

# CFRP 보강 콘크리트 구조물의 PZT센서 기반 구조 건전성 모니터링

## PZT Sensor-based Structural Health Monitoring for CFRP Laminated Concrete Structures

류 성 찬<sup>1)</sup>      김 주 원<sup>2)</sup>      이 창 길<sup>3)</sup>      박 승 희<sup>4)\*</sup>      박 선 규<sup>5)</sup>  
Ryu, Sung Chan      Kim, Ju Won      Lee, Chang gil      Park, Seung Hee      Park, Sun Kyu

### Abstract

A CFRP (Carbon Fiber-Reinforced Plastic) strengthening method is being very widely used to increase the load-carrying capacity of host structures, especially for bridges. However, not only flexure and shear failures but debonding failure also might occur in CFRP strengthened concrete structures. The CFRP debonding failure would cause a collapse accident of the host structure. Therefore, real-time health monitoring about the CFRP bonding condition is strongly required. In this study, a feasibility of the impedance-based damage detection method using PZT sensors is investigated through a series of experimental study monitoring both concrete cracks and CFRP debonding defects.

**Keywords** : Concrete crack, CFRP debonding, PZT, Structural Health Monitoring, Impedance method

### 1. 서론

외부환경에 노출되어 있는 토목구조물들은 혹독한 기후조건, 제설제의 과다 사용 뿐 만 아니라 교통량의 증가, 중차량의 과속 및 과적 등의 이유로 지속적으로 많은 손상을 받고 있다. 현재 국내 교량은 대부분이 2등급 교량이며 많이 노후화되어있기 때문에 내하력과 내구성 문제로 인하여 보수보강공법이 요구되고 있는 실정이다.

기존의 구조물에 대한 보수보강공법은 표면처리 공법, 충전공법, 주입공법, 단면확대공법, 프리스트레싱 보강공법, 강판접착공법, 섬유부착공법 등의 다양한 공법들이 연구되고 있고 실 구조물에 적용되고 있다. 이러한 보수보강이 적용된 구조물은 기존 설계시 예측되었던 파괴모드가 변화하게 되고 이러한 파괴모드의 변화는 결국 구조물의 예측 가능한 파괴경향을 파악하기 어렵게 하는 중요한 변수가 된다.

특히, CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic) 보강공법은 실제 교량에 적용빈도가 높고 연구 활용성에 대한

기대가 큰 공법으로, CFRP로 보강된 콘크리트 구조물은 외부에 예폭시 등으로 접촉된 CFRP로 인하여 휨과피 및 전단과피 외에 부착과피가 추가적으로 발생하게 되며 이러한 부착과피가 전체거동을 지배하게 되는 경우가 대부분이다. 또한 과피시 취성과피를 유발하게 되므로 적절한 유지관리를 도모함으로써 구조물의 붕괴를 미연에 방지하여야 한다.

한편, 이러한 국내 구조물의 효율적인 건전성 모니터링을 위해 최근 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히, 압전센서 및 IT 계측기술 기반 구조 건전성 모니터링 기술은 CFRP 부착과피와 같은 국부적인 구조 손상 감지에 유리한 기법으로 기계/항공 분야에서 활발히 연구되어 왔으며, 실제 구조물에 적용되고 있는 실정이다. 하지만 콘크리트 구조물에서의 실험연구 및 적용은 미미한 상황이며 보다 효율적인 센서의 제작 및 신호계측, 분석 기술에 대한 연구가 필요한 실정이다.[1, 4, 6, 7]

본 연구에서는 CFRP로 보강된 콘크리트 구조물에 대표적인 압전센서 중 하나인 PZT(Piezo-electric) 센서를

1) 정회원, 성균관대학교, u-City 공학과, 석사과정  
2) 정회원, 성균관대학교, u-City 공학과, 석사과정  
3) 정회원, 성균관대학교, 건설환경시스템공학과, 박사과정  
4) 정회원, 성균관대학교, 사회환경시스템공학과, 교수  
5) 정회원, 성균관대학교, 사회환경시스템공학과, 교수

\* Corresponding author : shparkpc@skku.edu 031-290-7525

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2010년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

이용한 손상 모니터링 기법에 대한 적용 방법을 연구하기 위한 목적으로 임피던스 기반 손상검색기법을 사용하여 콘크리트 균열 및 CFRP 부착파괴에 대한 모니터링 실험을 수행하였으며 계측 기법과 국부손상평가 방법에 대해 고찰해 보았다.

제안된 기법의 현장 적용성을 검증하기 위한 향후 연구가 진행된다면, 대표적인 CFRP보강 콘크리트 구조물의 국부손상 평가기술로 발전할 수 있을 것으로 예상된다.

## 2. 임피던스 기반 구조 손상검색기법

임피던스 기반 손상검색기법은 구조물에 부착된 PZT 센서를 고주파영역에서 가진하여 구조물-PZT 센서의 전기-역학적 임피던스를 측정함으로써, 손상 전후의 임피던스 신호 변화를 모니터링하여 손상정도를 추정하는 기법이다. PZT 센서가 구조물에 부착되었을 때 구조물-PZT 센서의 전기-역학적 임피던스는 식(1), (2)와 같이 표현된다(Liang et al, 1994) [3].

$$Z_{total}(\omega)^{-1} = j\omega \frac{wl}{h} \overline{\epsilon}_{33}^T - d_{31}^2 \overline{Y}^E + \left( \frac{Z_a(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} \right) d_{31}^2 \overline{Y}^E \left( \frac{\tan \kappa l}{\kappa l} \right) \quad (1)$$

$$= G(\omega) + jB(\omega) \quad (2)$$

여기서,  $w, l, h$  : PZT 센서의 폭, 길이, 두께이며  $\overline{\epsilon}_{33}^T$ 은 일정한 응력상태에서의 PZT 센서의 유전율,  $d_{31}$ 은 압전 상수,  $\overline{Y}^E$ 은 PZT 센서의 Yong's modulus,  $\kappa$ 는 파수 (wave number),  $Z_s(\omega)$ 와  $Z_a(\omega)$ 는 각각 구조물과 PZT 센서의 임피던스를 의미한다. 구조물과 PZT 센서의 전기-역학적 임피던스는 식(2)와 같이  $G(\omega)$ (실수부)와  $B(\omega)$ (허수부)로 표현될 수 있으며 Bhalla et al, (2002) [2]에 의해 구조물의 손상 변화에 대해 임피던스의 실수부가 허수부에 비해 더욱 민감하게 반응함이 증명되었다. 이처럼 임피던스 기반 구조 손상 검색 기법은 '임피던스'라는 구조물의 고주파 동적응답을 사용하여 측정주파수 영역에서 임피던스 신호의 크기뿐만 아니라 공진주파수의 변화까지도 동시에 모니터링하고 있으므로 구조 손상의 정량화를 위해 식(3)에서와 같이 표현되는 RMSD (Root Mean Square Deviation) 값을 손상지수로 이용한다.

$$RMSD(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \{Re(Z_{i,1}) - Re(Z_{i,0})\}^2}{\sum_{i=1}^n \{Re(Z_{i,0})\}^2}} \times 100 \quad (3)$$

여기서,  $Re(Z_{i,0})$ 와  $Re(Z_{i,1})$ 은 각각 손상 전 (Baseline)과 손상 후의 임피던스 신호의 실수부를 의미하며, 이러한 RMSD 손상지수를 사용할 때, 손상의 유무를 판단하는 기준이 되는 임계값 설정이 필요하며 이 임계값은 outlier analysis를 이용하여 결정한다(박규해 등 2005) [5].

## 3. 실험 연구

### 3.1 실험 장비

본 논문에서는 압전 다결정 소자 중 납, 지르콘산염, 티탄산염으로 이루어진 PZT 센서를 사용하였다. PZT 센서는 압전특성이 우수하여 감지도가 높고 가격이 저렴하고 작은 전압으로 작동이 가능하다. 또한 다양한 형상으로 제조가 가능하여 가장 광범위하게 사용되고 있다. Photo 1은 PZT 센서와 PZT 센서의 부착된 모습을 보여 주고 있다.

측정장비는 Photo 2와 같이 HIOKI 3532-50 LCR 하 이테스터를 사용하였다. 측정 주파수는 43Hz에서 5MHz

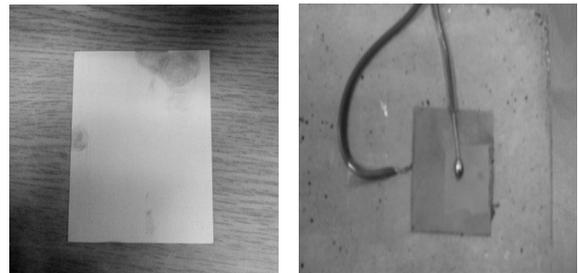


Photo 1 PZT(Piezo-electric) sensors

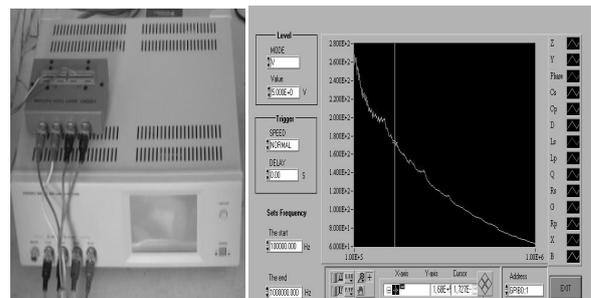


Photo 2 Impedance data acquisition (DAQ) system

의 고주파 영역까지 측정이 가능하며 기본 정확도는 0.08%의 오차범위이며 최고 속도 5m/s로 고속측정이 가능하다. 계측 프로그램은 LabVIEW 8.6을 사용하였다.

### 3.2 콘크리트 균열 모니터링

#### 3.2.1 실험 개요

콘크리트 구조물에 균열이 발생하면 구조물의 강성과 감쇠 및 고유 주파수가 변화하게 된다. 이러한 변화로 인해 구조물-PZT센서의 전기-역학적 임피던스가 변화하게 되고 공진 주파수가 변화하게 된다.

본 논문에서는 콘크리트의 균열정도에 따른 임피던스의 변화를 파악하기 위하여 Photo 3과 같이 100mm×100mm×400mm의 콘크리트 시편에 35mm×35mm×0.254mm의 PZT센서를 이용하는 실험을 수행하였다.

가진 주파수는 100Hz ~ 5MHz 범위를 측정된 결과 공진 주파수가 가장 뚜렷하게 나타나는 200KHz ~ 600KHz로 설정하였으며 균열정도에 따른 임피던스의 변화를 파악하기 위하여 콘크리트 시편의 한쪽 끝단에서 7cm 떨어진

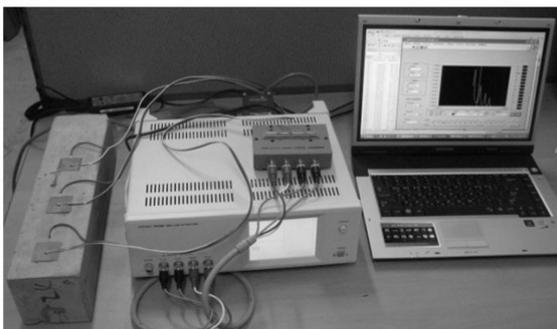
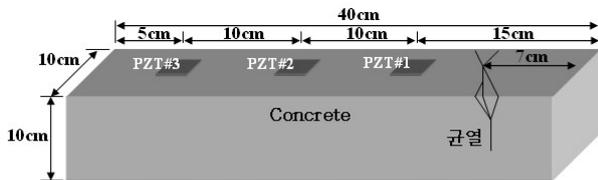
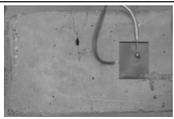


Photo 3 Experimental setup for concrete crack monitoring

Table 1 Damage scenario for concrete crack monitoring

시나리오	균열양상	시나리오	균열양상
Baseline	-	Crack level 1 (0.1mm)	
Intact	-	Crack level 2 (1mm)	

지점에서 충격을 주어 0.1mm(Crack Level1) 및 1mm (Crack Level2)의 균열을 인위적으로 유발하여 임피던스를 계측하였다. 해당 균열시나리오가 Table 1에 정리되었다. 콘크리트 균열손상에 대한 PZT센서의 감지영향을 파악하기 위하여 10cm 간격으로 3개의 PZT센서를 배치하였다. 측정 온도는 항온 상태를 유지하였고 다른 환경적인 변수 및 오차율을 확인하기 위하여 Baseline과 같은 상태 (Intact)에서 임피던스를 계측하였다.

#### 3.2.2 실험 결과

PZT센서에서 계측된 임피던스 신호를 Figs. 1, 2, 3에 나타내었다. 임피던스 신호는 신호잡음을 제거하기 위해

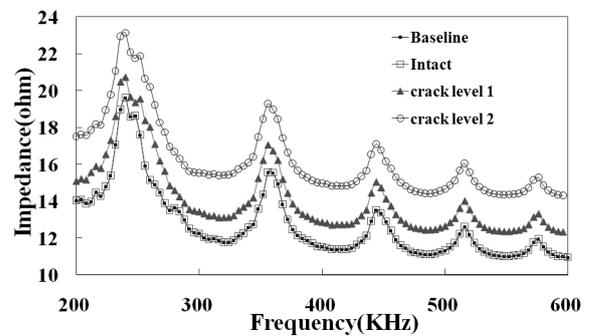


Fig. 1 Impedance measured at PZT#1

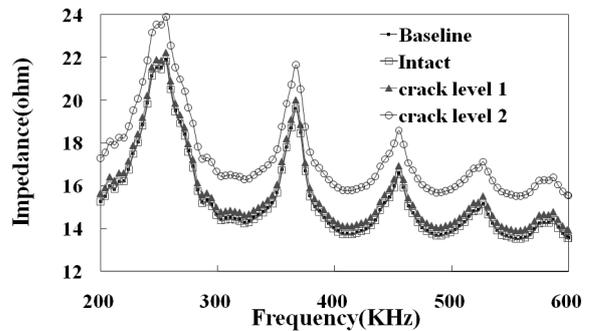


Fig. 2 Impedance measured at PZT#2

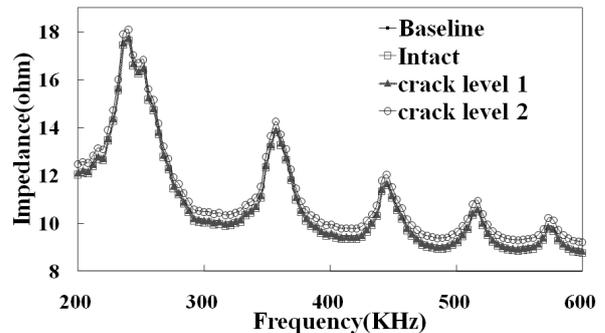


Fig. 3 Impedance measured at PZT#3

서 계측치에 대해 5회 평균값을 사용하였고, Baseline과 Intact의 신호는 거의 차이가 없어 다른 환경적인 영향요소는 없는 것으로 나타났다. 각각의 PZT센서에서 계측된 임피던스 신호는 균열이 발생하면서 공진주파수의 양상이 다소 변화하고 임피던스 크기가 커지는 경향이 나타났다. 또한, 0.1mm의 균열상태 보다 1mm의 균열이 발생하였을 때 임피던스 신호의 변화량은 현저하게 변화함을 알 수 있었고 균열 지점에서 거리가 멀어질수록 신호의 변화량은 적음을 확인할 수 있었다.

이러한 임피던스 신호의 변화를 정량적으로 파악하기 위해 식(3)에서 보여지는 RMSD(Root Mean Square Deviation)를 사용하여 Table 2에 나타내었다.

RMSD의 분석 결과 무 손상 상태에서의 기본 오차율은 0.5% 이하로 나타났으며, 균열 지점에서 8cm 떨어진 PZT#1센서의 RMSD(%)는 0.1mm균열이 발생하였을 때 12.286%, 1mm일 때 32.616%로 균열 정도를 RMSD를 통해 정량적으로 표현할 수 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 균열 지점에서 PZT센서의 거리가 멀어질수록 손상에 대한 감지도는 현저히 떨어짐을 알 수 있었다. 특히, 균열 지점에서 28cm 떨어진 PZT#3의 RMSD(%)를 살펴보면 Intact와 Crack level 1과 거의 차이가 없어 0.1mm의 미세한 균열은 거의 감지하지 못함을 알 수 있었다. Fig. 4는 계측 거리에 따른 임피던스

신호의 RMSD를 그래프로 나타낸 것이다.

콘크리트 균열정도에 따른 임피던스의 변화는 모든 PZT센서에서 감지할 수 있었지만 미세균열의 모니터링을 위해서는 PZT센서의 계측 범위를 균열(0~7cm)에서 PZT#2(~25cm)사이의 거리인 18cm 이내로 설정하는 것이 바람직하다고 판단할 수 있었다.

### 3.3 CFRP 부착파괴 모니터링

#### 3.3.1 실험 개요

CFRP 부착파괴 모니터링을 위하여 Photo 4와 같이 150mm×200mm×1000mm의 콘크리트 보를 CFRP plate로 보강하였다. 사용된 CFRP는 1방향 CFRP를 사용하였으며 50cm길이를 에폭시를 사용하여 부착하였다.

실험은 3가지 목적으로 수행되었다. 첫째, CFRP plate 재료에 적합한 측정 가진 주파수를 설정하기 위하여 가진 주파수의 변화를 주어 측정 주파수에 따른 계측 특성을 분석하였다. 둘째, CFRP 부착파괴에 따른 임피던스 신호의 변화를 분석하기 위해 CFRP 끝단에서부터 3cm, 6cm, 9cm로 CFRP를 부착파괴시켜 임피던스를 측정하였다. 그리고 셋째, 거리에 따른 PZT센서의 감지도를 분석하기 위하여 CFRP plate 한쪽 끝단에서 15cm 떨어진 지점부터

Table 2 Damage evaluation using RMSD(%)

시나리오	RMSD(%)		
	PZT#1	PZT#2	PZT#3
Baseline	-	-	-
Intact	0.526	0.321	0.412
Crack level 1	12.286	2.336	0.912
Crack level 2	32.616	12.869	4.105

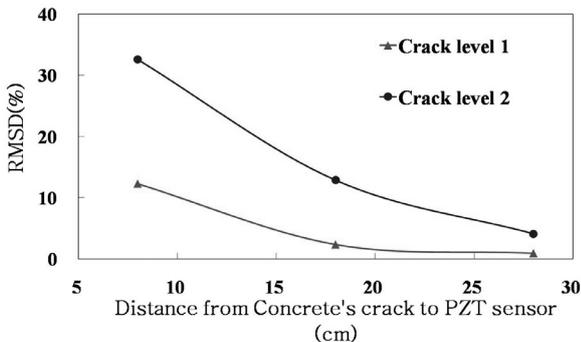


Fig. 4 RMSD(%) according to sensing distances

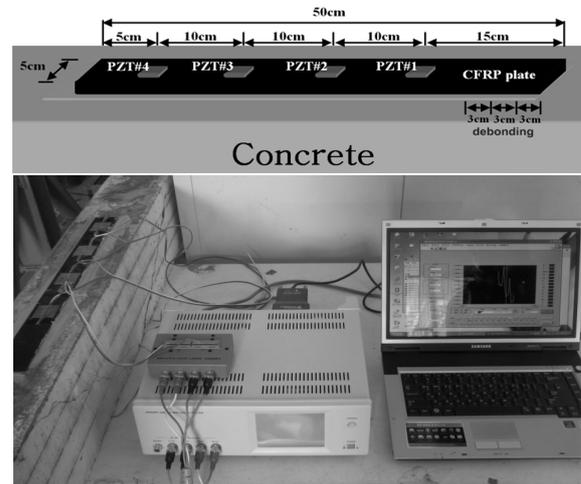


Photo 4 Experimental setup for CFRP debonding monitoring

Table 3 Damage scenario for CFRP debonding monitoring

시나리오	부착파괴 길이(cm)	시나리오	부착파괴 길이(cm)
Baseline	0	부착파괴1	3
Intact	0	부착파괴2	6
		부착파괴3	9

35mm×35mm의 PZT센서를 10cm간격으로 4개를 부착하여 임피던스를 측정하였다. CFRP 부착과피 모니터링을 위한 손상유발 시나리오는 Table 3과 같았다.

### 3.3.2 실험 결과

임피던스 신호는 각 5회 측정하여 평균값으로 계산하였고 항온 상태를 유지하여 측정을 실시하였다. Figs. 5와 6은 가진 주파수를 다르게 하여 PZT#1에서 측정한 임피던스 신호이다. 100Hz ~ 5MHz의 가진 주파수 범위에서 CFRP와 PZT의 전기-역학적 임피던스를 측정하고 결과 30KHz ~ 60KHz와 300KHz ~ 600KHz의 가진 주파수의 범위에서 공진이 뚜렷하게 나타나 두 가진 주파수 범위에서 임피던스를 측정하여 비교하였다.

30KHz ~ 60KHz의 범위에서 측정한 임피던스 신호는 임피던스의 크기의 변화는 거의 나타나지 않았고 공진주파수의 변화를 확인할 수 있었다. 이에 비해 300KHz ~ 600KHz의 범위에서 측정한 임피던스 신호는 공진 주파수의 변화보다 임피던스 크기의 변화가 두드러지게 나타났다. Table 4에 PZT#1에서 측정한 임피던스 신호의 RMSD(%)를 나타내었다. RMSD를 통해 분석한 결과

300KHz ~ 600KHz의 영역에서의 RMSD(%)가 약 2배 정도 크게 나와 CFRP 부착과피의 감지는 300KHz ~ 600KHz의 고주파 범위에서 측정하는 것이 적합하다고 판단하였다. 따라서 본 논문에서는 300KHz ~ 600KHz의 가진 주파수 범위에서 임피던스를 측정하였다.

Figs. 6, 7, 8, 9에 300KHz ~ 600KHz의 가진 주파수 영역에서 각각의 PZT 센서에서 측정한 임피던스 신호를 나타내었고, Table 5에 RMSD(%)를 분석결과를 나타내었다. 임피던스 신호는 전체적으로 공진주파수의 변화보다는 임피던스 크기의 변화가 두드러지게 나타났고 3cm, 6cm, 9cm의 CFRP 부착과피 정도가 커짐에 따라 임피던스 신호의 변화량도 크게 나타났다.

RMSD(%)의 분석결과 무 손상상태(Intact)에서의 기본 오차율은 0.4% 이내로 나타났으며 부착과피 위치에서 가장 가까운 PZT#1센서의 RMSD(%)의 경우 CFRP debonding 정도에 따라 각각 2.218%, 3.903%, 7.001%로 부착과피 정도를 RMSD를 통해 정량적으로 표현할 수 있었으며 PZT#2, PZT#3에서 측정한 임피던스 신호역시 비슷한 양상을 나타내었다. Fig. 10은 부착과피 거리에 따른 각 PZT센서에서 측정한 임피던스 신호의 RMSD를 보여주고 있다. 부착과피 지점에서 거리가 멀어질수록 PZT센서의 감지도가 감소하는 경향을 보이지만 25cm이내에 있는 PZT#1과 PZT#2에서 측정한 임피던스 신호의 RMSD는 크게 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 또한, PZT센서가 30cm이상 떨어졌을 경우 감지도가 현저히 감소함을 확인할 수 있었다. 특히 40cm이상 떨어져 있는 PZT#4에서 측정함 임피던스 신호의 RMSD의 경우에는 CFRP 부착과피와 관계없이 신뢰할 수 없는 수치가 측정되었다.

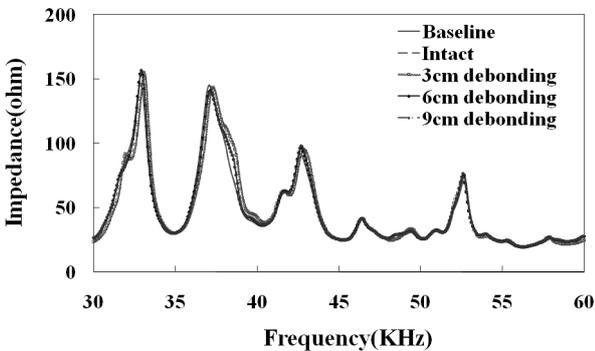


Fig. 5 Impedance measured at PZT#1 (Frequency range: 30KHz ~ 60KHz)

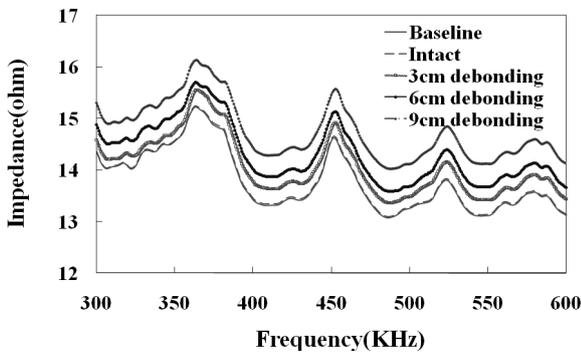


Fig. 6 Impedance measured at PZT#1 (Frequency range : 300KHz ~ 600KHz)

## 4. 결론

본 논문에서는 PZT센서를 이용한 임피던스 기반 손상

Table 4 RMSD(%) of impedance data at PZT#1 according to frequency ranges

시나리오	부착과피 길이 (cm)	RMSD(%)	
		30KHz ~ 60KHz	300KHz ~ 600KHz
Baseline	0	-	-
Intact	0	0.220	0.395
부착과피1	3	1.321	2.218
부착과피2	6	1.926	3.903
부착과피3	9	4.125	7.001

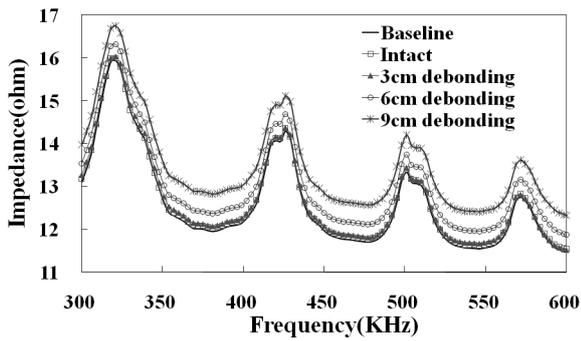


Fig. 7 Impedance measured at PZT#2

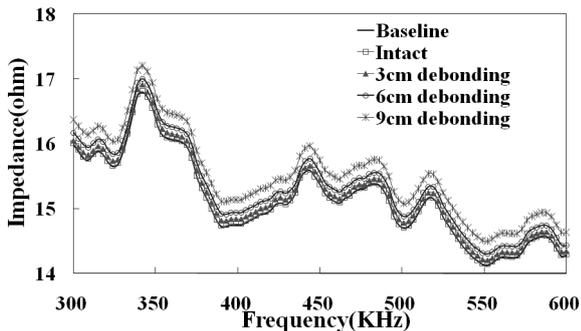


Fig. 8 Impedance measured at PZT#3

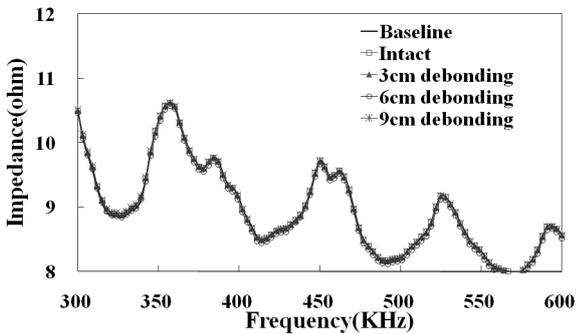


Fig. 9 Impedance measured at PZT#4

Table 5 Damage evaluation using RMSD(%)

시나리오	RMSD(%)			
	PZT#1	PZT#2	PZT#3	PZT#4
Baseline	-	-	-	-
Intact	0.395	0.295	0.205	0.196
부착파괴1	2.218	0.870	0.571	0.273
부착파괴2	3.903	3.224	1.120	0.646
부착파괴3	7.001	6.774	2.516	0.283

검색기법을 CFRP로 보강된 RC구조물 모니터링에 적용하기 위하여 콘크리트 균열 및 CFRP 부착파괴 모니터링에 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

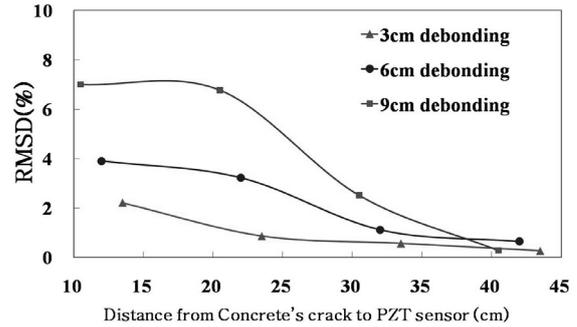


Fig. 10 RMSD(%) according to sensing distances

- 1) 구조물은 손상을 받거나 상태가 변화하게 되면 질량, 강성, 감쇠 및 고유주파수가 변화하게 된다. 이러한 변화로 인해 구조물-PZT센서의 전기-역학적 임피던스의 크기 및 공진주파수가 변화하게 된다. 이러한 특성을 통하여 PZT센서를 이용한 임피던스 기반 손상검색 기법은 콘크리트 균열과 CFRP 부착파괴 모니터링에 적용이 가능함을 확인할 수 있었다.
- 2) 구조물-PZT센서의 전기-역학적 임피던스는 가진 주파수에 따라 변화하며 구조물의 역학적 임피던스 신호의 공진주파수가 잘 표현되는 구간을 설정해주어야 하며 측정 대상 구조물에 따라 그 범위가 다르다. 콘크리트와 CFRP는 측정결과 각각 200KHz ~ 300KHz, 300KHz ~ 600KHz사이의 고주파 영역에서 균열 및 부착파괴에 대한 임피던스 신호의 변화가 가장 잘 나타남을 확인할 수 있었다.
- 3) 미세한 콘크리트 균열과 CFRP 부착파괴의 감지를 위해 PZT센서의 센싱 범위는 콘크리트 균열 모니터링은 18cm이내 CFRP 부착파괴 모니터링은 25cm이내로 측정하는 것이 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.
- 4) 콘크리트 균열과 CFRP 부착파괴 모니터링 실험을 통하여 임피던스 기반 손상검색 기법이 국부적인 상태 변화감지에 효과적인 모니터링 기법임을 확인함으로써 CFRP로 보강된 RC구조물 모니터링에 적용 가능성을 확인하였다.

특히, 전체적인 거동이 변화하고 국부적인 손상이 구조물의 파괴에 큰 영향을 미치는 보수·보강된 구조물의 경우에 임피던스 기반 손상검색 기법을 통한 구조물 건전성 모니터링은 매우 효과적이라 판단된다. 하지만현재의 연구결과는 실험실의 이상적인 환경에서 얻어진 결과이므로 여러 가지 외부환경에 노출된 현장조건을 고려하여 계

---

측기법 및 손상평가방법에 대한 지속적인 실험연구가 수  
받되어야 된다고 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 u-City 석박사과정 지원사업,  
한국토지주택공사, 그리고 한국건설교통기술평가원 지정  
R&D (06건설핵심 B05)의 지원에 의해 수행되었으며 이  
들의 전폭적인 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 박승희 "PZT센서의 Electro-Mechanical Impedance를 이용  
한 토목구조물의 손상검색기법" 한국과학기술원 공학석사 학위  
논문, 2004
2. Bhalla, S., Naidu, A.S.k, C.K., "Influence of structure  
actuator Interaction and temperature on piezoelectric  
signatures for NDE", Proc. ISSS-SPIE 2002  
International Conference on Smart Materials Structures  
and Systems. 2002, 5062
3. Lang, L., Sun, F.P and Rogers, C.A., "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,  
pp.12-20
4. Park, G., Cudney, H. and Inman, D.J., "Impedance-based  
health monitoring of civil structural components", The  
Shock and Vibration Digest. 33(4), 2001, pp.269-280
5. Park G., Rutherford, Shon H., R., Farrar "An Outlier  
Analysis Framework for Impedance-based Structural  
Health Monitoring", Journal of Sound and Vibration,  
2005, pp.229-250
6. Park S., Yun, C.B., Roh, Y. and Lee, J.J., "Health  
monitoring of steel structures using impedance of  
thickness modes at PZT patches", Smart Structures and  
Systems. 5, 2005, pp.12-20
7. Park S., Yun, C.B., Roh, Y. and Lee, J.J., "PZT-based  
active damage detection techniques for steel bridge  
components", Smart Materials and Structures. 15, 2006,  
pp.957-966

(접수일자 : 2010년 1월 5일)

(수정일자 : 2010년 4월 20일)

(심사완료일자 : 2010년 4월 23일)

---

## 요 지

CFRP보강공법은 구조물에 내하력을 증가시키기 위해 사용되고 있으며 실제 교량에 적용빈도가 높고 연구 활용성에 대한 기  
대가 큰 공법이다. CFRP로 보강된 콘크리트 구조물은 외부에 에폭시 등으로 접착된 CFRP로 인하여 휨파괴 및 전단파괴 외에  
부착파괴가 추가적으로 발생하게 되며 이러한 부착파괴가 전체거동을 지배하게 되는 경우가 대부분이며, 취성파괴를 유발하게  
된다. 따라서 이러한 CFRP 부착파괴에 대한 모니터링은 매우 중요한 의미를 갖는다. 본 논문에서는 국부적인 손상 파악에 유  
리한 PZT센서를 이용한 임피던스 기반 손상검색 방법을 사용하여 콘크리트 균열과 CFRP 부착파괴 모니터링에 대한 적용가능  
성을 검증해 보았다.

**핵심 용어** : 콘크리트 균열, CFRP 부착파괴, PZT센서, 임피던스 기법

---