

## 심해저 광물자원 채광시스템의 설치 거동 해석

홍 섭\*, 김형우\*, 최종수\*, 여태경\*

\*한국해양연구원 해양시스템기술연구본부

### Launching Simulation of Integrated Mining System for Deep-Seabed Mineral Resources

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

\*Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI  
Daejeon, Korea

**KEY WORDS:** Integrated mining system 통합채광시스템, Launching simulation 설치시물레이션, Nonlinear analysis 비선형해석, Coupled dynamic analysis 연성동적거동해석, Time domain simulation 시간영역 시물레이션

**ABSTRACT:** This paper concerns about coupled dynamic analysis of the deep-seabed mining system in launching operation. The dynamic behavior of mining system consisting of lifting pipe, buffer station, flexible conduit and self-propelled miner is simulated in time domain. The launching operation is divided into four critical phases: (1) deployment of miner and flexible conduit, (2) deployment of lifting pipe, flexible conduit and miner, (3) touch-down of miner, (4) final launching. The dynamic responses of sub-systems - miner, flexible conduit, buffer and lifting pipe - are analyzed in each launching phase. According to the changing periods of forced excitation at the top, the dynamic responses of sub-systems are diverse in their characteristics. It has been shown that the total integrated responses of sub-systems are strongly affected by the design parameters. Especially, the principal dimensions of flexible conduit seem to be significant in determining of the global response. Based on the simulation results, safe operation conditions are investigated.

#### 1. 서 론

1970년대 후반 다국적 컨소시엄인 OMI, OMA, OMCO 등에 의한 심해저 망간단괴 파일럿 채광시험 실시 이후, 심해저 망간단괴의 상업적 생산을 위해 자항식 집광기-유연관-버퍼-수직양광관을 이용한 연속 채광(Fig. 1)에 대한 개념이 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).

그동안 국내에서는 이와 같은 연속적 채광시스템의 설계 및 운용 기술 확립을 위한 시물레이션 기법에 대한 개발 연구가 지속적으로 수행되었다. 최근에는 해저 연약지반 주행차량에 대한 해석기법이 개발 되었으며(Hong et al., 2002, Kim et al., 2003, Kim et al., 2005), Hong et al. (2003a, 2003b)은 4개의 오일러 매개변수를 이용한 해저 광물 양광관의 3차원 비선형 동적거동 해석 방법을 개발하였다. 김형우 등(2006)은 전체 채광시스템(Fig. 1)의 각각의 부 시스템간의 연결 조건에 대한 수학적모델을 적용함으로써 앞서 개발된 부 시스템에 대한 시물레이션 S/W 들을 통합하였으며, 이로써 통합채광시스템의 통합 거동에 관한 해석이 가능하게 되었다.

해저 5000m에 채광시스템을 설치하기 위해서는 다양한 실험이나 수치해석을 통하여 문제점을 파악하고 보완하여야 한다. 하지만 전체 채광시스템에 대한 축소 모형실험은 너무나

큰 축척비로 인해 불가능하다. 이런 이유로 설치시 발생할 수 있는 많은 문제점은 다양한 수치해석에 의존할 수 밖에 없다.

본 논문에서는 김형우 등(2006)에 의해 개발된 채광시스템 통합거동 해석 프로그램을 이용하여 몇가지 조건의 설치 단계에 대한 시물레이션을 통해 채광시스템 설치 과정에서 나타날 수 있는 문제점을 파악하고자 한다.

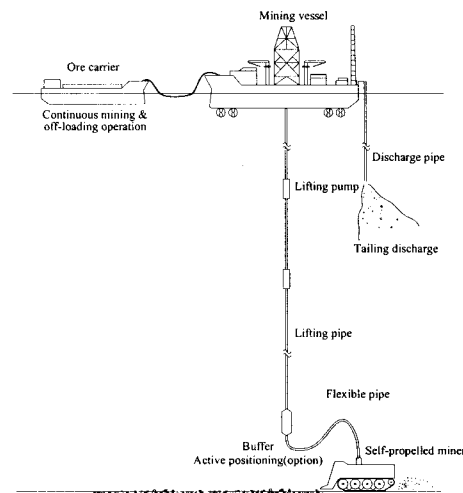


Fig. 1 Concept of Commercial Deep-Ocean Mining System

본 논문에서는 설치 과정을 3단계로 구분함으로써 3가지 모델에 대한 해석을 수행하였다. ① 집광시스템과 유연관 및 버퍼가 수중에 설치된 이후 수직양광관이 2000m 정도 설치된 조건, ② 앞서의 설치단계가 더 진행되어 수직양광관이 4500m 정도까지 설치된 경우, ③ 집광시스템이 해저면 바닥에 착지하는 조건. ①과 ②의 경우에 대해서는 수직양광관의 상단 끝부분이 수직으로 움직이는 경우와 수직과 수평 동시에 움직이는 경우에 대해서 해석을 수행하였다.

## 2. 수치해석 모델

### 2.1 유연 이송관 해석 모델

수직양광관은 일반적으로 강관으로 제작되나, 유연관은 주행차량이 자유롭게 움직일 수 있도록 하기 위하여 유연관이 수직면에 대해서 아크(arch)나 S-형을 형성하고 있다. 이러한 형상을 만들기 위해서 부력 모듈이 사용되었다.

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

Table 1 Principal dimensions of flexible pipe system model

Items	Data
Flexible Pipe	500 m
- Length (L)	0.4 m
- Outer diameter (Do)	0.356 m
- Inner diameter (Di)	65 kg/m
- Mass (m)	520 N/m
- Effective weight (we)	18,000 kN
- Axial stiffness (EA)	18 kN-m <sup>2</sup>
- Bending stiffness (EI)	90 kN-m <sup>2</sup>
- Torsional stiffness (GJ)	1.0
- Drag coefficient (Cd)	0.01
- Friction coefficient (Cf)	2.0
- Inertia coefficient (Cm)	
Buoyancy Module	0.9 m
- Outer diameter (Db)	1.0 m
- Length (Lb)	650 kg/m <sup>3</sup>
- Density (rb)	156
- Quantity (ea)	0.25 m
- Spacing	0.8
- Drag coefficient (Cd)	0.1
- Friction coefficient (Cf)	1.67 (averaged value)
- Inertia coefficient (Cm)	

### 2.2 버퍼 해석 모델

중간저장소인 버퍼시스템(Fig. 2)은 복잡한 시스템으로 구성 되어 있으나 본 논문에서는 실린더형의 간단한 1개의 강체로 가정하였다. 또한, 버퍼시스템을 움직이기 위한 추진장치가 있을 수 있으나, 본 논문에서는 생략하였다. 버퍼시스템에 대한 특성치는 Table. 3에 나타나 있다.

Table 2 Principal dimensions of lifting pipe model

Items	Data
- Length (L)	5000 m
- Outer diameter (Do)	0.2445 m
- Inner diameter (Di)	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 (Cd)	1.0
- Friction coefficient (Cf)	0.01
- Inertia coefficient (Cm)	2.0

Table 3 Principal dimensions of buffer system model

Items	Data
- Length (L)	9 m
- Diameter (Do)	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 (Cd)	2.0
- Added mass (m <sub>A</sub> )	75 ton

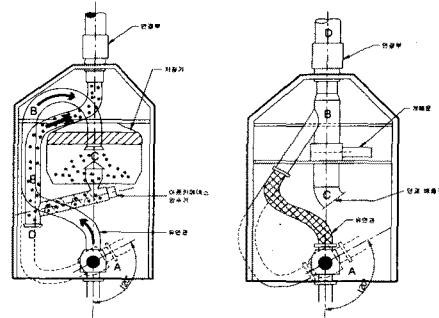


Fig. 2 Buffer system model

### 2.3 주행차량 모델

본 논문에서는 집광시스템을 하나의 강체로 가정하였다(Kim et al., 2003). 본 논문에서 사용된 주행차량의 모델은 Fig. 3에 나타나 있으며, 이에 대한 특성치는 Table 4에 나타나 있다.

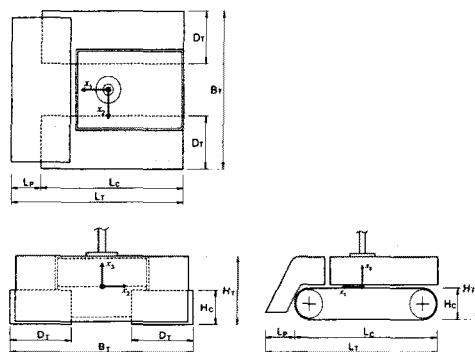


Fig. 3 Underwater tracked vehicle model

**Table 4** Principal dimensions of miner model

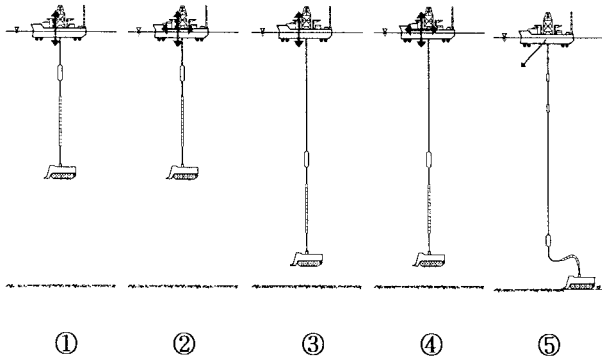
Items	Data
Mass (m)	50 ton
Total length of miner (LT)	10.8 m
Contact length of track belt (LC)	9.0 m
Total breadth of miner (BT)	10.0 m
Width of track belt (DT)	3.5 m
Height of mass center from bottom (HC)	1.5 m
Total height of miner (HT)	3.0 m

주행차량에 대한 부가질량 행렬과 감쇠 행렬에 대한 유체력 계수(Fossen, 2002)는 Fig. 3과 Table 4의 주요제원을 바탕으로 다음과 같이 산정되었다(김형우 등, 2006).

$$\begin{aligned}
 X_{ii} &= Y_{vv} = Z_{ww} = 10 \text{ ton}, \\
 K_p &= M_{qi} = 22.7 \text{ ton} \cdot \text{m}^2, N_r = 41.7 \text{ ton} \cdot \text{m}^2 \\
 X_{ii} &= 7.7 \text{ kN} \cdot \text{s/m}, Y_{vv} = 7.6 \text{ kN} \cdot \text{s/m}, Z_{ww} = 27.7 \text{ kN} \cdot \text{s/m} \\
 K_p &= 15.4 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{s}, M_{qi} = 15.2 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{s}, N_r = 55.4 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \\
 X_{iiv} &= 76.9 \text{ kN} \cdot (\text{s/m})^2, Y_{v|v} = 76.1 \text{ kN} \cdot (\text{s/m})^2, \\
 Z_{|w|w} &= 276.8 \text{ kN} \cdot (\text{s/m})^2 \\
 K_{|p|p} &= 154 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2, M_{|q|q} = 152 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2, \\
 N_{|r|r} &= 554 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2
 \end{aligned}$$

#### 4. 수치 해석

채광시스템의 통합모델의 동적거동에 대한 해를 구하기 위하여, Hong et al.(2003, 2003a)이 제안한 질량집중 매개변수 모델과 Newmark-β 방법을 적용한 미소증분-반복법을 적용하여 개발된 비선형 수치해석 프로그램인 RISER-TV를 이용하여 Fig. 4의 5가지 조건의 설치해석 시뮬레이션을 수행하였다.

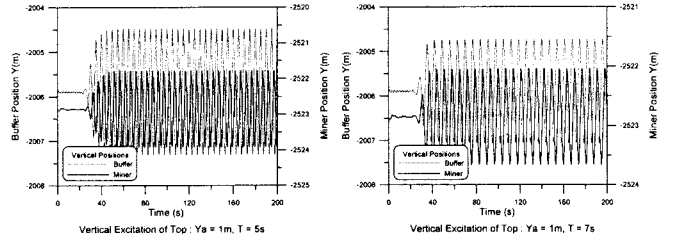


**Fig. 4** Launching simulation models

##### 4.1 Forced excitation(1)

수직강제진동(1)의 시뮬레이션은 Fig. 4의 ①과 같이 수중에는 집광기, 유연관, 버퍼, 수직양광관 2000m가 설치된 경우이다. 수직양광관의 상단에 수직방향으로 강제 축진동을 가했으며, 이때 축진동의 진폭은 1m, 주기는 5초에서 8초까지 1초 단

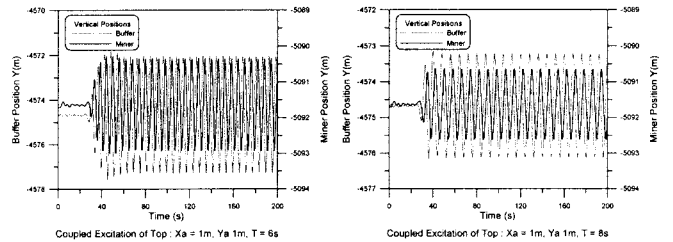
위로 변경하며 해석을 수행하였다. 총 해석시간은 300초이며, 시간 적분간격은 0.005초이다. Fig. 5는 주기가 각각 5초와 7초인 경우에 집광기와 버퍼의 수직변위를 나타내고 있다.



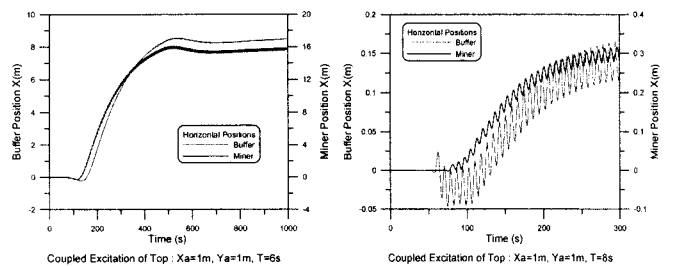
**Fig. 5** Vertical motions of buffer and miner at  $T_{top}=5s$  and  $7s$

##### 4.2 Forced excitation(4)

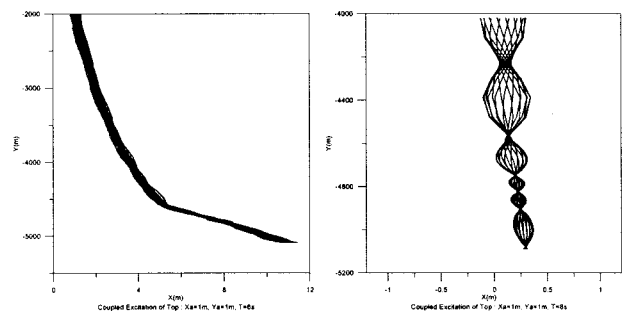
수직강제진동(4)의 시뮬레이션은 Fig. 4의 ④와 같이 수중에 집광기, 유연관, 버퍼, 약 4565m의 수직양광관이 설치된 경우로 수직 양광관 상단의 강제진동이 수평과 수직 동시에 작용하는 경우이다. 이때 수평 및 수직 진폭은 1m, 주기는 5~8초 구간에서 1초 단위로 변경하였다. 총 해석시간 300초, 시간적분 간격 0.005초이다. Fig. 6과 7은 주기가 각각 6초와 8초인 경우, 집광기와 버퍼의 수직 및 수평 변위를 나타내고 있다.



**Fig. 6** Vertical motions of buffer and miner at  $T_{top}=6s$



**Fig. 7** Horizontal motions of buffer and miner at  $T_{top}=6s$  and  $8s$

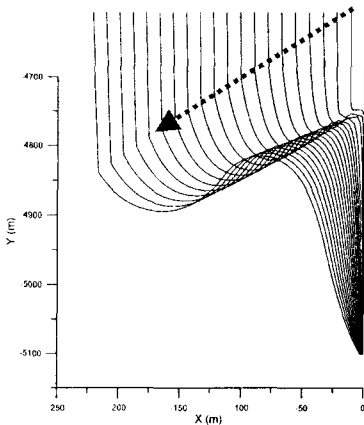


**Fig. 8** Motion envelopes at  $T_{top}=6s$  and  $8s$

Fig. 8은 수직평면 내에서의 수직양광관과 유연관의 운동 변화를 나타내고 있다. 주기 6초인 경우, 수평 가진진폭 1m 에도 불구하고 집광기는 약 10m 이상 이동하였다.

#### 4.3 Landing simulation

해저면의 주행차량 착륙에 대한 시뮬레이션의 개념도는 Fig. 4의 ⑤에 나타나 있다. 수중에 집광기, 유연관, 버퍼 및 약 4576m의 수직양광관이 설치되면 집광기가 해저면 바닥에 닿게 된다. 집광기 착지 이후 유연관이 S-형이 되도록 Fig. 5의 ⑤처럼 수직양광관의 상단이 왼쪽 아래 방향으로 움직이게 하였다. 이때, 상단의 이동속도는 0.05m/s, 총 해석시간은 5000초이다. Fig. 9는 유연관이 시간 경과로 S-형이 되는 것을 보여준다.



### 5. 결론

채광시스템의 통합거동 해석기법을 이용하여 연속채광시스템의 설치 과정에서 발생하는 연성 동적거동 해석을 수행하였다. 집광기 및 유연관 설계 변수에 따라서는 파도 중 수직 양광관 상단의 강제진동에 의해서 집광기가 계획된 위치로부터 크게 벗어나는 결과를 가져오는 것을 확인하였다.

아울러, 설치 해석을 통하여 양광관 내 응력의 발생크기 등을 예측함으로써 설계 안전도를 평가할 수 있게 되었다.

### 후기

본 논문은 해양수산특정 연구과제인 “심해저 집광시스템 및 채광운용기술 개발”과제로 수행되었으며, 해양연구원의 기본연구 과제인 “해양개발 설계엔지니어링 기술 고도화”의 연구의 일부분이다.

### 참고문헌

Amann, H et al. (1991): "Soft Ocean Mining," Proc. Offshore Tech Conf, Houston, Paper 6553.  
 Brink, AW and Chung, JS (1981): "Automatic Position Control of a 300,000-Ton Ship Ocean Mining System," Proc Offshore Tech Conf, Houston, Paper 4091.  
 Choi, JS, Hong, S, Kim, HW and Lee, TH (2003): "An Experimental

Study on Tractive Performance of Tracked Vehicle on Cohesive Soft Soil," Proc 5th ISOPE-OMS, Tsukuba, pp 83-90.  
 Chung, JS (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, JS (2003): "Deep-ocean Mining Technology: Learning Curve I," Proc 5th ISOPE-OMS, Tsukuba, November, pp 1-6.  
 Deepak, CR et al. (2001): "Development Tests on the Underwater Mining System Using Flexible Riser Concept," Proc 4th ISOPE -OMS, Szczecin, pp 94-98.  
 Fossen, TI (2002): Marine Control Systems, Marine Cybernetics.  
 Handschuh, R et al. (2001): "Innovative Deep Ocean Mining Concept based on Flexible Riser and Self-propelled Mining Machines," Proc 4th ISOPE-OMS, Szczecin, pp 99-107.  
 Herrouin, G et al. (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 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, HW and Choi, JS (2002): "Transient Dynamic Analysis of Tracked Vehicle on Extremely Soft Cohesive Soil," Proc 5th ISOPE-PACOMS, Daejeon, pp 100-107.  
 Hong, S, Kim, HW and Choi, JS (2003a): "A New Method Using Euler Parameters for 3D Nonlinear Analysis of Marine Risers/Pipelines," Proc 5th ISOPE-OMS, Tsukuba, pp 83-90.  
 Hong, S, Choi, JS and Kim HW (2003b): "Effects of Internal Flow on Dynamics of Underwater Flexible Pipes," Proc 5th ISOPE -OMS, Tsukuba, pp 91-98.  
 Kim, HW, Hong, S and Choi, JS (2003): "Comparative Study on Tracked Vehicle Dynamics on Soft Soil: Single-Body Dynamics vs. Multi-Body Dynamics," Proc 5th ISOPE-OMS, Tsukuba, pp 132-138.  
 Kim, HW, Hong, S, Choi, JS and Yeu, TK (2005): "Dynamic Analysis of Underwater Tracked Vehicle on Extremely Soft Soil by Using Euler Parameters", Proc 6th ISOPE-OMS, Changsha, pp 141-148.  
 김형우, 홍섭, 최종수, 여태경 (2006): "심해저 광물자원 채광시스템의 통합거동 해석", 2006년도 한국해양공학회 추계학술대회, 부산.  
 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.  
 Schulte, E, Handschuh, R and Schwarz, W (2003): "Transferability for Soil Mechanic Parameters to Traction Potential Calculation of a Tracked Vehicle," Proc 5th ISOPE-OMS, Tsukuba, pp 123-131.