

Risk-based Design of On-board Facility for Lifting System Field Test of Deep-sea Mining System

Su-gil Cho*, Sanghyun Park*, Jaewon Oh*, Cheonhong Min*, Seongsoon Kim*, Hyung-Woo Kim*,
Tae Kyung Yeu*, Jung Yeul Jung*, Jaeil Bae** and Sup Hong*

*Technology Center for Offshore Plant Industries, KRISO, Daejeon, Korea

**Yooyoun ENE Co.,LTD, Busan, Korea

심해저 광물자원 양광시스템 실증 시험을 위한 위험도 기반 선상 설비 설계

조수길* · 박상현* · 오재원* · 민천홍* · 김성준* · 김형우* · 여태경* · 정정열* · 배재일** · 홍섭*

*선박해양플랜트 연구소 해양플랜트산업기술센터

**유연이앤이

KEY WORDS: Deep-sea mining system 심해저 집광 시스템, Failure mode and effect analysis 고장모드 분석, Lifting system 양광시스템, On-board facility design 선상 설비 설계, Risk-based design 위험도 기반 설계

ABSTRACT: This study had the goal of designing onboard structures for a pre-pilot mining test (PPMT), which is required for the commercialization of the deep-sea mining industry. This PPMT is planned to validate the performance of a hydraulic lifting system and verify the concept of operating through a moon-pool in the east sea, Korea. All of the onboard equipment and facility were designed by KRISO. Because the test was performed at the first development, it is difficult to determine what risk will occur in the facility. Therefore, risk-based design is required in the facility for the PPMT, which includes the facility layout, failure mode and effect analysis (FMEA), and risk reduction plan. All of the expected performances of the lifting system itself and the onboard facilities were qualitatively validated using the risk-based design.

1. 서 론

자원고갈로 인한 원자재 가격 상승이 우려되는 상황에서 수심 5,000미터의 심해 연약지반에 존재하는 망간 단괴는 매우 큰 경제성을 지니고 있다(Hong, 2010a; Chi and Hong, 2014). 국내에서는 94년부터 심해저 광물자원 개발 연구를 지속해옴으로써 심해저 채광기술 분야에서 선도 기술 보유국의 위치에 진입할 수 있게 되었다(Hong et al., 2006; Hong, 2010b). 이러한 성과는 국제해저기구(International Sea-bed Authority, ISA) 및 탐사채약자들에게도 인정받게 됨으로써, 향후 공해상 심해저광물자원 개발규칙(Mining Code) 제정에 있어서 대한민국의 주도적인 참여가 가능하게 되었다. 2020년경 제정이 예상되고 있는 ISA의 개발규칙은 심해저광업이란 신산업 태동의 근간이 될 것이고 이러한 개발규칙의 제정 과정에는 채광시스템의 대규모 실증 시험이 요구될 것으로 예견되기에 선도 기술 보유국으로

서의 역할 수행에 대한 준비가 필요하다. 이에 대한 준비로 선박해양플랜트 연구소에서는 각 부분에 대한 예비파일럿 성능 실증 시험(PPMT, pre-pilot mining test)을 계획, 실증 시험 단계에 이르렀다(Yeu et al., 2013).

심해저 망간단괴 채광시스템은 개념적으로 심해에 부존하는 망간단괴를 집광하는 집광시스템과 집광된 망간단괴를 선상까지 끌어올리는 양광시스템으로 구분된다(Hong et al., 2007). 이에 대한 개념도는 Fig. 1과 같다. 집광시스템에 대한 연구로는 2007년 상업 채광량의 1/20 규모로 시험 집광기가 제작되었으며 2010년 동해 130미터 깊이의 근해에서 실증 시험을 통해 집광성능을 확인하였다(Park et al., 2010). 2012년에는 상업 채광량의 1/4 규모의 파일럿 집광로봇이 제작되었으며 2013년 동해 1,300미터 깊이의 근해에서 실증 시험이 이루어진 바 있다(Yeu et al., 2012; Yeu et al., 2013). 한편 양광시스템에 대한 연구는 2009년 불연속적으로 집광되는 망간단괴를 임시 저장, 일정한

Received 15 October 2016, revised 21 November 2016, accepted 22 November 2016

Corresponding author Sup Hong; +82-42-866-3350, suphong@kriso.re.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

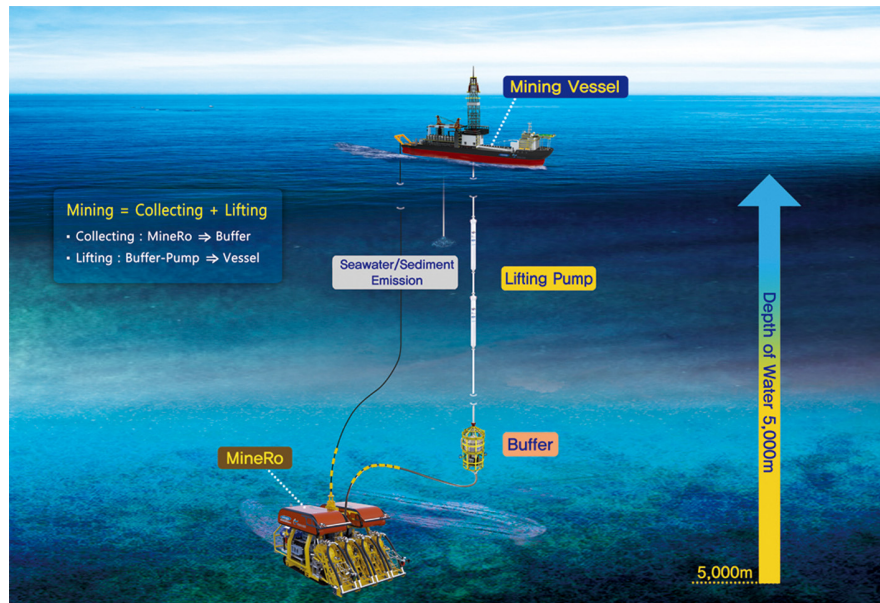


Fig. 1 Concept of the deep-seabed mining system

양으로 선상으로 송출하기 위한 시스템인 버퍼시스템이 개발되었으며 2,000미터의 수두에 망간단괴를 송출할 수 있는 6단 원심펌프를 가지고 있는 양광펌프가 개발되었다. 이 두 개의 시스템에 대한 수조실험은 실시되었지만 양광시스템의 통합적인 실증 시험은 아직 이루어지지 않았다.

본 연구는 파일럿 양광시스템의 예비파일럿 성능 실증 시험을 위한 선상 설비의 설계가 목적이다. 양광시스템 성능 실증 시험을 위한 선상 설비는 기존 오일 시추를 위한 해양플랜트 장비와는 운용 목적, 단괴 처리 방법 등에 차이가 있다. 즉, 처음 시도되는 장비들로서 자체 설계, 제작되기 때문에 그 위험도는 매우 크다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 위험도에 따른 각 시스템의 배치를 수행하고 FMEA(failure mode and effect analysis) 분석을 통해 개념 설계부터 제작, 운용까지 발생할 수 있는 고장모드를 식별하

여 위험도를 최소화 할 수 있는 대응 방안을 제시한다. 분석 결과 제시된 대응 방안은 고 위험도 장비의 잠재된 그리고 발생 가능한 위험요소 및 그 원인과 결과를 체계적으로 방지할 수 있다(Shafiee and Fateme, 2014).

2. 양광시스템 성능 실증 시험 구성

2.1 양광시스템 성능 실증 시험 준비

양광시스템 성능 실증 시험의 목표는 2,000m 수심의 망간단괴를 양광펌프가 관손실을 이겨내고 수상으로 양정할 수 있는가를 실험하는 것이다. 하지만 실험 비용의 한계로 양광관을 수심 2,000m까지 설치하는 것은 불가능하였다. 따라서 양광펌프의 작동수심인 500m에 맞추어 양광시스템을 설치하고 수심

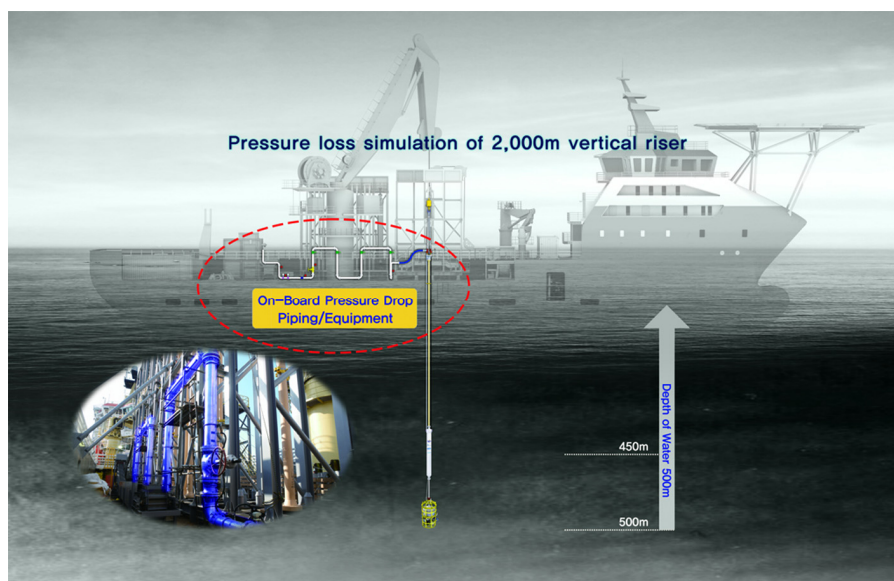


Fig. 2 Pressure drop simulation on-board system

2,000m 대비 양광관 축소에 의해 발생하는 펌프의 양정 문제는 Fig. 2와 같이 양광관 하단 흡입부에 밸브를 설치하여 관손실 발생을 모사함으로써 해결하였다.

양광펌프의 성능(유량, 양정, 슬러리 이송) 및 버퍼시스템의 성능(단괴 보관, 단괴 피딩) 실증을 지원하기 위해서 시험 선박은 충분한 크기의 문폴(Moon-pool), 능동운동보상형(AHC, active heave compensation) 대용량 크레인, 고성능 DPS 등을 기본 제원으로 갖추고 있는 OSV(offshore support vessel)를 사용해야 한다. 본 시험에서는 선장 94.6m, 선폭 20m, 총 톤수 4,425톤, DP2, AHC 100톤, Moon-pool 6.5m×6.5m 등의 제원을 가지는 OSV를 지원 선박으로 선정하였다.

2.2 양광시스템 구성

양광시스템 구성을 살펴보면 Fig. 3과 같이 양광펌프, 버퍼, 양광관이 존재한다. 먼저 양광펌프는 Brushless 전기모터와 6단 원심펌프를 사용하는 심정펌프 개념의 펌프로써 유량 500m³/h, 양정 26.5bar, 설치수심 400m 토출압력 45.3bar, 흡입압력 18.9bar, 전기모터 800kW(6.6kV, 3상/4극, 60Hz) 등의 설계사양을 갖는 펌프이다.

버퍼는 시간적으로 불규칙한 집광공정과 안전성 및 효율성이 요구되는 양광공정을 원활히 연결시키기 위해 중간저장기능(버퍼링)과 슬러리 관유동 보장기능을 가지는 시스템으로 선박해양플랜트 연구소에서 독자 개발되었다(Yeu et al., 2012). 버퍼는 상부의 중간저장 호퍼(Hopper), 호퍼 하부의 단괴공급제어장치(Feeder), 외부배관(인입, 토출), 전기유압제어시스템, 방향제어 추진기(Thruster) 2대 등으로 구성된다. 호퍼는 저장용적 6m³으로 최대 7톤의 망간단괴를 저장할 수 있으며, Feeder의 공급용



(a) Buffer (b) Lifting pump (c) Riser

Fig. 3 Main equipment of lifting system field test

량은 평균 10kg/s(최대 15kg/s)을 갖도록 스크류 방식으로 개발되었다. 버퍼 시스템의 Feeder와 방향제어 Thruster는 유압으로 작동되며 원격실시간으로 제어된다.

양광관은 국내 민간기업의 특허기술인 SAW(submerged arc welding) 방법을 사용해서 API 5L X80 재질의 양광관이 개발되었다. 플랜지 규격은 API 6A 6B 5000psi(양광관)/10000psi(양광펌프) 및 ASTM A182 F22 Class 3에 따라서 국내 제작되어 양광관과 용접되었다. 단위 양광관의 길이는 12.5m, 내경 202.7mm, 두께 8.2mm로 제작되었다. 본 시험을 위해 총 38본의 양광관이 사용되었다.

2.3 시험지원을 위한 필요 선상 구조물 개념설계

양광시스템 실증시험의 운용도는 Fig. 4와 같다.

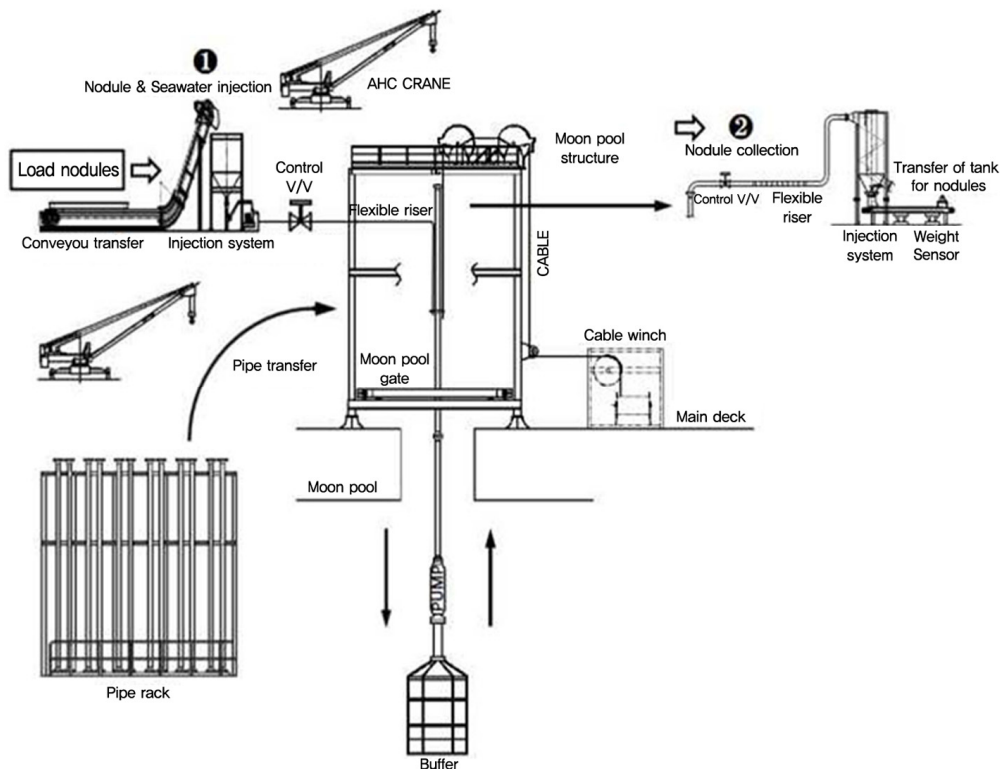


Fig. 4 Planar figure for lifting system field test

본 시나리오는 크게 양광시스템 진/회수 작업, 단괴 투입/회수 작업으로 구성된다. 먼저 양광시스템의 진/회수 작업은 선박에 있는 크레인을 이용하여 라이저랙에 있는 양광시스템을 문폴 타워를 통해 해저로 진/회수 시키는 작업이다. 단괴 투입/회수 작업은 양광시스템 진수 뒤 진행된다. 적재된 단괴를 단괴 투입시스템으로 버퍼로 투입한 뒤 버퍼에 저장된 단괴를 양광펌프로 선상으로 회수하는 과정이다. 또한 2000미터 양정을 모사하기 위해 감압배관을 거친 뒤 단괴와 해수를 분리하고 단괴는 저장, 분리된 해수는 배출하는 작업을 포함한다. 이를 구현하기 위해서 양광시스템을 보관할 수 있는 라이저랙, 양광시스템 설치/해체를 위한 문폴 타워, 선상압력강하배관, 단괴분리회수 및 해수배출 시스템이 필요하다. 또한 양광시스템 전체를 운용할 수 있는 선상 통합운용시스템, 고압 전력 공급을 위한 선상발전기 및 엄빌리컬-윈치(2대, 버퍼 및 펌프용), 양광펌프 구동 인버터 등이 존재한다. 이를 자세히 살펴보면 다음과 같다.

(1) 양광시스템 진/회수를 위해 플랜지 체결방식을 선택하였다. 체결작업을 위한 플랜지인 문폴 타워는 크기가 서로 다른 양광시스템(버퍼, 양광펌프, 양광관)을 진/회수시킬 수 있도록 문폴 타워 및 문폴 게이트 등이 자체 설계·제작되었다. 문폴 타워는 전체 하중을 지지하고 각 층마다 작업 공간이 확보되어야 한다. 또한 버퍼의 진/회수를 위해 5m 이상 개방이 가능한 문폴 게이트가 마련되어야 한다.

(2) 500m의 수심까지 양광시스템 진수시키기 위해 사용된 양광관은 38분이다. 따라서 양광관의 보관 장소가 선박 데크 내부에 마련되어야 한다. 본 연구에서는 데크 면적의 제한으로 수직 거치식으로 라이저 거치대를 자체 설계 제작하였다.

(3) 수직 양광관의 길이 축소(당초 2,500m → 변경 500m)에 따른 관내압력손실 차이는 선상배관을 통해서 모사하는 방법으로 실증 시험이 수행되었다. 본 연구에서는 Engelmann의 연구결과에 따라 망간단괴가 포함된 슬러리의 2,000m에 대한 압력손실을 예측하였으며(Engelmann, 1978), 이를 상황에 맞게 압력손실을 조절할 수 있는 밸브 및 고정적으로 큰 압력손실이 가능한 오리피스를 사용하여 배관설계를 수행하였다.

(4) 회수된 모조단괴를 해수와 분리 회수하는 장치와 일정시간

동안의 양광량 저장 측정하는 장치를 설계·제작하였다. 양광시스템 실증시험에서 목표로 하는 단괴슬러리 유량이 500m³/hr이기 때문에 이를 처리할 수 있도록 설계되어야 하며 분리된 단괴는 이송 및 저장하고 해수는 선박 밖으로 배출될 수 있도록 설계하였다. 계획된 단괴농도는 약 3vol%로 약 485m³/hr의 해수유량을 선박 밖으로 배수하기 위해 슬러리펌프와 자연배수관을 연결하는 방식을 선정하였다.

(5) 버퍼 시스템과 양광펌프 작동을 위하여 각각의 엄빌리컬/윈치(2기)를 주문 설계·제작하였다.

(6) 버퍼-양광펌프 통합운용, 선상배관 유량/압력 측정 및 양광슬러리 중량 측정 등의 통합운용모니터링을 담당하는 통합운용시스템(H/W, S/W)이 자체 개발되었다.

3. 양광시스템 성능 시험을 위한 위험도 기반 선상 구조물 설계

본 연구에서는 위험도를 기반으로 선상 구조물 배치 및 설계를 수행하였다. 수행 절차는 먼저 앞 절에서 정의된 각 시스템의 위험도와 기능을 고려하여 선상 배치를 수행하였다. 그 뒤 FMEA 분석을 통해 개념 설계부터 제작, 운용까지 발생할 수 있는 고장모드를 식별하여 큰 위험요소에 대해서 위험도 저감을 위한 개선설계 및 대응방안을 마련하였다. 이를 기반으로 상세설계를 수행하여 선상 구조물을 제작하였다.

3.1 위험도 및 기능을 고려한 선상 구조물 배치

선상 구조물의 배치는 운용적인 측면뿐만 아니라 선박 하부의 구조, 위험도까지 동시에 고려되어야 하는 매우 중요한 설계 요소이다. 기존 해양플랜트 FPSO(Floating production storage offloading) 배치 설계 역시 중요한 요소로 간주되어 연구가 진행된 바 있다(Ku et al., 2014). 본 실증시험을 위해 선박에 적재해야 하는 장비 무게는 약 280톤으로 장비 무게와 장비의 위험도는 Table 1과 같다. 고압 및 화재 폭발 위험이 따르는 발전기 및 고압인버터 Van은 작업 공간 및 사람이 밀집한 곳과 가장 멀리 떨어진 선박 선미 부분에 위치해야 한다. 또한 발전기-고압인버터-엄빌리

Table 1 Computed wind and current forces on buoy models

Equipment	EA	Size [m] (L×W×H)	Weight [ton]	Hazard
Moonpool tower	1	7.2 × 6.5 × 7	88.5	high
Riser rack (with riser)	1	12 × 3.6 × 13	80(37+43)	high
Nodules Injection system	1	1.8 × 18.5 × 2.6	7	low
Separated system	1	7 × 6.5 × 7	16	low
Decompression pipe line	1	∅ 0.2 × L 20.5	2	middle
Disposal system	3	∅ 0.5 × L 12.4	0.3	low
Invertor VAN	1	9 × 3 × 3.6	25	high
Power VAN	3	6 × 3 × 3	15	high
Control VAN	1	6 × 3 × 3	10	high
Buffer	1	∅ 3 × H 6.2	7.5	low
Winch	2	4.5 × 2.5 × 4.25	17.5/19.5	high

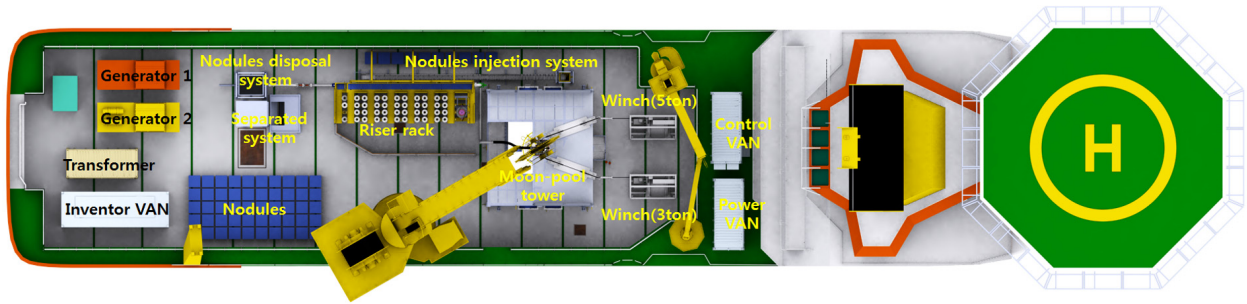


Fig. 5 Layout drawing of on-board facility for lifting system field test

Table 2 Plan for dominant failure mode of FMEA report

No.	Item Item's Name	Freq.	Seve.	Detect.	RPN	Solution
1	Moon Pool Gate	3	5	1	15	
1-1	Moon Pool Gate	3	5	1	15	Prohibit operation over 15m/s wind velocity, 2m maximum wave
1-2	Guide Rail	3	3	2	18	Pin fixation design
1-4	Moon Pool Base Frame	2	5	2	20	Reinforcement
1-7	Elec. Cable	3	4	2	24	Design change
2	Moon Pool Structure	2	5	2	20	
2-1	Structure	2	5	2	20	Prohibit operation over 15m/s wind velocity, 2m maximum wave
2-2	Base Frame	2	5	2	20	Perform UT test
2-4	Sheave Base Plate	3	3	2	18	Reinforcement
2-6	2nd Floor Moving Plate	3	3	2	18	Consideration based on HSE working condition
3	Riser Rack	2	3	2	12	
3-1	Riser Rack Structure	2	4	2	16	Reinforcement
3-3	Clamp	3	3	2	18	Monitoring system design
5	Nodules Separation and Disposal System	3	2	2	12	
5-1	Pipe Line for Nodules Separation (On the Deck)	3	2	2	12	Monitoring system design
5-5	Disposal Pipe	3	2	2	12	Monitoring system design

컬/윈치 시스템으로 이어지므로 전선의 꼬임이 발생하지 않도록 배치를 결정해야 한다. 고 위험도 군에 포함되는 엄빌리컬/윈치 시스템의 경우 선미에 배치해야 하나 문폴 타워까지 거리가 길어지고 사람의 통행이 있는 곳을 지나칠 경우 케이블의 손상이 더 큰 위험도를 발생시킨다. 따라서 문폴 타워에 가깝고 양광시스템 진/회수 상황을 바로 확인할 수 있는 부분에 배치시켰다.

기능적으로는 빠른 양광시스템 설치를 위해 라이저랙은 문폴 타워 측면에 설치하였으며, 안전을 위해 메인 크레인의 이동 반경과 사람의 동선이 겹치지 않도록 고려하여 배치하였다. 그리고 감압배관의 경우 라이저랙 기둥에 고정하여 설치하였다. 감압배관은 중 위험도에 속하므로 사람의 통행이 제한되는 곳에 배치해야 한다. 본 실증시험에서는 단괴 투입과 회수를 연속적으로 하지 않기 때문에 단괴 투입 시스템이 위치한 부분과 감

압장치를 같이 위치시켜 투입할 때는 사람이 지나다니는 공간으로 회수할 때는 사람의 출입을 제한하도록 배치하였다. 회수 시스템은 큰 소음이 발생하고 많은 양의 물이 발생하여 사람이 미끄러질 수 있으므로 상대적으로 선미 지역에 배치하였다. 하지만 해수가 발전기, 고압인버터에 침투하지 않도록 두 시스템 간의 이격 거리 및 분리대를 설치, 발전기 및 고압인버터를 높여서 설치하도록 하여 위험도를 제거하였다. 마지막으로 Control Van은 긴급 상황 시 사람이 빨리 진입할 수 있어야 하며 모든 시스템을 제어해야 하므로 가장 가까운 A 데크에 설치하였다. 선박 위에 설치되는 모든 시스템은 하중과 선박 하부의 메인 프레임간의 안정성을 고려하여 정확한 위치를 결정하였고 DNV-GL(Det Norske Veritas/Germanischer Lloyd)의 승인을 받아 진행하였다. 이에 따른 전체 배치도는 Fig. 5와 같다.

3.2 FMEA 분석

양광시스템 실증 시험을 위한 선상 설비는 자체 개발, 제작되는 부분이기 때문에 위험도 평가가 필수적이다. 위험도 평가는 먼저 양광시스템 통합 운용에서 발생할 수 있는 고장모드를 분석하고, 이것의 발생 빈도와 발생에 따른 손상/피해 정도를 객관적으로 분석하는 것이다. 다음으로는 분석된 고장모드의 피

해를 최소화 할 수 있는 대응 방안을 제시하고, 이를 통해 발생 빈도와 손상/피해의 저감 정도를 예측하는 것이다.

FMEA 분석은 대상 시스템에 잠재된 그리고 발생 가능한 고장모드 및 그 원인과 결과를 체계적으로 빠짐없이 식별할 수 있으며, FMEA 중에 논의되고 결정된 위험도 지수를 통해 대상 시스템의 전반적인 안전성 수준을 정성적(Qualitative) 또는 준

Table 3 FMEA report of on-board facility for lifting system field test

No.	Item's Name	Item	Item's Function	Potential Failure mode	Failure Item	Potential Cause of Failure	Failure Effect	Effect on Total System	Freq.	Seve.	Detect.	RPN
1	Moon Pool Gate	Clamp and support to riser in the LARS process of lifting system		Noise, Speed drop, Operation trouble	Deformation or failure by environmental factors(wind, noise, wave, snow, rain, temperature, impact) and crash into external equipment or crain		Impossible to lifting test		3	5	1	15
1-1	Moon Pool Gate	Open and close in the side direction for clamp of lifting system		Noise, Speed drop, Operation trouble	Deformation or failure by environmental factors(wind, noise, wave, snow, rain, temperature, impact) and crash into external equipment or crain		Impossible to lifting test		3	5	1	15
1-2	Guide Rail	Support rail for open of moon pool gate		Noise, Speed drop, Operation trouble	Rial deviation by noise and external shock		Impossible to open/close of moon pool gate		3	3	2	18
1-3	Guide Roller	Bottom roller for open of moon pool gate		Noise, Speed drop, Operation trouble	Rial deviation by noise and external shock		Impossible to open/close of moon pool gate		3	2	2	12
1-4	Moon Pool Base Frame	Installation between moon pool gate and deck, Support to moon pool gate		Deformation, Failure	Deformation or failure of base plate due to weaken base support structure		Impossible to lifting test		2	5	2	20
1-5	Ball Screw	Prevention for rail deviation on the roller and deformation		Deformation, Failure	Deformation or failure by external force		Impossible to open/close of moon pool gate		3	2	2	12
1-6	Moon Pool Clamp	Securement of free motion for roll & pitch mode on the ship, Consideration of material nonlinearty due to contact between flange and clamp, Securement of structural safety on the stopper		Deformation, Failure	Deformation or failure by environmental factors(wind, noise, wave, snow, rain, temperature, impact) and crash into external equipment or crain		Impossible to lifting test		3	4	1	12
1-7	Elec. Cable	Electrical cable to supply with buffer and lifting pump		Operation trouble, Overheating, Degradation of electric power	Failure or damage of Elec. Cable by external force Impossible operation of moon pool gate		Impossible to open/close of moon pool gate		3	4	2	24
2	Moon Pool Structure	Securement of work spcae for lifting system operation, Sturcutre able to wire work through the sheave		Deformation, Failure	Deformation or failure by environmental factors(wind, noise, wave, snow, rain, temperature, impact) and crash into external equipment or crain		Impossible to lifting test		2	5	2	20
2-1	Structure	Basic tower supprot on the moon pool, Securement of work space at each floor		Deformation, Failure	Deformation or failure by environmental factors(wind, noise, wave, snow, rain, temperature, impact) and crash into external equipment or crain		Impossible to lifting test		2	5	2	20
2-2	Base Frame	Basic support on the total structure weight		Deformation, Failure	Deformation or failure of base plate due to weaken base support structure		Impossible to lifting test		2	5	2	20
2-3	Sheave	Structure of pulley type able to operate two cables on the two winches		Noise, Operation trouble, Deformation, Failure	Deformation or failure by environmental factors(wind, noise, wave, snow, rain, temperature, impact) and crash into external equipment or crain Wire deviation into sheave due to winch operation		Impossible to lifting test		3	2	1	6
2-4	Sheave Base Plate	Basic support plate for external force on the sheave at 3rd floor of moon pool tower		Deformation, Failure	Deformation or failure by external force, Destruction of sheave baseplate		Impossible to lifting test		3	3	2	18
2-5	Stair	Stair of moon pool tower		Deformation, Failure	Deformation or failure by external force		Hazard of safety accident		2	2	1	4
2-6	2ndFloor Moving Plate	Moving plate for LARS process of buffer equipment		Noise, Operation trouble, Deformation, Failure	Destruction of moving plate by external force, Operation trouble due to damaged driveline, Crashed plate due to support weakness		Impossible to lifting test		3	3	2	18
2-7	Handrail	Handrail for fall prevention at moon pool tower		Deformation, Failure	Deformation or failure by external force		Hazard of safety accident		2	2	1	4

Item		Failure Item		Failure Effect		Freq.	Seve.	Detect.	RPN
No.	Item's Name	Item's Function	Potential Failure mode	Potential Cause of Failure	Effect on Total System				
3	Riser Rack	Structure for riser cargo and operation	Noise, Operation trouble, Deformation, Failure	Deformation or failure by environmental factors(wind, noise, wave, snow, rain, temperature, impact) and crash into external equipment or crain	Difficult to operation of pipe clamping	2	3	2	12
3-1	Riser Rack Structure	Structure for riser cargo of 48 ea	Deformation, Failure	Deformation or failure by environmental factors(wind, noise, wave, snow, rain, temperature, impact) and crash into external equipment or crain	Difficult to operation of pipe clamping	2	4	2	16
3-2	Guide Rail	Guide rail for rolling movement of riser at operation	Deformation, Failure	Defect on the pipe or guide rail due to external crash, Deviation of pipe on the clamp due to guide rail defection	Difficult to operation of pipe clamping	3	2	1	6
3-3	Clamp	Prevention for fall and rollover of riser in the rack	Operation trouble, Deformation, Failure	Defect on the clamp due to crash between pipe and clamp, Deviation of pipe on the clamp due to clamp defection	Hazard of safety accident	3	3	2	18
3-4	Handrail	Handrail for fall prevention at top floor of riser rack	Deformation, Failure	Deformation or failure by external force	Hazard of safety accident	2	2	1	4
4	Nodules Injection System	Equipment for continuous injection of nodules	Noise, Operation trouble, Speed drop	Deformation or failure by external force, Plugging on injection pipe by foreign material, Injection operation trouble of nodules due to defect on the pump, Operation trouble due to failure of the conveyer belt	Impossible to lifting test	3	2	2	12
4-1	Injection Pump	Pump for injection of nodules	Noise, Operation trouble, Speed drop	Defect on the pump by external force, Pumping operation trouble due to overworking or overheating of lifting pump	Impossible to lifting test	3	2	2	12
4-2	Conveyer Belt	Conveyer belt for injection of nodules	Noise, Operation trouble, Speed drop	Deformation of failure due to decrepit conveyer belt, Deformation or failure by external force, Operation trouble on the conveyer belt by foreign material	Impossible to lifting test	3	2	1	6
4-3	Injection Sensor	Sensor to detect injection amount of nodules	Operation trouble	Sensing failure by external force, Detection trouble by foreign material	Hazard of safety accident	3	2	2	12
4-4	Injection Control System	System to control injection amount of nodules	Operation trouble	Failure on the injection control system by external force	Hazard of safety accident	3	2	2	12
4-5	Support Plate of Injection Hose	Support plate for coupling lifting system to injection hose	Deformation, Failure	Deformation or failure of support plate by external crash	Operation difficult and time consuming	3	2	2	12
5	Nodules Seperation and Disposal System	System for seperation nodules into slurry, Disposal system of seperated seawater	Noise, Operation trouble, Speed drop	Deformation or failure by external force, Lifting performance trouble due to defect pump, Plugging on the pipe by foreign material or defect equipment, Leakage due to decrepitude or failure	Impossible to lifting test	3	2	2	12
5-1	PipeLine for Nodules Seperation (OntheDeck)	Pipe line from flexible hose to seperation system of slurry from lifting process, Structure safety on the internal force due to pipe pressure	Deformation, Failure	Plugging on the pipe by foreign material or defect equipment, Leakage due to decrepitude or failure	Degradation of system efficiency and hazard of safety accident	3	2	2	12
5-2	Flexible Hose	Flexible hose from lifting system to pipe line, Compensation function due to heave motion of lifting system	Deformation, Failure	Deformation or failure by external force, Plugging on the hose by foreign material or defect equipment, Leakage due to decrepitude or failure	Degradation of system efficiency and hazard of safety accident	3	2	2	12
5-3	Flow Control Measurement Sensor	Sensor to measure the flow amount into the injection system	Operation trouble	Sensing failure by external force, Detection trouble by foreign material	Impossible to measure for R&D	3	2	2	12
5-4	Measurement System of Nodules Weight	Measure system of seperated nodules weight	Operation trouble	Sensing failure by external force, Detection trouble by foreign material	Impossible to measure for R&D	3	2	2	12
5-5	Disposal Pipe	Pipe to dispose the seawater	Deformation, Failure	Deformation and defect of disposal pipe due to friction, Deformation or failure by external force, Operation trouble on the pipe by foreign material	Degradation of system performance	3	2	2	12
5-6	Pump for Seawater-Nodules DisCharge	Pump to separate nodules into seawater	Operation trouble	Defect pump by external crash, Pump operation trouble due to overwork or overheating of pump	Impossible to separate seawater and nodules	3	2	2	12
5-7	Mesh for seperating Nodules into Slurry	Mesh to separate nodules into seawater	Deformation, Failure	Defect or deformation by friction of seperating process between seawater and nodules, Deformation and failure by external force	Impossible to separate seawater and nodules	3	2	2	12

정량적(Semi-quantitative)으로 확인할 수 있다. 식별된 위험요소들의 원인과 결과를 적절히 제어하여 해당 위험도를 감소시키기 위한 대응 방안, 즉 안전시스템을 합리적이고 효과적으로 도출해 냄으로써 대상 시스템을 보다 안전하고 신뢰할 수 있는 수준으로 개발할 수 있게 하는 것 또한 FMEA의 중요한 역할이자 목적인 것이라 할 수 있다. 본 연구에서는 발주처, 설계, 제작 및 감사 업체들을 포함하여 FMEA 그룹을 구성하였고 3번의 회의에 거쳐 FMEA 분석을 실시하였다. 양광시스템 실증시험을 위한 양광시스템의 수중 진/회수 설치, 기동 및 양광, 선상 분리 및 처리과정 상황에서의 모든 고장모드를 식별하였다. 각 고장모드의 빈도, 영향 정도를 Table 3에 상세히 표기하였다. 특히, 양광시스템의 진/회수 작업 중 장비 충돌, 문폴 게이트 레일 이탈, 하중에 의한 파손 및 변형, 단괴 회수 시스템의 마찰 및 이물질로 인한 누수 또는 작동 불능이 위험도가 매우 높은 것으로 파악되었다. 특히 단괴 회수 시스템의 경우 상대적으로 높지 않은 고장모드이지만 겨울철 실험이기 때문에 결빙, 작업자의 상해를 고려하여 선정하였다. 식별된 높은 고장모드는 운용 환경 가이드라인 구축, 구조 변경, 구조 불량 검사 시스템 구축, 위험 감지 프로세스 추가 및 작업자의 감시 또는 각별한 주의 등의 형태로 방안이 마련되었다. 이는 Table 2에 표기되어 있다.

4. 선상 구조물 상세 설계 및 설치, 운용

고장모드 분석을 기반으로 각 시스템의 개선 설계를 수행하여 다음과 같이 상세 설계를 수행하였다. 제작이 완료된 선박의 모습은 Fig. 6과 같으며 운용 시 그림은 Fig. 7과 같다.

5. 결 론

본 논문에서는 파일럿 양광시스템의 예비파일럿 성능 실증 시험(PPMT)을 위해 개념 설계 단계에서 운용 시나리오에 따라 필요한 선상 시스템을 정의하고 이를 기반으로 선상 설비의 배

치와 설계를 위해 FMEA 분석을 통하여 잠재된 고장모드를 식별하고 위험도를 최소화 할 수 있는 대응 방안을 제시하였다. 자세한 내용은 다음과 같다.

(1) 운용 시나리오에 따른 필요한 선상 시스템은 양광시스템을 보관할 수 있는 라이저랙, 양광시스템 설치/해체를 위한 문폴 타워, 선상압력강하배관, 단괴분리회수 및 해수배출 시스템이다. 또한 양광시스템 전체를 운용할 수 있는 선상 통합운용시스템, 고압 전력 공급을 위한 선상발전기 및 엄벌리컬-원치(2대, 버퍼 및 펌프용), 양광펌프 구동 인버터가 필요하다. 이에 대한 적절한 제원과 요구 사항들을 정의하였다.

(2) 선상 시스템들의 위험도 및 기능을 기반으로 선박 내 배치를 수행하였다. 화재, 폭발 등의 위험도가 큰 시스템에 대해서는 선미에 배치하고 기능적으로 양광시스템 진/회수와 관련된 기능을 문폴 주변에 배치하였다. 또한 작업자의 동선과 작업 시나리오 상 동시에 발생하지 않는 시스템들을 배치하여 위험도를 최소화 하였다.

(3) FMEA 그룹을 구성하고 회의를 통해 양광시스템 실증시험을 위한 모든 고장모드를 식별하였다. FMEA 분석 결과, 양광시스템의 진/회수 작업 중 장비 충돌, 문폴 게이트 레일 이탈, 하중에 의한 파손 및 변형, 단괴 회수 시스템의 마찰 및 이물질로 인한 누수 또는 작동 불능의 고장모드가 발생 확률이 높은 것으로 파악되었다. 높은 확률의 고장모드에 대해서는 운용 환경 가이드라인 구축, 구조 변경, 구조 불량 검사 시스템 구축, 위험 감지 프로세스 추가 및 작업자의 감시 또는 각별한 주의 등의 형태로 방안이 마련되었고 이를 상세 설계에 반영하였다.

본 연구 결과를 바탕으로 2015년 11월에 성능 실증 시험을 위한 선상 구조물이 제작되었고 인명 사고 및 시스템의 결함 없이 시험을 성공적으로 수행하였다. 이는 최근 해양플랜트 산업에서 중요시 되고 있는 전단설계(FEED, front engineering end design) 개념이며 아직 정립되지 않은 새로운 시스템을 설계하는 방법론으로 적합하기 때문에 그 효용성이 크다. 또한 본 설계와 운용 경험은 향후 신산업이 될 해양광물플랜트의 산업화 개발에 활용될 수 있다고 판단된다.



Fig. 6 Topside completion on the support vessel



Fig. 7 Operation of lifting system field test

후 기

본 연구는 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소의 지원으로 수행된 “해양플랜트 장비/시스템 신뢰성 평가 핵심기술 개발(PES2320)” 및 해양수산부 지원으로 수행된 “해양플랜트 산업지원센터 구축 및 운영(PMS3270)” 과제의 연구결과 중 일부임을 밝힙니다.

References

- Chi, S.B., Hong, S., 2014. Development of Polymetallic Nodules in the NE Equatorial Pacific: Past, Present and Future. *Ocean and Polar Research*, 36(4), 367-371.
- Engelmann, H.E., 1978. Vertical Hydraulic Lifting of Large-Size Particles – A Contribution to Marine Mining. OTC 3173 the 10th Annual Offshore Technology Conference.
- Hong, S., Kim, H.W., Choi, J.S., Yeu, T.K., 2006. Total Dynamic Analysis of Deep-seabed Integrated Mining System. *Proceedings of Conference of KSOE*, Busan, 311-314.
- Hong, S., Choi, J.S., Kim H.W., Yeu, T.K., Park, S.J., Lee, T.H., Yoo, J.Hun., Jung, J.J., 2007. Development of a Self-Propelled Test Collector for Deep-Seabed Manganese Nodules. *Proceedings of The Seventh ISOPE Ocean Mining Symposium*, Lisbon, Portugal.
- Hong, S., 2010a. World Market and Opportunities in the Coming Decade. 2010 SMM Workshop, Offshore - Deep Sea Mining Dialogue.
- Hong, S., 2010b. Development Outlook of Marine Mineral Resources. *Proceedings of Conference of KSOE*, Mokpo, 247-250.
- Ku, N.K., Hwang, J.H., Lee, J.C., Lee, K.Y., 2014. Optimal Module Layout for a Generic Offshore LNG Liquefaction Process of LNG-FPSO. *Ships and Offshore Structures*, 9(3), 311-332.
- Park, S.J., Yeu, T.K., Yoon, S.M., Kim, D.W., Hong, S., Kim, H.W., Lee, C.H., Lee, K.M., Kim, S.B., 2010. Inshore Test of MineRo for Driving Property Analysis. *Proceedings of Conference of KSOE*, Mokpo, 251-254.
- Shafiee, M., Fateme, D., 2014. An FMEA-Based Risk Assessment Approach for Wind Turbine System: A Comparative Study of Onshore and Offshore. *Energies*, 7(2), 619-642; doi:10.3390/en7020619.
- Yeu, T.K., Yoon, S.M., Park, S.J., Hong, S., Kim, H.W., Lee, C.H., Choi, J.S., Sung, K.Y., 2012. Study on Path Tracking Approach for Underwater Mining Robot. 2012 OCEANS.
- Yeu, T.K., Yoon, S.M., Hong, S., Kim, J.H., Kim, H.W., Choi, J.S., Min, C.H., 2013. Operating System of KIOST Pilot Mining Robot in Inshore Test. the 10th ISOPE Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium, 265-268.