

분포형 광섬유 음향 센서 기반 HVDC 해저케이블 모니터링 기술 연구

최영국¹ · 정효영¹ · 김희운¹ · 김명진¹ · 강희운² · 김영호^{1,+}

A Study on HVDC Underwater Cable Monitoring Technology Based on Distributed Fiber Optic Acoustic Sensors

Youngkuk Choi¹, Hyoyoung Jung¹, Huioon Kim, Myoung Jin Kim¹, Hee-Woon Kang², and Young Ho Kim^{1,+}

Abstract

This study presents a novel monitoring technique for underwater high-voltage direct current (HVDC) cables based on the Distributed Acoustic Sensor (DAS). The proposed technique utilizes vibration and acoustic signals generated on HVDC cables to monitor their condition and detect events such as earthquakes, shipments, tidal currents, and construction activities. To implement the monitoring system, a DAS based on phase-sensitive optical time-domain reflectometry (Φ -OTDR) system was designed, fabricated, and validated for performance. For the HVDC cable monitoring experiments, a testbed was constructed on land, mimicking the cable burial method and protective equipment used underwater. Defined various scenarios that could cause cable damage and conducted experiments accordingly. The developed DAS system achieved a maximum measurement distance of 50 km, a distance measurement interval of 2 m, and a measurement repetition rate of 1 kHz. Extensive experiments conducted on HVDC cables and protective facilities demonstrated the practical potential of the DAS system for monitoring underwater and underground areas.

Keywords: Fiber optic sensors, Distributed acoustic sensor (DAS), High-voltage direct current (HVDC), Acoustic, Distributed detection, Measurement, Monitoring, Quality diagnosis

1. 서 론

탄소 저감 정책이 확대되고 재생 에너지에 대한 수요가 증가함에 따라 동일 송전용량 대비 손실이 작은 HVDC에 대한 요구는 날로 증가하고 있다[1]. 해양을 관통하는 HVDC송전 기술은 대륙간 및 섬과 도시 사이에 주파수가 다른 경우에도 비동기 장거리 전력 공급을 가능하게 한다. 그러나 자연열화, 해류 영향, 위해선박 및 해양생물 활동과 같은 다양한 환경요인에 취약할 뿐만 아니라 해저 환경에서 유지관리가 어렵기 때문에 케이블 손상 및 단선 사고가 발생하고 있다. 안정적인 전력 공급

및 품질 관리를 위해 HVDC 케이블의 상태보전 및 훼손 방지 모니터링은 필수적이다.

해저 HVDC케이블의 유지관리는 인력 중심의 순시 및 점검을 통해 이루어진다[2]. 잠수 인력과 선박을 운용하여 어업 구역을 순찰한다. 어선, 닻, 어망 등으로 인하여 HVDC케이블의 손상을 일으킬 수 있는 구역을 점검하기 위하여 수중 드론, 소나 및 잠수부 등을 활용하여 케이블의 상황을 점검한다. 이러한 방식은 인력과 비용이 많이 소요될 뿐만 아니라 연 2회 정도의 정기 점검 수준이기에 실시간 대처가 어렵다. 또한 해저의 수질에 따라 카메라 및 인력의 시야로 케이블을 진단하는 것이 불가능한 경우가 많으며, 현장에서 발생하는 동시다발적인 사고에 대처하기에는 한계가 있다.

HVDC 해저케이블의 상태를 감지하는 기술로 레이더 감시 및 Optical Time-Domain Reflectometry (OTDR) 분석법이 있다. 레이더 방식은 해저케이블 반경내에 선회하거나 정박하는 선박을 인지하는 용도로 어로 작업이나 양식장 설치 작업 시 발생할 수 있는 케이블의 손상을 보호하는 것이 목적이다. 레이더 감시 방식의 한계는 위험 선박을 분류할 수 없다는 점과 해저케이블의 상태를 파악할 수 없다는 점이 있다. 또한 감지 해상도가 수백 미터 수준으로 낮다. OTDR 분석법은 전력전

¹ 한국광기술원 (Korea Photonics Technology Institute)
OPMRC, KOPII, Cheomdanventure-ro 108 beon-gil 9, Buk-gu, Gwangju 61007, Korea

² 한국전력공사 (Korea Electric Power Corporation)
ICT Convergence group, Digital Solution Lab, KEPRI, 105, Munji-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34056, Korea

⁺Corresponding author: siuli092@gmail.com

(Received: May. 17, 2023, Revised: May. 24, 2023, Accepted: May. 31, 2023)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://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.

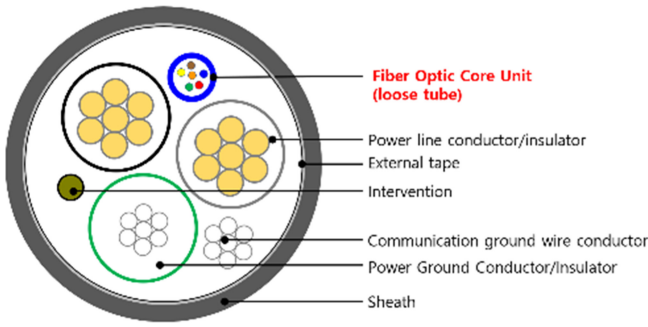


Fig. 1. Cross-sectional view of HVDC cable with built-in optical fiber.

송용 HVDC케이블에 포함된 광케이블에 펄스형태의 광신호를 인가하였을 때 되돌아오는 광 신호의 세기를 분석하여 접속지점, 감쇠율, 꺾임 및 단선을 진단할 수 있는 기술이다. 케이블의 직접적인 상태를 감시하고 위치를 식별할 수 있다는 것이 장점이다. 하지만 진단의 민감도가 낮으며 파악할 수 있는 정보가 한정적이다.

인프라 시설의 실시간 상태 모니터링 및 품질 진단을 위해 phase-sensitive optical time-domain reflectometry (Φ -OTDR) 기반의 분포형 광섬유 음향 센서 (DAS) 기술이 연구되고 있다 [3]. DAS는 한 가닥의 광섬유로 수십 km이상 구간의 음향/진동 데이터 수집 및 실시간 이벤트 검출이 가능한 기술이다. IoT 센서와 같이 감지부에 전원을 필요로 하지 않아 유지보수가 용이하다는 장점이 있으며, 전자기파, 고온 환경 등 극한환경에 내성을 지닌다. 따라서 기존 IoT 센서가 설치되기 힘든 환경이나 대규모 시설물에 구조 건정성 모니터링 기술로 각광받고 있다[4-6].

최근 DAS를 활용하여 해저광케이블 및 해저상황을 실시간으로 인지하는 모니터링 기술이 연구되고 있다[7]. 케이블에 가해지는 미소 진동 및 음향을 측정하여 민감도가 높고 상태를 직관적으로 진단할 수 있다. DAS 기반으로 해저광케이블의 상태 모니터링을 수행한 결과가 보고되었다[8]. 또한 지오폰을 대체하여 지질구조를 파악하기 위해 탄성파와 반사파를 측정하고 분석하는 연구도 보고된 바 있다[9]. 하지만 해저에서 발생하는 진동 패턴을 분석하고 위험 상황을 분류 및 판단한 결과는 보고된 바 없다.

본 논문에서는 광섬유가 내장된 HVDC 해저케이블의 상태를 정밀하게 진단하기 위한 DAS 기술의 적용연구를 보고한다.

Fig. 1은 광섬유가 내장된 HVDC케이블의 단면도를 나타낸다. HVDC 해저케이블 50 km 구간의 음향/진동 데이터를 측정하기 위해 개발된 DAS를 활용하였다. HVDC 케이블 및 보호설비를 활용한 실증 테스트를 통해 해저 상황을 파악하기 위해 다양한 신호원과 이벤트에 대한 진동 패턴 및 특성을 분석하여 DAS의 실효성을 검증하였다.

2.2 HVDC 해저케이블용 DAS 시제품 제작 및 성능 평가

2.2.1 시제품 제작

Figs. 2과 3는 설계, 제작된 DAS 시스템을 보여준다. 광원부, 광학계, 광검출부, 데이터처리부로 구성되어 있으며 시스템구동 및 안정적인 동작을 위해 전원용 노이즈 필터와 각 파트의 전원을 공급하기 위한 SMPS, PC용 Power Supply가 추가되었고 전원 및 보드에서 발생열을 배출하여 시스템의 온도를 일정하게 유지하기 위해 쿨링팬을 배치하였다.

2.2.2 DAS 시스템 성능 검증

제작이 완료된 DAS 시스템의 성능 검증을 위해, Fig. 4와 같이 실험 구성을 하고 성능 측정을 진행하였다. 중심 파장, 선포,

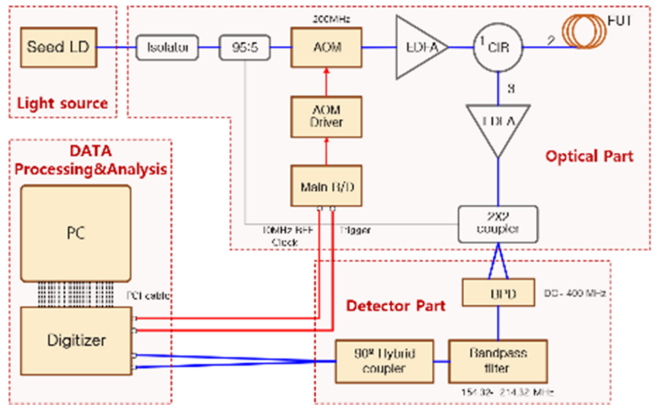


Fig. 2. DAS system block diagram.

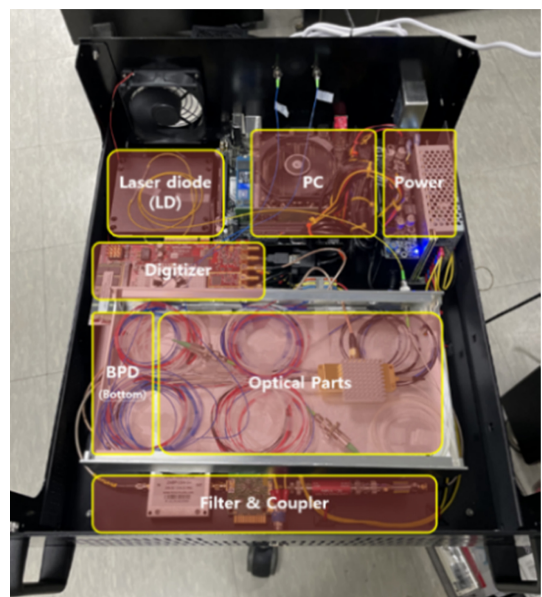


Fig. 3. Internal view of DAS prototype system.

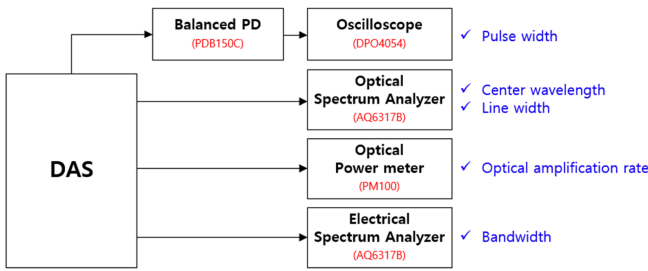
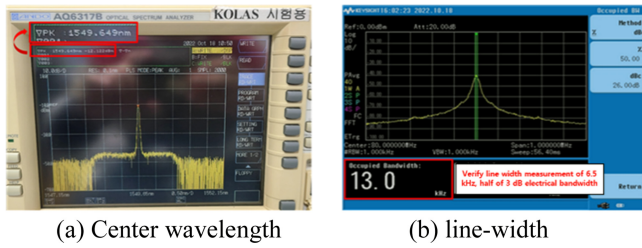


Fig. 4. Configuring Tests for Performance Verification.



(a) Center wavelength (b) line-width

Fig. 5. Center wavelength and line width measurement results

펄스폭, 광증폭률을 측정하여 광원 및 광학계의 성능을 검증하였으며, BPD의 증폭률과 대역폭을 측정하여 광검출부의 성능 검증을 진행하였다.

광 스펙트럼 분석기를 사용하여 광원의 중심 파장과 선폭을 측정된 결과, 중심 파장은 목표로 하는 1550 nm의 ±1 nm 범위 내인 1549.649 nm로 측정되어 목표 성능을 만족하였다. 선폭 측정결과 6.5 kHz로 우수한 선폭 성능을 확인하였다. Fig. 5은 이러한 파장과 선폭의 측정 결과를 보여준다.

펄스 폭 측정을 위해 Balanced PD와 오실로스코프를 활용하였다. 펄스폭 설정을 50 nm~200 nm까지 가변 시켜 출력되는 광 신호의 펄스폭을 측정하였고, Fig. 6과 같이 설정된 펄스 폭과 동일한 광신호가 출력됨을 확인하였다.

광원과 AOM을 통해 변조된 광 신호와 EDFA를 통과한 광 신호의 파워를 각각 측정된 결과, -34.90 dBm과 -6.11 dBm으로 28.79dB 증폭됨을 확인하였다. 검출부의 증폭성능(G)은 광전변환 증폭률(P)과 PD의 반응성(R)의 비율로 equation 1과같이 계산된다.

$$G = \frac{P}{R} = \frac{1.3034 \times 10^4 \text{ V/W}}{0.9 \text{ A/W}} = 1.4482 \times 10^4 \text{ V/A} \quad (1)$$

광전변환 증폭률(P)을 측정된 결과 $1.3034 \times 10^4 \text{ V/W}$ 와 InGaAsPD의 반응성(R) 0.9 A/W로 나눈 결과 $1.4482 \times 10^4 \text{ V/A}$ 의 증폭성능을 확인하였다. 200 MHz 신호가 변조된 DAS신호를 디지털이저를 통해 주파수 특성을 측정된 결과 Fig. 7과 같이 200 MHz대역의 신호를 측정할 수 있는 것을 확인하였다. Table 1은 각 항목에 대한 측정 결과를 보여준다.

최종 개발한 DAS 시제품의 최대 측정 거리는 50 km, 거리



Fig. 6. Pulse width measurement results.

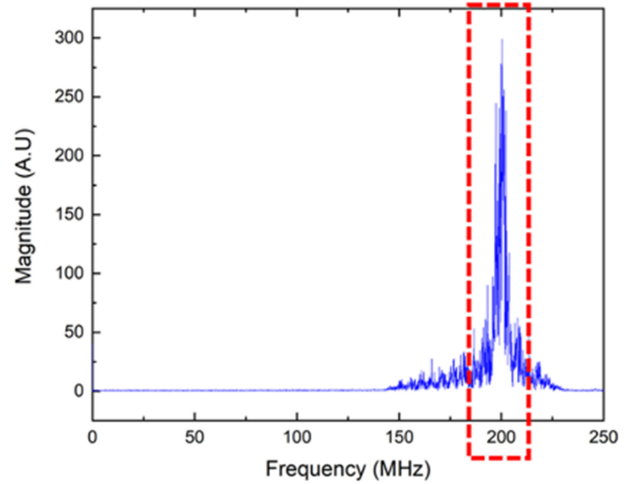


Fig. 7. Pulse width measurement results.

Table 1. Detector specification.

| Category | Measurement result |
|-----------------------------|----------------------------------|
| Center wavelength | 1,549.649 nm |
| Line width | 6.5 kHz |
| Pulse width | 50 ~ 200 ns (adjustable) |
| Optical amplification rate | 28.79dB |
| Detector amplification rate | $1.4482 \times 10^4 \text{ V/W}$ |
| Bandwidth | 200 MHz |

측정 간격은 2 m 및 측정 반복률은 1 kHz의 성능을 보여준다.

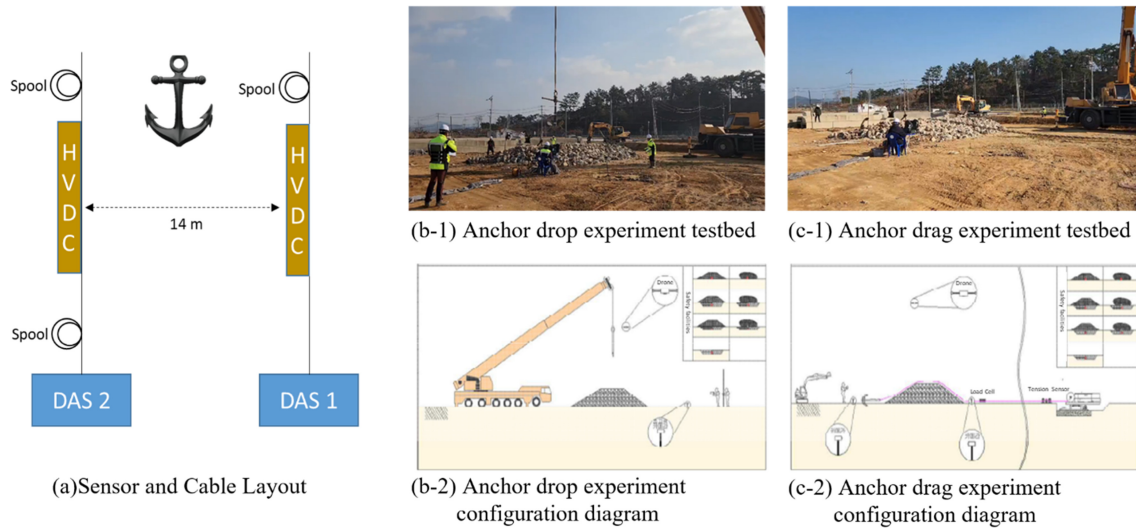


Fig. 8. Experiment setup for safety facilities of HVDC cables.



Fig. 9. Safety facilities for HVDC cables.

3. 결과 및 고찰

3.1 HVDC 해저케이블 및 보호설비 실규모 실험 방법

해저에 설치된 HVDC케이블과 보호설비가 실제 위험 요소로부터 받는 영향을 파악하기 위해 지상에서 테스트베드를 구축하여 실규모 실험을 수행하였다. 실험의 목적은 위험 상황으로 파생되는 진동/음향의 외력이 HVDC 케이블에 미치는 영향을 DAS를 통해 측정하는 것이다. 실규모 실증 시험은 한국전력 전력연구원의 지원을 받아 고창전력시험센터에 수행하였다.

실험 현장은 HVDC 케이블 매설, 보호설비 설치, 닻 구성, 주요/투묘 시험장비 구성 및 DAS 장비 설치를 통해 실증되었다. Fig. 8은 HVDC케이블 및 보호설비 실규모 실험 현장 및 실험 방식을 도식화한 그림이다. Spool은 광섬유여장을 의미하며 DAS1과 DAS2 두대의 장비를 동원하였다. 오른쪽 위는 실증 환경 사진이며 아래는 투묘와 주요 시험 상황을 묘사한 것이다. HVDC 해저케이블은 두 라인을 14m 만큼 이격하여 매설하였고 그 위에는 보호설비가 구간별로 설치되었다. 각 구간은 보호설비가 없는 일반 매설구간, 스톤백(stone bag) 설비가 설치된 구간, 돌무덤(rock-berm) 설비가 설치된 구간으로 구성된다. Fig. 9은 보호설비를 실증한 현장 사진이다. 위험요소는 닻이 떨어지는 투묘 이벤트와 닻이 끌리는 주요 이벤트를 시험한다.

Table 2. Weights and drop heights according to five anchor types.

| Anchor type | Smack anchor | Stock | Rocket | Stow-nets | Stock-less |
|-----------------|--------------|-------|--------|-----------|------------|
| Weight [Ton] | 0.18 | 0.61 | 0.8 | 1.6 | 2.1 |
| Drop Height [m] | 0.833 | 1.133 | 12.144 | 2 | 1.881 |



Fig. 10. Stow-net and rocket anchors.

Table 2는 닻의 종류에 따른 무게와 투하 높이를 나타낸다. 닻은 어선 닻, 스톡, 스톡리스, 안강망, 로켓포가 있다. Fig. 10은 안강망과 로켓포의 사진이다. 투하높이는 실제 닻이 해저에서 떨어질 때 물속 마찰력에 의해 포화된 상태에서 갖는 운동에너지와 같은 에너지로 지면에 떨어지게 하는 공기중 높이를 계산한 수치다.

3.2 HVDC 케이블 실험 데이터 수집

실험군은 투척물 종류, 주요와 투묘의 차이 및 이격 거리에 따른 진동 신호 특성을 분석하기 위한 구성을 포함한다. Table 3은 실험의 구성 조건과 데이터 수집 정보를 나타낸다. Exp1부터 Exp22까지 나열한 실험 조건은 주요/ 투묘, 보호설비, 닻 종류 및 데이터 수집 상태로 구분된다. DAS1과 DAS2에 해당하는 열은 데이터 수집 여부 및 이격거리를 표기한다. Direct는 직

Table 3. Details of experiments setup and conditions.

| Exp. index | Drop /Drag | Safety facilities | Anchor type | DAS1 | DAS2 |
|------------|------------|-------------------|--------------|-----------------|--------|
| Exp1 | Drop | Stone bag | Stock | Direct | Far |
| Exp2 | Drop | Stone bag | Stock-less | Direct | Far |
| Exp3 | Drop | Stone bag | Stow-nets | Direct | Far |
| Exp4 | Drop | Stone bag | Stow-nets | Direct (2m far) | Far |
| Exp5 | Drop | Stone bag | Rocket | Direct | Far |
| Exp6 | Drop | Rock-berm | Smack anchor | Far | Direct |
| Exp7 | Drop | Rock-berm | Stock | Far | Direct |
| Exp8 | Drop | Rock-berm | Stock-less | Far | Direct |
| Exp9 | Drop | Rock-berm | Stow-nets | Far | Direct |
| Exp10 | Drop | Rock-berm | Rocket | Far | Direct |
| Exp11 | Drop | Laying | Smack anchor | Direct | Lost |
| Exp12 | Drop | Laying | Stock | Direct | Lost |
| Exp13 | Drop | Laying | Stock-less | Direct | Far |
| Exp14 | Drop | Laying | Rocket | Direct | Far |
| Exp15 | Drop | Laying | Stow-nets | Direct | Lost |
| Exp16 | Drop | Laying | Stow-nets | Direct (2m far) | Far |
| Exp17 | Drag | Stone bag | Stock | Direct | Far |
| Exp18 | Drag | Stone bag | Stock-less | Direct | Far |
| Exp19 | Drag | Stone bag | Stow-nets | Direct | Far |
| Exp20 | Drag | Rock-berm | Stock | Far | Direct |
| Exp21 | Drag | Rock-berm | Stock-less | Far | Direct |
| Exp22 | Drag | Rock-berm | Stow-nets | Far | Direct |

접 투묘한 위치의 케이블을 통해 데이터 수집한 경우를 의미한다. Far은 이격 거리에 위치한 케이블을 통해 데이터를 수집한 경우이다. Lost는 광케이블 유실로 데이터 수집되지 않은 경우를 나타낸다.

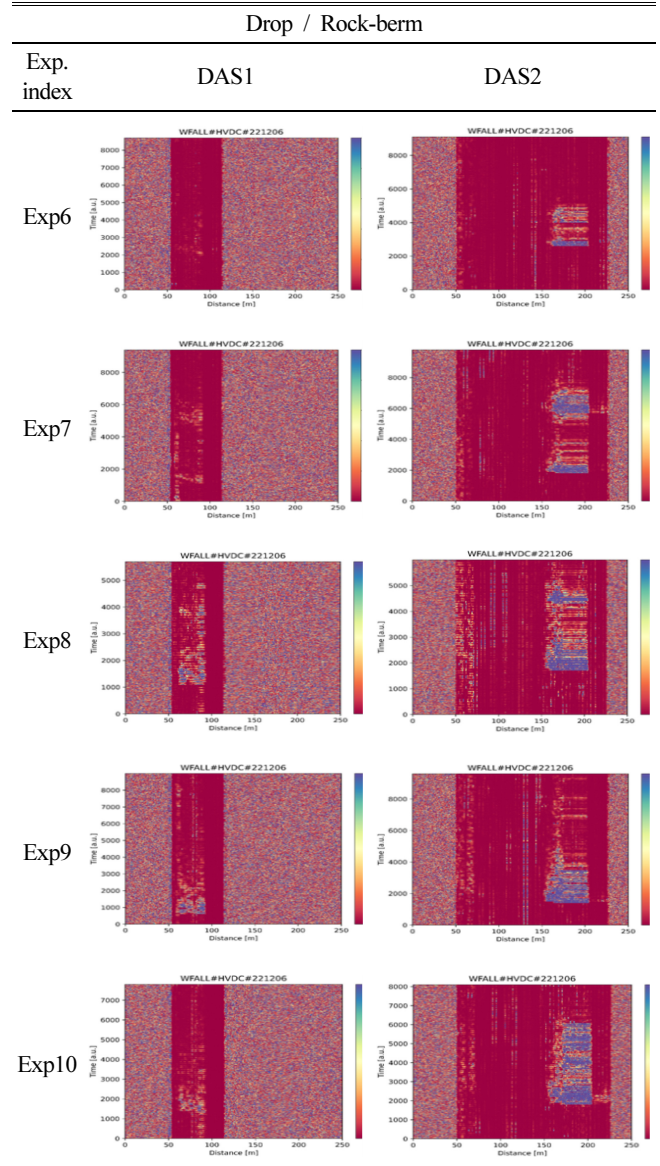
상황별로 데이터 수집하여 가시화를 수행한다. Table 4는 Exp6 부터 Exp10 투묘 실험 조건에서 수집한 데이터를 가시화한 결과다. 가시화 결과는 2D의 컬러맵(color map)으로 표현된다. 컬러맵의 x축은 거리를 y축은 시간을 의미한다. 색상은 진동의 세기를 표현하며 빨간색은 0 파란색은 10의 크기를 묘사한다. Table 5는 Exp20부터 Exp22의 주요 상황에서 수집된 DAS 데이터이다.

3.3 HVDC 케이블 실험 데이터 및 통계 결과

3.3.1 닻 종류에 따른 진동 신호 특성 분석

닻 종류에 따른 진동 신호의 발생 위치, 지속 시간 및 최대 크기 값을 분석한다. Fig. 11은 Exp1-Exp5까지의 시험 조건하에 DAS1으로 측정된 진동신호의 컬러맵 결과다. 스톤백 보호

Table 4. DAS data visualization for Exp6 – Exp10



시설 위로 서로 다른 닻으로 투묘했을 때 진동 분포 패턴을 볼 수 있다. Table 6은 진동 신호의 통계치를 보여준다. 어선 닻이 만든 진동은 76.6~91.2 m로 약 14.6 m 퍼지며 나머지 닻은 약 30 m 내외로 퍼진 것으로 확인된다. 이는 가장 작은 어선 닻을 제외하고는 30 m 가량 주어진 시험구간에서 진동신호가 관측된다는 것을 의미한다. 임계치가 넘는 진동 원이 발생하면 일대의 넓은 범위에 진동신호가 퍼진다는 것을 알 수 있다. 닻의 무게가 증가할수록 진동의 최대 크기가 증가하는 양상을 보인다. 상대적인 진동 크기를 비교하여 닻의 무게를 추정하는 것이 가능하다. 닻에 형태에 따라 진동의 지속시간이 달라진다는 것을 확인했다. 로켓포의 경우 한번 꽃히는 형태로 떨어지고 스톤리스의 경우는 낙하하여 지면에 충돌한 후 옆으로 넘어지는 이차 충돌이 발생한다. 이로 인해 진동 충격이 두번 발생하고 지속시간

Table 5. DAS data visualization for Exp20 – Exp22.

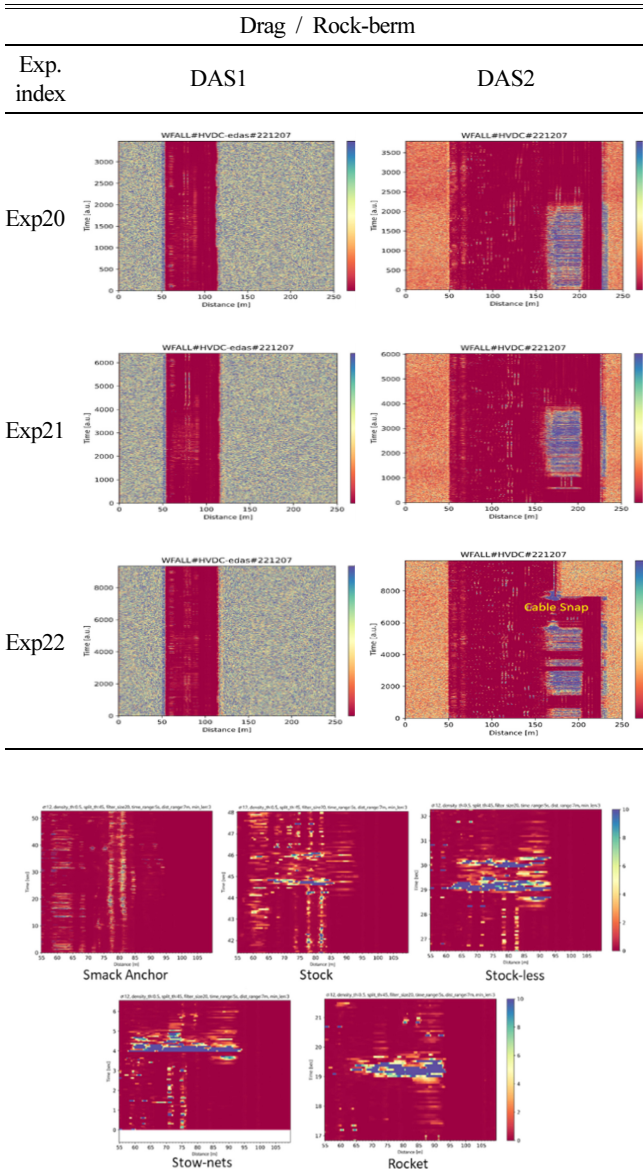


Fig. 11. DAS vibration measurement for five anchor types.

Table 6. Vibration statistics according to five anchor types

| Anchor type | Smack anchor | Stock | Rocket | Stow-nets | Stock-less |
|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Weight [Ton] | 0.18 | 0.61 | 0.8 | 1.6 | 2.1 |
| Location [m] | 76.6 ~91.2 | 56.5 ~88.3 | 61.0 ~91.6 | 58.9 ~91.4 | 60.0 ~91.8 |
| Duration [sec] | 0.2 | 2.6 | 0.8 | 1.0 | 2.2 |
| Max intensity [a.u.] | 28 | 335 | 545 | 912 | 930 |

이 로켓포 대비 2배 이상 길게 관측되었다.

Fig. 12는 안강망, 스톡, 스톡리스 및 로켓포에 따른 진동의

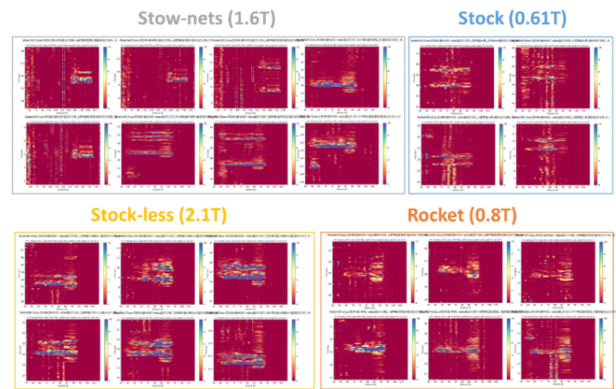


Fig. 12. Vibration pattern categories for four anchor types.

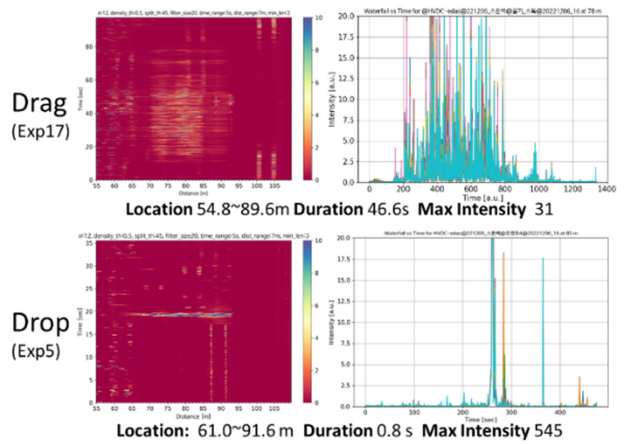


Fig. 13. Spatial-time graph, time-series graph, and vibration statistics for drag and drop event.

분포를 모아 놓은 그림이다. 여러 차례 시험한 데이터 중 닷의 종류를 기준으로 엮었다.

그림을 통해 닷의 종류 별로 진동이 퍼지는 패턴이 다른 점을 확인할 수 있었다. 로켓포의 경우 강한 진동 충격이 발생한 후 국소 부위에 잔여 진동이 남는 패턴을 보인다. 안강망, 스톡 및 스톡리스는 닷이 넘어지는 형태, 넘어지는 시간간격 및 잔여 진동 패턴으로 구분된다.

3.3.2 주묘와 투묘에 따른 진동 신호 특성 분석

주묘 및 투묘 이벤트에 대한 진동 신호의 발생 위치, 지속 시간 및 최대 크기 값을 분석한다. Fig. 13은 스톡백 보호시설에서 주묘 및 투묘 실험한 결과의 시간-거리 컬러맵, 시계열 그래프 및 진동 통계 결과다. 주묘 이벤트의 진동 신호는 최대 크기 31로 46.6초간 지속되었다. 투묘 이벤트의 진동 신호는 최대 크기 545로 0.8초 지속되었다. 주묘와 투묘 이벤트가 발생하는 진동은 최대크기와 지속시간에서 크게 구분되는 차이를 보인다. 주묘 신호는 상대적으로 작은 크기로 길게 지속되는 특성을 보인다. 투묘 신호는 상대적으로 큰 크기로 짧은 충격으로 나타난다.

Table 7. Vibration statistics according to distances from the location of event occurrence.

| Anchor type | Stock (0.61T) | | Stock-less (2.1T) | | Stow-nets (1.6T) | |
|-----------------|-----------------|---------------|-------------------|---------------|------------------|---------------|
| | DAS2 | DAS1 | DAS2 | DAS1 | DAS2 | DAS1 |
| Location [m] | 150.6 ~204.9 | 56.8 ~91.2 | 144.4 ~204.0 | 61.2 ~90.6 | 154.5 ~203.0 | 56.5 ~90.0 |
| Duration [sec] | 92.7 | 96.8 | 128.8 | 130.3 | 388.7 | 388.2 |
| Max int. [a.u.] | 1100 | 18 | 1210 | 37 | 3100 | 18 |

Table 8. Vibration statistics of four trials of Exp3 (Stone bag/stow-nets/drop).

| Trial | DAS1/DAS2 | Location [m] | Duration [sec] | Max int. [a.u.] |
|-------|-----------|--------------|----------------|-----------------|
| 1 | DAS1 | 60.0~91.2 | 3.9 | 1589 |
| | DAS2 | 152.9~202.2 | 0.9 | 119 |
| 2 | DAS1 | 58.9~91.4 | 1.0 | 912 |
| | DAS2 | 156.1~202.2 | 0.6 | 289 |
| 3 | DAS1 | 59.8~91.2 | 3.9 | 1120 |
| | DAS2 | 152.6~202.2 | 3.6 | 147 |
| 4 | DAS1 | 56.9~92.0 | 1.1 | 1109 |
| | DAS2 | 153.3~202.2 | 0.6 | 119 |

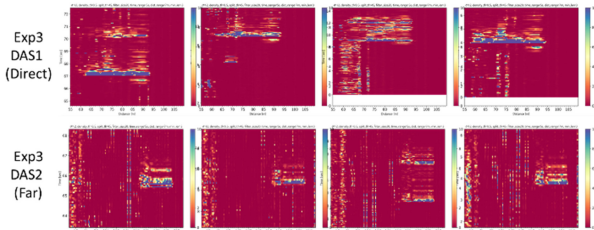


Fig. 14. Spatial-time graphs for four times trials of Exp3.

3.3.3 이격 거리에 따른 진동 신호 특성 분석

이격 거리에 따른 진동 신호의 특성을 분석한다. 실제 환경에서 이벤트가 광섬유 위에서 발생하는 경우는 드물다. 떨어진 지점에서 발생한 진동 이벤트가 DAS에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다. DAS로부터 계속된 진동 신호를 통해 이벤트와 광섬유사이의 거리를 추정할 수 있는지 가능성을 검토한다. Table 8은 Table 6의 Exp20-22의 DAS 측정에 대한 진동 통계 결과이다. Table 6에서는 거리-시간 컬러맵 그래프를 통해 이격 거리가 DAS 계속에 미치는 영향을 파악할 수 있다. 직접 타격한 위치에서 측정된 DAS2는 선명한 주요 신호라고 확인된다. 반면 14m 이격된 위치의 광섬유로 측정된 DAS1의 데이터는 진동신호가 희미하다. Table 7은 육안으로 확인한 결과를 정량적으로 보여준다. 이격 거리에 따른 지속시간의 차이는 보이지 않는다. 진동 세기는 큰 차이를 보인다. 14m 이격 거리에서 측정된 진동의 세기는 4~50배 가량 작은 크기를 보인다. 이격 거리를 판단하기 위해서는 진동의 감쇠 특성 정도를 분석하는 것이 필요하다는 것을 알 수 있다.

한 가지 주목할 점이 있다. Exp 22 조건인 안강망의 주요 실험 중 DAS2로 계속중인 광섬유가 단선되는 현상을 관측하였다. 주요 과정에서 대지가 뒤틀리며 광섬유를 단선될 정도의 큰 변형을 야기시킨다는 것을 알 수 있다. 광섬유나 전력선의 단선을 야기하는 위해가 발생할 때 사전에 검출이 가능하다는 것을 보여준다.

Fig. 14와 Table 8은 Exp3조건에서 수행한 4차례 시험의 거리-시간 컬러맵과 진동 통계 결과다. Exp3은 스톤백 보호설비에 안강망을 투묘한 실험 조건이다. 4차례의 시험을 통해 투묘 상황에서 이격 거리에 따른 진동 신호의 특성을 분석한다. 진동

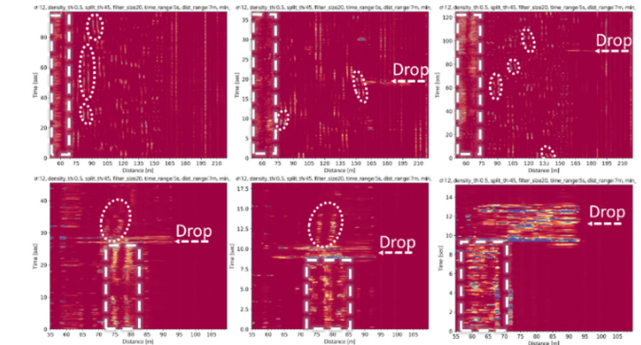


Fig. 15. Vibration signals from works, walks, and driving around the experiment site.

발생 구간은 직접 타격 시 약 33m이고 이격 거리에서는 약 50 m이다. 진동은 직접 타격한 곳에서 이격 거리로 이동하며 진동은 20m 퍼진다는 것을 알 수 있다. 지속 시간은 직접 타격 시 1초 이상 3.9초 이하까지 발생하며 이격 거리에서는 대부분 1초 이내로 관측된다. 지속 시간이 줄어든 원인 Fig. 15의 진동 컬러맵을 통해 알 수 있다. 짧은 지속 시간을 보일 때 관측한 진동 분포에서 안강망이 떨어지며 발생하는 두차례 충격 중 2차 충격이 이격 거리에서 관측되지 않는다. 이를 통해 두 차례 충격이 전파되면서 상대적으로 약한 2차 충격은 소멸되는 경우가 있다는 것을 알 수 있다. 이격 거리 지점에서 진동의 최대 크기는 14m 이격 거리에서 약 10배정도 감쇄된 크기다.

3.3.4 주변 작업에 따른 진동 신호 특성 분석

HVDC 케이블 및 보호설비 실규모 시험을 통해 작업 현장에서 발생하는 진동을 관측했다. Fig. 15는 시험 현장에서 발생하는 투묘, 기계 작업, 차량 이동 및 인력 이동에 대한 진동신호 관측 결과의 거리-시간 컬러맵 그래프다. 화살표는 투묘 신호를 가리킨다. 사각형 점선 박스는 기계 소음을 나타낸다. 원형 점선 박스는 차량 이동 및 인력 이동을 묘사한다. DAS 시제품을 통해 HVDC 케이블 주변 및 해안의 육지 지중구간에서 발생하는 작업 진동 및 차량이동을 파악할 수 있다는 점을 보여준다.

3. 결 론

본 연구에서는 해저 HVDC케이블의 상태 모니터링 및 품질을 진단하기 위하여 분포형 광섬유 음향 센서(DAS)를 적용한 결과를 보고하였다. 자체 개발한 DAS는 광원, 광학계, 광검출부 및 데이터 처리부로 구성되어 있으며, 시제품은 19인치 랙 거치형 케이스 크기로 제작되었다. 하드웨어 성능으로서 중심파장, 선폭, 펄스폭, 광증폭률, 증폭률 및 대역폭 등을 평가하였으며, 개발된 DAS의 최대측정 거리는 50 km, 거리 측정 간격은 2 m 및 측정 반복률은 1 kHz의 성능을 보였다.

HVDC 해저케이블 및 보호설비를 손상시킬 수 있는 상황을 규정하고 실험을 통해 각 상황별 진동 및 음향신호 특성을 확인하고 모니터링효과를 검증하기 위해 실증 시험을 수행하였다. 고창전력시험센터에 구성된 HVDC 해저 케이블 실규모 시험설비를 통해 닻의 종류에 따라 진동 신호의 세기, 넘어지는 형태에서 파생되는 진동 충격 횟수, 시간간격 및 잔여 진동의 패턴이 달라진다는 것을 확인하였다. 주요 신호는 투묘 신호대비 지속시간이 길고 작은 충격 크기를 갖는다. 14 m 떨어진 곳에서 관측한 진동은 인근에서 발생한 진동신호 대비 크기가 10배 가량 줄어들고 넓은 범위로 퍼진다는 것을 확인했다. 마지막으로 주변 공사 작업, 차량 및 인력 이동에 따른 진동 신호를 검출할 수 있었다.

결과적으로 개발한 DAS를 통해 해저 및 육지의 지중 구간에 매설된 전력선과 광케이블에 가해지는 진동 외력을 검출할 수 있음을 보였다. 투묘 및 주묘의 이벤트를 감지하고 닻의 종류를 구분할 수 있는 가능성을 보였다. 이 기술의 의의는 선박 신호, 투묘, 주묘, 지진 및 기타 공사작업을 인지하고 훼손을 예방하여 유지관리 할 수 있다는 점이다.

향후 서비스 개발을 위해 실제 해저에 실증, 데이터 수집, 이벤트 분류 알고리즘에 대한 연구가 필요하다. 실제 해저 상황에서 발생하는 신호의 패턴을 파악하는 것이 필요하다. 다양한 해저 이벤트 상황에서 데이터 정제 및 라벨링을 통해 학습된 데이터 세트를 구축하는 과정은 HVDC 케이블 및 보호설비의 정밀한 품질진단을 위한 실시간 모니터링 서비스 및 인공지능 기반 이벤트 분류 알고리즘 개발을 가능하게 할 것이다.

감사의 글

이 논문의 시험결과는 한국전력공사 전력연구원의 재원 (과제명: 장거리 광통신망 품질진단 타당성 연구)으로 고창전력시험센터 HVDC 실증 시험장의 지원을 받아 수행 되었음.

이 논문의 DAS 시제품 개발 2023년도 정부 (과학기술정보통신부, 행정안전부)의 재원으로 정보통신기획평가원 (ICT융합산업혁신기술개발사업)과 한국 산업기술평가관리원 (사회복합재난 대응기술 개발사업)의 지원을 받아 수행되었음 (No. 1711193517, 1315001760).

REFERENCES

- [1] D. Valenza and G. Cipollini, "HVDC submarine power cable systems-state of the art and future development", *IEEE Catalogue*, Vol. 1, pp. 283-287, 1995.
- [2] T. Kwon, W. Kim, S. Yoo, H. Lim, and H. Jeong, "Study for Maintenance of HVDC Submarine Cable", *Proc. 2002 KIEE Summer Conf.*, pp. 557-559, 2002.
- [3] Y. L. Lu, T. Zhu, L. A. Chen, and X. Y. Bao, "Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR", *J. Lightw. Technol.*, Vol. 28, No. 22, pp. 3243-3249, 2010.
- [4] H. Wu, Y. Qian, W. Zhang, and C. Tang, "Feature extraction and identification in distributed optical-fiber vibration sensing system for oil pipeline safety monitoring", *Photonic Sens.*, Vol. 7, No. 4, pp. 305-310, 2017.
- [5] C. Du, S. Dutta, P. Kurup, T. Yu, and X. Wang, "A review of railway infrastructure monitoring using fiber optic sensors", *Sens. Actuators A-Phys.*, Vol. 303, p. 111728, 2020.
- [6] L. Kirkcaldy, J. Pilgrim, R. Rogers, and G. Lees, "Distributed Acoustic Sensing of Partial Discharge: Initial Findings", *10th Int. Conf. Insulated Power Cables*, pp. 1-6, 2019.
- [7] A. Lv and J. Li, "On-line monitoring system of 35 kV 3-core submarine power cable based on Φ -OTDR", *Sens. Actuators A, Phys.*, Vol. 273, pp. 134-139, 2018.
- [8] X. Chen, N. Zou, Y. Wan, Z. Ding, C. Zhang, S. Tong, Y. Lu, F. Wang, F. Xiong, Y. Zhang, and X. Zhang, "On-line status monitoring and surrounding environment perception of an underwater cable based on the phase-locked Φ -OTDR sensing system", *Opt. Express*, Vol. 30, pp. 30312-30330, 2022.
- [9] T. Parker, S. V. Shatalin, M. Farhadiroushan, Y. I. Kamil, A. Gillies, D. Finfer, and G. Estathopoulos, "Distributed Acoustic Sensing - A New Tool for Seismic Applications", *Proc. of 74th EAGE Conf. Exhib.*, pp-293-00801, 2012.