

Admittance 기반 압전체 센서 자가진단절차의 영향인자 파악 및 실험적 고찰

조혜진* · 박통일* · 박규해**
* 전남대학교 기계공학부

Experimental Investigation on Admittance-Based Piezoelectric Sensor Diagnostic Process

HyeJin Jo*, Tong-il Park* and Gyuhae Park**

* School of Mechanical Engineering, Chonnam Nat'l Univ.

(Received July 29, 2014 ; Revised August 29, 2014 ; Accepted August 29, 2014)

Key Words: Structural Health Monitoring(구조건전성 모니터링), Admittance(어드미턴스), Bonding Material (접착 재료), Sensor Diagnostics(센서 진단)

초록: 압전소자(Piezoelectric transducer, PZT)는 구조물의 안정성 평가를 목적으로 하는 구조 건전성 모니터링 기법(Structural Health Monitoring, SHM)의 센서(sensor) 및 구동기(actuator)로 많이 활용되고 있다. 사용되는 센서 및 구동기의 성능을 사전에 파악하고, 잔존수명 및 결함을 탐지하는 센서 자가 진단법은 안정적인 SHM의 결과를 얻기 위해 매우 중요한 절차이다. 본 연구에서는 Admittance 값을 기반으로 한 센서 자가 진단절차를 통하여 압전체 센서의 결함을 탐지하였으며, 센서 진단과정에 영향을 줄 수 있는 접합층 및 온도 등의 영향인자에 대해 실험적 분석을 실시하였다. 분석 결과 Admittance와 온도 및 접착제의 상관관계를 파악할 수 있었으며, admittance를 기반으로 한 센서 자가 진단 절차를 통해 센서의 접착상태와 접착제의 성능평가가 가능함을 검증하였다.

Abstract: Structural health monitoring (SHM) techniques based on the use of active-sensing piezoelectric (PZT) materials have received considerable attention. The validation of the PZT functionality during SHM operation is critical to successfully implementing a reliable SHM system. In this study, we investigated several parameters that affect the admittance-based sensor diagnostic process. We experimentally identified the temperature dependency of the active-sensor diagnostic process. We found that the admittance-based sensor diagnostic process can differentiate the adhesion conditions of bonding materials that are used to install a PZT on a structure, which is important when designing a sensor diagnostic process for an SHM system.

- 기호설명 -

1. 서론

- Z_a, Z_s : PZT와 주구조물의 역학적 임피던스
- d_{31} : PZT 상수
- ϵ_{33}^T : PZT의 유전체 상수
- w, l : PZT 패치의 너비, 길이
- t_c : PZT 패치의 두께
- δ : PZT 패치의 유전체 손실계수
- Y_p^E : PZT 센서의 복합 영스 모달
- $Y(w)$: PZT 센서의 전가역학적 어드미턴스 (Ω^{-1})

구조물에 발생된 손상을 적절한 시기에 감지하지 못한다면 재정적인 혹은 인명적인 피해가 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위하여 구조물의 손상 및 결함을 조기에 감지하고 적절하게 유지 보수할 수 있는 구조 건전성 모니터링(structural health monitoring, SHM) 기법이 요구되고 있다. 따라서 다양한 국부적 구조 모니터링 기법에 대한 연구가 국내외 많은 연구자들에 의해 활발하게 진행되고 있다.⁽¹⁾ 압전소자(Piezoelectric transducer, PZT)는 구조 건전성 모니터링 기법에 센서(Sensor) 및 구동기(actuator)로 많이 활용되고 있으며, 일반

† Corresponding Author, gpark@jnu.ac.kr

적으로 대형구조물의 건전성 모니터링에는 많은 수의 압전 센서와 actuator를 필요로 한다.⁽²⁾

실제 구조물에 부착되어있는 센서의 경우 온도, 날씨 등 다양한 외부요인으로부터 노출되어 있다. 외부요인으로 인한 센서의 결함은 SHM system 분석결과에 영향을 주며, 구조물의 상태진단에 있어 정확도 및 신뢰성 문제를 야기할 수 있다. 따라서 센서 자체의 성능을 사전에 파악하고, 센서의 잔존수명 및 손상을 진단하는 센서 자가 진단 절차는 SHM의 신뢰성 증대를 위해 매우 중요한 절차이다.⁽³⁾

구조물에 부착된 센서의 결함을 탐지하는 센서 자가 진단에 관한 연구는 활발하게 진행되고 있다. Giurgiutiu 등⁽⁴⁾은 PZT 센서의 공진주파수 변화를 추적함으로써 센서의 파손을 탐지하는 기법을 제안하였으며, Xu 와 Liu⁽⁵⁾는 PZT 센서와 구조물 사이의 접합층을 1-d spring-mass-damper(SMD) system으로 모사하여 센서의 de-bonding을 탐지하는 연구를 수행하였다. 또한 센서의 손상 및 파손을 탐지하기 위하여 Park 등^(2,6)은 임피던스를 기반으로 한 압전체 센서 자가 진단법을 제안하였다. 임피던스를 기반으로 한 압전체 센서 자가 진단법은 PZT 센서의 capacitive value 변화를 추적함으로써 센서에 발생된 결함이나 접합층 파손을 감지하고, 최종적으로 센서의 손상과 구조물의 손상을 구별한다.

임피던스를 기반으로 하는 압전체 센서 자가 진단법을 실제 환경에 적용하기 위해서는 다양한 영향요소를 파악할 필요가 있으며, 임피던스의 변화를 야기하는 영향인자 파악과 관련된 연구는 다음과 같이 진행되었다.

Fabricio 등⁽⁷⁾은 온도에 따른 PZT 센서의 electro-mechanical impedance(EMI)의 변화 파악 및 공진주파수의 변화를 분석하는 연구를 수행하였으며, Bhalla and Moharana⁽⁸⁾는 구조물과 PZT 센서 사이의 접합층을 모델링하여 임피던스와 접합층의 관계를 이론적으로 설명하였다. Grisso and Inman⁽⁹⁾은 구조물에 부착된 PZT 센서들의 위치에 따른 비교 및 온도의 영향을 고려하여 센서의 결함을 탐지하는 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 admittance를 기반으로 한 압전체 센서 자가 진단 절차를 통해 센서의 결함을 탐지하였으며, 분석 결과에 영향을 줄 수 있는 온도, 접착제 등의 영향인자를 확인 및 분석하였

다. 실험을 통해 28~110도의 온도변화에 따른 admittance를 파악하였으며, 다양한 접착제가 사용되었을 때의 admittance를 파악함과 동시에 온도 변화와 접착제의 상관관계를 실험적으로 분석하였다.

2. Admittance를 기반으로 한 압전체 센서 자가 진단법

압전체는 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환하거나 기계적 에너지를 전기적 에너지로 상호 변환이 가능한 소자이다. 또한 압전체의 전기역학적 임피던스를 계측하고, 계측된 임피던스 신호의 변화를 관찰함으로써 구조물의 상태를 실시간으로 진단할 수 있다.^(10,11)

PZT 센서의 임피던스 허수 값을 기반으로 한 센서 자가 진단법은 Park 등에⁽⁶⁾ 의해 개발되었으며, 이때 임피던스의 역수인 PZT 센서의 electrical admittance는 다음과 같이 나타낸다.⁽¹²⁾

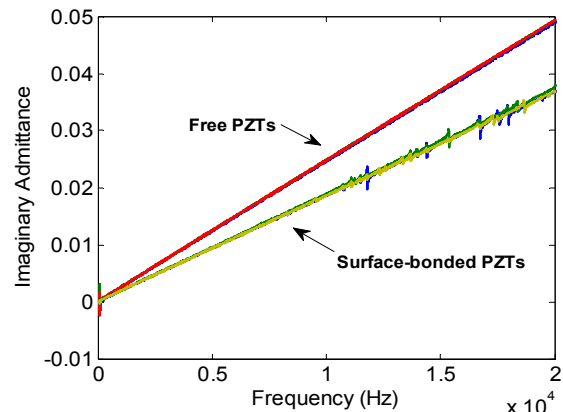


Fig. 1 Electrical admittance measurement from PZT patches under free and surface-bonded conditions

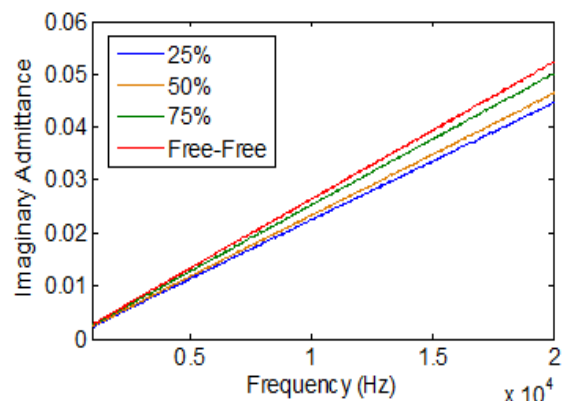


Fig. 2 Slope of the imaginary admittance increases with debonding percentage

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

PZT 센서가 구조물에 완벽히 부착되어 있을 때의 electrical admittance, $Y(w)$, 즉 식 (1)은 PZT 패치의 너비, 길이, 두께 등의 기하학적 상수 (w, l, t_c)와 PZT 패치의 유전체 상수 및 유전체 손실계수인 전기적 속성 (ϵ_{33}^T, δ)의 함수로 이루어진다. 이때 Z_a 와 Z_s 는 PZT와 주구조물의 역학적 임피던스이며, Y_p^E 는 PZT의 복합 탄성계수를 나타낸다.

압전체 센서의 손상은 압전체의 기하학적 상수 및 전기적 특성 값을 변화 시키며, 이 변화는 admittance의 기울기에 변화를 야기한다. 따라서 센서의 파손은 electrical admittance의 기울기를 추적함으로써 진단이 가능하다.⁽¹³⁾

한편, PZT 센서가 구조물에 부착되지 않은 free-free condition일 경우 electrical admittance는 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹²⁾

$$Y_{free}(w) = iw \frac{wl}{t_c} (\epsilon_{33}^T (1 - i\delta)) \quad (2)$$

PZT 센서가 구조물에 완전히 부착되었을 때의 electrical admittance를 나타낸 식 (1)은 PZT의 역학적 impedance에 비하여 구조물의 역학적 impedance가 훨씬 크다는 가정 하에, free 상태인 PZT의 admittance에서 접촉 층의 영향 값을 뺀 것으로 나타낼 수 있으며 이는 아래의 식 (3)과 같다.

$$Y(w) = iw \frac{wl}{t_c} (\epsilon_{33}^T (1 - i\delta)) - d_{31}^2 Y_p^E = Y_{free}(w) - iw \frac{wl}{t_c} (d_{31}^2 Y_p^E) \quad (3)$$

식 (3)은 electrical admittance가 주구조물과 PZT 센서 뿐만 아니라 접촉상태의 영향도 받을 수 있음을 의미한다.^(14,15)

Fig. 1은 식 (3)을 토대로, PZT 센서가 구조물에 부착되지 않은 free-free 상태일 때와 구조물에 부착되어 있을 때의 admittance를 나타낸다. 상단에 위치한 free PZT의 admittance 기울기는 PZT 센서가 구조물에 부착되면서 bonding effect로 인해 식 (3)의 $iw \frac{wl}{t_c} (d_{31}^2 Y_p^E)$ 만큼 감소한다.⁽¹⁶⁾

또한 PZT 센서의 부착정도가 변화한다면 admittance의 기울기는 각기 다른 값을 나타내며, de-bonding 비율이 높을수록 즉 부착률이 떨어질수록 admittance는 Free-Free 상태와 가까운 값을 나타낸다.(Fig. 2)

2.1 온도변화의 영향

실제 환경에서 압전체 센서 자가진단을 실시할 경우 구조물이 노출되는 온도의 영향을 고려해야 하며, 일반적으로 압전체의 capacitive value는 온도가 상승함에 따라 점차적으로 증가한다고 알려져 있다.^(17,18)

본 연구에서는 28°C에서 110°C의 온도범위에서 admittance를 측정함으로써 온도 변화가 압전체 센서 자가 진단에 미치는 영향을 실험적으로 파악하였다.

Fig. 3과 같이 200x300x10(mm)의 알루미늄 plate에 총 22개의 PZT 센서(APC 850, disk type)를 부착하였으며, PZT 센서의 부착조건은 Full bonding, de-bonding 으로 분류하여 센서의 손상을 모사하였다. 실험은 상온(28°C)에서부터 110°C까지 Environmental chamber(SJ-TH-S50)를 이용하여 10°C 간격으로 온도를 조절하였다.

일반적으로 Admittance를 측정할 때에는 HP 4194A 와 같은 impedance analyzer를 사용하지만

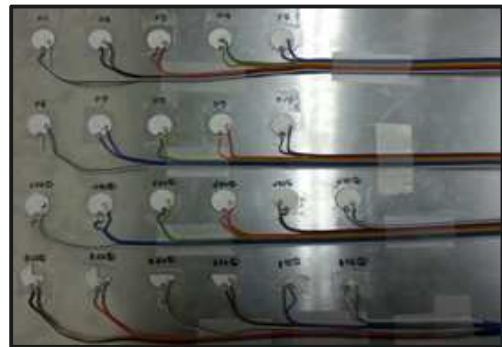


Fig. 3 Array of PZT sensors

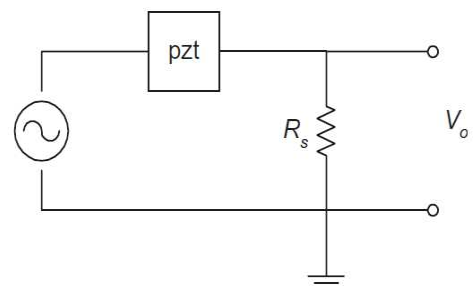


Fig. 4 Circuit of approximating PZT impedance

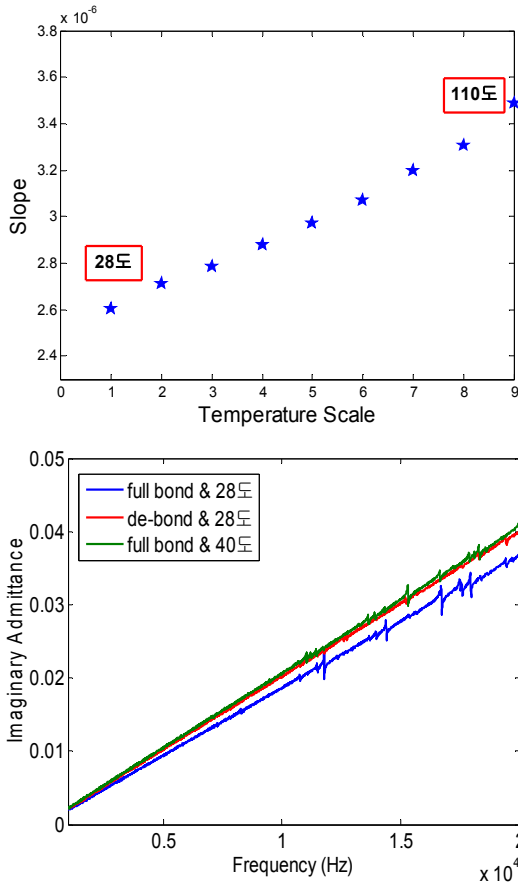


Fig. 5 Imaginary admittance and slope of PZT sensor under (a) free condition (b) full bond and de-bond

본 연구에서는 Fig. 4와 같이 보다 경제적이고 편리하게 사용가능한 impedance circuit을 구성하였다.⁽¹⁹⁾ 이를 Dynamic Signal Analyzer(NI USB 4431)에 연결한 후 0-20kHz의 주파수 범위에서 chirp 신호로 가진하고 그 응답을 측정하여 각 온도에 따른 admittance를 계산하였다.

Fig. 5(a)는 Free-Free PZT 센서의 온도에 따른 Admittance 기울기 변화를 나타낸다. 상온(28°C)에서는 가장 작은 기울기 값을 나타냈으며, 온도가 증가함에 따라 단계적으로 기울기가 상승하는 결과를 보였다. 또한 온도가 10°C 증가함에 따라 admittance의 기울기는 약 5% 상승하였으며, 28°C에서 110°C의 전체적인 기울기 변화율은 약 42% 상승하는 결과를 나타냈다.

Fig. 5(b)는 특정 온도(28,40)에서 full bond, de-bond 센서의 imaginary admittance를 비교한 결과이다. full bond 센서의 경우, 28도에서 40도로 온도가 증가함에 따라 admittance가 상승하게 되고, 상승된 값은 28도의 de-bond 센서와 매우 흡

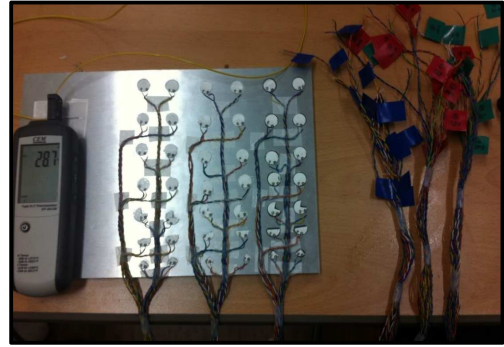


Fig. 6 Location of thermo couple and array of PZT sensors

사한 기울기로 약 1.2%의 차이만을 보였다.

Fig. 5(a),(b)의 결과는 PZT 센서의 admittance가 온도변화에 민감하며, 센서 자가 진단 결과에 주요한 영향을 줄을 의미한다. 따라서 센서 자가 진단 절차에서 admittance의 변화 발생 시 그 원인이 온도의 영향인지 혹은 센서의 결함인지 정확히 구별할 수 있어야 한다.

2.2 접착제의 영향

본 연구에서는 온도변화뿐만 아니라 PZT 센서와 주구조물 부착에 사용된 접착제의 electrical admittance에 대한 영향을 파악하기 위하여 실험을 실시하였다.

Fig. 6은 접착제의 영향을 파악하기 위하여 PZT 센서를 주구조물에 부착한 모습을 나타낸 것으로, 200x300x10(mm)의 알루미늄 plate에 총 42개의 PZT 센서(APC 850, disk type)를 부착하였다. PZT 센서 부착에 사용된 접착제는 Emer's glue와 순간접착제 Axia025, 다양한 용도로 이용되는 JB weld epoxy를 사용하였다. 실험은 상온(28°C)에서부터 110°C까지 Environmental chamber(SJ-TH-S50)를 이용해 실시되었으며, 이때 10°C 간격으로 0-20 Khz에서 Admittance를 측정하였다.

2.2.1 온도변화와 접착제의 상관관계

Fig. 7은 상온(28°C)에서 10°C 간격으로 온도가 상승할 때의 admittance를 나타내며, 사용된 접착제에 따른 admittance의 기울기가 비교되어 있다.

앞선 2.1절의 결과와 같이, 온도가 증가함에 따라 전반적으로 admittance가 증가하는 결과를 보인 반면 사용된 접착제에 따라 admittance 기울기의 증가 비율은 각기 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 28°C에서 110°C까지 전체적인 admittance 기울기 변화율은 Table 1에 나타낸 바

Table 1 Slope change rate of three adhesive and Free-Free condition

	Free-Free	Axia 025	Emer's glue	JB weld
기울기 변화율 (28~110°C)	42%	48%	50%	63%

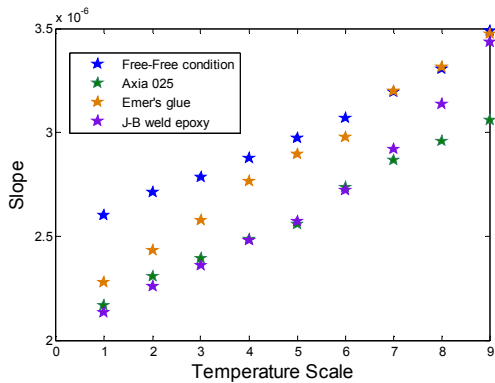


Fig. 7 Difference of admittance through each bonding agent

와 같이 Free-Free 42%, Axia025 48%, Emer's glue 50%, JB weld 63%로 사용된 접착제마다 온도에 따른 영향의 정도가 상이하게 나타남을 알 수 있다.

따라서 실제 구조물에 PZT 센서를 부착할 때는 온도 변화를 고려하여 접착제를 선택해야 하며, 보다 신뢰할 수 있는 센서 자가 진단을 위해서는 사용된 접착제의 영향을 고려한 후 센서의 상태를 진단할 필요가 있다.

2.2.2 센서 자가 진단법의 응용 - 접착성능 파악

Fig. 8은 full bonding 상태를 기준으로 3가지 접착제의 온도별 admittance를 나타낸다. Fig. 8의 결과는 앞선 2장의 Fig. 2에 나타난 바와 같이 접착의 정도가 높을수록 기울기가 낮아진다는 점을 토대로 분석가능하다.

Fig. 8(a)에서 기울기가 완만하게 나타난 JB weld는 상온(28°C)에서 가장 우수한 접착력을 나타내며, 뒤로는 super glue와 emer's glue 순으로 우수한 접착력을 갖는다.

반면 Fig 8(b)는 80°C에서 full bonding 상태를 기준으로 3가지 접착제의 admittance를 나타낸다. 상온에서 미세하게 순간접착제인 axia025보다 JB weld의 접착력이 우수하게 측정됐으나, 80°C에서는 JB weld 보다 axia025의 접착력이 나은 결과를

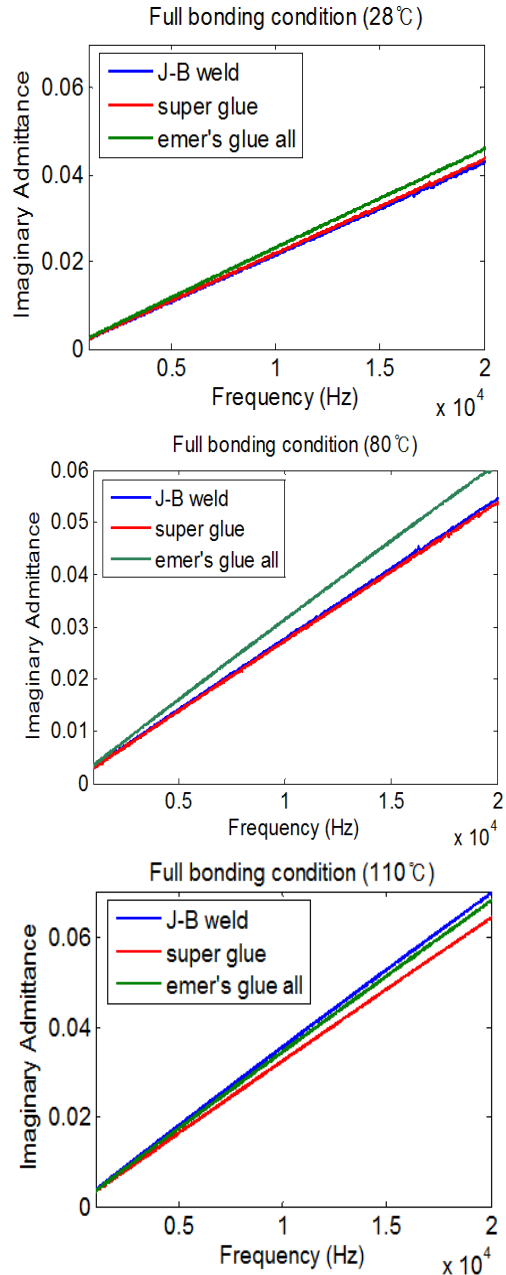


Fig. 8 bonding agent of full bonding condition at (a) room temperature and (b) 80°C (c) 110°C

보였다. 즉, 80°C를 기점으로 두 접착제의 기울기에 역전현상이 발생하였으며, 110°C에서는 현저한 접착력의 변화를 파악할 수 있다(Fig. 8(c)). 본 결과는 압전체의 온도변화에 대한 민감도는 접착제에 따라 상이하게 나타나며, 압전체만을 고려한 온도변화 영향 분석은 신뢰성에 한계가 있음을 의미한다. 따라서 센서 자가 진단 수행 시 사용된 접착제에 대한 온도변화율을 정확히 인지하고 있어야 한다. 또한 위의 결과를 통해 admittance를 기반으로 한 센서 자가 진단법은 센서의 결합

을 진단할 수 있을 뿐만 아니라 접착제의 성능 평가에 응용할 수 있음을 확인하였다.

3. 결론

본 논문에서는 구조건전성 모니터링에 사용되는 압전체의 admittance 기반 센서 자가진단에 대한 연구를 수행하였다.

온도 변화 실험(28°C~110°C)을 통하여 admittance의 온도 변화에 대한 민감도를 파악한 결과, APC850 PZT의 경우 free-free condition을 기준으로 온도가 10°C 상승함에 따라 admittance의 기울기는 약 5% 증가하였다. 본 실험에서는 PZT 센서의 admittance는 온도변화에 민감할 뿐만 아니라 사용된 접착제에 따라 admittance의 변화 정도가 상이함을 확인하였다. 따라서 접착제가 센서 자가 진단절차에 민감한 영향을 줄 수 있음을 실험적으로 검증하였다.

또한 본 연구에서는 admittance를 기반으로 한 센서 자가 진단법을 통하여 센서의 결함을 진단할 수 있을 뿐만 아니라 접착제의 성능 평가를 위한 용도로 응용가능 함을 확인하였다.

추후에는 실제 구조물에서 효과적으로 센서 자가 진단 절차를 수행하기 위하여 온도변화와 접합제의 영향으로부터 독립적인 센서 자가 진단법에 대한 추가 연구가 필요하다. 또한 정적하중이 임피던스 신호에 미치는 영향을 고려하고, 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).

참고문헌 (References)

- (1) Farrar, C. R. and Worden, K., 2006, "An Introduction to Structural Health Monitoring," *Mathematical Physical & Engineering Sciences*, pp. 303~315.
- (2) Park, G., Farrar, C. R., Lanza di Scalea, F. and Coccia, S., 2006, "Performance Assessment and Validation of Piezoelectric Active Sensors in Structural Health Monitoring," *Smart Materials and Structures*, 15(6), pp. 1673~1683.
- (3) Kerschen, G., De Boe, P., Golincal, J. and Worden, K., 2005, "Sensor Validation Using Principal Component Analysis," *Smart Materials and Structures*, 14, pp. 36~42.
- (4) Giurgiutiu, V., Zagari, A. N. and Bao, J. J., 2002, "Piezoelectric Wafer Embedded Active Sensors for Aging Aircraft Structural Health Monitoring," *Journal of Structural Health Monitoring*, 1, pp. 41~61.
- (5) 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 Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 13, pp. 389~396.
- (6) Park, G., Farrar, C. R., Rutherford, A. C. and Robertson, A. N., 2006, "Piezoelectric Active Sensor Self-Diagnostics Using Electrical Admittance Measurements," *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol.128, pp. 469~476.
- (7) Fabricio, G. B., Dannilo, E. B., Vinicius, A. D. and Jose, A. C. U., 2014 "An Experimental Study on the Effect of Temperature on Piezoelectric Sensors for Impedance-Based Structural Health Monitoring," *Sensors* 2014, 14(1), pp. 1208~1227.
- (8) Bhalla, S. and Moharana, S., 2013, "Modeling of Piezo-Bond Structure System for Structural Health Monitoring Using EMI Technique," *Key Engineering Materials*, Vol. 569-570.
- (9) Grisso, B. L. and Inman, D. J., 2010, "Temperature Corrected Sensor Diagnostics for Impedance-Based SHM," *Journal of Sound and Vibration*, Vol 329, pp. 2323~2336.
- (10) Park, S., Ahmad, S., Yun, C. B. and Rod, Y., 2006, "Multiple Crack Detection of Concrete Structures Using Impedance-based Structural Health Monitoring Techniques," *Society for Experimental Mechanics*, 46, pp. 609~618
- (11) Park, G., Shon, H., Farrar, C. R. and Inman, D. J., 2003, "Overview of Piezoelectric Impedance-Based Health Monitoring and Path Forward," *Shock Vibr Dig*, 35(6), pp. 451~463.

- (12) Sun, F. P., Chaudhry, Z., Liang, C. and Rogers, C. A., 1995, "Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor-Actuator," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 6, pp. 134~139.
- (13) Saint-Pierre, N., Jayet, Y., Perrissin-Fabert, I., and Baboux, J. C., 1996, "The Influence of Bonding Defects on the Electric Impedance of a Piezoelectric Embedded Element," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 29, pp. 2976~2982.
- (14) Bhalla, S. and Soh, S. K., 2004, "Electro-mechanical Impedance Modeling for Adhesively Bonded Piezo-Transducers," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 15, pp. 955~972.
- (15) Bhalla, S. and Moharana, S., 2013, "A Refined Shear Lag Model for Adhesively Bonded Piezo-Impedance Transducers," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 24, pp. 33~48.
- (16) Sirohi, J. and Chopra, I., 2000, "Fundamental Behavior of Piezoceramic Sheet Actuators," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 11, pp. 47~61.
- (17) Overly, R. G., Park, G. and Farinholt, K. M., 2009, "Piezoelectric Active-Sensor Diagnostics and Validation Using Instantaneous Baseline Data", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 9, pp. 1414~1421.
- (18) Baptista, F. G., Budoya, D. E., de Almeida, V. A. D. and Ulson, J. A. C., 2014, "An Experimental Study on the Effect of Temperature on Piezoelectric Sensors for Impedance-Based Structural Health Monitoring," *Sensors 2014*, 14, pp. 1208~1227.
- (19) Peairs, D. M., Park, G. and Inman, D. J., 2004, "Improving Accessibility of the Impedance-Based Structural Health Monitoring Method," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 15.