

해저케이블용 피기백 클램프의 기계적 성능 연구

김윤재* · 안경수** · 최진욱*** · 임진석*** · 최성웅*†

Mechanical Performance Study of Piggy Back Clamp for Submarine Cables

Yun Jae Kim*, Kyeong Soo Ahn**, Jin-wook Choe***, Jinseok Lim***, Sung Woong Choi*†

ABSTRACT: Due to the continuously increasing global demand for electricity, the demand for high-voltage submarine cables is also increasing. One of the issues that need to be addressed for submarine cables is the high production cost and expensive laying costs. Submarine cables exposed to the marine environment encounter external forces such as wave and current, leading to issues such as cable damage due to external factors or high maintenance costs in the event of an accident. Therefore, we are preparing for the uncertainty of the submarine environment through many protective materials and protective equipment. In this study, we examined the bending performance of piggyback clamps (PBC) and strap, which are representative protective equipment, in response to the submarine environment through analytical methods. To examine the structural performance of PBC, the bending performance were assessed under the maximum bending moment criterion of 15 kN·m for the flexible protection tube. As a result, it was confirmed that the structural performance regarding the bending moment of both PBC and straps was ensured.

초 록: 지속적으로 증가하는 세계적인 전력수요로 인해 고전압 해저케이블 수요도 증가하고 있다. 해저케이블은 고가의 제작 비용과 높은 단가의 포설 비용 등이 해결되어야 할 부분 중 하나이다. 해양 환경에 노출된 해저케이블은 파랑 및 해류 등의 외력들에 의해 케이블 손상이나 사고 시에는 높은 유지 보수 비용 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 해저케이블은 다양한 종류의 보호 기자재를 통해 해저 환경의 불확실성에 대비하고 있다. 본 연구에서는 대표적인 보호 기자재인 피기백 클램프(PBC)와 클램프에 사용되는 스트랩(strap)을 대상으로 해석적 방법을 통해 휨 성능을 살펴보았다. 피기백 클램프의 구조적 성능 검토를 위해 유연 보호 튜브의 최대 굽힘 모멘트 기준치인 15 kN·m 값을 토대로 휨 성능을 분석하였다, 그 결과, 피기백 클램프 및 strap의 굽힘 모멘트에 대한 휨 성능이 확보되었음을 확인할 수 있었다.

Key Words: 해저케이블(Submarine cable), 폴리우레탄(Polyurethane), 피기백 클램프(Piggyback clamp), 휨 성능(Flexural performance)

1. 서 론

전 세계적인 에너지 수요는 친환경적이고 지속 가능한

발전원으로서의 에너지 전환을 목표로 하고 있으며 에너지 전환에 따른 전력 에너지 수요는 2050년까지 계속해서 증가할 것으로 예측된다. 전력수요의 증가에 따라 대규모 전

Received 4 April 2024, received in revised form 11 April 2024, accepted 14 April 2024

*Gyeongsang National University, Graduate School of Mechanical System Engineering

**Hwaseung Cooperation, Defense Business Team

***Korea Electrotechnology Research Institute, Power Cable Research Center

†Gyeongsang National University, Mechanical System Engineering, Corresponding author (E-mail: younhulje@gnu.ac.kr)

력계통 송전과 계통 간 송전망 연계 확대의 필요성이 요구되고 있다[1]. 대규모 전력계통 송전 및 확대를 위해서는 고전압 해저 케이블의 수요가 증가하고 있지만, 고가의 제작 비용과 높은 단가의 포설 등의 설치 비용 등의 단점 또한 해결해야 할 부분 중 하나이다.

일반적으로 해양 환경에 노출되는 기자재들은 안전성을 확보하기 위해 위험성 연구 등을 통해 신뢰성 있는 시스템을 구축하고 있다[2-5]. 해저케이블 역시 파랑 및 해류 등의 외력에 노출되며, 외부 요소에 의한 케이블 손상이나 사고 시에는 높은 유지 보수 비용 등의 문제가 발생할 수 있다[2].

따라서 해저케이블은 많은 보호 기자재들을 통해 외부 요소들에 의한 손상을 방지하고 있다. 이러한 보호기자재 중 구조물과 케이블을 연결하기 위한 요소로 구조물과 케이블 사이의 공간을 지탱해 주는 피기백 클램프(PBC)와 케이블과 피기백 클램프를 고정해주는 스트랩이 있다.

본 연구의 목적은 PBC를 자켓에 체결한 후 유연보호튜브의 최대 굽힘 모멘트가 작용할 때 PBC 및 스트랩의 구조 성능이 확보되는지 파악하는 것이다. 따라서 PBC의 구조 성능 검토를 위해 유연보호튜브의 최대 굽힘 모멘트 기준치인 15 kN·m에 대해 힘 성능을 분석하였습니다. PBC의 재료로 사용된 폴리우레탄(PU) 82D는 고분자 소재 중 하나인 초탄성 재료로, 해석 진행 시에는 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해 실험을 통해 획득한 물성치를 사용하여야 한다[7,8]. 본 연구에서는 PBC의 재료인 폴리우레탄(PU) 82D와 스트랩의 재료인 Nylon 12에 대해서 탄성계수, 인장강도, Poisson's ratio 등의 물성치를 실험을 통해 측정된 물성치를 사용하였다. 확보된 물성치를 통해 해석적 방법으로 PBC와 스트랩(strap)의 힘 성능을 분석하였다.

2. Piggy Back Clamp 구조해석

해저케이블은 설치 시 유연보호튜브가 씌워진 해저케이블을 해저에 있는 하부 구조물에 클램프로 고정하는 방식의 유연입상설치시스템을 이용한다. 이때 사용하는 클램프 중 하나를 피기백 클램프(piggy back clamp, PBC)라고 하며 Fig. 1과 같이 구조물과 유연보호튜브에 스트랩(strap)을 통해 고정된다. 고정된 상태에서 외력이 작용 시 PBC의 구조적 성능의 확인이 필요하다. 구조적 성능을 확인하기 위해 2단계를 나눈 해석을 수행하였고 이는 Fig. 2에서 볼 수 있다.

해석 1단계는 구조물을 포함한 PBC 및 스트랩(strap)의 구조성능을 검토하기 위한 해석으로 유연보호튜브에 최대 굽힘 모멘트 15 kN·m가 작용한다는 가정하에 PBC의 구조 성능해석을 진행하였다. 유연보호튜브에 최대 굽힘 모멘트 15 kN·m는 Tekmar Energy[9]의 자료를 기준으로 하였다.

해석 2단계는 유연보호튜브를 포함한 PBC 및 스트랩(strap)의 구조 해석이고 1단계와 동일하게 최대 굽힘 모멘트 15 kN·m가 작용한다는 가정하에 PBC의 구조성능 해석을 진행하

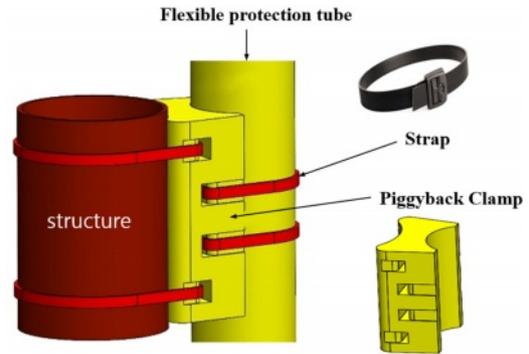


Fig. 1. PBC model

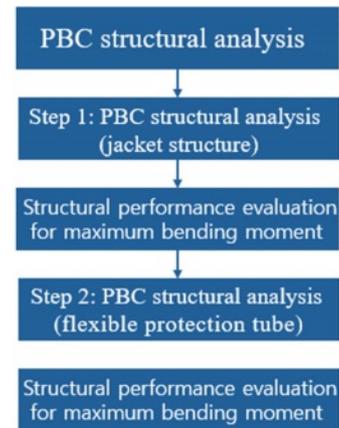


Fig. 2. Structural analysis flow chart

였다. 구조해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS Mechanical(Ansys version 2023)을 사용하였다.

2.1 모델링

1단계 구조해석은 Fig. 3과 같이 구조물에 해당하는 자켓을 포함하여 PBC를 자켓에 체결한 후 스트랩(strap)으로 고정하는 모델링을 대상으로 하였다. Fig. 3(a~c)는 1단계 구조해석 모델의 주요 부재인 자켓, PBC, 스트랩(strap)의 측면도, 정면도 및 평면도를 보여주고 Fig. 4(a~c)는 해석모델의 mesh를 보여준다. 해당 모델의 mesh는 곡면 및 스트랩(strap)의 접합부의 형상적 특징으로 인해 Tetra 요소를 적용하였으며, 자켓 및 스트랩(strap)은 Sweep Mesh를 적용하여 Hexa 요소로 형성하였다.

2단계 해석을 위한 모델링은 Fig. 5과 같이 유연보호튜브

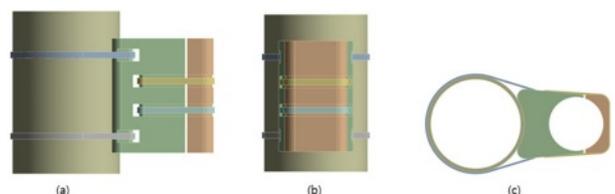


Fig. 3. Modeling of jackets, PBC and strap: (a) side view, (b) front view, (c) floor plan

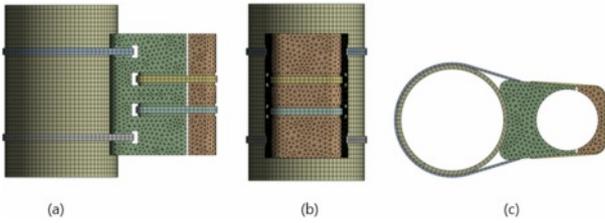


Fig. 4. Modeling mesh: (a) side view, (b) front view, (c) floor plan

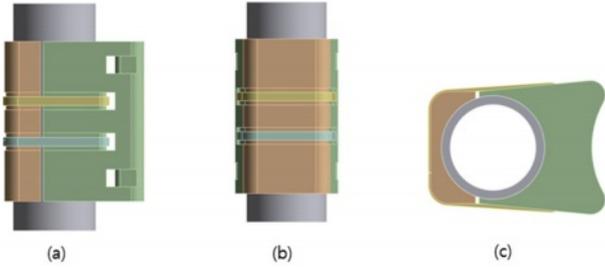


Fig. 5. Modeling of flexible protection tube, PBC and strap: (a) side view, (b) front view, (c) floor plan

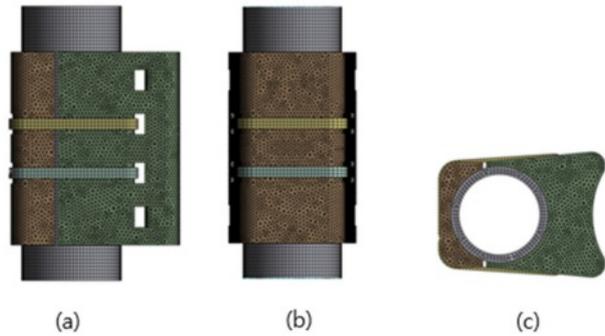


Fig. 6. Modeling mesh: (a) side view, (b) front view, (c) floor plan

를 포함하며, PBC를 유연보호튜브에 체결한 후 스트랩(strap)으로 고정하는 형태이다. Fig. 5(a~c)는 2단계 구조해석 모델의 주요 부재인 유연보호튜브, PBC, 스트랩(strap)의 측면도, 정면도 및 평면도를 보여주고 Fig. 6(a~c)는 해석모델의 mesh를 보여준다. 해당 모델의 mesh는 1단계와 동일하게 곡면 및 스트랩(strap)의 접합부는 Tetra 요소를 적용하였으며, 유연보호튜브 및 스트랩(strap)은 Hexa 요소로 형성하였다.

2.2 재료 물성치 및 모델

해석을 위한 PBC 및 스트랩(strap)의 재료는 폴리우레탄 82D와 Nylon 12로 물성치를 Table 1에서 볼 수 있다.

PBC의 재료인 폴리우레탄(PU) 82D의 인장특성(인장강도, 탄성계수)은 ASTM D638 시험 규격에 따라 측정하였다. 시험조건은 속도 5 mm/min, 그립 간 거리 115 mm, 탄성구간 0.05%~0.25%에서 간이 실험을 통해 도출하였으며, 탄성계수 및 인장강도는 각각 2,450 MPa, 54 MPa의 값을 얻었

Table 1. Analysis application material properties

Parameters	Polyurethane 82D	Nylon 12
Density [kg/m ³]	1,180	1,220
Hardness [-]	82D	82
Tensile strength [MPa]	54	51
Elongation at break [%]	6	9
Young's modulus [MPa]	2,450	3,200
Tearing strength [MPa]	83	-
Thermal conductivity [W/m·K]	0.242	-
Specific heat [J/kg·K]	1.44	-
Thermal expansion coefficient [μm/(m·°C)]	49.6	-

다. 프아송 비는 Video Extensometer를 통해 0.40을 도출하였다. 스트랩(strap)은 Nylon 12 glass-filled을 사용하여 간이 실험을 통해 탄성계수 및 인장강도 각각 3,200 MPa, 51 MPa 값을 도출하였다. 해석 시 자켓 및 유연보호튜브의 강재 재료는 선형재료로 가정하여 탄성계수, 프아송 비를 각각 200,000 MPa, 0.3으로 적용하였다.

2.3 접촉조건

해석을 위해 접촉조건과 하중 및 경계조건을 검토하였다. 해석에서 적용되는 접촉조건은 자켓-Clamp, 자켓-Strap, 및 Strap-Clamp 간의 접촉 조건이며 이는 재료적 측면에서 강재-폴리우레탄, 강재-나일론 및 나일론-폴리우레탄 간의 마찰이기 때문에 재료 간의 마찰계수를 고려하였다. 폴리우레탄의 마찰계수는 경험적 데이터를 기반으로 0.4에서 0.6 사이의 값을 보이며[1], 나일론은 0.37[2]에 해당된다.

PBC는 복잡한 형상으로 인해 접촉하는 면적을 명확히 지정하는 것이 불가능하여 본 해석에서는 ANSYS 프로그램에서 제공하는 General 접촉조건을 적용하여 해석을 수행하였다. PBC는 폴리우레탄 마찰계수 0.4을 적용하였으며 접촉하는 모든 부재의 면적에 동일한 접촉조건을 적용하였다.

하중 조건으로 1단계 구조해석에서는 Fig. 7과 같이 클램프 내부면 전체에 최대 굽힘 모멘트 15 kN·m를 반영하여 회전 하중을 x축 방향으로 최대 0.44도를 적용하였다. 경계

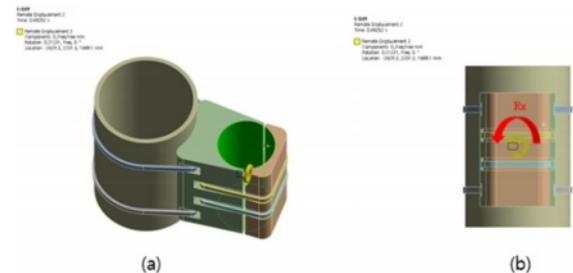


Fig. 7. Analysis model stage 1 loading conditions

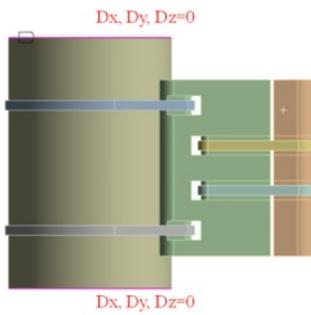


Fig. 8. Boundary conditions

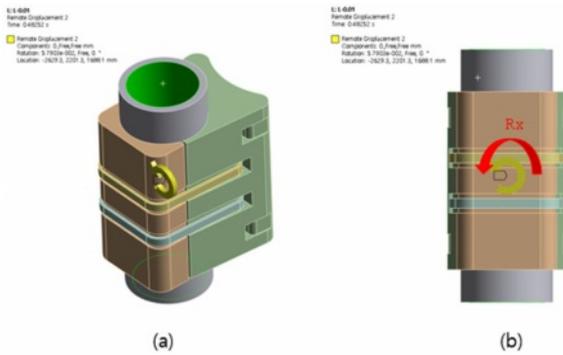


Fig. 9. Analysis model stage 2 loading conditions

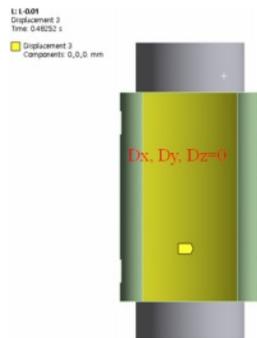


Fig. 10. Boundary conditions

조건은 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 자켓의 양단부에 모든 방향 (Dx, Dy, Dz)에 대한 변위를 제어하는 경계조건을 적용하였다.

하중 조건으로 2단계 구조해석에서는 Fig. 9과 같이 클램프 내부면 전체에 최대 굽힘 모멘트 15 kN·m를 반영하여 회전 하중을 x축 방향으로 최대 0.11도 적용하였다. 경계조건은 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 PBC 및 자켓이 접촉하는 면적의 모든 방향(Dx, Dy, Dz)에 대한 변위를 제어하는 경계조건을 적용하였다.

3. 결 과

3.1 구조물을 포함한 PBC 및 스트랩(strap)의 구조성능 해석

구조물을 포함한 PBC 및 스트랩(strap)의 구조성능을 검

토하기 위해 1단계 구조해석을 진행하였고 PBC에 작용하는 회전 하중으로 인한 변위 분포를 Fig. 11에서 확인할 수

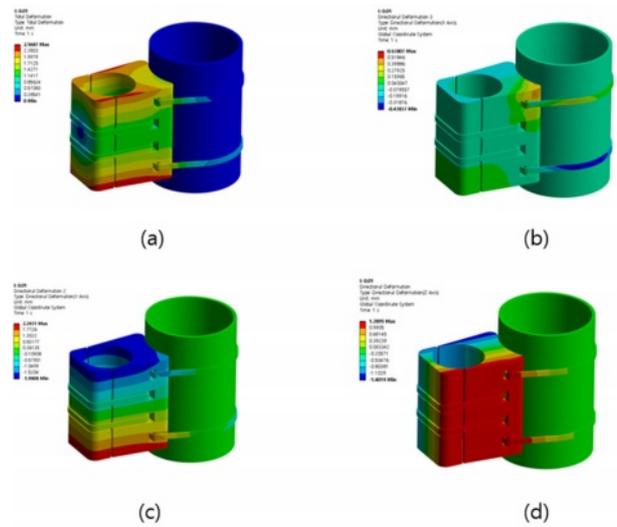


Fig. 11. Horizontal and vertical displacement distribution

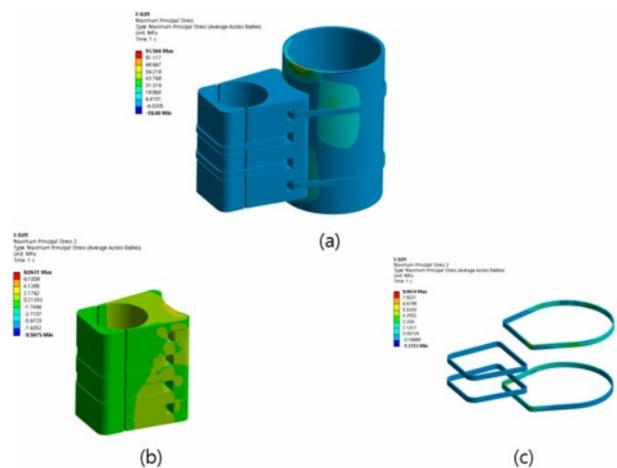


Fig. 12. Max. Principal Stress distribution that occurs in PBC

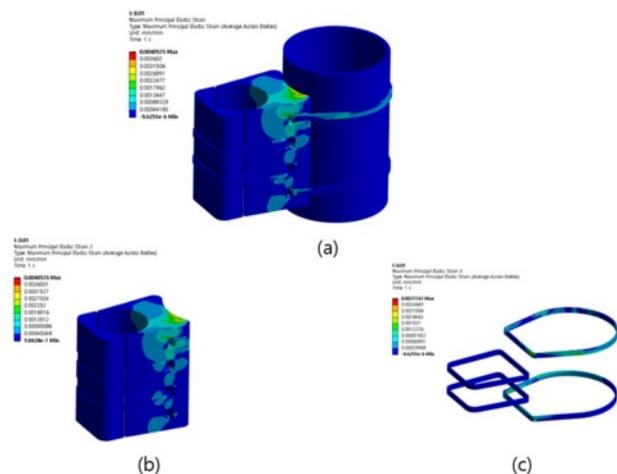


Fig. 13. Max. Principal Strain distribution that occurs in PBC

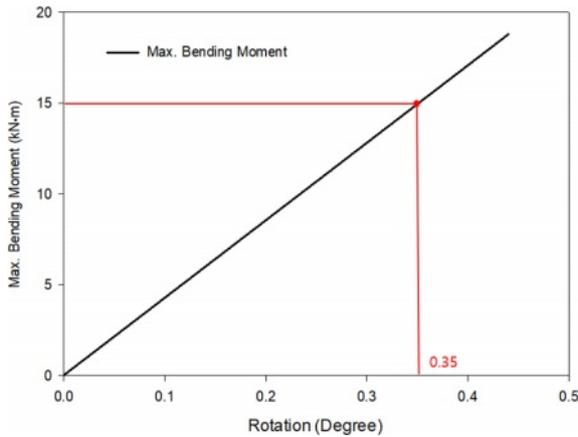


Fig. 14. Maximum bending moment according to rotation angle

있다. Fig. 11(a)에 볼 수 있듯이 PBC에 발생하는 변위는 clamp의 양단부에서 최대 약 2.57 mm의 변위가 발생함을 확인할 수 있다. Fig. 11(b) 및 (c)는 PBC에서 발생하는 x축 및 y축 방향 수평 변위 분포를 보여주고 clamp의 양단부에서 최대 약 0.64 mm, 2.24 mm의 변위가 발생함을 확인할 수 있다. 이는 x축 방향의 회전 하중으로 인해 y축 방향 변위가 크게 영향을 받은 것으로 판단된다. Fig. 11(d)는 PBC에서 발생하는 z축 방향 수직 변위 분포를 보여주며, clamp의 측면에서 최대 약 1.40 mm 변위가 발생함을 확인할 수 있다.

Fig. 12은 PBC에 발생하는 최대 주 응력 (Max. Principal stress) 분포를 보여주며 최대 주 응력은 Clamp에 최대 약 18.2 MPa이 발생함을 확인할 수 있다(Fig. 12(b)). Fig. 12(c)에서는 스트랩(strap)에 대한 최대 주응력을 보여주며 최대 약 8.9 MPa이 발생함을 확인할 수 있다. 관련 결과들을 통해 clamp 및 스트랩(strap)이 굽힘 모멘트에 대한 구조성능이 확보되었음을 알 수 있다.

Fig. 13는 PBC에 발생하는 최대 주 변형 (Max. Principal strain) 분포를 보여주며 최대 주 변형은 Fig. 13(b)에서 확인할 수 있듯이 Clamp에서 최대 약 0.004 mm을 보였다. 스트랩(strap)에 대한 최대 주 변형은 Fig. 13(c)에서 최대 약 0.003 mm가 발생함을 확인할 수 있다.

Fig. 14에서는 PBC의 회전 하중에 따른 굽힘 모멘트를 보여준다. 최대 굽힘 모멘트는 x축 방향 최대 변위 0.44도일 때 약 18.8 kN-m 발생함을 확인할 수 있다. 본 연구에서 제시한 최대 굽힘 모멘트(15 kN-m)를 고려할 X축 방향 최대 회전 각도는 0.35도를 보였고 이는 PBC 및 스트랩(strap)의 구조성능이 확보되었다고 판단된다.

3.2 유연보호튜브를 포함한 PBC 및 스트랩(strap)의 구조 해석

2단계 구조해석은 유연보호튜브를 포함한 PBC 및 스트랩(strap)의 구조성능을 검토하기 위해 해석을 진행하였고 Fig. 15과 같이 PBC에 작용하는 회전 하중으로 인한 변위 분

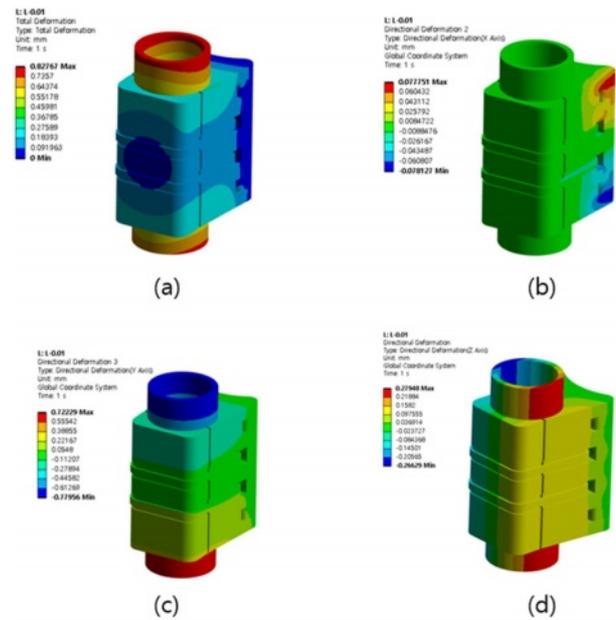


Fig. 15. Horizontal and vertical displacement distribution

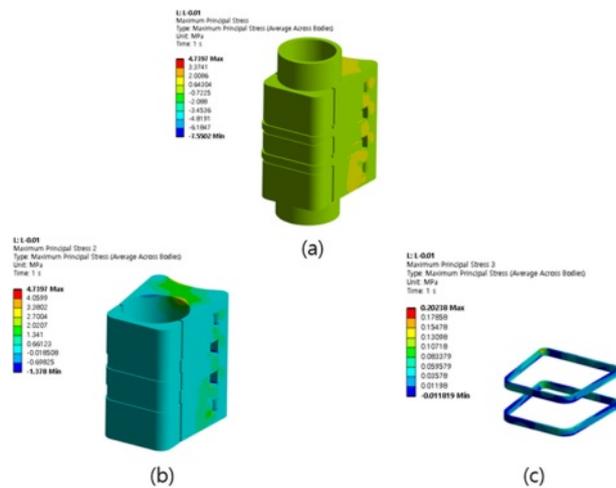


Fig. 16. Max. Principal Stress distribution that occurs in PBC

포를 나타내었다.

Fig. 15(a)는 유연보호튜브를 포함하였을 때 PBC에 발생하는 최대 변위로 clamp의 양단부에서 약 0.83 mm의 변위가 발생하였다. Fig. 15(b) 및 (c)는 PBC에서의 x축 및 y축 방향 수평 변위 분포이며, clamp의 양단부에서 각각 최대 약 0.08 mm, 0.78 mm의 변위가 발생하였다. 이 결과 역시 1단계 해석과 마찬가지로 x축 방향의 회전 하중으로 인해 y축 방향 변위가 크게 영향을 받은 것으로 판단된다. Fig. 15(d)는 PBC에서의 z축 방향 수직 변위 분포이며, clamp의 측면에서 최대 약 0.28 mm 변위가 발생하였다.

Fig. 16는 유연보호튜브를 포함하였을 때 PBC에 발생하는 최대 주 응력 (Max. Principal stress) 분포이며 Clamp에서의 최대 주 응력은 Fig. 16(b)에서 나타내었다. 결과는 최대

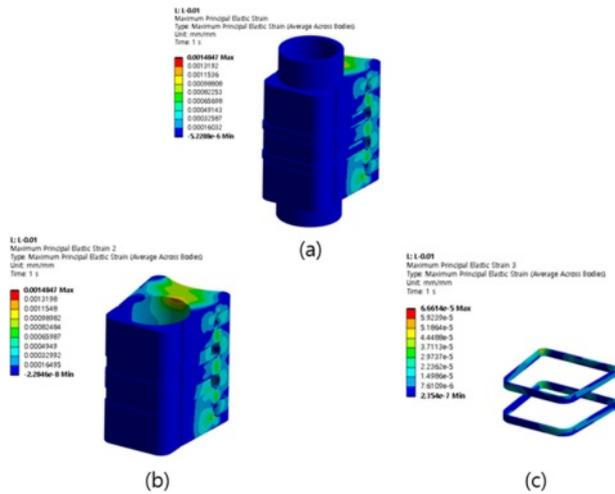


Fig. 17. Max. Principal Strain distribution that occurs in PBC

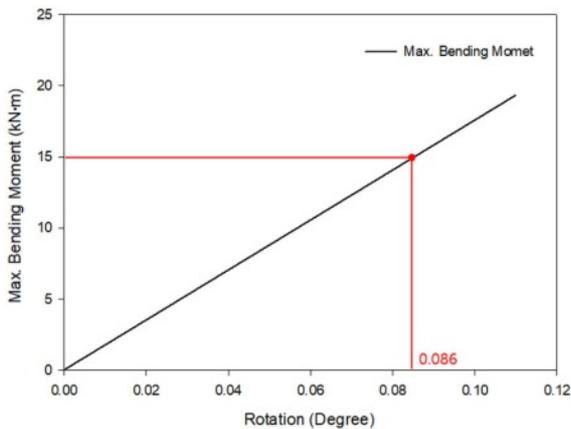


Fig. 18. Maximum bending moment according to rotation angle

약 4.7 MPa이 발생하였다. Fig. 16(c)에서는 스트랩(strap)에 대한 최대 주응력을 보여주며 최대 약 0.2 MPa이 발생하였다. 상기 제시한 결과들을 통해 clamp 및 스트랩(strap)이 굽힘 모멘트에 대한 구조성능이 확보되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 17에서는 유연보호튜브를 포함한 PBC의 최대 주 변형 (Max. Principal strain) 분포를 나타내었다. Fig. 17(b)는 Clamp에서의 최대 주 변형으로 약 0.0015 mm를 보였다. 스트랩(strap)에 대한 최대 주 변형은 Fig. 17(c)에서 최대 약 6.66e-5 mm가 발생하였다.

Fig. 18에서는 유연보호튜브를 포함한 PBC의 회전 하중에 따른 굽힘 모멘트를 보여준다. 최대 굽힘 모멘트는 x축 방향 최대 변위 0.11도일 때 약 19.34 kN·m 발생함을 확인할 수 있다. 해당 결과는 최대 굽힘 모멘트(15 kN·m)를 고려할 시 X축 방향 최대 회전 각도는 0.086도를 보였으며, 2단계 해석 결과 또한 PBC 및 스트랩(strap)의 구조성능이 확보되었다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 PBC 및 스트랩을 대상으로 해석적 방법을 사용하여 힘 성능을 고찰하였다. 해석은 구조물을 포함한 PBC 및 스트랩의 구조성능을 검토하기 위한 1단계 구조해석과 유연보호튜브를 포함한 PBC 및 스트랩의 구조성능을 검토하기 위한 2단계 구조해석으로 나누어 진행하였다.

1단계 해석 결과, PBC 및 strap의 최대 주 응력은 각각 18.2 MPa, 8.9 MPa이 발생함을 확인하였으며, 최대 주 변형은 각각 0.004 mm, 0.003 mm가 발생하는 것을 확인하였다. 2단계 해석 결과, PBC 및 strap의 최대 주 응력은 각각 4.7 MPa, 0.2 MPa이 발생하였으며, 최대 주 변형은 각각 0.0015 mm, 6.66e-5가 발생함을 확인하였다. 본 연구의 해석 결과를 통해 PBC 및 strap의 굽힘 모멘트에 대한 구조성능이 확보되었음을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 진행한 해석 방법론 및 결과는 해저케이블 보호기자재 및 관련 시스템 연구에 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20213000000020, 해상풍력단지 해저 전력망 구축을 위한 핵심기자재 및 평가 기술 개발) 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

- Kim, J.N., Go, G.R., and Park, S.G., "The Trends in Domestic and International Transmission Cable Technology," *KEPCO Journal on Electric Power and Energy*, Vol. 2, No. 3, 2016, pp. 361-364.
- Ko, H.Y., Lee, J.H., Lee, S.A., Kang, J.K., and Lee, S.D., "Development and Empirical Study on Integrated Ventilation-cleaning Filter System for Removal of Harmful Substances Flowing into Ship Cabins," *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, Vol. 47, No. 5, 2023, pp. 261-266.
- Nyongesa, A.J., Sul, Y., and Yeo, S., "Numerical Investigation on the Influence of Rope Cutter Installation on Water Flow around a Ship's Propeller," *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, Vol. 47, No. 2, 2023, pp. 98-104.
- Akturk, M., and Seo, J.K., "The Feasibility of Ammonia as Marine Fuel and Its Application on a Medium-size LPG/ammonia Carrier," *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, Vol. 47, No. 3, 2023, pp. 143-153.
- Kim, I.S., Jeong, B.U., Song, M.K., and Nam, D., "Determination of Bunkering Safety Zones for Ammonia-fueled Ship," *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, Vol. 46, No. 5, 2022, pp. 261-269.
- Gao, F., et al., "Study on the Safety Guarantee of Ship Mooring

- from Frequent Cable Accidents,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 621, No. 1, 2021.
7. Jo, J.S., Kim, J.S., and Choi, S.J., “Evaluation of Impact Resistance and Material Properties of Eco-friendly Buoys with Biodegradable Plastic Materials,” *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, Vol. 46, No. 5, 2022, pp. 230-236.
 8. Park, S.W., et al., “An Experimental Study on the Effect of Plastic Sheet Thickness on Gas Explosion Load Profiles Generated in a Vented Cylindrical Chamber,” *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology (JAMET)*, Vol. 47, No. 1, 2023, pp. 42-51.
 9. Tekmar Energy, “Market Leading Provider of Subsea Protection Systems”, UK, 2024.