

< 학술논문 >

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.12.1213>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 부분시스템 합성방법을 이용한 심해저 통합 채광시스템의 효율적인 유연 다물체 동역학 모델링 연구<sup>§</sup>

윤홍선\* · 김성수\*\*† · 이창호\*\*\* · 김형우\*\*\*

\* 충남대학교 기계설계 메카트로닉스 공학과, \*\* 충남대학교 메카트로닉스 공학과,  
\*\*\* 선박해양플랜트연구소 해양플랜트산업기술센터

### A Study on the Efficient Flexible Multibody Dynamics Modeling of Deep Seabed Integrated Mining System with Subsystem Synthesis Method

Hong-Seon Yun<sup>\*</sup>, Sung-Soo Kim<sup>\*\*†</sup>, Chang Ho Lee<sup>\*\*\*</sup> and Hyung-Woo Kim<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Dept. of Mechanical Design Mechatronics Engineering, Chungnam Nat'l Univ.,

<sup>\*\*</sup> Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam Nat'l Univ.,

<sup>\*\*\*</sup> Technology Center for Offshore Plant Industries, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering

(Received May 19, 2015 ; Revised August 9, 2015 ; Accepted August 24, 2015)

**Key Words:** Subsystem Synthesis Method(부분시스템 합성방법), Deep-seabed Integrated Mining System(심해저 통합 채광시스템), Flexible Multibody Dynamics(유연 다물체 동역학)

**초록:** 망간단괴를 채집하는 심해저 통합 채광시스템은 채광선, 수직양광관, 중간버퍼, 유연관, 채광로봇으로 구성되어 있다. 최근 심해저 통합 채광시스템 연구에서는 생산성을 극대화하기 위한 다수의 채광로봇으로 구성되는 새로운 다중로봇 통합 채광시스템의 개념이 소개되었다. 본 논문에서는 다중로봇 통합 채광시스템 해석의 효율성을 향상시키고, 다중로봇 시스템의 확장이 용이하도록 부분시스템 합성방법이 적용되었다. 또한 유연 다물체 동역학이 적용된 부분구조로 나눔으로써 수직양광관과 유연관의 대변위가 고려되었다. 일반적인 해석방법과 부분시스템 합성방법의 산술 연산 횟수를 비교함으로써 통합 채광시스템의 부분시스템 합성방법의 이론적인 효율성 연구가 수행되었다.

**Abstract:** A deep seabed integrated mining system consists of a mining vessel, a lifting pipe, a buffer station, a flexible pipe, and a mining robot for collecting manganese nodules. Recently, the concept of multiple mining robots was introduced to enhance to mining productivity. In this paper, the subsystem synthesis method was applied to the deep seabed integrated mining system in order to improve the efficiency of system analysis and to facilitate its extension to the system of multiple mining robots. Large deflections of the lifting and flexible pipe were considered by dividing a flexible pipe into several substructures, and applying flexible multibody dynamics to each substructure. Theoretical study has been carried out for the efficiency of the subsystem synthesis method for the integrated mining system, by comparing the arithmetic operational counts of the subsystem synthesis method with those of the conventional method.

#### 1. 서 론

심해저 자원을 개발하기 위한 심해저 통합 채광시스템은 채광선, 수직양광관, 중간버퍼, 유연관,

채광로봇으로 구성되어 있으며, 심해저 자원을 채광로봇과 유연관을 통하여 버퍼에 모으고, 수직양광관을 통하여 채광선으로 이송하는 개념을 제시하고 있다.<sup>(1)</sup> 이러한 통합 채광시스템의 동적 거동 해석을 위해서는 수직양광관과 유연관 시스템의 비선형 효과를 정확하게 반영하여야 한다. 케이블 동역학 분야에서는 변형된 물체의 기하학적 비선형 효과를 고려하기 위해 유한 차분법을 기초로 한

§ 이 논문은 2015년도 대한기계학회 동역학 및 제어부 문 춘계학술대회(2015. 5. 20-22., BEXCO) 발표논문임.

† Corresponding Author, sookim@cnu.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

방법<sup>(2-4)</sup>을 사용하였으며, 다물체 동역학 분야에서는 절대 절점 좌표계 공식<sup>(5)</sup>과 부분구조 방법<sup>(6)</sup>을 사용하였다. 하지만 이러한 방법들은 운동방정식의 크기가 커지는 문제점을 공통적으로 가지고 있으며, 따라서 해석하는데 많은 시간이 소요된다.<sup>(7)</sup>

또한 최근에는 Fig. 1 과 같이 심해저 자원의 생산성을 향상시키기 위한 다중로봇으로 구성된 심해저 채광시스템 개념이 소개되었다.<sup>(8)</sup> 이러한 다중로봇 통합 채광시스템의 거동 해석을 위해서는 운동방정식이 더욱 커지며, 그에 따른 많은 해석 시간을 필요로 한다. 따라서 보다 효율적인 해석방법이 필요하다.

부분시스템 합성방법은 차량 동역학 영역에서 실시간 해석을 위해 개발되었다.<sup>(9,10)</sup> 부분시스템 합성방법은 각 부분시스템에 대한 운동방정식을 형성하고 각 부분시스템에서의 동적 효과를 전체 시스템에 합성하여 해석할 수 있다. 이를 통하여 전체 시스템의 운동방정식을 한꺼번에 계산하는 대신, 각 부분시스템의 운동방정식을 나누어 계산할 수 있어 효율성을 향상시킬 수 있다. 또한 부분시스템 별로 동일한 프로그램 구조를 형성하기 때문에 부분시스템을 추가하여도 쉽게 추가시킬 수 있다.

본 논문에서는 심해저 통합 채광시스템 해석의 효율성 향상시키고, 다중로봇으로 구성된 시스템의 확장을 용이하게 하기 위하여 부분시스템 합성방법을 적용하였다. 또한 수직양광관과 유연관의 비선형적인 거동 해석을 위하여 유연 다물체 동역학에 기초한 부분구조 방법을 사용하였다. 통합 채광시스템의 효율적인 해석을 위해 수직양광관-채광선 부분 시스템과 유연관-채광로봇 부분시스템에 대하여 각각 부분시스템 운동방정식을 생성하였다. 부분시스템 합성방법의 효과를 고찰하기 위해서

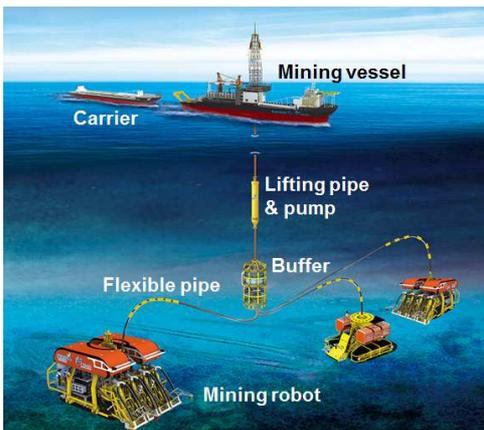


Fig. 1 Multi-robot integrated mining system

부분시스템 합성방법과 일반적인 해석방법의 계산 효율성을 비교하였다.

## 2. 수직양광관 및 유연관 시스템 해석을 위한 유연 다물체 동역학 모델

통합 채광시스템의 수직양광관과 유연관 모델에서 대변위와 미소변형률과 같은 기하학적 비선형을 고려하기 위해 부분구조 방법이 적용되었다. 부분구조 방법은 기존의 유한요소법과 달리 각 빔 요소에 물체 기준 좌표계와, 물체 기준 좌표계에 대한 변위를 정의하는 방법이다.

Fig. 2 는 물체 기준 좌표계를 포함한 일반적인 유연체 빔 요소를 나타낸다.  $X-Y$  는 관성 기준 좌표계이며,  $x'-y'$  는 물체 기준 좌표계를 나타낸다. 따라서 빔의 전체 운동은 관성 기준 좌표계에 대한 물체 기준 좌표계의 운동으로 나타낼 수 있다.

변위와 변형에 의한 회전은 물체 기준 좌표계에서 정의되며, 일반적인  $p$  점의 위치 벡터는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{r}^p &= \mathbf{r}_i + \mathbf{A}_i(\mathbf{s}'^p + \mathbf{u}'^p) \\ &= \mathbf{r}_i + \mathbf{A}_i(\mathbf{s}'^p + \mathbf{N}^j \mathbf{d}_{ij}) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{r}_i$  는 유연체 빔 요소의 전역 위치 벡터,  $\mathbf{A}_i$  는 좌표계 변환 행렬,  $\mathbf{s}'^p$  는 물체 기준 좌표계에서 변형 전의  $p$  점까지의 국부 위치 벡터를 나타낸다.  $\mathbf{u}'^p$  는 변형 전의  $p$  점과 변형 후의  $p$  점까지의 국부 위치 벡터이며, 이는 유한요소 이론에 의해 절점 좌표계  $\mathbf{d}_{ij}$  와 형상함수  $\mathbf{N}^j$  로 나타낸다.<sup>(11)</sup> 유연체 빔 요소의 가상일 형태의 운동방정식은 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\left[ \delta \mathbf{r}_i^T \quad \delta \theta \quad \delta \mathbf{d}_{ij}^T \right] \left[ \mathbf{M}_{ij} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{r}}_i \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\mathbf{d}}_{ij} \end{bmatrix} + \mathbf{S}_{ij} - \mathbf{Q}_{ij} + \mathbf{U}_{ij}(\mathbf{d}_{ij}) \right] = 0 \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{M}_{ij}$  는 유연체 빔의 일반적인 관성 행렬,

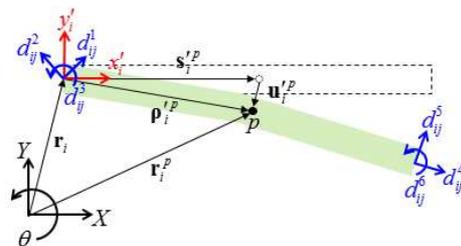


Fig. 2 A typical flexible beam model

$S_{ij}$  는 2 차 속도 벡터,  $Q_{ij}$  는 일반적인 힘 벡터,  $U_{ij}$  는 일반적인 탄성력 벡터를 나타낸다.<sup>(12)</sup>

유연체에 집중질량을 갖는 강체가 부착되어 있을 경우, Fig. 3 과 같이 집중질량 요소로 나타낼 수 있다.

집중질량에 대한 가상일 형태의 운동방정식은 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\begin{bmatrix} \delta r_i^T & \delta \theta_i & \delta d_{ij}^T \end{bmatrix} \left( M_i^k \begin{bmatrix} \ddot{r}_i \\ \ddot{\theta}_i \\ \ddot{d}_{ij} \end{bmatrix} + S_i^k - Q_i^k \right) = 0 \quad (3)$$

여기서  $M_i^k$  는 집중질량의 일반적인 관성 행렬,  $S_i^k$  는 2 차 속도 벡터,  $Q_i^k$  는 일반적인 힘 벡터를 나타낸다.

집중질량을 포함하고 있는 유연체 운동방정식은 가상일에 집중질량 식 (2)와 가상일의 유연체 운동방정식인 식 (3)을 더하여 식 (4)와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \delta r_i^T & \delta \theta_i & \delta d_{ij}^T \end{bmatrix} \left( \tilde{M}_{ij} \begin{bmatrix} \ddot{r}_i \\ \ddot{\theta}_i \\ \ddot{d}_{ij} \end{bmatrix} + \tilde{S}_{ij} - \tilde{Q}_{ij} + \tilde{U}_{ij}(d_{ij}) \right) = 0 \quad (4)$$

$\tilde{M}_{ij}$  는 집중질량을 갖는 요소의 일반적인 관성 행렬,  $\tilde{S}_{ij}$  는 2 차 속도 벡터,  $\tilde{Q}_{ij}$  는 일반적인 힘 벡터,  $\tilde{U}_{ij}$  는 일반적인 탄성력 벡터를 나타낸다. 이러한 방식으로 유연체 빔 요소의 변형된 전체 운동은 직교 좌표계와 절점 좌표계를 사용하여 표현할 수 있다.

Fig. 4 와 같이 각각의 유연체 빔 요소를 고정된 조인트로 연결하여, 기하학적 비선형 효과를 나타낼 수 있다. 부분구조 방법은 부분구조의 개수가 증가할수록 부분구조의 운동방정식과 각 부분구조 사이의 고정된 조인트 구속조건식이 많아지기 때문에 계산 효율성이 낮아지게 된다. 따라서 정확한 해석이 수행되면서 효율적으로 계산될 수 있는 부분구조 개수 선정이 유연 다물체 해석방법의 중요한 요소가 될 수 있다.

부분구조 방법<sup>(6)</sup>을 사용한 비선형 빔 모델을 검증하기 위하여, 유연 다물체 빔 모델을 개발하였으며, 끝 단에

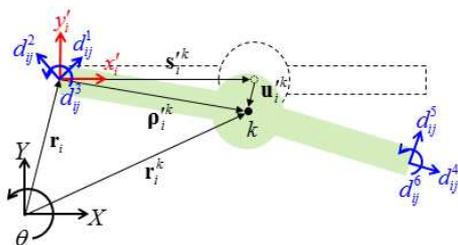


Fig. 3 A lumped mass element model

집중질량이 있는 외팔보 실험 결과<sup>(13)</sup>와 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

Table 1 은 실험<sup>(13)</sup>에 사용한 외팔보의 특성을 나타낸다. 외팔보 빔 진동의 실험 결과는 고속 카메라를 이용하여 획득하였다.

Fig. 5 에서 실험 결과와 부분구조 방법으로 개발된 빔 모델의 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 부분구조의 개수가 8 개일 때, 변위의 크기와 주파수가 매우 근접한 것을 확인하였다. 또한 실험 결과와 같이 개발된 빔 모델에서도 부분구조 방법에 의한 비선형 효과가 표현될 수 있다는 것을 확인하였다.

Table 1 Properties of cantilever beam

Properties	Value
Radius	0.5 mm
Length	0.4 m
Density	7,919 Kg/m <sup>3</sup>
Young's modulus	200 GPa
Poisson's ratio	0.28
Attached mass	20 g

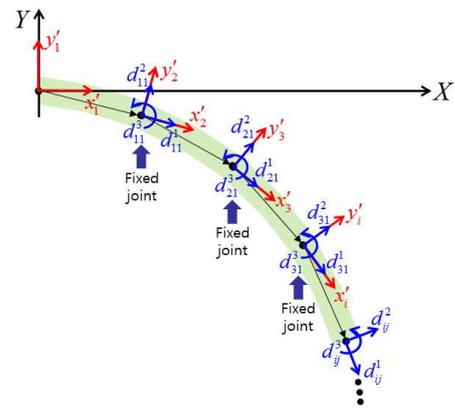


Fig. 4 Substructure method for a flexible pipe system

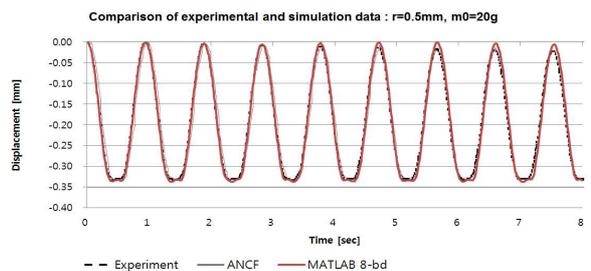


Fig. 5 Vertical position of end node in free vibration of the cantilevered beam

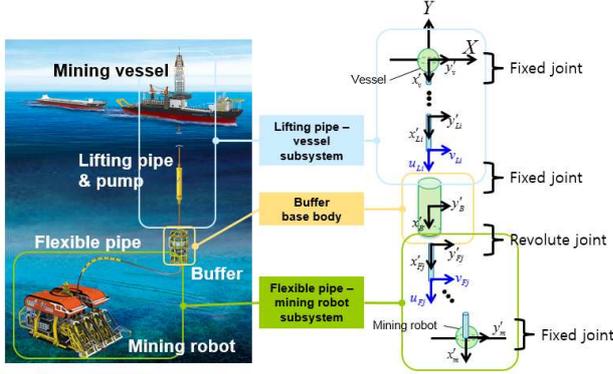


Fig. 6 Definition of subsystems in the integrated mining system

### 3. 다중로봇 통합 채광시스템을 위한 부분시스템 합성방법

부분시스템 합성방법<sup>(9,10)</sup>은 부분시스템의 운동 방정식을 독립적으로 해석하고, 기준 물체의 운동방정식에 부분시스템의 효과를 합성하여 전체 시스템을 해석할 수 있다.

통합 채광시스템에 부분시스템 합성방법을 적용하기 위하여, 기준 물체와 부분시스템으로 분할해야 한다.

통합 채광시스템의 부분시스템은 Fig. 6 과 같이 분할하였다. 버퍼는 기준 물체, 채광선과 수직양광관은 수직양광관-채광선 부분시스템, 유연관과 채광로봇은 유연관-채광로봇 부분시스템으로 정의하였다.

본 연구에서는 수직양광관과 유연관의 비선형 거동 해석을 위해서 2 장에서 기술한 부분구조의 유연체 빔으로 모델링 하였고, 채광선, 버퍼, 채광로봇은 전체 시스템의 거동에 관심이 있으므로 집중질량으로 단순화하였다.

통합 채광시스템에 다물체 동역학의 일반적인 식교 좌표 공식을 적용한 운동방정식은 식 (5)와 같이 정의된다.<sup>(14)</sup>

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_B & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \Phi_{q_B}^{1,T} & \Phi_{q_B}^{2,T} \\ \mathbf{0} & \bar{\mathbf{M}}_L & \mathbf{0} & \bar{\Phi}_{q_L}^{1,T} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \bar{\mathbf{M}}_F & \mathbf{0} & \bar{\Phi}_{q_F}^{2,T} \\ \Phi_{q_B}^1 & \bar{\Phi}_{q_L}^1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \Phi_{q_B}^2 & \mathbf{0} & \bar{\Phi}_{q_F}^2 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_B \\ \ddot{\mathbf{q}}_L \\ \ddot{\mathbf{q}}_F \\ \lambda^1 \\ \lambda^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_B \\ \bar{\mathbf{Q}}_L \\ \bar{\mathbf{Q}}_F \\ \gamma^1 \\ \gamma^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서,

$$\bar{\mathbf{M}}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_L^* & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{V,rigid} \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{Q}}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_L^* \\ \mathbf{Q}_{V,rigid} \end{bmatrix}, \ddot{\mathbf{q}}_L = \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_L \\ \ddot{\mathbf{q}}_{V,rigid} \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{M}}_F = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_F^* & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{R,rigid} \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{Q}}_F = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_F^* \\ \mathbf{Q}_{R,rigid} \end{bmatrix}, \ddot{\mathbf{q}}_F = \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_F \\ \ddot{\mathbf{q}}_{R,rigid} \end{bmatrix}$$

$\bar{\mathbf{M}}_L$  은 수직양광관-채광선 부분시스템의 일반적인 질량 행렬,  $\bar{\mathbf{Q}}_L$  과  $\ddot{\mathbf{q}}_L$  는 각각 일반적인 힘 벡터와 가속도를 나타낸다. 또한  $\bar{\mathbf{M}}_F$  와  $\bar{\mathbf{Q}}_F$ ,  $\ddot{\mathbf{q}}_F$  은 각각 유연관-채광로봇 부분시스템의 일반적인 질량 행렬, 힘 벡터, 가속도를 나타낸다.

통합 채광시스템에 부분시스템 합성방법을 적용하면, 수직양광관-채광선의 운동방정식은 식 (6~7) 과 같이 정의된다.

$$\bar{\mathbf{M}}_L \ddot{\mathbf{q}}_L = \bar{\mathbf{Q}}_L - \bar{\Phi}_{q_L}^{1,T} \lambda_L \quad (6)$$

$$\lambda_L = (\bar{\Phi}_{q_L}^1 \bar{\mathbf{M}}_L^{-1} \bar{\Phi}_{q_L}^{1,T})^{-1} (\Phi_{q_B}^1 \ddot{\mathbf{q}}_B + \bar{\Phi}_{q_L}^1 \bar{\mathbf{M}}_L^{-1} \bar{\mathbf{Q}}_L - \gamma_L) \quad (7)$$

또한 유연관-채광로봇의 부분시스템의 운동방정식은 식 (8~9)와 같이 정의된다.

$$\bar{\mathbf{M}}_F \ddot{\mathbf{q}}_F = \bar{\mathbf{Q}}_F - \bar{\Phi}_{q_F}^{2,T} \lambda_F \quad (8)$$

$$\lambda_F = (\bar{\Phi}_{q_F}^2 \bar{\mathbf{M}}_F^{-1} \bar{\Phi}_{q_F}^{2,T})^{-1} (\Phi_{q_B}^2 \ddot{\mathbf{q}}_B + \bar{\Phi}_{q_F}^2 \bar{\mathbf{M}}_F^{-1} \bar{\mathbf{Q}}_F - \gamma_F) \quad (9)$$

기준 물체인 버퍼의 운동방정식은 각 부분시스템으로부터 효과 항을 합성하여 식 (10)과 같이 정의된다.

$$(\mathbf{M}_B + \mathbf{M}_L^C + \mathbf{M}_F^C) \ddot{\mathbf{q}}_B = \mathbf{Q}_B + \mathbf{Q}_L^C + \mathbf{Q}_F^C \quad (10)$$

여기서,

$$\mathbf{M}_L^C = \Phi_{q_B}^{1,T} (\bar{\Phi}_{q_L}^1 \bar{\mathbf{M}}_L^{-1} \bar{\Phi}_{q_L}^{1,T})^{-1} \Phi_{q_B}^1$$

$$\mathbf{Q}_L^C = \Phi_{q_B}^{1,T} (\bar{\Phi}_{q_L}^1 \bar{\mathbf{M}}_L^{-1} \bar{\Phi}_{q_L}^{1,T})^{-1} (\gamma^1 - \bar{\Phi}_{q_L}^1 \bar{\mathbf{M}}_L^{-1} \bar{\mathbf{Q}}_L)$$

$$\mathbf{M}_F^C = \Phi_{q_B}^{2,T} (\bar{\Phi}_{q_F}^2 \bar{\mathbf{M}}_F^{-1} \bar{\Phi}_{q_F}^{2,T})^{-1} \Phi_{q_B}^2$$

$$\mathbf{Q}_F^C = \Phi_{q_B}^{2,T} (\bar{\Phi}_{q_F}^2 \bar{\mathbf{M}}_F^{-1} \bar{\Phi}_{q_F}^{2,T})^{-1} (\gamma^2 - \bar{\Phi}_{q_F}^2 \bar{\mathbf{M}}_F^{-1} \bar{\mathbf{Q}}_F)$$

$\mathbf{M}_L^C$  과  $\mathbf{Q}_L^C$  는 각각 수직양광관-채광선 부분시스템의 효과 질량 행렬과 효과 힘 벡터를 나타낸다.

또한  $\mathbf{M}_F^C$  와  $\mathbf{Q}_F^C$  는 각각 유연관-채광로봇 부분시스템의 효과 질량 행렬과 효과 힘 벡터를 나타낸다.

부분시스템 합성방법은 식 (5)와 같이 전체 시스템의 운동방정식 대신, 식 (6~10)과 같이 여러 개의 운동방정식으로 분할하여 계산할 수 있다. 따라서 일반적인 방법과 비교하여, 계산 효율을 얻을 수 있다. 식 (7)과 식 (9)는 기준 물체의 가속도,  $\ddot{\mathbf{q}}_B$  에 관련된 식이므로 기준 물체의 운동방정식 (10)을 우선 계산한 후, 각 부분시스템의 운동방정식을 계산할 수 있다.

Fig. 1 과 Fig. 7 과 같이 하나 이상의 채광로봇-유연관 부분시스템이 추가되는 경우, 식 (11)과 같이 유연관-채광로봇 부분시스템으로부터 효과 항

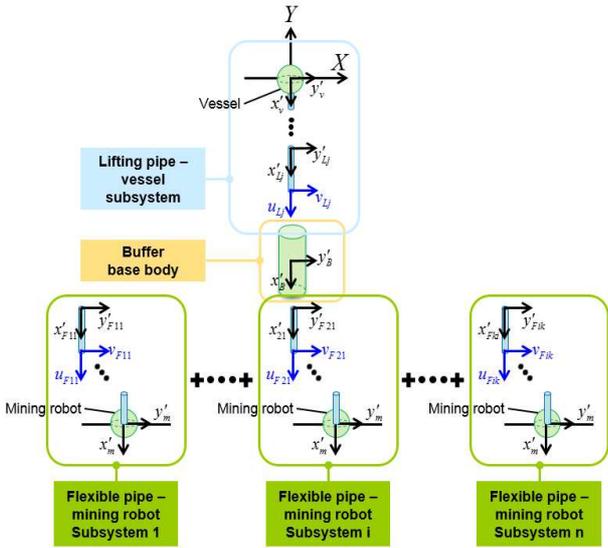


Fig. 7 Subsystem model of the multi-robot integrated mining system

을 더함으로써 기준물체의 운동방정식을 정의할 수 있다.

$$\left( \mathbf{M}_B + \mathbf{M}_L + \sum_{i=1}^n \mathbf{M}_{Fi}^C \right) \ddot{\mathbf{q}}_B = \mathbf{Q}_B + \mathbf{Q}_L^C + \sum_{i=1}^n \mathbf{Q}_{Fi}^C \quad (11)$$

여기서,

$$\mathbf{M}_{Fi}^C = \Phi_{qB}^{2,T} \left( \bar{\Phi}_{qFi}^2 \bar{\mathbf{M}}_{Fi}^{-1} \bar{\Phi}_{qFi}^{2,T} \right)^{-1} \Phi_{qB}^2, \quad (i=1, \dots, n)$$

$$\mathbf{Q}_{Fi}^C = \Phi_{qB}^{2,T} \left( \bar{\Phi}_{qFi}^2 \bar{\mathbf{M}}_{Fi}^{-1} \bar{\Phi}_{qFi}^{2,T} \right)^{-1} \left( \gamma_{Fi} - \bar{\Phi}_{qFi}^2 \bar{\mathbf{M}}_{Fi}^{-1} \bar{\mathbf{Q}}_{Fi} \right), \quad (i=1, \dots, n)$$

i 번째의 유연관-채광로봇 부분시스템의 운동방정식은 식 (12~13)과 같이 정의할 수 있다.

$$\bar{\mathbf{M}}_{Fi} \ddot{\mathbf{q}}_{Fi} = \bar{\mathbf{Q}}_{Fi} - \bar{\Phi}_{qFi}^{2,T} \lambda^2, \quad (i=1, \dots, n) \quad (12)$$

$$\lambda_{Fi} = \left( \bar{\Phi}_{qFi}^2 \bar{\mathbf{M}}_{Fi}^{-1} \bar{\Phi}_{qFi}^{2,T} \right)^{-1} \left( \Phi_{qB}^2 \ddot{\mathbf{q}}_B + \bar{\Phi}_{qFi}^2 \bar{\mathbf{M}}_{Fi}^{-1} \bar{\mathbf{Q}}_{Fi} - \gamma_{Fi} \right), \quad (i=1, \dots, n) \quad (13)$$

다중로봇 통합 채광시스템에 부분시스템 합성방법을 적용함으로써, 해석 프로그램 구조를 변경하지 않고, 용이하게 시스템을 확장할 수 있다.

#### 4. 다중로봇 통합 채광시스템의 동역학 해석

심해저 통합 채광시스템의 동적 거동 시뮬레이션을 수행하기 위하여, MATLAB 프로그램을 이용하여 부분시스템 합성방법을 적용한 모델을 구현하였다.

채광선은 Y 축 방향과 회전을 고정시키고, X 축 방향으로 최대 속도가 0.5m/s 로 이동하도록 구속 조건을 활용한 동작으로 대체하였다.

Table 2 Properties of lifting pipe module

Properties	Value
Length	12 m
Outer radius	0.10955 m
Inner radius	0.10005 m
Area moment of inertia	0.00003 m <sup>4</sup>
Young's modulus	200 GPa
Mass	49.1 kg/m
Density	7,849 kg/m <sup>3</sup>
Poisson's ratio	0.3
Buoyancy	758.24 N

Table 3 Properties of buffer

Properties	Value
Length	6.3 m
Radius	1.5 m
Volume	1.38 m <sup>3</sup>
Moment of inertia	30,960 kgm <sup>2</sup>
Mass	8,000 kg
Buoyancy	18,338.44 N

채광로봇은 Y 축 방향으로 침투량을 계산하여 접촉력을 적용하였으며, X 축 방향으로 채광선과 일정한 거리 및 속도를 유지하는 중속운동을 할 수 있도록 제어력을 인가한 강체 모델로 모델링 하였다.

수직양광관은 Table 2 와 같이 선박해양플랜트 연구소에서 설계 제작될 시스템의 제원을 사용하였으며, 수심 500m 에 설치되는 통합 채광시스템의 거동 및 효율성 분석을 목적으로 하였다. 따라서 수직양광관은 41 개의 모듈을 연결하여 492m 로 모델링 하였다. 상용 프로그램 ANSYS 를 사용하여 부분구조 최소 분할 개수에 따른 정적 해석 결과의 수렴성을 분석하여 수직양광관의 부분구조 분할 개수를 결정하였다. 따라서 수직양광관은 60 개의 유연체 빔 요소를 고정된 조인트로 연결하여 모델링 하였다.

수직양광관과 유연관 사이에 위치한 버퍼는 통합 채광시스템에서 심해저 자원의 흐름을 제어하는 역할을 수행한다. 버퍼는 강체 모델로 모델링 되었으며, 버퍼 모델의 특성은 Table 3 과 같다.

유연관은 버퍼와 채광로봇을 연결하는 역할을 수행하며, 복합 구조체로 제작될 유연관의 특성은 Table 4 와 같다. 유연관의 해석을 위해서 단일 소재로 가정하여 유연관 모델의 인장 실험 데이터<sup>(15)</sup>를 통하여 유연관의 Young's modulus 를 결정하였다. 수직양광관과 같은 방법으로 상용 프로그램

ANSYS 를 사용하여 부분구조 분할 개수에 따른 정적 해석 결과의 수렴성을 분석하여 유연관의 부분구조 최소 분할 개수를 결정하였다. 따라서 유연관 모델은 80 개의 유연체 빔 요소를 고정된 조인트로 연결하여 모델링 하였으며, 채광로봇의 기동성을 높이기 위해 부력재가 사용되었다.

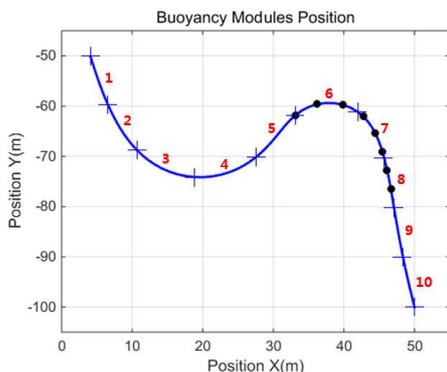
부력재는 Fig. 8 과 같이 100m 의 유연관을 10 등분하였을 경우, 채광로봇과 가까운 6-7 번 구간에 각각 3 개, 8 번 구간에 2 개를<sup>(16)</sup> 절점 좌표계 위치에 2 장에서 기술한 집중질량을 갖는 유연체로 모델링 하였다. 부력재의 특성과 부력은 Table 5 에 나타나 있으며 부력효과는 Y 축 방향으로 부력을 인가하여 정의하였다.

**Table 4** Properties of flexible pipe module

Properties	Value
Length	10 m
Outer radius	0.1250 m
Inner radius	0.1015 m
Area moment of inertia	0.00011 m <sup>4</sup>
Young's modulus	0.245 GPa(experiment) <sup>(15)</sup>
Mass	35 kg/m
Density	2,093 kg/m <sup>3</sup>
Poisson's ratio	0.3
Buoyancy	1,689.06 N

**Table 5** Properties of buoyancy module

Properties	Value
Length	1.2 m
Outer radius	0.5150 m
Inner radius	0.1250 m
Mass	532.7 kg
Buoyancy	2,177.08 N



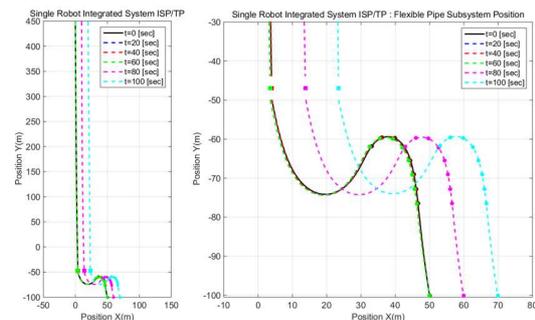
**Fig. 8** Position of buoyancy modules

통합 채광시스템의 동적 거동 시뮬레이션으로 Initial Stationary Positioning(ISP) 을 60 초간 수행하고 그 후 Tandem Positioning(TP) 시뮬레이션<sup>(17)</sup>을 40 초 동안 수행하였다. ISP 시뮬레이션에서는 채광선과 채광로봇이 정지시켜 통합 채광시스템이 안정화되도록 하였으며, TP 시뮬레이션에서는 채광선과 채광로봇을 최대 속도 0.5m/s 의 속도로 동시에 이동시켜 수직양광관 및 유연관, 버퍼의 거동을 확인하였다.

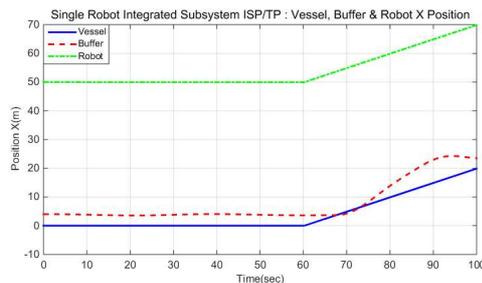
Fig. 9 과 Fig. 10 는 단일로봇 통합 채광시스템의 ISP/TP 시뮬레이션 결과, Fig. 11 과 Fig. 12 은 이중로봇 통합 채광시스템의 ISP/TP 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

Fig. 9 과 Fig. 11 의 좌측 결과는 통합 채광시스템의 위치 변화이고, 우측 결과는 유연관 부분시스템의 위치 변화를 나타낸다. 실선은 수직양광관과 유연관의 0 초일 때, 초기 형상이며, 점선은 20, 40, 60, 80, 100 초의 형상을 나타낸다.

Fig. 10 와 Fig. 12 은 채광선, 버퍼, 채광로봇의 X 축 위치를 나타낸다. 채광선과 채광로봇은 일정한 거리를 유지하며 움직이지만 버퍼는 관성효과로 인해 이동과 동시에 채광선을 중심으로 진자 운동을 하는 것을 확인할 수 있다. 기존 논문<sup>(17)</sup>의 결과와는 상이한 경향을 나타나고 있는데 이는 유체저항력과 수중 이동에 의한 부가질량 효과 등이 고려되지 않아 나타나는 현상으로 생각된다.



**Fig. 9** Initial stationary positioning and tandem positioning simulation results for the single robot integrated mining system

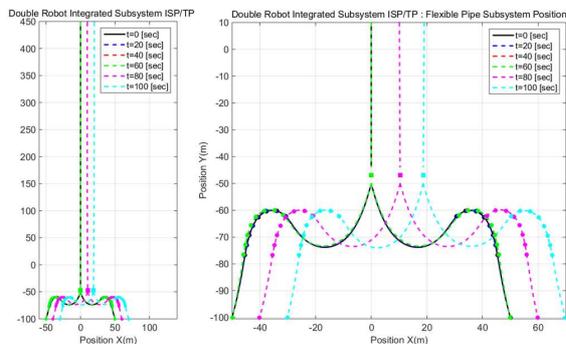


**Fig. 10** X-axis position of the vessel, the buffer and the mining robot of ISP and TP simulation results for the single robot integrated mining system

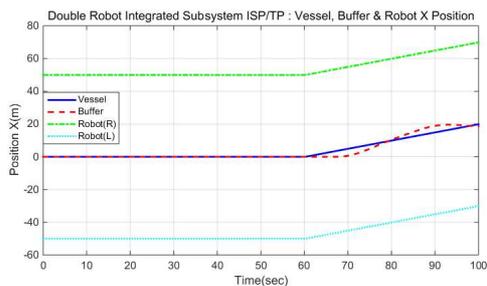
Table 6 에 나타난 바와 같이 부분시스템 합성방법의 효율성을 분석하기 위해 식 (5)로 전체 시스템을 해석하는 일반적인 해석방법과 식 (6~7), 식 (11~13)으로 해석하는 부분시스템 합성방법의 연산 횟수를 비교하였다. 단일로봇 통합 채광시스템에서는 부분시스템 합성방법이 일반적인 해석방법보다 약 2.27 배가 빠른 것을 확인할 수 있다. 이중로봇 통합 채광시스템과 삼중로봇 통합 채광시스템이 각각 7.97 배, 14.31 배 빠르게 계산됨으로써 유연관-채광로봇 부분시스템의 개수가 증가할수록 부분시스템 합성방법의 효율성이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

**Table 6** Computational complexity with conventional and subsystem synthesis method

	Number of subsystem		
	1	1	1
Lifting pipe	1	1	1
Flexible pipe	1	2	3
Conventional method	0.68e+09	2.65e+09	6.72e+09
Subsystem synthesis method	0.20e+09	0.33e+09	0.47e+09
Ratio (Con : Sub)	2.27:1	7.97:1	14.31:1



**Fig. 11** Initial stationary positioning and tandem positioning simulation results for the double robot integrated mining system



**Fig. 12** X-axis position of the vessel, the buffer and the mining robot of ISP and TP simulation results for the double robot integrated mining system

### 5. 결론

심해저 통합 채광시스템의 효율적인 해석을 위하여, 유연 다물체 시스템의 부분시스템 합성방법을 적용하였다. 심해저 통합 채광시스템의 수직양광관과 유연관의 비선형적인 거동 해석을 위하여 유연 다물체 동역학에 기초한 부분구조 방법을 사용하였다. 단일로봇으로 구성된 통합 채광시스템에 부분시스템 합성방법을 적용하였으며, 이중로봇으로 구성된 통합 채광시스템에도 효율적으로 확장할 수 있었다. 채광로봇-유연관 부분시스템의 개수에 따라 일반적인 해석방법과 부분시스템 합성방법의 연산 횟수를 비교하여 효율성을 이론적으로 검증하였다.

향후 본 연구 결과를 바탕으로 조류효과를 고려한 유체 저항력 적용 및 보다 안정적인 적분 알고리즘 적용이 필요하며, 부분시스템 합성방법의 장점을 이용한 병렬처리 기법을 통합 계산 효율성 연구가 필요하다.

### 후 기

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행된 “심해저 광물자원 통합 채광시스템 개발 연구” 과제의 연구 결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사 드립니다.

### 참고문헌 (References)

- (1) 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,” *Proceeding of the International Seabed Authority’s Workshop*, pp.261~283.
- (2) Sanders, J.V., 1982, “A Three-Dimensional Dynamic Analysis of a Towed System,” *Ocean Engineering*, Vol. 9(5), pp.483~499.
- (3) Hong, S., 1992, *Dreidimensionale Nichtlineare Statische und Dynamische Analyse von Flexiblen Rohrleitungen im Seegang*, Technical University of Aachen Doctoral Dissertation.
- (4) Hong, S. and Hong, S.W., 1994, “A Three-Dimensional Dynamic Analysis of Towed System, Part 1. A Mathematical Formulation,” *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 8(1), pp.16~22.
- (5) Shabana, A.A., 2000, “Three Dimensional Absolute Nodal Coordinate Formulation for Beam Elements:

- Theory,” *Journal of Mechanical Design*, Vol. 123(4), pp.606~621.
- (6) Wu, S.C., 1987, *A Substructure Method for Dynamic Simulation of Flexible Mechanical Systems with Geometric Nonlinearities*, The University of Iowa Doctoral Dissertation.
- (7) Delmer, T.N., Stephens, T.C. and Tremills, J.A., 1988, “Numerical Simulation of Cable-Towed Acoustic Arrays,” *Ocean engineering*, Vol. 15(6), pp.511~548.
- (8) Yoon, S.M., Yeu, T.K., Pack, S.J., Kim, J.H., Hong, S. and Kim, S.B., 2011, “A Study on Turning Motion for Formation Control of Multi-Miner,” *Proceeding of the KAOSTS*.
- (9) Kim, S-S., 2002, “A Subsystem Synthesis Method for Efficient Vehicle Multibody Dynamics,” *Multibody System Dynamics*, Vol. 7, pp.189~207.
- (10) Kim, S-S., Jeong, W.H., Kim, M.H. and Han, J.B., 2012, “Comparative Study on Multibody Vehicle Dynamics Models based on Subsystem Synthesis Method using Cartesian and Joint Coordinates,” *Theor. Appl. Mech. Lett.*, Vol. 2(6), 063010.
- (11) Cook, R.D., 1981, *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, John Willey & Sons.
- (12) Wu, S.C, Haug, E.J., Kim, S-S., 1989, “A Variational Approach to Dynamics of Flexible Multibody Systems,” *Mechanics of Structures and Machines*, Vol. 17(1), pp.3~32.
- (13) Yoo, W.S., Lee, J.H., Park, S.J., Sohn, J.H., Dmitrochenko, O. and Pogorelov, D., 2003, “Large Oscillations of a Thin Cantilever Beam: Physical Experiments and Simulation Using the Absolute Nodal Coordinate Formulation,” *Nonlinear Dynamics*, Vol. 34, pp.3~29.
- (14) Haug, E.J., 1989, *Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems*, Allyn and Bacon.
- (15) Min, C.H., Kim, H.W., Yeu, T.K., Jung, J.Y. and Hong, S., 2014, “Manufacturing of Flexible Rubber Hoses for Pilot Mining Test,” *Proceeding of the KSOE*.
- (16) Oh, J.W., Min, C.H., Kim, H.W., Lee, M.U., Lee, C.H., Hong, S. and Bae, D.S., 2014, “A Study on the Arrangement of Buoyancy Module for Stability of Marine Flexible Riser of a Deep-Seabed Mining System,” *Proceeding of the IMSD*.
- (17) Kim, H.W., Hong, S., Lee, C.H., Choi, J.S. and Yeu, T.K., 2010, “Total Dynamic Analysis of Deep-Seabed Integrated Mining System,” *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 34, pp.195~203.