

심해저 망간단괴 집광시스템의 물체트부양장치에 대한 FMEA 적용 연구

최종수*^a · 홍섭* · 이태희** · 김형우* · 여태경*

*한국해양연구원 해양시스템연구부

**한양대학교 기계공학부

Application Study on FMEA(Failure Mode and Effect Analysis) for Waterjet-lifter of Deep-Sea Manganese Nodule Miner

Jong-Su Choi*^a, Sup Hong*, Tae Hee Lee**, Hyung-Woo Kim* and Tae-Kyeong Yeu*

*Ocean Engineering Research Department, KORDI, Daejeon, Korea

**Hanyang University, Seoul, Korea

KEY WORDS: DSNM(Deep-sea manganese nodule miner) 심해저 망간단괴 집광시스템, Waterjet-lifter 물체트부양장치, Axiomatic design 공리적 설계, FMEA(Failure mode and effect analysis) 고장형태 영향분석

ABSTRACT: An FMEA for the waterjet-lifter of a DSNM is performed to prevent the occurrence of device failure. A waterjet-lifter raises and transports manganese nodules from the deep-sea floor up to a somewhat elevated place, from which a pin-scraper transports the lifted nodules to the inner space of the DSNM. A concept design for a device using the axiomatic design methodology is shown as the mapping between the functional domain and physical domain. The FMEA for a DSNM is introduced briefly and the rating criteria of severity, occurrence, and detection for the DSNM are defined. The FMEA of the functional requirements of a DSNM device is accomplished. Three kinds of failure modes, as well as their effects and causes, are predicted. Current design control methods for detecting potential failures, such as physical or computational experiments, design confirmation, and mathematical calculation, are described and the recommended actions for several significant causes are suggested.

1. 서 론

대표적인 심해저 광물자원으로는 망간단괴(Manganese nodule), 고코발트 망간각(Cobalt-rich manganese crust), 해저열수광상(Hydrothermal deposit, Seafloor massive sulfide) 등이 존재한다. 이 중 망간단괴는 19세기 후반에 영국 챌린저호의 대양탐사를 통해 그 존재가 알려졌으며, 전세계의 여러 지역에 존재하지만, 태평양의 CCFZ(Clarion-clipperton fracture zone)에 부존도가 높다. 이러한 망간단괴는 망간을 비롯한 철, 니켈, 코발트, 구리 등의 금속을 함유하고 있어 다금속단괴(Polymetallic nodule)라고도 불린다. 본격적인 망간단괴 채광시스템의 개발 연구와 파일럿 실험은 1970년대에 선진국을 중심으로 시작되었다(호리베 요시오 등, 1987).

우리나라는 1994년에 인도와 중국에 이어 7번째로 선행투자국의 자격을 획득하였으며, 이것을 계기로 유엔으로부터 태평양의 CCFZ에 심해저 광구권을 등록하였다. 이와 동시에 심해저 채광시스템 개발 연구도 착수하였다(홍섭 등, 1997).

Yamazaki and Park(2005)은 최근 국제 금속가격의 급격한 상승이 중국을 비롯한 아시아 국가의 급격한 수요증가에 기인된

것으로 판단하였다. 또한, 현존하는 육상 광산내 금속 부존량과 소비추세를 비교하였을 때 육상금속자원 중 구리자원의 부족이 가장 심각하다고 진단하였다. 심해저 광물자원 개발의 경제성 평가를 통해 2004년 기준 금속가격에 대해서 심해저 광물자원의 상업적 개발의 경제성이 좋은 편이며, 특히 망간단괴 개발이 가장 경제성이 있다는 것을 확인한 바 있다(Yamazaki and Park, 2005).

심해저 퇴적표층에 놓여 있는 망간단괴의 상업적 개발을 위한 채광시스템은 해저면 집광시스템, 양광시스템 그리고 해상의 채광선 시스템으로 구성된다. 집광시스템은 해저면 연약지반위를 주행하면서 망간단괴를 채집하여 유연관을 통해 임시저장소(버퍼)까지 이송하며, 양광시스템은 버퍼로부터 수직 양광관을 통하여 해상까지 망간단괴를 해상의 채광선까지 수송을 담당한다. 해상의 채광선 시스템은 앞에서의 수중 시스템의 통합 거동 제어 및 동력 공급, 선상에서의 망간단괴 처리 및 하역 등을 담당한다.

집광시스템은 해저면 주행장치, 망간단괴를 퇴적물로부터 분리 회수하는 채집장치, 채집된 단괴를 버퍼까지 이송시키는 송출장치 등으로 구성되어 있다. 본 연구에서 고려된 채집장치는

교신저자 최종수: 대전광역시 유성구 신성로 104, 042-866-3873, jschoe@moeri.re.kr

본 연구는 2007년도 서울에서 개최된 한국해양과학기술협의회 공동학술대회에 발표된 논문을 근간으로 하고 있음을 밝힙니다.

a: Hanyang University, Seoul, Korea

물체트부양장치, 이송장치, 세척장치 등으로 구성되어 있다(홍섭 등, 1999). 본 논문에서는 대표적으로 채집시스템의 물체트부양장치에 대해 FMEA를 수행하여 잠재적인 고장형태, 영향, 원인 등을 분석하여 설계개선의 방향을 제안하도록 한다.

Chung(2003)은 심해저 집광시스템의 기술발전의 상황을 정리하였다. 그는 자주식 원격제어집광시스템(Self-propelled remotely controlled miner)과 예인식 집광시스템(Tow-sled system)의 2가지 형태의 집광시스템을 분류하였다.

1970년대에 OMCO(Ocean Minerals Co.) 컨소시엄에서는 태평양에서 심해저 망간단괴 채광을 위한 아르키메디안 스크류형 자주식 원격제어집광시스템의 성능시험을 수행하였다. 2000년대에 들어서 인도와 중국에서는 심해저 연약지반용 무한궤도형 자주식 원격제어집광시스템을 각각 자국의 영해와 자국내 호수에서 성능시험을 수행한 바 있다(Chung, 2003). 최근에는 인도와 중국이 집광시스템 성능검증시험을 수행하였다. 인도는 인도양 410m 깊이의 심해저면에서 주행제어시험을 수행하였다(Deepak et al., 2001). 중국은 COMRA(China ocean mineral research and development association) 주도로 2001년에 깊이 120~140m의 내륙 호수에서 자항식 집광시스템의 성능시험을 수행하였다(Gong et al., 2002).

국제컨소시엄인 OMI(Ocean Mining Inc.)에 의해 1970년대에 예인식 집광시스템의 성능시험을 처음 수행하였다. 일본의 경우 예인식 집광시스템을 개발하였으며, 1997년 자국 EEZ(Exclusive economic zone)내 수심 2,200m 조건에서 성능시험을 수행한 바 있다(Yamada and Yamazaki, 1998).

한국해양연구원에서는 자주식 원격제어집광시스템(RCM; Remotely controlled miner) 형태의 집광시스템을 개발 중에 있다. 이 중 채집시스템의 자세제어기구에 대한 기구학적 설계평가가 수행되었다(최종수 등, 1998). 주행시스템의 연약지반 주행시뮬레이션(김형우 등, 2006; 2007)과 모형실험(최종수 등, 2006a; 여태경 등, 2007)이 이루어졌다. 근해역에서의 성능 실증시험을 위한 시험 집광시스템을 제작하여 그 성능시험을 수행하였다(파이낸셜뉴스, 2009). 시험 집광시스템의 근해역 성능시험을 바탕으로, 파일럿 집광시스템의 설계가 진행되고 있다.

최종수 등(2008)은 공리적 설계기법을 이용하여 이러한 원격제어집광시스템의 개념설계를 평가하였다. 또한, 집광시스템 파쇄기의 설계기능전개(QFD; Quality function deployment)를 통해 수요자의 요구사항을 개념설계에 반영하였다(최종수 등, 2006b).

FMEA(Failure mode and effect analysis)는 발생 가능한 잠재적인 고장 형태와 효과를 고장원인과 함께 표를 이용하여 체계적으로 분석하는 기법이다. 이러한 분석을 통해 각 고장형태간의 우선순위가 결정되어 최종적으로는 제품의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 1960년대 중반 항공우주공학분야에서 먼저 적용하여, 미국의 아폴로 우주탐사계획에서 최초로 활용되었다. 1974년에는 미해군에서 FMEA 활용에 관한 규격으로 MIL-STD-1629를 만들어 사용하였다. 그 후 1970년대 자동차 업계의 경영적자 누적과 제조물 책임 비용에 대응하기 위하여 FMEA 개념을 적극적으로 도입하면서 전 산업계에 전파되기 시작했다(박

성현, 2006a).

본 연구는 심해저 망간단괴 집광시스템의 물체트부양장치에 FMEA를 적용하여 집광시스템의 개발 초기단계에 FMEA가 유효함을 확인하고자 한다. 먼저 최종수 등(2008)에 의해 수행된 공리적설계를 통한 집광시스템 물체트부양장치의 개념설계 내용을 소개한다. 이러한 개념설계를 바탕으로 집광시스템에 적합하도록 고안된 FMEA를 제안하고 세부내용에 대한 설명과 정량적 평가 기준을 제시한다. 집광시스템의 FMEA를 수행함으로써 현 설계에 고장영향도와 위험도를 평가하고 설계개선과 관리방법 향상 방안을 제시하며, 설계개선의 우선순위 결정의 근거를 제공한다.

2. 심해저 망간단괴 집광시스템의 개념설계

공리적 설계(Axiomatic design) 관점에서의 설계란 기능영역(Functional domain)과 물리영역(Physical domain)의 사이에서 지그재그(Zigzag) 방식으로 계층적으로 내려가면서 물리영역의 설계변수를 결정하는 순차적 과정으로 정의한다. 본 연구에서는 최종수 등(2008)이 수행한 집광시스템의 공리적 설계를 기반으로 FMEA를 수행하도록 한다.

Fig. 1은 집광시스템의 상위수준의 개념도로서, 앞의 서론부분에서 설명한 바와 같이 집광시스템은 주행장치, 채집장치, 송출장치 등으로 구성되어 있다. Fig. 2는 채집장치의 하부시스템인 물체트부양장치를 중심으로 한 개념도이다. 물체트부양장치는 노즐에서 물체를 분사하여 망간단괴를 부양시키는 역할을 하는 물체트노즐장치, 부양된 망간단괴를 기계식 이송장치까지 전달하는 유동안내관, 물체트부양장치와 지면간의 간격을 조정하는 자세제어장치 등의 3가지 설계변수로 구성된다. 한편, 물체트생성노즐장치는 물펌프시스템, 물체트배관, 물체트노즐 등의 3가지로 이루어지며, 자세제어기구는 초음파간격센서, 자세 제어 실린더, 평행사변형 기구 등으로 구성된다.

Fig. 3은 집광시스템의 기능영역과 물리영역을 물체트부양장치를 중심으로 작성한 것이다. Fig. 1과 Fig. 2의 개념도는 Fig. 3의 설계과정에서 도출된 결과를 그림의 형태로 표현한 것이다.

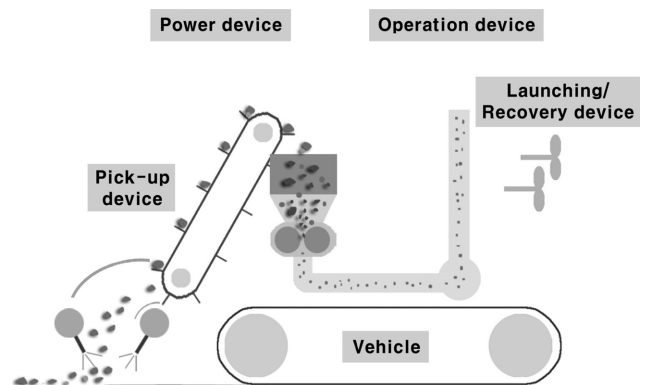


Fig. 1 Concept drawing of DSNM (Deep-sea manganese nodule miner)

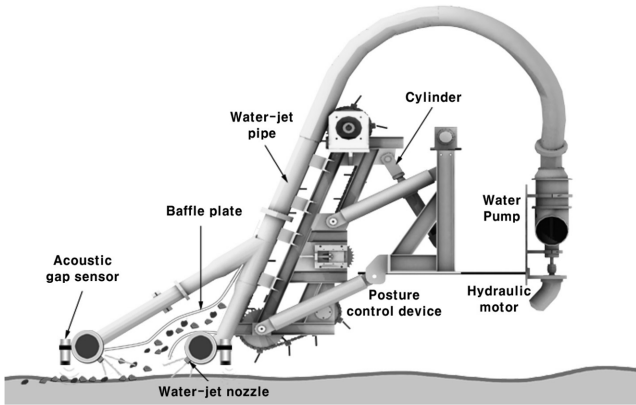


Fig. 2 Concept drawing for waterjet-lifter of pick-up device of DSNM

3. 집광시스템 FMEA

집광시스템에 대한 FMEA가 Fig. 4와 같이 표의 형태로 분석된다. Fig. 4는 공리적 설계과정을 통해 계층별로 순차적으로 만들어진 설계변수와 기능요구사항을 이용하여 FMEA를 수행할 수 있도록 하였으며, 본 집광시스템에 대하여 적합하도록 고안한 것이다. FMEA는 설계단계, 제작단계, 유지보수단계에서 적용될 수 있다. 본 연구는 집광시스템의 설계단계에 FMEA를 적용한 것에 대한 것이다. 한편, 설계는 개념설계, 기본설계, 상세설계 등의 3단계로 나눌 수 있다. 본 연구는 FMEA를 개념설계 단계에 적용하였다.

Fig. 4의 각 행의 구성은 다음과 같다. 첫 번째 행은 시스템명

이 포함된 제목이다. 두 번째 행과 세 번째 행에는 수행팀과 작성자의 이름, FMEA 번호와 개시일, 개정일과 참조사항을 기록하도록 하였다. 세 번째와 네 번째 행부터는 아래와 같이 각 열에 대해 설명하도록 한다. 본 FMEA 방법은 Stamatis(1995)가 정리한 내용을 주로 참고하여 심해저 광물자원 집광시스템에 맞도록 변경한 것이다.

3.1 설계변수와 기능요구사항(DPs and FRs)

본 집광시스템의 설계 과정 중에 FMEA의 대상이 되는 설계변수(DPs; Design parameters)를 5행의 첫 번째 열에 둔다. 또한, 그것에 요구되는 기능요구사항(FRs; Functional requirements)을 그 항목의 기능으로 결정한다. 이때 공리적 설계에서 수행된 설계변수에 대한 기능요구사항(FRs)을 이용한다.

3.2 잠재적 고장형태(Potential failure mode)

잠재적으로 요구기능을 만족할 수 없는 고장형태를 나열한다. 과거의 사례나 특정 작동조건에서만 발생할 수 있는 잠재적 고장형태가 고려되어야 한다.

3.3 잠재적 고장영향(Potential effects of failure)

잠재적 고장형태가 기능에 영향을 줌으로 인하여 사용자가 인지하는 관점으로 기술한다.

3.4 영향도(SEV; Severity)

고장이 사용자에게 얼마나 나쁜 영향인지에 대한 척도이다. 이러한 영향도 등급의 감소는 오직 설계변경으로만 가능하다. 영향도에 대한 평가기준은 제품과 구성팀에 따라 달라질 수 있

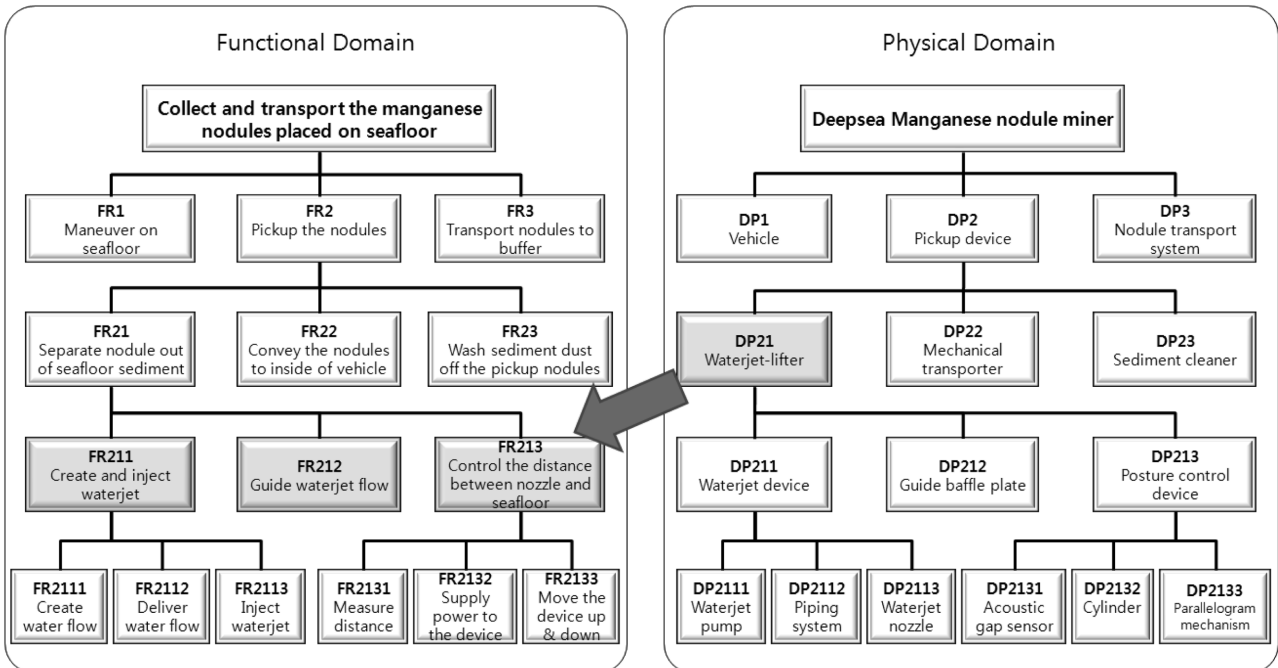


Fig. 3 Functional domain and physical domain of waterjet-lifter of pick-up device of DSNM

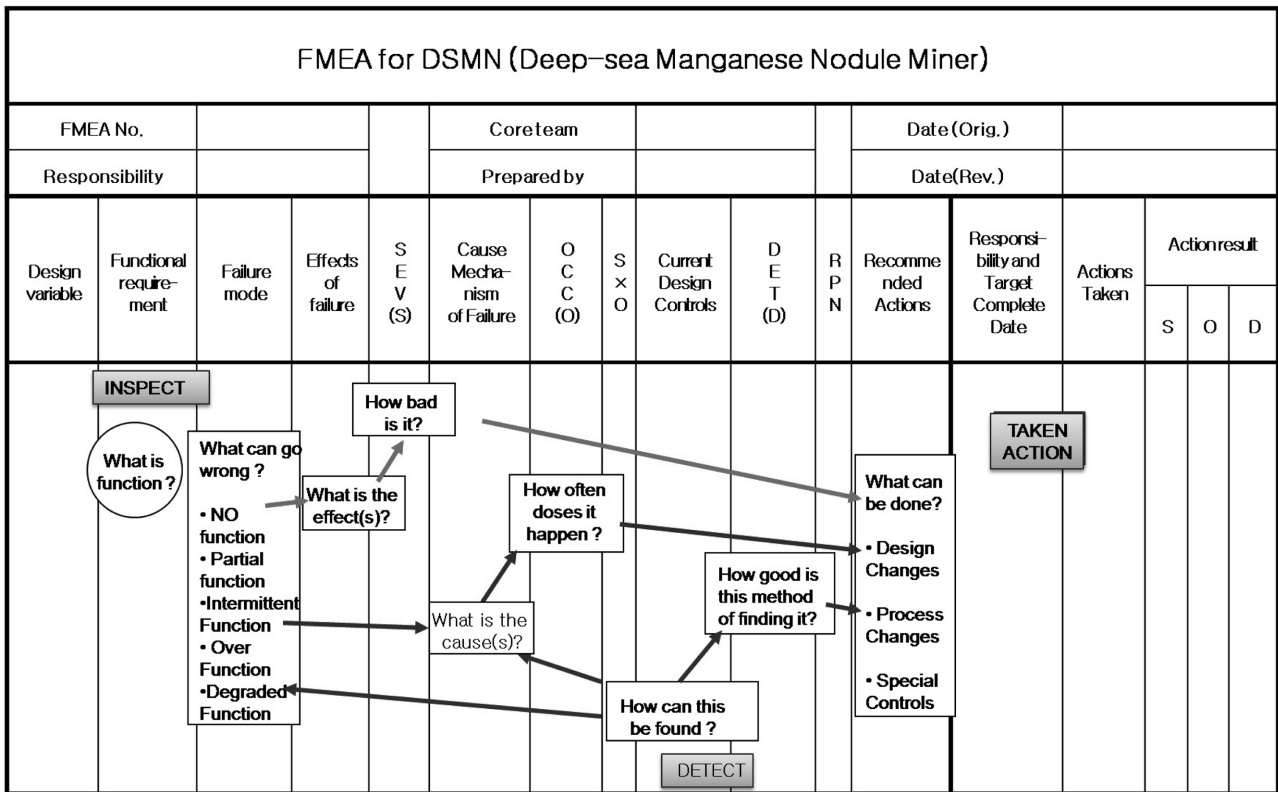


Fig. 4 Tabular form of FMEA for DSMN

Table 1 Rating criteria of evaluating the severity of potential failure effects for DSMN

Severity criteria	Rank
1 No effect or very slight effect on performance	1~2
2 Slight effect. Minor effect on product performance	3~4
3 Moderate effect. Product performance degraded	5~6
4 High effect. Product performance severely affected but functional and safe	7~8
5 Hazardous effect	9~10

으나 일단 작성되면 일관성을 가지고 적용해야 한다. Table 1은 심해저 망간단괴 집광시스템에 대한 영향도이다.

3.5 잠재적 고장원인(Potential cause/mechanism of failure)

잠재적 고장형태의 잠재적 고장원인 및 메커니즘을 간결하고 완전하게 나열한다.

3.6 발생도(OCC; Occurrence)

발생도는 잠재적 고장원인과 메커니즘이 발생할 가능성의 정도를 나타낸다. 발생도 등급의 감소는 고장원인과 메커니즘의 제거 및 관리를 위한 설계변경으로만 가능하다. Table 2는 잠재적 원인의 발생을 평가하기 위한 기준이다.

Table 2 Rating criteria of evaluating the occurrence of potential causes for DSMN

Occurrence criteria	Rank
1 Almost impossible, Failure unlikely at least once during 10 years	1
2 Remote, Rare number of failures likely at least once during 7 years	2
3 Very slight, Very few failures likely at least once during 5 years	3
4 Slight, Few failures likely at least once during 3 years	4
5 Low, Occasional number of failures likely at least once during 1 year	5
6 Medium, Medium number of failures likely	6
7 Moderately high, Moderately high number of failures likely	7
8 High, High number of failures likely	8
9 Very high, Very high number of failures likely	9
10 Almost certain, Failure almost certain	10

3.7 현재 설계 관리방법(Current design controls)

잠재적 고장원인에 대한 설계의 적절성을 보강할 수 있는 현재의 관리방법에 대해 서술한다. 예를 들어 해석을 통한 검증, 설계 검토, 실험 등을 통해 설계의 잠재적 고장원인을 발견할

Table 3 Rating criteria of evaluating the probability of detecting potential causes for DSNM

	Detection criteria	Rank
1	Almost certain, Easy to detect	1~2
2	High, Easy to detect relatively	3~4
3	Moderate, Moderate to detect	5~6
4	Slight, Slightly hard to detect	7~8
5	Remote, Very hard to detect	9
6	Almost impossible, Impossible to detect	10

수 있는 현재의 설계 관리방법을 서술한다.

3.8 검출도(DEC; Detection)

잠재적 고장원인과 메커니즘을 현재 설계 관리방법으로 발견

될 가능성의 정도를 나타낸다. Table 3은 집광시스템에 대한 고장원인을 발견할 수 있는 가능성에 대한 평가기준을 나타낸다.

3.9 RPN(Risk priority number; 위험우선순위)

RPN는 설계위험에 대한 추정치로서, 설계시 고려할 우선순위 결정시 사용한다. RPN은 앞에서 구한 영향도(S), 발생도(O), 검출도(D)의 곱($S \times O \times D$)으로 표현된다. 높은 RPN에 대하여서는 위험을 줄이기 위한 노력이 필요하다. 하지만, RPN의 결과와 관계없이 영향도가 높을 때에는 우선적으로 고려되어야 한다.

3.10 권고개선사항(Recommended actions)

위험도를 줄이기 위한 설계 및 검출 방안 개선의 우선순위에 맞추어 개선방안을 제안한다. 한편, 그 우선순위는 다음과 같다.

Table 4 An example of FMEA for waterjet-lifter of DSNM

Design variables	Functional requirement	Failure mode	Effects of failure	S E V (S)	Cause/mechanism of failure	O C C (O)	S x O	Current design controls (Detection method)	D E T (D)	R P N	Recommended Actions	
Water-jet lifter	Create and inject waterjet	Low flow rate of water-jet flow	Poor nodule lifting performance	5	Breakage of vane of water pump due to obstacles immersed in suction flow	7	35	Design review : the allowable passing size of pump inlet	3	105		
					Wearing of vane of water pump due to fine sediment particles from suction	4	20	Design review : material and its surface treatment	6	120		
					Lack of rotating power of pump motor due to failure of bearing parts	5	25	Design review : life time of bearing	3	75		
					Shortage of hydraulic flow rate of pump motor from hydraulic power system	3	15	Performance test of Hydraulic system	7	105		
	Guide waterjet flow	Wrong guide of waterjet flow	Poor nodule lifting performance	5	Plastic deformation in shape due to collision with nodules	1	5	Design review : material and fixing parts of guide baffle plate	8	40		
					Variation of size and shape of nodules	7	35	Design review : shape of guide baffle plate	5	155		
	Control the distance between nozzle and seafloor	Cannot control the distance	Poor nodule lifting performance	6	Breakage of acoustic gap sensor during launching and recovery process due to collision with objects	4	24	Dynamic simulation for launching and recovery process	6	144	The sensor should be assembled as encased type to protect it from collision with arbitrary objects and walls	
					Breakage of acoustic gap sensor due to collision with nodules during pickup	5	30	Design review : hand calculation of kinetic energy of moving nodule	5	150	The sensor should be assembled as encased type to protect it from collision with arbitrary objects and walls	
					Failure in measurement of the distance of acoustic gap sensor due to fine sediment particles	8	48	Design review and experimental confirmation test : noise filter for eliminating the signal of fine sediment particle	5	240	Sensor fusion with current acoustic type and additional mechanical type	
					Improper motion of cylinder of posture control device due to surface scratch of cylinder	4	24	Design review : surface treatment of rod of cylinder and seal specification	5	120	The rod of cylinder should be enclosed as foldable cover to protect surface of the rod	
						Improper motion of cylinder of posture control device due to hardness of oil sea	3	18	Design review : seal life time	5	90	

1. 영향도(S)가 높은 것
2. 영향도(S) × 발생도(O)가 높은 것
3. 위험 우선순위(RPN)가 높은 것

4. 결과 및 고찰

Table 4는 Fig. 3에서 제시된 집광시스템 FMEA에 대해 일부의 내용을 정리한 것이다. Table 4는 관련 연구팀에 의해 작성되었다. Fig. 3의 개념설계 내용에서 물체트부양장치(DP21)에 요구되는 기능 FR211, FR212, FR213을 이용하여 FMEA를 시작하였다. 그 하위 수준의 FRs와 DP는 고장원인, 설계관리방법, 개선방안 등의 설명을 위해 기술하였다.

잠재적 고장의 영향도(S)를 가장 먼저 고려하였다. 'Control the distance between nozzle and seafloor'의 고장형태가 가장 나쁜 영향을 주는 것으로 나타났다. 이 부분에 대해 설계개선 또는 관리가 필요하다는 것을 알 수 있었다.

영향도(S)와 발생도(O)를 함께 고려한 측면에서는 'Breakage of vane of water pump due to obstacles immersed in suction flow', 'Variation of size and shape of nodules', 'Breakage of acoustic gap sensor due to collision with nodules during pickup', 'Failure in measurement of the distance of acoustic gap sensor due to fine sediment particles' 등의 4가지의 고장원인이 상대적으로 중요하였다.

RPN으로부터 'Variation of size and shape of nodules', 'Breakage of acoustic gap sensor during launching and recovery process due to collision with objects', 'Breakage of acoustic gap sensor due to collision with nodules during pickup', 'Failure in measurement of the distance of acoustic gap sensor due to fine sediment particles'라는 잠재적 고장원인에 대해 심각히 고려해야 함을 알 수 있다.

Table 4의 FMEA결과는 연구팀이 정성적으로 염려하였던 내용을 체계적이고 정량적으로 잘 표현하고 있는 것으로 본 저자들이 판단하고 있다.

본 집광시스템 물체트부양장치에 대한 FMEA를 통해 다음과 같이 고찰한다.

(1) 기존 설계과정에서 막연히 수행하였던 고장형태와 영향력의 진단과 설계반영의 일련의 작업을 체계적으로 수행할 수 있게 되었다.

(2) 체계적 접근이 가능해져서 설계팀의 발휘할 수 있는 최대의 성과를 거둔 것으로 판단된다.

(3) 정성적 특성을 가진 개념설계 단계의 고장형태에 대한 심각성, 원인의 발생가능성, 검출가능성 등을 정량적으로 파악하게 함으로써, 설계 개선의 우선순위를 결정하게 되었다. 이를 통해 효과적인 설계를 가능하게 되었다.

한편, FMEA의 효과적인 적용을 위해 몇 가지의 개선사항을 다음과 같이 제시한다.

(1) 영향도(S), 발생도(O), 검출도(D)는 집광시스템에 적합한 평가기준을 도입하여 결정되었다. 하지만, 시스템의 규모가 커지면 평가기준을 제한하기가 어려울 것으로 판단된다. 따라서

AHP(Analytic hierarchy process)와 같이 상대적인 비교를 통한 정성적인 특성에 대한 평가를 좀 더 체계적으로 내릴 수 있는 기법의 도입이 필요하다.

(2) 박성현(2006b)이 제시한 것과 같이 잠재적인 고장 원인을 체계적으로 파악하고, 이에 연계된 발생도(O)를 정확하게 추정하기 위해서는 FTA(Fault-tree analysis) 도입이 필요한 것으로 판단된다.

(3) 설계관리방법은 경우에 따라, 간단한 계산이나 설계검토로 가능한 것에서부터 비용이 많이 드는 시뮬레이션이나 실험이 필요한 경우까지 다양하다. 본 FMEA의 방법론에는 설계관리방법에 따른 비용차이에 대한 고려가 없다. 실제 설계과정에서는 검출도를 높이는 방안과 더불어 일정과 비용적인 측면을 고려하여 설계관리방법을 결정하는 경우도 많다. 따라서, 설계관리방법에 따른 비용적인 요소도 함께 고려하도록 FMEA를 개선할 필요가 있다.

5. 결 론

FMEA를 심해저 망간단괴 집광시스템의 물체트부양장치에 대해 적용하여, 본 장치의 잠재적 고장을 다음과 같이 체계적으로 평가하고 개선하는 방향을 제안하였다.

(1) 영향도 분석을 통해, 본 설계팀은 현 개념설계의 물체트부양장치의 경우, 'Control the distance between nozzle and seafloor'기능과 관련된 요소들을 가장 주의해서 설계하는 것으로 의견을 모았다.

(2) 영향도와 발생도의 곱과 RPN값의 비교를 통해, 위험도 관리의 우선순위를 판단할 수 있었다.

(3) 'Failure in measurement of the distance of acoustic gap sensor due to fine sediment particles'는 가장 우선적으로 해결해야 할 잠재적 고장원인으로, 이러한 문제를 해결하기 위해서는 기계식 형태의 간격센서를 추가하여 기존의 초음파 간격센서와 융합하여 고장원인을 개선할 것을 권고한다.

후 기

본 연구는 국토해양부의 지원으로 수행된 "심해저 광물자원 집광 및 채광운용기술 개발" 사업의 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김형우, 홍섭, 최종수, 여태경 (2006). "오일러 매개변수를 이용한 해저연약지반 무한궤도 차량의 동적거동 해석", 한국해양공학회지, 제20권, 제6호, pp 93-100.

김형우, 홍섭, 최종수, 여태경 (2007). "연약지반 무한궤도차량의 다물체 동적거동 해석", 한국해양공학회지, 제21권, 제1호, pp 69-74.

박성현 (2006a). "통계적 프로세스 관리 SPC", 제8부 신뢰성 분석(FMEA, FTA), 품질혁신 e-mail 교육, 79호, 중소기업청/

- 대한상공회의소 싱글 PPM 품질혁신추진본부, pp 2-12.
- 박성현 (2006b). "통계적 프로세스 관리 SPC", 제8부 신뢰성 분석(FMEA, FTA), 품질혁신 e-mail 교육, 79호, 중소기업청/대한상공회의소 싱글 PPM 품질혁신추진본부, p 13.
- 여태경, 박성재, 최종수, 홍섭, 김형우, 원문철 (2007). "심해저 연약지반용 무한케도차량의 견인력-슬립 관계에 관한 실험적 연구", 한국해양공학회지, 제21권, 제1호, pp 75-80.
- 최종수, 이태희, 홍섭, 심재용, (1998). "심해저 망간단괴 집광기 채집장치의 설계평가", 한국정밀공학학회지, 제15권, 제3호, pp 68-74.
- 최종수, 홍섭, 김형우 (2006a). "직교배열표 실험계획법에 의한 심해저 점착성 연약지반용 무한케도차량의 선회성능에 대한 실험연구", 한국해양공학회지, 제20권, 제4호, pp 37-42.
- 최종수, 홍섭, 김형우, 여태경 (2006b). "심해저 망간단괴 집광시스템의 파쇄기 개념설계", 2006년 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, pp 1798-1802.
- 최종수, 홍섭, 김형우, 여태경, 이태희 (2008). "공리적 설계를 적용한 심해저 망간단괴 집광시스템의 설계평가", The Sea, J. of the Korean Society of Oceanography, Vol 13, No 3, pp 246-251.
- 파이낸셜뉴스 기사 (2009). "바닷속에서 광물 캐내는 채광시스템 첫선", 이재원기자, 2009.6.30., http://www.fnnews.com/view?ra=Sent0901m_View&corp=fnnews&arcid=00000921697784&cDateYear=2009&cDateMonth=06&cDateDay=30.
- 호리베 요시오, 오마찌 호쿠이찌로, 간노 마사요시 (1987). 해양 광물자원, 겐지사, pp 28-56.
- 홍섭 등 (1997). 심해저 광물자원 개발기술 및 환경보존 연구: 심해저 망간단괴 집광 및 채광운용시스템 개발연구, 과학기술부, pp 24-26.
- 홍섭 등 (1999). 심해저 광물자원 개발기술 및 환경보존 연구 : 심해저 망간단괴 집광 및 채광운용시스템 개발연구, 과학기술부, pp 7-33.
- Chung, J.S. (2003). "Deep-ocean Mining Technology: Learning Curve I", Proc 5th ISOPE Ocean Mining Symp, Japan, ISOPE, pp 1-6.
- Deepak, C.R., Shajaha, M.A., Atmanand, M.A., Annamalai, K., Jeyamani, R., Ravindran, M., Shculte, E., Handschuh, R., Panthel, J., Grebe, H. and Schwarz, W. (2001). "Development tests on the Underwater Mining System Using Flexible Riser Concept", Proc 4th ISOPE Ocean Mining Symp, Szczecin, Poland, ISOPE, pp 94-98.
- Gong, D., Yang, N. and Yu, M. (2002). "Development of Control System of COMRA's Deep Sea Miner", Proc 4th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mech Symp, Deajeon, Seoul, ISOPE, pp 75-80.
- Stamatis, D.H. (1995). Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution, ASQC Quality Press, Milwaukee, Wisconsin, pp 125-153.
- Yamada, H. and Yamazaki, T. (1998). "Japan's Ocean Test of Nodule Mining System", Proc 8th ISOPE Conf, Montreal, ISOPE, Vol 1, pp 13-19.
- Yamazaki, T. and Park, S.H. (2005). "Economic Validation Analyses of Japan's Nodule, Crust, and Kuroko-type SMS Mining in 2004", Proc. of ISOPE OMS-2005, Changsha, Hunan, China, October 9-13, pp 65-70.

2009년 9월 10일 원고 접수

2009년 11월 19일 심사 완료

2009년 12월 21일 게재 확정