

# 심해저 망간단괴 집광기의 채집장치에 관한 연구 A Study on Pick-up Device of Deep Sea Manganese Nodules Collector

홍 섭(한국기계연구원), 심재용(현대중공업), 이태희(영남대 기계공학부), 최종수(영남대 대학원)  
Sup Hong(KIMM), J.Y. Shim(Hyundai Heavy Industry), Tae Hee Lee(Yeungnam Univ.),  
J.S. Choi(Graduate School, Yeungnam Univ.)

## ABSTRACT

Performance and efficiency of hybrid (hydraulic-mechanical) pick-up device of deep sea manganese nodules collector are very sensitive to altitude and attitude of pick-up head relative to undulating seafloor. For this reason, motion control of pick-up head relative to the changing deep sea topography and other disturbances is of particular importance in design of pick-up device. The concept of design axiom is applied to a pick-up device of hybrid type. Kinematic analysis conducted in absolute Cartesian coordinates gives position, velocity, and acceleration of the hydraulic cylinders which enable the pick-up head to keep the preset optimal distance from seafloor. Inverse dynamic analysis provides the driving forces of hydraulic cylinders and the reaction forces at each joint. Design sensitivity analysis is performed in order to investigate the effects of possible design variables on the change of the maximum strokes of hydraulic cylinders. The direct differentiation method is used to obtain the design sensitivity coefficients.

**Key Words :** Deep Sea Manganese Nodules Collector(심해저 망간단괴 집광기), Pick-up Device(채집장치), Design Axiom(설계 공리), Kinematic Analysis(기구학 해석), Inverse Dynamic Analysis(역동역학 해석), Design Sensitivity Analysis(설계 민감도 해석)

## 1. 서 론

최근 들어 심해저의 개발에 대한 관심이 집중되면서 채광 기술 분야에서 괄목할 만한 성과를 거두고 있다. 우리나라는 UN으로부터 선형 투자국의 자격으로서 태평양의 C-C(Clarion-Clipperton) 해역에 광구권을 승인 받아 이 광구에 대한 개발권과 함께 선형 투자국으로서 의무 수행의 책임을 갖게 되었다. 심해저 채광 기술 중 채집 기술은 매우 중요한 핵심 기술이며, 이에 대한 연구가 요구되고 있다[1].

심해저 퇴적물의 상층부는 준액체(semi-liquid) 상태로서 준액체층 위에서의 망간단괴의 채집에는 여러가지 기술적 어려움이 존재한다. 준액체층은 차량 구동장치와의 상호작용으로 차량의 운동에 많은 영향을 주어서 평탄한 해저면일지라도 차량은 주행시 상하·회전 운동을 하는 것으로 알려져 있다[6]. 따라서 차량에 고정되어 있는 채집장치 또한 이와 같은 운동에 영향을 받을 것으로 예상된다. 준액체층상에서의 차량의 운동은 채집장치의 흡입부(intake

part)와 심해저면 사이의 상대적인 거리에 변화를 주어 채집 효율의 저하를 초래한다. 본 연구에서 고려 중인 혼합식 집광기는 채집장치의 흡입부가 심해저면에 대해 적절한 위치와 자세를 유지하기 위해서 2개의 유압식 실린더를 사용하고 있다.

본 연구에서는 혼합식 집광기의 채집장치에 대해 설계 공리의 관점에서 설계를 평가한다. 또한 기본적인 형상에 대한 기구학 해석을 수행함으로써 유압 실린더의 상대 위치, 속도, 가속도를 구하고 그 결과를 이용한 역동역학 해석에 의해 유압 실린더에 제공되어야 할 동력과 각 조인트에 작용되는 반력을 구한다. 또한 기구학적 민감도 해석을 통해 설계 개선의 자료를 제시한다.

## 2. 혼합식 채집장치의 모델링

채집장치는 강체로 가정된 모두 7개의 물체로 구성되어 있다. 즉, Fig. 1에서처럼 채집장치는 유압 실린더 #1, #2가 각각 2개의 강체로 이루어져 있고 프레임(frame), 채집 머리부(pick-up head) 그리고 차

량(ground로 가정)도 강체로 가정한다. 각 물체의 무게중심에 물체 부착  $x'-y'$  기준계(body fixed  $x'-y'$  reference frame)가 붙어 있다. 그리고 X-Y 판정 기준계가 모든 물체의 위치를 지정한다. 각 물체 사이는 6 개의 회전 조인트(revolute joint)와 2 개의 병진 조인트(translation joint)로 연결되어 있다. 따라서 ground를 포함한 기구학적 구속 방정식의 개수가 19 이고 전체 물체의 일반화된 좌표계의 개수가  $3 \times 7 = 21$  이므로 자유도는 2 가 된다.

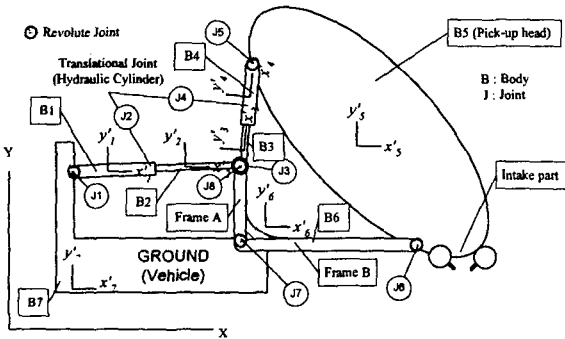


Fig. 1 Body-fixed reference frame embedded to each body of pick-up device of hybrid collector, and numbering of each body and joint.

### 3. 설계 공리를 적용한 혼합식 채집장치의 설계 평가

설계 공리는 설계를 평가할 수 있는 기준을 제공한다. 본 연구에서는 혼합식 채집장치에 대해 설계 공리를 적용해서 설계를 평가한다. 설계 평가 기준으로서 설계 공리는 다음과 같이 정의된다[4].

공리 1: 기능 독립 공리(The Independence Axiom)

공리 2: 정보량 최소의 공리  
(The Information Axiom)

혼합식 채집장치의 설계를 다음과 같이 계층 구조화한다. 먼저 채집장치에 대한 기능 요구는 다음과 같다.

FR1: 망간단괴를 끌어 올려서 전달하는 장치  
FR1은 채집장치의 포괄적 기능이며 이 기능 요구를 만족시켜주는 것이 바로 채집장치로서 다음과 같이 설계 변수(DP1)를 정의한다.

DP1: 채집장치

채집장치는 다음과 같은 세부 기능 요구로 분해 할 수 있다.

FR11: 단괴를 들어 올리는 장치

FR12: 단괴를 수송해서 전달하는 장치  
FR13: 흡입부의 위치와 자세 조정 장치  
FR14: 전체 시스템을 지탱하는 장치

이와 같은 기능 요구를 구현하기 위해 혼합식 집광기는 물체 분사 노즐, 체인 편 벨트, 유압 실린더, 프레임이 있다.

DP11: 물체를 분사하는 노즐

DP12: 체인 편 벨트

DP13: 2 개의 유압 실린더

DP14: 프레임

물체를 분사하는 노즐은 단괴를 들어 올리고, 일련의 편으로 덮인 체인 벨트는 단괴를 전달하고, 2 개의 유압 실린더는 흡입부의 위치를 조정하며, 프레임은 전체 채집장치를 지탱한다. 따라서 설계 방정식은 다음과 같고 비연성이 되므로 설계 공리 1을 만족한다.

$$\begin{Bmatrix} FR11 \\ FR12 \\ FR13 \\ FR14 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP11 \\ DP12 \\ DP13 \\ DP14 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

DP13의 역할은 다시 다음의 기능으로 세분화 될 수 있다.

FR131: 흡입부의 Y 방향 위치 조정

FR132: 흡입부의 자세 조정

2 개의 유압 실린더는 흡입부의 Y 방향과 자세를 조정하는 기능 요구를 만족한다. 이것에 대한 설계 변수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

DP131: 유압 실린더 #1의 상대 거리

DP132: 유압 실린더 #2의 상대 거리

현재층에서 설계 변수 DP131과 DP132에 대해 공리 1을 적용시켜서 설계 방정식을 만들면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} FR131 \\ FR132 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP131 \\ DP132 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

대략적으로 DP131으로 FR131을 조정하고 나면 DP132로써 FR132를 만족시킬 수 있으므로 비연성된 설계다. 따라서 설계 공리 1을 만족한다. 또한, FRs와 DPs의 개수가 같으므로 최소의 정보를 가졌기 때문에 설계 공리 2에 대해서도 만족하는 것을 알 수 있다.

이러한 이유는 유압 실린더 #1의 상대 운동 시 흡입부는 Fig.1의 7번 조인트를 중심으로 회전하는 경향을 가진다. 따라서 유압 실린더 #1의 운동은 Frame A부분의 길이를 회전 반경으로 프레임을 움직이고 그와 같은 움직임은 Frame B부분과 6번 조인트와 흡입부의 거리를 합한 길이를 회전 반경으로

로 흡입부를 움직이게 한다. 현 설계에서 Frame A 보다 Frame B가 3배나 길다. 따라서 상하 위치 조절의 기능이 유압 실린더 #1의 주된 기능으로 생각된다.

유압 실린더 #2는 6번 조인트를 중심으로 흡입부를 회전시키려는 경향을 가지고 채집 머리부를 직접 움직인다. 현 설계에서 흡입부와 6번 조인트 사이의 거리가 작다. 따라서 유압 실린더 #2의 상대 운동은 흡입부의 상하 병진 운동보다는 회전에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로 혼합식 집광기의 채집장치가 설계 공리의 견지에서 '잘된 설계'라는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 기구학 해석

2절에서의 기구학적 모델링으로 다음과 같은 기구학적 구속방정식을 구성한다.

$$\Phi^K(\mathbf{q}) = [\Phi_1^K(\mathbf{q}), \dots, \Phi_{19}^K(\mathbf{q})]^T = 0 \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{q}$ 는 일반화된 좌표계이며, 상첨자  $K$ 는 기구학적 구속방정식을 의미한다[1,3].

망간단괴로 널려진 심해저면 중 상업적 채광에 대상이 될 부분은 평탄하고 장애물이 없을 것으로 생각되나 준액체층으로 이루어진 퇴적층 상부와 집광기 주행장치간의 상호작용으로 차량은 상하 회전운동을 할 것으로 예상된다. 본 기구학 및 동역학 해석에서는 차량은 고정되고 심해저면이 다가오는 것으로 가정한다. 따라서 심해저면은 다음과 같은 정현파로 모델링한다.

$$y = 7 \sin\left(\frac{2\pi}{2000}(x - 100t)\right) - 2 \quad [\text{cm}] \quad (4)$$

식(4)로 표현되는 심해저면에 대한 채집장치의 흡입부의 위치와 자세(각)를 구동 구속조건으로 두면 식(5)와 같은 방정식을 구성할 수 있다.

$$\Phi^D(\mathbf{q}, t) = [\Phi_1^D(\mathbf{q}, t), \Phi_2^D(\mathbf{q}, t)]^T \quad (5)$$

여기서 상첨자  $D$ 는 구동 구속조건을 나타낸다.

식(3)과 식(5)를 연립하여 다음과 같이 구속 방정식을 완성한다.

$$\Phi(\mathbf{q}, t) = \begin{bmatrix} \Phi^K(\mathbf{q}) \\ \Phi^D(\mathbf{q}, t) \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

식(6)을 Newton-Raphson 법을 이용하여 풀면 시간에 따른 모든 물체의 위치와 자세를 구할 수 있다. 위치해석에서 유압 실린더의 상대 거리는 Fig.2와 같다.

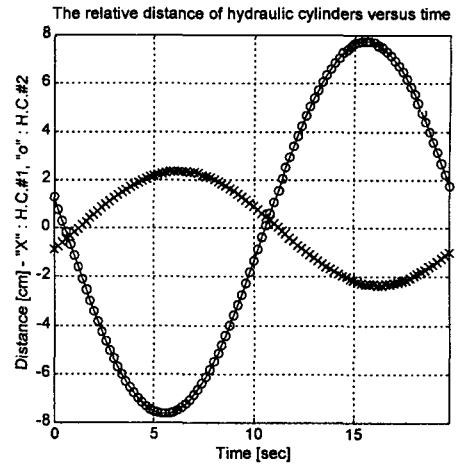


Fig. 2 The relative distance of hydraulic cylinders versus time.

위치 해석에서 사용된 구동 구속조건을 수치적으로 미분하여 속도 및 가속도 해석에 대한 구동 구속조건을 구한다. 이와 같이 구해진 구동 구속조건을 사용해서 다음과 같은 식을 구성하여 유압 실린더의 상대 속도 및 가속도를 비롯해서 모든 물체의 속도 및 가속도를 구한다.

$$\Phi_q \dot{\mathbf{q}} = -\dot{\Phi} \equiv \mathbf{v} \quad (7)$$

$$\Phi_q \ddot{\mathbf{q}} = -(\Phi_q \dot{\mathbf{q}})_q \dot{\mathbf{q}} - 2\Phi_{qr} \dot{\mathbf{q}} - \Phi_{rr} \equiv \boldsymbol{\gamma} \quad (8)$$

여기서  $\Phi_q$ 는  $\Phi$ 의 Jacobian이다. 계산 결과 유압 실린더 #1은 최대 속력이 0.7[cm/sec]이고 유압 실린더 #2는 2.5[cm/sec]이다. 또한 최대 가속도는 유압 실린더 #1이 0.2 [cm/sec<sup>2</sup>]이고 #2는 0.8[cm/sec<sup>2</sup>]이다.

이 시스템은 수중에서 작동하므로 부가 질량(added mass)과 항력(drag force)의 영향을 받게 된다. 따라서 기구학 해석을 바탕으로 유체력의 영향을 고려한다.

부가질량의 경우 각 물체의 가속도는 최대가 10<sup>3</sup>[g]의 차수이므로 중력 가속도의 차수보다 아주 작다. 그리고 본 시스템의 경우 큰 배수량(displacement volume)을 갖는 구성요소가 없으므로 부가 질량에 의한 외력은 무시 가능하다.

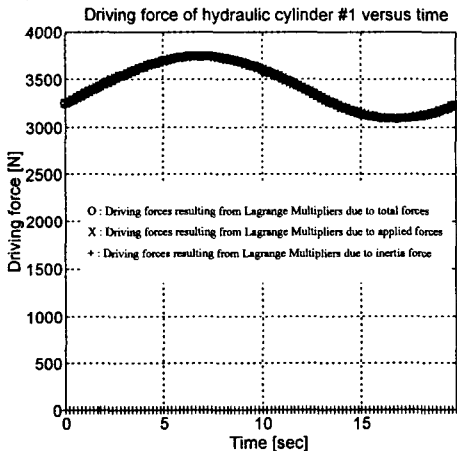
집광기의 전진 방향으로 가장 앞부분에 위치해 있는 채집 머리부는 투영면적이 가장 넓은 부분으로 다른 요소보다 항력이 많이 작용된다. 따라서 다음 장에 수행할 역동역학 해석에서는 채집 머리부에 대한 항력만을 고려하기로 한다.

## 5. 역동역학 해석

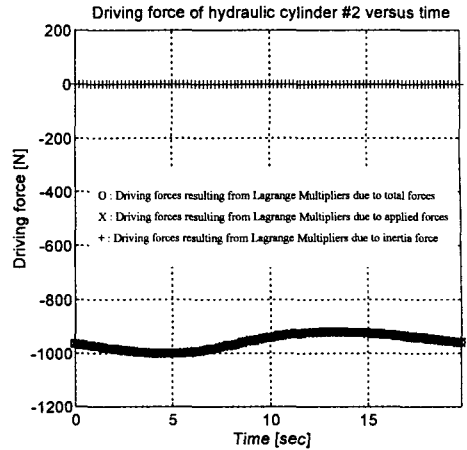
기구학 해석에서 구해진 각 물체의 위치, 속도, 가속도를 이용하면 구동 구속조건에 해당하는 Lagrange 승수를 구할 수 있다. 2개의 유압 실린더의 상대 운동을 구동 구속조건으로 두었을 때 Lagrange 승수는 유압 실린더의 구동력(driving force)을 계산하는 데 사용되어지고 관성력과 작용력으로 나누어 각각의 항에 의해 기인된 구동력을 구할 수 있다. Fig. 3 에는 관성력과 작용력 그리고 모든 힘을 고려했을 때의 구동력이 나타나 있다. 관성력이 작용력에 비해 너무 작아서 무시될 수 있다는 것을 알 수 있다.

원하는 운동을 하기 위해서는 유압 실린더 #1 에는 인장력이 유압 실린더 #2 는 압축력이 작용되어야 한다는 것을 알 수 있고 유압 실린더 #1 에 많은 힘이 작용되어야 한다. 이와 같은 이유는 관성력이 작아서 무시되면 정역학적 평형을 이루기 위해 가장 질량이 큰 채집 머리부의 무게 중심의 위치 때문에 유압 실린더 #2 보다 #1 에 큰 힘이 작용 된다고 생각된다.

기구학적 구속조건에 대한 Lagrange 승수는 각 조인트에 걸리는 반력을 계산하는데 사용되어 진다. 1 번, 3 번, 7 번 조인트에 걸리는 힘이 3000 ~ 4500 [N] 정도로 두드러지고 6 번과 8 번 조인트에도 힘이 많이 작용된다. 3 번, 6 번, 7 번, 8 번은 조인트는 프레임에 연결되어 있고 1 번과 3 번은 유압 실린더 #1 과 연결된 조인트이다. 따라서 전체 시스템을 지탱하는 역할을 하는 프레임과 유압 실린더 #1 에 힘이 많이 작용된다는 것을 알 수 있고 이 부분의 부재는 충분히 강도가 유지될 수 있도록 설계 되어야 할 것이다.



(a) hydraulic cylinder#1



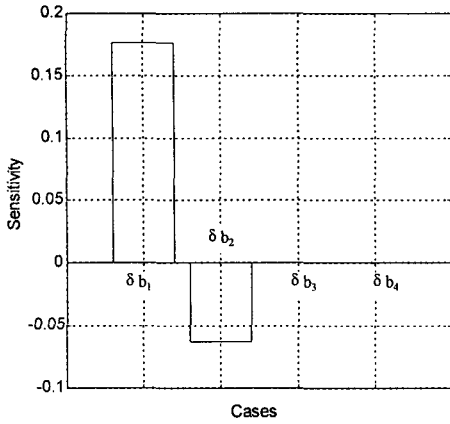
(b) hydraulic cylinder #2

Fig. 3 Driving forces to hydraulic cylinders.

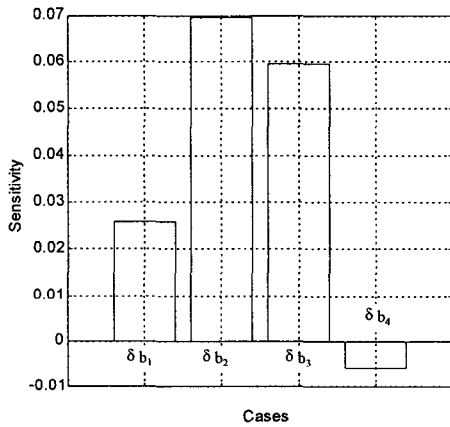
## 6. 설계 민감도 해석

일반적으로 동일한 구동조건에 대해 유압 실린더의 최대 행정이 클수록 에너지의 관점에서는 불리하나 제어의 측면에서는 유리하다. 따라서 유압 실린더의 최대 행정을 변화 시키기 위한 설계 변수의 변화의 방향을 제시하는 것은 중요하다. 이에 본 연구는 Fig. 1 의 프레임 A, B 의 길이를 설계 변수  $b_1$ ,  $b_2$  로 두고 채집 머리부에서 5 번 조인트의  $x_5$ ,  $y_5$  방향의 위치 좌표를 설계 변수  $b_3$ ,  $b_4$  로 둔다. 또한 유압 실린더 #1 과 #2 의 최대 행정길이를 성능 함수  $\Psi_1$ ,  $\Psi_2$  로 정의하고 직접 미분법을 이용하여 민감도를 구한다.

Fig. 4 (a), (b)는 각각  $\Psi_1$ 와  $\Psi_2$ 의 민감도를 나타낸다. 유압 실린더 #1 의 최대 행정은 프레임 A 의 길이 변화에 아주 민감하고 5 번 조인트의 위치에는 전혀 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 따라서 만약 유압 실린더의 #1 의 최대 행정의 변화를 위해서 프레임 A 의 길이를 변화 시키는 것이 유리하다. 유압 실린더 #2 의 경우 최대 행정을 증가시키려면 프레임 A 와 프레임 B 의 길이를 증가시켜야 하고 채집 머리에서 5 번 조인트를  $x_5$ 의 양의 방향으로 옮기고  $y_5$ 의 음의 방향으로 옮겨야 한다는 것을 알 수 있고 프레임 B 의 길이의 변화들과 5 번 조인트의  $x_5$  방향으로의 변화가 유압 실린더 #2 의 최대 행정에 민감하다는 것을 알 수 있다.



(a) Design sensitivity of performance function 1,  $\Psi_1$



(b) Design sensitivity of performance function 2,  $\Psi_2$

Fig. 4 Design sensitivity of the maximum strokes of hydraulic cylinders with respect to the design variables, the lengths of frames A, B and  $x'_5$ -,  $y'_5$ -directional positions of joint 5 on pick-up head.

## 7. 결론

혼합식 집광기의 채집장치에 설계 공리를 적용하여 현 시스템의 설계가 '잘된 설계'라는 것을 확인하였다. 기구학 해석을 통하여 채집장치가 심해면상을 진행할 때 흡입부가 일정한 위치와 자세를 유지하기 위한 유압 실린더의 상대 위치, 속도, 가속도를 구하였다. 또한 역동역학 해석을 통하여 유압 실린더에 주어어야 할 힘을 구함으로써 유압 실린더 용량 선정과 제어를 위한 기초적인 데이터를 제시했고, 각 조인트에 걸리는 반력을 계산하여 각 부재의 강도 설계의 근거를 마련하였다. 유압 실린더의 최대 행정에 대한 설계 민감도 해석을 수행하여 설계 개선의 방향을 제시하였다. 이상의 채집장치에 대한 연구는 채집장치의 기초 설계 단계에서 유용한 자료가 될 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

1. E.J. Haug, *The Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems*, Allyn and Bacon, Boston, 1989.
2. H. Amann, H.U. Oebius, F. Gehbauer, W. Schwarz, and R. Weber, *Soft Ocean Mining*, OTC, 1991.
3. J.S. Choi, Tae Hee Lee, and Sup Hong, *Kinematic and Dynamic Analysis of Deep Sea Manganese Nodules Collector*, 2nd Deep Sea Bed Mining Technology, KIMM, pp. 91- 104, 1996.
4. Nam P. Suh, *The principal of design*, Oxford University Press, New York, 1990.
5. Taeoh Tak, *A Recursive Approach to Design Sensitivity Analysis of Multibody Systems Using Direct Differentiation*, Ph.D. Thesis, U. of Iowa, Iowa, 1990.
6. THESIS-KRISO-HMRI joint project, 1996.
7. 홍 섭, 심해저 망간단괴 채광시스템의 기술분류, 선박해양기술 19 호, pp. 149 - 157, 1994.