



압전소자 기반 구조 건전성 모니터링 분야 현황

정휘권, 박규해*
(전남대학교 기계공학부)

1. 머리말

구조 건전성 모니터링은 다양한 센서 시스템 및 데이터 측정장비를 통해 구조물의 동적신호를 획득하고 이를 다양한 신호처리를 통해 구조물의 상태를 모니터링하는 기술이다. 기존 구조물 정비는 시간에 기반한 정비로 비효율적인 반면, 이 기술은 구조물 상태에 기반하여 정비를 수행하기 때문에 효율적 기기 운영 및 정비비용 절감이 가능하다. 이 글에서는 이러한 구조물 건전성 모니터링 중 한 분야인 압전소자 및 능동센싱에 기반한 구조 건전성 모니터링 분야에서 논의되는 연구 및 기술현황을 소개하여, 국내 관련 산업 및 연구계의 관심을 유도하고 적극적인 연구를 활성화하고자 한다.

2. 압전소자 기반 구조 건전성 모니터링 분야 현황

압전체는 구조 건전성 모니터링에 보편적으로 사용되는 소자이다. 이 소자는 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변화시킬 수 있으며 역으로 전기적 에너지를 가할 시 기계적 변형을 일으키는 특성을 보유하기 때문에 능동센싱 기반 구조 건전성 모니터링 분야에서 센서 및 구동기(actuator)로 사용된다. 압전소자는 위와 같이 센

서 및 구동기로 사용되기에 적합하지만 취성 성질이 강하며 구조물의 다양한 표면 형상에 맞춰 제작이 어렵기 때문에 주로 디스크나 평판형상을 지닌 제품들이 개발되었으나 유연성을 갖춘 압전소자 제품 또한 개발되었다. MFC(macro-fiber composites)와 AFC(active-fiber composites)이 그 예이다. 이러한 제품들은 실리콘이나 섬유재와 같은 유연한 재질에 압전체 분말을 첨가 후 분극화 작업을 통해 제작된다⁽¹⁾.

압전소자 기반 구조 건전성 모니터링에서는 주로 전기역학적 임피던스(electro-mechanical impedance)와 램파(Lamb wave)가 많이 쓰이며 구조물에 발생하는 손상탐지 및 위치추정을 위해 다양한 신호처리 기법이 사용한다. 먼저 임피던스 기법은 그림 2와 같이 압전소자가 구조물에 부착되었을 경우 소자의 전기적 임피던스와 구조물의 기계적 임피던스가 서로 연관되는 원리를 사용하며, 구조물 상태를 모니터링하기 위해 압전소자의 전기적 임피던스를 측정 및 비교한다⁽²⁻⁴⁾. 이 방법은 저전력을 요구하며, 사용한 손상 위치 추정 및 센서 자가진단이 가능하다는 장점이 있다.

램파는 초음파 탄성파의 일종으로, 신호의 급격한 감쇠없이 평판이나 셸의 내부에 따라 원거리까지 전파되는 특성으로 결함탐지에 압전체와 많은 신호처리 기법과 함께 연구결과가 보고되

* E-mail : gpark@jnu.ac.kr

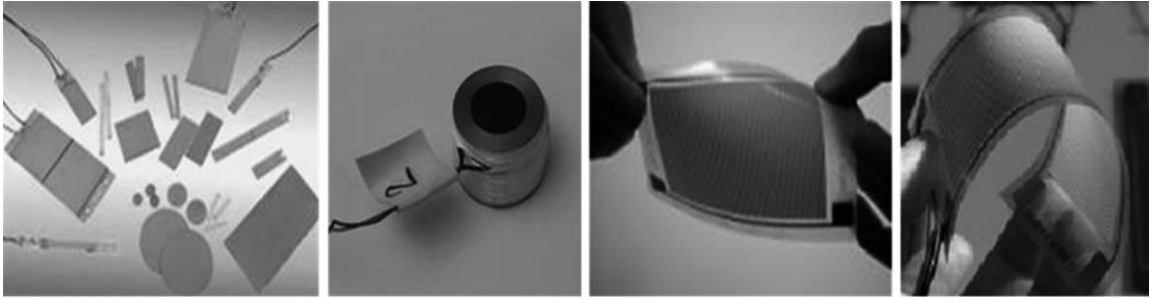


그림 1 다양한 압전소자 제품

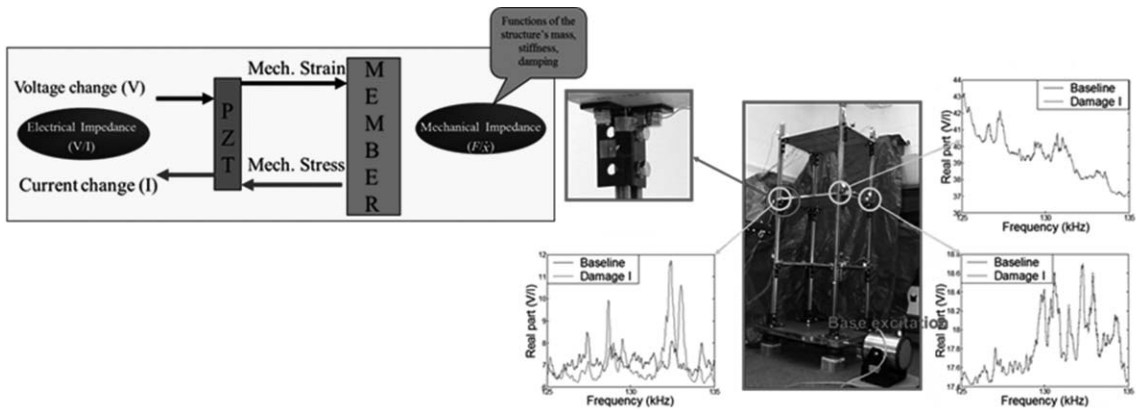


그림 2 임피던스 기법의 원리 및 적용 사례

고 있다⁶⁾. 램파를 이용한 결함탐지는 여러 신호 특징을 사용하는데, 먼저 램파의 변형 및 왜곡을 이용하는 방법이 있다. 주로 구동기로 가진하여 유도초음파를 생성한 뒤 이를 다른 위치에 부착된 센서를 통해 측정한다. 구동기와 센서 간 직선 구간에서 손상이 발생할 경우 신호의 감쇠특성 및 형상이 변화하는 원리가 사용되며, 손상탐지를 위해 주로 측정된 신호의 웨이브렛 계수와 주파수 스펙트럼을 손상에 민감한 신호특징으로 사용한다⁶⁾. 이 방법은 신호처리가 직관적이고 간단하며 비등방성 구조물 및 다양한 웨이브가 섞인 상황에서도 높은 정확성을 보유했다. 또한 손상이 자주 발생할 것으로 예상되는 위치에 효과적이라는 장점이 있다.

그 외에는 웨이브가 전파 중 장애물 등에 도달 시 반사파가 발생하는 현상을 사용하며, 손상으로부터 반사 및 산란되는 웨이브의 정보를 손상탐지 및 위치 추정에 사용한다. 손상으로부터 발생하는 웨이브는 구조물에 손상이 없는 경우 측

정된 기저신호와 손상 발생 시 측정된 테스트 신호의 차이를 통해 도출된다. 다수 센서와 손상 및 산란파가 도달하는 시점(TOF: time of flight)이나 센서 신호 간 도달시간 차이(TDOA: time difference of arrival)를 사용하는 경우, 손상위치 추정이 가능하다⁷⁾. 또한 손상정도가 심해질수록 손상으로 부터 발생하는 웨이브의 크기가 증가하기 때문에 이를 통한 손상정도 평가도 가능하다. 이 방법은 적은수의 센서로도 손상 위치추정을 수행할 수 있기 때문에 소수 센서만으로도 넓은 면적을 지닌 구조물의 건전성 모니터링이 가능하다는 장점이 있다. 특히 금속 구조물의 경우 신호감쇠 특성보다 산란 및 반사파 특성이 손상에 더 민감하기 때문에 금속 구조물의 건전성 모니터링에 주로 사용된다.

산란파의 SNR(signal to noise ratio)를 향상하기 위하여 위상배열기법(phase array)이 다수 센서 또는 구동기로 이루어진 소자배열과 함께 사용한다. 예를 들어 다수 구동기가 일렬로 배치되었

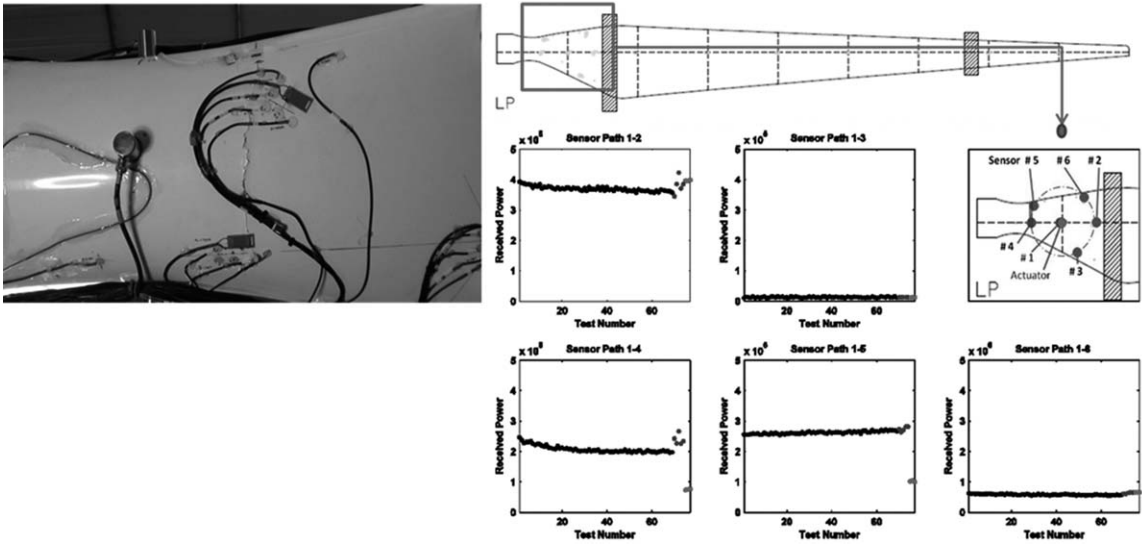


그림 3 Pitch-catch 기법 및 맵핑을 통한 손상 위치추정 적용 사례

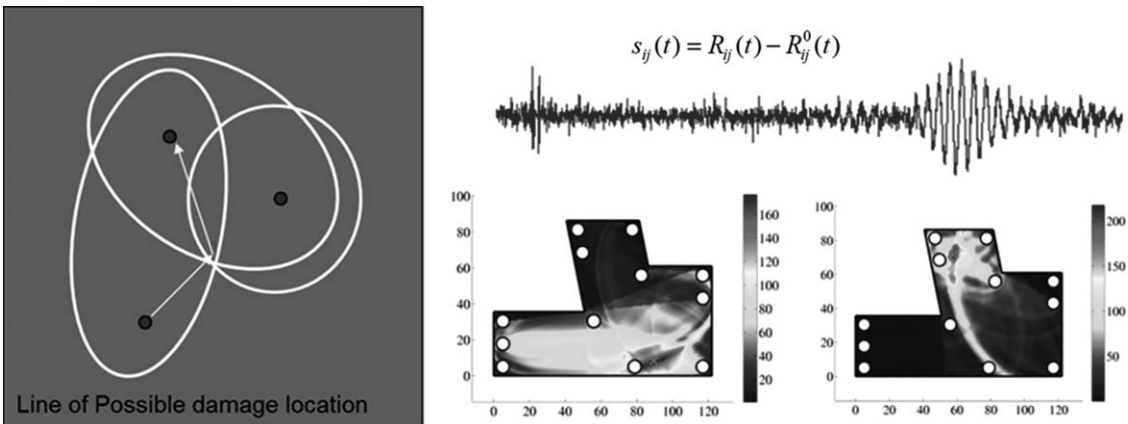


그림 4 Pulse-echo 기법을 통한 손상 위치추정 적용 사례

을 때, 각 구동기 간 가진 시점을 규칙적으로 지연시켜 웨이브를 생성하면 특정 방향성을 가진 웨이브가 생성된다. 반대로 센서군에서 측정된 신호의 재배열을 통한 신호증폭 결과를 비교함으로써 웨이브가 도달한 각도를 추정할 수 있다⁸⁾. 이 방법은 신호의 재배열 및 증폭 과정을 통해 SNR를 향상시킬 수 있으며 손상위치 추정을 위해 산란과 추적 기법과 결합하여 사용된다.

마지막으로 time reversal 기법은 공간적 회귀 이론(the principle of spatial reciprocity)에 기초한다. 즉, 생성된 웨이브의 분산, 산란 및 선형적 감쇠와 재료의 비등방성 성질에 관계없이 생성된 웨

이브는 공간상 회귀가 가능하다. 하지만 손상과 같은 비선형적 요인이 포함된 경우 웨이브는 더 이상 공간상 회귀 이론을 따르지 않는데 time reversal 기법에서는 이러한 현상을 통해 손상을 탐지한다⁹⁾. 구체적인 예로 그림 6처럼 한 개 파원과 몇 개의 센서가 설치되어 있을 때, 파원으로부터 생성되는 웨이브 신호는 각 센서로부터 측정된다. 이후 센서를 구동기로 사용하여 측정된 신호를 역 시간방향으로 가진하면 각 구동기로부터 생성된 웨이브는 원 파원에 집중된다. 위 과정을 통해 충격 또는 손상에 의한 음향방출이 발생한 경우 파원위치 추정이 가능하며 또한 웨이브

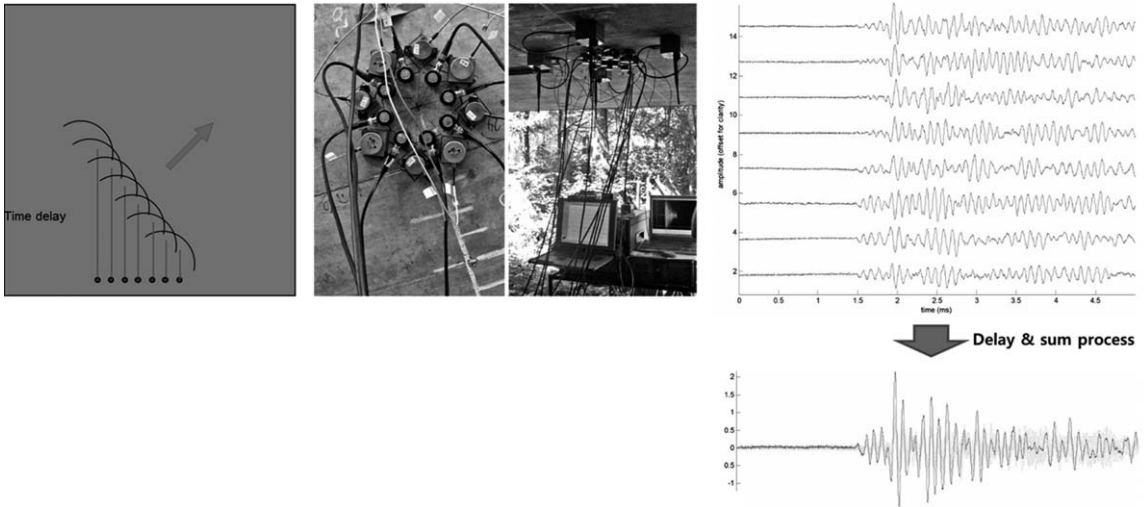


그림 5 Phase array 기법의 원리 및 적용 사례

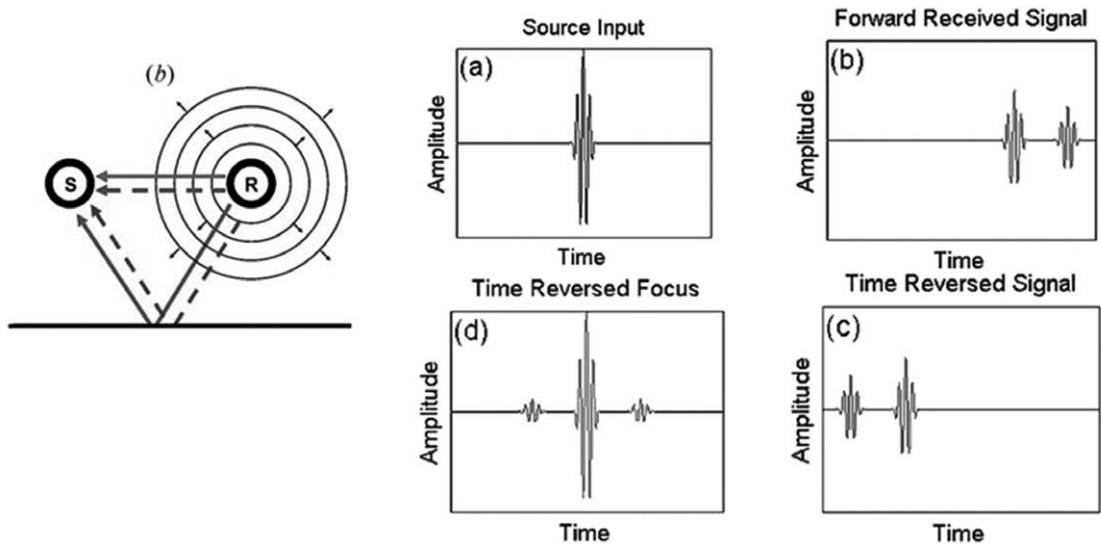


그림 6 Time reversal 기법을 통한 파원위치 추정 원리

의 공간상 회귀 여부를 통해 손상발생 여부를 탐지할 수 있다.

한편, 실제 구조물에 부착된 센서를 고려할 때, 센서는 다양한 환경적 요인에 노출되어 있다. 특히 항공기, 우주기기, 연료탱크 등과 같이 극한환경에 장시간 센서가 노출되는 경우 센서의 파손 및 결함이 발생할 수 있다. 이러한 이유로 센서 상태에 이상이 생긴 경우, 구조 건전성 모니터링 결과의 신뢰성에 문제를 야기할 수 있기 때문에 센서 자가진단 기법 및 절차에 대한 연구도 국내·외

에 활발하게 진행되는 추세이다. 이 기술현황 보고서에는 어드미턴스를 기반으로 한 압전체 센서 자가진단 기법을 소개하고자 한다. 구조물 상태가 정상이고 압전센서가 구조물에 완벽히 부착되었을 때, 전기적 임피던스는 압전센서의 기하학적 상수와 전기적 속성의 함수로 이루어진다. 여기서 센서의 손상은 압전체의 기하학적 상수 및 전기적 특성 값을 변화시키고 이는 어드미턴스의 기울기 변화를 야기한다. 따라서 센서의 부착상태 및 파손여부는 전기적 어드미턴스의

- Electrical admittance of a PZT bonded to a structure (Sun, et al 1996)

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

Geometry constants PZT's electrical and mechanical properties

- Electrical admittance of a free-free PZT
- $$Y_{free}(\omega) = i\omega \frac{wl}{t_c} \epsilon_{33}^T (1-i\delta)$$
- Electrical admittance of a PZT bonded to a structure
- $$Y(\omega) = i\omega \frac{wl}{t_c} \left(\epsilon_{33}^T (1-i\delta) - d_{31}^2 Y_p^E + \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{31}^2 \hat{Y}^E \left(\frac{\tan kl}{kl} \right) \right)$$
- The effect of bonding on the electrical admittance ($Z_a(\omega) \gg Z_s(\omega)$)
- $$Y(\omega) = i\omega \frac{wl}{t_c} \left(\epsilon_{33}^T (1-i\delta) - d_{31}^2 Y_p^E \right) = Y_{free}(\omega) - i\omega \frac{wl}{t_c} \left(d_{31}^2 Y_p^E \right)$$

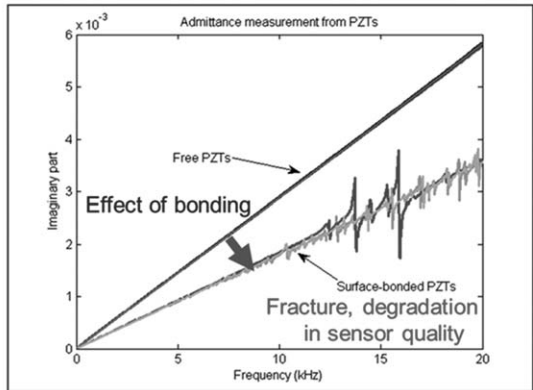


그림 7 Admittance 기반 센서자가진단 기법

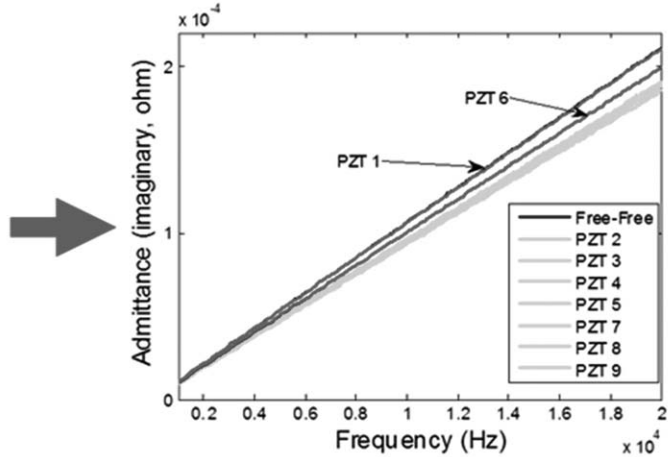
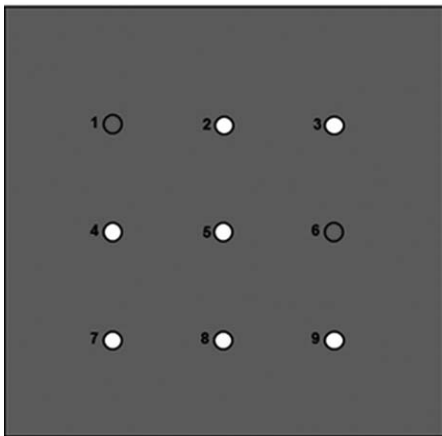


그림 8 센서 어드미턴스 기술기의 상대적 비교를 통한 손상센서 탐지 사례



<Accellent company>

<Metis Design corp>

<Cawley's group and Rose's group>

그림 9 다양한 상용화된 구조 건전성 모니터링 제품들 사례

기술기를 추적하여 진단이 가능하다⁽¹⁰⁾.

현재, 압전소자에 기반하여 구조 건전성 모니터링을 위한 다양한 압전체 제품, 웨이브 전파 기법들 및 센서 자가진단 기법이 개발되는 한편 이러한 모니터링 시스템을 상용화하기 위한 활동

들도 활발히 진행 중이다. 그중 이미 상업화에 성공한 사례를 그림 8에 나타내었다.

이중 Accellent company에서는 smart layer technology에 특화된 제품이 있는데 한 개 레이어에서 다수 센서를 연결할 수 있으며 주로 다수 레

이러로 구성된 복합재 내부에 설치되어 내부 크랙이나 결함을 탐지하는데 유용하다. 또한 해당 회사에서는 자체 rack DAQ 하드웨어 또한 제공한다. Methis Design 그룹의 제품은 phase array 기법에 특화되었으며 구조물 표면에 부착되어 수동 및 능동센싱 기법을 통한 충격 및 손상탐지에 유용하다. 해당 탐지 시스템은 자체 개발된 통합형 DAQ 하드웨어를 포함한다⁽¹⁾. 그리고 Cawley's 그룹과 Rose's 그룹에서 개발된 제품은 파이프라인의 건전성 모니터링에 효과적이며 다수 필드 실험을 통해 상업화 제품 개발에 성공하였다.

3. 맺음말

현재 압전소자 기반 구조 건전성 모니터링 분야에서 논의되고 있는 내용을 간단히 정리하였다. 압전소자는 물리적 성질에 의해 센서 및 구동기로 사용되며, 능동센싱에 기반한 다양한 방법을 통해 손상탐지를 수행한다. 또한 모니터링 결과의 신뢰성 확보를 위해 센서 자가진단법이 연구되고 있다. 항공구조물, 파이프, 복합재료 등 실구조물에 기술적용을 위한 연구도 활발히 진행 중이며, 상용화된 제품도 제작 및 판매 중이다. 구조 건전성 모니터링을 통한 효율적 구조물 정비와 관련하여 국내 해당분야 연구자 및 전문가들의 지속적 관심이 요구되는 분야이다. **KSNVE**

참고문헌

- (1) Sodano, H. A. et al., 2004, An Investigation Into the Performance of Macro-fiber Composites for Sensing and Structural Vibration Applications, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 18, No. 3, pp. 683~697.
- (2) Park, G. et al., 2003. Overview of Piezoelectric Impedance-based Health Monitoring and Path Forward, The Shock and Vibration Digest, Vol. 35, No. 12, pp. 33~37.
- (3) Park, G. et al., 2000, Impedance-based Health Monitoring of Civil Structural Components, ASCE Journal of Infrastructure Systems, Vol. 6, No. 4, pp. 153~160.
- (4) Bhalla, S. and Soh, C. K., 2003, Structural Impedance Based Damage Diagnosis by Piezotransducers, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 32, pp. 1897~1916.
- (5) Raghavan, A. and Cesnik, C. E. S., 2007, Review of Guided-wave Structural Health Monitoring, The Shock and Vibration Digest, Vol. 39, pp. 91~118.
- (6) Farinholt, K. M. et al., 2012, Full-scale Fatigue Tests of CX-100 Wind, Proceedings of the SPIE, Vol. 8343, p. 83430.
- (7) Flynn, E. B. et al., 2011, Maximum-likelihood Estimation of Damage Location in Guided-wave Structural Health Monitoring, Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science. Vol. 467, No. 2133, pp. 2575~2596.
- (8) Mcliskey, G. C. et al., 2010, Acoustic Emission Beamforming for Enhanced Damage Detection, Proceedings of the SPIE, Vol. 6932, p. 693239-9.
- (9) Anderson, B. E. et al., 2008, Time Reversal, Acoust, Today 4 5-16.
- (10) Park, G. et al., 2005, Piezoelectric Active Sensor Self-diagnostics using Electrical Admittance Measurements, ASME Journal of Vibrations and Acoustics, Vol. 128, No. 4, pp. 469~476.
- (11) Kessler, S. and Spearing, M., 2002, Design of a Piezoelectric-based Structural Health Monitoring System for Damage Detection in Composite Materials, Proceedings of the SPIE, Vol. 4701, pp. 86~96.