

## 유연관-해저주행차량 연성 동적거동 해석

홍 섭\* · 김형우

한국해양연구원 해양시스템기술연구본부

### Coupled Dynamic Analyses of Underwater Tracked Vehicle and Long Flexible Pipe

SUP HONG\* AND HYUNG-WOO KIM

Ocean Engineering Research Department, MOERI/KORDI, Daejeon, Korea

우리는 해저 연약지반 주행차량과 주행차량의 상부에 결합되어 있는 유연관의 연성거동 동력학 해석 기법을 개발하였다. 연약지반 주행차량은 1개의 강체로 모델링되었으며, 질량집중매개변수 기법을 이용한 이산화기법을 적용하여 유연관을 모델링하였다. 강체 무한계도 주행차량의 운동방정식과 유연관의 3차원 비선형 지배방정식을 결합시켰으며, 4개의 오일러 매개변수를 이용하여 주행차량과 유연관의 자세를 표현하였다. 주행차량과 유연관의 비선형 연성거동 동력학 방정식의 해를 구하기 위해, 증분-반복법을 이용하였다. 시간영역 수치적분을 위해 Newmark- $\beta$  기법을 이용하였다. 증분-반복법을 적용하여 연성 운동방정식에 대한 자코비안 행렬을 유도하였다. 동적거동 동력학 해석 기법을 통해 유연관의 동적거동과 연약지반 위를 주행하는 무한계도 차량의 동적거동 사이의 상호작용을 시간영역에서의 관찰하였다.

We developed a computational method on coupled dynamics of tracked vehicle on seafloor and long flexible pipe. The tracked vehicle is modeled as rigid-body vehicle, and the linked flexible pipe is discretized according to a lumped-parameter model. The equations of motion of the rigid-body vehicle on the soft seafloor are combined with the governing equations of flexible pipe dynamics. Four Euler parameters method is used to express the orientations of the vehicle and the flexible pipe. In order to solve the nonlinear coupled dynamics of vehicle and flexible pipe an incremental-iterative formulation is implemented. For the time-domain integration Newmark- $\beta$  method is adopted. The total Jacobean matrix has been derived based on the incremental-iterative formulation. The interactions between the dynamics of flexible pipe and the mobility of the tracked vehicle on soft seafloor are investigated through numerical simulations in time domain.

**Keywords:** Coupled Dynamics, Tracked Vehicle, Flexible Pipe, Euler Parameter, Incremental-iterative Formulation

### 서 론

1970년대 후반이후, 심해저 망간단괴의 상업적 채집을 위한 연속적 채광 개념에 대한 많은 연구가 진행되었다(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). Fig. 1은 심해저 채광시스템의 개념을 보여준다.

심해저 퇴적층처럼 매우 연약한 지반에서 필요한 추진력을 얻기 위해서는 무한계도 방식의 차량이 필수 불가결하다. 연약지반 무한계도 주행차량의 성능해석에 대한 다양한 실험 및 이론적인 연구가 진행되어 왔다(Hong *et al.*, 2002).

Hong *et al.*(2002)은 연약지반을 주행하는 강체차량에 대한 3차

원 비선형 동적거동 해석방법을 개발하였으며, Kim *et al.*(2003)은 Hong *et al.*(2002)에 의해 개발된 해석방법의 검증에 대해 강체 무한계도차량과 다물체 무한계도차량의 결과를 비교·검증하였다. Kim *et al.*(2005)은 특이점 문제가 발생하는 오일러 각 대신에 오일러 매개변수를 사용하여 강체 무한계도 차량 해석 프로그램을 개발하였으며, 무한계도에 영향을 미치는 유체력을 포함하였다. 다양한 수치해석을 통하여 유체력에 의한 주행차량의 동적 거동을 관찰하였다.

자항식 집광기의 개념을 실제 모델에 적용하기 위해서는 연약지반 주행차량의 운동에 큰 영향을 미치는 유연관의 거동도 주행차량 못지않게 중요한 요소이다. 유연관은 집광기와 망간단괴 유동제어를 위한 중간 저장소인 버퍼를 연결하는 부분이다. 이러한 유연관의 응용은 해저 석유 및 가스 생산시설에서도 많이 볼 수 있다.

연속적 채광개념에서 사용되는 유연관은 외부하중에 대해 큰 변형의 응답을 보인다. 심해저 채광시스템 구성 요소 중 유연관과

\*Corresponding author: suphong@moeri.re.kr

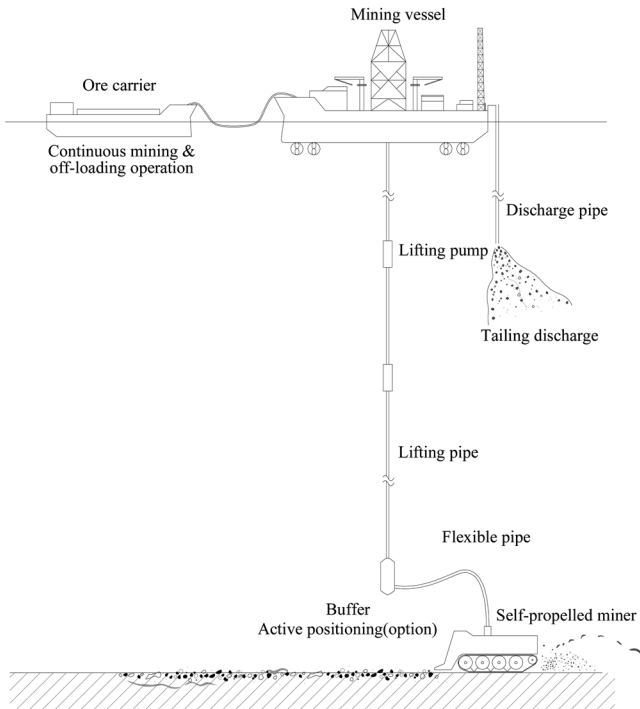


Fig. 1. Concept of commercial deep-ocean mining system.

양광관에 대한 3차원 비선형 동적거동 해석을 위해 반복-증분식 (iterative-incremental formulation)을 이용한 집중질량 매개변수 방법이 개발되었다(Hong 1992, 1995, 1997). 최근 Hong *et al.* (2003a)은 오일러 각의 특이점 문제를 해결하기 위해 4개의 오일러 매개변수를 이용한 해저 유연관의 3차원 비선형 동적거동 해석 방법을 개발하였으며, 아울러 유연관의 동적거동에 영향을 미치는 내부유동 효과를 포함한 전산해석 프로그램을 개발하였다(Hong *et al.*, 2003b).

본 논문에는 유연관과 연약지반을 주행하는 차량의 연성 동적거동 해석방법을 다루고 있다. Kim *et al.*(2005)에 의해 개발된 연약지반 강제 주행차량 해석기법과 Hong *et al.*(2003a, 2003b)에 의해 개발된 해저 유연관의 동적거동 해석 기법을 증분-반복법을 이용하여 통합시켰으며, 전체 자코비안 행렬을 구하기 위해 주행 차량의 운동방정식에 유연관의 동적 거동 영향을 포함시켰고, 유연관과 주행차량의 기구학적 접합조건식을 포함시켰다.

FORTRAN-90을 사용하여 유연관-주행차량의 연성 동적거동 해석 프로그램을 개발하였으며, 개발된 프로그램을 이용하여 몇 개의 예제를 해석하였다. 주행차량의 성능과 유연관의 거동이 상호 영향을 미친다는 것을 예제를 통하여 확인함으로써 연성거동의 필요성과 중요성을 알 수 있었다.

### 유연관 해석 모델

Hong *et al.*(2003a, 2003b)은 4개의 오일러 매개변수를 이용하여 유연관의 3차원 동적거동 해석방법을 개발하였다. 유연관의 기하학적 곡률과 자세를 표현하기 위해 4개의 오일러 매개변수를 사용하였으며, 기구학적 접합조건식, 재료역학 관계식, 힘의 평형조

건식, 모멘트 평형조건식으로 구성되는 비선형 지배방정식을 풀기 위해 증분-반복법을 이용하였다.

3차원 비선형 유연관의 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

#### ■ 기구학적 접합 조건식

$$\sum_{i=1}^3 \dot{x}_i a_{i1} = \dot{\epsilon} \tag{1a}$$

$$\sum_{i=1}^3 \dot{x}_i a_{i2} = (1 + \epsilon)\omega_3 \tag{1b}$$

$$\sum_{i=1}^3 \dot{x}_i a_{i3} = (1 + \epsilon)\omega_2 \tag{1c}$$

여기서,  $a_{ij}(i, j = 1, 3)$ 는 유연관의 자세행렬의 성분,  $x_i$ 는 유연관의 좌표,  $\epsilon$ 은 유연관의 축방향 변형률,  $\omega_j$ 는 유연관의 각 속도를 나타내며,  $(\dot{\phantom{x}}) = \partial/\partial t$ ,  $(\phantom{x})' = \partial/\partial s$ 를 나타낸다.

#### ■ 재료역학 관계식

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

$$r_1 = GJ_{11}k_1 \tag{2b}$$

$$r_2 = EI_{22}k_2 \tag{2c}$$

$$r_3 = EI_{33}k_3 \tag{2d}$$

여기서,  $E$ 는 Young's modulus,  $G$ 는 Shear modulus,  $A$ 는 단면적,  $J$ 는 극관성 모멘트,  $r$ 는 2차 관성모멘트,  $\nu$ 는 포아송 비,  $k$ 는 곡률,  $q_{1e}$ 는 유효인장력,  $r$ 는 비틀 및 굽힘 모멘트를 나타낸다.

#### ■ 힘의 평형조건식

$$m_1^* \sum_{i=1}^3 \ddot{x}_i a_{i1} = q_{1e}' - k_3 q_2 + k_2 q_3 + w_e a_{21} + f_{e1} \tag{3a}$$

$$m_2^* \sum_{i=1}^3 \ddot{x}_i a_{i2} = q_2' - k_3 q_1 + k_1 q_3 + w_e a_{22} + f_{e2} \tag{3b}$$

Table 1. Flexible pipe system model

| Items                                    | Data                  |
|--|-----------------------|
| <b>Flexible Pipe</b>                     |                       |
| - 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 (w <sub>e</sub> )     | 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                   |
| <b>Buoyancy Module</b>                   |                       |
| - 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) |

$$m_i^* \sum_{i=1}^3 \ddot{x}_i a_{i3} = q_3 - k_2 q_1 + k_1 q_2 + w_e a_{23} + f_{e3} \quad (3c)$$

여기서,  $m_i^*$ 는 유연관의 가상질량,  $w_e$ 는 유연관의 단위길이당 유효 중량,  $q_2$ 와  $q_3$ 는 유연관의 내부 전단력,  $f_{e3}$ 는 부가질량력을 제외한 외부유체력을 나타낸다.

■ 모멘트 평형조건식

$$J_{11}^* \dot{\omega}_1 + (J_{33}^* - J_{22}^*) \omega_2 \omega_3 = r_1' - k_3 r_2 + k_2 r_3 \quad (4a)$$

$$J_{22}^* \dot{\omega}_2 + (J_{11}^* - J_{33}^*) \omega_1 \omega_3 = r_2' - k_3 r_1 + k_1 r_3 - q_3 \quad (4b)$$

$$J_{33}^* \dot{\omega}_3 + (J_{22}^* - J_{11}^*) \omega_1 \omega_2 = r_3' - k_2 r_1 + k_1 r_2 + q_2 \quad (4c)$$

여기서,  $J_{ii}^*$ 는 2차관성모멘트,  $r_i$ 는 내부모멘트를 나타낸다.

유연관 시스템은 유연관과 부력모듈로 구성되어 있으며, 주행차량이 자유롭게 움직일 수 있도록, 부력모듈을 사용하여 유연관이 수직면에 대해서 아크(arch)나 S-형이 되도록 하였다. 유연관에 부력모듈을 결합시킬 경우 전체적인 형상이 증가하게 되어, 유연관의 관성력과 항력이 증가하게 된다. 본 논문에서는 부력재 사용에 의한 구조적 강성의 증가는 생략하였다.

본 논문에서는 500 m의 유연관을 156개의 부력재를 사용하여 S-형이 되도록 설계하였으며, 유연관과 부력재에 대한 물성치는 Table 1에 나타나 있다.

해저주행차량 해석 모델

Kim et al.(2005)은 Hong et al.(2002)에 의해 제안된 연약지반 주행차량의 과도기 동적거동 해석 방법을 개선하였다. 특이점 문제가 발생하는 오일러 각 대신 4개의 오일러 매개변수를 사용하여 차량의 자세를 표현하였으며, 해저주행차량의 동적 거동 해석을 위해 유체저항력을 포함시켰다.

연약지반 주행차량의 운동방정식을 간단히 표기하기 위해 틸드(tilde; ~) 연산자(operator)를 사용하였다.

벡터  $\mathbf{a} = [a_x, a_y, a_z]^T$ 의 틸드 연산자  $\tilde{\mathbf{a}}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\tilde{\mathbf{a}} = \begin{bmatrix} 0 & -a_z & a_y \\ a_z & 0 & -a_x \\ -a_y & a_x & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

틸드(~) 연산자를 이용하여 주행차량의 운동방정식은 다음과 같이 간단한 형태로 표현된다.

$$-\mathbf{m}\dot{\mathbf{V}}_C - \mathbf{m}\tilde{\omega}\mathbf{V}_C + \mathbf{A}^T(\mathbf{B} + \mathbf{W}) + \mathbf{F}_S + \mathbf{F}_H + \mathbf{F}_T = 0 \quad (6a)$$

$$-\mathbf{J}\dot{\omega} - \tilde{\omega}\mathbf{J}\omega + \mathbf{M}_B + \mathbf{M}_H + \mathbf{M}_S + \mathbf{M}_T = 0 \quad (6b)$$

여기서,  $\mathbf{m}$ 과  $\mathbf{J}$ 는 주행차량의 질량과 관성모멘트 행렬을 나타내고,  $\mathbf{V}_C$ 와  $\omega$ 는 차량의 무게중심의 병진속도와 회전속도를 나타낸다.  $\mathbf{W}$ 와  $\mathbf{B}$ 는 주행차량의 무게와 부력을 나타내며,  $\mathbf{F}$ 와  $\mathbf{M}_S$ 는 지면에 의해 차량에 작용하는 힘과 모멘트이다.  $\mathbf{F}_H$ 와  $\mathbf{N}_H$ 는 유체에 의해 받

생하는 힘과 모멘트를 나타낸다. 전체좌표계와 국부좌표계의 관계 식인 변환행렬  $\mathbf{A}$ 를 오일러 매개변수를 사용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{A} = 2 \begin{bmatrix} e_0^2 + e_1^2 - \frac{1}{2} & e_1 e_2 - e_0 e_3 & e_1 e_3 + e_0 e_2 \\ e_1 e_2 + e_0 e_3 & e_0^2 + e_2^2 - \frac{1}{2} & e_2 e_3 - e_0 e_1 \\ e_1 e_3 - e_0 e_2 & e_2 e_3 - e_0 e_1 & e_0^2 + e_3^2 - \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서  $e_0, e_1, e_2, e_3$ 는 오일러 매개변수이다(Haug, 1989).

도양에 의해 발생하는 힘과 모멘트,  $\mathbf{F}_S$ 와  $\mathbf{M}_S$ 는 도양의 견인저항, 다짐저항, 볼도장저항 등을 포함한다. Hong et al.(2002)은 차량의 접지면적에 대한 도양의 침하와 전단변형을 계산하였으며, 견인저항은 지면에 접촉하는 궤도의 각 분할격자에서의 수직압력과 전단 응력의 적분을 통해서 구할 수 있다. 또한, 지면에 접촉하는 궤도의 수직방향과 접선방향에 대해 발생하는 반복하중도 고려하였다.

Kim et al.(2005)은 해저 주행차량 해석모델에 유체력과 모멘트 ( $\mathbf{F}_H, \mathbf{M}_H$ )를 포함시켰다. 물속의 물체에 대한 유체저항력과 모멘트는 다음과 같이 표현된다(Fossen, 2002).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_H \\ \mathbf{N}_H \end{bmatrix} = -\mathbf{M}_A \dot{\nu} - \mathbf{C}_A(\nu)\nu - \mathbf{D}(\nu)\nu \quad (8)$$

여기서  $\nu = [u, v, w, p, q, r]^T$ 는 각 물체 무게중심의 병진속도와 회전속도이다.  $\mathbf{M}_A$ 는  $6 \times 6$  행렬로 부가질량 행렬을 의미하며,  $\mathbf{C}_A(\nu)$ 는 유체 코리올리힘 행렬이고,  $\mathbf{D}(\nu)$ 는 유체감쇠 행렬이다.

일반적으로  $6 \times 6$  부가질량 행렬의 각각의 계수는 실험을 통하여 찾아야하는 어려움이 있으나, 해저면을 느린 속도로 진행하는 주행차량의 경우에는 어떤 행렬성분은 크게 영향을 미치지 않는다. 본 연구에서는 부가질량 행렬을 다음과 같이 가정하였다.

$$\mathbf{M}_A = \text{diag}\{X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r\} \quad (9)$$

일반적으로 유체 코리올리힘 행렬의 비대각 성분은 대각성분에 비해 아주 작으므로, 대각행렬의 성분만 고려하였다.

속도가 느린 해저주행차량의 유체감쇠행렬 역시 대각성분만 고려하였다. 본 논문에서는 유체감쇠행렬을 선형과 2차 감쇠행렬의 합으로 가정하였다.

$$\mathbf{D}(\nu) = -\text{diag}\{X_{u\dot{u}}, Y_{v\dot{v}}, Z_{w\dot{w}}, M_{q\dot{q}}, N_{r\dot{r}}\} - \text{diag}\{X_{|u|u}, Y_{|v|v}, Z_{|w|w}, K_{|p|p}, M_{|q|q}, N_{|r|r}\} \quad (10)$$

Fig. 2는 해저주행차량 모델을 나타내고 있으며, 차량의 물성치는 Table 2에 나타나 있다. 식 (9)와 (10)의 유체력 계수는 Fig. 2와 Table 2의 차량의 기본적인 차원을 바탕으로 다음과 같이 산출하였다.

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

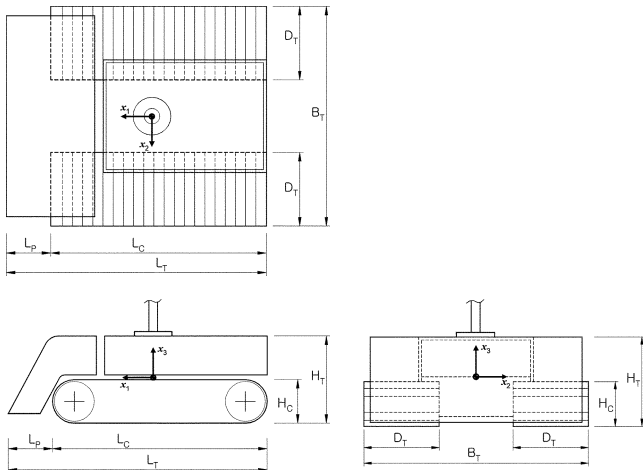


Fig. 2. Underwater tracked vehicle model.

Table 2. 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  |

### 연성 동력학 해석 모델

연성동적거동을 해석하기 위해서는 주행차량과 유연관의 연결점의 반력과 모멘트( $F_T$ ,  $M_T$ )이 식 (6)에 고려되어야 하며, 동시에 주행차량과 유연관간의 기구학적 연결조건을 표현하는 접합조건식(compatibility conditions)이 포함되어야 한다.

#### 좌표계

연성거동 해석을 위해 도입된 좌표계는 Fig. 3와 같다.

#### 접합조건식

유연관과 주행차량의 연결조건은 Fig. 4에 나타나 있다. 절점  $N$ ,  $N+1$  대신  $i$ 와  $j$ 를 사용하여, 연결점에 대해 기구학적 관계식을 표현하며 다음과 같다.

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_j + \mathbf{A}_j \mathbf{s}_{ji} \quad (11)$$

여기서  $\mathbf{x}$ 는 관성좌표계에 대한 위치벡터를 나타내고,  $\mathbf{A}_i$ 는 차량의 자세에 대한 변환행렬이며,  $\mathbf{s}_{ji}$ 는 차량의 좌표계에 대한 차량의 무게중심( $N+1$ )에서 연결점( $N$ )까지의 거리벡터를 나타낸다.

연결점에 대한 기구학적 접합조건식은 식 (11)을 시간에 대해 한번 미분함으로써 식 (12)와 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$\Phi = \dot{\mathbf{x}}_i - \dot{\mathbf{x}}_j - \mathbf{A}_j \dot{\omega}_j \mathbf{s}_{ji} = \mathbf{0} \quad (12)$$

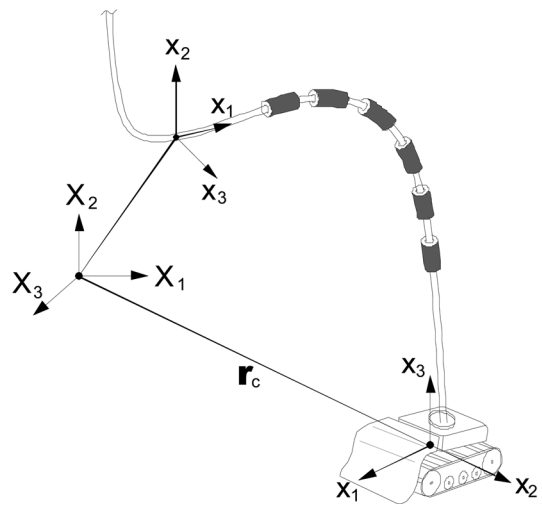


Fig. 3. Coordinates systems for coupled dynamic analysis.

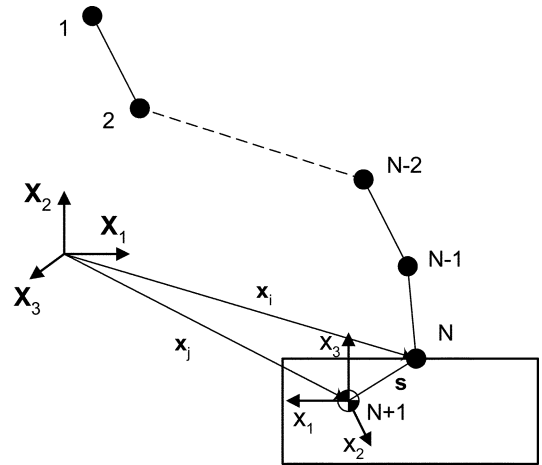


Fig. 4. Position vector of connection node of flexible pipe.

#### 연성운동방정식

주행차량의 연성운동방정식은 식(6)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$-\mathbf{m}\dot{\mathbf{V}}_C - \mathbf{m}\ddot{\omega}\mathbf{V}_C + \mathbf{A}(\mathbf{B} + \mathbf{W}) + \mathbf{F}_S + \mathbf{F}_H + \mathbf{A}_i^T \mathbf{T}_i = \mathbf{0} \quad (13a)$$

$$-\mathbf{J}\dot{\omega} - \dot{\omega}\mathbf{J}\omega + \mathbf{M}_B + \mathbf{M}_H + \mathbf{M}_S + \mathbf{A}_i^T \mathbf{M}_i = \mathbf{0} \quad (13b)$$

여기서,  $\mathbf{A}_{ij} = \mathbf{A}_i^T \mathbf{A}_j$ 이고,  $\mathbf{T}_i$ 와  $\mathbf{M}_i$ 는  $N$ 번째 절점의 장력과 모멘트 벡터이다.

### 연성 동력학 해석 기법

유연관 해석모델의 미지수는 유연관 각 절점의 위치벡터( $x_1, x_2, x_3$ )와 4개의 오일러 매개변수( $e_0, e_1, e_2, e_3$ ), 장력과 2개의 전단력을 포함한 내력( $T_1, T_2, T_3$ ), 비틀림과 2개의 굽힘모멘트( $M_1, M_2, M_3$ )이다. 또한 강체 주행차량의 미지수는 주행차량의 위치( $M_{C1}, M_{C2}, M_{C3}$ ), 주행차량의 자세를 나타내는 4개의 오일러 매개변수( $e_0, e_1, e_2, e_3$ )이다.

유연관과 주행차량의 연성동력학의 해를 구하기 위하여, Hong

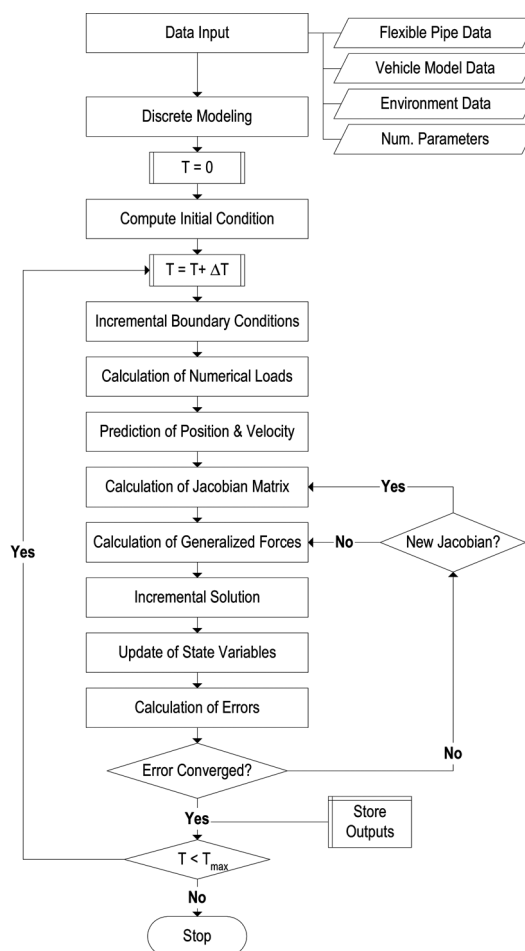


Fig. 5. Flowchart of computation program, *RISER-TV*.

et al.(2003a, 2003b)에 의해 제안된 증분-반복법이 적용되었다. 주행차량의 위치는 유연관 시스템의 이산화 모델의 절점에 추가되는 절점으로 정의하였다. 즉, 유연관 시스템이  $N$ 개의 절점으로 이산화 되었을 때, 주행차량의 위치는  $N+1$  절점으로 간주하였다.

만약 유연관의 절점의 개수가  $N$ 개 일 때, 연성 시스템의 미지수의 개수는  $12 \times N + 6$ 이다. 유연관과 주행차량의 힌지조건(hinged condition; 회전)으로 연결된 경우에 방정식의 개수는  $12 \times N - 3$  이고, 고정조건(fixed condition)으로 연결된 경우에는  $12 \times N$ 가 된다.  $12 \times N - 3$  이나  $12 \times N$ 개의 방정식으로부터  $12 \times N + 6$ 개의 미지수의 해를 구하기 위해서는 9개나 6개의 경계조건이 필요하게 된다. 유연관의 상단부에서 6개의 경계조건이 주어지게 되고, 힌지조건인 경우에 대해서는 연결점에서 3개의 경계조건이 주어지게 된다. 전체 자코비안 행렬의 크기는 각각  $(12 \times N - 3, 26)$  또는  $(12 \times N, 26)$ 이 된다.

질량집중 매개변수 모델과 Newmark- $\beta$  방법을 적용한 증분-반복법을 적용하여 비선형 수치해석 프로그램인 *RISER-TV*를 *FROTRAN-90*으로 개발하였다. Fig. 5는 *RISER-TV*의 계산흐름도를 나타내고 있다.

### 수치해석

개발된 *RISER-TV*를 이용하여 수치해석을 행하였다. 유연관 시

스템은 3개의 부분으로 나누었는데, 각 부분의 길이는 각각 152.5 m, 197.5 m, 150 m이다. 전체 시스템이 S-형이 될 수 있도록, Table 1의 부력 모듈을 유연관의 2번째 부분에 결합시켰다.

유연관의 끝부분은 주행차량의 무게중심에서 수직방향으로 1.5 m 되는 지점에 연결되어 있다. 본 논문에서는 유연관과 주행차량의 연결을 힌지조건에 대해서만 다루었다.

연성동적거동 해석은 다음의 4가지 경우에 대해 수행하였다.

- Initial stationary positioning(ISP)
- Tandem positioning(TP)
- Parallel positioning(PP)
- Steering positioning(SP)

모든 수치해석에서 적분시간간격은 0.01초로 고정하였으며, 유연관의 상부 끝단의 위치는 심해저 채광시스템의 버퍼의 위치로 설정하였다.

유연관의 초기 형상은 주행차량과 연결된 유연관의 하부끝단과 해저 바닥에서 수직으로 100 m, 수평으로 300 m 되는 위치에 있는 상부끝단에 의해 결정된다.

### ISP(Initial stationary positioning) 시뮬레이션

주행차량은 바닥에서 수직으로 3 m되는 지점에 유연관의 하부 지점이 연결되어 있으며, 주행차량은 초기에 지면에 접촉하고 있다. 1,200초 동안 수치해석을 수행하였으며, 적분시간간격은 0.01 초로 하였다. 해석 결과의 일부분을 Fig. 6~Fig. 8에 나타내었다. Fig. 6은 Fig. 7의 유연관의 장력에 의해 주행차량이 천천히 끌려가는 현상을 나타내고 있다. Fig. 8은 지면과 주행차량의 상호작용에 의해 주행차량의 거동이 계속 진동하고 있는 현상을 나타내고 있다. 주행차량 모델은 지면의 강성과 주행차량의 무게에 의해 결정되는 고유진동수에 의해 움직임이 결정된다.

### TP(Tandem positioning) 시뮬레이션

유연관은 초기에 주행차량의 앞부분에 위치하고 있으며, 50초 동안의 초기 안정화 단계 이후, 주행차량이 진행방향으로 움직이기 시작하며 이와 동시에 주행차량과 유연관 상부끝단의 초기 수

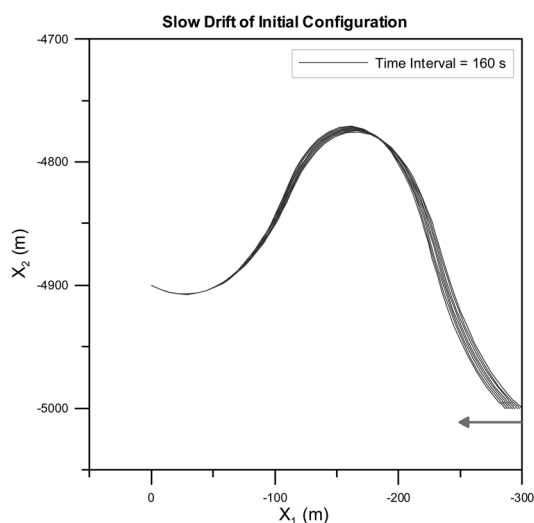


Fig. 6. Slow drifting of initial pipe configuration.

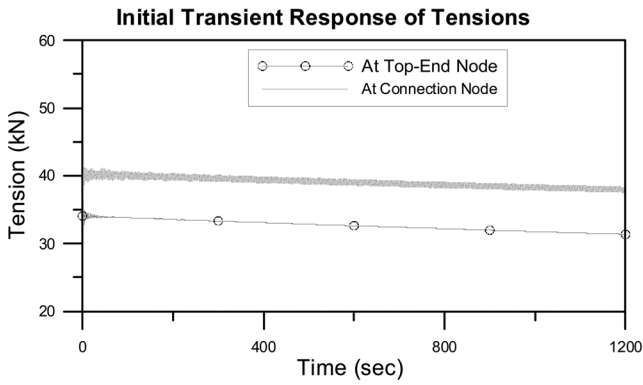


Fig. 7. Initial transient responses of tension forces.

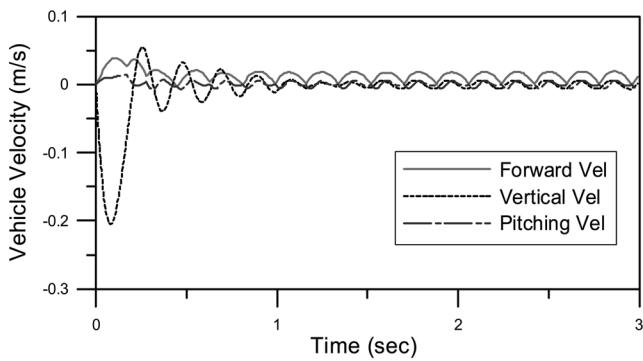


Fig. 8. Oscillatory response of vehicle on elastic soil model.

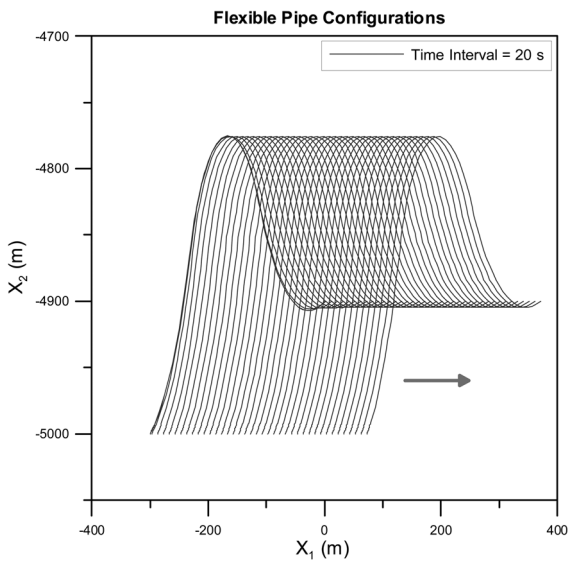


Fig. 9. Pipe deformations by tandem positioning for  $V_T = 0.5$  m/s.

평거리가 300 m가 되도록 유연관의 상부끝단이 움직이는 경우에 대해 수치해석을 수행하였다. 이 경우 주행차량과 유연관 상부 끝단의 자세는 일정하게 유지되도록 하였다. 주행차량의 속도( $V_T$ )가 각각 0.5 m/s(case I), 0.75 m/s(case II), 1.0 m/s(case III)인 경우에 대해 수치해석을 수행하였으며, Fig. 9와 10은 속도변화에 대한 유연관의 형상의 변화를 나타내고 있다.

Fig. 11은 주행차량의 속도변화에 따른 유연관의 상부끝단과 주

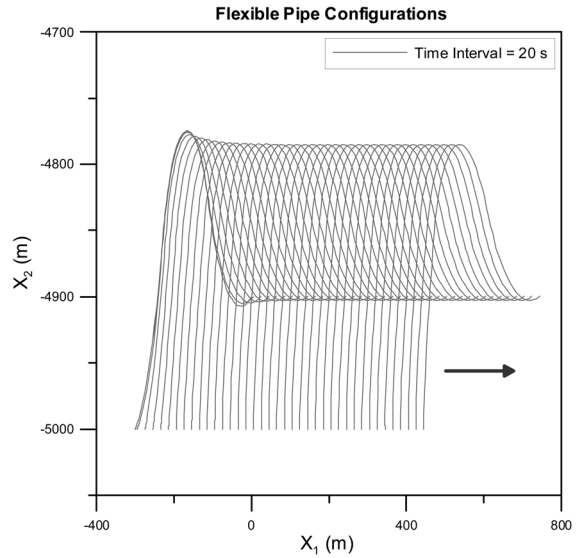


Fig. 10. Pipe deformations by tandem positioning for  $V_T = 1.0$  m/s.

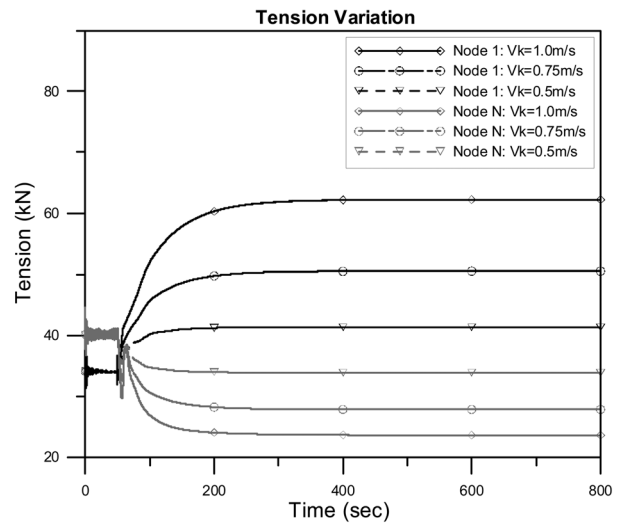


Fig. 11. Tension variations during tandem positionings.

행차량에 연결되어 있는 하부 끝단의 장력변화를 나타내고 있다. 유연관의 상부끝단은 속도가 증가함에 따라 장력이 증가하는 경향을 보이고 있으나 하부끝단은 속도변화에 따라 장력이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 주행차량의 움직임에 대해 유연관의 상부끝단은 같은 속도로 움직이지만 하부끝단은 상부끝단의 움직임이 전달되기 전에 주행차량의 움직임에 의해 밀려가는 현상이 발생하기 때문이다. Fig. 12는 속도변화에 따른 주행차량의 최대 전단변위(진행방향)를 나타내고 있다. 속도가 증가함에 따라 최대 전단변위가 증가하는 경향을 보이고 있다. 속도의 증가에 의해 유체 저항력의 증가에도 불구하고 최대전단변위가 크게 나타나지 않은 현상을 보이고 있다.

**PP(Parallel positioning) 시뮬레이션**

PP 시뮬레이션의 초기 구성은 Fig. 13처럼 유연관이 주행차량

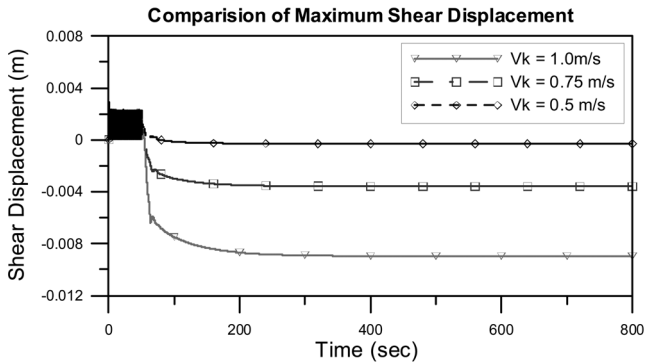


Fig. 12. Maximum shear displacements by tandem positionings.

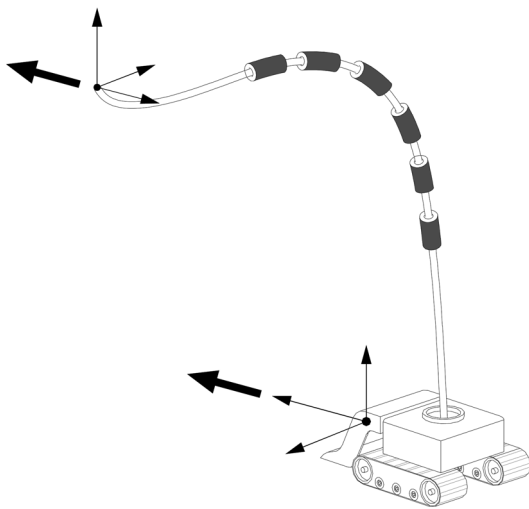


Fig. 13. Parallel positioning simulation of coupled dynamic analysis model.

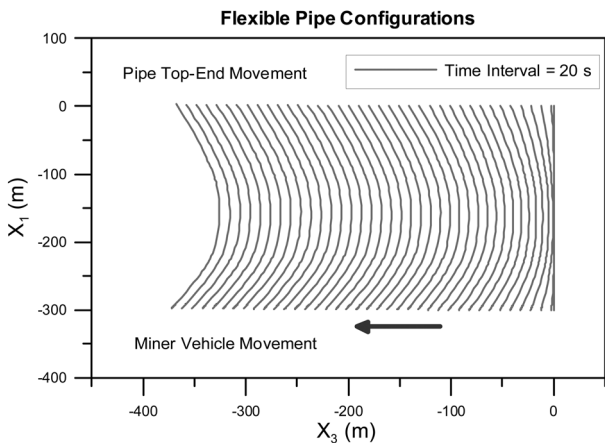


Fig. 14. Plan view of pipe deformation by parallel positioning for  $V_T = 0.5 \text{ m/s}$ .

의 좌현에 위치하고 있다. 초기 안정화 단계(50초)이후, 주행차량은 진행방향으로 움직이기 시작한다. 이때 주행차량의 속도( $V_T$ )를 각각 0.5 m/s(case I), 0.75 m/s(case II), 1.0 m/s(case III)로 변경하면서 해석을 수행하였다.

수치해석 결과는 Fig. 14~19에 나타나 있다. 주행차량이 유연관의 S형상 평면에 수직인 방향으로 움직이기 때문에 유연관에서 큰

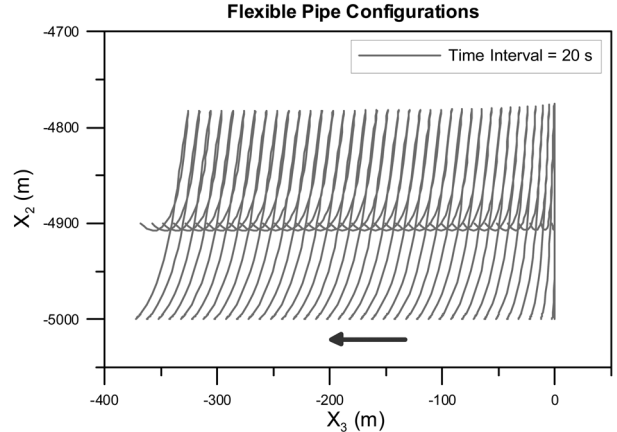


Fig. 15. Side view of pipe deformation by parallel positioning for  $V_T = 0.5 \text{ m/s}$ .

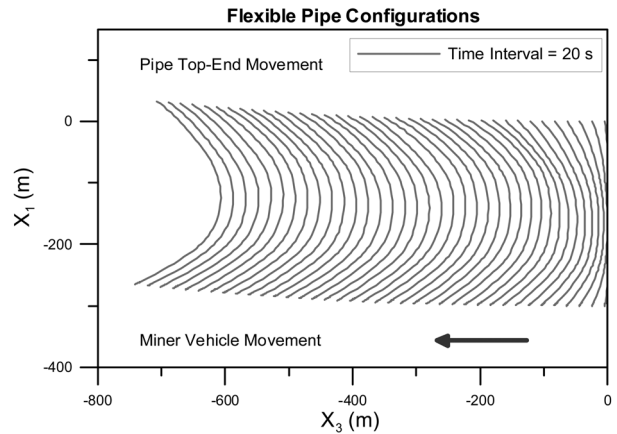


Fig. 16. Plan view of pipe deformation by parallel positioning for  $V_T = 0.5 \text{ m/s}$ .

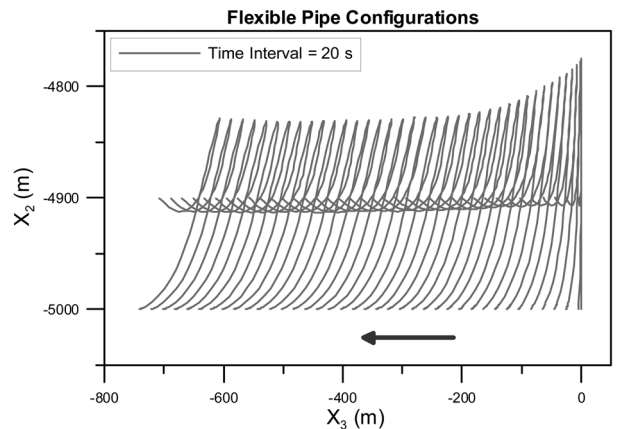


Fig. 17. Side view of pipe deformation by parallel positioning for  $V_T = 1.0 \text{ m/s}$ .

변형이 일어나며 이로 인하여 주행차량이 더 이상 직진운동을 하지 않았다. Fig. 16와 17에서는 주행차량의 속도가 1.0m/s인 경우, 유연관 형상의 변화를 나타내고 있다. Fig. 18과 19는 유연관의 장력과 지면에서 발생하는 전단변위의 변화를 나타내고 있다. 주행

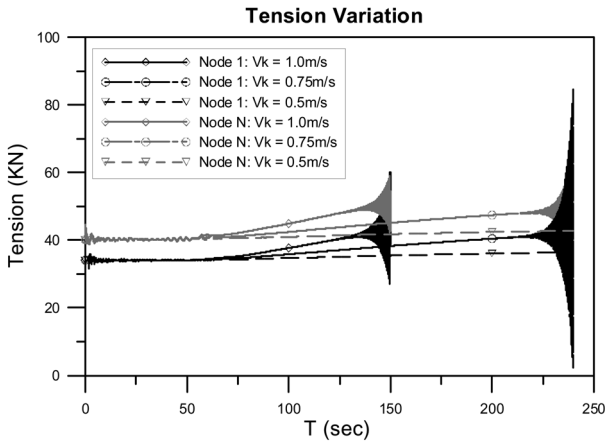


Fig. 18. Variation of tension forces by parallel positionings.

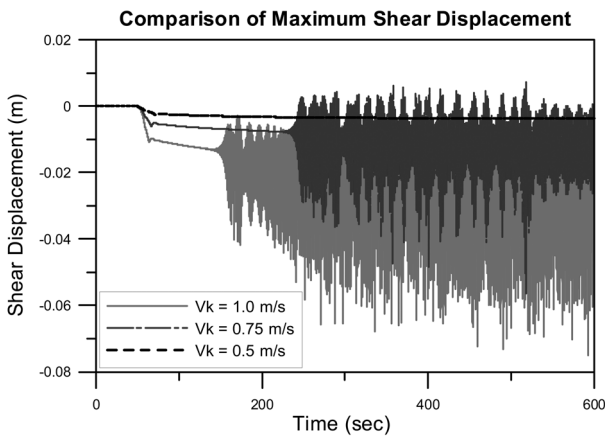


Fig. 19. Maximum shear displacements by parallel positionings.

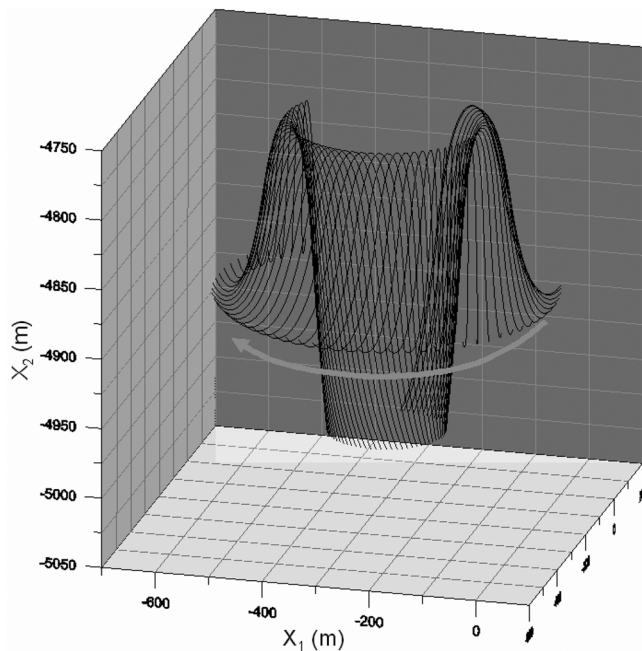


Fig. 20. 3D view of pipe deformation during steering.

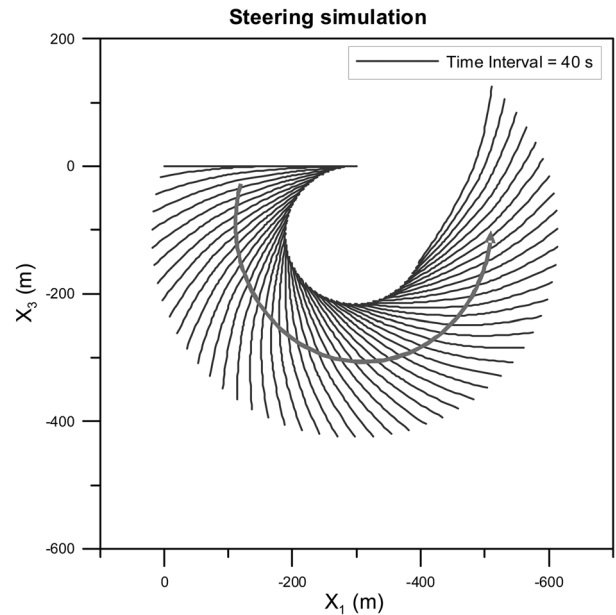


Fig. 21. Plan view of pipe deformation by steering positioning.

차량의 속도의 증가에 의해 지면에서 발생하는 전단변위와 유연관의 장력이 심하게 진동하는 것을 알 수 있으며, 유연관의 변형이 허용한계를 초과하는 경우에는, 더 이상 해석이 수행되지 않았다.

**SP(Steering positioning) 시뮬레이션**

Fig. 20은 유연관의 상부 끝단과 주행차량이 동시에 원운동하는 해석결과를 나타내고 있다. 주행차량의 내부 트랙의 속도는 0.23 m/s 이고, 외부트랙의 속도는 0.25 m/s이다. 주행차량이 작은 반경을 가진 경로를 아주 느리게 운동함에도 불구하고, 유연관의 상부 끝단은 주행차량과 상대적인 자세를 유지하기 위하여 큰 경로를 따라 빠르게 움직여야 함을 알 수 있다. 주행차량의 속도가 증가하면, 유연관의 상부끝단은 점점 더 빠르게 움직여야 하며, 이로 인하여 유연관의 상부 끝단과 하부 끝단의 속도차가 크게 발생하게 되어 유연관의 형상이 크게 변형하여 유연관의 구조적인 안정성이 보장되지 못하여 유연관이 깨어지는 현상이 발생하게 된다.

**결 론**

본 연구에서는 해저주행차량과 유연관간의 연성거동 해석 기법을 다루었다.

각각의 해석을 통해 연구되는 2개의 동적거동기법(3차원 비선형 유연관 동적거동 해석기법과 해지면 주행차량의 3차원 비선형 동적거동 해석기법)을 하나의 알고리즘에 의해 성공적으로 통합 시킴으로써, 주행차량-유연관의 연성거동 해석이 가능하도록 하였다.

그 결과 심해저 채광시스템에 대한 개념설계 및 기술적 타당성 연구를 위한 효율적인 수치해석 기법이 마련되었다. 일련의 수치 해석을 통하여 집광기 주행차량과 유연관간의 연성거동에 대한 중요성이 확인되었다.

향후 정확한 수치해석 결과를 위해 해저 주행차량의 유체동력학 계수 및 해저 연약지반 모델에 대한 보다 정확한 데이터가 필



요하다. 또한 양광관-버퍼-유연관-주행차량의 연성해석기법에 활용될 예정이다.

## 후 기

본 논문은 국토해양부 특정연구과제인 “심해저 광물자원 집광 시스템 및 채광운용기술 개발(2-2)”과제의 일부분으로 수행되었다.

## 참고문헌

- Amann, H., Oebius, H. U., Gehbauer, F., Schwarz, W. and Weber, R. 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”, International Journal of Offshore and Polar Eng, ISOPE, 6(4): 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., Jeyamani, R., Ravindran, M., Schulte, E., Handschuh, R. Panthel, J., Grebe, H. and Schwarz, W. 2001. “Development Tests on the Underwater Mining System Using Flexible Riser Concept”, Proc 4th ISOPE Ocean Mining Sym, Szczecin, pp. 94–98.
- Fossen, T.I., 2002. Marine Control Systems, Marine Cybernetics.
- Haug, E.J., 1989. Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, Volume I: Basic Methods, Allyn and Bacon, pp. 335–347.
- Handschuh, R., Grebe, H., Panthel, J., Schulte, E., Wenzlawski, B., Schwarz, W., Atmanand, M.A., Jeyamani, R., Shajahan, M.A., Deepak, C.R. 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.
- 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.
- 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 1<sup>st</sup> ISOPE Ocean Mining Sym, Tsukuba, pp. 69–74.
- Hong, S., 1997. “3D Dynamic Analyses of Lifting Pipe Systems in Deep Seabed Mining”, Proc 2<sup>nd</sup> 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. and Choi, J.S., 2002. “Transient Dynamic Analysis of Tracked Vehicle on Extremely Soft Cohesive Soil”, Proc 5<sup>th</sup> ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Sym, Daejeon, pp. 100–107.
- Hong, S., Kim, H.W. and Choi, J.S., 2003a. “A New Method Using Euler Parameters for 3D Nonlinear Analysis of Marine Risers/Pipelines”, Proc. 5<sup>th</sup> ISOPE Ocean Mining Sym, Tsukuba, pp. 83–90.
- Hong, S., Choi, J.S. and Kim H.W., 2003b. “Effects of Internal Flow on Dynamics of Underwater Flexible Pipes”, Proc 5<sup>th</sup> ISOPE Ocean Mining Sym, Tsukuba, pp. 91–98.
- 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 5<sup>th</sup> ISOPE Ocean Mining Sym, Tsukuba, pp. 132–138.
- Kim, H.W., Hong, S., Choi, J.S. and Yeu, T.K., 2005. “Dynamic Analysis of Underwater Tracked Vehicle on Extremely Soft Soil”, Proceedings of The 6<sup>th</sup> ISOPE Ocean Mining Symposium, 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.
- Schulte, E., Handschuh, R. and Schwarz, W., 2003. “Transferability for Soil Mechanic Parameters to Traction Potential Calculation of a Tracked Vehicle”, Proc 5<sup>th</sup> ISOPE Ocean Mining Sym, Tsukuba, pp. 123–131.

2008년 4월 4일 원고접수

2008년 7월 14일 수정본 채택

담당편집위원: 홍 섭