

해석심해자원개발용 버퍼의 동적위치제어기법

김기훈*, 최항순**, 홍 섭***

Dynamic Position Control Method for the Buffer Unit of a Deepsea Mining System

Kihun Kim*, Hang S. Choi** and Sup Hong***

요 약

심해자원채광시스템은 모선, 양광관, 버퍼, 집광기 등으로 구성된다. 양광관의 위쪽은 모선과 연결되고 아래쪽은 버퍼에 연결된다. 버퍼와 집광기는 유연 호스로 연결된다. 채광시스템의 원활한 운영을 위해서는 전체 시스템의 안정화가 이루어져야 하는데 이를 위해서는 버퍼의 위치를 능동적으로 제어해야한다. 본 연구에서 가장 중요한 부분은 길이 5000m에 달하는 양광관의 동적 거동해석이다. 양광관을 세장구조물로 단순화시켜 모델링하고 고유함수 전개법으로 해석하였으며, 버퍼에 장착되는 추진시스템에 대한 제어에는 PID 제어기법을 적용하였다. 버퍼에 작용하는 외력은 양광관에 작용하는 항력에 의한 반력이 지배적이므로 본 논문에서는 유연호스의 영향은 무시하였다. 파랑 중에서 모선은 저주파수 운동과 동시에 고주파 운동을 하게 되는데 버퍼가 추적하고자 하는 모선의 위치는 저주파수 운동에 해당하므로 고주파수 성분을 걸러내기 위하여 반드시 필터링을 필요로 한다. FIR 필터를 사용하여 모선 위치를 필터링한 값을 제어기의 목적위치로 설정하였다. 이러한 해석을 바탕으로 수치계산 알고리즘을 구축하여 모선의 여러 운동을 상징하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이러한 수치계산 결과 필터링을 통해 고주파수 성분이 잘 걸러짐을 확인하였다. 또한 버퍼의 위치와 속도에 대한 제어를 통해서 버퍼를 허용범위(watch circle) 안에 머무르게 하면서 전체시스템을 안정화시킨다는 것을 밝혔다.

※Keywords: Buffer(버퍼), Pipe(양광관), Mode Superposition(모드중첩), PID Control, FIR Digital Lowpass Filter

Abstract

This paper describes a control algorithm for the buffer of a deep-sea mining system, in which the buffer is connected to a long slender pipe and then to a surface ship on one end, and to a collector on sea floor through a flexible hose on the other end.

A mathematical modeling is established for designing the controller for buffer thrusters, in

접수일자: 2002년 1월 30일, 승인일자: 2002년 7월 1일

* 학생회원, 서울대학교 조선해양공학과 박사과정 (E-mail : shaton2@snu.ac.kr)

** 정회원, 서울대학교 조선해양공학과 교수 (E-mail : hschoi@plaza.snu.ac.kr)

*** 정회원, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 (E-mail : suphong@kriso.re.kr)

which the dynamic response of the long pipe is taken into account based on the mode superposition method. The fluid loading acting on the pipe is estimated by using Morison's formula. For simplicity, the surface ship is assumed to be kept stationary, the reaction from the flexible hose is ignored and only the lateral motions are considered.

In order to guide the buffer to react only to the low-frequency motion of the surface vessel, the FIR digital filter is introduced to a PID-based controller. It can be shown numerically that the high frequency component of the ship's motion can be effectively filtered out by using the FIR low pass filter.

1. 서론

산업화에 비례하여 육상의 자원이 고갈되어감에 따라 해양자원의 중요성이 부각되고 있다. 최근에는 수심 300m 내외의 영역에서의 해양자원 개발 단계를 지나 수심 1,000m 또는 그 이상의 심해역에 대한 개발이 현안문제로 대두되고 있다. 또한 1994년부터는 수심 6000m이상의 해역도 개발의 대상으로 인정하는 유엔의 해양개발법이 발효됨에 따라 심해역 거점확보를 위한 국가간 경쟁 또한

치열하게 전개되고 있다. 특히 하와이 근해의 C-C지역은 심해저 망간단괴가 상당량 매장되어 있는 지역이다. 우리나라는 현재 망간단괴 개발을 위한 유엔의 회원국으로 등록이 되어 있는 상태에서 망간단괴 개발과 관련된 기술을 조기에 구체화시켜야 할 것이다.

본 연구와 관련된 기존 연구로는 심해 채광기가 설정된 경로를 따라 채광시의 30만톤급 채광선의 능동제어에 관한 연구가 수행된 바 있다.[1] 또한 모드중첩법을 이용한 2차원 횡방향 제어에 관한 연구가 수행된 바 있다.[2]

Fig. 1은 심해저 망간단괴 채광시스템의 개략적인 모식도이다. 해저면 바닥의 집광기가 예정된 작업경로를 따라 주행하면서 망간 단괴를 채광하게 된다.

채광시스템은 집광기, 양광관과 양광펌프 시스템 및 버퍼, 해상의 채광선으로 구성된다. 이 시스템의 원활한 운영을 위해서는 위쪽은 가느다란 양광관을 통하여 모선과 연결되고 아래쪽은 유연 호스로 집광기에 연결된 버퍼의 위치를 최적으로 제

어하여야 한다. 버퍼에 작용하는 반력은 양광관에 의한 성분이 지배적이므로 본 논문에서는 유연 호스의 영향을 다루지 않았다. 양광관은 세장 구조물로 단순화시켜 모델링하여 고유함수 전개법으로 해석하였으며, 버퍼에 장착된 추진시스템에 대한 제어는 PID 제어기법을 적용하였다.

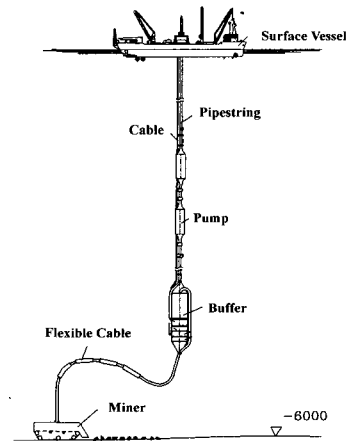


Fig. 1. Deep-sea mining system

2. 버퍼의 수평방향 제어

양광관의 횡방향 동적 변위가 작다고 가정하여 양광관을 선형화된 인장보로 간주하여 수학적으로 모델링하였다.

2.1 버퍼의 수평방향 운동방정식

버퍼의 수평방향 성분은 연성되지 않았다고 가정하면 다음과 같다.

$$m_b \ddot{\eta}(t) + d_1 \dot{\eta}(t) + d_2 (\dot{\eta} - U) |\dot{\eta} - U| \quad (1)$$

$$= \tau + f_c(z, t) + f_g$$

여기서 η 는 각각 버퍼의 수평방향의 위치를 나타낸다. m_b 는 부가질량을 포함한 버퍼의 질량이다. d_1 은 각 방향으로의 선형 감쇠계수이고, d_2 는 항력계수이다. U 는 버퍼에 가해지는 조류의 속도 성분을 나타낸다. τ 는 수평 방향으로의 제어 추력을 나타낸다. $f_c(z, t)$ 는 버퍼에 작용하는 양광관에 의한 수평방향 반력이고, f_g 는 버퍼에 작용하는 중력이다. 원심력과 같은 힘의 성분은 관성력에 비하여 그 크기가 무시할 만하므로 무시하였다.

2.2 양광관의 횡방향 운동방정식

동적 변위가 작은 경우, 양광관의 횡방향 운동 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.[2]

$$\frac{\partial}{\partial z^2} \left(EI(z) \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(T_e(z) \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} \right) + c \dot{u}(z, t) + m_z \ddot{u}(z, t) = f(z, t) \quad (2)$$

여기서 EI 는 양광관의 굽힘강성이며, T_e 는 양광관의 장력이고, c 는 구조감쇠계수이고, m_z 는 부가질량을 고려한 단위길이당 질량이며, f 는 외력이다. 횡방향의 변위 $u(z, t)$ 는 양광관의 축과는 수직이며, 시간 t 와 종방향 변위 z 에 따라 변한다. $EI(z) = EI$, $T_e(z) = T$ 로 가정하였다. 유체력 $f(z, t)$ 는 모리슨 식으로 추정한다.

식 (2)에 대한 일반 해는 채광선과 버퍼의 운동을 포함하여 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$u(z, t) = g(z) r(t) + h(z) \eta(t) \quad (3)$$

$$+ \sum_{i=1}^{\infty} p_i(z) q_i(t)$$

여기서 $g(z)$ 와 $h(z)$ 는 모선과 버퍼의 기본 변위를 나타낸다. $r(t)$ 와 $\eta(t)$ 는 모선과 버퍼의 변위로 시간에 관한 함수이다. $p_i(z)$, $q_i(t)$ 는 모드중첩법에 따라 양광관 변위를 공간과 시간 함수로 분리하여 각각 공간과 시간의 함수로 나타

내었다. 본 연구에서는 모선에서 버퍼까지 양광관의 기본 변위는 직선으로 가정하였다.

$$g(z) = 1 - \frac{z}{L}, \quad h(z) = \frac{z}{L} \quad (4)$$

i 번째 진동 모드에 대한 운동 방정식은 직교성과 정규화를 고려하여 식 (5.a)~(5.c)와 같이 구할 수 있다.

$$m_p \ddot{q}(t) + c \dot{q}(t) + k_i q(t) = f_i - c \gamma_i \dot{\eta}(t) - m_p \gamma_i \ddot{\eta}(t) \quad (5.a)$$

$$f_i = \frac{1}{a_i} \int_0^L p_i(z) [f(z, t) - c g(z) \dot{r}(t) - m_z g(z) \ddot{r}(t)] dz \quad (5.b)$$

$$a_i = \int_0^L p_i^2 dz, \quad \gamma_i = \frac{1}{a_i} \int_0^L p_i(z) h(z) dz \quad (5.c)$$

여기서 p_i 는 식(6)과 경계조건을 만족시키는 해이다.

$$EI \frac{\partial^4 p_i(z)}{\partial z^4} - T \frac{\partial^2 p_i(z)}{\partial z^2} = k_i \quad (6)$$

본 연구에서는 경계조건을 양 끝단이 모두 단순 지지인 경우라고 가정하고 식(6)의 해 p_i 를 구하였다.

양광관에 의해 버퍼 및 모선에 작용하는 반력은 가속도에 비례하는 성분, 속도에 비례하는 성분, 장력을 고려하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$f_c(z, t) = - \sum_{i=1}^{\infty} \gamma_i m_z \ddot{q}_{xi} + f_{drag}(z, t) + T(z, t) \sin(\theta(z, t)) \quad (7)$$

(7)식에서 f_r 는 모선 ($z=0$)과 양광관 끝단 ($z=L$)에 대하여 각각 (8)식과 같이 추정할 수 있다.

$$f_r(0, t) = \frac{1}{L} \int_0^L (L-z) \times f(z, t) dz \quad (8)$$

$$f_r(L, t) = \frac{1}{L} \int_0^L z \times f(z, t) dz$$

여기서 f 는 각각 상대속도에 대한 조류력으로 모리슨 식으로 추정한다.

양광관의 운동방정식과 버퍼의 수평방향 운동방정식을 동시에 푸는 과정은 다음과 같이 요약할

수 있다.

식(6)으로부터 경계조건을 만족시키는 해 p_i 를 구한다. 여기서 구한 p_i 로부터 식(5.c)를 이용하여 a_i, γ_i 를 구한다. 수평방향으로 작용하는 조류력 f 를 모리슨 식을 적용하여 각 시각에서의 일반해 u 를 구한다. 이때 깊이 방향에 따라 변하는 조류 속도를 고려하기 위하여 양광관의 길이 방향으로 수치 적분을 하여 구한다. 여기서 구한 값을 식 (5.b)에 적용하여 \ddot{q} 를 구한다. 식(7), (8)로부터 버퍼에 작용하는 양광관의 반력을 구한 후 이를 식(1)에 대입하여 버퍼의 운동방정식을 푼다. 버퍼의 운동방정식을 풀어 나온 수평방향 변위에 대하여 제어추력을 추정한다. 그 다음 시각에 대해서는 앞의 과정을 반복적으로 수행한다. 이러한 방법으로 두 개의 방정식을 각 시각에 대해 동시에 풀게 된다.

길이 방향에 따른 수치적분 방법으로는 Gauss quadrature를 사용하였고, 시적분 방법에는 Runge-Kutta 4차 방법을 사용하였다.

2.3 제어기법

수평 방향 제어기의 목적은 기본적으로 버퍼의 수평 방향 위치의 오차($\tilde{\eta} = \eta - \eta_d$)가 허용범위(watch circle)안으로 억제되도록 점차적으로 줄어 들게 하고, 버퍼의 속도($\dot{\tilde{\eta}} = \dot{\eta}$)가 원하는 속도로 수렴하도록 버퍼의 상대 위치와 속도를 제어하는 것이다. 여기서 η_d 는 버퍼의 원하는 위치를 나타낸다. 그밖에도 제어기는 배의 운동과 동유체력에 의한 버퍼와 양광관의 진동을 감쇠시키는 역할을 수행하도록 설계된다.

전통적인 PID 제어기로 설계하면 다음과 같이 제어입력을 구할 수 있다.

$$\tau = -k_p \tilde{\eta} - k_d \dot{\tilde{\eta}} - k_i \int_0^t \tilde{\eta} dt \quad (9)$$

2.4 필터(FIR Digital Filter)

파랑 중에서 모선은 저주파수 운동과 동시에 고주파 운동을 하게 된다. 버퍼가 추적하고자 하는

모선의 위치는 저주파수 운동에 해당하므로 고주파수 성분을 걸러내기 위하여 반드시 필터링을 필요로 한다. 실제로 고주파수 성분을 추적하도록 제어기를 설계할 경우 추진기에 순간적으로 과도한 하중을 주어 과부하에 걸릴 위험이 있다.

본 연구에서는 FIR (finite-duration impulse response) 디지털 필터를 사용하여 실제 모선의 위치를 필터링 한 값을 제어기의 목적위치(desired position)로 설정하였다. FIR 필터는 IIR (infinte-duration impulse response) 필터에 비하여 다음과 같은 장점을 가진다.

- 정확한 선형 위상차를 가진다.
- 언제나 안정하다.

FIR 필터의 주요한 단점으로는 어느 정도의 성능 확보를 위하여 IIR 필터에 비하여 많은 차수를 필요로 한다는 것을 꼽을 수 있다.

본 연구에서는 고주파수 성분을 FIR 필터로 걸러낸 모선의 위치를 (10)식과 같이 추정하였다.

$$y(n) = b(1)x(n) + b(2)x(n-1) + \dots + b(n)x(1) \quad (10)$$

여기서 FIR 필터의 계수는 Matlab에 있는 FIR.m을 사용하여 구하였다. Cutoff Frequency는 10초의 파성분을 걸러낼 목적으로 설계하였다. 필터를 사용할 경우 필터의 차수와 샘플링의 시간간격에 따라 위상차가 변하게 되는 데, 필터 설계 시 이를 적절히 조절할 필요가 있다.

2.5. 계산예제

선박의 파랑 중 저주파수 운동과 고주파수 운동을 모사하고 이에 따른 필터 및 제어기의 성능을 검증하기 위한 예제를 수행하였다. 자세한 주요치수와 제원은 Table 1에 제시하였다.[3]

표류력에 기인하는 모선의 저주파수 운동으로는 10m 진폭에 120초 주기의 정현파로 가정하였고, 파랑에 의한 고주파수 운동은 1m 진폭의 10초주기의 정현파와 0.5m 진폭의 5초주기, 0.25m 진폭의 2초 주기, 0.05m 진폭의 1초 주기파가 합성된 불규칙파로 모사하였다.

이때 하단의 버퍼는 선박의 위치를 필터링하여 10초 이하 주기의 파는 모두 걸러내고 120초 주

Table 1. Simulation data

양광관	외경, d_o	0.2445 m
	내경, d_i	0.2005 m
	밀도, ρ_p	$7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
	Young's modulus, E	$0.206 \times 10^{12} \text{ Ns/m}^3$
	구조댐핑계수 c_0	$0.049 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
	내부유체밀도 ρ_f	$1.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
	포위유체밀도 ρ	$1.03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
펌프모듈	모양	실린더
	외경, D	1.5 m
	길이, L_m	10.5 m
	L_m/D 비	7
	질량, $\overline{m_1}, \overline{m_2}$	50 ton
버퍼	모양	실린더
	외경, D	3 m
	길이, L_m	9 m
	L_m/D 비,	3
	질량, $\overline{m_1}, \overline{m_2}$	300 ton

기의 저주파수 운동에만 응답하게 제어를 수행하여야 한다. 본 예제에서는 24차의 FIR 필터를 사용하였고 샘플링의 시간간격은 0.5초로 하여 제어를 수행하였다.

Fig. 4에는 모선의 위치(실선)와 필터링된 모선의 위치(점선)가 도시되어 있다. 그림으로부터 고주파수 성분이 효과적으로 제거되는 것을 확인할 수 있다. 설계된 FIR 필터의 성능이 구현되고 있음을 계산 예제를 통하여 확인할 수가 있었다.

Fig. 5는 깊이 $z=l$ 에서 각 시각에서의 버퍼의 위치(점선)와 필터링된 모선의 위치(실선)를 나타내고 있다. 이때 제어기는 버퍼로 하여금 필터링이 된 후의 모선의 위치를 추적하게 함으로써 버퍼에 달린 추진기에 과부하를 주지 않도록 설계되어 있다. 그림에서 버퍼가 모선의 위치를 어느 정도의 간격을 두고 잘 쫓아가고 있음을 확인할 수 있다. 이에 따른 모선과 버퍼의 위치 오차는 Fig. 6과 같이 도출될 수 있다. 오차의 크기가 약

간 크다고 생각될 수 있는데, 5,000m에 달하는 양광관의 길이를 고려할 때 이 정도의 오차는 허용 범위 안에 놓여 있다고 할 수 있다.

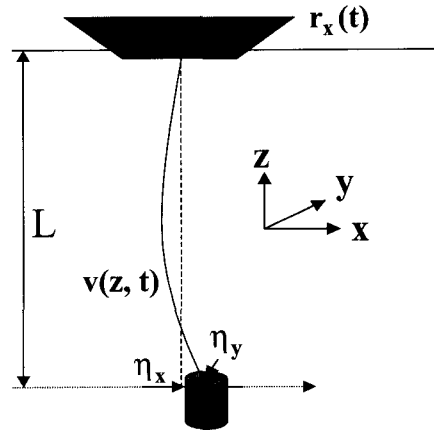


Fig. 2. Mathematical model for horizontal motion

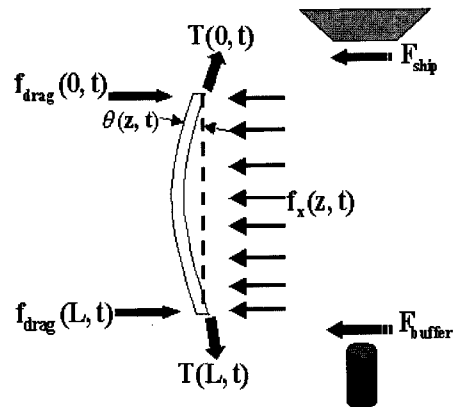


Fig. 3. Mathematical model for reaction force

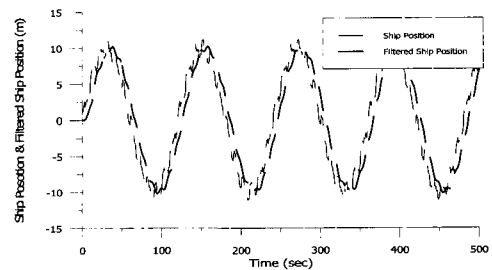


Fig. 4. Time histories of ship position and filtered ship position

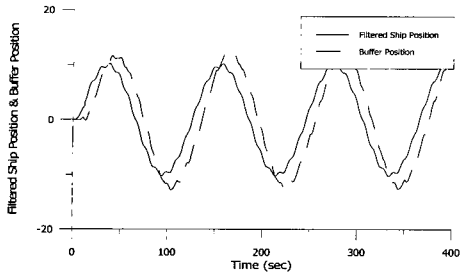


Fig. 5. Time histories of filtered ship position and buffer position

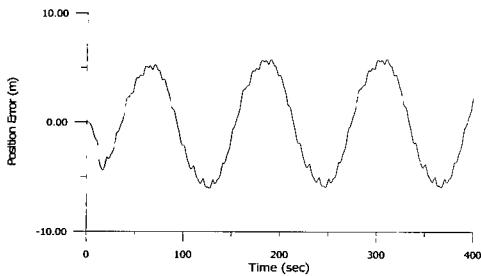


Fig. 6. Time history of position error of buffer

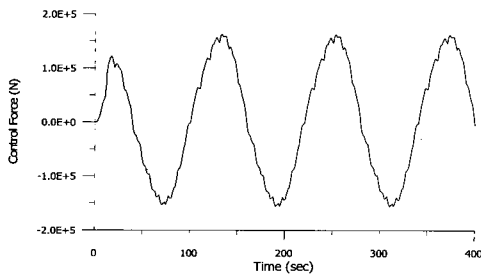


Fig. 7. Time history of control force

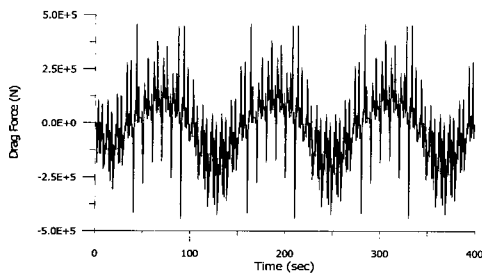


Fig. 8. Time history of drag force on pipe

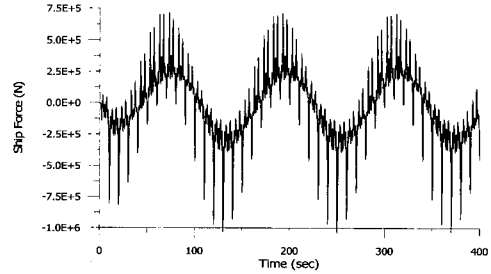


Fig. 9. Time history of reaction force on ship

Fig. 7에는 시간에 따른 요구되는 제어력이 도시되어 있다. 그림으로부터 상기된 바와 같은 모선의 장주기 운동을 양광관-버퍼 시스템이 쫓도록 제어하기 위하여 요구되는 추진기의 용량은 약 150kN이 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 각 시각에 양광관에 걸리는 항력을 나타내고 있다. 이는 모리슨식을 이용하여 양광관의 길이 방향에 대하여 수치적분을 수행함으로써 계산하였다.

Fig. 9는 양광관의 운동에 의해 모선에 걸리는 힘, 즉 양광관 상단에 걸리는 반력을 나타내고 있다.

Fig. 7과 Fig. 8, Fig. 9를 비교하여 볼 때 Fig. 8에 도시된 양광관에 걸리는 항력과 Fig. 9에 도시된 모선에 걸리는 반력에는 고주파수 성분이 나타나고 있는 반면, Fig. 7에 도시되어 있는 버퍼의 제어에 필요한 제어력에는 고주파수 성분이 이미 제거되어 나타나지 않음을 확인 할 수 있어 FIR 필터가 우수한 성능을 발휘하고 있다고 결론 내릴 수 있겠다.

3. 결론

본 연구에서는 심해 망간단괴 채광 시스템의 버퍼의 상대위치 제어와 관련하여 수학적 모델링과 제어기법을 연구하였다.

유체와 양광관의 상대 속도에 기인하는 항력을 보다 엄밀하게 추정하였다. 또한 필터를 이용하여 파랑 중의 고주파수 운동을 걸러낸 후 저주파수 운동만을 추적하도록 제어기의 성능을 개선하였

다. 이 알고리즘을 이용하여 정상상태의 항력을 추정함으로써 본 논문에서 사용하는 수치코드의 유효성을 검증하였다.

다양한 예제를 통해 상대위치 제어기의 안정성을 확인하였으며, 변수에 따른 정량적인 변화를 살펴봄으로써 향후 구체적인 망간 단괴 채광 시스템의 설계 시 참고 할 기초 자료를 제시하였다.

향후에는 본 연구에서 사용된 수학적 모델링을 보다 엄밀한 동역학적 모델링으로 확장해야 할 것으로 보인다. 특히 본 연구의 경우 장력이 종방향으로 일정하다는 가정 하에 접근하고, 양광관의 끝단에 해당하는 모선과 버퍼에 걸리는 반력을 추정할 때에만 근사적으로 장력의 변화를 고려하였는데 실제의 경우 종방향에 따른 장력은 지배적으로 변화하므로 이를 엄밀히 고려하여 포함하는 연구가 필요하다고 생각된다.

후 기

본 연구는 한국해양연구원 해양시스템안전연구소의 과제의 일부로서 수행된 연구이며, 이 자리를 빌어 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

[1] Brink. AW and Chung. JS., "Automatic Positionin Control of 300,000 Ton Ship During Ocean Mining Operation", Proc. Offshore Technology Conf, 1981

[2] Ingrid, S. and Olav, E., "Lateral Motion Control of an Underwater Truster System Suspended to a Ship by a Slender Marine Structure", J. of Offshore and Polar Engineering, 1996

[3] Yoshikazu, K. and Goro, O., "Active Control of Longitudinal Vibration and Axial Stress Caused in Pipe String for Mining Manganese Nodules in Deep Sea", Proceedings of the Ninth (1999) International Offshore and Polar Engineering Conference, 1999

[4] 이동환, 조경남, 최윤락, 홍사영, " 모드중첩법을 이용한 정수층의 매트형 거대부유구조물의 동하중에 대한 시간영역 유탄성 해석", 조선학회 논문집 제 38권 제 4호, 2001

[5] 이재욱, 양영태, "대변위 및 대화전을 고려한 편심된 격하 보요소의 기하학적 비선형해석", 조선학회 논문집 제 29권 제 4호, 1992



< 김 기 훈 >



< 최 항 순 >