

## 근해역 양광시험을 위한 HDPE Pipe의 구조특성 연구

이재환\* · 윤치호\*\*

\*충남대학교 선박해양공학과

\*\*한국지질자원연구원

### Analysis of Structural Characteristics of HDPE Pipe for Manganese Lifting Test

Jae-Hwan LEE\* and Chi-Ho Yoon\*\*

\*Naval Architecture & Ocean Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea

\*\*Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, Korea

**KEY WORDS:** Manganese noodle collection 망간단괴채집, Lifting pipe 양광관, HDPE (High Density PolyEthylene) Pipe 고밀도 폴리에틸렌 관, Tension and bending test, 인장과 굽힘 시험, Pressure test 압력시험

**ABSTRACT:** The mining of imitated manganese noodles in 1000 m of seawater is planned for 2012. Thus, it is necessary to prepare the lifting pipes to be used for the test. Because of storage and expense constraints, flexible and economic HDPE pipe is being considered, making it necessary to test the structural safety. Material, pressure-chamber tests and finite element analysis of HDPE pipe for the 1000-m depth were performed. The tangential stiffness of HDPE was obtained through tension and three-point bending material tests and used for a structural analysis. FEA results show that the current sample pipe segment is safe for 1000 m of water pressure, and the stress result is also within the safe value. From the current results, the HDPE pipe seems to be acceptable only for the currently suggested constraints. However, more numerical and pressure tests need to be considered by applying additional physical conditions such as gravitational and hydrodynamic loads, external and internal fluid pressure, axial force induced ship motion, and heavy pump pressure to determine future usage.

### 1. 서 론

심해저 양광시스템 (Fig. 1)은 집광기를 통해 채집된 망간단괴가 유연관(Flexible Pipe)을 통해 중간 버퍼로 유송되고, 유송된 단괴는 수직 양광관과 펌프에 의해 해상의 채광 선까지 이송되는 시스템이다. 망관 단괴를 이송하는 운송관(라이저)은 강철파이프와 유연관으로 분류되는데 유연재료에 관한 것으로 국외의 DeepFlex (www.deepflex.com) 유연관은 고가이며 본당 되지 않은 8겹의 재질로 되어 있다. 통상 망간 채집 경우 해저의 집광기가 이동하므로 버퍼까지는 유연관이 사용되고 버퍼부터 선상까지의 양광은 강도가 큰 강철관을 사용한다. 양광관의 경우 채광 수심에 따라 길이가 길어지며 높은 수압과 조류, 파도, 채광선의 동적운동 등의 외력에 견뎌야 하기 때문에 높은 강도와 유연성이 요구된다. 석유 수송에 사용되는 라이저는 강철관으로 이에 관한 연구결과가 많으나 망간 채집과 관련된 파이프 연구는 최근 들어 많이 발표되고 있다. Park et al.(2010)은 무거운 버퍼가 달린 매우 긴 해양용 파이프의 비선형 축 진동에 대한 연구를 수행하여 심해에서는 축 방향 진동이 중요함을 발표하였다. 정동호 등(2004)은 해양심층수를 취수하기 위한 유연라이저의 구조해석을 뉴턴의 제 2법칙, 모멘트 평형, 적합조건, 그리고 국부

적 곡률관계를 사용하여 3차원 지배방정식을 세우고 유한차분법으로 강철선이 외부에 보강된 250m의 HDPE 유연 라이저에 발생하는 장력을 계산하였다. 수면 근처에 파광과 조류가 같은 방향으로 작용할 경우 라이저의 장력 변동치가 평균보다 커짐을 도출하였다. Wang et al.(2007)은 1000m 급 망간단괴 강철관에 대해 모리슨 식이 포함된 유체동력에 대해 천이 동적 해석(Transient dynamic analysis)을 수행하였고 소형 해양수조에서의 실험결과에서 이론과 실험 두 경우 유사한 결과를 도출하였다. 외경, 내경, 두께가 각 219.08, 193.68, 12.7mm인 강철파이프에 발생하는 동적 응력을 계산하였다. Song et al.(2010) 등은 심해저 석유시추선인 FPSO 라이저 지지부에 대해서 최적설계를 수행하였다. 망간단괴 양광시스템에 관한 논문 Wang and Liu(2005), Liu et al.(2008), Handschuh et al.(2001)에서도 양광관에 대한 일부 내용이 있다.

2012년 개발 목표로 진행중인 양광 펌프와 시스템에 대해 1000m 모조 망간 단괴 양광(채집) 실험을 구상하고 있는 한국은 일시적인 실험이라 저렴하고 현장에서 설치/분해 등 관리가 쉽게 모조 단괴를 버퍼로 공급하는 공급관이나 선상으로 양광하는 양광관 후보로 고밀도 폴리에틸렌 HDPE(High density polyethylene) 양광관 사용에 관심을 두고 있다. 본 연구에서는 수심

교신저자 윤치호: 대전광역시 유성구 과학로 92, 한국지질자원연구원, 042-868-3222, ych@kigam.re.kr

1,000 m용으로 국산 양광용 관의 강도상 적합성을 알아보기 위하여 재료특성에 대한 실험과 3D CAD 모델링, FEM 모델링 및 구조해석, 수압실험을 통하여 구조의 안정성을 검토하였다. 현재의 연구는 해양 채집 중 발생하는 지점의 해양상태 즉 파도, 조류, 채집선의 운동과 버퍼/펌프의 작동하중 등은 아직 고려되어 있지 않다. 구조해석을 위한 양광관 HDPE의 물리적 특성 파악을 위한 실험, 단순한 정수압 상태의 수압시험과 관의 구조 해석 결과로 한정되어 있다. 본 논문의 HDPE 관의 구조는 Fig. 2와 같다. 관은 이중표피고 표피사이에 강성증강을 위해 H형 구멍들로 되어있으며 내피 표면에 45° 타원 회전 나선형 골이 있어 유체의 유속이 빨라짐에 따라 이물질 등이 부착되는 것을 방지하고, 유속 증가 시 국지적으로 형성되는 공기결집 (Air pocket)을 근본적으로 차단한다.

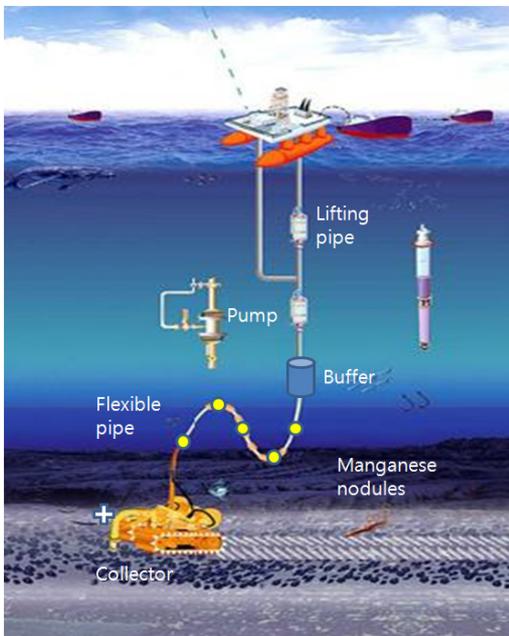


Fig. 1 Manganese nodules collecting and lifting

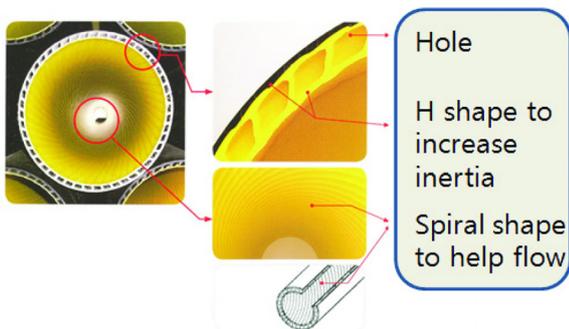


Fig. 2 Cross section of HDPE Pipe

## 2. 재료 물성치 실험과 HDPE 관 수압실험

### 2.1 재료 물성치 실험

HDPE의 경우 종류가 다양하며 성형 시 첨가물에 의해 물성

치가 달라진다. 따라서 구조해석 시 필요한 HDPE 물성치를 얻기 위해 인장/굽힘 실험을 통해 물성치를 얻었다.

### (1) 인장과 굽힘 실험

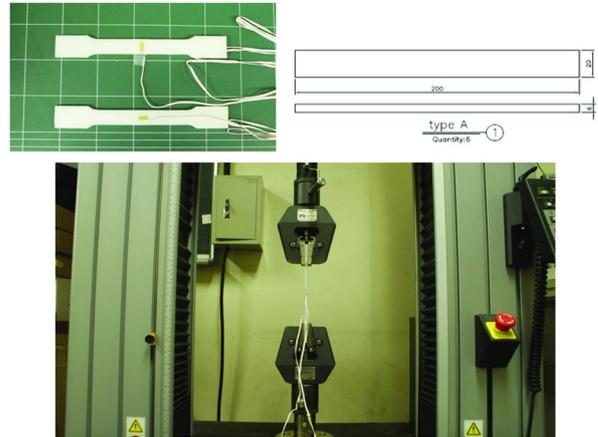


Fig. 3 HDPE specimen and Instron 5882

시험방법은 KS M 3006과 2003의 플라스틱의 인장성 측정 방법으로 Fig. 3의 시험기는 Instron 5882, 10tonf 로드셀, KYOWA사의 KFP-5-350-C1-65L1M3R 스트레인게이지가 사용되었고 파이프 제작에 사용된 재료의 시편 크기는 표점거리 140mm, 폭 20mm, 두께 6mm, 단면적 120mm<sup>2</sup>이다. Fig. 3과 같이 인장 시험 시 1번 시편에 한해서 포아송비를 구하기 위해 하중-하중 수직 방향으로 두 개를 집착 사용하였고, 2-4번 시편은 하중방향으로만 집착하였다. 시편별 인장속도와 산출된 항복응력은 1번 시편은 1mm/min, 12MPa, 2번 시편은 2mm/min, 14MPa, 3번 시편은 2mm/min, 16MPa로써 Table 1과 같이 항복응력의 평균값은 14MPa 이다.

Table 1 Yield stress of HDPE specimen

Specimea	1	3	4
Stress ( $\sigma_{yield}$ )	12	14	16

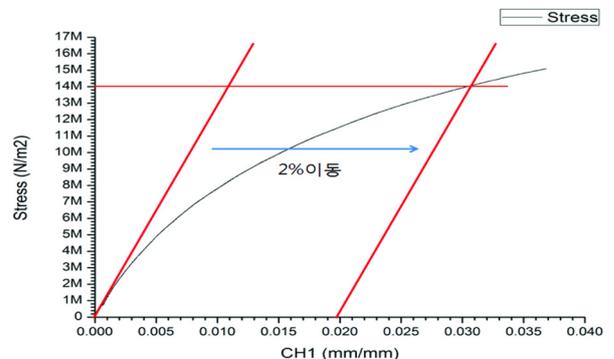


Fig. 4 Offset method for yield stress calculation

인장시험에서의 결과 값으로 그래프를 (Fig. 4) 형성하고  $E = \sigma / \epsilon$

를 사용해 Young's modulus  $E$ 는 1GPa, 항복응력은 Fig. 4와 같이 현재 통상적으로 쓰이고 있는 폴리에틸렌수지 실험의 2% Offset 법으로 평균으로 약 14MPa로 계산되었다. Fig. 5의 화면에서 보이는 그래프를 보면 재료의 특성이 항복응력을 지나 파단이 되기까지 인장되는 구간이 매우 긴 것으로 나타난다. 이는 플라스틱의 특성상 파단보다는 인장 변형이 크기 때문이다. Gere의 재료역학 문헌(2010)에는 폴리에틸렌의 극한강도(Ultimate stress)가 28MPa 까지이며 실사용 시 30 MPa 정도로도 보고 있다. 본 결과는 보수적이라고 볼 수 있다.

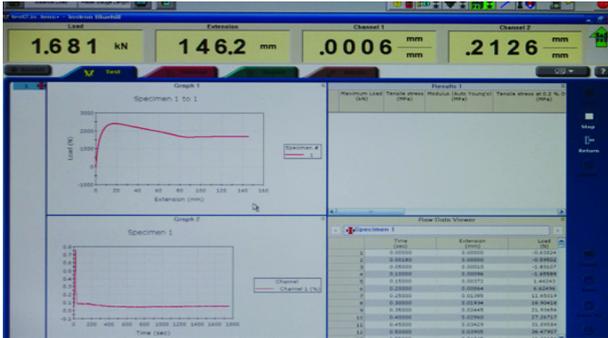


Fig. 5 Stress-strain graph and output

(2) 3점 굽힘시험

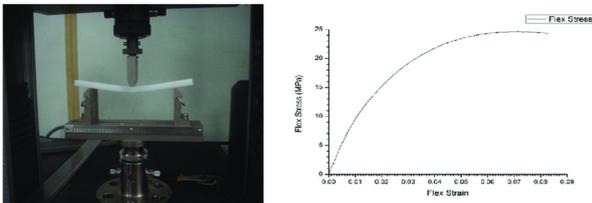


Fig. 6 Three point bending test and stress-strain

플라스틱-굴곡성의 측정을 위한 Fig. 6의 3점 굽힘시험기는 Instron 4467, 시험방법은 KS M ISO 178 2007 규정, 5 로드셀이 사용되고 시편은 표준 규격인 200 mm x 20 mm x 6 mm 크기의 A와 200mmx20mmx10mm 크기의 B이다. 규격시험 속도는 1분 동안 두께에 대해 0.4배의 변형이 발생하는 것을 측정하며, 시험편은 2mm/min 일 때 A(9mm) 4.5mm/min, B(6mm) 3 mm/min 으로 설정하였다. 실제 시험편 그림 지점 간 거리는 A형은  $h=9$ 로  $L=(16\pm 1)\times h$  에서 135, 144, 153 중 144mm, B형은  $h=6$ , 90, 96, 102 중 96mm가 사용되었다. 하중-수직변위 그래프를 구한 뒤, ASTM D790-10 12의 Tangent modulus of Elasticity 조항의 Flexural strain,  $E_B = \frac{L^3 m}{4bd^3}$  로부터 (m은 Slope to the tangent to the initial straight-line portion of the load-deflection curve(N/mm)로 초기구간에서의 하중-변형의 기울기), A형과 B형 모두  $\frac{L^3}{4bd^3} = 51200$ 이다. Fig. 6은 3점 굽힘 시험 시 시편에 작용하는 응력과 변형률에 대한 그래프이고 Table 2와 같이 재료의  $E$ (Young's modulus) 평균값은 1033.8 MPa로 계산되었다.

Table 2 Young's Modulus of HDPE specimen

Specimea	A1	A2	A3	A4	A5
E	970	1071	1075	1048	1150
Specimea	B1	B2	B3	B4	B5
E	929	952	996	1106	1041

2.2 HDPE 관 수압실험

구조해석의 결과와 비교하기 위해 한국해양연구원 해양시스템안전연구소(MOERI) 내압수조에서 수심 6000m 압력상태인 600bar 까지 압력을 적용시켜 안정성 실험을 하였다. 망간단과 양광 작업은 향후 태평양 6000m 수심에서 수행될 예정이라 현재 파이프의 사용 가능성을 보기 위함이다. 본 실험은 관이 밀봉된 상태는 아니다. 즉 관 내부와 외부로 유체가 유동하는 상태로써 내부가 막혀 있고 외압을 받는 순전히 밀봉 상태의 내압 상태는 아닌 것이다. 내압 실험 순서는 다음과 같으며 Fig. 7은 각 절차를 보여주고 있다.

- (1) HDPE 관 시편에 변형유무를 확인하기 위해 드릴로 구멍 형성(관이음 플렌지 부착 시 볼트 구멍)
- (2) 내압실험 용기에 실험 모델 설치
- (3) 내압수조에 실험 모델이 설치된 용기 삽입
- (4) 내압수조에 물 주입
- (5) 1 bar 에서부터 100bar (1000m 해당)까지 압력증가, 내부에 설치된 카메라로 관의 변형을 관찰
- (6) 관을 꺼내어 100bar에서 변형이 없음이 확인, 다시 설치 후 목표 수심인 6000 m에서 600bar까지 압력 증가
- (7) 600bar상태에서 변형 예상시간을 거친 후, 압력을 제거하며 시편을 확인. 실험 결과는 본 논문의 유한요소 구조해석 결과와 마찬가지로 수압 100bar에서는 변형이 관찰되지 않아, 수심 1000m 수압에서의 HDPE 관 구조강도는 안전하다고 판단된다. 6000m의 수압인 600bar 상태에서는 관에 변형이 일어난 것을 확인 할 수 있었고 수심6000 m에 사용하려면 세밀한 구조분석이 필요하다.

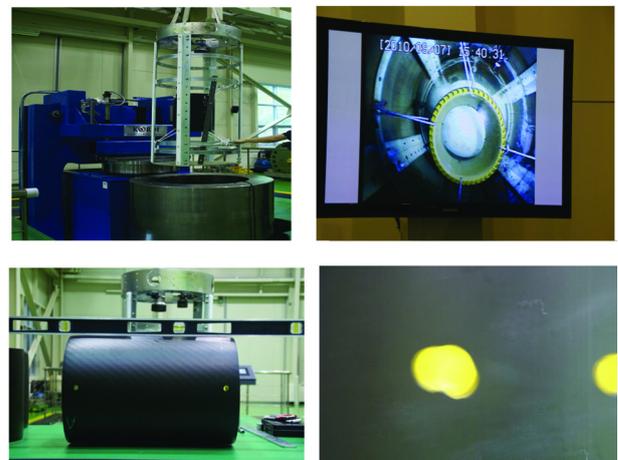


Fig. 7 Pressure tank, pipe, and damaged hole

### 3. HDPE 양광관 구조해석

바다에서 양광 작업을 위한 양광관 구조해석을 위해서는 아래와 같은 여러 하중 상태를 고려하여야 한다.

- (1) 선체 히빙, 피칭, 롤링 등에 의한 운동력
- (2) 해양파력
- (3) 수심에 따른 조력
- (4) 수압과 관 내부 마찰력
- (5) 부력 및 부가 수 질량
- (6) 관 무게와 관 내부 슬러리 (망간, 흙) 무게
- (7) 관과 내부 물체에 의한 관의 동적 힘
- (8) 양광관에 부착되는 추가 무게 (펌프, 버퍼 등)
- (9) 기타 양광에 필요한 별도의 하중

이러한 하중을 모두 고려하여 최종 설계를 하기 위해서는 관을 이을 플랜지와 추가로 관을 보강할 설계안, 시스템이 설치/운용될 선박의 종류, 펌프/버퍼 무게 등 관련 자료가 있어야 한다. 현재 상태는 제반 자료가 부족한 상태라 본 연구에서는 기본적인 하중에 대한 해석만을 하였다. 현재 상태의 HDPE 관을 1000 m 수심까지 사용하되 선박을 포함한 여러 하중상태를 세세히 고려하지는 않았다. 일단 심해 수압에 견딜 수 있는지와 간단한 플랜지를 부착하여 관을 이을 경우에 펌프의 무게가 일부 작용된다고 보고 해석을 하였다. 관은 10-15m 단위로 망간 채집 해상 현장에서 연결될 예정이다. 무거운 펌프는 강선으로 무게를 지지하고 양광관은 펌프에 연결된 상태에서 가능한 펌프의 무게를 받지 않게 하려고 한다. Fig. 8은 양광관이 이어져 바다로 침수되는 과정의 개략도이다.

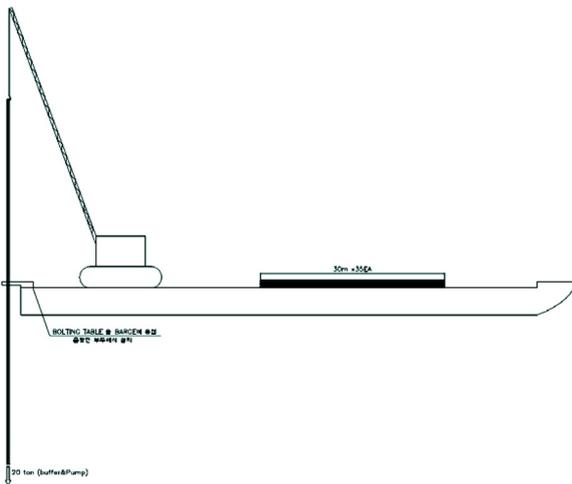


Fig. 8 Lifting pipe and vessel

Fig. 9은 나선형으로 된 양광관의 유한요소 모델인데 이중표피와 그 사이에 H형 홀이 있어 고체요소로 모델링 시 매우 많은 요소가 생겨 짧은 길이의 관에 대해서 일단 1000m와 6000m 수압에 대한 구조해석을 하였다. 현재 모델은 3.0019e-003m의 요

소크기로 61239개 절점, 32385 솔리드 요소로 분할되었다. 수심 1000m 경우 10250Pa/m×1000m 수압에 대해 최대 응력은 2.54MPa로 HDPE의 재료 물성치 실험에서 찾아낸 항복응력인 14MPa를 넘지 않으므로 수심 1000m에서 HDPE 관은 안전하다고 판단된다. 현재의 해석은 수중에서 파이프의 안과 바깥에 같은 크기의 수압이 작용하므로 응력은 적게 나오게 된다. 즉 수밀 되어 있는 상태의 관이 아니기 때문에 1000m 에서의 수압이 매우 큰 압력임에도 관에는 영향이 별로 없다. 6000m 경우 6.150X10<sup>7</sup>PA 수압이 걸리고, 최대 응력은 15.2MPa로 항복응력인 14MPa를 초과하여 구조강도는 안전하지 않으므로 6000m 심해저용으로는 현재 형상을 보완하거나 재료 자체 사용을 주의해야 한다. 물론 문헌상의 30MPa를 고려한다면 15MPa 도 적합할 수 있다. 현재 목적은 1000m 수심용으로 일단 수압에 대해서는 충분한 안정성이 있다.

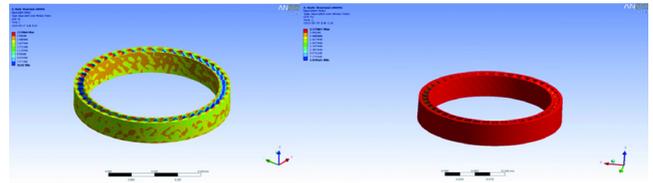


Fig. 9 Stress distribution on HDPE pipe in 1000 m and 6000 m depth

양광관이 양광시스템에서 가장 무거운 펌프의 영향을 최대한 안 받아야지만 순간적인 (펌프의 운동에 의한) 충격하중을 받는다고 가정하여야 한다. 또한 이중표피 - H형 홀이 있는 양광관에 대해 1000m 길이의 요소모델링이 요소가 너무 많아 해석시에 메모 사용이 발생하므로 이중표피가 아닌 단순두께 (외경 350, 내경 300mm) 관으로 1000m 모델링을 하며, 펌프 무게 15톤이 끝단에 작용하는 경우에 대한 해석 결과로 5.8MPa 응력이 발생하고 있다. 또한 플랜지의 영향을 보기 위하여 25m의 관 중간에 플랜지가 있고 단순 두께의 외피 관에 대한 1000m 수압 해석 결과도 안전한 응력범위 내에 있다(Fig. 10).

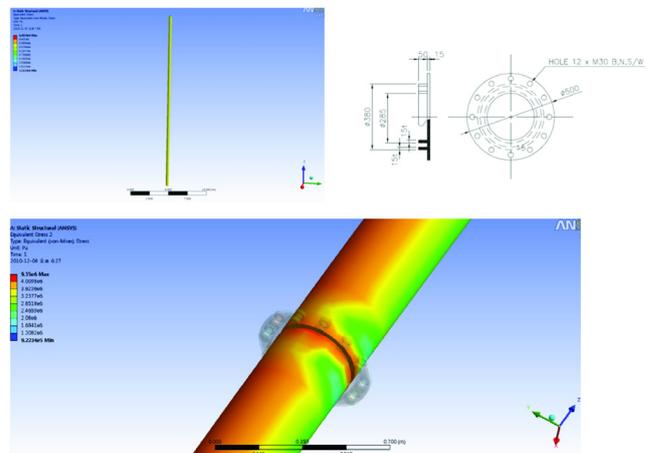


Fig. 10 Simple cross-sectional 1000 m pipe, flange design, pipes connected with flange

## 4. 결 론

본 연구에서는 망간의 양광 리프팅 관으로 사용가능성을 탐색하기 위하여 나선형으로 된 국산 HDPE 관에 대해 재질 특성 파악을 위한 재료실험을 수행하였고 도출된 재료 물성치를 사용하여 1000m 해저 수압에 대해 구조해석을 수행하였다. 또한 구조해석의 정확성을 검증하고자 내압실험을 통하여 수행하였다. 단, 본 실험은 관 내부와 외부에 유체가 같은 압력으로 존재하는 상태인데 양광 시 추가로 내부 압력이 증가하는 조건이 있는 경우에는 안정성 여부를 재실험할 필요가 있다.

현재까지 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 재료 인장시험을 통해 일반적인 고밀도 폴리에틸렌 응력 범위에 있는 항복응력 14MPa를 얻었다. 또한 굽힘실험으로 재료역학 문헌과 같은 탄성 값 약 1GPa 를 얻었다.

(2) 유한요소법으로 이중표피 관의 구조해석을 한 결과 1000m 수압에서 파이프의 최대응력은 2.5MPa 로 항복응력 14MPa 보다 매우 작아 안정성이 충분한 것이 보여 진다. (현재의 해석은 수중에서 파이프의 안과 바깥에 같은 크기의 수압이 작용하므로 응력은 적게 나오게 된다. 즉 수밀 되어 있는 상태의 관이 아니기 때문에 1000m 에서의 수압이 매우 큰 압력임에도 관에는 영향이 작다.) 6000m 심해저에 대한 구조해석에선 응력이 항복응력보다 다소 높게 산출되어 현재 형상의 사용에 대해서는 세밀한 분석이 필요하다.

(3) 최종적인 안정성을 확인하기 위해서는 본문 내에 언급된 하중을 모두 고려하여야 하고 관을 이을 플랜지와 추가로 관을 보강할 설계안, 선박의 종류, 펌프/버퍼 무게, 해당 해역의 조류, 파력 등 관련 자료가 모두 있어야 하므로 향후 연구에서 고려되어야 한다. 현재 결과는 운용 선박이 결정되어 있지 않아 선박의 Heaving motion에 따른 운동력과, 조류력이나 고압펌프의 영향이 포함되어 있지 않고 단순히 수압에 대한 응력해석의 결과이다. 조류력에 의해 굽힘 모멘트가 긴 관의 상단에 크게 작용하고 큰 펌프압이 작용할 경우에는 관의 파단으로 인해 양광용으로 폴리 파이프를 사용할 수 없으므로, 인장력을 보완하는 방법이 있을 경우에는 모조 망간 단괴 시험에서 보조용 공급관등으로 사용함을 고려해 볼 수 있다.

## 후 기

본 연구는 국토해양부 지원에 의한 '심해저 광물자원 양광시스템 개발' 과제의 일환으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- DeepFlex, Inc. Products & Services Advantages DeepFlex Composite vs. Steel, www.deepflex.com
- Gere, J. M. (2010). Mechanics of Materials, Kyobobook.
- Handschuh, R., Grebe H., Panthel, J. and etc (2001). "Innovative Deep Ocean Mining Concept Based on Flexible Riser and Self-propelled Mining Machines," 4th ISOPE Ocean Mining Symposium.
- Liu, S., Dai, Y., Cao, X. and Li, L. (2008). "Dynamic Analysis of The Complete Integrated Deep-ocean Mining Pilot System Based on Single-body Tracked Miner and Discrete Element Model of Pipe", Proceedings of the eighth ISOPE Ocean Mining Symposium.
- Park, H., Min, C., Teng, B, Kwon, Y. and Kim, B. (2010). "Effects of Fluid and Structural Damping on Axial Vibration of an ultra Long Ocean Pipe With a Heavy Buffer", Proceedings of the tenth ISOPE Ocean Mining Symposium.
- Song, C.Y., Lee, J. and Choung J. (2010). "A Pproximate Optimization Using Moving Least Squares Response Surface Methods: Application to FPSO Riser Support Design," 한국해양공학회지, 제24권, 제 1호, pp 20-33.
- Wang, G. and Liu, S. (2005). "Dynamic Analysis on 3-D Motions of Deep-ocean Mining Pipe System for 1000-m Sea Trial", Proceedings of the eighth ISOPE Ocean Mining Symposium.
- Wang, G., Liu, S. and Li, L. (2007). "FEM Modeling for 3D Dynamic Analysis of Deep-ocean Mining Pipeline and Its Experimental Verification", J. Cent. South Univ. Tech., 06-0808-06, pp 808-813.
- 정동호, 김현주, 박한일 (2004). "수치해석적 방법을 통한 해양 심층수 취수용 유연 라이저의 거동 해석에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제18권, 제4호, pp 15-22.

2011년 6월 9일 원고 접수

2011년 11월 14일 심사 완료

2011년 12월 23일 게재 확정