

공리적 설계를 적용한 심해저 망간단괴 집광시스템의 설계평가

최종수^{1,2*} · 홍 섭¹ · 김형우¹ · 여태경¹ · 이태희²

¹한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양시스템연구부
²한양대학교 기계공학부

Applying Axiomatic Design to Design Evaluation of a Deep-Sea Manganese Nodule Miner

JONG-SU CHOI^{1,2*}, SUP HONG¹, HYUNG-WOO KIM¹, TAE-KYUNG YEU¹, AND TAE HEE LEE²

¹Ocean Engineering Research Department, Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI, Daejeon, Korea
²School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

심해저 망간단괴 집광시스템(이하, 집광시스템)의 개념설계가 공리적 설계(Axiomatic Design)의 관점에서 평가되었다. 또한 이미 수행된 집광시스템의 개념설계에 대해 기능적 영역의 기능요구와 물리적 영역의 설계파라미터가 구체화되었다. 기능요구와 설계파라미터의 상호관계는 첫 번째 수준 계층에서 하위 수준 계층으로 순차적으로 분석되었다. 이러한 상호관계는 설계행렬의 형태로 표현되었고 기능요구와 설계파라미터 사이의 독립성을 판단하기 위한 지표로 사용되었다. 설계행렬의 분석결과 본 집광시스템은 설계파라미터간에 연성이 되지 않는 비연성화된 설계임이 확인되었다. 결과적으로, 본 집광시스템은 독립공리(Independence Axiom)를 만족하는 잘된 설계임이 개념적으로 입증되었다.

The conceptual design evaluation of Deep-Sea Manganese Nodule Miner (DSNM) based on Axiomatic Design was preformed. Functional Requirements (FRs) in functional domain and Design Parameters (DPs) in physical domain were embodied for the given concept design of DSNM. Interactions between FRs and DPs were sequentially analyzed from the first level hierarchy to the lower level hierarchy. The interactions were expressed as design matrices which showed the dependence or independence between FRs and DPs. The results showed that the design of DSNM was not a coupled one, but a decoupled. Finally, it was conceptually verified that DSNM was a good design satisfying the independence axiom of the Axiomatic Design.

Keywords: Axiomatic Design, Independence Axiom, Functional Requirements, Design Parameters, Deep-Sea Manganese Nodule Miner

서 론

심해저에는 망간단괴, 망간각, 해저열수광산 등의 광물자원이 존재한다. 심해저 광물자원 중 망간단괴는 망간을 비롯한 철, 니켈, 코발트, 구리 등의 금속을 함유하고 있다. 망간단괴는 19세기 후반에 영국 챈들러호의 대양탐사를 통해 그 존재가 알려졌다. 본격적인 망간단괴 채광시스템 개발 연구와 파일럿 실험은 1970년대에 선진국을 중심으로 시작되었다(호리베 등, 1987).

대한민국의 경우 1994년에 인도와 중국에 이어 7번째로 선형투자국의 자격을 획득하였으며, 이것을 계기로 유엔으로부터 태평양의 CCZ(Clarion-Clipperton Zone)에 대한 심해저 망간단괴 광구권을 등록하였다. 이와 동시에 심해저 채광시스템 개발 연구도 착수하였다(홍 등, 1995a).

Yamazaki와 Park은(2005) 최근 국제 금속가격의 급격한 상승이

중국, 인도 등을 비롯한 아시아 신흥경제국가들의 소비증가에 기인된 것으로 분석하였다. 또한, 현존하는 육상 광산내 금속 부존량과 소비추세를 비교하였을 때 육상금속자원 중 구리자원의 부족이 가장 심각하다고 진단하였다. 2004년 금속가격을 기준으로 심해저 광물자원 상업적 개발의 경제성이 우수하며, 특히 망간단괴 채광이 가장 경제성이 있다는 것을 확인한 바 있다.

Chung(2003)은 심해저 광물자원 채광시스템 개발과 관련된 연구 동향을 정리하였다. 그는 집광시스템을 원격조종 자항식 집광시스템(self-propelled Remote-Controlled Miner, RCM)과 견인식 집광시스템(Tow-Sled system, TS)으로 분류하였다.

원격조종 자항식 집광시스템은 1970년대에 OMCO-Lockheed 콘소시움에 의해 태평양에서 성능시험이 처음 수행되었다(Chung, 1996). 1976년과 1978년 사이에 OMCO-Lockheed 콘소시움은 수심 4877m에서 아르키메데안 스크류(archimedean screw) 형태의 주행차량으로 심해저 채광시험을 수행했다(Chung, 1999). 최근에는 인도와 중국이 집광시스템 성능검증시험을 수행하였다. 인도는 인

*Corresponding author: jschoe@moeri.re.kr

도해 410 m 깊이의 심해저면에서 주행제어시험을 수행하였다 (Deepak *et al.*, 2001). 중국은 COMRA의 주도로 2001년에 내륙 호수에서 원격조종 자항식 집광시스템의 성능시험을 수행하였다 (Gong *et al.*, 2003).

국제 콘소시엄인 OMI에 의해 1970년대에 건인식 집광시스템의 성능시험을 처음 수행하였다. 일본의 경우 건인식 집광시스템을 개발하였으며, 1990년대에 태평양에서 성능시험을 수행한 바 있다 (Yamada and Yamazaki, 1998).

우리나라의 경우, 1990년대 중반에 들어 한국해양연구원이 다양한 개념의 집광시스템의 설계개념을 조사하고 분석하였다(홍 등, 1995b). 심도 있는 검토과정을 거쳐 원격조종 자항식 집광시스템을 채택되었다. 본 집광시스템은 혼합형 채집장치, 무한궤도차량, 유연관을 이용한 송출장치 등을 포함하고 있다(홍 등, 1997, 1999).

시스템 개발 과정이 설계(개념설계, 기본설계, 상세설계), 시제품 제작 및 검증, 제작 등으로 구성된다고 할 때, 설계단계는 최종 개발된 시스템의 성능에 가장 큰 영향을 준다. 설계단계에서도 초기인 개념설계 단계에서의 설계 변경은 그 이후 단계에 비해 수월하고 그 파급효과도 가장 크다. 본 연구에서는 개념설계방법 중에 하나인 공리적 설계(Axiomatic Design) 기법을 한국해양연구원에서 개발 중인 집광시스템에 적용하고자 한다.

공리적 설계는 설계에 대한 과학적인 근거를 주기 위한 설계 방법론으로 개발되어 왔다(Suh, 1990; 박과 강, 2007). 공리적 설계는 설계자가 어떤 시스템이 잘된 설계인지의 여부를 개념적으로 평가하는 도구로 사용된다. 몇 가지의 설계 중 잘된 설계를 설계공리의 기준으로 선택하여, 시스템 설계 결과의 취약성을 줄여주고 제품 개발기간을 단축시킬 수 있다(Yang and El-Haik, 2003).

본 연구에서는 집광시스템의 설계개념을 평가하는데 공리적 설계기법을 사용한다. 본 기법을 이용하여 집광시스템이 개념적으로 잘된 설계인지를 판단하고자 한다.

공리적 설계

공리적 설계의 목적은 설계수행에 있어 논리적이고 합리적인 사고에 근거한 이론적인 기초를 설계자에게 제공하고자 함이다. 공리적 설계를 통해 설계업무에 대해 과학적 기반을 다지고 설계 진행 과정을 개선할 수 있다. 공리적 설계분야에서는 설계자가 원하는 기능과 그 기능에 대한 수행 방안 간의 연속적인 작용으로 설계과정이 정의된다.

기능요구(Functional Requirements, FRs)는 소비자요구(Customer Needs, CNs)를 특징짓는 독립적인 요구사항의 최소 집합이다. 설계파라미터(Design Parameters, DPs)는 기능요구를 수행하기 위한 물리적인 실체로 이루어진 집합을 형성한다. Fig. 1과 같이 기능적 영역(functional domain)의 기능요구와 물리적 영역(physical domain)의 설계파라미터 사이의 계층적 지그재그(zigzag) 과정을 통해 설계가 수행된다. 기능요구는 물리적 영역에서의 설계파라미터를 결정함으로써 그 기능요구가 충족될 수 있다. 기능요구에 부합하는 설계파라미터의 결정은 각 수준에서 지그재그 과정에 의해 수행된다. 설계제한조건(design constraints)이 물리적 영역에서 설계파라미터의 제한조건을 형성한다.

본 공리적 설계에서는 두 가지 설계공리가 제안되었다(Suh, 1990).

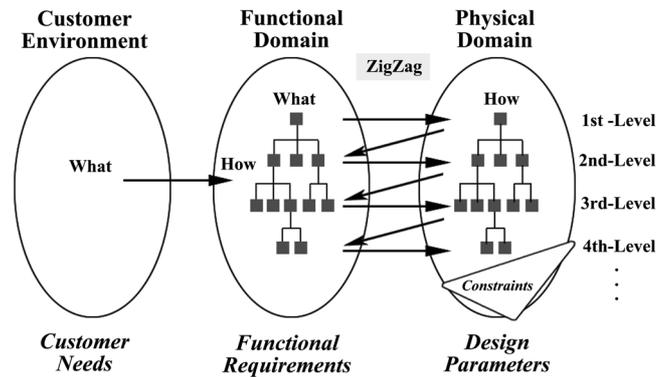


Fig. 1. Concept design process in Axiomatic Design.

[Axiom 1 : 독립공리], 기능요구의 독립성을 유지하라.

[Axiom 2 : 정보공리], 설계의 정보량을 최소화하라.

기능요구와 설계파라미터사이의 상호관계는 다음의 식과 같이 표현된다.

$$\{FR\} = [A]\{DP\} \tag{1}$$

여기서 행렬 $[A]$ 는 설계행렬(Design Matrix, DM)이라 불리며, 설계의 독립성을 나타낸다. $[A]$ 의 각 요소는 A_{ij} 라고 표기되고 j 번째 설계파라미터가 i 번째 기능요구에 미치는 영향을 나타낸다. 만약 영향을 상대적으로 많이 받으면 'X' 그렇지 않으면 '0'로 표현한다. 설계행렬이 요소 'X'에 의해 대각행렬(diagonal matrix)을 구성할 경우 그 설계는 비연성설계(uncoupled design), 설계행렬이 삼각행렬(triangular matrix)일 경우 그 설계는 비연성화설계(decoupled design)로 구분된다.

만약 설계행렬이 대각이나 삼각행렬이 아니라면 그 시스템은 연성설계(coupled design)인 것으로 간주된다. 제1설계공리의 관점에서 연성설계는 바람직하지 않다. 이러한 경우 일반적으로 최종 설계값을 얻기가 힘들다.

두 번째 공리는 정보량의 공리이다. 첫 번째 공리를 만족하는 여러 설계안들 중 최상의 설계는 최소한의 정보를 담은 설계이다. 설계에 정보량이 적을수록 지정된 기능요구를 제대로 수행할 가능성이 높다는 것을 의미한다.

심해저 망간단괴 집광시스템

본 연구에서 선정된 집광시스템은 무한궤도형 주행장치, 물체부양과 기계식 이송이 복합된 혼합식 채집장치, 유연관을 통한 2상 송출장치, 1점 케이블 방식의 진수회수장치, 원격 계측-제어-모니터링 통합 운용장치, 전력 및 유압 동력장치 등의 6개 부시스템으로 구성된다(Fig. 2 참조). 다음 장에서 집광시스템이 공리적 설계 관점에서 분석된다.

공리적 설계의 적용

본 연구에서는 집광시스템 설계의 기능요구와 설계파라미터를 모두 3 수준까지 분석한다. 최상위인 첫 번째 수준에서 전체 요구

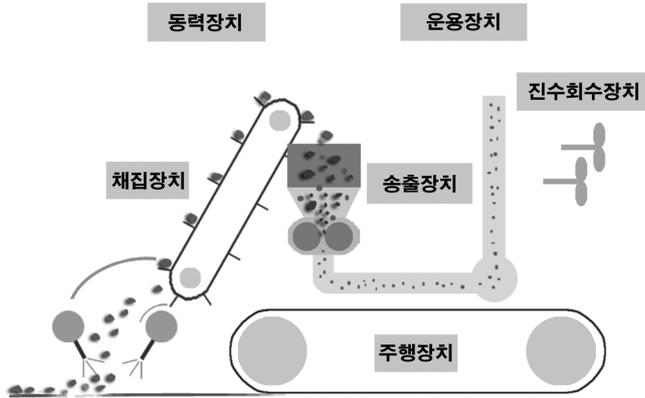


Fig. 2. Concept design of Deep-Sea Manganese Nodule Miner of KORDI.

사항 FR_0 과 시스템 이름인 DP_0 을 결정한다. 두 번째 수준에서 DP_0 에 요구되는 $FR_1 \sim FR_6$ 을 결정하고 그것의 물리적 실체 $DP_1 \sim DP_6$ 을 표현한다. 세 번째 수준에서는 두 번째에서 결정된 각 설계파라미터에 대한 기능요구를 결정하고, 그것을 수행하기 위해 고안된 설계파라미터를 나타낸다. 또한, 각 설계과정에 있어 설계행렬을 구성하여 각 수준에서 설계평가를 수행하고 설계순서를 제시하도록 한다.

첫 번째 수준

시스템 기능요구인 FR_0 로부터 시스템 이름에 해당하는 DP_0 을 결정한다.

- FR_0 : 심해저면에 망간단괴를 채집하여 이송하라.
- DP_0 : 심해저 망간단괴 집광시스템

두 번째 수준

- 두 번째 수준에서는 DP_0 에 필요한 기능요구 $FR_1 \sim FR_6$ 을 결정한다.
- FR_1 : 심해저면에서 전체가 이동할 수 있게 하라.
- FR_2 : 단괴를 채집하라.
- FR_3 : 버퍼로 단괴를 이송하라.
- FR_4 : 시스템을 진수하고 회수하라.
- FR_5 : 운용체계를 통합하고 관리하라.
- FR_6 : 전력 및 유압 동력을 공급하고 전달하라.

- $DP_1 \sim DP_6$ 은 상기한 $FR_1 \sim FR_6$ 에 대해 고안된 설계파라미터이다.
- DP_1 : 주행장치
- DP_2 : 채집장치
- DP_3 : 송출장치
- DP_4 : 진수회수장치
- DP_5 : 운용장치
- DP_6 : 동력장치

현 수준에서 기능요구와 설계파라미터의 관계를 Eq. 2에서 묘사하였다. 수준 2에서의 집광시스템은 비연성화설계(decoupled design)이다. ‘단괴를 채집하라(FR_2)’ 기능은 주행장치(DP_1)와 채집장치(DP_2)의 개념선정과 그 설계값에 의해 동시에 영향을 받는다. Fig. 2에서와 같이 채집의 대상이 되는 심해저 망간단괴가 해저면에 넓

게 분포해 있기 때문에 채집장치와 더불어 주행장치의 특성이 FR_2 기능에 영향을 준다.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \\ FR_5 \\ FR_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \\ DP_5 \\ DP_6 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

‘운용체계를 통합하고 관리하라(FR_5)’와 ‘전력 및 유압 동력을 공급하고 전달하라(FR_6)’의 기능은 각각 독립적으로 운용장치(DP_5)와 동력장치(DP_6)에 영향을 받는다. 운용장치(DP_5)는 $DP_1 \sim DP_4$, DP_6 의 각 하위 수준에 포함된 센서와 제어밸브 등과는 별도의 장치로서 통합운용GUI, 광통신을 통한 원격 조정, DB구축 등을 수행하는 장치이다. 동력장치(DP_6)는 $DP_1 \sim DP_5$ 의 각 하위 수준에서 필요한 유압 액추에이터, 센서 전원장치 등과는 별도의 장치로서 전기에너지와 유압에너지의 변환과 관리에 필요한 장치이다. 본 연구에서는 지면관계상 DP_5 , DP_6 에 대한 하위 수준(세 번째 수준 이하)에서의 상세분석은 생략하도록 한다.

DP_1 에 대한 세 번째 수준의 기능요구와 설계파라미터

- 주행장치(vehicle)로 명명된 DP_1 에 대한 기능요구는 다음과 같다.
- FR_{11} : 추진력을 발생시켜라.
- FR_{12} : 부양(flotation)할 수 있게 하라.
- FR_{13} : 선회(steering motion)할 수 있게 하라.

이러한 주행장치(DP_1)에 대한 기능요구에 대해 다음의 설계파라미터를 선정하였다.

- DP_{11} : 무한궤도트랙
- DP_{12} : 부력모듈
- DP_{13} : 좌우트랙속도제어

Fig. 3은 주행장치(DP_1)에 대한 개념도이다. 무한궤도트랙(DP_{11})은 ‘추진력을 발생시켜라(FR_{11})’기능을 수행한다. 무한궤도트랙(DP_{11})의 접지면과 부력모듈(DP_{12})의 부력이 주행장치의 ‘부양할 수 있게 하라(FR_{12})’기능을 수행한다. 무한궤도의 경우 좌우트랙속도(DP_{13})

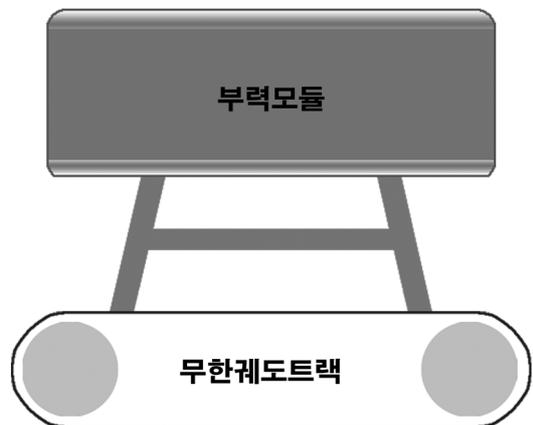


Fig. 3. Concept design of a vehicle.

의 변화가 주행장치의 ‘선회할 수 있게 하라(FR₁₃)’를 유발한다. 주행장치(DP₁)에 대한 설계행렬은 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} FR_{11} \\ FR_{12} \\ FR_{13} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{11} \\ DP_{12} \\ DP_{13} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Eq. 3을 통해 주행장치(DP₁)가 비연성화설계임을 확인할 수 있고, DP₁에 대한 설계를 위해서는 무한궤도트랙(DP₁₁), 부력모듈(DP₁₂)의 순서로 설계가 수행되어야 함을 알 수 있다. 한편, DP₁₁과 DP₁₂와 관계없이 독립적으로 좌우트랙속도제어(DP₁₃)를 통해 FR₁₃ 기능을 수행한다.

DP₂에 대한 세 번째 수준의 기능요구와 설계파라미터

채집장치(pick-up device)로 명명된 DP₂에 대한 기능요구는 다음과 같다.

- FR₂₁ : 심해저 연약지반에서 단괴를 분리하라.
- FR₂₂ : 주행장치내로 분리된 단괴를 이송하라.
- FR₂₃ : 단괴에 묻은 연약지반을 제거하라.

다음의 설계파라미터를 통해 DP₂의 기능요구가 만족된다.

- DP₂₁ : 물체트장치
- DP₂₂ : 기계식이송장치
- DP₂₃ : 단괴세척장치
- DP₁₁ : 무한궤도트랙

Fig. 4는 본 채집장치(DP₂)의 개념도이다. ‘심해저 연약지반에서 단괴를 분리하라(FR₂₁)’기능은 물체트장치(DP₂₁)와 무한궤도트랙(DP₁₁)에 영향을 받는다. 무한궤도트랙(DP₁₁)의 이동속도의 범위가 결정된 이후 DP₂₁이 설계되어 FR₂₁의 기능을 수행한다.

‘주행장치내로 분리된 단괴를 이송하라(FR₂₂)’기능은 물체트장치(DP₂₁)와 기계식이송장치(DP₂₂)의 영향을 받는다. DP₂₁의 경우 FR₂₁ 기능을 주로 하지만, DP₂₂ 앞까지 단괴를 이송하는 F₂₂기능도 보조적으로 수행한다.

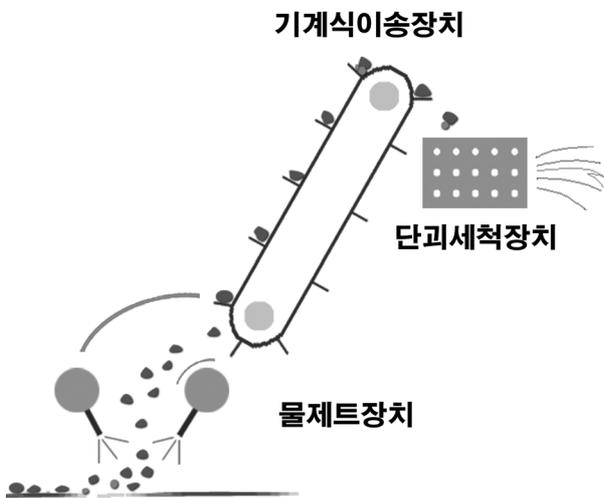


Fig. 4. Concept design of a pick-up device.

물체트장치(DP₂₁)는 FR₂₁기능과 FR₂₂기능에 더불어 ‘단괴에 묻은 연약지반을 제거하라(FR₂₃)’기능을 일부 수행한다. 또한 기계식이송장치(DP₂₂)의 경우 FR₂₂기능과 함께 FR₂₃ 기능도 수행한다. FR₂₃ 기능은 DP₂₁과 DP₂₂에서 어느 정도 이루어지더라도 완전하지 못할 것으로 예상된다. 따라서 단괴세척장치(DP₂₃)를 이용하여 마무리 세척이 이루어져야 한다. 이상을 정리하면, DP₂에 대한 설계행렬은 다음의 Eq. 4와 같이 비연성화설계가 된다.

$$\begin{Bmatrix} FR_{21} \\ FR_{22} \\ FR_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{21} \\ DP_{22} \\ DP_{23} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Eq. 2와 Eq. 4로부터 채집장치(DP₂)의 설계를 위해서는 주행장치(DP₁)의 일부인 무한궤도트랙(DP₁₁)이 결정된 이후 물체트장치(DP₂₁)-기계식이송장치(DP₂₂)-단괴세척장치(DP₂₃)의 순서로 설계가 수행되어야 한다는 것을 알 수 있다.

DP₃에 대한 세 번째 수준의 기능요구와 설계파라미터

송출장치(crusher)로 명명된 DP₃에 대한 기능요구는 다음과 같다.

- FR₃₁ : 단괴를 파쇄하라.
- FR₃₂ : 버퍼로 파쇄된 단괴를 이송하라.

이러한 DP₃의 기능요구에 대해 다음과 같이 설계파라미터를 결정한다.

- DP₃₁ : 단괴파쇄기
- DP₃₂ : 슬러리이송장치

Fig. 5는 송출장치(DP₃)의 개념도이다. ‘단괴를 파쇄하라(FR₃₁)’기능은 단괴파쇄기(DP₃₁)가 전담해서 수행한다. ‘버퍼로 파쇄된 단괴를 이송하라(FR₃₂)’의 기능은 슬러리이송장치(DP₃₂)가 대체로 수행하지만, 슬러리이송장치가 발생시키는 유체유동은 파쇄기를 통과해야 한다. 따라서 파쇄기의 입구 및 내부 형상에 따라 슬러리이송장치(DP₃₂)의 설계값들이 변화한다. 따라서 FR₃₂기능의 수행을 위해서는 DP₃₁과 DP₃₂를 동시에 고려해야한다. DP₃의 설계행렬은 다음과 같다.

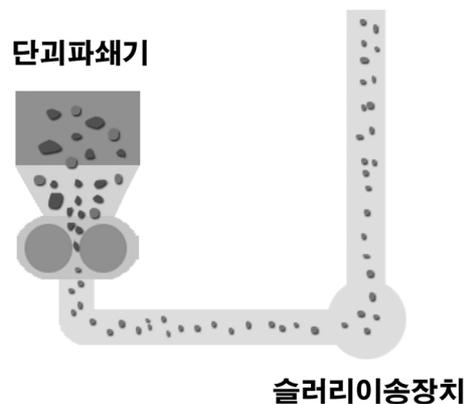


Fig. 5. Concept design of a crusher.

$$\begin{Bmatrix} FR_{31} \\ FR_{32} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{31} \\ DP_{32} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Eq. 5을 통해 송출장치(DP₃)가 비연성화설계임을 확인할 수 있다. DP₃의 설계를 위해서 단괴파쇄기(DP₃₁)-슬러리아송장치(DP₃₂)의 순서로 설계를 수행하도록 한다.

DP에 대한 세 번째 수준의 기능요구와 설계파라미터

진수회수장치로 명명된 DP₄에 대한 세 번째 수준의 기능요구는 다음과 같다.

- FR₄₁ : 전체를 매달수 있게 하라.
- FR₄₂ : 꼬임이 발생하지 않게 하라.

이러한 진수회수장치(DP₄)에 대한 기능요구에 대해 다음의 설계 파라미터를 조합한다.

- DP₄₁ : 와이어장치
- DP₄₂ : Yaw제어추진기

Fig. 6는 진수회수장치(DP₄)에 대한 개념도이다. 와이어장치(DP₄₁)를 이용하여 ‘전체를 매달수 있게 하라(FR₄₁)’기능을 수행한다. 진수회수시 발생하는 와이어 ‘꼬임이 발생하지 않게 하라(FR₄₂)’기능을 수행하기 위해 Yaw제어추진기(DP₄₂)를 사용한다. 이때 와이어장치(DP₄₁)의 설계사양에 따라 Yaw제어추진기(DP₄₂)의 사양이 변경될 수 있으나, 그 효과가 크지 않을 것으로 판단된다. 따라서 진수회수장치(DP₄)의 설계행렬은 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} FR_{41} \\ FR_{42} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{41} \\ DP_{42} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Eq. 6은 진수회수장치(DP₄)가 비연성설계(uncoupled design)임을 알려준다. 와이어장치(DP₄₁)와 Yaw제어추진기(DP₄₂)는 각각 독립적으로 결정될 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 집광시스템에 대한 기능적 영역의 기능요구와 설계영역의 설계파라미터를 세 번째 수준까지 보여준다.

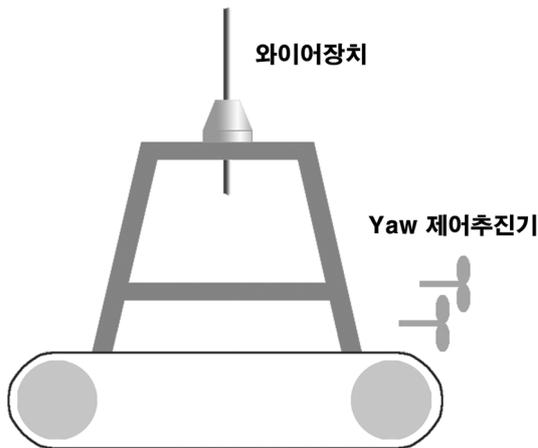


Fig. 6. Concept design of a launch and recovery system.

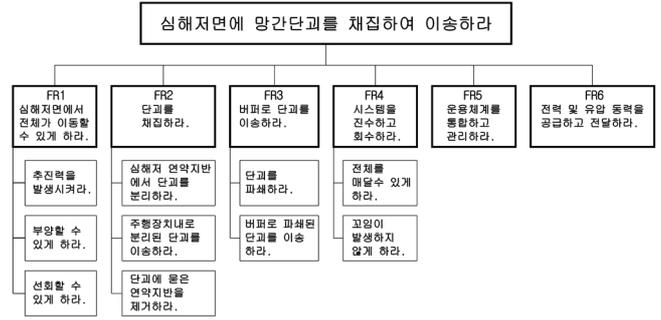


Fig. 7. Functional domain of a Deep-Sea Manganese Nodule Miner.

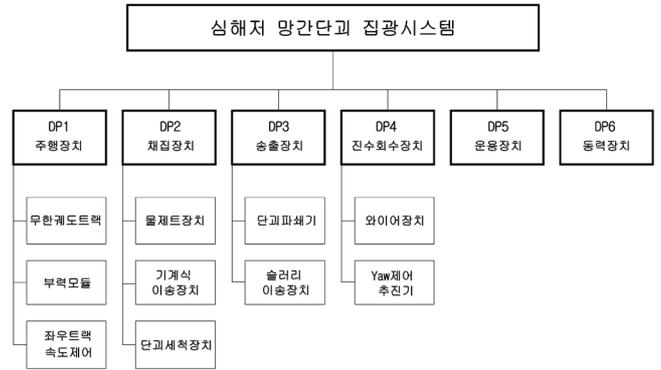


Fig. 8. Physical domain of a Deep-Sea Manganese Nodule Miner.

세 번째 수준에서의 설계행렬

Eq. 2는 두 번째 수준에서의 기능요구와 설계파라미터를 이용하여 작성한 설계행렬인데 비해, Eq. 7은 세 번째 수준에서의 설계행렬이다. 설계파라미터 DP₁, DP₂, DP₃, DP₄ 각각에 대한 세 번째 수준에서 설계행렬인 Eq. 3-Eq. 6을 통합하여 하나의 설계행렬을 구성하면 다음의 Eq. 7과 같이 표현된다. Eq. 7의 설계행렬을 통해 집광시스템이 비연성화설계임을 알 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} FR_{11} \\ FR_{12} \\ FR_{13} \\ FR_{21} \\ FR_{22} \\ FR_{23} \\ FR_{31} \\ FR_{32} \\ FR_{41} \\ FR_{42} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & X & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{11} \\ DP_{12} \\ DP_{13} \\ DP_{21} \\ DP_{22} \\ DP_{23} \\ DP_{31} \\ DP_{32} \\ DP_{41} \\ DP_{42} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

설계제한조건

본 집광시스템 설계에서 고려되어야 할 제한조건은 다음과 같다.

- 연간 300만톤의 건조상태 망간단괴를 채광
- 심해저면의 연약한 지반에서 주행이 가능해야 함.
- 길이방향으로 좌우 대칭
- 경제적이고 환경 친화적인 설계

- 안전 및 기타 관련 법령과 규칙을 준수한 설계

결 론

본 연구에서는 공리적 설계관점에서 한국해양연구원의 집광시스템을 개념적으로 분석하였다. 집광시스템의 기능요구와 설계과라미터의 관계를 나타내는 설계행렬을 작성하였다. 작성된 설계행렬은 집광시스템이 비연성화설계(decoupled design)임을 보여주었다. 따라서, 집광시스템이 공리적 설계관점에서 제1설계공리인 독립공리를 만족하는 ‘잘된 설계’임을 확인하였다.

분석된 비연성화된 설계행렬을 통해 집광시스템의 각 설계과라미터에 대한 설계순서를 제시하였다. 이러한 설계순서 제안을 통해 효과적으로 집광시스템이 설계될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 국토해양부 특장연구과제인 “심해저 광물자원 집광시스템 및 채광운용기술 개발”과제의 지원으로 수행되었습니다. 본 연구에 대해 전폭적으로 지원해주신 국토해양부 관계자들에 감사드립니다.

참고문헌

- 박경진, 강병수, 2007. 해석적 설계방법론, 동명사, 21-104 pp.
호리베 요시오, 오마찌 호꾸이찌로, 간노 마사요시, 1987. 해양광물자원, 겐지사, 28-56 pp.
홍 섭, 1995a, 심해저 광물자원 개발기술 및 환경보존 연구 : 심해저 망간단괴 집광 및 채광운용시스템 개발연구, 과학기술부, i-iii pp.
홍 섭, 1995b, 심해저 광물자원 개발기술 및 환경보존 연구 : 심해저 망간단괴 집광 및 채광운용시스템 개발연구, 과학기술부, 37-62 pp.
홍 섭, 1997, 심해저 광물자원 개발기술 및 환경보존 연구 : 심

해저 망간단괴 집광 및 채광운용시스템 개발연구, 과학기술부, 57-130 pp.

홍 섭, 1999, 심해저 광물자원 개발기술 및 환경보존 연구 : 심해저 망간단괴 집광 및 채광운용시스템 개발연구, 과학기술부, 37-354 pp.

Chung, J.S., 1996. Deep-ocean Mining: Technologies for Manganese Nodules and Crusts, *Int. J. of Offshore and Polar Eng.*, ISOPE, 6(7): 244-254.

Chung, J.S., 1999. Deep-Ocean Mining Issues and Ocean Mining Working Group (OMWG), *Proc. of ISOPE OMS-1999 Symp.*, ISOPE, pp. 14-17.

Chung, J.S., 2003. Deep-ocean Mining Technology: Learning Curve I, *Proc. of ISOPE OMS-2003 Symp.*, Japan, ISOPE, pp. 1-6.

Deepak, C.R., Shajahan, M.A., Atmanand, M.A., Annamalai, K., Jeyamani, R., Ravindran, M., Schulte, E., Handschuh, R., Panthel, J., Grebe, H. and Schwarz, W., 2001. Developmental tests on the Underwater Mining System Using Flexible Riser Concept, *Proc. of ISOPE OMS-2001 Symp.*, ISOPE, pp. 94-98.

Gong, D., Yang, N. and Yu, M., 2003. Development of Control System of COMRA's Deep Sea Miner, *Proc. of ISOPE PACOMS-2005 Symp.*, ISOPE, pp. 75-80.

Suh, N.P., 1990. The Principle of Design, Oxford University Press, 25-95 pp.

Yamada, H. and Yamazaki, T., 1998. Japan's Ocean Test of Nodule Mining System, *Proc. of 8th ISOPE Conf.*, ISOPE, 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 Symp.*, ISOPE, pp. 65-70.

Yang, K. and El-Haik, B., 2003. Design for Six Sigma, McGraw Hill, 199-233 pp.

2008년 4월 4일 원고접수

2008년 7월 22일 수정본 채택

담당편집위원: 홍 섭