

심해저 채광시스템에 대한 분산제어기 설계에 관한 연구

여태경* · 박성재 · 홍 섭 · 김형우 · 최종수
한국해양연구원 해양시스템안전연구소

Design of a Decentralized Controller for Deep-sea Mining System

TAE-KYEONG YEU*, SOUNG-JEA PARK, SUP HONG, HYUNG-WOO KIM, AND JONG-SU CHOI
MOERI/KORDI, 171 Jang-dong Yuseong, Daejeon 305-343, Korea

심해채광시스템(Deep-sea mining system)은 보편적으로 수상선(Surface vessel), 양광관(Lifting system), 버퍼(Buffer), 유연관(Flexible pipe) 그리고 집광기(Miner)로 구성된다. 이러한 채광시스템은 하부시스템들(Subsystems)로 구성되기 때문에 대규모 시스템(Large-scale system)으로 가정할 수 있다. 대규모 시스템을 제어하기 위하여, 최근에는 분산제어기법(Decentralized control approach)이 널리 적용되고 있다. 본 논문에서는 대규모 시스템인 채광시스템에 분산제어 기법의 적용성에 대한 기본연구로서, 먼저 심해채광시스템을 유사 모델(양광관과 버퍼를 구면진자 유연관을 2차원 선형 스프링 결합)로 가정하고 간략하게 모델화하였다. 간략화된 모델을 바탕으로, 대규모 심해채광시스템을 2개의 하부 시스템, 수상선, 양광관과 버퍼로 구성된 시스템과 집광기 시스템으로 각각 나누었다. 다음으로 각 하부 시스템 사이의 상호작용 요소(Interaction term)를 외란(Disturbance)으로 가정하고, 각 하부시스템에 대한 분산제어기를 설계하였다. 여기서 제어기는 집광기가 주어진 경로를 움직이는 동안, 집광기 시스템과 수상선, 양광관과 버퍼 시스템 사이의 거리가 일정하게 유지되도록 제어하였다. 끝으로 제안된 제어기의 효율성을 검증하기 위해, 간략화된 모델을 이용한 수치 시뮬레이션을 수행하였다.

The deep-sea mining system is generally composed of surface vessel, lifting system, buffer, flexible pipe and miner. The mining system can be regarded as a large-scale system in which each subsystem is interconnected to other ones. In order to control a large-scale system, decentralized control approaches have been proposed recently. In this paper, as a basic study on application of decentralized control, firstly, the mining system was modeled in a simplified way. Lifting system and buffer were regarded as a spherical pendulum and the flexible pipe was taken as a two-dimensional linear spring connection. Based on the simplified model dynamics, the mining system can be decentralized two subsystems, the one consisting of surface vessel, lifting system and buffer, and the other, the miner. Next, this paper proposed the design of controller for each decentralized subsystem by regarding the interacting terms as disturbances. The controllers kept the constant distance between two subsystems during the miner was moving on the specified track. Finally, the efficiency of proposed controller was proven through the numerical simulation of the derived model.

Keywords: Large-Scale System, Deep Seabed Mining System, Decentralized Controller, Numerical Simulation

서 론

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 망간 단괴 개발은 필수적이라고 하지 않을 수 없다.

심해저 채광 시스템(Deep Seabed Mining System)은 심해저면의 집광기(Mining), 양광관과 양광 펌프 시스템(Lifting Pipe

and Pumping System) 및 버퍼(Buffer) 그리고 해상의 채광선(Surface Vessel)으로 구성된다. 집광기에 의해서 해저면으로부터 분리 채집되는 망간단괴는 중간 저장소인 양광관 하부의 버퍼에서 단괴의 유동 농도를 최적으로 조절한 후 양광관을 통하여 해상까지 연속으로 이동된다. 한편, 집광기와 버퍼 사이에 유연관(Flexible Pipe)을 통하여 망간단괴를 이송함으로써 집광기가 해저면에서 부드럽게 주행할 수 있도록 설계된다. 집광기와 버퍼를 연결하는 유연관은 집광기의 주행성능을 최대한 보장하기 위하여 집광기와는 수직 방향으로 연결되어 큰 아치형상을 유지하면서 버퍼로 연결되도록 설계된다. 이와 같이 버퍼의 위치제어에 의해서 버퍼와 집광기 간의 상대 오차가 최적으로 유지될 때 집광기의 해저면에서의 주행 성능이 보장되며, 집광기의

*Corresponding author: yeutk@moeri.re.kr

우수한 주행 성능은 망간단괴 채광 시스템의 상업 생산 규모를 결정하는 가장 중요한 요소가 된다(양승일 등, 1995; 양승일 등, 1997; 홍섭 등, 2001).

일반적으로 채광 시스템과 같은 대규모 시스템(Large-scale System)을 제어하는 일반적인 방식은, 각 하부 시스템(Subsystem)의 정보들이 중앙 제어실로 보내지며, 그러한 정보들을 이용하여 최적의 제어치(Optimal controller)를 계산한 후, 그 제어치를 통해 전체 시스템을 안정화 시키는 것이다. 그러나 많은 하부 시스템들의 상호 결합으로 이루어져 있는 대규모 시스템의 특성상 중앙에서 모든 정보를 수집하고 정보들을 처리하기란 매우 어렵다. 만약, 그것이 가능하더라도 비용 그리고 계산 및 처리 시간 등의 문제점이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근에 제안되고 있는 방법 중의 하나가 전체 시스템을 각 하부 시스템으로 분해하고, 각각의 시스템에 대하여 제어기를 설계하는 분산 제어법(Decentralized Control Method)이다(Siljak and Vukcevic, 1976; Siljak and Vukcevic, 1978; Aldeen, 1991). 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 큰 어려움은 전체 시스템을 분해하는 과정에서 발생하는 각 하부 시스템들 사이에 상호작용 요소들(Interacting terms)을 처리하는 방법이다(Meirovitch, 1970).

본 논문에서는 심해저 채광 시스템에 대한 분산 제어법의 적용성에 대한 기본적 연구로서 먼저, 채광 시스템을 간단하게 모델화하였다. 모델화 과정에서 양광 시스템과 버퍼를 구면진자(Spherical Pendulum)로 단순화하며, 유연관은 2차원 선형 스프링 결합으로 가정하였다. 위와 같은 가정 하에서 유도된 모델을 바탕으로, 심해저 채광 시스템 상태 변수의 연결 특성을 분석하고, 그것을 토대로 각각의 하부 시스템으로 나눈 후, 각 하부시스템에 대하여 간단한 제어기를 설계하였다. 끝으로, 제안된 방법과 적용된 제어기의 성능을 검증하기 위하여, 집광기가 주어진 경로를 따라 움직일 수 있도록 수상선, 양광관 및 버퍼 시스템, 그리고 집광기 제어에 대하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다.

심해저 채광 시스템

Fig. 1은 연속 채광 개념의 심해저 망간단괴 채광 시스템을 보여준다. 망간단괴의 최적의 양광유동 농도를 조절하는 기능을 가지는 버퍼 및 버퍼와 집광기를 연결하는 유연관은 연속 채광 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.

채광 시스템의 통합운용은 망간단괴의 원활한 채집을 위해, 버퍼와 집광기 사이 거리가 일정하게 유지되도록 집광기와 채광선을 적절히 제어하는 것이다. 본 연구에서는 집광기가 미리 설정된 경로를 따라 일정한 속도로 움직이고, 채광선은 버퍼-집광기 사이의 거리를 일정하게 유지시키도록 제어하는 것이 목표이다.

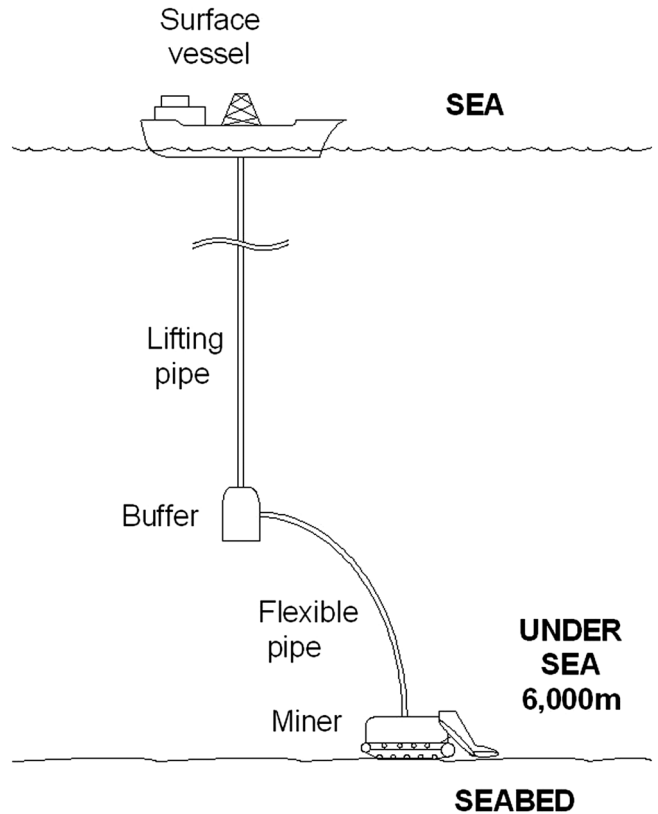


Fig. 1. Concept view of deep-sea mining system.

심해저 채광 시스템의 모델

채광 시스템을 간단하게 모델링하기 위하여 양광 시스템과 버퍼를 구면 진자로, 유연관을 2차원 선형 스프링 결합으로 가정하고, 집광기의 회전 운동에 의한 유연관에 미치는 영향을 무시하면, Fig. 1의 채광 시스템은 Fig. 2와 같이 간략하게 표현될 수 있다. Fig. 2의 단순화 모델에 대한 상태 방정식을 유도하기 위하여 본 연구에서는 라그랑제(Lagrange)의 운동 방정식을 이용하기로 한다. 일반적인 라그랑제운동방정식은 다음과 같다.

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

여기서, q_i 는 각 좌표의 변위, 선회각에 대한 변수, T 는 운동 에너지, D 는 손실 에너지, U 는 위치 에너지 그리고 u_i 는 외부 입력을 나타낸다.

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

채광선과 구면 진자의 운동 방정식

채광선과 구면 진자의 단순 모델은 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, θ 는 구면 진자가 Z축과 이루는 각, ϕ 는 진자를 X-Y 평면에 투영시켰을 때 X축과 이루는 각, 그리고 μ 는 채광선의 회

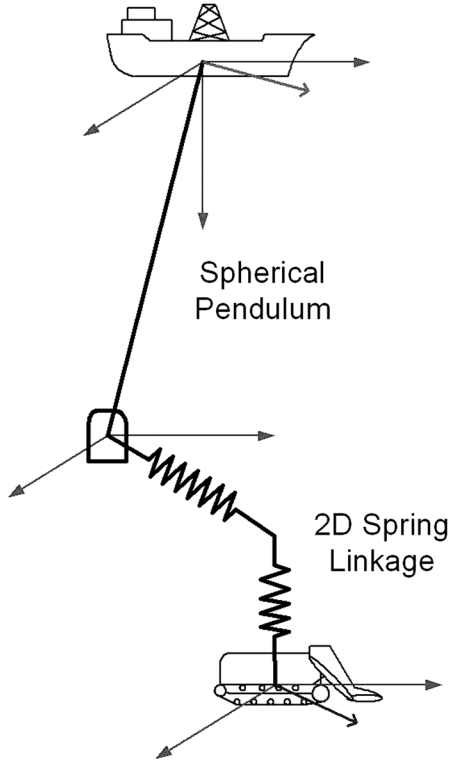


Fig. 2. Simplified model of deep seabed mining system.

전각, l 은 양광관의 길이를 각각 나타낸다. 또한 채광선에 있어서 F_{s1} 은 주 트러스트(Main thruster), F_{s2} 와 F_{s3} 는 측면 트러스트(Side thruster)이며, r_{s1} 과 r_{s2} 는 무게 중심에서 측면 트러스트까지의 거리를 나타낸다.

먼저 버퍼의 위치를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_s l \sin\theta \cos\phi \\ y_s l \sin\theta \sin\phi \\ l \cos\theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서 x_s, y_s 는 수상선의 중심위치를 나타낸다.

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

$$\begin{aligned} T_{sp} &= \frac{1}{2}M_s(\dot{x}_s^2 + \dot{y}_s^2) + \frac{1}{2}M_p \left(\frac{d}{dt}(x_s - l \sin\theta \cos\phi) \right)^2 \\ &\quad + \frac{1}{2}M_p \left(\frac{d}{dt}(y_s - l \sin\theta \sin\phi) \right)^2 + \frac{1}{2}M_p \left(\frac{d}{dt}(l \cos\theta) \right)^2 + \frac{1}{2}I_s \dot{\psi}_s^2 \\ D_{sp} &= \frac{1}{2}(D_{x_s} \dot{x}_s^2 + D_{y_s} \dot{y}_s^2 + D_{\psi_s} \dot{\psi}_s^2 + D_{\theta} \dot{\theta}^2 + D_{\phi} \dot{\phi}^2) \\ U_{sp} &= M_p g l (1 - \cos\theta) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, M_s, I_s, M_p 는 채광선 중량 및 관성모멘트, 그리고 진자 중량, $D_{x_s}, D_{y_s}, D_{\psi_s}, D_{\theta}, D_{\phi}$ 는 마찰계수이다. 또한, 아래첨자 sp는 Fig. 3에서의 채광선-진자(Surface vessel-Pendulum)를 의미한다.

식 (3)을 식 (1)의 라그랑제 방정식으로 풀고, 상태 변수에 관하여 전개한 후 각 상태변수들 $[\dot{x}_s, x_s, \dot{y}_s, y_s, \dot{\psi}_s, \psi_s, \dot{\theta}, \theta, \dot{\phi}, \phi]$ 의 평형점들, $\sin\theta \approx \theta, \cos\theta \approx 1, \sin\phi \approx \phi, \cos\phi \approx \phi, \dot{\theta} = \dot{\phi} \approx 0, \dot{\theta}^2 = \dot{\phi}^2 \approx 0, \theta^2 = \phi^2 \approx 0$ 에 대하여 선형화하면 다음의 식이 유도된다.

$$\begin{aligned} (M_s + M_p)\ddot{x}_s + D_{x_s}\dot{x}_s - M_p l \ddot{\theta} &= F_{s1} \\ (M_s + M_p)\ddot{y}_s + D_{y_s}\dot{y}_s - M_p l \ddot{\phi} &= F_{s2} + F_{s3} \\ I_s \ddot{\psi}_s + D_{\psi_s} \dot{\psi}_s &= r_{s1} F_{s2} - r_{s2} F_{s3} \\ \ddot{\theta} &= -\frac{1}{l}(\ddot{x}_s + \phi \ddot{y}_s + g\theta) \\ \ddot{\phi} &= -\frac{1}{l\theta}(\phi \ddot{x}_s + \ddot{y}_s) \end{aligned} \quad (4)$$

구면 진자와 집광기의 운동 방정식

해저 연약지반을 주행하며 망간단괴를 채집하는 집광기에 대하여, 본 연구에서는 간략한 방정식을 유도하기 위하여 2륜 차량으로 가정하여 모델링한다. 구면 진자와 집광기에 대한 단순 모델은 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, K_x 와 K_z 는 각각 X-Y면과 Z축의 스프링 상수이며, K_x 는 X축 방향의 스프링 상수로서 $K_x = K_{xy} \cos\gamma$ 로, K_y 는 Y축 방향의 스프링 상수로서 $K_y = K_{xy} \sin\gamma$ 로 계산되며, γ 는 진자와 집광기의 중심 좌표로부터 계산된다. 그리고 x_{pm}, y_{pm}, z_{pm} 은 각 축의 스프링 길이를 나타낸다. 또한 M_m 은 집광기의 하중, ψ_m 은 집광기의 선화각이며, F_{m1} 과 F_{m2} 는 집광기 트랙의 추진력, r_{m1} 과 r_{m2} 는 무게중심에서 추진력까지의 거리를 나타낸다.

Fig. 4에 대한 에너지 방정식을 구하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} T_{pm} &= \frac{1}{2}M_m(\dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2) + \frac{1}{2}M_p l^2 (\dot{\theta}^2 + (1 - \cos^2\theta)\dot{\phi}^2) \\ D_{pm} &= \frac{1}{2}(D_{x_m} \dot{x}_m^2 + D_{y_m} \dot{y}_m^2 + D_{\theta} \dot{\theta}^2 + D_{\phi} \dot{\phi}^2) \\ U_{pm} &= \frac{1}{2}K_x(x_m - l \sin\theta \cos\phi)^2 + \frac{1}{2}K_y(y_m - l \sin\theta \sin\phi)^2 + \frac{1}{2}K_z(y_m - l \cos\theta)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 D_{x_m} 과 D_{y_m} 은 해저지면에 대한 집광기의 마찰계수이다.

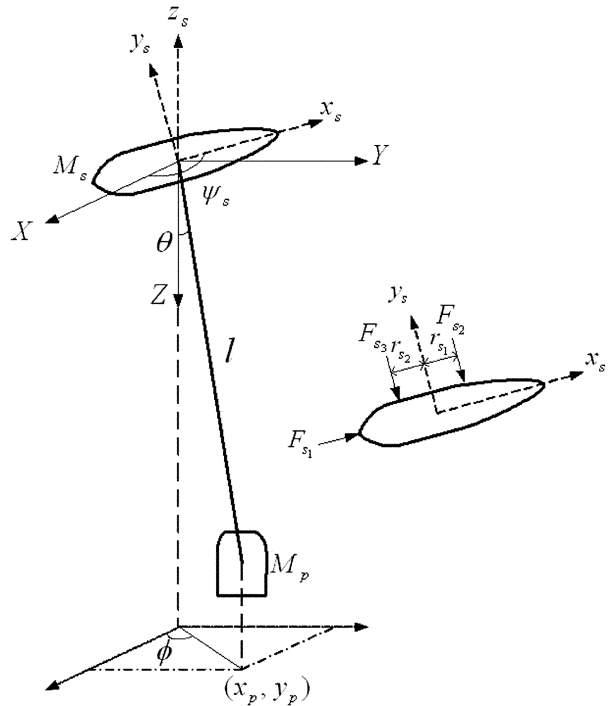


Fig. 3. Model of surface vessel, lifting system and buffer.

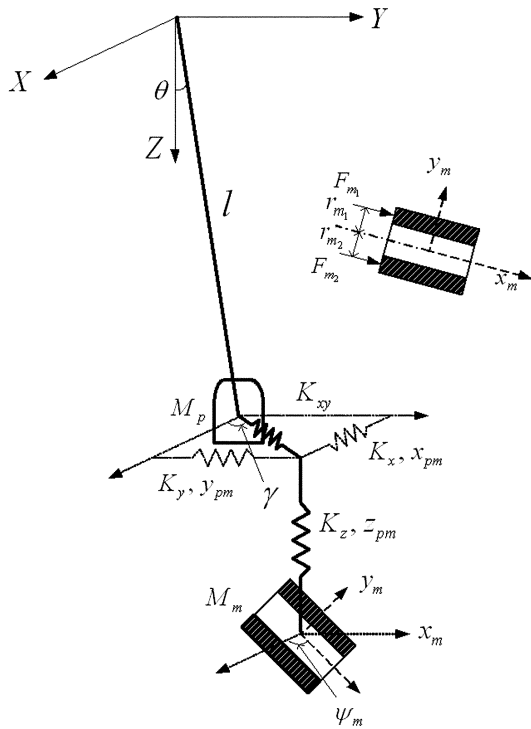


Fig. 4. Model of lifting system, buffer and miner system.

식 (5)의 라그랑제 방정식을 각 상태 변수 $[\dot{x}_s, x_s, \dot{y}_s, y_s, \dot{\psi}_s, \psi_s, \dot{\theta}, \theta, \dot{\phi}, \phi]$ 의 평형점에 대하여 식 (4)와 같이 선형화하면 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned}
 M_m \ddot{x}_m + D_{x_s} \dot{x}_m + K_x(x_m - l\theta) &= F_{m_1} + F_{m_2} \\
 M_m \ddot{y}_m + D_{y_s} \dot{y}_m + K_y y_m &= 0 \\
 I_m \ddot{\psi}_m + D_{\psi_s} \dot{\psi}_m &= r_{m_1} F_{m_1} - r_{m_2} F_{m_2} \\
 M_m l^2 \ddot{\theta} &= d_\theta \\
 M_m l^2 \ddot{\phi} &= d_\phi
 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 d_θ 와 d_ϕ 는 스프링 K_{xy} 에 의해 발생된 θ 방향과 ϕ 방향의 관성모멘트를 나타낸다.

통합 채광시스템의 분산화

앞의 절에서 얻어진 방정식을 하나로 묶어, 전체 시스템 상태방정식으로 정리하면 식 (7)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \ddot{x}_s \\ \dot{y}_s \\ \ddot{y}_s \\ \dot{\psi}_s \\ \ddot{\psi}_s \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \\ \dot{x}_m \\ \ddot{x}_m \\ \dot{y}_m \\ \ddot{y}_m \\ \dot{\psi}_m \\ \ddot{\psi}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 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_s g}{M_s} & 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 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{D_y}{M_s} & 0 & 0 & 0 & 0 & 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 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{D_{\psi_s}}{I_s} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{D_\theta}{M_s l} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{M_s - M_p}{M_s l} g & 0 & -\frac{K_x}{M_s l} & 0 & \frac{K_y}{M_s l} & 0 & 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 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_x}{M_s l} & 0 & 0 & 0 & 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 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{M_m} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{M_m} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{M_m} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{M_m} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_m} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ \dot{x}_s \\ y_s \\ \dot{y}_s \\ \psi_s \\ \dot{\psi}_s \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ \phi \\ \dot{\phi} \\ x_m \\ \dot{x}_m \\ y_m \\ \dot{y}_m \\ \psi_m \\ \dot{\psi}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{M_s} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 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 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_{m_1}}{I_s} & -\frac{r_{m_2}}{I_s} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{M_s l} & -\frac{c}{M_s l} & -\frac{c}{M_s l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{m_1} \\ F_{m_2} \\ F_{m_1} \\ F_{m_2} \\ F_{m_1} \\ F_{m_2} \\ F_{m_1} \\ F_{m_2} \\ F_{m_1} \\ F_{m_2} \\ F_{m_1} \\ F_{m_2} \\ F_{m_1} \\ F_{m_2} \\ F_{m_1} \\ F_{m_2} \\ F_{m_1} \\ F_{m_2} \\ F_{m_1} \\ F_{m_2} \end{bmatrix} \tag{7}$$

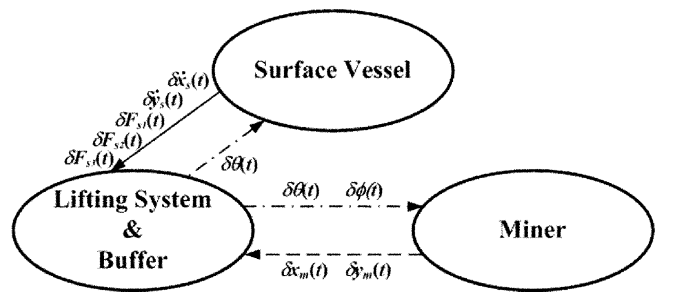


Fig. 5. Interaction terms of deep seabed mining system.

식 (7)로부터, 각 하부 시스템 사이에 작용하는 요소들의 관계를 도식화하면 Fig. 5와 같다.

Fig. 5를 살펴보면, 수상선과 집광기 사이에는 상호작용 요소가 존재하지 않으며, 수상선과 양광관 및 버퍼 사이에는 많은 요소들이 상호작용하고 있고, 양광관 및 버퍼와 집광기 사이에는 비교적 적은 양의 요소들이 영향을 주고받고 있다. 이를 보다 자세히 살펴보면, 양광 시스템과 버퍼 그리고 집광기 사이에는 버퍼의 각도 성분 $\theta(t)$, $\phi(t)$ 와 집광기의 위치 성분 $x_m(t)$, $y_m(t)$ 이 양광 시스템과 버퍼 그리고 수상선에 있어서는 수상선의 속도 성분 $\dot{x}(t)$, $\dot{y}(t)$, 버퍼의 각도 성분 $\theta(t)$ 그리고 채광선의 각 방향의 추진력 $F_{s_1}(t)$, $F_{s_2}(t)$, $F_{s_3}(t)$ 등의 많은 요소가 상호작용하고 있음을 알 수 있다. 현실적으로 양광 및 버퍼시스템 내에서 수상선의 정보들을 얻는다는 것은 매우 어렵다.

이로부터 심해저 통합 채광 시스템은 2개의 하부 시스템, 즉 (1) 수상선, 양광 및 버퍼 시스템을 하나로 묶은 시스템과 (2) 집광기 시스템으로 분해한 후, 각각에 대하여 분산제어기를 적용하는 것이 타당함을 확인 할 수 있다.

분산제어기 설계

심해저 통합 채광시스템의 제어에 있어서의 핵심은 집광기가 주어진 경로를 주행하면서 단괴를 채집할 수 있도록 수상선, 양광관 및 버퍼 시스템이 일정한 속도와 거리를 유지하면서 운용되는 것이다. 연약지반을 주행하는 집광기의 경우, 유연관으로부터 가해지는 외력에 대하여 저항할 수 있는 힘은 매우 약하다. 따라서 버퍼의 위치 제어가 통합 채광시스템 운용에 있어 가장 중요한 기술이다.

수상선, 양광관 및 버퍼 시스템의 제어기 설계

앞서 설명한 바와 같이, 수상선, 양광관 및 버퍼 시스템에 있어서는 버퍼가 집광기와 일정한 거리를 유지하도록 수상선을 적절하게 제어하여야 한다. 본 연구에서는 버퍼의 위치 제어를 위하여, 집광기가 움직이는 경로와 동일한 경로로 이동하면서 $\theta(t)$ 와 $\phi(t)$ 가 0이 유지되도록 수상선을 제어하는 것이 목표이다. 이를 위해, 본 시스템에 대해서는 목표치를 빠르게 추종하도록 피드포워드 보상기(Feedforward compensator)를 포함하고 있는 2자유도 제어기(Two-Degree-of-Freedom Controller)를 적용한다.

일반적으로, 제어 시스템에 요구되는 가장 기본적인 목적중의 하나가 강인한 서보 특성을 가지는 것이다. 이것은 시스템의 불확실성 또는 외부 외란에 대하여 정상 상태에서 목표치를 강인하게 추종하는 것을 의미한다. 주어진 목표치에 대하여 정상상태 추종 오차를 제거하기 위하여, 일반적으로 내부 보상기를 설계하여 적용한다. LQ 레귤레이터 이론을 기초로 하는 2자유도 제어기는 Fujisaki(1991)와 Ikeda(1992)에 의해서 제안되었다. 수상선과 진자로 구성된 시스템에 대하여, 제어 추종 응답성을 빠르게 하며 강인한 안정성을 보장하도록 높은 이득 보상기(high gain compensator)를 포함한 2자유도 제어기(Kim, 1995)를 적용하고자 한다.

본 연구에서 적용될 2자유도 제어기의 구성은 Fig. 6과 같다.

먼저, 수상선, 양광관 및 버퍼시스템의 상태방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{X}_s(t) &= A_s X_s(t) + B_s u_s(t) \\ y_s(t) &= C_s X_s(t) \end{aligned} \tag{8}$$

여기서 $X_s \in \mathbb{R}^n$, $y_s \in \mathbb{R}$, $u_s \in \mathbb{R}^m$ 는 상태변수, 출력, 제어입력을 각각 나타낸다. 위의 시스템이 다음의 조건을 만족한다고 가정한다.

(I) (A_s, B_s) 는 안정하다.

$$(II) \text{rank} \begin{bmatrix} A_s & B_s \\ C_s & 0 \end{bmatrix} = n+m$$

이것으로부터, Fig. 6에서 나타낸 시스템의 상태방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{w}_s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_s + B(F_0 + GF_1) & B_s G \\ -C_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ w_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_s H_0 \\ I \end{bmatrix} r_s \\ y_s &= [C_s \ 0] \begin{bmatrix} x_s \\ w_s \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{9}$$

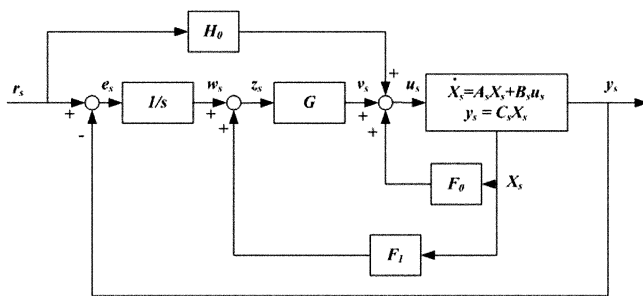


Fig. 6. Diagram of two-degree-of-freedom controller.

여기서 w_s 는 적분보상기이다. 또한 F_0 는 최적 레귤레이터 이득(gain)으로서, 행렬(A_s, B_s)를 안정화시킨다. 게인 F_1 과 H_0 는 다음과 같이 정의된다.

$$F_1 = C_s(A_s + B_s F_0)^{-1} \tag{10}$$

$$H_0 = [-C_s(A_s + B_s F_0)]^{-1} \tag{11}$$

$$G = (F_1 B_s)^{-1} \tag{12}$$

집광기 시스템 제어기 설계

슬라이딩 모드 제어 이론(Sliding mode control theory)은 비홀로노믹(Nonholonomic) 특성과 제한된 주행환경에서의 이동 로봇(Mobile robot)의 경로 제어에 많이 적용되고 있다(Yang and Kim., 1999). 일반적으로, 슬라이딩 모드 제어는 임의의 안정한 면(슬라이딩 면)을 정의한 후, 출력 오차가 최소화되도록, 즉 슬라이딩 면(Sliding surface)으로 수렴하도록 비선형 특성을 갖는 입력을 설계하는 방법이다. 이 방법은 제어기 구조가 간단하며 설계가 쉽고, 파라미터 변동 또는 미지 외란(Unknown disturbance)을 가지는 시스템에 대해서 매우 효과적이다.

본 연구에서는 집광기 시스템을 간략하게 표현하기 위해 무한 궤도형 집광기 모델을 Fig. 7과 같이 2륜 차량 모델로 가정하였다. 그리고 유연관의 움직임으로 인하여 집광기에 가해지는 영향을 미지의 외란으로 간주하고, 이러한 외란에 대하여 집광기가 주어진 경로를 추종할 수 있도록 슬라이딩 모드 제어를 적용하고자 한다.

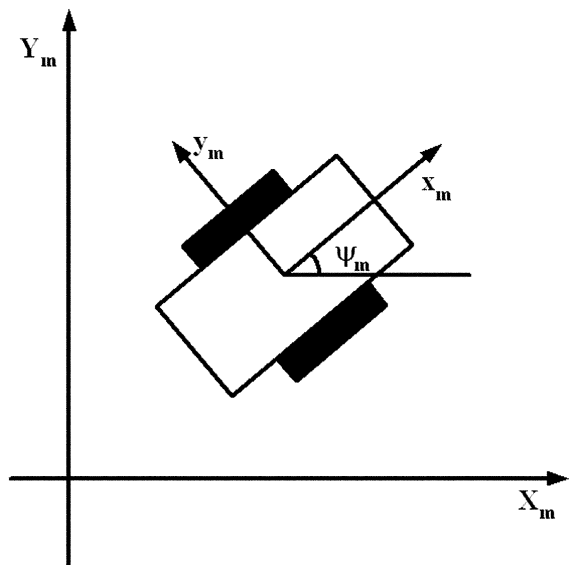


Fig. 7. Coordinate of miner(2-wheel mobile vehicle).

집광기의 자세는 고정좌표계에 의해 표현된다.

$$q_m = [X_m, Y_m, \psi_m]^T \tag{13}$$

내부 상태변수를 다음과 같이 선택한다.

$$z_m = [\dot{x}_m, \dot{\psi}_m]^T \tag{14}$$

단, 차량의 휠에는 슬립이 발생하지 않는다고 가정한다. 따라서 다음의 조건을 만족한다.

$$\dot{Y}_m \cos(\psi_m) - \dot{X}_m \sin(\psi_m) = 0 \quad (15)$$

위의 제한조건은 간략하게 표현된다.

$$N(q_m)\dot{q}_m = 0 \quad (16)$$

비홀로노믹 조건하에서 식 (15)는 다음과 같이 유도된다.

$$\dot{q}_m = J(q_m)z_m \quad (17)$$

여기서 $J(q_m)$ 은 $J^T(q_m)N^T(q_m) = 0$ 을 만족한다. 집광기의 운동 방정식은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$H_m(q_m)\dot{z}_m + G_m(q_m, z_m) + \tau_d = t_m \quad (18)$$

여기서 $H_m(q_m)$ 은 관성을 포함한 행렬, $G_m(q_m, z_m)$ 은 코리올리 행렬, τ_m 은 입력 토크 벡터를 각각 나타낸다. 또한 외란 벡터 τ_d 는 행렬 $H_m(q_m)$ 와의 곱으로 표현되거나, 일정한 범위를 갖는 아래의 불확실 매칭 조건(Uncertainty matching condition)을 만족한다.

$$\tau_d = H_m(q_m)f, f = [f^1, f^2]^T, |f^i| \leq f_{m_i}, |f^2| \leq f_{m_2}$$

여기서, f_{m_1} 과 f_{m_2} 는 외란의 경계치이다.

추종 에러를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{bmatrix} e_{m_1} \\ e_{m_2} \\ e_{m_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi_m & \sin\psi_m & 0 \\ -\sin\psi_m & \cos\psi_m & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{mr} - X_m \\ Y_{mr} - Y_m \\ \psi_{mr} - \psi_m \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기서, x_{mr} , y_{mr} , ψ_{mr} 은 집광기의 위치와 선회각에 대한 목표값이다. 위의 방정식을 1차 및 2차 미분하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_{m_1} \\ \dot{e}_{m_2} \\ \dot{e}_{m_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & e_{m_2} \\ 0 & -e_{m_1} \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{\psi}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{x}_{mr} \cos e_{m_1} \\ \dot{x}_{mr} \sin e_{m_1} \\ \dot{\psi}_{mr} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{e}_{m_1} \\ \ddot{e}_{m_2} \\ \ddot{e}_{m_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \dot{e}_{m_2} \\ 0 & -\dot{e}_{m_1} \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{\psi}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & e_{m_2} \\ 0 & -e_{m_1} \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_m \\ \ddot{\psi}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \ddot{x}_{mr} \dot{e}_{m_1} \cos e_{m_1} \\ \ddot{x}_{mr} \dot{e}_{m_1} \sin e_{m_1} \\ \ddot{\psi}_{mr} \end{bmatrix} \quad (21)$$

슬라이딩 모드 제어를 설계하기 위한 슬라이딩 면을 다음과 같이 정의한다.

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{e}_{m_1} + k_1 e_{m_1} + k_2 \text{sgn}(e_{m_1}) \\ \dot{e}_{m_2} + k_3 e_{m_2} \end{bmatrix} e_{m_3} \quad (22)$$

여기서, k_1 , k_2 그리고 k_3 는 양의 값이며, sgn 은 sign 함수를 의미한다. 만약 슬라이딩 면에 이르면, 시스템 운동방정식은 $S = 0$ 로 수렴하여 다음의 미분방정식을 만족한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_{m_1} \\ \dot{e}_{m_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_1 e_{m_1} - k_2 \text{sgn}(e_{m_1}) \\ -k_3 e_{m_2} \end{bmatrix} e_{m_3} \quad (23)$$

Yang(1999)에 의해 제안된 계산 토크법에 의해 정의되는 제어입력은 다음과 같다.

$$H_m(q_m)\dot{z}_{mr} + G_m(q_m, z_m) + H_m(q_m)u_m = t_m \quad (24)$$

여기서 $u_m = [u_{m_1}, u_{m_2}]^T$ 는 에러방정식을 최소화하는 제어칙이다. 식 (24)와 식 (18)을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{z}_m + f &= \dot{z}_{mr} + u_m \\ \dot{z}_m - z_{mr} &= u_m - f \end{aligned} \quad (25)$$

식 (22)와 (23)로부터, 다음의 식이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_{m_1} \\ \dot{e}_{m_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{e}_{m_2} \dot{\psi}_m - \ddot{x}_m + e_{m_2} \ddot{\psi}_m - \dot{x}_{mr} \dot{e}_{m_1} \cos e_{m_1} \\ \dot{\psi}_{mr} - \dot{\psi}_m \end{bmatrix} \quad (26)$$

만약 $\ddot{x}_{mr} = 0$ 이면, 식 (26)은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_{m_1} \\ \dot{e}_{m_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_{mr} - \ddot{x}_m \\ \dot{\psi}_{mr} - \dot{\psi}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{e}_{m_2} \dot{\psi}_m + e_{m_2} \ddot{\psi}_m - \dot{x}_{mr} \dot{e}_{m_1} \cos e_{m_1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

식 (26)과 (27)로부터 다음 식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{S}_1 \\ \dot{S}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} u_{m_1} - f_1 \\ u_{m_2} - f_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{e}_{m_2} \dot{\psi}_m + e_{m_2} \ddot{\psi}_m - \dot{x}_{mr} \dot{e}_{m_1} \cos e_{m_1} \\ 0 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \dot{e}_{m_1} + k_1 e_{m_1} + k_2 \text{sgn}(e_{m_1}) \\ k_3 e_{m_2} \end{bmatrix} e_{m_3} \end{aligned} \quad (28)$$

제어칙 $u_m = [u_{m_1}, u_{m_2}]^T$ 를 다음과 같이 정의하자.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_{m_1} \\ u_{m_2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Q_1 & 0 \\ 0 & Q_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{sgn}(S_1) \\ \text{sgn}(S_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{e}_{m_2} \dot{\psi}_m + e_{m_2} \ddot{\psi}_m - \dot{x}_{mr} \dot{e}_{m_1} \cos e_{m_1} \\ 0 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \dot{e}_{m_1} + k_1 e_{m_1} + k_2 \text{sgn}(e_{m_1}) \\ k_3 e_{m_2} \end{bmatrix} e_{m_3} \end{aligned} \quad (29)$$

식 (29)에서 Q 와 P , $i = 1, 2$ 는 양의 상수 값이고, 반드시 리아프노프(Lyapunov) 함수 $V = \frac{1}{2} S^T S \geq 0$, $\dot{V} < 0$ 를 만족해야 한다. 따라서 $Q_i > 0$, $P_i \geq f_{m_i}$, $i = 1, 2$ 가 되도록 선정하면 된다.

수치 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 분산제어기의 성능을 검증하기 위하여 간단한 수치 시뮬레이션을 수행한다. 심해저 통합 채광 시스템의 각 하부 시스템에 대한 파라미터는 Table 1과 같이 설정하였다.

Table 1. Parameter values of mining system

Parameter	Value	Unit	Parameter	Value	Unit
M_s	250	ton	M_m	5	ton
D_{zs}	4000	kg·m ² /s	I_m	102	kg·m ²
D_{yx}	9000	kg·m ² /s	D_{xm}	50	kg·m ² /s
I_s	957000	kg·m ²	D_{ym}	80	kg·m ² /s
M_p	50	ton	K_x	500	kg/m ²
l	5000	m	K_y	500	kg/m ²
r_{s_1}	60	m	r_{m_1}	0.7	m
r_{s_2}	60	m	r_{m_2}	0.7	m

Table 1에 설정된 파라미터 중 집광기와 관련된 파라미터를 제외한 나머지는 임의의 적절한 값으로 설정하였다.

[시뮬레이션 조건]

- i) 샘플링 시간(Sampling time)은 0.1[sec]이다.
- ii) 시스템에 환경적 외란 즉, 파도 및 해류 등의 영향은 고려하지 않는다.
- iii) 식 (4)의 마지막 방정식에서 임펄스 모드(Impulsive mode)가 존재한다. 따라서 시뮬레이션 초기 과도한 응답이 나타나므로 이를 최소화하기 위해 모든 초기값은 0으로 한다.
- iv) 집광기에 있어 외란 요소는 버퍼와 집광기 사이의 위치 오차에 의해 발생하는 스프링 힘이다. 단, Z방향의 힘은 고려하지 않는다.
- v) 버퍼와 집광기 사이의 상대 위치 오차가 10 m 이하면, 유연관에 의한 영향력은 무시한다.

수상선/양광관/버퍼에 대한 2자유도계 제어기

“수상선, 양광관 및 버퍼 시스템의 제어기 설계”절에서 설명한 제어기 설계 절차에 의해 얻어진 2자유도 제어기는 다음과 같다.

$$F_1 = \begin{bmatrix} 133.4 & 69077.8 & 0.0 & 141 & 82.3 & 0.0 & 18835.2 & 5978.2 & 22928.1 & 333.7 \\ 819.2 & -426857.2 & 0.0 & 82.3 & -923.9 & 0.0 & 376467.2 & 371919.9 & 46165.5 & 7486.3 \\ 0.0 & 0.0 & 22.5 & 0.0 & 0.0 & -6.8 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 1.5 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 7653.0 & 0.0 & 0.0 & 14.0 \\ 0.0 & 8769.8 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & -7653.0 & 7653.0 & 0.0 & -14.0 \end{bmatrix}$$

$$H_0 = \begin{bmatrix} 315.07 & 0.27 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ -0.19 & 2.23 & 0.71 & 0.0 & 0.0 \\ -0.19 & 2.23 & -0.71 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} 31.507 & 2.700 & -0.0 & 0.0 & 0.0 \\ -1.909 & 22.278 & 70.710 & 0.0 & 0.0 \\ -1.909 & 22.278 & -70.710 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix}$$

집광기 시스템에 대한 슬라이딩 모드 제어기

“집광기 시스템 제어기 설계” 절에서 제안한 집광기 시스템에 대한 슬라이딩 모드 제어기는 다음과 같이 설계되었다.

$$Q = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 \\ 1.0 & 0.0 \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} 0.01 & 0.0 \\ 0.0 & 0.01 \end{bmatrix}$$

$$K_1 = 0.03, K_2 = 0.01, K_3 = 100.0$$

수치 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 연구는 통합 채광 시스템의 목표인 버퍼와 집광기의 경로 제어에 대한 기초적 연구로서, 전체 시스템을 하부 시스템으로 분해한 후, 각 하부시스템에 제어기를 설계하는 분산제어법을 적용하였다. Fig. 8은 버퍼와 집광기 사이의 위치 오차를, Fig. 9는 수상선, 버퍼 그리고 집광기의 움직인 경로를 각각 나타낸다.

특히, Fig. 9에서의 실선은 목표치 경로를 나타내며, 이것은 집광기가 망간단괴의 채집효율을 연속적 단위면적당 극대화하기 위하여 “ㄷ”형태로 설정하였다. Fig. 8과 9의 결과에서, 목표 경로가 수직으로 변화할 때, 즉 (1000, 0), (1000, 300), (0, 300), (300, 600)지

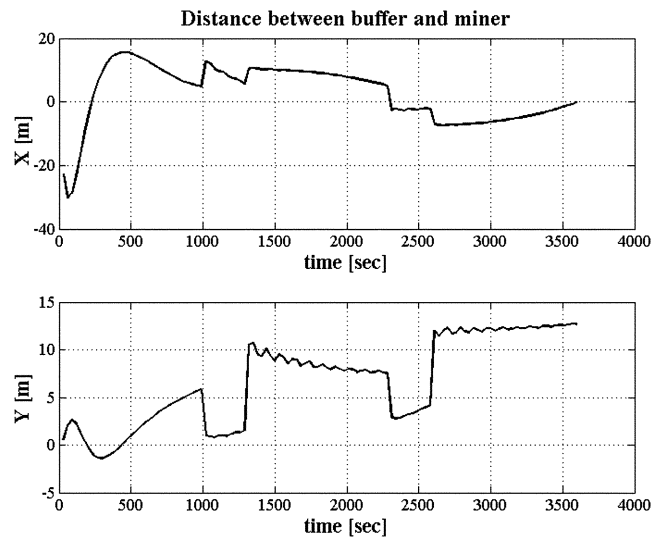


Fig. 8. Position error between buffer and miner.

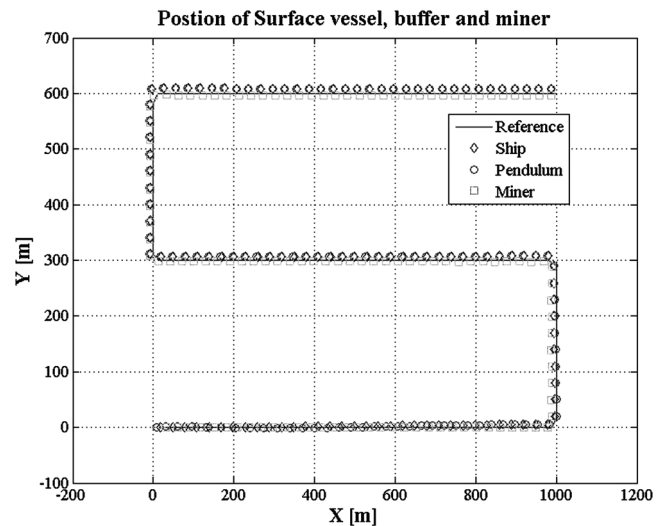


Fig. 9. Position of vessel, buffer and miner.

점을 각각 통과하는 시각(1000, 1300, 2300, 2600 [sec])에서, 버퍼와 집광기 사이의 상대오차가 비교적 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 특히, Fig. 8에서 Y방향의 위치 오차가 X방향에 비해 상대적으로 크게 발생하며, 수렴속도는 느림을 알 수 있다. 이것은 집광기가 양쪽 바퀴의 속도비에 따라 조정되므로, 측면으로부터의 외란에 대해서 극복할 수 있는 힘은 직진 주행에 비해 매우 작기 때문이다. 또한 버퍼와 집광기 사이의 상대 오차를 줄이기 위해서는 목표 경로의 설정도 매우 중요하다는 것을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과로부터 기본 목표인 버퍼와 집광기 사이의 상대 위치 제어가 비교적 잘 이루어졌음을 보여준다.

본 연구로부터 집광시스템에 있어 분산제어기의 적용 가능성에 대하여 일차적으로 입증되었으며, 각 하부 시스템에 대한 간단한 제어기를 통해 통합 시스템의 목표를 달성할 수 있다는 효율성도 검증되었다.

금번 연구 결과로부터, 차후 개선 및 고려되어야할 사항을 간략

하게 정리하면 다음과 같다.

- i) 비선형 요소까지 고려한 운동방정식 수립
- ii) 유연관의 운동방정식을 템퍼-스프링 모델로의 개선
- iii) 임펄스 모드에 대한 고려
- iv) 집광기를 지반의 슬립까지 고려한 트랙 차량으로의 모델링
- v) 버퍼와 집광기의 상대 위치 오차의 예측을 통한 제어기 설계

결 론

본 논문에서는 심해저 채광시스템에 대한 분산 제어법의 적용성에 대한 기초 연구로서 심해저 통합 채광 시스템에 대하여 양광 시스템과 버퍼 그리고 유연관을 각각 구면진자와 2차원 스프링 연결로 가정하여 모델을 단순화 한 뒤, 그 모델에 대하여 운동방정식을 도출하였다. 도출된 운동 방정식을 바탕으로 심해저 채광 시스템을 집광기 시스템 그리고 수상선, 양광 시스템과 버퍼를 하나로 묶은 시스템으로 각각 분해하여 분산제어기를 적용시키는 것이 타당함을 확인하였다. 본 연구에서는 수상선, 양광관 및 버퍼 시스템에 대해서는 2자유도 제어기, 집광기 시스템에는 슬라이딩 모드 제어기를 각각 분산제어기로 적용하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다.

사 사

본 논문은 국토해양부 연구과제인 “심해저 집광시스템 및 채광 운용기술 개발”과제의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

양승일 등, 1995. 심해저 광물자원 개발 기술 및 환경보전연구 - 심해저 망간단괴 채광기술 연구, 한국해양연구원 보고서,

BSN350-1907D.

양승일 등, 1997. 심해저 광물자원 개발 기술 및 환경보전연구 - 심해저 망간단괴 채광기술 연구, 한국해양연구원 보고서, UCN376-2068.D.

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

Aldeen, M., 1991 Interaction modelling approach to distributed control with application to power systems, *International Journal of Control*, **53**: 1035-1054.

Meirovitch, L. 1970. *Methods of analytical dynamics*. McGraw-Hill, Inc.

Kim, Y.B, M. Ikeda and Y. Fusisaki, 1995. Robust stability and high gain compensation of a two-degree of freedom servosystem. *Proce. 34th IEEE CDC*, pp. 1431-1436.

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

Siljak, D.D. and M.B. Vukcevic, 1978. On decentralized estimation. *International Journal of Control*, **27**: 113-131.

Yang, J.M and J.H. Kim, 1999. Sliding mode motion control of non-holonomic mobile robots, *IEEE Trans, on Robotics and Automation*, **15**(3): 578-587.

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

2008년 4월 6일 원고접수

2008년 7월 14일 수정본 채택

담당편집위원: 홍 섭