

## 교량 케이블 적용 강연선 모니터링을 위한 음향방출 기법 검토

김가영<sup>1</sup>, 서동우<sup>2\*</sup>

### Application of Acoustic Emission Technique for Bridge Cable Monitoring

Ga-Young Kim<sup>1</sup>, Dong-Woo Seo<sup>2\*</sup>

**Abstract:** This paper presents the assessment of 7-wire strand monitoring using acoustic emission technique for bridges. 7-wire strand is widely used construction materials to provide additional tensile force to bridges. PSC (PreStressed Concrete) bridge and cable-stayed bridge are representatives for such cases. However, as the bridge aging progresses recently, corrosion problems of strand are emerging. For this reason, various NDT (Non-Destructive Test) methods for cable inspection are being studied and applied to the field. One of the NDT methods, acoustic emission technique, is known as an effective technique to detect cable damage and breakage. In this study, to evaluate the applicability of acoustic emission technique to bridges, acoustic emission signals according to damage of the strand were acquired and analyzed by tensile test. Moreover, The optimal AE sensor type was selected for field application. As a result, it is considered that the acoustic emission technique will be able to detect corrosion breakage and signs of rupture.

**Keywords:** 7-wire strand, Monitoring, Acoustic emission, Cable stayed bridge

## 1. 서론

우리나라는 1970년대부터 시작된 건설 활성화의 영향으로 현재 시설물의 급격한 노후화가 진행되고 있는 추세이며, 이에 따른 유지관리 비용도 급증할 것으로 예상된다. 현재 시설물의 안전 확보는 안전점검 및 정밀안전진단을 통하여 관리하고 있다(KISTEC, 2016). 또한, 현장조사 및 각종 시험에 의해 시설물의 물리적, 기능적 결함 검출과 내재되어 있는 위험요인을 발견하고, 이에 대해 신속하고 적절한 보수·보강 방법 및 조치방안 등을 제시하고 있다. 하지만, 2016년 발생한 정릉천 고가 텐던 파단 사고에서 확인할 수 있듯이 비파괴 방법을 활용하여 현재의 안전점검 및 진단방법을 보완할 필요가 있다(Fallis and Peeler, 2009; DaSilva, et al., 2009).

비파괴검사 방법의 일종인 음향방출(Acoustic Emission: AE) 기법은 인위적인 충격을 가하거나 강재의 파단에 의해 발생하는 음파를 AE센서로 감지하고, 발생 위치에서 측정위치의 도달시간을 이용하여 음원의 위치를 파악할 수 있는 방법이다(FHWA, 2013; Colony et al., 2016). AE기법은 교량

의 안전성 상태 평가를 목적으로 강연선의 부식 정도와 파단 위치를 파악하기 위하여 적용 가능한 방법이다. 한국콘크리트학회(KCI, 2006)에서는 프리스트레스 콘크리트 교량의 텐던 파단의 조사방법 및 교량의 안전성 평가기술 개발을 목적으로 AE기법을 적용한 연구를 수행하였다. 이 보고서(KCI, 2006)에서는 텐던의 파단 및 부식의 진행상황, 음파전달속도에 의한 긴장재의 파단위치 추적, 장기적인 모니터링시스템 기술의 구축 등이 가능한 것으로 기술하고 있다. 현재 해외에서는 PSC 교량 및 특수교(사장교, 현수교 등) 케이블 등에 적용 가능한 가장 유효한 방법으로 평가되고 있다. 따라서 본 연구에서는 음향방출 기법을 이용하여 교량 케이블 안전관리를 위한 적용 가능성을 실험적으로 검토하였다.

## 2. AE 센서 원리

AE 기법은 인위적인 충격을 가하거나 강재의 파단에 의해 발생하는 음파를 감지는 원리로 작동하며, AE 센서의 검출소자는 PZT(티탄산지르콘산염)가 주로 사용된다. PZT 등의 압전 재료는 힘을 가하면 전하를 발생시키는 특성을 가지고 있어, 금속 등 표면을 통해 전파된 AE파가 AE 센서 내부의 PZT에 전달되고, PZT의 변형에 의해 전기 신호로 변환되는 원리로 작동한다. AE 센서는 검출 소자(PZT)의 기계적 공진을 이용해서 신호를 검출하게 된다. 실제 사용시의 AE 센서는 부차

<sup>1</sup>정회원, 한국건설기술연구원 박사후연구원

<sup>2</sup>정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원, 교신저자

\*Corresponding author: dwseo@kict.re.kr

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), Goyang, 10223, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 8월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

면에 고정되기 때문에 PZT의 공진 주파수는 일단고정 공진이 되며, 식 1과 같이 구할 수 있다.

$$f = \frac{c}{4l} \quad (1)$$

여기서,  $l$ 은 길이,  $c$ 는 음속이다.

일반적으로 AE 센서의 감도-주파수 특성은 반 무한의 크기를 가진 철 블록에 부착한 상태로 순수한 종파 또는 표면파로 측정한다. 그러나 실제 계측 대상은 유한의 크기이며 그 단면에서 반사된 AE파가 복잡하게 뒤섞이고, 그 파형은 AE 센서에 첨부된 주파수 특성 데이터와 같지 않은 경우가 많다.

AE 센서의 부착 방법은 그 검출면이 부착면이 되기 때문에 부착면에 접촉 매질(그리스 등)을 바르고 센서는 테이프로 고정하거나 핫 멜트(Hot melt) 또는 접착제로 직접 부착하는 경우도 있으며, 마그네틱식 홀더와 접착고정식 홀더를 이용하여 고정하는 방법도 있다. 부착이 곤란한 현장에서 사용하기 위해 센서의 형상을 변경 설계하여 만든 플랜지형이나 나사 부착형 센서도 활용된다.

### 3. 실험 계획

#### 2.1 실험 준비

AE센서에 의한 케이블 점검 방법의 성능 검증을 위해 실제 교량에 주로 사용되는 직경 15.2mm 강연선을 정상, 부식, 기계적 손상 상태로 구분하여 시편을 제작하였다.

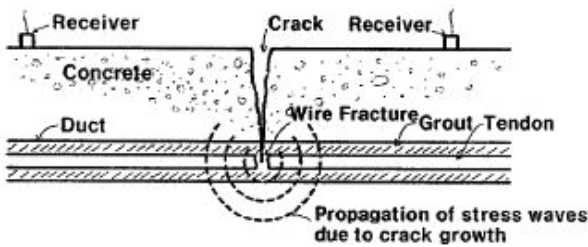


Fig. 1 Concept of acoustic emission (KCI, 2006)



Photo 1 Mechanical damage of 7-wire strand using milling machine

각 시편은 KS D 7002 규격에 따른 동일계강 제품을 사용하였으며, 부식 강연선의 단면 결손량은 약 0.2%~1.3%로 상대적으로 부식의 진전이 적은 시편을 대상으로 실험을 수행하였다.

또한 강연선의 국부적 손상을 모사하기 위하여 Photo 1과 같이 밀링머신을 사용하여 기계적인 손상을 1개 와이어에 인가하였다. 강연선 시편 종류 및 특성은 Table 1과 같다.

Table 1 Specimen description for tensile experiments

Case No.	Damage description	Quantity
1	No damage	2 EA
2	Light corrosion or pitting	2 EA
3	Mechanical damage	2 EA

Table 2 AE sensor types and characteristics

Location	Channel	AE sensor frequency characteristics
Upper grip	2	30 kHz resonance type
	4	1,500 kHz resonance type
	6	60 kHz resonance type
	8	Wideband type
Lower grip	1	30 kHz resonance type
	3	1,500 kHz resonance type
	5	60 kHz resonance type
	7	Wideband type

Table 3 Sensor and DAQ information

No.	Name	Model	Specification
1	AE sensor	Resonance type	Frequency range: 100~1000 kHz Size: 19×21 mm Connector: BNC Resolution: 55 dB Temperature range: -65 ~ 175°C
			Frequency range: 30, 60, 1500 kHz Size: 19×22 mm Connector: BNC Resolution: 80dB Temperature range: -65 ~ 175°C
2	Wideband		
3	DAQ board		AE input channel: 8 ea Frequency response: 1 kHz~10 MHz Sample Rate: Computer selectable 100 kS/s ~ 40 MS/s Dynamic Range: >85 dB
4	AE signal acquisition	PC	CPU: Intel Quad i5-3570 Memory: 8 GB OS: Win7 Pro 64bit
5	Analysis S/W:	AE-Win	AE signal real time monitoring and post-processing analysis

본 연구에서는 최적의 AE센서 선정을 위하여 공진형 센서 3가지 종류(30, 60, 1500 kHz)와 광대역 형 1개를 적용하여 강연선의 인장 실험을 수행하였고, 적용된 AE 센서의 주파수 특성 및 데이터 수집 장비의 상세 내용은 Table 2~3과 같다.

## 2.2 인장 실험 수행

실내 인장실험은 한국건설기술연구원 구조실험동의 100 ton UTM (Universal Testing Machine)을 사용하여 수행하였다. 실험 세팅은 썬치가 포함된 상부 모노콘과 하부 모노콘 사이의 거리가 1,208mm, 상부 이동 지지대와 하부 고정 지지대 사이가 1,000mm로 세팅하였다. 강연선에 적용 가능한 AE 센서 주파수 특성을 파악하기 위하여 Table 2와 같이 4가지 유형의 센서를 상하부 각각 Photo 2와 같이 부착하여 데이터를 취득하였다.

실험 시작전 강연선을 고정하는 썬치의 정착강도를 높이기 위해 50 kN을 인가한 후 하중을 제거한 후 변위제어로 초당 0.04 mm의 속도로 하중을 인가하였다.

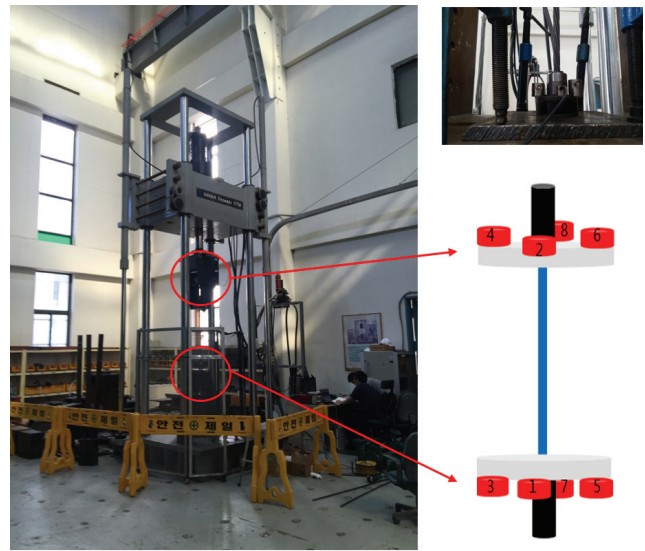
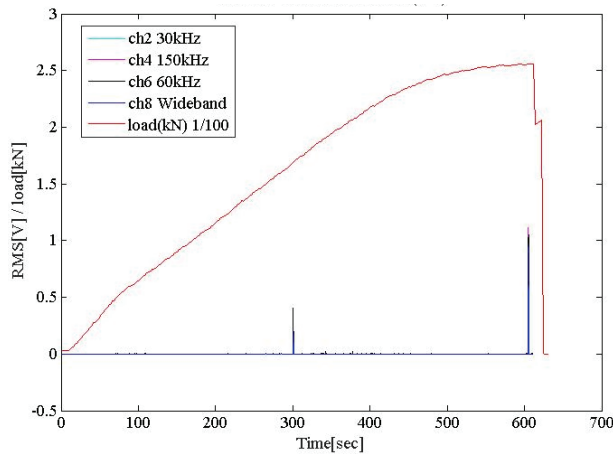
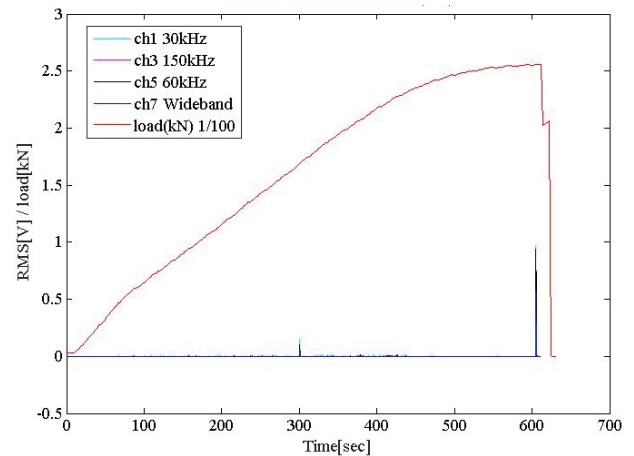


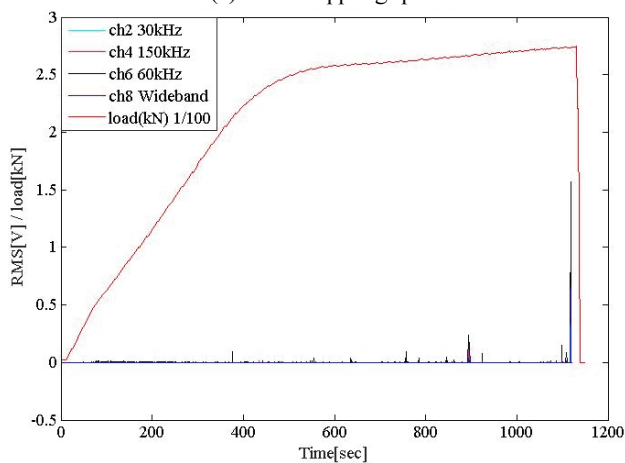
Photo 2 AE sensor location for tensile experiment



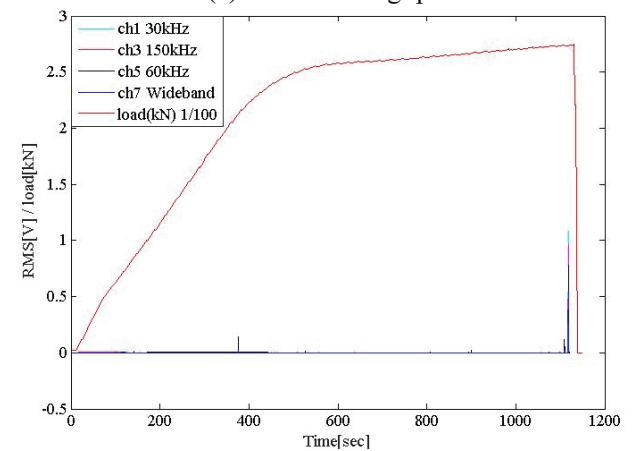
(a) Case 1-upper grip



(b) Case 1-lower grip

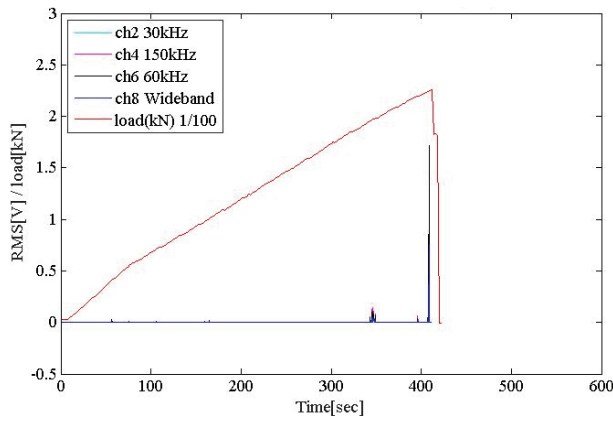


(c) Case 2-upper grip

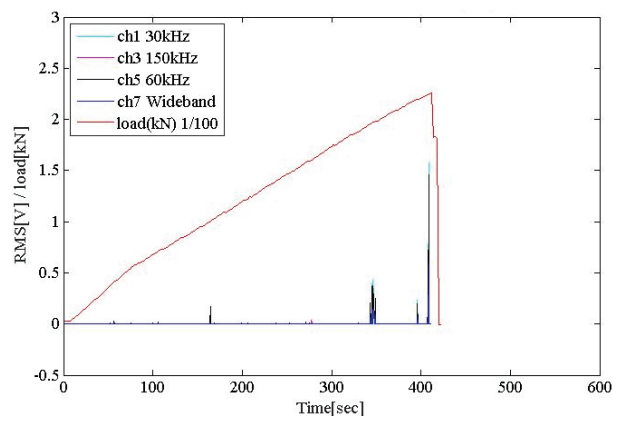


(d) Case 2-lower grip

Fig. 2 Experiment results : Time vs AE signal activity (continue)



(e) Case 3-upper grip



(f) Case 3-lower grip

Fig. 2 Experiment results : Time vs AE signal activity

### 3. 실험결과 및 분석

실내 인장 실험을 통하여 Table 1과 같은 3가지 실험체의 손상 유형에 따른 AE 신호 특성을 확인하였다. 본 결과를 토대로 현장에 적용할 수 있는 AE 센서 타입을 결정하고 강연선 파단 등의 손상 탐지 가능성을 확인하였다. 실험 결과는 강연선 시편의 파단에 따른 AE 신호 정보의 크기 및 위치를 파악하기 위하여 Fig. 2와 같이 시간에 따른 AE 신호의 크기로 그래프를 도출하였다. 모든 경우에서 60 kHz 공진형 및 광대역형 센서에서 신호 특성이 상대적으로 명확하였다(Fig. 2).

정상 시편(Case 1)의 경우 상·하부 AE 신호의 경우 약 300초 부근 하중이 150kN으로 상승하는 구간에서 파단 이전의 전초 AE 신호가 발생하는 것을 확인하였다. 이를 통하여 항복 하중에 근접하면서 AE 신호가 발생하는 것을 추정된다.

부식 시편(Case 2)의 경우 상·하부 AE 신호의 경우 하중 약 200~260kN로 변화하는 구간에서 파단 이전 전초 AE 신호가 다수 발생하였다. 하부보다 상부에서 파단 이전의 전초 신호가 다수 발생하는 것을 볼 때 하부보다는 상부의 시편에서 내부 미세 균열이 다수 발생된 것으로 추정된다. 또한 부식 시편의 경우 항복이후에 소성 구간이 정상시편에 비해 길게 발생하였는데, 이에 대한 보다 면밀한 분석이 필요할 것으로 사료된다. 본 연구에서 사용된 부식 시편의 부식 정도가 단면 결손량 1.3% 미만으로 의미 있는 결과를 도출하기에 부족하였고 판단된다. 향후 부식의 단계를 파단 직전의 경우까지 제작하여 실험할 필요가 있다고 사료된다.

기계적 손상(Case 3) 시편의 경우 상·하부 AE 신호의 경우 하중 50kN ~ 200kN 변화 구간에서 파단 이전 전초 AE 신호가 다수 발생하였고, 하부의 경우 약 350초 부근에서 약 0.5[V] 정도로 타 시편에 비해 전초 신호 중 가장 큰 신호 특성이 확인되었다.

### 4. 결론

교량에 사용되는 강연선 시편을 정상, 부식, 기계적 손상으로 구분하여 인장실험을 수행한 결과 하중의 증가에 따른 AE Activity가 시편에 따른 특성을 가지면서 구분이 됨을 확인하였다.

신호 분석 결과 상·하부 부근에 설치한 AE 센서에서 파단 이전 전초 신호가 발생되고 신호 Level은 약 0.2[V] 정도(하중 변화 상승 구간), 파단시점에는 Background 신호 대비 약 10배 이상의 1.1~1.6[V]의 큰 신호 Level이 확인되었다.

실제 시편 실험 결과, 시편 별 파단 시점이 기계적 손상> 정상→부식 순으로 짧았으며, 이는 이론적으로 볼 때 정상 시편이 파단까지 걸리는 시간이 길 것으로 생각되는 의견과 차이가 있었다. 부식은 표면 부식으로 정상 시편 대비 단면적이 커진 상태로 동일한 하중 조건일 때 단면적에 따른 하중 분산으로 부식의 경우가 파단까지 오래 걸리는 것으로 추정된다. AE 주파수 특성을 볼 때 인장 실험 결과 기준으로 광대역 및 60kHz의 공진형 센서를 선정하는 것이 좋을 것으로 판단하였다. 따라서 본 연구에서 강연선 모니터링에 가장 적합한 것으로 선정된 60 kHz의 공진형 센서를 활용하여 강연선이 주로 적용되는 사장교 또는 PSC 교량에 적용하여 AE센서를 활용한 교량 케이블 모니터링 가능성을 평가할 예정이다.

### 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원에서 지원하는 주요사업(20180478-001)의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Colony, C., Rogers, D., Nims, D. and Bradley, J. (2016), Investigation, Proposed Rehabilitation and Application of a Corrosion Sensor to the Anthony Wayne Bridge Suspension Cables, International Cable Supported Bridge Operator's Conference, Halifax, Canada,
- DaSilva, M., Javidi, S., Yakel, A. and Azizinami, A. (2009) Nondestructive method to detect corrosion of steel element in concrete, The Nebraska Department of Roads, USA.
- Fallis, G. and Peeler, M. (2009), Non destructive detection of fractures in prestressed and post-tensioned cables," PTI Journal.
- Federal Highway Administration (2013), Corrosion monitoring research of New York City bridge, FHWA Publication No.: FHWA-HRT-14-024, December.
- Korea Concrete Institute (2006), Development of acoustic emission techniques for preventing sudden collapse of prestressed concrete bridges, Final report, 14-43.
- Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation (2016), Cable inspection and damage cases of cable supporting bridges.

Received : 05/10/2018

Revised : 06/04/2018

Accepted : 06/30/2018

---

**요 지** : 본 연구에서는 음향 방출 기법을 사용하여 강연선(7-wire strand)의 손상을 감지하기 위한 기초 실험을 수행하였다. 강연선은 주로 교량에 추가적인 인장력을 제공하기 위해 널리 사용되는 건설 자재이다. 프리스트레스 교량 또는 사장교가 대표적인 경우이다. 그러나 교량 노화가 급격히 진행되면서 강연선 부식 문제가 대두되고 있다. 이러한 이유로 케이블 점검을 위한 다양한 비파괴 방법이 연구되고 있고 현장 적용이 시도되고 있다. 비파괴 방법 중 하나인 음향 방출 기법은 케이블 손상 및 파단을 감지하는 효과적인 기술로 알려져 있다. 본 연구에서는 음향 방출 기법의 교량에 대한 적용 가능성을 평가하기 위해 강연선의 손상에 따른 음향 방출 신호 특성을 인장 실험을 분석하고, 현장 적용을 위한 최적 센서 주파수 타입을 선정하였다. 결과적으로, 음향 방출 기법을 활용하여 향후 교량 케이블의 부식 파단 및 파단 징후를 감지할 수 있다고 여겨진다.

**핵심용어** : 강연선, 모니터링, 음향방출, 사장교

---