

# 압전센서를 사용한 배관 구조물의 실시간 건전성 평가

## Real-time Health Monitoring of Pipeline Structures Using Piezoelectric Sensors

김 주 원<sup>1)</sup>

이 창 길<sup>2)</sup>

박 승 희<sup>3)\*</sup>

Kim, Ju Won

Lee, Chang gil

Park, Seung hee

### Abstract

Pipeline structure is one of core underground infrastructure which transports primary sources. Since the almost pipeline structures are placed underground and connected each other complexly, it is difficult to monitor their structural health condition continuously. In order to overcome this limitation of recent monitoring technique, recently, a Ubiquitous Sensor Network (USN) system based on on-line and real-time monitoring system is being developed by the authors' research group. In this study, real-time pipeline health monitoring (PHM) methodology is presented based on electromechanical impedance methods using USN. Two types of damages including loosened bolts and notches are artificially inflicted on the pipeline structures, PZT and MFC sensors that have piezoelectric characteristics are employed to detect these damages. For objective evaluation of pipeline conditions, Damage metric such as Root Mean Square Deviation (RMSD) value was computed from the impedance signals to quantify the level of the damage. Optimal threshold levels for decision making are estimated by generalized extreme value(GEV) based statistical method. Throughout a series of experimental studies, it was reviewed the effectiveness and robustness of proposed PHM system.

**Keywords** : Electromechanical impedance, Generalized extreme value distribution, Low-Cost self-sensing method, Piezoelectric sensor, Root mean square deviation, Structural health monitoring

### 1. 서 론

가스, 수도 및 송유관을 포함하는 배관구조물은 국가의 주요자원을 수송하는 핵심 지하시설물이다. 하지만 이들은 균열, 볼트 풀림, 부식과 같은 국부적인 손상이 발생할 가능성이 크고, 이의 발견 없이 방치될 경우 배관구조물 전체의 파손으로 이어져 가스폭발, 침수, 기름유출과 같은 대형 사고로 이어질 수 있다. 이러한 위험으로 부터 인적, 물적 안전을 보장받기 위해 배관구조물은 항시적으로 완벽하게 관리되어야 한다. 하지만 배관 구조물은 주로 접근이 쉽지 않은 좁은 지하공간에 복잡하게 얽혀있기 때문에 상시적인 구조물 건전성 평가에는 어려움이 있어왔다. 현재는 배관의 건전성 평가를 위해 정기적으로 비파괴 검사(NDE)를 수행하고 있는데 이러한 검사를 위해서는 배관구조물의 운전중지로 인한 비효율이 요구되었고 직접 크고 무거운 검사 장비를 대상 배관까지 가지고가서

수행하여야 한다는 어려움이 있어왔다. 특히 비상시적인 현재의 비파괴검사방식의 특성상 검사기간 사이에 발생한 충격 및 함몰과 같은 갑작스런 사고로 인한 손상이 즉각 발견되지 못함으로써 빠르게 손상에 대처하지 못해 대형화 된다는 한계점이 있어왔다. 이러한 한계점을 극복하고, 온라인을 이용하여 실시간으로 구조물의 상태를 파악하기 위해서 현재 스마트 센서를 활용한 유비쿼터스 센서 네트워크 기반의 구조물 건전성 평가 기술이 다양한 연구자들에 의해 활발히 연구되고 있다. 이들 중 Lead-Zirconate-Titanate(PZT) 및 Micro Fiber Composite (MFC)와 같은 압전 센서를 사용한 평가법은 유망한 구조물 건전성 평가법 중 하나이다. 본 연구에서도 압전효과를 이용한 구조물의 임피던스 측정을 위해 압전센서가 사용되었다. 압전 센서의 특성인 압전 효과는 크게 두 가지로 분류 할 수 있는데 압전 직접효과라고 하는 것은 전압발생 기능으로 압전 소자에 외부 응력, 진동 변위 등을

1) 학생회원, 성균관대학교 u-City공학과 석사과정

2) 학생회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정

3) 정회원, 성균관대학교 사회환경시스템 공학과/u-City 공학과 조교수

\* Corresponding author : shparkpc@skku.edu 031-290-7525

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

주면 그 출력단에 전기 신호가 발생하는 현상을 말하며 각종 센서에 응용되고 있다. 또 역 압전 효과라고 하는 것은 변위발생 기능으로 압전소자에 외부로부터 전압을 걸어주면 소자가 기계적 변위를 일으키는 현상을 말하며 액츄에이터 등에 적용되고 있다. 이런 정, 역 압전효과를 통칭하여 압전효과라고 부르고 있다. 이러한 압전효과를 이용하면 압전센서를 구조물에 붙여 구조물을 가진하고 그 응답신호를 계속하여 다양한 구조물의 국부손상을 찾아낼 수 있는 유용하고 혁신적인 기술로 사용될 수 있다 (Bhalla and Soh 2004, Victor Giurgiutiu et al. 2002, 2004, Ihn and Chang 2004, Gyuhae Park et al. 2000, 2003, Seunghee Park et al. 2005, 2006, 2007, Jeannette R. Wait et al. 2005).

본 연구에서는 온라인 기반의 실시간 배관구조물 건전성 평가 기법을 압전센서를 이용, 다음과 같이 연구하였다. 배관 구조물에 압전센서를 부착하여 볼트 손상과 균열손상을 가정하고 임피던스를 계속하여 구조물의 상태에 따른 신호의 변화를 통해 손상을 탐색함으로써 배관구조물에서의 임피던스 기반 손상탐색 기법의 적용가능성을 알아보고자 한다. 또한 손상지수인 제곱평균제곱근편차 (Root Mean Square Deviation, RMSD)를 구하여 정상상태의 임계값과 비교해 봄으로써 정량적인 손상평가를 하고 그 가능성을 확인하고자 한다. 본 논문은 본문인 2장중 1절은 연구에 사용된 임피던스 기법, RMSD, 임계값 설정 등의 이론적 배경에 대해 정리하고, 2절에서는 실험 수행 및 결과에 대해 정리한 후 3장에서 본 연구의 결론을 서술하는 것으로 구성되었다.

## 2. 본 론

### 2.1 이론적 배경

#### 2.1.1 임피던스 기반 손상 평가

전기/역학적 임피던스 기반의 손상평가는 구조물에 부착된 PZT 및 MFC와 같은 작은 압전센서를 통해 고주파 영역에서 구조물을 가진하고 동시에 그 구조물의 전기/역학적 임피던스의 변화를 관찰한다. 압전센서가 대상 구조물에 부착되어 있을때 구조물의 역학적 임피던스  $Z_s(\omega)$ , 압전센서의 임피던스  $Z_a(\omega)$ 가 상호 연계된 전기적 임피던스의 역수인 전기적 어드미턴스  $Y(\omega)$ 를 다음 식(1)과 같이 정리하였다(Chen Liang et al. 1994).

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

여기서  $\omega$ ,  $l$  및  $h$  는 각각 압전센서의 너비, 길이와 두께를 나타내고  $\overline{\epsilon_{33}^T} = \epsilon_{33}^T (1 - \delta j)$ 는 일정한 응력상태에서의 압력센서의 복합 전기유전율을 나타내며  $\delta$ 는 압전센서의 역학적 손실계수를 나타낸다.  $\overline{Y^E} = Y^E (1 + \eta j)$ 는 지속적인 전기장 내에서 압전센서의 Young의 계수,  $\eta$ 은 압전센서의 역학적 손실계수를 나타내며  $d_{31}$ 은 압전센서의 전기-역학적 상수인 압전상수를 나타내고  $Z_s(\omega)$ 와  $Z_a(\omega)$ 는 각각 압전센서와 구조물의 전기적 임피던스를 나타낸다.  $\kappa = \omega (\rho / \overline{Y^E})^{1/2}$  는 파수(wave number)를,  $\rho$ 는 압전센서의 밀도를 나타낸다. 실수부와 허수부의 복잡한 숫자들의 조합으로 구성된 이 식을 통해 어드미턴스  $Y(\omega)$ 를 구할 수 있다. Suresh Bhalla 등(2002)은 구조물의 국부적인 손상에 대해 계속된 어드미턴스의 실수부가 허수부보다 더 민감하게 변화함을 보였고, Gyuhae Park 등(2006)은 허수부가 압전센서의 자가진단에 더욱 효과적임을 발견하였다. 임피던스를 이용한 계속에는 다양한 방법이 있는데, 본 연구에서는 저비용으로 높은 신뢰도를 보여주는 커패시터를 이용한 저비용 셀프센싱 기법을 이용하였다(Lee and Sohn 2006, Daniel M. Peairs et al. 2002). 셀프 센싱기법에서는 하나의 압전센서가 가진기와 센서의 역할을 동시에 수행하고 하나의 간단한 커패시터 연결만을 필요로 하기 때문에 기존의 임피던스 계속 시스템에 비해 저비용이다. 셀프센싱 계속기법을 위한 커패시터를 연결한 간단한 전압 분배기의 회로는 Fig. 1과 같이 구성된다.

여기서 사용된 셀프센싱 회로는 입력신호에 대한 역학적 응답신호를 구별해내는데 사용된다. 셀프센싱 기법은 1. 파형 시험 적용을 통한 Scaling Factor(SF)의 계산, 2. 임의의 입력 파형에 해당하는 역학적 응답 추출의 두 단계로 구성되어 진다. 이 과정들은 시간 반전 처리를 위해 필요하다. 압전센서의 한 면은 대상 구조물과 부착되고 나머지 한 면은 임의의 파형 생성기에서 생성된 입력 전압  $v_i(t)$ 와 연결된다. 그리고 바닥면은 제안된 셀프센싱 회로와 연결되고 셀프센싱 회로로 부터의 출력 전압  $v_o(t)$ 는 디지털라이저(Digitizer)에서 계속되어진다. 사용

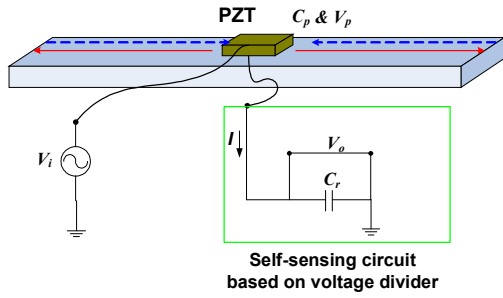


Fig. 1 Self-sensing circuit using capacitor

된 셀프센싱 회로의 출력전압은 입력전압과 대상구조물의 역학적 응답신호  $v_p(t)$ 로 구성되어있는데 일반적으로 입력전압의 진폭 크기는 역학적 응답의 크기보다 크기 때문에, 출력 전압은 입력전압의 지배를 받고 식(2)와 같이 정리 된다.

$$v_o(t) = \frac{C_p}{C_p + C_r}(v_i(t) + v_p(t)) \approx \frac{C_p}{C_p + C_r}v_i(t) \quad (2)$$

여기서  $C_p$ 는 압전센서의 케패시턴스,  $C_r$ 은 셀프센싱회로의 참조 케패시턴스 이다. 여기에서 제안된 셀프센싱회로의 SF 지수는 다음 식(3)과 같이 정의된다.

$$SF = \frac{C_p}{C_p + C_r} \approx \frac{v_o(t)}{v_i(t)} \quad (3)$$

식(3)은 입력신호에 대한 출력신호의 진폭비율을 구함으로써 SF 지수의 근사치를 구할 수 있음을 보여준다. 여기서 셀프센싱기법의 전기적 어드미턴스는 식(4)와 같이 다시 정의할 수 있다.

$$Y(\omega) = j\omega C_p \frac{V_o(\omega)}{V_i(\omega) - V_o(\omega)} \quad (4)$$

여기서  $C$ 는 하중이 없는 상태에서의 압전센서 케패시턴스 값을,  $V_o$ 는 출력전압,  $V_i$ 는 입력전압을 각각 나타낸다. Lee 와 Sohn(2006)은 직교성의 방법을 통해 이를 증명함으로써 위의 식이 정의됨을 보였다.

### 2.1.2 손상탐색을 위한 손상지수: RMSD

앞 절과 같은 방법으로 구조물에 부착된 압전센서로부터 얻은 전기-역학적 임피던스 신호의 변화를 관찰함으

로써 구조물의 건전성을 평가할 수 있다. 하지만 임피던스의 변화는 손상 탐색을 위한 질적 평가만을 제공해주기 때문에 정량화된 스칼라 손상 지수가 정량적인 구조물손상의 평가를 위해 사용되고 있다. 이를 위해 Daniel M. Peairs 등(2006)은 다양한 손상지수의 비교에 대한 연구를 하였다. 하지만 임피던스 기법을 위해서는 RMSD를 사용하는 것이 일반적이고 이는 각 주파수별 임피던스의 차이를 아래 식(5)와 같이 구한다.

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{Re}(Z_0(\omega_i)) - \text{Re}(Z_1(\omega_i)))^2}{\sum_{i=1}^n \text{Re}(Z_0(\omega_i))^2}} \quad (5)$$

여기서  $Z_0(\omega)$ 는 구조물이 정상 상태에 압전센서로부터 측정된 임피던스 이고  $Z_1(\omega)$ 은 구조물의 각 상태에 측정된 임피던스, 그리고  $n$ 은 샘플 포인트의 수이다. 이렇게 구해진 RMSD의 더 큰 지수 값, 즉 기준 임피던스와 대상 임피던스의 더 큰 차이는 구조물의 손상이 더 분명함을 뜻한다.

### 2.1.3 GEV 분포를 사용한 임계값 설정

위와 같이 손상지수를 통해 정량화 하고 나면 그 손상지수의 정상, 손상을 구분해줄 수 있는 적절한 임계값 설정이 필요하다. 본 연구에서는 일반극치분포(Generalized Extreme Value Distribution, GEV)를 이용해 99.9% 신뢰도의 임계값을 설정하였다. 일반 극치분포는 누적 분포 함수의 형태를 가지고 다음 식을 따른다.

$$F(x; \mu, \sigma, \xi) = \exp - [1 + \xi(\frac{x - \mu}{\sigma})]^{-1/\xi} \quad (6)$$

여기서  $1 + \xi(x - \mu)/\sigma > 0$ 이고,  $\mu \in R$ 은 위치 변수,  $\sigma > 0$ 은 스케일 변수,  $\xi \in R$ 은 형태 변수이다(Stuart Coles, 2001)

## 2.2 실험적 연구

### 2.2.1 실험 구성

실험을 위한 테스트 베드는 Fig. 2와 같이 제작되었다. 네 가지 소재의 배관이 U자관과 플렌지 연결부에 각각 4



Fig. 2 Testbed for pipeline damage detection experiment

쌍의 볼트-너트 체결을 통해 연결되었다. 하지만 본 실험에서는 SUS(Steel Use Stainless) 50A관만을 대상으로 하였고 상세한 치수는 Fig. 3과 같다.

배관은 바깥지름 6cm, 두께 0.39cm, 길이 90cm이고 볼트가 체결되는 플렌지 부의 너비는 14cm 이다. 본 배관구조물의 가진과 센싱을 위해 압전 센서들이 부착되었는데 볼트풀림 손상검색을 위한 가로세로 3.2cm의 정사각형 모양 Navy type II의 PZT 센서가 볼트 체결부 사이에 부착되었고 균열손상 검색을 위한 가로 11cm 세로 3.2cm의 M-8525-P2 타입 MFC#A가 배관의 왼쪽 끝에서 5cm 떨어진 곳에 같은 크기 같은 타입의 MFC#B가 MFC#A로부터 우측으로 40cm 떨어진 곳에 부착되었다.

Fig. 4는 임피던스 신호 계측을 위한 장비 구성이다. 입력신호를 생성하는 임의파형생성기(Arbitrary Waveform



Fig. 4 DAQ system for experiment

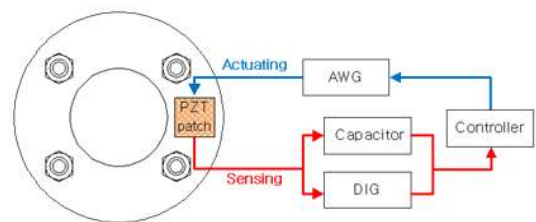


Fig. 5 Schematic diagram of the impedance method

Generator, AWG), 센서로부터 구조물의 응답신호를 계측하는 디지털라이저(Digitizer) 및 자동으로 계측채널을 변경해주는 멀티플렉서(Multiplexer)가 슬롯형태로 NI-PXI 새시 안에 삽입되었다. 이들의 제어하기 위한 내장형 제어기(Embedded Controller)가 새시 안에 함께 삽입되었고 이들은 Lab-View 프로그램을 통해 제어되고 작동되었다. 추가적으로 신호를 증폭시키고 노이즈를 감소시키기 위해 Low-Noise Pre amplifier가 함께 설치되었고 추가적으로 셀프센싱기법의 임피던스 계측 회로 구

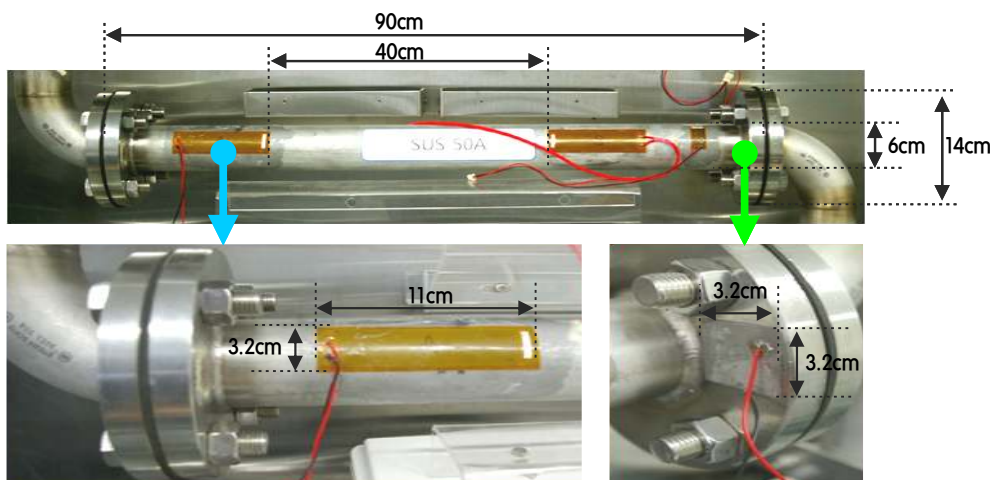


Fig. 3 Detailed specifications of pipeline specimen

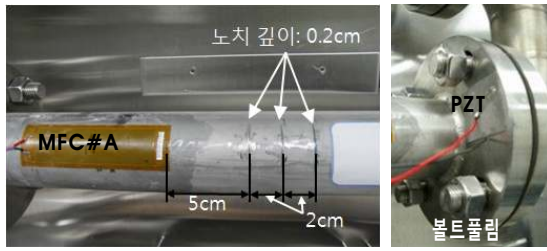


Fig. 6 Simulation of Damages

성을 위해 압전센서의 커패시턴스 값과 대응하는 용량의 커패시터가 디지털라이저와 병렬로 연결되어 출력전압을 분배해준다(Gyuhae Park 등 2003).

### 2.2.2 실험 절차

본 실험은 실험적 기초 연구로, 상온의 실내에서 진행되었으며 배관은 속이 빈 상태로 작동하지 않는 동일한 상태에서 실험하였다. 따라서 온도와 같은 환경적 요인은 본 실험에서 고려하지 않았다.

볼트 풀림과 균열 손상 탐색을 위해 저비용 셀프센싱기법을 사용하여 임피던스를 계측 하였다. 저비용 셀프센싱기법에서는 가진기와 센서의 역할을 하나의 압전센서가 수행하기 때문에 각 세부실험별로 하나씩의 센서만이 사용되었다. 장비의 구성과 신호의 흐름은 위의 Fig. 5와 같이 이뤄진다. AWG 를 통해 발생된 전기적 입력신호를 압전센서에서 물리적 에너지로 바꾸어 구조물을 가진하고 이때의 구조물 응답을 다시 동일한 센서를 통해 받아 압전효과로 인해 다시 전기적신호로 바꾼다. 이 출력 전압을 병렬로 연결된 커패시터와 디지털라이저에서 분배 원리에 따라 측정하여 임피던스 값을 계측하게 된다. 본 실험은 배관연결부의 볼트풀림과 배관부의 균열 손상 두 가지의 손상 시나리오로 구성되었다.

볼트풀림 손상 탐색을 위해 Fig. 6과 같이 연결부의 볼트-너트 4쌍 중 1개, 2개, 3개의 순서로 풀어가며 각 단계별로 임피던스 신호를 계측하였고 균열손상 탐색을 위해서 배관의 길이방향과 수직으로 2mm 깊이의 Notch를 2cm 간격으로 1개부터 3개 까지 늘여가며 각 단계의 신호를 계측하였다. 볼트 풀림 손상 탐색을 위해서 볼트체결부 사이에 부착된 PZT를 사용하였고 대상 배관구조물의 공진주파수를 포함하는 33kHz~36kHz의 주파수영역에서 신호를 계측하였다. Notch 손상 탐색을 위해서는 최초 Notch 손상부로부터 각각 5cm, 35cm 떨어진 배관부 표면에 부착된 MFC#A와 MFC#B에서 신호를 계측하였

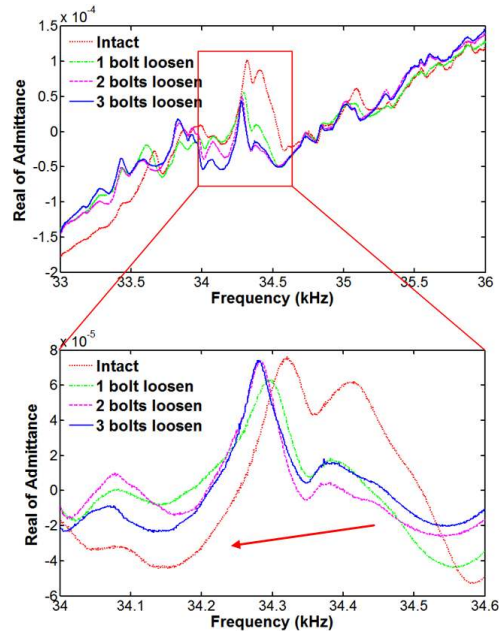


Fig. 7 Changes of impedance signals according to number of loosen bolts measured at PZT

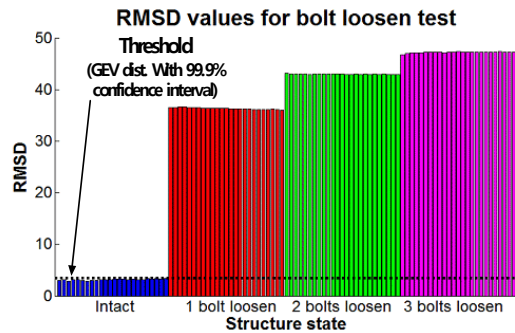


Fig. 8 RMSD bar chart of bolt damage detection experiment

고 역시 공진주파수가 나타나는 17kHz~19kHz의 영역에서 각 손상단계마다 계측하였다. 두 가지 손상 탐색 실험 모두 신호의 랜덤 오차를 제거하기 위해서 각 계측시에 5회 계측값을 평균 내어 사용하였고 반복을 통한 객관성 확보를 위해 손상상태별로 25회 반복 실험 하였다. 또한 계측신호의 바이어스를 제거하기 위해서 계측 임피던스값에서 대상임피던스의 평균값을 빼는 과정을 거쳤다.

### 2.2.3 실험 결과

#### 2.2.3.1 볼트풀림 손상 탐색

정상상태 및 볼트풀림 개수가 증가함에 따른 손상단계별 임피던스 신호 그래프를 Fig. 7에 나타내었다. 33kHz~36kHz의 주파수 영역에서 손상단계별로 25회씩 계측

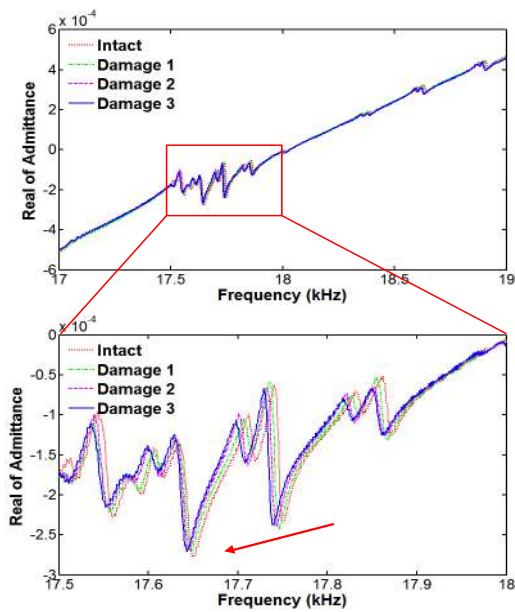


Fig. 9 Changes of impedance signals according to notch damages measured at MFC#A

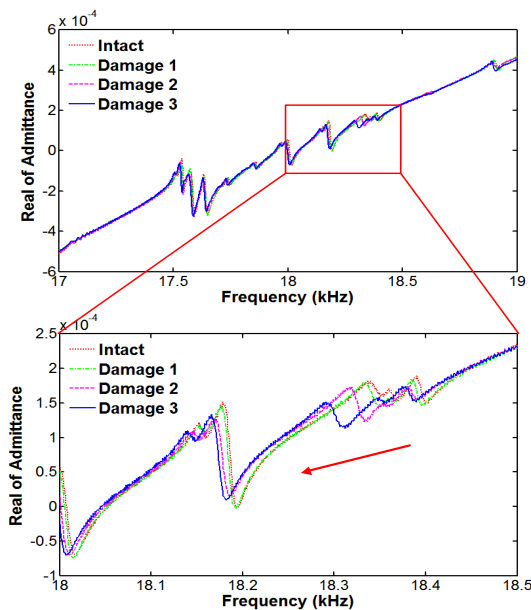


Fig. 10 Changes of impedance signals according to notch damages measured at MFC#B

한 값을 평균내어 사용하였으며 용이한 비교를 위해 모든 손상단계를 한 그래프에 함께 그리고 각기 다른 색상으로 표시 하였다. 그래프에서 보면 볼트풀림개수가 증가함에 따라 그래프 형태의 변화와 공진주파수 Peak의 좌측 이동이 점차 커지는 것을 볼 수 있다. 하지만 이 그래프만으로는 배관구조물의 손상정도를 정량적으로 객관화 할 수가 없다. 따라서 임피던스 신호의 변화를 손상지수를 구

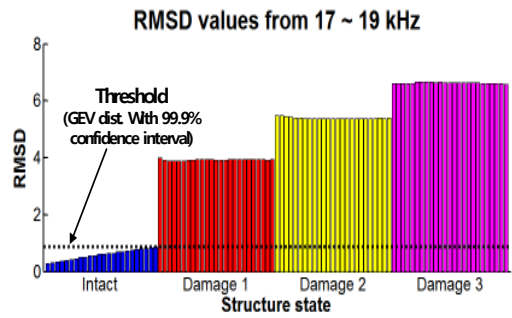


Fig. 11 RMSD bar chart of notches detection experiment measured at MFC#A

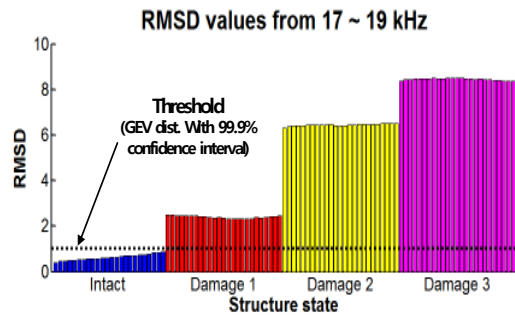


Fig. 12 RMSD bar chart of notches detection experiment measured at MFC#B

함으로써 정량화 시켜 객관성을 확보할 필요가 있고 본 연구에서는 각 손상단계별 RMSD를 계산 하여 손상판단에 활용하였고 그 그래프는 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8을 통해 볼트풀림 개수가 증가할수록 손상지수인 RMSD값이 단계적으로 커짐을 확인할 수 있다. 또한 구조물의 정상상태와 손상상태 구분을 위해 GEV분포를 통해 설정된 정상상태의 임계값을 손상시의 손상지수들이 모두 초과함을 보임으로써 임피던스 계측을 통한 볼트풀림 손상탐색이 가능함을 객관적으로 확인할 수 있었다.

### 2.2.3.2 균열(Notch) 손상 탐색

균열손상을 가정하기 위해 배관구조물에 notch 손상 개수를 1,2,3개로 늘여가며, 각 손상마다 notch 손상 부위로부터 각각 5cm, 35cm 거리를 두고 떨어진 MFC#A, MFC#B를 통해 임피던스 신호를 계측하였다. Notch 손상 탐색 실험에서 계측된 임피던스 신호를 Fig. 9과 10에 볼트 풀림 손상 탐색 실험시의 Fig. 7과 같은 방법으로 나타내었고, 공진주파수영역의 변화가 잘 나타난 주파수 영역인 MFC#A 계측신호는 17.5kHz~18kHz 영역, MFC#B 계측신호는 18kHz~18.5kHz 영역을 더 명확한 확인을 위해 확대하여 하단에 표시하였다. 두 센서에서

모두 notch 손상의 개수가 커짐에 따라 임피던스 신호 그래프의 형태 변화가 증가함과 동시에 공진주파수의 Peak이 점차 왼쪽으로 이동함을 볼 수 있다. 볼트풀림 손상탐색 실험시와 마찬가지로 정량화를 위해 손상지수인 RMSD를 구하였고 Fig. 11과 12에 나타내었다.

볼트 손상 때와 마찬가지로 MFC#A와 MFC#B 두 센서에서 계측된 신호로부터 각각 계산된 RMSD 값이 notch 개수가 증가할수록 단계적으로 증가함을 두 그래프 모두에서 확인할 수 있다. 또한 손상시에 손상지수가 모두 GEV분포를 통해 설정한 임계값을 초과함을 볼 수 있다. 그리고 Fig. 10과 11을 비교해보면 상대적으로 큰 손상인 2개,3개의 notch 손상에서는 두 그래프가 비슷한 RMSD값을 가지지만 상대적으로 작은 손상인 1개 notch 손상의 경우 notch 손상부로부터 가까이 부착된 MFC#A의 RMSD값이 멀리 떨어진 MFC#B에서의 RMSD값보다 크게 나타남을 확인함으로써 작은 손상의 경우 센서와의 거리가 가까울수록 임피던스의 변화가 민감하게 감지됨을 확인할 수 있다.

### 3. 결론

본 연구에서는 핵심 시설물인 배관구조물의 볼트풀림, 균열손상과 같은 국부손상 탐색을 위하여 배관구조물의 압전센서를 사용한 저비용 셀프-센싱 임피던스 기법의 적용가능성을 실험적으로 입증하였다. 연결부가 4개의 볼트/너트로 채워진 SUS관에 압전센서를 부착하여 실험을 수행하였다.

- (1) PZT를 통해 계측한 볼트풀림손상탐색 실험에서 볼트풀림개수가 증가할수록 계측된 임피던스 신호의 형태변화와 공진주파수 Peak의 이동이 커짐을 확인할 수 있었고
- (2) 손상지수인 RMSD를 계산하여 손상증가에 따른 RMSD의 단계적인 변화를 확인할 수 있었다.
- (3) 손상으로부터 다른 거리만큼 떨어진 두 개의 MFC에서 계측한 균열 손상탐색 실험에서도 notch 손상의 개수가 증가할수록 임피던스 신호의 공진주파수 Peak이 점차 좌측으로 이동함과 동시에 형태 변화도 커짐을 볼 수 있었다.
- (4) RMSD 역시 손상이 커짐에 따라 단계적으로 증가함을 보여 손상정도의 판단에 대한 가능성을 보여 주었다.

- (5) 1개 notch손상의 경우 가까이서 계측한 임피던스 신호가 더 민감하게 반응함을 실험을 통해 확인할 수 있었다.
- (6) 볼트풀림과 notch 손상 탐색 두 가지 실험 모두에서 GEV분포를 통해 설정한 정상상태의 임계값을 초과함을 보임으로써 객관적인 손상판단이 가능함을 확인할 수 있었다.

저비용 셀프-센싱 임피던스 기법으로 수행된 본 연구를 통해 배관구조물의 볼트풀림 및 notch의 국부손상검색을 높은 정확도로 객관적이게 해냄으로써 위 제언된 방법의 배관구조물에의 적용성과 효율성을 입증할 수 있었다. 추후 실제 작동하는 배관을 대상으로 다양한 환경에서의 실험을 통해 온도, 습도와 같은 환경적 요인에 대한 보정 및 신뢰도 있는 손상탐색 가능 거리의 정량화, 효과적인 센서의 선정과 부착위치에 대한 연구와 같은 지속적인 추가연구를 통해 실제 배관구조물에 적용 가능한 신뢰할 수 있고 효과적인 배관구조물 손상 탐색 시스템을 개발할 수 있을 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부의 u-City 석·박사 과정 지원사업의 지원과 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한 국연구재단의 원자력연구사업(2010-0025889) 및 기초 연구사업(2010-0023404) 지원을 받아 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. Bhalla, S., Naidu, A.S.K. and Soh, C.K., "Influence of structure-actuator interactions and temperature on piezoelectric mechatronic signatures for NDE", Proc. ISSS-SPIE 2002 International Conference on Smart Materials Structures and Systems, 5062, 2002.
2. Bhalla, S. and Soh, C.K., "High frequency piezoelectric signatures for diagnosis of seismic/blast induced structural damages", NDT&E International, vol. 37, No. 1, 2004, pp.23-33.
4. Coles, S., An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values, Springer, Verlag. 2001. pp.47-49.
5. Giurgiutiu, V., Zagrai, A. and Bao, J.J., "Piezoelectric wafer embedded active sensors for aging aircraft structural health monitoring", International Journal of Structural Health Monitoring, vol. 1, 2002, pp.41-61.
6. Giurgiutiu, V., Zagrai, A. and Bao, J.J., "Damage identification in aging aircraft structures with piezoelectric wafer active sensors", Journal of

- Intelligent Material Systems and Structures, vol. 15, No. 9-10, 2004, pp.673-688.
7. Ihn, J.B. and Chang, F.K., "Detection and monitoring of hidden fatigue crack growth using a built-in piezoelectric sensor/ actuator network: II. Validation using riveted joints and repair patches", Smart Materials and Structures, vol. 13, No. 3, 2004, pp.621-630.
  8. Lee, S.J and Sohn, H., "Active self-sensing scheme development for structural health monitoring", Smart Materials and Structures, vol. 15, No. 6, 2006, pp.1734-1746.
  9. Lee, S.J. and Sohn, H., "Active self-sensing module for sensor diagnosis and structural health monitoring", Proc. 3rd European Workshop on Structural Health Monitoring, Granada, Spain, 2006.
  10. Liang, C., Sun, F.P. and Rogers, C.A., "Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems-determination of the actuator power consumption and system energy transfer", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 5, No. 1, 1994, pp.12-20.
  12. Park, G., Cudney, H. and Inman, D.J., "Impedance-based health monitoring of civil structural components", American Society of Civil Engineers, vol. 6, No. 4, 2000, pp.153-160.
  13. Park, G., Sohn, H., Farrar, C.R. and Inman, D.J., "Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward", The Shock and Vibration Digest, vol. 35, No. 6, 2003, pp.451-463.
  14. Park, G., Farrar, C.R., Rutherford, A.C. and Robertson, A.N., "Piezoelectric active sensor self-diagnostics using electrical admittance measurements", Journal of Vibration and Acoustics, vol. 128, No. 8, 2006, pp.469-476.
  15. Park, S., Yun, C.B., Roh, Y. and Lee, J.J., "Health monitoring of steel structures using impedance of thickness modes at PZT patches", Smart Structures and Systems, vol. 1, No. 4, 2005, pp.339-353.
  16. Park S., Yun, C.B., Roh, Y. and Lee, J.J., "PZT-based active damage detection techniques for steel bridge components", Smart Materials and Structures, vol. 15, No. 4, 2006, pp.957-966.
  17. Park, S., Grisso, B.L., Inman, D.J. and Yun, C.-B., "MFC-based structural health monitoring using a miniaturized impedance measuring chip for corrosion detection", Reserch in Nondestructive Evaluation, vol. 18, No. 2, 2007, pp.139-150.
  18. Peairs, D.M., Park, G., Inman, D.J., "Low Cost Impedance Monitoring Using Smart Materials", Proceeding of the First European Workshop on Structural Health Monitoring, Ecole Normale Superieure, Paris, France, July 10-12, 2002.
  19. Peairs, D.M., Tarazaga, P.A., and Inman, D.J., "A study of the Correlation between PZT and MFC Resonance Peaks and Damage Detection Frequency Intervals Using the Impedance Method", International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium, 2006.
  20. Wait, J.R., Park, G., Farrar, C.R., "Integrated structural health assessment using piezoelectric active sensors", Shock and Vibration, vol. 12, No. 6, 2004, pp.389-405.

(접수일자 : 2010년 6월 9일)

(수정일자 : 2010년 8월 4일)

(심사완료일자 : 2010년 8월 23일)

## 요 지

가스관, 송유관 등의 배관구조물은 주요자원의 수송을 책임지는 핵심 지하시설물 중 하나이다. 이들은 사고 및 자연적인 노후화로 인해 국부적인 손상이 발생할 위험에 노출 되어있다. 하지만 대부분의 배관구조물은 지하의 좁은 공간에 복잡하게 연결되어 있기 때문에 구조물의 건전성을 지속적으로 모니터링 하는데 어려움이 있었다. 이러한 지금까지 관리방식의 한계점을 극복하기 위해 최근 유비쿼터스 센서 네트워크 기반의 온라인 방식의 상시적 구조물 건전성 평가방법에 대한 연구가 활발히 이뤄지고 있다. 본 논문에서는 전기-역학적 임피던스 기반의 실시간 배관 구조물 건전성 평가방법에 대하여 연구하였다. 배관 구조물에 발생하기 쉬운 볼트 풀림과 균열의 두 가지 국부손상을 가정하였고 압전효과를 가진 PZT와 MFC 센서를 이용하여 구조물의 상태에 따른 임피던스를 계측하여 손상탐색 실험을 수행하였다. 하나의 센서로 가진과 센싱을 동시에 수행할 수 있는 저비용 셀프 센싱 기법을 사용하였고 배관 상태에 대한 객관적인 판단을 위해 손상지수인 RMSD 값을 사용하여 계측된 신호를 이용하여 손상의 정도를 정량화시켰다. 손상여부의 판단을 위해 일반 극치 분포를 이용하여 최적화된 통계적인 정상상태의 임계값을 설정하였다. 위와 같은 실험적 연구과정을 통해 제안된 실시간 배관 구조물 건전성 평가 방법의 타당성과 효율성을 확인해 보았다.

핵심 용어 : 전기-역학적 임피던스, 일반 극치 분포, 저비용 셀프센싱 기법, 압전 센서, RMSD, 구조물 건전성 평가