

해상 풍력 단지 해저 케이블의 열 및 기계적 스트레스 측정을 위한 시스템의 실험적 검증

서진교, 유희석^{ID}

비전플러스 부설연구소

Experimental Validation of a System for Measuring Thermal and Mechanical Stress in Submarine Cables for Offshore Wind Farms

Jin-Kyo Seo and Hee-Suk Ryoo

Research Institute, Visionplus, Seongnam 13572, Korea

(Received February 21, 2025; Revised March 1, 2025; Accepted March 7, 2025)

Abstract: The increasing demand for renewable energy is driving the rapid expansion of the offshore wind industry, leading to intensified research on subsea cables. These cables endure combined thermal, electrical, and mechanical stresses, with mechanical stress being a critical failure factor. Environmental changes, such as seabed scouring, free spans, and seismic activity, accelerate cable degradation by introducing additional dynamic loads. Conventional monitoring systems primarily track thermal stress, lacking the ability to assess mechanical impacts. This study develops a system to simultaneously measure thermal and mechanical stress in subsea cables. Laboratory experiments confirm the system's reliability, showing a temperature measurement error within 0.8% at 60°C and a strain measurement error within 13% at 378 $\mu\epsilon$. The proposed system aims to enhance failure prediction and maintenance strategies for offshore wind subsea cables.

Keywords: Offshore wind farm, Cable, Mechanical stress, Temperature, Strain

1. 서론

친환경 에너지에 대한 관심이 증가하면서 해상 풍력 산업이 급격히 성장하고 있으며, 이에 따라 해저 케이블에 대한 연구 또한 활발히 진행되고 있다 [1-3].

해상 풍력 단지에서 해저 케이블은 발전된 전력을 육지로 송전하는 필수적인 역할을 수행하지만, 다양한 환경적 요인으로 인해 성능 저하 및 고장이 발생할 가능성이 크다. 특히, 열적, 전기적, 기계적 스트레스는 해저 케이블의 수

명을 단축시키는 주요 요인으로 작용하며, 이 중에서도 기계적 스트레스는 케이블 구조의 물리적 변형을 초래하여 심각한 손상을 유발할 수 있다 [4]. 해저 환경에서 케이블이 받는 기계적 스트레스는 지형 변화, 해류, 조석 작용, 자유 공간(free span) 및 세굴(scouring)과 같은 다양한 요인에 의해 가중된다. 이러한 외부 요인들은 케이블에 반복적인 진동과 피로 하중을 가해 열화를 촉진하며, 궁극적으로 전력 전송 신뢰성을 저하시킬 수 있다 [5,6].

해저 케이블은 해양의 동적 환경에서 장기적으로 운용되므로, 기계적 스트레스를 정확히 측정하고 관리하는 기술이 필수적이다. 기존의 해저 케이블 모니터링 기술은 주로 온도를 감지하여 열적 스트레스를 평가하는 방식에 집중되어 있으며, 기계적 스트레스의 영향을 실시간으로 감

✉ Hee-Suk Ryoo; hsryoo20@gmail.com

Copyright ©2025 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

지하는 데에는 한계가 있다. 만약 해상 풍력 단지에서 해저 케이블이 받는 기계적 스트레스를 실시간으로 측정하고 모니터링할 수 있다면, 예상치 못한 고장을 예방하고 유지보수 비용을 절감할 수 있는 이점이 있다 [7].

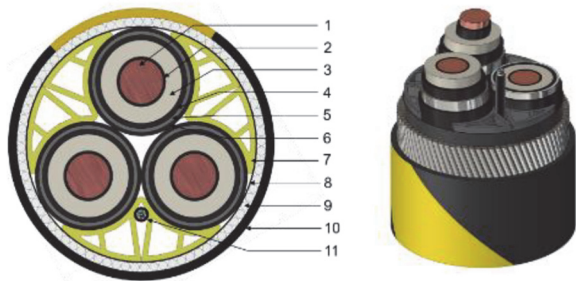
본 연구에서는 해상 풍력 해저 케이블의 열적 및 기계적 스트레스를 동시에 측정할 수 있는 시스템을 개발하고, 실험적 검증을 통해 신뢰성을 평가하였다.

실험실 환경에서 스트레인 및 온도를 측정하여 시스템의 정확성을 분석한 결과, 온도 측정 시스템은 기준 온도 60°C에서 0.2°C 이내의 오차 범위를 보였으며, 기계적 스트레인 측정에서는 최대 변화 185 $\mu\epsilon$ 에서 21 $\mu\epsilon$ 의 오차 (11%)가 확인되었다. 이러한 연구 결과는 향후 해상 풍력 단지의 해저 케이블 상태 모니터링 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 이론적 배경

2.1 해상 풍력 해저 케이블의 구조

본 연구에서는 해상 풍력 해저 케이블에 인가되는 열적 및 기계적 스트레스를 측정하기 위한 시스템을 도입하고, 이 시스템의 신뢰성을 검증하기 위해 실험실 환경에서 스



No.	Structure	Material
1	Conductor	Copper
2	Inner Semiconducting Layer	Semiconducting PE
3	Insulation	XLPE
4	Outer Semiconducting Layer	Semiconducting PE
5	Metallic Shield	Alloy
6	Semiconducting Layer	Semiconducting PE
7	Shaped filler	PE
8	Bedding	PP
9	Aarmor	Galvanized Steel
10	Outer Sheath	PP
11	Optical Unit	PE

Fig. 1. 66 kV offshore wind submarine cable.

트레인과 온도를 측정하였다. 신뢰성 검증이 완료된 온도 및 스트레인 측정 시스템의 적용 대상은 66 kV dry type 해상 풍력용 해저 케이블이며, 그림 1과 같다.

그림 1은 66 kV dry type 해상 풍력용 해저 케이블을 나타낸다. 케이블은 도체, 내부 반도체층, 절연체, 외부 반도체층, 시스, 필러, 아머, 외피, 광유닛 등으로 구성되어 있다.

그림 1에서 케이블에 인가되는 열적 스트레스로 인해 발생하는 온도와 기계적 스트레스로 인한 스트레인의 변화는 광유닛을 통해서 측정되며, 이를 바탕으로 케이블 절연체에 인가되는 열적 및 기계적 스트레스를 감시하고 진단하게 된다.

2.2 열적 및 기계적 스트레스의 영향

전력케이블 시스템은 운전 중 다양한 스트레스에 노출된다. 이 중 케이블의 열화와 관련된 주요 요인은 열, 전기, 및 기계적 스트레스이다.

전력 송전을 위해 케이블에 전압이 인가되어 스트레스에 노출되면, 전류가 흐르면서 발생하는 저항성 발열로 인해 케이블 내부 온도가 주변 온도보다 높아지고, 이에 따라 케이블은 팽창한다. 또한, 온도 변화에 따라 팽창과 수축이 반복되면 열화가 가속화된다. 높은 온도에서는 케이블 절연체가 화학적으로 분해되어 절연 강도가 저하되고 전기적 절연 파괴를 초래할 수 있다 [8,9]. 또한, 케이블을 설치하거나 취급할 때 굽힘, 당김, 비틀림 등 여러 가지 기계적 하중에 노출되어 물리적 손상 및 변형을 유발할 수 있다. 더불어, 해상 풍력 단지의 해저 케이블은 진동, 바람, 해저의 움직임 등으로 인해 동적 하중에 지속적으로 노출되어 기계적 스트레스를 겪게 된다. 이러한 반복적인 기계적 하중은 시간이 지남에 따라 절연체에 균열을 발생시킬 수 있다 [10].

열적 스트레스와 기계적 스트레스가 동시에 작용하면, 열팽창으로 인해 기계적 하중에 의한 균열 발생이 증가하여 케이블 시스템의 열화가 가속화된다. 따라서, 특히 해상 풍력 해저 케이블에서는 온도와 스트레인을 측정할 수 있는 감시 기술이 필수적으로 요구되고 있다.

그림 2는 전력 케이블에서 발생하는 열적 및 기계적 스트레스를 나타내며, 해상 풍력 해저 케이블 포설 시 발생하는 인장력과 굽힘을 나타내는 기계적 스트레스, 그리고 지중 케이블의 도체에 전류가 통전될 때 케이블에 발생하는 온도를 보여준다. 케이블 시스템 운전 중에는 불가피하게 열적 및 기계적 스트레스가 발생하며, 특히 해상 풍력용 해

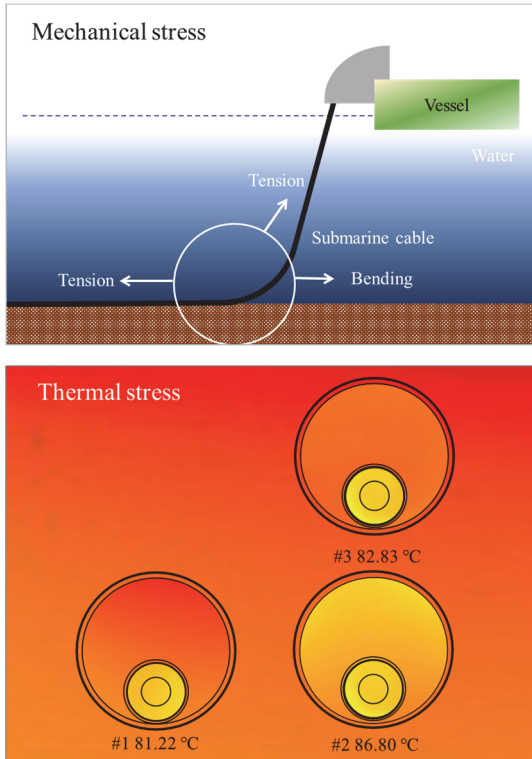


Fig. 2. Temperature and tension due to thermal and mechanical stresses in power cables.

저 케이블은 기계적 스트레스에 더욱 취약하다. 기계적 스트레스에 더 취약하게 된다.

2.3 기존 모니터링 기술 및 한계

OTDR (optical time domain reflectometer)을 응용한 분산 센싱 기술은 광섬유를 통해 raman 또는 brillouin 산란 현상을 이용하여 케이블 전체의 온도와 기계적 스트레인을 실시간으로 모니터링할 수 있는 장점을 지니고 있다. 일반적으로 온도 측정에는 raman 산란이 활용되는데, 이는 온도 변화에 따른 신호 변화만이 비교적 뚜렷하게 나타나기 때문이다. 반면, 기계적 스트레인 측정에는 brillouin 산란을 이용하지만, 이 신호는 온도와 스트레인 두 요인에 동시에 영향을 받는다 [11]. 따라서 brillouin 산란에서는 스트레인과 온도의 상호 영향을 분리하는 것이 어렵다는 한계가 있다. 이러한 이유로 raman 대역 센싱 시스템의 온도 측정은 비교적 용이한 반면, brillouin 대역 기반 온도 및 스트레인 측정은 보다 정밀한 교정 및 보정 과정이 필요하여 기술적 난이도가 높다. 특히, 국내에서는 brillouin 산란을 활용한 기계적 스트레인 측정 기술이 아

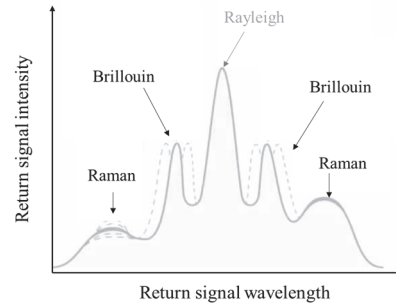


Fig. 3. Frequency bands of raman and brillouin scattering phenomena in optical fibers.

직 상용화되지 못한 상태이며, 연구 및 적용 사례가 부족하여 실질적인 활용에 어려움이 있다. 그림 3은 광섬유에서 발생하는 후방산란현상의 주파수 분포를 나타내며, raman과 brillouin 변화의 특성을 표시하였다.

3. 연구 방법

3.1 실험 설계

광 케이블에 인가되는 열 및 기계적 스트레스를 측정하기 위해 실험 구조물을 설계하였으며, 그 구조는 그림 4와 같다. 그림 4의 왼쪽은 기계적 스트레스 인가 장치, 오른쪽은 열적 스트레스 인가 장치이다. 실험 구조물의 끝에 볼트를 조여 기계적 장력을 인가하는 구조로 설계되었으며, 해당 구조물에 광케이블과 집중 소자인 스트레인 측정 소자를 병렬로 설치하여 인가된 하중에 따라 광케이블과 집중 소자에서 측정된 스트레인 값을 비교 분석하였다. 또한, 광케이블에 스트레인 발생 없이 온도 스트레스만을 인가할 수 있는 구조물을 설계하고, 온도 측정설비와 광케이블 측정설비를 병렬로 운영하여 온도 상승 및 하강 변화에 따른 온도를 측정하고 그 값을 비교하였다. 또한 교정기관의 공인성적을 취득하기 위하여 교정기관의 교정된 오븐과 온도 측정설비를 이용하여 비교측정 성적을 확보하였다. 온도와 스트레인 측정은 IEC 61757을 참조하여 수행하였다.

표 1은 광케이블에 인가할 기계적 및 열적 스트레스 조건을 나타낸다. 열적 스트레스 인가 조건은 실제 66 kV 해상 풍력용 해저 케이블의 운전 조건을 고려하여 20°C, 40°C 및 60°C로 설정하였다. 기계적 스트레인 측정 값은 상대적인 값만을 비교하기 위해 구조물에 하중 100 kg, 150 kg 및 200 kg만을 인가하였으며, 실제 케이블에 영향을 주는 스트레인에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

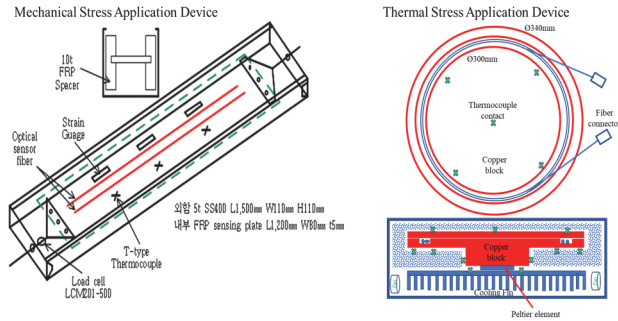


Fig. 4. Design of experimental setup for applying and measuring thermal and mechanical stresses.

Table 1. Temperature and mechanical stress application conditions.

No.	Load	Temperature
1	100 kg	20°C
2	150 kg	40°C
3	200 kg	60°C

3.2 스트레인 및 온도 측정 시스템 구성

광케이블에 인가되는 기계적 및 열적 스트레스를 측정하기 위해 그림 4와 같은 실험 구조물을 설계하고 제작하였다. 그림 5는 기계적 스트레스 인가 장치를 나타내며, 파란색 Nylon판에 스트레인 측정용 집중 소자와 광케이블을 부착하였다. 시작점에 설치된 볼트를 조임으로써 Nylon판에 인장 하중을 부여하였으며, 표 1과 같이 Nylon판을 당기는 힘을 증가시켜 집중 소자와 광케이블에 스트레인이 발생하도록 실험을 진행하였다. 이후 측정값을 비교하여 광케이블을 이용한 기계적 스트레인 측정의 신뢰성을 평가하였다.

그림 6은 광케이블의 열적 스트레스 인가 장치로서, 구리 판 위에 광케이블과 교정용 집중 온도 센서를 설치하고 오븐에 넣어 승온하였다. 그 이후 광케이블을 통해 측정되는 온도와 집중형 소자로부터 측정된 온도 값을 비교 분석하여 온도 측정의 신뢰성을 평가하였다.

3.3 데이터 수집

그림 7은 광케이블에 인가되는 열적 및 기계적 스트레스를 측정하기 위한 프로그램을 나타내며, 위 사진은 집중형 소자로부터 측정된 값을 표현하기 위한 프로그램이고, 아

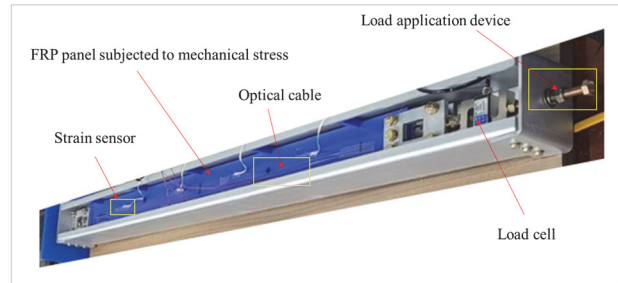


Fig. 5. Mechanical stress application device and experimental setup.

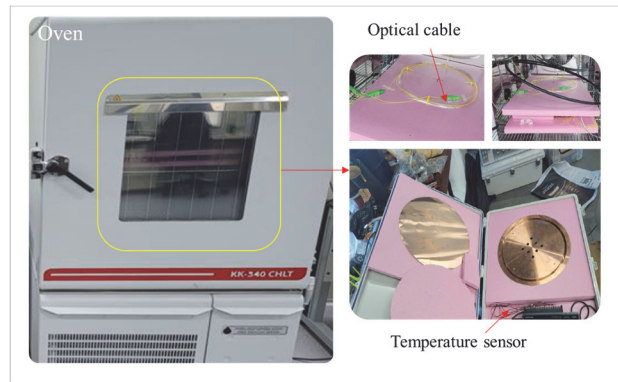


Fig. 6. Thermal stress application device and experimental setup.

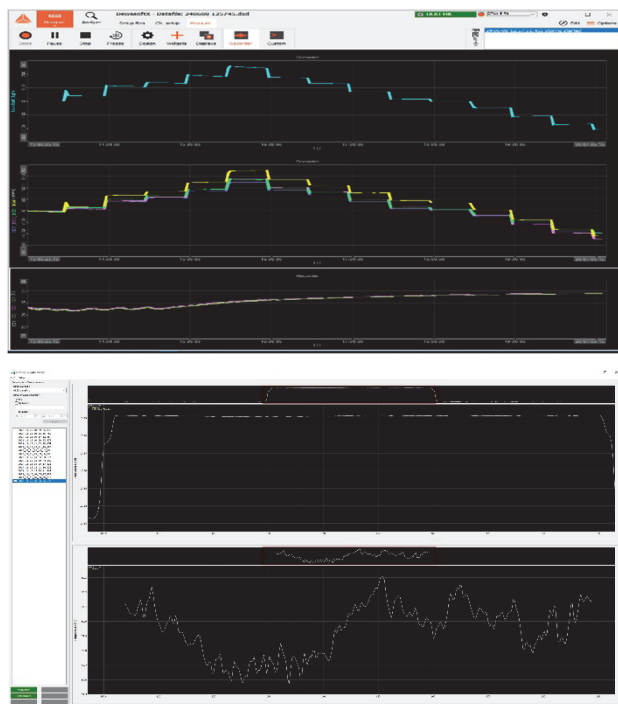


Fig. 7. Program for data measurement: top: measurement program for measuring temperature and strain from gauges and bottom: program for measuring temperature from optical cables.

래의 프로그램은 광케이블로부터 측정된 값을 표현하기 위한 프로그램으로 자체 제작한 것이다. 해당 프로그램을 이용하여 온도와 스트레인을 측정하고 그 값을 비교 분석하였다.

4. 실험 결과

4.1 온도 측정 결과

그림 6과 같이 광케이블과 집중형 소자를 오븐에 넣고 온도를 20°C, 40°C 및 60°C까지 승온하면서 측정된 값의 최대, 최소, 평균을 비교하여 나타내었다. 온도가 포화된 후 5분이 지난 후 집중소자와 광케이블을 이용하여 온도를 측정하였다.

오븐을 20°C 기준으로 설정하였을 경우, 집중소자를 통한 온도는 20.2°C이며, 광케이블로 측정했을 경우에는 최대 20.7°C, 최소 19.5°C로 평균 20.1°C였다. 40°C 기준으로 설정하였을 경우, 집중소자를 통한 온도는 40.1°C이며, 광케이블로 측정했을 경우에는 최대 39.9°C, 최소 39.0°C로 평균 39.4°C였다. 또한, 60°C 기준으로 설정하였을 경우, 집중소자를 통한 온도는 60.1°C였으며, 광케이블로 측정했을 경우에는 최대 60.3°C, 최소 59.5°C로 평균 59.9°C였다. 측정된 온도 영역에서 광케이블의 측정 정확도는 ±1.7% 이내의 고정밀도의 측정 성능을 보여주었다. 이 정확도는 반복적이고 폭 넓은 측정을 거쳐 비선형 파라메타를 산출함으로써 개선할 수 있을 것이다.

표 2는 열적 스트레스에 따른 집중소자 및 광케이블의 온도 측정 결과를 나타낸다.

Table 2. Temperature measurement results of thermal couple and optical cables under thermal stress.

No.	Temperature				
	Ref. (°C)	Optical cable			
		Max (°C)	Min (°C)	Mean (°C)	Dev. (°C)
1	20.2	20.7	19.5	20.1	-0.1
	40.1	39.9	39.0	39.4	-0.7
	60.1	60.3	59.5	59.9	-0.2
2	20.2	20.7	19.1	19.9	-0.3
	40.1	40.4	39.4	39.9	-0.2
	60.1	60.6	59.9	60.2	+0.1

4.2 스트레인 측정 결과

그림 5와 같이 광케이블과 집중형 소자를 nylon판에 고정 후 하중을 인가하여 변형이 발생하는 것을 각각 측정하고, 그 값의 최대, 최소, 평균을 비교하여 분석하였다. 스트레인 측정은 하중을 인가한 후 5분이 지난 시점에서 수행하였다. Nylon 판에 실제 인가된 하중은 100 kg 기준 104 kg이었으며, 이때 집중소자에서 측정된 스트레인은 최대 278 µε, 최소 274 µε로 나타났다. 같은 조건에서 광케이블에서 측정된 스트레인은 최대 238 µε, 최소 227 µε였다. 150 kg의 하중을 인가한 경우, 실제 하중은 151 kg이었으며, 이때 집중소자에서 측정된 스트레인은 최대 477 µε, 최소 474 µε로 나타났다.

200 kg 하중을 인가한 경우, 실제 하중은 207 kg이었으며, 집중소자에서 측정된 스트레인은 최대 662 µε, 최소 660 µε였다. 같은 조건에서 광케이블에서 측정된 스트레인은 최대 659 µε, 최소 662 µε였다.

Table 3. Strain measurement results of strain sensor and optical cables under mechanical stress.

Load (kg)	Load cell (kg)	Strain		
		Sensor (µε)	Optical cable	
			Strain (µε)	Error (%)
200	208	538	661	23
	208	552	662	20
	207	536	661	23
	207	546	660	21
	207	544	659	21
Mean	207	543	660	22
150	152	376	477	27
	152	382	475	24
	151	377	475	26
	151	380	474	25
	151	379	473	25
Mean	151	378	474	25
100	104	227	278	22
	104	232	276	19
	104	230	276	20
	104	233	275	18
	103	238	274	15
Mean	103	232	275	19

전반적으로 광케이블에서 측정된 스트레인 값은 집중소자 대비 높은 값을 나타냈으며, 측정된 스트레인 영역에서 광케이블의 측정 성능은 ±13%의 오차 범위를 보였다.

표 3은 기계적 스트레스에 따른 집중소자 및 광케이블의 스트레인 측정 결과를 나타낸다. 상대 변위로 평가한 결과도 비슷한 최대 26% 정도의 오차율을 나타낸다. 스트레인의 경우도 온도와 같이 폭넓은 측정과정을 거쳐 비선형 파라메타를 산출·적용한다면 개선될 것으로 평가된다.

4.3 시스템의 신뢰성 평가

OTDR 장비에 센싱 시스템을 추가하여 해상 풍력용 해저 케이블의 열 및 기계적 스트레스 측정 시스템을 구축하였으며, 실험 구조물을 제작하여 온도와 스트레인을 측정하였다. 표 2에서 볼 수 있듯이, 광케이블을 이용한 온도 측정은 1.7% 이내의 안정된 측정이 가능하나 스트레인 측정의 경우 최대 26%의 오차가 발생하여 신뢰성을 확보하기 위한 추가적인 검증 및 연구가 필요하다.

현재 국내에서는 해상 풍력 단지의 해저 케이블을 대상으로 온도와 스트레인을 동시에 측정할 수 있는 기술이 아직 상용화되지 않은 상황이다. 따라서 본 연구는 이러한 기술적 한계를 극복하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대되며, 추가 연구를 통해 신뢰성을 개선하고 실용적인 측정 시스템을 구축할 필요가 있다.

5. 논의

본 연구에서는 해상 풍력 단지의 해저 케이블에 인가되는 열적 및 기계적 스트레스를 동시에 측정할 수 있는 시스템을 개발하고, 실험적 검증을 수행하였다. 연구 결과, 광케이블 기반 온도 측정 시스템은 최대 0.7°C의 오차로 높은 정밀도를 보이며 신뢰성이 입증되었다. 반면, 기계적 스트레인 측정 시스템의 경우 최대 26%의 오차가 발생하여, 온도 측정에 비해 상대적으로 높은 오차율을 나타냈다.

스트레인 측정의 신뢰성 확보를 위해서는 보정 과정이 필요하며 추가적인 연구가 요구된다. 또한, 본 연구에서는 실험실 환경에서 측정을 수행하였으므로, 실제 해양 환경에서의 동적 하중 및 장기적인 열화 영향을 고려한 추가 검증이 필요하다.

현재 국내에서는 해상 풍력 단지의 해저 케이블을 대상으로 한 기계적 스트레스 모니터링 기술이 상용화되지 않았으며, 기존 시스템은 주로 열적 스트레스 감지에 집중되어 있다. 따라서 본 연구에서 제안할 복합 스트레스 측정

시스템은 국내 해상 풍력 단지의 해저 케이블 유지보수 및 고장 예측 기술에 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.

6. 결론

본 연구에서는 해상 풍력 해저 케이블의 열적 및 기계적 스트레스를 동시에 측정할 수 있는 시스템을 개발하고, 실험적 검증을 수행하였다. 연구 결과, 온도 측정 기술은 ±1.72% 이내의 높은 정밀도를 보였으며, 해상 풍력 단지 운영에 적용할 수 있는 수준의 신뢰성을 확보하였다. 그러나 스트레인 측정 기술의 경우 26%의 오차가 발생하였으며, 이는 온도와 기계적 스트레스의 복합적인 영향으로 인해 정확한 측정이 어려운 한계를 나타낸다.

향후 연구에서는 실제 해양 환경에서의 장기적 실증 실험을 통해 스트레인 측정의 신뢰성을 향상시키고, 온도 및 스트레인 측정 간의 상호 영향을 최소화하는 보정 알고리즘을 개발할 필요가 있다. 본 연구에서 제안한 시스템이 실용화될 경우, 해상 풍력 해저 케이블의 상태 모니터링 및 유지보수 기술 발전에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

ORCID

Hee-Suk Ryoo

<https://orcid.org/0009-0006-8414-8388>

감사의 글

이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2021300000020, 해상 풍력 단지 해저 전력망 구축을 위한 핵심기자재 및 평가 기술 개발).

REFERENCES

- [1] B. S. Kim, *Green Energy Technol. Insight*, **12**, 10 (2021).
- [2] R. Chippendale, P. Cangy, and J. Pilgrim, *Proc. Jicable'15 (Jicable, Versailles, France, 2015)* p. 4.
- [3] L. You, J. Wang, G. Liu, H. Ma, and M. Zheng, *Energies*, **11**, 545 (2018).
doi: <https://doi.org/10.3390/en11030545>
- [4] CIGRE Working Group D1.23, *Diagnostics and Accelerated Life Endurance Testing of Polymeric Materials for HVDC Application* (CIGRE, Nov. 2015).
- [5] DNV, *Recommended Practice DNV-RP-J301: Subsea Power*

- Cables in Shallow Water Renewable Energy Applications* (DNV, Feb. 2014).
- [6] DNV GL, *Recommended Practice DNVGL-RP-0360: Subsea Power Cables in Shallow Water*, Ed. March 2016 (DNV GL, 2016).
- [7] A. Masoudi, J. A. Pilgrim, T. P. Newson, and G. Brambilla, *Proc. Optical Sensors Conf.* (OSA, July 2018) SeTh2E.1. doi: <https://doi.org/10.1364/SENSORS.2018.SeTh2E.1>
- [8] S. Li, Y. Ke, L. Xie, Z. Zhao, X. Huang, Y. Wang, and Z. Wang, *J. e-Polym.*, **23**, 20228089 (2023). doi: <https://doi.org/10.1515/epoly-2022-8089>
- [9] S. W. Lee, J. W. Choe, and H. J. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 570 (2023). doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.6.5>
- [10] S. W. Lee, J. W. Choe, I. S. Kwon, D. E. Kim, and H. J. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **37**, 286 (2024). doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.3.7>
- [11] S. Lee, J. Kim, and Y. Park, *Opt. Express*, **17**, 21066 (2009).