

USN을 이용한 상수도 관리 시스템 개발

최수환*°, 백영인**, 엄두섭***

*고려대학교 전자컴퓨터공학과, **(주)센서웨이, ***고려대학교 전자컴퓨터공학과

The Development of Water Supply management System with USN

Choi, Soo Hwan*°, Baek Young In**, Eom Doo-Suep***

Korea University, Sensorway, Korea University

E-mail : inblue@korea.ac.kr, shonjy55@hanmail.net, eomds@korea.ac.kr

요 약

USN(Ubiquitous Sensor Network)을 이용한 상수도 관리 시스템은 상수도관로에 설치된 센서들 간에 네트워크망을 구축하여 상수도 관리에 필요한 주요 정보를 실시간으로 수집하고 관리하는 시스템이다. 센서의 종류에 따라서 수질, 유량, 유압, 타공사감지, 누수탐지 등의 정보가 수집되며 관계 센터로 전송되어 데이터베이스에 저장되거나 모니터링 화면에 출력되고 필요한 경우 단문자 서비스를(SMS) 이용하여 관리자에게 통보한다. 본 논문에서는 센서의 설치와 입력된 신호의 처리를 통하여 압력과 타공사감지 및 누수를 탐지하는 방법 및 센서 네트워크를 구성하는 방법을 제안하였고, 남양주시의 상수도관로상에 적용하여 그 성능을 검증하였다[1].

1. 서론

현대의 도시는 지속적으로 인구가 증가하고 생활환경이 선진화하면서 물 사용량이 급속하게 증가하고 있다. 그러나 기존 토목 중심의 수계관리 및 상수도 누수관리체계 운영으로는 상수도 급수 인프라의 확장과 낮은 유수율로 인한 누수손실액 축소에 한계가 있어 기존 시설활용의 극대화가 요구되고 있다. 또한 기존의 유선 통신망으로 구축된 상수도 관리체계는 시설을 유지하기 위한 담당 인력의 부족과 시설의 유지보수 비용이 과도하게

지출되어 유지보수 비용 절감을 위한 다양한 관리 체계의 도입이 시급하다[2].

기존의 상수도 관리는 관리지가 직접 지역을 순회하며 데이터를 수집하거나 유선 네트워크를 이용하여 데이터를 전송 받는 방식이었다. 그러나 이와 같은 방법으로는 넓은 지역을 효율적으로 관리하기 어려우며 네트워크의 설치 및 유지관리에 많은 비용이 소모된다는 단점이 있다. 제안된 시스템은 USN 기술을 이용한 무선 센서 네트워크이기 때문에 설치 비용을 절감할 수 있으며 실시

간으로 전송되는 상수도 관련 정보를 이용하여 상수도의 품질 및 관리에 대한 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 Zigbee 모듈을 이용한 WPAN(Wireless Personal Area Network)을 구성하여 센서 모듈과 NCAP(Network Capable Application Processor) 장치간 데이터 통신을 하였다. NCAP 장치간에는 WLAN(Wireless Local Area Network: IEEE802.11)을 이용한 무선 네트워크망을 형성하고 Gateway를 통하여 인터넷에 연결될 수 있도록 하였다. 그 결과 센서에서 수집된 데이터는 위의 무선 네트워크를 통하여 관제 센터에 연결될 수 있도록 하였다.

또한 압력센서, 타공사감지센서 그리고 누수탐지센서를 실제로 설치하고 동작 알고리즘을 구현하여 운용해보면서 성능을 검증하였다..

2. 본론

2.1 상수도 관리 시스템

제안된 상수도 관리 시스템의 전체 망 구성도는 다음 그림1과 같다.

각종 센서를 설치하기 위해서 상수관로상에 맨홀

을 설치하고 누수탐지센서와 유량계 수압계 등의 센서가 설치되며 맨홀 내부에 타공사감지센서를 설치하였다. 누수탐지센서와 타공사 감지 센서 및 수압계와 같이 센서의 출력이 아날로그 전압으로 출력되는 센서는 SDM(Sensor Data Module) 장치의 ADC(Analog Data Convertor)로 입력받도록 하였으며, UART Data 출력이 가능한 PH, 잔류염소, 탁도계, 전기전도계 및 유량계는 시리얼 케이블을 이용하여 TBIM(Transducer Bus Interface Module: IEEE 1451.3)장치와 연결하였다. SDM 장치와 TBIM 장치에서 수집된 센서의 정보는 WPAN을 통하여 Zig-Bee 통신 방식으로 NCAP 장치에 전송된다.

NCAP 장치는 자신의 하위 센서 네트워크에서 수집된 센서 데이터를 취합하여 gateway 연결되어 있는 NCAP장치로 전송한다. 이때 NCAP 장치간에는 IEEE 802.11 WLAN 방식으로 네트워크를 형성하여 서로 데이터를 주고 받을 수 있다. Gateway가 연결되어 있는 NCAP에서는 주위 NCAP으로부터 수신된 데이터를 받아 인터넷을 통하여 관리 센터로 보낸다.

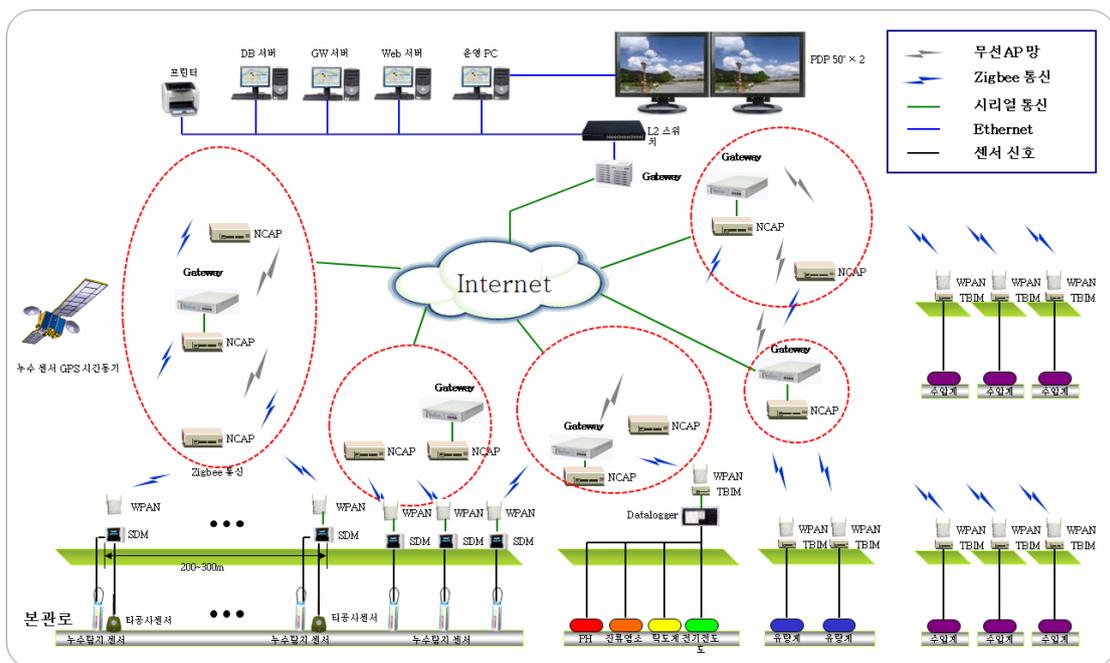


그림 1 제안된 상수도 관리 시스템 구성도

관리 센터에 설치된 gateway에서는 이를 수신하여 서버의 DB에 저장하고 운영 PC는 이러한 정보들을 모니터링 화면에 출력한다.

이와 같이 센서에서 수집된 데이터는 SDM 장치와 TBIM장치에서 처리된 이후 모두 무선 네트워크를 통하여 인터넷에 연결될 수 있기 때문에 설치와 유지관리의 비용을 절감할 수 있다.

2.2 센서

일반적인 센서의 출력은 아날로그 전압이나 전류로 출력되며, 최근에는 IEEE 1451 규격이나 자체 규격을 따르는 디지털 데이터 출력이 가능한 센서들도 많이 사용된다. 본 개발에서는 센서의 종류에 따라서 ADC 부를 가지고 있는 SDM 장치와 TBIM 장치에서 이를 처리하였다. 다음 그림 2는 맨홀 내부에 설치된 센서들이다.



그림 2 맨홀 내부에 설치된 센서들

2.2.1 압력센서

압력센서는 상수관로상에 설치되며 아날로그 전압으로 출력하므로 SDM장치의 ADC부를 거쳐서 실제 압력 값을 얻을 수 있다. 전압의 출력은 실제 압력에 비례하므로 반복하며 얻은 압력값과 ADC 입력값을 이용하여 실제 압력값을 구한다. 단위는 Kg/cm^2 이다.

2.2.2 타공사감지센서

타공사란 상수도관로주변에서 행해지는 허가 받지 않은 공사를 말한다. 실제로 크고 작은 공사로 인

하여 지중에 매설된 상수관이 파손되는 사고가 빈번하게 일어나며 이로 인한 민원과 주민의 불편 또한 크다. 이와 같은 상수도의 파손을 실시간으로 감시하고 능동적으로 대처하기 위하여 타공사 감지센서를 설치한다.

다음 그림 3은 타공사감지센서의 동작 알고리즘을 설명한 것이다.

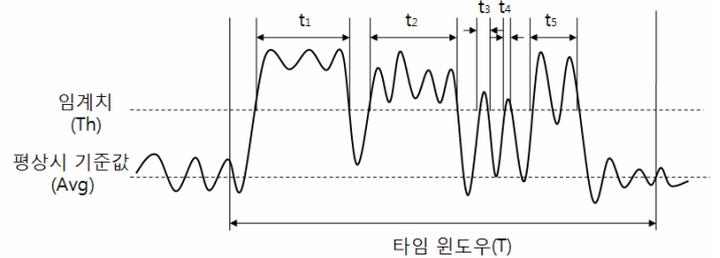


그림 3 타공사감지센서의 동작

타공사감지센서는 진동센서의 일종으로 맨홀내부의 벽면에 지면으로부터 연직방향으로 설치된다. 출력은 역시 아날로그 전압이므로 SDM장치에서 ADC 부를 거쳐 처리된다. SDM 장치는 처음 구동되고 일정시간동안 타공사감지센서에서 수집된 데이터를 누적하여 평균(Avg)한다. 이는 주변 환경의 평상시 소음의 정도를 측정하는 것이다. 이렇게 수집된 데이터를 토대로 타공사 감지의 기준값을 정한다. 이와 같은 방법은 타공사감지센서가 설치된 주위 환경이 조용한 주택가 골목이거나 시끄러운 대로변이더라도 부가적인 설정 없이 타공사를 감지할 수 있는 기초자료가 된다. 실제 타공사의 감지는 평상시 기준값을 수배 또는 수십배 (a)로 설정된 임계치($Th = a * Avg$)를 초과하는 진동음이 정해진 타임 윈도우(T)안에서 일정 비율 ($p < \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{T}$) 이상 감지되었을 때 알람이 발생하도록 한다. 일반적으로 타공사는 한번 시작하면 수시간동안 지속되므로 이와 같은 방법으로 수분내에 발생하는 일시적인 소음과 타공사를 구분할 수 있다.

2.2.3 누수탐지센서

상수관은 재료의 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 발생한다. 상수도의 누수는 그대로 귀중한 자원의 손실이며 누수 부위로 오염 물질이 침입될 수 있으므로 누수 발생을 조기에 감지하고 처리하는 것이 중요하다. 하지만 대부분의 상수도는 지하에 매설되어 있기 때문에 누수의 발생 여부를 판단하기 어려우며, 누수 발생을 확인하였다 하더라도 실제 누수 발생 지점을 찾는 것 또한 어렵다.

기존 누수 탐지 방법 중에는 지상에서 청음기를 사용하여 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 알아 내는데 미흡하여 여러 군데 굴착 작업을 하여 누수 위치를 찾아내야 하는 번거로움이 따른다.

다른 방식으로는 상수관로상에 하이드로폰이나 진동센서를 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 누수탐지센서는 항상 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 연구에서는 하이드로폰을(음향 센서) 이용하여 누수를 감지하였다. 하이드로폰을 특수 제작한 케이스에 넣고 상수관을 천공하여 설치한다. SDM장치의 누수탐지동작은 그림 4와 같다.

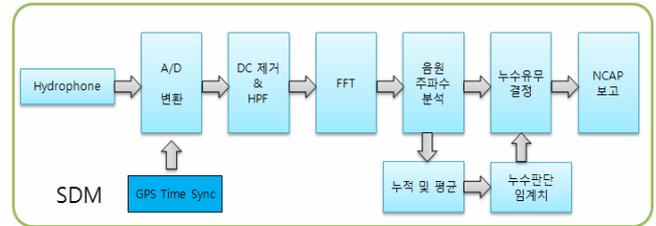


그림 4 SDM장치의 누수 탐지 동작

하이드로폰을 통해 수집된 상수관 내부의 수중음은 전용 케이블을 통하여 지상의 합체에 설치된 SDM장치의 ADC 부를 통하여 디지털 신호로 변환된다. 상수도에서 누수가 발생하면 누수 부위에서 소리가 발생하며 이 소리는 상수관과 내부의 물을 통하여 전파된다. 이때 전파되는 매질이 로우패스필터의 역할을 하여 고주파 성분은 감쇄되고 저주파 성분만이 전파된다. SDM 장치에서는 수신된 신호의 DC 성분을 제거하고 10Hz 이상의 하이패스필터를 통과시킨 뒤 고속 푸리에 연산(FFT)을 통하여 주파수 영역에서 누수음을 감지하였다. 실험 결과 누수음은 주로 50~250Hz 대역에 분포하므로 평상시 수중음과 비교하여 해당 주파수 대역의 소리가 커졌을 경우 누수가 발생한 것으로 판단하게 된다. 누수 탐지는 수용가구에서 상수를 사용하지 않는 새벽 2~5시 사이의 시간대에 동작한다. 이로 인해 누수 탐지는 준-실시간 동작이 되며, 시간 정보는 SDM장치에 연결된 GPS의 시간 정보를 이용한다.

SDM 장치에서 누수가 발생하였다고 판단되면 실제 누수 위치를 추정하기 위한 동작이 시작된다. 그림 5는 누수 위치 탐지 동작을 설명한 그림이다.

일단 누수가 발생하게 되면 SDM은 이와 같은 사항을 자신의 상위에 있는 NCAP 장치에 알린다.

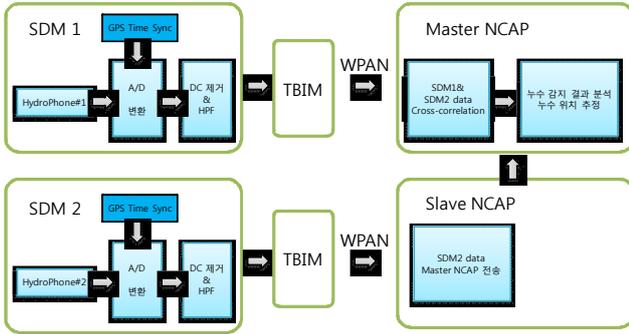


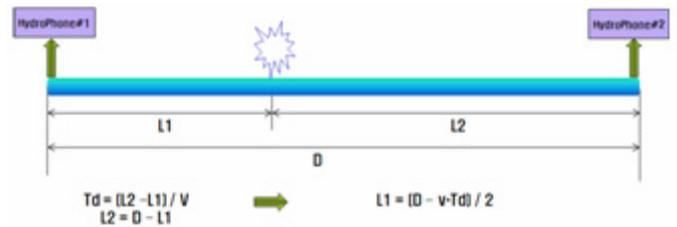
그림 5 SDM장치와 NCAP장치의 누수 위치 탐지 동작

누수 탐지 시스템의 경우 NCAP장치는 마스터 NCAP 장치와 슬레이브 NCAP장치의 쌍으로 이루어져 있다. 마스터 NCAP장치는 자신의 하위에 있는 SDM 장치의 누수 발생 정보뿐만 아니라 슬레이브 NCAP장치로부터 수신된 누수 발생 정보를 종합하여 실제로 누수가 발생하였는지 판단한다. 누수 발생 신호가 정해진 횟수 이상 보고가 되면 마스터 NCAP은 누수 위치 탐지를 위한 명령을 자신의 SDM과 슬레이브 NCAP의 SDM에게 전송한다. 누수 위치 탐지 명령을 전송 받은 SDM 장치는 동시에 같은 시간에 하이드로폰을 통하여 신호를 샘플링하기 위하여 GPS의 동기 신호를 사용한다. 이때 정확한 동기 신호를 획득하기 위하여 GPS에서 출력되는 1PPS(Pulse Per Second) 신호를 이용한다. 상수관로상에 나란히 일정 간격을 두고 설치된 두 하이드로폰 사이에서 누수가 발생한다면 그 소리는 상수관을 따라서 양 방향으로 전송된다. 이때 두 하이드로폰과 누수 발생 지점간의 거리차에 의해서 누수음이 각각의 하이드로폰에 전달되는 시간 차이가 존재한다. GPS의 동기 신호에 맞춰 샘플링된 데이터를 NCAP 장치에 전송하고, 슬레이브 NCAP 장치는 이것을 다시 마스터 NCAP 장치로 전송하면, 마스터 NCAP 장치는 두 지점에서 같은 시간에 샘플링된 데이터를 얻을 수 있다. 이 두 데이터를

상호 상관 연산(Crosscorrelation)하면 누수음이 전달되는 시간 차를 구하고 실제 누수 위치를 계산할 수 있다. 마스터 NCAP 장치는 누수 발생 신호가 정해진 횟수 이상 보고되고 상호 상관 연산을 통하여 누수 위치가 추정되면 최종적으로 누수가 발생한 것으로 확정하고, 누수 발생 알람과 누수 발생 위치 추정값을 상위의 네트워크를 통하여 관리 서버에 전송한다.

Master NCAP에서 누수 위치를 추정하는 방법은 다음 그림6과 같다.

그림 6



누수 위치 추정

위 그림에서 우리는 두 Hydrophone 사이의 거리 D와 파이프를 통해 전파되는 음파의 속도 v, 마지막으로 교차 상관 계수를 이용해서 얻을 수 있는 지연시간 Td를 가지고 Hydrophone #1과 누수 지점과의 거리 L1을 구할 수 있다. 음파의 속도 v는 일반적으로 480m/sec 정도이지만 누수 신호의 전파속도는 파이프의 재질, 두께, 수압 등에 따라 다르므로 차후에 실험을 통하여 얻은 데이터를 분석하여 정확한 v값을 구해야 한다. 상호상관 연산은 다음의 식을 이용하여 구한다.

$$R_{vw}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v(t)\omega'(t-\tau)dt$$

여기서 $v(t)$ 와 $\omega(t)$ 는 하이드로폰 #1과 #2에서 샘플링된 데이터이다. $R_{vw}(\tau)$ 의 그래프에서 최대값을 갖는 τ 의 값이 두 신호의 TDoA(Time Difference of Arrival)이다[7]. 보다 정확한 위치

추정을 위하여 수차레에 걸쳐서 SDM으로부터 샘플링 데이터를 전송받아 \bar{x} 를 계산하여 평균을 구한다.

2.2.4 기타 센서

PH, 잔류염소, 탁도계, 전기전도계 및 유량계는 UART로 data가 출력되므로 TBIM 장치에 연결한다. 제조사의 data sheet를 참조하여 UART data의 내용을 읽고 원하는 값을 얻는다.

2.3 SDM 장치

SDM장치는 각종 센서로부터 전송된 데이터를 A/D변환하여 디지털 데이터를 처리하는 장치이다. TI사의 TMS320F28335 DSP processor를 사용하였으며 150MHz의 처리 속도와 부동소수점 연산기능을 제공하므로 고속 푸리에 연산 등을 실시간으로 처리하기에 충분한 성능을 제공한다. 타공사와 누수탐지센서의 경우 고성능의 높은 이득의 AD변환을 위하여 ADS1256 ADC(24Bits 30MHz) 모듈을 추가로 장착하여 사용하였다. SDM 장치에서 처리된 데이터는 UART로 연결된 WPAN 장치를 통하여 NCAP 장치로 전송된다.

2.4 WPAN 장치

WPAN 장치는 SDM 장치, TBIM장치 그리고 NCAP장치에 각각 연결되어 장치간 무선 네트워크를 형성하고 데이터를 전송하는 역할을 한다. SDM 장치와 TBIM 장치로부터 수신된 데이터는 WPAN 장치를 통하여 무선으로 전송되고 이것은 NCAP 장치에 연결된 WPAN 장치에 수신된다. NCAP 장치는 UART로 연결되어 있는 WPAN 장치로부터 데이터를 수신한다.

WPAN 장치는 Zigbee 모듈을 이용하였으며 2.4GHz ISM 무선 대역을 이용한다.

2.5 TBIM 장치

센서들 중에 UART로 디지털 데이터를 출력하는 PH, 잔류염소, 탁도계, 전기전도계 및 유량계와 같은 센서는 TBIM 장치와 연결한다. TBIM 장치는 센서로부터 수신되는 신호에서 센서의 데이터를 얻어 NCAP 장치로 전송한다. TBIM 장치는

시리얼 데이터를 처리하여 다시 WPAN 장치로 시리얼 데이터를 전송하는 역할을 하므로 빠른 처리 능력이 필요하지 않다. 본 연구에서는 TI사의 MSP-430 Micro-Controller 을 이용하였다.

2.6 NCAP 장치

NCAP 장치는 주변의 센서들과 네트워크를 구성하여 데이터를 수신하고 제어 신호를 전송한다. 또한 주변의 NCAP 장치와 WLAN 네트워크를 형성하여 원거리에 있는 관제 센터에 연결된다. NCAP 노드에 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 UART를 통해 WPAN 장치와 연결하여 주변 센서들과 무선으로 통신할 수 있다.

누수탐지시스템에 있어서 NCAP은 부가적으로 누수여부를 판단하고 누수 위치를 추정하는 알고리즘 연산을 수행한다.

3. 결과

본 연구는 현재 남양주시에 실제 적용되어 시험 서비스 중이다. PH, 잔류염소, 탁도계, 전기전도계, 유량계 및 압력계에서 수집된 데이터는 실제로 NCAP 네트워크와 KT전용망을 통해서 화도 정수장의 관제 센터의 데이터베이스에 실시간으로 저장되고 있으며 모니터링 화면으로도 확인이 가능하다. 타공사감지센서도 약간의 감도 조절 과정을 거친 뒤 현재 서비스를 제공하고 있다.

누수탐지센서의 동작은 실제로 이번 사업에서 가장 중점을 두었으며 오랜 시간 검수과정을 거쳤다. 다음은 누수탐지센서의 동작을 검증한 과정이다. 남양주시의 관리하에 실제 상수도관에 지관을 설치하고 수도꼭지를 연결하여 누수 상황과 유사한 이벤트를 발생시킬 수 있도록 하였다. 수도꼭지를 틀어 누수 이벤트를 발생시키고 SDM 장치에서

이를 검출하는 지를 확인하였다. 두개의 하이드로폰 사이의 거리는 약 200m정도이며 수도꼭지가 설치된 위치는 마스터 NCAP 장치쪽 하이드로폰으로부터 약 50m 정도 떨어진 위치이다.

다음 그림 7은 DSP에서 처리한 누수탐지센서의 탐지 결과를 TI사의 Code Composer Studio 프로그램으로 갈무리한 그림이다.

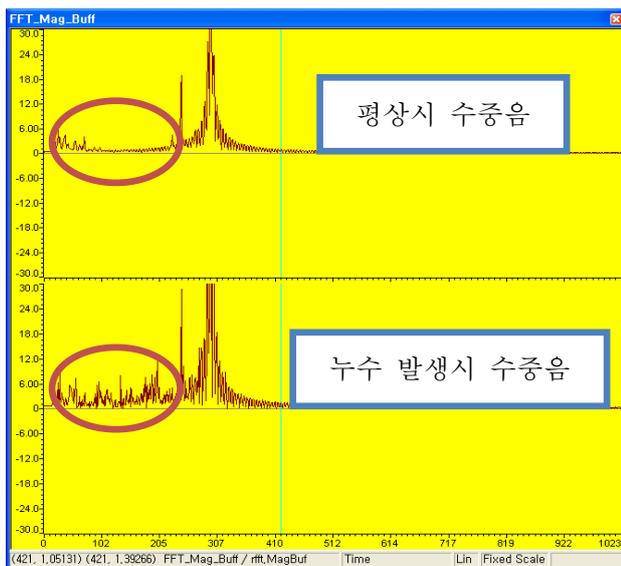


그림 7 상수도관 내부의 누수음 그래프

위의 그래프는 정상시 누수음이 없을 때 일정시간 동안 수차례 샘플링된 데이터를 평균한 것으로 누수 판단의 기준이 된다. 아래의 그래프는 실제 누수 이벤트가 발생되었을 때의 그래프로 50~250Hz 대역의 신호가 커진 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과를 근거로 누수발생알람이 발생하며 실험결과 약 3l/min 정도의 누수 이벤트를 검출할 수 있었다.

NCAP장치에서 누수 위치 탐지 알고리즘 연산을 한 결과 누수 위치는 약 10m 정도의 오차를 가지고 출력되었다. 현재는 time domain에서 상호 상관 연산을 수행하지만 frequency domain에서 연산을 수행하면 노이즈를 제거하는 효과가 있기 때문에 좀더 좋은 성능을 얻을 수 있을 것으로 기대된다[8].

4. 결론

기존의 토목에 기초한 상수도 관리에서 발전하여 IT 기술을 접목한 상수도 관리 시스템은 관망 계통을 따라 분포된 최적의 센서네트워크 인프라를 구축하고 상수도 운영 DB 및 표준 시스템을 구축함으로써 U-상수도 정보화 시스템 구축의 발판이 되었으며 누수에 대하여 준-실시간 대처와 타공사 상황의 실시간 관리로 사고예방 및 민원 서비스에 즉각 대응할 수 있게 되었다. 또한 효율적인 수자원관리는 물생산량 절감으로 이어져 정수장 및 배수지 추가 확보 예산을 절약할 수 있으며 USN을 이용한 정보수집 체계 정비로 효율적인 인력운영이 가능해졌다.

기술적인 측면에서도 U-Eco city 에 실제 적용 가능한 시범 사례를 수행하고 검증 받았기 때문에 향후 정책의 수립과 집행에 중요한 가이드라인이 될 것으로 기대된다.

아울러 누수 탐지 시스템은 본 사업에서 가장 심혈을 기울인 부분으로서 실제 유수율 제고에 크게 기여할 것으로 생각되며 세계적으로도 아직 실제 적용 사례가 없는 만큼 보다 더 연구하고 성능을 개선한다면 누수 탐지뿐만 아니라 송유관 누유 탐지와 플랜트내의 누수 탐지 등 여러 분야에 적용 가능할 것이다.

[참고문헌]

- [1] U-상수도 관망관리 시스템 구축사업, '08년 u-City 과제 사업, 행정안전부
- [2] 환경부, 수자원공사, "물산업육성방안", (2006)
- [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 on Information Processing in Sensor Networks (IPSN’07)*, April 25-27, (2007), Cambridge, MA, pp. 264-273.

[7] L. Zhu and J. Zhu, “A New Model and its Performance for TDOA Estimation,” *IEEE Vehicular*

Technology Conference, Vol.4, October (2001), pp.2750-2753.

[8] C. H. Knapp and G. C. Carter, “The generalized correlation method for estimation of time delay”, *IEEE Transactions on Acoustic, Speech, and Signal Processing*, Vol. ASSP-24, August (1976)