

## 심해저 광물자원 채광시스템의 통합거동 해석

김형우\*, 홍 섭\*, 최종수\*, 여태경\*

\*한국해양연구원 해양시스템기술연구본부

### Total Dynamic Analysis of Deep-Seabed Integrated Mining System

HYUNG-WOO KIM\*, SUP HONG\*, JONG-SU CHOI\* AND TAE-KYEONG YEU\*

\*Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI

Daejeon, Korea

**KEY WORDS:** Integrated mining system 채광시스템, Tracked vehicle 무한궤도차량, Flexible pipe 유연관, Total dynamic analysis 통합거동해석, Soft soil 연약지반, Time domain simulation 시간영역 시뮬레이션

**ABSTRACT:** This paper concerns about total dynamic analysis of integrated mining system. This system consists of vertical steel pipe, intermediate buffer station, flexible pipe and self-propelled miner. The self-propelled miner and buffer are assumed as rigid-body of 6-dof. Discrete models of vertical steel pipe and flexible pipe are adopted, which are obtained by means of lumped-parameter method. The motion of mining vessel is not considered. Instead, the motion of mining vessel is taken into account in form of various boundary conditions (e.g. forced excitation in slow motion and/or fast oscillation and so on). A terramechanics model of extremely soft cohesive soil is applied to the self-propelled miner. The hydrodynamic forces and moments are included in the dynamic models of vehicle and lifting pipe system. Hinged and fixed constraints are used to define the connections between sub-systems (vertical steel pipe, buffer, flexible pipe, miner). Equations of motion of the coupled model are derived with respect to the each local coordinates system. Four Euler parameters are used to express the orientations of the sub-systems. To solve the equations of motion of the total dynamic model, an incremental-iterative formulation is employed. Newmark- $\beta$  method is used for time-domain integration. The total dynamic responses of integrated mining system are investigated.

#### 1. 서 론

1970년대 후반이후, 심해저 망간단괴의 상업적 생산을 위한 많은 개념들이 연구되어 왔다(Brink and Chung, 1981; Chung, 1996, 2003; Herrouin *et al.*, 1989; Amann *et al.*, 1991; Liu and Yang, 1999; Hong and Kim, 1999; Deepak *et al.*, 2001; Handschuh *et al.*, 2001). 심해저의 퇴적지반은 매우 높은 함수율을 가진 미세한 입자들로 형성되어 있기 때문에 지반의 지지력(bearing capacity)이 매우 미약하다는 문제점을 가진다. 이러한 미약한 지반 지지력으로 인해 망간단괴를 집광시스템으로 실어 운반하는 것은 불가능하며, 해상의 채광선까지 양광관을 통한 연속적 채광(continuous mining)의 타당성이 높게 평가되고 있다. 이러한 연속적 채광시스템은 채광선, 수직양광관, 중간버퍼, 유연관, 자항식 집광기로 구성된다. 자항식 집광기와 버퍼를 연결하는 유연관의 형상은 자항식 집광기의 주행성능에 큰 영향을 준다. 또한 유연관에 연결되어 있는 중간버퍼와 자항식 집광기 간의 상대위치도 자항식 집광기의 성능에 영향을 준다. 따라서 채광선-양광관-버퍼-유연관-자항식 집광기로 이어지는 전체 채광시스템의 동적거동 해석은 심해저 채광기술의 중요한 요소기술이다.

컴퓨터의 발달에 힘입어, 컴퓨터를 이용한 기계시스템에 대한 동적거동 해석이 활발히 이루어지고 있다. Hong *et al.* (2002)은 연약지반을 주행하는 강체차량에 대한 3차원 비선형

동적거동 해석방법을 개발하였으며, Kim *et al.*(2003)은 Hong *et al.*(2002)에 의해 개발된 해석방법의 검증을 위해 강체 무한궤도와 다물체 무한궤도의 결과를 비교·검증하였다. Kim *et al.*(2005)은 오일러 각 대신에 오일러 매개변수를 사용한 강체 무한궤도 차량 해석 프로그램을 개발하였으며, 무한궤도의 동적거동에 영향을 미치는 유체력을 포함하였다.

수직양광관 및 유연관에 대한 3차원 비선형 동적거동 해석을 위해 반복-증분 공식을 이용한 질량집중 매개변수 방법이 개발되었다(Hong 1992, 1995, 1997). 최근에 Hong *et al.*(2003a)은 4개의 오일러 매개변수를 이용한 해저 광물 양광관의 3차원 비선형 동적거동 해석 방법을 개발하였으며, 아울러 해저 채광관의 동적거동에 영향을 미치는 내부 유동을 포함한 프로그램을 개발하였다(Hong *et al.*, 2003b).

본 논문에서는 채광시스템 통합거동 해석을 위하여 수직양광관, 버퍼, 유연관, 해저주행차량을 기구학적 접합조건식과 연성방정식을 이용하여 통합 동적거동 해석이 가능하도록 하였다. Kim *et al.*(2005)의 개발된 연약지반 강체 주행차량 해석 기법과 Hong *et al.* (2003a, 2003b)에 의해 개발된 해저 광물 양광관의 동적거동 해석 기법을 이용하였으며, 각 시스템(양광관, 버퍼, 유연관, 주행차량)을 연성시키기 위해 기구학적 접합조건식을 포함시켰다.

FORTRAN-90을 사용하여 채광시스템 통합거동 해석 프로그램을 개발하였으며, 개발된 프로그램을 이용하여 몇 개의 예

제를 해석하였다.

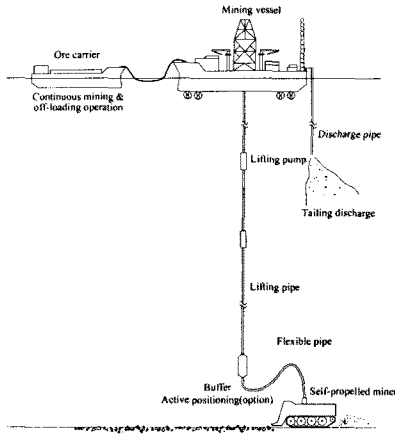


Fig. 1 Concept of Commercial Deep-Ocean Mining System

## 2. 수치해석 모델

### 2.1 해저 채광관 해석 모델

해저 양광관 시스템은 수직 양광관시스템과 유연관시스템으로 구성되어 있으며, 두 시스템 사이에는 중간 저장장소인 버퍼가 연결되어 있다. 유연관 시스템은 유연관과 부력모듈로 구성되어 있으며, 주행차량이 자유롭게 움직일 수 있도록, 유연관이 수직면에 대해서 아크(arch)나 S-형을 형성하기 위해 부력모듈이 사용되어 졌다. 유연관에 부력모듈을 결합시키면, 유연관의 관성력과 항력이 증가하게 된다.

본 논문에서는 5000m의 수직양광관과 500m의 유연관을 사용하였으며, 156개의 부력재를 사용하여 유연관이 S-형이 되도록 설계하였다. 해저 채광관과 부력재에 대한 특성치는 Table 1과 2에 나타나 있다.

Table 1 Principal dimensions of flexible pipe system model

Items	Data
Flexible Pipe	
- Length (L)	500 m
- Outer diameter (D <sub>o</sub> )	0.4 m
- Inner diameter (D <sub>i</sub> )	0.356 m
- Mass (m)	65 kg/m
- Effective weight (we)	520 N/m
- Axial stiffness (EA)	18,000 kN
- Bending stiffness (EI)	18 kN-m <sup>2</sup>
- Torsional stiffness (GJ)	90 kN-m <sup>2</sup>
- Drag coefficient (C <sub>d</sub> )	1.0
- Friction coefficient (C <sub>f</sub> )	0.01
- Inertia coefficient (C <sub>m</sub> )	2.0
Buoyancy Module	
- Outer diameter (D <sub>b</sub> )	0.9 m
- Length (L <sub>b</sub> )	1.0 m
- Density (ρ <sub>b</sub> )	650 kg/m <sup>3</sup>
- Quantity (ea)	156
- Spacing	0.25 m
- Drag coefficient (C <sub>d</sub> )	0.8
- Friction coefficient (C <sub>f</sub> )	0.1
- Inertia coefficient (C <sub>m</sub> )	1.67 (averaged value)

Table 2 Principal dimensions of lifting pipe model

Items	Data
- Length (L)	5000 m
- Outer diameter (D <sub>o</sub> )	0.2445 m
- Inner diameter (D <sub>i</sub> )	0.2005 m
- Mass (m)	120 kg/m
- Effective weight (we)	1,081 N/m
- Axial stiffness (EA)	5.6e5 kN
- Bending stiffness (EI)	19,800 kN-m <sup>2</sup>
- Torsional stiffness (GJ)	15,221 kN-m <sup>2</sup>
- Drag coefficient (C <sub>d</sub> )	1.0
- Friction coefficient (C <sub>f</sub> )	0.01
- Inertia coefficient (C <sub>m</sub> )	2.0

### 2.2 버퍼 해석 모델

중간저장소인 버퍼는 복잡한 시스템으로 구상되어 있으며, 주요기능으로는 ①양광관과 유연관의 연결, ②양광관의 안정성 유지, ③유연관의 균형유지, ④단괴의 유출량 조절 등이다. Fig. 2는 버퍼시스템 예를 나타내며, 본 논문에서는 복잡한 버퍼시스템을 실린더형의 1개의 강체로 가정하였다. 버퍼시스템에 대한 특성치는 Table. 3에 나타나 있다.

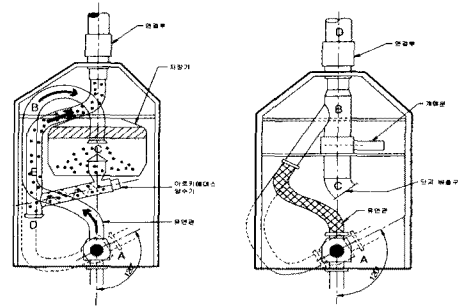


Fig. 2 Buffer system model

Table 3 Principal dimensions of buffer system model

Items	Data
- Length (L)	9 m
- Diameter (D <sub>o</sub> )	3 m
- Mass (m)	75 ton
- Inertia (I <sub>xx</sub> , I <sub>yy</sub> , I <sub>zz</sub> )	168, 168, 84 ton-m <sup>2</sup>
- Drag coefficient (C <sub>d</sub> )	2.0
- Added mass (m <sub>A</sub> )	75 ton

### 2.3 주행차량 모델

Fig. 3은 해저주행 차량 모델을 나타내고 있다. 본 논문에서는 해저주행차량을 하나의 강체로 가정하였으며, 해저주행차량의 특성치는 Table 4에 나타나 있다.

Table 4 Principal dimensions of miner model

Items	Data
Mass (m)	50 ton
Total length of miner (L <sub>T</sub> )	10.8 m
Contact length of track belt (L <sub>C</sub> )	9.0 m
Total breadth of miner (B <sub>T</sub> )	10.0 m
Width of track belt (D <sub>T</sub> )	3.5 m
Height of mass center from bottom (H <sub>C</sub> )	1.5 m
Total height of miner (H <sub>T</sub> )	3.0 m

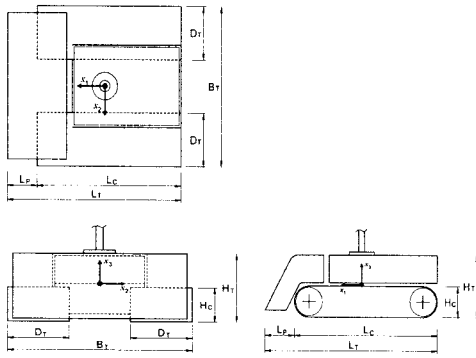


Fig. 3 Underwater tracked vehicle model

정확한 해석을 위하여 해저 주행차량에 대한 유체력을 적용하였다(Fossen, 2002). 주행차량에 대한 추가질량 행렬과 감쇠 행렬에 대한 유체력 계수는 Fig. 3과 Table 4의 차량의 기본적인 차원을 바탕으로 다음과 같이 계산되었다

$$\begin{aligned} X_{ii} &= Y_v = Z_w = 10 \text{ ton}, K_p = M_i = 22.7 \text{ ton} \cdot \text{m}^2, \\ N_r &= 41.7 \text{ ton} \cdot \text{m}^2, X_{u|u} = Y_{v|v} = 7.7 \text{ kN} \cdot \text{s/m}, Y_v = 7.6 \text{ kN} \cdot \text{s/m}, \\ Z_w &= 27.7 \text{ kN} \cdot \text{s/m}, K_p = 15.4 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{s}, M_i = 15.2 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{s}, \\ N_r &= 55.4 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{s}, X_{l|l} = Y_{l|l} = 76.9 \text{ kN} \cdot (\text{s/m})^2, \\ Z_{w|w} &= 276.8 \text{ kN} \cdot (\text{s/m})^2, K_{l|l} = 154 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2, \\ M_{l|l} &= 152 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2, N_{l|l} = 554 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2 \end{aligned}$$

#### 4. 수치 해석

채광시스템의 통합모델의 동적거동에 대한 해를 구하기 위하여, Hong *et al.*(2003a, 2003b)의 의해 제안된 증분-반복 방법을 적용하였으며, 질량집중 매개변수 모델과 Newmark- $\beta$ 방법을 적용한 증분-반복 방법을 적용하여 비선형 수치해석 프로그램인 RISER-TV를 FROTRAN-90으로 개발하였다.

개발된 RISER-TV를 이용하여 수치해석을 행하였다. 통합가동 해석은 2가지의 경우에 대해서 수행되었다.

- Initial stationary positioning
- Tandem positioning

##### 4.1 Initial stationary positioning(ISP)

버퍼의 무게중심에서 수직방향으로 상하 4.5m되는 지점에 수직 양광관과 유연관이 연결되어 있으며, 유연관의 나머지 한 부분은 주행차량의 바닥에서 3.0m되는 지점에 주행차량과 연결되어 있으며, 초기에 주행차량은 지면에 접촉해 있다. 총 해석시간은 600초이며, 적분시간 간격은 0.005초이다. 조류의 영향은 없는 것으로 가정하였다. 해석결과와 Fig. 5-6에 나타나 있다. Fig. 5는 수직 양광관과 유연관 형상의 변화를 나타내고 있다. 수직 양광관은 시간의 변화에 따라 왼쪽으로 움직이고 있지만(Fig. 5a), 양광관의 끝점(주행차량이 연결된 지점)의 움직임은 거의 변화가 없었다(Fig. 5b). 주행차량이 움직이지 않는 이유는 수직양광관이 유연관에 비해 상대적으로 길고, 지면

에 접촉해 있는 주행차량보다 버퍼가 상대적으로 움직이기 쉽기 때문이다.

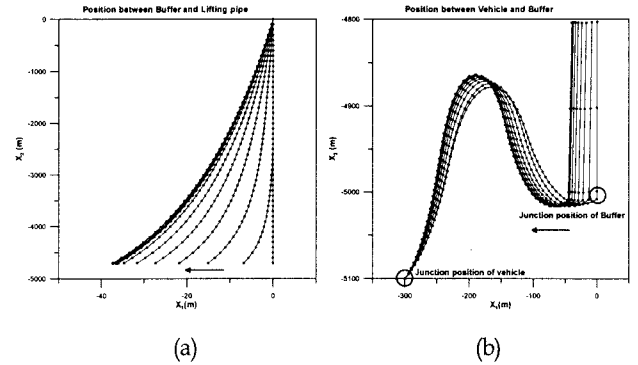


Fig. 5 Pipe deformation by ISP

##### 4.2 Tandem positioning(TP)

이 시뮬레이션은 파이프 시스템의 초기 형상은 주행차량 앞쪽에 놓여 있으며, 초기 안정화 시간 50초가 지난 후에, 주행차량이 차량의 진행방향으로 움직이며, 동시에 수직 양광관의 상부 끝점이 주행차량과 같은 방향, 같은 속도로 움직인다. 차량의 속도는 0.5, 0.75, 1.0m/s로 변화시키면서 해석을 수행하였다. Fig. 6은 채광시스템의 움직임을 나타내고 있다. 수직양광관(Fig. 6a)은 초기 안정화 구간에서는 왼쪽으로 움직이지만, 그 이후에는 오른쪽으로 움직인다. 유연관(Fig. 6b)의 경우에, 수직양광관의 끝점이 주행차량의 속도와 같이 움직이고 있음에도 불구하고, 버퍼가 결합되어 있는 부분이 주행차량이 결합되어 있는 부분보다 느리게 움직인다. 이러한 현상은 수직양광관의 길이가 길기 때문에, 수직양광관의 수면 끝점이 주행차량과 같은 속도로 움직이지만, 버퍼가 고정되어 있는 수직 양광관의 끝점의 움직임은 시간지연에 의해 느리게 움직인다.

Fig. 7은 주행차량이 지면과 접촉하는 지점에서의 최대전단 변위를 나타내고 있다. 차량의 속도가 빨라질수록 최대전단 변위가 커지는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 유연관과 주행차량이 연결되어 있는 지점에서의 장력을 나타내고 있다. 속도가 1.0m/s인 경우에 장력이 증가하는 것을 보이고 있는데, 이는 차량은 빨리 움직이나 버퍼는 상대적으로 느리게 움직여서 유연관의 S-형상이 초기형상보다 많이 좁혀져서 생기는 현상이다.

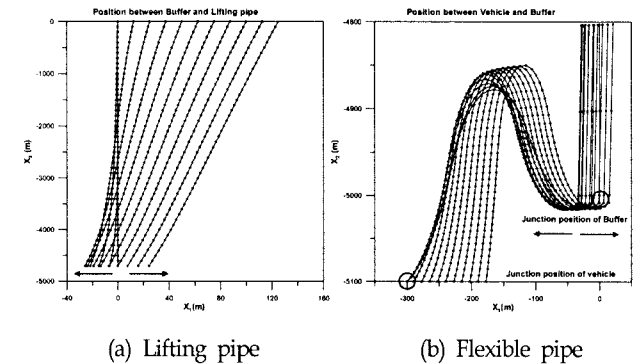


Fig. 6 Pipe deformation by TP

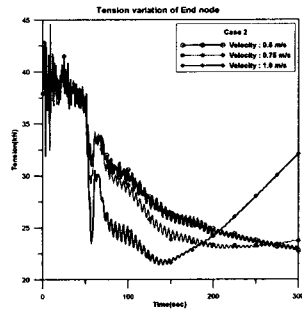
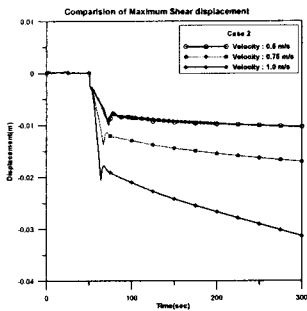


Fig. 7 Max. shear displacement Fig. 8 Tension of end node

## 5. 결론

유연관과 수직양광관의 3차원 비선형 동적거동 해석 프로그램과 주행차량의 3차원 비선형 동적거동 해석 프로그램을 이용하여 수직양광관-버퍼-유연관-주행차량을 동시에 해석할 수 있는 3차원 비선형 통합거동 해석 프로그램을 개발하였다. 수치해석을 통하여 각 시스템의 거동이 상호영향을 받고 있다는 것을 알 수 있었으며, 이러한 사실을 통하여 통합거동의 중요성이 확인되었다.

향후 보다 정확한 수치해석을 위해 버퍼 및 시험집광기설계에 대한 정확한 유체력 계수가 산정되어야 할 것이다.

## 후기

본 논문은 해양수산특정 연구과제인 "심해저 집광시스템 및 채광운용기술 개발"과제로 수행되었으며, 아울러 기본연구 과제인 "해양개발 설계엔지니어링 기술 고도화"의 일부분으로 수행되었다.

## 참고문헌

- Amann, H. et al. (1991). "Soft Ocean Mining," Proc Offshore Tech Conf, Houston, Paper 6553.
- Brink, A.W. and Chung, J.S. (1981). "Automatic Position Control of a 300,000-Ton Ship Ocean Mining System," Proc Offshore Tech Conf, Houston, Paper 4091.
- Chung, J.S. (1996). "Deep-ocean Mining. Technologies for Manganese Nodules and Crusts," Int J Offshore and Polar Eng, ISOPE, Vol 6, No 4, pp 244-254.
- Chung, J.S. (2003). "Deep-ocean Mining Technology. Learning Curve I," Proc 5th ISOPE Ocean Mining Sym, Tsukuba, November, pp 1-6.
- Deepak, C.R., Shajahan, M.A., Atmanand, M.A., Annamalai, K., et al. (2001). "Development Tests on the Underwater Mining System Using Flexible Riser Concept," Proc 4thISOPE Ocean Mining Sym, Szczecin, pp 94-98.
- Fossen, T.I. (2002). Marine Control Systems, Marine Cybernetics.
- Handschuh, R., Grebe, H., Panthel, J., Schulte, E., Wenzlawski, B., Schwarz, W., Atmanand, M.A., Jeyamani, R., Shajahan, M., Deepak, C., Ravindran, M. (2001). "Innovative Deep Ocean Mining Concept based on Flexible Riser and Self-propelled Mining Machines," Proc 4th ISOPE Ocean Mining Sym, Szczecin, pp 99-107.
- Herrouin, G., Lenoble, J.P., Charles, C. Mauviel, F., Bernard, J., Taine, B. (1989). "A Manganese Nodule Industrial Venture Would Be Profitable. Summary of a 4-Year Study in France," Proc Offshore Tech Conf, Houston, Paper 5997.
- Hong, S. (1992). Three dimensional nonlinear static and dynamic analysis of flexible risers, doctoral dissertation (in German), Univ of Aachen.
- Hong, S. (1995). "Three Dimensional Analysis on Behaviour of Mining Pipe of Deep Seabed Mineral Resources," Proc 1st ISOPE Ocean Mining Sym, Tsukuba, pp 69-74.
- Hong, S. (1997). "3D Dynamic Analyses of Lifting Pipe Systems in Deep Seabed Mining," Proc 2nd ISOPE Ocean Mining Sym, Seoul, pp 75-81.
- Hong, S. and Kim, K. (1999). Proposed Technologies for Mining Deep-Seabed Polymetallic Nodules - "Chap 12 Research and Development of Deep Seabed Mining Technologies for Polymetallic Nodules in Korea," Proc International Seabed Authority's Workshop, Kingston, Jamaica, pp 261-283.
- Hong, S., Kim, H.W., Choi, J.S. (2002). "Transient Dynamic Analysis of Tracked Vehicle on Extremely Soft Cohesive Soil," Proc 5th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Sym, Daejeon, pp 100-107.
- Hong, S., Kim, H.W., Choi, J.S. (2003). "A New Method Using Euler Parameters for 3D Nonlinear Analysis of Marine Risers/Pipelines," Proc 5th ISOPE Ocean Mining Sym, Tsukuba, pp 83-90.
- Hong, S., Choi, J.S., Kim H.W. (2003). "Effects of Internal Flow on Dynamics of Underwater Flexible Pipes," Proc 5th ISOPE Ocean Mining Sym, Tsukuba, pp 91-98.
- Kim, H.W., Hong, S., Choi, J.S. (2003). "Comparative Study on Tracked Vehicle Dynamics on Soft Soil. Single-Body Dynamics vs. Multi-Body Dynamics," Proc 5th ISOPE Ocean Mining Sym, Tsukuba, pp 132-138.
- Kim, H.W., Hong, S., Choi, J.S. Yeu, T.K. (2005). "Dynamic Analysis of Underwater Tracked Vehicle on Extremely Soft Soil by Using Euler Parameters", Proc 6th ISOPE Ocean Mining Sym, Changsha, pp 141-148.
- Liu, F. and Yang, N. (1999). Proposed Technologies for Mining Deep-Seabed Polymetallic Nodules - "Chap 9 Environmentally Friendly Deep Seabed Mining System," Proc International Seabed Authority's Workshop, Kingston, Jamaica, pp 187-211.