

심해저 광물자원 채광시스템의 통합거동 해석

김형우* · 홍 섭** · 이창호*** · 최종수**** · 여태경*****

*,**,***,****,***** 한국해양연구원 해양시스템안전연구소

Total Dynamic Analysis of Deep-Seabed Integrated Mining System

Hyung-Woo Kim · Sup Hong** · Chang-Ho Lee*** · Jong-Su Choi**** · Tae Kyeong Yeu******

,,***,****,***** Maritime and Ocean Engineering Research Institute, KORDI, Daejeon, Korea*

요 약 : 본 논문은 통합채광시스템의 동력학 해석을 다루고 있다. 통합채광시스템은 채광선, 수직양광관, 중간 저장 장소인 버퍼, 유연관, 자항식집광기로 구성되어 있다. 자항식집광기와 버퍼는 6자유도의 강체로 가정하였으며, 수직양광관과 유연관의 동적거동 해석을 위해 집중 질량 매개방법을 이용한 이산화 모델을 적용하였다. 채광선에 대한 운동은 포함시키지 않았지만 경계조건을 통하여 채광선의 움직임을 표현하였다. 연약한 해저면을 주행하는 차량에는 연약지반 역학 모델을 적용시켰다. 수직양광관-버퍼, 버퍼-유연관, 유연관-자항식집광기의 연결에는 회전구속과 볼 구속조건을 사용하였다. 연성 동력학 모델의 운동방정식을 유도하기 위해 국부좌표계를 사용하였으며, 4개의 오일러 매개변수를 사용하여 각 시스템의 자세를 표현하였다. 통합 채광시스템의 운동 방정식 해를 구하기 위해서 증분-반복법을 적용하였으며, 시간영역 적분기는 newmark- β 를 사용하였다. 통합 채광시스템의 동적 거동 해석을 수치해석을 통해 분석하였다.

핵심용어 : 채광시스템, 자항식집광기, 수직양광관, 유연관, 통합거동해석, 연약지반, 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 cohesive soft soil is applied to the self-propelled miner. Hinged and ball constraints are used to define the connections between sub-systems (vertical steel pipe, buffer, flexible pipe, self-propelled 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- β method is used for time-domain integration. The total dynamic responses of integrated mining system are investigated.

Key words : Integrated mining system, Self-propelled miner, Flexible pipe, Total dynamic analysis, Soft soil, Time domain simulation

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 수직양광관을 통한 연속적

채광(continuous mining)의 타당성이 높게 평가되고 있다. 이러한 연속적 채광시스템은 채광선, 수직양광관, 중간버퍼, 유연관, 자항식 집광기(해저 주행차량)로 구성된다. 해저 주행차량과 버퍼를 연결하는 유연관의 형상은 해저 주행차량의 주행성능에 큰 영향을 준다. 또한 유연관에 연결되어 있는 중간버퍼와 해저 주행차량간의 상대위치도 해저 주행차량의 성능에 영향을 준다. 따라서 채광선-수직양광관-버퍼-유연관-해저 주행차량으로 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 무한궤도차량을 하나의 강체로

* 대표저자 : 정희원, guddn@moeri.re.kr, 042)866-3871

** 정희원, suphong@moeri.re.kr 042)866-3970

*** 정희원, chlee78@moeri.re.kr 042)866-3884

**** 정희원, jschoe@moeri.re.kr 042)866-3873

***** 정희원, yeutk@moeri.re.kr 042)866-3872

가정하여 무한궤도차량에 대한 3차원 비선형 동적거동 해석방법을 개발하였으며, Kim et al.(2003)은 Hong et al.(2002)에 의해 개발된 강제 무한궤도차량의 해석방법의 검증에 대해 강제 무한궤도차량과 다물체 무한궤도차량의 동적거동 해석결과를 비교·검증하였다. Kim et al.(2005)은 오일러 각에서 발생하는 특이점 문제를 해결하기 위해 오일러 매개변수를 사용하여 강제 무한궤도차량의 동적거동 해석 프로그램을 개선하였으며, 해저 주행차량의 동적거동에 영향을 미치는 유체력을 포함시켰다.

Hong(1992, 1995, 1997)은 수직양광관 및 유연관에 대한 3차원 비선형 동적거동 해석을 위해 반복-증분 공식을 이용한 질량집중 매개변수 방법을 사용한 해석기법을 개발하였다. 또한 Hong et al.(2003a)은 4개의 오일러 매개변수를 이용한 해저 광물 수직양광관의 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 Kim et al.(2005)의해 개발된 연약지반 강제 주행차량 해석기법과 Hong et al. (2003a, 2003b)에 의해 개발된 해저 광물 수직양광관의 동적거동 해석 기법을 이용하였으며, 수직양광관, 버퍼, 유연관, 해저 주행차량을 기구학적 접합조건식과 연성방정식을 이용하여 전체 시스템에 대한 자코비안 행렬을 구성함으로써 채광시스템에 대한 연성 동적거동 해석이 가능하도록 하였다.

연성동적거동 해석을 위해 각 시스템에 대한 좌표계의 정의, 적분시간 선정 및 시간간격, 유연관의 이산화 및 경계조건의 선정 등이 중요한 요소이다. 본 논문에서는 Fig. 1과 같은 연속적 채광 시스템의 통합채광에 대한 연성거동 해석을 수행하였다. 채광선에 대한 동적거동 해석을 포함시키지 않았으나, 경계조건을 통하여 채광선의 움직임을 표현하였다.

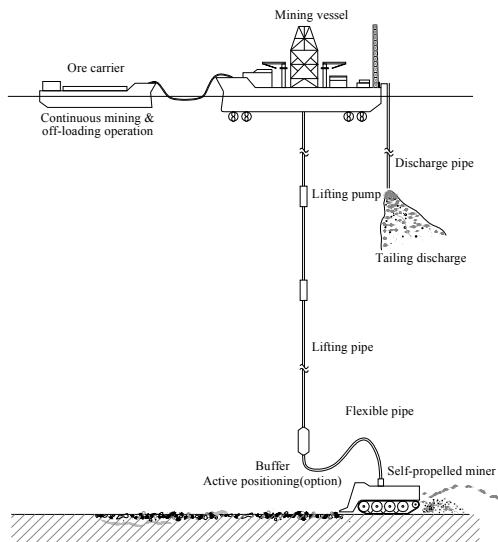


Fig. 1 Concept of commercial deep-ocean mining system

FORTRAN-90을 사용하여 채광시스템 통합거동 해석 프로그램을 개발하였으며, 개발된 프로그램을 이용하여 몇 개의 예제를 해석하였다. 해저 주행차량의 성능에 유연관 및 수직양광관

의 거동이 영향을 미치고 반대로 유연관의 성능에 해저 주행차량의 거동이 영향을 미친다는 것을 예제를 통하여 확인하였으며, 이를 통하여 연성거동의 필요성과 중요성을 알 수 있었다.

2. 수치해석 모델

2.1 해저 양광관 해석 모델

해저 양광관 시스템은 수직양광관과 유연관으로 구성되어 있으며, 수직양광관과 유연관 사이에는 중간 저장장소인 버퍼가 연결되어 있다. 수직양광관은 일반적으로 스틸관으로 제작되며, 선상에서 버퍼까지의 운동은 일반적으로 시계추처럼 움직인다. 이에 반해 유연관은 해저 주행차량이 자유롭게 움직일 수 있도록 유연한 재질을 사용하고 있으며, 유연관의 형상이 해저 주행차량의 이동에 방해가 되지 않도록 하기 위하여 유연관이 수직면에 대해서 아크(arch)나 S-형을 형성하도록 하고 있다. 이러한 형상을 만들기 위해 부력 모듈이 사용되고 있다.

Table 3 Principal dimensions of lifting pipe model

Items	Data
- Length (L)	5000 m
- Outer diameter (D _o)	0.2445 m
- Inner diameter (D _i)	0.2005 m
- Mass (m)	120 kg/m
- Effective weight (w _e)	1,081 N/m
- Axial stiffness (EA)	5.6e5 kN
- Bending stiffness (EI)	19,800 kN-m ²
- Torsional stiffness (GJ)	15,221 kN-m ²
- Drag coefficient (C _d)	1.0
- Friction coefficient (C _f)	0.01
- Inertia coefficient (C _m)	2.0

Table 4 Principal dimensions of flexible pipe model

Items	Data
Flexible pipe	
- Length (L)	500 m
- Outer diameter (D _o)	0.4 m
- Inner diameter (D _i)	0.356 m
- Mass (m)	65 kg/m
- Effective weight (w _e)	520 N/m
- Axial stiffness (EA)	18,000 kN
- Bending stiffness (EI)	18 kN-m ²
- Torsional stiffness (GJ)	90 kN-m ²
- Drag coefficient (C _d)	1.0
- Friction coefficient (C _f)	0.01
- Inertia coefficient (C _m)	2.0
Buoyancy module	
- Outer Diameter (D _b)	0.9 m
- Length (L _b)	1.0m
- Density (ρ _b)	650kg/m ³
- Quantity (ea)	156
- Spacing	0.25 m
- Drag coefficient (C _d)	0.8
- Friction coefficient (C _f)	0.1
- Inertia coefficient (C _m)	1.67(Average value)

본 논문에서는 5000m의 수직양광관과 500m의 유연관을 사용하여 수치해석 모델을 구성하였으며, 156개의 부력재를 사용하여 유연관이 S-형이 되도록 설계하였다. 수직양광관, 유연관과 부력재에 대한 특성치는 Table 1과 2에 나타나 있다.

Hong et al. (2003a, 2003b)에 의해 개발된 4개의 오일러 매개변수를 이용한 수직양광관 및 유연관의 3차원 동적거동 해석방법을 이용하여 수치 모델을 구성하였다. 수직양광관 및 유연관의 기하학적 곡률과 자세를 표현하기 위해 4개의 오일러 매개변수를 사용하였으며, 기구학적 접합조건식, 재료역학 관계식, 힘의 평형조건식, 모멘트 평형조건식으로 구성되는 수직양광관, 유연관의 비선형 지배방정식을 풀기 위해 증분-반복법을 이용하였다.

3차원 비선형 수직양광관 및 유연관의 지배방정식은,

- 기구학적 접합 조건식
- 재료역학 관계식
- 힘의 평형조건식
- 모멘트 평형조건식

등으로 구성된다(Hong et al.,2003a,2003b). 상기 식의 자세한 내용은 부록 A.1 - A.13에 자세히 표현되어 있다.

2.2 버퍼 해석 모델

중간저장소인 버퍼는 복잡한 시스템으로 구성되어 있으며, 주요기능으로는 ①수직양광관과 유연관의 연결, ②수직양광관의 안정성 유지, ③유연관의 균형유지, ④단괴의 유출량 조절 등이다. Fig. 2는 버퍼시스템 예를 나타내며, 본 논문에서는 통합 채광시스템의 동적거동 해석이 주 목적인 관계로 버퍼시스템 내부 운동은 생략하여 복잡한 버퍼시스템을 실린더형의 1개의 강체로 가정하여 모델링하였다. 버퍼시스템에 대한 특성치는 Table 3에 나타나 있다.

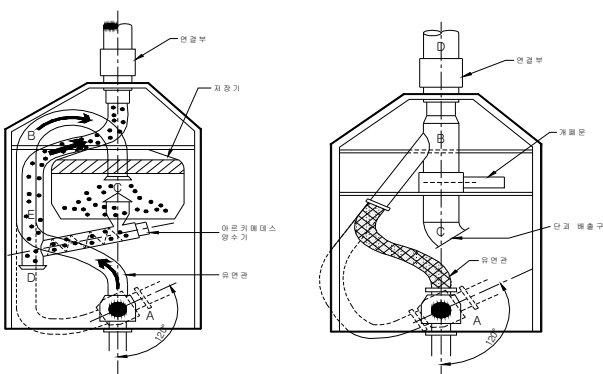


Fig. 2 Buffer system model

Table 5 Principal dimensions of buffer system model

Items	Data
- Length (L)	9 m
- Diameter (D ₀)	3 m
- Mass (m)	75 ton
- Inertia (I _{xx} , I _{yy} , I _{zz})	168, 168, 84 ton·m ²
- Drag coefficient (C _d)	2.0
- Added mass (m _A)	75 ton

2.3 주행차량 해석 모델

Fig. 3은 해저 주행차량 모델을 나타내고 있다. 해저 주행차량은 채집시스템, 구동시스템, 송출시스템, 구조시스템 등 다양한 요소로 구성되어 있다. 하지만 본 논문에서는 연속적 채광시스템의 통합 동적거동해석과 실시간 해석이 주 목적인 관계로 해저 주행차량을 하나의 강체로 가정하였다(Kim et al.:2003).

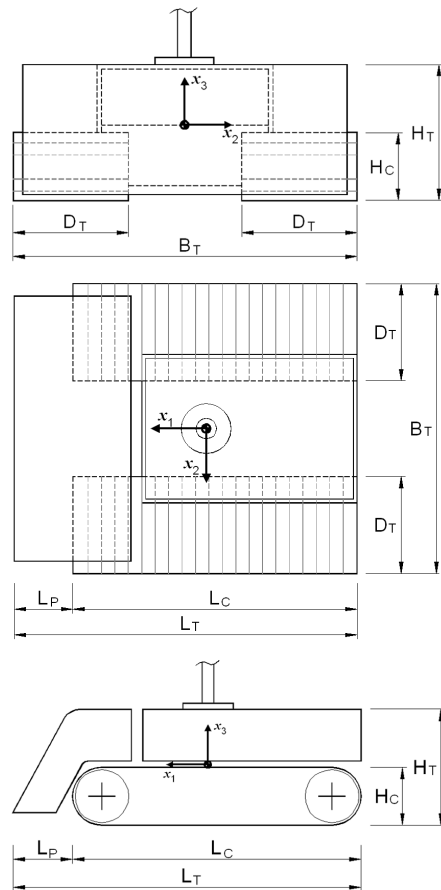


Fig. 3 Underwater tracked vehicle model

해저 주행차량의 운동방정식은 다음과 같이 간단한 형태로 표현된다(Kim et al.:2003).

$$-m\dot{V}_C - m\tilde{\omega}V_C + A^T(B - W) + F_S + F_H = 0 \tag{1}$$

$$-J\dot{\omega} - \tilde{\omega}J\omega + M_B + M_H + M_S = 0 \tag{2}$$

여기서, **m**과 **J**는 해저 주행차량의 질량과 관성모멘트 행렬을 나타내고, **V_C**와 **ω**는 해저 주행차량의 무게중심의 병진속도와 회전속도를 나타낸다. **A**는 해저 주행차량의 무게중심에서의 자세 행렬을 나타낸다. **W**와 **B**는 해저 주행차량의 무게와 부력을 나타내며, **F_S**와 **M_S**는 지반에 의해서 차량에 작용하는 힘과 모멘트이다. **F_H**와 **M_H**는 유체에 의해 발생하는 힘과 모멘트를 나타내며, **M_B**는 부력에 의해 발생하는 모멘트를

나타낸다.

틸드(tilde, ~) 연산자(operator)는 3차원 공간상의 임의의 벡터 \mathbf{a} 를 $\mathbf{a} = [a_x, a_y, a_z]^T$ 로 정의할 경우, 틸드 연산자 $\tilde{\mathbf{a}}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\tilde{\mathbf{a}} = \begin{bmatrix} 0 & -a_z & a_y \\ a_z & 0 & -a_x \\ -a_y & a_x & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

본 논문에서 사용된 해저 주행차량의 물성치는 Table 4에 나타나 있다.

Table 6 Principal dimensions of miner model

Items	Data
Mass (m)	50 ton
Total length of miner (L_T)	10.8 m
Contact length of track belt (L_C)	9.0 m
Total breadth of miner (B_T)	10.0 m
Width of track belt (D_T)	3.5 m
Height of mass center from bottom (H_C)	1.5 m
Total height of miner (H_T)	3.0 m

3. 연성거동 동역학 모델

이상과 같이 수직양광관/유연관, 버퍼, 해저 주행차량의 수치해석 모델을 유도하였으며, 이를 통합하여 통합거동 해석 모델을 만들기 위해서는 수직양광관-버퍼, 버퍼-유연관, 유연관-해저 주행차량의 연결점에 대한 장력과 모멘트($\mathbf{F}_T, \mathbf{M}_T$)를 버퍼와 해저 주행차량에 포함시켜야하며, 동시에 각 연결점의 기구학적 연결조건을 표현하는 접합조건식(Compatibility condition)이 포함되어야 한다.

3.1 접합조건식(Compatibility condition)

3개의 연결점(수직양광관-버퍼, 버퍼-유연관, 유연관-해저 주행차량)에 대한 접합조건식은 같은 표현으로 나타낼 수 있으며, 본 논문에서는 유연관-해저 주행차량의 접합조건에 대해서 표현하기로 한다. Fig. 4는 유연관-해저 주행차량이 연결의 개념도이다. 유연관과 해저 주행차량은 절점(N)에서 접합되어 있다(Fig. 4 참조).

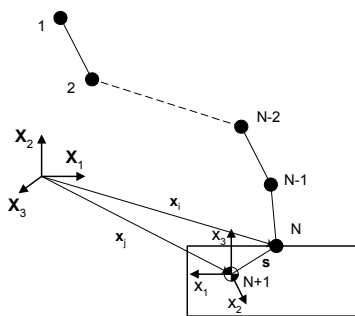


Fig. 4 Position vector of connection node of flexible pipe

일반적으로 강체동역학에서는 다양한 접합조건식이 있다 (Haug, 1989). 강체동역학의 접합조건의 일부분을 이용하여 해저 유연관-해저 주행차량의 접합조건식을 유도하였다.

① Dot-1 조건

Dot-1 조건은 Fig. 5의 공간상의 임의의 벡터($\mathbf{a}_i, \mathbf{a}_j$)가 항상 수직인 조건이다. Dot-1조건을 수학적으로 표시하면 다음과 같다.

$$\Phi^{D1}(\mathbf{a}_i, \mathbf{a}_j) = \mathbf{a}_i^T \mathbf{a}_j = 0 \quad (4)$$

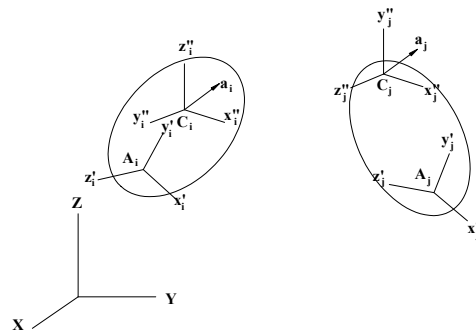


Fig. 5 Vectors fixed in and between bodies

② Hinged-3(H3) 조건

H3 조건은 Fig. 6와 같이 한 쌍의 점(두 물체의 P_i 와 P_j)이 일치하는 조건이다. H3조건을 수학적으로 표시하면 다음과 같다.

$$\Phi^{H3}(P_i, P_j) = \mathbf{r}_j + \mathbf{A}_j \mathbf{s}'_j - \mathbf{r}_i - \mathbf{A}_i \mathbf{s}'_i = \mathbf{0} \quad (5)$$

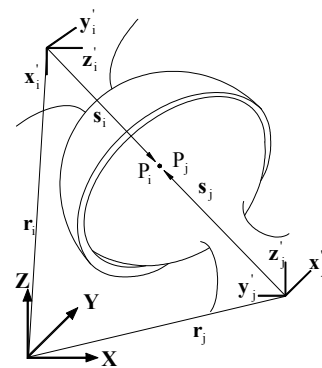


Fig. 6 Hinged-3 condition

여기서 \mathbf{r}_i 와 \mathbf{r}_j 는 관성좌표계에서 바라본 i, j 물체 중심까지의 거리벡터를 나타내고, \mathbf{A}_i 와 \mathbf{A}_j 는 각각 i, j의 자세행렬을 의미하며, \mathbf{s}'_i 와 \mathbf{s}'_j 는 i, j 물체의 무게중심에서 접합지점까지의 거리벡터를 나타낸다.

③ Hinged-1(H1) 조건

H1 조건은 Fig. 7과 같이 한 쌍의 점(두 물체의 P_i 와 P_j)이

일치하면서 임의의 축(\mathbf{h}_i or \mathbf{h}_j)에 대해서 회전하는 조건이며, 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi^{H1}(P_i, P_j) = \begin{bmatrix} \Phi^{H3}(P_i, P_j) \\ \Phi^{P1}(\mathbf{h}_i, \mathbf{h}_j) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (6)$$

여기서 $\Phi^{P1}(\mathbf{h}_i, \mathbf{h}_j)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Phi^{P1}(\mathbf{h}_i, \mathbf{h}_j) = \begin{bmatrix} \Phi^{D1}(\mathbf{f}_i, \mathbf{h}_j) \\ \Phi^{D1}(\mathbf{g}_i, \mathbf{h}_j) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (7)$$

그리고 $\mathbf{f}_i, \mathbf{g}_i, \mathbf{h}_i$ 와 $\mathbf{f}_j, \mathbf{g}_j, \mathbf{h}_j$ 는 각각 i, j 물체의 자세행렬의 x, y, z 축 성분을 나타낸다.

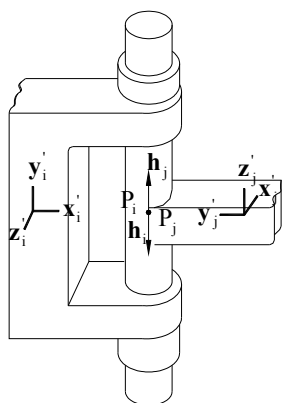


Fig. 7 Hinged-1 condition

이상의 조건식을 이용하여 수직 양광관-버퍼, 버퍼-유연관, 유연관-해저 주행차량에 대한 접합조건식을 유도하였다. 각각의 연결점에 대한 기구학적 접합조건식은 상기에서 유도된 조건식을 시간에 대해 미분함으로써 구할 수 있다.

3.2 연성운동방정식

해저 주행차량의 연성운동방정식은 식 (1)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$-\mathbf{m}\dot{\mathbf{V}}_C - \mathbf{m}\tilde{\omega}\mathbf{V}_C + \mathbf{A}_j(\mathbf{B} - \mathbf{W}) + \mathbf{F}_S + \mathbf{F}_H + \mathbf{A}_{ij}^T \mathbf{F}_T = \mathbf{0} \quad (8)$$

$$-\mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\omega}} - \tilde{\omega}\mathbf{J}\boldsymbol{\omega} + \mathbf{M}_B + \mathbf{M}_H + \mathbf{M}_S + \mathbf{A}_{ij}^T \mathbf{M}_T = \mathbf{0} \quad (9)$$

여기서, $\mathbf{A}_{ij} = \mathbf{A}_i^T \mathbf{A}_j$ 이고, \mathbf{A}_i 는 해저 유연관 N 번째 절점의 자세행렬, \mathbf{A}_j 는 차량의 자세행렬을 나타내며, \mathbf{F}_T 와 \mathbf{M}_T 는 N 번째 절점의 장력과 모멘트 벡터이다.

4. 연성 동역학 해석 기법

이상과 같이 유도된 수직양광관/해저 유연관, 버퍼, 해저 주행차량 운동방정식과 접합조건식을 통합하여 연성동역학의 해를 구하기 위해 Hong et al.(2003a, 2003b)에 의해 제안된 증분-반복법이 적용되었다. 버퍼의 위치는 수직양광관의 이산화

모델의 절점에 추가되는 절점으로 정의하였다. 즉, Fig. 4에서와 같이 수직 양광관 모델이 N 개의 절점으로 이산화 되었을 때, 버퍼의 위치는 $N+1$ 절점으로 간주하였다. 해저 주행차량도 이와 같은 방법을 적용하였다. 즉, 해저 유연관 모델이 N 개의 절점으로 이산화 되었을 때, 해저 주행차량의 위치는 $N+1$ 절점이 된다.

연성운동방정식에 Newmark-b방법을 적용한 증분-반복법을 적용할 경우 자코비안(Jacobian) 행렬을 구해야 하며, 자코비안 행렬을 개략적으로 표시하면 Fig. 8와 같이 표현된다. 이상에서 유도된 방법을 적용하여 비선형 연성거동 수치해석 프로그램인 RISER-TV를 FORTRAN-90으로 개발하였다. Fig. 9은 RISER-TV의 순서도를 나타낸다.

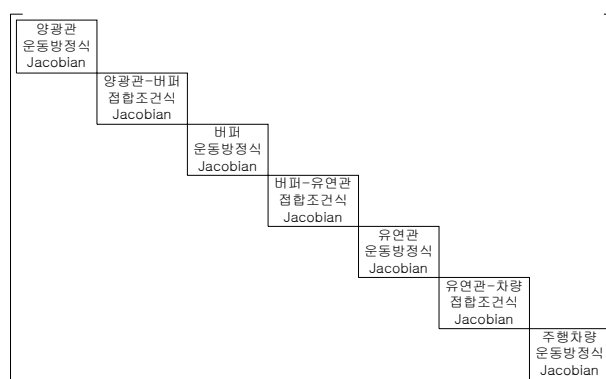


Fig. 8 Jacobian matrix of coupled dynamic analysis model

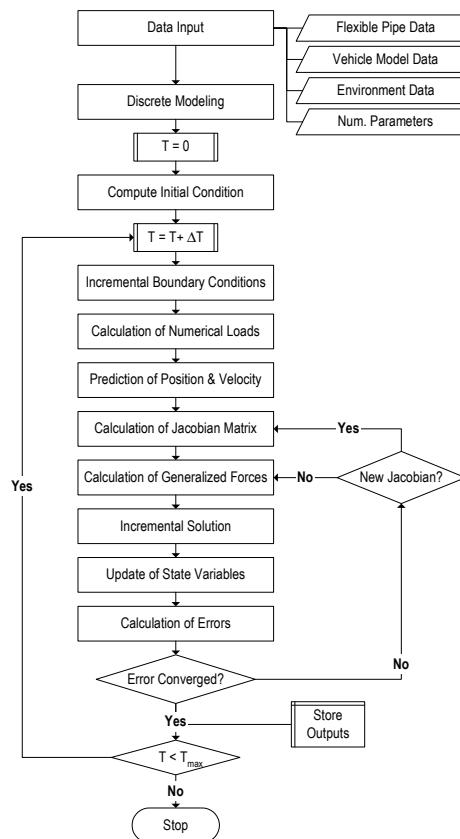


Fig. 9 Flowchart of computation program, RISER-TV

5. 수치 해석

개발된 비선형 수치해석 프로그램인 RISER-TV를 이용하여 수치해석을 행하였다. 통합거동 해석은 2가지의 경우에 대해서 수행되었다.

- Initial stationary positioning
- Tandem positioning

5.1 Initial stationary positioning(ISP)

버퍼의 무게중심에서 수직방향으로 상하 4.5m되는 지점에 수직 양광관과 해저 유연관이 연결되어 있으며, 해저 유연관의 나머지 한 부분은 해저 주행차량의 바닥에서 3.0m되는 지점에 해저 주행차량과 연결되어 있으며, 초기에 해저 주행차량은 지면에 접촉해 있다. 총 해석시간은 600초이며, 적분시간 간격은 0.005초이다. 조류의 영향은 없는 것으로 가정하였다. 해석결과는 Fig. 10~12에 나타나 있다. Fig. 10과 11은 수직 양광관과 해저 유연관 형상의 변화를 나타내고 있다. 수직 양광관은 시간의 변화에 따라 왼쪽으로 움직이고 있지만(Fig. 10), 수직 양광관의 끝점(주행차량이 연결된 지점)의 움직임은 거의 변화가 없었다(Fig. 11).

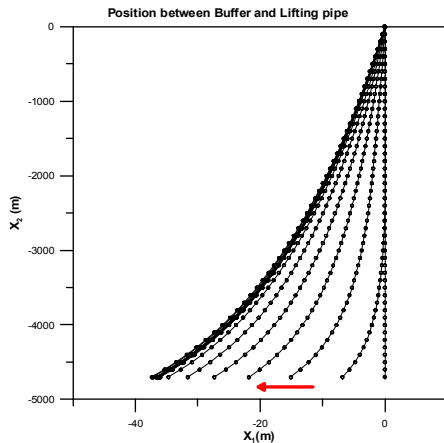


Fig. 10 Lifting pipe deformation by ISP simulation

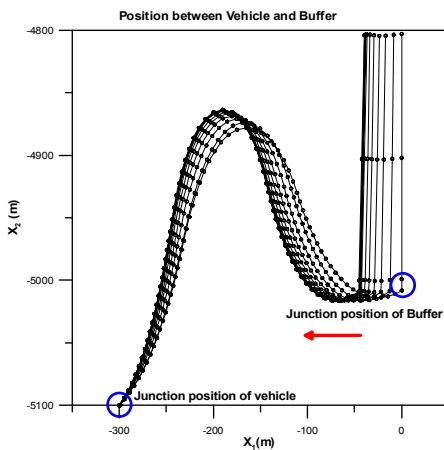


Fig. 11 Flexible pipe deformation by ISP simulation

해저 주행차량이 움직이지 않는 이유는 수직양광관이 해저 유연관에 비해 상대적으로 길고, 지면에 접촉해 있는 해저 주행차량보다 버퍼가 상대적으로 움직이기 쉽기 때문이다. Fig. 12는 시간의 변화에 대한 버퍼와 해저 주행차량의 진행방향의 움직임을 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 버퍼는 45m 정도 움직인 후 안정화 되었으며, 해저 주행차량은 움직임의 변화가 거의 없었다.

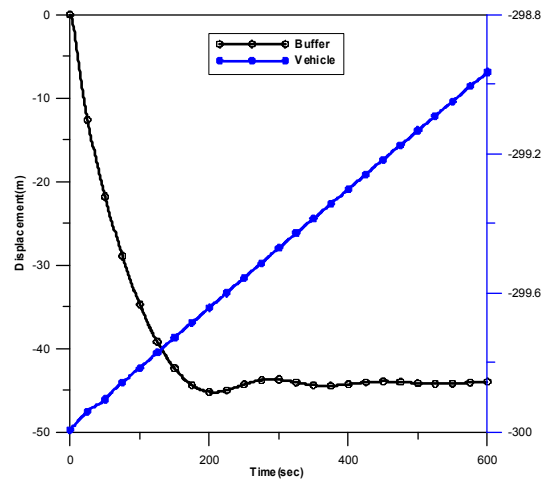


Fig. 12 Longitudinal position of buffer and vehicle tandem positioning(TP)

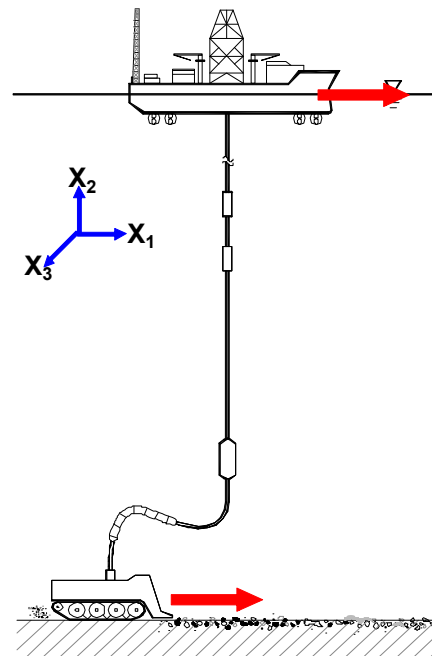


Fig. 13 Coupled dynamic simulation of tandem positioning

TP시뮬레이션은 Fig. 13과 같이 파이프 시스템의 초기 형상이 해저 주행차량 앞쪽에 놓여 있으며, 초기 안정화 시간 50초가 지난 후에, 해저 주행차량이 차량의 진행방향으로 움직일 때, 이와 동시에 수직 양광관의 상부 끝점이 해저 주행차량과

같은 방향, 같은 속도로 움직이는 시뮬레이션이다. 차량의 속도는 0.5, 0.75, 1.0m/s로 변화시키면서 해석을 수행하였다.

Fig. 14과 15는 수직양광관과 유연관의 움직임을 나타내고 있다. 수직양광관은 초기 안정화 구간에서는 왼쪽으로 움직이지만, 그 이후에는 차량과 모선의 진행방향과 같은 방향으로 움직이는 것을 알 수 있다. 수직양광관의 상부 끝단은 해저 주행차량과 같은 속도로 움직이지만 하부 끝단은 상대적으로 느리게 움직이고 있다. 이러한 현상은 수직양광관의 길이가 길기 때문에, 수직양광관의 상부 끝점이 해저 주행차량과 같은 속도로 움직이지만, 버퍼가 고정되어 있는 수직양광관의 하부 끝점의 움직임은 시간지연에 의해 느리게 움직이기 때문이다. 이럴 경우 수직양광관에 큰 변형이 생겨 심할 경우에는 수직양광관이 파손하게 된다. 이를 방지하기 위해서는 버퍼에 추가적인 추력장치를 장착하던지 아니면 해저 주행차량 및 모선의 속도를 작게 주어야 한다.

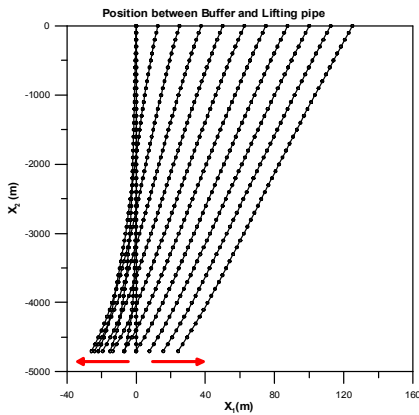


Fig. 14 Lifting pipe deformation by TP simulation

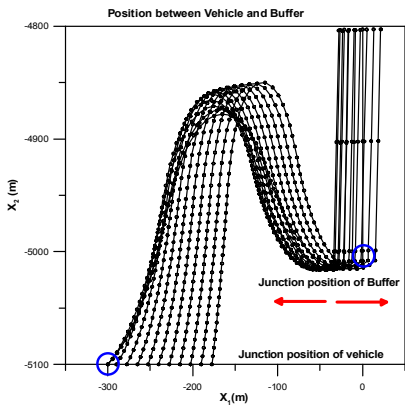


Fig. 15 Flexible pipe deformation by TP simulation

Fig. 16은 해저 주행차량이 지면과 접촉하는 지점에서의 최대전단 변위를 나타내고 있다. 차량의 속도가 빨라질수록 최대전단 변위가 커지는 것을 알 수 있다. Fig. 17는 해저 유연관과 해저 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 해저 유연관의 S-형상이 초기형상보다 많이 좁혀져서 생기는 현상이다.

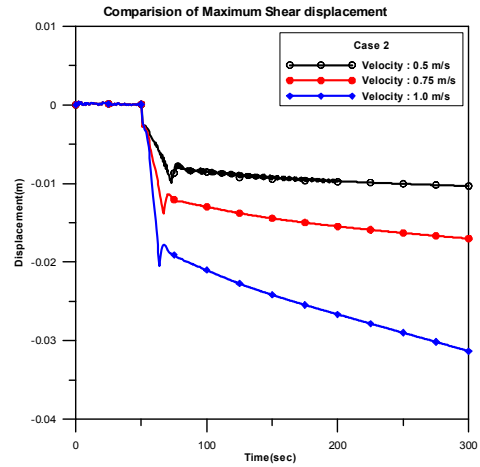


Fig. 16 Max. shear displacement by TP simulation

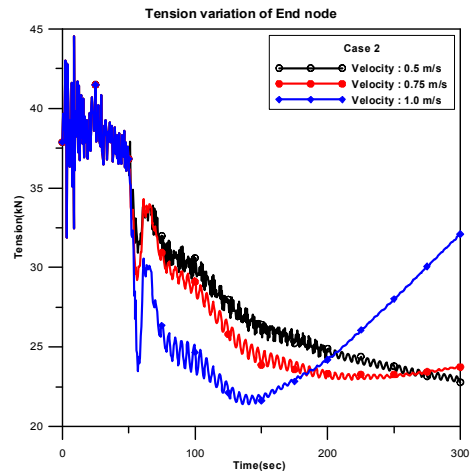


Fig. 17 Variation of tension force by TP simulation

6. 결론

해저 유연관과 수직양광관의 3차원 비선형 동적거동 해석 프로그램과 해저 주행차량의 3차원 비선형 동적거동 해석 프로그램을 이용하여 수직양광관-버퍼-유연관-해저 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 해저 주행차량 설계에 대한 정확한 유체력 계수가 산정되어야 할 것이며, 다양한 접합조건식에 대한 응용이 있어야 할 것이다.

후기

본 논문은 해양수산특정 연구과제인 “심해저 광물자원 집광

시스템 및 채광운용기술 개발"과제로 수행되었으며, 아울러 기본연구 과제인 "해저지형 자율 맵핑 핵심기술 개발"의 일부로 수행되었다.

참고 문헌

- [1] Amann, H., Oebius, H.U., Gehbauer, F., Schwarz, W., and Weber, R.(1991), "Soft Ocean Mining," Proc Offshore Tech Conf, Houston, Paper 6553.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Chung, J.S. (2003), "Deep-ocean Mining Technology. Learning Curve I," Proc 5th ISOPE Ocean Mining Sym, Tsukuba, November, pp. 1-6.
- [5] Deepak, C.R., Shajahan, M.A., Atmanand, M.A., and Annamalai, K.(2001), "Development Tests on the Underwater Mining System Using Flexible Riser Concept," Proc 4thISOPE Ocean Mining Sym, Szczecin, pp. 94-98.
- [6] Edward J. H. (1989), Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, Allyn and Bacon
- [7] Handschuh, R., Grebe, H., Panthel, J., Schulte, E., Wenzlawski, B., Schwarz, W., Atmanand, M.A., Jeyamani, R., Shajahan, M., Deepak, C., and 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.
- [8] Herrouin, G., Lenoble, J.P., Charles, C., Mauviel, F., Bernard, J., and 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.
- [9] Hong, S. (1992), Three dimensional nonlinear static and dynamic analysis of flexible risers, doctoral dissertation (in German), Univ of Aachen.
- [10] 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.
- [11] Hong, S. (1997), "3D Dynamic Analyses of Lifting Pipe Systems in Deep Seabed Mining," Proc 2nd ISOPE Ocean Mining Sym, Seoul, pp. 75-81.
- [12] 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.
- [13] Hong, S., Kim, H.W., and 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.
- [14] Hong, S., Kim, H.W., and 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.
- [15] Hong, S., Choi, J.S., and Kim, H.W. (2003), "Effects of Internal Flow on Dynamics of Underwater Flexible Pipes," Proc 5th ISOPE Ocean Mining Sym, Tsukuba, pp. 91-98.
- [16] Kim, H.W., Hong, S., and 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.
- [17] Kim, H.W., Hong, S., Choi, J.S., and 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.
- [18] 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.

부 록

■ 기구학적 접합 조건식

$$\sum_{i=1}^3 \dot{x}_i a_{i1} = \dot{\epsilon} \quad (A.1)$$

$$\sum_{i=1}^3 \dot{x}_i a_{i2} = (1 + \epsilon) \omega_3 \quad (A.2)$$

$$\sum_{i=1}^3 \dot{x}_i a_{i3} = -(1 + \epsilon) \omega_2 \quad (A.3)$$

여기서, a_{ij} ($i, j = 1, 3$)는 유연관 단면의 자세행렬의 성분, x_i 는 유연관의 좌표, ϵ 은 유연관의 축방향 변형률, ω_i 는 유연관의 각 속도를 나타내며, $(\dot{}) = \partial/\partial t$, $()' = \partial/\partial s$ 를 나타내며, t 는 시간, s 는 유연관의 길이를 의미한다.

■ 재료역학 관계식

$$q_{1e} = (EA\epsilon + \zeta A\dot{\epsilon}) + (1 - 2\nu)(p_0 A_0 - p_i A_i) \quad (A.4)$$

$$r_1 = GJ_{11}\kappa_1 \quad (A.5)$$

$$r_2 = GI_{22}\kappa_2 \quad (A.6)$$

$$r_3 = EI_{33}\kappa_3 \quad (A.7)$$

여기서, E 는 Young's modulus, G 는 Shear modulus, ζ 는 감쇠계수, A 는 유연관의 단면적, A_0 는 외경에 대한 면적, A_i 는 내경에 대한 면적, p_0 는 관외부의 압력, p_i 는 관 내부의 압력, J_{11} 는 극관성 모멘트, I_{22} , I_{33} 은 2차 관성모멘트, ν 는 포아송 비, κ 는 곡률, q_{1e} 는 유효인장력, $r_i (i=1,3)$ 는 굽힘강성을 나타낸다.

■ 힘의 평형조건식

$$m_1^* \sum_{i=1}^3 \ddot{x}_i a_{i1} = q'_{1e} - \kappa_3 q_2 + \kappa_2 q_3 + w_e a_{21} + f_{e1} \quad (A.8)$$

$$m_2^* \sum_{i=1}^3 \ddot{x}_i a_{i2} = q'_2 - \kappa_3 q_1 + \kappa_1 q_3 + w_e a_{22} + f_{e2} \quad (A.9)$$

$$m_3^* \sum_{i=1}^3 \ddot{x}_i a_{i3} = q'_3 - \kappa_2 q_1 + \kappa_1 q_2 + w_e a_{23} + f_{e3} \quad (A.10)$$

여기서, m_i^* 는 유연관의 질량, w_e 는 유연관의 단위길이당 유효하중, $q_i (i=1,3)$ 는 유연관의 내부 전단력, $f_{ei} (i=1,3)$ 는 추가질량력을 제외한 유체의 의해 발생하는 외력을 나타내며, $a_{2i} (i=1,3)$ 은 유연관 단면의 자세행렬의 성분, $(\ddot{}) = \partial^2 / \partial t^2$ 를 나타내며, t 는 시간을 의미한다.

■ 모멘트 평형조건식

$$J_{11}^* \dot{\omega}_1 + (J_{33}^* - J_{22}^*) \omega_2 \omega_3 = r'_1 - \kappa_3 r_2 + \kappa_2 r_3 \quad (A.11)$$

$$J_{22}^* \dot{\omega}_2 + (J_{11}^* - J_{33}^*) \omega_1 \omega_3 = r'_2 - \kappa_3 r_1 + \kappa_1 r_3 - q_3 \quad (A.12)$$

$$J_{33}^* \dot{\omega}_3 + (J_{22}^* - J_{11}^*) \omega_1 \omega_2 = r'_3 - \kappa_2 r_1 + \kappa_1 r_2 + q_2 \quad (A.13)$$

여기서, $J_{ii}^* (i=1,3)$ 는 관성모멘트를 나타낸다.

원고접수일 : 2009년 2월 3일
 심사완료일 : 2010년 3월 30일
 원고채택일 : 2010년 4월 26일