

논문 2011-48SP-3-15

센서네트워크를 이용한 무선 누수 탐지 시스템

(Wireless Water Leak Detection System Using Sensor Networks)

최 수 환*, 엄 두 섭**

(Soo Hwan Choi and Doo Seop Eom)

요 약

상수도 누수 탐지 시스템은 상수관로상의 누수 발생을 탐지하고 누수 위치를 추정하여 그 결과를 관제 서버로 알리는 시스템이다. 기존의 누수 탐지는 일반적으로 사용자가 직접 장비를 들고 이동하면서 누수 발생 탐지를 하는 방식으로 진행하기 때문에 작업 속도도 느리고 작업자의 경험에 많은 부분을 의존해야 한다. 또한 누수 탐지의 정확도를 높이기 위해서는 물 사용이 적은 심야시간에 탐지를 해야 하기 때문에 작업에 어려움이 따른다. 본 논문에서는 센서네트워크를 이용한 무선 누수 탐지 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템에서 각 누수 탐지 장치는 무선 네트워크를 형성하여 탐지 결과를 주고받으며 이를 통하여 탐지의 신뢰성을 높였다. 또한 정확한 탐지를 위하여 상수도관의 수증음의 특성을 분석하고 누수음을 분리해내는 사전 신호처리 과정을 제안하였다. 마지막으로 누수 위치를 추정하기 위해서는 두 지점에 설치된 누수 탐지 장치의 시간 동기가 매우 중요한데 본 논문에서는 GPS에서 제공하는 1PPS(1 Pulse Per Second) 신호를 이용하여 정확한 시간 동기를 획득하였다. 본 시스템은 남양주시의 상수관로상에 적용하여 그 성능을 검증하였다[1].

Abstract

Water leak detection system is a system based on wireless sensor networks(WSNs) which detect a leak on water supply, localize the leak position and finally inform a water management center. A traditional leak detection method is to use experienced personnel who walk along a pipeline listening to the sound that is generated by the leaks and their effectiveness depend on the experience of the user. Also making more successful detection, it should be processed at middle of the night when people do not use water, as the result users have to operate the leak detection system at midnight. In this paper, we propose a new method for the water leak detection system based on the WSNs and describe it in detail. Leak detection devices which detect a leakage of water transmit and receive the result of water leak detection with each other by configuring WSNs to improve reliability of the detection result. Also, we analyzed the sound from water flowed in pipeline, proposed the pre-signal processing to separate a leakage sound from noisy sound. And lastly, It is especially important to make a time synchronization with water leak detection devices that are installed on the pipeline, we used 1PPS(1 Pulse Per Second) signal generated by GPS, therefore we could get a precise time synchronization. The proposed system set up in Namyangju and performances were evaluated.

Keywords : 누수탐지, 센서네트워크, GPS, 1PPS, 신호처리

I. 서 론

상수도관은 지하에 매장된 시설물이기 때문에 재료

의 경년적 열화나 관연결 부속의 재질 및 구조의 부적절한 사용, 내부 부식, 교통 하중과 지반 이동 등의 다양한 요인에 의해서 손상을 입을 수 있으며 이로 인해 누수가 발생할 수 있으나 이를 조기에 탐지하기는 매우 어렵다. 게다가 누수 발생을 확인하였다 하더라도 실제로 누수 발생 지점을 찾는 것 또한 어렵다. 2008년 기준으로 국내의 상수도 서비스의 우수율은 약 81.1% 정도로 약 7억3400만 m³의 물이 누수 되고 있으며 이를 금액으로 환산하면 약 5200억원의 아까운 국민의 세금이

* 학생회원, ** 정회원-교신저자, 고려대학교 전자컴퓨터공학과

(Department of Electronics and Computer Engineering, Korea University)

※ “본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음” (NIPA-2010-C1090-1021-0001)

접수일자: 2010년10월22일, 수정완료일: 2011년2월15일

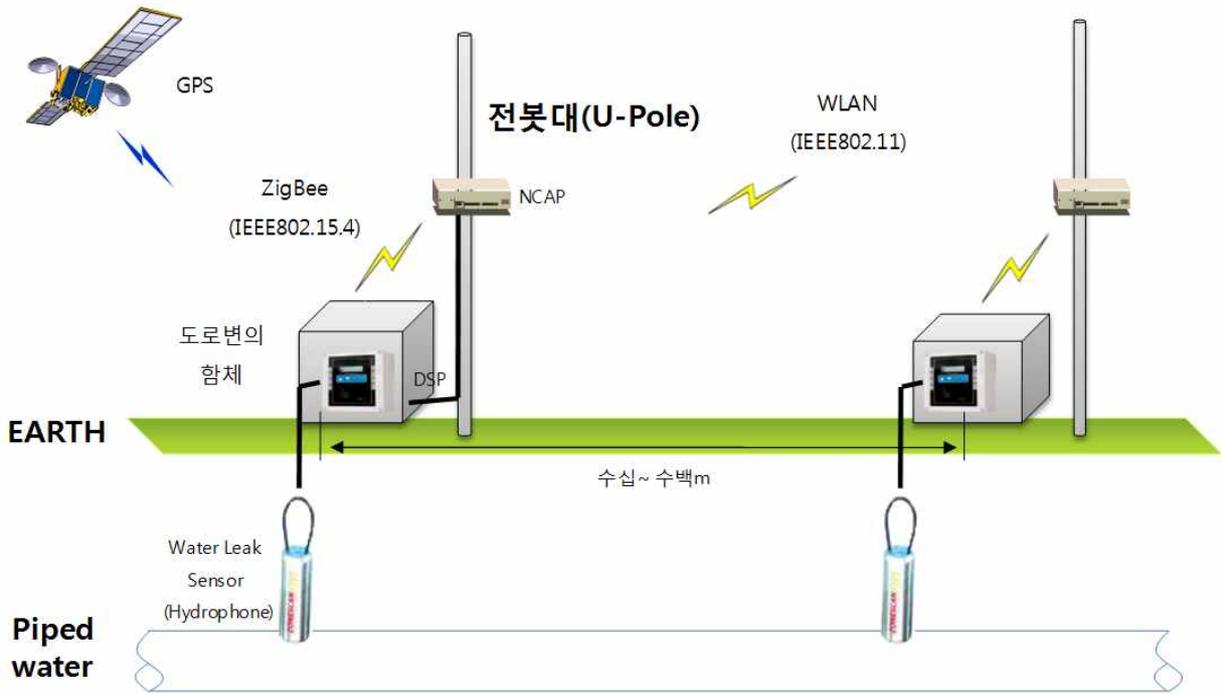


그림 1. 누수 탐지 시스템 구성도
 Fig. 1. Schematic of water leak detection system.

땅속으로 손실되고 있는 셈이다^[2]. 기존의 누수 탐지 방법은 사용자가 청음기를 사용하여 지상에서 상수관로를 통해 흐르는 소리를 듣고 누수 부위를 알아내는 방식이 있다^[3]. 이 방식은 땅속 깊이 수도관이 매설되어 있거나 도로를 통행하는 차량이나 주변 소음에 의한 영향을 받을 수 있어 누수 탐지가 용이하지 않을 뿐만 아니라 대략적으로 누수 부위를 파악할 수는 있겠으나 정확한 누수 위치를 알아내는데 미흡하여 여러 군데 굴착 작업을 하여 누수 위치를 찾아내야 하는 번거로움이 따른다.

다른 방식으로는 상수관로상에 하이드로폰이나 진동 센서를 설치하여 누수음을 탐지하는 방식이 있다^[4-5]. 이와 같은 방법은 수중의 누수음이나 진동을 직접 장비로 검출하는 방식이므로 사람이 하는 것보다 정확한 진단이 가능하지만 대부분 누수가 의심되는 지역에 설치하여 일정 시간 동안 동작하게 한 뒤 수거하여 PC에서 분석하는 방식으로 이용한다.

그러나 이와 같은 방식은 누수 발생에 미리 대처하고 능동적으로 대처하기 어렵기 때문에 네트워크를 통하여 상수관을 실시간으로 감시할 수 있는 시스템이 제안되고 있다^[6]. 제안된 누수 탐지 시스템은 항시 상수관로상에 설치하여 온라인으로 감시를 하며 누수 발생 탐지와

누수 위치 추정까지 모두 장비 내에서 자동으로 처리하는 보다 적극적인 누수 탐지 방식이라 할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 누수 탐지 시스템의 전체 망 구성과 구성 요소의 기능과 역할에 대하여 정의한다. III장에서는 누수 발생 여부를 탐지하는 동작에 관하여 서술하고 IV장에서는 누수 위치를 탐지하는 동작에 관하여 서술한다. V장에서는 실제 상수도관에 적용하여 얻은 데이터를 이용하여 성능을 검증하였으며 VI장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 구성

1. 전체 시스템 소개

제안된 누수 탐지 시스템의 전체 구조는 그림 1과 같다. 먼저 누수 탐지 센서(하이드로폰) 특수하게 제작된 케이스속에 담겨 상수도관에 설치된다. 하이드로폰에서 채집된 수중 음향은 도로변에 설치된 합체에 위치한 DSP 장치로 전달된다. DSP장치에서는 입력 신호를 샘플링한 뒤 누수 발생 여부를 탐지하기 위한 동작을 한다. 또한 DSP장치는 정확한 시간 동기화 시간 정보를 얻기 위해 GPS 신호를 수신한다. 신호처리 결과는 무선 모듈(ZigBee)을 통하여 자신의 상위에 있는

NCAP(Network Capable Application Processor)으로 전송된다. NCAP은 인접한 두 NCAP간에 master/slave 관계를 가지고 있다. Slave NCAP은 자신의 하위에 있는 DSP 장치의 신호처리 결과를 Master NCAP으로 보낸다. Master NCAP은 두 DSP 장치에서 보내온 신호처리 결과를 토대로 누수 발생여부를 결정한다. 누수가 발생되었다고 판단되면, Master NCAP은 자신의 하위 DSP장치와 Slave NCAP에게 누수 데이터를 요청한다. Slave NCAP은 이 요청을 다시 자신의 하위 DSP장치로 전송한다. 누수 데이터를 요청 받은 DSP 장치들은 GPS의 신호를 이용해서 미리 정해진 기준 시간에 동시에 신호를 샘플링한다. 누수 위치를 정확하게 추정하기 위해서는 두 하이드로폰에서 동시에 샘플링 하는 것이 중요하기 때문이다. 이렇게 샘플링된 데이터는 상위의 NCAP으로 전해지며, Slave NCAP은 Master NCAP으로 재전송한다. Master NCAP에서는 두 지점의 하이드로폰에서 전송된 누수 데이터를 cross-correlation 연산하여 누수 발생 위치를 추정한다.

2. 누수 탐지 센서

본 연구에서는 하이드로폰을 이용하여 누수를 탐지하였다. 하이드로폰은 특수하게 제작된 금속 케이스에 넣고 상수도관을 천공하여 설치한다. 하이드로폰 전용 오디오 케이블을 이용하여 DSP 장치의 ADC 입력단자에 연결하였다. 다음 그림 2는 맨홀 내부의 상수도관에 설치된 누수 탐지 센서이다.



그림 2. 상수도관에 설치된 누수 탐지 센서
Fig. 2. Water leak detection sensor installed on pipe.

3. DSP장치

DSP장치는 TI사의 TMS320F28335 DSP 프로세서를 이용하였으며 무선 네트워크 구성을 위한 ZigBee 모듈

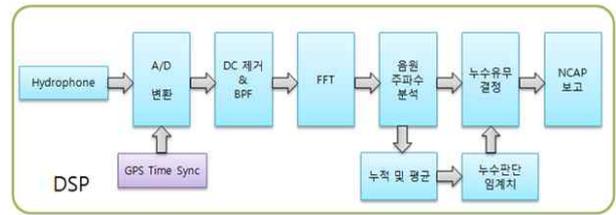


그림 3. DSP장치의 누수 탐지 동작
Fig. 3. Block diagram of water leak detection procedure for DSP device.

은 TI의 CC1100을 이용하였다. 하이드로폰의 입력 신호는 TI사의 ADS1256 24Bits ADC를 이용하여 2KHz로 샘플링 하였다. 정확한 시간 정보와 동기를 얻기 위해서 ASCEN사의 GPS 모듈을 사용하였다. 시간정보는 UART를 통해서 입력 받고, 1PPS신호는 인터럽트로 이용하기 위하여 GPIO신호로 입력 받는다.

그림 3은 누수발생탐지를 위한 DSP 장치의 동작도이다. 하이드로폰에서 수집된 상수도관 내부의 수증음은 GPS를 통해 얻은 시간 정보를 이용하여 미리 정해진 심야시간에 샘플링된다. 가급적 주위 수용가의 물사용량이 적은 시간대에 데이터를 처리하여 오탐지율을 낮추기 위함이다. 상수도에서 누수가 발생하면 누수 부위에서 소리가 발생하며 이 소리는 상수관과 내부에 흐르는 물을 통하여 양방향으로 전파된다. 이때 전파되는 매질이 Low-Pass Filter의 역할을 하여 고주파 성분은 감쇄되고 저주파 성분만이 전파된다. DSP 장치에서는 샘플링된 신호의 DC성분을 제거하고 Band-Pass Filter를 통과시켜 누수음이 주로 분포하는 주파수 대역만을 통과시킨다. 실험 결과 누수음은 주로 5~250Hz 대역에 분포하였다. 필터를 통과시킨 뒤에는 FFT(Fast Fourier Transform)를 통해 주파수 영역에서 신호를 분석한다. DSP장치가 처음 동작될 때에는 누수 발생을 판단하기 위한 임계치를 획득하는 동작을 한다. 정해진 시간에 DSP 장치는 수증음을 반복해서 샘플링하여 주파수 영역에서 누적하여 평균값을 구한다. 누수 판단의 임계치가 정해지면 다음날부터는 같은 시간에 수증음을 샘플링하여 주파수 영역에서 임계치와 비교한다. 비교 결과 임계치보다 일정비율 이상 큰 신호가 들어온다면 누수가 발생한 것으로 판단하게 된다. 본 논문에서는 새벽 2시, 3시 그리고 4시 정각에 이와 같은 동작을 1분 간격으로 각각 N회씩 반복하도록 하였으며 그 결과를 NCAP으로 전송하였다. 전체 N회중 M회 이상 동시에 누수로 판단되었을 경우 최종적으로 누수가 발생한 것

으로 판단한다.

4. NCAP장치

NCAP 장치는 주변의 DSP장치와 네트워크를 구성하여 데이터를 수신하고 제어 신호를 전송한다. 또한 주변의 NCAP 장치와 WLAN 네트워크를 형성하여 원거리에 있는 관제 센터에 연결된다. NCAP 장치에 사용되는 CPU는 미국 인텔사의, PXA270 프로세서로서 200 MHz의 동작속도를 갖고 있다. OS는 Linux를 사용하였으며 IEEE802.11 무선 접속 규격과 IEEE802.3 유선 접속 규격을 지원한다. 또한 DSP 장치와 연결하기 위한 ZigBee 모듈을 포함하고 있다.

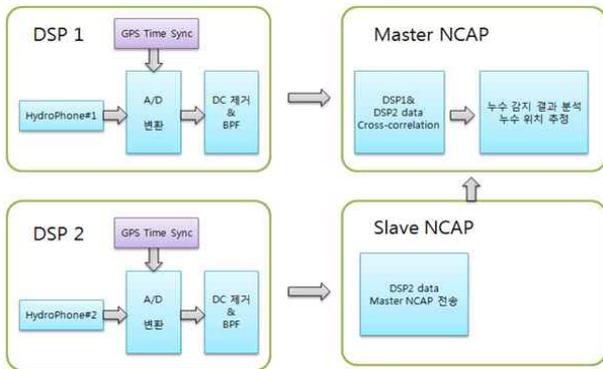


그림 4. DSP장치와 NCAP장치의 누수 위치 탐지 동작
Fig. 4. Block diagram of water leak localization procedure for DSP device and NCAP device.

그림 4는 DSP장치와 NCAP장치에 의해 누수 위치를 탐지하는 동작을 설명한 그림이다. NCAP은 인접하여 설치된 두 NCAP간에 Master/Slave 관계를 형성하고 있다. Master NCAP에서 누수 발생 판단과 누수 위치 추정을 하며 Slave NCAP은 자신의 하위 DSP 장치에서 수신된 데이터를 Master NCAP으로 전달하는 역할을 한다. DSP 장치는 GPS의 1PPS 신호를 기준으로 정해진 시각에 동시에 데이터를 샘플링 하여 NCAP으로 전송한다. Slave NCAP은 자신의 DSP 장치로부터 수신된 데이터를 Master NCAP으로 재전송한다. 누수 데이터가 수신되면 cross-correlation 연산을 통하여 누수 발생 위치를 추정하고 그 결과를 관제 센터로 전송한다.

Ⅲ. 누수 발생 탐지

그림 5는 실제 상수도관에서 수집된 데이터를 이용

하여 그린 스펙트럼 그림이다. 주파수 영역에서 실제 신호의 모습을 보기 위해서 DC성분만 제거하였을 뿐 Band-Pass Filter 등의 사전 신호처리는 거치지 않고 FFT 연산을 하였다. 파란색 실선 데이터는 평상시 누수가 없을 때 샘플링한 데이터의 주파수 스펙트럼을 100회 평균한 그림이다. 평상시 누수가 발생하지 않은 시점에서는 DC부근과 약 290Hz 부근을 제외하고는 전반적으로 고른 분포를 보인다. 290Hz 부근의 큰 신호는 낮 시간대에 주변 수용가의 물 사용이 빈번할 때에는 250~300Hz 대역 사이에 불규칙하게 분포하다가 심야 시간에 물 사용량이 적어지면 차츰 일정하게 290Hz 부근의 신호로 나타난다. 이는 상수도관에 물이 흐르면서 생기는 진동에 의한 것으로 심야 시간에는 상수도관에 물이 가득 차게 되므로 일정한 주파수를 보이게 되는 것으로 판단된다. 실제 누수를 위한 신호 처리에서 이 대역은 불안정한 동작을 일으킬 위험이 있으므로 필터링하여야 한다. 붉은색 점선 데이터는 상수도관에 임의의 누수 이벤트를 발생시킨 뒤 샘플링한 신호의 스펙트럼이다. 전반적으로 신호의 크기가 크며 주로 250Hz 이하 대역의 신호가 매우 커짐을 알 수 있다. 본 논문에서는 DC부근의 데이터는 노이즈의 영향을 많이 받을 수 있기 때문에 50~250Hz 대역의 신호를 비교하여 누수 발생 여부를 판단하였다.

새벽 2시, 3시 그리고 4시 정각이 되면 DSP 장치는 1분 간격으로 한번씩 10번 동안 샘플링 하여 50~250Hz 대역의 스펙트럼을 임계치 데이터와 비교한다. 임계값보다 일정비율 이상 큰 신호가 감지되면 누수 발생으로 판단하고 10회 동안 판단한 결과를 NCAP으로 전송한다. 실험 결과 제안된 시스템에서는 100m 떨어진 지점에서 분당 3리터 정도의 누수를 탐지하였다.

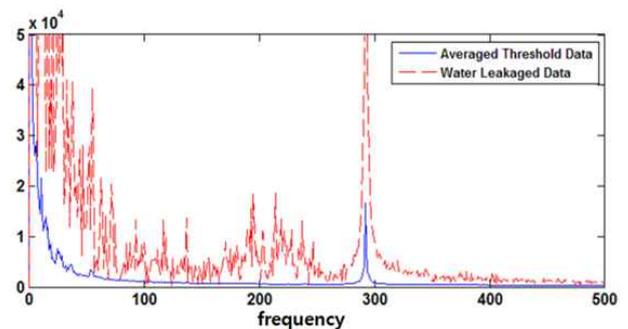


그림 5. 평상시 상수도관의 평균값과 누수음의 주파수 스펙트럼

Fig. 5. Frequency spectra of averaged threshold data and water leak data.

Master NCAP은 자신의 하위의 DSP 장치와 Slave NCAP의 하위 DSP 장치로부터 전송된 누수 탐지 결과를 종합하여 총 10회중에 8회 이상 누수가 발생한 경우 최종적으로 누수가 발생한 것으로 판단한다.

IV. 누수 위치 탐지

Master NCAP에서 누수가 발생되었다고 최종적으로 판단하면 DSP 장치로 누수 데이터를 요청한다. 누수 위치를 판단하기 위해서 다음 그림 6과 같이 TDoA(Time Difference of Arrival)^[7]를 이용한다.

TDoA는 누수가 발생한 위치로부터 상수관의 양쪽에 위치한 하이드로폰까지의 거리 차에 의해 누수음이 도달하는 시간 차이를 이용하여 누수 위치를 추정하는 방법이다. TDoA 를 정확하게 구하기 위한 가장 중요한 조건은 두 지점에서 동시에 같은 시간에 데이터를 샘플링 해야 한다는 것이다. 만일 샘플링 시작 시간이 달라지면 그 시간차만큼 누수 발생 위치를 추정하는데 오차가 커진다. 본 논문에서는 두 DSP 장치가 서로 떨어져 있기 때문에 시간 동기를 맞추기 위해서 GPS에서 제공하는 1PPS 신호를 이용하였다. 1PPS 신호는 서로 다른 GPS 수신 모듈에서도 항상 절대적으로 같은 시간에 1 초마다 한번씩 내어주는 펄스 신호이다. 이 펄스 신호를 이용하여 동시에 같은 시간에 샘플링을 시작한다. 샘플링은 2KHz로 2048개의 data를 샘플링 한다. 24bit ADC이기 때문에 4byte word로 저장하여 전체 데이터 사이즈는 8Kbytes가 된다. Master NCAP 에서는 두 지점에서 데이터가 수신되면 cross-correlation 연산을 수행하여 누수음의 도달 시간 차인 T_d 를 구한다.

상호상관 연산은 다음의 식 (1)을 이용하여 구한다.

$$R_{vw}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v(t)w^*(t-\tau)dt \quad (1)$$

여기서 $v(t)$ 와 $w(t)$ 는 하이드로폰 #1과 #2에서 샘플링된 데이터이다. $R_{vw}(\tau)$ 의 그래프에서 최대값을 갖는

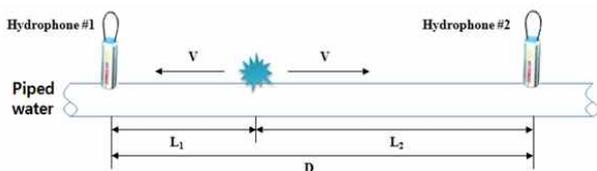


그림 6. 누수 위치 추정(TDoA)
Fig. 6. Schematic of water leak localization(TDoA).

τ 의 값이 두 신호의 TDoA 이다. 실제로는 보다 정확한 위치 추정을 위하여 수차례에 걸쳐서 DSP 로부터 샘플링 데이터를 전송 받아 τ 를 계산하여 평균한 값이 T_d 가 된다.

누수 위치로부터 하이드로폰 #1까지의 거리 L_1 은 다음 식(2),(3),(4)에 의하여 구할 수 있다.

$$T_d = (L_2 - L_1)/V \quad (2)$$

$$L_2 = D - L_1 \quad (3)$$

$$L_1 = (D - V \times T_d)/2 \quad (4)$$

여기서 D 는 두 센서간 거리이며, 음파의 전달 속도 V 는 실험 초기에 측정한 결과 약 1163m/sec 이다. 일반적으로 수중에서 음파가 전달되는 속도는 480m/sec이지만, 하이드로폰은 파이프의 표면에 천공을 하고 설치되기 때문에 물과 파이프를 통해서 전파된 음파와 진동음을 수신하게 된다. 이때 신호의 전파속도는 파이프의 재질, 두께, 수압, 파이프가 설치된 기울기, 파이프를 외부의 재료 등에 따라 다르다. 본 논문에서 실제로 적용된 상수도관의 재질은 주철관(cast iron pipe)으로 유사한 조건에서 측정된 전달 속도는 1175m/sec 이다^[8].

실제로 누수와 유사한 이벤트를 발생시키기 위해 상수도관에 밸브를 설치하였다. 두 하이드로폰은 154m가량 떨어져 있고 밸브는 한쪽 하이드로폰에서 51m 정도 떨어진 지점에 설치되었다. 실제로 지하에 묻혀있는 상수도관이기 때문에 지상의 도로를 따라서 매설된 거리를 측정하였다.

그림 7은 실제 상수도관의 누수 이벤트를 발생시키고 데이터를 샘플링한 그림과 cross-correlation 연산을 위해 사전 신호 처리한 데이터를 그린 그림이다.

그림 7. (a)를 보면 실제로 상수관 내부에는 누수음 외에도 다양한 소리가 섞여있음을 알 수 있다. 먼저 하이드로폰의 노이즈를 감소시키기 위해 다음과 같은 시스템 함수 $H(z) = 1 - z^{-1}$ 을 통과시킨다.

이 시스템 함수는 계차방정식(difference equation) $y[n] = x[n] - x[n-1]$ 으로 나타낼 수 있으며 high-pass filter 특성을 가진다^[9]. 또한 누수음 이외의 신호 성분을 차단하기 위해 50~250Hz 대역을 통과시키는 band-pass filter를 거친다. Band-pass filter를 통과시킨 결과는 그림 7의 (c),(d)에서 볼 수 있다. 사전 신호 처리 후

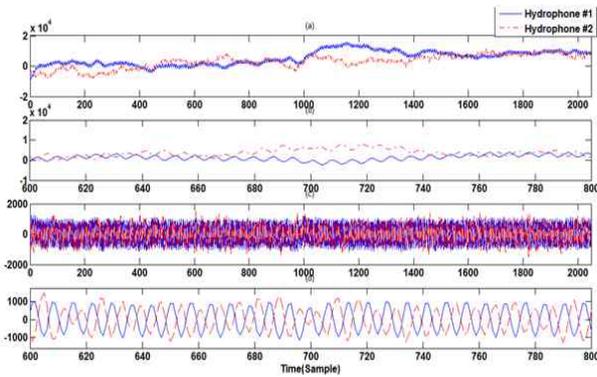


그림 7. (a) 두 지점에서 샘플링된 데이터, (b) (a) 그래프의 일부분을 확대, (c) 누수음에 해당하는 대역의 신호만 추출한 데이터, (d) (c) 그래프의 일부분을 확대

Fig. 7. (a) Hydrophone datas that sampled from two adjacent points, (b) enlarged view of graph (a) , (c) signal processing data about leak noise, (d) enlarged view of graph (c).

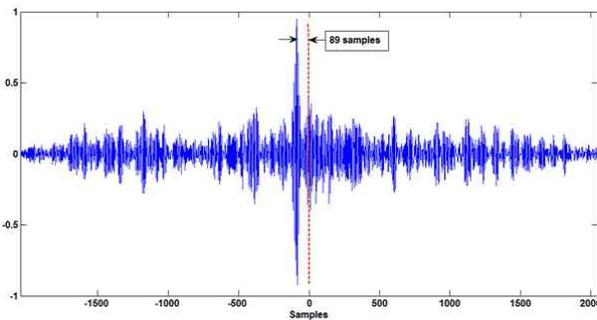


그림 8. Cross-correlation 연산 결과

Fig. 8. Cross-correlation result.

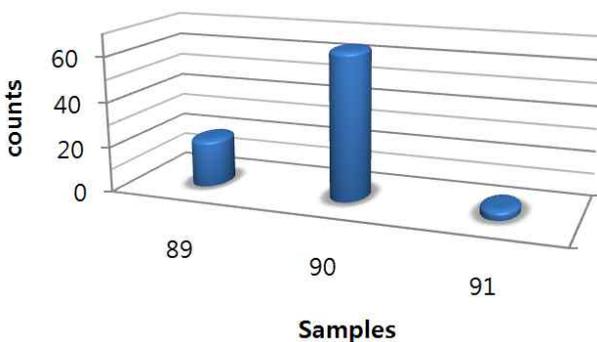


그림 9. Cross-correlation 연산의 시간 지연 샘플수에 대한 히스토그램

Fig. 9. Histogram for time delay samples of cross-correlation.

cross-correlation 연산한 결과는 다음 그림8과 같다.
 최대값이 나타나는 위는 중심에서 좌측으로 89샘플 떨어진 위치이다. 한 샘플당 시간차는 0.5 msec 이므로 두 지점간 시간차는 44.5msec가 된다. (154 -

$1163 \times 44.5m / 2 = 51.1m$ 로 실제 거리 약 51m에 거의 근접한 결과임을 알 수 있다.

다음 그림 9는 실제 상수도에서 90회 반복하면서 얻은 두 지점의 누수음을 이용하여 cross-correlation 연산을 한 뒤 중심을 기준으로 최대값이 나타나는 샘플의 위치를 나타낸 히스토그램이다. 모든 최대값이 나타난 샘플의 위치가 89~91 샘플이내의 일정한 결과를 보이므로 본 논문의 누수 위치 탐지에 사용된 시각 동기 방법과 누수 신호 처리 방법이 그만큼 정확하다고 판단된다. 만일 1샘플의 오차가 발생한다면, 2KHz로 샘플링하고 누수음의 전달 속도가 1163m/sec 라 가정할 때 0.5815m의 거리 오차가 발생하게 된다.

V. 결론

본 논문에서는 무선 네트워크를 이용한 누수 발생 탐지 및 누수 위치 추정 시스템을 제안하였다. 누수 발생 탐지 테스트 결과 100m 떨어진 지점에서 분당 3ℓ 정도의 누수를 탐지할 수 있었다. 또한 누수 위치를 추정하기 위해서는 두 DSP장치간 시각 동기가 중요하다. 본 논문에서는 GPS의 1PPS 신호를 이용하여 시각 동기를 맞추었다. 누수 위치 추정 연산을 반복한 결과가 일정하다는 것은 1PPS를 이용한 시각 동기가 정확하게 동작함을 알 수 있다. 또한 누수 위치 추정 신호 처리 방법이 그만큼 정확하다는 것을 알 수 있다.

누수 탐지 시스템은 앞으로도 많은 연구와 개발이 필요한 분야이다. 실제로 운용되고 있는 상수도관에 시스템을 설치하고 테스트하기까지는 여러 정부 기관의 협조가 필요하다. 본 논문에서는 누수 이벤트 발생을 위한 밸브를 한군데밖에 설치하지 못하였지만 실험의 정확도를 높이기 위해서는 추가적인 밸브를 설치해야 한다. 또한 현재는 주철관에서만 테스트하였으나 PVC관과 강철관과 같이 관의 종류 및 직경을 달리하여 폭넓은 현장 데이터를 얻어야 누수 탐지 시스템의 정확도를 높일 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] U-상수도 관망관리 시스템 구축사업, '08년 u-City 과제 사업, 행정안전부.
- [2] 환경부, (2008)상수도통계 2009 (상~하).
- [3] JC-737, 전자청음식 누수탐지기, 대성엔지니어링.

- [4] 일본국 공개특허 평11-271168.
- [5] Zcorr, 상관식 누수탐지기, RADCOM (영국).
- [6] I. Stoianov, L. Nachman, S. Madden and T. Tokmouline, "PIPENET: A wireless sensor network for pipeline monitoring," *Proceedings of the International Symposium Information Processing in Sensor Networks('07)*, pp. 264-273, April 25-27, (2007), Cambridge, MA.
- [7] L. Zhu and J. Zhu, "A New Model and its Performance for TDOA Estimation," *IEEE Vehicular Technology Conference*, Vol.4, pp.2750-2753, October(2001).
- [8] 이영섭, 윤동진, "배관-유체 연성진동을 이용한 누수지점 탐지 알고리즘 개발 연구", *춘계학술대회 논문집*, (2004), 대한기계학회, pp.798-803
- [9] Ross E. Bland, "Acoustic and Seismic Signal Processing for Footstep Detection", B.S., MIT (2006).

— 저 자 소 개 —



최 수 환(학생회원)
 2000년 고려대학교 전기전자전파 공학부 학사 졸업
 2002년 고려대학교 전자컴퓨터 공학과 석사 졸업
 2002년~현재 고려대학교 전자 컴퓨터 공학과 박사과정
 2004년~2009년 (주)폴리테크 선임연구원
 <주관심분야 : 디지털신호처리, 임베디드 시스템, 센서네트워크>



엄 두 섭(정회원)-교신저자
 1987년 고려대학교 전자공학과 학사
 1989년 고려대학교 전자공학과 석사
 1999년 일본 오사카대학 정보통신공학과 박사
 1989년 2월~1999년 8월 한국전자통신연구소 연구원
 1999년 9월~2000년 8월 원광대학교 전임강사
 2000년 9월~현재 고려대학교 전기전자전파 공학부 정교수
 <주관심분야 : 통신네트워크 설계 및 성능분석, 무선 ATM, 센서네트워크>