

## Macro fiber composite (MFC) 센서를 이용한 음향방출 기술 기반 배관 누수 감지 시스템

박재현\* · 이시맥\*\* · 이범주\*\*\* · 김선주\*\*\* · 유형민\*\*\*\*†

## Acoustic Emission (AE) Technology-based Leak Detection System Using Macro-fiber Composite (MFC) Sensor

Jaehyun Park\*, Si-Maek Lee\*\*, Beom-Joo Lee\*\*\*, Seon Ju Kim\*\*\*, Hyeong-Min Yoo\*\*\*\*†

**ABSTRACT:** In this study, aimed at improving the existing acoustic emission sensor for real time monitoring, a macro-fiber composite (MFC) transducer was employed as the acoustic emission sensor in the gas leak detection system. Prior to implementation, structural analysis was conducted to optimize the MFC's design. Consequently, the flexibility of the MFC facilitated excellent adherence to curved pipes, enabling the reception of acoustic emission (AE) signals without complications. Analysis of AE signals revealed substantial variations in parameter values for both high-pressure and low-pressure leaks. Notably, in the parameters of the Fast Fourier Transform (FFT) graph, the change amounted to 120% to 626% for high-pressure leaks compared to the case without leaks, and approximately 9% to 22% for low-pressure leaks. Furthermore, depending on the distance from the leak site, the magnitude of change in parameters tended to decrease as the distance increased. As the results, in the future, not only will it be possible to detect a leak by detecting the amount of parameter change in the future, but it will also be possible to identify the location of the leak from the amount of change.

**초 록:** 본 연구에서는 기존 배관 가스 누출 감지에 사용되던 음향방출 센서가 실시간 모니터링에 적용될 때 발생할 수 있는 문제들을 개선하기 위해, Macro-fiber composite (MFC) 트랜스듀서를 음향방출 센서로 사용하여 가스 누출 감지 시스템에 적용하였다. 적용 전 MFC의 구조를 최적화하기 위해 구조해석을 진행하여 제작하였고, 그 결과 MFC가 가지는 유연성으로 굴곡진 배관에 잘 밀착되어 AE 신호를 문제없이 수신할 수 있었다. AE 신호 분석 결과 고압 누출, 저압 누출 모두 파라미터 값 변화에 유의미한 결과를 보였으며, 특히, FFT 그래프의 파라미터에서 고압 누출의 경우 누출이 없는 경우 대비 120~626%의 변화량, 저압 누출의 경우 9~22%의 변화량을 보였다. 또한, 누출 발생 부위에서의 거리에 따라, 거리가 멀수록 이러한 파라미터 변화량이 줄어드는 경향을 보여, 추후 파라미터 변화량 감지를 통해 누출 감지가 가능할 뿐만 아니라, 변화량으로부터 누출 발생 위치를 파악할 수 있을 것으로 보인다.

**Key Words:** 음향방출기술(Acoustic emission technology), 스마트 복합재료(Smart composites), 누출 감지(Leak detection), 타이타늄산 지르콘산 연(PZT), 구조 안전성 모니터링(Structural health monitoring, SHM)

Received 11 November 2023, received in revised form 20 November 2023, accepted 23 November 2023

\*Smart Manufacturing System R&D Department, Research Institute of Clean Manufacturing System, Korea Institute of Industrial Technology

\*\*HW Development Team, Rina Solution Corp.

\*\*\*School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education (KOREATECH)

†Corresponding author (E-mail: yhm2010@koreatech.ac.kr)

## 1. 서 론

음향방출(Acoustic emission, AE) 기술은 비파괴 검사 방법 중 하나로, 항공, 플랜트 산업에서 구조물의 건전성 평가에 사용되고 있다[1-5]. 음향방출 기술은 구조물의 크랙이 전파될 때 혹은 가스 누출이 존재할 때 발생하는 고주파 영역의 탄성파를 감지하여 신호를 분석하는 기술로, 다른 스캔 방식의 비파괴 검사와 달리 직접 크랙, 누출 위치 위에서 검사할 필요가 없어 효율적이고, 구조물의 표면뿐만 아니라 내부의 결함 감지에도 적용될 수 있다. 또한, 구조물 한 포인트에 설치하여 이동이 불필요하기 때문에 실시간 구조물 건전성 모니터링에 적합한 기술이다[6-8]. 그러나 이러한 음향방출 기술에 사용되는 현재의 음향방출 센서는 민감도 등의 성능을 이유로, 압전효과를 나타내는 bulky한 PZT가 포함된 원통 형태의 구조로 제작되고 있다. 실시간 구조물 건전성 모니터링에 이용하기 위해서는 음향방출센서를 구조물 외부에 부착해야 하는데, 기존의 bulky한 구조를 가지는 음향방출센서의 고정은 형상, 무게, 크기로 인해 외부에 고정장치가 따로 필요할뿐더러, 고정을 한다고 하더라도 불안정하고, 움직이는 구조물에서는 더욱 고정이 어렵다는 단점을 가지고 있다. 대부분의 실시간 모니터링이 필요한 구조물이 배관, 복합재 부품 등 굴곡이 있는 형태라는 점을 고려했을 때, 이러한 형태의 고정은 더욱 어려워 정확한 AE 신호를 받기가 어렵다[9-11].

한편, Macro-Fiber composite (MFC)은 평균 두께 300  $\mu\text{m}$ 의 필름형태의 트랜스듀서로, 압전효과를 나타내는 Active layer가 PZT 섬유와 에폭시로 구성되어 있어 취성을 가지는 PZT의 기계적 물성을 완화하여 유연성을 확보한 복합재이다. PZT 섬유/에폭시 복합재 형태의 트랜스듀서는 PZT 섬유의 형상에 따라 섬유 단면이 둥근 형태인 Active-fiber composite (AFC)와 사각 형태인 MFC로 나눌 수 있는데, 최근에는 AFC의 경우 전극과의 접촉이 불안정하다는 점과 제조 공정상의 어려움으로 현재는 MFC를 필름형태의 트랜스듀서로 활발히 적용하고 있다. MFC는 유연성과 압전효과를 동시에 보이기 때문에 에너지 하베스터 분야에 적용되고 있고, 역압전효과를 이용하여 소프트 액추에이터로도 사용하고 있다[12-14]. 그러나, 이러한 MFC는 구성하는 재료의 종류, PZT의 폭, 전극의 형상 등의 기계적인 구조에 따라 유연성과 전기적인 특성이 달라지기 때문에 목표 실험 전 이를 정확히 규명할 필요가 있다.

Fig. 1에 나타난 바와 같이, 기존의 음향방출 센서는 일정한 이상의 두께를 가지는 원통 구조의 PZT를 사용하고, 이를 전극, 기타 필요 부품과 패키징하여 두께 40 mm 이상의 bulky한 구조를 가진다. 반면에, 본 연구에서 자체 제작한 MFC의 경우 0.2 mm 이하의 PZT를 에폭시와 결합하여 유연성을 확보하고자 하였고, 전극을 포함하더라도 전체 두께 0.4 mm 이하의 필름형태로 제작되었다.



Fig. 1. Comparison of appearance between existing AE sensor (a) and MFC (b)

본 연구에서는 배관 가스 누출 감지에 기존 음향방출 센서 대신 유연성을 가지는 MFC를 적용하여 배관에 누출 감지 가능성을 살펴보고자 하였으며, 적용 전 MFC 해석을 통해 기계적 특성을 분석하고, Test-bed를 이용한 가스 누출을 모사하여 AE 신호 분석을 진행하여 MFC를 이용한 유연 음향방출 센서가 향후 실시간 구조물 모니터링에 적합한지를 알아보하고자 한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 MFC

MFC의 구조는 Fig. 2에 나타난 것과 같이, 가운데 active layer를 중심으로 위아래 전극이 도포되고, 그 외부에 패키징 소재로 Polyimide가 적용된 형태이다.

Active layer는 분극을 진행한 PZT-5H 소재와 에폭시로 이루어진 복합재 형태로 외부의 기계적 진동에 의해 전기적인 신호를 발생시키는 부분이다. 이러한 Active layer는 복합재로, 압전효과를 나타내는 PZT의 폭의 변화에 따라 기계적 물성이 변화할 것으로 예상하여 변형 해석, 모드 해석을 진행하였다. 해석에 이용한 소재의 물성은 Table 1과 같고, 경계 조건은 Fig. 3에 나타내었다. 한쪽을 고정시키고, 변형해석(b)과 모드 해석(c)을 진행하였으며, 변형해석의

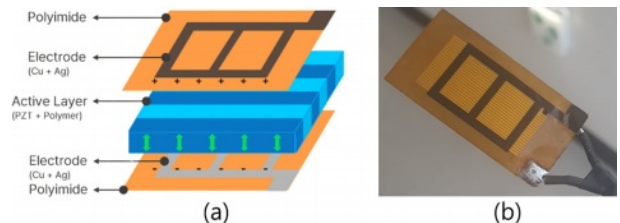
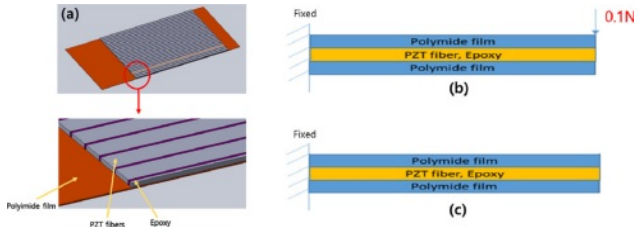


Fig. 2. Structure of MFC (a) and photo of sample with wires (b)

Table 1. Material properties used in numerical analysis

	PZT-5H	Epoxy	PI
Density [ $\text{kg/m}^3$ ]	7500	1200	1450
Elastic modulus [Gpa]	64	2.1	3.2
Poisson's Ratio	0.33	0.3	0.34
Tensile strength [Mpa]	115	35	260



**Fig. 3.** Geometry model of MFC (a), boundary conditions of total deformation analysis (b) and modal analysis (c)

경우 고정부 반대쪽 끝 부분에 0.1 N의 힘을 가해 변형 거동을 확인하고자 하였다.

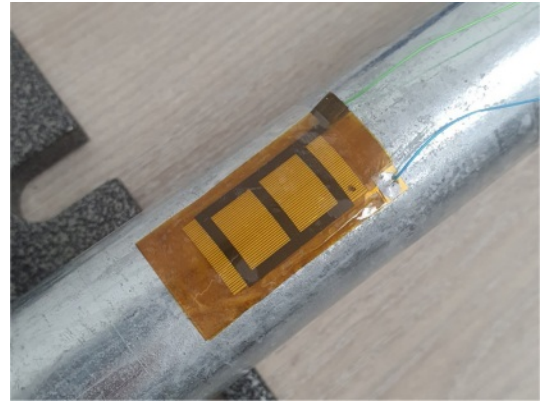
해석결과를 토대로 유연성을 가장 크게 확보할 수 있는 MFC를 실제 제작하였으며, 이를 배관 누수 감지에 적용하였다.

## 2.2 Test-bed

MFC의 센서로서의 성능을 확인하기 위해, 인위적인 가스 누출을 발생시킬 수 있는 Test-bed를 Fig. 4과 같이 제작하였다. 배관은 플랜트, 제조 산업 현장에서 많이 사용하는 외경 35 mm의 아연도금강관으로 구성하였고, 인위적인 누출 발생은 배관의 끝부분 이음새 부분을 느슨하게 만들어 실제 현장에서 빈번하게 발생하는 배관 플랜지 누출을 모사하였다. 배관의 끝 부분에는 압력계를 설치하여 배관 내압을 측정할 수 있게 하였으며, 가스 주입은 질소 고압 가스 통을 이용하여 최대한 펌프 등의 기계적인 노이즈를 발생시킬 수 있는 장비들을 배제하였다.

측정 부위는 누출 발생 부위로부터 가까운 곳부터 point1, point2, point3 총 세 곳을 측정하였으며, 그 거리는 각각 누출 발생 부위로부터 150 mm, 450 mm, 600 mm이다. 각 측정 부위에서 MFC를 밀착시키고, 외부에 테이핑하여 고정하였으며, MFC와 배관 사이에는 초음파 영역의 신호가 잘 전달될 수 있도록 초음파용 couplant (에스엘테크 사, JOOUEN Sonic)를 일정한 두께로 도포하여 신호 측정을 진행하였다 (Fig. 5).

측정 케이스는 각 측정 부위에서 누출이 없는 경우의 신호, 누출이 발생했을 때의 신호를 측정하여 비교하였고, 누



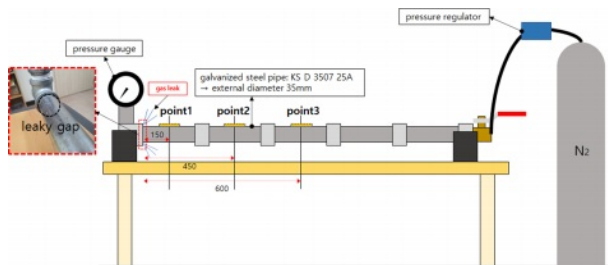
**Fig. 5.** MFC attached to the pipe

출이 발생하는 경우는 배관의 내압에 따라 고압 누출 (High pressure leak), 저압 누출 (Low pressure leak)으로 구분하여 신호를 측정, 분석하였다. 고압 누출은 0.2 MPa, 저압 누출은 0.001 MPa 이하로 배관 내압을 설정하여 측정을 진행하였다.

분석장치 구성을 위해 MFC의 양쪽 전극에 전선을 연결하고, 신호 증폭을 위한 프리앰프(40 dB), 데이터 수집 장치를 순서대로 연결하였다. 데이터 수집 장치에서 200 KHz의 샘플링 속도로 데이터를 저장하였으며, 추후 PC에서 저장된 데이터를 분석하였다. x축이 시간, y축이 신호 값(전압)인 웨이브 폼 형태로 저장을 하고, 웨이브 폼 형태를 일정 시간 간격에서 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)을 사용하여 x축이 주파수(frequency), y축이 신호 값(전압)인 FFT 그래프 형태를 얻었다. 일반적으로 음향방출에서 누출에 대한 신호 변화는 FFT 그래프의 30 KHz~50 KHz 범위에서 두드러지게 나타난다고 알려져 있어[15], 본 연구에서도 분석 범위를 30 KHz~50 KHz로 설정하여 그래프를 나타내었다. 각 측정 부위에서 신호 변화를 정량적으로 측정하기 위해 웨이브 폼 그래프에서는 파라미터로 표준편차(Standard deviation)와 피크 투 피크(Peak to peak) 값을 산출하였고, FFT 그래프에서는 평균 주파수(Mean frequency), Square root of centroid frequency 값을 산출하여 나타내었다 (Table 2) [16].

**Table 2.** Material properties used in numerical analysis

Waveform Parameter	Standard deviation	$\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2}{N - 1}}$
	Peak to peak	$x(n)_{\max} - x(n)_{\min}$
FFT parameter	Mean frequency	$\frac{\sum_{k=1}^K s(k)}{K}$
	Centroid frequency	$FC = \frac{\sum_{k=1}^K f_k \cdot s(k)}{\sum_{k=1}^K s(k)}$
	Standard deviation of centroid frequency	$SD_{FC} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (f_k - FC)^2 \cdot s(k)}{K}}$
	Square root of centroid frequency	$\frac{\sum_{k=1}^K (f_k - FC)^{1/2} \cdot s(k)}{K \cdot SD_{FC}}$



**Fig. 4.** Schematic of test-bed which can artificially generate leak



### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 MFC 해석 결과

변형량 해석 결과, Fig. 6에 나타난 바와 같이, 최대변형량은 MFC의 active layer에서 PZT의 폭이 넓을수록 작게 나타났다. 이는 예측시보다 월등히 큰 PZT의 탄성계수 때문으로 판단되며, 굴곡진 배관 외부에 밀착하기 위해서 유연 음향방출 센서의 유연성 극대화가 필요하고, 이를 위해, 최대 변형량이 큰, PZT 폭이 작은 쪽으로 설계하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다. 다만, 실제 압전 효과를 나타내는 PZT의 폭을 한없이 줄이기는 무리가 있으므로, 문헌을 참고하여[12-14] 유연성을 최대로 가지면서 압전 효과를 문제없이 보이는 PZT의 폭(0.3 mm)을 설계치로 설정하였다.

모드 해석 결과는 Fig. 7, Table 3과 같다. Fig. 7에 모드 형상을 나타내었고, 모드에 따른 공진주파수 결과 값은 Table 3에 나타내었다. 모드 해석 결과를 토대로, PZT의 폭 변화는 20 KHz~30 KHz 범위에서 MFC 구조의 공진 특성에 유의미한 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다.

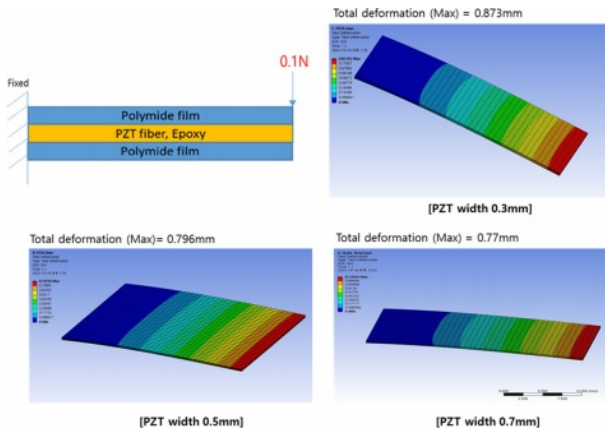


Fig. 6. Numerical analysis results for total deformation

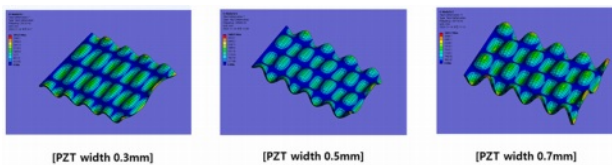


Fig. 7. Modal analysis results (mode shape – mode 21)

Table 3. Modal analysis results (frequency mode)

Mode	Frequency (Hz)		
	PZT 0.3	PZT 0.5	PZT 0.7
1	20041	20156	20180
21	30132	30565	30716
41	40274	40303	41226
61	50791	49812	50832

#### 3.2 AE 신호 분석

Test-bed에서 측정한 AE 신호를 측정 위치별로 누출이 없는 경우, 고압 누출, 저압 누출로 나누어 각각 웨이브 폼 그래프와 FFT 그래프를 나타내었다(Fig. 8-10). 모든 측정 위치에서 고압 누출 시, 누출이 없을 때 대비 웨이브 폼 그래

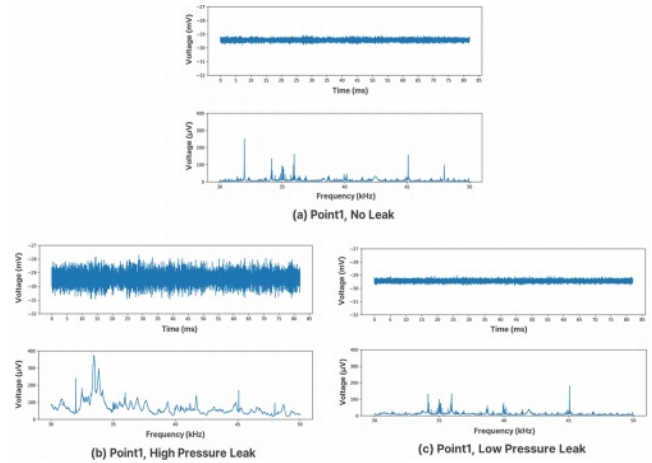


Fig. 8. AE signal (Point 1)

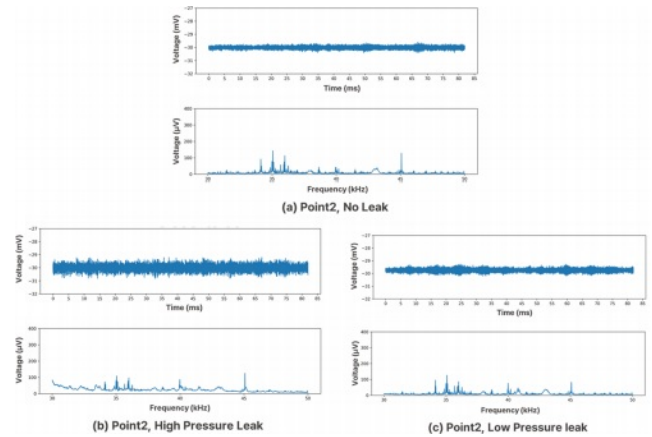


Fig. 9. AE signal (Point 2)

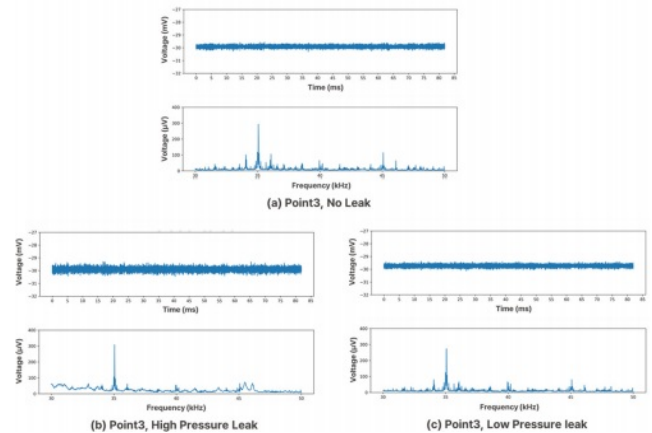


Fig. 10. AE signal (Point 3)

**Table 4.** Parameter of AE signal

Status	Waveform parameter		FFT parameter	
	Standard Deviation	Peak to Peak	Mean Frequency	Square Root of Centroid Frequency
point1_No Leak	1	1	1	1
point1_Low Pressure	1.024740695	1.026206240	1.221145701	1.184736617
point1_High Pressure	4.820271794	4.450526796	7.259854134	7.249829027
point2_No Leak	1	1	1	1
point2_Low Pressure	1.316048483	1.172207248	1.112638071	1.087386049
point2_High Pressure	2.260323316	2.012528216	2.846048439	2.929123263
point3_No Leak	1	1	1	1
point3_Low Pressure	1.055474356	0.998894521	1.065239161	1.081206828
point3_High Pressure	1.656666981	1.531266517	2.215605788	2.437060064

프와 FFT 그래프의 변화가 눈에 띄게 나타났고, 저압 누출 시에는 고압 누출의 경우처럼 그래프의 변화가 두드러지지 않는 반면 누출의 없는 경우에 비해 미세한 변화가 나타난 것을 알 수 있다. 정량적인 수치로 이러한 변화를 분석해 보았고, 웨이브 폼 그래프에서는 표준편차와 피크 투 피크 값, FFT 그래프에서는 평균 주파수, Square root of centroid frequency 값을 산출하여 Table 4에 나타내었다. 누출이 없는 경우의 값을 기준값 1로 설정하고, 나머지 경우들의 값을 상대 비교하였으며, 그 변화량은 고압 누출의 경우 53~626% 범위의 큰 변화량을 보이는 것을 알 수 있고, 웨이브 폼의 파라미터보다, FFT 그래프의 파라미터에서 더 큰 변화량을 보였다. 저압 누출의 경우에도 값의 변화가 고압 누출 보다는 작지만 유의미하게 변화하는 것을 알 수 있는데, 특히, FFT 그래프의 파라미터에서 9~22% 변화량을 보이는 것으로 나타났다.

또한, 측정 부위별 파라미터 결과를 보면, 누출 발생지와 거리가 멀수록 누출에 의한 파라미터 값 변화가 적어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 고압 누출의 경우와 저압 누출의 경우 모두 유사한 경향을 보였다. 다만, 저압 누출의 경우 웨이브 폼 파라미터에서는 거리와 변화율 상관관계가 명확하게 나타나지 않았고, FFT 그래프 파라미터의 경우에서만 거리에 따라 값들이 적어지는 것으로 나타났다. 이러한 경향을 자세히 보기 위해, FFT 그래프 파라미터를 (평균 주파수, Square root of centroid frequency)의 값 변화

를 측정 위치별로 나타내었고, 그 결과는 Fig. 11과 같다. 고압 누출과 저압 누출에서의 파라미터를 한 그래프에 나타내었는데, 고압 누출의 파라미터 절대값이 저압 누출에 비해 상대적으로 커서 저압 누출 값에 대한 경향을 육안으로 확인하기 어려워 오른쪽에 따로 확대하여 나타내었다. 고압 누출, 저압 누출 하에서 동일하게 두 파라미터의 값은 누출 부위와 멀어질수록 그 값이 점차 유의미하게 작아지는 경향을 보였다. 이는 누출 발생지와 거리가 멀수록 변화율이 작아진다는 것을 의미한다.

#### 4. 결 론

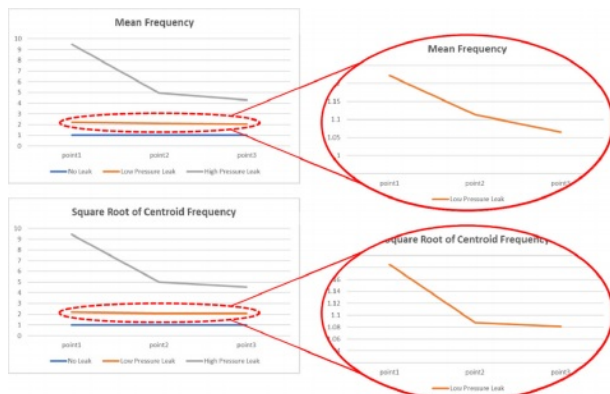
본 연구에서는 MFC를 음향방출 센서로 이용하여 배관 이음새 부분의 가스 누출을 감지할 수 있는 시스템을 구성하고자 하였다. MFC 제작 전 구조의 수치해석을 통해 유연성을 확보할 수 있는 PZT 폭을 선정하였고, 이러한 폭의 변화는 구조 자체의 공진 특성 변화에 영향을 끼치지 않음을 확인하였다. 이렇게 선정된 값으로 MFC를 직접 제작하였고, 기존 bulky한 형태의 음향 방출 센서와 달리 굴곡진 배관에 밀착하여 고정시켜 AE 신호를 획득할 수 있었다. MFC에서 측정된 신호는 가공을 거쳐 웨이브 폼과 FFT 그래프로 나타낼 수 있었고, 그 결과 고압 누출, 저압 누출 모두 파라미터의 변화율을 통해 누출 감지가 가능하다는 것을 보였다. 다만, 저압 누출의 경우 고압 누출에 비해 변화율이 작았고, 웨이브 폼 파라미터의 경우 누출 발생지와 거리에 따른 경향성이 뚜렷하게 나타나지 않았다. 결과적으로 FFT 파라미터를 사용하면, 고압 누출, 저압 누출 모두에 대해 누출 감지는 물론, 거리에 따라 변화율이 작아지는 것을 확인할 수 있고, 나아가 이러한 파라미터 변화율을 통해 역으로 가스 누출 발생지까지의 거리를 감지할 수 있는 시스템으로 발전이 가능할 것으로 보인다.

#### 후 기

이 논문은 한국생산기술연구원의 지역혁신기반기술사업의 지원을 받아 수행하고 있는 ‘청정기술연구소 파트너기업 기술현안대응 사업(PJF23115)’ 과제에서 수행된 연구임.

#### REFERENCES

1. Scruby, C.B., “An Introduction to Acoustic Emission”, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 20, No. 4, 1987, pp. 946-953.
2. Dornfeld, D., “Application of Acoustic Emission Techniques in Manufacturing”, *Ndt & E International*, Vol. 25, No. 6, 1992, pp.259-269.
3. Gholizadeh, S., Leman, Z., and Baharudin, B.T.H.T., “A Review of the Application of Acoustic Emission Technique in Engi-



**Fig. 11.** Parameter value changes with distance from where the leak occurred

- neering”, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 54, No. 6, 2015, pp. 1075-1095.
4. Huguet, S., Godin, N., Gaertner, R., Salmon, L., and Villard, Y.D., “Use of Acoustic Emission to Identify Damage Modes in Glass Fibre Reinforced Polyester” *Composites Science and Technology*, Vol. 62, No. 10, 2002, pp. 1433-1444.
  5. Yu, L., and Li, S.Z., “Acoustic Emission (AE) Based Small Leak Detection of galvaNized Steel Pipe due to Loosening of Screw Thread Connection”, *Applied Acoustics*, Vol. 120, 2017, pp. 85-89.
  6. Nair, A., and Cai, C.S., “Acoustic Emission Monitoring of Bridges: Review and Case Studies”, *Engineering Structures*, Vol. 32, No. 6, 2010, pp. 1704-1714.
  7. Carpinteri, A., Lacidogna, G., and Pugno, N., “Structural Damage Diagnosis and Life-time Assessment by Acoustic Emission Monitoring”, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 74, No.1, 2007, pp. 273-289.
  8. Roberts, T., and Talebzadeh, M., “Acoustic Emission Monitoring of Fatigue Crack Propagation,” *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 59, No. 6, 2003, pp. 695-712.
  9. Eaton, M., Pullin, R., Holford, K., Evans, S., Featherston, C., and Rose, A., “Use of Macro Fibre Composite Transducers as Acoustic Emission Sensors”, *Remote Sensing*, Vol. 1, No. 2, 2009, pp. 68-79.
  10. De Castro, B.A., de Melo Brunini, D., Baptista, F.G., Andreoli, A.L., and Ulson, J.A.C., “Assessment of Macro Fiber Composite Sensors for Measurement of Acoustic Partial Discharge Signals in Power Transformers”, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 17, No. 18, 2017, pp. 6090-6099.
  11. Brunner, A.J., and Barbezat, M., “Acoustic Emission Leak Testing of Pipes for Pressurized Gas Using Active Fiber Composite Elements as Sensors,” *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 25, 2007, pp. 42-50.
  12. Sodano, H.A., Park, G., and Inman, D.J., “An Investigation into the Performance of Macro-fiber Composites for Sensing and Structural Vibration Applications”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 18, No. 3, 2004, pp. 683-697.
  13. Song, H.J., Choi, Y.T., Wereley, N.M., and Purekar, A.S., “Energy Harvesting Devices Using Macro-fiber Composite Materials”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 21, No. 6, 2010, pp. 647-658.
  14. Bilgen, O., Kochersberger, K.B., and Inman, D.J., “Macro-fiber Composite Actuators for a Swept Wing Unmanned Aircraft”, *The Aeronautical Journal*, Vol. 113, No. 1144, 2009, pp. 385-395.
  15. Gao, L., Dong, L., Cao, J., Wang, S., and Liu, W., “Acoustic Emission-based Small Leak Detection of Propulsion System pipeline of Sounding Rocket”, *Shock and Vibration*, Vol. 2020, 2020, pp. 1-9.
  16. Ullah, N., Ahmed, Z., and Kim, J.M., “Pipeline Leakage Detection Using Acoustic Emission and Machine Learning Algorithms”, *Sensors*, Vol. 23, No. 6, 2023, pp. 3226.