

PZT를 이용한 구조물 미소손상 평가에 관한 연구

A Study on Structure Minute Damage Assessment by Using PZT Patches

김 병 진* · 한 수 현* · 홍 동 표** · 태 신 호***

Kim Byung Jin, Han Su Hyun, Hong Dong Pyo and Tae Sin Ho

Key Words : Structural Health Monitoring, PZT Patches, Piezoelectric Impedance Response, hole, crack, 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 propagaation. The natural frequency of the object has a tendency of frequency shifting according to hole size corresponded to real structure crack and crack size. In order to estimate the damage condition numerically, we suggest the evaluation method of Impedance peak frequency shift ΔF in this paper. .

기호설명

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

1. 서 론

현재 우리나라 사회기반 시설인 교량, 터널, 송전탑 등의 거대 구조물과 고층빌딩, 항공기, 대형선박 등의 상당부분이 1970~80년대의 고도 성장기에 건설되어 건설 후 20년 이상이 지나고 있는 구조물들이 매우 많다. 우리나라 뿐 아니라 세계 각국도 이러한 구조물의 노후화로 인한 붕괴위험을 안

고 있어 그에 대한 대책 마련을 위한 연구를 활발히 진행하고 있다.

우리나라에서 발생했던 1994년 성수대교 붕괴사고, 이듬해인 1995년 삼풍백화점 붕괴사고, 일본에서의 1998년 송전선 철탁 붕괴사고, 미국의 1984년 샌프란시스코 오클랜드만교량 붕괴사고, 중국의 2002년 남문대교 붕괴사고 등 대형 구조물 붕괴사고가 잇달아 발생하여 엄청난 인명 및 재산 피해를 초래함으로써 구조물에 대한 안전기술의 확보에 대한 중요성이 절실히 요청되고 있는 상황이다. 또한, 항공기를 포함한 기계 구조물의 상당수가 그 설계수명에 이르고 있으며 이러한 구조물에서의 손상 발생은 대 참사를 일으킬 가능성이 높기 때문에 예기치 못한 사고를 미연에 방지하기 위해 구조물의 사용 연수를 설정해 두고 있지만, 환경과 조건의 변화로 인하여 그 기간은 상당히 유동적이다. 이 뿐 아니라 철도·도로 등의 교통시스템, 수도·전력·가스 등의 사회 기반 구조물은 비록 단기간의 기능 정지라 할지라도 사람들의 사회 활동이나 일상생활에 큰 영향을 미치며, 경제적으로도 재산적인 손실이 막대하다.

이러한 사회적 요구로부터 최근 구조물에 축적되는 손상의 정도를 파악해서 그 위험여부를 손쉽게 판정할 수 있는 구조물의 건강 모니터링 기술에 대한 연구가 주목을 받고 있으며, 미국, 일본을 비롯한 선진국에서는 이미 대형 구조물의 정량적 비파괴 검사나 건강 모니터링에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

* 소속 : 전북대학교 정밀기계공학과 대학원
E-mail : bluechip@chonbuk.ac.kr
Tel: (063) 270-2374

** 전북대학교 기계항공시스템공학부

*** 현대자동차

2. Impedance 계측법

2.1 PZT를 이용한 Impedance 계측법 개념

균열이나 부식 등의 내·외부적 요인으로 인해 손상이 발생한 구조물은 손상이 없을 때에 비해 강성 및 감쇠율 등의 변화가 발생하며, 결과로써 구조물의 기계적 Impedance가 변화하게 된다. 이 손상의 발생으로 인한 구조물의 기계적 Impedance 변화와 PZT의 전기적 Impedance 변화 관계를 이용해 구조물의 건강상태를 평가하는 것이 Impedance 계측법의 개념이다. 그러나 일반적으로 미소한 기계적 Impedance의 변화를 고정밀도로 계측 하는 것은 어려운 것이다. 그래서 그림 2), 3)에 나타난 압전 소자가 붙여 있는 구조물의 모델을 생각하면 압전 소자의 어드미턴스(전기적 Impedance의 역수)는 구조물 및 압전 소자의 기계적 Impedance를 이용해 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

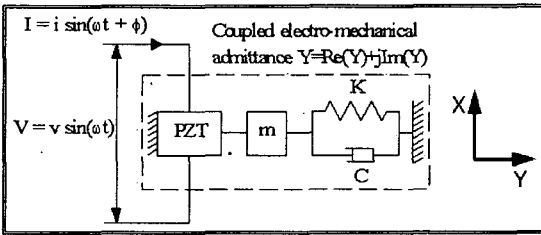


그림 1 압전소자(PZT)가 부착된 구조물의 1자유도 모델

$$Y = i\omega \frac{w_a l_a}{h_a} \left[\epsilon_{33}^T (1 - i\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{31}^2 Y_{xx}^E \right] \dots \text{식(1)}$$

구조물에 손상이 발생되지 않았을 때의 구조물의 Impedance가 일정하다고 가정하면, 손상이 발생할 경우에는 구조물의 Impedance가 변화하여 그 공진주파수 대역이 달라질 것이라는 예측을 할 수 있다. 따라서 구조물의 손상으로 인해 발생하는 기계적 Impedance와 압전소자(PZT)의 전기적 Impedance의 관계를 이용하여 구조물의 손상 상태와 손상 정도를 계측 및 분석 하여 구조물의 손상 정도를 평가할 수 있는 건강 모니터링 기술의 확립을 목표로 시행하였다.

2.2 측정 대상물

그림2)에 나타난 바와 같이, 가장 간단한 구조물로서 알루미늄 보를 이용해 기초 실험을 실시한다. 보에 원형 크랙을 내어 그 영향에 의한 Impedance 변화를 Impedance 분석기를 이용하여 계측하였다. 원형 크랙의 크기는 직경 D는 초기에는 D=2.0mm 로 하고 그 후 D=3.0, 4.0, 5.0, 6.0mm 로 1mm씩 크게 하여, 각각의 직경 D의 경우에 대한 Impedance 파형을 측정하여 손상크기와 Impedance 파형관계를 조사하였으며, 그림2)에서 보의 좌측으로부터 40mm, 보의 폭 방향의 중심으로 압전 소자 PZT1, 2를 양면에 붙였다. 보와 압전 소자의 물성치 표1과 같다.

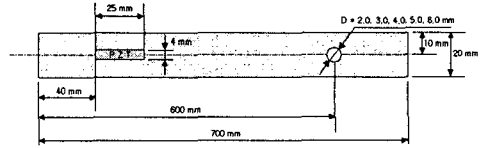


그림 2 원형 크랙을 적용한 알루미늄 보 구조물

또한 원형 크랙의 동일한 장비, 시편, 계측방법, 과정을 갖게하여 그림 3)과 같이 일자형 크랙의 크기를 CL = 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0mm로 1mm씩 증가하여 손상에 대한 Impedance 파형을 계측 실시 하였으며, 크랙의 너비는 1mm로 하였다.

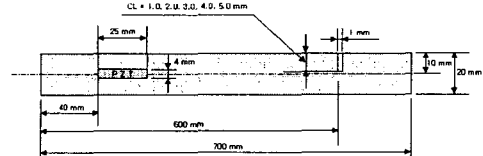


그림 3 일자형 크랙을 적용한 알루미늄 보 구조물

표 1 알루미늄 보와 압전 소자(PZT)의 물성치

Aluminum beam element	
Length l_s (mm)	700
Width w_s (mm)	20
Thickness h_s (mm)	2
Density ρ_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 ρ_s ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)	7.4
Relative dielectric constant ϵ_{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

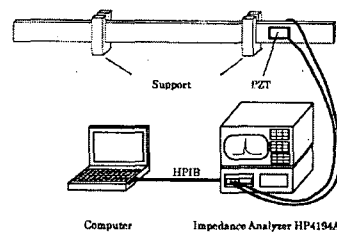


그림 4 임피던스 계측 장치의 개략도

PZT를 이용한 Impedance 계측 장비로는 Impedance 분석기(Impedance Analyzer : HP 4192A)를 사용하였으며, 이것으로 Impedance의 변화를 계측하여 구조물에 발생하는 미소손상의 존재와 손상의 종류, 크기, 등을 알아낼 수 있다.

알루미늄 보 구조물의 기계적 Impedance를 측정하기 위해서는 컴퓨터를 이용하여 계측하고자 하는 주파수 범위와 주파수 스텝을 Impedance 분석기에 입력하면, 입력 값들에 대응하는 일정한 교류신호가 PZT에 더해진다. 이러한 과정에 의해 구조물에 발생하는 종단성파가 PZT에 전위변화를 가져오게 되고, 이 전위 변화가 Impedance 분석기 내에서 Impedance로 계산되어 컴퓨터에 전송데이터로서 기록된다.

4. 정상 구조물의 Impedance 응답

기본 구조물인 보의 양단이 자유 또는 고정된 경우, 종단성 진동에서의 보의 고유 주파수는

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

여기서, c 는 보의 내부를 전해진 위상 속도, l 는 길이, E 는 탄성계수, ρ 는 밀도이다. 그런데, 표 1)보의 물성치를 식(2)에 대입 하면 보의 고유 주파수는 $f_n=3.456(\text{kHz})$ 가 된다.

계측 한 Impedance 응답의 실수부의 결과는 그림4)와 같다. Impedance 응답에는 실부와 허부가 있지만, 실수부만이 응답의 변화를 확인하기 쉽기 때문에, 허수부는 제외했다. 그림 4)에 나타낸 펄스의 주기는 약 5(kHz)로 식(2)에서 구한 $f_n=5.21n(\text{kHz})$ 로 거의 같다.

그림 5)에는 정상 알루미늄 보 구조물에 대하여 1 kHz로부터 150 kHz까지의 Impedance 응답을 계측한 결과가 나타나 있다. Impedance 분석기에 의해 계측된 Impedance에는 실수부와 허수부가 있지만 그림에서 보듯 실수부가 응답의 변화를 확인하기 용이하고, 측정 정밀도가 높기 때문에 Impedance 응답파형의 실수부를 평가에 사용하였다. 그림 5)에서 피크가 발생하는 주파수의 주기는 약 3.531 kHz이며, 이 값은 식 (2)에서 계산되어진 $f_n = 3.456 \text{ kHz}$ 과 거의 같다

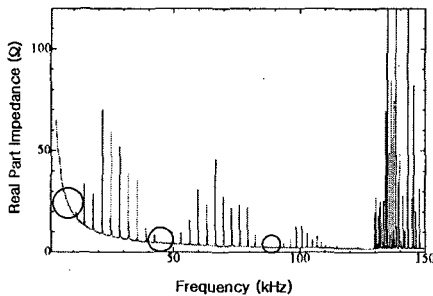


그림 5 알루미늄 보의 Impedance 파형

5. 구조물의 미소손상 계측 및 분석

5.1 원형 크랙 크기 계측 및 분석

그림 5에서 보이는 것처럼 Impedance 파형에서 표시된 원은 Impedance가 발생되지 않거나 또는, 너무 작은 값을 가지고 있기 때문에 이러한 위치에서의 Impedance 피크 값들은 고려하지 않는다. 100 kHz 이상이 되면 구멍의 크기 변화에 따른 Impedance 피크 주파수 쉬프트량 Δf 가 이전의 모드들에서 볼 수 있는 일반적 경향을 띄고 있지 않기 때문에, 각각의 모드에 대한 파형 분형을 하는데 있어서 문제가 발생될 수 있으므로 그이상의 모드들은 제외하였다.

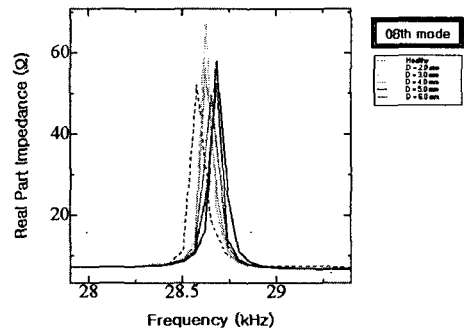
표 2는 계측된 Impedance 파형으로부터 추출되는 모드별 피크 주파수이다.

표 2 원형 크랙의 크기 변화에 따른 각 모드별 피크주파수

Mode	Frequency (kHz)					
	Healthy	D=2mm	D=3mm	D=4mm	D=5mm	D=6mm
8	28.5780	28.6230	28.6230	28.6523	28.6815	28.6815
18	63.1965	63.1965	63.1380	62.9918	62.8748	62.6993
23	79.2930	79.2840	79.2840	79.2840	79.2548	79.1670

Impedance 측정결과의 일부분을 그림 6)에 나타내었다. 건강시 비해 원형 크랙의 크기가 커질수록 Impedance가 발생하는 피크 주파수의 위치가 점점 쉬프트 되어지고 있음을 확인할 수 있다. 이와 더불어 각 모드에서의 쉬프트량 또한 차이를 보이고 있음을 볼 수 있다.

원형 크랙의 크기 변화에 대한 Impedance의 파형 변화의 경향은 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 그림 6)의 18차 모드에서와 같이 원형 크랙의 크기가 커짐에 따라 Impedance가 발생하는 피크 주파수가 건강 시에 비해 감소하는 것이고, 두 번째는 이와 반대로 8차 모드에서와 같이 Impedance 피크 주파수가 증가하는 경향을 보이는 것이며, 마지막으로 23차 모드에서와 같이 Impedance 피크 주파수의 변동이 거의 없이 피크의 크기가 줄어들면서 복소의 피크 파형이 발생하는 것이다. 이와 같은 경향을 볼 때 손상의 크기인 원형 크랙의 크기의 영향이 Impedance 파형에 나타나기 쉬운 모드와 그렇지 않은 모드가 존재함을 알 수 있다.



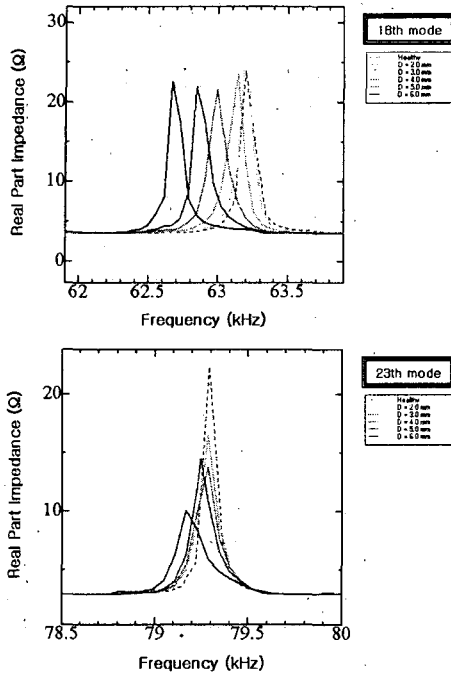


그림 6 원형 크랙의 크기 변화에 따른 모드별 Impedance 파형 변화의 경향

본 연구에서 정한 손상의 평가지수는 Impedance 피크 주파수 쉬프트량 ΔF 이다. 표 2)의 Impedance 피크 주파수 데이터와 아래의 식 (3)을 이용하여 원형 크랙의 크기에 대한 각 모드별 ΔF 를 구한 값을 그림 7)에 그래프로 나타내었다.

$$\Delta F = w_D - w_H \dots \dots \text{식 (3)}$$

이때 건강 상태에서의 피크 주파수를 w_H , 손상 후의 피크 주파수를 w_D 로하면 그차이를 피크 주파수 ΔF 라한다.

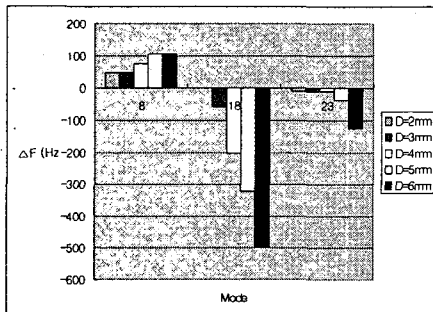


그림 7 원형 크랙의 크기와 Impedance 피크 주파수 쉬프트량 ΔF

그림 7을 보면 원형 크랙의 크기 변화에 대한 Impedance 피크 주파수 쉬프트량 ΔF 의 변화가 증가되고 있다는 것

을 알 수 있다. 이와 같이 ΔF 값이 증가하는 경향을 이용하여 구조물에 어느 정도의 손상이 진전되었는지를 가늠할 수 있게 되는 것이다. 그리하여 손상의 크기를 분석하고 평가할 때는 파형의 변화가 큰 18차 모드의 정보를 이용하는 것이 효율적이라는 것을 알 수 있다.

5.2 일자형 크랙 크기 계측 및 분석

본 절에서는 원형 크랙인 구멍 대신에 일자형 크랙을 구조물에서 발생한 손상으로 적용하였다. 실험에 사용되는 계측장비와 시편, 그리고 계측방법과 계측 과정을 5.1절과 동일하게 하였다. 표 3)는 계측된 Impedance 파형으로부터 추출되는 모드별 피크 주파수이다

표 3 일자형 크랙의 크기 변화에 따른 모드별 피크주파수

Mode	Frequency (kHz)					
	Healthy	D=2mm	D=3mm	D=4mm	D=5mm	D=6mm
8	28.3305	28.3305	28.3305	28.3305	28.3305	28.3305
23	78.4650	78.4065	78.4065	78.3480	78.2310	78.1140

그림 8)에 Impedance 계측기를 이용하여 건강상태 에서부터 일자형 크랙의 크기를 1~5mm까지 변화시키면서 계측한 각각의 모드별 Impedance 피크파형의 일부를 나타내었다

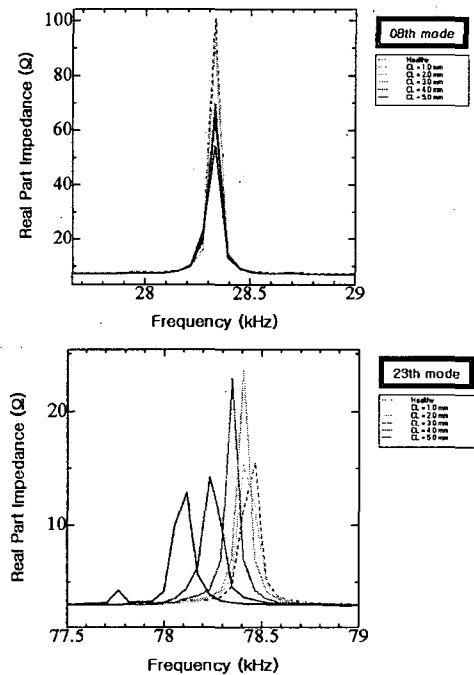


그림 8 일자형 크랙의 크기 변화에 따른 Impedance 파형 변화의 경향

일자형 크랙의 발생과 크기 변화에 따른 Impedance 피크 파형 변화는 원형 크랙의 경우에서와는 다른 경향을 보인다. 원형 크랙의 경우에는 구멍의 발생과 직경(구멍크기)이 증가함에 따라 Impedance 피크 주파수가 감소하는 모드와 증가하는 모드가 함께 존재하였지만, 일자형 크랙에서는 손상없는 건강시에서의 Impedance 피크 주파수와 동일한 주파수에서 일자형 크랙의 크기 증가에 따른 Impedance 피크 파형이 복수로 발생하는 경우를 제외하고, 모든 모드에서 크랙의 크기 증가에 따라 Impedance 피크 주파수가 감소하는 경향만 보인다. 그림 8)의 6차 모드에서는 크랙의 크기를 증가시켜도 Impedance 피크 주파수의 이동 없이 동일한 주파수에서 피크의 크기만 감소되어지는 것을 볼 수 있다. 23차 모드의 Impedance 피크 파형을 관찰해보면 본래의 피크 파형 그룹의 앞쪽에 본래의 피크 파형보다 크기가 작은 Impedance 피크 파형들이 발생하는 것을 볼 수 있다. 그리고 이러한 피크 파형들도 본래의 피크 파형들도 마찬가지로 크랙의 크기가 증가에 따라 발생하는 Impedance 피크 주파수가 점점 감소되어지는 것을 볼 수 있다. 이러한 파형변화 양상을 보이는 이유는 알루미늄 보 구조물에 종단성파가 전달되면서 일자형 크랙의 부분을 경계로 하여 발생하는 간섭 현상 때문이라고 생각되어진다.

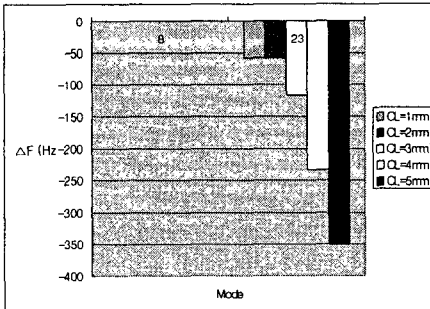


그림 9 일자형 크랙의 크기와 Impedance 피크 주파수 이동량 ΔF

원형 크랙의 경우와 마찬가지로 일자형 크랙에서도 23차 모드가 고감도의 반응을 나타내는 경향을 볼 수 있다. 그러므로 구조물에 발생하는 손상의 발생과 진전을 분석하기 위해서는 크랙의 크기 증가에 민감하게 반응하는 23차 모드의 정보를 이용하는 것이 효율적이라고 할 수 있다.

6. 결론

구조물의 건강 상태를 실시간으로 모니터링 하고, 인위적이거나 자연적인 이유로 인한 손상이 발생 했을 경우 조기에 발견할 수 있는 건강 모니터링 기술의 확립을 위해 구조물의 초기 손상을 정량적으로 계측 및 평가할 수 있는 계측 방법과 손상의 종류에 따른 경향 그리고 이에 대한 평가 방법에 대해 다음과 같은 결과를 정리 할 수 있다.

① 손상의 영향이 Impedance 파형에 나타나기 쉬운 모드와 그렇지 않은 모드가 존재하며, 저주파수대의 저차모드에서 보다는 고주파수대의 고차모드에서 손상의 크기에 따른 고감도의 계측이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

② Impedance 계측 방법을 이용하여 구조물에 미소손상이 발생되었을 경우 Impedance 파형 계측 및 피크 주파수 분석을 통해 손상의 종류와 진전 정도를 모니터링 하는 것이 가능하였다.

③ 손상의 평가지수로 구조물의 Impedance 피크 주파수 쉬프트량 ΔF 를 선정하였으며, 이를 이용해 손상의 크기를 평가할 수 있는 손상 크기 평가 알고리즘을 제안하였다.

본 연구는 구조물의 건강 모니터링 기술을 확립하기 위한 기초 연구로서 앞으로도 더 많은 연구를 수행할 계획이다.

알루미늄 보와 같은 기본 구조물에서 더 나아가 트러스 구조물과 같은 좀 더 구체적인 형상의 계측에 대한 연구가 필요하며, 궁극적으로는 일상생활에서 볼 수 있는 실제의 구조물에 적용할 수 있도록 해야 할 것이다. 더불어 손상 평가를 함에 있어서 Impedance 피크 주파수 쉬프트량 ΔF 이외에도 피크진폭비 변화율과 같은 손상 평가지수를 더욱 확충하여 보다 정밀한 평가가 이루어지도록 해야 할 것이다.

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) 윤기현, 오기영, "압전·전해 액추에이터", 반도출판사, 1995.
- (2) Gunnar Backstrom, "Deformation and Vibration by Finite Element Analysis", PDE Solutions, 2004.
- (3) S.H.Diaz Valdes and C.Soutis, "Delamination Detection in Composite Laminates from Variations of Their Modal Characteristics", "Journal of Sound and Vibration", 1999.
- (4) Zhongwei Jiang and Yasutaka Takeuchi, "Damage Assessment for Truss Structural Health Monitoring with Piezoelectric Impedance-Based Technique" Proceedings of ICMIT'01, 283-286,2001
- (5) 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