

## 터널 안전진단을 위한 충격반향법 사례 연구

신성렬<sup>1)\*</sup>, 조철현<sup>2)</sup>

### Case Study on the Impact-Echo Method for Tunnel Safety Diagnosis

Sung Ryul Shin and Cheol Hyun Jo

**Abstract** For the purpose of determining the thickness of concrete lining and detect of the cavity where may be located behind tunnel lining, IE (Impact-Echo) method is effectively useful in the tunnel safety diagnosis and the quality control during the construction. As a part of case study, we applied IE method to various tunnel structure types such as road tunnel and subway tunnel constructed by NATM (New Austrian Tunnelling Method) and ASSM (American Steel Support Method). As tunnel specifications estimated from this method were compared with coring data, design drawing and other survey results, it was very good agreement with each other. In conclusion, we verified that IE method shows an accurate and reliable result. The conventional interpretation of IE method in frequency domain gives only vertical information at a certain point. However, the interpretation using time-frequency analysis and depth section imaging technique from two dimensional profiling surveys can show more reliable information about structure inside.

**Key words** Impact-Echo method, Tunnel structure, Safety diagnosis, Non-destructive test, Depth section imaging

**초 록** 비파괴 물리탐사 방법의 일종인 충격반향법 조사는 터널 구조물의 시공 중 품질관리 및 시공 후 구조물의 건전성을 파악하기 위한 안전진단 분야에 널리 사용되고 있다. 충격반향법은 특히 철근콘크리트로 시공된 라이닝에 대하여 라이닝의 두께나 터널 배면 공동 등 내부 상태를 파악하는데 가장 효과적인 비파괴탐사 방법이다. 본 연구는 현장적용 사례 연구의 일환으로 철근 콘크리트 라이닝의 도로터널, NATM공법으로 시공된 지하철터널, 재래식 공법으로 시공된 도로터널 등 구조 및 형식이 다른 여러 가지 터널에 대하여 충격반향법 조사를 실시하였다. 충격반향법 탐사 결과를 기존의 설계도서, 코어링 자료 및 다른 탐사자료와 대비하였을 때 서로 잘 일치하였고 충격반향법 탐사결과와 신뢰도를 확인할 수 있었으며, 시간-주파수 분석은 구조물 내부 특성에 대한 추정을 보다 용이하게 하였다. 1차원적인 한 지점에서의 수직하부 정보를 구하는 통상적인 주파수 영역에서의 충격반향법 자료해석과 더불어 2차원적인 심도단면도를 구하는 탐사법 적용은 구조물을 보다 정확하게 영상화할 수 있기 때문에 구조물 내부에 대한 신뢰도 높은 정보 파악이 가능하였다.

**핵심어** 충격반향법, 터널 구조물, 안전진단, 비파괴탐사, 심도단면도

## 1. 서 론

지하철, 도로 등 교통 시설과 석유, 가스 등 에너지의 지하비축기지 건설 및 도심지 지하공간개발에서 터널 구조물은 매우 중요한 부분이다. 최근 터널 굴착기술의 발달로 인하여 길이가 길어지고 굴착단면의 크기가 넓

어지는 추세여서 터널의 안전성을 확보하기 위한 방안으로 시공 단계에서는 터널의 안정성 확보 및 품질관리가 매우 중요하며 시공 후 단계에서는 안전한 시설물의 유지관리를 위하여 안전진단 및 안전점검은 필수적인 사항이 되었다. 안전진단 및 안전점검 시 육안관찰과 더불어 구조물 내부 상태에 대한 정보가 필요하며 여러 가지 조사항목에서 터널라이닝 배면공동 존재 확인은 매우 중요한 부분이다. 배면공동이 존재할 경우 라이닝 배면 지반의 이완영역이 확대되는 등 터널구조물의 장기적인 안정성 측면에서 매우 불리하게 작용할 수 있기 때문이다(시설안전기술공단, 1996).

터널 안전점검 및 안전진단에서 라이닝 배면의 공동유

<sup>1)</sup> 한국해양대학교 에너지자원공학과

<sup>2)</sup> 지하정보기술(주) 대표이사

\* 교신저자 : srshin@hhu.ac.kr

접수일 : 2008년 11월 27일

실사 완료일 : 2008년 12월 15일

계재 확정일 : 2009년 1월 14일

무를 탐지하고 지보재 및 복공의 상태와 결함을 파악할 수 있는 방법으로는 전자기파를 이용한 GPR (Ground Penetrating Radar) 탐사법과 탄성과 충격시의 공진 주파수를 이용한 Impact-Echo법 등이 사용될 수 있다. GPR은 통상 수백에서 수천 MHz 대역의 전자기파 펄스가 송신안테나로부터 방출되어 전자기적 성질이 다른 매질에서 반사된 신호를 수신 안테나로 수신하여 지하단면의 영상 및 관련 정보를 획득하는 탐사이다. 터널 안전진단에 적용할 때 무근콘크리트의 경우 콘크리트 내부에 시공된 강지보재의 위치, 콘크리트 및 숏크리트 두께 등에 대한 정보 획득이 가능하지만 이와 달리 조밀한 간격으로 배근된 철근콘크리트 라이닝과 라이닝 배면에 방수재로 철판이 삽입 시공된 구조형식인 경우 라이닝 배면 또는 철판 배면에 대한 조사는 불가능하게 된다(김영근 외, 1996; 권형석 외, 1997; 김학수 외, 1999).

콘크리트내의 결함 탐지를 위해 개발된 Impact-Echo 법은(Haack et al., 1995; Sansalone et al., 1995) 탄성 파공진법 혹은 충격반향법으로 국내에 소개된 바 있으며(김동수 외, 1995), 철근에 대한 영향을 거의 받지 않아 철근콘크리트 라이닝에서도 결함 탐지나 두께 측정이 가능한 장점이 있어 GPR의 한계를 상호 보완할 수 있는 탐사방법이다(신성렬 외, 1998; 2000). 한편, GPR의 경우 현장 탐사작업이 매우 신속하고 효율적인 반면 충격반향법(Impact-Echo method)은 현장적용 시 준비 작업과 측정에 많은 시간이 소요되고 현장에서 측정 자료를 정밀하게 해석하는 것이 어려운 단점이 있다. 충격반향법은 신호처리 방법에 있어 고전적인 푸리에 변환(Fourier Transform) 방식이 가장 일반적으로 널리 사용되고 있으며, 신호의 주파수 스펙트럼으로부터 구조물의 형상이 1-D라고 가정하여 이때의 공진주파수를 통하여 두께 및 결함을 파악한다.

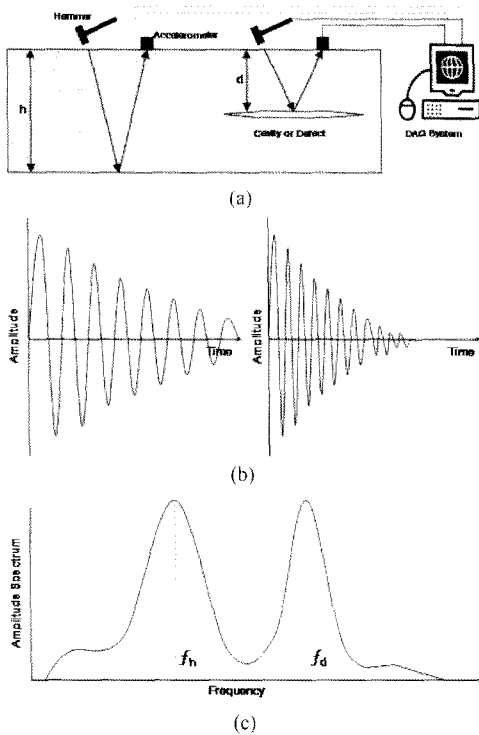
본 연구에서는 충격반향법의 현장적용 사례 연구의 일환으로 철근콘크리트 라이닝의 도로터널 갱구부, NATM (New Austrian Tunnelling Method)공법으로 시공된 지하철 터널과 시공 중인 지하철 터널, 재래식 공법(ASSM; American Steel Support Method)으로 시공된 도로터널 등 구조 및 형식이 다른 여러 가지 터널 구조물에 대하여 충격반향법 조사를 실시하였다. 각각의 터널에 대하여 현장자료를 얻어 통상적인 주파수 영역에서의 자료 분석, wavelet 변환을 이용한 시간-주파수 분석 및 주파수영역 또는 심도영역에서의 영상화를 실시하였고 사례 연구를 통하여 충격반향법의 적용 한계 및 적용 가능성에 대하여 알아보았다.

## 2. 충격반향법

### 2.1 충격반향법 원리 및 자료취득

터널 안전진단에 널리 사용되는 GPR 탐사법은 전자기파를 이용하기 때문에 신속히 측정할 수 있고 송수신 안테나의 중심주파수에 따라 가탐심도를 용이하게 변경시킬 수 있으며 구조물의 내부를 손쉽게 영상화시킬 수 있는 장점이 있으나 터널 라이닝이 철근 콘크리트이거나 방수재가 철판으로 된 경우 그 배후에 대한 정보를 얻기란 쉽지 않다(김영근 외, 1996; 권형석 외, 1997; 김학수 외, 1999). 한편 구조물의 내부 상태를 파악하기 위하여 안전진단에서 이용되는 초음파 탐사도 일종의 탄성과 탐사로서 초음파 탐사는 파장이 매우 짧아 분해능이 뛰어나지만 파의 감쇠가 심하여 콘크리트의 경우 10 cm 이상을 탐지하기 어려운 단점이 있다(이세경 외, 1988). 탄성과 탐사는 비교적 낮은 주파수와 큰 에너지를 사용하므로 다른 비파괴 시험방법보다 가탐심도가 매우 크며, 지하 단면자료는 지하영상과 관련되어 있으므로 시각적이고 객관적인 자료제시가 가능하다는 장점이 있다. 또한 철근에 대한 반응이 작기 때문에 철근이 배근되어 있는 구조물 배면의 조사도 가능하다(신성렬 외, 1998; 2000). 그러나 측정면과 접촉 상태가 양호해야 하기 때문에 측정면 고르기 등의 현장준비가 필요하고 측정시간이 오래 걸리는 단점도 있다. 일반적인 탄성과 탐사의 파장에 비하여 구조물의 크기가 비교적 작아서 시간영역에서 탄성파탐사 자료를 도시하고 해석하는 것은 거의 불가능하기 때문에 주파수 영역으로 자료를 변환하여 해석하는 충격반향법은 매우 효과적인 수단이 된다.

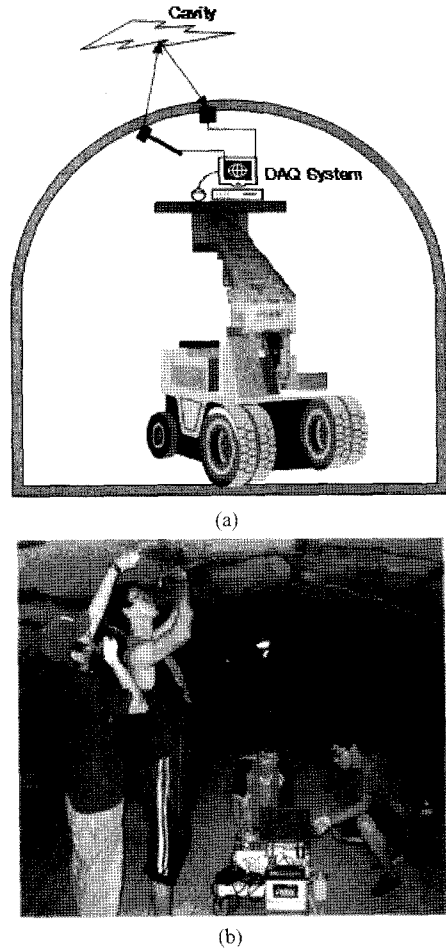
Fig. 1은 충격반향법의 원리를 나타내는 그림으로, 망치로 구조물을 타격하여 임펄스 형태의 탄성파를 발생시키면 탄성파는 구조물 내부에 전파되어 구조물의 형상, 크기에 따른 왕복 주기 즉, 공진 주파수를 가지게 된다. 구조물 내부에 공동이나 결함이 있을 경우 탄성파의 전파 경로가 달라지면서 주기도 달라져 공진 주파수도 변하게 된다. Fig. 1(b)는 전형적인 시간영역에서 측정된 충격반향법 자료를 나타낸 것이며, 그림에서 보는 바와 같이 시간영역에서 구조물에 대한 정보를 파악하기란 매우 어렵다. Fig. 1(b)의 좌측 그래프는 구조물이 가지고 있는 고유의 공진주기에 따른 일반적인 진동 특성을 나타낸 것이며, 우측은 구조물 내부에 결함이나 공동이 있을 경우로서 구조물이 가지는 공진 주기에 비하여 짧은 공진주기로 나타날 것이다. 한편 시간영역 자료를 주파수 영역으로 변환하면 공진 주파수 특징을 파악할 수 있는데 이로부터 구조물의 형상 및 크기의



**Fig. 1.** (a) Schematic diagram of Impact-Echo method. (b) Comparison of Impact-Echo data for structures with cavity (right) and without cavity (left) in time domain. (c) Frequency response of Impact-Echo data in frequency domain. Resonance frequency  $f_h$  and  $f_d$  entirely correspond to structure thickness and cavity depth.

유추가 가능하다. Fig. 1(c)는 주파수 영역으로 변환된 충격반향법 자료로 구조물의 두께에 대응하는 공진 주파수  $f_h$ 와 공동이나 결함의 깊이에 따른 공진 주파수  $f_d$ 가 서로 다른 주파수 응답스펙트럼을 가지게 된다. 결과적으로 충격반향법은 일종의 주파수 영역 탄성과 탐사라고 볼 수도 있을 것이다.

터널 라이닝 시공에서 가장 취약하고 시공이 어려우며 또한 공동, 크랙 등 결함이 나타날 가능성이 가장 큰 부분이 터널의 천단부이다. 터널 천단부에 대한 조사는 고소작업에 유리한 사다리 굴절차 등을 이용하며 Fig. 2에 충격반향법 탐사의 현장자료 취득에 대한 모식도와 사진을 나타내었다. 구조물에 충격을 가하기 위하여 임펄스 형태의 탄성파를 발생시키는 장치는 트리저가 장착된 망치를 사용하거나 또는 자료취득 장치에 소프트웨어에 의한 트리저링이 내장되어 있는 경우 일반 망치를 사용할 수 있다. 음원의 크기를 정확히 계측하기 위해서는 로드 셀이 장착된 망치를 사용하면 된다. 충격



**Fig. 2.** (a) Schematic diagram of field data acquisition using Impact-Echo method and (b) a photograph.

반향법에서는 탄성파를 발생시킨 정확한 시점에 대한 정보 보다 신호가 얼마나 자주 음과 양으로 바뀌는지 여부가 중요하다.

수진기의 설정은 탐사 목적에 맞게 선택되어야 한다. 진동의 측정에 있어 일반적으로 지진 계측에서는 변위를, 탄성과 탐사에서는 속도 성분을 측정하지만 상대적으로 크기가 작은 구조물이 대상일 경우는 가속도계를 이용하여 가속도 성분을 측정한다. 탄성과 탐사에서는 수신 주파수대역이 수십에서 수백 Hz인 속도 타입 지오폰을 사용하는 것이 일반적이며 구조물 탐사에서는 비교적 고해상의 자료를 얻어야 하므로 주파수 대역이 수 백~수 십 kHz인 가속도계를 사용한다. 고주파수 가속도계를 사용하므로 가속도계와 측정표면의 접촉상태가 매우 양호해야 하며 이를 위하여 조사면을 깨끗하게 정리하고 가속도계와 조사면 사이에 그리스를 적당히

발라서 접촉상태를 최상의 상태로 유지하여야 한다.

충격반향법 조사는 진동 측정을 위한 일반적인 자료 획득장치(Data Acquisition System)를 이용할 수 있으며, 노트북 컴퓨터를 본체로 하여 신호조정(Signal Conditioning) 기능을 갖춘 외장형 A/D 변환기를 부착한 시스템이 효과적이다. 현장자료는 통상 윈도우 환경에서 구동되는 소프트웨어를 이용하여 자료 취득과 처리가 이루어지며, 수신된 신호는 A/D 변환기에 의하여 디지털 신호로 바뀌어 컴퓨터로 저장되고 측정 현장에서 그래픽으로 볼 수 있을 것이다. 한편 콘크리트의 탄성파속도가 약 4,000 m/s이고 구조물의 두께가 2 m라고 가정하면 배면의 반사 신호가 1 ms에 나타나므로 총 기록시간을 40 ms로 하면 공진된 반향파가 충분히 기록될 수 있을 것이다. 신호의 샘플링 시간 간격은 조사결과와 해상도와 밀접한 관계가 있는데 통상 샘플링 시간간격이 10~20  $\mu$ s 정도이면 터널 구조물에 대한 정보를 충분히 파악할 수 있다. 즉, 샘플링 간격이 1  $\mu$ s이면 Nyquist 주파수가 500,000 Hz이므로 보통의 콘크리트 구조물에서는 심도 0.4 cm 이하부터 정보를 파악할 수 있다.

## 2.2 충격반향법의 자료처리 및 해석

기본적으로 현장에서 측정된 충격반향법 자료는 푸리에 변환을 이용하여 주파수 영역으로 자료를 변환시켜 해석하며 또한 구조물에 대한 영상화를 통하여 단면에 대한 정보를 파악 할 수 있으며, 정밀한 진동 특성 파악을 위하여 wavelet변환을 이용한다.

### 2.2.1 푸리에 변환을 통한 자료해석

일반적인 1차원 해석을 위한 충격반향법 자료는 다음과 같은 자료처리과정을 거쳐 해석된다.

- 1) 저품질 자료 편집 : 측정 시 발생된 오류와 잡음에 의해 저급화된 자료를 선택하여 제외한다.
- 2) 탄성파 속도 결정 : 최소 두개의 서로 다른 송-수신 거리에서 측정된 주시자료를 이용하여 콘크리트 속도를 결정하거나, 코어샘플에 대한 초음파 속도 측정으로 결정하거나 또는 참고문헌을 통한 적절한 속도를 가정할 수 있으며, 통상적으로 콘크리트의 탄성파 속도는 대략 3,500~4,500 m/s 범위로 성분, 양생 상태, 재령 등에 따라 다르다.
- 3) 주파수 변환 : 푸리에 변환을 이용하여 시간영역 자료를 주파수영역으로 변환시키고, 반복 측정된 자료를 평균한다.
- 4) 심도 계산 : 주파수 진폭 스펙트럼의 최대값을 나타내는 지점에서 주파수를 선택하고 미리 확보한 탄성파 속도를 이용하여 다음 식(1)과 같이 심도를 계산

한다.

$$d = \frac{\lambda_{1mode}}{2} = \frac{v_{conc}}{2f_{peak}} \quad (1)$$

여기서,  $d$ 는 심도,  $\lambda_{1mode}$ 는 1차 공진모드의 파장,  $v_{conc}$ 는 콘크리트의 음파속도,  $f_{peak}$ 는 진폭이 최대인 주파수이다. 이론적으로는 1차 공진모드에서 가장 큰 진폭을 보일 것이며, 특히 두께의 반파장이 공진모드가 되는 조건을 만족하는 구조의 좌우연장이 매우 긴 슬라브 혹은 패널 형상일 경우에 잘 나타날 수 있다. 그러나 실제로는 1차 공진모드가 불명확하게 나타나는 경우가 발생하는데 좌우연장이 두께에 비해 별로 길지 않거나 또는 주변에 기둥이나 거더 등 반사를 야기시키는 구조물이 있는 경우에 흔히 발생된다.

터널 구조물의 경우 1차원 모델 가정이 잘 적용되며 충격반향법 1차원 자료해석을 바탕으로 음원과 수신기의 위치를 조금씩 이동하면서 측정하여 주파수 스펙트럼 진폭에 의한 2차원 단면도를 작성할 수 있다. 이를 통하여 구조물 내부를 영상화할 수 있으며, 적절히 진폭 스펙트럼의 크기를 조절하면 원하는 구조물 부분을 특히 강조하여 나타낼 수 있다.

### 2.2.2 Wavelet 변환을 통한 자료해석

일반적인 신호의 주파수성분들은 시간에 대하여 변화하는 함수이기 때문에 고전적인 푸리에 변환에서는 시간영역과 주파수 영역의 신호를 동시에 해석할 수 없는 단점이 있지만 wavelet 변환은 신호가 가지는 시간영역과 주파수 영역의 정보를 시간-주파수의 2차원 평면에 동시에 파악할 수 있는 장점이 있다. wavelet 변환을 이용한 시간-주파수 분석법은 비파괴검사, 수중음향 신호처리, 음성 신호처리, 영상 자료처리, 자료압축 등 여러 분야에서 활발히 이용되고 있다. 구조물 진단과 관련하여 일본에서는 구조물에 타격을 가하고 이때 발생된 음향신호를 wavelet 변환을 통하여 구조물의 진진도를 파악하는 시스템을 고안한 바 있으며, 국내에서는 신성렬(2000)에 의하여 충격반향법 자료에 대한 wavelet 변환의 소개 및 현장 적용에 대한 논문을 발표한 바 있다. wavelet변환 방법은 1) Gabor함수를 이용한 방법, 2) 신호 전체에 대한 푸리에 변환이 시간변화에 대응한 주파수변화를 나타내지 못하는 단점을 보완하여 짧은 시간 창을 통하여 신호를 분리하여 푸리에 변환을 하는 방법인 단시간 푸리에 변환법(Short Time Fourier Transform), 마지막으로 3) 양자역학 분야에서 비정상신호에 대한 확장된 순간적인 파워스펙트럼을 나타내는 한 가지 방

법으로 시계열의 부분적인 자기상관함수를 기본으로 순간자기상관을 이용한 위그너분포법이 있다(신성렬, 2000).

### 3. 현장적용 사례 연구

#### 3.1 재래식(ASSM) 도로터널 배면공동 및 내부상태 조사

##### 3.1.1 자료취득

조사 대상 ○○터널은 1970년대 후반 재래식 공법에 따라 시공된 도로터널로서 1차 및 2차 라이닝은 무근콘크리트이며 두 라이닝 사이에는 지하수 차단용을 위하여 1.2 mm 두께의 방수철판이 설치되어 있다. 1차 라이닝은 여굴 정도에 따라 두께가 약 30 cm에서 1 m 정도로 변화가 매우 심하며 2차 라이닝은 30 cm 내외이다. 방수 철판으로 인하여 터널 조사에 흔히 사용되는 GPR 탐사를 이용할 경우 철판에 의한 차폐효과로 인하여 1차 라이닝 두께 및 배면 공동 파악이 불가능하기 때문에 기존 지반탐사 장비의 한계를 극복한 Impact-Echo System을 이용하여 1차 및 2차 라이닝 두께 및 배면 공동부에 대한 조사를 실시하였다.

본 조사에서는 터널 상·하행선 천정부에 10 m 간격마다 측정점을 선정하여 총 253개 측정점(상행선-130점, 하행선-123점)에서 터널 종단방향에 대한 조사를 실시하였다. 또한 상대적으로 누수상태가 심하여 취약할 것으로 의심되는 특정 Span에 대하여 횡단방향으로 3개의 단면을 선정하였고 단면 당 20 cm 간격으로 25개 지점에서 측정하여 횡단면에 대한 정보를 얻고자 하였다. 각 조사 지점에서 3회 이상의 반복 측정을 통해 신뢰도 높은 자료를 취득하였다. 한편 충격반향법 자료처리 및 해석을 위하여 탄성파속도가 필요한데 본 조사 대상 터널의 경우 정밀안전진단과정에서 8개소의 라이닝에 대한 코어링을 실시하였고, 채취된 코어에 대하여 탄성파속도를 측정된 결과 평균 속도는 3,522 m/s였다.

##### 3.1.2 자료처리 및 해석

총 253개 지점의 충격반향법 탐사자료에 대하여 푸리에 변환을 실시하여 주파수영역으로 자료를 변환시켜 시간영역에서의 진동특성과 주파수영역에서의 진폭 스펙트럼 특성을 분석하였으며, 또한 wavelet 변환을 이용하여 시간-주파수에 대한 변화를 동시에 관찰하였다. Fig. 3은 조사 대상 터널의 구조 형식 및 시공된 상태와 이때의 충격반향법 신호 특성 및 공진 주파수 특성을 분류하여 모식도로 나타낸 그림으로서 4가지 형태 Type I-IV로 분류하였다. Type I (Fig. 3(a))은 원지반

과 1차라이닝 경계면 및 1·2차라이닝 경계면의 밀착상태가 양호한 상태이고, Type II (Fig. 3(b))는 1·2차라이닝 경계면 사이에 공동이 존재하는 상태로 원지반과 1차라이닝 경계면 상태를 추정하기는 어렵다. Type III (Fig. 3(c))는 1·2차라이닝 경계면의 밀착상태는 양호하나 원지반과 1차라이닝 경계면 사이에 공동이 존재하는 상태이며 마지막으로 Type IV (Fig. 3(d))는 1·2차라이닝 경계면 사이에 소규모 공동이 존재하거나 밀착 불량 상태이고, 원지반과 1차라이닝 경계면 사이에 공동이 존재하는 상태이다. 충격반향법 조사로부터 추정된 1, 2차 라이닝의 두께는 기존의 GPR 조사 및 코어링 자료와 대비하였을 때 서로 잘 일치하였다.

Fig. 4는 Type I의 전형적인 특징을 나타낸 상행선 660 m 지점 천정부에 대한 충격반향법 탐사자료이다. Fig. 4(a)는 시간영역의 자료로서 약 1 ms까지 임펄스 형태의 해머 타격에 따른 충격파만 측정되었고 이후 시간에는 진동이 거의 없음을 관찰할 수 있다. Fig. 4(b)는 주파수 영역에서의 진폭스펙트럼인데 1차 라이닝과 원지반의 경계까지의 거리에 대응하는 약 2,300 Hz 저주파수 대역에 최대 스펙트럼이 나타나고 2차 라이닝의 두께에 대응하는 약 5,700 Hz 고주파수에서 낮은 피크점이 나타난다. Fig. 4(c)는 심도전환 결과를 나타낸 것으로 2차라이닝의 두께가 32 cm이고 1차라이닝과 원지반의 경계면이 표면으로부터 78 cm에 위치한다는 것을 추정할 수 있다. Fig. 4(d)는 웨이브렛 변환을 이용하여 나타낸 시간-주파수 스펙트럼으로써 고주파수의 공진에 비하여 저주파수의 공진 지속시간이 매우 긴 것을 관찰할 수 있다. 본 터널의 경우 Type I과 같은 신호가

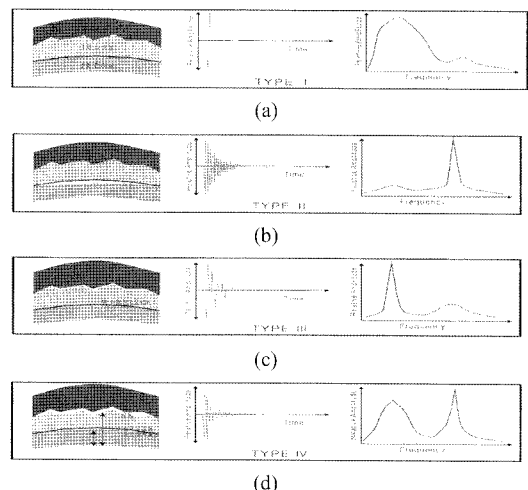


Fig. 3. Impact-Echo data are classified into four groups according to frequency response.

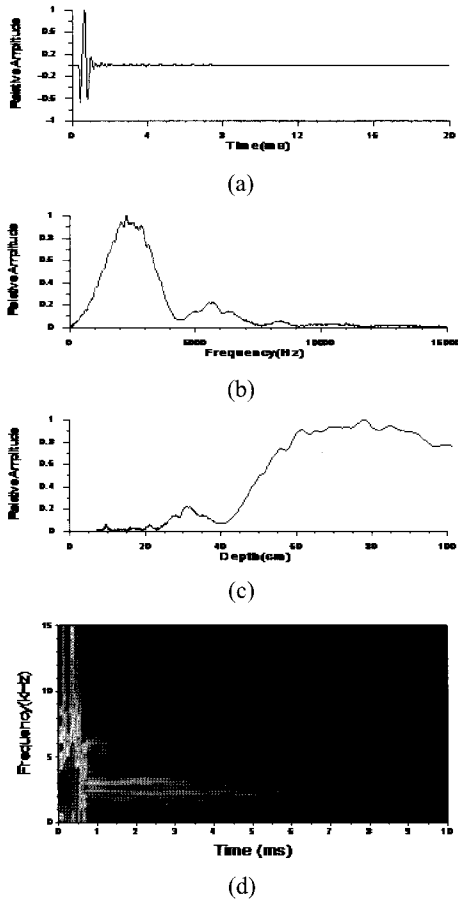


Fig. 4. (a) Impact-Echo data of type I at the tunnel crown of station number 660 m in time domain, which has impulse response. (b) Frequency response. (c) Depth domain data, and (d) time-frequency analysis through wavelet transform.

측정되면 터널 라이닝 상태가 비교적 양호하다는 것을 추측할 수 있다.

Fig. 5는 Type II의 전형적인 특징을 나타낸 상행선 440 m 지점 천단 우측부에 대한 충격반향법 탐사자료이다. Fig. 5(a)는 시간영역의 자료로서 약 8 ms에 걸친 오랜 공진 지속시간과 자유진동에 의한 감쇠현상을 관찰할 수 있으며 이는 1·2차라이닝 사이의 공동 또는 완전한 분리로 인한 2차 라이닝의 공진현상 때문으로 추정된다. Fig. 5(b)는 주파수 영역에서의 진폭스펙트럼으로서 2차 라이닝에 대응하는 약 6,200 Hz 고주파수에서 큰 피크점이 나타나며 원지반에 의한 약 2,300 Hz에서 낮은 피크점이 나타난다. Fig. 5(c)는 심도전환 결과를 나타낸 것으로 2차라이닝의 두께가 28 cm이고 1차 라이닝과 원지반의 경계면이 표면으로부터 78 cm에 위

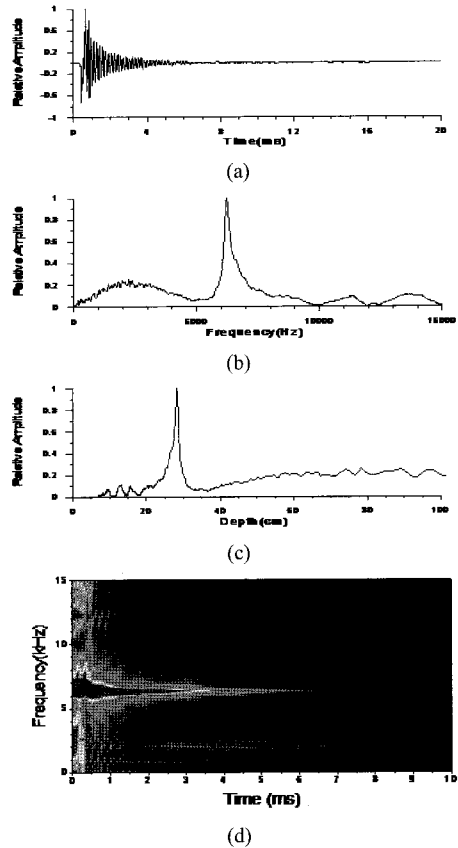


Fig. 5. (a) Impact-Echo data of type II at the tunnel crown of station number 440 m in time domain, which has free oscillation. (b) Amplitude spectrum in frequency domain has peak amplitude at 6,200 Hz. (c) Depth domain data shows that 2nd tunnel lining thickness is 28 cm, and (d) time-frequency analysis through wavelet transform.

치한다는 것을 추정할 수 있다. Fig. 5(d)의 시간-주파수 스펙트럼에서는 6,200 Hz의 고주파수임에도 불구하고 큰 스펙트럼의 긴 지속시간이 나타나고 있으며 2~3 kHz의 저주파수 대역은 진폭이 작고 지속시간 또한 짧게 나타난다. 본 터널의 경우에 대하여 Type II와 같은 신호가 측정되면 터널 2차 라이닝 배면이 공동이거나 1차 라이닝과 완전히 분리된 상태로 추정할 수 있다.

Fig. 6은 Type III의 전형적인 특징을 나타낸 충격반향법 탐사자료로서 Fig. 3에서도 알 수 있는 바와 같이 Type II는 고주파수의 공진이 발생됨에 비하여 Type III는 저주파수의 공진이 크게 나타나는 경우이다. Fig. 6(a)는 시간영역의 자료로서 4 ms에 걸친 지속시간 동안 자유진동에 의한 감쇠현상을 관찰할 수 있으며, Fig. 6(b)에서는 약 2,800 Hz 주파수에서 큰 진폭의 좁은 피

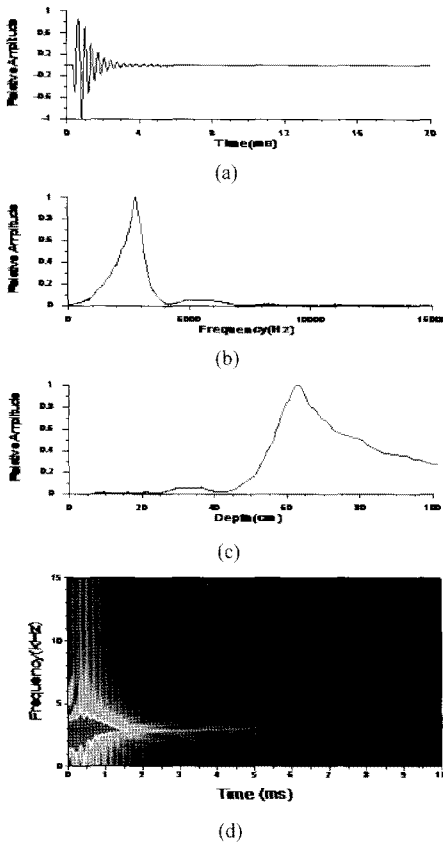


Fig. 6. (a) Impact-Echo data of type III which is acquired at the tunnel crown in time domain, which has low frequency oscillation. (b) Amplitude spectrum in frequency domain has peak amplitude at 2,800 Hz. (c) Depth domain data shows that total tunnel lining thickness is 63 cm, and (d) time-frequency analysis through wavelet transform.

크점이 나타나며 이는 원지반과 1차라이닝 경계면에 대한 공진으로 사료된다. 심도전환 경우인 Fig. 6(c)에서 1차라이닝과 원지반의 경계면이 표면으로부터 63 cm에 위치할 것으로 추정된다. Fig. 6(d)의 wavelet 변환에서도 2,800 Hz의 주파수에서 큰 진폭스펙트럼을 가지고 오랫동안 공진이 지속되는 것을 관찰할 수 있는 반면에 고주파수에서의 신호는 미약하다. 본 터널의 경우에 대하여 Type III와 같은 신호가 측정되면 터널 1차와 2차 라이닝의 결합 상태는 매우 양호하지만 1차라이닝과 원지반이 떨어져 있거나 공동이 있을 것으로 추정된다.

Fig. 7은 Type IV의 전형적인 파형을 나타낸 그림으로서 고주파수의 공진과 함께 저주파수의 공진이 동시에 발생하는 경우이다. Fig. 7(a)에서 약 5 ms에 걸친

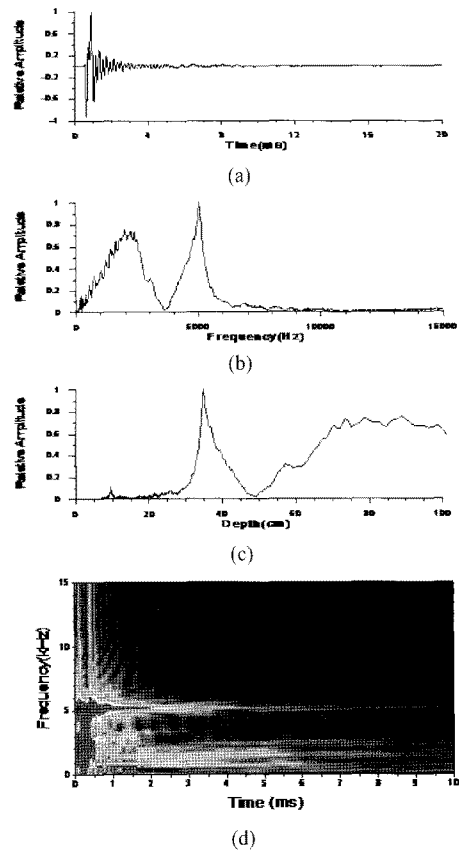


Fig. 7. (a) Impact-Echo data of type IV acquired at the tunnel crown in time domain, and then Impact-Echo data has free oscillation. (b) Amplitude spectrum in frequency domain has two peaks at 2 kHz and 5 kHz. (c) Depth domain data shows that second tunnel lining thickness is 35 cm and total thickness 78 cm, and (d) time-frequency analysis through wavelet transform.

지속시간 동안 자유진동에 의한 감쇠현상을 관찰할 수 있으며, Fig. 7(b)에서는 2 kHz 및 5 kHz 부근에서 두 개의 분리된 큰 진폭스펙트럼을 관찰할 수 있다. 두 신호는 1·2차라이닝의 경계면과 원지반과 1차라이닝의 경계면에서의 공진 때문이며 Fig. 7(c)에서 2차라이닝의 두께가 35 cm이고 1차라이닝과 원지반의 경계면이 표면으로부터 78 cm에 위치한다는 것을 추정할 수 있다. Fig. 7(d)의 wavelet 변환에서도 두 개의 분리된 신호를 볼 수 있고 Type IV와 같은 신호가 측정되면 1·2차라이닝 경계면 사이에 소규모 공동이 존재하거나 밀착 불량상태이고, 원지반과 1차라이닝 경계면 사이에 공동이 존재할 것으로 추정된다.

이번에는 누수가 관찰되고 상태가 불량한 터널의 특

정 Span에 대하여 횡단면을 따라 조사하여 Fig. 8과 같이 3개의 심도단면도를 구하였다. 진폭스펙트럼의 크기를 색으로 표현하였으며 주파수 영역 자료를 심도영역으로 전환하여 나타낸 심도단면도이다. 30 cm 내외에 1·2차 라이닝 사이의 경계면을 추정하여 점선으로 나타내었으며, 천단부인 가운데와 측벽부인 우측 부분에서 경계가 뚜렷이 나타나지만 좌측 측벽부는 대비가 불명확하다. 특히 천단부에 Type II와 같이 경계가 뚜렷이 나타난다는 것은 1·2차 라이닝의 밀착상태가 아주 불량하거나 공동이 있을 가능성이 매우 크다는 것을 의미한다. 그러나 공동의 크기를 정량적으로 계산하고 판단하기 어려우며 또한 배후에 대한 정보 획득은 상당히 어려우나 1차 라이닝과 원지반의 경계는 자료의 연속성을 고려하면 약 60~70 cm 부근으로 추정되며 점선으로 나타내었다. 한 지점에서의 수직하부 정보를 구하는 통상적인 충격반향법 자료 해석과 더불어 2차원적인 심도

단면도를 구하는 탐사법 적용은 구조물을 보다 정확하게 영상화할 수 있기 때문에 구조물 내부에 대한 신뢰도 높은 정보 파악이 가능하다.

#### 4.1 NATM 도로터널 내부상태 조사

##### 4.1.1 자료취득

NATM공법으로 시공된 도로터널인 고속도로 △△터널의 철근콘크리트 라이닝구간에서 발생된 라이닝 처짐 구간에 대하여 라이닝 내부 상태조사 및 배면공동 존재 여부 확인과 만약에 공동이 존재할 경우 공동 규모 파악을 위하여 충격반향법 조사를 실시하였다. 라이닝이 국부적으로 처진 구간을 중심으로 조사하였으며, 이 구간은 철근콘크리트로 시공되었고 1 스패의 길이는 9 m이며 조사한 측선은 Fig. 9(a)와 같다. 측선은 총 5개 측선으로 천단부를 따라 7 m 길이의 종측선 1개와 약간의 처짐이 발생된 부분을 포함하는 10 m 길이의 횡측선 2개와 기타 주변 부위에 2개의 횡측선을 설정하였다. 측정간격은 0.25 m를 기본 측정 간격으로 정하였으며, 단 횡측선의 경우 어깨부 이하에서는 배면공동의

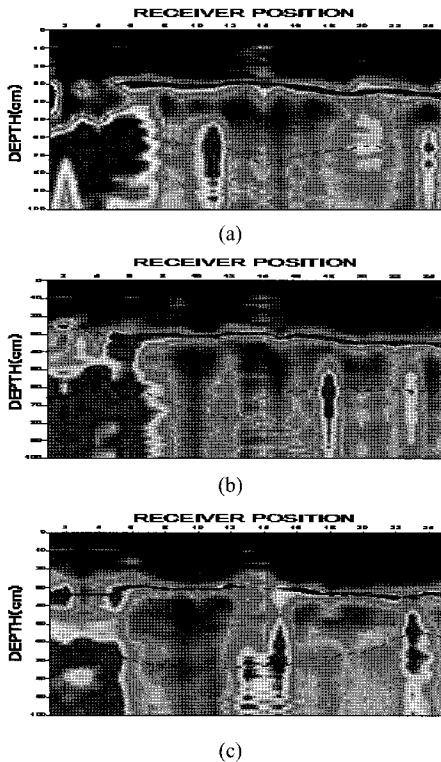


Fig. 8. Depth section of Impact-Echo data from three survey line at a weak tunnel span. We can clearly observe second tunnel lining thickness profile (solid and dashed line around 30 cm) with high amplitude spectrum of type II at especially tunnel crown and estimate 1st tunnel lining interface(solid and dashed line around 60-70 cm).

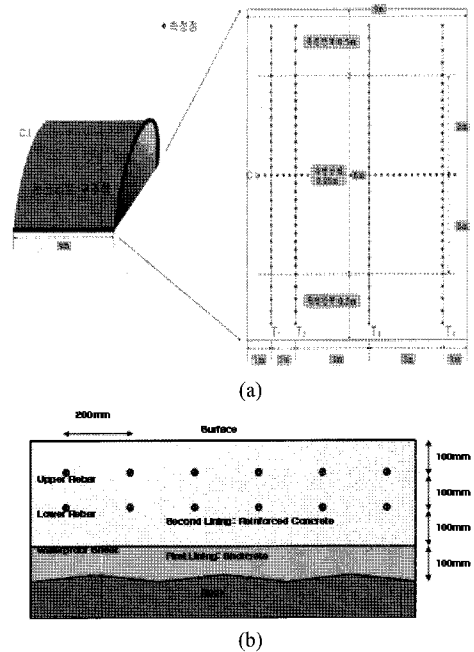


Fig. 9. (a) Survey line and data acquisition parameter. One in-line length is 7 m along tunnel crown and four transverse lines have 10 m length. (b) Standard design drawing for tunneling in section view. 1st lining is 10 cm shotcrete with steel fiber and 2nd lining is 30 cm reinforced concrete.



존재가능성이 매우 낮으므로 벽체부에서는 0.5 m 간격으로 측정하였다. 한편 본 조사구간의 터널설계는 Fig. 9(b)와 같이 굴착된 지반을 신속히 약 10 cm 두께의 강섬유 슛크리트로 1차 라이닝 처리하고 방수를 위하여 부직포와 고밀도 폴리에스테르(HDPE)천으로 방수막을 형성한 다음 최종적으로 30 cm 두께의 2차 라이닝을 시공한다. 2차 라이닝은 상부 및 하부의 이중철근콘크리트이며 직경 16 mm의 주철근과 13 mm의 보조철근이 사용되었다.

#### 4.2 자료처리 및 해석

취득된 각 측선의 자료에 대하여 주파수영역으로 변환시킨 후 진폭스펙트럼의 크기를 색으로 표현하였으며, 주파수 영역을 다시 심도영역으로 전환하여 Fig. 10과 같은 심도단면도를 작성하였다. 철근의 밀도와 탄성파 속도는  $7.9 \text{ g/cm}^3$ 과  $5,810 \text{ m/s}$ 이며 콘크리트는 골재 및 시멘트의 종류에 따라 다르지만 보통  $2.5 \text{ g/cm}^3$ 과  $4,000 \text{ m/s}$  내외이므로 밀도와 탄성파 속도의 곱인 음향임피던스 차이가 5배 정도이기 때문에 철근이 비록 단면적이 작지만 그림에서 보는 바와 같이 충분히 영상화될 가능성이 있을 것이다. 한편 1차 라이닝과 2차 라이닝이 떨어져 있거나 공동이 있을 경우는 콘크리트와 공기의 음향임피던스 차이가 매우 크기 때문에 쉽게 공진이 발생하여 큰 반응을 나타낼 것이다. 그러나 1차 및 2차 라이닝이 완전히 밀착되거나 결합 상태가 좋을 경우 두 라이닝 사이에 방수포가 있지만 단면적이 매우 작아 큰 영향을 미치지 못하며 두 라이닝의 재료가 콘크리트로 비슷하기 때문에 큰 반응을 나타내지 못할 것으로 사료된다. 원지반의 재료적 특성과 음향 물성 상태에 따라 달라지겠지만 1차 라이닝과 원지반은 1, 2차 라이닝 사이에 비하여 상대적으로 큰 음향임피던스 차이를 가지는 것이 일반적인 경우이며 반응 또한 크게 나타날 가능성이 높다.

Fig. 10에서 고립된 원형으로 심도 10 cm 부근 일정한 심도에 나란히 나타나는 반응은 상부철근의 영향으로 만들어진 영상이며(A), 그 아래 심도 20 cm 정도에서도 하부철근에 의한 영상(B) 나타나고 있다. 40 cm 내외에 1차라이닝과 원지반의 경계에서 나타난 것으로 추정되는 반응을 점선으로 표시하였으며, 반응들의 연속성이 매우 좋게 나타나고 있다. 이 점선에서 10 cm 안쪽 부근에 1차 라이닝과 2차 라이닝의 경계가 있을 것으로 추정되며 반응의 크기가 매우 미약하게 나타난다. 반응의 크기가 매우 작다는 것은 공동의 존재 가능성이 매우 희박하며 두 라이닝의 결합상태가 양호하다는 것을 암시한다. 5개의 종·횡 측선에 대한 충격반향

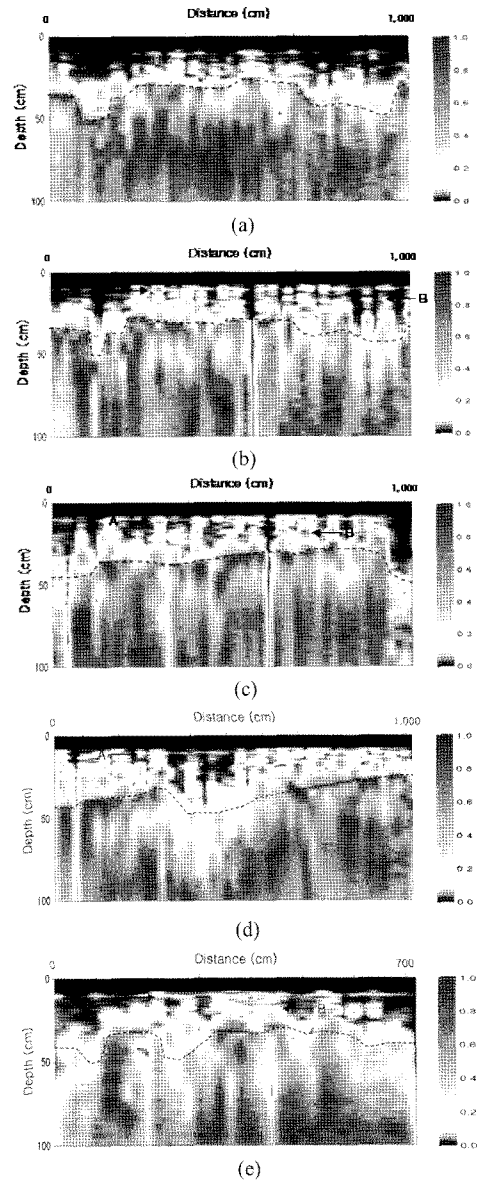


Fig. 10. (a)~(d) Depth section of four transverse survey line and (e) depth section at in-line survey. Amplitude spectrum of isolated circles at 10 cm depth is from upper rebar response (A) and 20 cm depth is from lower rebar (B). The dashed line around 40 cm depth indicates an interface between shotcrete and rock.

법 단면도 모두 상부 및 하부철근의 영상화 위치에 일관성과 유사성을 보여주고 있으며 또한 1차 라이닝과 원지반 경계에 대한 반응도 매우 일관성과 유사성을 가지고 있다. 심도단면도를 작성할 때 적절한 대역주파수

필터링 및 진폭 조절이 매우 중요하기 때문에 세심한 주의가 필요하다.

## 5. NATM 지하철티널 배면공동 조사

### 5.1 자료취득

NATM 방식으로 설계 시공된 지하철티널에서 장기적인 누수로 인하여 배면공동이 발생되었을 것으로 의심되는 터널 구간에 대하여 일축 가속도계를 사용한 충격반향법 조사를 실시하였다. 터널 조사면은 그라인더로 정리한 후 그리스를 가속도계와 라이닝면 사이에 발라 터널 라이닝 표면에 밀착되도록 설치하여 접촉상태를 최상으로 하였고, 수신기는 음원과 15 cm의 이격거리를 유지하였다. S/N비 (Signal to Noise Ratio)를 높이기 위하여 각 측정마다 4번의 Stacking을 하였고, 육안조사 시 취약성이 의심되는 터널 천단부의 종단면을 따라 조사간격 25 cm로 총 20 m 구간에 대하여 탐사를 실시하였다. Fig. 11(a)는 충격반향법 탐사 자료를 나타낸 것으로 탄성파반사 단면도는 지층의 경계 또는 지질 구조를 파악하는데 효과적인 방법이지만, 터널 라이닝과 같이 탄성과 파장에 비해 두께가 작은 경우에는 콘크리트 라이닝과 원지반 사이의 반사면 및 배면공동 경계부위가 형성될 수 없어 반사특성에 의한 이상체의 심도를 효과적으로 제시할 수 없다. 2~4 m 부근의 트레이스는 자유감쇠진동(Free Damped Oscillation) 특성을 보여주고 있다.

### 3.2 자료처리 및 해석

공진모드는 시간영역에서 보다 주파수영역에서 파악하는 것이 이해가 쉽기 때문에 거라-시간의 탄성파 단면도인 Fig. 11(a)를 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform)을 통하여 거리-주파수의 단면도로 변환하였고, 전체 트레이스에 대한 파워스펙트럼 중에서 최대값을 1로 하고 모든 트레이스를 정규화 하였으며 최대 파워스펙트럼의 40% 이상치는 검은색으로 나타내었다. 500 Hz 이하의 저주파수에서 비교적 큰 스펙트럼 에너지가 나타나며 2~4 m 부근 2,500 Hz에서 매우 큰 파워스펙트럼을 나타내고 있다. 충격반향법으로 라이닝 두께를 파악할 수 있지만 본 경우에는 구별하기 힘들었는데, 그 이유는 라이닝 두께가 50 cm 이상으로 매우 두껍고 원지반과 콘크리트 라이닝이 밀착된 상태에서는 뚜렷한 공진주파수의 형성이 어려웠기 때문이라고 해석된다. Fig. 11(b)는 전체 트레이스에 대하여 파워스펙트럼을 거리-심도의 단면도로 나타낸 것으로, 거리가 2~4 m 이며 심도가 0.7~0.75 m 부근에 매우 큰 스펙트럼이 나

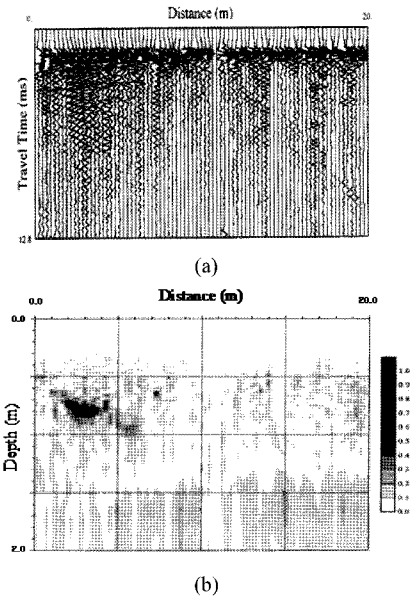


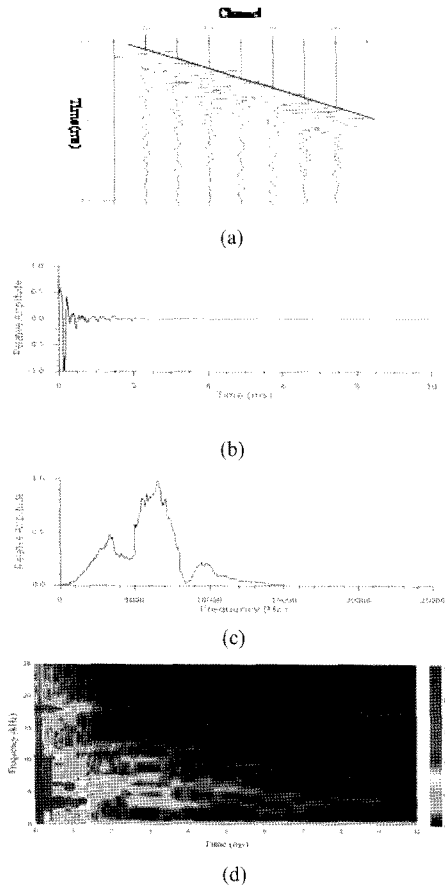
Fig. 11. (a) Seismic section obtained along the crown of subway tunnel. (b) The image section of amplitude spectrum in depth domain. The response from the cavity behind the tunnel lining is clearly isolated in the frequency band of 2,000 Hz to 3,000 Hz and cavity depth is about 70 cm.

타난다. 이것은 터널 라이닝 배면공동에 의한 것이거나 또는 라이닝과 원지반의 밀착상태가 불량하거나 원지반의 파쇄상태가 심한 곳으로 추정된다. 일반적으로 배면공동이 발견되면 코어링에 의한 확인 작업과 더불어 시멘트액을 주입하여 공동을 충전 시키는 것이 바람직할 것이다.

## 6. NATM 지하철티널 라이닝 두께 조사

### 6.1 자료취득

본 사례는 NATM 공법으로 공사 중인 지하철티널의 철근콘크리트 라이닝 두께에 대한 부실 시공 논란을 규명하기 위하여 실시된 탐사에 관한 내용이다. 시공 품질관리는 코어링 작업을 통하여 내부 상태 확인이 가능하지만 코어링을 하게 되면 터널 구조물에 심각한 결점이 생길 수 있기 때문에 충격반향법과 같은 비파괴 방식의 탐사가 바람직할 것이다. 조사대상 약 1 km 구간에서 선정된 30개 지점(측벽부 28개 지점, 천단부 2개 지점)에서 충격 탄성파 공진시험 장비를 이용한 충격반향법 탐사를 수행하였고 이를 처리 분석하여 조사 지점에서의 터널 라이닝 콘크리트 두께를 파악하였다. 자료의 신뢰도를 높이기 위하여 각 조사 지점에서 7회



**Fig. 12.** (a) Concrete P-wave velocity determination from time-distance curve. P-wave velocity, an inverse of slope, is about 4,000 m/s. (b) Impact-Echo data of subway tunnel in time domain. (c) Amplitude spectrum in frequency domain has peak at 6,000 Hz, which second tunnel lining thickness is 30 cm, and (d) time-frequency analysis through wavelet transform.

이상의 반복 측정을 통해 각 측정 시 반복적으로 나타나는 주파수 피크치를 취득하여 자료의 질을 향상시켰다. Fig. 12(b)는 조사 대상 측벽부에서 취득한 대표적인 충격반향법 자료를 나타낸 것이다. 충격반향법 탐사에서 가장 중요한 변수인 콘크리트의 탄성과 속도는 송수신기 거리가 50 cm씩 증가하도록 송수신기를 설치하여 주시 자료에서 초동(first arrival)을 발췌하였으며, Fig. 12(a)와 같이 시간 - 주시곡선으로부터 콘크리트의 속도를 추정하였으며 약 4,000 m/s 정도로 나타났다.

## 6.2 자료처리 및 해석

충격반향법 탐사자료에 대하여 Fig. 12(c)와 같이 시간 영역의 자료를 주파수 영역 자료로 변환시켰으며,

터널 라이닝 두께 파악이 탐사의 중요한 목적이기 때문에 라이닝 두께에 대응되는 주파수를 중심으로 대역주파수 필터링을 실시하였다. 6,500 Hz 부근에서 매우 큰 주파수스펙트럼을 보이는 바 이는 2차 라이닝 두께에 대응하는 것이라 사료된다. 보다 상세한 분석을 위하여 Fig. 12(d)와 같이 wavelet 변환을 이용한 시간-주파수 분석을 실시하였다. 그림에서 나타나는 주요한 큰 스펙트럼은 주파수 18,000 Hz, 10,000 Hz, 6,500 Hz, 4,000 Hz 부근이며, 탄성파속도가 4,000 m/s일 때 이를 두께로 환산하면 각각 11 cm, 20 cm, 30 cm, 50 cm에 해당된다. 이 중에서 약 6,500 Hz 부근의 스펙트럼이 가장 크며 또한 지속시간이 긴 것으로 보아 터널 2차 라이닝에 의한 공진으로 사료되며 그 두께는 약 30 cm 정도이다. 18,000 Hz와 10,000 Hz의 신호는 고주파수 공진으로 지속시간이 비교적 짧아 각각 상부철근과 하부철근에 의한 신호로 판단되며, 약 4,000 Hz 부근의 신호는 모암까지의 공진에서 나타나는 신호로 분석된다. 선정된 30개 지점(측벽부 28개 지점, 천단부 2개 지점)에서의 충격반향법 탐사자료 해석결과 2차 라이닝 두께는 30 cm 내외로 분석되었으며 이는 설계도면에 나타난 시공 상태와 잘 일치하였다.

## 7. 결론

본 연구에서는 재래식 공법으로 시공된 도로터널의 배면공동 및 내부 상태조사, NATM 공법으로 시공된 철근콘크리트 라이닝의 도로터널 갱구부에 대한 상태조사, NATM 공법으로 시공된 지하철 터널의 배면공동조사, NATM 공법으로 시공 중인 지하철 터널의 라이닝 두께조사 등 구조 및 형식이 다른 여러 가지 터널 구조물에 대하여 충격반향법 조사를 실시하였다. 각각의 터널에 대하여 현장자료를 얻어 통상적인 주파수 영역에서의 자료 분석, wavelet 변환을 이용한 시간-주파수 분석 및 주파수영역 또는 심도영역에서의 영상화를 실시하였다. 이러한 사례 연구를 통하여 충격반향법의 적용 한계 및 가능성에 대하여 알아보았고 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 여러 가지 형태의 구조, 형식, 시공 상태의 터널 구조물에 대하여 내부상태, 배면공동, 라이닝두께 등을 파악하기 위하여 충격반향법을 적용하는 것은 매우 적절하며 효과적인 탐사방법이었다. 충격반향법 탐사 결과를 기존의 설계도서, 코어링 자료 및 다른 탐사자료와 대비하였을 때 서로 잘 일치하였으며 충격반향법 탐사결과와 신뢰도를 확인할 수 있었다.
- 2) 통상적인 주파수 영역에서의 충격반향법 탐사자료의

해석과 더불어 wavelet 변환을 이용한 시간-주파수 해석을 동시에 실시하면 구조물의 특성에 대한 정보 파악이 용이하였다.

- 3) 1차원적인 한 지점에서의 수직하부 정보를 구하는 통상적인 주파수 영역에서의 충격반향법 자료해석과 더불어 2차원적인 심도단면도를 구하는 탐사법 적용은 구조물 내부를 보다 정확하게 영상화할 수 있기 때문에 구조물 내부에 대한 신뢰도 높은 정보 파악이 가능하였다. 심도단면도를 작성할 때 적절한 대역주파수 필터링 및 진폭 조절이 매우 중요하기 때문에 세심한 주의가 필요하다.

시공 중 품질관리와 터널구조물의 유지관리 및 안전진단과 관련하여 터널구조물의 내부 상태에 대한 조사는 매우 중요한 요소이므로 보다 효과적인 현장조사가 수행될 수 있는 탐사 시스템 개발과 더불어 충격반향법에 대한 지속적인 기술개발이 필요하다.

**참고문헌**

- 1. 권형석, 설순지, 서정희, 장현삼, 임해룡, 홍재호, 1997, "GPR을 이용한 터널 라이닝 두께 검증", 1997년 한국지구시스템공학회 춘계학술발표대회 논문집, p.132-137.
- 2. 김동수, 박형춘, 이광명, 1995, "충격반향기법과 표면파

- 기법을 이용한 콘크리트 부재의 비파괴검사", 한국콘크리트학회 추계학술발표회 논문집, pp.164~168.
- 3. 김영근, 장정범, 정한중, 조철현, 1996, "터널라이닝 건전도 평가를 위한 비파괴 조사법의 적용연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp.383~386.
- 4. 김학수, 임해룡, 배성호, 1999, "GPR에 의한 지반 구조물 탐사", 한국지구물리학회 학술발표대회 논문집, p.65-91
- 5. 시설안전기술공단, 1996, "안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(터널편)".
- 6. 신성렬, 조철현, 신창수, 양승진, 장원일, 1998, "GPR 및 단일채널 탄성파탐사에 의한 터널라이닝 배면공동 조사", 한국구조물진단학회지, Vol.2, No.4, pp.148-158.
- 7. 신성렬, 이성민, 장원일, 2000, "터널 콘크리트 구조물의 안전진단을 위한 충격반향법 실험", 한국자원공학회지, Vol.37, No.4, p.240-248.
- 8. 신성렬, 2000, "시간-주파수 분석을 이용한 충격반향법 자료의 해석", 한국자원공학회지, Vol.37, No.6, p.432-438.
- 9. 이세경, 김영환, 구자용, 김병주, 김영길, 1988, "콘크리트 구조물에 대한 초음파 탐사법 개발(III)", 과학기술처 특정연구개발사업 연구보고서, KSRI-88-88-IR, 과학기술처.
- 10. Haack, A., Schreyer, J., and Jackel, G., 1995, "State-of-the-art of Non-destructive testing methods for determining the state of a tunnel lining", Tunnelling and underground space technology, v.10, No.4, pp.413~431.
- 11. Sansalone, M. J., Streett, W. B., and Jaeger, B. J., 1995, "Seminar on the principles of impact-echo and use of the DOCTER impact-echo field instrument", Cornell univ.

**신 성 렬**



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
 1990년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
 1994년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사  
 Tel: 051-410-4681  
 E-mail: srshin@hhu.ac.kr  
 현재 한국해양대학교 에너지자원공학과 교수

**조 철 현**



1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
 1985년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
 1992년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사  
 Tel: 02-522-2694  
 E-mail: chjo@geeha.co.kr  
 현재 지하정보기술(주) 대표이사