

Article

심해저 채광 시스템에서 유연관의 안정적인 운용을 위한 부력재 배치 설계

오재원^{1,2} · 민천홍² · 이창호² · 홍섭² · 배대성¹ · 임준현¹ · 김형우^{2*}

¹한양대학교 공과대학 기계공학과
(133-791) 서울특별시 성동구 왕십리로 222
²한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소
(305-343) 대전광역시 유성구 유성대로 1312번길 32

Arrangement Plan of Buoyancy Modules for the Stable Operation of the Flexible Riser in a Deep-Seabed Mining System

Jae-Won Oh^{1,2}, Cheon-Hong Min², Chang-Ho Lee², Sup Hong², Dae-Sung Bae¹,
Jun-Hyun Lim¹, and Hyung-Woo Kim^{2*}

¹Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Hanyang University
Seoul 133-791, Korea

²Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, KIOST
Daejeon 305-343, Korea

Abstract : This paper focuses on the efficient arrangement plan of buoyancy modules, which plan is used to secure the safe operation and structural stability of a marine riser. The marine riser is connected between a vessel and seabed devices. The movement of the vessel and the seabed devices are affected by the motion of the riser. The riser of a deep-seabed integrated mining system exerts a strong influence on the healthy transfer of minerals. So, buoyancy modules must be equipped to compensate for the problem which is the structure stability and the dynamic motion. Installation locations and quantities of the buoyancy modules are determined by real sea experiments. But this is not easy to do because in real sea experimental conditions the cost is expensive as well as being, time-consuming and dangerous. Therefore, the locations and quantities should be determined by numerical simulation. This method is called simulation-based design. The dynamic analysis models of the riser and the buoyancy modules are built into the commercial software of DAFUL.

Key words : flexible riser, deep-seabed mining system, buoyancy module, arrangement plan, multi-body dynamics

1. 서 론

육상 자원의 고갈로 인해 심해저 광물자원의 개발에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 태평양의 클라리온-클립퍼튼 해역(CCFZ)에 부존되어 있는 심해저 망간단괴

의 연속적 채광을 위한 수많은 연구가 진행되어 왔다 (Brink and Chung 1981; Chung 1996, 1998; Hong and Kim 1999; Morgan et al. 1999; Liu and Yang 1999; Handschuh et al. 2001; Glasby 2002; Valsangkar 2003; Deepak et al. 2007; Sharma 2011). 한국은 1994년 태평양의 클라리온-클립퍼튼 해역에서 독점 탐사권을 확보하였으며, 한국의 선박해양플랜트연구소에서는 Fig. 1에서 보

*Corresponding author. E-mail : hyungwoo4601@kriso.re.kr

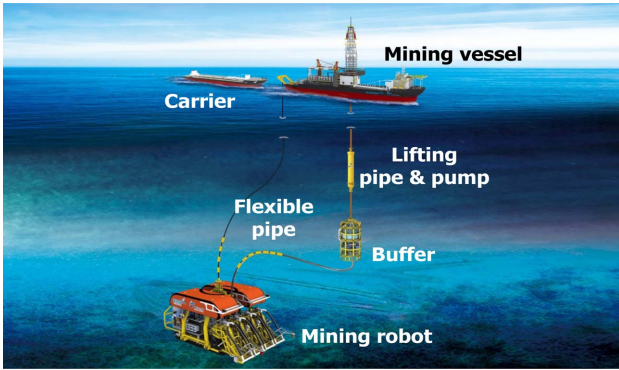


Fig. 1. Conceptual diagram of deep-seabed integrated mining system

이는 것과 같은 해저 광물자원의 연속적 채광을 위한 심해저 통합 채광 시스템을 개발 중이다. 이와 같은 통합 채광 시스템은 선박, 양광 라이저, 버퍼, 유연 라이저, 채광 로봇으로 구성되어 있다. 각각의 요소기술은 완성 단계에 도달하였지만 요소기술을 통합한 통합운용에 대한 연구는

아직까지 미진하다. 따라서 본 연구에서는 심해저 통합 채광 시스템 중 해양 유연 라이저의 안정적인 운용에 대해 고찰하고자 한다.

해양 라이저는 선박과 해저 장비간에 연결되어 있는 장비로 유전, 가스, 광물 등 해양 자원의 이송을 위해 사용된다. 해양 라이저는 크게 강관과 유연관으로 구분이 되며 용도에 맞는 라이저를 선별하여 사용해야 한다. 본 연구에서 사용되는 라이저는 유연관으로 채광 로봇이 채집한 광물을 1차 저장소인 버퍼로 운반하는 이송관의 역할을 한다. 유연관은 해양 장비들에 연결되어 있기 때문에 거동이 불안정하면 장비의 파손 및 손실 등의 문제점을 초래할 수 있다. 또한 유연관의 형상은 연결되어 있는 장비의 운동 및 광물의 이송에 큰 영향을 미친다. 이런 영향을 최소화하기 위해 유연관에 부력재를 장착하여 최적의 형상을 만들어야 한다. 현재 해양 석유시추산업에서는 장비의 운용과 환경에 따라 유연관의 형상을 몇 가지로 구분하여 사용하고 있다. 유연관의 운용 형상은 Table 1과 같다. 일반적으로 심해저 채광 시스템에서는 해저면의 끌림 현상

Table 1. Flexible riser configurations (Halil 2012)

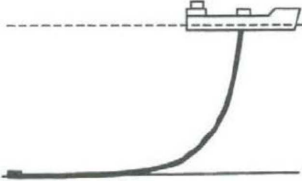
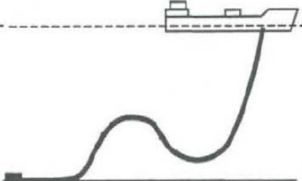
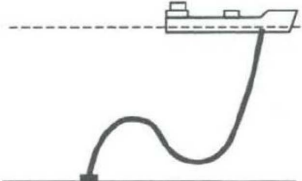
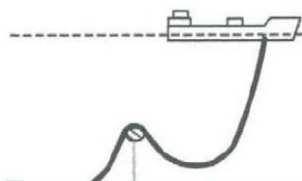
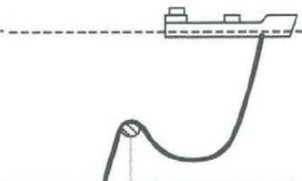
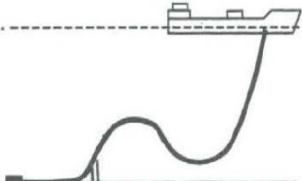
		
Free Hanging Catenary	Lazy Wave	Steep Waves
		
Lazy S	Steep S	Pliant Wave



Fig. 2. Installation experiment of buoyancy module in real sea

을 방지하고 채집된 망간단괴의 원활한 슬러리 유동이 가능한 steep wave 형태를 많이 사용하고 있다. 이러한 유연관의 형상을 만들기 위해서는 부력재를 유연관에 장착하여야 하는데, 최적의 부력과 부력재의 수량, 위치 등이 매우 중요한 설계요소가 된다. 사용자가 원하는 운용 형상이 되도록 유연관의 부력재 배치 설계를 하기 위해서는 해상 실험을 통해 답을 얻는 것이 가장 정확하지만 해상 실험의 위험성(Fig. 2)과 측정의 어려움으로 인해 거의 불가능하다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 CAE (Computer Aided Engineering) 접근 방식의 설계 기법 중 하나인 SBD(Simulation Based Design)를 이용하여 부력재의 배치 설계(수량, 위치, 부력 등)와 유연관의 구조 안전성 평가를 수행하고자 한다.

2. 수치해석모델

연구를 위한 수치해석모델은 상용 다물체 동역학 소프트웨어인 DAFUL(Virtual Motion Inc. 2012)을 사용하였으며, 전체적인 시스템 모델은 Fig. 3과 같다. 본 연구는 유연관과 부력재에 관한 연구이므로 명확한 분석과 효율적인 해석 속도를 위해 버퍼와 채광 로봇은 고정조인트를 사용하여 구속하였다. 버퍼와 채광 로봇의 운용 거리는 선

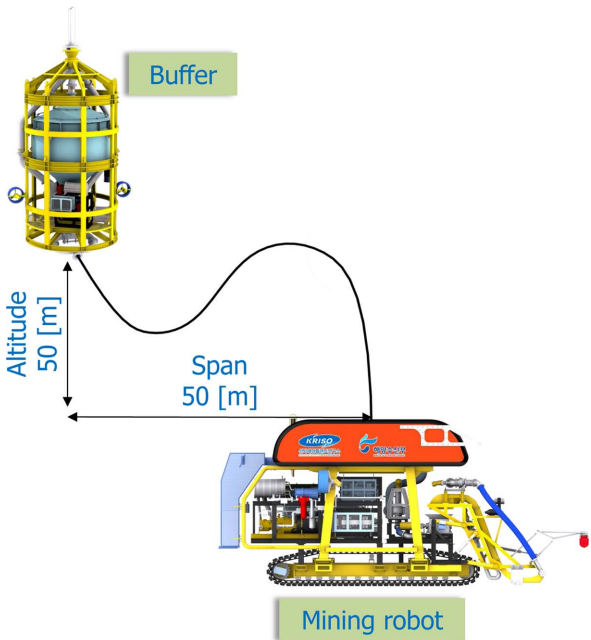


Fig. 3. Dynamic analysis model for this study



Fig. 4. A module of flexible riser

Table 2. Flexible riser's characteristics

	Parameter	Value
Hose	Inner diameter	203.2 [mm]
	Outer diameter	250.0 [mm]
	Length	10.0 [m]
	Mass	305 [kg]
	Young's module	400 [Mpa] (Estimation)
	Quantity	10 [Roll]
Flange	Mass	37.5 [kg]

박해양플랜트연구소에서 차후 실험을 위해 계획한 폭 50 m, 높이 50 m로 하였다.

유연관의 제원

유연관의 한 모듈은 호스, 부력재 결합 부품(collar), 플랜지로 구성되어 있으며 Fig. 4와 같다. 일반적으로 유연관 제작 시 호스와 플랜지는 한 모듈로 제작이 되고 부력재 결합 부품인 collar의 개수를 선정하여 추가 제작한다. 심해저 채광 시스템에서 사용하기 위한 유연관의 제원은 Table 2와 같다. 유연관은 복합 재료를 사용하여 열처리 및 건조 과정을 통해 제작되는 복합 재질의 부품이기 때문에 영률과 같은 물리적 특성을 정확하게 알 수가 없다. 따라서 유연관에 사용되는 재질 중 지배적 특성을 갖는 주재료인 tire cord의 특성을 설계 검증 및 시뮬레이션에 이용하였다.

유연관의 동역학 모델

본 연구에서는 유연관을 동역학 모델로 표현하기 위해서 오일러-티모셴코 빔 이론을 사용하였다. 오일러-티모셴코 빔은 강체와 강체 사이를 힘 요소로 연결함으로써 일반적인 노드(node) 기반의 유한요소법 보다 해석 시간이 빠르며 유사한 거동을 모사하는 장점이 있다. 유연관을 여러 개의 강체로 나누고, 강체들 사이를 오일러-티모셴코 빔으로 연결하여 유연관의 수치모델링을 수행하였으며 식 (1)과 같이 표현할 수 있다(Virtual Motion Inc. 2012).

$$F = Kx + C\dot{x} \tag{1}$$

여기서 K 는 강성 행렬이고 C 는 감쇠 행렬, x , \dot{x} 는 강체의 위치와 속도를 의미한다.

빔의 힘에서 감쇠 행렬은 구조의 변형에는 영향을 주지 않기 때문에 구조 해석에서 일반적으로 강성 행렬의 1%

값을 사용한다. 강성 행렬은 다음과 같은 방법을 이용하여 구할 수 있다.

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} & 0 & 0 & 0 & k_{26} \\ 0 & 0 & k_{33} & 0 & k_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{53} & 0 & k_{55} & 0 \\ 0 & k_{62} & 0 & 0 & 0 & k_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$k_{11} = \frac{EA}{L} \quad (3)$$

$$k_{22} = \frac{12EI_{zz}}{L^3(1+P_y)} \quad (4)$$

$$k_{33} = \frac{12EI_{yy}}{L^3(1+P_z)} \quad (5)$$

$$k_{44} = \frac{GI_{xx}}{L} \quad (6)$$

$$k_{55} = \frac{(4+P_z)EI_{yy}}{L(1+P_z)} \quad (7)$$

$$k_{66} = \frac{(4+P_y)EI_{zz}}{L(1+P_y)} \quad (8)$$

$$k_{26} = \frac{-6EI_{zz}}{L^2(1+P_y)} \quad (9)$$

$$k_{35} = \frac{6EI_{zz}}{L^2(1+P_z)} \quad (10)$$

여기서 E 는 유연관의 재료 영률, G 는 유연관의 재료 전단률, A 는 유연관의 단면적, L 은 유연관의 길이, I 는 각 방향의 관성모멘트이고 P 는 전단력 계수로서 전단력이 고려되지 않는 일반적인 빔 구조에서는 0을 사용한다.

빔 요소로 모델링 된 유연관은 Fig. 5와 같이 분석의 용이성을 위해 순서화한다. 1번 라이저는 버퍼의 스위벨 조인트와 연결되고 10번 라이저는 채광 로봇과 직각으로 연결되는 부분이다. 유연관에 장착되는 부력재는 형상은 무시하고 힘 요소를 이용하여 부력만 적용하였다. 부력의 크기와 작용점은 본 연구에서 파라미터 반복법을 통해 변화

Table 3. Variable condition for equipment position and quantities of the buoyancy module

No. Riser	Quantities of buoyancy module			
7				
6 + 7	1 ea.	2 ea.	3 ea.	4 ea.
7 + 8				
6 + 7 + 8				

하는 입력 변수로 정의하였다.

해석 조건

부력재의 배치 설계를 위해 사용된 변수로는 유연관을 steep wave 형태로 만들어 주기 위한 부력재의 총 부력, 부력재가 장착될 위치, 장착된 부력재의 개수이다. 총 부력은 5 변수, 부력재 장착 위치는 라이저 번호로써 4 변수, 장착된 부력재의 개수는 4 변수로 정의하였으며 각각의 조합에 따른 결과를 분석하여 설계 반영하고자 한다.

수중에서 유연관의 전체 중량은 유연관의 자중에 부력을 포함한 값으로 1,345 kgf이므로, 전체 부력재에 의한 부력의 크기를 라이저 중량보다 크거나 작은 범주인 1,000 kgf~2,000 kgf에서 1000, 1250, 1500, 1750, 2000 kgf로 5개의 설계변수를 적용하였다. 장착 위치에 대한 설계 변수는 라이저 번호로써 라이저 한 모듈에 동일한 부력재 수량을 균등한 위치에 장착하고 위치와 수량에 대한 설계 변수는 Table 3에 나타나 있다. 유연관 한 모듈이 10 m이고 부력재의 길이가 약 2 m인 관계로 부력재의 최대 개수는 4개로 제한하였다.

총 해석 시간은 100 sec로 유연관 형상이 steep wave 형상으로 안정화될 때까지 충분히 오래 해석을 수행하였으며, 부력재에 의한 결과를 자세하게 고찰하기 위해서 유연관의 양단은 고정시키고 오직 부력재의 힘과 유연관 부력, 자중에 의해서만 동적 거동이 가능하게 하였다.

3. 결 과

부력재의 최적배치설계를 위해서는 다음과 같이 설계기준을 정의하였다.

- 1) 유연관과 버퍼 스위벨 조인트 사이의 장력(상부 끝단 장력)은 작아야 한다.
- 2) 유연관의 변형 시 임계 곡률 반경은 재료 한계인 1.8 m로 제한한다.

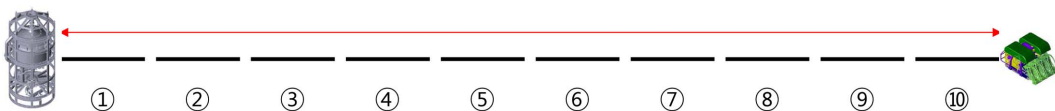


Fig. 5. Numbering of flexible riser

3) Fig. 6과 같은 steep wave 형태로 유연관이 변형 시 변형 에너지가 작아야 하므로 곡률 반경 R_1 과 R_2 의 크기의 차이가 작을수록 좋은 설계 조건이다.

부력 결정

부력재의 배치 설계에 앞서 유연관에 필요한 부력을 확인해야 한다. 필요한 부력재의 총 부력 크기를 결정하기 위해서 7번 라이저에 집중하중을 가하여 평가하였다. Table 4는 부력의 집중하중에 의한 라이저의 변형 최대 높이(H)를 보여준다. 부력의 크기가 커질수록 H 또한 높아지며 유연관의 형태가 급격하게 변화하지만 약 1700 kgf

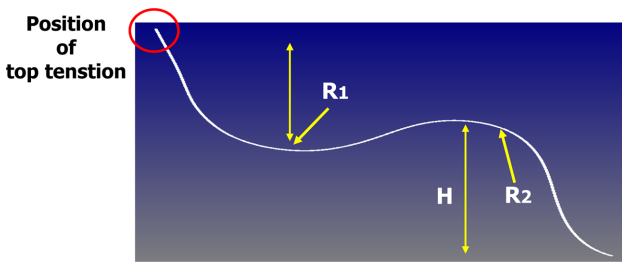


Fig. 6. Dimensional schematic for arrangement plan of the buoyancy module

Table 4. Maximum height of flexible riser by applied buoyancy

Buoyancy [kgf]	Height [m]	Configuration
1000	31.42	
1250	34.31	
1500	35.75	
1750	36.99	
2000	37.01	

이상부터는 부력의 크기가 증가하여도 H의 값이 거의 수렴하고 형태도 일정함을 확인할 수 있다. 이는 부력이 1700 kgf 보다 크게 작용하면 운용하는데 충분하다는 점을 보여준다. 따라서 본 연구에서는 부력재에 의한 전체 부력의 크기를 충분한 값인 1800 kgf를 배치 설계에 사용하였다.

부력재의 위치 및 수량 결정

부력재의 위치와 수량을 결정하기 위해서 유연관 운용에 가장 중요한 상부 끝단 장력에 대한 영향력과 곡률반경 조건의 적합성을 판별하여 결정하였다. Fig. 7은 부력재가 장착된 라이저의 조합과 부력의 장착 수량에 따른 상부 끝단 장력의 결과를 나타낸다. Fig. 7(a)를 보면 4가지의 조합 중 6+7(녹색), 6+7+8(노란색) 관의 조합에 따른 상부 끝단 장력이 가장 작게 작용함을 확인할 수 있다. Fig. 7(b)를 보면 부력재의 수량에 따라 상부 끝단 장력이 거의 변화하지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 상부 끝단 장력의 결과에 의하면 부력재의 위치가 가장 중요한

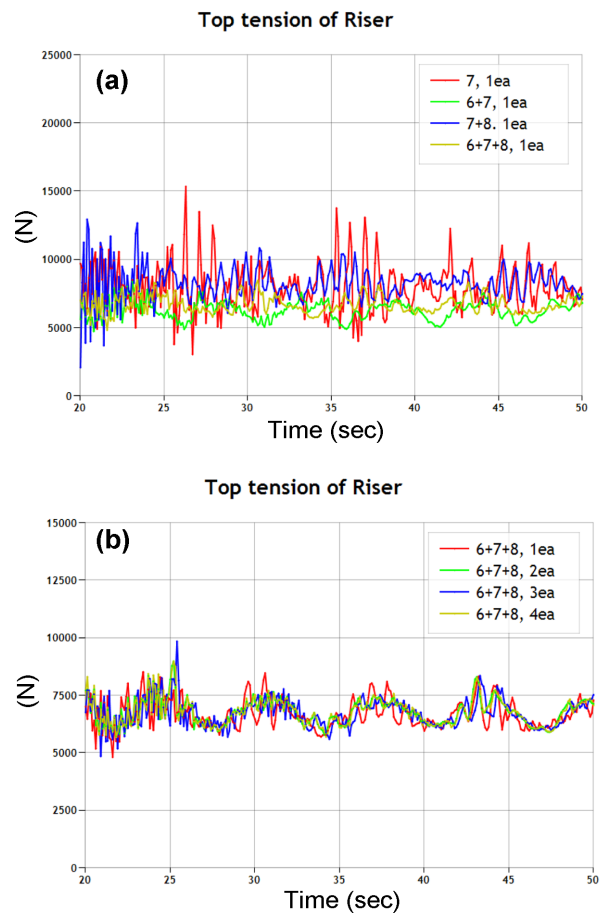


Fig. 7. Top tension of the flexible riser: (a) with combination of riser equipping the buoyancy module, (b) with number of equipped the buoyancy module

Table 5. R_1 , R_2 and H with combination of risers and quantity of the buoyancy module

No. Riser	1 ea.			2 ea.		
	R_1 [m]	R_2 [m]	H [m]	R_1 [m]	R_2 [m]	H [m]
7	14.4	2.8	35.1	14.3	3.7	33.9
6+7	10.2	4.3	39.7	10.4	5.2	39.4
7+8	10.1	3.9	32.8	9.6	5.5	30.6
6+7+8	11.7	10.6	35.2	7.7	8.0	35.1
No. Riser	3 ea.			4 ea.		
	R_1 [m]	R_2 [m]	H [m]	R_1 [m]	R_2 [m]	H [m]
7	11.0	4.1	34.6	12.7	4.1	34.0
6+7	10.3	5.4	40.1	10.3	5.1	39.6
7+8	9.3	5.6	30.1	8.7	7.2	30.5
6+7+8	8.3	8.0	35.1	7.6	8.2	34.9

변수이고 여기서 6+7과 6+7+8 라이저에 부력재가 배치 되어야 함을 알 수 있다. 그러나 곡률반경의 적합성에 대해서는 부력재의 위치뿐만 아니라 수량 또한 중요한 변수임을 Table 5를 보면 알 수 있다. 결과에서 곡률반경 R_1 과 R_2 의 값의 차이가 거의 없는 라이저의 조합은 6+7+8에 부력재를 배치했을 경우이다. 따라서 상부 끝단 장력과 곡률반경 설계 조건을 기준으로 6+7+8의 라이저에 부력재를 배치해야 한다. 부력재의 수량에 따른 결과를 보면 모든 곡률반경이 재료한계는 넘어섰고, 6+7+8 조합 시 2, 3, 4개의 부력재가 존재했을 경우 곡률반경의 차이가 가장 적음을 알 수 있다. 따라서 부력재의 전체 부력이 1800 kgf가 되도록 6, 7, 8 라이저에 각각 2개 이상의 부력재를 배치하면 유연관을 안정적으로 운용할 수 있다.

유연관의 안전성 평가

지금까지 안정적인 유연관 운용을 위해 steep wave 형

태를 유지하기 위한 부력재의 배치 설계를 하였다. 그렇다면 배치 설계 결과가 steep wave 형태를 유지는 하지만 실제로 구조 안전성을 갖고 있는지 확인하여야 한다. 본 연구에서 사용한 유연관의 최대 인장력은 300 kN이다. Fig. 8에서는 부력재를 6, 7, 8에 배치했을 경우의 라이저의 인장력에 대한 결과를 보여주고 있다. 라이저에 가해지는 최대 인장력은 8번 관에 작용하였으며 전체적으로 인장력은 10 kN 내외로 이는 재료 특성으로써 최대 인장력 300 kN의 3% 영역으로써 구조적 측면에서 매우 안정적이다. 따라서 본 연구에서의 배치 설계가 라이저의 안정적인 운용에 적합하다고 할 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 부력재의 위치, 부력 등에 대한 유연관의 형상 및 형상에 따른 유연관의 상부 끝단 장력의 영향

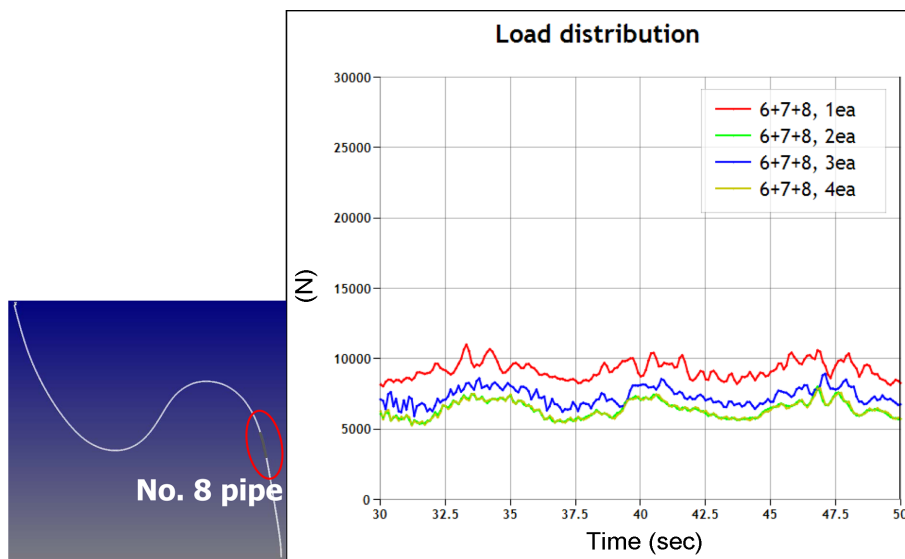


Fig. 8. Load distributions with number of buoyancy module in no.8 pipe

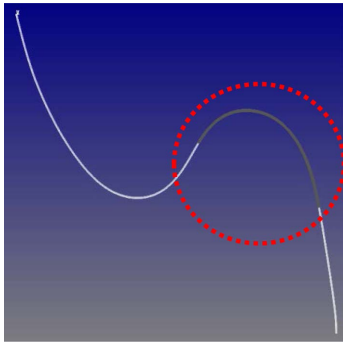


Fig. 9. Riser configuration by optimum arrangement; the red dotted area is optimum arrangement of buoyancy module

을 시뮬레이션 기반으로 수행하였으며, 유연관의 안정적인 운용을 위해 steep wave 형태의 설계를 위한 부력재의 배치 설계를 실시하였다. 심해저 채광 시스템에서 사용할 부력재는 한 모듈당 222 kgf의 부력을 갖는다. 따라서 이를 유연 라이저에 활용하기 위해서는 6, 7, 8번 라이저에 총 8개 또는 9개의 부력재를 장착하여야 하고 6, 7번에 3개 8번에 2개 총 8개를 장착하였을 경우 최종 형상은 Fig. 9와 같다. 앞선 결과에서 부력재를 2개 이상씩 6, 7, 8 번 라이저에 장착할 경우 모든 설계 조건을 만족하였고 구조 안전성 또한 확보가 되었기 때문에 Fig. 9의 배치 설계가 실제 운용 시 적용될 수 있고 차기 실험에서 활용할 계획이다.

심해저 장비의 한 부분인 유연관의 형상 결정에 있어 실험의 어려움 때문에 시뮬레이션 기반의 설계 기법을 이용하여 설계, 계획, 검증 수행하였다. 차후에는 최적 설계 기법과 동역학 시뮬레이션을 연동하여 더 정확한 설계, 계획, 검증 기법을 연구할 예정이다.

사 사

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행된 “심해저 광물 자원 통합 채광시스템 개발 연구(PMS3090)” 과제의 연구 결과 중 일부임을 밝힙니다.

참고문헌

- Brink AW, Chung JS (1981) Automatic position control of a 300,000-ton ship ocean mining system. In: Offshore technology conference, Houston, 1 December 1981
- Chung JS (1996) Deep-ocean mining: technologies for manganese nodules and crusts. *Int J Offshore Polar Eng*

6(4):244-254

- Chung JS (1998) An articulated pipe-miner system with thrust control for deep-ocean crust mining. *Mar Georesour Geotec* 16:253-271
- Deepak CR, Ramji S, Ramesh NR, Babu SM, Raju A, Shajahan MA, Atmanand MA (2007) Development and tests of underwater mining systems for long term operations using flexible riser concept. In: 7th ISOPE ocean mining symposium, Lisbon, Portugal, 1-6 July 2007
- Glasby GP (2002) Deep seabed mining: past failures and future prospects. *Mar Georesour Geotec* 20:161-176
- Halil D (2012) Riser concepts for deep waters. Norwegian University of Science and Technology, 5 p
- Handschuh R, Grebe H, Panthel J, Schulte E, Wenzlawski B, Schwarz W, Atmanand MA, Jeyamani R, Shajahan M, Deepak C, Ravindran M (2001) Innovative deep ocean mining concept based on flexible riser and self-propelled mining machines. In: 4th ISOPE ocean mining symposium, Szczecin, Poland, 23-27 September 2001
- Hong S, 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. In: International seabed authority's workshop, Kingston, Jamaica, 3-6 August 1999
- Liu F, Yang N (1999) Proposed technologies for mining deep-seabed polymetallic nodules: Chap 9 Environmentally Friendly Deep Seabed Mining System. In: International seabed authority's workshop, Kingston, Jamaica, 3-6 August 1999
- Morgan CL, Odunton NA, Jones AT (1999) Synthesis of environmental impacts of deep seabed mining. *Mar Georesour Geotec* 17:307-356
- Sharma R (2011) Deep-sea mining: economic, technical, technological, and environmental considerations for sustainable development. *Mar Technol Soc J* 45:28-41
- Valsangkar AB (2003) Deep-sea polymetallic nodule mining: Challenges ahead for technologists and environmentalists. *Mar Georesour Geotec* 21:81-91
- Virtual Motion Inc. (2012) DAFUL 4.2 User's Manual
- Virtual Motion Inc. (2012) DAFUL 4.2 Verification Manual

Received Aug. 27, 2014

Revised Dec. 5, 2014

Accepted Feb. 9, 2015