적용된 경우
45	물 분무 시스템이 테스트 되었으며 즉시 사용할 수 있는지?				적용된 경우
46	벙커링 장치(펌프, 컴프레서 등)의 작동 상태가 양호한지?			A	적용된 경우

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
47	모든 제어 밸브는 잘 관리되고 작동 상태가 양호한지?				
48	벙커링 시스템 게이지 및 고압 경보가 작동하고 올바르게 설정되어 있으며 양호한 작동 상태인지 확인?				
49	수취선박의 벙커링 탱크는 항상 실수로 인하여 넘치지 않도록 보호되며 탱크 내용물은 지속적으로 모니터링 되며 경보가 올바르게 설정되고 동작되는지 확인?			R	
50	MH 시설의 모든 안전 및 제어 장치를 점검하고 테스트한 결과 작동 상태가 양호한지?				
51	압력 제어 장비의 작동상태가 양호한지?				
52	Vapour 연결부가 올바르게 연결되고 지지되어 있는지?				적용된 경우
53	수취선박과 급유선박에서 ESD, 자동 밸브 또는 이와 유사한 장치가 테스트되고 작동 상태가 양호하며 사용 준비가 되었는지? ESD의 closing rate가 상호간 합의되었는지?			A	본선 ESD: Bunkering station ESD:
54	초기 MH 벙커링 라인업이 점검되고, 사용하지 않는 연결구들은 닫히고 비워졌으며 완전히 볼트로 고정되었는지?				

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
55	MH 벙커링 호스, 고정 파이프 라인 및 매니폴드는 상태가 양호하고, 적절하게 준비되어 있고, 지지되며, 올바르게 연결되어 있으며, 누출 테스트 및 MH 이송에 문제가 없는지?				
56	수취선박과 급유선박 사이 MH 벙커링 매니폴드에 건식분리형 커플링(Dry Disconnection Coupling, DDC)이 제공되었는지?				적용된 경우
57	수취선박과 급유선박 사이의 MH 벙커링 연결 부에는 적절한 전기 절연 수단이 제공되었는지?				
58	MH 벙커 연결부의 건식 브레이크 커플링 (Dry breakaway coupling)이 위치하여 있고, 육안으로 작동하는지 검사한 결과 작동 상태가 양호한지?			A	
59	선박의 비상 화재 관리 계획 (Ship's emergency fire control plan)이 비치되어 있는지?				적용된 경우 위치:
60	국제육상시설연결구 (International shore connection)가 공급되었는지?				적용된 경우
61	MH 연료 벙커링 운송 작업이 시작되고 근처에 있는 다른 선박에 정보를 제공하였는지 확인?				통보날짜/시간:

3.4 Part D: MH 연료 이송 데이터 (MH fuel Transfer Data)

합의된 MH 벙커링 시작온도 및 압력 (Agreed starting temperature and pressure of MH)

합의된 수량 단위: □ m^3□ Tones □ _____

구분	수취선박 (Receiving Vessel)		급유선박 (Bunkering Vessel)		비고
MH 연료탱크 시작 온도					°C/°F
MH 연료탱크 시작 압력					kg/cm^2, bar, psi
MH 연료탱크 벙커링 가능용량					PQU

* PQU : Physical Quantity Unit

합의된 MH 벙커링 작업(Agreed bunker operations of MH)

합의된 수량 단위: □ m^3□ Tones □ _____

구분	No.1 MH Fuel Cylinder	No.2 MH Fuel Cylinder	…	비고
합의된 이송 수량				PQU
매니폴드에서 시작 압력				kg/cm^2, bar, psi
이송시작속도				PQU per hour
최대이송속도				PQU per hour
Topping up 속도				PQU per hour
매니폴드에서 최대 압력				kg/cm^2, bar, psi

합의된 MH 연료 최대 및 최소(Agreed maximum and minimum)

구분	최대 (Maximum)	최소 (Minimum)	비고
벙커링중 압력			kg/cm^2, bar, psi
MH Cylinder내부 압력			kg/cm^2, bar, psi
MH 온도			°C
MH Cylinder Filling limit			%

합의된 MH 벙커링/오일 벙커링 동시작업 (Agreed simultaneous MH bunker / Oil bunker operations)

오일 벙커링 작업의 경우 별도의 체크리스트를 작성해야 한다.

Oil bunkering 작업	수취선박 (Receiving Vessel)	급유선박 (Bunkering Vessel)	터미널 (Terminal)

합의된 MH 벙커링/화물 동시작업 (Agreed simultaneous MH bunker / Cargo operations)

화물 작업	수취선박 (Receiving Vessel)	급유선박 (Bunkering Vessel)	터미널 (Terminal)

MH 벙커링/화물작업 제한 (Restrictions in MH bunker / Cargo operations)

제한 작업 내용	수취선박 (Receiving Vessel)	급유선박 (Bunkering Vessel)	터미널 (Terminal)

선언 (Declaration)

아래 서명한 사람들은 지침에 따라 Part A, B, C 및 D의 위 항목을 확인했으며 입력한 내용을 확인하였습니다.

또한 필요에 따라 반복적인 점검을 수행할 것이며, 체크리스트 목록에 'R'로 표시된 항목은 ____ 시간을 초과하지 않는 간격으로 다시 점검해야 한다는 데 동의했습니다.

품목의 상태가 변경되면 즉시 상대방에게 알리도록 하겠습니다.

구분	수취선박 (Receiving Vessel)	급유선박 (Bunkering Vessel)	터미널 (Terminal)
이름 (Name)			
직급 (Rank)			
날짜 (Date)			
시간 (Time)			

반복점검기록 (Record of repetitive checks)								
날짜 (Date)								
시간 (Time)								
서명 (본선)								
서명 (벙커링 선박)								
서명 (터미널)								

3.5 Part E: MH 연료 이송 후 체크리스트 (After MH fuel Transfer Check-list)

MH연료 이송작업 이후에 작성이 되어야 한다

번호	확인내용	수취 선박	급유 선박	코드	비고
62	MH 벙커링 호스, 고정 파이프 라인 및 매니폴드가 퍼지되어 분리할 준비가 되었는지?			A	
63	원격 및 수동 제어 밸브가 닫히고 분리할 준비가 되었는지?			A	
64	연결 부를 분리한 후 MH 이송 안전구역이 비활성화되어 표시가 제거되었는지?			A	
65	MH 벙커링 작업이 완료되고 인근에 있는 다른 선박들에게 정보를 제공하였는지?				시간:
66	MH 벙커링 작업이 완료되었다고 터미널에 통보하였는지?				시간:
67	해당되는 경우 실수 및 사고들을 해당관청에 보고가 되었는지?				Report No.:

선언 (Declaration)

아래 서명한 사람들은 지침에 따라 Part D의 위 항목 및 입력한 내용을 확인하였습니다.

구분	수취선박 (Receiving Vessel)	급유선박 (Bunkering Vessel)	터미널 (Terminal)
이름 (Name)			
직급 (Rank)			
날짜 (Date)			
시간 (Time)			

[부록 2] 수소사고사례

1 수소사고사례 (국내)

1.1 정유공장 중질유 분해공정 운전 중 배관에서 화재·폭발 (1999.05)

1) 사고개요

- 1999 년 5 월 13 일 석유제품 제조공장의 Recycle oil 배관에서 고온, 고압의 오일이 분출되면서 배관이 파괴되어 화재, 폭발로 설비 파손 및 인명피해가 발생함.

2) 사고 발생 원인

- **(수소 부식)** 고온의 수소 환경에 누출되어 고온 수소침식.

  (HTHA: High Temperature Hydrogen Attack, 탈탄현상) 발생.

- (재질선정 부적절) 고온 수소침식에 취약한 탄소강 배관으로 설치.

3) 사고 재발방지 대책

- 탄소강에서 고온 수소침식에 대한 내부식성이 강한 *스테인레스 강으로 재질 변경.

  *** STS304, 316 등 일반적으로 사용하는 스테인레스 강을 모두 포함.**

- 지속적인 부식 및 방식관리 실시.



<그림 1> 폭발사고 현장



<그림 2> 폭발 파편

1.2 수소취급 배관 구성장치(밸브) 해체작업 중 화재·폭발 (2001.10)

1) 사고개요

- 2001 년 10 월 15 일 BTX 공정의 수소라인에서 협력업체 소속 근로자 2 명이 3 인치 게이트밸브 패킹부위 보수를 위하여 밸브덮개(Bonnet)부위 너트를 풀어내던 중 내부에 충진 되어 있던 수소가스가 급격히 누출되면서 정전기에 의한 발화로 폭발이 발생하여 인명피해가 발생.

2) 사고 발생 원인

- **(작업 전 안전조치 미흡)** 전 배관 내부에 고압 수소가스가 충진 되어 있는 상태로 밸브 수리 작업 지시.
- **(작업방법 부적절)** 해체작업 대상은 패킹 누름판(Grand) 체결부 너트였으나, 밸브덮개(Bonnet) 부위 너트를 해체하여 잘못된 작업 수행.

3) 사고 재발방지 대책

- 고압 수소가스 등을 취급하는 배관을 포함한 화학설비 수리 시에는 사전에 내부 물질을 완전히 제거하도록 조치한 후 작업 실시.
- 작업자에게 당해 작업방법 및 순서를 정확하게 전달할 수 있도록 작업요령서 작성 후 작업 전 교육 실시.



<그림 3> 폭발사고 현장



<그림 4> 파손된 밸브

1.3 수소압축기 가동작업 중 조작 판넬 폭발 (2004.09)

1) 사고개요

- 2004 년 09 월 20 일 합성수지공장 내 수소압축기용 압력방폭구조의 판넬에서 압축기 가동을 위한 작업 수행 중 압축기 인입측에 설치된 질소 퍼지 라인을 통해 수소가 전기판넬로 유입되었고, 판넬 내의 전기 스파크로 인해 폭발이 발생하여 인명피해 발생.

2) 사고 발생 원인

- 압축기 인입측에 연결된 퍼지 배관에 설치된 체크밸브 등에서의 누설로 판넬과 연결된 질소 배관으로 수소가 역류되었고, 판넬 내부에 폭발 분위기가 형성된 상태에서 전기스위치 등을 조작하여 폭발이 발생.

3) 사고 재발방지 대책

- **(설비 유지관리 및 작업 전 점검 강화)** 설비 수리 보수 후 가동 전에 압축기 및 각종 밸브 개방 또는 잠긴 상태, 각종 계기 관련 부속설비에 대한 이상유무 및 주기적인 누설여부 등에 대한 점검 강화.
- **(변경요소관리 절차 준수)** 화재, 폭발사고 예방을 위한 시스템적 안전조치 이행.

  ※ 위험성평가, 안전운전절차서 작성, 변경요소 관리, 근로자 교육, 가동 전 점검



<그림 5> 폭발사고 현장



<그림 6> 파손된 전기판넬

1.4 발전기 시운전 중 수소 누출로 인한 폭발 (2006.09)

1) 사고개요

- 2006 년 09 월 30 일 발전소 내에서 현장 운전원이 발전기 시운전 준비 중 공기누설시험 후에 이산화탄소 가스로 치환하고 수소가스를 투입하는 중에 발전기 하단의 오일 누설부위를 확인하기 위해 발전기 여자기실 출입문을 열고 전기스위치를 켜는 순간 수소가스가 폭발하여 인명피해가 발생.

2) 사고 발생 원인

- 발전기 회전 밀봉부위(Seal ring 과 Rotor shaft) 간극을 통한 수소가스가 누출, 체류 되어 폭발 분위기가 형성된 상태에서, 운전원이 비방폭 전등의 스위치를 가동할 때 스위치 접점 등이 발화원으로 작용하여 폭발.

3) 사고 재발방지 대책

- 벤트배관을 통해 밀폐공간 외부의 안전한 곳으로 수소를 배출하도록 배관 확장, 수소가스 누출 감지기와 강제 배기시설 연동 조치.
- 폭발위험장소 내 방폭 전기기계, 기구 설치.
- 발전기 정비보수 내 누설시험 실시로 수소누출 여부.



<그림 7> 폭발사고 현장



<그림 8> 시운전 도중 폭발된 발전기

1.5 수소 트레일러 시료채취 중 폭발 (2010.03)

1) 사고개요

- 2010 년 3 월 26 일 수소 트레일러 충전 및 공급공정에서 트레일러 내 압축된 수소 농도 측정을 위한 시료 채취 작업 중 공구를 이용하여 트레일러와 수소 공급라인의 배관 연결부분을 분리하다가 수소 튜브트레일러가 폭발하여 관련 설비 파손 및 인명피해 발생.

2) 사고 발생 원인

- 수소실린더에 산소가 유입되어 가연성 혼합기를 생성한 상태에서 시료채취를 위해 연결부위를 해체하던 중 정전기 등의 발화원에 의한 폭발.

3) 사고 재발방지 대책

- 수소가스 분위기로 산소 및 염소가스 유입 유무를 파악하기 위한 농도 분석.
- 압축기 전단에 산소농도 측정 계장 설비를 설치하여 공급되는 가스 중의 산소농도가 일정 범위 이상이면 압축기가 자동으로 정지하도록 연동시스템을 구축.



<그림 9> 폭발사고 현장



<그림 10> 시료채취 도중 폭발된 튜브트레일러

1.6 공정 가동 준비 중 배관 내 Off-gas 누출 화재, 폭발 (2010.12)

1) 사고개요

- 2010 년 12 월 20 일 석유제품 제조공장 수소정제 설비에서 정비작업을 마치고 가동 준비 중 배관에서 Off-gas(수소 약 86.5%)가 누출되면서 화재폭발사고가 발생하여 관련 설비 파손 및 인명피해가 발생.

2) 사고 발생 원인

- **(부적절한 맹판 사용 및 체결 미흡)** 비규격품 맹판 사용, 배관 끝단부와 맹판에 볼트 체결상태 불량.
- **(작업허가절차 운영 미흡)** 규격품의 맹판이 배관 끝단부에 적절하게 설치되어 있는지 확인하지 않은 상태로 허가증을 발급.

3) 사고 재발방지 대책

- 맹판 체결 시 배관의 규격에 맞는 제원을 선택하여 사용하고, 맹판 체결용 볼트는 해당 맹판 제원에 맞는 개수 및 규격을 사용.
- 작업허가증을 발급할 경우에는 현장의 각종 안전조치 사항을 직접 확인하고, 관련 안전조치 사항을 모두 준수하였을 경우에만 작업허가증을 발급하는 등 안전작업허가제도를 철저히 준수.



<그림 9> 폭발사고 현장



<그림 10> 파손된 맹판

1.7 용접용 수소 분배기 철거작업 중 폭발 (2017.05)

1) 사고개요

- 2017 년 5 월 8 일 스테인레스 강관 용접 공정에서 기존의 용접용 수소 분배기를 신규 분배기로 교체하기 위해 철거 작업을 하던 중 원인 미상의 폭발이 발생.

2) 사고 발생 원인

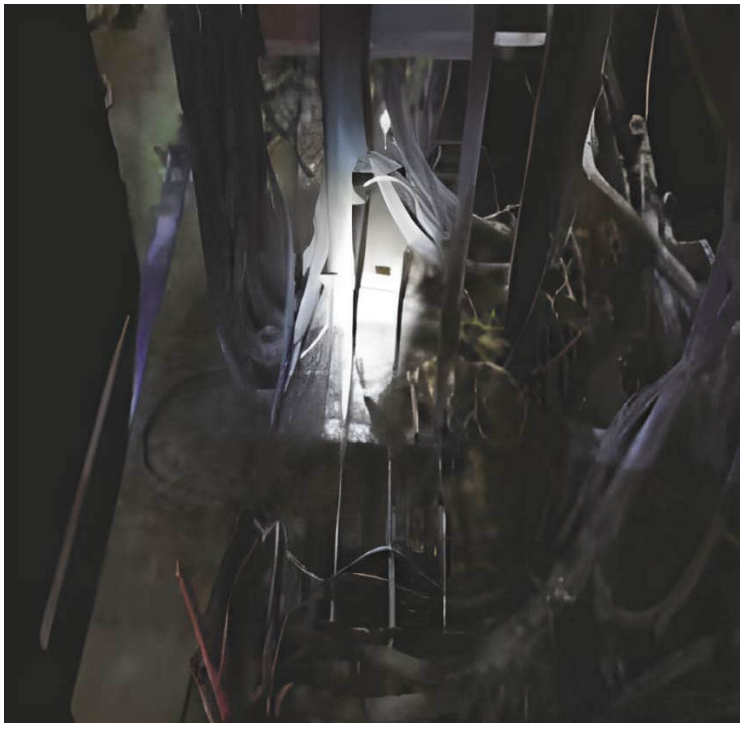
- **(정비 등의 작업 시 안전조치 미실시)** 내부에 압축된 기체가 방출되어 근로자가 위험해 질 우려가 있는 경우에는 압축된 기체를 미리 방출시키고 완전히 제거하는 등 위험방지를 위해 필요한 사전조치 미실시.
- **(화재, 폭발 예방조치 미실시)** 화재, 폭발재해 예방을 위한 작업책임자 지정, 위험물 등 누출 방지, 작업장 및 그 주변의 인화성 가스 농도 수시 측정 미실시.

3) 사고 재발방지 대책

- 정비 등의 작업 시 유해, 위험요인 파악 및 사전조치 철저.
- 화재, 폭발 위험작업 시 작업책임자 조치 등 예방조치 철저.



<그림 11> 폭발사고 현장(Ⅰ)



<그림 12> 폭발사고 현장(Ⅱ)

1.8 R&D 실증시험 중 수소탱크 폭발 (2019.05)

1) 사고개요

- 2019 년 5 월 23 일 국책 연구과제 실증시험 중 수소탱크 4 기의 폭발로 인해 건축물, 연구설비 전파 및 다수의 인명피해가 발생.

2) 사고 탱크 제원

- 탱크용기: 8bar (고압가스 안전관리법 대상인 10bar 에 미달)
- 설계압력: 12bar
- 용량: 40,000L

3) 사고 발생 원인

- 수소 내 산소의 혼입으로 인해 폭발위험성 상승.
- 자동경보장치 미설치로 위험상황 사전 인지 제한.

4) 사고 재발방지 대책

- 자동경보장치 설치 및 관리 (산소감지 및 자동경보장치 설치)
- 제조업 등 유해·위험방지계획서 심사·확인을 통한 근원적 안전성 확보.



<그림 13> 폭발사고 현장



<그림 14> 파괴된 수소탱크

1.9 수소제조공장 재가동 중 수소 누출로 화재, 폭발 (2019.09)

1) 사고개요

- 2019 년 9 월 23 일 수소제조 공정 재가동 중 ***Quick Swing Spectacle Blind** 로 배관을 폐쇄하다가 수소가 다량 함유된 공정가스가 누출되어 폭발, 화재 발생.

***Quick Swing Spectacle Blind: 핸들 조작으로 블라인드 플레이트를 돌려서 열림, 닫힘 위치를 바꾸며 30 초~3 분 안에 배관을 밀거나 당기지 않고 배관을 차단할 수 있는 설비**

2) 사고 발생 원인

- **(작업절차 미준수)** 시운전 시 설비 격리작업 중 밸브 조작 미흡.

※ 공정설비 격리 작업 전 배관내부 유체 제거여부 및 내부압력 확인을 실시하지 않은 상태에서 Quick Swing Spectacle Blind 1,2 차측 밸브를 모두 닫아야 하나, 2 차측 밸브만 닫아서 수소가 누출되어 폭발사고가 발생

- **(작업 전 안전조치 확인 미흡)** 회사 자체 안전 규정인 작업허가절차에 따라 안전작업허가서를 발행하여 사전 안전조치 확인 후 작업을 착수해야 하나, 이를 지키지 않은 상태에서 작업을 실시하다가 사고가 발생.

3) 사고 재발방지 대책

- 시운전 등 공정 운영단계별 작업절차 준수.
- 안전작업허가서 발급으로 작업 전 안전조치 여부 확인.



<그림 15> 폭발된 수소제조공장(Ⅰ)



<그림 16> 폭발된 수소제조공장(Ⅱ)

1.10 구미 유리제조공정 설비 정전테스트 중 폭발 (2021.01)

1) 사고개요

- 2021 년 1 월 29 일 유리제조공정 설비의 정전테스트 과정에서 설비 내부에 체류된 수소에 전기 불꽃(Spark)으로 추정되는 발화원에 의한 폭발이 발생하여 근로자가 부상하고 생산설비와 공장 구조물이 일부 파손.

2) 사고 발생 원인

- 설비 오조작 또는 결함으로 수소가 사고 설비 내부에 유입되었고, 정전테스트를 진행하는 도중 설비 일부에 전력이 잘못 공급되어 히터표면이 가열되었으며, 이후 임시 조명용 전등에 상용전력을 공급하던 중 전기 스파크 등에 의해 착화되어 폭발이 발생.

3) 사고 재발방지 대책

- 설비의 정비, 점검, 시험 및 가동 전에는 불활성가스 투입, 위험 분위기의 제거를 위한 환기 실시.
- 발화원의 제거 및 인화성 가스 농도 측정 등.



<그림 17> 폭발된 유리제조공정 설비(Ⅰ)



<그림 18> 폭발된 유리제조공정 설비(Ⅱ)

2 수소사고사례 (국외)

2.1 일본 연료전지실증용 충전소 폭발 (2005.12)

1) 사고개요

- 2005 년 12 월 7 일 수소충전소 실증시험설비의 고압수소를 발생시키는 고압축 수소에너지발생장치(HHEG) 내부가 고온, 고압 상태가 되면서 안전밸브가 작동해 수소가스, 산소 가스가 분출됐으며 이후 산소분리탱크 출구 측 배관이 연소되어 불산 등을 포함한 물과 가스가 분출되었다.

2) 제원

- 처리량: 1,080m3/day(표준 상태)
- 상용 압력: 40MPa (폭발 당시 120Mpa 추정)
- 사용 온도: 35℃ (폭발 당시 400℃ 추정)

3) 사고 발생 원인

- 전해전지 탱크 내부에 이상반응 발생.
- 40MPa 의 고압 하에서 티타늄 전극의 일부가 반응 또는 전해전지 내 산소와 수소 혼합기가 반응하여 부분적인 발열 발생때문으로 추정.

4) 사고 재발방지 대책

- 작동 압력 하에서 전지를 구성하는 자재(티타늄, MEA(Membrane Electrode Assembly), 씰 등)의 내구성 확보
- 전지를 구성하는 자재의 이상 반응 감지.
- 물, 수소, 산소 등의 기초 물성 파악.
- 사고 재발을 막기 위한 시스템 제어 기술 확립 및 위험성 평가 실시.

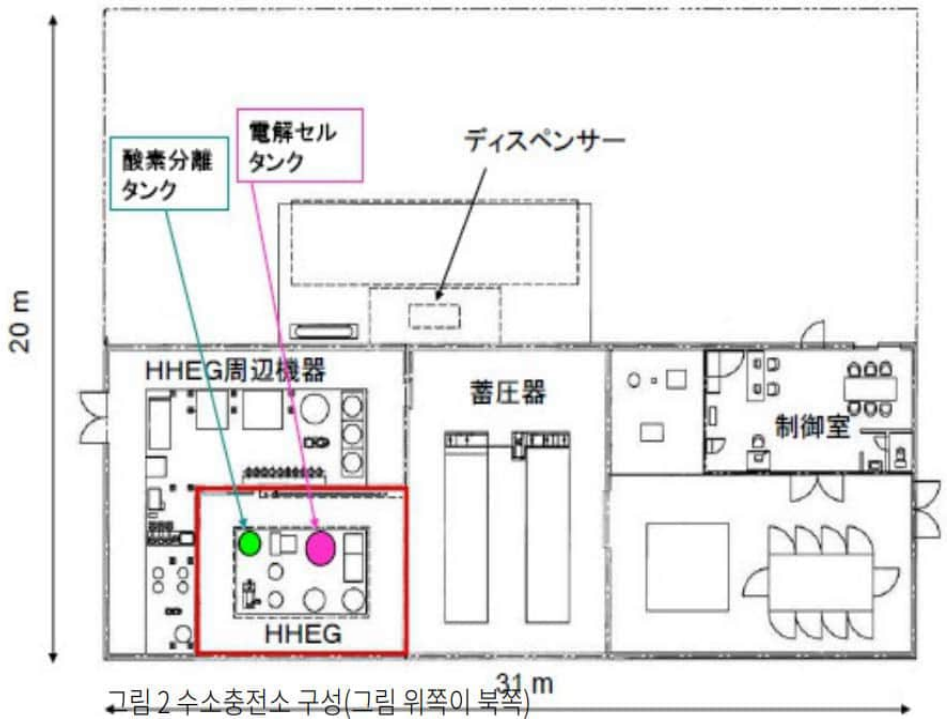


그림 2 수소충전소 구성(그림 위쪽이 북쪽)

<그림 19> 수소충전소 구성

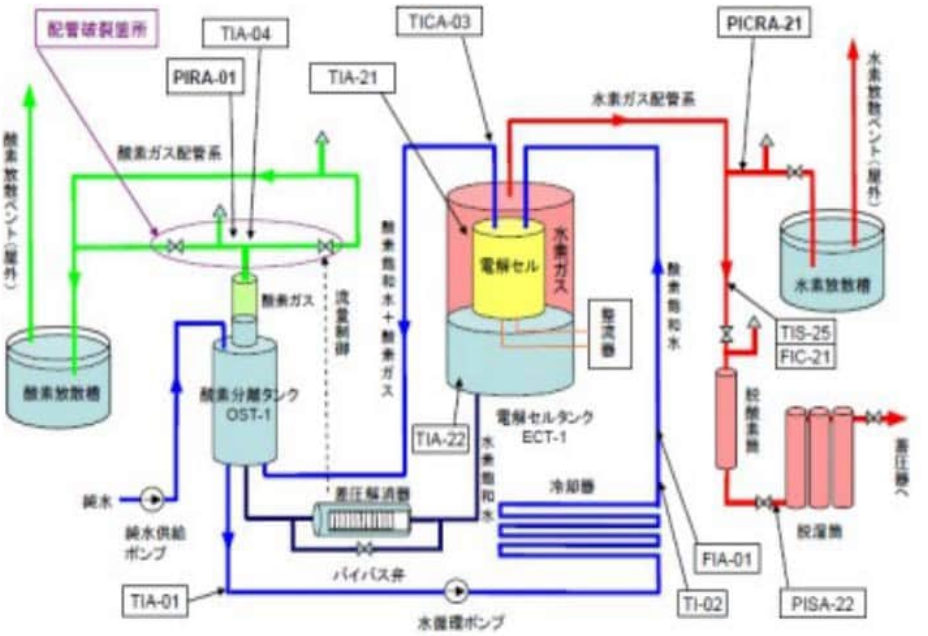


그림 3 HHEG 흐름 개요 (적색 : 수소가스 배관, 녹색 : 산소가스 배관, 청색 : 물 순환 배관, 남색 : 차압 감지용 배관, ⋈ : 자동밸브, △ : 안전밸브)

<그림 20> HHEG 흐름 개요



<그림 21> 파손된 배관(C1116, 20A)



<그림 22> 파손된 전해질 셀 스택

2.2 일본 후쿠시마 제 1 원전 발전소 3 기(1 호기~3 호기) 수소폭발 (2011.03)

1) 사고개요

- 2011 년 03 월 11 일 발생한 동일본 대지진으로 인한 쓰나미로 후쿠시마에 있는 핵발전소가 폭발했다. 직접 원인은 정전으로 비상발전기가 작동하지 않았기 때문으로, 원자로 6 기 중 1~3 호기에서는 노심용융이 발생했고, 1,3,4 호기에서는 수소폭발이 발생했다.

2) 제원

구분		1호기	2호기	3호기
설비용량 (MW)		4,696	4,400	4,400
정격출력 (Mwe)		460	784	784
열출력 (MWt)		1,380	2,381	2,381
원자로형		BWR-3	BWR-4	BWR-4
상업운전개시		'71.03	'74.07	'76.03
격납용기 형태		Mark-I		
원자로 용기 (RPV)	내경(m)	4.8 (abt.)	5.6 (abt.)	5.6 (abt.)
	높이(m)	20 (abt.)	22 (abt.)	22 (abt.)
	무게(톤)	440	500	500
격납 용기 (PCV)	높이(m)	32 (abt.)	33 (abt.)	33 (abt.)
	원통부 직경(m)	10 (abt.)	11 (abt.)	11 (abt.)
	원통부 직경(m)	18 (abt.)	20 (abt.)	20 (abt.)
	수조 냉각수량(톤)	1,750	2,980	2,980

<표 1> 후쿠시마 제 1 원전 발전소 (1 호기~3 호기) 제원

3) 사고 발생 원인

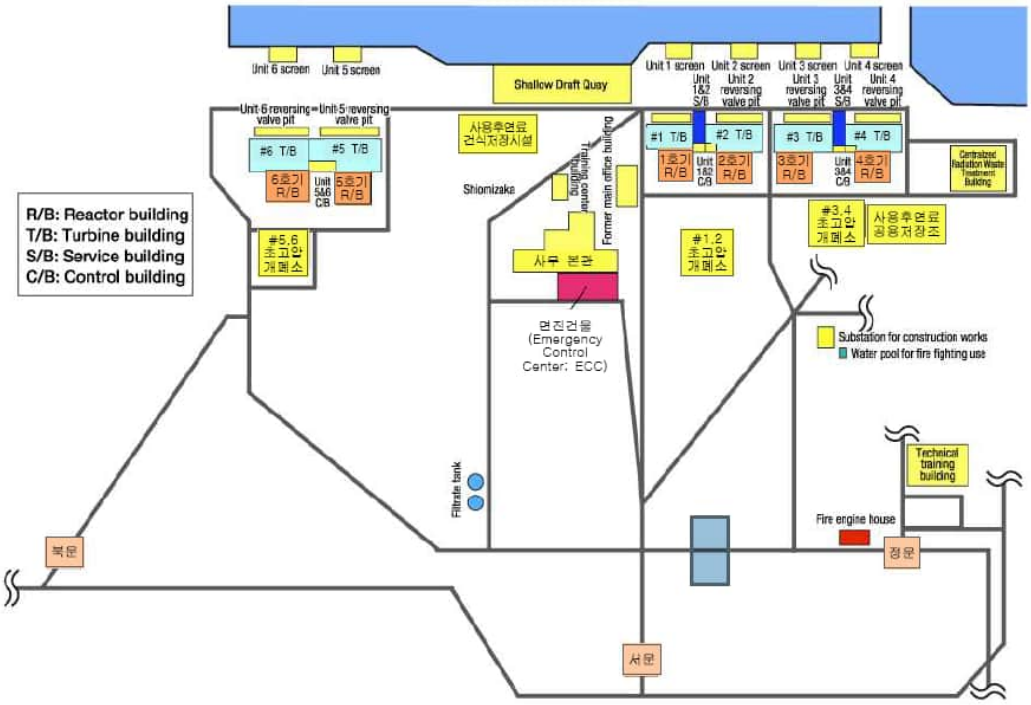
- 쓰나미에 따른 배전반 침수로 인해 발전소로의 전원공급 불가.
- 발전소의 전원상실에 따라 냉각수 주입이 불가능하여 다량의 증기 및 수소 발생.
- 격납용기의 내부 압력이 증가하여 1 호기부터 증기방출 실시했으나 증기에 수소가 섞여 있었고 수소체적이 15%를 넘어 폭발.

4) 사고 재발방지 대책

- 자연재해 발생에 대비한 원자력 발전소 설계기준 강화.
- 운전원에 대한 교육 진행 및 사고대응절차서의 작성.



<그림 23> 동일본대지진 前 후쿠시마 제 1 원전 전경



<그림 24> 후쿠시마 제 1 원전 주요 시설 배치도



<그림 25> 발전소 폭발 당시 사진(Ⅰ)



<그림 26> 발전소 폭발 당시 사진(Ⅱ)

2.3 일본 아이치현 충전소 내 디스펜서의 미세균열에 의한 수소 누출 (2018.08)

1) 사고개요

- 2018 년 08 월 10 일, 일본 아이치현의 한 수소충전소에서 충전호스의 파열로 인한 수소가스 누출 발생.

2) 제원

- 내경 (6.3mm), 외경 (14.8mm), 길이 (800mm)
- 고압가스 생산 능력: 22,874m3/day
- 상용압력: 82Mpa
- 상용온도: -40~10℃

3) 사고 발생 원인

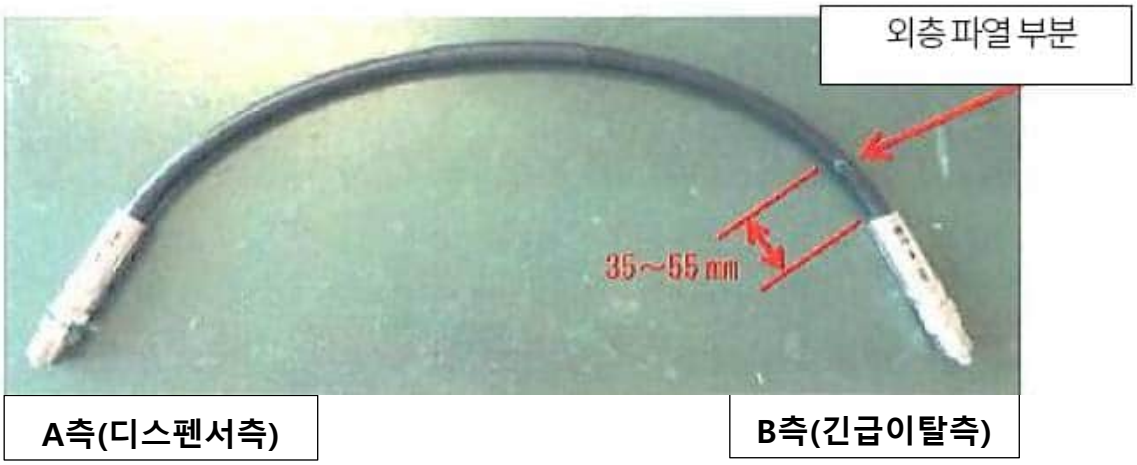
- 정기 자율점검에 따른 질소 분사 과정에서 질소 용기 內 금속편 등의 이물질이 혼입되어 디스펜서 내층 미세균열 발생 확인.
- 균열로 인해 누출된 수소가 표피(외층)아래로 흘러들어감.
- 충전호스에는 수소가스를 외층 밖으로 방출하는 미세구멍이 있으나 내층의 미세균열로 인해 누출된 수소 가스량이 평소 투과 가스량을 훨씬 뛰어넘었기 때문에 체류한 압력상승에 의해 외층 파열.

4) 사고 재발방지 대책

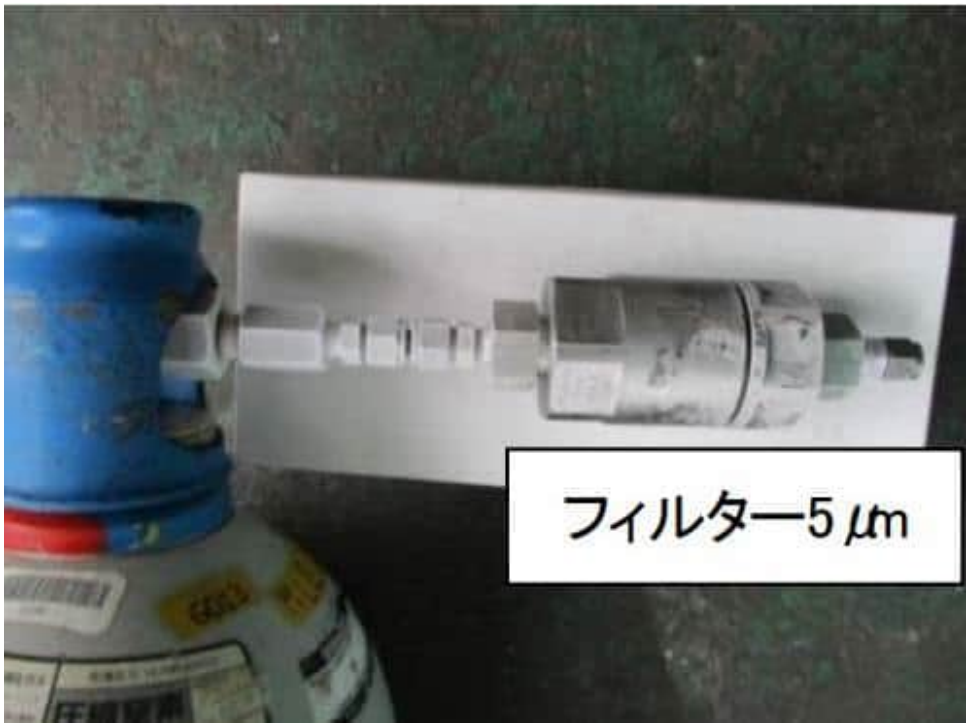
- 질소 용기 內 이물질이 들어가지 않도록 필터 사용.
- 투과된 수소 가스량을 확인할 수 있는 수소가스 감지기 사용.



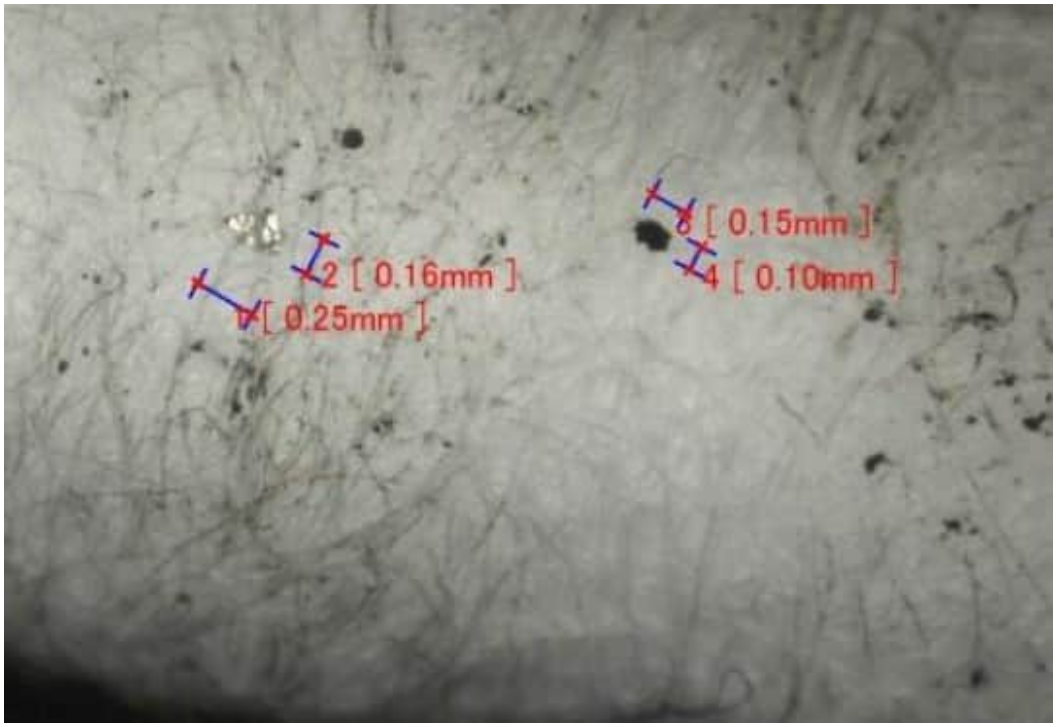
<그림 27> 충전호스 파열부위(외층) (Ⅰ)



<그림 28> 충전호스 파열부위(외층) (Ⅱ)



<그림 29> 질소 용기에 연결된 필터



<그림 30> 필터 입구에 존재하는 이물질

2.4 일본 나고야 수소충전소 압축기 실린더 헤드 內 수소 누출 2 건 (2018.10)

1) 사고개요

- 2018 년 10 월 24 일, 31 일 일본 나고야 시의 압축수소 충전소에서 연료전지자동차(FCV)에 수소를 충전한 후, 압축기 압력이 낮아져 압축기가 자동 운전을 시작하자 압축기의 5 단 실린더 헤드(10/24) 및 3 단 실린더 헤드(10/31)에서 수소 누출 발생.

2) 제원

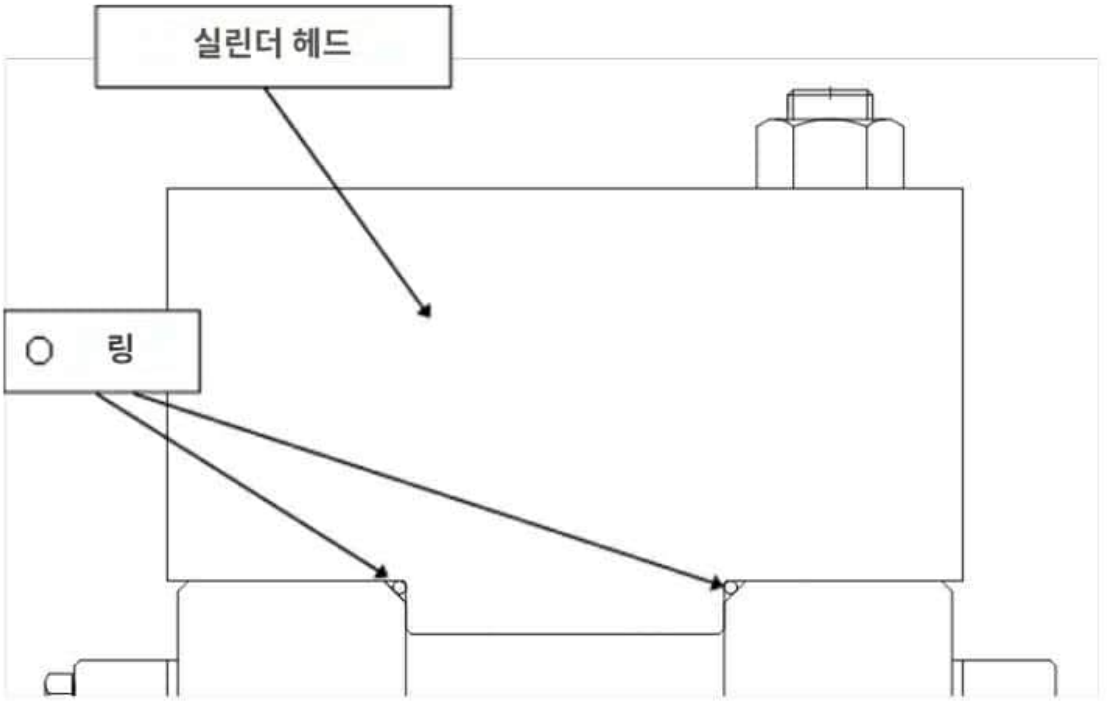
품목	재질	고압가스 생산능력	흡입압력 (MPa)	상용압력 (MPa)	상용온도 (℃)
3단 실린더 헤드 (G60)	불소 고무계	7,986m^3/day	8.83	24.1	180
5단 실린더 헤드 (P36)			45	82	160

3) 사고 발생 원인

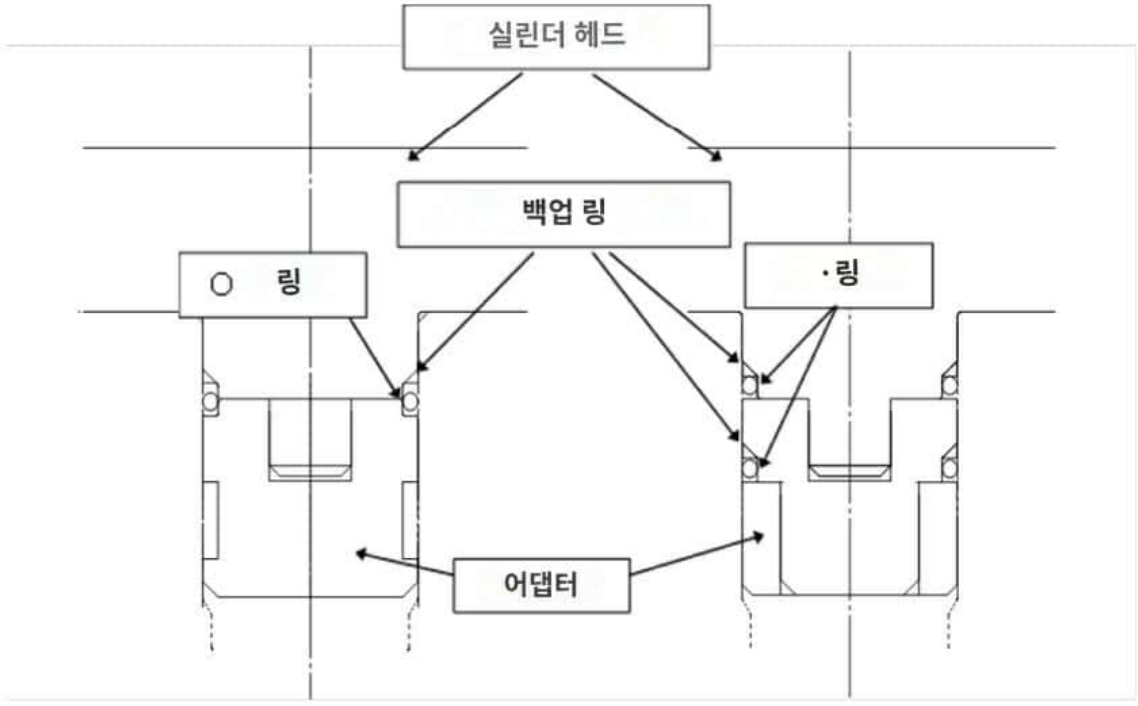
- 압력 맥동으로 인한 O-Ring 의 비틀림 (10/24)
- 수명 초과로 인한 O-Ring 의 손상 및 긁힘 (10/31)

4) 사고 재발방지 대책

- O-Ring 의 압착률을 높이기 위한 연구개발 필요.
- O-Ring 의 지속적인 점검 및 노후된 O-Ring 의 교체 주기 검토.



<그림 31> 3 단 실린더 헤드의 구조



<그림 32> 5 단 실린더 헤드의 구조



5단 실린더 헤드의 O링 상태

<그림 33> 5 단 실린더 헤드 누출



3단 실린더 헤드의 O링 상태

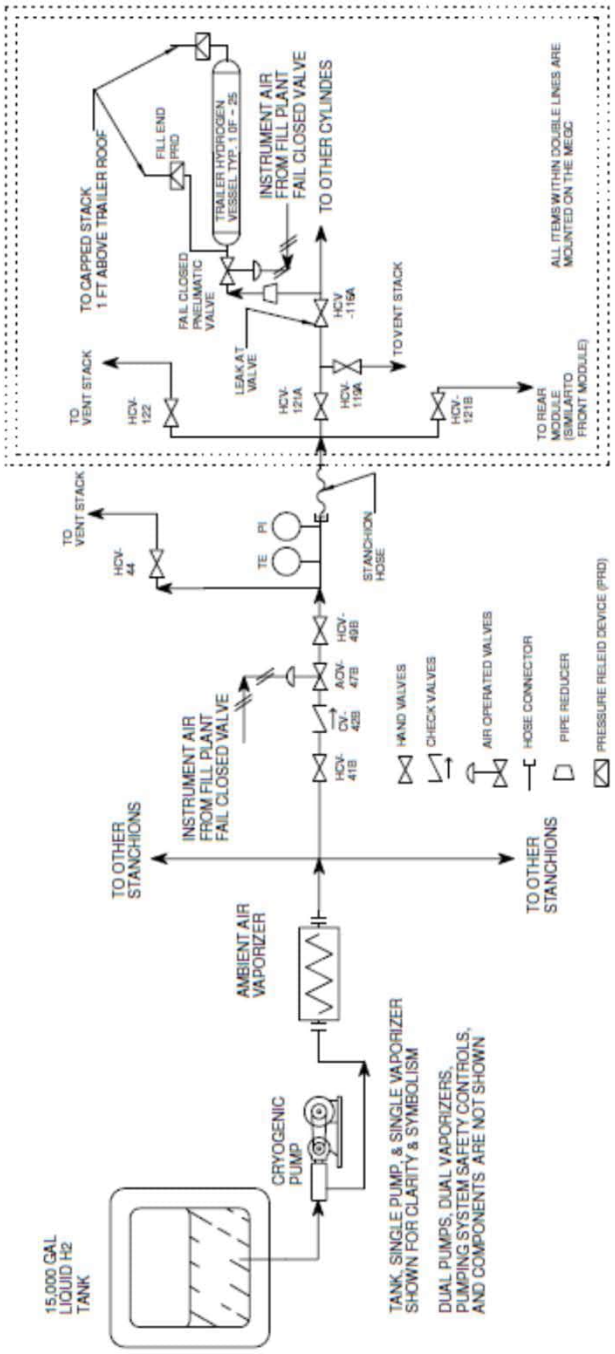
<그림 34> 3 단 실린더 헤드 누출

2.5 미국 캘리포니아 수소 트레일러 충전 도중 폭발 (2019.06)

1) 사고개요

- 2019 년 06 월 01 일, 미국 캘리포니아 산타클라라에 위치한 한 수소 트레일러 충전 시설에서 모듈식 멀티 실린더 트레일러의 기체 수소 충전 도중 고압 수소가 대량 방출되는 사고 발생.

2) 제원



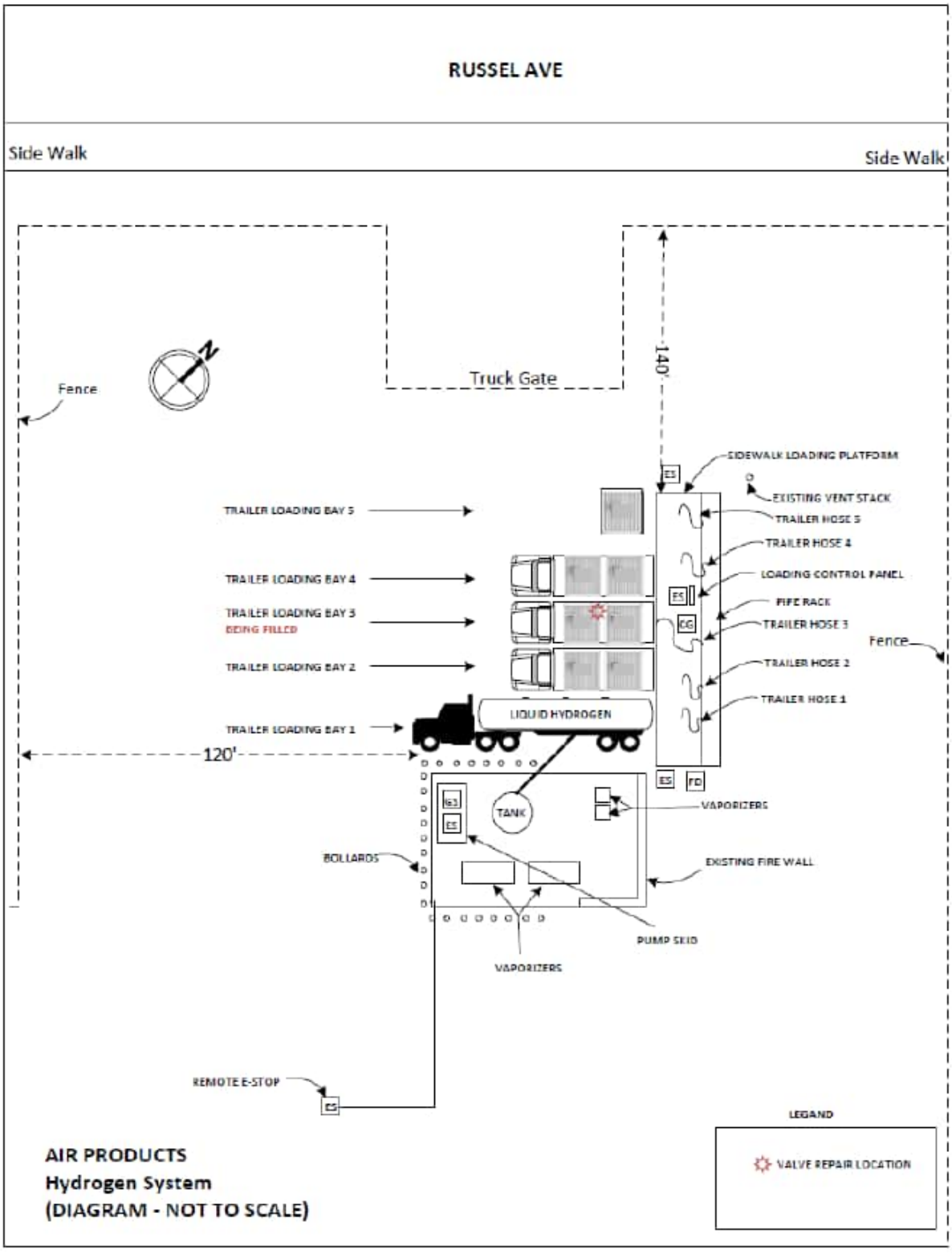
<그림 35> 수소충전소 시스템 PFD

3) 사고 발생 원인

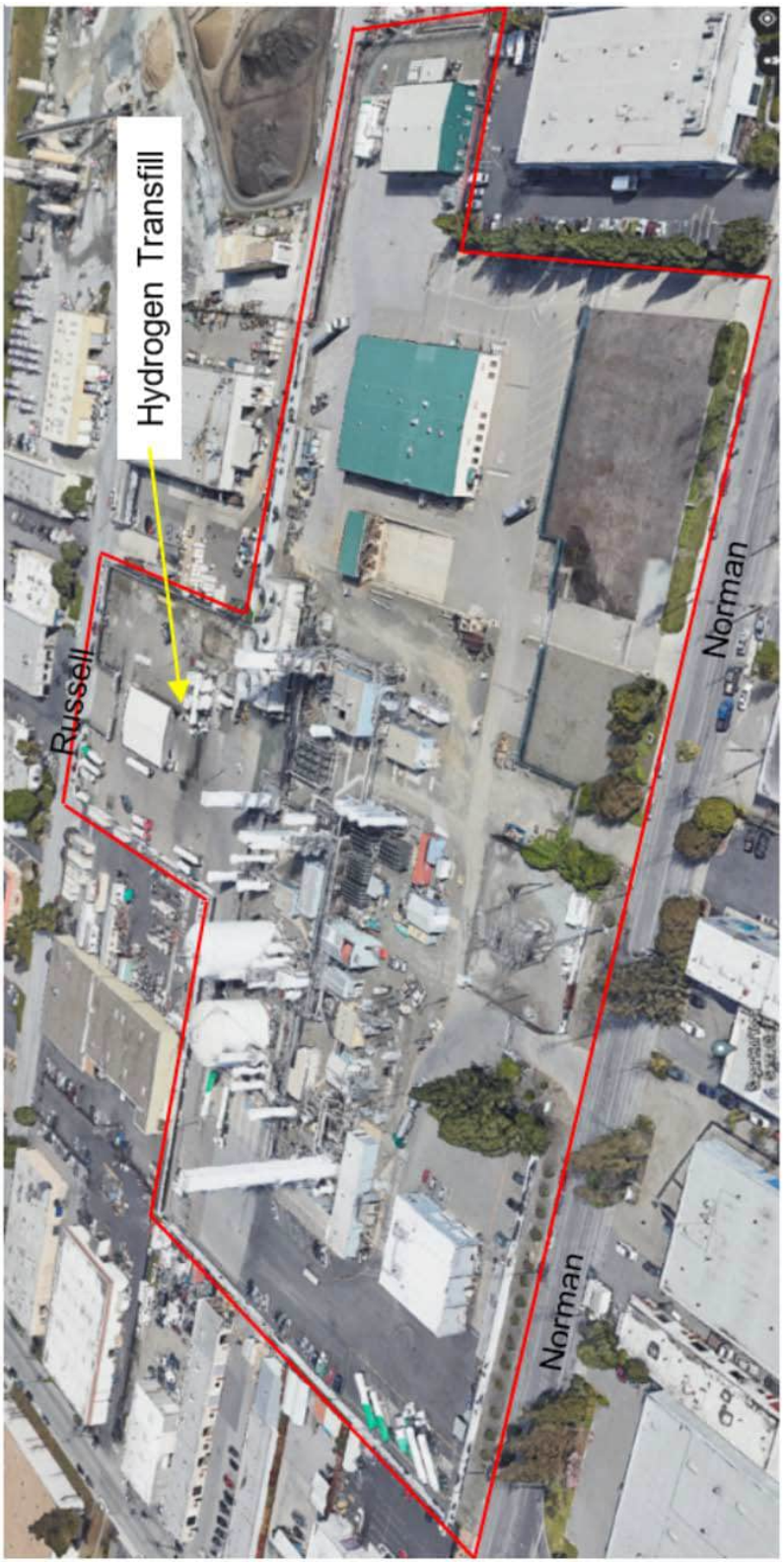
- **(초기 누출)** 전면 모듈 수소 차단 밸브의 O-ring 균열 또는 콘 및 나사산 피팅 누출.
- **(무단 정비)** 트레일러 운전자가 표준 잠금/태그아웃 절차를 사용하여 수소 공급 배관을 적절히 분리하지 않고 무단 수리 실시.
- **(의사소통 오류)** 선임 기사가 연수생에게 "트레일러 충전 중단"을 지시했으나, 이를 잘못 이해하여 "퍼지/트레일러 활성화" 제어 버튼을 작동시켜 공압 밸브가 열리고 분리된 매니폴드 파이프로 수소 이동.

4) 사고 재발방지 대책

- 트레일러 충전 절차 개선
- 운전자 교육 강화
- 제어 기능 라벨링 개선



<그림 36> 사고 발생 지점 도식



<그림 37> 사고 발생 지점 위성 사진



<그림 38> 손상된 트랙터, 트레일러



<그림 39> 사고 트레일러 운전실 및 전면 모듈

2.6 노르웨이 오슬로 수소충전소 폭발 (2019.06)

1) 사고개요

- 2019 년 06 월 10 일, 노르웨이 오슬로에 위치한 한 수소충전소에서 화재 발생.

2) 사고 발생 원인

- 고압저장장치 內 수소탱크 플러그의 잘못된 조립.
- 플러그 틈새로 누출된 수소가 산소와 혼합하여 화재 발생.

3) 사고 재발방지 대책

- 현장 관리자의 정기적인 설비 점검.
- 수소 누출여부를 바로 확인할 수 있는 수소 감지기 설치.



<그림 40> 손상된 수소저장 실린더



<그림 41> 폭발사고 현장

2.7 미국 캘리포니아 연료전지 버스 內 화재 발생 (2023.07)

1) 사고개요

- 2023 년 7 월 18 일 미국 캘리포니아에 위치한 한 수소충전소에서 충전 중이던 수소버스에서 화재 발생.

2) 사고 발생 원인

- **(장비 결함)** 수소공급 배관 및 밸브의 결함에 의한 수소연료탱크 폭발.
- **(주변 여건)** 터널 內 누출된 수소의 확산 및 주변 바람에 의해 폭발 야기.

3) 사고 재발방지 대책

- 현장관리자의 지속적인 설비 유지관리.
- 사고방지를 위한 위험성평가 실시.



<그림 42> 연료전지 버스 화재발생 현장(Ⅰ)



<그림 43> 연료전지 버스 화재발생 현장(Ⅱ)

[부록 3] 위험성 연료 안전관리를 위한 규정/국제기준/가이드라인 분석

- IMO 규격의 IGF Code 와 IGC Code 상에 있는 수소 천연가스의 추진선과 운송선에 해당하는 Code 를 살펴보았으나 수소와 관련된 내용은 찾아볼 수 없었음.
- 따라서, 현재 개발중인 ISO(국제표준화기구) 24132 규격의 자료를 참고하여 작성함.
- ISO 에 등재되어있는 수소 관련 기준은 찾아볼 수 없었으며, 현재 ISO 24132 규격을 개발 중에 있음.
- ISO 24132 는 2024 년 이후에 일본에서 정식 등록 예정.
- 개발중인 ISO 24132 규격에 대해서는 아래에 첨부문서를 참고.

1 퍼지 가스 주입 라인

- 적재/하역 전에 먼저 공기를 질소(N_2)로 교체한 후 부속서 D 에 제시된 방법에 따라 질소(N_2)를 수소(H_2)로 교체해야 하며, 교체 완료를 확인하기 위해 가스 감지기를 사용해야 함.

5.5.2 Product purge gases injection line

Before the loading/unloading, air shall be first replaced with N2, after that N2 shall be replaced with H2 according to the method given in Annex D. A gas detector shall be used for confirming the completion of the replacement.

At the end of the loading/unloading operation, first H2 or He shall be used to displace the product, and then the purge gases shall be replaced by nitrogen. The purge gases and/or nitrogen injection line shall be connected to the product line of the ship's manifold piping or jetty piping.

<그림 1> ISO/DIS 24132:2021(E) – 5.5.2 Product purge gases injection line

2 증기 회수 라인

- 해당 지역 또는 국가 표준 및 규정 또는 소유자가 요구하는 경우, 증기 회수 라인은 1 차 실(Seal)을 통해 여분의 누출 가스를 회수하고 1 차 실과 2 차 실 사이의 챔버가 가압되는 것을 방지하기 위해 제품 스위블(Swivel)의 누출 감지 포트에서 리턴 가스 라인까지 설치할 수 있다. 증기 회수 라인과 회수 가스 라인 사이에 체크 밸브를 설치해야 한다.

5.5.5 Vapour recovery lines

Vapour recovery lines, if required by local or national standards and regulations or the owner, may be installed from the leak detection port of product swivels to the return gas line in order to recover minor leaking gas through the primary seal and to avoid pressurizing of a chamber between the primary and secondary seals. A check valve shall be installed between the vapour recovery line and return gas line.

<그림 2> ISO/DIS 24132:2021€ – 5.5.5 Vapour recovery lines

3 배수관 연결

- 배관에 남아있는 LH_2 를 신속하게 배출해야 하는 소유자의 요구 사항에 따라 배수관 연결이 이뤄질 수 있다.

5.5.9 Drain connection

Drain connections may be provided by the owners' requirement to rapidly evacuate the remaining LH2 in the piping.

<그림 3> ISO/DIS 24132:2021€ – 5.5.9 Drain connection

4 진공 단열

- 진공 단열 이중벽 구조를 채택하는 경우 로딩 암의 적절한 진공 압력을 유지하기 위해 다음 사항을 수행해야 한다.
- 진공 압력의 실시간 모니터링을 통한 단열 성능 충족 확인.
- 외부 파이프 손상 방지를 위해 압력 방출이 가능한 부품 설치 등.

5.5.10 Vacuum insulation

If a vacuum insulated double wall structure is adopted, the following functions shall be installed to maintain adequate vacuum pressure of loading arm:

— at the vacuum area which has weak points such as bellows, vacuum pressure shall be monitored at all times to confirm that suitable heat insulation performance is satisfied;

— the vacuum monitoring device, such as a vacuum gauge, shall be installed to make maintenance easy;

NOTE This monitoring may be substituted by measurement of the outer surface temperature, which is dependent on the vacuum pressure in the vacuum insulated space.

— the connection ports for vacuuming shall be installed at each vacuum area;

— the surface of each connection port for vacuuming shall be covered with consideration of the movement of the loading arm;

— to avoid damage at the outer pipe because of the pressure increase at vacuum area, parts that enable the release of pressure shall be installed;

— the direction of the connection ports for easy vacuum operation shall be approved by the owner.

<그림 4> ISO/DIS 24132:2021€ – 5.5.10 Vacuum insulation

5 용접

- 압력 함유 부품의 용접은 자격을 갖춘 작업자가 ASME 보일러 및 압력 용기 코드 섹션 8 또는 국가 표준 및 규정에 따라 승인된 용접 절차를 사용하여 수행해야 한다.

5.6 Welding

Welds on pressure containing parts shall be carried out by a qualified operator using approved welding procedures in accordance with ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section IX, or local or national standards and regulations.

<그림 5> ISO/DIS 24132:2021€ – 5.6 Welding

6 안전 시스템

- 비상 정지(ESD) 시스템의 기능은 선박과 해안 사이의 액체 및 증기 이동을 안전하게 차단하고 고립시키는 것이다.
- 선박과 육상 모니터링 및 활성화 시스템을 연결하여 선박과 육상에서 ESD 및 ERS 기능이 조화롭게 작동하도록 해야 한다.

6 Safety systems

6.1 General

The function of the emergency shutdown (ESD) system is to safely stop and isolate the transfer of liquid and vapour between the ship and shore. Typically, this system may be activated by the following:

— fire or gas detection

— tank high level or abnormal pressure

— ship's drift

— electric power failure on shore

— a manual signal

It shall result in the tripping of transfer pumps on both ship or shore as applicable, and the timed closure of ESD valves on the ship and shore to reduce hydraulic surge in the transfer lines to acceptable limits.

The function of the emergency release system (ERS) is to protect the transfer arms and to minimize the spillage of LH2 by quick disconnection in the case of the ship drifting out of its operating envelope. The ERS consists of a powered emergency release coupling (PERC), isolating valves to minimize loss of product when the PERC parts, and sensors to monitor transfer arm angle. The ERS is activated automatically or manually. Initiation of the ERS shall result in the simultaneous closing of ERS isolating valves, PERC separation, and the transfer arms withdrawing clear of the ship's structure and adjacent arms, preventing the arms from being damaged.

The ship and shore monitoring and activation systems shall be linked to ensure the coordinated operation of both ESD and ERS functions on the ship and ashore.

Electro Magnetic Compatibility (EMC) for electrical and electronic components that are part of the safety system shall be taken into consideration.

<그림 6> ISO/DIS 24132:2021€ – 6 Safety systems ~ 6.1 General

7 선박과의 연결

7.1 일반

- 로딩암과 선박의 연결부는 액화 산소가 발생하지 않도록 주변 온도에 대비하여 적절히 단열되어 있어야 하며, 누출 시 bayonet 연결부로의 열 침입을 최소화해야 한다.
- 그 외 QC/DC의 설계 및 시스템, 플랜지 커버에 대한 설계 시 참고해야 할 내용 포함.

7 Connection with the ship

7.1 General

The connection of the arm to the ship shall be adequately heat insulated against ambient temperature to avoid producing liquefied oxygen and to minimize heat in leak e.g. bayonet connection.

The interface between the transfer arm and ship's manifold flange shall be met.

An example of a form of specific requirements by the owner is given in Table A.10.

The connection of the arm to the ship can be achieved by the following means:

- bolted flange according to a standard specified by the owner;
- manual coupler (manual QCDC);
- hydraulic coupler (hydraulic QCDC).

Aligning and centring devices shall be furnished for each diameter of flanges to which a QCDC shall connect.

Seals and flange surface finishing shall be compatible with the LH2 carrier manifold.

Gaskets, depending on their type, shall be in accordance with local or national standards and regulations, or specified by the owner.

<그림 7> ISO/DIS 24132:2021(E) – 7. Connection with the ship ~ 7.1 General

7.2 QC/DC 설계

- QC/DC 의 강도는 내부 설계 압력과 최대 설계 등가 하중인 LCA 의 조합을 기반으로 하며, 이는 가장 엄격한 로딩암 각도와 매니폴드 플랜지의 외부 축 방향, 굽힘 모멘트 및 전단 하중의 조합에 기반한다.
- 안전 계수는 최소 수의 연결 클램프가 굽힘 모멘트에 의해서만 장력을 받는 방향을 고려하여 계산해야 한다.
- 커플러는 최대 설계 등가 부하와 최소 작동 압력에서 연결 클램프 중 하나 이상이 고장 날 때 누출이 없는 상태를 유지해야 한다.

7.2 Design of QCDC

The strength of the QCDC shall be based on the combination of the internal design pressure and the maximum design equivalent load, LCA, which is based on the combination of the most stringent arm attitude and external axial, bending moment and shear loads on the manifold flange.

The following minimum safety factors in Table 2 shall be used to design for maximum design equivalent loads:

a) load factor (safety factor) a (SFa) × LCA + PL (see NOTE 2 in 6.4.2) against structural failure and separation;

b) load factor (safety factor) b (SFb) × LCA + PL (see NOTE 2 in 6.4.2) against leakage and permanent deformation.

When loading combinations are different from Table A.15, an appropriate safety factor shall be selected.

The safety factors shall be calculated allowing for the orientation in which the minimum number of connecting clamps will be in tension due to the bending moment only.

The coupler shall remain leak tight when at least one of the connecting clamps fails at the maximum design equivalent load plus at least operating pressure.

<그림 8> ISO/DIS 24132:2021(E) - 7.2 Design of QCDC

7.3 QC/DC 시스템

- 잠금 상태를 확인할 수 있는 잠금 시퀀스 완료 표시기가 제공되어야 한다.
- 유압식으로 작동하는 QC/DC 의 경우, 제품 이송 중 또는 로딩암에 압력이 가해질 때 또는 로딩암의 ERS 준비가 완료되었을 때 열리지 않도록 인터록을 제공해야 한다.
- 유압식으로 작동하는 QC/DC 클램프는 동일한 힘으로 동시에 작동해야 하며 결합 선박 매니폴드 플랜지에 과도한 응력이 가해져서는 안 된다.
- 유압이 손실되는 경우, 유압으로 작동하는 QC/DC 및 관련 유압 작동 제품 밸브는 "있는 그대로" 유지되어야 한다.

7.3 QCDC system

Flange rating and diameter shall be as specified in Table A.10.

The QCDC shall be provided with a mechanical or hydraulic locking device to prevent inadvertent release due to human error, pressure or vibration. Activation of this device should be clearly visible by a method approved by the owner.

Connection and disconnection operations of a hydraulically operated QCDC shall be possible both from the transfer arm control panel at the jetty platform and also at the local control station, which is typically a portable or pendant control panel.

A lock sequence completion indicator to confirm locked condition shall be provided.

For a hydraulically operated QCDC, an interlock shall be provided to prevent opening during product transfer, or when there is pressure in the arm, or ERS ready of the arm.

Hydraulically operated QCDC clamps shall operate simultaneously with equal forces and shall not overstress the mating ship manifold flanges.

In the event of the loss of hydraulic pressure, the hydraulically operated QCDC and any associated hydraulically operated product valves shall remain "as is." A manual release shall be provided.

For a hydraulically operated QCDC, the operating time range should be [10 s to 15 s] (see Table A.10). For clamp safety reasons, the operating time shall not be less than the specified minimum.

The QCDC shall be capable of disconnection under the maximum manifold loads, including specified ice build-up.

Manual couplers shall not require extension bars on the clamp/release lever, which are not part of the original design.

Lubrication of all moving parts shall be possible without dismantling the coupler.

<그림 9> ISO/DIS 24132:2021(E) - 7.3 QCDC system

7.4 플랜지 커버

- 연결 플랜지에는 이물질, 물 또는 습기의 유입을 방지하기 위해 플랜지 커버가 제공되어야 한다. 커버는 이송암 작동 압력을 견딜 수 있도록 설계되지 않아도 된다.
- 커버에는 탭 구멍이 있어야 하며, 제거하기 전에 감압을 위해 블리드 밸브 또는 압력 해제 포트를 장착할 수 있도록 플러그가 장착되어야 한다.
- 손으로 쉽게 설치 및 제거할 수 있도록 플랜지 커버에 손잡이가 제공되어야 한다. 커버의 무게에 따라 대빗(Davit)이 필요할 수 있다.

7.4 Flange cover

The connection flange shall be provided with a flange cover to prevent the ingress of any foreign matter, water or moisture. The cover may not need to be designed to withstand the transfer arm operating pressure.

The cover shall have tapped hole and be fitted with a plug to enable the fitting of a bleed valve or pressure relief port for depressurization before removal.

Handles shall be provided on the flange cover to facilitate installation and removal by hand. A davit may be needed depending on the weight of the cover.

<그림 10> ISO/DIS 24132:2021(E) - 7.4 Flange cover

[부록 4] 수소추진선박 벙커링 위험도 평가 HAZOP REPORT

Providing the best services, Creating a better world



수소추진선박 벙커링 위험도 평가

HAZOP REPORT

SYSTEM SAFETY RESEARCH TEAM
KOREAN REGISTER

KR-HSE-HAZP-RPT-023 Rev.0
JULY 2022

[This Page Was Intentionally Left Blank]

RISK ANALYSIS FOR HYDROGEN FUELED SHIP BUNKERING

HAZOP REPORT

PROJECT TITLE	RISK ANALYSIS FOR HYDROGEN FUELED SHIP BUNKERING
CLIENT	-
TASK	HAZARD AND OPERABILITY ANALYSIS ON HYDROGEN FUELED SHIP BUNKERING
DOCUMENT TITLE	HAZOP REPORT
DOCUMENT NO.	KR-HSE-HAZP-RPT-023
HULL NO.	-

REV.	DATE	DESCRIPTION/CHANGES
0	08. Jul. 2022	Final Report Issue

CLASSIFICATION:	Confidential	No Distribution Without Permission From KR
	Restricted Distribution	Unrestricted Distribution

© Korean Register 2022. All Rights Reserved.

DOCUMENT PROFILE

Document Title	Document Number:
RISK ANALYSIS FOR HYDROGEN FUELED SHIP BUNKERING (HAZOP REPORT)	KR-HSE-HAZP-RPT-023

KOREAN REGISTER	36, Myeongji Ocean City 9-ro, Gangseo-gu, Busan 46762 Republic of Korea Tel +82 70 8799 8114 Fax +82 70 8799 8599 http://www.krs.co.kr
Client	-
Date of Current Issue	08. Jul. 2022
Revision Number	Rev.0
Number of Pages	Total 80 (including covers)
Keywords	Hydrogen fueled, Bunkering, HAZOP, Risk

	Name	*Position*	*Signature*
Prepared by	Mr. PARK Dongwook	• Deputy Senior Researcher • System Safety Research Team • Korean Register	
Reviewed by	Mr. LEE Hyunyong	• Senior Researcher • System Safety Research Team • Korean Register	
Approved by	Dr. LEE Sangick	• Principal Researcher • System Safety Research Team • Korean Register	

The Person in Charge	• PARK Dongwook / KR • [redacted] • [redacted] • [redacted]

[This Page Was Intentionally Left Blank]

EXECUTIVE SUMMARY

수소는 대기 오염물질을 방출하지 않는 청정 연료로 주목받고 있으나, LNG보다도 인화점이 낮은 수소의 특성을 고려하여 추가 안전 조치가 필요하다. 한국선급, 한국해사기술, 이앤코, 동아대학교, 한국조선해양기자재연구원, 중소조선연구원은 해양수산부의 지원으로 수소 벙커링 및 이송 적하역에 필요한 안전기준 개발 과제를 수행하고 있다.

본 연구는 수소연료추진선박 벙커링 운영 과정에서 발생하는 시스템 설계 및 운용 의도와는 다른 예상치 못한 모든 이상 현상(Deviation) 및 위험 요소(Hazards)를 식별하기 위해 경험이 풍부한 다양한 분야의 전문가들이 참석하여 공정상의 문제점을 확인하고, 이후 가능한 원인 및 결과를 분석하고 적절한 안전 장치가 확보되었는지, 안전 장치가 미흡한 경우 추가적인 안전 대책을 수립하기 위해 정성적 위험도 평가 기법 중 하나인 공정운용위험분석(HAZOP) 기법을 활용하여 연구를 수행하였다. 위험도 평가는 위험요소식별(HAZID)과 HAZOP을 선행적으로 수행하여 위험요소를 식별하고, 해당 위험요소를 해소하기 위해 제시된 권고사항을 설계에 반영하거나 근거 문서를 제출하여 안전성을 입증하는 방법으로 진행하는 것이 일반적이다.

HAZOP 워크숍은 2022년 5월 31일에 부산 한국선급 본사에서 개최되었으며, 설계, 시험, 관련 제도 및 규칙 분야의 전문가들이 참석하여 10K 수소벙커링 선박과 기체수소 수취선박(G/T 700T Research vessel), 액체수소 수취선박(1,800TEU Container vessel) 및 고체수소 수취선박(G/T 200T Car carrier)간 수소 벙커링 시스템 운영에 대한 HAZOP 분석을 수행하였다. 기능에 따라 [1] Bunkering tank system, [2] Re-condenser, [3] HP Pump, [4] GH2 receiving ship, [5] Metal hydride receiving ship, [6] LH2 receiving ship으로 총 6개의 노드로 구분하였다. 각 Node에 대한 HAZOP 분석을 통해 도출된 안전성 검토 결과 및 안전성 향상을 위해 필요한 추가 안전조치 사항을 보고서에 기록하였으며, 본 HAZOP 분석의 모든 결과들은 참여전문가들의 논의 내용을 바탕으로 작성된 것으로, 모든 전문가들의 합의를 통해 최종 결정되었다.

수소연료추진선박 벙커링에 대한 HAZOP 분석 결과, 총 80개의 위험 시나리오가 식별되었고, 각 시나리오의 위험도 지수를 정성적으로 평가하였다. 이 중 ALARP 수준의 위험 시나리오는 39개, 무시가능한 위험시나리오는 41건이 확인되었고, 위험 시나리오에 대해 권고사항으로 제시된 안전 조치를 실제 시스템 운영 전 모든 사항을 처리하는 것이 바람직하다.

PARTICIPATING COMPANY

KOMAC	Korea Maritime Consultants Co., LTD
E&CO	E&CO Energy
DAU	Dong-A University
KOMERI	Korea Marine Equipment Research Institute
RIMS	Research Institute of Medium&small Shipbuilding
GASPACK	GASPACK
KOGAS-TECH	Korea Gas Technology Coporation
KR	Korean Register

DISCLAIMER

Korean Register has made every reasonable effort to perform the work contained herein in a manner consistent with high professional standards. All the results of this work are dependent on the accuracy of information provided by the Client, and entirely based on the agreement of the experts participated in HAZOP workshop.

LIMITATIONS

The HAZOP study was conducted at the early in the design stage, thus all the drawings and design documents reviewed at HAZOP study may be changed. This HAZOP report is valid only for the drawings and references used during HAZOP workshop.
This report is prepared based on the discussions held during HAZOP workshop with the experts from all responsible parties. While HAZOP study is a recognized technique and all efforts have been taken to identify potential hazards, it cannot provide assurance that every hazard has been identified and recorded.

TABLE OF CONTENTS

1. 서론 1

1.1. 배경 1

1.2. 제한사항 1

2. 약어 및 참고문헌 2

2.1. 약어 2

2.2. 참고문헌 3

3. 목적 및 범위 5

3.1. 목적 5

3.2. 분석 범위 5

4. HAZOP 분석 방법론 6

4.1. 개요 6

4.2. HAZOP 수행 절차 6

4.3. HAZOP Guideword 7

4.4. 사고원인 및 결과, 안전대책 8

4.5. 위험도 평가 8

5. 분석 대상 시스템 12

5.1. 벙커링 선박 및 수취 선박 12

5.2. HAZOP 노드 17

6. HAZOP 워크숍 19

7. 결과 22

7.1. 요약 22

7.2. 권고사항 목록 및 상세내용 23

ANNEX A. HAZOP WORKSHEET 27

ANNEX B. P&IDS FOR HAZOP 46

[This Page Was Intentionally Left Blank]

REPORT

1. 서론

1.1. 배경

지구온난화와 환경오염에 대한 국제적 관심과 우려의 증가로 인하여 세계 각국과 주요 기업들은 현재의 기후변화에 발빠르게 대응하기 위해 탄소중립을 선언하고 있으며, '21년 6월 유럽의회는 유럽기후법(European climate law)을 발효하고, '21년 7월에는 '30년까지 탄소배출량을 1990년 수준 대비 55% 감축을 목표로 하는 입법안 패키지 'Fit for 55'를 발표하였다. 그리고 국제해사기구(IMO: International Maritime Organization)의 IMO 2020을 통해 선박 연료유의 황 함유량 기준을 0.5%로 강화하여 선박의 배기가스 배출을 적극적으로 규제하고자 하는 움직임이 최근 현실화되고 있다. 해당 규제는 오랫동안 유지해온 선박의 운영 개념을 바꾸는 조치로, 선사, 조선소, 기자재 업체 뿐만 아니라 선박용 연료 공급 체계 및 항만 인프라 구축 등 업계 전반에 광범위한 변화를 불러올 것으로 예상된다. 지금까지 고유황유(HFO)를 사용하던 대부분의 현존선은 해당 규제를 만족시킬 수 없기 때문에, 해사업계에서는 국제 환경 규제를 만족할 수 있는 친환경 대체연료 및 Zero-Emission 선박에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다. 수소를 이용하여 전기를 생산하는 연료전지 시스템은 친환경 선박의 추진 시스템으로 주목받고 있으나, LNG보다도 인화점이 낮은 수소의 특성을 고려하여 추가 안전 조치가 필요하다.

본 연구에서는 수소연료추진선박 벙커링 운영 과정에서 발생하는 시스템 설계 및 운용 의도와는 다른 예상치 못한 모든 이상 현상(Deviation) 및 위험 요소(Hazards)를 식별하기 위해 경험이 풍부한 다양한 분야의 전문가들이 참석하여 공정상의 문제점을 확인하고, 이후 가능한 원인 및 결과를 분석하고 적절한 안전 장치가 확보되었는지, 안전 장치가 미흡한 경우 추가적인 안전 대책을 수립하기 위해 공정운용위험분석(이하 HAZOP) 분석을 수행하였다. HAZOP 워크숍은 2022년 5월 31일에 부산 한국선급 본사에서 개최되었으며, 설계, 시험, 관련 제도 및 규칙 분야의 전문가들이 참석하여 수소 벙커링 공정에 대한 HAZOP 분석을 수행하였다. 그리고 본 HAZOP 분석의 모든 결과들은 참여전문가들의 논의 내용을 바탕으로 작성된 것으로, 모든 전문가들의 합의를 통해 최종 결정되었다.

1.2. 제한사항

HAZOP 분석은 워크숍을 위해 제공된 도면 및 설계 문서를 바탕으로 진행되었으며, 본 분석에 활용한 자료 목록은 2.2장에 정리하였다. 워크숍 이후에 설계 변경된 사항에 대해서는 본 HAZOP 분석에 활용하지 않으며, 결과에 적용되지 않는다.

2. 약어 및 참고문헌

2.1. 약어

Abb.	Description
AIAA	The American Institute of Aeronautics and Astronautics
ALARP	As Low As Reasonably Practicable
BOG	Boil-off Gas
C&E	Cause and Effect
CBM	Cubic Meter
CGA	Compressed Gas Association
DPI	Differential Pressure Indicator
ERC	Emergency Release Coupling
ESD	Emergency Shutdown
FGSS	Fuel Gas Supply System
FI	Frequency Index
FSA	Formal Safety Assessment
GH2	Gaseous Hydrogen
G/T	Gross Tonnage
HAZID	Hazard Identification
HAZOP	Hazard and Operability
I/O	Input/Output
IMO	International Maritime Organization
LH2	Liquid Hydrogen
LI	Level Indicator
MFV	Multi-function Valve
MH	Metal Hydride
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram
PCV	Pressure Control Valve
PFD	Process Flow Diagram

Abb.	Description
PI	Pressure Indicator
PTS	Port to Ship
PSD	Process Shutdown
PSV	Pressure Safety Valve
RI	Risk Index
SAE	Society of Automotive Engineers
SI	Severity Index
SME	Subject Matter Expert
SOC	State of Charge
S/S	Stainless Steel
STS	Ship to Ship
TCV	Temperature Control Valve
TI	Temperature Indicator
TTS	Truck to Ship
XV	Shut-off Valve

2.2. 참고문헌

본 HAZOP 보고서에서 참고한 문헌 및 자료는 다음과 같다.

[1] Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-making Process, MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2, April 2018

[2] HAZOP (Hazard & Operability) Guidelines, GL-0006-E, KR, 2019

[3] Gas as a Marine Fuel Safety Guidelines – Bunkering Ver. 2.0, SGMF, FP07-01, March 2017

[4] LNG Bunkering Guidelines, IACS Rec. 142, June 2016

[5] Bunkering System P&IDs, B500-SNP-KOR-PRO-DWG-01~27, E&CO, Apr 2022

[6] Bunkering System C&E Chart, B500-SNP-KOR-PRO-TAB-02, E&CO, Apr 2022

[7] Bunkering System I/O List, B500-SNP-KOR-INS-LST-02, E&CO, Apr 2022

[8] G/T 700T Research Vessel Design Basis, KOMAC, Jun 2021

[9] G/T 700T Research Vessel General Arrangement, KOMAC, Jun 2021

[10] 3.9K Chemical Tanker Design Basis, KOMAC, Jul 2021

[11] 3.9K Chemical Tanker General Arrangement, KOMAC, Feb 2021

[12] 12K Slab Carrier Design Basis, KOMAC, Jul 2021

[13] 12K Slab Carrier General Arrangement, KOMAC, Jun 2021

[14] 1,800TEU Container Ship Design Basis, KOMAC, Jul 2021

[15] 1,800TEU Container Ship General Arrangement, KOMAC, Jun 2021

[16] G/T 260T Car Carrier Design Basis, KOMAC, Jul 2021

[17] G/T 260T Car Carrier General Arrangement, KOMAC, Jun 2021

[18] GH2, LH2, MH Equipment Specifications, E&CO, Jul 2021

[19] GH2, LH2, MH PFD, E&CO, Jul 2021

[20] GH2, LH2, MH System Block Diagram, E&CO, Jul 2021

[21] GH2 Bunkering Operation Manual, E&CO, Jul 2021

[22] LH2 Bunkering Operation Manual, E&CO, Jul 2021

[23] MH Bunkering Operation Manual, E&CO, Jul 2021

3. 목적 및 범위

3.1. 목적

HAZOP 분석의 목적은 초기 설계 단계에서 발견하지 못한 설계 의도에서 벗어나는 공정 및 운영상의 잠재적 위험요소를 식별하고, 이에 대한 원인을 조사한 후 위험사건의 위험도를 분석 및 평가하는 것이다. 위험요소는 인명, 재산 및 환경에 영향을 미칠 수 있는 모든 잠재적인 요소이며, 하나의 위험요소는 다양한 사고원인으로 인해 발생할 수 있고 다양한 사고결과를 초래할 수 있다. HAZOP 분석의 주요 목적은 다음과 같다.

- 대상 시스템의 설계 및 운용 개념에 대한 전반적 이해 증진
- 대상 시스템의 설계 및 운용 개념에 대한 안전성 측면의 전반적 내용 검토
- 대상 시스템의 운용 과정 중 발생 가능한 위험요소 및 위험사건의 체계적 식별
- 대상 시스템의 설계 및 운용 개념에 반영되어 있는 현행 안전대책의 효과 검토
- 대상 시스템에 대하여 식별된 위험요소 및 위험사건의 위험도를 허용가능 수준으로 감소시키기 위한 추가 안전조치의 합리적 도출
- 대상 시스템의 설계 개념 및 운용 절차에 불가항력 안전문제 존재 여부 검토

3.2. 분석 범위

10K 수소 벙커링 선박과 3종의 수소연료추진선박-기체수소 수취선박(G/T 700T research vessel), 액체수소 수취선박(1,800TEU container vessel) 및 고체수소 수취선박(G/T 200T car carrier)-간 수소 벙커링 시스템 운영과 관련된 일련의 공정을 HAZOP 분석 범위로 한다. 벙커링을 위한 사전 준비 작업은 안전하게 완료되었다고 전제하며, 추진을 위한 연료공급시스템, 엔진 등은 HAZOP 분석에 포함하지 않는다. 10K 수소 벙커링 선박의 Bunkering tank system, Re-condenser, HP Pump 시스템 및 수소 연료를 공급받는 수소연료추진선박 3종 GH2 receiving ship, Metal hydride receiving ship, LH2 receiving ship이 HAZOP 분석에 포함되었다.

4. HAZOP 분석 방법론

4.1. 개요

HAZOP 분석은 대상 시스템의 운영 과정에서 발생할 수 있는 잠재적 위험요소 및 운용상의 문제점을 식별하는 체계적인 분석 방법으로써 대상 시스템과 관련 있는 설계, 건조, 운영 등 다양한 이해관계자 및 다양한 분야의 전문가(Subject Matter Experts, SME)로 구성된 팀이 참석하는 워크숍에서 브레인스토밍 회의를 통해 수행된다.

HAZOP 진행자(Facilitator)는 각 분야별 전문가들이 참석하는 HAZOP 워크숍이 체계적이고 효과적으로 진행될 수 있도록 조율하는 역할을 하며, 수행하는 동안 객관적이고 중립적인 입장을 유지하여야 한다. 그리고 분석 대상 시스템을 여러 개의 노드로 구분하고, 각각의 노드에 대해 사전에 준비한 Guideword(참조어)와 공정 변수를 적용하여 회의를 진행한다. HAZOP 팀 구성원은 각각의 문제 상황에 대한 원인과 결과를 논의하고, 위험 상황에 대한 안전 장치가 충분하지 않으면 개선을 권고한다. HAZOP 서기(Scribe)는 워크숍에서 이루어지는 모든 전문가 논의 및 합의 사항을 HAZOP 작업표(Worksheet)에 기록하고, 팀 구성원들의 확인을 받는다.

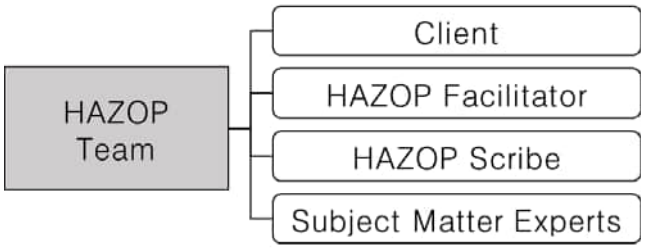


그림 4-1. HAZOP 팀 구성

HAZOP 분석을 통해 식별된 위험요소는 적절한 조치를 통해 안전 규정을 만족하도록 개선되어야 한다. HAZOP 분석은 위험요소 및 위험사건을 식별하는 기법으로, HAZOP을 수행한 것이 문제가 해결된 것을 의미하는 것은 아니다.

4.2. HAZOP 수행 절차

HAZOP 수행 절차는 그림 4-2와 같고, HAZOP 진행자의 주도로 각 절차를 순차적으로 반복 진행한다. 먼저 시스템을 기능에 따라 몇 개의 노드로 구분하여 분석 대상 노드를 선정하고, 분석 노드에 대한 설계 의도 설명 후 가이드 워드를 적용하여 이상 현상(Deviation)의 설정과 적용으로 발생가능한 위험요소 및 위험사건을 식별한다. 그리고 위험요소 및 위험사건의

잠재적 사고원인 및 사고결과 식별 후 사고원인에 대한 발생빈도를 결정하고 식별된 사고결과를 고려하여 심각도 지수를 결정한다. 결정된 발생빈도 및 심각도 지수에 의거 현재 고려되어 있는 안전대책(Safeguards)을 통해 위험도를 감소시킬 수 있는지, 필요하다면 위험도를 감소시킬 수 있는 추가적인 안전조치를 제시하여야 한다. 분석 중인 노드에 대한 논의가 완료 후, 다른 노드에 대한 HAZOP 분석을 반복 진행한다.

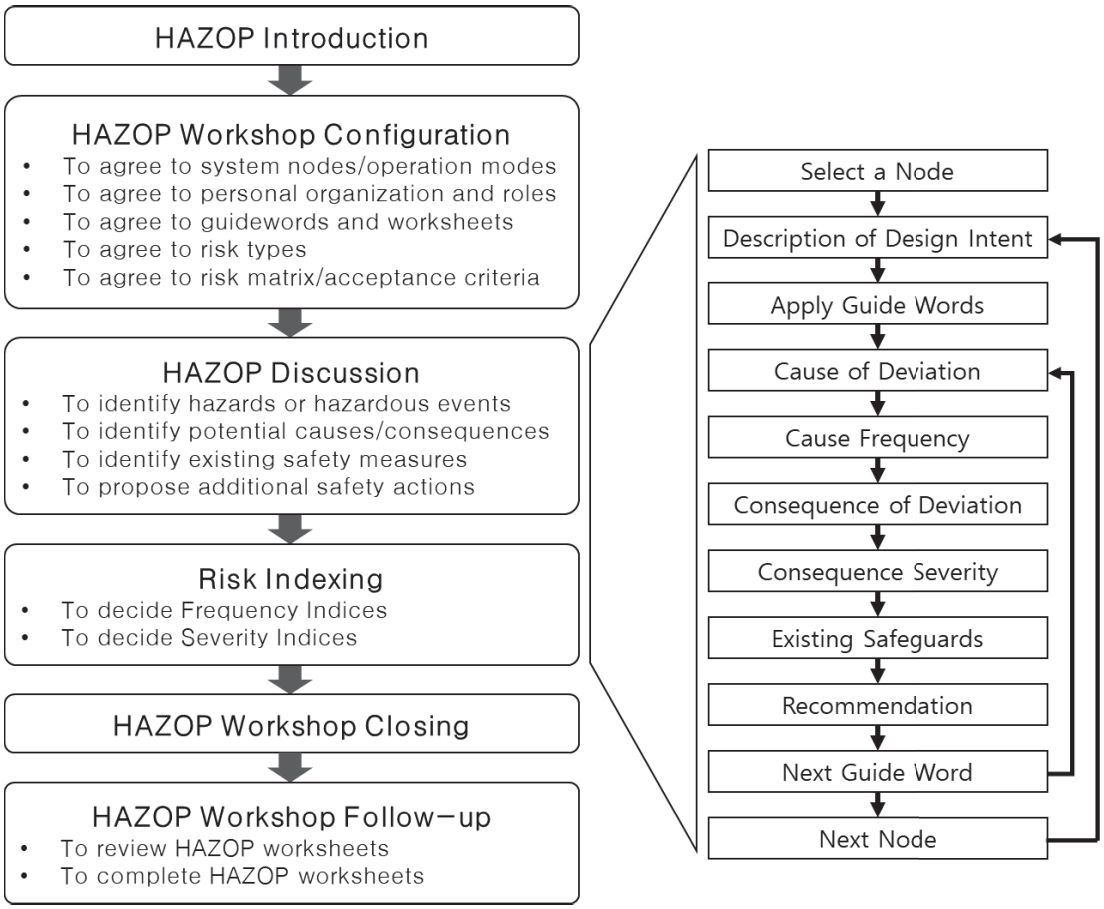


그림 4-2. HAZOP 수행 절차

4.3. HAZOP Guideword

HAZOP 워크숍 참석자의 논의를 활발하고 효과적으로 진행하기 위하여 필요한 경우 HAZOP 대상 시스템의 모든 노드에 대해 Guideword(참조어)를 사용할 수 있다. Guideword는 위험요소 또는 위험사건의 원인 및 결과를 논의하기 위한 단초로써 활용될 수 있으며, Guideword를 중심으로 신속한 논의를 진행할 수 있다. HAZOP 분석에서 주로 사용하는 Guideword에는 "유량(Flow)", "온도(Temperature)", "압력(Pressure)", "수위(Level)" 등의 공정 변수가 있고, 이 공정변수들의 이상 현상을 정성적/정량적 상태로 표현할 수 있는 Guideword인 "No", "Less", "More", "Reverse"로 이루어져 있으며, 아래 표 4-1의 Guideword 예시를 적절히 변형/조합하여

사용할 수 있다.

표 4-1. HAZOP Guideword

	No	Less	More	Reverse
Flow	O	O	O	O
Temperature		O	O	
Pressure		O	O	
Level	O	O	O	

4.4. 사고원인 및 결과, 안전대책

HAZOP 워크숍에서 식별된 사고 상황에 대한 잠재적인 원인과 결과를 식별하여 HAZOP 작업표(Worksheet)에 기록한다. 여기서 사고원인이란 위험요소(또는 사고)를 일으킬 가능성이 있는 특정 사건 또는 요소로써, 주요 장비의 고장 외에 이상 작동을 유발하는 공정 제어 시스템의 고장/오작동, 막힘 및 조작 실수 등을 포함한다. 원인에 따라 인명, 환경, 재산의 손실 및 훼손을 초래할 수 있는 의도하지 않은 사건을 사고라고 하며, 사고는 위험요소와 밀접한 관계가 있으며, 경우에 따라 위험요소와 동일한 의미를 가질 수 있다. 그리고 위험요소(또는 사고)의 발생과 그 진행으로 인해 결과적으로 발생 가능한 부정적 결과(또는 영향)를 사고결과라 하며, 일반적으로 인명, 환경, 재산의 결과적인 손실 및 훼손 등으로 표현한다.

위험 상황으로부터 시스템을 보호할 수 있는 적절한 안전 대책이 있는지 확인하고, 안전을 위한 추가 조치가 필요하다고 판단되는 경우 허용 가능한 정도로 위험 수준을 낮출 수 있는 안전대책을 권고 사항으로 작성한다. 여기서 안전대책이란 위험도 저감방안으로써 안전 배치, 안전 장비, 운용 절차, 안전 절차 및 매뉴얼, 유지보수 절차, 정기적 검사, 안전 교육 등이 이에 해당한다.

4.5. 위험도 평가

4.5.1. 발생빈도 지수 (Frequency index, FI)

HAZOP 워크숍을 진행하는 동안 참여 전문가에 의해 식별된 각 위험요소 또는 위험사건의 발생빈도를 결정하기 위해 발생빈도 수준을 5단계로 구분하고 해당하는 지수를 정의하였다. 발생빈도란 단위 시간 동안 위험요소 또는 위험사건의 발생 횟수로써, 각 발생빈도 범주의

성격은 표 4-2에 설명된 바와 같다. 각 위험요소 또는 위험사건에 가장 적절하다고 판단되는 발생빈도 지수는 HAZOP 워크숍 참여전문가들의 논의와 최종 합의를 거쳐 결정되었다.

표 4-2. 발생빈도 지수 정의

FI	Category	Definition
5	**Frequent**	Likely to occur during the short-time operation of target system (e.g., likely to occur once per month, etc.)
4	**Probable**	Likely to occur during the long-time operation of target system (e.g., likely to occur once per year, etc.)
3	**Occasional**	Likely to occur over the lifetime operation of target system (e.g., likely to occur once per decades, etc.)
2	**Rare**	Unlikely but possible to occur in many systems similar to the target system (e.g., it has occurred in the related companies.)
1	**Improbable**	Unlikely to occur in many systems similar to the target system (e.g., no experience in the related companies or industries, etc.)

4.5.2. 심각도 지수 (Severity index, SI)

HAZOP 워크숍 동안 참여 전문가에 의해 식별된 각 위험요소 또는 위험사건에 의해 발생한 사고 결과의 심각도를 결정하기 위하여 아래의 표 4-3와 같이 심각도 수준을 다섯 가지로 범주화하고 해당하는 지수를 정의하였다. 심각도 범주의 성격은 표 4-3에 설명된 바와 같으며, 인명, 환경, 재산에 대한 영향으로 각각 구분되어 있다. 각 위험요소 또는 위험사건에 가장 적절하다고 판단되는 지수는 HAZOP 워크숍을 진행하는 동안 참여전문가들의 논의와 최종 합의를 거쳐 결정되었다.

표 4-3. 심각도 지수 정의

SI	Category	Definition (Effects on)		
		Human	Environment	Asset
1	**Slight**	Slight injuries (first-aid needed)	Slight effect (immediate restoration available)	Slight damage (immediate repair)
2	**Minor**	Minor injuries (outpatient treatment needed)	Minor local effect (short-term restoration needed)	Minor local damage (local repair available)
3	**Major**	Severe injuries (hospitalization needed/permanent	Sever local effect (mid-term restoration needed)	Severe local damage (external support needed/partial operation

SI	Category	Definition (Effects on)		
		Human	Environment	Asset
		disability)		available)
4	Critical	Single fatality or multiple severe injuries	Extensive effect (long-term restoration needed)	Extensive damage (operation unavailable)
5	Catastrophic	Multiple fatalities	Massive effect (almost impossible to be restored)	Total loss

4.5.3. 위험도 지수 (Risk index, RI)

위험도 지수는 앞에서 결정된 발생빈도 지수와 심각도 지수를 조합하여 결정된다. 식별된 모든 위험요소에 대해 적절한 위험도 지수가 부여되면 직관적으로 우선순위 또는 중요도를 평가할 수 있다. 즉, 각 위험요소가 가지는 위험도 지수를 비교함으로써, HAZOP 참여전문가들은 어떤 위험요소 또는 위험사건이 보다 더 위험 수준이 높고, 따라서 어떤 위험요소 보다 더 면밀한 검토 및 주의가 요구되는지를 파악할 수 있다.

- 위험도 지수(Risk index) = 발생빈도 지수(FI) X 심각도 지수(SI)

4.5.4. 위험도 매트릭스 및 위험도 분류

본 HAZOP 분석에서 적용한 위험도 매트릭스 및 위험도 평가기준은 표 4-4와 같다. 위험도 매트릭스는 발생빈도 지수와 심각도 지수를 조합하여 결정되는 위험도 지수들을 정리한 표로써, 정성적 위험도 분석 수행 시 많이 사용되는 기법이다.

표 4-4. 위험도 매트릭스 및 위험도 수준 구분

FI	Frequency	Severity Index				
		1	2	3	4	5
		Slight	Minor	Major	Critical	Catastrophic
5	Frequent	5	10	15	20	25
4	Probable	4 초과	8	12	16	20
3	Occasional	3	6	9	12	15
2	Rare	2	4 이하	6	8	10 초과
1	Improbable	1	2	3	4 초과	5

본 HAZOP 분석 위험도 평가는 조선해양을 비롯한 여러 분야의 위험도 평가에서 많이

적용되고 있는 ALARP(As low as reasonably practicable) 원칙에 따라 수행되었다. ALARP 원칙에서는 위험도 수준을 크게 세 가지로 구분하는데, 허용불가 위험도 영역, ALARP 위험도 영역, 그리고 무시가능 위험도 영역과 같다.

- **허용불가 위험도 수준 (Intolerable risk level)**: 위험도 지수가 10.0 초과로, 표 4-4의 붉은색 영역에 해당한다. 해당 위험요소 또는 위험사건의 위험도가 감당할 수 없는 높은 수준으로써, 현재의 위험도를 낮추기 위한 추가적인 안전조치(예를 들어, 설계 변경, 안전장치 추가, 운용 절차 변경, 검사 및 유지보수 강화 등)가 즉각적 필수적으로 요구된다.

- **관리가능 위험도 수준 (Manageable or ALARP risk level)**: 위험도 지수가 4.0 초과 10.0 이하로, 표 4-4의 노란색 영역에 해당한다. 해당 위험요소 또는 위험사건의 위험도는 기본적으로 수용 가능한 수준으로 볼 수 있다. 다만, 합리적이고 실용적인 방법으로 가능한 현재의 위험도를 보다 더 낮추도록 노력하여야 한다. 일반적으로, 비용 효율성이 중요한 기준이 되고 있는데, 현재 위험도 감소를 위해 추가 안전조치를 취할 경우 투입되는 비용과 얻을 수 있는 위험도 감소 효과가 적절히 균형 시 해당 안전조치 적용을 결정할 수 있다.

- **무시가능 위험도 수준 (Negligible risk level):** 위험도 지수가 4.0 이하로, 표 4-4의 초록색 영역에 해당한다. 해당 위험요소 또는 위험사건의 위험도가 충분히 낮아 안전성이 적절히 확보되어 있다고 볼 수 있다. 따라서, 위험도 저감을 위해 추가 안전조치가 필요 없다.

5. 분석 대상 시스템

5.1. 벙커링 선박 및 수취 선박

본 HAZOP 분석은 10K 수소 벙커링 선박과 3종의 수소연료추진선박-기체수소 수취선박(G/T 700T research vessel), 액체수소 수취선박(1,800TEU container vessel) 및 고체수소 수취선박(G/T 200T car carrier)-간 수소 벙커링 시스템 운영과 관련된 일련의 공정을 HAZOP 분석 범위로 한다.

수소연료추진선박의 벙커링은 수소 공급 방식, 이송하는 수소의 상태, 대상 선종에 따라 아래 표 5-1과 같이 구분할 수 있다. 수소 공급 방식에 따라 적용 가능한 수소의 상태 및 저장 방식이 달라지므로, 각각의 벙커링 조건에 해당하는 위험요소를 검토해야 한다. 본 HAZOP 분석에서는 기체, 액체, 고체 벙커링을 모두 적용할 수 있는 선박간 벙커링(STS)에 대해 위험요소 식별 작업을 수행하고, 트럭(TTS) 및 육상설비(PTS)를 이용한 벙커링에서 발생하는 위험요소를 추가 논의하는 방식으로 진행하였다.

표 5-1. 수소 상태별 적용가능한 수소 벙커링 방식

수소상태별 [선종]	기체 [G/T 700T research vessel]	액체 [1,800TEU container vessel]	고체 [G/T 200T car carrier]
Ship to ship (STS)	○	◎	△
Truck to ship (TTS)	△	-	-
Port to ship (PTS)	△	△	△

다음은 HAZOP 분석 대상 선박의 제원을 정리한 것이다. 수소 벙커링을 위해 개발한 벙커링 개념 모델의 주요 장비를 700톤급 수산과학조사선(기체수소), 1,800TEU급 컨테이너선(액체수소), 260톤급 차도선(고체수소저장방식)에 배치하여 설계하였다.

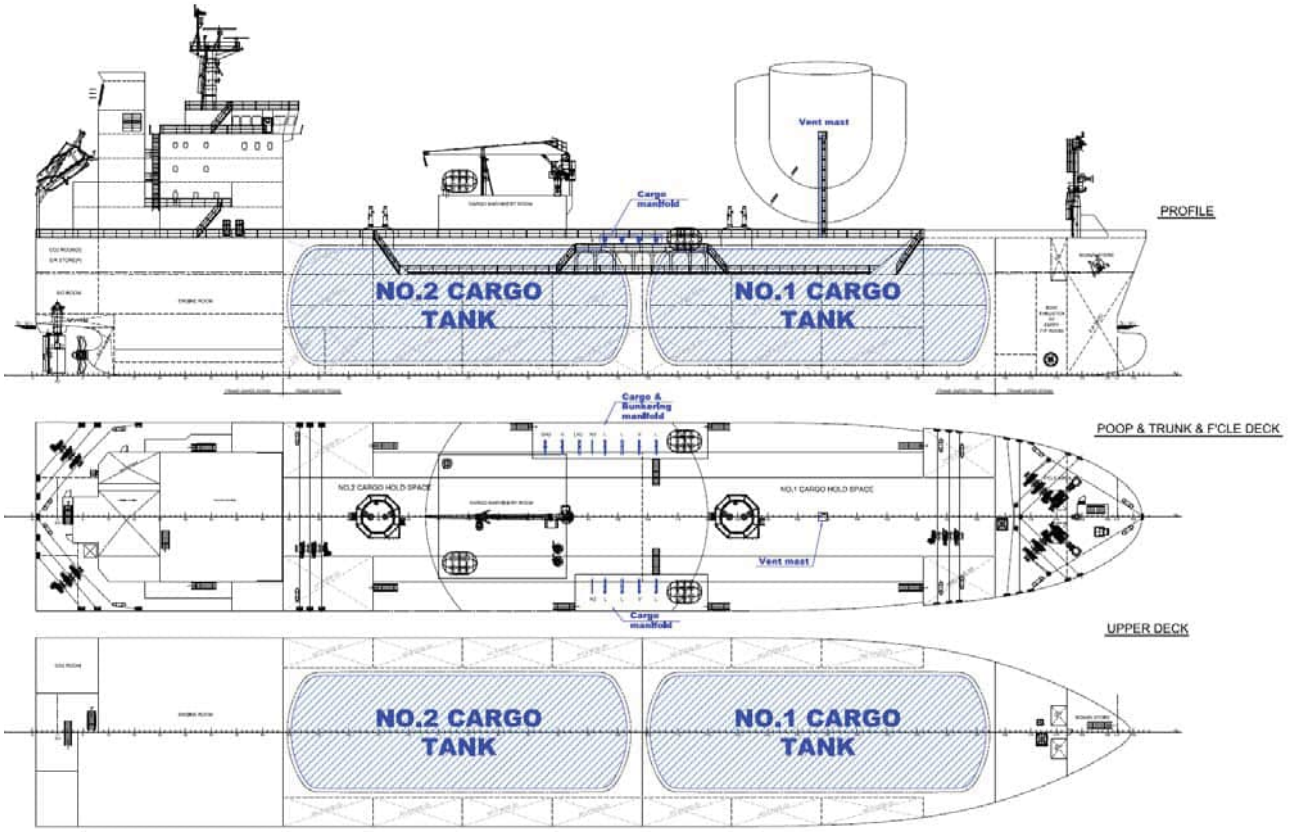


그림 5-1. 10K CBM Hydrogen Bunkering Vessel

표 5-2. 10K 수소 벙커링 선박의 주요 치수 및 특징

Length (O.A.)	129.90m
Breadth	22.00m
Depth / Draft	11.80m / 5.80m
Hydrogen Storage Tank	5,000m^3 per tank, IMO Type-C tank
Bunkering Capacity	Liquid hydrogen: 293m^3/h @ 6barg, -244℃ Gaseous hydrogen: 50m^3/h @ 350barg, -33℃

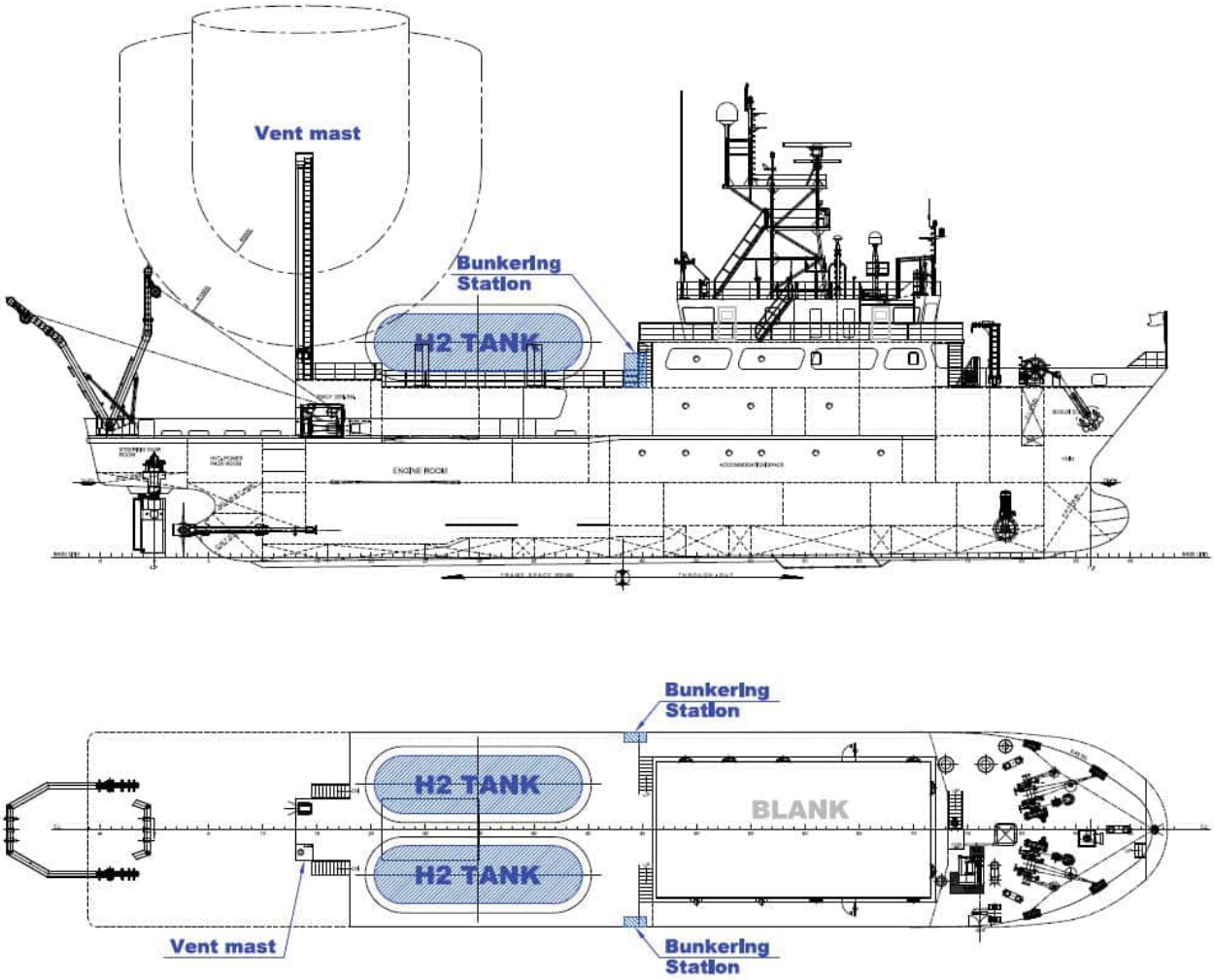


그림 5-2. G/T 700T Research Vessel (고압기체수소)

표 5-3. 700톤급 수산과학조사선의 주요 치수 및 특징

Length (O.A.)	59.91m
Breadth	10.80m
Depth / Draft	6.75m / 4.15m
Hydrogen Storage Tank	150m^3 per tank, IMO Type-C, 2 sets
Tank Pressure (Design / Operating)	450barg / 350barg
Tank Design Temperature	45℃

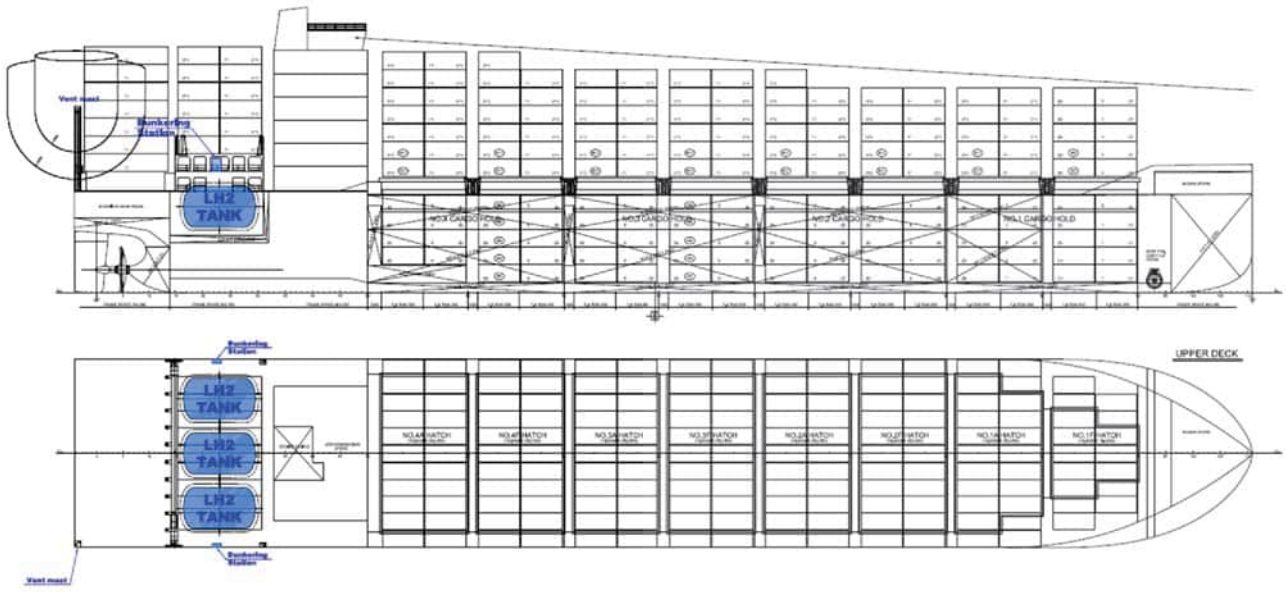


그림 5-3. 1,800TEU Container Vessel (액체수소)

표 5-4. 1,800TEU 컨테이너선박의 주요 치수 및 특징

Length (O.A.)	172.20m
Breadth	27.50m
Depth / Draft	14.30m / 8.50m
Hydrogen Storage Tank	260m^3 per tank, IMO Type-C, 3 sets
Tank Pressure (Design / Operating)	9barg / 6barg
Tank Design Temperature	-253℃

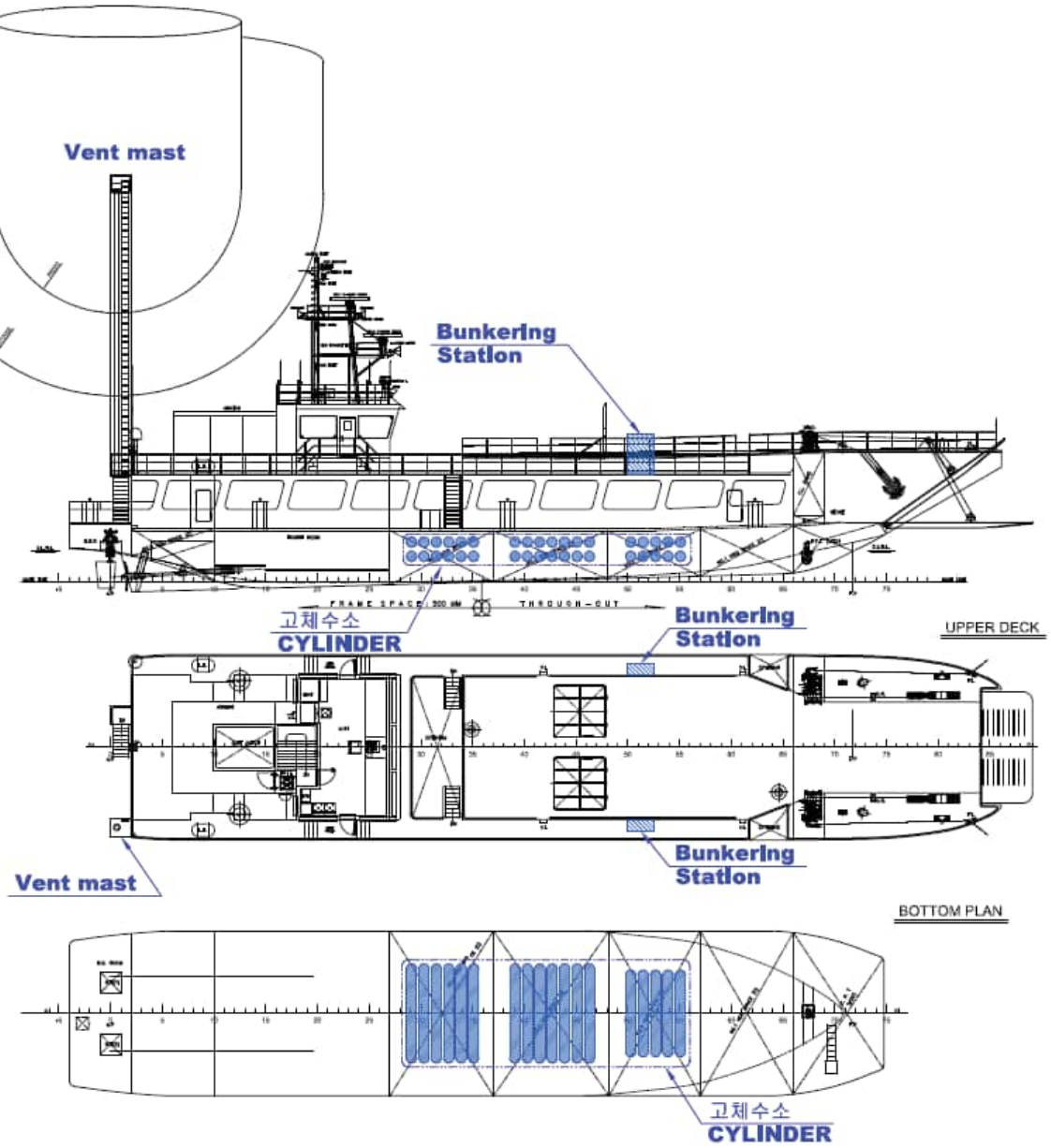


그림 5-4. G/T 260T Car Carrier (고압고체수소)

표 5-5. 260톤급 차도선의 주요 치수 및 특징

Length (O.A.)	45.20m
Breadth	8.00m
Depth / Draft	2.50m / 1.50m
Hydrogen Storage Tank	0.82m^3 per tank, 104 sets
Tank Operating Pressure / Temp.	64barg / 25℃

5.2. HAZOP 노드

HAZOP 분석 대상 시스템인 10K 수소 벙커링 선박과 기체수소 수취선박(G/T 700T research vessel), 고체수소 수취선박(G/T 200T car carrier) 및 액체수소 수취선박(1,800TEU container vessel)을 6개의 노드로 구분하여 수행한다. 노드로 구분하여 분석을 수행하는 것은 분석 범위를 명확하게 하고 체계적으로 접근하기 위함이다.

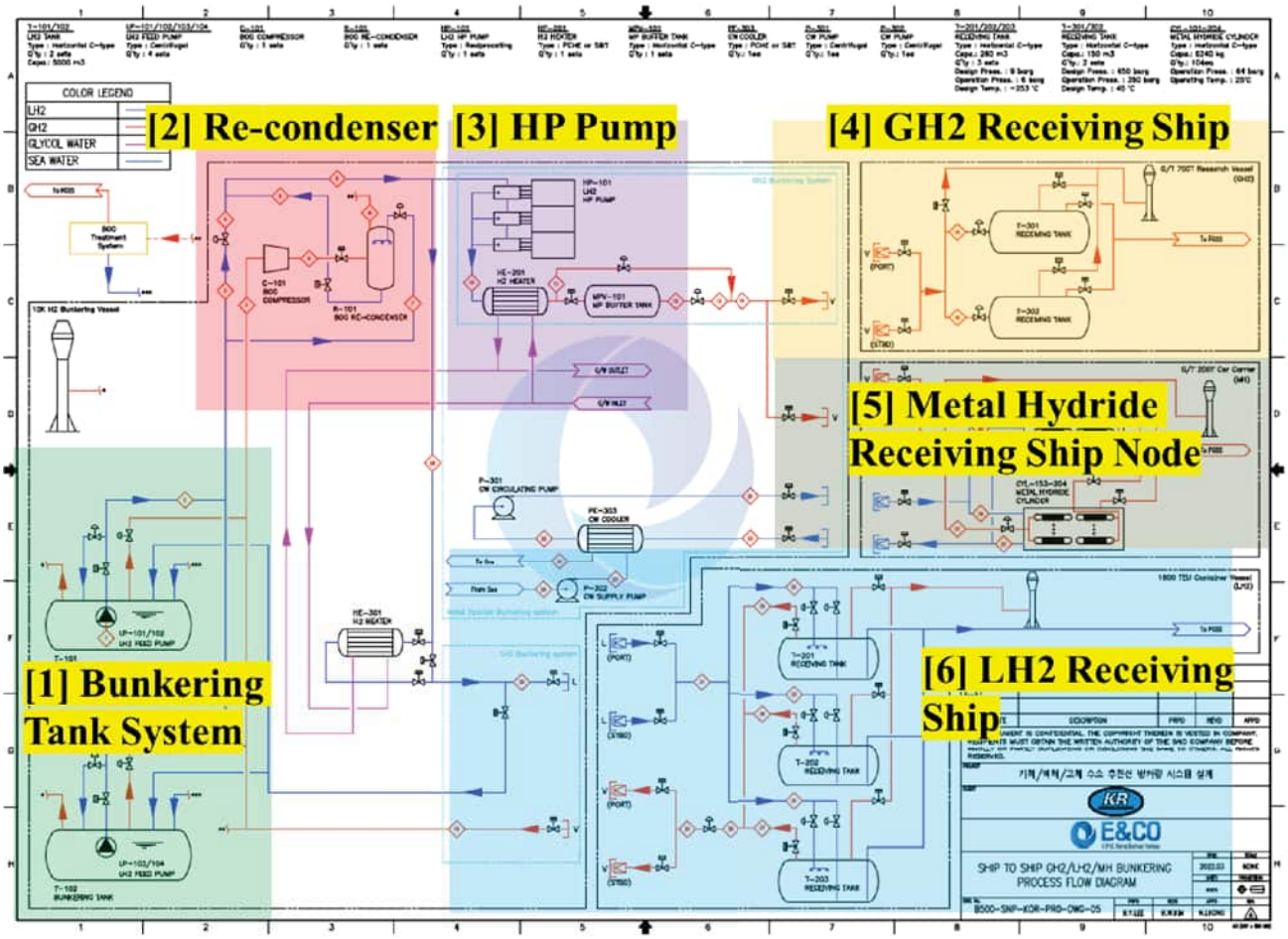


그림 5-5. HAZOP 노드

- 노드 1 (Bunkering tank system): 액화수소를 저장하고 수취선박 수소연료 저장탱크에 수소연료(기체, 액체 상태)를 공급하기 위한 시스템으로써, 연료 공급, 회수 및 퍼징 등과 관련된 모든 밸브/장비를 포함한다.

- 노드 2 (Re-condenser): 액화수소 저장 탱크 및 배관에서 이송 중 자연적으로 기화되는 기체수소를 대기 중으로 방출시키지 않고 재액화시켜 탱크로 회수 또는, 액체수소 추진선박에 연료로 공급한다.

- 노드 3 (HP pump): HP pump와 Heater를 이용하여 압력 및 온도 조건을 제어하여 기체

및 고체수소 추진선박에 연료로 공급한다. 탱크에서 연료 공급 라인으로 이송된 수소연료는 고온의 글리콜 워터와의 열 교환을 통해 기화되어 공급된다. 기체수소 추진선박의 경우 Heater와 Buffer 탱크에서 온도 제어 후 Mixing된 기체 수소를 Control valve를 통해 감압하여 공급한다. 반면, 고체수소 추진선박의 경우 온도 제어를 위한 Mixing 없이 Buffer 탱크를 거치지 않고 바로 연료 공급을 한다.

- 노드 4 (GH_2 receiving ship): G/T 700T Research vessel로써 수소연료 벙커링 선박으로부터 고압기체수소를 공급받아 최대 150m^3 용량의 고압기체 수소탱크 2개에 설계온도 45℃ 및 설계압력 450barg로 저장 후, FGSS를 통해 압력 350barg의 연료로 사용하는 수취선박이다. 연료 공급 작업 또는 선박 운용 중 과압 발생 시 선박에 위치한 Vent mast를 통해 수소연료를 배출한다.

- 노드 5 (Metal hydride receiving ship): G/T 200T Car carrier로써 수소연료 벙커링 선박으로부터 고압고체수소를 공급받아 최대 0.82m^3 용량의 104개의 Metal hydride cylinder에 저장 후, FGSS를 통해 압력 64barg 및 온도 25℃의 연료로 사용하는 수취선박이다. 벙커링 작업 시, 원활한 수소 흡장을 위해 해수를 이용하여 Metal hydride cylinder의 온도를 일정하게 유지시켜야 하고, 연료 공급 작업 또는 선박 운용 중 과압 발생 시 선박에 위치한 Vent mast를 통해 수소연료를 배출한다.

- 노드 6 (LH_2 receiving ship): 1,800TEU Container vessel로써 수소연료 벙커링 선박으로부터 액체수소를 공급받아 최대 260m^3 용량의 액체수소 탱크 3개에 설계온도 -253℃ 및 설계압력 9barg로 저장 후, FGSS를 통해 압력 6barg의 연료로 사용하는 수취선박이다. 연료 공급 작업 또는 선박 운용 중 과압 발생 시 선박에 위치한 Vent mast를 통해 수소연료를 배출한다.

6. HAZOP 워크숍

HAZOP 워크숍에는 총 19명의 전문가가 참여하여, 수소 벙커링 시스템 운영과 관련된 일련의 공정의 위험도를 평가하였다. 워크숍 진행자(Facilitator) 및 기록(Scribe)은 KR에서 담당하였고, 전문가 참석 명단 및 서명록은 다음과 같다.

- 2022년 05월 31일(목), 10:00 ~ 18:00
- 장소: 한국선급 부산본부 3층 세미나실

No.	Name	Company/Position	Role	Remark
1	이상익	KR 시스템안전연구팀/수석연구원	Facilitator	Full-time
2	이현용	KR 시스템안전연구팀/책임연구원	Scribe	Full-time
3	이동준	KR 시스템안전연구팀/수석연구원	SME	Full-time
4	박동욱	KR 시스템안전연구팀/선임연구원	SME	Full-time
5	정철우	한국해사기술 싱크탱크본부/상무	SME	Full-time
6	정현아	한국해사기술 싱크탱크본부 /부장	SME	Full-time
7	박정현	한국해사기술 싱크탱크본부 /부장	SME	Full-time
8	조민규	E&CO 기술총괄담당/이사	SME	Full-time
9	이훈이	E&CO 엔지니어링팀/과장	SME	Full-time
10	최정호	동아대학교 공정연구실/교수	SME	Full-time
11	이진광	동아대학교 공정연구실/교수	SME	Full-time
12	최은정	동아대학교 공정연구실/석사	SME	Full-time
13	현수빈	동아대학교 공정연구실/석사	SME	Full-time
14	이용석	동아대학교 공정연구실/학사	SME	Full-time
15	정지현	한국조선해양기자재연구원 국제표준팀/선임연구원	SME	Full-time
16	박충환	중소조선연구원 해양레저안전연구센터/수석연구원	SME	Full-time
17	윤동협	중소조선연구원 설계엔지니어링지원센터/선임연구원	SME	Full-time
18	문영식	GASPACK/전무이사	SME	Full-time
19	이요림	한국가스기술공사 공정설계부/과장	SME	Full-time

수소추진선박 벙커링 및 수소운반선박 적하역 안전기준 개발
[수소연료 벙커링 위험성평가 HAZOP 워크숍]

Date	31 May, 2022	Venue	한국선급, 부산

No.	Name	Company & Position	Team & Background & Contact	Sign
1	박동욱	KR 선임	· 시스템안전연구팀 · offshore safety engineering 7yr	
2	이진광	동아대 연구	· 공정연구실	
3	최은정	동아대 석사	· 공정연구실	
4	이용석	동아대 학사	· 공정 연구실	
5	현두빈	동아대 석사	· 공정연구실	
6	문영식	(주)자스택 전무		
7	정지현	KOMERI 선임연구원		
8	조민규	E&W 이사	- 기술총괄 상담	
9	이훈이	ERCO 과장	- 엔지니어링팀	
10	윤동현	RZMS 선임	- 세계 엔지니어링 지원 세계	

수소추진선박 벙커링 및 수소운반선박 적하역 안전기준 개발
[수소연료 벙커링 위험성평가 HAZOP 워크숍]

Date	31 May, 2022	Venue	한국선급, 부산

No.	Name	Company & Position	Team & Background & Contact	Sign
11	박충희	RIMS 수석	- 치영계 저안전 연구센터	
12	정철우	KOMAC 상무.	- 심크탱크 본부	
13	정현아	KOMAC 부장	- 심크탱크 본부	
14	이요림	KOGAS-Tech 과장	- 엔지니어링 사업처 공정설계부	
15	박정현	KOMAC 부장	- 심크탱크 본부	
16	최정도	동아대	- 공정연구실	
17	이현용	KR	- 시스템안전연구팀	
18	이상익	KR. 수석	- 시스템 안전 연구팀	
19	이동준	〃	- 시스템 안전 연구팀	

7. 결과

7.1. 요약

총 6개의 Node에 대한 HAZOP 분석을 통해 도출된 안전성 검토 결과 및 안전성 향상을 위해 필요한 추가 안전조치 사항을 보고서에 기록하였으며, 본 HAZOP 분석의 모든 결과들은 참여전문가들의 논의 내용을 바탕으로 작성된 것으로, 모든 전문가들의 합의를 통해 최종 결정되었다. 수소연료추진선박 벙커링에 대한 HAZOP 분석 결과, 총 80개의 위험 시나리오가 식별되었고, 각 시나리오의 위험도 지수를 정성적으로 평가하였다. 이 중 ALARP 수준의 위험 시나리오는 아래 그림 7-1과 같이 39개, 무시가능한 수준의 위험시나리오는 41건이 확인되었고, 위험 시나리오에 대해 권고사항으로 제시된 안전 조치를 실제 시스템 운영 전 모든 사항을 처리하는 것이 바람직하다.

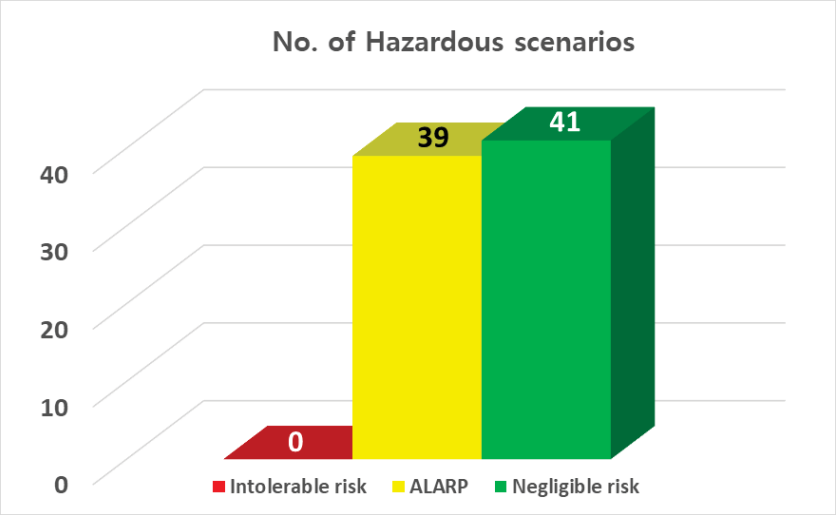


그림 7-1. 위험도 수준에 따른 HAZOP 분석 결과

위험 시나리오들을 노드 별로 분류하여 위험도 분포를 살펴보면 그림 7-2와 같다. 허용불가 위험도 영역에 해당하는 위험 시나리오는 앞서 설명한 바와 같이 식별되지 않았고, 가장 많은 위험시나리오가 식별된 노드는 'Node 1: Bunkering tank system'로써 ALARP 수준 6개 및 무시가능한 수준 15개 포함하여 총 21개의 위험시나리오가 식별되었다.

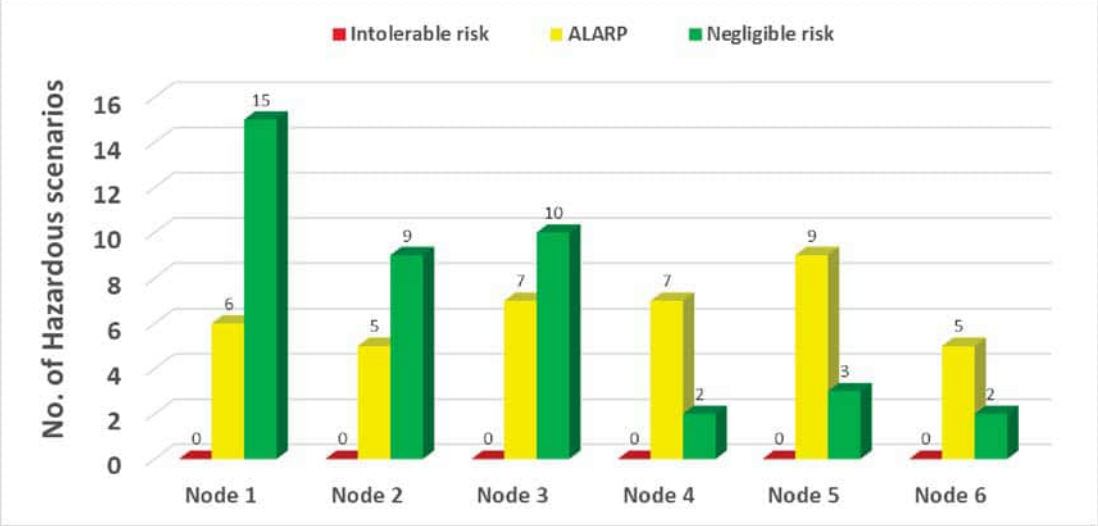


그림 7-2. 노드 별 위험도 수준 비교

7.2. 권고사항 목록 및 상세내용

No.	Node	RI	Recommendations
1	1	4.0	벙커링 작업 전, 벙커링 작업 관련 밸브 상태 지정 확인
2	1	4.0	벙커링 라인에 유량계 적용
3	1	3.0	Backpressure등을 고려하여, Top spray라인연결을 Liquid filling등으로 수정 고려
4	1	4.0	Vapor return 및 Vapor header 라인 정리 검토 및 Forcing vaporizer를 통한 탱크 압력 유지 검토
5	1	8.0	Inert gas 또는 공기를 충분히 제거할 것을 벙커링 절차서 내 명시
6	1	8.0	저온에서 응축된 불순물을 제거하기 위하여 화물 관장치에 여과와 같은 적절한 수단을 제공 [Quoted from 액화수소 산적운반선 지침서]
7	1	6.0	ESD 및 Trip 작동 상황 및 후속 조치 업데이트
8	1	6.0	C&E Chart 업데이트
9	1	6.0	센서의 알람리스트 및 인터락 업데이트 (I/O list 및 C&E Chart)
10	1	9.0	선급에서 요구하는 재료 선정 및 시험 수행 (충격 시험 등)
11	1	6.0	Pre-cooling 절차를 벙커링 절차서에 구체적으로 명시
12	1	6.0	선급규칙에 따른 Gas detector(위치, 개수) 적용
13	1	9.0	적합한 매체와 장비를 이용한 밀폐 및 누설시험 수행(ex. 헬륨 추적가스를 포함한 질소 및 전자누출탐지기 등)

No.	Node	RI	Recommendations
14	1	9.0	표준(AIAA등)에서 허용하는 재질의 가스킷 사용
15	1	4.0	극저온용 밸브 및 적합한 단열재 적용 (ex. vacuum jacketing or noncombustible material with a vapor-tight outer covering)
16	1	4.0	PSV 전단 Isolation valve에는 Mechanical Interlock 설치
17	1	4.0	액체수소가 충만한 상태로 격리될 우려가 있는 모든 관장치 및 구성품에는 압력도출밸브 설치할 것
18	1	1.0	액체수소에서 Ortho비율을 확인하여, 로딩 및 벙커링 수행
19	1	2.0	탱크 PSV 후단라인에 연결되는 PSV-0403A, PSV-0400A 라인들의 별도 분리 검토
20	1	-	탱크 형상 및 크기를 고려한 Sampling point 설치 위치 검토
21	1	2.0	선급 규칙에 따라서 계산된 Loading Limit에 따른 적재
22	1	6.0	공기 중 습기로부터 형성된 얼음이 쌓여 벤트가 막히지 않도록 적절한 수단 제공
23	1	2.0	탱크 내 BOG Management 방법 고려
24	1	-	Grounding, Earthing 적용
25	1	-	적절한 퍼지를 위해서 시스템 내에 여러 위치에서 가스농도 및 온도 측정 벤트 가스 내 산소의 적정 비율 검토 필요(ex. 산소의 농도가 1% 미만이 된 이후에 수소 로딩)
26	2	2.0	Oil free 타입 압축기 검토
27	2	6.0	수소/청수 혼입시 처리 절차 수립 (밸브 차단 및 ESD 작동 등)
28	2	6.0	청수 탱크 벤트에 가스 감지기 설치하여 수소 유입 감지
29	2	6.0	DPIT등을 통한 차압 감지
30	2	4.0	액위 측정을 통한 Re-condenser 전단 컨트롤 밸브 및 후단 밸브의 제어 필요 여부 검토
31	2	4.0	Re-condenser 및 전후단 밸브 운전개념 정립
32	2	4.0	LIT-2152A, 2153A(DWG-08, 8, G)Remote 확인 및 알람 적용 검토
33	3	3.0	압축수소, 고체수소, 액체수소 벙커링 작업별로 절차를 명확히 명시
34	3	3.0	액체수소 벙커링 라인과 HP 펌프 라인의 분기점 근처에 차단 밸브를 설치하여, 액체수소가 Dead leg에 고이는 상황을 방지

No.	Node	RI	Recommendations
35	3	6.0	펌프 Start Interlock 반영
36	3	4.0	액체수소/글리콜 워터 혼입시 처리 절차 수립 (밸브 차단 및 ESD 작동 등)
37	3	4.0	단열재 시공여부 검토필요
38	3	3.0	TI-5152A를 통한 시스템 트립 또는 유량 제어 로직 정립
39	3	-	NPSHr(Net Positive Suction Head required)을 고려한 장비(Re-condenser 및 HP펌프) 배치 고려
40	4	6.0	가스감지기 설치 및 Flange guard 설치
41	4	-	압력에 적합한 밸브 적용
42	4	6.0	수취선 라인에 온도 측정 및 고온(벙커링 수소) 대응 방안 정립
43	4	-	탱크 입구에서 온도 측정 수취선 라인에 온도 측정 및 고온(벙커링 수소) 대응 방안 정립
44	4	-	수취선 라인에 압력 및 온도 측정에 의한 대응 방안 정립
45	4	-	수취선 라인에 압력 및 온도 측정에 의한 대응 방안 정립
46	5	-	냉각수 출구 온도 측정 및 대응방안 정립
47	5	-	Water bath 레벨 측정
48	5	-	MH 실린더 배관 라인에 PSV설치
49	5	-	적용되는 MH의 특성에 따라 적합한 필터 또는 스트레이너 적용
50	5	6.0	케이싱 PSV 설치 검토
51	5	6.0	실린더의 설계 압력 정의 필요
52	5	6.0	냉각수 배관에 유량계 설치
53	6	6.0	Vapor return라인을 PFD에 표시
54	6	6.0	ERC를 포함한 호스를 P&ID에 포함하고 액체수소의 물성에 적합한 호스 사용할 것
55	6	6.0	워터 커튼 적용

ANNEX

ANNEX A. HAZOP Worksheet

System Node 1. Bunkering Tank Systems (B500-SNP-KOR-PRO-DWG-06, 07)

	Causes	Consequences	Existing Safeguards	FI	SI	RI	REC	Recommendations	Remarks
No/Less Flow									
1	[Liquid Line] PCV-0551A, 0552A(DWG-06, 5, C) 밸브 오작동으로 닫힘	* 벙커링 불가 * 펌프 손상	* PI-0052A, 0054A 를 통해서 배관 압력 모니터링 및 High, Low 압력 알람 * PI-0053A, 0055A High High 트립(DWG-06, 5, C) (Low Low 및 High High 압력 명기 필요) * Pump Electrical Protection 시스템 적용	4.0	1.0	**4.0**	1	* 벙커링 작업 전, 벙커링 작업 관련 밸브 상태 지정 확인	* 벙커링 매뉴얼 상에 벙커링 호스 연결 후 벙커링 모드로 전환할 것을 명기
							2	* 벙커링 라인에 유량계 적용	
2	[Liquid Line] PCV-0550A(DWG-06, 4, C) 밸브 오작동으로 열림	* 벙커링 압력 저하 * 벙커링 중단	* PI-0052A, 0054A 를 통해서 배관 압력 모니터링 및 High, Low 압력 알람	3.0	1.0	**3.0**	3	* Backpressure 등을 고려하여, Top spray 라인연결을 Liquid filling 등으로 수정 고려	
3	[Vapor Return Line] XV-0500A(DWG-06, 4, C) 밸브 오작동으로 닫힘	* BOG 회수불가 * 수취 탱크 압력 상승 * 벙커링 성능 저하 * 벙커링 탱크 내 압력저하	* PI-B051A, PI-B050A 을 통해 배관 압력 모니터링 및 알람 작동(DWG-22, 6, B, 8, B) * 내조 탱크의 Full vacuum 을 견디는 설계	4.0	1.0	**4.0**	4	* Vapor return 및 Vapor header 라인 정리 검토 및 Forcing vaporizer 를 통한 탱크 압력 유지 검토	
4	퍼지밸브 열림	* 벙커링 압력 저하	* 차단밸브 2 개 및 퀵커넥터 설치됨	3.0	1.0	**3.0**		* 권고사항 #1 참조	
5	잔여 Inert gas 또는 공기에 의한 얼음형성 및 배관 막힘	* 벙커링 불가 * 펌프 손상 * 배관 손상	* 벙커링 매니폴더에 Strainer 적용	4.0	2.0	**8.0**	5	* Inert gas 또는 공기를 충분히 제거할 것을 벙커링 절차서 내 명시	
							6	* 저온에서 응축된 불순물을 제거하기 위하여 화물 관장치에 여과와 같은 적절한 수단을 제공 [Quoted from 액화수소 산적운반선 지침서]	
6	ESD 작동	* 벙커링 중단		2.0	3.0	**6.0**	7	* ESD 및 Trip 작동 상황 및 후속 조치 업데이트	
							8	* C&E Chart 업데이트	
							9	* 센서의 알람리스트 및 인터락 업데이트 (I/O list 및 C&E Chart)	

수소추진선박 벙커링 위험도 평가

	Causes	Consequences	Existing Safeguards	FI	SI	RI	REC	Recommendations	Remarks
7	수소취성 및 저온 취성에 의한 배관 및 탱크 파손에 따른 수소 누출	* 벙커링 불가 * 액체수소 손실 * 저온 노출에 의한 작업자 부상, 장비, 선체 손상 위험 * 화재/폭발 위험	* 수소취성 및 저온취성에 적합한 배관 및 탱크 재료 사용 * 적합한 Schedule 파이프 사용 * 다중벽 구조의 타입 C 탱크	3.0	3.0	**9.0**	10	* 선급에서 요구하는 재료 선정 및 시험 수행 (충격 시험 등)	* Liquid line 및 저온가스라인은 진공단열 * Enclosed space 를 통과하는 가스라인은 이중배관 적용
8	저온 수축에 따른 벙커링 배관 파손 및 Leak	* 벙커링 불가 * 액체수소 손실 * 저온 노출에 의한 작업자 부상, 장비, 선체 손상 위험 * 화재/폭발 위험	* 탱크 및 배관 압력 모니터링 가능	2.0	3.0	**6.0**	11	* Pre-cooling 절차를 벙커링 절차서에 구체적으로 명시	* 다양한 로드 케이스를 조합한 배관응력해석 수행 검토
							12	* 선급규칙에 따른 Gas detector(위치, 개수) 적용	* Bellows 및 Expansion Loop 적용 * Flange connection 하부 드립트레이 적용
9	용접부, 이음부, 밸브 패킹 및 실(seal)을 통한 수소 누설	* 벙커링 불가 * 액체수소 손실 * 저온 노출에 의한 작업자 부상, 장비, 선체 손상 위험 * 화재/폭발 위험	* 탱크 및 배관 압력 모니터링 가능	3.0	3.0	**9.0**	13	* 적합한 매체와 장비를 이용한 밀폐 및 누설시험 수행(ex. 헬륨 추적가스를 포함한 질소 및 전자누출탐지기 등)	
							14	* 표준(AIAA 등)에서 허용하는 재질의 가스킷 사용	* 선급 규정: 수소의 높은 투과성 때문에 공기를 대신하여 헬륨, 또는 5 % 수소와 95 % 질소 혼합물이 밀폐시험의 매체로 사용되어야 한다. * CGA_G-5.4 Pneumatic testing with a mixture of at least 10% helium in an inert gas or 5% to 10% hydrogen in an inert gas.
10	리모트 밸브, 수동 밸브의 얼음 형성에 따른 작동 불가	* 밸브 작동 불가		4.0	1.0	**4.0**	15	* 극저온용 밸브 및 적합한 단열재 적용 (ex. vacuum jacketing or noncombustible material with a vapor-tight outer covering)	
11	펌프 고장	* 벙커링 불가	* 각 탱크 당 펌프 2 대 제공			-			
More Flow									
1	펌프 제어 오류 (벙커링 탱크)	* 펌프 과열 및 손상 * 배관압력 상승	* PI-0052A, 0054A 를 통해서 배관 압력 모니터링 및 High, Low 압력 알람 * PI-0053A, 0055A High High 트립(DWG-06, 5, C) (Low Low 및 High High 압력 명기 필요) * 펌프 운전 상태 모니터링 가능	4.0	1.0	**4.0**		* 권고사항 #5 참조	
Reverse Flow									

	Causes	Consequences	Existing Safeguards	FI	SI	RI	REC	Recommendations	Remarks
1	PCV-0550A (DWG-06, 4, C)열림	* 벙커링 유량 감소	* 배관 압력 모니터링 가능	4.0	1.0	4.0			
Less Temperature									
1	특이사항 없음								
More Temperature									
1	탱크 단열 손상	* BOG 과다 생성 * 탱크 내부 압력 상승	* 과압 발생 시, 탱크 PSVs 를 통해 배출 * 탱크내부 온도 모니터링 가능	2.0	2.0	4.0	16	* PSV 전단 Isolation valve 에는 Mechanical Interlock 설치	
2	배관 단열부 손상	* 배관 내 2 phase flow 형성 가능 * 탱크와 배관 내부 압력 상승	* 과압 발생 시, PSV 를 통해 배출	2.0	2.0	4.0	17	* 액체수소가 충만한 상태로 격리될 우려가 있는 모든 관장치 및 구성품에는 압력도출밸브 설치할 것	
3	Ortho 수소의 비율 높음	* BOG 과다 생성 * 탱크 내부 압력 상승		1.0	1.0	1.0	18	* 액체수소에서 Ortho 비율을 확인하여, 로딩 및 벙커링 수행	
4	외부 화재	* BOG 발생량 증가 * 탱크 내부 압력 상승 * 센서 및 장비 오작동 유발	* 다중벽 구조의 타입 C 탱크 적용 * 용량 계산된 PSVs 탱크에 설치됨 * 냉각 및 방화 목적의 물분무장치 제공	2.0	2.0	4.0		* 권고사항 #16 참조	
5	탱크 외부 열 유입	* BOG 발생량 증가 * 탱크 내부 압력 상승	* 다중벽 구조의 타입 C 탱크 적용 * 선급 규칙에 따라 용량 계산된 PSV x 2 탱크에 설치	2.0	1.0	2.0	19	* 탱크 PSV 후단라인에 연결되는 PSV-0403A, PSV-0400A 라인들의 별도 분리 검토	
No/Less Level									
1	탱크 내 잔존수소 부족	* 펌프 Start up 을 위한 최소 레벨 불만족 * 벙커링 불가 * 펌프 손상	* 레벨 게이지 설치됨			-	20	* 탱크 형상 및 크기를 고려한 Sampling point 설치 위치 검토	
More Level									
1	탱크 외부 열 유입	* 액체수소 부피 팽창 및 레벨 상승	* 선급 규칙에 따라 용량 계산된 PSV x 2 탱크에 설치 * LIC-0150A, 0151A(DWG-06, 2, D)를 통한 High, Low 알람 및 레벨스위치 설치됨 * Overfill protection 설치됨	2.0	1.0	2.0	21	* 선급 규칙에 따라서 계산된 Loading Limit 에 따른 적재	* Cold vapor 의 벤팅에 의한 영향 확인 및 적절한 조치 검토(ex. Liquid air formation) * HH 에 따른 밸브 자동 차단 검토 필요 [한국선급 규칙 7 편 전용선박] " 1303. 넘침제어【지침 참조】 1. 4 항에 규정하는 경우를 제외하고, 각 화물탱크에는 다른 액면지시장치로부터

수소추진선박 벙커링 위험도 평가

Causes		Consequences	Existing Safeguards	FI	SI	RI	REC	Recommendations	Remarks
									독립적으로 작동하고 작동 시 가시가청 경보를 발하는 고액면경보장치가 설치되어야 한다. 2. 고액면경보와 별도로 작동하는 추가적인 센서는 하역용 관장치가 과도한 액체압력을 받지 않고 탱크가 액체로 가득 채워지는 것을 방지하도록 차단밸브를 자동으로 작동시켜야 한다."
No/Less Pressure									
1	수취선 노드 참조								
More Pressure									
1	배관 또는 탱크 PSV 막힘	* 배관 또는 탱크 손상		2.0	3.0	6.0	22		
2	탱크 외부 열 유입	* 탱크 압력 상승 * 과다 BOG 발생	* 선급 규칙에 따라 용량 계산된 PSV x 2 탱크에 설치	2.0	1.0	2.0	23		
3	펌프 제어 오류 등	* 임계 유체로 인한 펌프 파손		2.0	1.0	2.0			
Etc.									
1	벙커링 시 액체수소 유속 증가	* Hammering 으로 인한 밸브 등 기자재 손상 * Static charge 축적	* LNG 대비 낮은 밀도			-	24	* Grounding, Earthing 적용	* 일반적 LNG 운반선 - Liquid Max: 10m/s - Vapor Max: 40m/s * 문헌조사 등을 통해 액체수소 및 압축수소에 적합한 Velocity 검토
2	배관 및 탱크의 불완전한 가스 치환 - 수소를 질소로 치환 - 질소를 공기로 치환 - 공기를 질소로 치환 - 질소를 수소로 치환 등 * 퍼지 속도, 지속시간 또는 혼합 범위가 너무 낮으면 수소, 공기, 불활성 가스가 내부에 잔존	* 화재/폭발 위험 * 잔여 공기 및 질소의 고화==> 기자재 손상, 배관 막힘				-	25	* 적절한 퍼지를 위해서 시스템 내에 여러 위치에서 가스농도 및 온도 측정 * 벤트 가스 내 산소의 적정 비율 검토 필요(ex. 산소의 농도가 1% 미만이 된 이후에 수소 로딩)	* 참조: 80K 까지는 수소가스 사용 후, 80K 이상부터 질소 사용(AIAA) * AIAA G095: The oxygen content in the vented purge gas should be less than 1% by volume before the GH2 is introduced. * CGA_G-5.4: Systems shall be purged with an inert gas to eliminate oxygen/air before hydrogen is admitted. Residual oxygen shall be reduced to less than 1%.

System Node 2. BOG Re-condenser (B500-SNP-KOR-PRO-DWG-08)

	Causes	Consequences	Existing Safeguards	FI	SI	RI	REC	Recommendations	Remarks
No/Less Flow									
1	XCV-2550A(DWG-08, 3, C) 밸브 오작동에 의한 닫힘	* 압축기 손상 * Re-condensing 불가	* Recycle 밸브 및 라인 설치	4.0	2.0	**8.0**			
2	XV-0502A(DWG-06, 8, C) 탱크 BOG 배출밸브 닫힘	* 압축기 손상 * 벙커링 탱크 압력 상승 * Re-condensing 불가	* Recycle 밸브 및 라인 설치 * PI-2051A(DWG-08, 2, B), PI-2053A(DWG-08, 3, B)를 통해 High High, Low Low 트립 * PIC-2050A(DWG-08, 1, C), PIC-2052A(DWG-08, 3, C)를 통해 High, Low 알람	4.0	2.0	**8.0**			
3	오일 분리기 및 필터 막힘	* Re-condensing 불가	* Recycle 밸브 및 라인 설치 * PI-2055A, PIC2054A(DWG-08, 7, B)를 통해 High, Low 알람 및 High High, Low Low 트립 * 필터 2 set, one standby * 필터 DPI 설치	2.0	1.0	**2.0**	26	* Oil free 타입 압축기 검토	
4	[오일 배관 또는 튜브] 오일 탱크 내 히터 고장 또는 냉각 후 배관 내 오일 점도 상승	* 압축기 오일 공급 불가		2.0	1.0	**2.0**			
5	Gas Cooler(DWG-08, 9, D) 손상	* 청수 순환 라인으로 수소 유입 가능성 * Re-condensing 성능저하		2.0	3.0	**6.0**	27	* 수소/청수 혼입 시 처리 절차 수립 (밸브 차단 및 ESD 작동 등)	
							28	* 청수 탱크 벤트에 가스 감지기 설치하여 수소 유입 감지	
							29	* DPIT 등을 통한 차압 감지	
6	Recycle cooler 전단 XCV-2556A(DWG-08, 1, G) 오작동으로 인한 닫힘	* Recycle Cooler 를 통한 청수 냉각 불가 * 오일 냉각 불가 * 압축기 후단 BOG 냉각 불가		3.0	2.0	**6.0**		* 권고사항 #26 참조	
7	Re-condenser 전단 PCV-2554A(DWG-08, 6, H) 오작동으로 닫힘	* Re-condensing 불가	* BOG Treatment system 이용	3.0	2.0	**6.0**			

수소추진선박 벙커링 위험도 평가

Causes		Consequences	Existing Safeguards	FI	SI	RI	REC	Recommendations	Remarks
More Flow									
1	Excessive BOG 발생 및 공급	* 탱크 압력 상승	* 압축기 전단 XCV-2550A(DWG-08, 3, C) 및 압축기 제어 * Re-condenser 전단 PCV-2554A(DWG-08, 6, H)를 통한 액체수소 유량 조절 * BOG Treatment system 이용	4.0	1.0	4.0			
Reverse Flow									
1	특이사항 없음								
Less Temperature									
1	특이사항 없음								
More Temperature									
1	청수 시스템 공급 불가로 Gas Cooler 냉각 불가	* Re-condensing 성능 저하	* TI-2254A(DWG-08, 8, D)를 통한 온도 모니터링 가능 * TG-2200A(DWG-08, 2, F)를 통한 온도 확인 가능	3.0	1.0	3.0		* 권고사항 #26 참조	
2	압축기 과열(토출가스 온도 상승)	* Re-condensing 성능 저하	* TI-2252A(DWG-08, 5, C) High High 트립 * TIC-2253A(DWG-08, 5, C) High 알람	3.0	1.0	3.0		* 권고사항 #26 참조	
No/Less Level									
1	Re-condenser 의 액위 조절 실패	* BOG 가스가 HP 펌프 라인으로 인입 * HP 펌프 손상	* LIT-2152A, 2153A(DWG-08, 8, G)를 통해 액위를 Local 확인 가능	2.0	2.0	4.0	30	* 액위 측정을 통한 Re-condenser 전단 컨트롤 밸브 및 후단 밸브의 제어 필요 여부 검토	* LIT 심볼이 Field Mounted 로 표기됨. 확인 필요 * Residence time 고려
							31	* Re-condenser 및 전/후단 밸브 운전개념 정립	
More Level									
1	XV-2501A(DWG-08, 7, H) 고장 등으로 인한 Re-condenser 의 액위 조절 실패	* 액체 수소의 BOG treatment 로 유입	* PIC-2051A(DWG-08, 6, G)를 통한 압력 모니터링 * PIC-2060A(DWG-08, 6, G)를 통한 High 알람	2.0	2.0	4.0	32	* LIT-2152A, 2153A(DWG-08, 8, G)Remote 확인 및 알람 적용 검토	

Causes		Consequences	Existing Safeguards	FI	SI	RI	REC	Recommendations	Remarks
No/Less Pressure									
1	BOG 압축기 제어오류 등	* Re-condensing 성능 저하	* LIT-2152A, 2153A(DWG-08, 8, G)를 통해 액위를 Local 확인 가능 * PIC-2060A(DWG-08, 6, G)를 통한 High 알람	3.0	1.0	**3.0**			
2	LH2 Feed 펌프 압력 저하 등	* Re-condensing 성능 저하(압력 하강) * BOG 가스 역류		3.0	1.0	**3.0**			
More Pressure									
1	특이사항 없음								
Etc.									
1	특이사항 없음								

System Node 3. HP Pump (B500-SNP-KOR-PRO-DWG-09, 11, 13)

	Causes	Consequences	Existing Safeguards	FI	SI	RI	REC	Recommendations	Remarks
No/Less Flow									
1	Feed 펌프 고장(DWG-06)	* 연료 벙커링 불가	* Feed 펌프 2 대	2.0	1.0	2.0			
2	PCV-0551A, 0552A(DWG-06, 5, C) 밸브 오작동으로 인한 닫힘	* 벙커링 불가 * 펌프 손상	* HMI 에서 배관 압력 모니터링(PI-0052A, 0054A; DWG-06, 5, D) 하여 액체수소 흐름 확인 및 알람 * 과압 시 PI-0053A(DWG-06, 5, C)를 통해 ESD 작동	3.0	2.0	6.0			
3	PCV-0550A 스프레이 컨트롤 밸브(DWG-07, 4, C) 열림	* 벙커링 압력 저하 * 벙커링 중단	* 배관 압력 모니터링 가능	3.0	1.0	3.0			
4	XV-A503A(DWG-21, 7, D) 밸브 열림	* HP 펌프 공급 유량 저하	* 압축수소와 액체수소의 벙커링은 동시에 일어나지 않음	3.0	1.0	3.0	33 34	* 압축수소, 고체수소, 액체수소 벙커링 작업별로 절차를 명확히 명시 * 액체수소 벙커링 라인과 HP 펌프 라인의 분기점 근처에 차단 밸브를 설치하여, 액체수소가 Dead leg 에 고이는 상황을 방지	
5	XV-3501A(DWG-09, 2, G), XV-3502A 오작동으로 인한 닫힘	* HP 펌프 고장 * 압축수소 벙커링 불가	* PIC-3051A(DWG-09, 2, F)를 통한 압력 모니터링, Low 알람, Low Low Shutdown	3.0	2.0	6.0	35	* 펌프 Start Interlock 반영	
6	Cone Strainer 막힘	* HP 펌프 고장 * 압축수소 벙커링 불가	* DPIT(Differential Pressure Indicator Transmitter)(DWG-09, 1, F)설치됨	2.0	2.0	4.0			
7	XLV-3503A(9, B) 밸브 닫힘	* HP 펌프 고장 * 압축수소 벙커링 불가	* PIC-3054A(DWG-09, 9, B)를 통한 압력 모니터링 및 High High(350bar) ESD 작동 * XV-3510A 를 통한 감압	3.0	2.0	6.0			
8	HP Vaporizer(DWG-11) 손상	* 벙커링 성능 저하(불가) * 액체수소 누출 * 글리콜 워터 순환 라인으로 액체수소 유입 가능성 * 글리콜 워터 결빙	* TIC-5251A(DWG-11, 4, C), TI-5252A(DWG-11, 6, C)를 통한 온도 감지 * 글리콜 워터 탱크의 벤트에 가스 감지기 설치됨	2.0	2.0	4.0	36	* 액체수소/글리콜 워터 혼입 시 처리 절차 수립 (밸브 차단 및 ESD 작동 등)	
More Flow									
1	특이사항 없음								

	Causes	Consequences	Existing Safeguards	FI	SI	RI	REC	Recommendations	Remarks
Reverse Flow									
1	HP 펌프 토출 측 밸브 등 닫힘(rapidly)	* 펌프 손상 * 배관 손상 및 누출	* 배관에 PSV3404A, PSV3405A (Set: 370barg)가 각 각 달려 있음.	3.0	1.0	3.0			
2	1ea 펌프만 운전 시 (HP-101 운전, HP-102 스탠바이) 나머지 펌프의 토출 측으로 흐름	* 벙커링 불가	* 체크밸브 및 차단밸브 설치됨	1.0	1.0	1.0			
Less Temperature									
1	[PSV 후단] PSV 열림	* [PSV 후단 배관] 배관 표면 산소/질소 결빙 및 산소 농축 * 화재/폭발		2.0	2.0	4.0	37	* 단열재 시공여부 검토필요	* 단열재 심볼 반영 필요
2	[HP Vaporizer 후단] TCV-5553A(DWG-11, 5, C) 제어오류로 인한 압축수소 온도 낮음	* 수취선 Metal Hydride 실린더 손상 * 압축수소 탱크(금속) 응축수 및 아이싱 생성	* TI5252A L-Low Temp PSD Action 으로 PCV5551A 가 Close 됨.	3.0	1.0	3.0	38	* TI-5152A 를 통한 시스템 트립 또는 유량 제어 로직 정립	* Design basis 에 따르면, Metal Hydride 실린더는 64barg 25℃ 의 조건으로 공급됨 * Design basis 에 따르면, 압축수소는 탱크는 MPV-101 에 저장되어진 350barg, 25℃인 수소와 함께 혼합되어 –33℃로 제어 후 수취선 탱크로 공급
More Temperature									
1	흡입측 배관 단열재 손상	* 배관 내부 Bubble 생성 * HP 펌프 진동 발생 * HP 펌프 효율 저하 및 고장	* TIC-3250A(2, E)를 통해 High 알람 및 High High shut down	2.0	2.0	4.0			* 적정한 HH 및 H 온도 확인 및 P&ID 에 수치 표기 검토 * 전체 시스템에 대해서 L, LL, H, HH 수치 표기 검토
No/Less Level									
1	특이사항 없음								
More Level									
1	특이사항 없음								
No/Less Pressure									

수소추진선박 벙커링 위험도 평가

Causes		Consequences	Existing Safeguards	FI	SI	RI	REC	Recommendations	Remarks
1	HP 펌프 제어 오류	* 벙커링(충전) 성능 저하 * 충분한 SOC(State of Charge) 달성 불가	* 2xHP Pump	3.0	2.0	**6.0**			
2	기타 No/Less Flow 참조					-			
3						-	39	* NPSHr(Net Positive Suction Head required)을 고려한 장비(Re-condenser 및 HP 펌프) 배치 고려	
More Pressure									
1	배관 내 잔여 액체수소 (DWG-09, 2, G)	* 배관 내 과압 생성 * 배관 파손, 수소 누출 * 화재, 폭발				-		* 권고사항 #17 참조	
2	HP 펌프 제어 오류	* 배관 내 과압 생성 * 배관 파손, 수소 누출 * 화재, 폭발	* 라인에 PSV 설치됨 * 압력 계산을 통한 배관 Sch. 또는 Tube thk 계산 * MFV-3550A (8, A) 열림	3.0	2.0	**6.0**		* 권고사항 #1, #2 참조	
3	HP 펌프 토출 측 후단 밸브(또는 ERC) 등 닫힘	* 배관 내 과압 생성 * 펌프 손상 * 배관 파손, 수소 누출 * 화재, 폭발	* 라인 및 펌프에 PSV 설치됨 * 압력 계산을 통한 배관 Sch. 또는 Tube thk 계산 * XV-3510A 를 통한 감압	3.0	2.0	**6.0**		* 권고사항 #1, #2 참조	
4	HP Vaporizer 막힘	* 배관 내 과압 생성 * 펌프 손상 * 벙커링 불가 * 배관 파손, 수소 누출 * 화재, 폭발		3.0	2.0	**6.0**			
Etc.									
1	HP 펌프 압력 Pulsation	* 진동발생	* Damper 및 Buffer 탱크 설치			-			

System Node 4. GH2 Receiving System (B500-SNP-KOR-PRO-DWG-16, 17, 18, 19)

	Causes	Consequences	Existing Safeguards	FI	SI	RI	REC	Recommendations	Remarks
No/Less Flow									
1	스트레이너 막힘	* 수소 벙커링 불가 * 호스 손상 * 고압 수소 누출	* PI-9050A, 9051A(DWG-16,5, B), PI-0051B, 0052B(DWG-17, 4, B)를 통해, High 시 알람 작동, High High 압력 시 ESD 작동	2.0	2.0	4.0			
2	ESD 닫힘(오작동)	* 수소 벙커링 불가 * 호스 손상 * 고압 수소 누출	* PI-9050A, 9051A(DWG-16,5, B), PI-0051B, 0052B(DWG-17, 4, B)를 통해, High 시 알람 작동	3.0	2.0	6.0			
3	드레인 밸브, 샘플링 밸브, 질소 퍼징 밸브 열림(작업자 실수 등)	* 수소 벙커링 불가 * 호스 손상 * 고압 수소 누출	* PI-9050A, 9051A(DWG-16,5, B), PI-0051B, 0052B(DWG-17, 4, B)를 통해, Low Low 트립 * 차단밸브 2 개씩 설치됨	3.0	1.0	3.0			
4	호스 파손	* 수소 벙커링 불가 * 고압 수소 누출 * 화재, 폭발 * Whipping 등	* 설계 압력 및 고압 수소에 적합한 호스 설치	2.0	3.0	6.0			* ERC(Emergency Release Coupling)의 적용 여부 * 자동차 충전 스테이션의 경우, 차량의 탱크 정보(탱크 부피, 온도, 압력 등)를 충전소로 송출하여 스테이션에서 프로토콜(SAE J2601)에 따라 압력 조절
5	밸브, 플랜지를 통한 누설	* 수소 벙커링 불가 * 고압 수소 누출 * 화재, 폭발		2.0	3.0	6.0	 40	* 권고사항 #13, #14 참조 * 가스감지기 설치 및 Flange guard 설치	* 350bar(design pressure)의 고압 운전조건에 플랜지가 적합한지 확인 필요
6	수소 취성(탱크, 기자재, 배관)	* 수소 벙커링 불가 * 고압 수소 누출 * 화재, 폭발		2.0	3.0	6.0			* 일부 오스테나이트 S/S 의 경우에도 저온에서 항복점 이상의 힘을 받으면 마르텐사이트 구조로 변환 및 수소취성에 민감해짐
7	배관 파손	* 수소 벙커링 불가 * 고압 수소 누출 * 화재, 폭발		2.0	3.0	6.0		* 권고사항 #13, #14 참조	
More Flow									
1	특이사항 없음								

수소추진선박 벙커링 위험도 평가

	Causes	Consequences	Existing Safeguards	FI	SI	RI	REC	Recommendations	Remarks
Reverse Flow									
1							41	* 압력에 적합한 밸브 적용	* Butterfly 밸브 적용 가능 여부 확인.
Less Temperature									
1	HP Vaporizer 후단 TCV-5553A(DWG-11, 4, D) 제어오류	* 배관 단열재 표면 결빙 또는 응축수 * 탱크 표면 응축수 발생	* TIA-7250A(DWG-13, 4, D), TIC-7251A(DWG-13,6, D)를 통한 Temperature high, low 알람	3.0	2.0	**6.0**			
More Temperature									
1	HP Vaporizer TCV-5553A(DWG-11, 4, D) 제어오류	* SOC 만족 불가 * (탱크의 복합재 손상)	* TIA-7250A(DWG-13, 4, D), TIC-7251A(DWG-13,6, D)를 통한 Temperature high, low 알람	3.0	2.0	**6.0**	42	* 수취선 라인에 온도 측정 및 고온(벙커링 수소) 대응 방안 정립	
2	외부 열유입 (직사광선 노출에 따른 복사열에 의한 온도상승)	* 탱크 내부 압력 상승 * 센서 및 장비 오작동 유발	* 운전압력은 350bar, 설계압력은 450 bar * 선급 규칙에 따라 용량 계산된 PSVs 탱크에 설치됨 * 냉각 및 방화 목적의 물분무장치 제공			-			수산과학조사선 기준, 탱크는 Deck 상에 설치
3	외부 화재	* 탱크 내부 압력 상승 * 센서 및 장비 오작동 유발	* 선급 규칙에 따라 용량 계산된 PSVs 탱크에 설치됨 * 냉각 및 방화 목적의 물분무장치 제공			-			
4	벙커링 배관을 통한 입열	* 적합한 SOC 만족 불가				-	43	* 탱크 입구에서 온도 측정 * 수취선 라인에 온도 측정 및 고온(벙커링 수소) 대응 방안 정립	
5	탱크 과충전	* 탱크 손상 * 수소 누출	* PI-9050A, 9051A(DWG-16,5, B), PI-0051B, 0052B(DWG-17, 4, B)를 통해, High 시 알람 작동, High High 압력 시 ESD 작동			-	44	* 수취선 라인에 압력 및 온도 측정에 의한 대응 방안 정립	* 수소 충전 프로토콜 고려
No/Less Level									
1	특이사항 없음								
More Level									
1	특이사항 없음								

Causes		Consequences	Existing Safeguards	FI	SI	RI	REC	Recommendations	Remarks
No/Less Pressure									
1	HP 펌프 제어 오류	* 벙커링(충전) 성능 저하 * 충분한 SOC(State of Charge) 달성 불가	* 2xHP Pump			-			
More Pressure									
1	HP 펌프 제어 오류	* 과충전 * 탱크 내 과압 생성 * 화재, 폭발 * 수취선 탱크 온도상승	* PI-1050A, 1050B(DWG-18, 5, E)를 통해 high 알람, High High ESD 작동 * 선급 규칙에 따라 용량 계산된 PSVs 탱크에 설치됨			-	45	* 수취선 라인에 압력 및 온도 측정에 의한 대응 방안 정립	
Etc.									
1	선박 간 Non compatibility	* Hose bending radius 불만족 * 적합한 계류 불가				-			* 압축수소를 사용하는 선박의 경우, 소형선박인 경우가 많아, Compatibility 에 대한 검토가 필요 * 벙커링에 상당한 시간이 소요될 가능성이 높으므로, 장기간 해상 Ship to Ship 벙커링의 타당성 검토 필요 - Design basis 에 따르면, 6 시간 소요 * 벙커링 시간을 줄이려면, 수취선의 용량이 작아질 가능성이 높고, 그에 따라, Compatibility 에 대한 분석이 더 중요할 것으로 예상
2	Isolation gasket	* 화재, 폭발				-			* 기존 LNG 벙커링 시에는 선박과 선박 사이의 접지를 통해서 Electric potential 을 동일하게 한 후에, 벙커링 호스를 전달. 이후 Isolation gasket 을 적용하여, 전위차에 따른 스파크 등을 차단. * Isolation gasket 의 적용 여부 확인 요
3	고압 배관응력 집중(ex. 지지구조 배치 부적합 등)	* 고압수소가스 누출 등				-			

System Node 5. MH Receiving System (B500-SNP-KOR-PRO-DWG-16, 17, 20)

	Causes	Consequences	Existing Safeguards	FI	SI	RI	REC	Recommendations	Remarks
No/Less Flow									
1	스트레이너 막힘(DWG-16, 17)	* 수소 벙커링 불가 * 호스 압력상승에 따른 손상 * 고압 수소 누출	* PI-9053A, 9054A(DWG-16, 5, C), PI-0054B, 0055B(DWG-17, 4, C)를 통해, High 시 알람 작동, High High 압력 시 ESD 작동	2.0	2.0	4.0			* Design basis 에 따르면, Metal Hydride 실린더는 64barg 25℃ 의 조건으로 공급됨. 온도를 32℃ 로 일정하게 유지시키며, 충전시간은 33 시간
2	ESD 닫힘(오작동)	* 수소 벙커링 불가 * 호스 손상 * 고압 수소 누출	* PI-9053A, 9054A(DWG-16, 5, C), PI-0054B, 0055B(DWG-17, 4, C)를 통해, High 시 알람 작동, High High 압력 시 ESD 작동	3.0	2.0	6.0			
3	드레인 밸브, 샘플링 밸브, 질소 퍼징 밸브 열림(작업자 실수 등)	* 수소 벙커링 불가 * 호스 손상 * 고압 수소 누출	* PI-9053A, 9054A(DWG-16, 5, C), PI-0054B, 0055B(DWG-17, 4, C)를 통해, High 시 알람 작동, High High 압력 시 ESD 작동 * 차단밸브 2 개씩 설치됨	3.0	1.0	3.0			
4	호스 파손	* 수소 벙커링 불가 * 고압 수소 누출 * 화재, 폭발 * Whipping 등	* 설계 압력 및 고압 수소에 적합한 호스 설치	2.0	3.0	6.0			* ERC(Emergency Release Coupling)의 적용 여부 * 자동차 충전 스테이션의 경우, 선박의 탱크 정보(탱크 부피, 온도, 압력 등)를 충전소로 송출하여 스테이션에서 프로토콜(SAE J2601)에 따라 충전
5	밸브, 플랜지를 통한 누설	* 수소 벙커링 불가 * 고압 수소 누출 * 화재, 폭발	* 탱크 및 화물 관/밸브에 대한 밀폐시험(Tightness test) 시험 * 누설시험(Leak test) 수행 * AIAA 등 표준에서 요구하는 가스켓 적용	2.0	3.0	6.0			
6	수소 취성 (탱크, 기자재, 배관)	* 수소 벙커링 불가 * 고압 수소 누출 * 화재, 폭발		2.0	3.0	6.0			* 일부 오스테나이트 S/S 의 경우에도 저온에서 항복점 이상의 힘을 받으면 마르텐사이트 구조로 변환 및 수소취성에 민감해짐
7	배관 파손	* 수소 벙커링 불가 * 고압 수소 누출 * 화재, 폭발	* 선급 규정에 따른 Sch. 계산 * 탱크 및 화물 관/밸브에 대한 밀폐시험(Tightness test) 시험 * 누설시험(Leak test) 수행	2.0	3.0	6.0			

Causes		Consequences	Existing Safeguards	FI	SI	RI	REC	Recommendations	Remarks
8	냉각수 공급 중단	* 실린더 내부온도 및 압력 상승 * 수소 벙커링 불가 * 고압 수소 누출 * 화재, 폭발	* 냉각수 펌프 2 대 * 냉각수 회수 탱크에 가스 감지기 설치			-	46	* 냉각수 출구 온도 측정 및 대응방안 정립	
							47	* Water bath 레벨 측정	
							48	* MH 실린더 배관 라인에 PSV 설치	* Bath 타입에 따른 냉각수 회수 방법 및 선박 운동(Rolling and/or Pitching 등) 영향, PSV 설치 등 고려
More Flow									
1	특이사항 없음								
Reverse Flow									
1	MH 파우더에 의한 밸브 Sealing, Tightness 성능 저하	* 연료 수소(Line to FGSS)의 벤트(XV-3503B)				-	49	* 적용되는 MH 의 특성에 따라 적합한 필터 또는 스트레이너 적용	
Less Temperature									
1	HP Vaporizer TCV-5553A (DWG-11, 4, D) 제어오류	* 배관 단열재 표면 결빙 또는 응축수 * 탱크 표면 응축수 발생	* TIA-7250A(DWG-13, 4, D), TIC-7251A(DWG-13, 6, D)를 통한 온도 High, Low 알람	3.0	2.0	**6.0**			
More Temperature									
1	HP Vaporizer TCV-5553A (DWG-11, 4, D) 제어오류로 고온의 수소 공급	* SOC 만족 불가 * 탱크 재료 열화(복합재인 경우)	* TIA-7250A(DWG-13, 4, D), TIC-7251A(DWG-13, 6, D)를 통한 온도 High, Low 알람	3.0	2.0	**6.0**			
2	탱크 외부 열유입 (직사광선 노출에 따른 복사열에 의한 온도상승)	* 탱크 내부 압력 상승 * 센서 및 장비 오작동 유발				-			* 냉각 및 방화 목적의 물분무장치 제공
3	탱크 외부 화재	* 탱크 내부 압력 상승 * 센서 및 장비 오작동 유발				-			* 냉각 및 방화 목적의 물분무장치 제공
No/Less Level									
1	특이사항 없음								
More Level									
1	특이사항 없음								

수소추진선박 벙커링 위험도 평가

Causes		Consequences	Existing Safeguards	FI	SI	RI	REC	Recommendations	Remarks
No/Less Pressure									
1	HP 펌프 제어 오류	* 벙커링(충전) 성능 저하 * 충분한 SOC 달성 불가		3.0	2.0	**6.0**			
2	실린더 손상에 따른 수소가스의 냉각수 자켓으로의 유출	* 벙커링(충전) 성능 저하 * 충분한 SOC 달성 불가		1.0	3.0	**3.0**		* 권고사항 #27 참조	
More Pressure									
1	냉각수 온도 상승(작업자 실수, 온도 제어 오류 등)	* 수소 흡장 불가 * 실린더 내 압력상승(수소 방출) * 수소 벙커링 불가 * 고압 수소 누출 * 화재, 폭발	* PI-3052B, PI-3053B(DWG-20, 7, B, E)를 통한 High 알람 및 High High Shutdown			-			
2	냉각수 배관 XV-3507B, 3508B(DWG-20, 9, D) 닫힘	* 실린더 또는 케이싱 내 압력 상승 * 수소 흡장 불가 * 수소 벙커링 불가 * 고압 수소 누출 * 화재, 폭발		3.0	2.0	**6.0**	50	* 케이싱 PSV 설치 검토	
							51	* 실린더의 설계 압력 정의 필요	
							52	* 냉각수 배관에 유량계 설치	
Etc.									
1	GH2 Receiving System Node, etc #1, #2, #3, #4 참조					-			
2	국부 응력 (ex. 수소 흡장 시 부피 팽창에 따른 실린더 국부 응력 발생)	* 수소 벙커링 불가 * 고압 수소 누출 * 화재, 폭발				-			

System Node 6. LH2 Receiving System (B500-SNP-KOR-PRO-DWG-22, 23, 24)

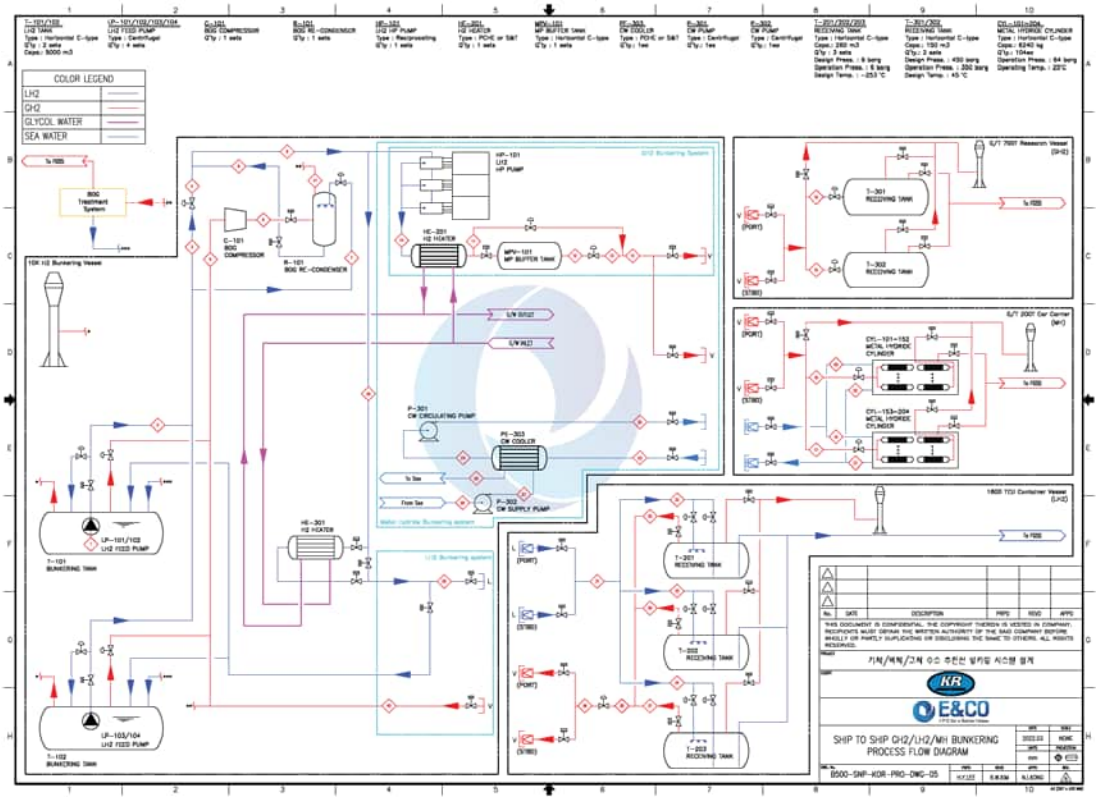
	Causes	Consequences	Existing Safeguards	FI	SI	RI	REC	Recommendations	Remarks
No/Less Flow									
1	[Vapor Return line] ESD-B501(DWG-22,7, C), ESD-4054B(DGW-23, 4, C) 밸브 오작동에 의한 닫힘	* 증기회수 불가 * 벙커링 성능 저하 * 액체수소 누출 * 화재, 폭발	* PI-B050A(DWG-22, 8, B), PI-4050B(DWG-23, 5, B) 압력 Low, High 알람 * HMI 에서 밸브 상태 모니터링(Limit switch) 가능 * 탱크 온도 및 레벨 변화 모니터링 가능	3.0	2.0	**6.0**	53	* Vapor return 라인을 PFD 에 표시	
2	[Liquid Supply line] PSV-B400A, B401A(DWG-22, 6, D & 8, D), PSV-4400B, PSV-4401B, PSV-4402B(DWG-23, 3, D) 오작동에 의한 열림	* 벙커링 성능 저하 * 벤트마스트로 배출	* PI-B502A(DWG-22, 7, D), PI-B054A(DWG-2, 8, D)를 통한 배관 압력 모니터링 및 압력 Low, High 알람 * PI-4052B(DWG-23, 3, D), PI-4053B(DWG-23, 4, D) 배관 압력 모니터링 및 압력 Low, High 알람 * PI-B053A(DWG-22,7, D), PI-4054B(DWG-23, 4, D)를 통한 압력 모니터링 및 High High, Low Low 시 트립 * PSV 후단 육안으로 아이싱 생성 확인 가능	3.0	2.0	**6.0**			
3	[Liquid Supply line & Vapor return line] 작업자 오류에 의한 N2 퍼징 밸브 또는 drain 밸브 열림	* 퀵 퍼징 라인을 통해서 액체수소 누출 * 산소 농축 * 화재, 폭발 위험	* 차단밸브 2 개씩 설치됨 * 퀵 퍼징 밸브도 체크 밸브 기능 수행 * 드립트레이 설치됨	3.0	1.0	**3.0**			* N2 퍼징 밸브 및 Drain 밸브의 목적 및 작업절차를 운전매뉴얼에 반영할 것
4	[Liquid Supply line] 스트레이너 막힘	* 벙커링 성능 저하 * 액체수소 누출 * 화재, 폭발 위험	* PI-B502A(DWG-22, 7, D), PI-B054A(DWG-2, 8, D)를 통한 배관 압력 모니터링 및 H, L 알람 설정 * PI-4052A(DWG-23, 3, D), PI-4053B(DWG-23, 4, D) 배관 압력 모니터링 및 H, L 알람 설정 * PI-B053A(DWG-22,7, D), PI-4054B(DWG-23,4, D)를 통한 압력 모니터링 및 HH, LL 시 Trip	2.0	2.0	**4.0**			

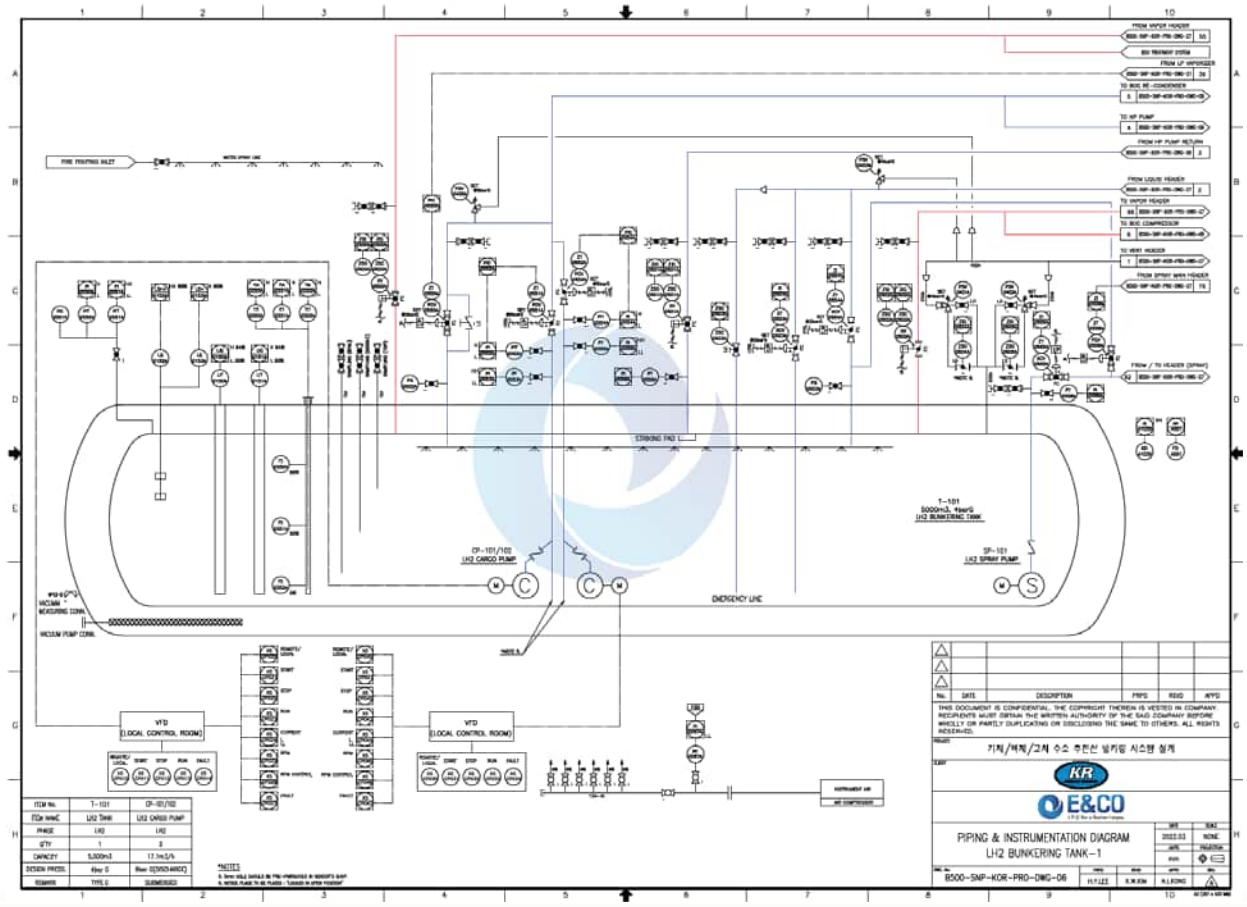
수소추진선박 벙커링 위험도 평가

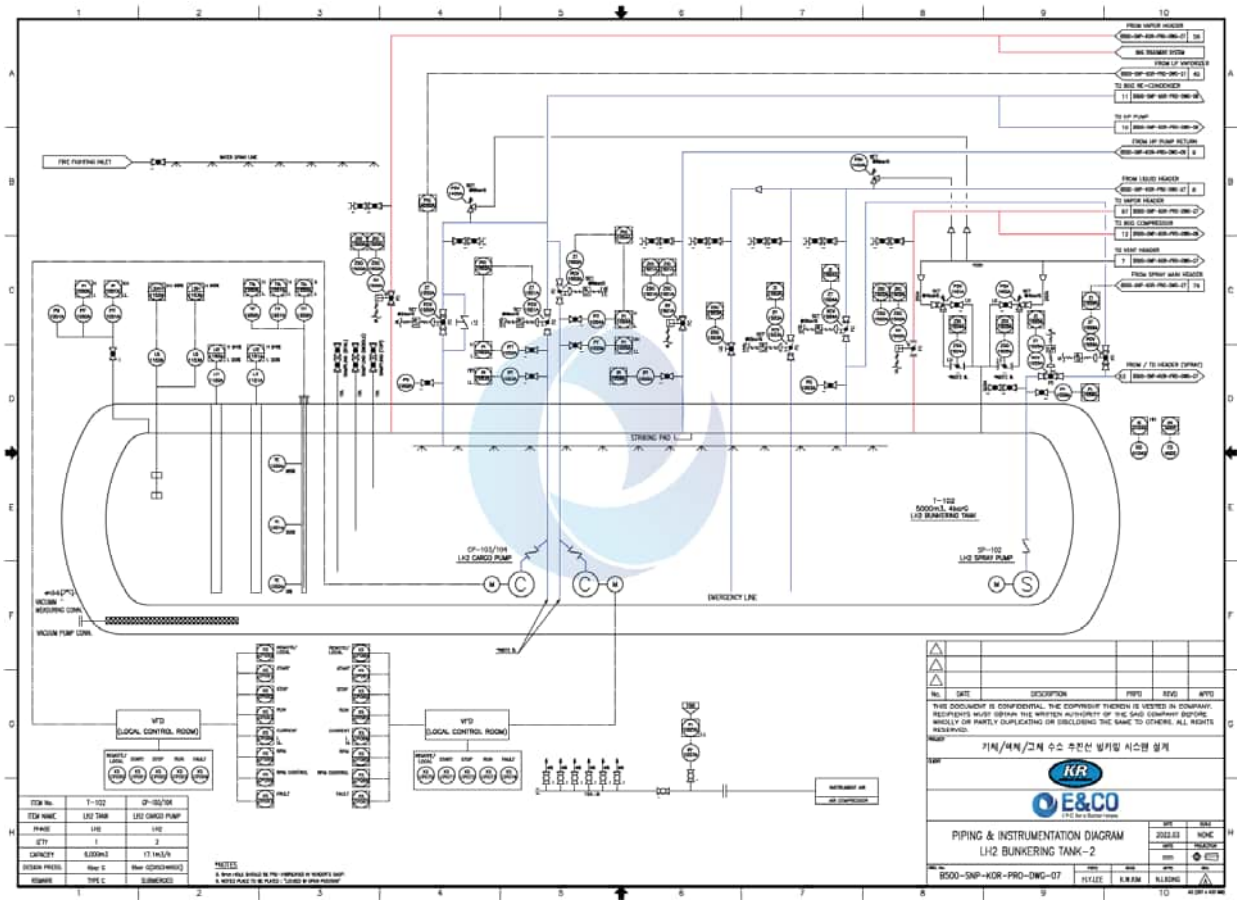
Causes		Consequences	Existing Safeguards	FI	SI	RI	REC	Recommendations	Remarks
5	배관 및 밸브를 통한 누출(밸브 고장, 가스켓/플랜지 페이스 손상 등)	* 액체수소 누출 * 저온 노출에 의한 작업자 부상, 장비 손상 위험 * 화재/폭발 위험	* 탱크 및 배관내 압력 확인 * 드립트레이 * ESD * 액체수소 벙커링 라인 플랜지 적용 최소화 * 드립트레이 TT 설치 검토	2.0	3.0	**6.0**			* 드립트레이 용량은 차단밸브 사이의 배관 또는 호스를 통해 누출될 수 있는 최대 액체수소량 보다 커야 함 * 차단밸브 작동 시 delay time 이 있는 경우, 최대 누설량 계산 시 고려해야 함 * 드립트레이에 액체수소 누설 시, 수소 기화 및 산소 농축의 영향 검토
7	액체수소 호스 파손	* 액체수소 누출 * 저온 노출에 의한 작업자 부상, 장비 손상 위험 * 화재/폭발 위험 * 선체 손상	* 호스 Saddle 설치 및 Fall arrestor 설치	2.0	3.0	**6.0**	54	* ERC 를 포함한 호스를 P&ID 에 포함하고 액체수소의 물성에 적합한 호스 사용할 것	
							55	* 워터 커튼 적용	
More Flow									
1	LH2 Feed 펌프 제어 오류	* 수취선의 초기 온도에 따라 BOG 과다 발생 가능 * 탱크의 Overfilling 가능성	* 탱크 PI-5050B(DWG-24, 2, C)를 통한 압력 모니터링 및 H 알람 * 탱크 PI-5051B 를 통한 압력 모니터링 및 High High 트립 * 탱크 LSHH-5152B, LSH-5153B 를 통한 레벨 확인 및 H, HH 알람 및 트립 * LIC-5150B, LIC-5151B 를 통한 레벨 확인 및 High, Low 알람	3.0	2.0	**6.0**			
Reverse Flow									
1	Vapor Return 라인을 통한 가스 역류 (From Bunkering tank to Receiving tank)	* 벙커링 성능 저하 * 수취 탱크 압력 상승	* 탱크 PSV X 2 설치됨 * BOG Treatment system 적용			-			* [운용매뉴얼] 벙커링 작업 전에 수취 탱크와 벙커링 탱크의 압력 및 온도 확인
Less Temperature									
1	특이사항 없음								
More Temperature									
1	Ortho-Para 불충분한 변환		* 선급 규칙에서 정하는 Ortho-para 비율 적용된 수소 수급			-			* Ortho-Para 변환은 장시간 걸쳐 진행됨

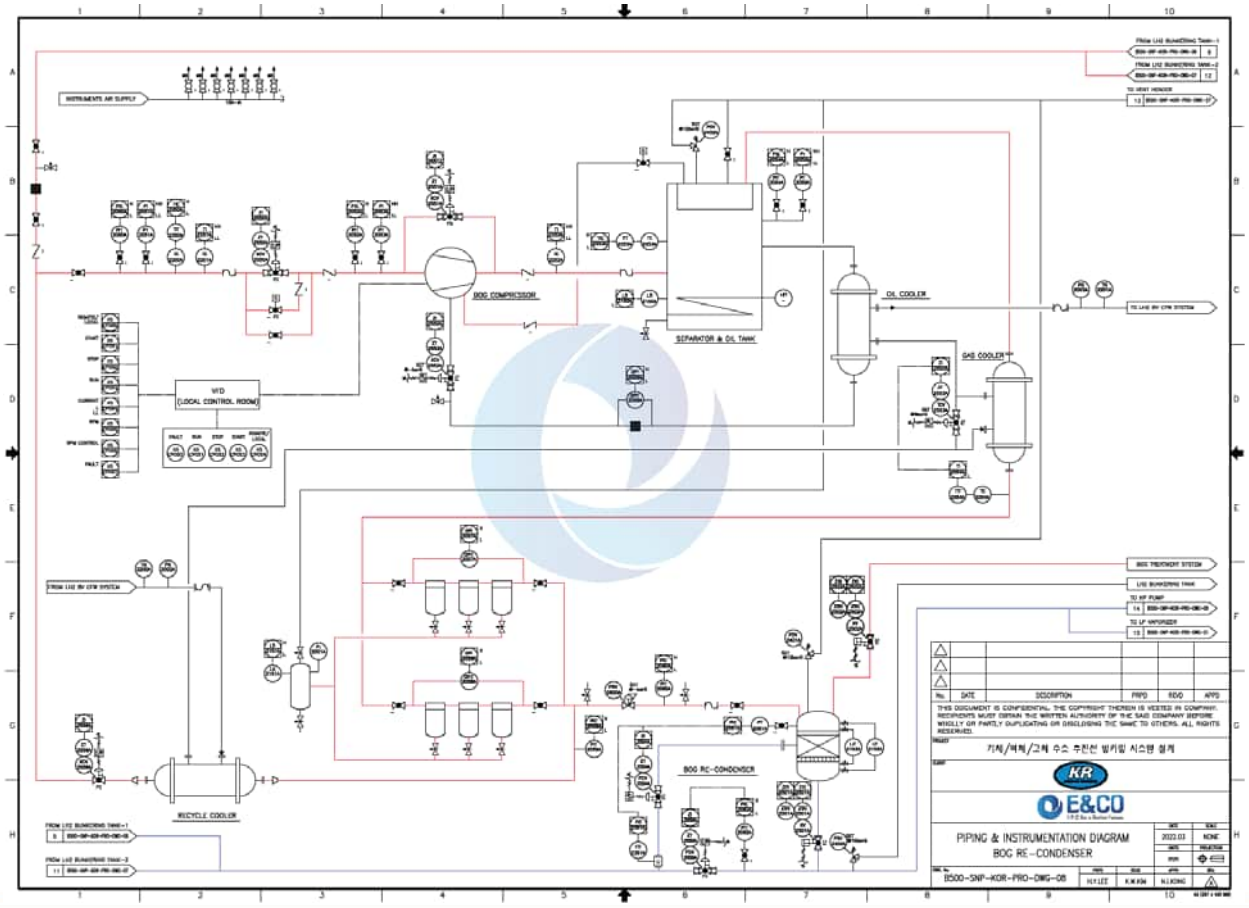
Causes		Consequences	Existing Safeguards	FI	SI	RI	REC	Recommendations	Remarks
2	높은 온도의 액체수소 공급	* 벙커링 불가 * BOG 과다 생성 * 탱크 내부 압력 상승	* 과압 발생 시, 탱크 및 배관 PSV 를 통해 배출 * 공급 액체수소 및 탱크내부 온도 모니터링 가능			-			* [운용매뉴얼] 벙커링 작업 전에 수취 탱크와 벙커링 탱크의 압력 및 온도 확인
3	배관 단열부 손상	* BOG 과다 생성 * 탱크와 배관 내부 압력 상승 * 2 phase flow	* 과압 발생 시, 탱크 및 배관 PSV 를 통해 배출			-			
4	외부 화재	* BOG 발생량 증가 * 탱크 내부 압력 상승 * 센서 및 장비 오작동 유발	* 선급 규칙에 따라 용량 계산된 PSVs 탱크에 설치됨 * 냉각 및 방화 목적의 물분무장치 제공			-			
5	탱크 단열재(진공 손실)	* BOG 과다 생성	* 선급 규칙에 따라 용량 계산된 PSVs 탱크에 설치됨 * 탱크 Vacuum 주기적 계측 * 탱크 압력 모니터링			-			
No/Less Level									
1	특이사항 없음								
More Level									
1	Loading Limit 계산 오류					-			* Loading limit 기준으로 벙커링 필요 * Design basis 에 따르면, "Receiving tank 의 level 이 98%에 도달하면 작업은 완료되고, 운전 시간은 2 시간 이내로 한다."로 되어 있어 확인 필요
No/Less Pressure									
1	[No/Less Flow] 내용 참고								
More Pressure									
1	[More Temperature] 내용 참고								
Etc.									
1	수소 취성	* 탱크 파손 * 수소 누출	* 수소에 적합한 재료 사용			-			

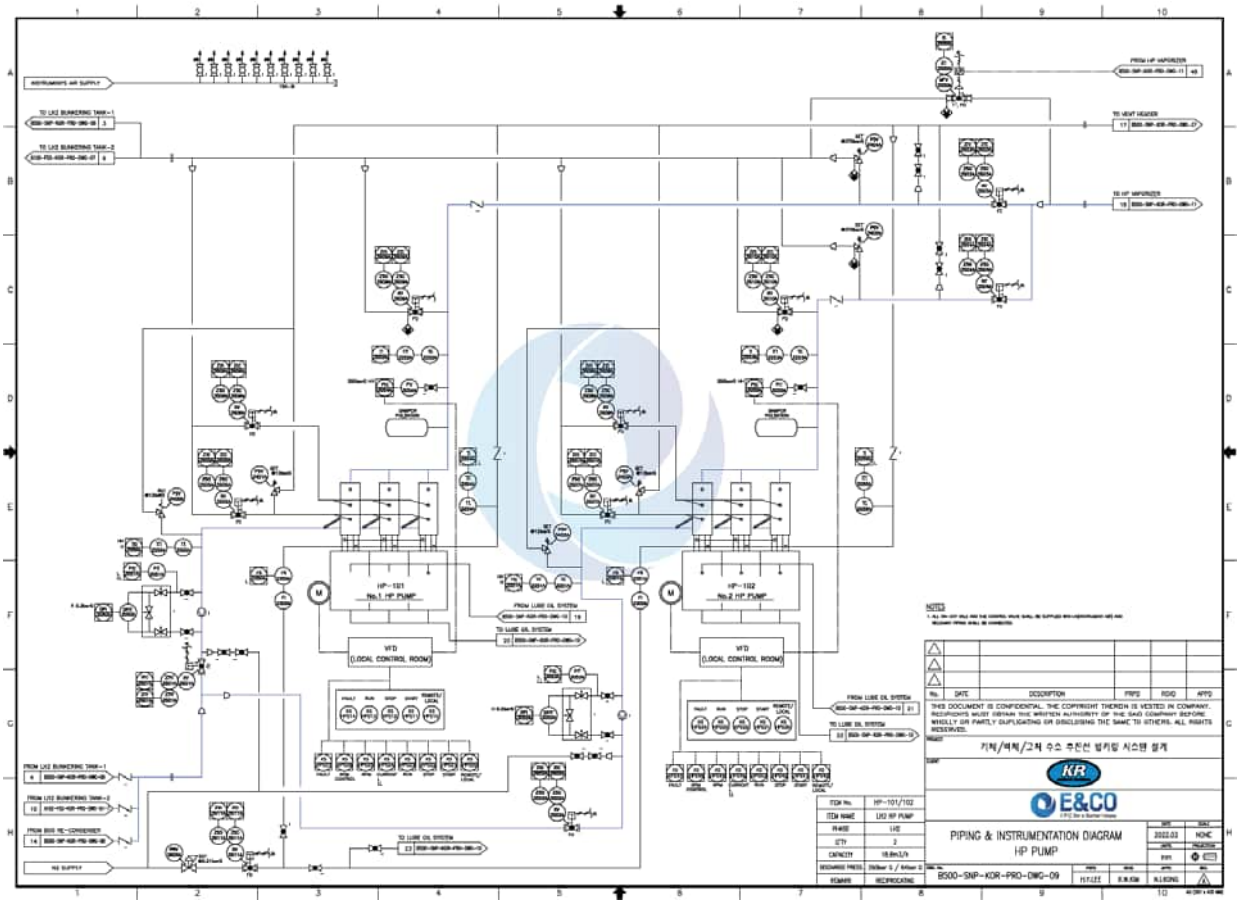
ANNEX B. P&IDs for HAZOP

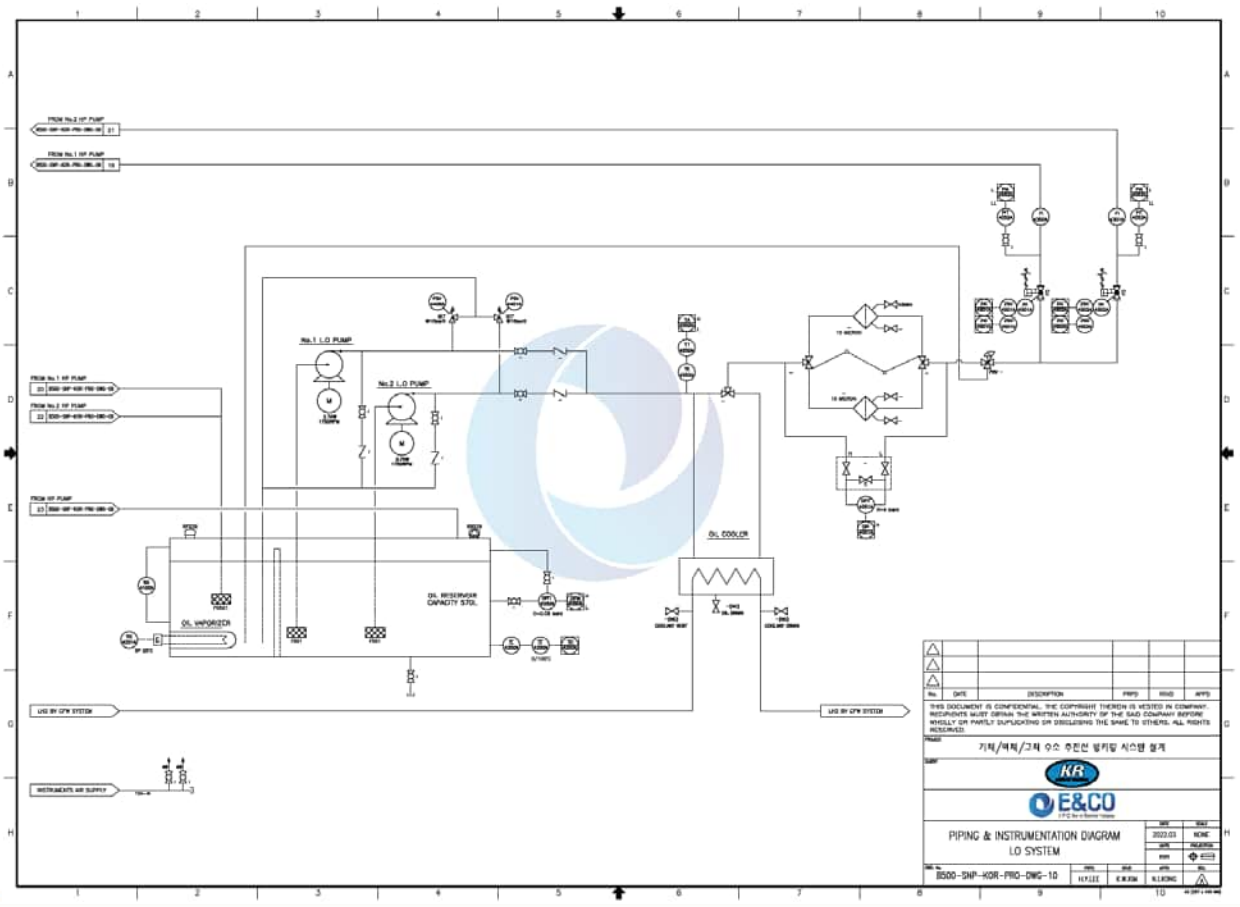


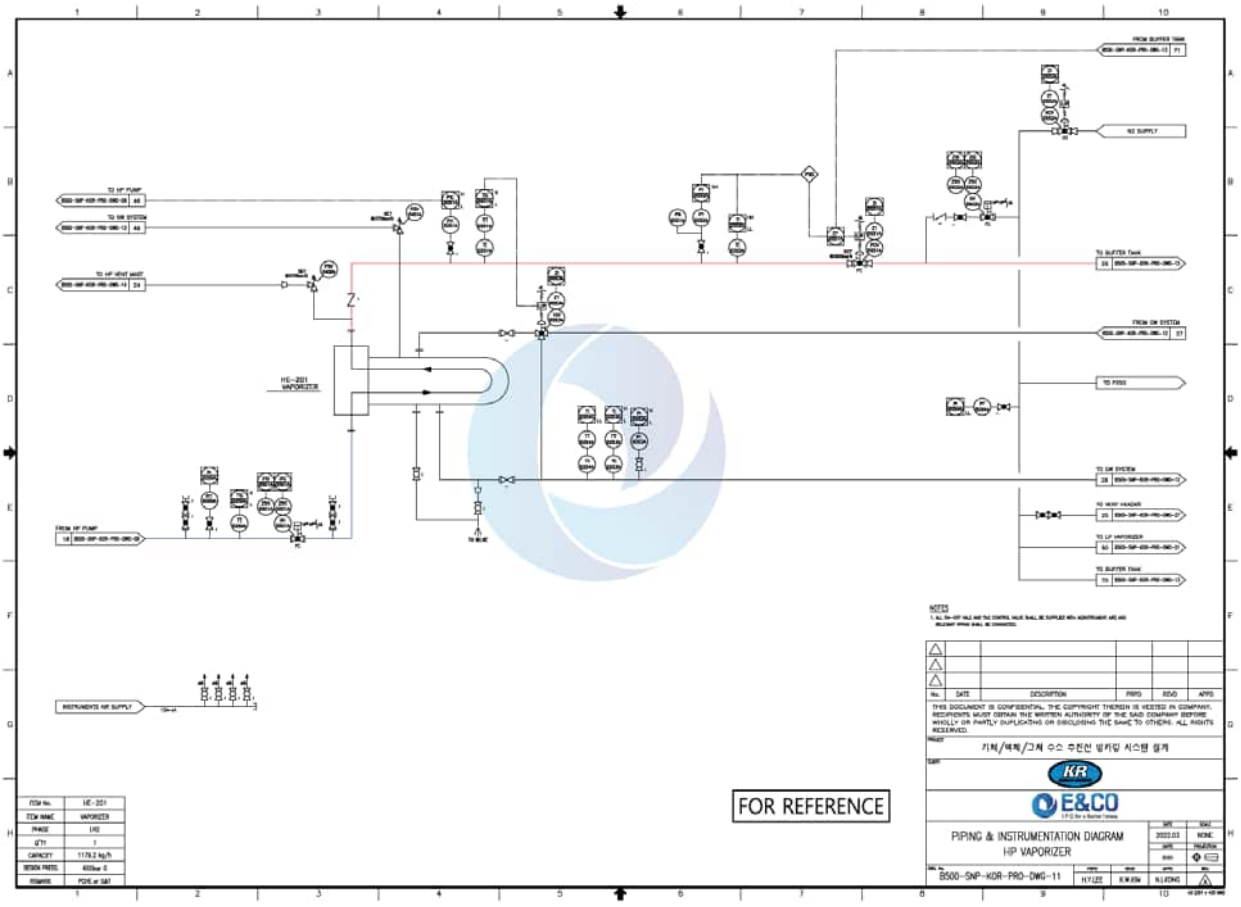

PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
LH2 BUNKERING TANK-1
B500-SNP-KOR-PRO-DWG-06
E&CO
EMERGENCY LINE
LH2 CARGO PUMP
LH2 SPRAY PUMP
VFD
(LOCAL CONTROL ROOM)

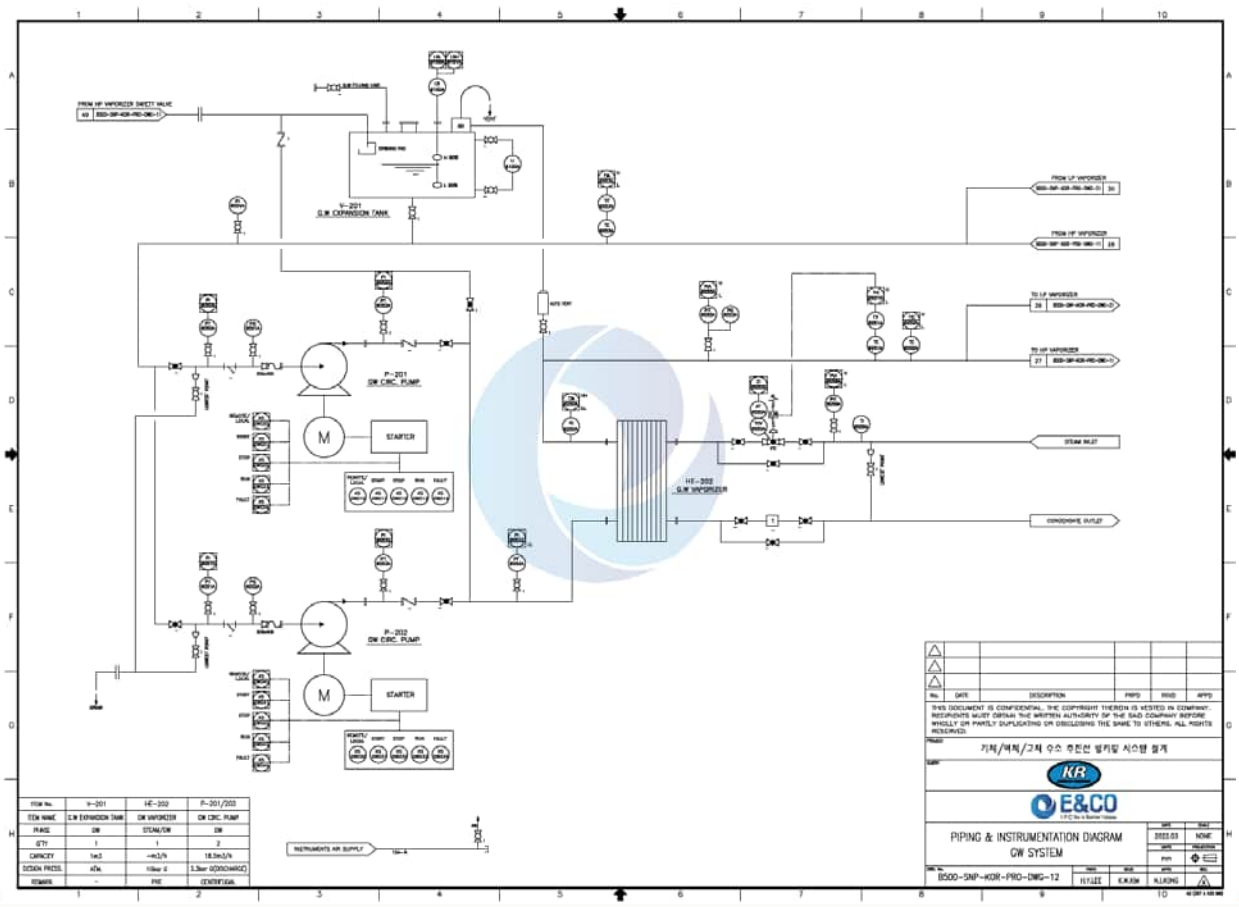

PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
LH2 BUNKERING TANK-2
E&CO
B500-SNP-KOR-PRO-DWG-07

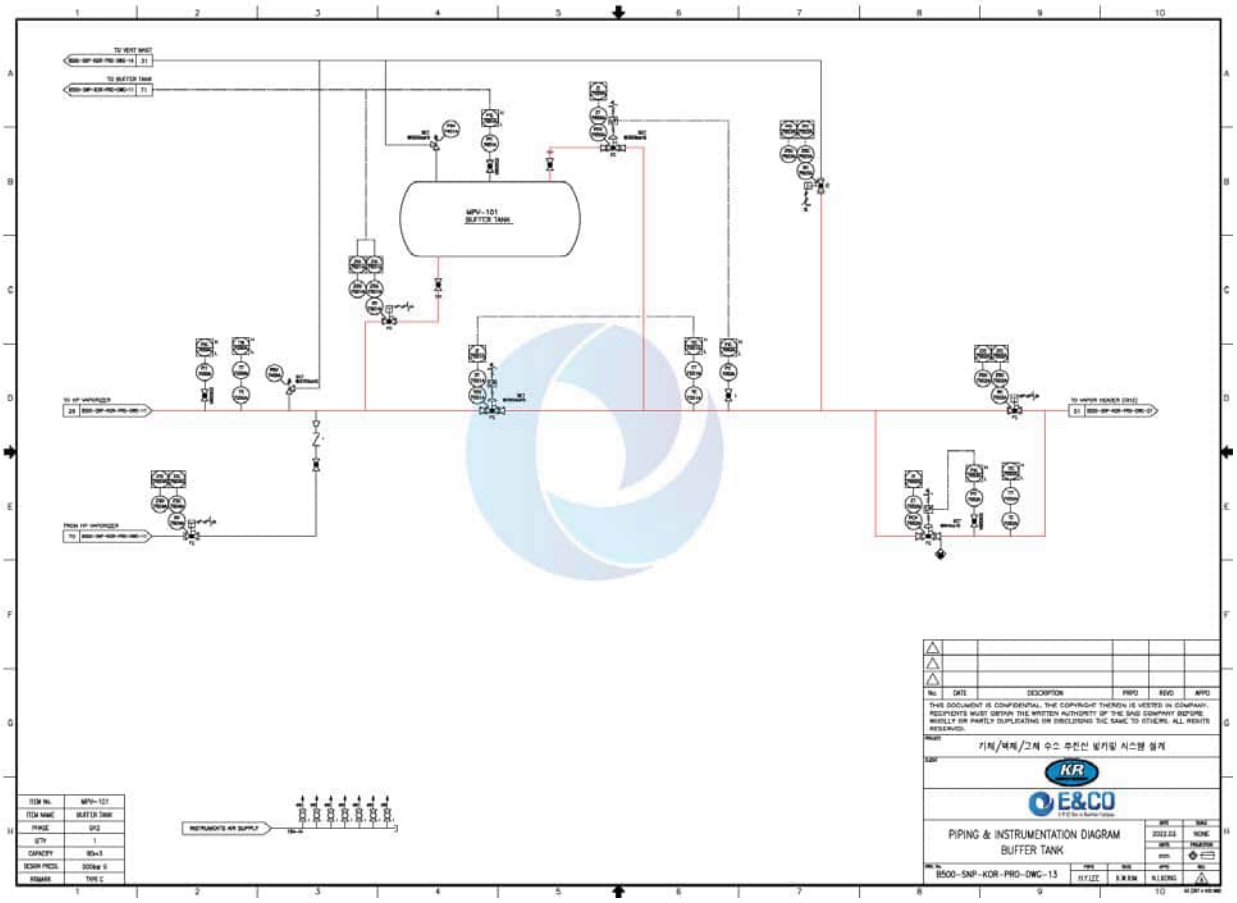

INSTRUMENTS AIR SUPPLY
BOG COMPRESSOR
SEPARATOR & OIL TANK
OIL COOLER
GAS COOLER
VFD
(LOCAL CONTROL ROOM)
RECYCLE COOLER
BOG RE-CONDENSER
PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
BOG RE-CONDENSER
E&CO
B500-SNP-KOR-PRO-DWG-08

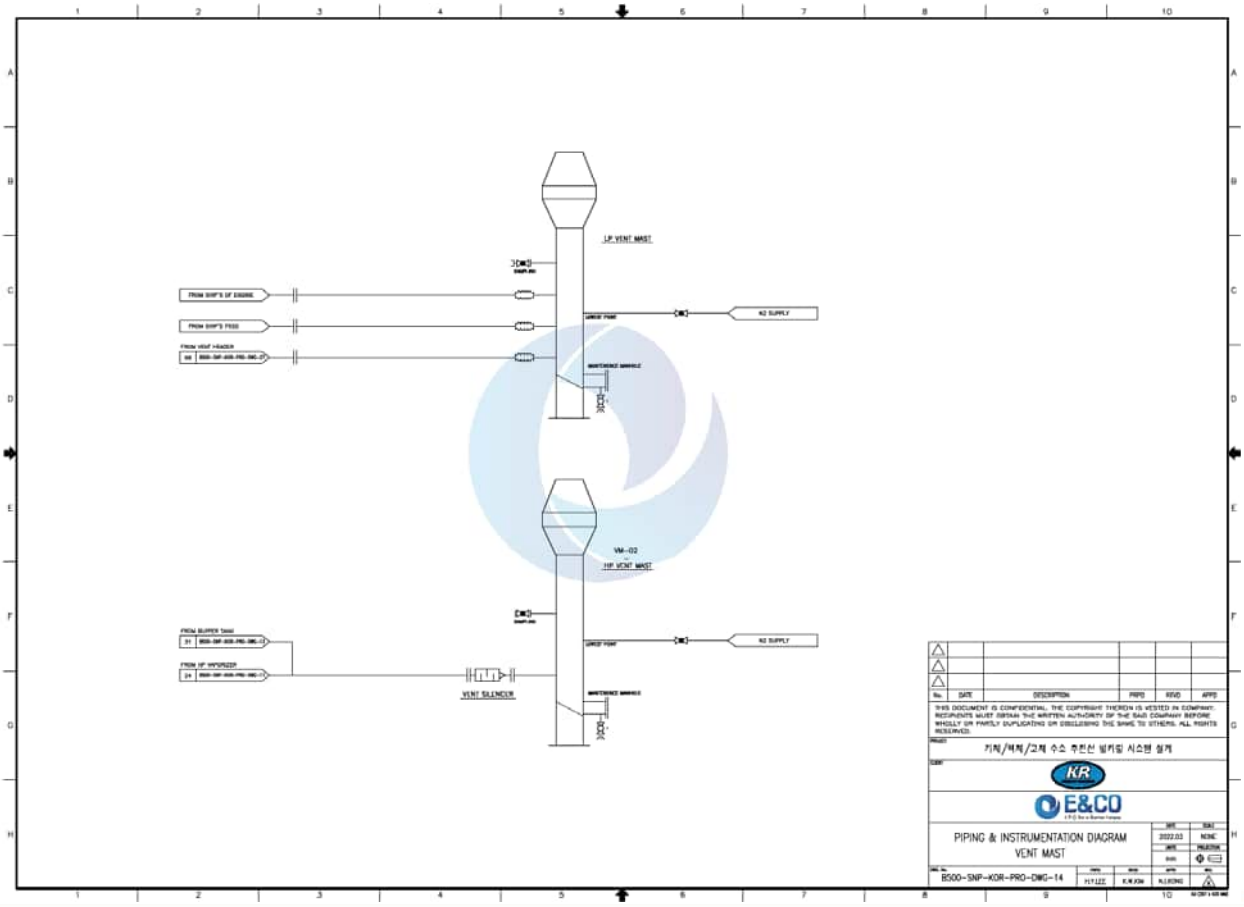

HP-101
No.1 HP PUMP
HP-102
No.2 HP PUMP
VFD
(LOCAL CONTROL ROOM)
PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
HP PUMP
B500-SNP-KOR-PRO-DWG-09
E&CO

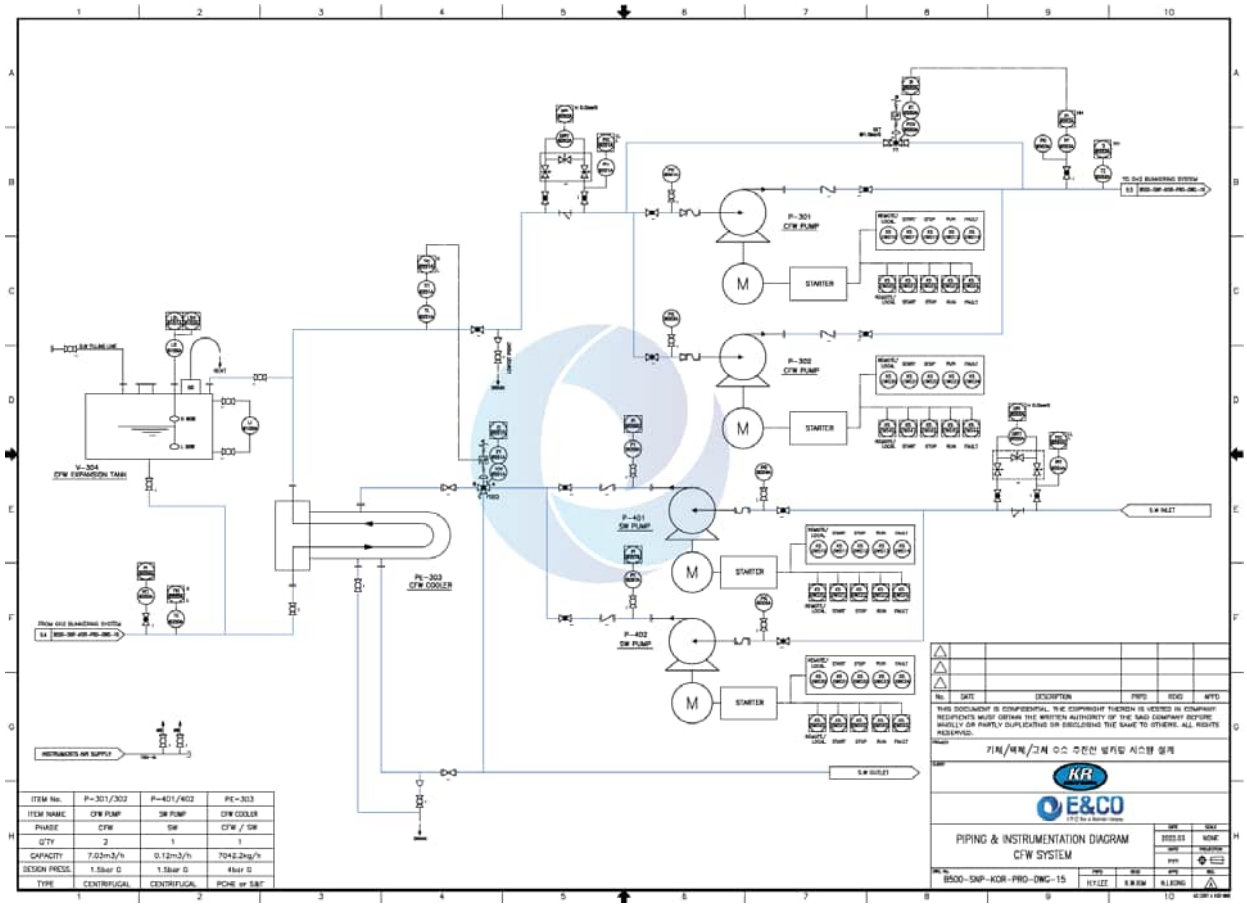

No.1 L.O PUMP
No.2 L.O PUMP
OIL COOLER
OIL VAPORIZER
OIL RESERVOIR CAPACITY 57DL
LVD BY CFW SYSTEM
INSTRUMENTS AIR SUPPLY
THIS DOCUMENT IS CONFIDENTIAL. THE COPYRIGHT THEREIN IS VESTED IN COMPANY. RECIPIENTS MUST OBTAIN THE WRITTEN AUTHORITY OF THE SAO COMPANY BEFORE WHOLLY OR PARTLY DUPLICATING OR DISCLOSING THE SAME TO OTHERS. ALL RIGHTS RESERVED.
기체/액체/고체 수소 추진선 방위팀 시스템 설계
E&CO
PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
LO SYSTEM
2022.03
NONE
B500-SNP-KOR-PRO-DWG-10

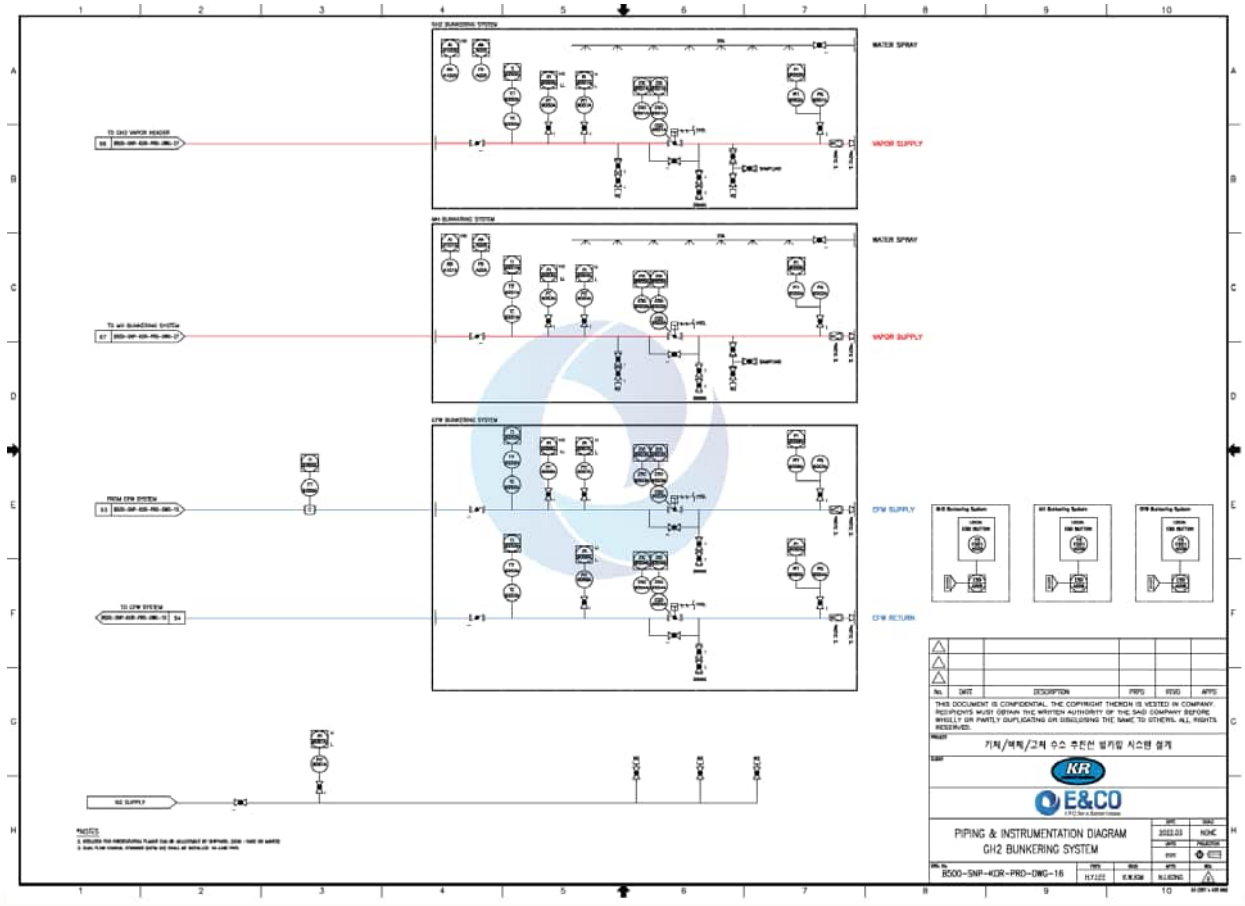

FOR REFERENCE
PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
HP VAPORIZER
B500-SNP-KDR-PRO-DWG-11
E&CO
KR

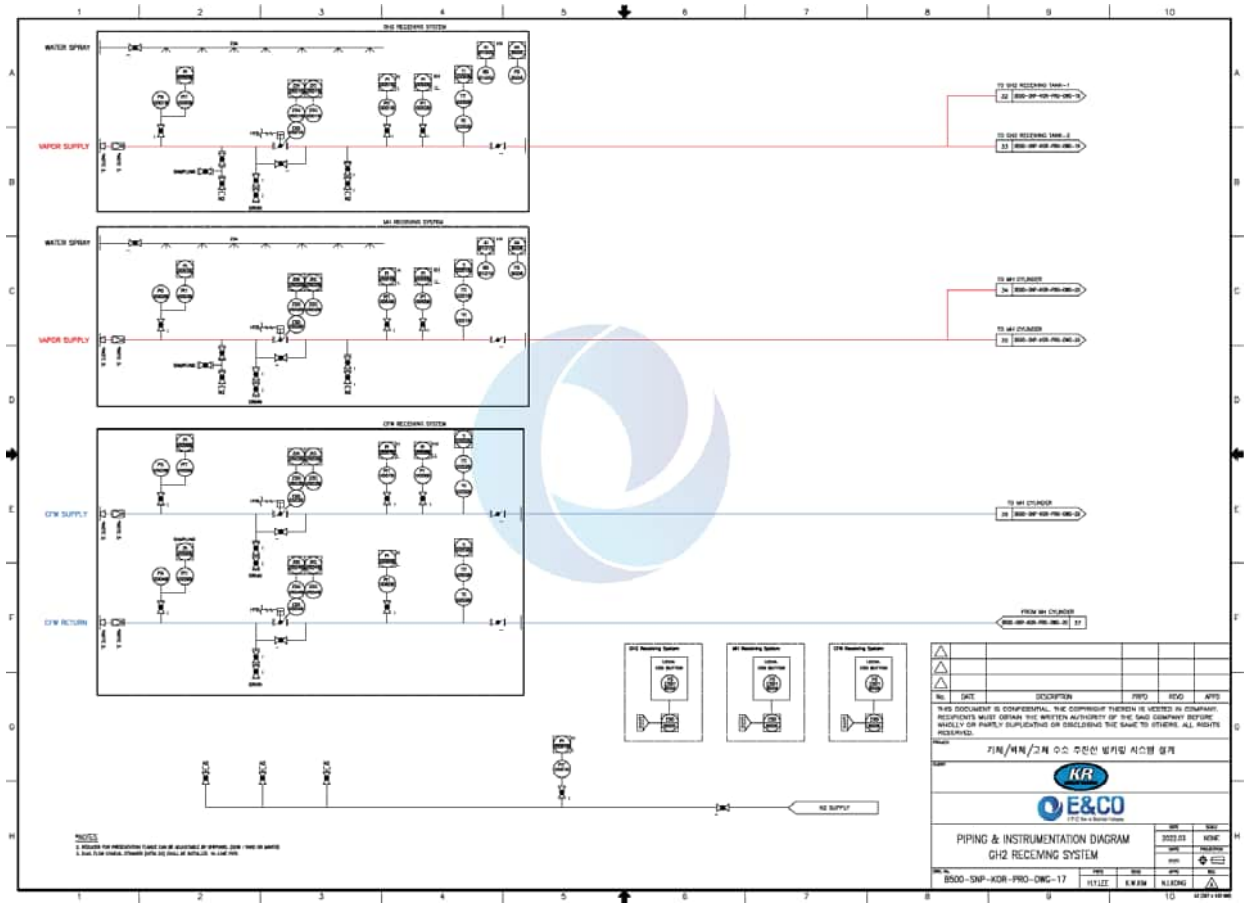

V-201
G.W EXPANSION TANK
P-201
GW CIRC. PUMP
P-202
GW CIRC. PUMP
M
STARTER
HE-202
G.W VAPORIZER
STEAM INLET
CONDENSATE OUTLET
INSTRUMENTS AIR SUPPLY
PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
GW SYSTEM
B500-SNP-KOR-PRO-DWG-12
E&CO

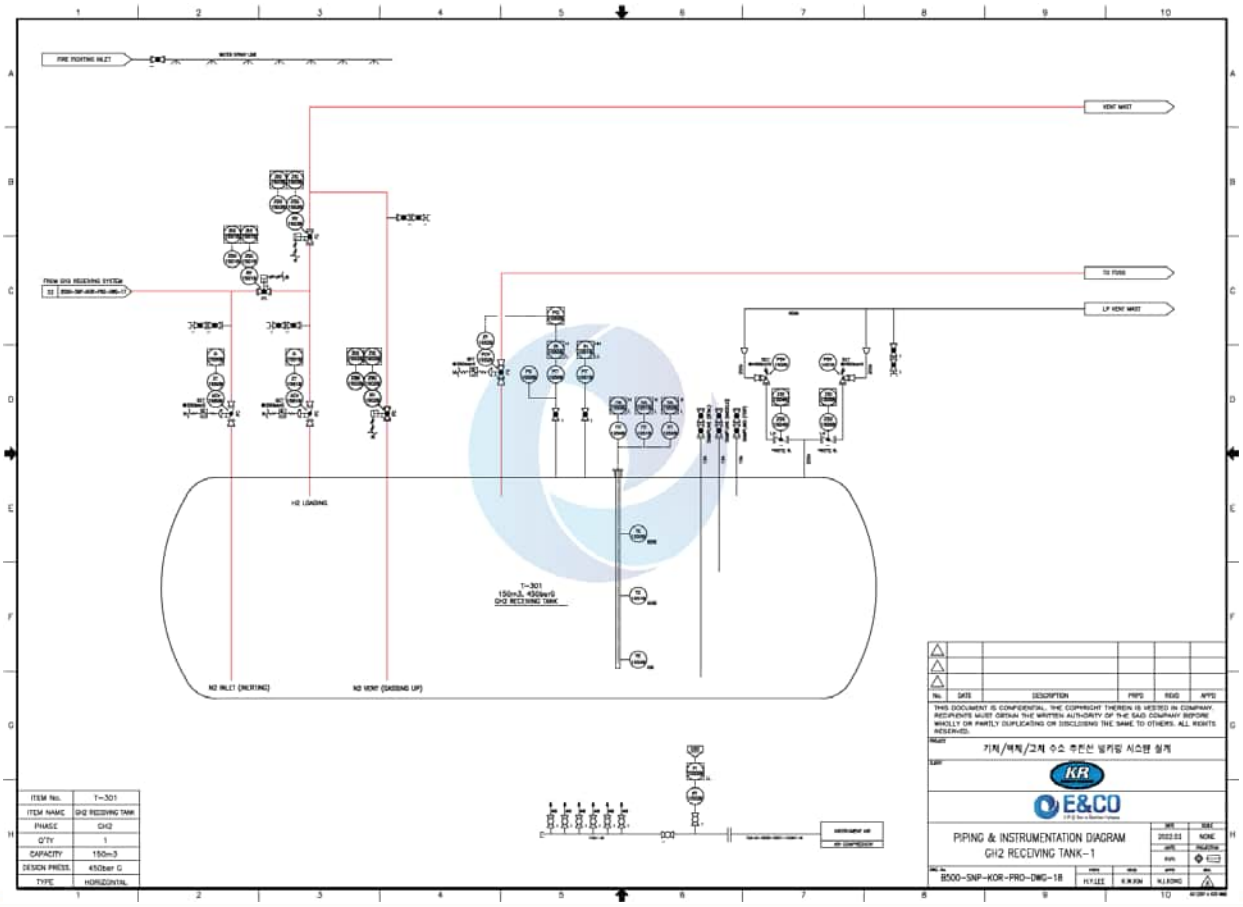

MPV-101
BUFFER TANK
PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
BUFFER TANK
B500-SNP-KOR-PRO-DWG-13
E&CO

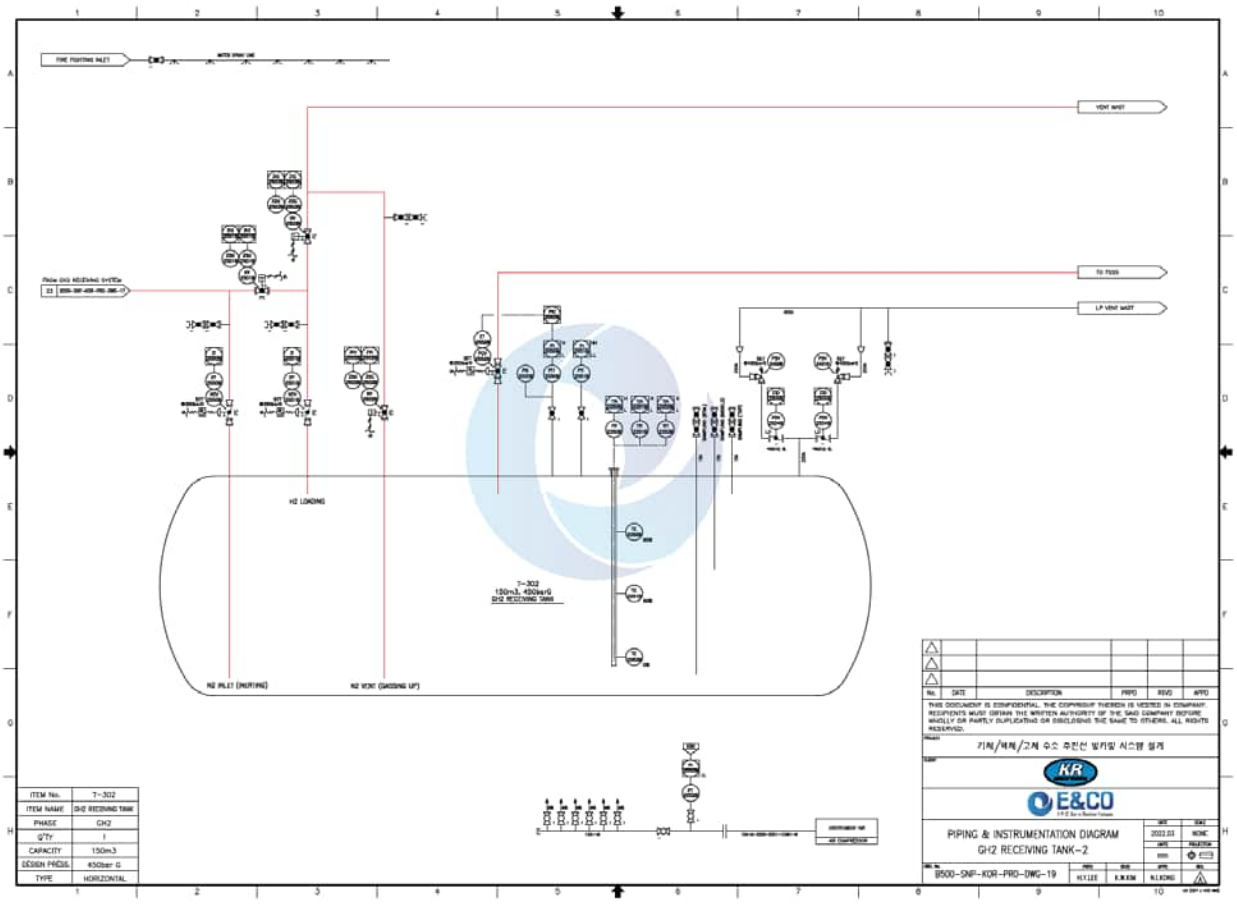

LP VENT MAST
FROM SHIP'S LP ENGINE
FROM SHIP'S FCSG
FROM VENT HEADER
N2 SUPPLY
VM-02
HP VENT MAST
FROM SURPER TANK
FROM HP VAPORIZER
VENT SILENCER
N2 SUPPLY
PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
VENT MAST
2022.03
B500-SNP-KOR-PRO-DWG-14

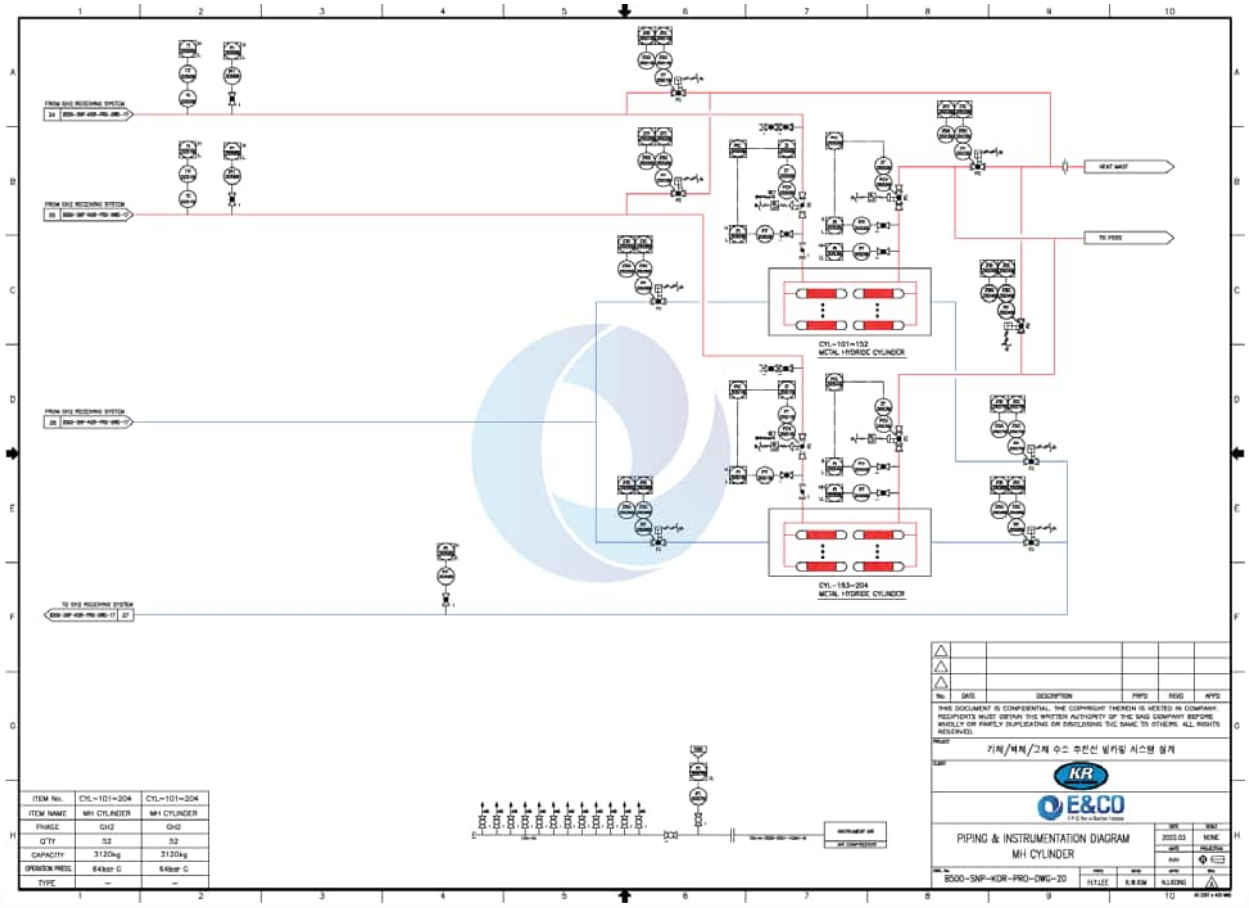

P-301
CFW PUMP
P-302
CFW PUMP
STARTER
V-304
CFW EXPANSION TANK
PE-303
CFW COOLER
P-401
SW PUMP
P-402
SW PUMP
INSTRUMENTS AIR SUPPLY
S.W INLET
S.W OUTLET
ITEM No. | P-301/302 | P-401/402 | PE-303
ITEM NAME | CFW PUMP | SW PUMP | CFW COOLER
PHASE | CFW | SW | CFW / SW
Q'TY | 2 | 1 | 1
CAPACITY | 7.03m3/h | 0.12m3/h | 7042.2kg/h
DESIGN PRESS. | 1.5bar G | 1.5bar G | 4bar G
TYPE | CENTRIFUGAL | CENTRIFUGAL | PCHE or S&T
THIS DOCUMENT IS CONFIDENTIAL. THE COPYRIGHT THEREIN IS VESTED IN COMPANY RESPONDENTS MUST OBTAIN THE WRITTEN AUTHORITY OF THE SAID COMPANY BEFORE WHOLLY OR PARTLY DUPLICATING OR DISCLOSING THE SAME TO OTHERS. ALL RIGHTS RESERVED.
기체/액체/그체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계
KR
E&CO
PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
CFW SYSTEM
B500-SNP-KOR-PRO-DWG-15
H.Y.LEE
K.W.KIM
N.LEONG

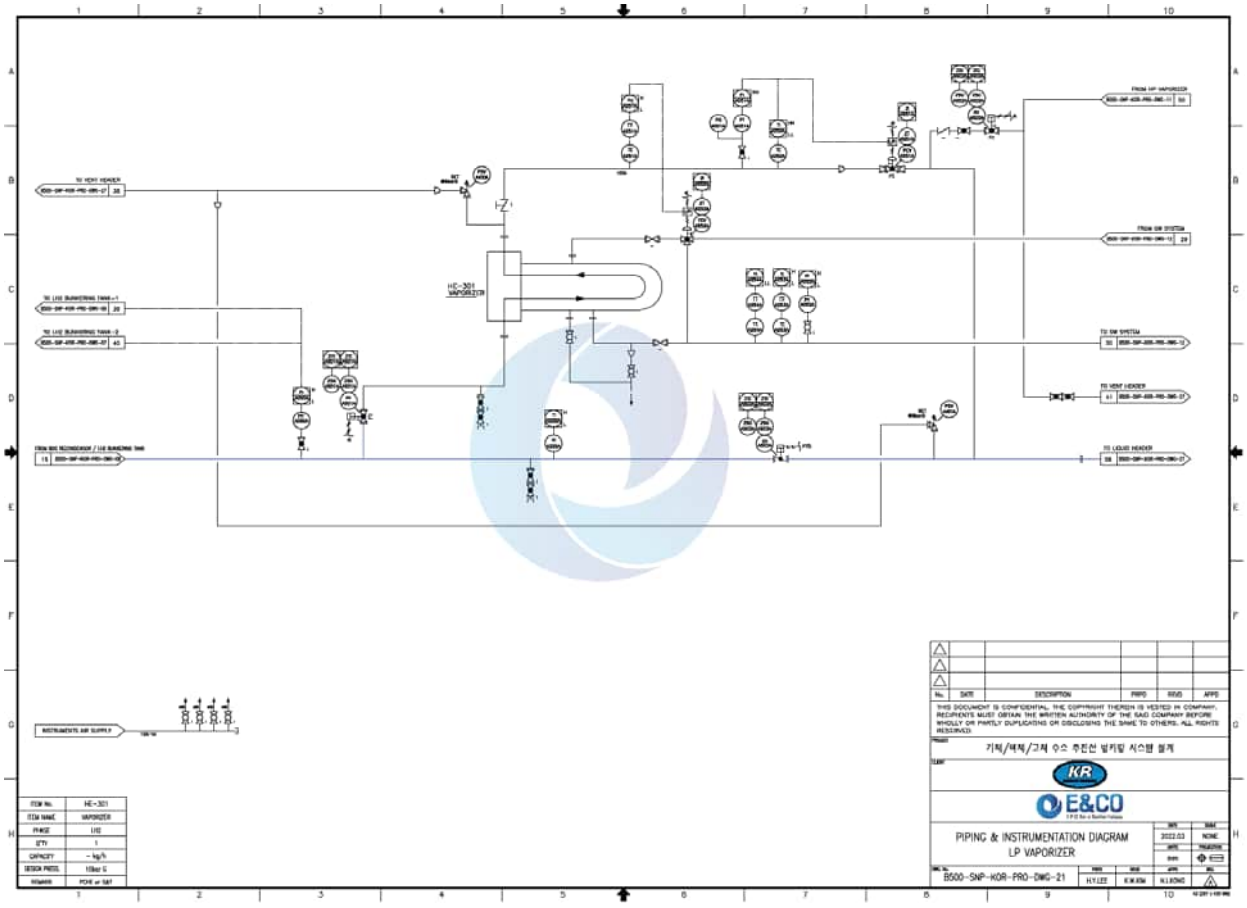

WATER SPRAY
VAPOR SUPPLY
WATER SPRAY
VAPOR SUPPLY
CFW SUPPLY
CFW RETURN
기체/액체/고체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계
E&CO
PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
GH2 BUNKERING SYSTEM
2022.03
8000-SNP-KOR-PRD-DWG-16

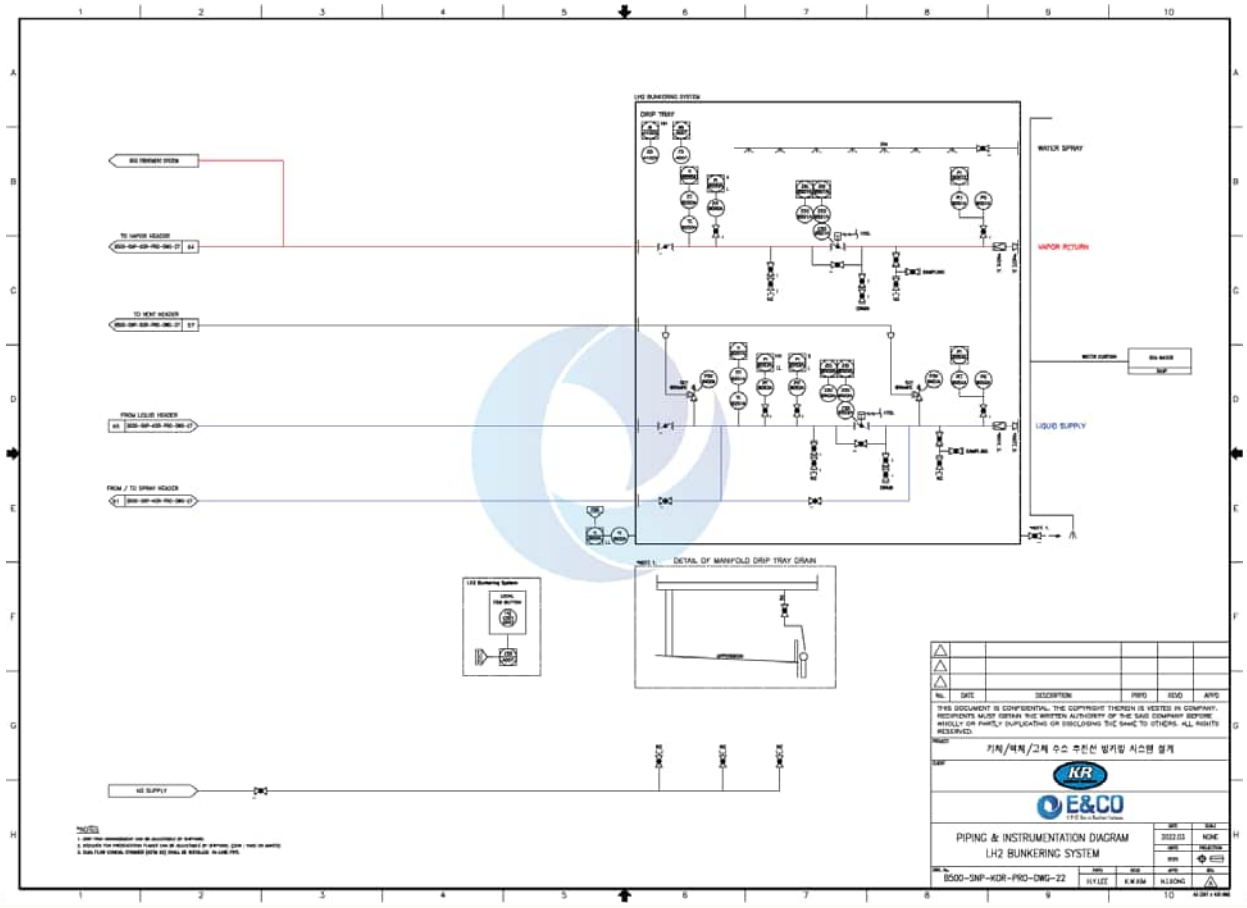

WATER SPRAY
VAPOR SUPPLY
WATER SPRAY
VAPOR SUPPLY
CFW SUPPLY
CFW RETURN
N2 SUPPLY
PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
GH2 RECEIVING SYSTEM
8500-SNP-KOR-PRO-DWG-17

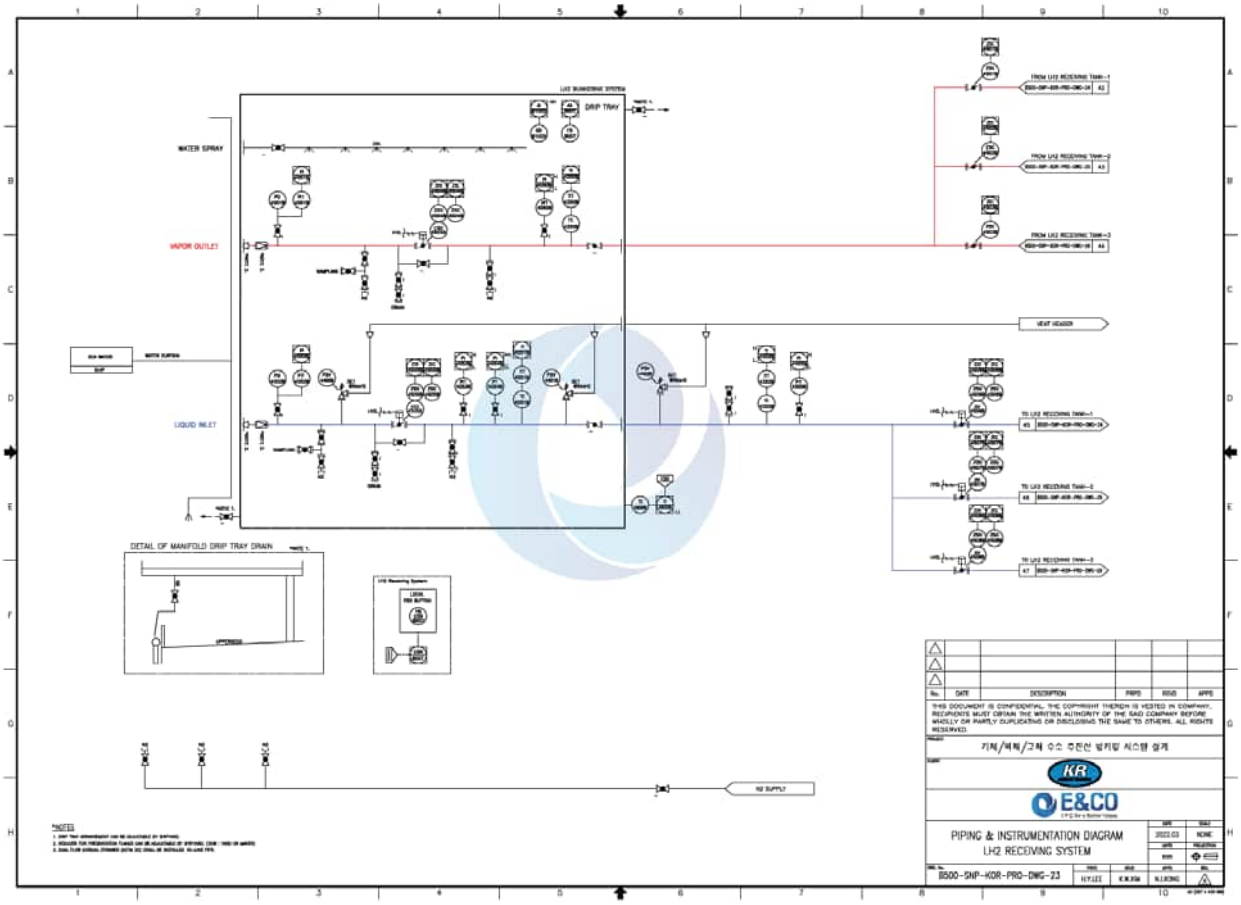

FIRE FIGHTING INLET
VENT MAST
TO FLARE
LP VENT MAST
FROM GH2 RECEIVING SYSTEM
H2 LOADING
T-301
150m3, 450barG
GH2 RECEIVING TANK
N2 INLET (INERTING)
N2 VENT (GASSING UP)
ITEM No. T-301
ITEM NAME GH2 RECEIVING TANK
PHASE GH2
Q'TY 1
CAPACITY 150m3
DESIGN PRESS. 450bar G
TYPE HORIZONTAL
THIS DOCUMENT IS CONFIDENTIAL. THE COPYRIGHT THEREIN IS VESTED IN COMPANY. RECIPIENTS MUST OBTAIN THE WRITTEN AUTHORITY OF THE SAID COMPANY BEFORE WHOLLY OR PARTLY DUPLICATING OR DISCLOSING THE SAME TO OTHERS. ALL RIGHTS RESERVED.
기체/액체/고체 수소 추진선 급키잉 시스템 설계
E&CO
PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
GH2 RECEIVING TANK-1
B500-SNP-KOR-PRO-DWG-18

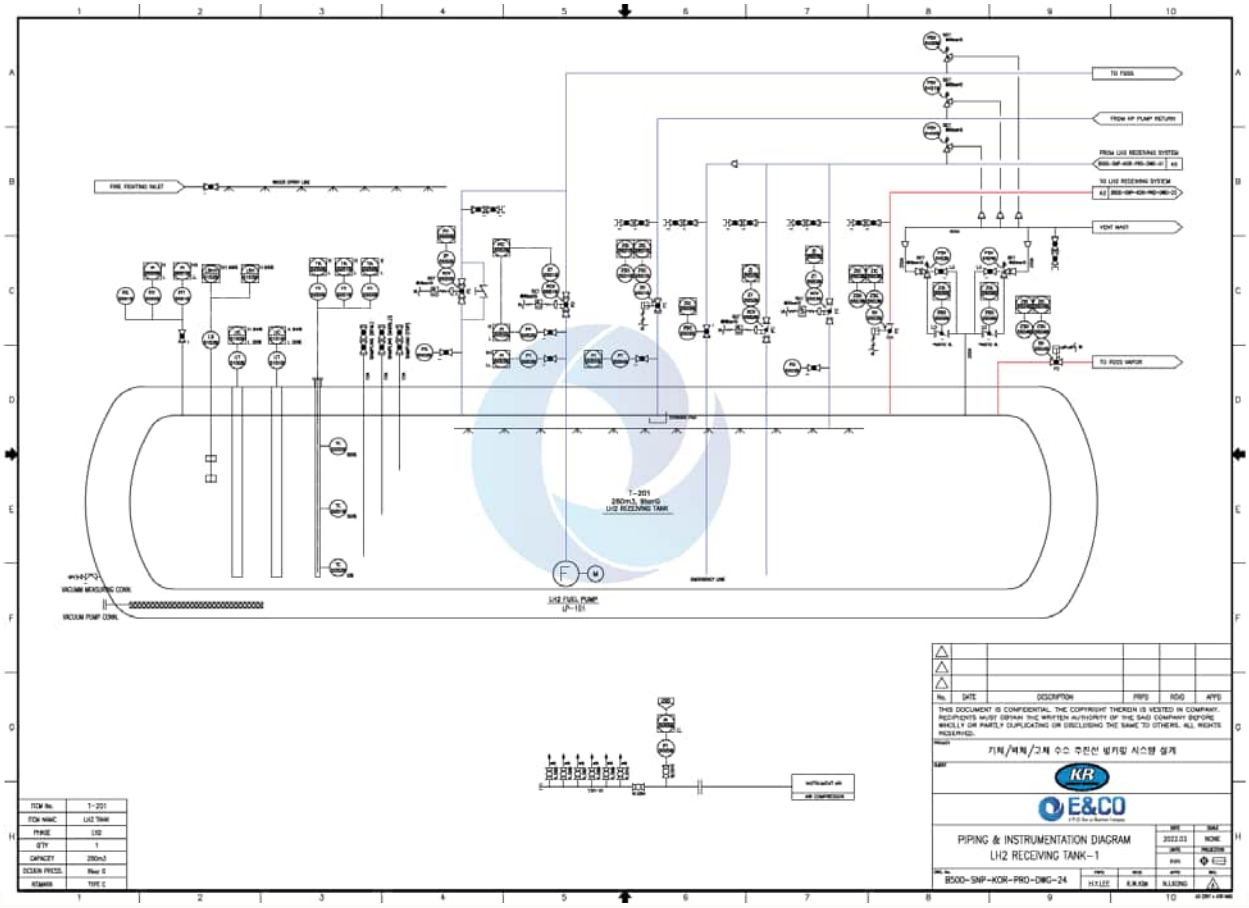

VENT MAST
TO FLARE
LP VENT MAST
H2 LOADING
T-302
150m3, 450barG
GH2 RECEIVING TANK
H2 INLET (PURGING)
H2 VENT (BLEEDING UP)
ITEM No. T-302
ITEM NAME GH2 RECEIVING TANK
PHASE GH2
Q'TY 1
CAPACITY 150m3
DESIGN PRESS. 450barG
TYPE HORIZONTAL
기체/액체/고체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계
PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
GH2 RECEIVING TANK-2
B500-SNP-KOR-PRO-DWG-19


CYL-101~152
METAL HYDRIDE CYLINDER
CYL-153~204
METAL HYDRIDE CYLINDER
ITEM No. | CYL-101~204 | CYL-101~204
ITEM NAME | MH CYLINDER | MH CYLINDER
PHASE | GH2 | GH2
Q'TY | 52 | 52
CAPACITY | 3120kg | 3120kg
OPERATION PRESS. | 64bar G | 64bar G
TYPE | – | –
E&CO
PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
MH CYLINDER
B500-SNP-KOR-PRO-DWG-20

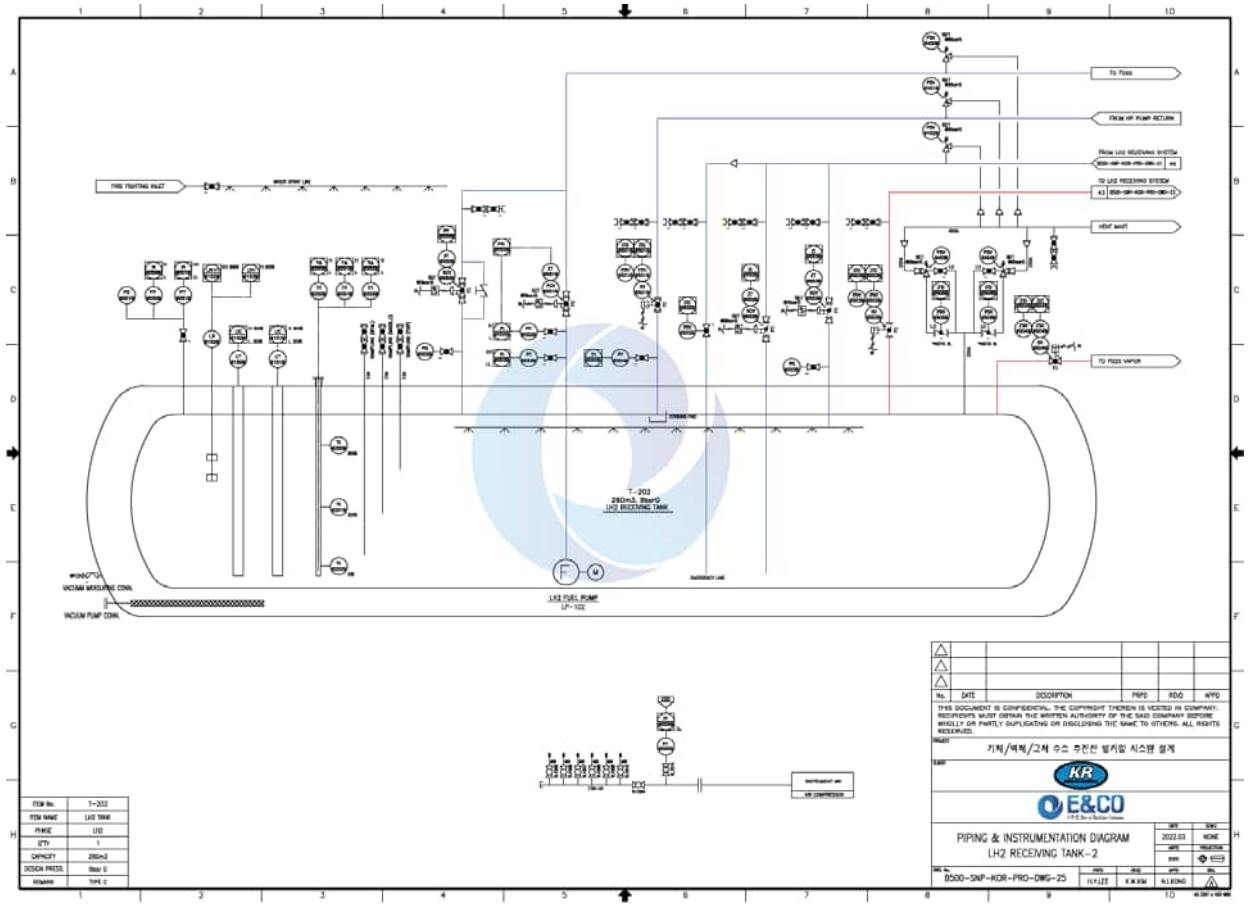

PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
LP VAPORIZER
B500-SNP-KOR-PRO-DWG-21
E&CO
KR

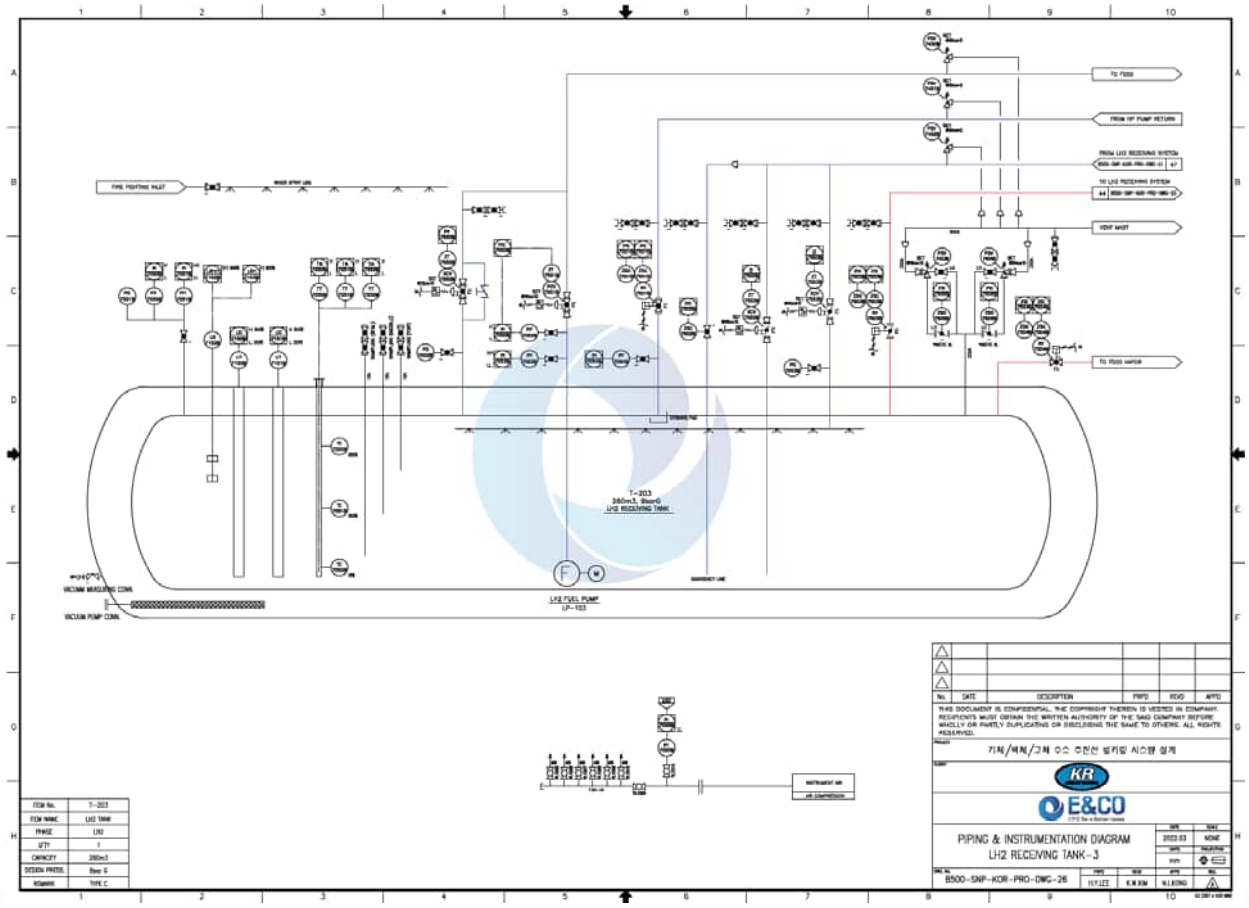

DRIP TRAY
WATER SPRAY
VAPOR RETURN
LIQUID SUPPLY
DETAIL OF MANIFOLD DRIP TRAY DRAIN
PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
LH2 BUNKERING SYSTEM
B500-SNP-KOR-PRO-DWG-22


DRIP TRAY
WATER SPRAY
VAPOR OUTLET
LIQUID INLET
VENT HEADER
DETAIL OF MANIFOLD DRIP TRAY DRAIN
THIS DOCUMENT IS CONFIDENTIAL. THE COPYRIGHT THEREIN IS VESTED IN COMPANY. RECIPIENTS MUST OBTAIN THE WRITTEN AUTHORITY OF THE SAID COMPANY BEFORE WHOLLY OR PARTLY DUPLICATING OR DISCLOSING THE SAME TO OTHERS. ALL RIGHTS RESERVED.
기체/액체/고체 수소 추진선 벙커링 시스템 설계
E&CO
PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
LH2 RECEIVING SYSTEM
B500-SNP-KOR-PRO-DWG-23

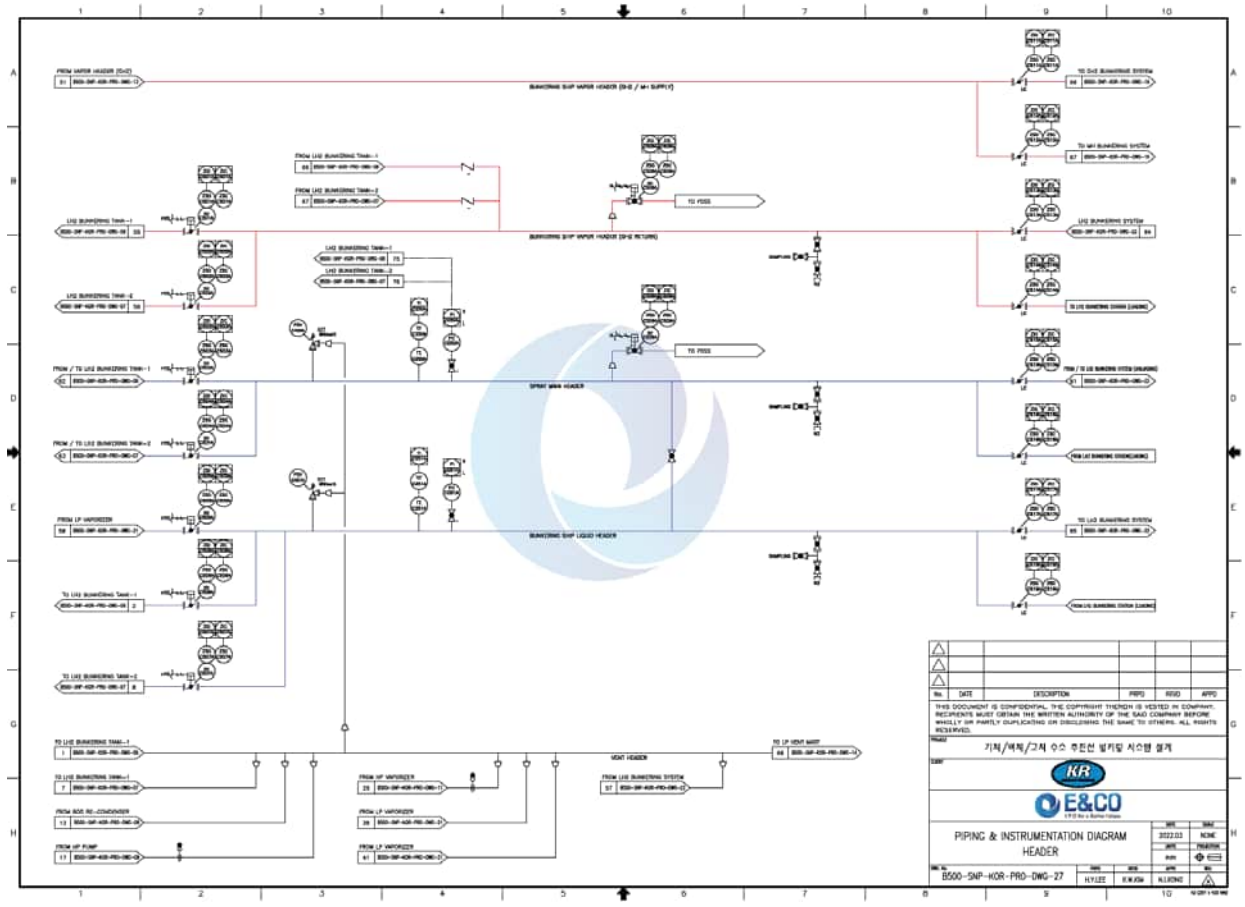


TO FUEL
FROM HP PUMP RETURN
FROM LH2 RECEIVING SYSTEM
TO LH2 RECEIVING SYSTEM
VENT MAST
TO FUEL VAPOR
FIRE FIGHTING INLET
T-201
LH2 RECEIVING TANK
LH2 FUEL PUMP
VACUUM MEASURING CONN.
VACUUM PUMP CONN.
No.
DATE
DESCRIPTION
PRFS
RSVD
APPD
THIS DOCUMENT IS CONFIDENTIAL. THE COPYRIGHT THEREIN IS VESTED IN COMPANY. RECIPIENTS MUST OBTAIN THE WRITTEN AUTHORITY OF THE SAID COMPANY BEFORE WHOLLY OR PARTLY DUPLICATING OR DISCLOSING THE SAME TO OTHERS. ALL RIGHTS RESERVED.
기체/액체/고체 수소 추진선 발키팅 시스템 설계
E&CO
PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
LH2 RECEIVING TANK-1
2022.03
NONE
B500-SNP-KOR-PRO-DWG-24
H.Y.LEE
K.M.KIM
N.LEONG
ITEM No.
T-201
ITEM NAME
LH2 TANK
PHASE
LH2
QTY
1
CAPACITY
250m3
DESIGN PRESS.
Max 0
REMARK
TYPE C


To Flare
FROM HP PUMP RETURN
TO LH2 RECEIVING SYSTEM
VENT MAST
TO FLARE VAPOR
T-202
LH2 RECEIVING TANK
LH2 FUEL PUMP
LP-102
VACUUM MEASURING CONN.
VACUUM PUMP CONN.
PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
LH2 RECEIVING TANK-2
B500-SNP-KOR-PRO-DWG-25



TO FEED
FROM HP PUMP RETURN
FROM LH2 RECEIVING SYSTEM
TO LH2 RECEIVING SYSTEM
VENT MAST
TO FEED VAPOR
FIRE FIGHTING INLET
T-203
LH2 RECEIVING TANK
LH2 FUEL PUMP
LP-103
VACUUM MEASURING CONN.
VACUUM PUMP CONN.
INSTRUMENT AIR
AIR COMPRESSION
No.
DATE
DESCRIPTION
PRPD
REVD
APPD
THIS DOCUMENT IS CONFIDENTIAL. THE COPYRIGHT THEREIN IS VESTED IN COMPANY. RECIPIENTS MUST OBTAIN THE WRITTEN AUTHORITY OF THE SAID COMPANY BEFORE WHOLLY OR PARTLY DUPLICATING OR DISCLOSING THE SAME TO OTHERS. ALL RIGHTS RESERVED.
기체/액체/그체 수소 추진선 발키팅 시스템 설계
E&CO
PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
LH2 RECEIVING TANK-3
B500-SNP-KOR-PRO-DWG-26
2022.03
NONE
ITEM No.
T-203
ITEM NAME
LH2 TANK
PHASE
LH2
QTY
1
CAPACITY
280m3
DESIGN PRESS.
Rear G
REMARK
TYPE C


PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
HEADER
B500-SNP-HOR-PRO-DWG-27
E&CO
KR

[END OF DOCUMENT]



(46762) 36, Myeongji ocean city 9-ro, Gangseo-gu, Busan Republic ok Korea

TEL +82 70 8799 7114 **Fax** +82 70 8799 8999 **Email** systemsafety@krs.co.kr

www.krs.co.kr

▰ 외부 전문가 평가 검토의견서 반영결과표 ▰

검토 대상	수소추진선박 벙커링 및 수소운반선박 적하역 안전기준 개발(1과제)
검토 일시	2023 년 11 월 15일

평가 항목	검토위원	검토 의견	반영 결과	비고
수소연료 추진선 벙커링 안전운용 절차	소속: 삼성중공업 직위/직책: 프로 성명: 최병윤	장비 구성에 있어서 Loading간 BOG 처리에 대한 고심이 있지만 실제 운영 시 BOG 포함 각 용량에 대한 정량화가 되지 않아 Recondensing 실제 가능성 검토 필요	본 과제는 실선 설계과제가 아니므로, 탱크 설계 사양이 결정되지 않아 실제 운영 시 BOG 발생량을 정량화할 수 없기 때문에 향후 탱크 사양이 접수된 이후 공정 설계과정에서 운용과정에서 발생되는 BOG 처리에 대한 방안을 검토할 수 있음.	향후 검토 가능
		Cool down 절차가 누락되어 타 자료와 절차 일치 필요 (21페이지)	안전운용절차서의 21페이지 내용은 기체수소 Bunkering에 대한 operation procedure이기 때문에 Tank나 Line에 대한 cool down 절차는 필요 없음.	미반영