

AE기법을 이용한 자기애자의 손상 분석

최인혁¹, 신구용¹, 임윤석¹, 구자빈¹, 손주암¹, 임대연², 오탈근^{2,3} , 윤영근² 

¹ 한국전력공사 전력연구원

² 인천대학교 안전공학과

³ 인천대학교 공학기술연구소

Analysis on Damage of Porcelain Insulators Using AE Technique

In-Hyuk Choi¹, Koo-Yong Shin¹, Yun-seog Lim¹, Ja-Bin Koo¹, Ju-Am Son¹, Dae-Yeon Lim²,
 Tae-Keun Oh^{2,3}, and Young-Geun Yoon²

¹ Korea Electric Power Corporation (KEPCO) Research Institute, Daejeon 34056, Korea

² Department of Safety Engineering, Incheon National University, Incheon 22012, Korea

³ Research Institute for Engineering and Technology, Incheon National University, Incheon 22012, Korea

(Received January 20, 2020; Revised February 12, 2020; Accepted February 24, 2020)

Abstract: This paper investigates the soundness of porcelain insulators associated with the acoustic emission (AE) technique. The AE technique is a popular non-destructive method that measures and analyzes the burst energy that occurs mainly when a crack occurs in a high-frequency region. Typical AE methods require continuous monitoring with frequent sensor calibration. However, in this study, the AE technique excites a porcelain insulator using only an impact hammer, and it applies a high-pass filter to the signal frequency range measured only in the AE sensor by comparing the AE and the acceleration sensors. Next, the extracted time-domain signal is analyzed for the damage assessment. In normal signals, the duration is about 2ms, the area of the envelope is about 1,000, and the number of counts is about 20. In the damage signal, the duration exceeds 5ms, the area of the envelope is about 2,000, and the number of counts exceeds 40. In addition, various characteristics in the time and frequency domain for normal and damage cases are analyzed using the short-time Fourier transform (STFT). Based on the results of the STFT analysis, the maximum energy of a normal specimen is less than 0.02, while in the case of the damage specimen, it exceeds 0.02. The extracted high-frequency components can present dynamic behavior of crack regions and eigenmodes of the isolated insulator parts, but the presence, size, and distribution of cracks can be predicted indirectly. In this regard, the characteristics of the surface crack region were derived in this study.

Keywords: Porcelain insulator, Acoustic emission, Damage detection, Highpass filter, Short time fourier transform

1. 서론

전력 수요는 현대의 산업발달, 기계시스템 자동화, 지구 온난화, 전기 자동차의 증가 등으로 인해서 급증하고 있다. 이러한 많은 양의 전력을 안정적으로 공급하기 위해 높은 전송 전압이 필요하며, 이로 인해 송전선로는 높은 수준의 절연이 요구된다. 절연체는 송전탑

✉ Tae-Keun Oh; tkoh@inu.ac.kr
 Young-Geun Yoon; y_young_geun@naver.com

Copyright ©2020 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.

에 송전선을 기계적으로 고정시키며, 전기적인 절연을 통한 송전선과 송전탑과의 절연간격을 확보하는 등 송전선로의 신뢰성 및 안전성을 유지하기 위한 핵심적인 역할을 담당하고 있다 [1].

국내의 154 kV 송전선로에 설치된 도자기 절연체는 약 120만 개 이상이며, 사용수명(30년) 이상 사용된 절연체는 약 80만 개로 전체의 65%에 해당된다 [2].

절연체는 사용수명을 넘어섰다고 해서 즉시 기계적 파손 또는 절연성능의 저하가 발생하지는 않지만, 지속적인 스트레스 환경에서 응력이 누적 및 열화에 의한 절연체의 노화가 진행됨에 따라 갑작스러운 파손이 발생할 수 있다. 이로 인해 송전선이 끊어지거나 추락하는 사고를 유발할 수 있으며, 도자기 절연체의 문제로 발생하는 정전 사고 등은 막대한 손실을 동반하기 때문에, 이를 사전에 방지하기 위한 신뢰성 높은 점검기술의 개발이 필요하다 [3,4].

절연체 손상을 식별하는 대부분의 기술은 전기적인 관점에서 절연체의 전기 절연 성능을 평가하는 데 중점을 두고 있다. 전기적 관점에서 절연저항 측정, 전계 측정, 부분방전 측정 [5-7] 등의 방법이 있으며 최근에는 적외선 측정, 항공 이미지 분석 및 3D-CT가 기계적인 측정을 위해 연구되고 있다 [8,9]. 그러나 상기 방법은 온도, 습도 및 태양 플럭스에 의해 측정 결과가 큰 영향을 받는다는 문제점이 있으며, 대부분 절연체의 전기적 손상 및 고장에만 초점을 맞추기 때문에 절연체의 기계적 손상을 식별하기는 어렵다.

따라서 본 연구에서는 미세한 기계적인 손상, 탈락 등의 식별이 가능한 음향방출(acoustic emission, AE) 기법이 적용되었다. AE 기법은 구조체에서 균열, 파손 등의 손상으로 발생하는 고주파 영역의 에너지 방출을 대상 구조물에 적합한 광대역 또는 공진형 센서를 통해 검출하며, 보편적으로 piezoelectric wafer active sensor (PWAS)를 이용하여 측정하는 방법이다. 이러한 AE 기법은 건축/토목 분야에서 구조물의 모니터링 [10], 제조업의 기계설비 분야에서 마모, 탈락 등의 검출 및 유지관리 [11], 재료에 대한 파괴 거동 [12] 등의 연구에 적용되고 있다. 그러나 일반적인 AE 기법은 지속적인 상시 모니터링과 센서를 보정, 검정해야 한다는 문제점을 가지고 있다. 본 연구는 자기애자의 표면 또는 내부에서 균열이 발생한 경우에 보통의 가속도 센서로 측정이 어려운 균열 및 파손 영역 등에서 발생하는 높

은 주파수 영역의 반응을 측정하기 위해서 AE 기법을 적용하였으며, 일반적인 AE 모니터링 기법이 아닌 외부 충격파 에너지에 의해 계측되는 손상영역에서의 발생신호를 통해 즉각적으로 정상과 손상을 판단하였다.

2. 실험 방법

2.1 음향방출법

AE는 물질에서 미세구조 변화에 따라 방출되는 동적 에너지를 의미한다 [10]. 예를 들어 동적 에너지는 기계적·열적 압력 및 화학적 힘을 사용하여 물질에 응력을 가함으로써 생성될 수 있다. 동적 에너지가 발생하는 지점을 AE 발생점이라고 말하며, 이러한 동적 에너지는 전파될 때 다양한 요인의 영향을 받으며, 영향을 주는 요소에는 전파 속도, 감쇠, 반사, 굴절, 불연속성 및 재료의 형상이 포함된다. 또한, 동적 에너지의 전파 속도는 파동 유형, 재료 특성 및 주파수에 따라 다르다. AE 기법은 그림 1과 같이 동적 에너지가 표면에도달하면 진동이 발생하고 진동을 측정하는 방법이다.

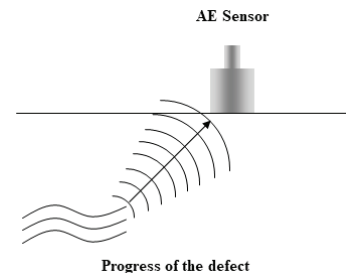


Fig. 1. Basic principles of acoustic emission measurement.

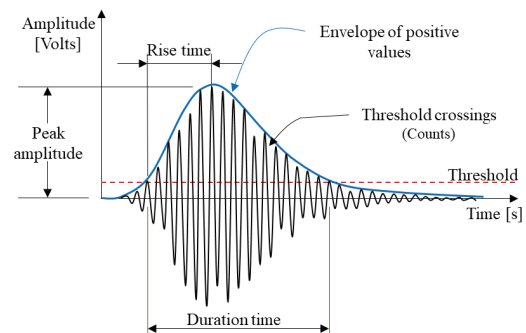


Fig. 2. Variable extraction and analysis method for AE signal.

본 연구에서는 그림 1과 같이 일반적으로 사용되는 지속적인 응력의 누적으로 결함의 진전을 통해 발생하는 AE를 측정하는 것이 아닌 간단하게 외부타격을 통해 자기애자의 정상 및 손상에 따라 계측되는 신호에 대해서 그림 2와 같이 시간 영역 신호에 대한 다양한 분석 및 주파수 영역 분석을 진행하였다.

2.2 시험편

시험편은 NGK사의 cristobalite 소재인 자기애자 5개가 사용되었다. 정상 2개, 자기손상 2개, 캡손상 1개에 대하여 실험을 수행하였다. 정상 및 손상 애자의 외관은 그림 3과 같다.

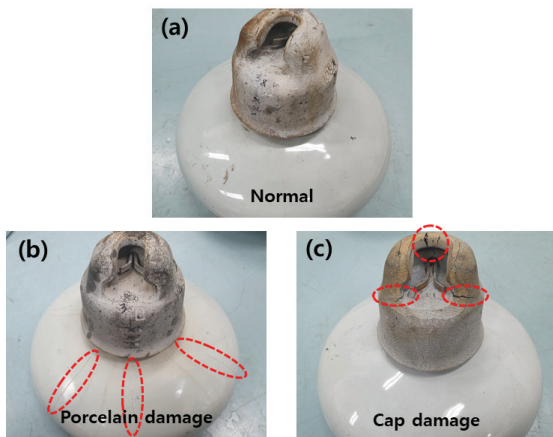


Fig. 3. Type of porcelain insulator damages: (a) normal, (b) porcelain damage, and (c) cap damage.

2.3 실험계의 구성

저주파에서 고주파까지 민감하게 반응하는 AE 센서를 활용하여 일반적으로 충격시험에 사용되는 가속도 센서의 측정 결과와 비교 분석을 진행하였으며, 이를 위한 실험계의 구성은 그림 4와 같다.

가속도 신호를 측정하기 위한 실험계로, 외부에서 충격 에너지를 발생시키기 위한 a) 임팩트 해머(PCB 086C03), 충격에 의한 응답을 계측하기 위한 b) 가속도센서(PCB 208C05), 실험장비에 의한 데이터수집을 위한 c) signal conditioner (PCB 482C16) 및 d) DAQ (NI PXIe-6366)를 사용하였으며, 측정 프로그램으로 e) NI signal express를 이용하였다.

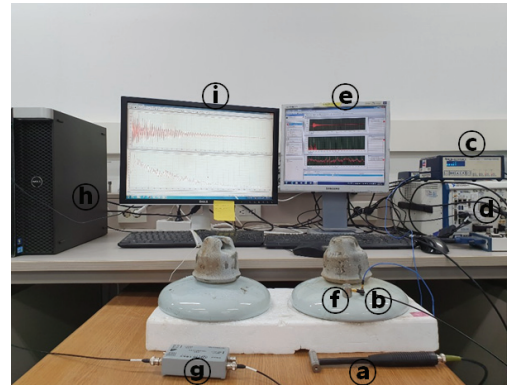


Fig. 4. Experimental setup for measuring acceleration and acoustic emission of porcelain insulators.

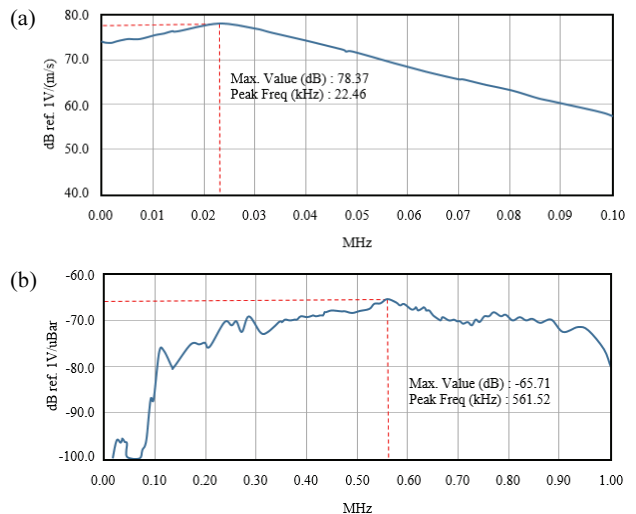


Fig. 5. Frequency response characterization of AE sensors. (a) Frequency response of resonance sensor (SN BP40) and (b) frequency response of wide bandwidth sensor (SN AI93).

AE 신호를 측정하기 위한 실험계로써 충격에너지 발생을 위한 해머를 동일하게 사용하였으며, 일반적인 AE는 수십에서 수백 kHz 이상에서 발생하기 때문에 f) 공진형 AE 센서(SN BP40) 및 광대역 AE 센서(SN AI93)가 사용되었고, 두 가지 AE 센서의 주파수응답 특성은 그림 5에 제시하였다. 일반적으로 AE 센서는 고역 통과 필터(high-pass filter)가 사용되어 저주파를 차단하지만 그림 5(a)의 공진형 AE 센서의 경우 0 Hz ~ 100 kHz의 주파수 범위를 전부 측정 가능하며, 그림 5(b)의 광대역 센서는 100 kHz 이상의 고주파수에 민감하지만 약 15~50 kHz 범위도 측정 가능한 것을 알 수 있다. 다음으로 미세한 AE 신호를 증폭시키기 위한

g) preamplifier (NJ 08550), 데이터 계측을 위한 h) 2 채널 AE data acquisition board (MISTRAS) 및 AE 신호 분석 소프트웨어인 i) AE Win (MISTRAS)을 이용하였다.

두 가지 장비 모두 sampling rate 500 kS/s로 설정하고 센서에 의해 측정된 데이터를 저장하고, 이후 분석은 MATLAB 2019a signal processing toolbox를 활용하였으며 시간 데이터에 대해 정규화 및 FFT (fast fourier transformation) 변환을 통해 자기애자의 정상과 손상에 따른 신호 및 주파수 분석을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 데이터의 일관성 확인

가속도 센서의 경우 진동 또는 충격시험에서 많이 활용되어 계측 결과에 대한 신뢰성이 입증되었지만, AE 센서는 충격시험에서 활용되는 경우가 적기 때문에 충격에너지에 의한 센서의 계측 신뢰성 확인이 필요하다. 따라서 정상 애자의 자기부분에 AE 센서를 설치하고 임팩트 해머를 이용하여 센서의 측면을 동일한 위치에서 5번의 실험을 진행하였다. 본 실험은 타격을 통해 신호를 발생시키기 때문에 센서에 의해 수집되는 신호의 에너지는 임팩트 해머의 타격을 통해 생성되는 가진 에너지에 따라 변화될 수 있다. 따라서 신호 에너지의 일관성 확보를 위해 초기 신호의 최대 에너지의 정규화를 진행하였고, 이에 대한 FFT 그래프를 그림 6에 도식하였다. 본 실험에서 공진형 및 광대역 AE 센서를 사용하여 1 MHz까지 FFT를 확인한 결과 30 kHz 이상에서는 주파수 신호가 거의 발생하지 않았기

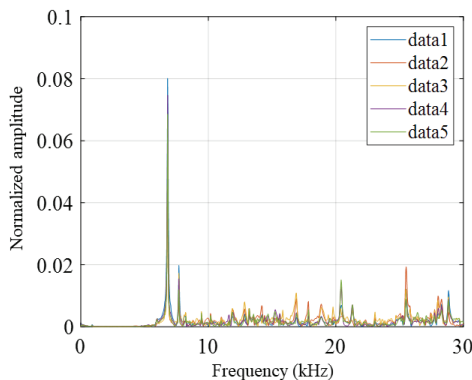


Fig. 6. FFT results by five experimental values using AE sensor.

때문에 관심영역을 30 kHz로 설정하고 공진형 AE 센서를 사용하여 분석을 진행하였다.

5회 타격에 의한 FFT 결과 7 kHz에서 가장 큰 주된 피크가 발생하였으며, 10 kHz 이상의 주파수 영역에서 일부 피크가 발생하는 주파수 이외의 부분에서 대부분 에너지는 아주 작게 나타났고, 일부 피크의 에너지는 0.02 이하로 분석되었다.

추가적으로 5회 타격의 결과에서 미세한 파형의 차이가 발생하였는데, 이는 해머의 타격각도, 접촉시간, 센서의 민감도 등에 의해 발생할 수 있는 미미한 변화로 판단되며, 5회의 실험 결과를 통해 공진형 AE 센서의 충격시험에 대한 일관성을 확인할 수 있었다.

3.2 가속도 센서와 AE 센서의 비교 분석

공진형 AE 센서의 계측 일관성을 확인한 후 충격 시험에서 많이 활용되는 가속도 센서와의 비교를 진행

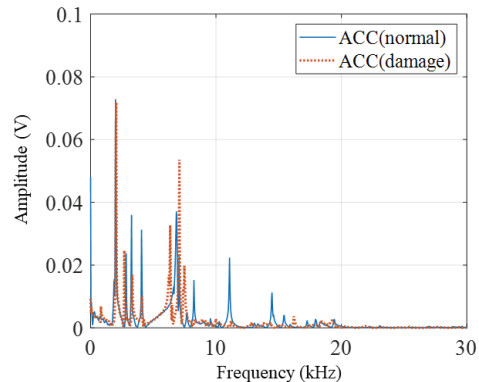


Fig. 7. FFT result of accelerometer (ACC) for normal and damage porcelain insulators.

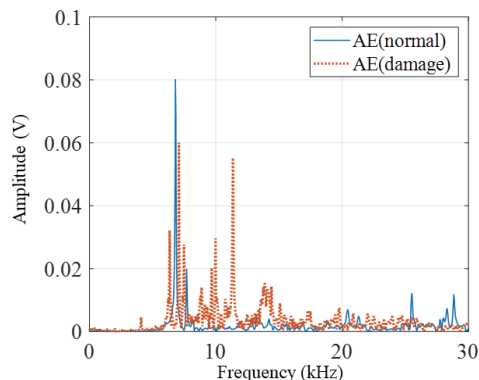


Fig. 8. FFT result of AE sensor for normal and damage porcelain insulators.

하였다. 정상 및 손상에 대한 가속도 센서의 FFT 결과를 그림 7에 도식하였으며, AE 센서를 통해 수집된 신호의 FFT 결과를 그림 8에 도식하였다.

가속도 센서를 사용한 정상과 손상의 FFT에서 정상 시험편의 경우 10 kHz 이하에 대부분의 피크가 존재하였으며, 일부 피크가 그 이상에서 발생하였다.

가속도 센서를 사용한 정상과 손상의 FFT에서 정상 시험편의 경우 10 kHz 이하에 대부분의 피크가 존재하였으며, 일부 피크가 그 이상에서 발생하였다. 손상 시험편의 경우 10 kHz 이하의 피크는 정상과 거의 동일하였고, 10 kHz 이상의 피크는 약해지는 경향을 보였다. 이처럼 가속도 센서를 사용하여 10 kHz 이상의 피크가 약해지는 것을 통해서 자기애자의 손상을 구분할 수 있지만, 일반 가속도 센서로는 10 kHz 이상의 고주파에 대한 신호의 계측이 어렵기 때문에 결함 또는 미세균열 등에서 발생하는 고주파 신호에 대한 다양한 분석을 하기 어렵다는 문제점이 있다.

공진형 AE 센서를 사용한 정상 시험편과 결함 시험편의 FFT 그래프에서는 동일하게 7 kHz에서 가장 큰 피크가 발생하였으며, 10 kHz 이상의 주파수에서 정상 시험편은 대부분의 주파수가 미세하게 나타났으며 25 kHz 부분 외에는 주된 피크가 발생하지 않는 것으로 확인되었다. 결함 시험편의 경우에는 10 kHz 이상의 주파수에서 큰 에너지를 가지는 주된 피크가 새롭게 발생하였으며, 그 외의 주파수 영역에서 FFT의 에너지는 정상보다 큰 것으로 분석되었다. 두 가지 방법의 분석 결과 손상 시험편에 대해 가속도 센서는 10 kHz 이상에서 손상의 FFT 에너지가 약해졌으며, AE 센서의 경우 반대로 10 kHz 이상에서 손상의 FFT 에너지가 크게 발생하는 차이가 확인되었다.

따라서 자기애자의 주된 피크가 일관적으로 발생하는 10 kHz 이하의 주파수 영역을 넘어서서 손상 부분에서 발생하는 일부 조각, 균열에서의 진동 및 반사파 등 다양한 에너지 등에 대해 미약한 신호에도 민감하게 반응하는 AE 센서를 적용한다면 고주파 영역에서 다양한 특징을 도출 및 분석을 통해 정상과 손상을 구분하는 데 신뢰도가 증가할 것으로 판단된다. 또한, 기본적인 FFT 분석 외에 다양한 분석을 통해 좀 더 정량적으로 정상과 손상을 구분하는 방법의 적용이 필요하다.

3.3 AE 신호의 분석

가속도 센서의 FFT에서 주된 피크는 대부분 10 kHz 이하에 존재하였으며, 이는 저주파수에서 일반적인 진

동이 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한, AE 센서의 FFT에서도 정상과 결함 모두 10 kHz 이하에서 주된 피크가 발생하였기 때문에 정상과 결함의 차이를 좀 더 정확하게 구분하기 위하여 10 kHz의 하이패스 필터를 적용하고 10 kHz 이상을 주 관심영역으로 설정하였다. 이에 따라 초기 신호, 정규화 신호, 필터가 적용된 AE 신호는 그림 9에 도식하였으며, 정규화 및 필터가 적용된 time signal을 사용하여 그림 2와 같은 추가적인 분석을 진행하였다.

정상 시험편과 결함 시험편의 신호에 대한 지속 시간(duration time), 피크 에너지(peak amplitude), 상승 시간(rise time), 임계값(threshold)을 넘는 파형의 수는 그림 10과 같이 time signal에 임계값을 설정하고 임계값을 넘는 파형에 대한 분석을 통해 산출되었으며, 포락선(envelope)의 면적의 경우 MATLAB의 envelope 함수를 활용하여 time signal의 양의 값에 대한 포락선을 추출하였다. 포락선의 분석 범위는 신호

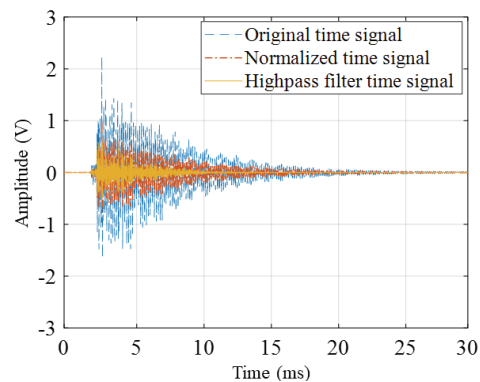


Fig. 9. Comparison of original, normalized, and filtered time signals.

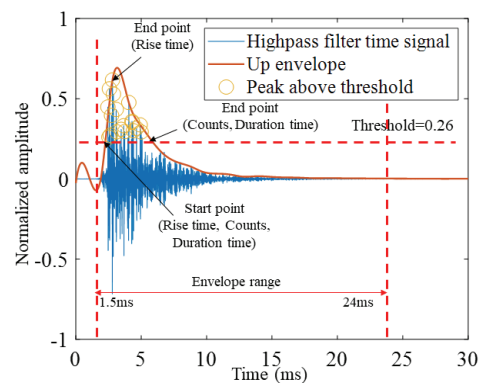


Fig. 10. Analysis results for rise time, duration time, counts, and envelope of AE signal.

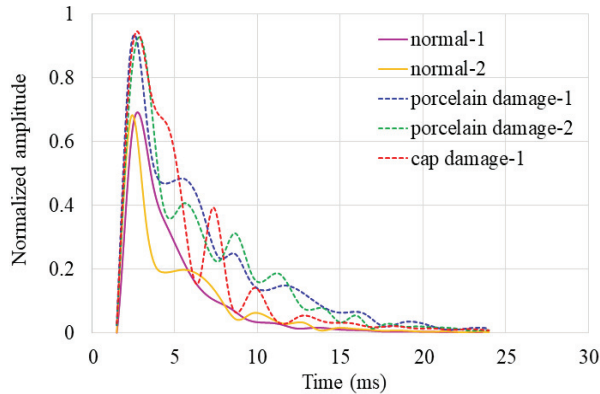


Fig. 11. Results of extracted envelope for five specimens.

Table 1. Values for five variables using AE signals.

	Normal-1	Normal-2	Porcelain damage-1	Porcelain damage-2	Cap damage-1
Rise time (s)	3.52e-4	3.02e-4	2.84e-4	1.25e-3	2.88e-4
Duration time (s)	2.54e-3	1.96e-3	5.30e-3	6.61e-3	5.26e-3
Peak amplitude	6.17e-1	6.74e-1	8.74e-1	8.56e-1	8.27e-1
Envelope	1,137	1,022	2,264	2,161	1,998
Counts	19	20	43	48	56

의 시작과 수렴을 고려하여 1.5~24ms으로 설정하였으며, 5개 시험편에 대한 포락선을 그림 11에 도식하였다. 그림 10 및 그림 11을 통해 도출된 결과를 정리하여 표 1에 제시하였다.

상승 시간은 임계점을 넘는 순간부터 가장 큰 에너지를 가지는 피크점 사이의 시간을 의미하며, 정상의 경우 약 0.35ms, 0.3ms, 자기 손상의 경우 0.28ms, 1.2ms, 캡 손상의 경우 0.28ms로 분석되어 특별한 경향을 보이지 않았기 때문에 정상과 손상을 구별하는 특징으로의 사용은 어렵다고 판단된다. 지속 시간은 임계점을 넘는 순간부터 임계점이 끝나는 순간의 사이 시간을 의미하며, 정상의 경우 2.5ms, 1.9ms로 분석되었으며, 자기 및 캡 손상의 경우 5.3ms, 6.6ms, 5.2ms로 분석되어 손상의 지속 시간이 정상의 지속 시간보다 2배 이상 긴 것으로 분석되었다.

지속 시간은 임계점을 넘는 순간부터 임계점이 끝나는 순간의 사이 시간을 의미하며, 정상의 경우 2.5ms, 1.9ms로 분석되었으며, 자기 및 캡 손상의 경우 5.3ms,

6.6ms, 5.2ms로 분석되어 손상의 지속 시간이 정상의 지속 시간보다 2배 이상 긴 것으로 분석되었다. 피크의 에너지는 양의 최대 피크를 기준으로 하였으며, 정상과 손상의 피크는 최소 0.15의 차이가 발생하는 것으로 확인되었다. 포락선의 면적은 그림 11에 대한 적분 값이며, 신호가 정규화되었기 때문에 단위는 무차원으로 표현된다. 정상의 경우 포락선의 면적은 약 1,000 정도이며, 손상의 경우 약 2,000 이상으로 2배 정도의 큰 차이가 나타나는 것으로 분석되었다. 카운트는 임계값을 넘는 피크파형 수를 의미하며, 정상의 경우 약 20개로 분석되었고, 자기 및 캡 손상의 경우 40개 이상으로 분석되어 2배 이상의 차이가 발생하는 것으로 분석되었다. 정규화 및 필터를 적용한 time signal에 대해 5가지 방법으로 분석한 결과 지속 시간, 피크 에너지, 카운트 수, 포락선의 면적에서 정상과 손상의 차이를 구분할 수 있었으며, 2배 이상의 차이가 발생하는 지속 시간, 카운트 수, 포락선의 넓이를 사용한다면 높은 신뢰도로 정상과 손상의 구분할 수 있을 것으로 판단된다.

3.4 STFT 분석

단시간 푸리에 변환(short time fourier transform, STFT)은 비정지 신호의 주파수 내용이 시간에 따라 어떻게 변하는지 분석하는 데 사용된다. STFT를 계산하는 과정은 긴 시간 신호를 동일한 길이의 세그먼트로 짧게 분할하고, 각 짧은 세그먼트를 개별적으로 푸리에 변환하여 계산하는 것이다. 그림 12(a)는 normal-1, (b)는 normal-2, (c)는 porcelain damage-1, (d)는 porcelain damage-2 및 (e)는 cap damage이며, 각각 time signal, FFT 및 STFT의 결과를 도식하였다.

Time signal에 대한 분석 결과 10ms 이하에서 정상 신호는 손상 신호보다 에너지 작게 나타났으며, 10~20ms에서 신호가 급격히 약해지고, 20ms 이상에서는 신호가 거의 사라지는 것으로 파악되었다. 손상 신호는 10~20ms에서 신호가 약해지지만, 일정 수준의 신호가 계속되었으며, 20ms 이상에서도 약한 신호가 발생하는 것으로 파악되었다. FFT에 대한 분석 결과 정상의 FFT보다 손상의 FFT에서 더 많은 피크가 발생되었으며, 정상의 경우 정규화된 에너지 값의 0.02보다 작은 값을 가지는 것으로 분석되었다.

STFT 분석 결과 정상의 경우 강한 주파수가 8~9ms까지 발생하며 이후에는 주파수가 약해지다가 20ms 이후에는 거의 사라지는 것으로 확인되었으며, 손상의 경우에는 정상보다 10ms 이상에서도 강한 주파수가

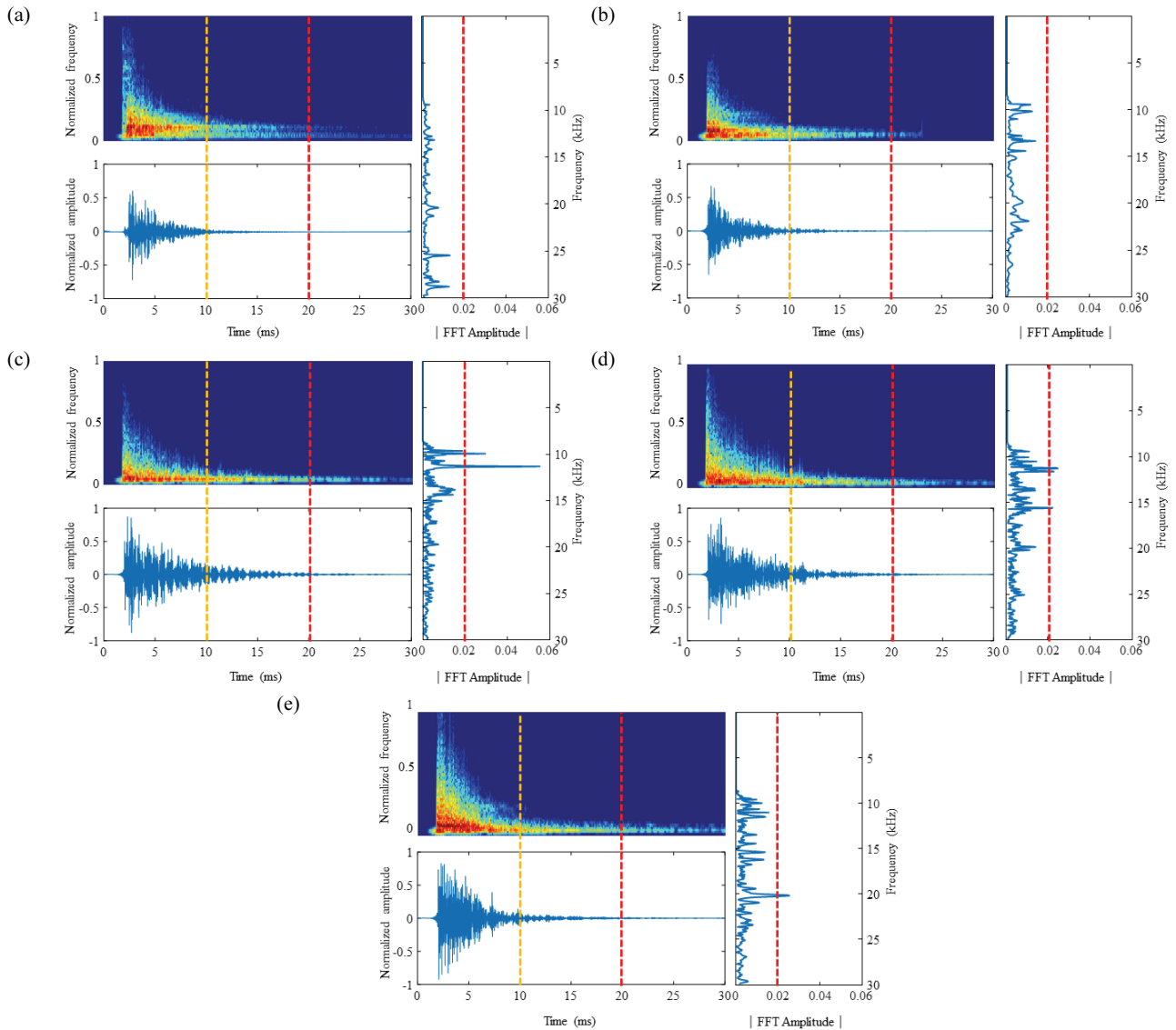


Fig. 12. Results of time signal, FFT, STFT for all of the AE signals. (a) Results of time signal, FFT, STFT for normal-1, (b) results of time signal, FFT, STFT for normal-2, (c) results of time signal, FFT, STFT for porcelain damage-1, (d) results of time signal, FFT, STFT for porcelain damage-2, and (e) results of time signal, FFT, STFT for cap damage.

유지되며, 20ms 이상에서도 지속적으로 주파수가 발생되는 것으로 파악되었다.

이러한 결과는 표면결함 또는 내부에 존재하는 미세한 결함들이 약해진 동적 에너지에도 반응하여 나타나는 결과로 판단되며, 미세한 에너지를 감지할 수 있는 AE 센서의 활용을 통해 정상과 손상에 대한 다양한 차이를 식별할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 자기애자의 손상을 검출하기 위해 미세한 기계적인 손상, 탈락 등에서 발생하는 작은 동적 에너지에도 민감하게 반응하는 AE 센서를 활용하였으며, 기존 모니터링 방법과 달리 외부 가진에 의한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 일반적으로 지속적인 상시 모니터링 분야에 사용

되는 AE 센서에 대해서 외부 가진에 의한 활용 가능성을 타진하였다.

- 2) 가속도 센서를 활용한 FFT에서 정상의 경우 10 kHz 이상에 2개의 피크가 발생하였지만, 손상의 경우 10 kHz 이상의 피크가 소멸되는 것으로 분석되었다. 또한, AE 센서를 활용한 정상 및 손상의 FFT는 7 kHz에서 주 피크가 발생하였으며, 10 kHz 이상에서 정상은 피크의 에너지가 0.02 이하이며, 손상은 다양한 피크가 나타나고 정상보다 에너지가 크기 때문에 자기애자의 손상 파악에 적합한 10 kHz의 high-pass 필터가 적용되었다. 10 kHz 이상의 주파수 분석을 통해 자기애자의 손상을 파악하기 위해 두 가지 센서를 활용할 수 있다고 판단된다.
- 3) AE time signal의 5가지 분석방법 중 지속 시간에 대한 분석 결과 정상의 경우 1.9~2.5ms이었으며, 손상의 경우 5.2~6.6ms으로 2배 이상의 차이가 나타나는 것으로 분석되었고, 포락선 면적의 경우 정상은 1,000, 손상은 약 2,000의 값을 나타내며 약 2배의 차이가 발생하였으며, 카운트 수에서 정상은 약 20개, 손상은 40개 이상으로 2배 이상의 차이가 발생하는 것으로 분석되었다. 이처럼 5가지 분석방법 중 3가지 방법에서 2배 이상의 큰 차이가 발생함에 따라 정상과 손상을 구분하기 위한 분석방법으로 사용할 수 있다고 판단된다.
- 4) SFFT 분석 결과 정상보다 손상에서 지속적으로 긴 시간 동안 주파수가 발생하는 것이 확인되었다. 이는 가진 에너지가 약해지는 경우에도 결함에서 발생하는 신호에 의한 것으로 사료되며, 작은 에너지에 민감하게 반응하는 AE 센서의 적용을 통해 계측 가능한 것으로 판단된다.

본 연구는 AE 센서를 기존의 상시 모니터링 방법이 아닌 외부 가진을 통한 순간반응을 통해 자기애자의 손상을 구분하는 데 신뢰할 만한 결과를 얻었으며, 이러한 가능성을 바탕으로 향후 자기애자 내부의 결함 검출을 위해 다양한 적용이 가능할 것으로 판단된다.

ORCID

Tae-Keun Oh
Young-Geun Yoon

<https://orcid.org/0000-0003-3848-6248>
<https://orcid.org/0000-0002-2846-9332>

REFERENCES

- [1] G. H. Vaillancourt, J. P. Bellerive, M. St-Jean, and C. Jean, *IEEE Trans. Power Del.*, **9**, 208 (1994). [DOI: <https://doi.org/10.1109/61.277692>]
- [2] I. H. Choi, T. K. Kim, Y. B. Yoon, J. Yi, and S. W. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **30**, 551 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2017.30.9.551>]
- [3] X. Jiang, S. Wang, Z. Zhang, S. Xie, and Y. Wang, *IEEE Trans. Power Del.*, **22**, 472 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.876705>]
- [4] S.M.A. Dhalaan and M. A. Elhribawy, *Proc. 2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (IEEE Cat. No.03CH37495)* (IEEE, Dallas, USA, 2003) p. 909. [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDC.2003.1335058>]
- [5] A. Cavallini, S. Chandrasekar, G. C. Montanari, and F. Puletti, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **14**, 23 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2007.302866>]
- [6] G. H. Vaillancourt, S. Carignan, and C. Jean, *IEEE Trans. Power Del.*, **13**, 661 (1998). [DOI: <https://doi.org/10.1109/61.660958>]
- [7] V. Padma and V. S. Raghavan, *Proc. 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology* (IEEE, Kanyakumari, India, 2011) p. 110. [DOI: <https://doi.org/10.1109/ICECTECH.2011.5941868>]
- [8] H. Ha, S. Han, and J. Lee, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **61**, 267 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2159322>]
- [9] X. Miao, X. Liu, J. Chen, S. Zhuang, J. Fan, and H. Jiang, *IEEE Access*, **7**, 9945 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2891123>]
- [10] G. Y. Kim and D. W. Seo, *Korean Soc. Med. Inf.*, **22**, 121 (2018).
- [11] K. J. Park, *Korean Soc. Saf.*, **18**, 6 (2003).
- [12] S. H. Song, S. W. Kim, W. S. Park, K. B. Choi, and H. D. Yun, *Korean Soc. Med. Inf.*, **13**, 115 (2009).