

## 구조물의 안전진단을 위한 충격파의 주파수 영역 탐사에 관한 연구

### A Study of Frequency Domain Analysis of Impact-wave for Detecting of Structural Defects in the Concrete Structure

김 형 준\*                      이 상 철\*                      서 백 수\*\*  
Kim, Hyoung-Jun              Lee, Sang-Chul              Suh, Baek-Soo

#### Abstract

Impact seismic wave method is a method for non-destructive testing of concrete structure using of stress wave which is propagate and reflected from internal flaws within concrete structure and external surface. In this study, we performed frequency domain method using impact seismic wave test for safety diagnosis of civil engineering structure. And reflection method which is used for one-dimensional target such as tunnel lining and transmission method are compared with each other.

키워드 : 콘크리트 구조물, 비파괴 시험, 충격 탄성과 검사법, 투과법, 반사법  
Keywords : *impact seismic wave method, non-destructive testing, concrete structure, reflection method, transmission method*

#### 1. 서론

최근 신설 중 구조물의 품질관리 또는 기존 구조물의 유지 및 보수관리가 중요한 무제로 대두되고 있는 실정이며, 옹벽 및 기초슬래브, 현장타설 말뚝, 터널라이닝 등과 같은 지반구조물에 있어서도 이를 위한 비파괴검사가 필요한 실정이다. 지반 구조물에 있어서 비파괴검사의 효용은 크게 구조물 내부의 공극, 균열, 불량콘크리트 등의 결함을 탐지하거나, 콘크리트와 지반 또는 암반과의 접촉 상태를 파악하는 목적으로 고려할 수 있는데, 구조물의 안정측면에서 이는 매우 중요하다[1].

본 연구에서는 토목·건축 구조물에 대한 비파

괴 조사법의 적용성을 살펴보기 위하여 교각의 안전성에 직접적인 원인이 될 수 있는 교각 모형을 제작하여 교각 내 미세균열의 발달을 탐지하려 하였다. 콘크리트의 노후현상은 균열 및 연약부분을 발생시키며 이 연약부분의 확장 및 팽창 부분을 공동으로 간주하여 실험모형으로 선택하였다. 이 연구 이전에 1차원 형상의 콘크리트 라이닝 모델과 3차원 형상의 콘크리트 교각 모델에 대한 두께측정과 미세균열에 관한 연구가 행해졌었다. 그 연구에서는 1차원 형상의 콘크리트 라이닝 모형에 대한 연구는 실험환경 및 모델의 속성에 의해 연구가 성공적으로 이루어졌으나, 3차원 형상의 콘크리트 교각 모형에서는 좋은 결과를 얻지 못하였다[2].

이를 위해서 3차원 형상을 가지는 한 개의 실험실 수준의 교각을 모델로 정하여 충격탄성과 검사법 중 교각에서 주로 사용되는 투과법을 이용하였

\* 강원대학교 지구시스템공학과 석사과정

\*\* 강원대학교 지구·환경공학부 교수, 공학박사

고 그 다음으로 반사법을 이용한 결과와 검사법의 효율성을 비교 고찰하였다.

## 2. 충격탄성과 검사법

### 2.1 충격탄성과 검사법의 원리

충격탄성과 검사법의 원리는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 시험체 표면의 한점에서 순간응력파(transient stress pulse)가 기계적 충격에 의하여 생성되면, 이 펄스파는 P파와 S파로서 시험체 내부로, R파로서 표면에 전달된다. P파와 S파가 구형파형(spherical waveform)으로 시험체내로 전파되고, 시험체내의 내부균열, 공극 또는 경계면에서 반사하게 된다. 충격점 가까이에 위치한 수신기는 반사파의 도달에 의한 표면변위를 측정할 수 있다. 이 반사파는 차례로 자유면에서 반사되고 다시 시험체내로 전파되고 또다시 반사된다. 따라서 순간공명조건(transient resonance condition)이 자유면과 내부결함 또는 외부 경계면 사이에서 다중반사에 의해서 형성된다.

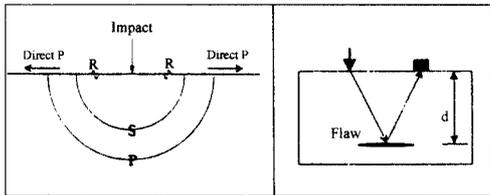


Fig. 1 충격탄성과 검사법의 원리

충격탄성과 검사법에서 P파에 의해 생긴 표면 변위는 S파에 의해 생긴 것보다 크기 때문에 중요하며, 기록된 시간영역신호를 Fast Fourier Transform(FFT)에 의해 주파수영역신호로 변환시킴으로써 P파 도달시의 주파수를 구할 수 있다. 만약 시험체에 대한 P파 속도를 안다면 내부결함이나 외부 경계면까지의 길이(T)는 다음과 같이 계산된다[3][4][5].

$$T = \frac{C_p}{2f} \quad (1)$$

여기서  $C_p$ 는 콘크리트 내에서의 P파 속도,  $f$ 는 P파반사의 주파수이다.

### 2.2 검사장치 구성 및 측정원리

충격탄성과 검사장치는 Fig. 2와 같이 충격원(impactor)과 수신기, 자료획득 및 처리하는 컴퓨터로 구성된다. 측정할 곳에 충격을 가해서 진동을

감지하여 전기 신호로 변환한다. 이 신호가 시간계측의 시작신호가 된다. 충격에 의해 콘크리트 표면에 탄성파가 발생하여 내부로 전파된다. 공동, 철근, 저관 등에서 반사되어 되돌아오는 탄성파를 수신기로 감지하여 전기 신호로 변환한다. 이때 탐사 목적에 따라 특정 주파수의 탄성파를 선별하여 시간계측을 한다. 충격 탄성과 탐사법의 경우, 초음파 탐사법과 같이 연속적인 송신 펄스를 이용하지 않고 단발 충격파를 이용하기 때문에 파형기록장치와 오실로스코프의 역할을 하는 컴퓨터에 표시하는 방식을 적용한다[6].

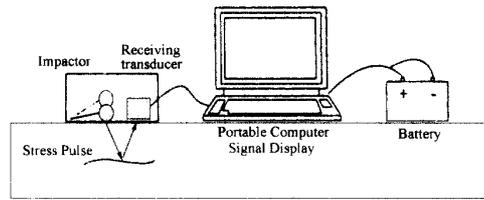


Fig. 2 충격탄성과 검사장치의 개략도

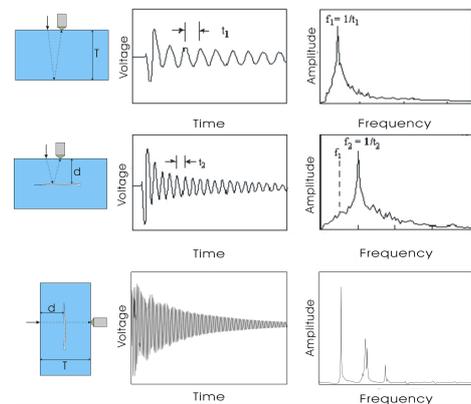


Fig. 3 균열이 없는 경우의 충격탄성과 반응과 균열이 있는 경우의 충격탄성과 반응 비교

Fig. 3은 균질한 슬래브와 깊이 d에 넓은 범위의 균열을 가지는 슬래브 상에서 측정된 충격탄성과 검사법의 반사법과 깊이 d에 넓은 범위의 균열을 가지는 콘크리트 교각 상에서 측정된 충격탄성과 검사법의 투과법으로부터 나온 파형과 스펙트럼을 보여준다. 위의 그림과 같이 최종 진폭스펙트럼(amplitude spectrum)에서 최고치에 해당하는 주파수  $f$ 를 알아내고 콘크리트 모형의 P파 속도를 안다면 상기 식 (1)에 의해 내부결함이나 외부 경계면까지의 길이를 계산할 수 있다[7].

### 3. 예비 실험

본 연구를 수행하기 전에 예비실험의 모델로 두 개의 작은 블록을 제작하였다. 두 개의 작은 블록 중 하나는 10cm×14cm×22cm의 크기를 갖고 있는 균질한 암석이고 다른 하나는 크기가 10cm×14cm×30cm인 가운데에 균열을 인위적으로 만든 암석이다.

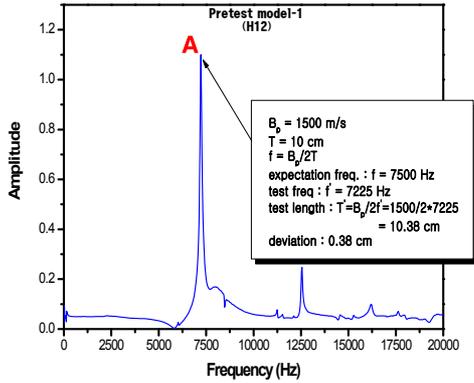


Fig. 4 균질한 블록의 주파수응답함수

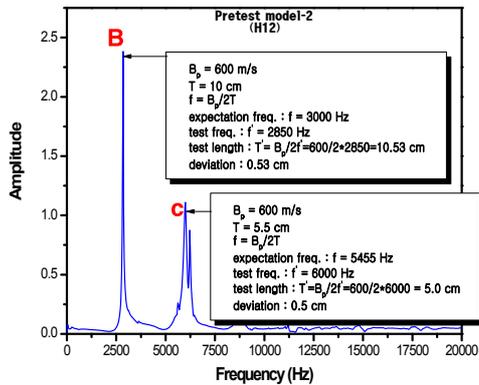


Fig. 5 균열이 있는 블록의 주파수응답함수

충격탄성과 검사법을 실험한 결과, 예비실험모형 1과 2 모두 최대주파수가 예리한 peak를 보이고 있으며, 이는 블록 전체 두께(A, B)와 균열까지의 두께(C)를 찾는 데 정확한 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 4와 Fig. 5는 각각 두께 10cm인 균질한 블록과 균열이 있는 블록에서 측정된 주파수응답함수(FRF; Frequency Response Function) 결과이다.

동적신호분석기(FFT Analyzer)에서 주 주기가 되는 구간을 첫 번째 공진모드로 푸리에 변환하면 Fig. 4와 같이  $f' = 7,225\text{Hz}$ (A지점)로 측정된다. P파 속도가 1,500m/s이므로, 심도 T'는 식  $T' = Cp/2f'$ 에 의하여 10.38cm로 계산되며, 이것을 실제 두께와

비교할 때 0.38cm의 오차로 모델 두께를 정확하게 찾아낸 것임을 알 수 있다.

Fig. 6에서 B지점에서의 주파수  $f'$ 는 2850Hz이다. P파 속도가 600m/s이므로, 심도 T'는 상기 식에 의하여 10.53cm로 계산된다. 그리고 C지점에서의 주파수  $f'$ 는 6,000Hz로 심도 T'는 상기 식에 의하여 5.0cm로 계산된다. 두 지점 모두 실제 공동까지의 두께와 비교할 때 모델 두께를 정확하게 찾아낸 것임을 알 수 있다.

### 4. 실험 및 결과 고찰

Fig. 6과 같이 실험모형은 가로×세로×높이가 40cm×40cm×70cm인 콘크리트로 타설되어 제작되었고 내부에 공동의 모양을 재현하기 위해서 인공적으로 정육면체(6cm×6cm×6cm)의 공동을 삽입하였다.

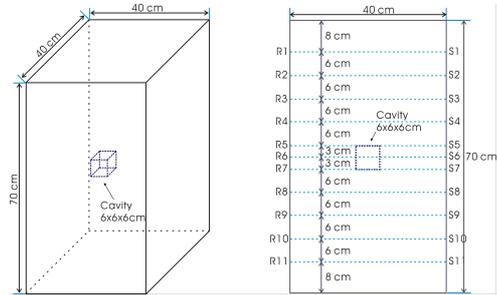


Fig. 6 실험모델의 입체도와 단면도

#### 4.1 충격탄성과 검사법 중 투과법 실험

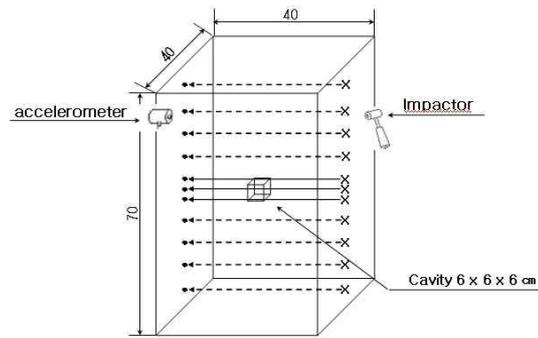


Fig. 7 투과법 실험 모식도

실험 방법은 Fig. 7과 같이 한쪽면에서 송신을 하고 수평한 반대쪽 면에서 수신을 하는 방식으로 측정하였다. 공동이 없는 부분에서는 6cm의 간격을 두었고 공동이 있는 부분에서는 3cm의 간격을 두었다.

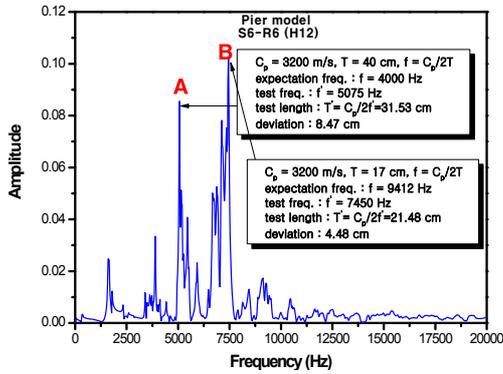


Fig. 8 공동이 있는 부분에서의 주파수 응답함수

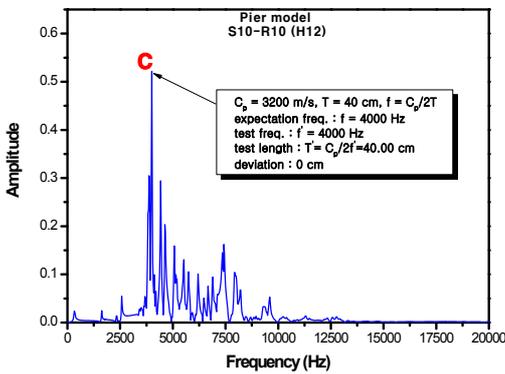


Fig. 9 공동이 없는 부분에서의 주파수 응답함수

Fig. 8은 두께가 40cm인 콘크리트 교각 모형에 6cm 크기의 공동이 존재할 경우에 측정된 주파수 응답함수(FRF ; Frequency Response Function)이다. 동적신호분석기(FFT Analyzer)에서 주 주기가 되는 구간을 첫 번째 공진모드로 푸리에 변환하면, 그림에서와 같이 A에서의 공진주파수는 5,075Hz, B에서의 공진주파수는 7,450Hz로 측정된다. 이때 A와 B는 각각 교각의 끝부분과 공동의 앞부분을 나타낸다. 공진주파수가 5,075Hz(A지점)일 경우, P파 속도가 3,200m/s이므로 심도 T'는 식  $T' = C_p/2f'$ 에 의하여 31.53cm로 계산된다. 실제 교각의 두께 40cm와 비교하면 8.47cm 정도의 측정오차가 발생한다. 그 이유는 송신기에 의해 생긴 응력파가 공동부분에서 반사, 굴절, 회절 등 여러 현상이 일어나면서 시간 지연이 발생했기 때문인 것으로 생각된다. 공진주파수가 7,450Hz(B지점)일 경우 심도 T'는 식에 의하여 21.48cm로 계산되며, 실제 공동까지의 두께 17cm와 비교할 때 4.48cm 정도의 측정오차가 발생한다. 이것은 측정 오차 한계를 5cm로 보았을 때 비교적 정확한 두께를 유추한 것임을 알 수 있다.

Fig. 9는 공동이 존재하지 않을 경우의 주파수 응답함수이며 C에서의 공진주파수는 4,000Hz로 상

기식에 의해서 40cm로 계산된다. 이것은 실제 콘크리트 교각 모형과 비교하여 오차가 없는 정확한 두께로 계산됨을 알 수 있다.

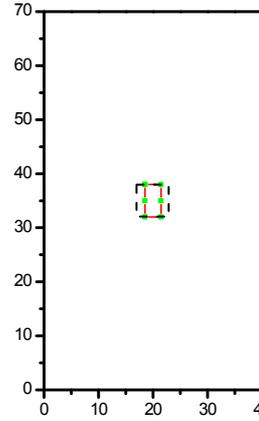


Fig. 10 충격탄성과 검사법 중 투과법을 이용한 공동부분의 실험결과를 영상화한 단면도

Fig. 10은 콘크리트 교각 모형의 공동부분에서 측정된 주파수 분석 결과를 영상화한 단면도이다. 이때 점선은 실제 공동의 위치를 나타내고 실선은 주파수응답함수에서 계산된 공동의 위치를 나타낸다. 이 2D 단면도의 공동 측정 결과를 보았을 때 측정 결과와 달리 더 작은 오차를 가진 것처럼 보이는 이유는 공동의 오른쪽면에 대한 그 측정값이 왼쪽 3개의 점이고 공동의 왼쪽면에 대한 그 측정값이 오른쪽 3개의 점이기 때문이다. 비록 이렇다 할지라도 이 측정값들이 5cm의 허용 오차 한계내에 있기 때문에 비교적 정확한 결과를 보여준 것이라 판단된다.

#### 4.2 충격탄성과 검사법 중 반사법 실험

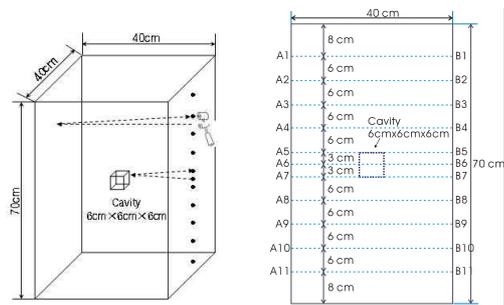


Fig. 11 반사법 실험 모델 모식도

지표반사법 탐사와 동일하게 교각의 한면(A단면)에 송·수신기를 배열하여 자료를 측정하였다.

Fig. 11과 같이 A단면의 측정위치 A5~A7구간은 공동이 존재하는 위치이다. 측정점의 위치는 투과법을 사용할 경우와 마찬가지로 6cm, 공동부에서는 3cm의 간격을 두었다. 단면 B에서도 마찬가지로 같은 실험을 수행하였다.

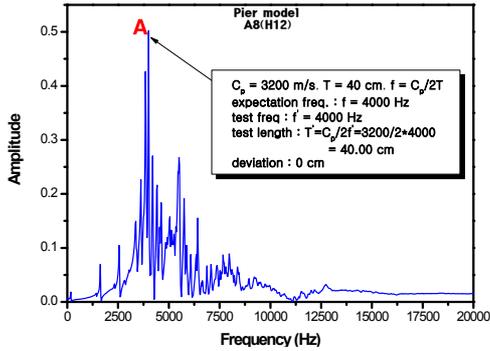


Fig. 12 공동이 없는 부분에서의 측정결과

Fig. 12는 공동이 없는 부분에서의 측정 결과이며, 교각의 끝부분을 나타내는 A에서의 측정공진주파수는 4,000Hz이며, 상기 식에 의해 40cm로 계산된다. 이것은 교각의 실제 단면거리인 40cm와 일치하였다.

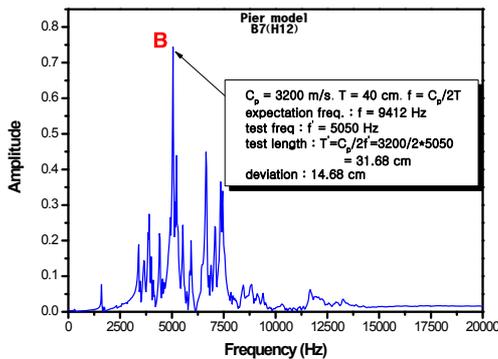


Fig. 13 공동이 있는 부분에서의 측정결과

Fig. 13은 교각 내 공동이 있는 부분에서의 측정 결과를 나타낸 것인데, 스펙트럼 단면에서 보면 입사한 충격파는 공동부분에서의 회절현상으로 인해 여러 개의 피크가 발생함을 알 수 있다. 공동의 앞부분을 나타내는 B에서의 측정공진주파수는 5,050 Hz로, 상기 식에 의해 31.68cm로 계산되어 공동의 탐지가 불가능한 것으로 나타났다. 그러나 공동이 없는 표면에서 측정된 결과와 공동에서 반사된 공진주파수 결과는 차이성이 있는데 이는 공동이 있음을 암시하고 있으나, 실제 교각에서는 내부 결함에 대한 정보를 갖지 못하는 실정으므로 해석이 어

렵다.

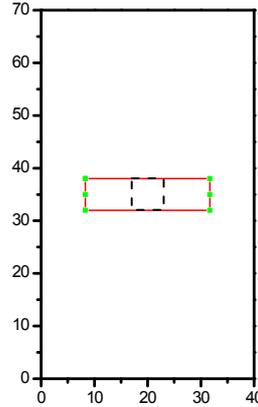


Fig. 14 충격탄성파 검사법 중 반사법을 이용한 공동부분의 실험결과를 영상화한 단면도

Fig. 14는 콘크리트 교각 모형의 공동부분에서 측정된 주파수 분석 결과를 영상화한 단면도이다. 이때 점선은 실제 공동의 위치를 나타내며 실선은 계산된 공동의 위치를 나타낸다. 그림에서 공동의 실제 위치와 계산된 위치는 큰 오차를 보여주고 있다.

#### 4.3 실험 결과 비교

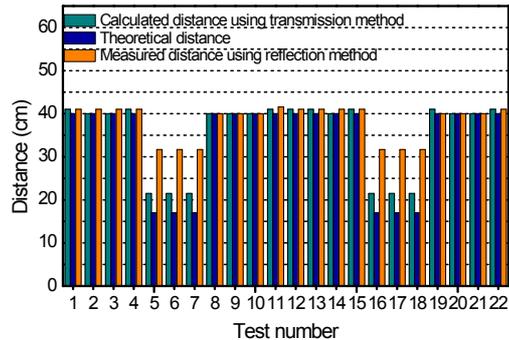


Fig. 15 측정방법에 따른 결과를 계산한 길이와 실제 길이의 비교

Fig. 15는 측정방법에 따른 결과를 계산한 길이와 실제 길이 차이를 비교한 히스토그램이다. 실험번호 1부터 실험번호 11까지가 교각 모형의 한쪽 단면을 측정된 것이고 실험번호 12부터 실험번호 22까지가 반대쪽 단면을 측정된 결과이다. 그리고 실험번호 5,6,7과 실험번호 16,17,18이 교각의 공동부분을 측정된 결과이다.

이 히스토그램을 보았을 때, 앞에서도 설명하였듯이 공동이 없는 부분에 대한 측정결과는 두가지

측정방법 모두 정확하였으나 공동부분에 대한 측정결과는 투과법을 사용한 실험에서는 측정오차가 작게 나타난 것을 볼 수 있고, 반사법을 사용한 실험에서는 측정오차가 큼을 볼 수 있다.

## 5. 결론

교각의 안전진단에 대한 적용성 및 신뢰성을 알아보기 위하여 충격탄성과 검사법을 사용하여 측정 방식에 따른 그 결과를 알아보고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 투과법 실험을 통하여 콘크리트 교각 모형의 두께와 공동의 위치를 측정하였다. 실험 결과 콘크리트 모형의 두께에 해당하는 최대 진폭을 갖는 주파수를 정확하게 찾을 수 있었고 공동의 위치 또한 정확하게 찾을 수 있었다.
- (2) 반사법 실험을 통하여 콘크리트 교각 모형의 두께와 공동의 위치를 측정한 결과, 콘크리트 모형의 두께에 해당하는 주파수를 정확하게 찾을 수 있었으나 공동의 위치는 큰 오차를 보였다.
- (3) 충격탄성과 검사법 중에 일반적으로 터널 라이닝 면과 같은 1차원 면에서 사용되는 반사법을 콘크리트 교각에 적용시킨 경우, 그 결과가 투과법을 이용했을 경우보다 훨씬 좋지 못했다. 반사법 실험에서 공동의 위치를 찾아내기가 어려운 이유는 공동이 위치하는 반사거리에 비해 공동의 규모가 상대적으로 작기 때문에 응력파가 다중반사 현상을 일으키지 못하고 파가 타고 넘어가는 현상을 일으키기 때문이다. 따라서 교각과 같은 3차원의 구조물에 대해 안전진단을 수행할 경우에는 투과법을 이용하여 검사를 수행해야만 정밀한 진단을 할 수 있다고 판단된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김동수, 서원석, 이광명, “콘크리트 지반 구조물의 비파괴검사를 위한 충격반향-표면파 병행기법 : 1.” 수치해석적 연구, *한국지반공학회논문집*, 제18권 4호, pp. 257-270, 2002.
- [2] 안제훈, 서백수, “충격반향기법의 주파수영역 해석을 이용한 구조물 안전진단에 관한 연구”, *터널과 지하공간*, 14권 1호, pp. 35-42, 2004.
- [3] Sansalone, M., and Streett, W., *Impact Echo : Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*, Bullbrier Press, 47-52, 1997.
- [4] Sansalone, M., and Carino, N J., “Impact Echo : a Method for Flaw Detection in Concrete

Using Transient Stress Waves”, *Report No. NBSIR 86-3452*, 1986.

- [5] 박형준, “충격반향기법과 SASW기법을 이용한 콘크리트 부재의 결함탐지”, *한국과학기술대학교 대학원 석사학위논문*, 1995
- [6] 김동수, 박형준, 이광명, “충격반향기법을 이용한 콘크리트 부재의 비파괴검사”, *콘크리트학회지*, 제9권 2호, pp. 109-119, 1997.
- [7] Lin, Y., Sansalone, M., Carino, N. J., “Impact-Echo Response of Concrete Shaft”, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 14, No.2, pp. 121-137, 1991.