

배관안전진단을 위한 임피던스 USN 노드 시스템 연구

권영민⁰ 이형수 윤홍구

전자부품연구원 RFID/USN융합연구센터

youngminy@keti.re.kr, hslee@keti.re.kr, ketisukit69@gmail.com

A Study on the impedance-based Wireless Sensor Node for Pipeline Health Monitoring

JYoungmin Kwon⁰ Hyung Su Lee Honggu Yun

RFID/USN Convergence Research Center, Korea Electronics Technology Institute

요 약

지하 배관 구조물은 국가 주요 자원의 수송망을 책임지는 핵심적인 기능을 수행하는 시설물로서, 배관 구조물의 노후화와 부식, 균열, 조인트 풀림 등의 손상으로 인한 누출사고 발생 시 막대한 사회·경제적 손실을 초래할 우려가 있다. 특히, 지중배관 및 노출배관 경우에는, 현장 작업상황이 지속적으로 변화하고 있는 상황에서 24시간 안전관리에 대한 감시체계가 미흡한 것이 현실이다. 고가의 센서설치 및 배관의 유지관리 비용 등의 문제를 극복하려는 센서개발 연구 및 센서로부터 취득된 계측데이터를 현장에서 분석하여 실시간으로 배관의 이상상태를 판정하여 원격으로 그 판정결과를 알려주는 유비쿼터스 원격감시기법에 대한 연구 및 기술개발이 요구된다. 본 논문에서는 USN 기술을 활용한 배관안전진단 기술을 소개하고 임피던스 기반의 자가 감지 기법을 활용한 다양한 구조의 배관에 대해 진단 연구를 수행 하였다.

1. 서 론

지하 배관 구조물은 국가 주요 자원의 수송망을 책임지는 핵심적인 기능을 수행하는 시설물로서 그 규모와 재료, 모양 면에서 구조적인 종류가 매우 다양하다 급격한 산업화 추세에 부응하기 위해 지난 40년 동안 우리나라에서 건설된 수많은 배관 구조물이 점차 노후화되고 있는 추세이며, 대부분 도심에 집중적으로 건설되어 있기 때문에, 부식, 균열, 조인트 풀림 등의 손상으로 인한 누출사고 발생 시 막대한 사회·경제적 손실을 초래할 우려가 있다. 특히, 지중배관 및 노출배관 경우에는 현장 작업상황이 지속적으로 변화하고 있는 상황에서 24시간 안전관리에 대한 감시체계가 미흡한 것이 현실이다 이에 배관 구조물의 안전성 확보를 위해서는 1차적으로 배관구조의 안전성을 충분히 고려한 구조해석 및 모형실험을 통한 안전성평가 등을 통해 합리적이고 체계적인 계획, 설계, 제작 또는 시공이 이루어져야 하며 2차적으로는 제작/시공된 배관 구조물의 안전을 철저히 점검하고 점검결과에 따라 신속하고 합리적인 보수보강을 수행하여 안전성을 확보해야 한다. 이러한 효과적 배관상태관리에 의한 유지관리를 위해서는 정기점검 및 정밀 비파괴 안전진단이 필수적이나, 이들만으로 배관 구조물의 안전성을 충분히 보장할 수 없다 즉, 배관의 사용성과 구조적 건전성을 확보하기 위해서는 운용 중 성능 및 건전성을 평가하는 첨단 구조건전성 모니터링 및 비파괴 검사기술의 개발 및 적용이 필요하다 USN 진단 기술은 최첨단 유비쿼터스 기술로서 이에 대한 최신 지중 시설물 건전도 측정을 가능하게 할 수 있다

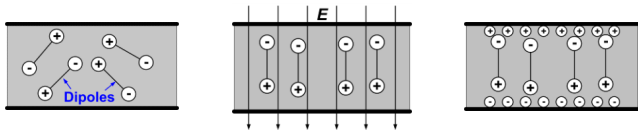
배관의 구조 건전도 평가 기술은 센서기술 계측기술, 정보처리기술 등의 요소기술의 발전과 더불어 많은 발전을 이루게 되었으며, 최근 미국, 캐나다를 비롯한 유럽에서는 광섬유센서, 압전센서 등의 스마트센서를 활용하여 변형률, 진동 및 주파수 분석 초음파 검사, 원격감시 기술 등의 첨단 연구를 이용하여 배관의 건전도를 평가하기 위한 연구가 활발히 추진되고 있다 일본, 중국, 싱가포르를 포함한 아시아 국가에서도 다양한 배관 구조물에 대하여 건전도 모니터링 시스템이 설치되고 있으며 국내에서는 가스 배관을 중심으로 상시 모니터링 시스템이 설치되고 있지만 현재의 기술은 배관 구조물 건전성 평가기술의 실용화를 위해 현장에서 적용되기에 비용이나 기술개발 면에서 매우 원시적인 수준이다 고가의 센서 설치 및 배관의 유지관리 비용 등의 문제를 극복하려는 센서개발 연구 및 센서로부터 취득된 계측데이터를 현장에서 분석하여 실시간으로 배관의 이상상태를 판정하여 원격으로 그 판정결과를 알려주는 유비쿼터스 원격감시기법에 대한 연구 및 기술개발이 요구된다 본 논문에서는 USN 기술을 활용한 배관안전진단 기술을 소개하고 임피던스 기반의 자가감지 기법을 활용한 다양한 구조의 배관에 대해 진단 연구를 수행 하였다

2. 본 론

2.1 배관안전진단 시스템 Architecture

압전소자는 세라믹의 일종으로 역학적 압력이 가해지면 전하 또는 전압을 발생시키고 반대로 전기장 안에

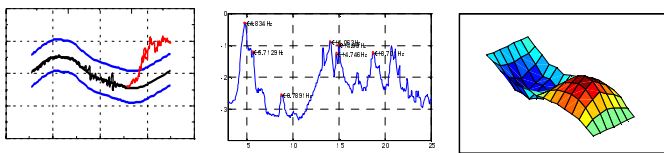
놓이면 역학적인 변형이 발생된다. 이러한 고유한 압전 현상으로 인해, 압전소자는 임피던스의 계측이나 램파의 생성 및 계측 등을 위한 가진기(actuator)와 센서(sensor)로써, 광범위하게 사용될 수 있다. 압전소자의 전반적인 거동과 전기적 성질은 극성에 따라 좌우되는데, 그림 2에서와 같은 극성화(poling) 과정을 거쳐 압전소자는 자신의 거동특성을 결정짓는 고유한 방향성을 갖게 된다.



(a) 세라믹에 열을 가함 (b) 전기장의 영향으로 전극들이 정렬됨 (c) 열이 제거된 후에도 극성이 유지됨

그림 2. 압전센서 제작을 위한 압전소자 극성화(poling) 과정

이러한 특성을 갖는 압전소자로부터 구조물 건전성 평가를 위한 다양한 형태의 센서 및 액추에이터가 개발될 수 있는데, 최근에는 PZT 및 MFC와 같은 패치형태의 능동센서들이 구조물로부터 저주파 진동 고주파 임피던스 및 유도초음파를 측정하기 위해 매우 활발하게 이용되어져 왔다. 여기서, 압전형 능동센서를 이용하는 진동 및 임피던스 기반 구조손상 검색기술은 구조물에 부착된 압전센서에서 얻어지는 시간영역의 구조응답을 주파수 영역에서 상시적으로 분석하여 기준신호로부터 갑작스런 특정변화가 나타날 때, 이 변화를 이용하여, 전역적 또는 국부적인 이상상태를 찾아내는 기술로써 구조물에 소형 압전센서(예: PZT 센서)들을 적절한 위치에 부착하여 각 노드에서의 저주파 영역 진동응답으로부터 구조물의 진동모드를 구함으로써, 구조물 전체의 거동특성을 실시간 감시하는 기술이다. 현재 이를 위한 저비용 고효율 저주파 진동응답 계측기술 개발이 필요한 상황이다. 진동기반의 시간영역 및 주파수 스펙트럼 분석을 통한 구조물 이상상태 모니터링 기법의 한 예를 그림3에 나타내었다.



(a) 시간영역 모니터링 (b) 주파수 스펙트럼 분석 (c) 모드해석
그림 3. 진동기반 모드해석을 통한 구조물 이상상태 모니터링 기법

또 다른 방법으로, 고주파 영역의 진동응답과 연계되어 있는 전기적 임피던스 신호의 변화를 관찰함으로써 구조물의 국부 손상을 상시적으로 검색할 수도 있다. 그림 4는 PZT센서와 구조물간의 결합관계를 모형화한 1차원 모델을 보여주고 있다. 압전센서가 구조물의 표면에 부

착되어 있는 경우 압전센서에서 계측되는 전기적 어드미턴스(전기적 임피던스의 역수) $Y(\omega)$ 는 구조물의 기계적 임피던스 $Z_s(\omega)$ 와 압전센서의 기계적 임피던스 $Z_a(\omega)$ 가 결합된 함수로써, 식 (1)과 같이 표현된다.

$$Y(\omega) = j\omega \frac{wl}{h} \left\{ \overline{\epsilon}_{33}^T - d_{31}^2 \overline{Y}^E + \left(\frac{Z_a(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} \right) d_{31}^2 \overline{Y}^E \left(\frac{\tan \kappa l}{\kappa l} \right) \right\} \quad (1)$$

식 (1)에서 w, l, h 는 각각 압전센서의 너비, 길이 및 두께를 의미하며 $\overline{\epsilon}_{33}^T = \epsilon_{33}^T (1 - \delta_j)$ 는 일정 응력조건에서 압전센서의 복소 전기유전율이다. 여기서 δ 는 압전센서의 유전 손실계수.

$\overline{Y}^E = Y^E (1 + \eta_j)$ 는 일정 전기장 조건에서 압전센서의 탄성계수, η 는 압전센서의 감쇠계수, d_{31} 는 압전센서의 압전상수, Z_a 와 Z_s 는 각각 압전센서와 구조물의 전기적 임피던스, $\kappa = \omega \sqrt{\rho / Y^E}$ 는 파수, ρ 는 압전센서의 밀도를 의미한다. 압전센서로 계측한 임피던스 값의 변화양상을 실시간 관찰하여 Root mean square deviation(RMSD)이나 Correlation coefficient(CC) 등의 손상지수 값을 이용하여 구조물의 건전성에 대한 정량적인 평가를 할 수 있다. 이러한 신호변화기반 손상 검색기법에서 중요한 것은 손상 지수의 적절한 경계값의 결정인데, 통계적인 신뢰도 구간의 개념을 이용한 이상치 검증(outlier analysis) 방법을 사용하여 최적의 경계값을 구할 수 있다. 그러나 온도변화와 같은 예상치 못한 변화를 고려하여 경계값을 지속적으로 개선해주어야 하는 단점이 있다.

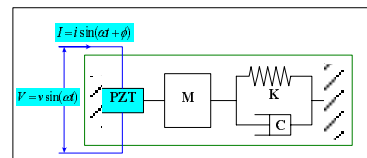


그림 4. PZT센서와 구조물 사이의 결합관계를 보여주는 1차원 모델

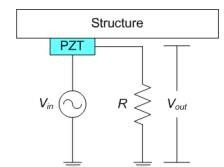


그림 5 저비용 임피던스 측정회로

기존의 방법에서 이용되어온 임피던스 측정기(예: HP4194A)는 비싸고 크기가 커서 실제 첨단 u-구조물의 건전도 평가에 사용되기에 많은 제약을 가지고 있다. 따라서 그림 5에서 보이는 임피던스 측정회로를 이용한 저비용 임피던스 기반 구조손상 검색방법이 이용될 수 있다. 이 방법에서 PZT의 전기적 어드미턴스는 PZT에 걸리는 입력전압과 출력전압의 차이에 대한 출력전압의 비율을 기준저항 R로 나눠주는 전압 분배기 원리에 의해 얻어진다.

이상에서 언급한 구조물 진단 기술과 유비쿼터스 센서 네트워크 기술 융합을 통한 배관안전진단 USN 노드를 개발하여 u-City 내에서 언제 어디서나 자유자재로 이

용할 수 있는 자동화된 첨단 다중스케일 구조안전진단 시스템을 구축하고자 한다 이를 위한 세부연구는 다음과 같이 진행되었다.

2.2 배관안전진단 USN 시스템

배관안전진단 USN은 지하배관의 상시 모니터링 체계 구축을 목표로 개발된 시스템으로 배관의 임피던스 측정과 지하 환경에서의 무선전송이 가능한 시스템이다 임피던스 측정을 위해 사용된 Analog Devices 사의 임피던스 컨버터(AD5933)는 저가의 소형 저전력 칩셋으로 무선 센서네트워크 응용에 적합한 특성을 갖추고 있다 이 초소형 임피던스 측정 칩셋이 무선 센서 네트워크 기술과 접목되면서, 내장형 감지, 내장형 신호처리 알고리즘, 무선 데이터 전송 모듈 등을 모두 포함한 능동형 임피던스 센서노드가 제작되었다 이 센서노드에는 초소형 임피던스 측정장치, 마이크로 프로세서, RF 송신기가 탑재되어 있으며, 신호호출, 데이터 획득을 포함한 모든 과정이 센서 내에서 자체적으로 실행된다

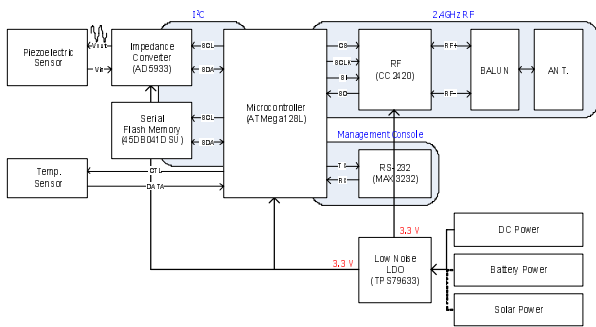


그림 6 배관안전진단 USN 블록 다이어그램

그림 6의 block diagram을 살펴보면 마이크로 프로세서(ATmega128L)는 센서노드의 전체기능을 제어하고 신호계측 및 해석 알고리즘들을 수행하며 RF 송신모듈(Zigbee PHY(CC2420))은 계측된 임피던스 신호 또는 해석 처리된 결과를 원격의 서버로 전송한다 그리고, 초소형 임피던스 측정장치 (AD5933)는 정해진 주파수 대역에서 압전센서로부터 임피던스 값들을 얻어내는 기능을 하며, 온도 센서를 소켓에 연결하여 실시간으로 온도 데이터를 계측한다 배관안전진단 USN은 다음 그림 7과 같이 구성되어 있다

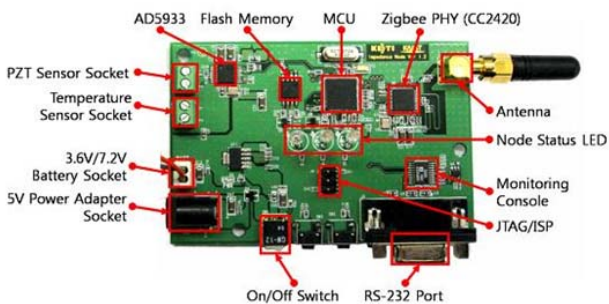


그림 7 배관안전진단 USN 노드
ATMEL사의 ATmega128L 프로세서를 메인프로세서로

사용하여 Impedance Converter와는 Clock, Data 버스를 이용하여 연결되어 있다 또한 RF Tranceiver인 CC2420과는 4 Wire SPI 인터페이스를 사용해서 구성되어 있다. 각각 플랫폼의 데이터 및 동작 모니터링은 RS-232 통신을 통해 가능하게 되어 있다 보드의 프로그래밍을 위해 이용되는 SPI, JTAG인터페이스가 구성되어 있다.

또한 MFC센서의 인터페이스는 2핀 커넥터가 제공되는데 ATmega128의 설정에 따라 타 센서의 인터페이스를 할 수 있는 범용성을 확보하기 위해 A/D 변환 포트와 GPIO 역할을 수행할 수 있게 설계되었다 각각의 보드의 ID를 위해서 부착되는 Silicon Serial Number IC는 1-wire 인터페이스를 통해서 Data Read 만 가능하게 되어 있다.

2.3 자가감지 임피던스 기법을 활용한 구조물 손상 검색 기법

본 연구는 배관 구조물의 볼트풀림 손상 감지를 위해 대표적인 압전센서인 MFC센서를 사용하여 자가감지 임피던스 기법의 배관구조물의 볼트 풀림 손상 검색 실험을 진행하였다 이 실험을 통하여 배관의 소재 센서의 종류와 부착위치를 다양하게 변경해가며 구조물 상태에 따른 전달 임피던스를 계측하고 데이터를 비교 및 분석해 봄으로써 구조물 상태에 대한 일관적이고 상시적인 모니터링이 가능한지를 평가해보고 검색을 위한 최적의 조합을 찾아보고자 한다

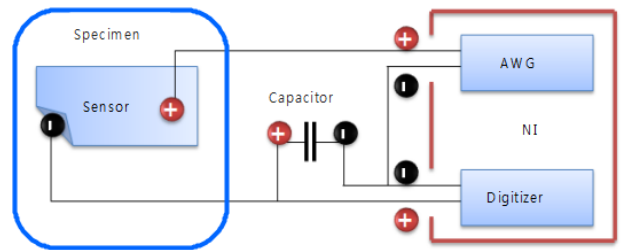


그림 8 자가감지 임피던스 기법 회로

압전센서는 교류 전압을 흘려주면 반복적인 수축과 팽창을 통해 진동을 일으키게 되는 Actuator로서의 역할을 하게 되며, 반대로 진동을 통해 물리적 영향을 받게 되면 전압을 발생하게 되는 Sensor로서의 역할을 하게 된다. 이러한 전기적 에너지와 기계적 에너지를 상호 변환시킬 수 있는 압전 센서의 특징을 바탕으로 그림8과 같이 회로를 구성하였다 자가감지 기법은 위에서 설명한 압전센서의 특성을 이용하여 하나의 센서로 입력 전압을 받아 구조물을 가진함과 동시에 가진된 구조물의 진동에 따른 물리적 변형에 의해 출력 전압을 발생하게 된다 여기서 계측된 입력 전압과 출력 전압의 비를 통하여 구조물의 임피던스를 도출해 낼 수 있다

그림 9는 임피던스기반의 자가감지 기법을 이용한 배관 구조물 실험에 사용된 실내 배관 안전진단 테스트베드이다. 다양한 재질의 배관에 따른 특성을 분석하기 위해 50A 황동, 알루미늄, SUS등으로 구성되어 있으며 실제

배관과 유사하게 물을 흘릴 수 있는 구조로 되어 있다

것을 보여줌으로 고주파영역의 신호가 구조물의 손상에 더 민감하게 반응함을 알 수 있다



그림 9 배관안전진단 USN 실내테스트베드

임피던스 신호 계측을 위해 곡면인 파이프 상에 휘어지는 특성을 가진 가로 107mm * 세로 32mm의 MFC를 연결부로부터 5cm 떨어진 지점에 그림10과 같이 부착하였다. 볼트풀림 손상 검색을 위해 각 배관 각각의 센서마다 차례대로 볼트 1개풀림, 볼트 2개풀림 상태에서 임피던스 신호를 계측하여 정상상태에서 계측한 신호값과 비교하였다

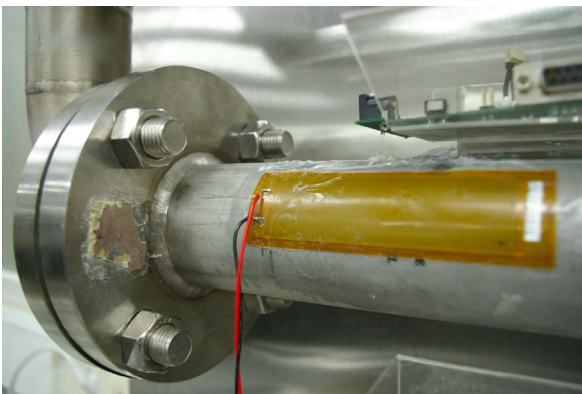


그림 10. MFC센서를 사용한 SUS 50A 관에서의 볼트 풀림 검색실험 세팅

임피던스 신호는 5kHz~40kHz의 주파수 영역에서 계측하였으며 계측주파수 범위에서는 10.9kHz ~ 11.4kHz, 17.4kHz ~ 18.0kHz 두 개의 공진주파수 영역이 나타났다.

상대적으로 고주파 영역인 17.4kHz~18.0kHz 영역에서는 신호에 노이즈가 많아 저주파영역보다 공진주파수의 형태가 깨끗하지는 않지만 구조물의 손상에 따라 17.5kHz~17.6kHz 영역에서 공진주파수의 형태가 변한

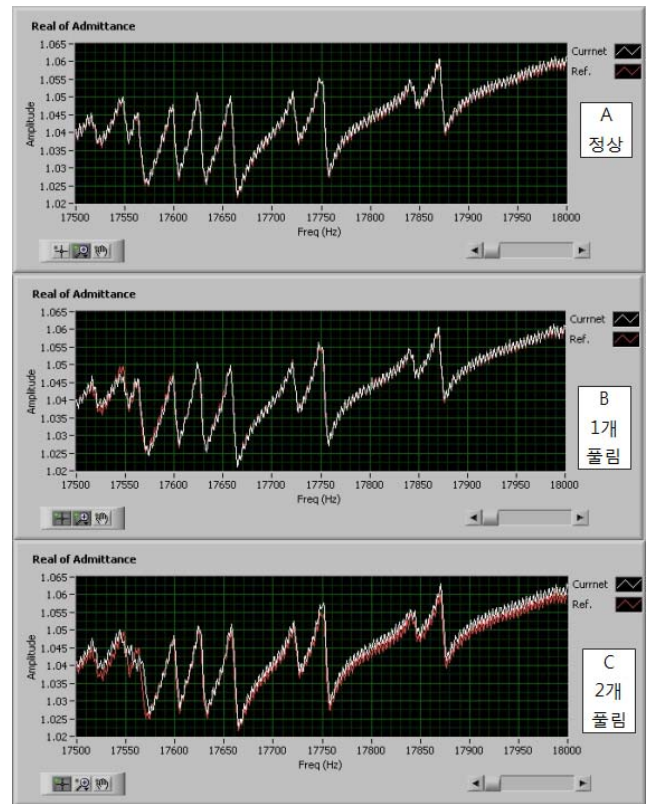


그림 11. 볼트풀림 손상에 따른 임피던스 신호 그래프

SUS 50A 배관구조물의 볼트풀림 상태에 따라 106mm*32mm 크기의 MFC 센서를 통해 계측된 임피던스신호 그래프를 그림 11에 나타내었다. 정상상태의 그림A는 계측된 신호가 기준 값과 일치함을 볼 수 있고 볼트1개가 풀린 상태의 그림B에서는 17500Hz~17600Hz 영역에서 공진주파수의 크기만이 약간 변화하였다. 볼트 2개 풀림상태인 그림 C에서는 크기의 변화가 커졌을 뿐만 아니라 공진주파수가 이동하여 그래프 형태가 변했음을 볼 수 있다.

2.4 테스트베드 배관 구조물 손상 검색

실제 배관 구조물에의 손상 감지 기술 적용을 목적으로 실제 지하 배관망과 유사한 환경의 지하시설물 테스트베드를 활용하여 실험을 수행하였다(그림 12, 13). 이 실험을 통하여 배관 구조물 상태에 따른 임피던스를 계측하고 데이터를 비교 및 분석해 봄으로써 구조물 상태에 대한 일관적이고 상시적인 모니터링이 가능한지를 평가해 보았다.

본 실험은 배관안전진단 USN 노드와 계측된 임피던스 신호를 무선통신으로 받아 PC로 전달하는 Base Station으로 구성하여 실험을 수행하였다



그림 12. 지하시설물 테스트베드

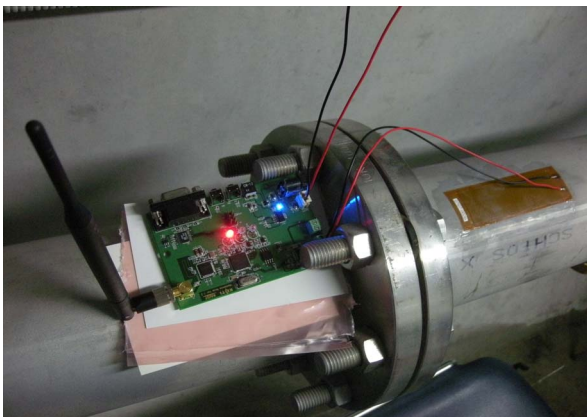


그림 13. 무선 임피던스 센서노드

그림 14는 지하시설물 테스트베드에서 측정된 임피던스 신호이며 4200Hz ~ 4500Hz 영역에서 공진 주파수가 측정되었다. 기존의 실내 배관 안전진단 테스트 베드와는 달리 낮은 주파수 대역에서 공진 주파수가 측정되었으며 신호의 세기도 많이 작아진 것을 알 수 있다 배관의 구조물의 크기가 실내 테스트베드에 비해 커지고 환경이 100A로 늘어남에 따른 변화로 분석된다.

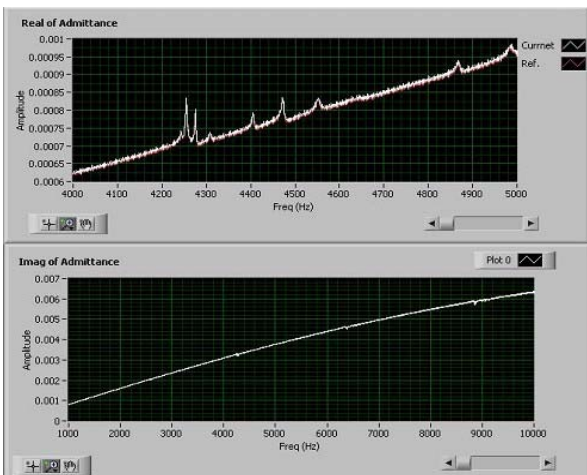


그림 14. 정상-볼트조임시 측정된 임피던스 그래프

3. 결 론

본 논문에서는 PZT 센서를 이용하여 배관구조물의 안전성을 진단하는 배관안전진단 USN 노드를 설계하고 다양한 테스트베드 환경에서의 실험을 통해 시스템을 실증하였다. 설계된 시스템은 곡면 배관에 적합 MFC 센서를 사용한 임피던스 기반의 자가감지 기법을 활용하여 USN의 응용에 적합한 저가, 소형 그리고 저전력 시스템을 제시하였다. 본 연구는 구조물 진단 기술과 유비쿼터스 센서 네트워크 기술 융합을 통한 배관안전진단 USN 노드를 개발하여 u-City 내에서 언제 어디서나 자유자재로 이용할 수 있는 자동화된 첨단 다중스케일 구조안전진단 시스템을 구축하고자 한다 궁극적으로는, 사회기반 시설물에 설치된 자동화된 압전센서 계측시스템에서 계측된 다중스케일 데이터를 전송하거나 사전에 계산된 구조물의 이상상태 진단 및 손상유무 결과만을 비상시 전달해 줄 수 있는 유비쿼터스 구조안전진단 네트워크 시스템을 제안하고자 한다 상시 구조 안전성 모니터링을 통하여 위험을 조기에 경보하고 시설물의 현 상태를 실시간 평가한다면 정기적인 검사에만 의존하여 보수보강을 결정하는 것보다 필요할 때 합리적이고 경제적으로 구조물의 안전성을 평가하는 것이 가능하고 생애주기비용 평가 등 다른 기술과 연계하여 효율적인 최첨단 유비쿼터스 지하 배관시설물 유지관리가 가능 할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업 - 지능형국토정보기술혁신 사업과제의 연구비지원(06국토정보C01)에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Mascarenas, D. L., Tood, M. D., Park, G., Farrar, C. R., "A Miniaturized Electromechanical Impedance-based Node for the Wireless Interrogation of Structural health", Proceeding of SPIE's 13th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 6177, 2006
- [2] Fraden. J. "Handbook of Modern Sensors, Physics, Designs, and Applications, 2nd Edition (New York, NY: Springer-Verlag)", 2000
- [3] IEEE Computer Society, "Part 15.4: Wireless Medium access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specification for Low-Rate Wire Personal Area Networks(WPANs)," IEEE 802.15.4 Specification, 2006
- [4] G. Motenegro, N Kushalnagar, J. Hui, D. Culler, "Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks." REF 4944, 207