

# 압전센서 기반 CFRP 부착면 탈락 손상영역 탐색성능 향상

## Improvement of Damage Localization Performance for CFRP-debonding defects using Piezo-electric Sensors

김주원\* · 이창길\*\* · 이동환\*\*\* · 장하주\*\*\*\* · 박승희\*\*\*\*\*

Kim, Ju-Won · Lee, Changgil · Lee, Dong-Hwan · Chang, Hajoo · Park, Seunghee

### 요 약

최근 콘크리트 구조물의 안전성강화를 위해 탄소섬유 강화 플라스틱(CFRP) 보강 공법이 널리 사용되고 있지만 잘 알려진 바와 같이 CFRP 보강재와 콘크리트 표면사이의 부착면 탈락은 보강재 자체의 손상보다 발생할 확률이 높고 이러한 부착면 탈락은 보강의 효과를 무의미하게 만들기 때문에 구조물 전체의 파괴로 직결될 수 있다. 이에 본 연구에서는 CFRP 부착면 탈락손상을 실시간으로 검색하기 위해 압전센서를 사용하는 구조물 건전성 평가 기술을 적용하였다. 이의 검증을 위해 CFRP로 보강된 콘크리트 보를 제작하였고 3단계로 증가하는 부착면 탈락 손상을 발생시켰다. 손상 증가 단계마다 CFRP 표면에 배열된 압전센서로부터 임피던스와 유도초음파 신호를 계측하였고 손상에 따른 신호변화를 정량화하기 위해 손상지수인 RMSD를 계산하였다. 더 구체적인 부착면 탈락 손상위치 탐색을 위해서 두 가지 계측 기법으로부터 구해진 RMSD 값을 중첩시키는 Superposed RMSD 가 제안되었다. 구해진 Superposed RMSD 값을 사용하여 커브 피팅이 수행되었고 도출된 커브의 최고값에 해당하는 위치값을 찾아 실제 손상위치와 비교함으로써 제안된 기법의 가능성을 검증해 보았다.

**keywords** : CFRP 접착면 모니터링, 압전센서, 손상영역탐색, 임피던스, 유도초음파, Superposed RMSD

### 1. 서 론

최근 구조물 보수 보강의 중요성이 점차 증가하고 있는 가운데, 뛰어난 보강력, 가벼운 무게와 방수성 등 다양한 장점을 가지는 CFRP 보강법은 가장 널리 사용되는 보강법 중 하나이다. 하지만 이는 보강재가 구조물에 완벽히 부착되어 있을 때만 보강력이 보장 될 수 있는데, CFRP 보강법의 경우 부착면의 탈락손상이 발생할 위험이 크고 이는 구조물의 붕괴로 이어질 위험이 크다. 이에 실시간으로 부착면 탈락을 검색하는 동시에 손상의 위치를 파악하여 초기에 대처하는 것이 요구된다. 이에 본 연구에서는 부착면 손상 검색을 위해 압전센서를 사용한 임피던스 및 유도초음파 기반의 구조물 건전성 평가 기법을 적용하고 RMSD 손상지수를 계산하여 손상을 정량화 시켰다. 임피던스와 유도초음파 두 가지 기법으로부터 구해진 손상지수 값을 중첩시킨 Superposed RMSD를 제안하고 적용시켜봄으로써 향상된 손상위치 검색의 가능성을 평가해보았다.

\* 학생회원 · 성균관대학교 u-City공학과 석사과정 malsi@nate.com

\*\* 학생회원 · 성균관대학교 건설환경공학과 박사과정 tolck81@gmail.com

\*\*\* 학생회원 · 성균관대학교 u-City공학과 석사과정 ycleedh@paran.com

\*\*\*\* 학생회원 · 성균관대학교 u-City공학과 석사과정 hajoo@gmail.com

\*\*\*\*\* 정회원 · 성균관대학교 사회환경공학과 조교수 shparkpc@skku.edu

## 2. 손상위치 탐색 성능 향상을 위한 Superposed RMSD

본 연구에서는 향상된 손상위치 탐색을 위해, 두 가지 측정기법에서 가정되는 센싱 범위가 서로 불일치되는 특성을 이용하여, 셀프 센싱 임피던스와 Pitch-Catch 유도초음파 두 기법으로부터 구해진 RMSD 값을 해당구간에 따라 그림 1과 같이 중첩시키는 Superposed RMSD를 제안하였다.

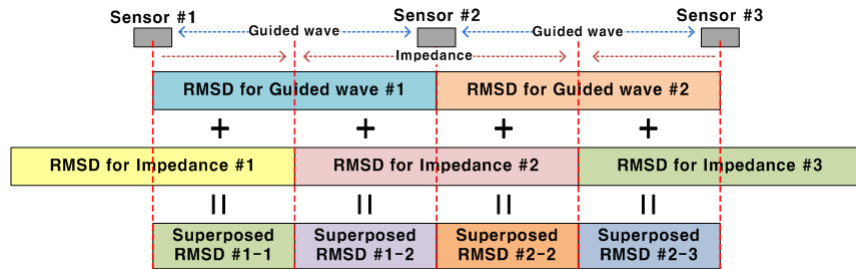


그림 1 Superposed RMSD의 개념도

임피던스와 유도초음파 두 측정 기법의 영향을 모두 반영하기 위해 두 가지 측정 기법으로부터 구해진 RMSD 값들을 대등한 비율로 맞추는 과정이 필요하여 본 연구에서는 식 (1)과 같이 구해진 스케일링 팩터  $k$ 를 임피던스 RMSD 값에 곱해준 후에 두 지수 값을 식 (2)와 같이 더하는 간단한 방법으로 중첩시켰다.

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{n_{gw}} RMSD_{gw} / n_{gw}}{\sum_{i=1}^{n_{im}} RMSD_{im} / n_{im}} \quad (1) \quad Superposed\_RMSD = RMSD_{gw} + k \cdot RMSD_{im} \quad (2)$$

제안된 Superposed RMSD를 사용 할 경우, 기존의 RMSD 값을 사용했을때 보다 동일한 구간내의 손상지수 개수가 약 2배로 증가하고 이에 따라 구해지는 손상예측범위가 절반으로 줄어들게 된다.

## 3. 실험 연구 내용

### 3.1. 실험 세팅 및 방법

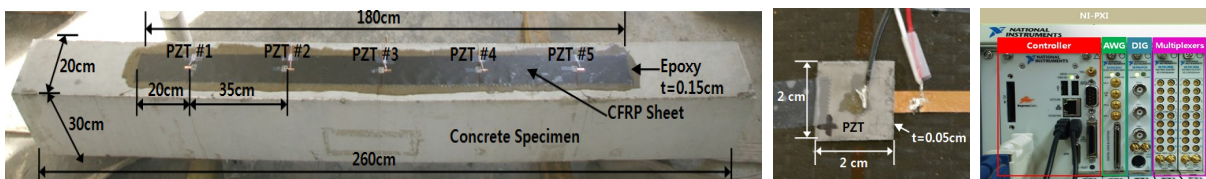


그림 2 CFRP 보강 콘크리트 보 시편 및 측정 장비

CFRP 부착면 탈락 손상 검색 실험을 위해 그림 2와 같이 폭 10cm 길이 180cm의 CFRP 시트로 보강된 폭 20cm, 너비 260cm, 높이 30cm 콘크리트 시험체를 제작하였고, 신호의 가진과 센싱을 위한 2 x 2cm의 정사각형 PZT센서 5개가 CFRP의 왼쪽끝 20cm 지점부터 35cm의 동일한 간격으로 CFRP 표면에 부착되었다.

부착면 탈락 손상에 따른 영향을 보기 위해 그림 3과 같이 최초로 37cm 지점에 5cm 크기의 부착면 탈락 손상 (A:37-42cm)를 발생시켰고, 이어서 손상크기를 왼쪽방향으로 5cm 확장(A+B: 32-42cm)시켰다. 마지막으로 110cm 지점에 8cm의 손상(C: 110-118cm)를 추가로 발생시켰다. 손상이 증가되는 동안 각 단계마다 95kHz~130kHz 주파수 범위의 셀프 센싱 임피던스 신호와 150kHz, 10V의 5-peak Morlet wavelet 파형 입력 신호로 가진된 유도초음파 응답신호를 측정하였다.

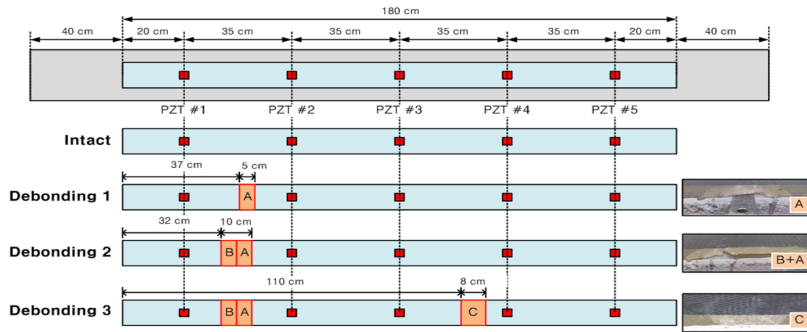


그림 3 CFRP 부착면 탈락손상 단계별 시나리오

### 3.2. 실험 결과

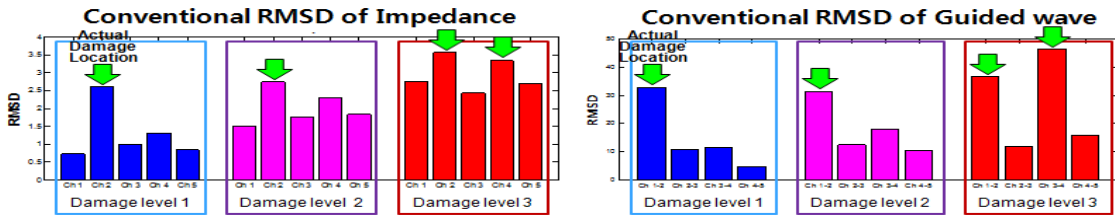


그림 4 손상단계에 따른 임피던스 RMSD 및 유도초음파 RMSD

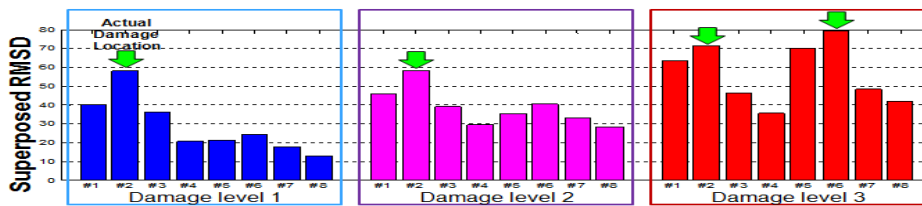


그림 5 손상단계에 따른 Superposed RMSD

임피던스와 유도초음파기법 각각의 부착면 탈락 손상 단계에 따른 신호변화로부터 도출된 RMSD 그래프들을 그림 4에 나타내었다. 공통적으로 임피던스와 유도초음파의 RMSD 값 모두 부착면 탈락 손상이 발생하는 시점에 손상부위를 포함하는 센싱 범위에 해당하는 RMSD값이 크게 증가하였다. 임피던스 기법에서는 구조물 전체의 손상단계가 높아질수록 나머지 구간에서도 RMSD 값이 증가하였지만 유도초음파기법은 손상부위의 RMSD값만 증가하는 것을 확인할 수 있다. 위와 같이 하나의 기법에서 도출된 손상지수를 이용한 방법을 통해서도 부착면 탈락 손상을 찾아낼 수 있었다.

하지만 손상예측범위를 더욱 좁히기 위해 본 연구에서 새롭게 제안된 Superposed RMSD를 적용하였고 그림 5에 그 결과 그래프를 나타내었다. 그림 5와 같이 같은 구간 내에 RMSD 지수값이 일반적인 방법과 비교해 약 2배로 증가함으로써 한 지수에 해당되는 센싱 범위가 절반으로 감소하여 더욱 세분화된 위치 탐색이 가능함을 확인할 수 있다. 이는 일반적인 방법과 비교해 손상 예측 범위를 절반으로 줄여 손상 위치 검색 능력이 두 배로 향상되었다고 볼 수 있다. 이 세분화된 범위 역시 실제 손상발생 위치를 정확하게 포함함으로써 이 방법의 적용 가능성을 볼 수 있었다.

좀 더 구체적인 부착면 탈락 손상에 대한 정보를 얻기 위해 Superposed RMSD 값들을 사용한 커브 피팅 작업을 수행하였고 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 커브의 최고값을 찾아서 그에 해당되는 위치값을 찾은 결과 실제 손상위치와 정확하게 일치함을 확인할 수 있다. 또한 손상의 크기가 증가(손상단계1→손상단계2) 했을 때 최고값의 위치가 손상의 확장방향으로 이동함을 볼 수 있다. 이와 함께 최고값 부근의 커브가 완만해지

고 이에 따라 일정한 RMSD 값을 초과하는 범위가 증가함을 확인할 수 있다. 추가적인 연구를 통해 손상단계에 따른 적절한 임계값이 설정된다면 이러한 특성을 이용하여 손상의 크기를 예상할 수 있을 것으로 기대된다. 위와 같은 과정을 통하여, 새롭게 제안된 접근법을 적용할 경우 더욱 구체적인 CFRP 부착면 탈락 손상에 관한 정보를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

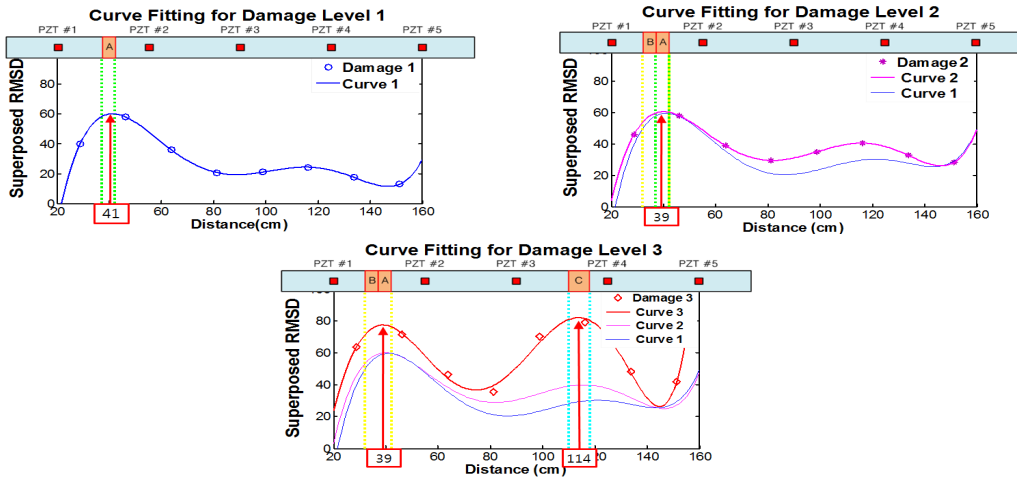


그림 6 Superposed RMSD를 이용한 손상 단계별 커브 피팅 결과

#### 4. 결론

본 연구에서는 압전센서를 사용한 임피던스 및 유도초음파 기반의 CFRP 부착면 탈락 손상 검색과 Superposed RMSD를 사용한 손상위치 탐색 성능 향상 실험을 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 압전센서로부터 얻은 임피던스 및 유도초음파 신호는 손상이 발생한 시점에 그 손상 주변의 센서에서 측정된 신호들만이 변화하였다.
2. CFRP 부착 탈락 손상이 증가함에 따라 임피던스 RMSD와 유도초음파 RMSD 모두 증가하였고 이는 실제 손상지점과 일치하였지만 그 예측범위가 넓었다.
3. 새롭게 제안된 Superposed RMSD를 적용한 결과 손상에측범위를 절반으로 좁힘으로써 손상 위치 탐색 성능이 향상되었다.
4. Superposed RMSD값들을 사용하여 피팅한 커브의 최고점은 실제 손상위치와 정확히 일치하였다.
5. 추후 연구를 통해 각 손상단계별 임계값을 설정한다면 손상의 크기 정보도 본 방법을 통해 도출 할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부의 u-City 석·박사 과정 지원사업의 지원과 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되는 원자력연구사업(2010-0025889)의 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- Park, S., Kim, J.W., Lee, C. and Park, S. K. (2011) Impedance-based Wireless Debonding Condition Monitoring of CFRP Laminated Concrete Structures, *NDT&E International*, 44, pp.232-238
- Lemistre, M. and Balageas, D. (2001) Structural health monitoring system based on diffracted Lamb wave analysis by multiresolution processing, *Smart Mater Struct*, 10(3), pp.504-511