

CFRP 판 보강 RC보의 균열 및 박리 손상 모니터링

Crack and Debonding Monitoring of RC Beams Strengthened with CFRP Plates

윤준호¹⁾ 한정현²⁾ 조두용^{3)*} 박선규⁴⁾
Yoon, Jun Ho Han, Jung Hun Cho, Doo Yong Park, Sun Kyu

Abstract

A CFRP (Carbon Fiber-Reinforced Plastic) strengthening method being widely used to increase the load-carrying capacity of structures is very suitable for existing bridge structures. However, not only flexure and shear failures but also debonding failure might be additionally occurred in reinforced concrete(RC) beams strengthened with the CFRP plates. The CFRP debonding failure would cause a brittle fracture of the beam. Therefore, health monitoring for the CFRP bonding condition is strongly required. In this study, a feasibility of the impedance-based damage detection method using PZT sensors was investigated through a series of experimental studies for realtime structural health monitoring(SHM) for the CFRP laminated concrete structures.

Keywords : Crack, Debonding, CFRP, Health monitoring, Impedance method

1. 서론

보수보강된 구조물은 기존 설계 시 예측되었던 파괴모드가 변화하게 된다. 이러한 변화는 결국 구조물의 예측 가능한 파괴 경향을 파악하기 어렵게 하는 중요한 변수가 된다. 따라서 보수보강된 구조물은 변화된 파괴모드를 고려한 실시간 상시계측을 통하여 구조물의 이상 거동을 감지하고, 적절한 유지관리를 도모함으로써 시설물의 붕괴를 미연에 방지해야 한다(류성찬 등 2010).

사회기반 시설물의 효율적인 건전성 모니터링을 위해 최근 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 IT기반 스마트 센서 및 이를 이용한 스마트 모니터링 기술은 국부적인 손상의 추정에 유리한 기법으로 보수보강된 구조물에 적용하는데 있어 효율적인 기법이다.(이진학 등, 2004)

스마트 센서를 이용한 구조물의 손상 모니터링 방법에 관한 연구는 미국, 일본 등의 선진국에서는 이미 꾸준히 진행되어 왔으나 계측 데이터를 이용하여 구조물의 손상 상태를 정량적으로 평가하는 것이 어렵고 구조물의 특성에 맞는 측정과 평가방법에 대한 기준이 확립되지 않아

실용화 단계까지 발전하지 못하고 있는 상태이며 이를 보완하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 스마트 센서로 사용되는 압전소자는 B. Jaffe(1950)에 의해 온도, 습도의 변화와 시간 경과에 대해 안정된 재료 특성을 가지며, 이후에 압전성이 우수한 PZT(Piezo-electric)계 압전 세라믹스가 발견됨에 따라 본격적으로 개발되기 시작하여 임피던스 기반 구조물의 검색 기법(Giurgiutiu (1999)), 전자파를 이용한 구조물 검색 기법(Kessler (2002)) 등을 이용한 구조물 손상검색 기법 개발에 관한 연구와 계측된 신호처리 기법(Sohn and Farrar (2001))과 신호 패턴인식(Farrar(2000))을 통한 구조물의 손상도 평가에 관한 연구가 지속적으로 진행되어 왔다.

한편, 국내에서는 박승희 등(2005)이 압전센서를 이용한 구조물 건전성 평가에 관한 연구를 수행하였으며 지능형 센서 중의 하나인 PZT센서를 이용하여 알루미늄, 강재 및 콘크리트의 균열손상, 강재의 볼트 풀림 등의 손상 모니터링 실험을 수행하여 모니터링 기법 검증 및 적용 방법을 제시하였다. 또한 홍용(2009)은 PZT 센서를 이용하여 구조물의 손상의 크기와 위치에 따른 임피던스 파형의 관계를 조사하

1) 학생회원, 성균관대학교 u-City공학과 석사과정
2) 학생회원, 성균관대학교 u-City공학과 석사과정
3) 정회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 연구교수
4) 정회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 정교수

* Corresponding author : dooyongcho@skku.edu 031-290-7530
• 본 논문에 대한 토의를 2011년 7월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

였고 손상평가지수로 임피던스 피크의 쉬프트 량을 사용하여 손상정도를 파악하였으며 김대민(2008)은 PZT센서를 이용한 Coherence기반 비파괴 검사기법을 콘크리트 구조물의 손상 모니터링에 적용해 검사기법을 제안하고 평가하였다.

본 연구에서는 실제 교량에 적용빈도가 높고 활용성에 대한 기대가 큰 보수보강 공법인 FRP보강공법이 적용된 구조물에 PZT센서를 이용한 손상 모니터링 기법에 대한 적용 방법을 연구하기 위한 목적으로 수행되었다. 구조물에 FRP보강공법이 적용되면 변화하는 파괴모드로 인해 파괴거동을 파악하기 어렵게 된다. 효율적인 손상 모니터링을 위하여 RC 보의 파괴양상을 파악하였으며 적절한 센서 위치와 계측 시 주목해야할 부분을 결정하였다.

또한 본 실험에서는 철근콘크리트 보 실험체를 제작하여 CFRP 판보강을 실시하였으며, 하중단계 별로 임피던스를 측정하였다. 이를 통해 FRP로 보강된 철근콘크리트 보의 국부적 및 전체적인 거동을 분석하여 FRP보강 공법이 적용된 구조물의 손상 모니터링 기법에 대하여 임피던스를 기반으로 한 PZT센서의 적용성을 검토하고 모니터링 방법에 대해 고찰을 수행하였다.

2. 손상 검색 기법

2.1 임피던스 기반 손상 검색 기법

구조물에 부착된 지능형 센서인 PZT센서를 고주파영역에서 가진 후에 구조물-PZT센서의 전기-역학적 임피던스를 측정함으로써, 손상 전후의 임피던스 신호변화를 모니터링하여 손상정도를 추정하는 기법이 임피던스 기반 손상 검색 기법이다.

임피던스 기법은 구조물의 재료특성, 형상 및 질량 그리고 온도, 손상의 종류 등 다양한 인자에 따라 임피던스 신호의 변화양상이 달라기 때문에 정량적인 평가 기준을 확립하기 어렵다. 따라서 실 구조물에 적용을 위해서는 먼저 대상 구조물의 거동을 미리 파악하여 위험 구간에서의 국부적인 손상 모니터링을 통하여 구조물의 건전성을 파악하는 것이 효율적인 방법이라 할 수 있다. 그리고 무손상 상태에서 구조물-PZT센서의 전기-역학적 임피던스의 영향을 주는 인자들을 확인하고 그런 인자들로 인한 임피던스의 변화양상을 파악해야 한다.

특히, 실제 교량구조물은 교통하중 등에 의해 콘크리트 및 FRP에 변형 및 진동이 발생하기 때문에 임피던스의

패턴을 분석하고 손상지수의 변화량의 파악이 선행되어야 하며 이러한 인자들의 영향을 보정하거나 기본 오차율로 가정하여 손상으로 인한 임피던스 신호의 변화만을 구분할 수 있는 기초를 마련하여야 한다.

본 실험에서는 CFRP로 보강된 콘크리트 보에 하중을 주어서 균열이 발생하거나 CFRP의 박리를 임피던스의 신호변화에 어떤 영향을 끼치는지를 통하여 손상정도를 확인하고자 한다.

지능형 센서인 PZT센서가 구조물에 부착되었을 때 구조물-PZT센서의 전기-역학적 임피던스(EMI : Electro-Mechanical Impedance)는 식 (1), (2)와 같이 표현된다(Liang et al, 1994).

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

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

위 식에서 w, l, h : PZT 센서의 폭, 길이, 두께이며 $\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_{33}}$ 은 일정한 응력상태에서의 PZT 센서의 유전율, d_{31} 은 압전상수, $\overline{Y^E}$ 은 PZT센서의 Young's modulus, κ 는 파수(wave number), $Z_s(\omega)$ 와 $Z_a(\omega)$ 는 각각 구조물과 PZT센서의 임피던스를 의미한다.

구조물과 PZT센서의 전기-역학적 임피던스는 식 (2)와 같이 $G(\omega)$ (실수부)와 $B(\omega)$ (허수부)로 표현될 수 있으며 Bhalla et al (2002)에 의해 구조물의 손상 변화에 대해 임피던스의 실수부가 허수부에 비해 더욱 민감하게 반응함이 증명되었다.

2.2 공진주파수를 이용한 손상지수(RMSD : Root Mean Square Deviation) 방법

앞에서 언급된 임피던스 기반 구조 손상 검색 기법은 얼마나 손상이 되었는지에 대해서 정량화되어 있지 않아서 신뢰성을 얻기에는 역부족이다. 임피던스 기반 구조 손상 검색 기법은 구조물의 균열 등 손상에 의한 역학적 임피던스라는 구조물의 고주파 동적응답인 구조물-센서 시스템의 EMI 변화를 사용하여, 측정주파수 영역에서 임피던스 신호의 크기뿐 아니라 공진주파수의 변화까지도 동시에 손상을 감지할 수 있기에, 구조 손상의 정량화를 위해 식 (3)에서와 같이 표현되는 RMSD (Root Mean

Square Deviation) 값을 변량/Intact(무 손상상태)에 대입하여 손상지수로 이용한다.

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

여기서, $Re(Z_{i,0})$ 와 $Re(Z_{i,1})$ 은 각각 손상 전(Baseline)과 손상 후를 의미한다. 임피던스 신호의 실수부를 의미하고, RMSD 손상지수를 사용할 때, 손상의 유무를 판단하는 기준이 되는 임계값 설정이 필요하며 이 임계값은 outlier analysis 를 이용하여 결정한다. (Park, G et al, 2001, 2003).

임피던스 응답특성 분석기법으로서는 임피던스 응답 상관계수 분석법, 임피던스 제곱근오차(Root Mean Square Deviation, RMSD) 분석법, 공진주파수(Resonant Frequency) 변화 분석법 등이 있다. 이정미(2008)는 RMSD 기법의 결과가 앞선 기법들에 비해 더 선형적으로 나온 것을 확인하였으며 이는 추후 모니터링에 있어 RMSD 분석기법을 이용할 경우 가장 정확한 측정을 할 수 있을 것으로 판단하였다. 따라서 본 논문에서는 RMSD 기법을 사용하여 임피던스 변화를 관찰하였다.

3. 실험 연구

3.1 실험체 제작 및 실험 방법

보강실험을 위해 단면치수 200 × 300mm, 피복두께

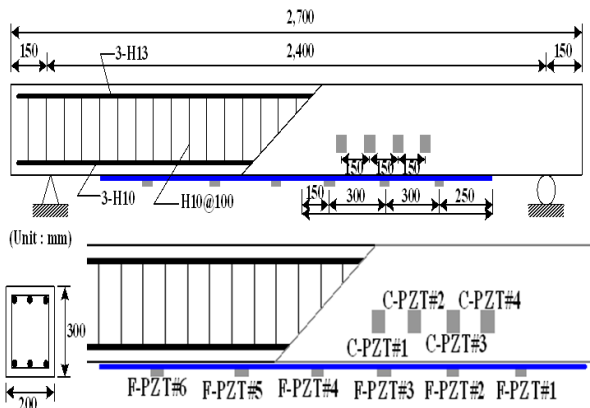


Fig. 1 Specification of specimen and Positions of PZT (Piezo-electric) sensors

30mm, 실험체 총 길이 2700mm, 순지간 길이 2400mm 인 콘크리트 보를 제작하였다. 휨과파괴 및 부착과파괴를 유도하기 위해 인장 측에는 H10 철근을 사용하였으며, 압축 측에는 H13 철근을 사용하였다. 휨 균열에 대한 모니터링을 용이하게 하기 위하여 압축철근을 더 많이 사용하였다. 스티럽은 H10 철근을 사용하였으며 100mm 간격으로 배치하였다. CFRP 판은 길이 2000mm, 폭 50mm 로 콘크리트 보의 하면에 에폭시를 사용하여 부착하였다. CFRP 박리를 모니터링 하기 위하여 CFRP 하면에 30cm 간격으로 35mm × 35mm 크기인 6개의 지능형 센서인 PZT를 부착하였고, 콘크리트의 휨 균열에 대한 모니터링을 위하여 집중 휨 균열이 발생하는 하중 재하 지점으로 부터 각각 7.5cm, 22.5cm, 37.5cm, 52.5cm 떨어진 지점에 35mm × 35mm 크기인 4개의 지능형 센서인 PZT를 부착하였다. 본 실험을 위하여 제작된 실험체의 형상과 상세도 및 PZT센서 부착 위치는 Fig. 1과 같으며 재료 물성은 Table 1~Table 4와 같다.

아래의 Photo 1은 하중재하 및 임피던스 계측 장비를 보여주고 있다. 1000kN 용량의 UTM으로 4점 재하 정

Table 1 Property of concrete(28-day strength)

Specified compressive strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
24	2.3	25.2	2.16×10^4

Table 2 Property of Rebar

Type	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)	Elongation (%)
H10	472.3	725.2	2.01×10^5	14.4
H13	452.6	698.3	2.11×10^5	17.2

Table 3 Property of CFRP

Type	Width (mm)	Thickness (mm)	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus of elasticity (MPa)	Note
Plate	50	1.2	over 3,000	1.5×10^5	SK-CPS 05

Table 4 Property of Epoxy

Type	Dry time (hr)	Bond strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Note
epoxy	within 11	2	35	epoxy putty

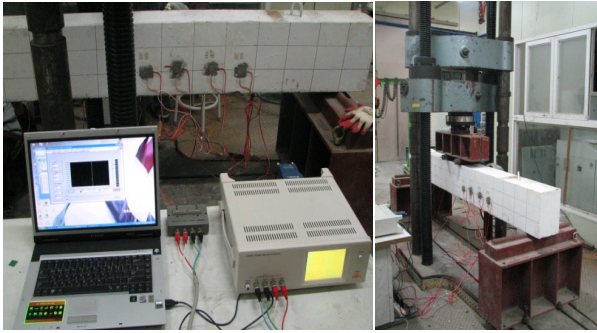


Photo 1 Experimental set up for concrete crack monitoring and concrete beam loading

적 휨 실험을 실시하였고 PZT 센서의 임피던스 신호는 22.54kN(균열하중), 38.2kN, 58.5kN, 76.44kN(CFRP 탈락), CFRP탈락이후 주요균열 2mm정도로 확장되었을 때 계측하였다. 38.2kN과 58.5kN은 균열 변화가 육안 상으로 확연히 드러나는 시점이다. 계측을 위해 LCR 하이테스터를 사용하여 임피던스를 계측하였으며 가진 주파수는 100Hz ~ 5MHz 범위를 측정된 결과 공진 주파수가 가장 뚜렷하게 나타나는 200KHz ~ 600KHz로 설정하였다. 하중은 변위제어 방법을 사용하였으며 수동으로 가력하여 각 하중단계별로 임피던스 신호를 계측하였다. 계측된 임피던스를 그래프로 보기위하여 PC에 LabVIEW 프로그램을 설치하여 확인하였다.

3.2 FRP로 보강된 콘크리트 보의 손상 모니터링

3.2.1 실험개요

보수 및 보강으로 인한 파괴모드의 변화는 구조물의 파괴 경향을 파악하기 어렵게 하는 중요한 변수가 된다. 특히, FRP보강공법이 적용된 콘크리트 보는 외부에 에폭시 등으로 접착된 FRP로 인하여 휨파괴 및 전단파괴 외에 부착파괴가 추가적으로 발생하게 되며 이러한 부착파괴가 전체거동을 지배하게 되는 경우가 대부분이다.

본 논문에서는 이러한 국부적인 손상 파악에 유리한 PZT센서를 이용한 임피던스 기법을 통하여 콘크리트 균열과 CFRP 박리 모니터링에 대한 적용성을 확인하였고, 계측기법과 손상평가 방법에 대해 고찰해 보았다. 또한, CFRP로 보강된 콘크리트 보에 적용하여 정적 실험을 수행하여 손상 단계별 임피던스 계측 및 분석을 통하여 구조물의 취약부 및 전체 파괴거동을 평가해 보았다.

3.2.2 실험결과

콘크리트에 부착된 PZT센서에서의 임피던스 계측은 하중을 가하지 않은 무손상 상태를 포함하여 총 6단계로 계측하였다. 콘크리트 보의 중앙부인 하중재하 부분에 초기 균열이 발생하였으며 CFRP 탈락 이전에는 미소균열만이 발생하였고 CFRP 탈락 이후 급격히 균열 폭이 커졌다. 하중재하에 따른 균열상태의 변화를 Table 5에 나타내었다. 하중 22.54kN(균열하중)에서 콘크리트 보 중앙부 하중재하 부분에 0.1mm 정도의 미소균열 2개소 발생하기 시작했고, 하중 38.2kN에서는 0.1mm 정도의 미소균열이 3개소 더 발생하였고 기존 균열은 0.15mm 정도로 발전하였다. 그리고 하중 58.8kN에서 추가적인 균열은 발생하지 않고 기존 균열의 발전도 미미하였다. 이후에 하중 76.44kN(CFRP 탈락)에서 CFRP가 탈락되면서 콘크리트 보 중앙부의 균열이 0.5mm 정도로 진전하였고 미소균열도 다수 발생하였고, CFRP 탈락 이후 인장 철근이 항복하면서 균열이 계속 진전했다.

콘크리트에 부착된 PZT센서에서 계측된 임피던스 신호는 Fig. 2와 같이 균열이 진전됨에 따라 변화량이 더 커져 균열의 발생이 임피던스 신호의 변화에 영향을 줌을 확인할 수 있었다. 가한 하중이 22.54kN에서 초기 균열이 발생하였을 때 특히 임피던스 신호의 변화가 커졌으며

Table 5 Concrete crack conditions by load levels

Levels	Crack conditions
22.54kN (Crack occurrence)	
38.2kN	
58.8kN	
76.44kN (CFRP debonding)	
After CFRP debonding	

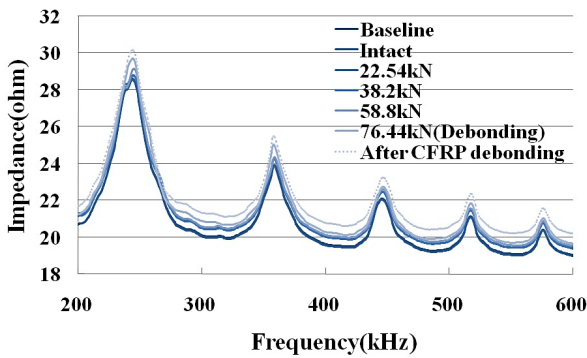


Fig. 2 Impedance measured at C-PZT#1

Table 6 RMSD(%) of impedance data at C-PZT#1

Scenario	RMSD(Root Mean Square Diviation)	Damage evaluations (variate/intact)
baseline	0 %	
intact	0.323 %	1
22.54kN (Crack occurrence)	1.856 %	5.750
38.2kN	1.945 %	6.014
58.8kN	2.336 %	7.223
76.44kN (CFRP debonding)	3.331 %	10.302
After CFRP debonding	5.618 %	17.373

CFRP 탈락 이후 균열 폭이 급격히 증가함에 따라 임피던스 신호 역시 변화 폭이 커짐을 확인할 수 있었다.

Fig. 2와 Table 6에 콘크리트 중앙부에 가장 가까운 C-PZT#1센서에서 측정된 임피던스 신호와 RMSD에 의한 손상지수를 나타내었다. C-PZT#2, C-PZT#3, C-PZT#4에서 측정한 임피던스 신호 역시 콘크리트 균열을 반영하여 변화를 나타내었고 콘크리트 중앙부의 주요 균열에서의 거리가 멀어질수록 임피던스 변화량과 손상지수는 작게 나타났다.

3.2.3 CFRP 부착과피 모니터링 결과

CFRP 판에 부착된 PZT센서에서의 임피던스 측정은 하중을 가하지 않은 무손상 상태(Intact)를 포함하여 총 6단계로 측정하였다. 콘크리트 균열 모니터링 실험과 마찬가지로 하중 단계별로 임피던스 신호를 측정하였으며, 다른 부분은 CFRP 탈락 이전과 이후의 임피던스 신호를 측정하여 비교분석 하였다. CFRP 판에 부착된 임피던스 신호는 초기에는 CFRP 판의 탈락이 보의 왼쪽 끝단에서

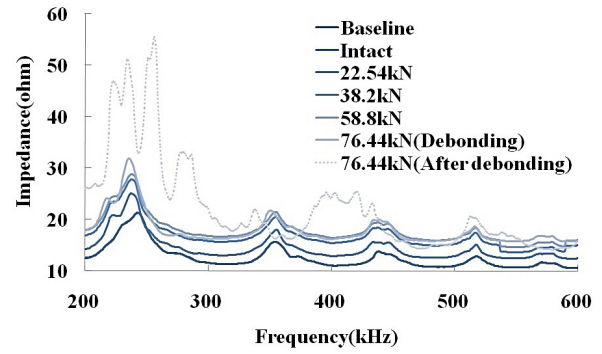


Fig. 3 Impedance measured at F-PZT#3

Table 7 RMSD(%) of impedance data at F-PZT#3

Scenario	RMSD(Root Mean Square Diviation)	Damage evaluations (variate/intact)
baseline	0 %	
intact	0.931 %	1
22.54kN (Crack occurrence)	15.601 %	16.753
38.2kN	18.856 %	20.254
58.8kN	24.436 %	26.247
76.44kN (CFRP debonding)	30.318 %	32.565
76.44kN (After CFRP debonding)	95.514 %	102.568

발생했음에도 불구하고 콘크리트 보의 중앙부에서 가장 많은 변화가 나타났다. 이것은 CFRP 판의 변형 및 균열로 인한 CFRP의 박리의 발생의 영향으로 임피던스 신호가 변화한 것으로 판단할 수 있다.

본 실험에서의 CFRP 판에 부착된 PZT 센서에서 76.44kN 이전에 측정된 임피던스 신호의 변화는 CFRP 박리 보다는 CFRP 판의 변형률에 따른 변화라고 판단된다. Fig. 3은 콘크리트 보의 중앙부에 부착된 F-PZT#3에서 측정한 임피던스 신호를 나타낸 것이다. CFRP 판 탈락 이전에는 임피던스 신호의 크기가 일정하게 증가함을 알 수 있었다. 콘크리트 보 실험체는 76.44kN에서 CFRP 판 탈락의 징후를 보였고 CFRP 탈락 직전에 측정한 임피던스 신호는 이전의 임피던스 신호의 변화와는 다른 양상을 보였다. 임피던스의 크기뿐 아니라 공진주파수와 임피던스 신호의 형태 또한 변화를 보였다. CFRP 판 탈락 이후의 임피던스 신호는 Fig. 3과 같이 이전과 전혀 다른 모양의 임피던스 신호가 측정되었다. 이것은 CFRP

탈락 시 PZT센서가 손상을 입어 PZT센서의 공진 주파수가 변화하여 발생한 결과로 판단된다. Fig. 4는 CFRP 판의 탈락이 발생한 위치인 F-PZT#6에서 측정한 임피던스 신호를 나타낸 것이다. 하중이 증가할수록 CFRP의 변형에 따라 임피던스 신호는 일정하게 변화함을 확인할 수 있었고, CFRP 판 탈락 직전에 임피던스 신호의 변화가 크게 증가하는 것으로 CFRP 박리가 발생하였음을 확인할 수 있다.

3.3 구조물 손상평가 및 실 구조물 적용에 대한 고찰

임피던스 기법은 국부적인 손상 등으로 인한 상태변화 감지를 바탕으로 구조물의 건전성을 모니터링하는 기법으로 아래와 같이 CFRP보강 RC보의 손상 상태 및 거동 예측이 가능하다.

Fig. 5는 CFRP 보강 RC보의 균열양상, Fig. 6과 Fig. 7은 각각 콘크리트와 CFRP 보강판에 부착한 PZT센서에서 측정한 임피던스를 RMSD로 분석한 결과이다. CFRP 보강 RC보는 22.5kN에서 1번과 2번 균열이 발생하였고 C-PZT#1, C-PZT#2, C-PZT#3, C-PZT#4의 손

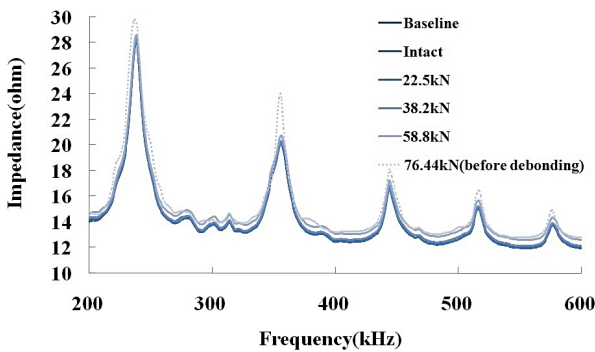


Fig. 4 Impedance measured at F-PZT#6

Table 8 RMSD(%) of impedance data at F-PZT#6

Scenario	RMSD(Root Mean Square Diviation)	Damage evaluations (variate/intact)
baseline	0 %	
intact	0.931 %	1
22.54kN (Crack occurrence)	8.602 %	9.237
38.2kN	12.071 %	12.962
58.8kN	20.608 %	22.130
76.44kN (Before CFRP debonding)	31.644 %	44.719

상지수는 각각 5.750, 2.353, 2.115, 1.230으로 나타나 C-PZT#1 왼쪽 부분에 균열이 발생하였음을 확인할 수 있다.

또한 Fig. 6의 손상지수를 바탕으로 38.2kN에서 4번 균열, 58.8kN에서 6번균열 그리고 76.44kN에서 8번 균열이 발생하였음을 예측할 수 있다. CFRP 탈락 이후 균

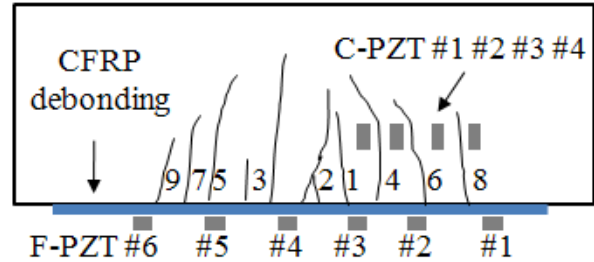


Fig. 5 Crack appearance of CFRP strengthened concrete beam

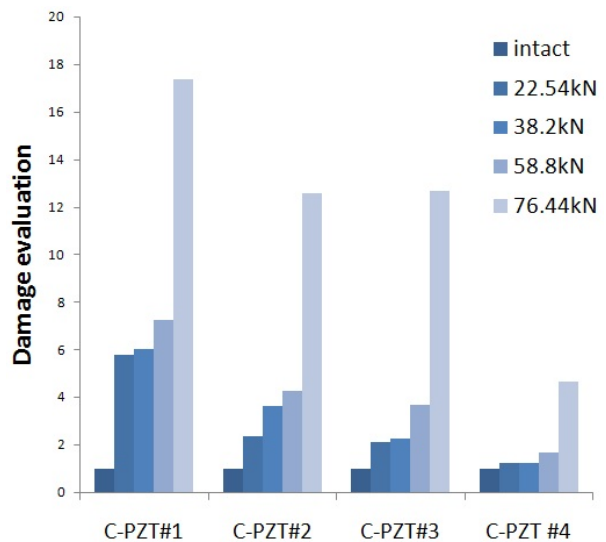


Fig. 6 Damage evaluations of C-PZT sensors bonding on concrete

Table 9 Damage evaluations of C-PZT sensors bonding on concrete beam

Scenario	Damage evaluations			
	C-PZT#1	C-PZT#2	C-PZT#3	C-PZT #4
intact	1	1	1	1
22.54kN (Crack occurrence)	5.750	2.353	2.115	1.230
38.2kN	6.014	3.598	2.235	1.234
58.8kN	7.223	4.236	3.658	1.654
76.44kN (Before CFRP debonding)	17.373	12.548	12.658	4.658

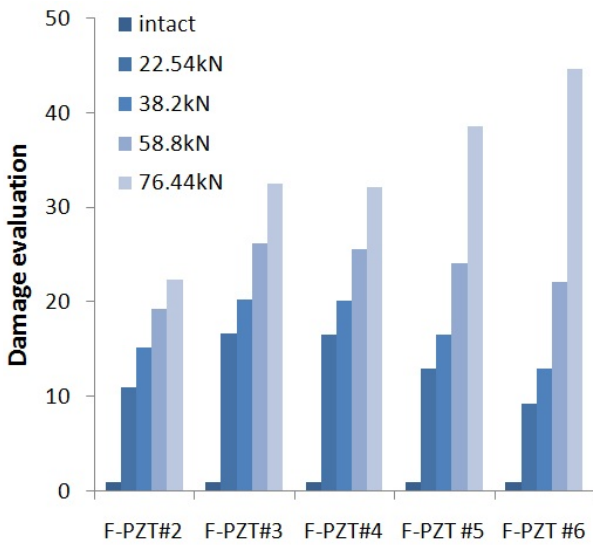


Fig. 7 Damage evaluations of F-PZT sensors bonding on CFRP

Table 10 Damage evaluations of F-PZT sensors bonding on CFRP

Scenario	Damage evaluations				
	F-PZT#2	F-PZT#3	F-PZT#4	F-PZT#5	F-PZT#6
intact	1	1	1	1	1
22.54kN (Crack occurrence)	10.994	16.753	16.524	12.995	9.237
38.2kN	15.244	20.254	20.125	16.608	12.962
58.8kN	19.250	26.247	25.658	24.189	22.13
76.44kN (Before CFRP debonding)	22.459	32.565	32.214	38.642	44.719

열이 급 진전되면서 각각의 PZT센서의 손상지수 또한 급격하게 증가하였으며 C-PZT#1의 손상지수의 변화량이 현저하게 나타난 것을 바탕으로 보 기간 중앙부에 균열이 집중되어 휨 파괴 형상을 보임을 예측할 수 있다.

Table 10에서 보듯이 22.54kN의 초기 균열이후에 CFRP의 변형의 영향으로 CFRP에 부착된 PZT의 손상지수가 전체적으로 증가하였고, F-PZT#3, F-PZT#4의 손상지수의 변화가 크게 나타나 기간중앙에 균열이 발생하면서 CFRP 박리가 발생하였음을 예측할 수 있다. F-PZT#1의 손상지수는 하중이 증가함에 따라 큰 변화가 없어 CFRP 변형이외의 박리는 거의 발생하지 않은 것으로 판단되며, CFRP 탈락이 발생한 부분에 부착된 F-PZT#6의 손상지수는 하중이 증가함에 따라 뚜렷한 증가를 보였으며 CFRP 탈락 직전인 76.44kN의 하중이 가해졌을 때 신호의 급격한 증가를 보여 CFRP 탈락의 징후를 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 PZT센서를 이용한 임피던스 기법을 CFRP 판 보강 RC보의 균열 및 박리 손상 모니터링에 적용하기 위한 실험을 수행해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 구조물이 손상 등의 이유로 상태가 변하면 그 물성이 변하고 구조물의 고유주파수가 변하게 된다. 이로 인해 구조물-PZT센서의 전기-역학적 임피던스 및 공진주파수가 변하게 되며 이러한 특성은 콘크리트와 CFRP의 재료에서도 적용이 가능했고 PZT센서를 이용한 임피던스 기법을 사용해 CFRP 판 박리를 확인할 수 있었다.
- (2) 구조물의 가진 주파수 설정은 임피던스 기법에서 중요하며 구조물 특성이 잘 나타나는 공진주파수가 존재하는 구간을 설정해야 한다. 본 논문의 실험 결과 CFRP는 200kHz~600kHz 사이의 범위에서 공진주파수가 뚜렷하게 나타났고 CFRP 박리 모니터링이 가능하였다.
- (3) 본 논문에서는 여러 개의 PZT센서의 손상지수를 바탕으로 CFRP 판 보강 RC보의 손상 감지와 거동 예측을 수행하였다. 하지만 임피던스 기법은 구조물의 재료특성, 형상 및 질량 그리고 온도, 손상의 종류 등 다양한 인자에 따라 임피던스 신호의 변화양상이 달라지기 때문에 정량적 평가 기준을 확립하기 어렵다. 따라서 실 구조물 적용을 위해서는 대상 구조물의 거동을 미리 파악하여 위험 구간에서의 국부적인 손상 모니터링을 통하여 구조물의 건전성을 파악하는 것이 효율적인 방법이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 u-City 석박사과정 지원사업에 의해 수행되었으며 전폭적인 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김대민, "압전소자를 이용한 콘크리트 구조물의 손상추정법에 관한 연구", 경북대학교 대학원, 석사학위논문, 2008.
2. 류성찬, 김주원, 이창길, 박승희, 박선규, "CFRP 보강 콘크리트 구조물의 PZT센서 기반 구조 건전성 모니터링", 한국구조물진단학회, 제14권 5호, 2010, pp.72-78.
3. 박승희, 윤정방, 노용래, Ahmad Sohaib, "토목구조 부재의 PZT 기반 상시 비파괴 검사 기법", 한국비파괴검사학회, 춘

- 계학술대회 논문집, 2005, pp.167-174.
4. 이정미, "PSC 거더의 긴장력 변화에 따른 휨진동 응답 및 정착부 임피던스 응답 특성에 관한 실험적 연구", 부경대학교 대학원, 석사학위논문, 2008.
 5. 이진학, 박승희, 윤정방, 노용래, "임피던스 계측을 통한 구조물의 손상 평가", 한국구조물진단학회, 봄학술발표회 논문집, 2004, pp.517-522.
 6. 홍용, "스마트 재료를 이용한 손상 탐지 기법과 구조물의 건전성 평가에 관한 연구", 전북대학교 대학원, 박사학위논문, 2009.
 7. A. N. Zagrai and V. Giurjuti, "Electro-Mechanical Impedance Method for Crack Detection in Thin Wall Structures", 3rd International Workshop of Structural Health Monitoring, 2001, pp.12-14.
 8. 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, pp.50-62.
 9. Chen Liang, Fanping Sun and Craig A Rogers, "Electro-mechanical impedance modeling of active material systems", Smart Materials & Structures, Vol. 5, 1996, pp.171-186.
 10. Farrar, C. R., Duffey, T. A., Doebling, S. W. and Nix, D. A., "A statistical pattern recognition paradigm for vibration-based structural health monitoring", 2nd Int. Workshop on Structural Health Monitoring, 1999, pp.764-773.
 11. Giurjuti, V. Reynolds, A. and Rogers, C. A., Experimental Investigation of E/M Impedance Health Monitoring for Spot-welded Structural Joints, J. Intell. Mater. Syst. Struct., 10., 1999, pp.802-812.
 12. Hoon Sohn, Seung Dae Kim, Chi Won in, Kelly E. Cronin and Kent Harries, "Debonding Monitoring of CFRP Strengthened RC Beam without Reference Date nor Prior Decision Boundaries", The 4th International Conference on Earthquake Engineering, 2006, pp.12-13
 13. Kessler, S. S., "Piezoelectric-Based In-Situ Damage Detection of Composite Materials for Structural Health Monitoring Systems", 1-200, MIT, Ph.D thesis, 2002.
 14. Liang, 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.
 15. Park, G. Sohn, H. C. R. and Inman, D. J., "Overview of Piezoelectric Impedance-Based Health Monitoring and Path Forward", Shock and Vibration Digest, Vol. 35, No. 6, 2003, pp.451-463.
 16. 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.
 17. Sohn, H. and Farrar C. R., "Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals", Smart Materials and Structures, 10, 2001, pp.446-451.
- (접수일자 : 2011년 3월 18일)
(수정일자 : 2011년 5월 24일)
(심사완료일자 : 2011년 5월 30일)

요 지

CFRP 보강공법은 구조물에 내하력을 증가시키기 위해 사용되고 있는데 실제 교량에 적합하고 연구 활용성이 좋다. 하지만, CFRP로 보강된 콘크리트 보에서 휨파괴와 전단파괴 뿐만 아니라 부착파괴 또한 추가적으로 발생하게 된다. 이러한 CFRP 부착파괴는 취성파괴를 유발하게 된다. 따라서 이러한 CFRP로 보강된 콘크리트보 박리에 대한 모니터링은 매우 중요한 의미를 갖는다. 본 논문에서는 국부적인 손상 파악에 유리한 PZT센서를 이용한 임피던스 기반 손상검색 방법을 사용하여 CFRP로 보강된 콘크리트보에서 박리 모니터링에 대한 적용가능성을 검증해 보았다.

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