

해저케이블용 Bend Restrictor의 굽힘 성능 연구

김윤재* · 안경수** · 최성웅*†

Bending Performance Study of Bend Restrictor for Submarine Cables

Yun Jae Kim*, Kyeong Soo Ahn**, Sung Woong Choi*†

ABSTRACT: Submarine cables are exposed to various marine environments over extended periods, and repetitive lateral loads from waves and ocean currents can lead to bending damage. To prevent failure due to excessive bending, a Bend Restrictor is used on the exterior of the submarine cable, making it crucial to accurately assess its bending behavior and performance. This study employs a numerical analytical method to examine the bending behavior and structural performance of the Bend Restrictor. The structural performance of the Bend Restrictor was evaluated by considering rotational loads related to the target bending moment (15.0 kN·m) and the maximum bending moment (43.1 kN·m). Additionally, the study investigated whether the Minimum Bending Radius (MBR) was met at a bending moment of 15 kN·m. The results confirmed that the structural performance of the Bend Restrictor was adequately secured in relation to the bending moment.

초 록: 해저 케이블은 다양한 해양 환경에 장기간 노출되며, 파랑과 해류로 반복적인 휨하중에 의해 굽힘 손상이 발생할 수 있다. 과도한 굽힘으로 인한 파손을 방지하기 위해 해저케이블 외부에 Bend Restrictor를 사용하는데 굽힘 거동과 성능을 정확히 파악하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 Bend Restrictor를 대상으로 수치 해석적 방법을 이용하여 굽힘 거동 및 구조적 성능을 살펴보았다. Bend Restrictor의 구조적 성능은 목표 굽힘 모멘트(15 kN·m) 및 최대 굽힘 모멘트(43.1 kN·m)에 관한 회전 하중(Rotation Load)을 고려하였으며, 굽힘 모멘트(15 kN·m)에 대하여 최소 굽힘 반경(Minimum Bending Radius, MBR)의 만족 여부를 파악하였다. 그 결과 Bend Restrictor의 굽힘 모멘트에 대한 구조성능이 확보됨을 확인할 수 있었다.

Key Words: 해저케이블(Submarine cable), Bend Restrictor, 굽힘 성능(Bending performance), 최소 굽힘 반경(Minimum Bending Radius)

1. 서 론

전 세계적으로 화석 연료의 사용을 줄이기 위한 노력이 지속되면서, 친환경적이고 지속 가능한 에너지원으로서의 전 환이 가속화되고 있다. 이에 따라 에너지 산업에서는 기술 적 발전이 이루어지고 있으며, 경제적 효율성에 대한 연구 도 활발히 진행되고 있다. 특히, 신재생 에너지의 활용성을

높이기 위한 다양한 노력이 이어지고 있으며, 그 결과 2015년 부터 2020년까지 신재생 에너지의 총용량이 약 50% 증가 하는 등 괄목할 만한 성과가 나타나고 있다.

신재생 에너지 중에서도 특히 풍력 에너지는 높은 성장 세를 보였으며, 2020년 기준으로 연평균 약 10%의 용량 증 가율을 보였다[1]. 풍력 터빈의 용량이 증가함에 따라 해저 케이블의 기술적 요구사항과 성능 기준 또한 점차 강화되

Received 27 February 2025, received in revised form 14 March 2025, accepted 21 March 2025

*Gyeongsang National University, Graduate School of Mechanical System Engineering

**Hwaseung Cooperation, Defense Business Team Affiliation

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

고 있다[2].

일반적으로 고전압 해저 케이블은 코어, 절연층, 보호층 및 외장층으로 구성되며, 복잡한 구조를 가지고 있다. 이러한 특성으로 인해 제작, 설치 및 유지보수 비용이 높다는 문제점이 있다[3]. 따라서 설계 단계에서 해저 케이블에 손상을 초래할 수 있는 외부 환경 요인 및 내부 구조적 요인을 면밀히 검토하고, 이에 대한 안전성 평가를 선행하는 것이 필수적이다[4].

해저 케이블은 포설 작업 중 굽힘 모멘트의 영향을 받게 된다[5]. 또한, 해저 케이블은 복잡한 해양 환경에 장기간 노출되며, 파랑과 해류로 인한 반복적인 횡하중에 의해 굽힘 손상이 발생할 가능성이 있다[6]. 따라서, 실험 대비 경제적, 시간적 비용의 감소와 신뢰성 확보의 용이성이 있는 수치 해석적 방법[7-12] 및 실측 시험을 통해 해저 케이블의 굽힘 성능을 평가하고, 굽힘 보강재나 굽힘 제어기와 같은 보호 기자재를 활용하여 굽힘 저항 성능을 향상시키는 연구가 진행되고 있다[13-15].

해저 케이블은 과도한 굽힘으로 인한 파손을 방지하기 위해 외부에 Bend Restrictor를 사용한다[15]. Bend Restrictor는 Fig. 1과 같이 여러 개의 모듈로 구성되며, 케이블을 감싸는 형태로 설치되어 케이블의 굽힘을 효과적으로 제어한다. 따라서 Bend Restrictor를 적용할 경우, 그에 따른 굽힘 거동과 성능을 정확히 파악하는 것이 중요하다. 일반적으로 구조물의 굽힘 반경은 최소 굽힘 반경(Minimum Bending Radius, MBR)으로 평가되며, 이를 기준으로 해저 케이블의 굽힘 성능을 분석할 수 있다.

Thies et al. (2024)[15]의 연구에서는 Bend Restrictor의 구조적 성능을 평가하기 위해 수치해석 및 가속 시험(accelerated reliability testing)을 수행하였다. 해당 논문의 경우, Bend Restrictor에 관한 동적 성능 평가에 초점을 맞추고 있으며, 정적 하중 조건에서의 구조 성능 평가가 포함되어 있지 않다.

Bend Restrictor는 복합재료로 활용 가능한 폴리우레탄(PU) 82D가 사용되며, 복합재료는 구조적 건전성을 확보하기 위

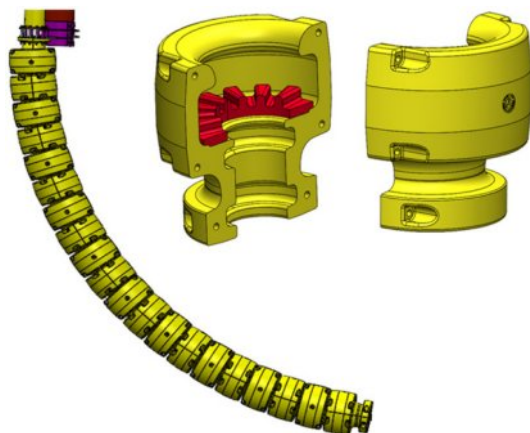


Fig. 1. Bend Restrictors

해 실험적 및 수치 해석적 방법을 통한 성능 검증이 필수적이다. 따라서, 본 연구에서는 Bend Restrictor를 대상으로 수치적 정적 해석을 수행하여 굽힘 거동과 구조적 성능을 정량적으로 평가하였다.

해석에 사용된 물성치는 폴리우레탄(PU) 82D의 실측 시험을 통해 확보된 탄성 계수, 인장 강도 및 푸아송 비(Poisson's ratio)를 기반으로 하였다. 수치 해석은 목표치의 굽힘 모멘트(15 kN·m)와 최대 굽힘 모멘트(43.1 kN·m)에 대한 회전 하중(Rotation Load)을 고려하였으며, 목표치의 굽힘 모멘트(15 kN·m)에서 최소 굽힘 반경(Minimum Bending Radius, MBR)을 충족하는지 여부를 분석하였다.

2. 구조해석

2.1 해석 모델링

본 해석은 Fig. 2과 같이 Bend Restrictor를 대상으로 구조적 거동 및 성능 검토를 위해 해석 프로그램인 ANSYS Workbench 2023 R1을 통해 모델링을 수행하였다. 또한, 전체 해석 모델 중 굽힘 거동을 확인하기 위해 국부 해석 모델(최소 길이)을 고려하였다.

해석 모델의 격자는 Fig. 3과 같이 형성하였으며, 곡면 및 볼트 접합부로 인해 형상이 복잡하여 Tetra 요소를 적용하였다. Tetra 요소의 최대 크기는 20 mm로 설정하였다.

해석은 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ANSYS Mechanical을 사용하여 접촉 조건, 하중 및 경계 조건을 모두 고려하여 수행하였다.



Fig. 2. Modeling of Bend Restrictors

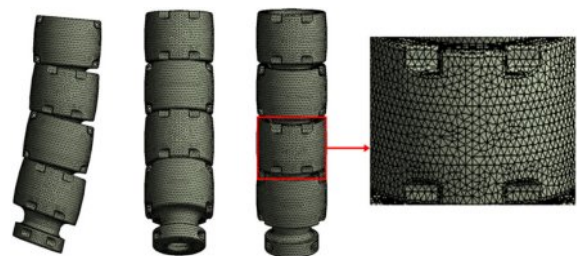


Fig. 3. Modeling mesh

2.2 재료 물성치

Bend Restrictor의 재료 물성치는 Table 1에서 볼 수 있듯이 폴리우레탄(PU) 82D를 적용하였으며, 이때 폴리우레탄(PU) 82D의 물성치는 실측 시험을 통해 얻은 탄성 계수와 인장 강도 데이터를 사용하였다. 시험 조건은 ISO 527 표준 규격[16]에 따라 탄성 구간 0.05%~0.25%, 시험 속도 50 mm/min, 그립 간 거리 115 mm로 설정하였고, 이를 바탕으로 탄성 계수 2,000 MPa와 인장 강도 55 MPa의 값을 도출하였다. 또한, 푸아송 비는 Video Extensometer를 통해 측정하였으며, 0.40을 적용하였다. 본 연구에서는 선형 해석을 수행하여 탄성 구간에 대한 구조 성능을 평가하였다.

2.3 접촉 및 하중 조건

접촉 조건은 Bend Restrictor의 각 모듈이 굽힘 거동 및 마찰 저항을 가지므로, 접촉하는 모든 부분을 고려하였다. 해석에서 각 모듈은 이격 및 슬립이 발생할 수 있는 마찰 조건(Frictional Condition)을 반영하여 Fig. 4(a)와 같이 적용하였다. 또한, Bend Restrictor의 각 모듈은 볼트를 통해 연결되므로, Beam Connection을 적용하여 볼트 연결부를 Fig. 4(b)와 같이 구현하였다. 마찰 계수는 폴리우레탄의 경험적 데이터를 기반으로 0.4를 적용하였다[17].

하중 조건은 Tekmar[18]의 기준을 참고하여 설정하였으며, Bend Restrictor의 굽힘 성능이 굽힘 모멘트(15 kN·m)에서 최소 굽힘 반경(Minimum Bending Radius, MBR) 2.5 m를 만족하도록 진행하였다. 따라서 Bend Restrictor의 목표

Table 1. Analysis application material properties

Parameters	Polyurethane 82D
Density [kg/m ³]	1,180
Hardness [-]	82D
Tensile strength [MPa]	55
Young's modulus [MPa]	2,000
Poisson's ratio]	0.40

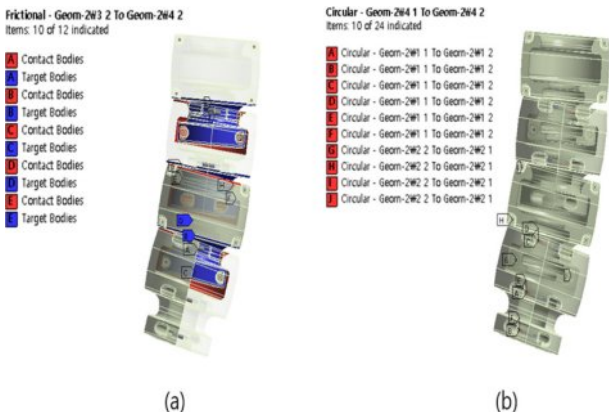


Fig. 4. Contact conditions: (a) friction condition, (b) bolted connection

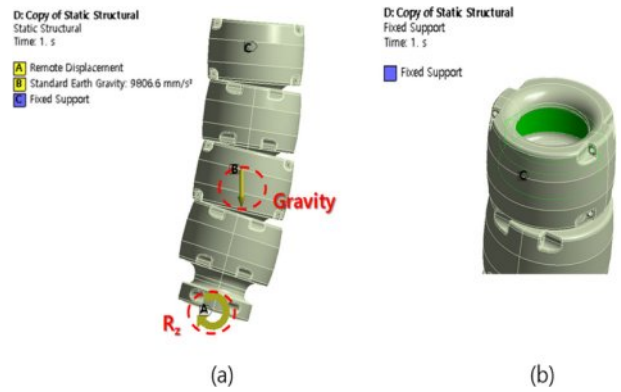


Fig. 5. Loading conditions of the analysis model

치의 굽힘 모멘트(15 kN·m)에 대해 역산 과정을 통해 Fig. 5(a)와 같이 Bend Restrictor 외부면 하단에 z축 방향으로 최대 4.0° 회전 하중(Rotation Load)을 적용하였으며, 이때 Bend Restrictor의 자중을 포함하여 해석을 수행하였다. 경계 조건은 Fig. 5(b)와 같이 Bend Restrictor의 상부 내벽에 모든 방향(Dx, Dy, Dz/Mx, My, Mz)에 대한 변위 및 회전을 제어하였다.

3. 결 과

3.1 Bend Restrictor의 구조 거동 및 성능 분석

Bend Restrictor의 구조 거동을 검토하기 위해 수치 해석을 진행하였고, 회전 하중(Rotation Load)에 의해 발생하는 Bend Restrictor의 변위 분포를 Fig. 6와 같이 도출하였다. Fig. 6(a) 및 6(b)에서는 Bend Restrictor에 발생하는 총 변위와 수평 변위를 볼 수 있으며, Bend Restrictor의 하단부에서 최대 약 54 mm의 변위가 발생함을 확인할 수 있었다. 해당 결과는 z축 방향 회전으로 인해 x축 방향 수평 변위에 큰 영향을 미친 것으로 확인되었다. 따라서, 최소 굽힘 반경(Minimum Bending Radius, MBR)은 x축 방향 수평 변위를 통해 계산하였다.

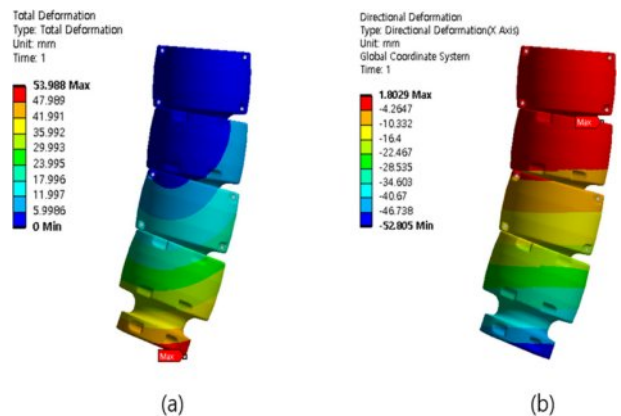


Fig. 6. Overall and horizontal displacement distributions

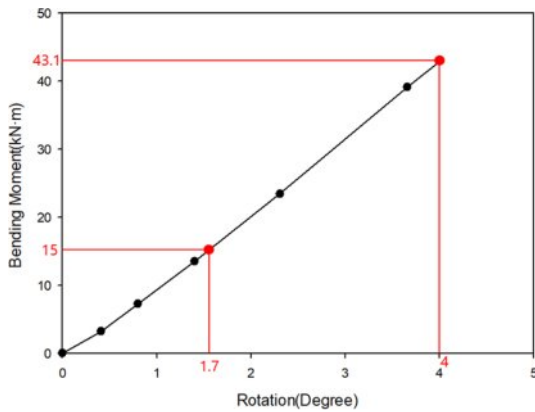


Fig. 7. Bending moment under rotational loading

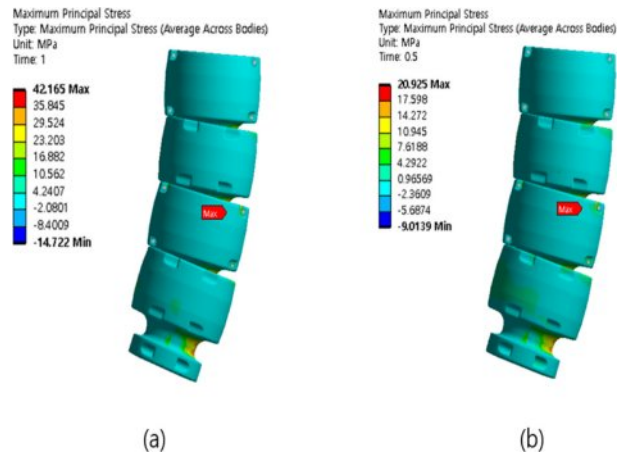


Fig. 9. Max. Principal stress distribution

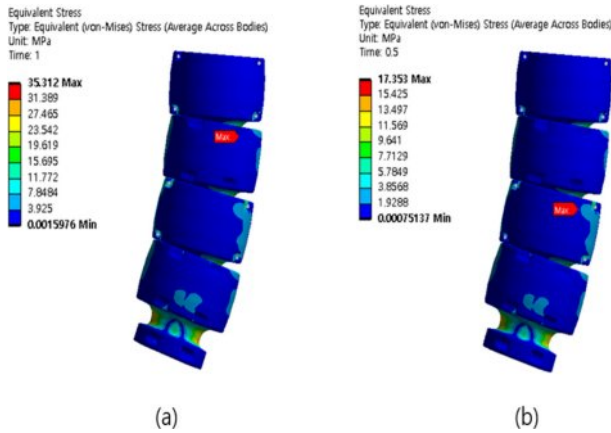


Fig. 8. Von-Mises stress distribution

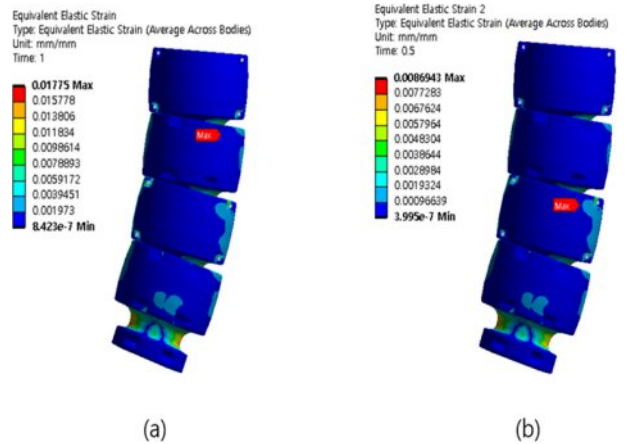


Fig. 10. Von-Mises strain distribution

Bend Restrictor에 작용하는 굽힘 모멘트는 Fig. 7에 나타나 있다. 최대 굽힘 모멘트의 경우, 최대 회전 하중(Maximum Rotation Load) 4.0°에서 43.1 kN·m가 발생하였고, 1.7°에서 목표치의 굽힘 모멘트(15 kN·m)가 도출되었다. 따라서, 구조 성능을 평가하기 위해 최대 굽힘 모멘트(43.1 kN·m)와 목표치의 굽힘 모멘트(15 kN·m)에서 구조 해석을 수행하였다.

Fig. 8은 Bend Restrictor에 발생하는 Von-mises Stress 분포를 보여준다. 최대 굽힘 모멘트(43.1 kN·m)가 작용할 경우 최대 약 35.3 MPa이 발생하였고(Fig. 8(a)) 목표치의 굽힘 모멘트(15 kN·m)는 약 17.4 MPa이 발생하였다(Fig. 8(b)). Bend Restrictor에 발생하는 Max. Principal stress는 Fig. 9에서 보여주며, 최대 굽힘 모멘트(43.1 kN·m)에서는 최대 약 42.2 MPa이 발생하였고(Fig. 9(a)) 목표치의 굽힘 모멘트(15 kN·m)에서는 약 20.9 MPa이 발생하였다(Fig. 9(b)). Fig. 10은 Bend Restrictor에 발생하는 Von-mises Strain 분포를 보여준다. 최대 굽힘 모멘트(43.1 kN·m)를 적용할 경우 최대 약 0.0177 mm/mm가 발생하였고(Fig. 10(a)) 목표치의 굽힘 모멘트(15 kN·m)는 약 0.0086 mm/mm가 발생하였다(Fig. 10(b)). Bend Restrictor에 발생하는 Max. Principal Strain은

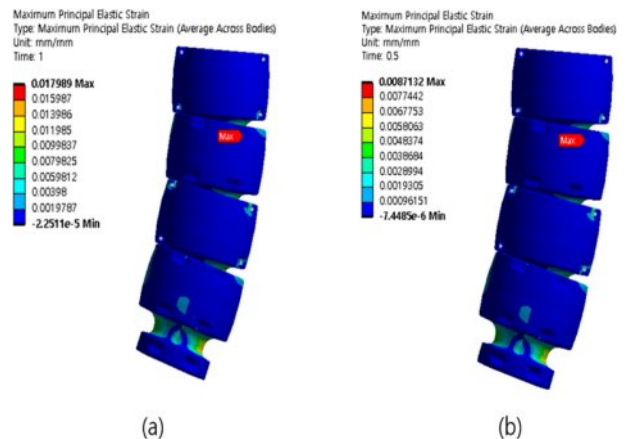


Fig. 11. Maximum principal strain distribution

Fig. 11에서 보여주며, 최대 굽힘 모멘트(43.1 kN·m)에서는 최대 약 0.0179 mm/mm가 발생하였고(Fig. 11(a)) 목표치의 굽힘 모멘트(15 kN·m)에서는 약 0.0087 mm/mm가 발생하였다(Fig. 11(b)).

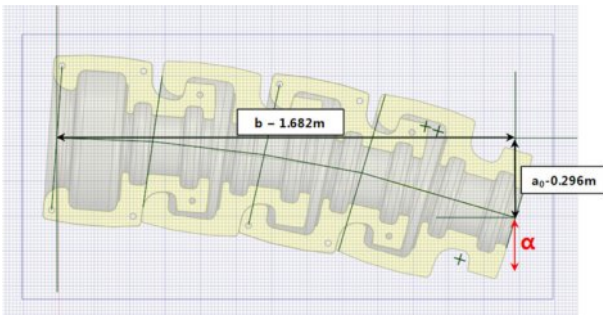


Fig. 12. Detailed view of the Bend Restrictor

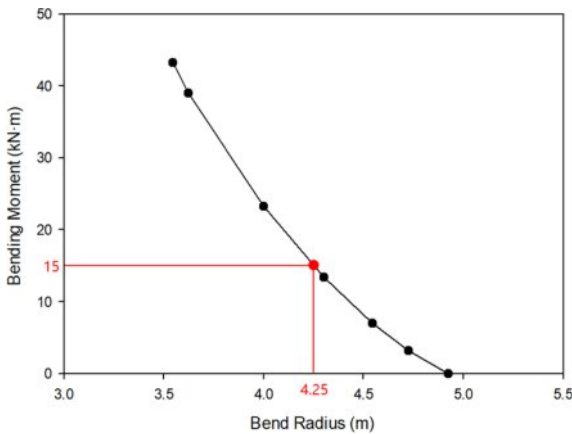


Fig. 13. MBR under bending moment

3.2 최소 굽힘 반경(Minimum Bending Radius, MBR) 분석

본 해석에서는 굽힘 모멘트(15 kN·m)에 대해 최소 굽힘 반경(Minimum Bending Radius, MBR)을 2.5 m로 설정하였다. MBR은 피타고라스 정리를 이용하여 식 (1)에서와 같이 계산하였다.

$$R = \frac{b^2 + a^2}{2a} \quad (1)$$

여기서 R은 MBR을 나타내고 a와 b는 각각 구조물의 초기 변위 및 길이를 나타낸다.

Fig. 12은 Bend Restrictor의 길이(b) 및 초기 변위(a)를 보여주며, 각각 1.682 m와 0.296 m를 보였다. 또한, 추가 굽힘 모멘트에 의해 발생하는 추가 변위(α)를 고려하여 최종 최소 굽힘 반경(Minimum Bending Radius, MBR)을 도출하였다. 굽힘 모멘트에 따른 Bend Restrictor의 MBR은 Fig. 13에서 볼 수 있는데 최대 굽힘 모멘트(43.1 kN·m) 발생 시 약 3.5 m로 나타나며, 목표치의 굽힘 모멘트(15 kN·m)에서는 MBR이 약 4.25 m로 도출되었다. 이는 MBR의 목표치인 2.5 m보다 큰 값으로, 더 낮은 굽힘 모멘트에서 구조 성능이 우수함을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 Bend Restrictor를 대상으로 수치 해석적 방법을 이용하여 굽힘 거동 및 구조적 성능을 살펴보았다. 굽힘 성능의 경우, Bend Restrictor에 대한 굽힘 모멘트(15 kN·m)에 대해 최소 굽힘 반경(Minimum Bending Radius, MBR)을 2.5 m를 기준으로 진행하였다. 해석 결과, Bend Restrictor에서 발생하는 최대 Von-Mises 응력은 목표 굽힘 모멘트(15 kN·m)가 발생할 때 대상 구조물의 단부에서 최대 약 17.4 MPa가 발생하였으며, 최대 굽힘 모멘트(43.1 kN·m)에서는 약 35.3 MPa가 발생하였다. 최소 굽힘 반경(Minimum Bending Radius, MBR)의 경우, 최대 굽힘 모멘트(43.1 kN·m) 발생 시 MBR은 약 3.5 m로 도출되었으며, 목표 굽힘 모멘트(15 kN·m)에서는 MBR이 약 4.25 m였다. 이는 MBR의 목표치인 2.5 m보다 큰 값으로, 더 낮은 굽힘에서 구조 성능이 확보되는 것을 확인할 수 있었다. 해당 결과는 Bend Restrictor가 해저 케이블 보호 기자재에서 구조적으로 신뢰할 수 있는 요소임을 검증하였으며, 향후 설계 최적화 및 산업적 적용 가능성을 높이는 데 기여할 수 있다. 따라서, 추후 해저 케이블 및 Bend Restrictor 설계 시 중요한 참고 자료로 활용될 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

1. Sokulski, C. C., Barros, M. V., Salvador, R., Broday, E. E., and de Francisco, A. C., "Trends in renewable electricity generation in the G20 countries: An analysis of the 1990–2020 period," *Sustainability*, Vol. 14, No. 4, 2022, 2084.
2. Zhao, Y., Shan, Q., Zhao, X., Wang, Z., Wang, C., Yang, L., and Liao, R., "Theoretical research on insulation thickness design of 66 kV AC submarine cables," *In 2022 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, pp. 554-559. IEEE, October, 2022.
3. Fouda, B. M. T., Han, D., Zhang, W., and An, B., "Research on key technology to determine the exact maximum allowable current-carrying ampacity for submarine cables," *Optics & Laser Technology*, Vol. 175, 2024, 110705.
4. Zhou, P., Gao, Y., Wang, L., and Li, L., "Investigation on dynamic response of J-tube submarine cable around monopile foundation," *Applied Ocean Research*, Vol. 154, 2025, 104319.
5. Yang, N., Jeng, D. S., and Zhou, X. L., "Tension analysis of sub-

- marine cables during laying operations,” *The Open Civil Engineering Journal*, Vol. 7, No. 1, 2013, pp. 282-291.
6. Li, X., Liu, Z., Jiang, X., and Hopman, H., “RVE model development for bending analysis of three-core submarine power cables with dashpot-enhanced periodic boundary conditions,” *Ocean Engineering*, Vol. 309, 2024, 118588.
 7. Park, H.J., Kim, J.S., and Nam, B.W., “Numerical analysis for motion response of modular floating island in waves,” *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 37, No. 1, 2023, pp. 8-19.
 8. Shin, J.R., “Numerical method for calculating fourier coefficients and properties of water waves with shear current and vorticity in finite depth,” *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 37, No. 6, 2023, pp. 256-265.
 9. Mai, T.L., and Yoon, H.K., “Numerical Investigation of Motion Response of the Tanker at Varying Vertical Center of Gravities,” *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 38, No. 1, 2024, pp. 1-9.
 10. Lee, W.H., and Nam, B.W., “Numerical Analysis of Wave Interference Effects on Ship Resistance in Parallel Arrangements,” *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 38, No. 6, 2024, pp. 325-335.
 11. 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.
 12. Moon, C., Roh, G., Kim, K., and Park, K., “Preliminary study on the development of sailing modes for ships,” *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, Vol. 47, No. 5, 2023, pp. 275-284.
 13. Ménard, F., and Cartraud, P., “A computationally efficient finite element model for the analysis of the non-linear bending behaviour of a dynamic submarine power cable,” *Marine Structures*, Vol. 91, 2023, 103465.
 14. Fang, P., Li, X., Jiang, X., Hopman, H., and Bai, Y., “Bending study of submarine power cables based on a repeated unit cell model,” *Engineering Structures*, Vol. 293, 2023, 116606.
 15. Thies, P. R., Johanning, L., Bashir, I., Tuk, T., Tuk, M., Marta, M., and Mueller-Schuetze, S., “Accelerated reliability testing of articulated cable bend restrictor for offshore wind applications,” *International Journal of Marine Energy*, Vol. 16, 2016, pp. 65-82.
 16. Li, S.-X., and Liu, Y.-J., “Polyurethane adhesive,” Chemical Industry Press, Beijing, 1989.
 17. J. Chen, Z. Guo, X. Li, and C. Yuan, “Development of gradient structural composite for improving tribological performance of PU material in water-lubricated bearings,” *Tribology International*, Vol. 176, 2022, p. 107876.
 18. “Market Leading Provider of Subsea Protection Systems,” Tekmar Energy, assessed April, 4. 4, <http://https://tekmar.co.uk/>