한국해양공학회 2004년도 추계학술대회 논문집 PP.73~78

심해저 채광시스템의 단순 모델에 대한 분산 제어 기법 적용성 연구

여태경* · 홍섭* · 김형우* · 최종수*
*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

Study on the Application of Decentralized Control Method for Simplified Model of Deep Seabed Mining System

TAE-KYEONG YEU*, SUP HONG*, HYUNG-WOO KIM* AND JONG-SU CHOI*
Ocean Development System Laboratory, KORDI, Daejon, Korea

KEY WORDS : Deep Seabed Mining System 심해저 채광시스템, Decentralized Control Method 분산 제어 기법, Large-Scale System 대규모 시스템, Lagrange Equation 라그랑제 방정식

ABSTRACT: *The deep seabed mining system is generally composed of surface vessel, lifting system, buffer, flexible pipe and miner. The mining system is regarded as a large-scale system in which each subsystem is interconnected to other one. In order to control a large-scale system, a decentralized control approaches have been proposed recently. In this paper, as a basic study on application of decentralized control, firstly, the mining system is simplified modeled, where the lifting system and buffer is regarded as a spherical pendulum and the flexible pipe is as a two-dimension linear spring. Based on the derived model, the system characteristics and the feasibility of decentralized control are analyzed.*

1. 서 론

수심 3,000m 이상의 심해는 전 해양 면적의 약 81%라는 방대한 면적을 차지하는데, 이러한 심해저에는 망간단괴나 망간각과 같은 광물자원이 막대한 양으로 부존되어 있다. 심해저 광물자원의 개발은 해저의 망간단괴와 망간각으로부터, 하이테크 산업의 필수 원자재가 되는 망간, 니켈, 구리, 코발트 등의 금속 자원을 장기적으로 안정적으로 공급하는 것을 목표로 하고 있다. 최근 육상 광물자원의 고갈과 더불어 자원민족주의가 팽배해지는 국제 정세를 감안해 볼 때, 태평양 공해상의 노다지와 같은 망간 단괴의 개발은 필수적이라고 하지 않을 수 없다.

심해저 채광 시스템(Deep Seabed Mining System)은 심해저면의 집광기(Miner), 양광관과 양광 펌프 시스템(Lifting Pipe and Pumping System) 및 버퍼(Buffer), 해상의 채광선(Surface Vessel)으로 구성된다. 집광기에 의해서 해저면으로부터 분리 채집되는 망간단괴는 중간 저장소인 양광관 하단의 버퍼에서 단괴의 유동 농도를 최적으로 조절한 후 양광관을 통하여 해상까지 연속으로 이송된다. 한편, 집광기와 버퍼 사이에 유연관(Flexible Pipe)을 통하여 망간단괴를 이송함으로써 집광기가 해저면에서 부드럽게 주행할 수 있도록 설계된다. 집광기와 버퍼를 연결하는 유연호스는 집광기의 주행성능을 최대한 보장하기 위하여 집광기와는 수직 방향으로 연결되어 큰 아치형상을 유지하면서 버퍼로 연결되도록 설계된다. 이때 버퍼는 집광기의 전방에 위치하여 유연호스의 아치형상이 유지되도록 한다. 이와 같이 버퍼의 위치제어에 의해서 버퍼와 집광기 간의 상대 위치가 최적으로 유지될 때 집광기의 해저면에서의 주행 성능이 보장되며, 집광기의 우수한 주행 성능은 망간단괴 채광시스템의 상업 생산 규모를 결정하는 가장 중요한 요소가 된다(양승일 외 1995, 양승일 외 1997, 홍섭 외 2001).

심해저 채광 시스템과 같은 대규모 시스템(Large-scale System)을 제어하는 일반적인 방식은, 각 하부 시스템(Subsystem)의 정보들이 중앙 제어실로 보내지고, 수집된 정보들을 이용하여 최적의 제어치(Optimal controller)를 계산한 후, 그 제어치를 통해 전체 시스템 시스템을 안정화시키는 것이다. 그러나 많은 하부 시스템들의 상호 결합으로 이루어져 있는 대규모 시스템의 특성상 중앙에서 모든 정보를 수집하고 정보들을 처리하기란 매우 어렵다. 가령, 그것이 가능하다할지라도 설비 비용 혹은 계산 처리 시간 등의 문제점이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근에 제안되고 있는 방법 중의 하나가 전체 시스템을 각 하부 시스템으로 분해하고, 각각의 분해된 시스템에 대하여 제어기를 설계하는 분산 제어법이다(Decentralized Control Method: Siljak 외 1976, Siljak 외 1978). 이러한 분산 제어는 전체 시스템의 완전한 분해를 통해, 더욱 간단한 구조의 제어기 설계와 계산의 효율성을 이끌어 낼 수 있는 장점을 가진다. 그러나 분산 제어에 있어 가장 어려운 점은 각 시스템을 분해하는 과정에서 각 하부 시스템들 사이에 상호 작용하는 정보들(Interacting terms)을 어떻게 처리하느냐이다(Aldeen 1991).

본 논문에서는 심해저 채광 시스템에 대한 분산 제어법의 적용성에 대한 기본적 연구로서 먼저, 채광 시스템을 간단하게 모델화한다. 모델화하는 과정에서 양광 시스템과 버퍼를 구면진자

(Spherical Pendulum)로 단순화하며, 유연관은 2차원 선형스프링 결합으로 가정한다. 위와 같은 가정 하에서 유도된 모델을 바탕으로, 심해저 채광 시스템의 특성과 분산 제어의 적용 가능성을 분석하고자 한다.

2. 심해저 채광시스템

Fig. 1은 연속채광 개념의 심해저 망간단괴 채광시스템을 보여준다. 이때, 망간단괴의 최적의 양광유동 농도를 조절하는 기능을 가지는 버퍼 및 버퍼와 집광기를 연결하는 유연관은 연속채광 개념의 구현에 있어서 매우 중요한 의미와 역할을 가진다. 집광기와 버퍼를 연결하는 유연관은 집광기의 주행성능을 최대한 보장하기 위하여 집광기와는 수직 방향으로 연결되어 큰 아치형상을 유지하면서 버퍼로 연결되도록 설계된다.

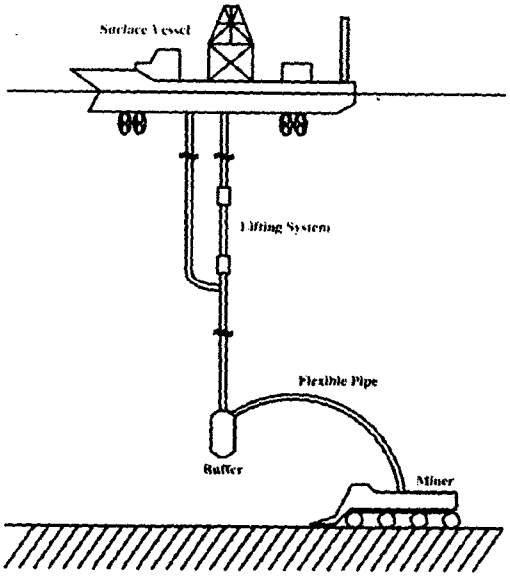

Fig. 1 Concept view of deep seabed mining system

본 논문에서는 심해저 채광 시스템에 대한 분산 제어법의 적용성에 대한 기본적 연구로서 채광 시스템을 간단하게 모델화한 후, 그 유도된 모델을 바탕으로 시스템의 특성과 분산 제어의 적용 가능성을 분석한다.

3. 심해저 채광시스템의 단순 모델

채광 시스템을 간단하게 모델화하기 위하여 양광 시스템과 버퍼를 구면 진자로, 유연관을 2차원 선형스프링 결합으로 가정하며, 집광기의 회전 운동에 의한 유연관에 미치는 영향을 무시하면, Fig. 1의 채광 시스템은 Fig. 2와 같이 간략하게 표현될 수 있다. Fig. 2의 단순화된 모델에 대한 상태 방정식을 유도하기 위하여 본 연구에서는 라그랑제(Largrange)의 운동 방정식을 이용하기로 한다(Meirovitch 1970).

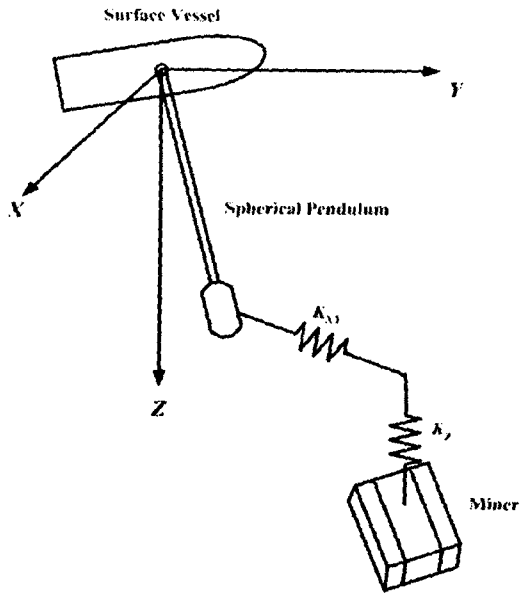

Fig. 2 Simplified model of deep seabed mining system

일반적인 라그랑제 운동 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = u_i \qquad (1)$$

여기서, T는 운동 에너지, D는 손실 에너지, U는 위치에너지 그리고 u_i는 외부 입력이다.

Fig. 2와 같은 단순 모델에 대한 운동 방정식을 얻기 위하여, 전체 시스템을 채광선과 구면 진자 그리고 구면 진자와 집광기 두 부분으로 나누고, 각 부분에 대한 상태 방정식을 구한 후, 각 방정식을 통합시킴으로써 전체 시스템의 상태 방정식을 얻는다.

3.1 채광선과 구면 진자의 운동 방정식

먼저, 채광선과 구면 진자의 단순 모델은 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, θ는 구면 진자가 Z축과 이루는 각, ϕ는 진자를 X-Y 평면상에 투영시켰을 때 X축과 이루는 각, 그리고 ψ_h는 채광선의 회전각, l은 양광관의 길이를 각각 나타낸다. 또한, 채광선에 있어서 F_{x_1}은 주 트러스트(Main thruster), F_{x_2}와 F_{x_3}는 측면 트러스트(Side thruster)이며, r_{x_1}과 r_{x_2}는 무게 중심에서 측면 트러스트까지의 거리를 나타낸다.

먼저 버퍼의 위치는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{pmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l\sin\theta\cos\phi \\ l\sin\theta\sin\phi \\ l\cos\theta \end{pmatrix}$$

Fig. 2의 시스템에 대한 각 에너지 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$T_{sp} = \frac{1}{2}(M_s + M_p)(\dot{x}_s^2 + \dot{y}_s^2) + \frac{1}{2}M_p\left(\frac{d}{dt}(x_s - l\sin\theta\cos\phi)\right)^2 + \frac{1}{2}M_p\left(\frac{d}{dt}(y_s - l\sin\theta\sin\phi)\right)^2 + \frac{1}{2}M_p\left(\frac{d}{dt}(l\cos\theta)\right)^2$$

$$D_{sp} = \frac{1}{2}D_x\dot{x}_s^2 + \frac{1}{2}D_y\dot{y}_s^2$$

$$U_{sp} = -M_p g l\cos\theta$$

여기서, $q = [x_s, x_s, \dot{y}_s, y_s, \dot{\theta}, \theta, \dot{\phi}, \phi]$, D_x, D_y는 마찰계수 그리고 g는 중력 가속도이며, 양관 시스템과 버퍼에 작용하는 유체 저항은 무시하기로 한다.

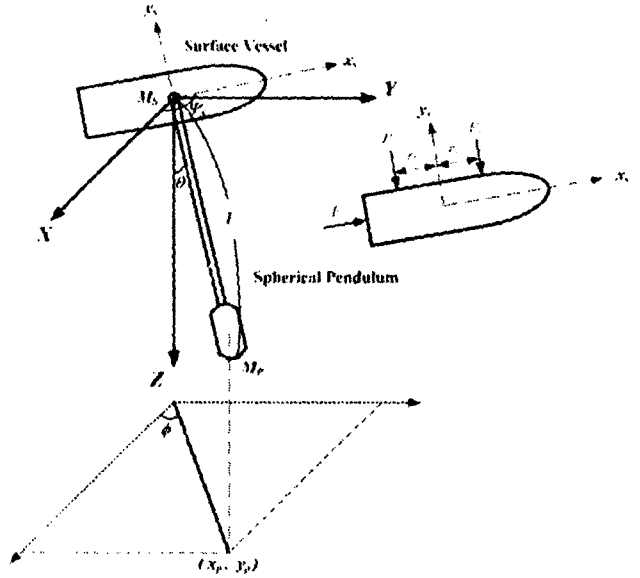

Fig. 3 Simplified model of surface vessel and lifting system and buffer

우선, (1) 식의 라그랑제 방정식을 $\dot{x}_s$와 x_s에 관하여 풀면 아래와 같이 얻어지며

$$(M_s + M_p)\ddot{x}_s + M_p[\ddot{\theta}l\cos\theta\cos\phi - \dot{\theta}^2 l\sin\theta\cos\phi - \dot{\theta}\dot{\phi}l\cos\theta\sin\phi - \ddot{\phi}l\sin\theta\sin\phi - \dot{\phi}\dot{\theta}l\cos\theta\sin\phi - \dot{\phi}^2 l\sin\theta\cos\phi] + D_x\dot{x}_s = F_{s_1} \quad (2)$$

$\dot{y}_s$와 y_s에 대하여 방정식을 풀면

$$(M_s + M_p)\ddot{y}_s + M_p[\ddot{\theta}l\cos\theta\sin\phi - \dot{\theta}^2 l\sin\theta\sin\phi - \dot{\theta}\dot{\phi}l\cos\theta\cos\phi - \ddot{\phi}l\sin\theta\cos\phi - \dot{\phi}\dot{\theta}l\cos\theta\cos\phi - \dot{\phi}^2 l\sin\theta\sin\phi] + D_y\dot{y}_s = F_{s_2} + F_{s_3} \quad (3)$$

와 같고, $\dot{\theta}$와 θ에 대하여 풀면 다음과 같이 된다.

$$M_p[-\ddot{x}_s l\cos\theta\cos\phi + \ddot{y}_s l\cos\theta\sin\phi + l^2\ddot{\theta} + l^2\sin\theta\cos\phi\dot{\phi}^2] + M_p g l\sin\theta = 0 \quad (4)$$

끝으로, $\dot{\phi}$와 ϕ에 관한 방정식을 풀면 아래와 같이 얻어진다.

$$M_p[-\ddot{x}_s l\sin\theta\sin\phi + \ddot{y}_s l\sin\theta\cos\phi + l^2\sin^2\theta\,\ddot{\phi} - 2l^2\sin\theta\cos\phi\dot{\theta}\dot{\phi}] = 0 \quad (5)$$

위 식 (2)-(4)를 평형점(equilibrium point) 즉, $\ddot{x}_{s_0} = \dot{x}_{s_0} = 0$, $\ddot{y}_{s_0} = \dot{y}_{s_0} = 0$, $\ddot{\theta}_0 = \dot{\theta}_0 = 0$, $\ddot{\phi}_0 = \dot{\phi}_0 = 0$, $\theta = \theta_0$, $\phi = \phi_0$, $F_{s_{10}} = 0$, $F_{s_{20}} = 0$, $F_{s_{30}} = 0$에서 선형근사하면 다음과 같이 얻어진다.

$$(M_s + M_p)\delta\ddot{x}_s + D_x\delta\dot{x}_s + M_p l(bd\delta\ddot{\theta} - ac\delta\ddot{\phi}) = \delta F_{s_1} \quad (6)$$

$$(M_s + M_p)\delta\ddot{y}_s + D_y\delta\dot{y}_s + M_p l(bc\delta\ddot{\theta} + ad\delta\ddot{\phi}) = \delta F_{s_2} + \delta F_{s_3} \quad (7)$$

$$M_p l(bd\delta\ddot{x}_s + bc\delta\ddot{y}_s + l\delta\ddot{\theta} + gb\delta\theta) = M_p gla \quad (8)$$

$$M_p l(-ac\delta\ddot{x}_s + ad\delta\ddot{y}_s + la^2\delta\ddot{\phi}) = 0 \quad (9)$$

여기서,

$a = \sin\theta_0$, $b = \cos\theta_0$, $c = \sin\phi_0$, $d = \cos\phi_0$

$\delta\ddot{x}_s = \ddot{x}_s - \ddot{x}_{s_0}$, $\delta\ddot{y}_s = \ddot{y}_s - \ddot{y}_{s_0}$, $\delta\ddot{\theta} = \ddot{\theta} - \ddot{\theta}_0$, $\delta\ddot{\phi} = \ddot{\phi} - \ddot{\phi}_0$,

$\delta\theta = \theta - \theta_0$, $\delta F_{s_1} = F_{s_1} - F_{s_{10}}$, $\delta F_{s_2} = F_{s_2} - F_{s_{20}}$,

$\delta F_{s_3} = F_{s_3} - F_{s_{30}}$

식 (6)과 (7)을 간략화하기 위하여 식 (8)과 (9)를 아래와 같이 변형시키고,

$$\delta\ddot{\theta} = -\frac{1}{l}(bd\delta\ddot{x}_s + bc\delta\ddot{y}_s + gb\delta\theta + ga) \quad (10)$$

$$\delta\ddot{\phi} = -\frac{1}{la}(c\delta\ddot{x}_s + d\delta\ddot{y}_s) \quad (11)$$

식 (10)과 (11)을 식 (6)과 (7)에 대입시키면

$$M_s\delta\ddot{x}_s + D_x\delta\dot{x}_s - M_p b^2 dg\delta\theta - M_p abdg = \delta F_{s_1} \quad (12)$$

$$M_s\delta\ddot{y}_s + D_y\delta\dot{y}_s - M_p b^2 cg\delta\theta - M_p abcg = \delta F_{s_2} + \delta F_{s_3} \quad (13)$$

이와 같이 얻어진다. 위에서 얻어진 식을 다시 정리하면

$$\delta\ddot{x}_s = -\frac{D_x}{M_s}\delta\dot{x}_s + \frac{M_p b^2 dg}{M_s}\delta\theta + \frac{1}{M_s}\delta F_{s_1} + \frac{1}{M_s}(M_p abdg) \quad (14)$$

$$\delta\ddot{y}_s = -\frac{D_{y_s}}{M_s}\delta\dot{y}_s + \frac{M_p b^2 cg}{M_s}\delta\theta + \frac{1}{M_s}(\delta F_{s_2} + \delta F_{s_3}) + \frac{1}{M_s}(M_p abcg) \quad (15)$$

와 같고, 이것을 식 (10)과 (11)에 대입하여 풀면 다음과 같이 얻어진다.

$$\delta\ddot{\theta} = \frac{b}{M_s l}\{dD_{x_s}\delta\dot{x}_s + cD_{y_s}\delta\dot{y}_s - d\delta F_{s_1} - c(\delta F_{s_2} + \delta F_{s_3})\} - \frac{1}{l}(gb\delta\theta + g\alpha) \quad (16)$$

$$\delta\ddot{\phi} = \frac{1}{M_s la}\{cD_{x_s}\delta\dot{x}_s + dD_{y_s}\delta\dot{y}_s - c\delta F_{s_1} - d(\delta F_{s_2} + \delta F_{s_3})\} \quad (17)$$

끝으로, 채광선에 작용하는 모멘트 평형방정식은

$$I_s\ddot{\psi}_s + D_{r_s}\dot{\psi}_s = r_{s_1}F_{s_1} - r_{s_2}F_{s_2} \quad (18)$$

와 같이 간단하게 나타낼 수 있다. 여기서, I_s는 극관성 모멘트, D_{r_s}는 회전마찰계수이다.

3.2 구면진자와 집광기의 운동 방정식

구면 진자와 집광기에 대한 단순 모델은 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

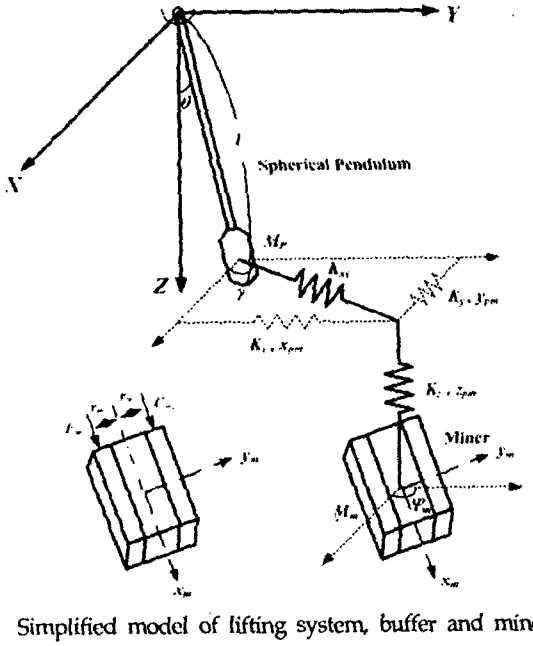

Fig. 4 Simplified model of lifting system, buffer and miner

여기서, K_{xy}와 K_z는 각각 X-Y 면과 Z 축의 스프링 상수이며, K_x는 X축 방향의 스프링 상수로써 $K_x = K_{xy}\cos\gamma$로, K_y는 Y축 방향의 스프링 상수로써 $K_y = K_{xy}\sin\gamma$로 계산되며, γ는 진자와 집광기의 중심 좌표로부터 계산된다. 그리고 x_{pm0}, y_{pm0}, z_{pm0}은 각 축의 스프링 길이를 나타낸다. 또한 M_m은 집광기의 하중, ψ_m은 집광기의 회전각이며, F_{m_1}과 F_{m_2}는 집광기의 추진력, r_{m_1}과 r_{m_2}는 무게중심에서 추진력 작용점까지의 거리를 나타낸다.

Fig. 4에 대한 에너지 방정식을 구하면 아래와 같다.

$$T_{pm} = \frac{1}{2}M_m(\dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2) + \frac{1}{2}M_p l^2(\dot{\theta}^2 + (1-\cos^2\theta)\dot{\phi}^2)$$

$$D_{pm} = \frac{1}{2}D_{x_m}\dot{x}_m^2 + \frac{1}{2}D_{y_m}\dot{y}_m^2$$

$$U_{pm} = \frac{1}{2}K_x(x_m - l\sin\theta\cos\phi - x_{pm0})^2 + \frac{1}{2}K_y(y_m - l\sin\theta\sin\phi - y_{pm0})^2 + \frac{1}{2}K_z(e - l\cos\theta)^2$$

여기서, $q = [\dot{x}_m, x_m, \dot{y}_m, y_m, \dot{\theta}, \theta, \dot{\phi}, \phi]$이며, $e = l - z_{p_m}$이다. 그리고 집광기는 평면 운동만 하고, 회전 운동에 의한 유연관에 미치는 영향은 없는 것으로 가정하며, 집광기가 받는 유체 저항은 무시한다.

위의 방정식을 $\dot{x}_m$와 x_m에 관하여 풀면

$$M_m\ddot{x}_m + D_{x_m}\dot{x}_m + K_x(x_m - l\sin\theta\cos\phi - x_{pm0}) = F_{m_1} + F_{m_2} \quad (19)$$

와 같이 얻어지고, $\dot{y}_m$와 y_m에 관하여 풀면

$$M_m\ddot{y}_m + D_{y_m}\dot{y}_m + K_y(y_m - l\sin\theta\sin\phi - y_{pm0}) = 0 \quad (20)$$

와 같이 계산된다. 또한 $\dot{\theta}$와 θ에 관하여 풀면

$$M_p l^2\ddot{\theta} + M_p l^2\sin\theta\cos\phi\dot{\phi}^2 - K_x l(x_m - x_{pm_0})\cos\theta\cos\phi - K_y l(y_m - y_{pm_0})\cos\theta\sin\phi + K_z l(e\sin\theta - l\sin\theta\cos\theta) = 0 \quad (21)$$

와 같고, 끝으로 $\dot{\phi}$와 ϕ에 관하여 방정식을 풀면 다음과 같다.

$$M_p l^2\sin^2\theta\ddot{\phi} + 2M_p l^2\sin\theta\cos\phi\dot{\theta}\dot{\phi} + K_x l(x_m - x_{pm0})\sin\theta\sin\phi - K_y l(y_m - y_{pm0})\sin\theta\cos\phi = 0 \quad (22)$$

위 식 (19)-(22)를 평형점 즉, $\ddot{x}_{m_0} = \dot{x}_{m_0} = 0$, $\ddot{y}_{m_0} = \dot{y}_{m_0} = 0$, $\ddot{\theta}_0 = \dot{\theta}_0 = 0$, $\ddot{\phi}_0 = \dot{\phi}_0 = 0$, $\theta = \theta_0$, $\phi = \phi_0$, $F_{m_{2_0}} = 0$, $F_{m_{2_0}} = 0$에서 선형근사하면, 아래와 같이 얻어진다.

$$M_m\delta\ddot{x}_m + D_{x_m}\delta\dot{x}_m + K_x(\delta x_m - lbd\delta\theta + lac\phi) = \delta F_{m_1} + \delta F_{m_2} \quad (23)$$

$$M_m\delta\ddot{y}_m + D_{y_m}\delta\dot{y}_m + K_y(\delta y_m - lac\delta\theta - lad\delta\phi) = 0 \quad (24)$$

$$M_p l^2\ddot{\theta} - K_x lbd\delta x_m - K_y lbc\delta y_m - l\{K_x a^2cd + K_y a^2c^2 + K_z(eb - lb^2 + la^2)\}\delta\theta - l^2abc(K_x c - K_y d)\delta\phi + l(K_x + K_y)abcd = 0 \quad (25)$$

$$M_p l^2 a^2 \delta\ddot{\phi} - l^2 abcd\,(K_x - K_y)\delta\theta - l^2 a^2 c^2 (K_x + K_y)\delta\phi$$
$$- l^2 a^2 cd\,(K_x - K_y) = 0 \qquad (26)$$

끝으로, 집광기에 작용하는 모멘트 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_m \ddot{\psi}_m + D_{r_m} \dot{\psi}_m = r_{m_1} F_{m_1} - r_{m_2} F_{m_2} \qquad (27)$$

여기서, I_m과 D_{r_m}는 각각 집광기의 극관성 모멘트와 회전마찰 계수이다. 지금까지 계산된 운동 방정식으로부터 전체 시스템의 상태 방정식은 식 (28)과 같이 얻어진다.

4. 분산 제어의 적용성 검토

식 (28)에서 얻어진 전체 시스템의 상태 방정식을 3개의 하부 시스템 즉, 채광선, 양광 시스템과 버퍼 그리고 집광기로 나누어 생각해보면, 채광선의 상태 방정식은

$$\dot{X}_s(t) = A_s X_s(t) + A_{sr} X_{sr}(t) + B_s u_s(t) + D_s \qquad (29)$$

와 같이 표현된다. 여기서,

$$A_s = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{D_x}{M_s} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{D_y}{M_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{D_\psi}{I_s} \end{bmatrix} \quad A_{sr} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{M_p b^2 dg}{M_s} \\ 0 \\ \frac{M_p b^2 cg}{M_s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad D_s = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{M_p}{M_s} abdg \\ 0 \\ \frac{M_p}{M_s} abcg \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$B_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{M} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{M_s} & \frac{1}{M_s} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_s}{I_s} & \frac{r_s}{I_s} \end{bmatrix} \quad X_s(t) = \begin{pmatrix} \delta x_s(t) \\ \delta \dot{x}_s(t) \\ \delta y_s(t) \\ \delta \dot{y}_s(t) \\ \delta \psi_s(t) \\ \delta \dot{\psi}_s(t) \end{pmatrix} \quad X_{sr}(t) = \delta\theta(t)$$

이고 양광 시스템과 버퍼에 대한 상태 방정식은

$$\dot{X}_p(t) = A_p X_p(t) + A_{pr} X_{pr}(t) + B_p u_p(t) + D_p \qquad (30)$$

와 같으며, 여기서

$$A_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{ga}{l} + \frac{a}{M_p l} & 0 & \frac{\tilde{b}}{M_p} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{bcd(K_x - K_y)}{M_p a} & 0 & \frac{c^2(K_x + K_y)}{M_p a} & 0 \end{bmatrix} \quad A_{pr} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{bdD_x}{M_p l} & \frac{bcD_x}{M_p l} & \frac{K_x bd}{M_p l} & \frac{K_x bc}{M_p l} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{cD_y}{M_p la} & \frac{dD_y}{M_p la} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\frac{bd}{M_p l} & -\frac{bc}{M_p l} & -\frac{bc}{M_p l} \\ 0 & 0 & 0 \\ -\frac{c}{M_p la} & -\frac{d}{M_p la} & -\frac{d}{M_p la} \end{bmatrix} \quad D_p = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{ga}{l} \\ 0 \\ -\frac{(K_x + K_y)}{M_p l} abcd + \frac{(K_x - K_y)}{M_p} cd \end{bmatrix}$$

$$X_p(t) = \begin{pmatrix} \delta\theta(t) \\ \delta\dot{\theta}(t) \\ \delta\phi(t) \\ \delta\dot{\psi}(t) \end{pmatrix} \quad X_{pr}(t) = \begin{pmatrix} \delta x_s(t) \\ \delta y_s(t) \\ \delta x_m(t) \\ \delta y_m(t) \end{pmatrix}$$

이다. 끝으로 집광기에 대해서는

$$\dot{X}_m(t) = A_m X_m(t) + A_{mr} X_{mr}(t) + B_m u_m(t) + D_m \qquad (31)$$

과 같이 나타낼 수 있으며 각 파라메타는 다음과 같다.

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_x}{M_m} & -\frac{D_x}{M_m} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_y}{M_m} & -\frac{D_y}{M_m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{D_\psi}{I_m} \end{bmatrix} \quad A_{mr} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{K_x bd}{M_m} & -\frac{K_x ac}{M_m} \\ 0 & 0 \\ \frac{K_y ac}{M_m} & \frac{K_y ad}{M_m} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{M_m} & \frac{1}{M_m} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{r_m}{I_m} & \frac{r_m}{I_m} \end{bmatrix}$$

$$D_m = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad X_m(t) = \begin{pmatrix} \delta x_m(t) \\ \delta \dot{x}_m(t) \\ \delta y_m(t) \\ \delta \dot{y}_m(t) \\ \delta \psi_m(t) \\ \delta \dot{\psi}_m(t) \end{pmatrix} \quad X_{mr}(t) = \begin{pmatrix} \delta\theta(t) \\ \delta\phi(t) \end{pmatrix}$$

식 (29)-(31)와 같이 얻어진 상태 방정식으로부터 각 하부 시스템 사이에 작용하는 요소들을 그려보면 Fig. 5와 같다.

$$\begin{bmatrix} \delta\dot{x}_s \\ \delta\ddot{x}_s \\ \delta\dot{y}_s \\ \delta\ddot{y}_s \\ \delta\dot{\psi}_s \\ \delta\ddot{\psi}_s \\ \delta\dot{\theta} \\ \delta\ddot{\theta} \\ \delta\dot{\phi} \\ \delta\ddot{\phi} \\ \delta\dot{x}_m \\ \delta\ddot{x}_m \\ \delta\dot{y}_m \\ \delta\ddot{y}_m \\ \delta\dot{\psi}_m \\ \delta\ddot{\psi}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{D_x}{M_s} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{M_p b^2 dg}{M_s} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{D_y}{M_s} & 0 & 0 & \frac{M_p b^2 cg}{M_s} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{D_\psi}{I_s} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{bdD_x}{Ml} & 0 & \frac{bcD_x}{Ml} & 0 & 0 & -\frac{ga}{l} + \frac{a}{Ml} & 0 & \frac{\tilde{b}}{M} & 0 & \frac{K_x bd}{Ml} & 0 & \frac{K_x bc}{Ml} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{cD_y}{Mla} & 0 & \frac{dD_y}{Mla} & 0 & 0 & \frac{bcd(K_x - K_y)}{Ma} & 0 & \frac{c^2(K_x + K_y)}{M} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_x bd}{M} & 0 & \frac{K_x ac}{M_m} & 0 & -\frac{D_x}{M_m} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_x}{M_m} & 0 & -\frac{D_x}{M_m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_y ac}{M} & 0 & \frac{K_y ad}{M_m} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_y ac}{M_m} & 0 & -\frac{K_y}{M_m} & -\frac{D_\psi}{M_m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{D_\psi}{I_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_s \\ \delta\dot{x}_s \\ \delta y_s \\ \delta\dot{y}_s \\ \delta\psi_s \\ \delta\dot{\psi}_s \\ \delta\theta \\ \delta\dot{\theta} \\ \delta\phi \\ \delta\dot{\phi} \\ \delta x_m \\ \delta\dot{x}_m \\ \delta y_m \\ \delta\dot{y}_m \\ \delta\psi_m \\ \delta\dot{\psi}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{M} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{M_s} & \frac{1}{M_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_s}{I_s} & \frac{r_s}{I_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{bd}{Ml} & -\frac{bc}{Ml} & -\frac{bc}{Ml} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{c}{Mla} & -\frac{d}{Mla} & -\frac{d}{Mla} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{M_m} & \frac{1}{M_m} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{r_m}{I_m} & \frac{r_m}{I_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_s \\ \delta y_s \\ \delta\psi_s \\ \delta x_m \\ \delta y_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{M_p}{M} abdg \\ 0 \\ \frac{M_p}{M} abcg \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{ga}{l} \\ 0 \\ -\frac{(K_x + K_y)}{Ml} abcd + \frac{(K_x - K_y)}{M} cd \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (28)$$

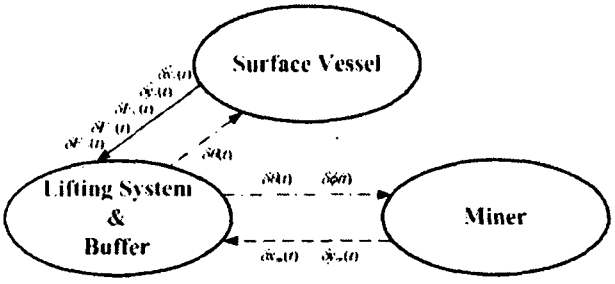

Fig. 5 Interacting terms of deep seabed mining system

일반적으로, 대규모 시스템을 구성하는 하부 시스템들로 완전하게 분산시키고 그 분산된 하부 시스템 각각을 제어하기 위해서는, 반드시 각 하부 시스템 내에서 다른 하부 시스템들로부터 영향을 받는 요소의 정보가 필요하다. 분산 제어에 있어서 가장 큰 문제점은 그러한 요소들에 대한 정보를 각 하부 시스템에서 어떻게 얻느냐는 것이다.

Fig. 5를 보면 심해저 채광 시스템에서의 채광선과 집광기의 경우는 다른 시스템들로부터의 상호 작용 요소가 매우 작다. 그러나 양광 시스템과 버퍼의 경우는 채광선과 집광기의 많은 요소들로부터 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 그러므로 실제 양광 시스템과 버퍼 내에서 채광선과 집광기로부터의 작용 요소에 대한 정보를 얻는다는 것은 매우 힘들다. 이 문제를 해결하기 위해서는 채광선과 양광 시스템과 버퍼를 하나의 시스템으로 가정하고 분산 제어를 적용시키는 것이 타당하다고 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 심해저 채광시스템에 대한 분산 제어법의 적용성에 대한 기초 연구로서 채광시스템의 양광시스템과 버퍼 그리고 유연관을 각각 구면진자와 2차원 스프링 연결이라고 가정하여 모델을 단순화 한 후, 그 단순 모델에 대하여 운동 방정식을 도출하였다. 여기서 도출된 운동 방정식을 바탕으로 심해저 채광시스템의 특성과 분산 제어의 적용 가능성을 분석하였다. 그 결과 양광시스템과 버퍼를 채광선과 함께 하나의 하부 시스템으로 두고 분산 제어를 적용시키는 것이 타당함을 확인했다.

후 기

본 논문은 해양수산특정연구과제인 "심해저 집광시스템 및 채광운용기술 개발" 과제의 일부분으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

양승일 외 (1995). "심해저 광물자원 개발 기술 및 환경보전연구 - 심해저 망간단괴 채광기술 연구", 한국해양연구원 보고서, BSN350-1907D.

양승일 외 (1997). "심해저 광물자원 개발 기술 및 환경보전연구 - 심해저 망간단괴 채광기술 연구", 한국해양연구원 보고서, UCN376-2068D.

홍 섭 외 (2001). "심해저 망간단괴 집광시스템 개발 및 채광운용 실용화 연구", 한국해양연구원 보고서, 2000-N-LD-01-C-20002.

Siljak D.D. and Vukcevic M.B. (1976). "Decentralization, stabilization and estimation of large-scale linear systems", IEEE Trans., AC-21, pp.363-366.

Siljak D.D. and Vukcevic M.B. (1978). "On decentralized estimation", International Journal of Control, Vol. 27, pp.113-131.

Aldeen M. (1991). "Interaction modelling approach to distributed control with application to power systems", International Journal of Control, Vol. 53, pp.1035-1054.

Yeu T.K. (2003). "Decentralized control of large-scale interconnected descriptor systems via FDI approach", Ph.D. Thesis, Kumamoto Univ. Japan.

Meirovitch L. (1970). "Methods of analytical dynamics", McGraw-Hill, Inc.

김상봉, 하주석 (1992). "메카니칼 시스템 제어", (주)한미출판.