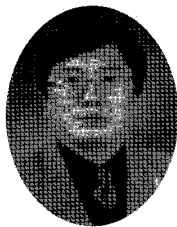


충격반향기법을 이용한 건축부재의 손상추정

Development of Damage Estimation Using Impact Echo in Building Elements



최영화*
Choi, Young-Wha



박강근**
Park, Kang-Geun



김이성***
Kim, Ie-Sung

1. 서론

오늘날 널리 건설재료로 이용되고 있는 건축부재는 외력에 의해 취성 및 연성파괴, 그리고 전단파괴등에 노출되어 있다. 철근콘크리트 부재의 경우 뜻하지 않게 발생하는 외력 등으로 인하여 균열이 증진되기 때문에 재료의 내부 및 외부 등에 여러 형태의 보강재를 이용하고 있다. 이러한 보강재는 비파괴 검사시에 균열손상 등과의 위치적 중첩으로 검사부재의 품질 및 안전성 검토에 많은 영향을 주고 있다. 따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해 국내외적으로 여러가지 형태의 재료 탐사성 센서를 적용하고 계측 모니터링 방법에 대한 연구를 진행 중에 있다.

특히, 탄성파 가진을 이용한 충격반향기법은 주파수 영역에서의 비교를 주로하고 있으나 탄성파 가진시 발생하는 표면파와 체적파가 중첩된 파(Wave)에 대해 1축 방향센서로는 푸리에 변환(FFT)과 같은 직접적이고 단순한 분석법을 적용하기 어렵다. 따라서, 이를 해결하기 위

해 단층촬영기법인 토모그래피법(Tomography Method)을 본 연구에서 응용하였다. 이를 위한 실험에서는 유니모르프 형태(Unimorph Type)의 압전(PZT)센서를 이용하여 건축부재에 탄성파를 가진하여 발생한 속도차를 이용하여 콘크리트 보부재에 철근이 매입되어 있는 경우와 균열손상이 발생한 경우에 대해 비교검토하고, 이러한 기법을 막재료(Membrane)에 전단변형이 발생한 경우에 적용해 보았다.

2. 연구동향

충격반향기법을 이용한 건축부재에서의 손상추정법 개발에 대한 연구로 Sandettin Orhan et al(2005)는 충격반향기법을 이용하여 균열손상을 입은 보의 해석에 대한 연구를 하였다. 축소모델을 이용하고 모델에 발생한 균열의 폭과 위치를 파악하기 위해, 충격파를 가진하여 주파수 영역에 대한 비교분석을 수행한 연구를 하였다. Jri Zacal et al(2006)는 초음파 전달 단층촬영기법을 위한 파동방정식과 계측센서의 교정에 대한 연구를 하였다. 일방향 전달파에 대하여 Single-frequency Wave 방정식을 이용하여 실질적인 기하학적 조건에 결과를 획

* 정회원 · 대구대학교 건축공학과 교수, 공학박사

** 정회원 · 부산대학교 건축학부 교수, 공학박사

*** 정회원 · 대구대학교 건축공학과 연구교수, 공학박사

특하기 위한 연구를 하였다.

이러한 연구를 실제 건축부재의 비파괴검사에 적용할 경우 탄성파의 가진으로 발생하는 파형에 대한 복잡한 후처리기능이 필요하므로 비속력자나 비전공자가 건축 부재에 발생한 손상을 검토하기에는 어려운 것으로 나타났다.

3. 탄성파의 시간이동에 따른 해석

탄성파 가진에 의해 물질내부에 발생한 파형은 속도의 역수에 의존하기 때문에, 재료내부에 균열공극을 통과한 영역의 속도 이상변화를 알 수 있다.

$$\Delta V = V' - V \quad (1)$$

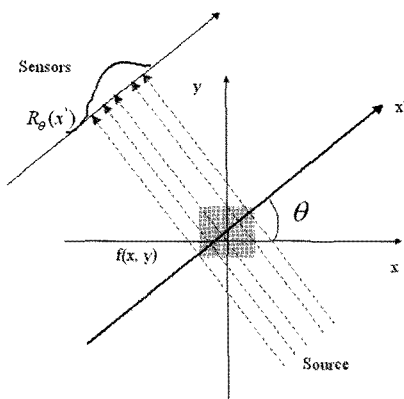
$$\Delta \eta = \frac{1}{\nu + \Delta V} - \frac{1}{V} = \frac{\Delta V}{V^2} \quad (2)$$

만약, 이상 균열영역을 통과한 궤적 길이(Trajectory Length)를 길이(l)이라고 하면,

$$\Delta t = l \times \Delta \eta = \frac{-l \Delta V}{V^2} \quad (3)$$

여기서, V: 초기 속도, V': 이상속도, ΔV: 속도변화, Δη: 속도의 역수 변화, Δt: 시간의 이상변화

그리고, 속도의 변화는 시간의 이상변화와 관계됨을 알 수 있다. 또한, Radon Transform에 의해



〈그림 1〉 Radon Transform의 기하학 체계

$$R_{\theta}(x') = \int_{-\infty}^{\infty} f(x' \cos \theta - y' \sin \theta, \sin \theta + y' \cos \theta) dy' \quad (4)$$

여기서,

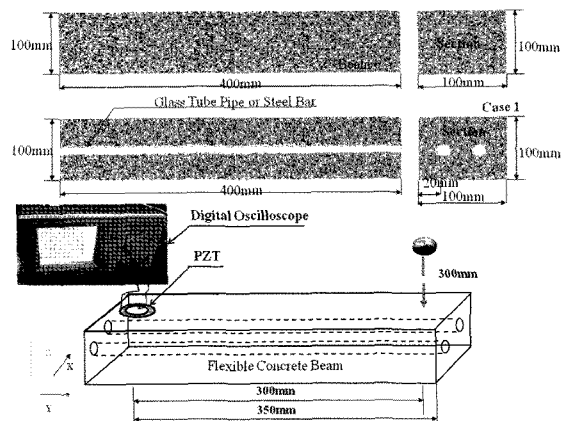
$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (5)$$

따라서, 탄성파 가진위치와 센서의 위치영역 내에 균열이나 공극이 발생하면, 변위차가 발생함으로 속도의 변화가 발생함을 알 수 있다.

4. RC 보와 건축용 막의 시험계획

4.1 시험체 계획

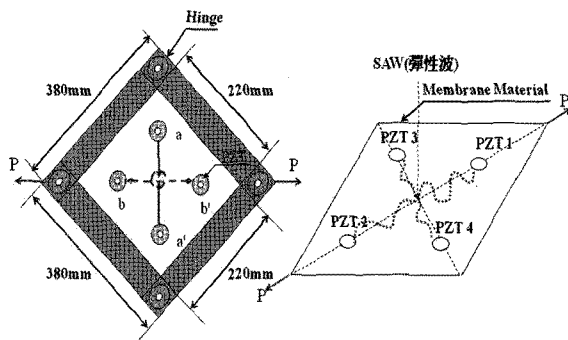
100×100×400mm의 철근콘크리트 보를 제작하였다. 보시험체는 철근과 균열손상으로 가정한 중공 파이프를 내포하지 않은 경우와 400mm 길이 방향으로 2개의 유리관을 배치한 경우, 2개의 이형철근을 배치한 경우에 대하여 55g 무게의 구슬을 자유낙하하여 탄성파를 가진하였고 탄성파 계측용 압전센서는 일본 MURATA사의 유니모르프 형태의 압전부저(Piezoelectric Speaker)를 사용하였다.



〈그림 2〉 콘크리트 시험체와 시험방법

200×200mm의 막시험체를 제작하였고, 380×380mm의 전단 막시험 장비에 막재료의 양단을 고정하여

정치하였다. 막재료의 평면을 x축과 y축으로 1/4씩 분할하고, 압전센서를 1/4 평면의 중앙에 배치하여 인장력 작용에 따라 전체 막재료의 평면중앙에 55g의 쇠구슬을 200mm의 높이에서 자유 낙하하여 탄성파를 가진하였다. 그림 3은 막시험체와 시험방법을 나타내고 있다.



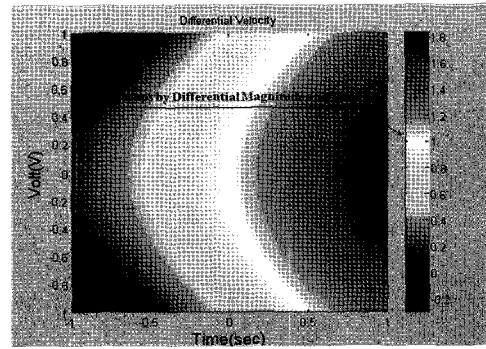
〈그림 3〉 막 시험체와 시험방법

압전소자의 전압측정을 위해 독일의 Witting Technologies사의 BenchScope Digital Oscilloscope를 이용하였다.

또한, 탄성파의 가진으로 콘크리트 보의 표면과 내부에 발생한 전달파형을 비교분석하기 위해 Mathwork사의 수치해석 프로그램인 MATLAB Ver. 6을 이용하였다.

4.2 속도변화에 의한 손상검토

유니모르프 형태의 압전센서는 평면방향의 변위를 구속하기 위해 금속 등의 물체표면에 센서를 부착하여 수직 축방향으로의 증폭을 증대한 센서이다. 이로 인하여 가진력에 에너지가 크게 작용하는 반면 에너지 저감이 큰 센서임에도 불구하고, 저가의 가격과 기전력형 센서이기 때문에 여러부분의 연구에서 널리 응용되고 있다. 그러나, 불연속적 파형에 대해 비교가 어렵기 때문에 Wavelet Transform 등과 같은 후처리 과정이 필요하다. 이러한 단점을 보완하기 위해 본 연구에서는 Radon Transform을 이용하여 중요 건축부재에 탄성파가 가진되면 압전소자의 전압 크기(Voltage Magnitude) 변화와 탄성파의 통과시간을 이용하여 단층그래프를 수치해석 프로그램인 Matlab으로 나타내어 비교하였다.

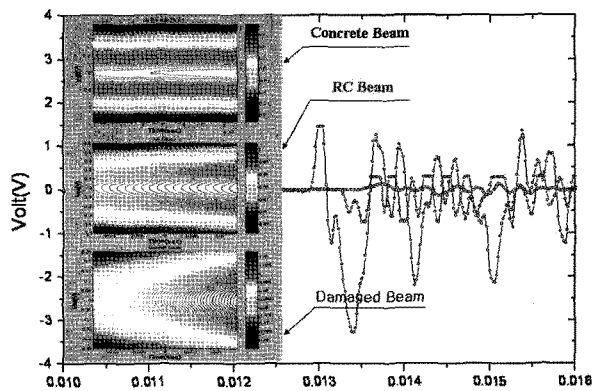


〈그림 4〉 Radon Transform에 의한 Tomography

5. 탄성파 가진에 따른 결과분석

5.1 RC 보부재에서의 탄성파 가진

철근콘크리트 보시험체 내부에 중공 유리관이 있는 경우, 외력에 의해 균열이 발생하여 손상되었다고 가정하고, 철근이 내포되어 있는 경우가 탄성파 가진을 이용하여 철근콘크리트 보부재에 발생한 손상을 검토하는데 주는 영향평가를 위해 압전소자에 발생한 탄성파의 시간차와 비교분석을 하였다.



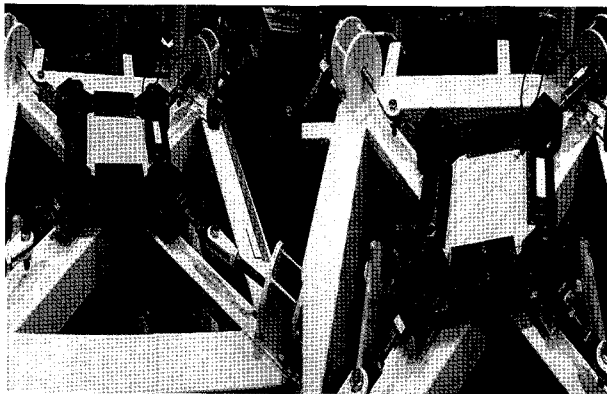
〈그림 5〉 압전소자를 이용한 탄성파의 속도변화

그림 5는 Unimorph Type Piezo 센서를 이용하여 탄성파 가진으로 발생한 센서의 시간차를 비교한 결과이다. 실험결과, 탄성파 가진에 따라 유리관이 매입된 콘크리트 보와 철근콘크리트 보의 시간차는 중공 유리관이 콘크리트에 내포된 경우, 손상을 입지 않은 콘크리트 보에 비해 0.6×10^{-2} (sec)의 시간차가 발생하였지만 그래프로 비교하기 어려운 것으로 나타났다. 이를 Radon

Transform Method를 이용하여 획득한 등고선도를 이용하여 비교분석하였고 손상을 입은 콘크리트 부재가 손상이 없는 콘크리트 부재와 철근이 내포된 콘크리트부재에 비하여 Tomograph가 크게 변화하는 것으로 나타나 시간차에 의한 파형비교보다 손상검토가 더 쉬운 것으로 나타났다.

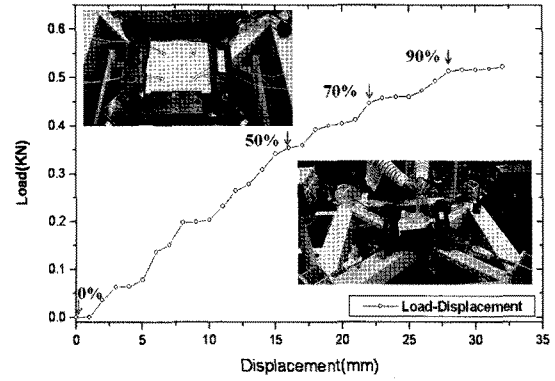
5.2 인장력 막재료의 탄성파가진

전단 막시험장비에 막재료를 양단에 고정하고 막재료 시험체에 1축 인장력이 작용하는 경우, 전단변형구간별로 탄성파를 가진하여 1축 인장력이 작용될 때 발생하는 막재료의 전단변형을 검토하기 위해 막재료의 중앙부에 탄성파를 가진하고 압전소자에 발생한 탄성파의 시간차를 비교분석하였다.

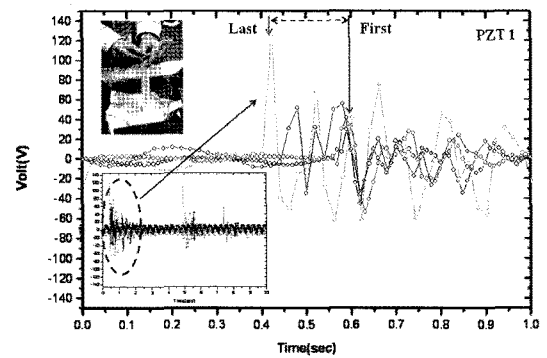


〈그림 6〉 막재료의 전단실험

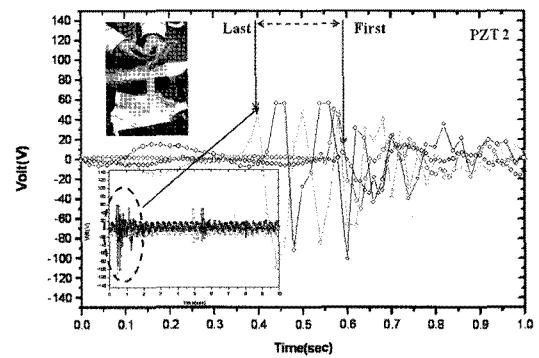
막재료의 1축 인장시 하중-변위에 대한 그래프는 그림 6과 같다. 전단 시험기에 설치된 막재료에 1축인장력이 작용하기 전에 막재료의 중앙부에 탄성파를 가진하여 압전소자의 초기전압과 탄성파의 전달시간을 획득하였다. 그리고 1축 인장력이 막시험체 내력의 50%에 도달하였을 때, 인장력을 정지하여 탄성파를 가진하고, 내력의 70%와 90%에 대해서도 탄성파를 가진하여 비교검토하였다.



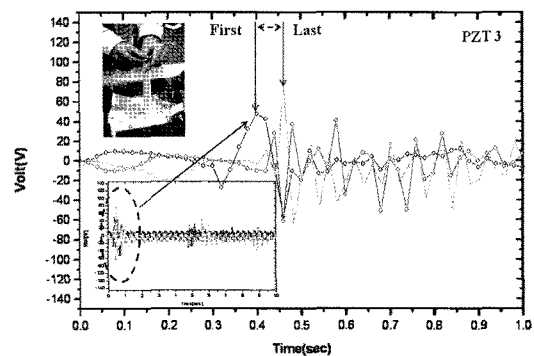
〈그림 7〉 막재료의 시험체의 하중-변위도



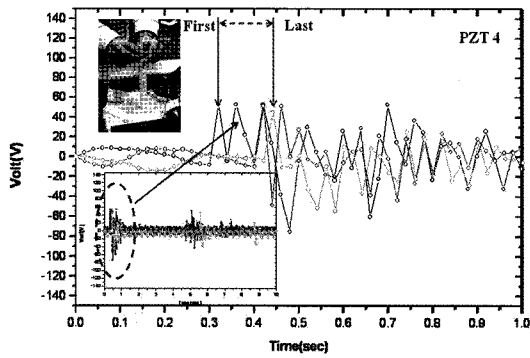
〈그림 8〉 PZT 1의 전압변화



〈그림 9〉 PZT 2의 전압변화

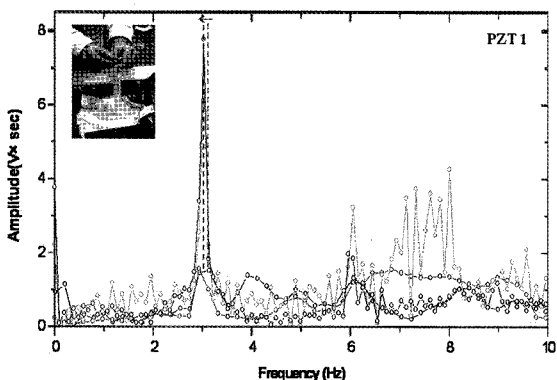


〈그림 10〉 PZT 3의 전압변화

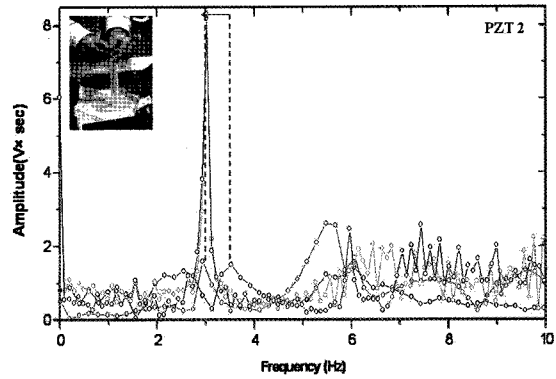


〈그림 11〉 PZT 4의 전압변화

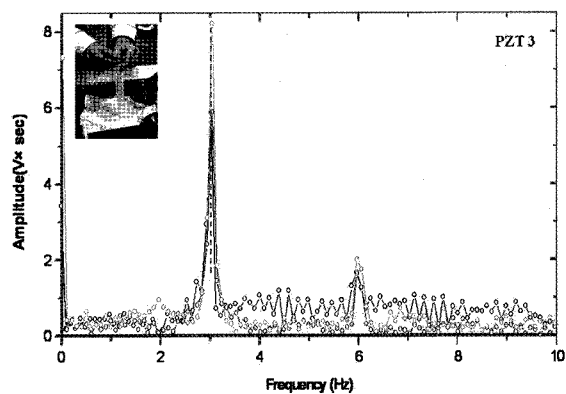
막시힘체 내력의 50%와 70%, 90%에서의 탄성파 가진에 따른 압전소자의 전압변화에 대해 탄성과 전달시간을 비교한 결과, 내력 50%에서는 인장하중이 작용하기 전과 탄성파 전달시간의 차이가 발생하지 않았으며, 내력 50%에서 내력 70%구간에서는 $1.2 \times 10^{-1}(\text{sec})$ 의 시간차가 발생하였고 내력 50%에서 내력 90%구간은 $2.4 \times 10^{-1}(\text{sec})$ 의 시간차가 발생하였다. 1축 인장력이 작용하는 선(Line)상에 위치한 PZT 1과 2는 인장력의 작용에 따라 센서의 배치거리가 늘어남으로 인하여 오히려 전달속도가 증가하는 것으로 나타났고, 1축 인장력이 작용하는 선상과 역으로 위치한 PZT 3과 4는 인장력의 작용에 따라 센서의 배치거리가 감소하였지만 오히려 전달속도가 감소되는 것으로 나타났다. 이는 인장력 증가로 발생한 종사(Warp)와 횡사(Weft)의 배치변화로 발생하는 문제로 사료된다. 따라서 이를 분석하기 위해 고속푸리에 변환을 이용하여 주파수 특성을 분석하였다.



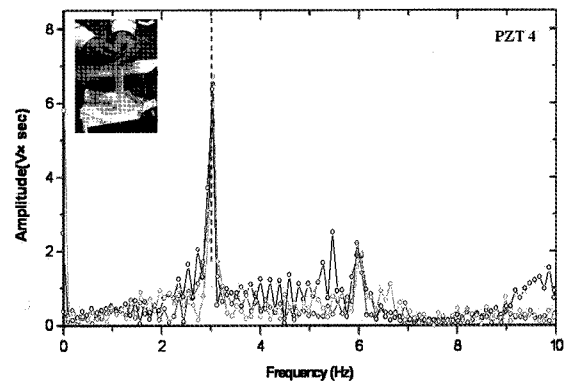
〈그림 12〉 PZT 1의 주파수 특성분석



〈그림 13〉 PZT 2의 주파수 특성분석



〈그림 14〉 PZT 3의 주파수 특성분석

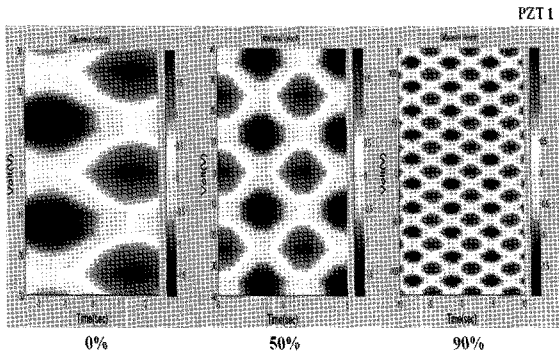


〈그림 15〉 PZT 4의 주파수 특성분석

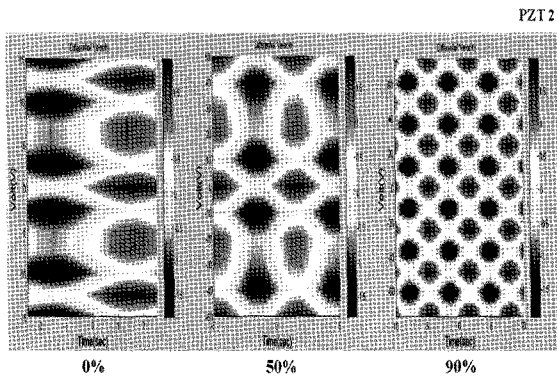
탄성파 가진에 따른 압전소자의 주파수특성을 비교한 결과, 1축 인장력이 작용하는 선상에 위치한 PZT 2는 인장력의 작용에 따라 센서의 배치거리가 늘어남에 따라 $5 \times 10^{-1}(\text{Hz})$ 의 주파수 감소가 나타났으나 센서의 배치거리가 감소하는 PZT 3와 4에서는 변화가 발생하지 않았다. 이는 유니모르프 압전센서는 압전체의 횡변위가 구

속되어 있기 때문에 재료적으로 박막인 막재료에 적용할 경우 이에 대한 보완이 필요한 것으로 사료된다.

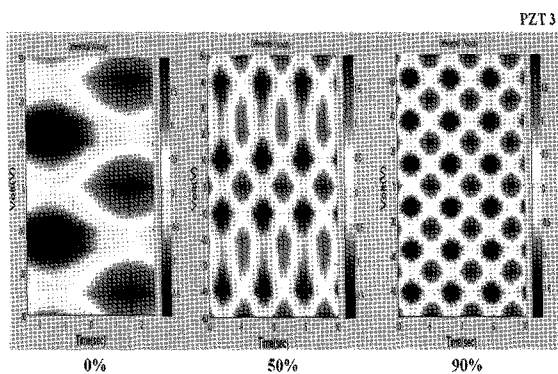
따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해 철근콘크리트 보부재에서 탄성파 가진으로 균열손상검토에 적용한 Radon Transform Method의 등고선도로 비교해 보았다.



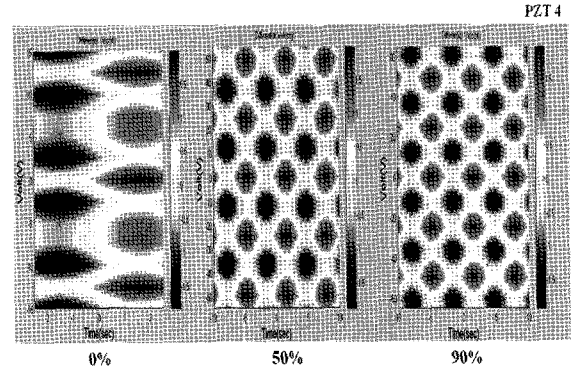
〈그림 16〉 PZT 1의 Tomography



〈그림 17〉 PZT 2의 Tomography



〈그림 18〉 PZT 3의 Tomography



〈그림 19〉 PZT 4의 Tomography

막시힘체 내력의 0%와 50%, 90%에서의 철근콘크리트 보부재에서 탄성파 가진으로 균열손상검토에 적용한 Radon Transform Method의 등고선도로 압전소자(PZT)의 전압변화를 비교한 결과, 막재료의 전단변형에 따른 막재료 단층 등고선도는 PZT 1~4에서 탄성파의 가진에 따라 막재료의 전단변형이 증가할수록 등고선도의 변화가 증가하는 것으로 나타났다.

막재료는 주로 지붕재로 사용하기 때문에 실시간으로 많은 자료를 전송하는 오실로스코프와 같은 정밀 계측기를 이용하면 자료전송의 어려운 문제점이 발생할 수 있고 계측을 위해 계측자가 탄성파를 가진하기 위해 지붕에서 작업하기도 쉽지 않다. 따라서 지붕재에 상시작용하는 풍하중(Wind Load)을 탄성파의 가진력으로 응용하고 RMS(Root Mean Square)장비를 이용하면 상시 계측에 유리하고 Radon Transform Method의 등고선도에 적용하면 막재료에 전단변형으로 발생한 손상의 이상징후를 관리자가 원격으로 검토할 수 있을 것으로 사료된다.

6. 결론

충격반향기법을 이용한 건축부재에서의 손상추정법 개발에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 철근콘크리트 부재에 발생한 균열손상을 검토하는 비파괴시험법에서는 주로 손상 전과 후에 주로 초음파 시험법을 이용하여 손상을 검토하고 있으나 철근

콘크리트 부재 내부에 배치된 철근의 방향과 배치에 따라 비파괴 시험결과에 영향을 주고 있고, 검토방법이 어려워 비숙련자나 비전문가들이 손상을 파악하는 데 많은 어려움이 발생하고 있다. Radon Transform Method의 등고선도를 이용하면 보다 쉽게 손상의 유무를 파악할 수 있는 것으로 사료된다.

2) 건축용 막에 발생한 전단변형을 검토하기 위해 철근콘크리트 부재에서와 같이 탄성파 가진에 따른 속도차 비교와 주파수 특성분석을 이용하였지만 종사와 횡사로 이루어진 막재료의 특성상 두께방향의 수직축에 대한 파형분석이 어려운 것으로 나타났지만, 비교적 적은 탄성파 자료로 Radon Transform의 등고선도를 이용하면 비숙련자나 비전문가들이 보다 쉽게 손상의 유무를 파악할 수 있는 것으로 사료된다.

Fire Safety", JOHN WILEY & SONS, 2000, pp.1-82.

6. MATLAB(Version 6) Users Manual. The Mathworks, 2006.

7. Emmanuel C. Ifeachor, Barrie W. Jervis, "Digital Signal Processing", Prentice Hall, 2002, pp.317-341.

8. Vinay K. Ingle, John G. Proakis, "Digital Signal Processing using MATLAB", Brooks/Cole Thomson Learning, 2000, pp.183-208.

- 참고문헌 -

1. Jiri Zacal, Dusan Hemzal, Jiri Jan, Adam Filipik, Radovan Jiri and Kolar, " Comparison Wave-Equation Versus Measurement-Processing Transducer Calibration for Ultrasonic Transmission Tomography", Proceedings of the 28th IEEE EMBS Annual International Conference New York City, USA, Aug 30-Sept 3, 2006, pp.2754-2757.

2. Ertugrul Cam, Sadettin Orhan, Murat Luy, "Analysis of Cracked Beam Structure using Impact Echo Method", International Journal for NDT&E, 2005, pp.368-373.

3. Dan Hampson, "Inverse Velocity Stacking for Multiple Elimination ", Journal of Canadian Society of Exploration Geophysicists, Vol. 22, No.1, 1986, pp.44-55.

4. Dougal Drysdale, "An Introduction to Fire Dynamics", JOHN WILEY & SONS, 1998, pp.31-157.

5. Andrew H. Buchanan, "Structural Design for