

Admittance를 기반으로 한 센서 자가 진단 알고리즘의 실험적 검증 – 상호비교를 통한 센서 결함 탐지

조혜진* · 정휘권* · 박통일* · 박규해*†

Validation of Piezoelectric Sensor Diagnostics Algorithm Using Instantaneous Baseline Data

HyeJin Jo*, Hwee Kwon Jung*, Tong il Park*, Gyuhae Park*†

ABSTRACT: In order to detect damage in early stages and properly maintaining structures, the structural health monitoring technology is employed. In most cases, active-sensing SHM needs many piezoelectric (PZT) sensors and actuators. Thus, if there is a defect on PZT used for active-sensing SHM, the structural status could be misclassified. This study, for reliable SHM performance, investigated to detect defects of sensors by using the admittance-based sensor diagnostics. This study also introduced an algorithm that can diagnose sensor defects based only on data measured from the sensors in case that information about the changes in adhesive and environmental investigation, this study confirms that the proposed algorithm could be efficiently applied to real-world structures in which a significant temperature variation could take place.

초 록: 구조건전성 모니터링은 구조물에 발생된 손상을 조기에 감지 및 적절한 유지보수를 통해 재정적 혹은 인명 피해를 방지하기 위해 실시된다. 대부분의 능동센싱 기반 구조건전성 모니터링에서는 많은 수의 압전체(piezoelectric transducer) 센서와 구동기(actuator)를 필요로 한다. 구조건전성 모니터링 시 사용된 압전센서에 결함이 존재하는 경우, 구조물의 상태진단에 문제가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 신뢰성 있는 구조건전성 모니터링 결과를 위해 임피던스 기반 센서 자가 진단법을 사용하여 다수 센서의 결함을 탐지하였다. 또한 사용된 접착제와 센서의 정보가 충분치 못한 경우, 사용된 센서로부터 측정된 데이터만을 토대로 센서결함 진단을 위한 알고리즘을 소개하였다. 알고리즘이 적용 가능한 온도 범위를 실험적으로 분석함으로써 개발된 기법이 실제 환경에서 응용이 가능함을 확인하였다.

Key Words: 센서자가 진단법(Sensor diagnostics), 임피던스(Impedance), 접착제(Adhesives), 압전소자(Piezoelectric transducer), 구조 건전성 모니터링(Structural Health Monitoring)

1. 서 론

구조건전성 모니터링(Structural Health Monitoring, SHM)은 항공기 또는 사회기반시설 등의 구조물 건전성을 실시간 감시하는 기술이다. 구조건전성 모니터링의 궁극적인

목적은 구조물의 안전성 향상 및 효율적인 유지보수이다 [1]. 구조건전성 모니터링 기법은 크게 수동탐지 기법과 능동탐지 기법으로 구성된다. 수동탐지 기법은 구조물에 센서만 부착하여 외부 하중이나 구조물의 상태에 따른 센서 신호를 실시간으로 측정하여 구조물의 손상상태를 예측하

Received 30 June 2015, received in revised form 27 August 2015, accepted 27 August 2015

*Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Korea

*†Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Korea, Corresponding author (E-mail: gpark@chonnam.ac.kr)

는 방법을 말한다. 반면 능동탐지 기법은 구조물에 장착된 구동기를 통해 구조물을 가진 뒤, 여러 곳에 분포되어 있는 센서들의 신호를 통해 구조물의 손상 여부를 탐지하는 방법이다[2]. 능동 탐지 기법을 통해 구조물의 손상 여부를 탐지하는 경우, 압전소자(Piezoelectric element, PZT)는 가진과 센싱이 모두 가능하며 타 센서에 비해 경제적이란 이점을 가지고 있기 때문에 활발하게 사용된다[3].

일반적으로 대형구조물의 안전성을 검증하는 경우, 많은 압전소자가 필요하며 실제 구조물에 부착되어 있는 센서는 온도, 날씨 등 다양한 외부 환경변화로부터 노출된다. 다양한 외부 영향인자로 인해 구조물에 부착된 센서는 파손되거나 접촉불량 혹은 PZT의 역학적·전기적 특성저하가 발생할 우려가 있다. 위와 같은 요인으로 인한 센서 오작동은 불안정하며 신뢰할 수 없는 구조건전성 모니터링의 결과를 유발한다[4]. 따라서 센서 자가 진단 절차를 통해 구조물에 부착되어 있는 센서의 실질적인 작동 상태를 확인하며, 사용하고자 하는 센서의 수명을 예측하고 센서의 교체 시기를 파악할 필요가 있다. 즉, 구조 건전성 모니터링을 통해 측정된 결과에 이상신호가 발생한 경우, 이상신호의 원인이 구조물의 손상 때문인지 혹은 센서 손상으로 인한 결과인지를 센서 자가 진단 절차를 통해 확실하게 구별할 필요가 있다.

구조물에 부착된 센서의 결함 탐지 및 수명예측을 위한 센서 자가 진단에 관한 연구는 전 세계적으로 활발하게 진행 중이다.

Lee와 Choi[5]는 유도초음파의 시간 역전 현상을 활용하여 센서의 접촉불량을 탐지하였으며, Giurgiutiu *et al.*[6]은 PZT 센서의 공진주파수 변화를 추적함으로써 센서의 파손을 탐지하는 기법을 제안하였다. 이 밖에도 Xu와 Liu[7], Fabricio *et al.*[8]은 센서 자가 진단 절차의 영향 요소 파악 및 공진주파수의 변화를 분석하여 센서의 손상을 탐지하는 연구를 수행하였다. 위와 같은 연구는 구조물에 손상이 없다는 가정 하에 실시되는 것으로, 구조물에 손상이 발생할 수 있는 실제 산업현장에 적용하기에는 한계점이 있다. 따라서 구조물의 손상 여부로부터 독립적으로 센서를 진단하기 위하여 Park *et al.*[9,10]은 임피던스를 기반으로 한 압전체 센서 자가 진단법을 제안하였다. 임피던스를 기반으로 한 압전체 센서 자가 진단법은 압전센서의 capacitive value 변화를 추적하여 센서에 발생된 결함이나 접촉층 파손을 감지하고, 최종적으로 센서의 손상과 구조물의 손상을 구별한다.

임피던스를 기반으로 하는 압전체 센서 자가 진단법을 실제 산업 현장에 적용하기 위해서 다양한 영향요소 파악이 요구된다. 이에 따라 임피던스의 변화를 야기하는 영향인자 파악과 관련된 연구는 다음과 같이 진행되었다. Bhalla와 Moharana[11]는 구조물과 PZT 센서 사이의 접합층을 모델링하여 임피던스와 접합층의 관계를 이론적으로 설명하

였으며, Jo *et al.*[12]은 사용된 접착제에 따른 임피던스의 변화 및 센서 자가 진단에 대한 실험적 검증을 실시하였다. Grisso와 Inman[13]은 구조물에 부착된 PZT 센서들의 위치에 따른 비고 및 온도의 영향을 고려하여 센서의 결함을 탐지하는 연구를 수행하였다. 위와 같은 연구들은 센서 자가 진단을 실시할 때 온도, 접착제 등의 영향요소를 반드시 고려해야 함을 의미한다. 또한 기존 보유 중인 데이터를 참고하여 센서의 상태를 진단할 경우 사용된 접착제 및 온도환경에 유의해야 한다. 반면, 기존에 보유하고 있는 데이터에 사용된 접착제나 측정된 온도 등의 정보가 불충분한 경우, 참고 데이터 없이 사용된 센서들의 결과를 통한 센서상태진단이 필요하다.

Overly *et al.*[14]은 참고데이터 없이 사용된 센서에서 측정된 어드미턴스의 상호비교를 통해 센서상태를 진단하는 알고리즘을 제안하였다. 상호비교를 통한 센서 자가진단 알고리즘은 이론적으로 제안되었으나, 실험을 통한 검증사례는 미미하다. 따라서 본 연구에서는 상호비교를 통한 센서 자가 진단 알고리즘을 실험적으로 검증하고 다양한 온도조건에서 적용함으로써 실제 산업 현장에서의 적용가능성을 증진시키고자 한다.

2. 압전체 센서자가 진단법

2.1 어드미턴스 기반 센서자가 진단

압전체는 전기적 에너지를 기계적 에너지로 또는 기계적 에너지를 전기적 에너지로 상호변환이 가능한 소자이다. 이러한 압전체의 전기역학적 임피던스를 계측하고, 계측된 임피던스 신호의 변화를 관찰함으로써 구조물의 상태를 실시간으로 진단할 수 있다[15,16].

$$Y(\omega) = i\omega \frac{(\omega l)}{t_c} (\epsilon_{33}^T (1-\delta)) - d_{31}^2 Y_p^E + \frac{Z_a(\omega)}{Z_a(\omega) + Z_s(\omega)} d_{33}^2 Y_p^{\lambda E} \left(\frac{\text{tank}l}{kl} \right) \quad (1)$$

식 (1)은 압전소자가 구조물에 완전히 부착되었을 때 전기적 어드미턴스의 허수부분을 나타낸다[17]. 전기적 어드미턴스의 허수부분인 $Y(\omega)$ 는 압전소자 패치의 너비 ω , 길이 l , 두께 t_c 등의 기하학적 상수와 압전소자 패치의 유전체 상수 및 유전체 손실계수인 전기적 속성 (ϵ_{33}^T , δ)의 함수로 이루어진다. 이때 Z_a 와 Z_s 는 압전체와 구조물의 역학적 임피던스이며, Y_p^E 는 압전체의 복합 탄성계수를 나타낸다.

Park *et al.*[9]은 식(1)의 값인 압전체의 전기적 어드미턴스의 허수부분인 $Y(\omega)$ 의 변화를 추적하여 센서의 결함을 진단하는 방법을 제안하였다. 압전체의 파손은 기하학적 상수의 변화를 야기하며, 최종적으로 어드미턴스의 변화를 발생시킨다. 따라서 어드미턴스 변화를 추적함으로써 센서의 파손 여부파악이 가능하다[17].

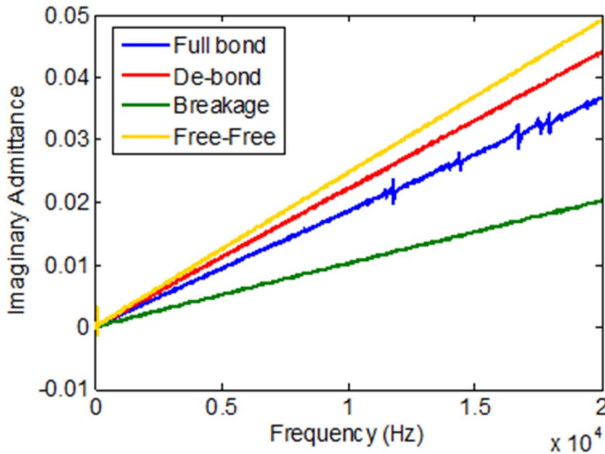


Fig. 1. Slope change of the imaginary admittance with sensor conditions

한편, 압전체가 구조물에 부착되지 않은 상태일 때의 전기적 어드미턴스는 아래의 식 (2)와 같이 나타낸다.

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

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

압전체가 구조물에 완전히 부착될 경우, 전기적 어드미턴스는 식(1)과 같이 나타낼 수 있을 뿐만 아니라 압전소자의 역학적 임피던스에 비하여 구조물의 역학적 임피던스가 매우 크다는 가정 하에 식 (3)과 같이 표현된다. 식 (3)은 압전소자가 구조물에 부착되지 않은 상태일 때의 어드미턴스인 식 (2)에서 접착 층의 영향 값을 뺀 것으로 나타낸다.

즉, 구조물에 부착된 센서의 접착 상태에 따라 접착층의

영향 값인 $i\omega \frac{\omega l}{t_c} (d_{31}^2 Y_p^E)$ 은 변화하게 되며, 최종적으로 Fig. 1

과 같이 어드미턴스의 변화가 야기된다[18]. 따라서 전기적 어드미턴스인 $Y(\omega)$ 의 변화를 추적함으로써 센서의 파손이나 혹은 센서 접착불량을 탐지할 수 있다.

2.2 상호비교를 통한 센서진단 알고리즘

기준에 보유하고 있는 데이터, 즉 기준 데이터를 토대로 새롭게 측정된 어드미턴스와의 비교를 통해 센서를 진단할 때, 손상이 있을 경우 Fig. 2와 같이 손상된 센서의 어드미턴스가 증가하여 기존 정상센서들에 비해 다른 어드미턴스 값을 갖게 된다. 이러한 현상을 통해 상호비교를 통한 센서상태진단이 가능하다. 하지만 상호비교를 통한 센서진단 시, 기준 데이터 즉, 정상센서 데이터에 대한 명확한

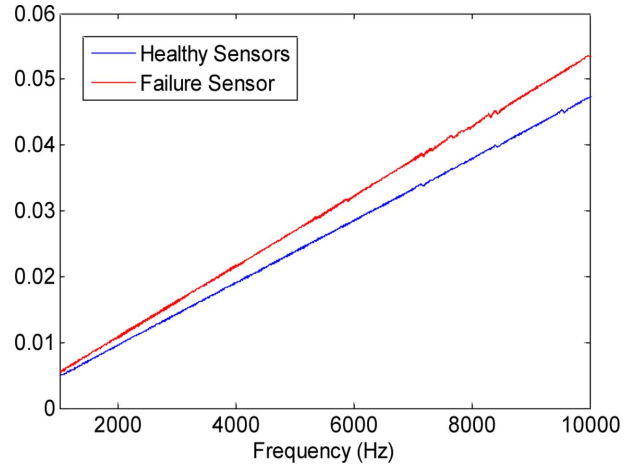


Fig. 2. Imaginary admittance of healthy sensors and failure sensor

이해가 필요하다. 반면 기준 데이터의 측정 온도 및 사용된 접착제 등과 같은 정보가 불충분한 경우에는 새롭게 측정된 어드미턴스와의 비교를 신뢰할 수 없게 된다. 이와 같은 한계점을 극복하기 위하여 Overly *et al.*[14]은 참고·기준 데이터 없이 센서들의 어드미턴스를 상호 비교하여 결함을 탐지하는 알고리즘을 제안하였다.

상호비교를 통해 센서의 결함을 탐지하는 알고리즘은 구조물에 부착된 전체 센서군 중 소수 센서에만 결함이 존재함을 가정한다. 따라서 센서 진단 시 기준 데이터를 요구하지 않으며, 온도 변화 혹은 접착제 종류에 민감하게 반응하지 않는다.

상호비교를 통한 센서 자가 진단 알고리즘의 절차는 아래와 같다.

- ① 구조물에 부착된 압전체 센서의 어드미턴스 측정
- ② 측정된 어드미턴스의 표준편차 계산

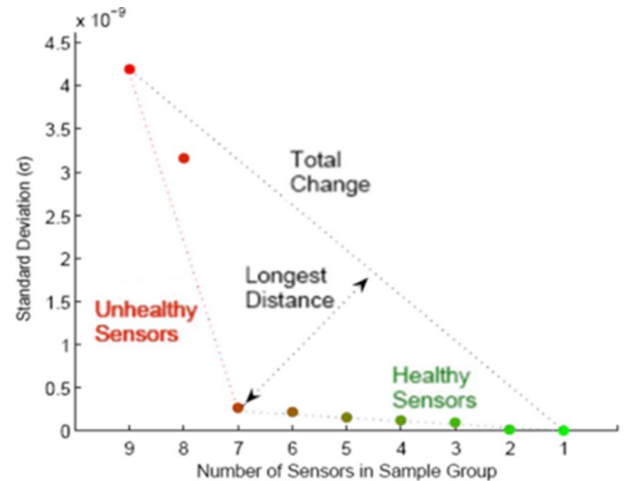


Fig. 3. Longest distance from the overall change corresponds to the change from unhealthy to healthy patches [14]

- ③ 표준편차에 가장 많은 영향을 주는 센서 제거
- ④ 1개의 센서가 남을 때까지 ②~③ 과정 반복
- ⑤ 최종 변화로부터 가장 멀리 위치한 센서를 기준으로 센서의 상태 파악

여기서 Fig. 3은 과정 ②와 같이 구조물에 부착된 압전체 센서들의 표준편차를 보여준다. 타 센서들(1~7)에 비해 센서 8,9번은 상대적으로 높은 표준편차를 보이기 때문에 과정 ③을 거치면서 제거된다.

한편, 상호비교를 통한 센서 자가 진단 알고리즘은 아래와 같은 조건이 충족되어야 성공적인 센서 결함 탐지가 가능하다.

- 동일한 재료 및 규격을 갖는 압전소자
- 동일한 구조물
- 동일한 실험환경에서 실험 진행
- 정상 센서의 비율이 전체 센서의 1/2 이상

3. 실험적 검증

3.1 동일한 온도조건에서의 센서 자가진단

본 연구에서는 상호 비교를 통한 센서 자가 진단 알고리즘의 적용 가능성을 검증하기 위해 센서가 모두 동일한 온도인 경우에 대한 실험적 검증을 실시하였다.

실험은 Fig. 4와 같이 200 × 300 × 10(mm)의 알루미늄 plate에 총 17개의 압전체 센서(APC 850, disk type)를 내열성 순간접착제(Axia431)를 통해 부착하였으며, PZT 센서의 부착 조건은 완전접착(full-bonding), 접착불량(de-bonding), 센서 파손(breakage)로 분류하여 센서의 손상을 모사하였다. 구조물에 부착된 모든 센서가 동일한 온도일 경우의 어드미턴스를 측정하기 위하여 실험은 온도조절 챔버(SJ_TH_S50)를 통해 28°C에서 60°C의 온도범위에서 10°C 간격으로 온도조절을 하며 진행되었다.

일반적으로 어드미턴스를 측정할 때에는 HP 4194A 와 같은 임피던스 측정기를 사용하지만 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 보다 경제적이고 사용이 편리한 임피던스 측정 씨킷

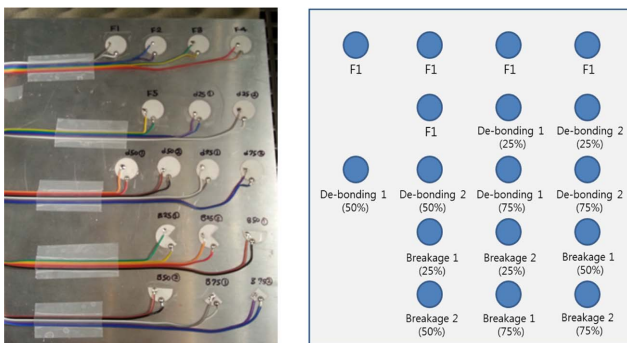


Fig. 4. Array of PZT sensors

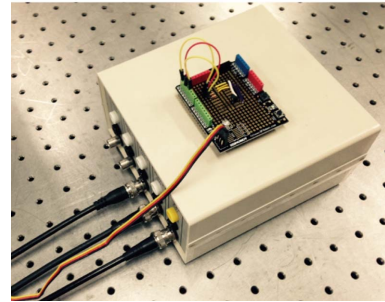
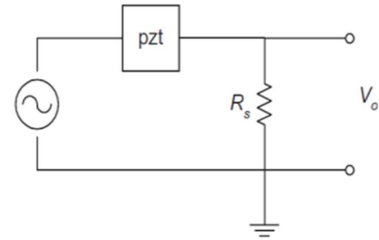


Fig. 5. Circuit of approximating PZT impedance

을 제작하였다[19]. 이를 DAQ장비(NI USB 4431)에 연결하고 0-20 kHz의 주파수 범위의 chirp 신호 생성하였다. 이후 가진에 따른 센서의 응답을 측정하여 각 온도에 따른 어드미턴스를 계산하였다.

각 온도에서 상호비교를 통한 센서 자가 진단 알고리즘을 적용시킨 결과가 Fig. 6에 표현되었다. 여기서 각 (a)와 (b)에서 2개의 그림을 볼 수 있는데, x축은 모두 센서번호를 뜻한다. 또한 위 그림의 y축은 센서 당 측정된 어드미턴스값의 표준편차를 뜻하며, 아래 그림의 y축은 센서 당 측정된 편차백분율을 뜻한다. 편차백분율의 크기 및 부호에 따라 정상센서의 어드미턴스 기울기에 비해 이상센서의 어드미턴스 기울기의 차이 및 차이 방향을 알 수 있다. 정상 및 손상 센서를 포함한 모든 센서의 온도가 28°C일 경우, 모든 센서의 상태를 정확하게 탐지하였다. 또한 모든 센서가 60°C인 경우에도, 각 센서의 결함이 정확하게 진단 가능하였다. 온도변화에 따른 실험결과를 통해 센서 간 온도편차가 작은 경우, 개발된 센서 자가진단 알고리즘의 실제 적용이 가능함을 확인하였다.

3.2 각기 다른 온도를 갖는 센서의 결함탐지

일반적으로 산업 현장의 구조물이나 혹은 대형 구조물에 부착된 센서의 경우, 센서 간 온도편차가 존재한다. 본 논문에서는 구조물에 부착된 센서의 위치에 따라 미세한 온도차이가 존재할 경우, 상호비교를 통한 센서 자가 진단 알고리즘의 적용 가능 여부를 실험적으로 검증하였다.

실험은 앞선 3.1절과 동일하게 진행되었으며, 20°C에서 40°C의 온도 범위에서 센서 및 온도를 무작위로 선정한 후 상호비교를 통한 센서 자가 진단 알고리즘에 적용하였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 무작위로 선정된 센서 및 온도에 상호비교를 통한 알고리즘을 적용한 결과를 나타낸다. Fig. 7에서

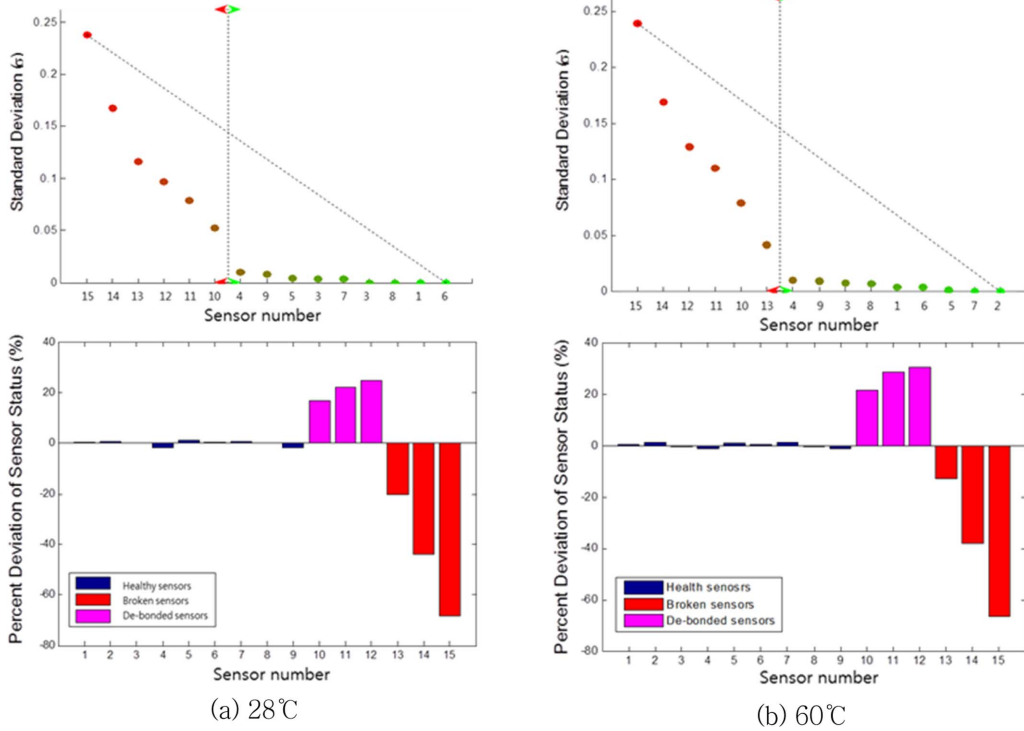


Fig. 6. Sensor diagnostic process applied to aluminum plate at each temperature

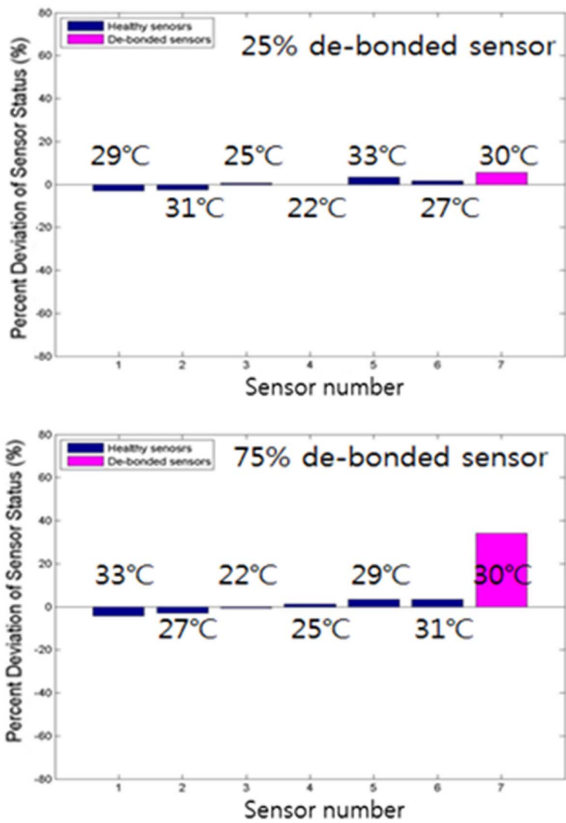


Fig. 7. Sensor diagnostics with mixed temperature gradient de-bonding sensors

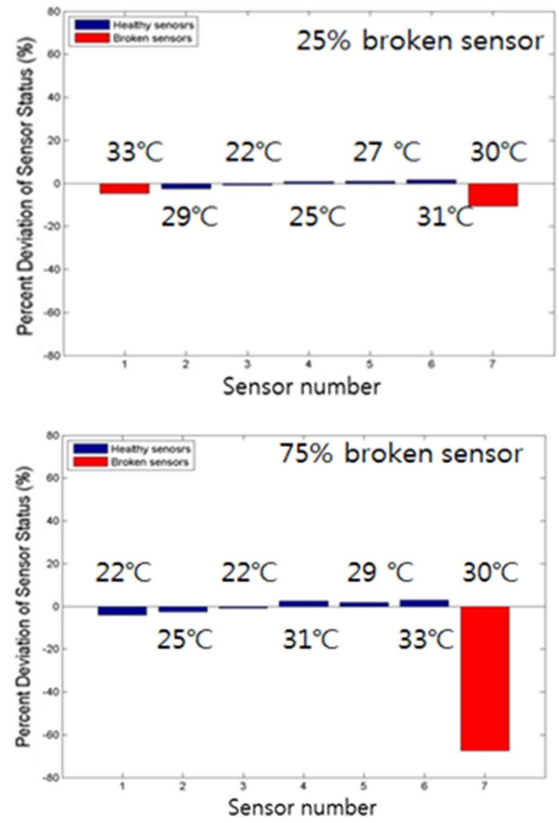


Fig. 8. Sensor diagnostics with mixed temperature gradient broken sensors de-bonding sensors

와 같이 구조물과 센서간 접촉 면 불량이 25%인(de-bodning 25%) 센서가 포함된 경우 효과적으로 센서의 결함을 진단할 수 있었으며, 마찬가지로 75% 접촉이 분리된 센서가 포함된 경우 또한 정상 센서와 비 정상 센서를 정확하게 진단하는 결과를 보였다.

반면, Fig. 8과 같이 25% 파손된 센서가 포함된 경우, 33°C의 정상센서를 파손된 센서로 오판하였으나 75% 파손된 센서가 포함된 센서 군에서는 센서의 상태를 모두 정확하게 진단하였다. 최종적으로 20~40°C 내에서 무작위로 선정된 다양한 센서 군에 상호비교를 통한 알고리즘을 적용한 결과, 약 98%로의 비율로 센서의 결함을 탐지하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 구조건전성 모니터링에 사용되는 압전체의 어드미턴스 기반 센서 자가진단의 현장적용 가능성에 대한 연구를 수행하였다.

센서 자가 진단 절차에서 기준데이터의 측정온도 및 사용된 접착제 등과 같은 정보가 불충분한 경우나 혹은 기준데이터가 존재하지 않는 경우, 센서 간 측정된 값을 통해 결함여부를 판단해야 한다. 본 연구에서는 이와 같은 상호비교를 통한 센서 자가 진단 알고리즘을 다양한 온도조건에서 실험을 진행하였다.

모든 센서가 동일한 온도를 유지하는 경우, 상호 비교를 통한 센서 자가 진단 알고리즘은 28~60°C의 온도 범위 내에서 효과적으로 사용가능 함을 확인하였다. 하지만 일반적으로 실제 산업 구조물에 부착된 모든 센서를 동일한 온도 상에 존재하지 않기 때문에 20~40°C 내에서 무작위로 선정된 센서 군에 대하여 상호비교를 통한 센서 자가 진단 알고리즘을 적용하였으며, 그 결과 약 98%의 정확도를 보였다.

상호 비교를 통한 센서 자가 진단 절차에 대한 실험적 검증을 통해 실제 산업 현장에서의 적용가능성을 향상시켰으며, 추후 다양한 분야에 확대 적용을 위해 극저온 환경을 고려한 연구가 필요하다. 또한 센서의 결함을 효과적으로 탐지 가능한 새로운 알고리즘에 대한 연구가 필요하다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 과학기술국제화사업 연구임(2011-0030065).

REFERENCES

1. Farrar, C.R. and Worden, K., "An Introduction to Structural Health Monitoring", *Mathematical Physical & Engineering Sciences*, Vol. 365, 2007, pp 303-315.
2. Kim, I.G., Lee, H.J., Kim, J.Y. et al., "Structural Health and Usage Monitoring System(HUMS) - Recent Advances", *The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 2003, pp. 943-950.
3. Park, G., Farrar, C.R., Lanza di Scalea et al., "Performance Assessment and Validation of Piezoelectric Active Sensors in Structural Health Monitoring", *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, No. 6, 2006, pp. 1673-1683.
4. Kerschen, G., De Boe, P., Golincal, J. et al., "Sensor Validation Using Principal Component Analysis", *Smart Materials and Structures*, Vol. 14, 2005, pp. 36-42.
5. Lee, U.S. and Choi, J.S., "Structural Damage Method by Using the Time-reversal Property of Guided Waves", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 27, No. 6, 2010, pp. 66-74.
6. Giurgiutiu, V., Zagrai, A.N., and Bao, J.J., "Piezoelectric Wafer Embedded Active Sensors for Aging Aircraft Structural Health Monitoring", *Journal of Structural Health Monitoring*, Vol. 1, 2012, pp. 41-61.
7. Xu, Y.G. and Liu, G.T., "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, 2002, pp. 389-396.
8. Fabrico, G.B., Dannilo, E.B., Vincius, A.D. et al., "An Experimental Study on the Effect of Temperature on Piezoelectric Sensors for Impedance-based Structural Health Monitoring", *Sensors*, Vol. 14, No. 1, 2014, pp. 1208-1227.
9. Park, G., Farrar, C.R., Rutherford, A.C. et al., "Piezoelectric Active Sensor Self-diagnostics Using Electrical Admittance Measurements", *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 128, 2006, pp. 469-476.
10. Park, G., Farrar, C.R. et al., "Performance Assessment and Validation of Piezoelectric Active Sensors in Structural Health Monitoring", *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, No. 6, 2006, pp. 1673-1683.
11. Bhalla, S. and Moharana, S., "Modeling of Piezo-bond Structure System for Structural Health Monitoring Using EMI Technique", *Key Engineering Materials*, 2013, pp. 569-570.
12. Jo, H.J., Park, T., and Park, G., "The Effect of Temperature Variations and Bonding Agents on Piezoelectric Sensor Diagnostics", *The Korean Society for Noise and Vibration Engineering* 2013, Vol. 10, 2013, pp. 779-804.
13. Grisso, B.L. and Inman, D.J., "Temperature Corrected Sensor Diagnostics for Impedance Based SHM", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, 2010, pp. 2323-2336.
14. Overly, T.G., Park, G., Farinholt, K.M. et al., "Piezoelectric Active-sensor Diagnostics and Validation Using Instantaneous Baseline Data", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 9, 2009, pp. 1414-1421.
15. Park, S., Ahmad, S., Yun, C.B. et al., "Multiple Crack Detection of Concrete Structures Using Impedance Based Structural Health Monitoring Techniques", *Society for experimental mechanics*, Vol. 46, 2006, pp. 609-618.
16. Park, S., Shon, H., Farrar, C.R. et al., "Overview of Piezoelectric Impedance Based Health Monitoring and Path Forward", *Shock*

- and Vibration Digest*, Vol. 35, 2003, pp. 451-463.
17. Sun, F.P., Chaudhry, Z., Liang, C. *et al.*, "Truss Structure Integrity Identification Using pzt Sensor-actuator", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 6, 1995, pp. 134-139.
 18. Sirohi, J. and Chopra, I., "Fundamental behavior of Piezoceramic Sheet Actuators", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 11, 2000, pp. 47-61.
 19. Peairs, D.M., Park, G., and Inman, D.J., "Improving Accessibility of the Impedance-based Structural Health Monitoring Method", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 15, 2004, pp. 129-139.