

# 하수관거 배면 공동 탐지를 위한 충격반향법의 적용성 평가

## Assessment of Impact-echo Method for Cavity Detection in Dorsal Side of Sewer Pipe

송 석 민 <sup>1</sup>	Song, Seokmin	김 한 섭 <sup>2</sup>	Kim, Hansup
박 두 희 <sup>3</sup>	Park, Duhee	강 재 모 <sup>4</sup>	Kang, Jaemo
최 창 호 <sup>5</sup>	Choi, Changho		

### Abstract

The leakage of water under sewer pipelines is one of main sources of sinkholes in urban areas. We performed laboratory model tests to investigate the presence of cavities using impact-echo method, which is a nondestructive test method. To simulate a concrete sewer pipe, a thin concrete plate was built and placed over container filled with sand. The cavity was modeled as an extruded polystyrene foam box. Two sets of tests were performed, one over sand and the other on cavity. A new impact device was developed to apply a consistent high frequency impact load on the concrete plate, thereby increasing the reliability of the test procedure. The frequency and transient characteristics of the measured reflected waveforms were analyzed via fast Fourier transform and short time Fourier spectrum. It was shown that the shapes of Fourier spectra are very similar to one another, and therefore cannot be used to predict the presence of cavity. A new index, termed resonance duration, is defined to record the time of vibration exceeding a prescribed intensity. The results showed that the resonance duration is a more effective parameter for predicting the presence of a cavity. A value of the resonance period was proposed to estimate the presence of cavity. Further studies using various soil types and field tests are warranted to validate the proposed approach.

### 요 지

싱크홀 발생의 주요 원인인 하수관거 배면의 공동 탐지를 위해 비파괴검사 방법 중 하나인 충격반향법을 적용한 실내 모형 실험을 수행하였다. 콘크리트 하수관의 모의를 위해 얇은 두께의 콘크리트 평판 시험체를 제작하였고 주변 지반은 모래로 조성하였으며 공동의 모사를 위해 스티로폼 박스를 모래에 매립하였다. 콘크리트 판 배면이 공동인 경우와 완전히 모래에 밀착된 경우로 나누어 실험이 진행되었으며 일정한 타격 강도의 유지를 위해 새롭게 제작된 타격 장치를 사용하여 획득 자료의 신뢰성을 높였다. 측정된 반사파는 고속 푸리에 변환과 국소 푸리에 변환을 사용하여 주파수 특성 및 시간 특성을 분석하였다. 그 결과, 푸리에 스펙트럼의 형상으로는 공동의 유무를 판별할 수 없는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 공진 시간이라고 명한 새로운 지표를 제안하였다. 이는 공진 주파수가 일정 강도를

1 비회원, 한양대학교 건설환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Env. Engr., Hanyang Univ.)

2 비회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사후연구원 (Post-Doctoral Researcher, Dept. of Civil and Env. Engr., Hanyang Univ.)

3 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil and Env. Engr., Hanyang Univ., Tel: +82-2-2220-0322, Fax: +82-2-2220-1945, dpark@hanyang.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

4 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 (Member, ph.D. Student, Dept. of Civil and Env. Engr., Hanyang Univ.)

5 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구소 연구위원 (Member, Research Fellow, Korea Institute of Civil Engr. and Building Technology)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

초과하는 지속 시간으로 정의하였다. 공진 시간은 공동의 유무를 효과적으로 예측하는 것으로 나타났다. 나아가 공동 유무를 구분할 수 있는 공진 시간을 제시하였다. 실제 현장 조건에서의 검증과 보다 광범위한 적용성의 확보를 위해 다양한 지반 조건에 대한 추가 실험과 실제 하수관에 대한 현장 실험 등을 진행할 예정이다.

**Keywords** : Sewer pipe, Cavity detection, Nondestructive testing, Impact-echo, Signal processing, Resonance duration

## 1. 서론

최근 국내에서 빈번히 발생하고 있는 지반침하의 일종인 싱크홀(sinkhole) 현상으로 인해 시민과 시설의 안전에 대한 우려가 커지고 있다. BAI(2015)에 따르면 2010년부터 2014년 7월까지 서울시 관할 도로에서 발생한 크고 작은 싱크홀 현상은 총 3,119 건으로 매년 지속적인 증가 추세를 보이고 있다. 국부적인 지반침하의 발생 원인으로서는 터널 등의 지하 구조물 시공으로 인한 지하수위의 저하에 따른 공동 발생, 굴착에 따른 흠막이 가시설 배면의 지하수 및 토사 유출에 의한 공동 형성 등이 있으나, 80% 이상의 대부분을 차지하는 원인은 노후화된 하수도 시설의 누수로 인한 지반의 교란 및 토사 유출이다. 관로 주변의 토사 유출로 공동이 발생하며, 이로 인해 지반의 지지력이 감소하여 관로 상부의 지반 침하로 이어지게 된다. 따라서 이러한 싱크홀 현상의 예측과 대응을 위해서는 하수관로 배면의 공동 유무 판단을 위한 효율적이고도 정확한 탐지 및 모니터링 기법이 필요할 것이다.

송수관로의 상태 평가를 위해 현재 사용되고 있는 비파괴검사 방법으로는 1) CCTV 또는 레이저 스캔 등을 이용하는 육안 조사, 2) 누설 자속탐상법(magnetic flux leakage), 지표 투과 레이더(ground penetrating radar) 등에 의한 전자기적 방법, 3) 수중 음파 탐지 프로파일링 시스템(sonar profiling system), 충격반향법(impact-echo method) 등을 포함한 음향학적 방법, 4) 초음파 방법, 5) 방사선이나 열화상을 이용하는 방법 등이 있다(Liu and Kleiner, 2013). 이 중 음향학적 방법의 하나인 충격반향법은 슬라브 형태 콘크리트 구조물의 내부 결함 탐지를 위해 개발되었으며(Carino et al., 1986; Sansalone and Carino, 1986), 이후 기둥, 보와 같은 균일단면부재의 결함 탐지에 적용되었다(Lin and Sansalone, 1992a, b, c). Colla and Lausch(2003)는 충격반향법에서 타격 도구로 사용되는 강구(steel ball)의 직경과 발생하는 주파수 영

역 간의 상관관계를 분석하였다. 강구의 직경이 작을수록 고주파수 영역대가 발생하며, 발생하는 주파수 영역대가 타격 대상의 공진 주파수보다 낮을 경우 측정된 데이터의 질이 떨어지거나 공진 주파수 측정이 정확히 이루어지지 않는 것으로 나타났다. 콘크리트 구조물과 배면의 부착 상태를 평가하기 위한 연구에도 충격반향법이 응용되었다. Aggelis et al.(2008)은 터널 라이닝과 주변 암반 사이의 그라우팅 상태에 대해 충격반향법을 적용한 실험을 통해 완전 부착 상태와 부분 부착 상태로 구분하여 시간 영역과 주파수 영역, 시간-주파수 영역에 대한 특성을 분석하였다. 그라우팅의 부착 상태가 불량할수록 라이닝과 그라우팅의 경계에서 많은 반사파가 발생하며, 이로 인해 측정되는 진동의 지속 시간이 길어지고 공진 주파수에서의 진폭이 커지는 것으로 나타났다. Song and Cho(2009)는 터널의 슛크리트 라이닝과 주변 암반 사이의 부착 상태 평가를 위해 수치해석과 모형 실험, 현장 실험을 실시하였다. 라이닝과 암반의 부착 상태를 완전 부착 상태와 부분 부착 상태, 공동 상태로 나누어 실험하였으며, 표면파에 의한 영향을 줄이기 위해 zero-padding 기법을 적용하였다. 부착 상태가 좋을수록 부착면으로의 에너지 전달이 커져서 공진 주파수의 지속 시간이 짧고 진폭은 작아지며 감쇠비가 증가하는 것을 확인하였다. Ryden et al.(2013)은 터널 라이닝 뒤채움재의 상태 변화를 측정하기 위한 실험을 통해 Q-factor를 분석하였다. 공진 주파수의 진폭에 대한 분석 대신 Q-factor를 사용하면 타격 도구에 의해 발생하는 힘을 고려하지 않은 분석이 가능하다. 뒤채움재의 양생 시간이 짧아 라이닝 배면에 공동이 존재할 경우 Q-factor가 크게 나타나며, 양생 시간이 늘어나 라이닝과 뒤채움재의 부착 정도가 양호해짐에 따라 Q-factor가 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같이 충격반향법은 원래의 목적인 콘크리트 부재 내부의 결함 탐지 이외에도 부재를 둘러싼 주변 물질의 상태 파악에도 적용되고 있다.

본 연구에서는 소형 모듈에 탑재하여 하수관 내부에

서 배면의 공동을 탐지하기 위한 방법으로써 충격반향법의 적용성을 검토하였다. 일반적으로 하수관에 널리 사용되는 콘크리트 홉관의 두께로 시험체를 제작하고 공동 유무에 따라 주변 지반을 조성하여 각 조건에 따른 반사파 분석을 통해 공동 탐지에 충격반향법의 적용성을 평가하고, 공동 유무를 판단할 수 있는 정성적, 정량적 기준을 제시하였다. 이는 싱크홀 현상에 대한 피해 저감 대책의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 충격반향법(Impact-echo method, IE)

충격반향법은 타격에너지에 의해 발생하는 탄성파에 기초를 두며, 탄성파가 진행하면서 발생하는 반사파에 대한 주파수 분석을 통해 대상의 상태를 평가한다. 콘크리트 표면에 충격을 가해 발생하는 탄성파 중 P파에 의한 진동을 측정하며, 콘크리트의 상태에 따라 발생하는 주파수의 특성을 분석한다. 콘크리트 부재에 타격으로 인한 응력 또는 변위가 발생하면 응력파가 발생하며, 구형의 파면을 가지고 부재 내부로 전파된다. 이러한 경우에 발생하는 응력파는 P파와 S파, R파로 구분된다. P파는 수직응력에 의한 전파와 관련되며, S파는 전단응력에 의한 전파와 관련된다. R파는 표면으로 전파되는 파를 의미한다. 같은 매질 내에서의 각각의 응력파는 일정한 속도로 전파되며, 응력파 속도는 매질의 탄성계수와 포아송비, 밀도에 의해 결정된다. 또한 P파와 S파, R파의 속도는 매질의 포아송비를 이용하여 서로 변환 가능하다.

응력파가 서로 다른 매질의 경계를 통과하면서 반사파가 발생한다. 이러한 경우 반사파의 세기는 매질 간의 고유 음향 임피던스(specific acoustic impedance) 차이와 입사파의 입사 각도에 의해 결정된다. 입사파의 입사 각도가 90° 일 때 회절이나 굴절없이 반사파의 세기가 가장 크게 나타나며, 반사파의 발생 정도는 반사계수(reflection coefficient,  $R$ )로 나타낸다. 반사계수  $R$ 은 식 (1)과 같이 표현된다(Carino, 2001).

$$R = \frac{Z_t - Z_i}{Z_t + Z_i} \quad (1)$$

여기서  $Z_t$ 는 입사되는 매질의 고유 음향 임피던스며,  $Z_i$ 는 투과되는 매질의 고유 음향 임피던스다. 고유 음향 임피던스는 매질에서의 응력파 속도와 밀도에 의해 나

타나는 물질의 고유 특성이며, 대표적인 물질에 대한 값이 Table 1에 정리되어 있다.

본 연구에서 수행하는 실험은 콘크리트 부재와 부재 배면의 지반 또는 공동의 존재 여부를 분석하는데 목적이 있다. 콘크리트 부재에서 진행하는 응력파는 부재의 경계면에서 지반 또는 공기를 만나 반사된다. 이러한 경우 지반과 공기의 고유 음향 임피던스 차이에 따라 발생하는 반사파의 크기가 다르게 나타난다. 반사파는 가속도계로 측정되어 저장장치에 기록되며, 파형의 주파수 특성을 분석하여 콘크리트 배면의 공동 유무를 판단한다.

판 형태의 콘크리트 부재에서 측정되는 P파의 주파수 특성은 콘크리트 부재 윗면과 아랫면에서의 반사파에 의해 나타난다. 이 경우 측정되는 주파수는 부재의 두께에 대한 공진 주파수  $f_r$ (Hz)이며, 식 (2)로 나타낼 수 있다(Carino, 2001).

$$f_r = \frac{\beta V_p}{2t} \quad (2)$$

여기서  $t$ 는 콘크리트 부재의 두께(m)이며  $\beta$ 는 부재의 형상을 나타내는 형상계수로 판 형태의 부재에서는 0.96의 값을 가진다.

타격 도구로는 충격 해머(impact hammer) 또는 강구(steel ball)가 주로 사용되는데 타격 도구의 적절한 선택은 충격반향법에 있어서 매우 중요한 요소이다. 타격에 의한 진동은 부재의 두께의 모드(mode)에 해당하는 공진을 일으키는데, 타격 시 발생하는 주파수의 최대 범위가 공진 주파수보다 커야만 공진이 발생한다. 따라서 부재의 두께에 해당하는 공진 주파수를 발생시킬 수 있는 적절한 타격 도구를 선정해야 한다. Carino(2001)에 따르면 타격에 의해 발생하는 펄스는 힘-시간 관계에서 반파장의 사인 곡선으로 나타나며, 타격이 이루어지는 시간은 타격 도구와 부재의 접촉 시간에 의해 결정된다. 또한 이를 푸리에 변환(Fourier transform)하여 발생하는

Table 1. Specific acoustic impedance for some materials (Carino, 2001)

Material	Specific acoustic impedance (kg/m <sup>2</sup> s)
Air	0.4
Water	0.5×10 <sup>6</sup>
Soil	0.3~4×10 <sup>6</sup>
Concrete	7~10×10 <sup>6</sup>
Steel	47×10 <sup>6</sup>

주파수 범위를 확인할 수 있으며, 접촉 시간이 짧을수록 주파수 범위가 증가한다. 충격 해머는 측정 장치에 연결하여 타격에 의해 발생하는 펄스를 측정할 수 있으나 강구는 직접 측정이 불가능하다. Colla and Lausch(2003)는 강구와 부재의 접촉 시간  $t_c(\text{sec})$ 를 식 (3)으로 제시하였으며, 강구에 의해 발생하는 주파수의 최대값  $f_{\text{max}}(\text{Hz})$ 를 식 (4)와 같이 구하였다.

$$t_c = 0.0043D \quad (3)$$

$$f_{\text{max}} = \frac{1.25}{t_c} = \frac{291}{D} \quad (4)$$

여기서  $D$ 는 강구의 직경(m)이다. 접촉 시간은 강구의 직경에 비례하며, 강구의 직경이 작을수록 주파수의 최대 범위는 증가한다.

반사파에 의해 기록된 파형의 주파수를 분석하기 위한 방법으로는 푸리에 변환이 널리 사용된다. 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform, FFT)은 시간 영역에서 측정된 파형을 주파수 영역으로 변환시킨다. 이 방법은 탁월 주파수(predominant frequency)의 값을 쉽게 찾을 수 있어 콘크리트 판의 공진 주파수를 확인하기에는 용이하지만 시간에 대한 정보가 누락되는 단점이 있다. 이를 보완하기 위한 방법이 국소 푸리에 변환(short time Fourier transform, STFT)이다. 이 방법은 시간 영역에 대한 자료를 작은 창으로 분할하여 각 영역에 대해 FFT를 반복하여 시간 변화에 따른 주파수의 빈도를 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 공진 주파수의 진폭과 시간에

따른 주파수의 특성을 파악하기 위하여 FFT와 STFT를 복합적으로 사용하였다.

### 3. 모형 실험

#### 3.1 실험 장치의 구성

하수관으로 주로 사용되고 있는 원심력 철근 콘크리트관은 한국공업규격 KS F 4403에 규정되어 있으며, 내부 지름은 250mm에서 1,800mm이고 각각의 지름에 따라 28mm 부터 127mm의 두께를 가진다. 본 연구에서 사용한 시험체는 D600관의 두께에 해당하는 50mm로 선정하였으며, 분석에 필요한 P파 이외에 R파의 반사에 의한 잡음을 최소화 하기에 충분한 크기인 가로와 세로 각각 1.2m로 제작하였다. 하수관 주변 지반의 모사를 위해 가로, 세로 각각 1.5m, 높이 1m의 철재 토조에 모래를 0.8m 깊이로 채웠으며, 그 위에 콘크리트 시험체를 위치시켰다. 공동이 존재하는 경우를 모의하기 위해서는 콘크리트 판을 모래 위에 올리기 전에 미리 속이 빈 스티로폼 박스를 토조 중앙에 콘크리트 판과 밀착될 수 있도록 매설하였다. 스티로폼 박스의 크기는 가로 250mm, 세로 200mm, 높이 130mm이다. Fig. 1에 실험에 사용된 콘크리트 시험체와 그 배면에 위치한 공동과 모래가 도시되어 있으며 Table 2에 각 물질의 기본 물성이 정리되어 있다.

타격 도구는 일정한 응력파를 발생시키기 위하여 직접 제작한 장비를 사용하였다. 계측 장비로는 콘크리트 판과 공동 또는 모래와의 경계면에서 발생하는 반사파

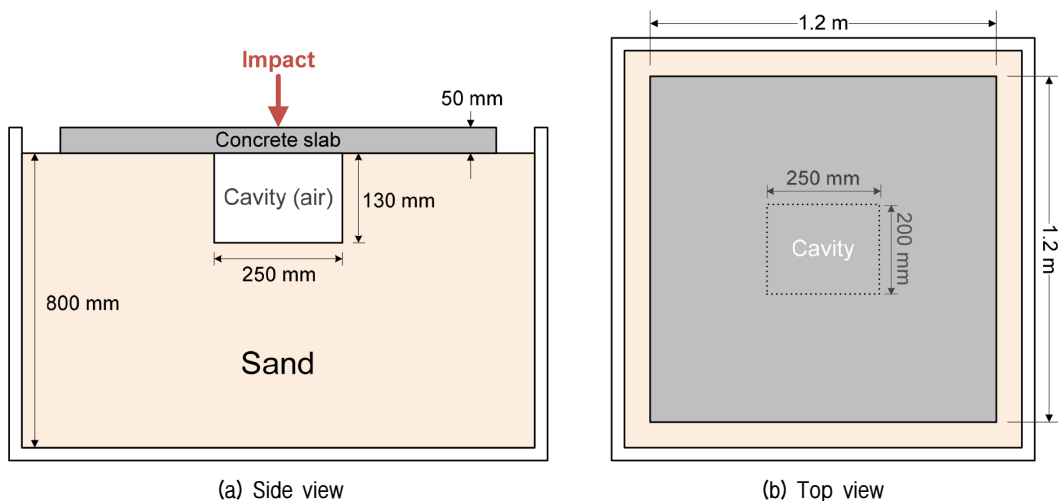


Fig. 1. Setup and dimensions of experimental test

Table 2. Material properties for air, soil and concrete

Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	P-wave velocity (m/s)
Air	1.22	0.142*	-	340
Soil	1420	2.90	0.25	400~1200
Concrete	2290	30	0.2	3500~4500

\*adiabatic bulk modulus

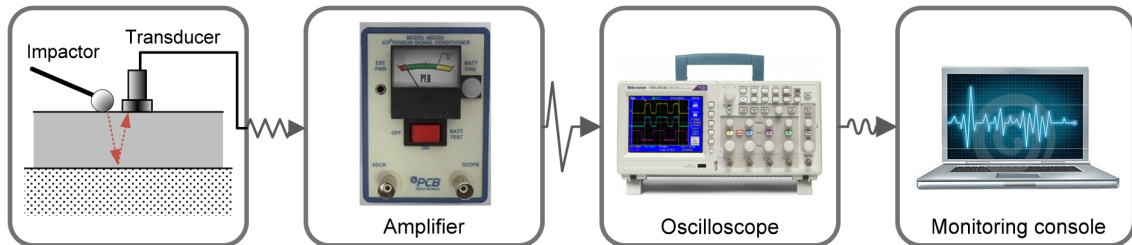


Fig. 2. Procedure for impact-echo test

를 측정하기 위한 가속도계(PCB 352A60)와 미세 신호 증폭을 위한 증폭계(PCB 480C02), 증폭된 파형 표시를 위한 오실로스코프(Tektronix TDS2002C)를 사용하였고 측정된 신호는 오실로스코프에 연결된 랩탑 컴퓨터에 저장된다. Fig. 2에 충격반향법의 실험 과정을 도시하였다.

실험에 사용된 콘크리트 판의 공진 주파수를 적절하게 측정하기 위해 실험 장비의 성능에 대한 고려가 필요하다. 일반적인 콘크리트에서 P파의 전파 속도는 4,000m/s이며, 식 (2)에 의하면 50mm 두께의 콘크리트 판의 공진 주파수는 38.4kHz이다. 실험에 사용된 가속도계가 측정 가능한 주파수 범위는 5Hz부터 60kHz까지이며, 이는 콘크리트 판의 공진 주파수를 측정하기에 충분한 범위이다. 타격 도구는 직경 5mm의 강구를 사용하였다. 식 (4)에 따르면 직경 5mm의 강구에 의해 발생하는 최대 주파수는 58.2kHz로 이 또한 콘크리트 판의 공진 주파수를 측정하기에 충분하다. 본 연구에서는 실험 시 발생할 수 있는 오차나 잡음의 영향을 최대한 배제하고, 공동 유무 판단을 위한 보다 정확한 정보 제공을 위해 공동이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우에 대해 각각 100 회의 반복 실험을 수행하고 획득 자료를 통계 분석하였다. 이때 각 실험의 타격 강도가 일정하지 않으면 측정된 반사파의 신호가 균일하지 않아 실험 자료의 일관성 있는 분석에 어려움이 따른다. 따라서 강구가 항상 같은 높이에서 낙하하여 타격 강도가 일정하게 유지되도록 Fig. 3과 같이 새롭게 제작된 타격 도구를 사용하였다. 타격 도구에 부착된 강구는 강선(steel wire)에 연결된 회전축을 중심으로 낙하하여 타격이 이루어지며,

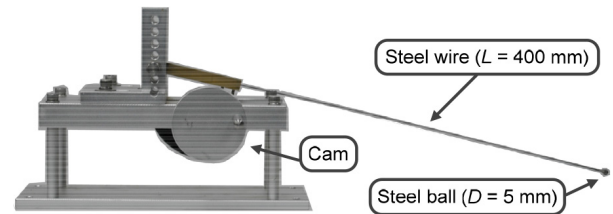


Fig. 3. New impactor developed for this study

실험 조건에 따라 강구의 크기와 낙하 높이가 조절 가능하도록 설계하였다. 본 연구에서 사용된 강구의 크기는 5mm이며, 강구에서부터 회전축까지의 길이는 400mm, 강구의 낙하 높이는 250mm로 일정하게 유지하였다.

### 3.2 분석 방법

충격반향법의 적용 시 분석에 필요한 신호는 콘크리트 표면에 직각 방향으로 진행되는 P파의 반사파이다. 하지만 콘크리트 상부 표면을 따라 진행하다가 가속도계에 측정되는 R파와 콘크리트 판 모서리에서 발생하는 R파의 반사파 등의 잡음이 동시에 측정될 수 있다. 이러한 잡음은 정확한 공진 주파수의 측정에 악영향을 미친다. 본 연구에서 사용한 50mm 두께의 콘크리트 판에서 측정된 원시 신호는 0~30kHz의 저대역 성분과 30~60kHz의 공진 주파수 대역의 성분이 동시에 나타난다. Gibson and Popovics(2005)에 의하면 이때 발생하는 저대역 신호는 콘크리트 배면 이외의 경계면에서 발생하는 반사파로 인해 측정되며, 공진 주파수 분석에 불필요한 성분이다. 본 연구에서는 이러한 저주파 대역의 잡음을 효과적으로 제거하기 위해 고역 통과 필터(high-pass

filter, HPF)를 사용하였다. 고역 통과 필터는 IIR(infinite impulse response) 필터의 일종인 Butterworth 필터를 사용하였다. 이를 통해 일정 주파수 이하의 저대역 신호를 감쇠시켜 원하는 대역의 주파수를 얻을 수 있다. 고역 통과 필터의 차단주파수(cutoff frequency)는 분석에 필요한 공진 주파수 대역에 영향을 미치지 않으면서 동시에 잡음을 최소화할 수 있도록 반복 분석을 통해 얻은 최적값인 15kHz로 설정하였다. 필터링된 신호는 정규화 후에 FFT와 STFT의 신호 처리를 거치게 된다. FFT를 통해 공진 주파수와 최대 진폭을 구할 수 있으며, STFT를 통해 공진 주파수 영역의 공진 시간을 확인할 수 있다. 이와 같은 신호 처리 과정을 Fig. 4에 도시하였다.

공진 시간의 산정은 Fig. 5의 절차를 따른다. STFT 결과는 3 차원 자료로서  $x$  축은 시간,  $y$  축은 주파수,  $z$  축은 주파수의 강도를 의미한다.  $z$  축에 대해 정규화한 후 FFT에서 결정된 공진 주파수 대역에 해당하는 주파수 강도를 분석한다. 정규화된  $z$  값이 일정 세기 이상으

로 지속되는 시간을 산정하여 이를 공진 시간으로 정의하였다. 이 때 기준이 되는  $z$  값을 임계 진폭(threshold amplitude)으로 정의하였으며, 공동 유무를 판단하기 위한 최적의 값을 선정하기 위한 분석이 이루어졌다. 임계 진폭에 대한 분석 결과는 다음 장에 기술하였다. 모든 일련의 신호처리 과정은 MATLAB R2015b(2015)의 스크립트를 이용하여 자동으로 처리되도록 하였다.

본 연구에서 개발된 신호 처리 및 공진 시간 산정 절차를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 충격반향법에 의해 얻어진 원시 신호(Fig. 4①)에 고역 통과 필터를 적용하여 저주파 대역의 잡음을 제거한다(Fig. 4②).
- (2) 필터링된 파형에 FFT(Fig. 4③) 및 STFT(Fig. 4④)를 적용하여 FFT 결과로부터 최대 진폭 및 공진 주파수 확인한다.
- (3) STFT 결과로부터 (2)에서 결정된 공진 주파수 대역의 프로파일 추출한다(Fig. 5).

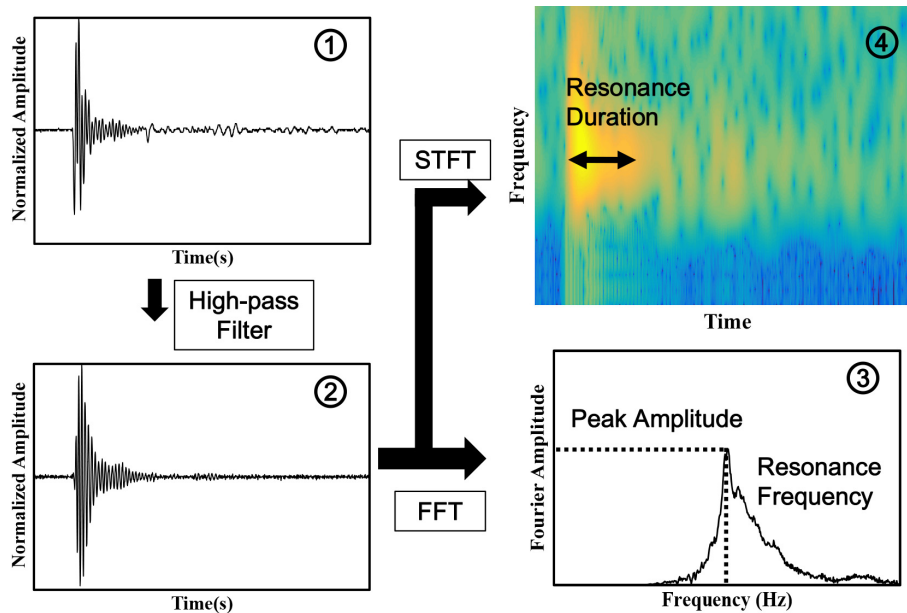


Fig. 4. Proposed signal processing

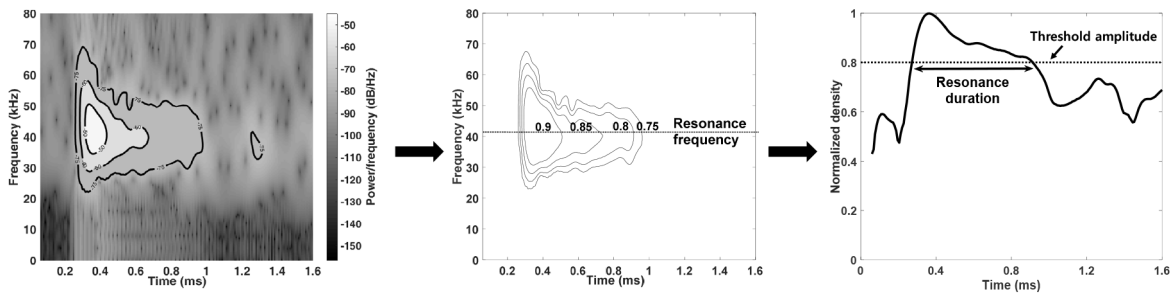


Fig. 5. Determination of resonance duration

(4) 공진 주파수 대역의 프로파일에 임계 진폭을 적용하여 공진 시간을 산정한다.

## 4. 결과 분석 및 고찰

### 4.1 신호 처리

충격반향법의 실험은 공동이 있는 경우와 없는 경우에 대해 각각 100회씩 수행되었으며, 반복 실험을 통해 얻어진 실험 자료를 FFT 및 STFT를 이용하여 시간 영역과 주파수 영역, 시간-주파수 영역에서 분석하였다. 이에 대한 대표적인 결과를 Fig. 6~7에 도시하였다. 시간 영역의 결과는 고역 통과 필터링 전과 후로 구분하여 나타내었다. FFT에 의한 주파수 영역 결과와 STFT를 통한 시간-주파수 영역의 결과를 공진 주파수와 최대 진폭, 공진 시간과 함께 도시하였다.

주파수 영역에서 측정된 공진 주파수는 공동이 존재하지 않는 경우 40,649Hz이며, 존재하는 경우 40,405Hz이다. 실험에 사용된 콘크리트 판의 두께는 50mm이므로 식 (2)에 대입하여 구한 콘크리트에서의 P파 속도는

각각 4,234m/s와 4,209m/s이다. 이는 일반적인 콘크리트의 속도인 3,500m/s~4,500m/s의 범위에 속하는 값으로 실험을 통해 측정된 공진 주파수의 값이 적절하다고 판단된다. 공진 주파수에서의 최대 진폭은 공동이 없는 경우  $7.602 \times 10^{-5}$ , 있을 경우  $8.332 \times 10^{-5}$ 로 공동이 있을 때 최대 진폭이 다소 크게 나타났다.

시간-주파수 영역 분석에서는 공진 시간을 측정하였다. 공진 시간을 측정하기 위해서는 임계 진폭이 먼저 결정되어야 한다. 최적의 임계 진폭을 결정하기 위해 총 200 개의 측정 자료에 대하여 0.6부터 0.9까지 0.1 간격으로 4 개의 임계 진폭을 적용하여 각각의 공진 시간을 측정하였다. 각각의 임계 진폭에 대해 공동이 존재하는 경우의 공진 시간과 존재하지 않는 경우의 공진 시간을 비교하여 가장 뚜렷한 차이를 나타낼 때 이를 최적 임계 진폭으로 선정하였다. Table 3에 정리되어 있는 바와 같이 임계 진폭이 0.6과 0.7일 경우 전체 자료의 중간값의 차이가 각각 0.004ms로 거의 차이를 보이지 않았으며, 0.9의 경우 0.016ms로 나타났다. 이에 비해 임계 진폭이 0.8일 때 중간값의 차이가 0.024ms로 가장 명확한 차이를 나타내어 이를 최적 임계 진폭으로 결정하고 이에

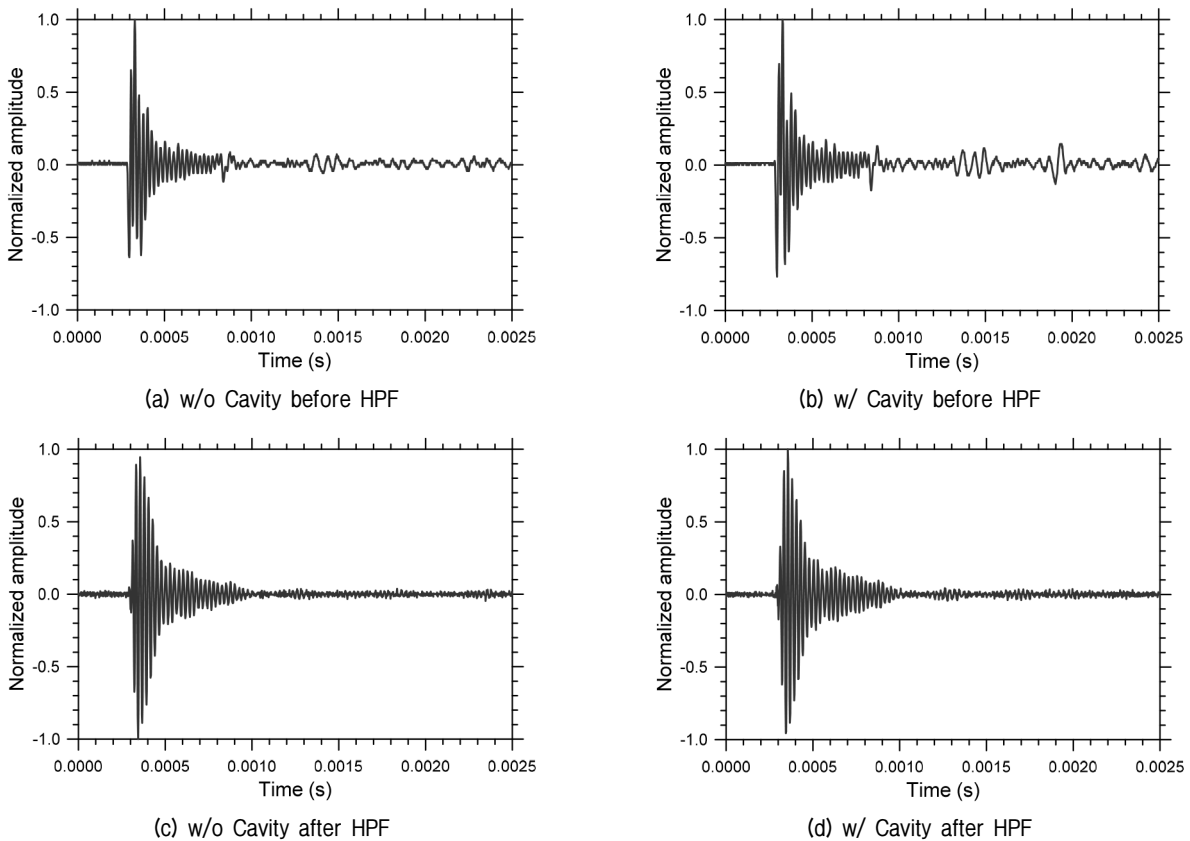


Fig. 6. Measured reflected waveforms

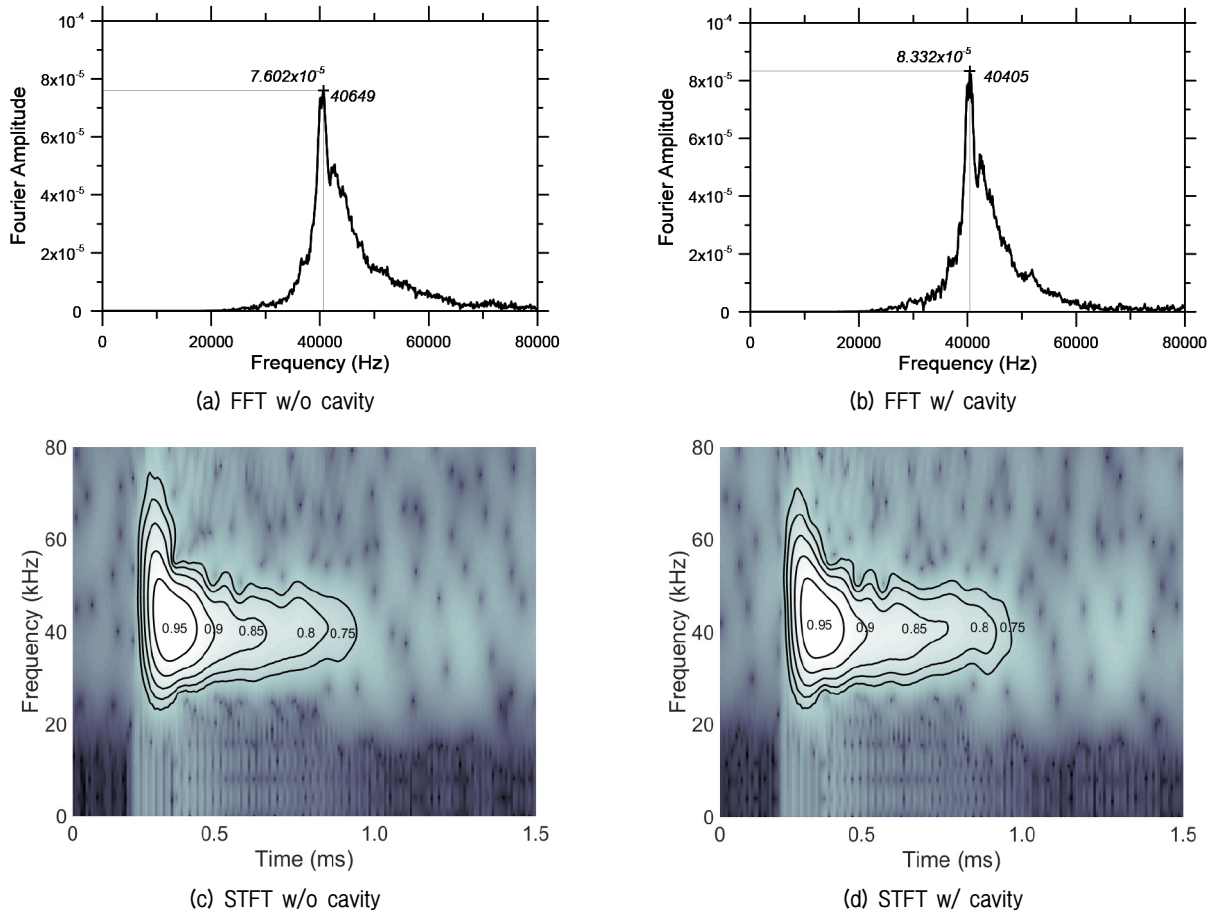


Fig. 7. Results of signal processing

Table 3. Sensitivity analysis of threshold amplitude

Threshold amplitude		0.6	0.7	0.8	0.9
Median value of resonance duration (ms)	w/o cavity	0.768	0.724	0.616	0.200
	w/ cavity	0.772	0.728	0.640	0.216

따라 공진 시간을 산정하였다.

선정된 임계 진폭에 의해 산정된 공진 시간은 공동이 존재하는 경우 0.616ms, 존재하지 않는 경우 0.640ms로 측정되었으며, 공동이 존재하는 경우 공진 시간이 증가하는 경향이 나타났다. 이는 콘크리트 판 배면의 상태에 따른 반사파 진폭 차이의 영향으로 분석된다. 배면에 모래 지반이 있는 경우 콘크리트와 마른 모래 지반의 반사계수는 약 0.8이며, 배면에 공동이 있는 경우 콘크리트와 공기의 반사계수는 1.0이다. 반사계수의 크기에 따라 반사파의 진폭이 결정되며, 콘크리트와 모래의 경계면에서 발생하는 반사파는 콘크리트와 공기의 경계면에서 발생하는 반사파보다 진폭이 작게 나타난다. 반사파의 진폭이 작을수록 경계면에서 투과되는 파의 성분이 커진다는 것이며, 타격으로 발생한 파의 에너지가 경계

면에서 많이 소산되는 것을 의미한다. 즉, 지반의 밀도가 증가하고 P파의 전파 속도가 빨라질수록 지반의 고유 음향 임피던스가 증가하며, 이에 따라 반사계수가 작아지고 반사파의 진폭이 작아진다. 따라서 콘크리트 배면 지반의 밀도가 높을수록 Table 1과 식 (1)에 의해 반사파의 진폭이 빠르게 감소하고 공진 시간이 짧아질 것으로 예측된다.

#### 4.2 최대 진폭과 공진 시간 분석

본 연구에서는 공동 유무에 따라 각각 100 회씩 총 200 회의 실험이 수행되었으며 STFT를 통해 측정된 공진 시간의 확률 밀도 함수 분포와 빈도는 Fig. 8에 도시하였다. 공동이 존재하지 않는 경우에 대한 공진 시간의



중간값은 0.616ms이며 이때 표준편차는 0.0113이다. 공동 조건에서의 공진 시간 중간값은 0.640ms로 나타났으며 표준편차는 0.00515이다. 이외에 FFT에 의해 얻어진 공진 주파수에서의 최대 진폭의 범위, 평균 등 자세한 통계 분석 결과는 Table 4에 정리하였다. 콘크리트 판 배면에 공동이 있는 경우 공동이 없는 경우에 비해 공진 시간은 길어지고 최대 진폭이 다소 커지는 경향을 나타낸다. 이와 같은 결과는 콘크리트 배면의 상태에 따른 공진 시간과 최대 진폭의 변화를 제시한 Song and Cho (2009)의 결과와 일치한다. Fig. 8과 Table 4에서 볼 수 있듯이 최대 진폭에 의해 공동 유무를 판별하는 것은 그 범위가 서로 겹치는 부분이 많아 명확한 구분이 쉽지 않다. 그에 비해 공진 시간은 공동의 유무를 상대적으로 잘 구분하여 나타내므로 보다 효과적인 공동의 탐지가 가능할 것으로 판단된다. 확률 밀도 함수를 통해 분석된 결과는 0.628ms를 경계로 하여, 공진 시간이 이보다 길게 측정될 경우 공동이 있는 것으로 나타났다. 공동이 실제 존재하는 경우에 공동이 없다고 오탐지할 확률은 3.29%로 나타났으며, 공동이 없을 경우에 공동이 있다고 분석될 확률은 11.0%로 나타났다. 단, 본 연구에서 수행된 실내 모형 실험은 실제 하수관에 대한 실험이

아닌 판 형태의 콘크리트 부재를 대상으로 수행되었으므로 본 연구의 결과를 공동 탐지에 대표적인 지표로 사용하기 위해서는 실제 콘크리트 하수관에 대한 추가적인 실험이 필요할 것이다. 또한, 하수관 배면의 지반을 모의하기 위해 사용한 모래는 실제 하수관거가 매립되는 일반적인 심도의 지반과 비교하면 상당히 느슨한 상태이며 따라서 실제 지반에 비해 반사계수가 커서 공동 유무에 따른 공진 시간과 최대 진폭의 차이가 확연히 나타나지는 않는다. 하지만 4.1절에서 언급한 바와 같이 밀도가 높은 지반에서는 보다 명확한 공동 탐지가 가능할 것이다. 이를 검증하고 보다 폭넓은 적용성 확보를 위해 다양한 밀도, 탄성계수, 포아송비 등의 지반 조건에 대한 추가적인 실험과 자료 분석이 필요할 것이다.

## 5. 결론

하수관거 배면의 공동 탐지를 위해 충격반향법을 적용하였다. 하수관의 모의를 위해 판 형태의 콘크리트 구조물을 사용하였고 하수관이 완전히 모래에 밀착된 경우와 배면에 공동이 형성된 경우로 나누어 충격 탄성과 실내 실험을 수행하였다. 일정한 타격 강도를 유지하기 위해 새롭게 제작된 타격 장치를 사용하여 실험의 신뢰성을 높였으며, 측정된 신호의 처리는 FFT와 STFT를 적용하여 분석하였다. 신호 처리 단계부터 공동 유무 판단을 위한 공진 주파수와 최대 진폭, 공진 시간의 산정 과정은 MATLAB R2015b(2015)를 이용하여 개발한 프로그램으로 이음매없이 효율적으로 수행되었다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) FFT를 통해 공진 주파수와 최대 진폭을 측정하였으며 콘크리트 판 배면에 공동이 없을 경우( $7.602 \times 10^{-5}$ ), 공동이 있을 경우( $8.332 \times 10^{-5}$ )에 비해 최대 진폭이 작게 측정되었다.
- (2) STFT를 통해 공진 주파수에서의 공진 시간을 측정하

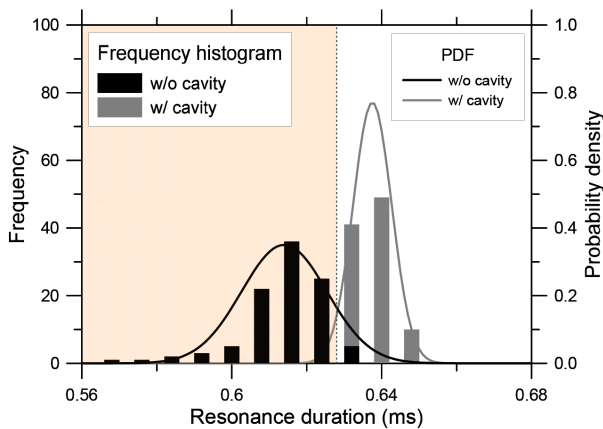


Fig. 8. Occurrence frequency and probability density function of resonance duration

Table 4. Statistics of signal processing results

	w/o cavity		w/ cavity	
	Peak amplitude (Fourier amplitude)	Range ( $\times 10^{-5}$ )	7.51 ~ 8.71	Range ( $\times 10^{-5}$ )
	Average ( $\times 10^{-5}$ )	8.04	Average ( $\times 10^{-5}$ )	8.35
	Standard deviation ( $\times 10^{-6}$ )	2.75	Standard deviation ( $\times 10^{-6}$ )	3.34
Resonance duration (ms)	Range	0.568~0.632	Range	0.632 ~ 0.648
	Median	0.616	Median	0.640
	Standard deviation ( $\times 10^{-2}$ )	1.13	Standard deviation ( $\times 10^{-2}$ )	0.515

였으며 콘크리트 판 배면에 공동이 없을 경우(0.616ms), 공동이 있을 경우(0.640ms)에 비해 공진 시간이 짧게 측정되었다.

- (3) 이는 콘크리트와 모래 또는 공동의 경계면에서 발생하는 반사파의 진폭 차이에 의한 것으로 판단된다. 콘크리트 배면의 상태가 모래 지반일 경우 에너지 소산이 많이 일어나 반사파의 진폭이 작아지지만, 배면이 공동인 경우 에너지 소산이 적게 일어나 반사파의 진폭이 커진다. 따라서 반사파의 진폭이 클수록 공진 주파수의 최대 진폭과 공진 시간이 커지는 것으로 나타났다
- (4) 충격반향법에 의한 하수관 배면 공동 탐지를 위한 신호 처리 및 분석 알고리즘을 제시하였다. 기존의 비파괴검사로부터 얻어지는 화상 자료의 판독은 경험과 노하우를 바탕으로 숙련된 기술자의 판단이 필요하지만 본 연구에서 제안된 절차는 객관적이고 정량적인 평가가 가능하다.

본 연구는 판 형태의 콘크리트 구조물과 특정 지반 조건에 대한 제한적인 결과이다. 보다 일반적이고 광범위한 적용성의 확보를 위해서는 공동의 형태와 규모에 대한 고려 및 주변 토양의 상태 등 다양한 조건에 대한 검토와 실제 하수관의 형태로 제작된 시험체를 이용한 실험 등의 추가적인 연구가 필요할 것이다. 또한, 선이나 면이 아닌 점에 대한 정보만을 획득할 수 있는 충격반향법 자체의 한계를 극복하기 위해서 열화상 방법, GPR 등 상호보완적인 탐지 기법의 병행을 통해 공동 탐지의 효율성 및 정확도 향상을 기하는 것이 바람직할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 및 국가과학기술연구회의 융합연구사업(융합연구단-14-ETRI, 사물인터넷 기반 도시 지하매설물 모니터링 및 관리시스템 기술개발)의 위탁연구과제로 수행한 연구 결과의 일부입니다. 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌 (References)

1. BAI (2015), *Audit Report - Road and Construction Projects Status in Seoul*, Board of Audit and Inspection of Korea, pp.95-111.
2. Aggelis, D.G., Shiotani, T., and Kasai, K. (2008), "Evaluation of Grouting in Tunnel Lining using Impact-echo", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.23, No.6, pp.629-637.
3. Colla, C. and Lausch, R. (2003), "Influence of Source Frequency on Impact-echo Data Quality for Testing Concrete Structures", *Ndt & E International*, Vol.36, No.4, pp.203-213.
4. Liu, Z. and Kleiner, Y. (2013), "State of the Art Review of Inspection Technologies for Condition Assessment of Water Pipes", *Measurement*, Vol.46, No.1, pp.1-15.
5. Song, K.I. and Cho, G.C. (2009), "Bonding State Evaluation of Tunnel Shotcrete Applied onto Hard Rocks using the Impact-echo Method", *Ndt & E International*, Vol.42, No.6, pp.487-500.
6. MATLAB R2015b (2015), The Math Works Inc., Natick, Massachusetts.
7. Carino, N.J. (2001), "The Impact-echo Method: An Overview", *Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition*, pp. 21-23.
8. Carino, N.J., Sansalone, M., and Hsu, N.N. (1986), "Flaw Detection in Concrete by Frequency Spectrum Analysis of Impact-echo Waveforms", *International Advances in Nondestructive Testing*, Vol.12, pp.117-146.
9. Gibson, A. and Popovics, J.S. (2005), "Lamb Wave Basis for Impact-echo Method Analysis", *Journal of Engineering mechanics*, Vol. 131, No.4, pp.438-443.
10. Lin, Y. and Sansalone, M. (1992a), "Detecting Flaws in Concrete Beams and Columns using the Impact-echo Method", *ACI Materials Journal*, Vol.89, No.4, pp.394-405.
11. Lin, Y. and Sansalone, M. (1992b), "Transient Response of Thick Circular and Square Bars Subjected to Transverse Elastic Impact", *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.91, No.2, pp.885-893.
12. Lin, Y. and Sansalone, M. (1992c), "Transient Response of Thick Rectangular Bars Subjected to Transverse Elastic Impact", *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.91, No.5, pp.2674-2685.
13. Ryden, N., Aurell, O., Nilsson, P., and Hartlén, J. (2013), "Impact Echo Q-Factor Measurements Towards Non-Destructive Quality Control of the Backfill in Segmental Lined Tunnels", *Nondestructive Testing of Materials and Structures*: Springer, pp.915-919.
14. Sansalone, M. and Carino, N. (1986), *Impact-Echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves*, NBSIR 86-3452, National Bureau of Standards, Washington, DC, PB 87-10444/AS (National Technical Information Service, Springfield, MA, 1986).

Received : December 10<sup>th</sup>, 2015

Revised : June 7<sup>th</sup>, 2016

Accepted : August 2<sup>nd</sup>, 2016