

# 온도 변화에 따른 압전체 센서 자가진단법 및 접합제의 영향에 대한 실험적 고찰

## The Effect of Temperature Variations and Bonding Agents on Piezoelectric Sensor Diagnostics

조혜진\* · 박통일\* · 박규해\*†

HyeJin Jo, Tong-il Park and Gyuhae Park

**Key Words** : impedance (임피던스), structural health monitoring (구조물 건전성 모니터링), sensor diagnostics (센서진단), bonding agent (접합제)

### ABSTRACT

The sensor/actuator active sensor diagnostics procedure, where the sensors/actuators are confirmed to be functioning properly during operation, is a critical component to successfully complete the structural health monitoring (SHM) process with large numbers of active sensors typically installed in a structure. The basis of this process is to track the changes in the capacitive value of piezoelectric materials, which shows up in measured admittance.

Due to the temperature dependent nature of piezoelectric materials, we investigated the effects of temperature variations on sensor diagnostic process. The effect of temperature variations found to be remarkable, modifying the measured capacitive values significantly. In addition we analyzed the effect of bonding agents between a PZT patch and a host structure.

This paper summarizes considerations needed to develop such sensor diagnostic processes, experimental procedures and results, and additional issues that can be used as guidelines for future investigations.

### 기 호 설 명

$Y(w)$  : PZT 센서의 전기-역학적  
어드미턴스 ( $\Omega^{-1}$ )

$Y_p^E$  : PZT 센서의 복합 영스 모달

$d_{31}$  : PZT 상수

$\epsilon_{33}^T$  : PZT의 유전체 상수

$w, l$  : PZT 패치의 너비, 길이

$t_c$  : PZT 패치의 두께

$\delta$  : PZT 패치의 유전체 손실계수

$Z_a, Z_s$  : PZT와 주구조물의 역학적 임피던스

### 1. 서 론

구조물에 손상이 발생했을 때 이를 적절한 시기에 감지하지 못한다면 재정적인 혹은 인명적인 피해가 발생할 수 있다. 따라서 구조물에 발생된 손상을 조기에 감지하고 적절하게 유지 보수할 수 있도록 구조 건전성 모니터링(structural health monitoring, SHM) 기법이 요구되고 있다. 현재 이를 체계적으로 유지 관리하기 위하여 다양한 국부적 구조 모니터링

† 교신저자, 전남대학교 기계공학과 ASD연구실

E-mail : gpark@jnu.ac.kr

\* 전남대학교 기계공학과

기법에 대한 연구가 국내외 많은 연구자들에 의해 활발하게 진행되고 있다.

대부분의 active sensing SHM에서는 많은 수의 압전체(piezoelectric, PZT) 센서와 액츄에이터(actuators)를 필요로 한다. 따라서 SHM을 진행할 때 센서의 고장은 구조물 결함 탐지에 주요한 영향을 발생시켜 적절하지 않은 손상을 감지시킬 수 있다. 즉, 안정적이며 성공적인 구조물 건전성 모니터링을 위해서는 반드시 구조물의 손상과 센서의 손상을 구별할 수 있어야 한다.

센서의 손상 및 파괴를 탐지하기 위하여 Park et al<sup>1)</sup>은 임피던스를 기반으로 한 압전체 센서 자가 진단법을 제안하였다. 임피던스를 기반으로 하는 압전체 센서 자가 진단법은 PZT 센서의 임피던스 값 변화를 파악함으로써 센서에 발생한 결함이나 파손을 감지하고, 센서의 손상과 구조물의 손상을 구별할 수 있다.

본 논문에서는 압전체 센서 자가 진단 절차에서 고려해야 하는 요소들을 파악했다. 다양한 온도변화가 있을 때 임피던스 신호의 변화를 분석하여 온도가 센서자가 진단 절차에 발생시키는 영향을 파악하였으며, 여러 접합제(emers glue all, Axia026, J-B weld epoxy)를 사용하여 온도와 접합제와의 관계를 파악했다. 또한 사용된 주구조물과 PZT 센서를 부착하기 위해 사용된 접합제가 임피던스의 허수 값에 주는 영향을 실험적으로 분석하였다.

## 2. 임피던스를 기반으로 한 piezoelectric sensor 자가 진단법

piezoelectric sensor는 압전효과를 가진 소자를 이용한 센서로서, 압전 센서에 전압을 가하면 신축하는 성질인 압전효과로 인해 전기장을 형성한다. 이때 생성된 전기장의 전류를 측정하면 전기-역학적 임피던스를 계측할 수 있으며, 계측된 임피던스 신호의 변화를 관찰함으로써 구조물의 상태를 실시간으로 진단할 수 있다. 이러한 SHM 기술을 기반으로 한 센서 자가 진단법은 Park et al 에<sup>(1)</sup> 의해 개발되었다. 센서자가진단법의 기본이 되는 PZT 센서의 전기적 어드미턴스 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(2)</sup>

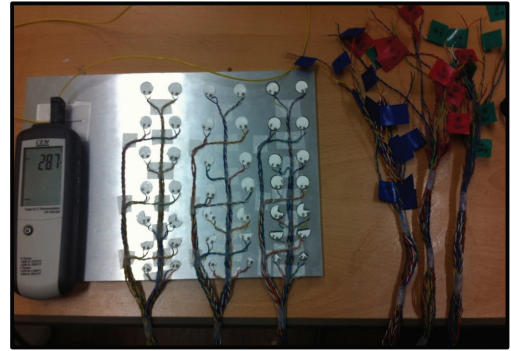


Figure1. Location of thermo couple and array of PZT sensors.

$$Y(w) = iw \frac{wl}{t_c} (\epsilon_{33}^T (1 - i\delta)) - d_{31}^2 Y_p^E + \frac{Z_a(w)}{Z_a(w) + Z_s(w)} d_{31}^2 Y_p^E \left( \frac{\tan kl}{kl} \right) \quad (1)$$

센서 자가 진단법은 PZT 센서의 기하학적 상수  $(w, l, t_c)$ 와 전기적 속성 $(\epsilon_{33}^T, \delta)$ 의 함수로 나타낸 (1)의 식을 근거로 한다. 이때 admittance는 센서의 손상이나 파손이 일어나면 변화된 기울기 값을 나타낸다. 따라서 전기 어드미턴스의 허수 부분 값의 변화를 추적함으로써 PZT 센서 자가 진단이 가능하다.

### 2.1 온도변화의 영향

실제 현장에서 구조물 건전성 모니터링을 실시할

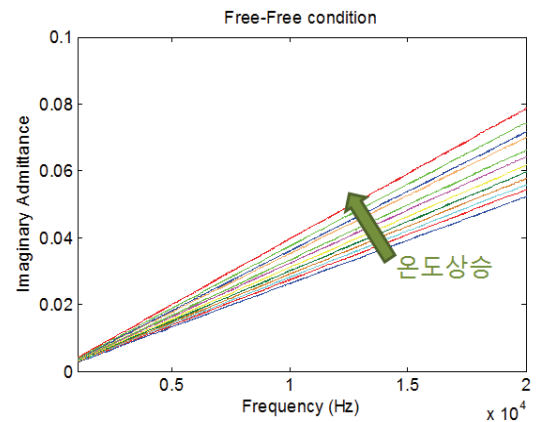


Figure2. imaginary admittance of PZT sensor at Free-Free condition

때 외부 온도의 변화로부터 자유로울 수 없다. 따라서 SHM을 실시할 때나, PZT 센서 자가진단 과정에서 온도의 영향을 고려해 주어야 한다. 일반적으로 어드미턴스 허수부분 값의 기울기는 온도가 상승함에 따라 점차적으로 증가한다고 알려져 있다.<sup>(2)</sup>

본 연구에서는 보다 광범위한 온도범위의 실험을 통하여 온도 변화의 영향을 파악하였으며, 온도변화가 존재할 때 주구조물과 PZT 센서 사이에 발생하는 접합체의 영향을 실험적으로 분석하였다.

Figure1에서와 같이 200x300x10(mm)의 알루미늄 판에 총 42개의 PZT 센서를 부착하였다. 이때 부착의 정도를 100%, 75%, 50%, 25% 로 각각 나누어 주었고 파손의 정도도 마찬가지로 75%, 50%, 25% 로 나누어 부착하였다. 모든 PZT 센서들은 접합체를 제외한 모든 조건을 동일하게 주었다.

일정한 온도변화를 주기 위해 150℃까지 조절이 가능한 Temperature Oven을 사용하였고, 주구조물의 정확한 온도 측정을 위해서 -300℃에서 1000℃

범위까지 측정이 가능한 thermo couple을 주구조물에 부착하였다. 실험은 상온(28℃)에서부터 110℃까지 실시되었으며, 10℃ 간격으로 Imaginary Admittance 값을 측정하였다.

Figure2는 PZT 센서가 Free-Free 상태일 때 온도가 변함에 따라 imaginary admittance 값이 변하는 것을 나타낸다. 상온(28℃)에서는 가장 하단에 위치하여 완만한 기울기를 나타냈으며, 온도가 증가함에 따라 단계적으로 기울기가 상승하여 110℃에서는 가장 급한 경사를 나타내었다. 온도변화가 존재할 때 admittance의 허수부분 값이 지속적으로 변하는 것은 PZT 센서가 온도의 영향을 충분히 받는다는 것을 말한다. 즉, 임피던스 값을 기반으로 한 센서 자가 진단법을 실시할 때 측정된 임피던스 기울기 값의 변화가 온도의 영향 때문에 발생한 것인지, 혹은 센서 자체에서 발생한 debonding현상이 원인인지 유의하여 진단할 필요가 있다.

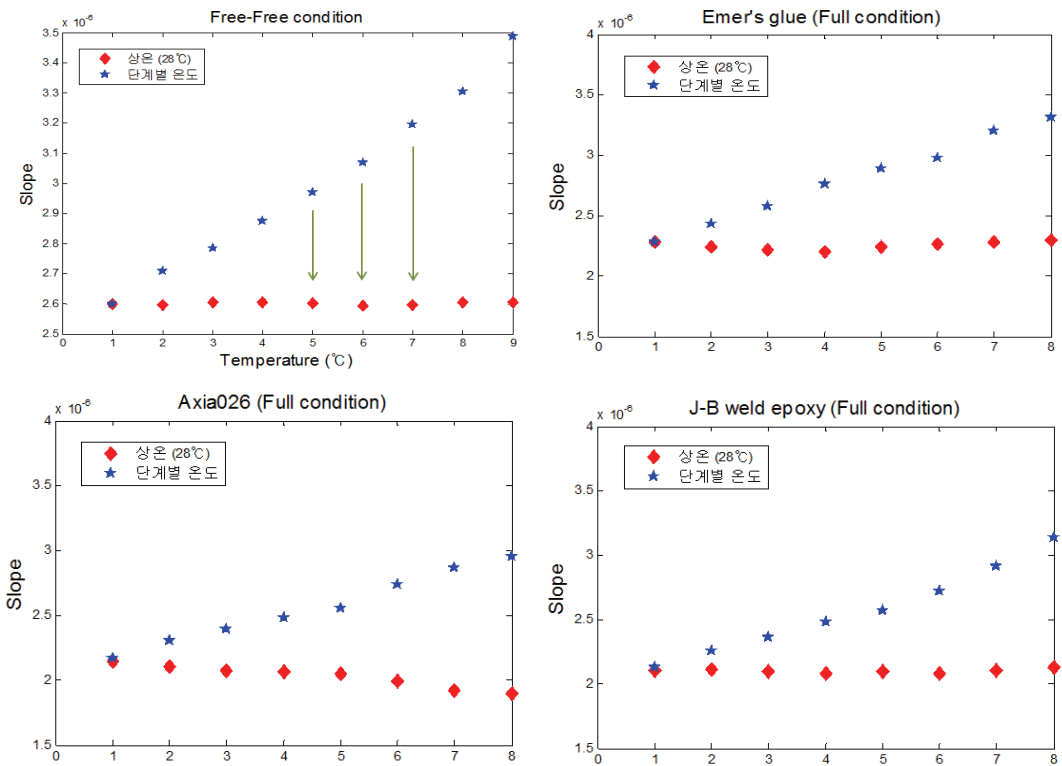


Figure3. re-measurement of room temperature through each bonding agent

## 2.2 접합제의 영향

Xu와 Liu<sup>(3)</sup>는 PZT sensor와 주구조물 사이에 SDOF system의 모습을 갖는 접합 층 (bonding layer)이 포함된 전기-역학적 임피던스 모델을 나타냈다. 이는 impedance의 값은 주구조물과 PZT 센서 뿐만 아니라 접합제의 영향 또한 받을 수 있다는 것을 말한다.

접합제가 impedance 값에 주는 영향을 알아보기 위하여 앞서 2.1절에서 언급한 것과 같이 실험을 준비하였다. 주구조물과 PZT센서를 부착하기 위한 접합제는 물에 쉽게 녹아 재사용이 가능한 emer's glue all과 통상 실험 시 가장 많이 사용되는 순간 접착제인 Axia026 그리고 다양한 용도로 사용이 가능한 J-B weld epoxy를 이용하였다.

### (1) 온도변화로 인한 접합제의 영향

안정적인 SHM과 PZT 센서 자가 진단을 위해서는 지속적인 온도변화가 존재하여도 주구조물과 PZT 센서 사이에 접착이 잘 유지되어야 한다. 즉, 동일한 조건에서 특정온도에 구조물이 노출되어 있을 때 각 온도에 맞는 어드미턴스 값을 나타내어야 한다.

Figure 3은 상온(28℃)에서 10℃ 간격으로 온도를 상승시켜 측정한 데이터와 각 단계별 온도 이후 상온 재측정을 실시한 데이터를 나타낸 것이다. 앞선 2.1 절에서 온도가 상승함에 따라 어드미턴스의

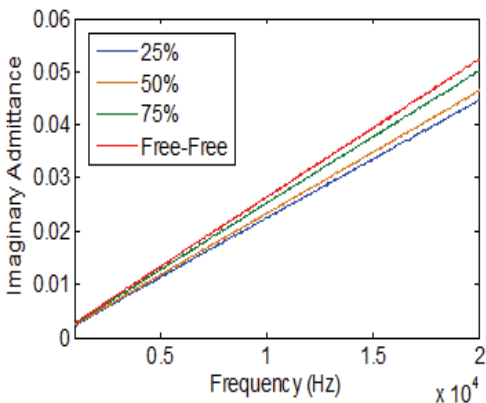


Figure4. Slope of the imaginary admittance increases with debonding percentage

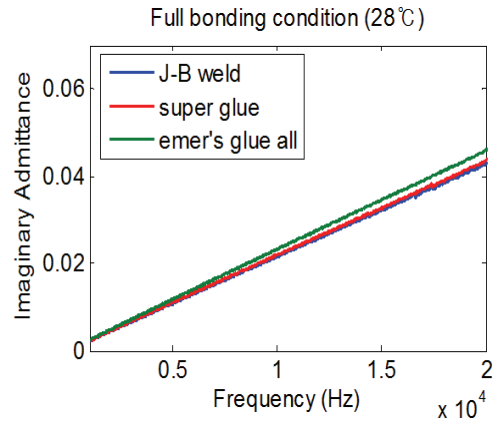


Figure5. bonding agent of full bonding condition at room temperature

기울기는 증가했다. 마찬가지로 Figure3의 온도별 어드미턴스의 기울기는 접합제의 종류에 상관없이 온도가 상승함에 따라 함께 증가하는 모습을 보였다.

Free-Free 상태일 때 각 단계별 온도 이후 상온 재 측정된 데이터는 온도변화 이후에도 상당히 일관된 모습을 나타낸다. 이는 접합제가 온도변화가 존재할 때에도 안정적으로 사용되기 위해서는 Free-Free 상태와 마찬가지로 상온 재측정 결과가 일관된 모습을 보여야 한다는 것을 의미한다. Figure3을 보면 순간접착제인 Axia026은 상온 재측정 데이터에서 약간의 불안정한 모습을 보이지만 다른 접합제인 emer's glue all과 J-B weld epoxy는 상대적으로 상당히 안정된 모습을 보인다.

실제 구조물이 온도변화에 쉽게 노출될 수 있는 환경에서 PZT 센서를 부착할 때는 주구조물과 PZT 센서 사이를 부착할 접합제 선택에 유의하여야 하며, 보다 신뢰할 수 있는 센서 자가 진단을 위해서는 부착되어 있는 접합제의 영향을 고려하여 상태를 진단할 필요성이 있다.

### (2) 온도별 접합제의 변화

Figure4는 PZT 센서와 주구조물을 부착할 때 접착의 정도에 차이를 주어 측정된 데이터로, Free-Free 상태일 때 측정된 값에서 debonding비율이 낮아질수록 기울기가 완만해 지는 것을 볼 수 있다.

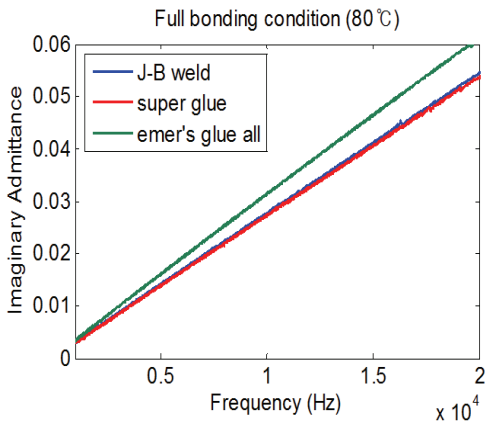


Figure6. bonding agent of full bonding condition at 80°C

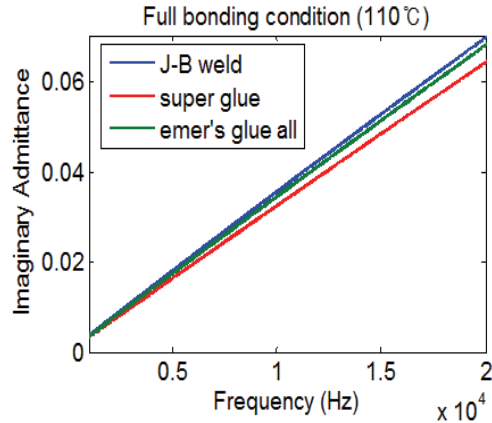


Figure7. bonding agent of full bonding condition at 110°C

Figure5는 주구조물과 PZT 센서가 100% 부착되어 있을 때, 각 접착제들이 상온(28°C)에서 나타내는 어드미턴스 값을 나타낸 것이다. 이때 어드미턴스는 각 접착제들이 완전 경화된 이후에 측정되었다.

Figure5의 데이터는 Figure4에서 얻은 결론인 접착의 정도가 높을수록 기울기가 완만하게 나타난다는 점을 토대로 분석할 수 있다. 즉, 기울기가 완만하게 나타난 J-B weld가 상온(28°C)에서 가장 우수한 접착력을 나타내며, 뒤로는 super glue와 emer's glue all의 순서대로 우수한 접착력을 갖는다고 볼 수 있다. 하지만 상온에서의 우수한 접착력이 고온에서도 반드시 우수한 접착력을 유지하는 것은 아니다.

Figure6에는 80°C에서 full bonding 상태일 때 3가지 접착제의 어드미턴스가 나타나 있다. 상온에서 미세하게 순간접착제 axia026보다 J-B weld의 접착력이 우수하게 측정됐으나, 80°C에서는 J-B weld보다 axia026의 접착력이 나은 결과가 나타났다. 즉, 80°C를 기점으로 두 접착제의 기울기에 역전현상이 발생하였고, 110°C에서는 눈에 띄게 접착력의 변화가 온 것을 볼 수 있다(Figure7). 이는 온도가 증가함에 따라 모든 접합제의 어드미턴스 기울기가 상승하기는 하나 그 비율이 각 접합제마다 다르다는 것을 의미한다.

또한 상온에서 우수한 접착력을 가지고 있다고 해서 고온에서도 우수한 접착력을 보이지 않지 때문에 어떠한 접합제가 우수하다고 쉽게 단언할 수 없다. 즉, 저온이나 상온, 고온 등 실제 상황을 고려하여

PZT 센서와 주구조물 사이를 부착할 접합제를 선택해야 하고 센서자가진단 절차를 수행할 때는 사용된 접합제의 온도변화율을 인지하고 있어야 한다.

### 3. 결 론

허수부분 임피던스 값의 변화를 추적하여 센서의 결함과 파손을 탐지하는 센서 자가 진단법은 임피던스 값을 통해 실시하는 구조 건전성 모니터링 기술을 기반으로 한다. 따라서 안정적이며 성공적인 SHM을 위해서는 반드시 적절한 센서자가진단 절차가 동반되어야 한다.

본 논문에서는 특정한 범위의 온도 변화 실험을 통하여 센서 진단 과정의 기본인 어드미턴스 값이 온도변화로부터 충분한 영향을 받는다는 것을 보였다. 또한 PZT 센서와 주구조물을 부착하는데 사용된 접합제에 따라 전기 역학적 임피던스의 값이 변화하고, 이는 접합제가 센서자가진단 절차에 충분한 영향을 줄 수 있음을 강조했다. PZT 센서와 주구조물을 부착하는데 사용된 접합제 자체도 온도변화에 민감하게 반응하기 때문에 상온에서 우수한 접합제라도 고온에서는 우수하지 못한 접합제가 될 수 있음을 보였다.

따라서 안정성과 신뢰성 있는 센서자가진단을 위해서는 전기-역학적 임피던스 값에 영향을 주는 복합적인 요소들을 고려해야 한다.

추후에는 실제 구조물에서 효과적으로 센서자가진단 절차가 진행되기 위하여 온도변화와 접합제의

영향으로부터 독립적인 센서 자가 진단법에 대한 추가 연구가 필요하다. 또한 정적하중이 임피던스 신호에 주는 영향을 고려하고<sup>(4)</sup>, 극 초저온에서 PZT 센서 자가 진단 시 고려해야할 요소들을 파악하여 보다 광범위하게 센서 자가 진단법을 적용하기 위한 연구가 필요할 것이다.

## 후 기

이 논문은 2013년도 정부 (미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 과학기술국제화사업 연구임 (2011-0030065)

## 참 고 문 헌

(1) Park, G., Farrar, C. R., Rutherford, A. C., Robertson, A. N., 2006, "Piezoelectric Active Sensor Self-Diagnostics Using Electrical Admittance Measurements.", ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol.128, pp 469-476.

(2) Overly, R. G., Park, G., Farinholt, K. M, 2009, "Piezoelectric Active-Sensor Diagnostics and Validation Using Instantaneous Baseline Data", IEEE SENSORS JOURNAL, Vol.9, pp 1414-1421.

(3) Xu, Y. G and Liu, G. R., 2002, "A modified electro-mechanical impedance model of piezoelectric actuator-sensors for debonding detection of composite patches", Journal of IMSS, Vol13, pp 389-396.

(4) Jiyoung Min., Chung-Bang Yun and Kwang Soo Lee., 2009, "E/M Impedance-based SHM Using Piezo electric Sensors for Tidal Current Power Plant Structure", Korean Society for Noise and Vibration Engineering, pp 814-815.