

# 압전소자를 이용한 볼트체결 상태계측 및 측정 Estimation of Fastened Condition of Bolts Using PZT Patches.

채 관 석 \*<sup>1)</sup> · 하 남 \*<sup>2)</sup> · 홍 동 표 \*\*<sup>3)</sup> · 채 희 창 \*\*\*<sup>4)</sup>

Chae Kwan Seok, Ha Nam, Hong Dong Pyo and Chae Hee Chang

**Key Words :** Structural Health Monitoring, PZT Patches, Piezoelectric Impedance Response, Looseness of Bolts, Damage Assessment Indices.

### ABSTRACT

This work presents a study on development of a practical and quantitative technique for assessment of the structural health condition by piezoelectric impedance-based technique associated with longitudinal wave propagation method. The bolt fastening condition is adjusted by torque wrench. In order to estimate the damage condition numerically, three damage indices, impedance peak frequency shift  $\Delta F$  is proposed in this paper. Furthermore, an assessment method is described for estimation of the damage by using these three damage indices.

### 기호설명

- $Y$  : 어드미턴스
- $Z_a$  : 압전 소자의 기계적 Impedance
- $Z_s$  : 구조물의 기계적 Impedance
- $Y_{zx}^E$  : 압전 소자의 전계가  $0(kV/m)$  때의 신장 탄성률
- $d_{3x}$  : 임의의  $x$ 방향에 대한 등가 압전 정수
- $\epsilon_{33}^T$  : 유전정수
- $\delta$  : 압전 소자의 유전손실을
- $w_a, l_a, h_a$  : 압전 소자의 폭, 길이, 두께

### 1. 서 론

truss형을 한 구조물에는 다리나 철탑 등이 있어, 사람들의 생활에 가까이 존재 한 경우가 많다. 그 때문에 truss 구조를 이용한 철교나 고가다리, 송전선 철탑이 폭락이나 붕괴 하면 많은 인명피해가 발생되며 또 경제활동이 중지되는 것으로 방대한 자금이나 자원이 없어지게 된다. 예를 들면

1962년에 오스트레일리아에서 용접강교가 강재의 결합때문에 균열을 일으켜서 파단되었으며, 1989년 샌프란시스코의 오클랜드 만 교량의 부분철탑 기둥에 고정받침을 정착하기 위해 사용된 직경 2.5cm의 볼트 24개가 자연재해에 의해 전단되어 붕괴의 원인이 되었다. 1998년에는 카가와현에서 송전선 철탑의 볼트가 전단원인이 되어 붕괴된 일이 발생되었다. 그래서 다리나 철탑 등과 같은 구조물의 폭락이나 붕괴를 막기 위해서 손상을 조기 발견 해 대책을 실시할 필요가 있다. 구조물의 손상의 종류로서는 강재의 균열이나 부식, 볼트의 해이해짐이나 단락 등이 있다. 강재의 균열이나 볼트의 해이해짐은 도장에 숨어 발견하기 어렵기 때문에, 조기 발견이 어렵다. 한층 더 강재의 균열은 금속 피로의 경우가 많아, 강교 외에도 고속도로내의 표시기둥이 그 기초부에 바랍이나 교통량으로 일어난 진동에 의해 반복 응력을 받아 금속 피로로부터 균열이 생기며 파손 된 보고도 있다. 또, 금속재료는 부식되면 그 피로 강도 이하로 파괴가 일어난다. 그래서 강재의 내부 응력이나 부식 상태에 따른 볼트 상태를 정상적으로 검사 할 필요가 있다. 구조물을 파괴 하지 않고 손상을 평가 한 방법으로서 비파괴 검사와 구조물의 헬스 모니터링 기술이 있다. 구조물의 헬스 모니터링 기술은 재료 중에 신경이나 뉴런과 같이 센서를 묻어, 구조물에 가해진 변형이나 응력 변화, 재료 중에 발생 한 손상 등을 리얼타임으로 자기 검지·진단하는 기술이다. 헬스 모니터링에 이용 한 센서에는 광섬유를 이용한 것이나 압전 소자를 이용한 것이 있다. 광섬유를 이용한 센서는 재료 중 전체에 묻어서 신경과 같이 사용하기 때문에, 구조물의 재료 특성을

1) 소속 : 전북대학교 기계설계공학과  
E-mail : familych76@hotmail.com  
Tel : (063) 270-2455

2) 전북대학교 정밀기계공학과  
3) 전북대학교 정밀기계공학과  
4) 전북대학교 기계설계공학과

일어 버릴 가능성이 있고, 또 기존 구조물에는 나중에 묻기 어려운 점이 있다. 압전 소자는 센서로서 기능 하는 것과 동시에 액츄에이터로도 사용할 수 있어, 재료에 붙이는 것만으로 사용할 수 있기 때문에, 강재에 붙여 계측을 실시하는 것으로서 손상의 평가를 할 수 있게 된다.

## 2. impedance 계측법

### 2.1 압전 소자를 이용한 impedance 계측법 개념

구조물에 어떠한 요인으로 손상이 발생 하면 건강시에 비해 구조물의 강성이나 감쇠율 등이 변화 해, 그 결과 구조물의 기계적 impedance가 변화 한다고 생각된다. 이 손상의 발생과 기계적 impedance의 변화의 관계로부터, 기계적 impedance의 계측을 실시하는 것으로 구조물의 건강 상태(손상의 유무)를 평가 하는 것이 impedance 계측법의 개념이다. 그러나 일반적으로 미소한 기계적 impedance의 변화를 고정밀도에 계측 하는 것은 어려운 것이다. 그래서 그림 2)에 나타낸 압전 소자가 붙여 있는 구조물의 모델을 생각 하면 압전 소자의 어드미턴스(전기적 impedance의 역수)는 구조물 및 압전 소자의 기계적 impedance를 이용해 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

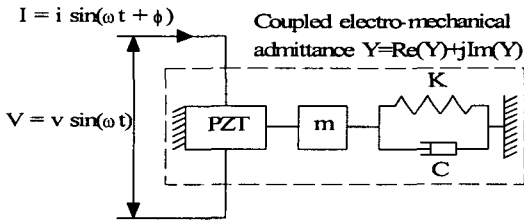


그림 1) 압전 소자를 붙인 구조물의 1 자유도 모델

$$Y = i\omega \frac{w_a l_a}{h_a} \left[ \epsilon_{33}^T (1 - i\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 Y_{xx}^E \right] \quad \dots \text{식(1)}$$

손상이 생기지 않으면 압전 소자의 기계적 impedance는 일정하므로, 구조물의 기계적 impedance의 변화가 지배적이 된다. 따라서, 구조물의 기계적 impedance의 값은, 구조물에 붙인 압전 소자의 전기적 impedance의 계측을 통해 얻을 수 있다. 본 연구에서는 「구조물의 손상」과 「기계적 impedance」, 그리고 「압전 소자의 전기적 impedance」의 세 개의 관계에서 압전 소자의 전기적 impedance를 계측하는 것으로 구조물의 손상 상태를 평가한다. 정량적인 손상을 용이하게 만들어 낼 수 있는 것으로, 반복 계측에 재현성을 유지하게 하는 것을 고려해 Joint부의 볼트의 해이해짐 상태를 예로 취해, 손상의 정량 평가를 확립하는데 있다.

### 2.2 측정 대상물

그림2) 나타낸 바와 같이, 가장 간단한 구조물로서 알루미늄 보를 이용해 기초 실험을 실시한다. 보에는 truss형 구조물에 달기 위한 나사구멍이 8개이며 그 직경은  $\phi 4$ 이다. 그림2)에서 보의 좌측으로부터 40mm, 보의 폭 방향의 중심으로 압전 소자 PZT1, 2를 양면에 붙였다. 보와 압전 소자의 물성치 표1)와 같다.

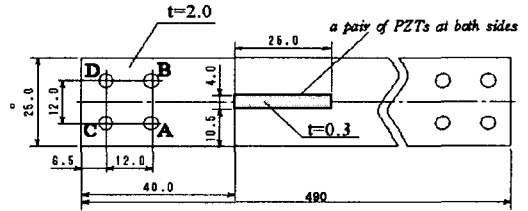


그림2) 알루미늄 보에 PZT Patch를 붙인 impedance 측정용 시험편

표 1) 알루미늄 보와 압전 소자의 물성치

Aluminum beam element	
Length $l_s$ (mm)	490
Width $w_s$ (mm)	25
Thickness $h_s$ (mm)	2
Density $\rho_s$ ( $\times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )	2.70
Young's Modulus $E_s$ ( $\times 10^{10} \text{ N/m}^2$ )	7.06
Piezo-electric element (C-6)	
Length $l_a$ (mm)	25
Width $w_s$ (mm)	4
Thickness $h_s$ (mm)	0.3
Density $\rho_s$ ( $\times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )	7.4
Relative dielectric constant $\epsilon_{33}^T$	2000±300
Piezo-electricity constant $d_{31}$ ( $\times 10^{-12} \text{ m/V}$ )	-195
Young's Modulus $Y_{11}^E$ ( $\times 10^{10} \text{ N/m}^2$ )	5.8
Induced loss $\tan \delta$	2.1
Frequency constant $N_{31}$ (Hz · m)	1400

### 3. 실험장치

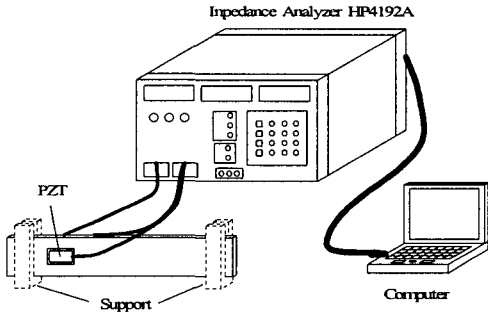


그림 3) impedance 측정장치

실험에서는 지지부의 영향을 가능한 한 없애기 위해 그림 3)에 나타난 알루미늄 보를 스트로폼 지지에 사용하고, 보의 양쪽에 대칭으로 붙인 압전 소자 PZT1, PZT2에 동시에 교류 전압을 걸어 구조물중에 세로 탄성파를 발생시킨다. 압전 소자의 impedance 응답은, impedance 애널라이저 (HEWLETT PACKARD 4192 A)를 사용해 다음의 순서로 행한다. 처음에 Computer로부터 계측 주파수·범위와 가진 주파수 스텝을 Impedance Analyzer에 입력 하면 거기에 대응 한 일정(1 Vrms)의 교류 신호가 PZT에 더해진다. 이것에 의해 구조물에 생긴 정상파가 PZT에 전위 변화를 가져온다. 이 전위 변화가 Impedance Analyzer내에서 impedance로 계산되어 Computer에 전송 데이터로서 기록된다.

### 4. 평가할 주파수 영역 선정

우선, 양단 자유 또는 양단 고정 보의 세로 진동을 생각하면 그 고유 주파수는 .

$$f_n = \frac{c}{2l} n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad n=1, 2, 3 \dots \dots \text{식 (2)}$$

여기서, c는 보의 내부를 전해진 위상 속도, l는 길이, E는 탄성계수, ρ는 밀도이다. 그런데, 표 2)보의 물성치를 식(2)에 대입 하면 보의 고유 주파수는  $f_n=5.21n(\text{kHz})$ 가 된다.

한편, 압전 소자의 신축에 의해 보의 폭방향에도 정상파가 생길 가능성이 있다. 그래서 보의 폭 25(mm)를 식(2)의 l에 대입 하면  $f_n=104.2n(\text{kHz})$ 가 된다. 따라서 구동 주파수 104(kHz)을 넘으면 폭방향의 진동이 영향을 준다. 따라서 본연구에서는 주파수의 계측 범위를 100(kHz) 이하로 한다. 그림 2)의 알루미늄 보에 대해서 1(kHz)에서 100(kHz)까지 계측 한 impedance 응답의 실수부의 결과는 그림4)와 같다. impedance 응답에는 실부와 허부가 있지만, 실수부 편이 응답의 변화를 확인하기 쉽기 때문에, 허수부는 제외했다. 그

그림 4)에 나타난 펄스의 주기는 약 5(kHz)로 식(2)에서 구한  $f_n=5.21n(\text{kHz})$ 로 거의 같다.

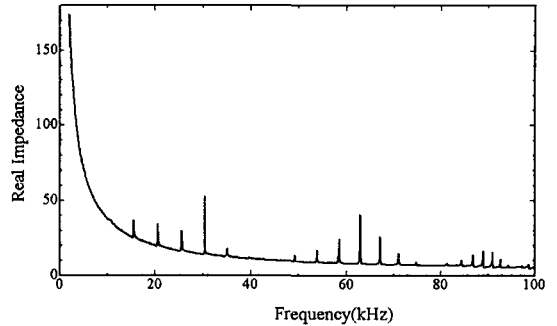


그림4) 알루미늄 보의 impedance 파형

### 5. impedance 측정의 재현성

impedance 측정에는, 재현성이 필요하다. 재현성이 좋지 않으면, 피크의 정보를 충분히 얻지 못해, 정확한 평가를 할 수 없게 된다. 그래서 사용 한 주파수역의 하나의 피크로 주목 해, 그 피크로 하여 1회째의 계측 후 곧바로, 다음의 계측을 실시해, 그것을 4회 계속하는 것으로 재현성을 조사한다. 정확한 재현성을 조사하기 위해서 분해능은 1회째 10(Hz), 2번째 5(Hz), 3번째 1(Hz), 4번째 0.5(Hz)와 계측을 실시할 때 마다 분해능을 올려 그 결과는 그림5)와 같고, 대체로 피크의 형태는 거의 일치하고 있다. 이 결과로부터 거의 impedance 피크의 변동은 없다.

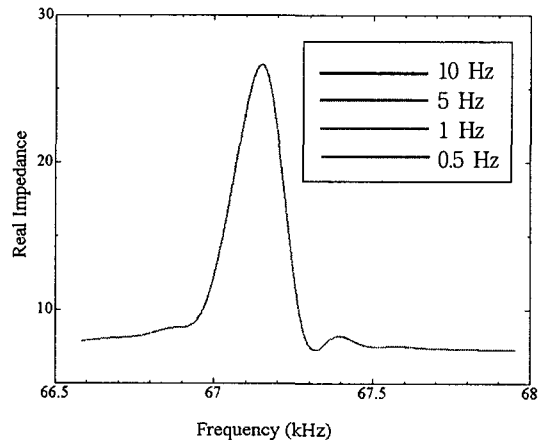


그림 5) 분해능 별 impedance 피크

표 2) 분해능 별 피크 주파수와 피크 진폭비

Resolution (Hz)	10	5	1	0.5
Peak frequency (kHz)	67.17	67.17	67.18	67.18
peak Amplitude(Ω)	25.80	25.80	25.82	25.82

## 6. 측정 방법 및 손상 평가법

구조물에 손상을 주면 그 impedance 피크치의 크기와 주파수가 변화 한다. 그 손상의 크기가 미소하면 피크의 변화도 미소하다. 본 연구에서는 미소한 손상의 변화의 일례로서 보를 고정하고 있는 한곳의 볼트의 합계 체결 토크가 느슨해졌을 경우를 손상으로서 생각한다. 볼트의 해이해짐의 조정은 토크 렌치로 조절하기 때문에, 다시 잡는 것으로 몇 번이나 계측을 실시할 수가 있다. 그러나 이 구조물은 보와 Joint부를 볼트와 너트로 고정되어 있기 때문에, 볼트의 억압 토크를 한 번 변화시키면 시험편 전체의 특성이 변화한 가능성이 있다. 따라서, 계측을 실시하는데 있어서 일정한 순서가 필요하게 된다. 우선 처음에 매우 양호한 상태(모든 볼트의 억압 토크가  $3.0\text{N}\cdot\text{m}$ )의 impedance 파형을 취하고 볼트의 억압 토크를  $3.0\text{N}\cdot\text{m}$ 에서  $0.0\text{N}\cdot\text{m}$ 까지  $0.5\text{N}\cdot\text{m}$ 의 단위로 변화시키면서 impedance 응답을 측정 한다.

그림 2)에 나타난 시험편 중 볼트 a의 체결 토크를 변화시켰을 경우의 impedance 응답을 조사하여 그 손상 평가법을 확립 한다. 구체적으로 볼트 a의 합계 체결 토크를  $0.5\text{N}\cdot\text{m}$ 마다 매우 양호한 상태의  $3.0\text{N}\cdot\text{m}$ 에서  $0\text{N}\cdot\text{m}$ 까지 감소시켜, 각각의 impedance 파형을 계측한다. 그 결과 그림 6)과 같이 측정 주파수 범위는  $52.5\sim 70.0(\text{kHz})$ 이다. 한층 더 각 피크를 확대한 것은 그림 6-a, 6-b, 6-c, 6-d)과 같다. 각각의 확대도에서 토크의 감소에 따라 각 피크의 주파수의 쉬프트 및 진폭의 변화가 현저하게 잡어져 볼트의 결합력의 정량 평가가 가능하다고 생각된다.

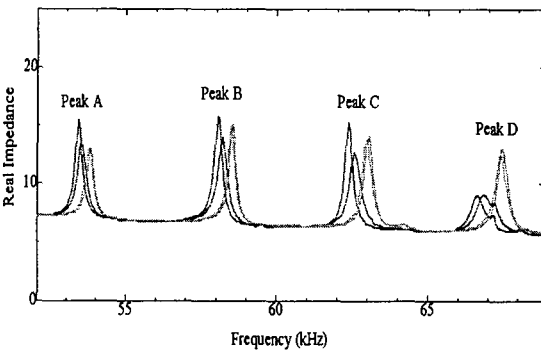


그림 6) 볼트 a의 토크를 변화시켰을 경우의 impedance 응답

다음의 확대도에서 좌측의 파형으로부터 순차적으로 볼트 A를  $0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0\text{N}\cdot\text{m}$ 으로 조인 후의 impedance 파형이다. 순차적으로 주파수가 오른쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다.

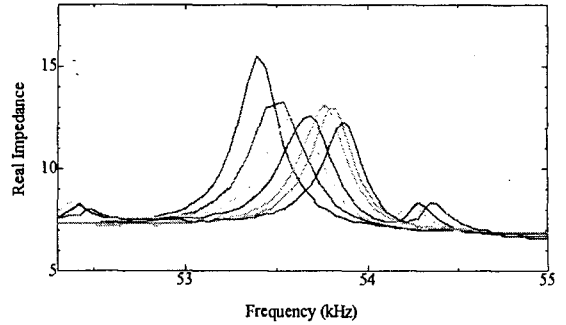


그림 6-a) Peak A에서의 impedance 응답

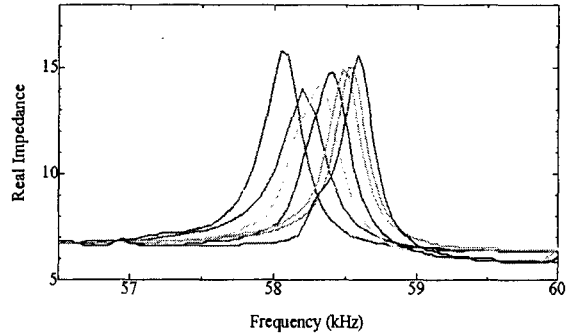


그림 6-a) Peak B에서의 impedance 응답

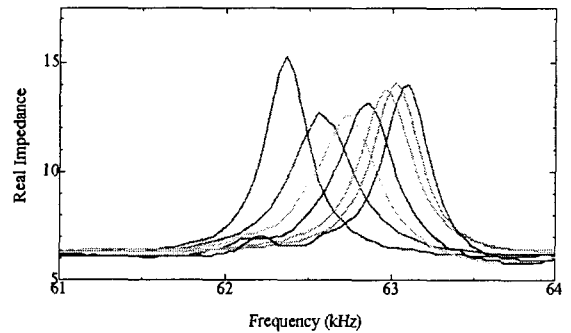


그림 6-a) Peak C에서의 impedance 응답

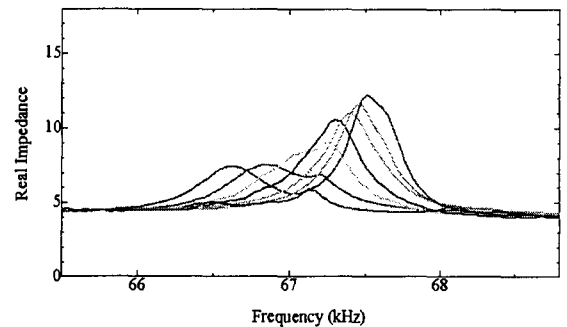
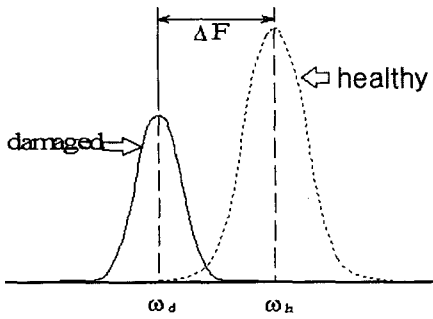


그림 6-a) Peak D에서의 impedance 응답



impedance의 변화를 측정 하는 것으로 검지할 수 있다. 또, 녹이나 부식에 의해 재료 성질이 변화 하면, 그 탄성계수이나 밀도가 변화 한다. 그러면 새로 탄성과 이론에서 재료 내부를 전파 한 정상파가 변화하기 때문에, 검출된 전기적인 impedance가 변화 하게 된다. 즉, 본 연구로 제안한 평가방법은 구조물의 물리적 특성이 미소해도 변화가 있으면, 압전 소자의 전기적 impedance가 변화 하므로, 그 변화의 정량화에 적용할 수 있으나, 손상의 변화 상태를 예측할 수 있지만 손상의 위치를 결정하는 것은 어려운 것이다. 대책으로서는 압전 소자를 구조물에 많이 붙여, 계측과 구동 방법을 연구 하면 손상 위치를 구하는 일도 가능이라고 생각된다.

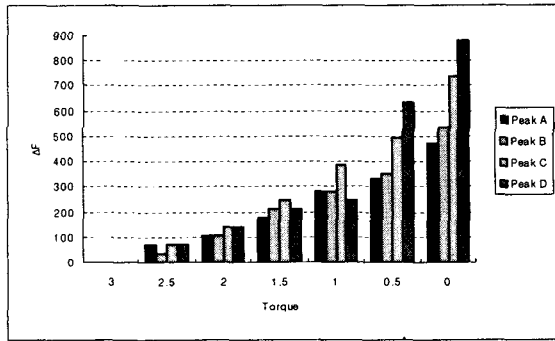


그림 7) 평가 지수 및 피크 주파수 쉬프트량과 볼트 토크 변화

## 7. 결론

구조물이 받는 손상의 한 예로 볼트의 해이해짐을 생각해 impedance 응답을 계측 하는 것으로, 볼트를 조인 토크에 대한 평가법을 제안했다. 얻을 수 있는 결과를 정리하면 다음과 같다.

- ① 압전소자가 부착된 구조물에 대하여 종단성과 원리를 이용한 임피던스 측정법은 광범위 주파수 영역에서 임피던스 공진주파수를 용이하게 측정가능하다.
- ② impedance 계측의 재현성을 실험에 의해 확인 하였다.
- ③ impedance 계측에서는 가진 주파수의 분해능이 구조물 손상의 검출 정밀도에 영향을 주어 측정 대상에 따라 적절히 설정할 필요가 있다.
- ④ 손상 평가 지수로서 「피크 주파수 쉬프트량」을 제안하였다.

본 연구에서는 볼트의 합계 체결 토크를 미소한 손상의 일례로서 생각했지만, 예를 들면 금속 피로에 의한 내부 응력 변화, 녹이나 부식에 의한 재료 성질의 변화에 대해 사용할 수 있는지를 고찰 한다. 우선 처음에 금속 피로에 의한 내부 응력의 변화에 대해서는, 응력의 변화에 의해 기계적인 impedance가 변화 하므로, 그 변화를 압전 소자의 전기적인

## 후 기

본 연구는 과학기술부 주관 국제공동연구 프로젝트로 “스마트 재료를 사용한 구조물 헬스 모니터링 시스템 개발”과제의 일환으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Zhongwei Jiang and Yasutaka Takeuchi, "Damage Assessment for Truss Structural Health Monitoring with Piezoelectric Impedance-Based Technique" Proceedings of ICMIT'01, 283-286,2001
- (2) Kevin L. Rens, Terry J. Wipf and F. Wayne Klaiber "Review of nondestructive evaluation techniques of civil infrastructure" Journal of performance constructed facilities/November 1997(152-159)
- (3) Darryll J Pines and Philip A Lovell "Conceptual framework of a remote wireless health monitoring system for large civil structures", Smart Mater.Stuct, 1998
- (4) C. Liang, F. P. Sun and C. A. Rogers, "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, 5, 1994
- (4) 武田 展雄, 岡部 洋二, "光ファイバセンサを用いた複合材料のヘルスマonitoring技術" 日本機械學會論文集, 67-655, A(2001), 378-383