음향방출 및 상관법을 이용한 상수도배관 누수탐지 연구

윤동진*† · 정중채* · 이영섭*

Leak Detection of Waterworks Pipeline Using Acoustic Emission and Correlation Method

Dong-Jin Yoon*†, Jung-Chae Jeong* and Young-Sup Lee*

Key Words : Elastic wave(탄성파), Acoustic Emission(음향방출), Correlation Method(상관법), Leak Detection(누수탐지), Waterworks Pipeline(상수도배관)

Abstract

Water leak is one of topics with great concern in Korea and many other countries, because of decreasing water supplies and the deterioration of old pipeworks. Correlation techniques have been widely used in leak detection of water pipes, which allow to locate a leak point based on the correlation of leak noise at two sites along water pipes. In this study, both the cross-correlation method and the conventional arrival time difference method are applied in order to analyze and to locate a leak point of a water pipe. In experiment, a 150 m of whole length waterwork pipeline system was constructed in a ground, and several types of leak noise were installed on the pipeline in order to control leak condition. Both the cross-correlation technique and the arrival time difference method showed favorable results at leak detection with the experimental pipeline system.

1. 서 론

국내 상수도 관망은 수도 시설의 중요한 구성요소지만 대부분이 지하에 매설되어 있음으로 배관의 노후상태 파악이 어려워 적절한 시기에 효과적인 유지관리를 받지 못하고 있다.(1) 환경부에서 발행한 [1999 년도 상수도 통계] 자료에 의하면 국내 총 연장 115,740 ㎞ 중 10 년 이상 경과된 노후관이 50 %에 이르고 있다. 특히, 수자원공사 관할구역이 아닌 일반 가정용, 수용가까지의 급수관이 50 % 이상을 차지하고 있어 이에 대한 누수관리의 필요성이 절실히 요구되고 있다. [1998 년 환경산업 총람] 통계에 의하면 전국적으로 약 16 %인 934,456 천 톤이 누수되었으며, 이를 금액으로 환산하면 약 2 천 5 백억원의 경제적 손실을 가져왔다. 또한 누수로 인한 수압저하와 이에 따른 부가적인 에너지 소요비용, 2 차 오염 등 간접비용까지 고려한다면 경제적인 손실은 년간 조 단위에 이를 것으로 판단된다. UN 은 우리나라를 이미 물 부족 국가로 분류하였으며, 2006 년도부터는 심각한 수준에 이를 것이라는 경고를 한 바 있다. 이러한 현실을 감안한다면 이에 대한 적극적인 대책이 절실하다고 생각된다.

현재의 누수 검출은 청음식 원리인 휴대용 장비를 사용하여 현장을 순회하며 탐지하고 있으나 비생산적이며, 효과적이지 못한 낙후된 방식으로 누수를 검출하고 있는 실정이다. 청음식 탐지 방식은 우리나라와 상수도 관리가 유사한 일본에서 개발되어 사용해 왔으나 일본의 경우 현재 이와 같은 방법을 사용하지 않고 있다. 이 방법은 휴대용 청음 장비를 소지하고 지하 관로를 따라 일일이 탐지해야 하며, 청음방법을 사용하기 때문에 고도의 주의를 기울여 누수를 판별해야 하는 숙련된

† 책임저자, 한국표준과학연구원 비파괴계측그룹
E-mail : djyoon@kriss.re.kr
TEL : (042)868-5332 FAX : (042)868-5639
* 한국표준과학연구원 비파괴계측그룹

기술이 필요하다. 따라서 이러한 방법에서 탈피하여 차세대에 적합한 연속적인 감시가 가능한 효율적인 누수탐지 네트워크 구축이 절실히 요구되는 시점에 이른 것이다. 이에 대한 대책으로서 본 연구에서 수행하고자 하는 차세대 누수탐지 시스템은 상수도 관로상의 누수를 어느 정도 확립된 기술인 압력 및 유량 센서를 이용하여 대략적인 누수 예상 구간을 선정하며,다음으로 각 지역에 설치된 탄성파 검출센서를 이용하여 정확한 누수 지점을 검출하는 기술을 개발하고자 하는 것이 주목적이다.

본 연구에서 사용하고자 하는 탄성파를 이용한 누출탐지 방법에는 탄성파 위치표정기술의 원리를 이용한 도달 시간차 법(arrival time difference method)과 CCSLP(cross-correlation sonic leak pinpointer) 기술이 있다.[2-5] 도달 시간차 법은 두 지점에서 측정한 시간의 차를 이용해 근원지를 알아내는 방법으로서 신뢰성 있는 전파속도와 시간차를 측정하게 된다면 아주 정확한 위치를 누수위치를 찾아낼 수 있다. 그리고 CCSLP 기술은 어느 정도 떨어진 두 센서에서 누출에 의해 발생되는 같은 신호를 측정한 후 두 신호의 시간차를 상관함수를 이용하여 계산하게 되는 원리이다.

따라서 본 연구에서는 모의 누수 시스템을 구성하고 음향방출(AE : acoustic emission) 센서 및 가속도계(accelerometer) 센서를 이용해 누수신호에 대한 신호 분석을 통해 누수지점을 검출하는 연구를 수행하였다.

2. 실 험

2.1 모의 누수 배관 시스템 설계 및 제작

본 연구에서는 실내용 단거리 모의누출 시스템과 옥외용 장거리 모의누출 배관시스템 두 종류를 설계 제작하였다. Fig. 1 은 실내에 설치한 길이 15 m 의 모의 누수 시스템으로서 배관의 양 끝 단은 관내에 물을 채울 수 있도록 마개를 만들었고, 급수, 배수 및 누수현상을 모사하기 위하여 밸브를 설치하였다. 누수를 모사하기 위하여 배관의 2/3 지점에 직경 3 ㎜ 의 구멍을 뚫었다

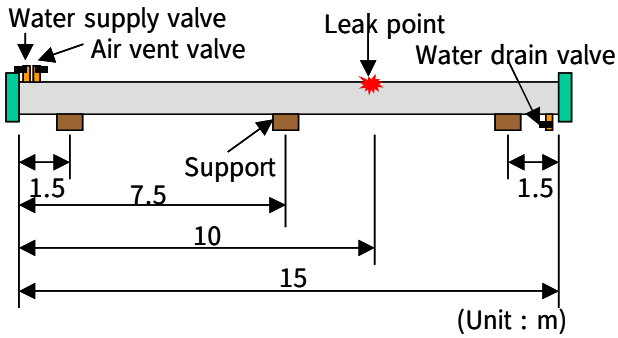


Fig. 1 Schematic diagram of indoor laboratory leak test pipeline system

Fig. 2 는 실제 매설되어 있는 상수도 배관망과 같은 조건을 모사하여 제작한 옥외 모의누수 배관 시스템을 나타낸 것이다. 누수를 모사하기 위하여

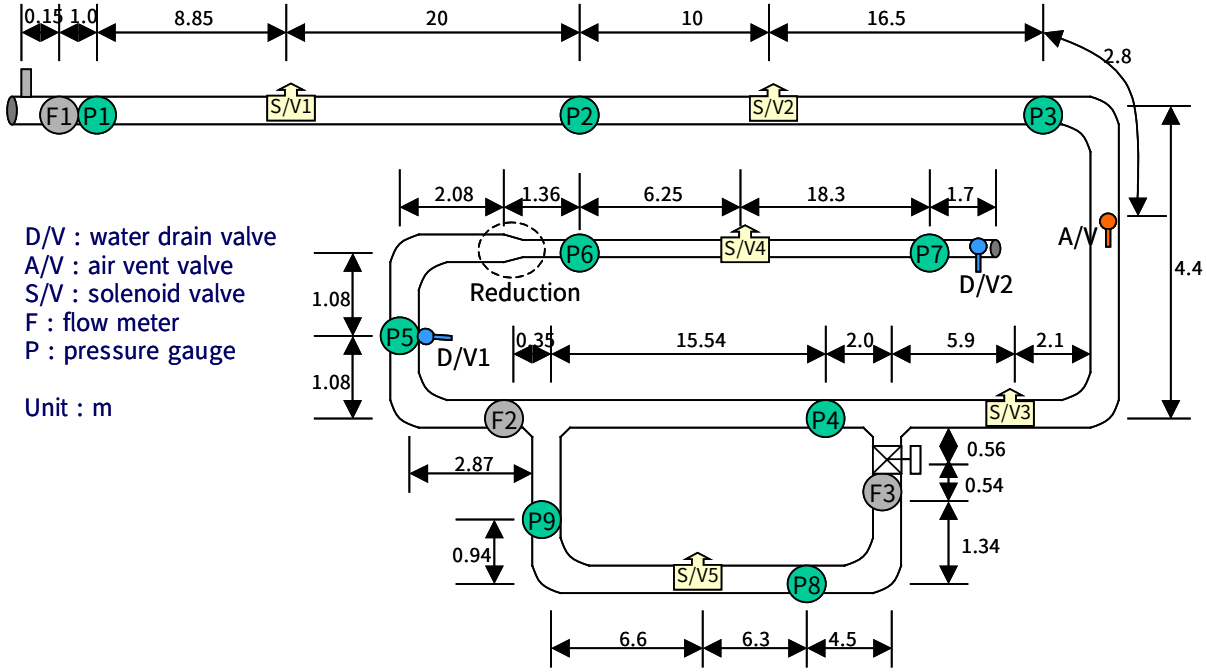


Fig. 2 Schematic diagram of simulated pipeline system for outdoor leak test

물 공급 지점으로부터 10 m, 40 m, 67 m 및 분기간 중간 지점에 지름 3 mm 누수 결함을 임의 가공하였다. 정상 상태일 때 수압과 누수가 발생하는 경우 순간적으로 수압이 낮아지는 것에 의한 누수 현상을 무선으로 온라인 모니터링 하기 위해 각각의 중요 지점에 압력계(pressure gauge)를 아홉 군데 설치하였으며, 누수가 일어날 때 물의 흐름을 이용한 누출감지를 위해 유량계를 세 지점에 설치하였다. 실내 및 옥외 모의누수 시스템 모두 아연 도금된 수도용 강관을 사용하였다.

2.2 측정장치

AE 신호의 측정을 위해 다채널 상용 AE 시스템인 MISTRAS 2001 (PAC)과 디지털 오실로 스코프(LeCroy 9354A)를 사용하였다. 데이터 취득을 위한 AE 센서는 2 개가 사용되었는데 하나는 60 kHz(PAC R6)이며 다른 하나는 150 kHz (PAC R15) 공진형 센서를 사용하였다. 모든 실험에서 문턱값은 43 77dB 로 주변 환경에 따라 설정되었으며, 임의 결함 구역에서 방출되는 누수 신호는 전치증폭기를 통해 60 dB 로 동일하게 증폭하였다. 가속도계 신호분석을 위해 가속도계(PCB 352C66, B&K 4370 type)가 사용되었으며, 가속도계 파워 유닛(PCB 480E09, B&K NEXUS Conditioning Amplifiers)이 사용되었다. 또한 적정 주파수를 분석하기 위해 Filter (Krohn-Hite Co. Model 3103)를 사용하였으며, 4 채널 Dynamic Analyzer (B&K Pulse System, Type 3560C)을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 음향방출센서를 이용한 누출 탐지 실험

AE 신호분석 시스템에서는 누수위치를 찾는 기본 변수들을 먼저 설정하게 되는데 본 실험에서 탄성파의 예상 전파 속도는 검증 실험을 통해 얻은 1300 m/s 로 설정하였으며 누수량이나 누수 음의 변화를 위해서 누수밸브의 각도와 측정위치를 변화시켜 실험을 수행하였다. Fig. 3 은 실내 모의 누수 시스템인 전체 길이 15 m 의 배관에서 5 m 지점과(sensor 1)과 12 m 지점(sensor 2)에 센서를 부착하여 실험한 결과이다. 누수 밸브를 45° 열고 누수 위치를 탐지한 결과 누수 위치에서 많은 AE 신호들이 형성됨을 알 수 있었다. 누수 밸브를 90° 열고 측정한 결과를 살펴보면, 누수가 발생하는 위치 외에 다른 지점에서도 AE 신호가 발생하는 것을 볼 수 있지만 누수 위치는 정확히 탐지 할 수 있었다. 이와 같이 누수 밸브를 90° 열었을 경우 다른 지점에서 AE 신호가 나타난 이유는 누수되는 물이 배관을 가진하는 힘이 증가하여 배관면을 타고 가는 또 다른 탄성파를 유발시키는 것으로 판단된다

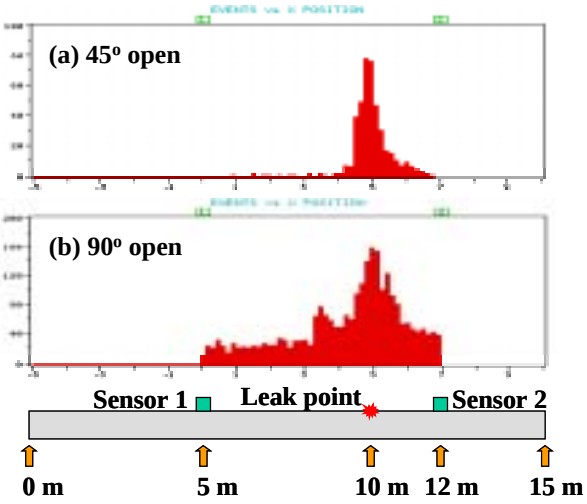


Fig. 3 Leak location by acoustic emission

따라서 이와 같은 실내 실험의 한계를 벗어나 장거리 배관을 모사한 옥외 누수탐지 시스템(Fig. 2)에서 실험을 수행 하였다. Fig. 4 는 누수 지점으로부터 S1 센서까지 거리는 15 m 이며 S2 센서까지 거리는 5 m 인, 전체 검출 구간 길이가 20 m 일 때의 AE 위치표정 결과를 나타낸 것이다. 탄성파 진행 속도는 1250 m/s 로 입력하였고 AE 검출 신호의 문턱값은 57 dB 로 설정하였다. 시험구간은 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 전체 모의 상수도 관로 중 60 m 의 직선 구간을 이루고 있는 S/V2 를 누출 지점으로 하여 진행한 위치표정 결과값을 나타내었다. 동일한 조건에서 위치표정의 재현성 실험을 한 결과 S1 센서로부터 정확히 15 m 되는 지점에 다량의 AE hit 가 발생되어 있음을 관찰할 수 있었다.

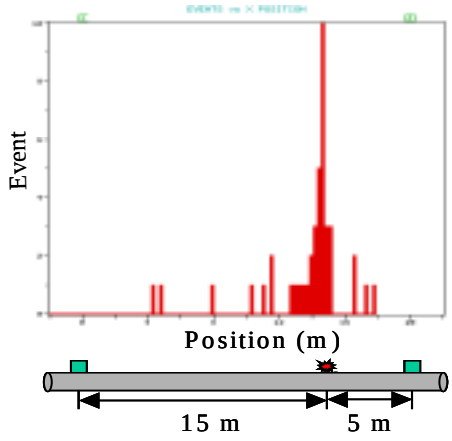


Fig. 4 Leak location by acoustic emission

Fig. 5 는 탄성파의 속도에 따른 영향을 관찰하기 위하여 야외 모의 누수 시스템 중 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 약 60 m 의 직선 구간인 S/V1 과 S/V2 밸브가 있는 배관망에서 실험한 결과이다. 임의 누수 지점으로부터 S1 센서는 10 m, S2 센서는 5 m 지점 상수도 관 표면에 R6 AE 센서를 부착한 후 측정하였다. 탄성파의 속도만을 (a) 1100 m/s, (b) 1200 m/s, (c) 1250 m/s 및 (d) 1300 m/s 로 각기 다르게 변화시켰을 때 전반적으로 (a) 1100 m/s 에서만 누수되는 지점에 비해 좌측에 위치가 표정되는 것을 제외한 다른 결과들은 누수 위치 표정을 정확히 나타내었다. 그러나 보다 엄밀히 관찰한 결과 탄성파의 속도가 1250 m/s 일 때 가장 정확한 위치표정 값을 나타내었기 때문에 이 후 분석에서는 대부분 탄성파의 속도를 1250 m/s 로 설정하였다. AE 를 이용한 누수지점 위치표정을 한 결과 누수가 발생하는 경우 많은 AE 신호들이 전구간에 나타났으나, 시간이 경과함에 따라 누출 지점에 보다 많은 AE hit 를 발생시켰음을 관찰할 수 있었다.

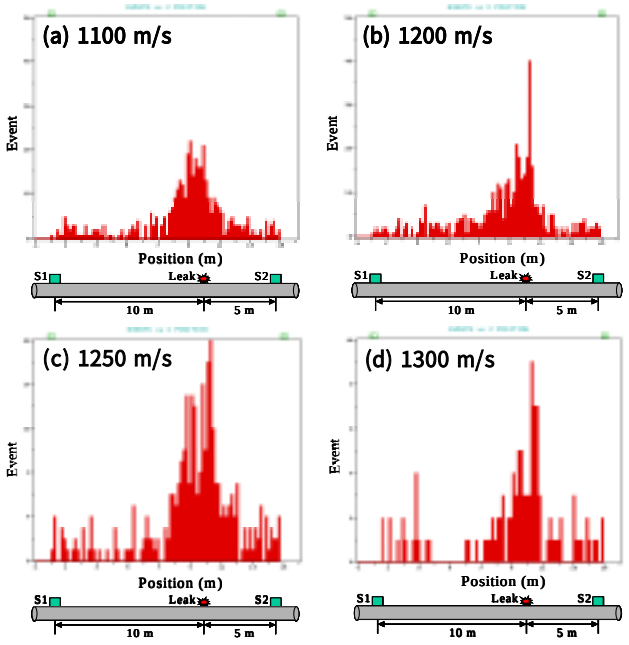


Fig. 5 Leak detection using the acoustic emission

Fig. 6 은 임의 누수 지점인 S/V2 솔레노이드 밸브로부터 S1 까지 거리가 30 m 이고 S2 까지 거리는 40 m 로서 전체 측정구간이 70 m 에서 누수탐지를 한 결과이다. 탄성파 전파의 흐름이 왜곡되는 지역에서는 측정 거리가 짧다 할지라도 누수 위치표정을 명확히 하기 힘들거나 심하게 왜곡되는 현상을 나타내기 때문에 곡관부 및 끝단부 영향을 배제한 실험 조건에서 탄성파 영향을 관찰하고자 하였다. 누수지역 위치표정결과 단일 peak 형태가 아니라 다소 산처럼 peak 를 이루며 나타났으나 누수가 집중적으로 일어나는 지점임을 쉽게 판단할 수 있다

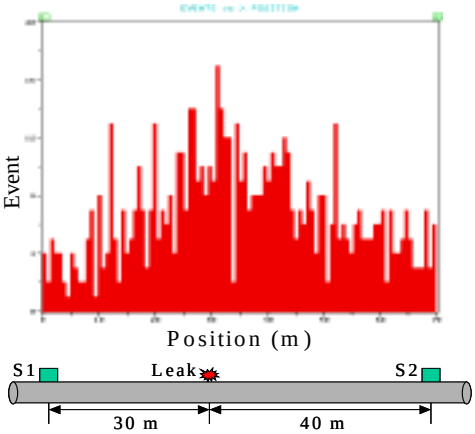


Fig. 6 Leak detection using the acoustic emission

3.2 가속도 신호분석을 통한 누출탐지 실험

가속도계를 이용한 누출탐지 실험 또한 AE 센서를 이용한 방법과 같이 실내 및 옥외 모의누수 시스템에서 실험을 하였다. 실험시에 filter 를 사용하여, 1/3 octave band 주파수 구간이 되도록 설정한 후에 실험을 수행하였으며, 중심주파수(center frequency)가 4 kHz, 6.3 kHz 와 8 kHz 인 경우에 대하여 실험을 수행하였다. Analyzer 설정은 모든 실험에서 동일하게 두고 실험을 하였는데, 주파수 구간은 12.8 kHz 에서 66.67 % overlap 을 한 Hanning Window 를 사용하여 150 번 average 하여 신호를 분석하였다. 누수위치 탐지를 위해 상호 상관관계 함수(cross-correlation function)에서 두 측정 가속도간의 시간 지연(time delay)을 측정 하였다.

Fig. 7 은 11 m 지점(ch. 1)과 4 m 지점(ch. 2)에서 측정한 가속도 신호를 중심 주파수가 다른 1/3 octave band 필터를 거친 후에 나타낸 상호 상관관계 함수이다. 상호 상관관계를 분석한 결과, 시간 지연을 나타내는 피크가 각각 다른 위치에서 나타나고 있다. 이는 주파수에 따라 전파되는 탄성파의 속도가 다르다는 것을 의미한다. 결론적으로 실내 실험의 결과에 의하면 가속도계를 사용할 경우, 지배적인 시간 지연을 나타내는 피크가 명확하게 구분이 되지 않는 문제점이 있으며, 시스템의 감쇠가 작기 때문에 발생하는 문제 등은 시스템의 길이가 길어질 경우에 어느 정도 해결이

가능할 것으로 판단된다. 이러한 문제점들은 지하에 매설되거나 경계가 무한한 상당히 긴 실제 배관계에서는 좀 더 명확하게 규명할 수 있을 것으로 판단된다.

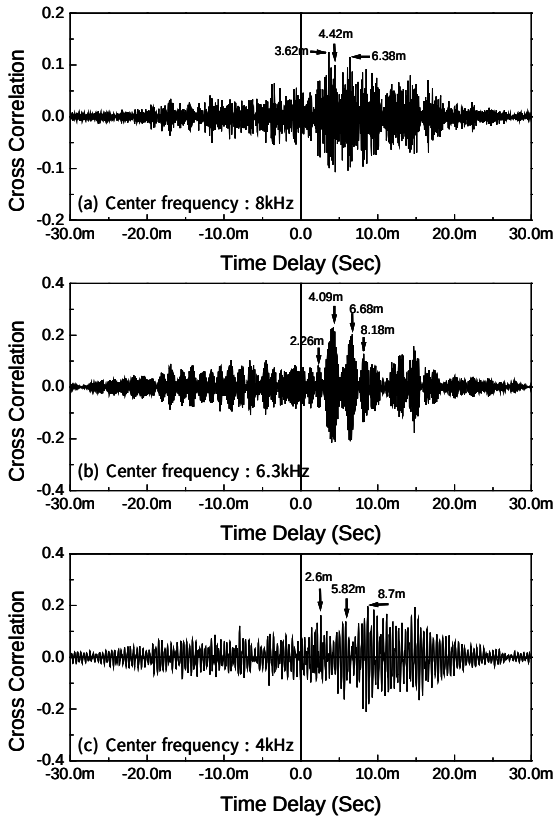


Fig. 7 Cross-correlation in the short pipe

Fig. 8 은 옥외 모의 누수 시스템에서 누수 지점으로부터 +5 m 지점(ch. 1)과 – 15 m 지점(ch. 2)에서 측정한 상호 상관관계 함수이다. 본 실험에서는 가속도 측정지점이 누수지점으로부터 (+)5 m 와 (-)15 m 로 두 지점간의 거리 차이는 20 m 이고, 탄성파가 전파되는 거리의 차이는 10 m 인 경우이다.(Fig. 8(a))

Fig. 8(b)는 10 m 지점(Ch. 1)과 5 m 지점(Ch. 2) 지점에서 누수 발생시 신호를 측정한 것으로서 가속도 신호를 1-10 kHz 로 넓게 주파수 필터링 한 상호 상관관계 함수 결과이다. 누수 위치를 찾는데는 근거리에서 큰 문제가 없으나 넓은 주파수 대역으로 인하여 깨끗한 위치표정을 하는데는 다소 어려운 점이 있다고 판단된다. 그림 (d)에 나타나는 상호 상관관계 결과에서 붉은색으로 표시된 4.2 m 은 4.2 ms 를 나타내며 두 지점간의 거리 차가 5 m 일 경우 배관에서의 탄성파 전파 속도가 약 1200 에 해당됨을 나타내고 있다.

Fig. 8(c)는 동일 지점에서 누수될 때 가속도 신호를 3-4 kHz 로 주파수 필터링 한 후에 얻은 결과를 나타낸 것으로 아주 뚜렷이 나타남을 볼 수 있다. 이는 앞서 고찰한 데이터를 바탕으로 누수 될 때 발생되는 신호는 2-4 kHz 범위를 갖는 신호였기에 4 kHz 이상 되는 주파수는 필터링을 한 결과 Fig. 8(c)에 나타내었듯이 대부분 제거되었음을 나타내었다. 즉 Fig. 8(b)와는 다르게 구별하기가 매우 용이할 정도로 정확한 위치표정 결과를 얻을 수 있었다.

즉, 주파수 필터링 조건에 따라 상호 상관관계는 각기 다르게 표시됨을 알 수 있었으며, 전반적으로 필터링 주파수 범위가 낮은 3-4 kHz 에서 깨끗한 누수 위치 표정을 할 수 있었으며, 주파수 필터링 폭이 높거나 너무 낮은 경우 명확하게 나타나지 않고 많은 피크가 나타났다. 결론적으로, 두 센서에서 측정되는 가속도 신호에 대해 전체 주파수 범위에서 상호 상관관계를 수행할 경우 특정 주파수 밴드에 대해 필터링 한 결과보다 대체적으로 산만하게 나타나게 되므로 정확한 누수 지점을 찾는데 애로 사항이 있을 것으로 판단되었다. 따라서 본 모의 누수 배관 시스템에서 최적인 주파수 밴드가 있듯이 실제 상수도 관망에서의 측정 가속도계에 대한 최적의 주파수 밴드가 있을 것으로 판단되며, 이들 각각에 대한 정보는 정확한 누수 위치를 찾는데 매우 중요한 정보가 될 것이다.

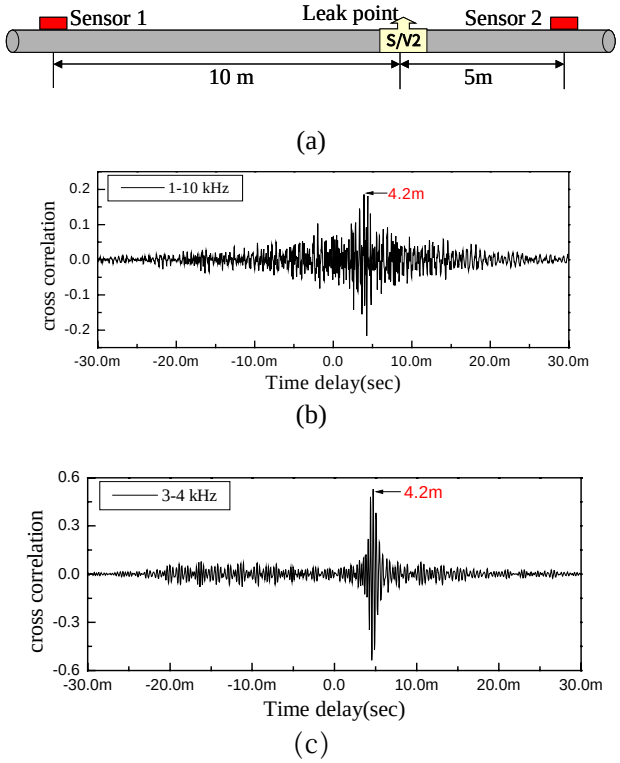
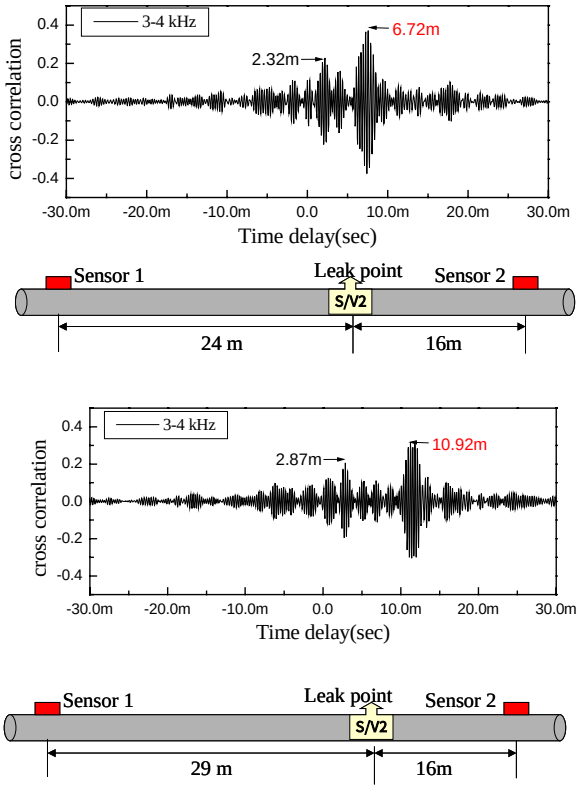


Fig. 8 Cross-correlation by filtering

끝단부에서의 반사파 영향 고찰하기 위해 Fig. 9 와 같이 거리에 따른 영향을 고찰하였다. 일반적으로 누수에 의해 생성된 탄성파는 저주파수 성분이 많기 때문에 파장이 긴 경우가 많다. 따라서 파장이 길기 때문에 직관 배관의 끝단부와 가까이 센서를 부착하거나 곡관부 근처에 센서를 부착하는 경우 끝단부나 곡관부에서의 반사파에 의한 영향을 받을 가능성이 많다. 이는 앞의 음향방출 센서를 사용하였을 경우와 같은 현상으로 설명할 수 있다. Fig. 9 는 끝단부에서의 반사파의 영향을 관찰하기 위해 끝단에서 어느 일정 거리를 두고 원거리 실험을 수행하였다. 그림 (a)는 센서 1 번의 위치가 좌측 끝단부와 가장 거리가 먼 경우이고 그림 (b)는 (a)보다는 가깝지만 (c) 보다는 끝단부와의 거리가 먼 경우이다. 그리고 (c) 그림은 끝단부와 가장 거리가 가까운 경우로서 (a)와 (b) 그림에 비해 시간지연 값이 누수 되는 위치에서 벗어나 있음을 알 수 있다. 그러나 (a)와 (b)의 경우 끝단부에 의한 반사파의 영향을 받지 않은 관계로 (-) 시간 지연이 나타나지만 명확한 위치표정을 할 수 있음을 알 수 있다.



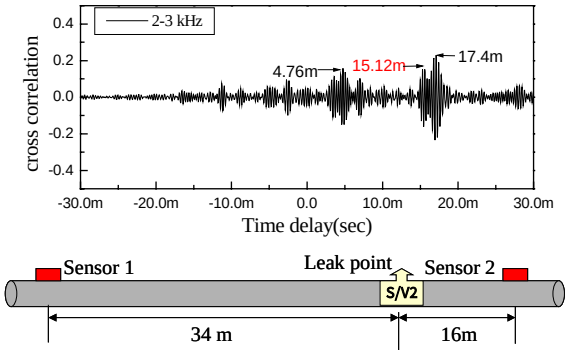


Fig. 9 Cross-correlation by edge-effect

4. 결 론

실내 및 옥외 모의누수 시스템을 설계 제작한 후 음향방출 센서와 가속도센서를 이용해 누수탐지 연구를 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 음향방출 센서를 이용하여 위치표정한 결과, 누수 부위를 정확히 탐지할 수 있는 것을 확인하였다. 누수 조건에 따라, 누수 위치 외의 다른 지점에서도 피크가 발생하는 것을 볼 수 있지만, 전체적인 경향을 나타내는 위치표정 피크는 잘 보여주고 있었다.
2) 가속도센서에 의한 상호 상관관계 함수로부터 시간 지연(time delay)을 구하고 이로부터 누수위치표정 가능성을 확인하였으며, 정확한 위치표정을 위해 각 재질 및 기하학적인 조건에 따른 탄성파의 속도, 특정 주파수 밴드 등에 대한 정보가 매우 중요함을 알 수 있었다.

참고문헌

(1) 안윤주, 이헌동, 1995, “국내 중소도시 수도관의 파괴특성에 관한 고찰,” 1995 년 한국수자원학회 춘계학술대회, pp. 48-51.
(2) Muggleton, J.M., Brennan, M.J. and Pinnington, R.J. 2000, “Wavenumber prediction of waves in buried plastic pipes for water leak detection,” *Proceedings of the 7th International Congress on Sound and Vibration, Garmisch-Partenkirchen, Germany*, pp. 985-992.
(3) Shifeng Liu, Luming Li, Jian Cui, Tie Li, 2000, “Acoustic Emission Detection of Underground Pipeline Leakage,” 15th WCNDT.
(4) R. K. Miller, etc., 1999, “A reference standard for the development of acoustic emission pipeline leak detection techniques,” NDT&E International Vol. 32, pp. 1-8.
(5) Jerzy M. Raijtar, Rajan Muthiah, Larry R. Scott, 1994, “Pipeline leak detection system for oil spills prevention,” Technical Completion Report, pp. 601-614.