

터널 콘크리트 構造物의 安全診斷을 위한 衝擊反響法 實驗

辛誠烈* · 李成民 · 張元一

Impact-Echo Method for the Safety Diagnosis of Tunnel Concrete Structures

Sung Ryul Shin*, Seong Min Lee and Won Il Chang

Abstract : Determining the thickness of concrete lining and detecting of the cavity where is located behind tunnel lining plays an important role in the safety diagnosis of tunnel structure and the quality control during the construction. In this study, we made use of Impact-Echo method with single-axis and triaxial accelerometer in order to find the cavity or flaw. The thickness estimated by this method was good agreement with the thickness of concrete plate model. According to the use of single and multi-component accelerometer, we studied the characteristic of power spectrum and phase angle in frequency domain and examined the accuracy of the estimated thickness. In the field application, the method can clearly show the location and depth of the cavity in the reinforced concrete lining of subway tunnel.

Key words : Impact-Echo method, accelerometer, safety diagnosis, lining thickness, detecting the cavity

요 약 : 터널 유지관리에서 안전진단과 시공 중 품질관리에서 터널라이닝 배면공동 존재 여부는 안전과 관련하여 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 구조물의 두께 및 결함을 탐지할 목적으로 판형 콘크리트 모형을 제작하여 일축 및 3축 가속도계를 사용한 충격반향법 실험을 하였으며, 충격반향법으로 추정된 두께와 실제두께는 서로 잘 일치하였다. 시간 및 주파수 영역에서 가속도계의 종류 및 측정성분에 따른 진폭 및 위상의 특성과 심도 추정의 정확도에 대하여 분석하였고, 심도전환 자료처리 과정을 통하여 결함의 심도를 나타내었다. 본 방법의 현장적용에서는 지하철 터널의 철근콘크리트 라이닝 배면에 있는 결함의 심도 및 위치가 명확하게 나타났다.

주요어 : 충격반향법, 가속도계, 안전진단, 라이닝 두께, 공동탐지

서 론

터널은 지하철, 도로터널 등 교통시설 뿐만 아니라 다양한 지하공간 개발에 있어 가장 중요한 부분이며 장대화, 대단면화 되고 있어 터널의 안정성 확보 및 공사 중 품질 관리가 강조되고 있다. 터널라이닝 배면공동 존재 여부는

안전 측면에서 매우 중요하며 배면공동이 존재할 경우 라이닝 배면 지반의 이완영역이 확대되는 등 터널구조물의 장기적인 안정성 측면에서 매우 불리하게 작용할 수 있다.²⁾ 터널 안전진단에서 라이닝배면의 공동유무를 탐지하고 지보재 및 복공의 상태와 결함을 파악할 수 있는 탐사방법^{3,7)}으로는 전자기파를 이용한 GPR(Ground Penetrating Radar) 법, 탄성과 충격시의 공진 주파수를 이용한 Impact-Echo 법,⁸⁾ 탄성과의 표면파 분산특성을 이용한 SASW(Spectral Analysis of Surface wave) 법,⁴⁾ 적외선 탐사법 등이 있다. 콘크리트내의 결함 탐지를 위해 개발된 Impact-Echo 법은 탄성과공진법⁵⁾ 혹은 충격반향법⁶⁾으로 소개된 바 있으며, 철근에 대한 영향을 거의 받지 않으므로 철근 콘크리트에도 결함 탐지나 두께측정에 적용 가능한 장점이

2000년 3월 7일 접수, 2000년 5월 9일 채택
*韓國海洋大學校 海洋開發工學部

있다.¹⁾ 이와 같은 장점에도 불구하고 충격반향법(Impact-Echo method)은 현장적용 시 준비작업과 측정에 많은 시간이 소요되고 현장에서 측정자료를 정밀하게 해석하는 것이 어려워 현장에서 활발하게 사용되고 있지 않은 실정이다. 본 연구에서는 실시간 자료측정과 해석이 가능한 Impact-Echo 시스템을 구성하여 기존에 널리 사용되는 1축 가속도계와 함께 3축 가속도계를 사용하여 판형 콘크리트 모형에 대한 실험을 실시하여 그 반응 특성에 대하여 고찰하였으며, 지하철 터널에 대한 현장적용 사례를 소개하였다.

모형실험

시스템 구성

안전진단에서 널리 이용되는 초음파 탐사도 일종의 탄성과 탐사로서 초음파 탐사는 파장이 매우 짧아 내부에 대한 분해능이 뛰어나지만 파의 감쇠가 심하여 콘크리트의 경우 10 cm 이상을 탐지해 낼 수 없다. 한편 일반적인 탄성과 탐사는 주어진 에너지의 크기에 따라 매우 깊은 심도까지도 탐사할 수 있다. 그러나 터널라이닝 주변에 대한 조사는 탐사심도가 1 m 내외이므로 소형해머를 음원으로 사용하고 고주파수 성분을 측정할 수 있는 가속도계를 수신기로 사용한다.

충격반향법은 외부 충격에 의한 공진현상으로부터 주파수 영역에서 자료를 해석하는 탄성과 탐사의 일종이며, Fig. 1에서 나타난 바와 같이 충격반향법을 실시하기 위하여 구성된 시스템은 음원, 가속도계, A/D 변환기, 자료 저장 및 처리장치이다. 음원은 망치(Impulse Force Hammer)를 사용하였고, 망치의 재원은 미국 PCB 사 모델 086C05, 타격부위에 Quartz Force Sensor가 내장되어 있고 타격하는 세기의 범위(Force Range)는 0~5000lb, 민감도(Voltage Sensitivity)는 1.00 mV/lb 이다. Table 1은 진동을 측정하기 위한 일축 및 3축 가속도계의 재원을 나타낸 것이다.

가속도계에서 측정된 신호는 A/D 변환기를 통하여 디지털 자료로 컴퓨터에 저장된다. A/D 변환기는 미국

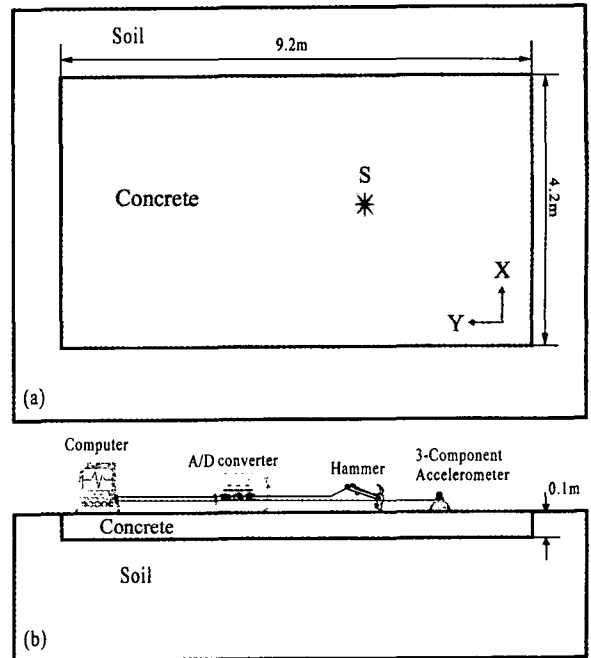


Fig. 1. Schematic diagram of Impact-Echo method and the model used in the experiments (a) plane view and (b) section view.

Strawberry Tree Co. 제품으로 동해상도(Dynamic Resolution)가 13 bit, 채널(Channel)수가 16개이며 초당 최대 샘플링은 100 kHz 이다. 자료취득 및 자료처리(Data Acquisition and Control Software)의 전과정은 미국 Strawberry Tree Co.의 WorkBench PC for Windows를 이용하였고, 실시간으로 자료취득 및 시계열 분석과 통계처리/분석을 할 수 있는 다양한 모듈로 구성되었다.

모형실험 및 결과

터널구조물에서의 공동은 통상적으로 라이닝 시공 시에 tunnel crown 부위의 라이닝 미충진으로 발생되며, 공동이 발생된 곳의 단면은 표면으로부터 콘크리트 라이닝 → 공동 → 숏크리트가 시공된 원지반의 순서로 나타난다. 콘크리트의 P파 속도는 재령, 골재의 종류, 수분함량 등에 따라 다소 차이는 있지만 4000 m/s 내외이며, 공동에서의

Table 1. Specification of Single-axis and Triaxial Accelerometer for Impact-Echo

구분	모델명	민감도 (Voltage Sensitivity)	측정범위	해상도
일축 가속도계 (Single-Axis Accelerometer)	미국PCB 사 모델 353B34	100 mV/g	± 50 g	0.001 g
3축 가속도계 (Triaxial Accelerometer)	미국 PCB 사 모델 356A08	100 mV/g	± 50 g	0.0005 g

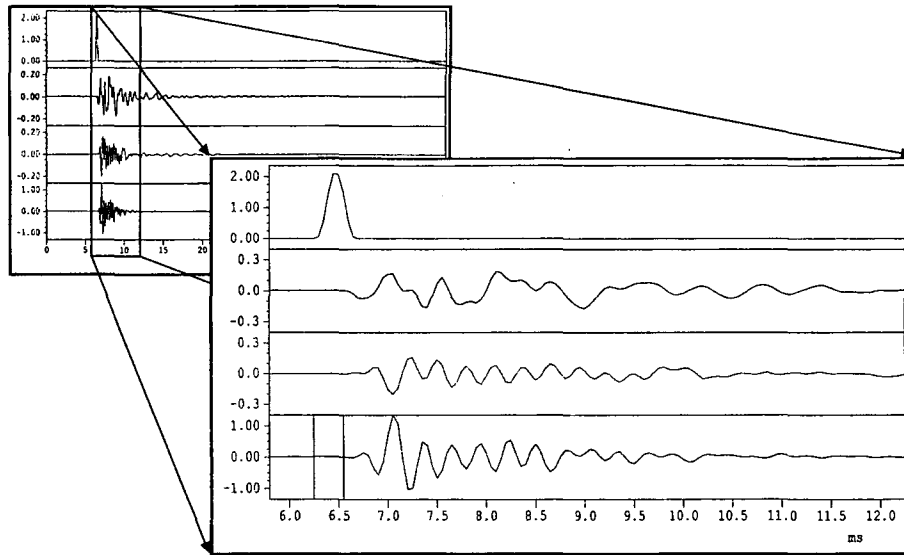


Fig. 2. The signals obtained by Impact-Echo method with triaxial accelerometer. Traces are recorded from external hammer force, X, Y, and Z-component. It is scaled up to pick the travelttime.

P파 속도는 340 m/s, 원지반의 속도는 암중 또는 토질에 따라 그 범위가 매우 넓다. 만일 터널의 원지반이 암반이라면 모형의 하부 재료가 암반인 것이 이상적이지만, 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 모형설치 장소의 한계 등으로 인하여 토사층 위에 가로×세로가 9.2 m×4.2 m 두께가 약 10 cm 내외로 콘크리트를 타설하여 모형을 제작하였다. Fig. 2는 음원이 격자망의 가운데 있고 10 cm 간격의 격자로 X 방향 41개 Y 방향 41개의 격자를 구성하였을 때, 3축 가속도계가 X11Y21 위치에 설치되었을 때 측정된 자료이다. 위에서부터 아래쪽으로 해머의 타격 신호와 3축 가속도계로 측정된 X, Y, Z 성분을 기록하였고, 신호가 주로 나타나는 6~12 ms 구간은 확대하여 자세하게 나타내었다. 콘크리트의 표면에 수직 방향으로 타격하고 측정하였기 때문에 Z 성분의 진폭이 가장 크게 나타나고 있으며, 탄성파의 입자운동을 파악하기 위한 호도그램(Hodogram)인 Fig. 3에서도 입자운동이 거의 Z 방향으로 우세함을 볼 수 있다.

콘크리트 구조물의 두께 및 결함탐지를 목적으로 한 충격반향법(Impact-Echo method)에서는 시간영역의 자료를 주파수 영역으로 변환시켜 아래와 같이 공진주파수(Resonance Frequency)로부터 결함이 위치하는 심도를 파악한다.⁸⁾

$$v = f_R \lambda \quad (1)$$

이 때, f_R 는 공진주파수, λ 는 파장, v 는 매질의 속도이다. 콘크리트의 P 파 속도는 보통 3500~4800 m/s 범위에

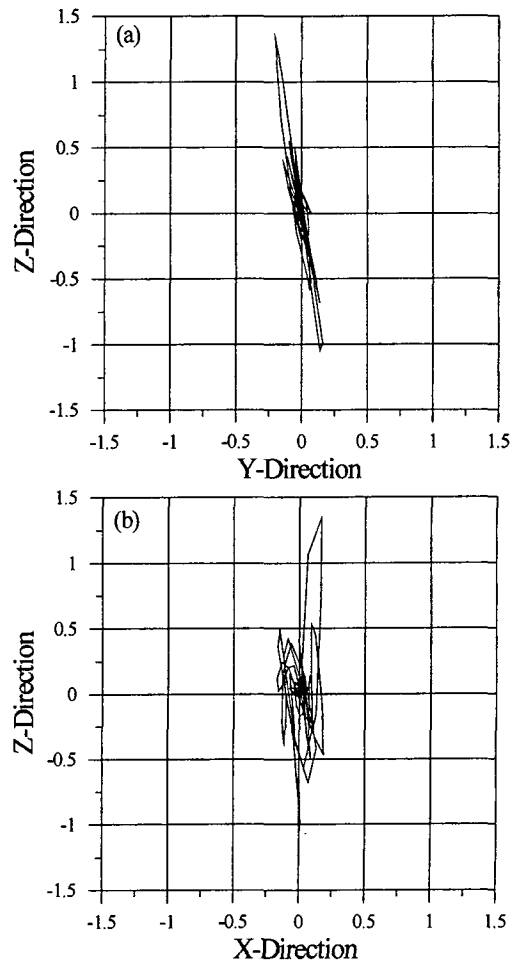


Fig. 3. Hodogram of particle motion (a) Z-Y direction and (b) Z-X direction.

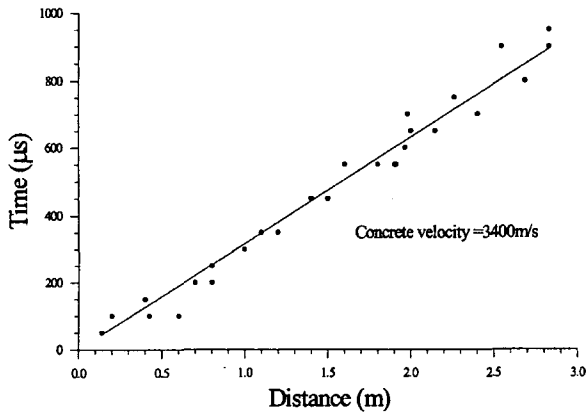


Fig. 4. Concrete P-wave velocity determination from the picked traveltimes and distance. The equation estimated from linear regression is $y = 295.4798926x$, where y is time(μ s) and x is distance(m) from source to accelerometer. P-wave velocity, an inverse of slope, is about 3400 m/s.

있으며 골재의 배합비, 양생과정, 재령 등 품질에 따라 다르다. 결함이나 두께를 파악할 때 필요한 기본정보가 매질의 속도이므로 본 연구에서 사용한 판형 콘크리트 모형의 P 파 속도를 결정하기 위하여 41×41의 격자점에서 3축 가속도계로 측정된 자료 중에서 타격한 힘과 X, Y, Z 성분과의 해당거리 만큼의 지연시간이 매우 양호하게 나타나는 자료를 대상으로 초동을 발체하였다. Fig. 4는 추출된 자료로부터 구한 도달시간과 측정거리를 사용하여 선형회귀 분석한 결과이다. 회귀직선식 $y = 295.4798926x$ 로부터 결정된 콘크리트의 P 파 속도는 약 3400m/s 이다.

충격반향법의 자료해석은 주파수 영역에서 실시하며, 측정된 시간영역의 자료를 주파수 영역으로 변환시킬 때 추정되는 콘크리트의 두께와 대응되는 주파수 대역을 강화시키고 그 이외의 주파수 범위를 감쇠시키는 대역통과 필터링(Band pass filter)이 필요하다. Fig. 5는 이 때 사용된 대역통과 필터를 나타낸 것이다.

주파수 영역에서 자료를 해석하는 것 보다 자료를 실제 심도로 변환하여 해석하는 것이 보다 해석하기 수월하기 때문에 심도전환이 필요하다. 표면에서 콘크리트 배면까지의 두께를 D 라고 할 때, $2D = \lambda$ 이므로 식 (1)은 다음과 같이 된다.

$$D = \frac{v}{2f_R} \quad (2)$$

식 (2)에서 알 수 있는 바와 같이 콘크리트 라이닝의 두께 D 와 공진주파수 f_R 는 서로 반비례한다. 민감도 분석

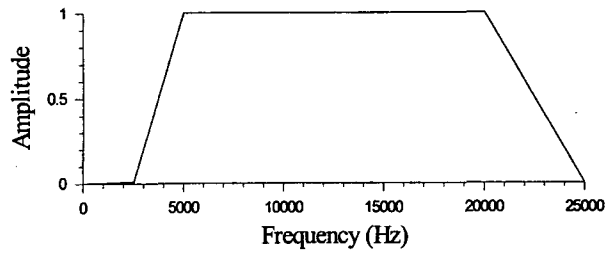


Fig. 5. Band-pass filter (5000 Hz to 20000 Hz).

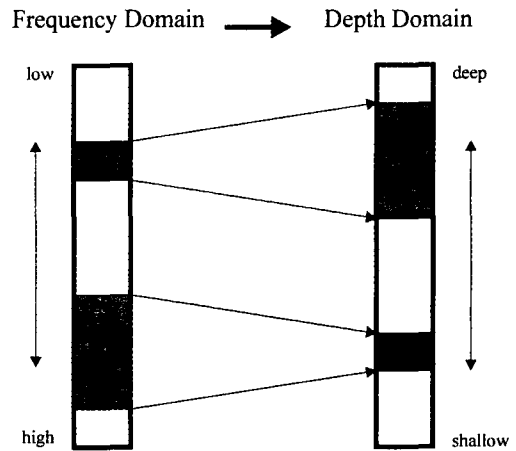


Fig. 6. Schematic explanation for the depth conversion from frequency domain.

(Sensitivity Analysis)에 따르면 주파수 영역에서 심도영역으로 좌표변환(Mapping)할 때 저주파수 대역이 더욱 민감하게 되며 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다. 예로서 콘크리트의 P 파 속도가 4000 m/s 이며 Δf 가 500일 때, 상대적으로 저주파수 대역에 있는 두개의 주파수 500, 1000 Hz와 상대적으로 고주파수 대역에 있는 2000, 2500 Hz에 대한 심도 ΔD 의 변화량은 각각 2 m와 0.2 m가 된다. 즉 저주파수 대역이 월등히 민감하게 거동하며 확장효과(Stretching Effect)가 나타남을 알 수 있다.

판형 콘크리트의 한 지점에서 타격지점과 수신기의 이격거리는 5 cm, 음원과 수신기는 나란히 Y 방향으로 설치하고 일축 및 3축 가속도계로 각각을 측정한다. 앞에서 설명한 과정에 따라 자료처리 및 해석을 실시하였다. Fig. 7(a)는 일축 가속도계를 사용하여 측정된 시간영역의 자료이며, Fig. 7(b)는 주파수 영역에서의 파워스펙트럼, Fig. 7(c)는 주파수 영역에서의 위상, Fig. 7(d)는 심도전환 결과를 나타낸 것이다. 일축 가속도계를 이용하여 측정된 Fig. 7(a)는 2 ms에 걸친 지속시간(duration time) 동안 자유진동에 의한 감쇠현상을 관찰할 수 있다. 주파수 영역으로 변환한 Fig. 7(b)에서는 약 18500 Hz에서 최대

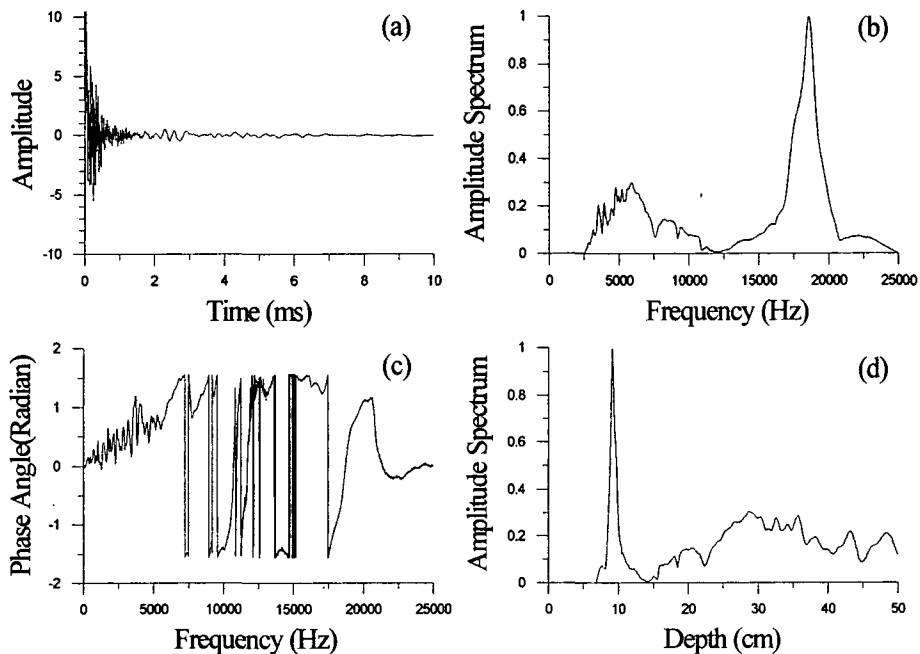


Fig. 7. (a) The results observed with single-axis accelerometer. It shows free oscillation of concrete plate model (b) power spectrum and (c) phase angle in frequency domain. The frequency of maximum amplitude spectrum is 18500 Hz (d) depth conversion. The depth of maximum amplitude is good agreement with the true thickness of concrete plate.

진폭을 보이는데 이것은 판형 콘크리트의 두께에 대응하는 주파수이며, 0~5000 Hz 대역은 대역통과 필터에 의하여 진폭이 크게 감소되었으나 5000 Hz 부근에서 큰 진폭이 나타난다. 이것은 저주파수 대역은 본래 감쇠가 적고 또한 모형하부의 전석이나 모형의 수평방향 불균질 매질의 존재 등 복합적인 요인에 의한 것이라 사료되며, 충격반향법으로 두께나 배면공동을 탐지할 때 오류를 발생시킬 수 있는 요인이다. Fig. 7(c)에 나타난 위상각은 진폭이 최대를 보이는 18500 Hz 부근에서는 위상각이 매우 안정되게 $-\pi/2$ 로부터 $\pi/2$ 로 증가되는 경향을 볼 수 있으며, 진폭스펙트럼이 작은 7500~15000 Hz 대역의 위상각은 변화가 매우 심하게 나타난다. Fig. 7(d)에서는 9.1 cm에서 최대값을 가지는데 모형의 두께 10 cm 내외와(모형의 두께를 10 cm로 정확하게 유지하며 콘크리트를 타설하기 어려움) 비교할 때 비교적 잘 일치하며 약 10% 이내의 오차범위를 나타낸다.

일축 가속도계로 측정된 동일한 지점에서 3축 가속도계로 측정된 X, Y, Z 성분을 Fig. 8, 9, 10에 나타내었다. X 성분을 측정된 Fig. 8(a)는 Fig. 7(a)와 비교하여 작은 진폭을 보이나 초기 2 ms 까지 자유진동감쇠특성을 확인할 수 있으며, 모형의 수평 가장자리에서 반사된 파들과 중첩되어 나타난다. Fig. 8(b)는 주파수 영역의 자료로서 일축 가속도계로 측정된 경우와 비슷한 주파수 대역에서

최대값을 나타내지만 저주파수 대역에서의 진폭은 매우 작다. Fig. 8(c)의 최대 진폭을 나타내는 주파수 대역에서 위상각의 변화는 안정되어 있으나 10000 Hz 이하에서 변화가 크게 나타난다. 심도전환한 결과인 Fig. 8(d)에서는 일축 가속도계로 측정된 경우와 비슷하게 9.2 cm에서 최대 진폭이 나타난다. Y 성분은 Fig. 9(a)에 있으며 X 성분과 비슷한 지속시간과 모형 가장자리로부터 발생된 반사파를 볼 수 있다. 공진이 일어나는 초기시간대에서 진폭부호가 (+)와 (-)로 교대하며 영점통과(Zero-Crossing) 되는 현상이 뚜렷하게 나타나지 않는다. Fig. 9(b)는 주파수 영역의 자료이며, 최대 진폭은 앞의 경우와 달리 콘크리트의 두께에 대응하는 주파수보다 상당히 낮은 11000 Hz 부근에서 관찰되며 약 17500 Hz에서도 큰 진폭을 볼 수 있다. Fig. 9(c)의 위상각은 진폭스펙트럼이 큰 주파수 대역에서 변화는 매우 안정되어 있으나 진폭스펙트럼이 작은 주파수 대역은 변화가 매우 심하다. Fig. 9(d)의 심도전환 결과는 15 cm에서 최대값을 보이며 이는 실제두께와는 상당한 차이를 나타낸다. 두 번째 큰 진폭인 17500 Hz에 대응되는 심도는 9.7 cm로서 실제 콘크리트판의 두께와 잘 일치함을 볼 수 있다. 단순히 최대진폭에 의하여 두께를 결정한다면 Y 성분으로 추정되는 두께는 실제값과 상당한 차이를 보이므로 3성분 측정에 의한 충격반향법의 현장적용에서는 이러한 특성을 고려하여야 한다. Z 성분의 측정자료는

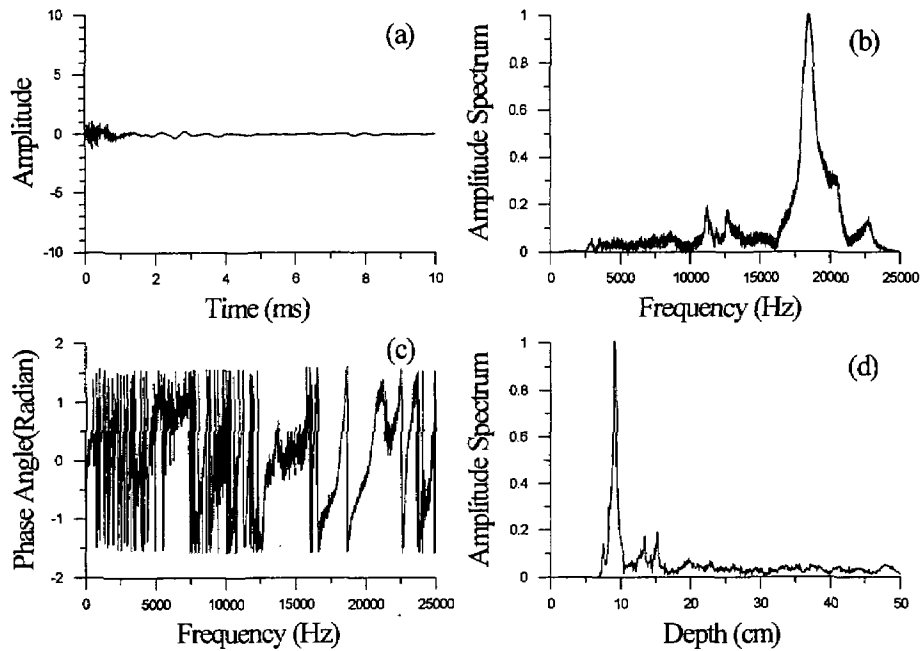


Fig. 8. (a) X-component observed with triaxial accelerometer (b) power spectrum and (c) phase angle in frequency domain (d) depth conversion.

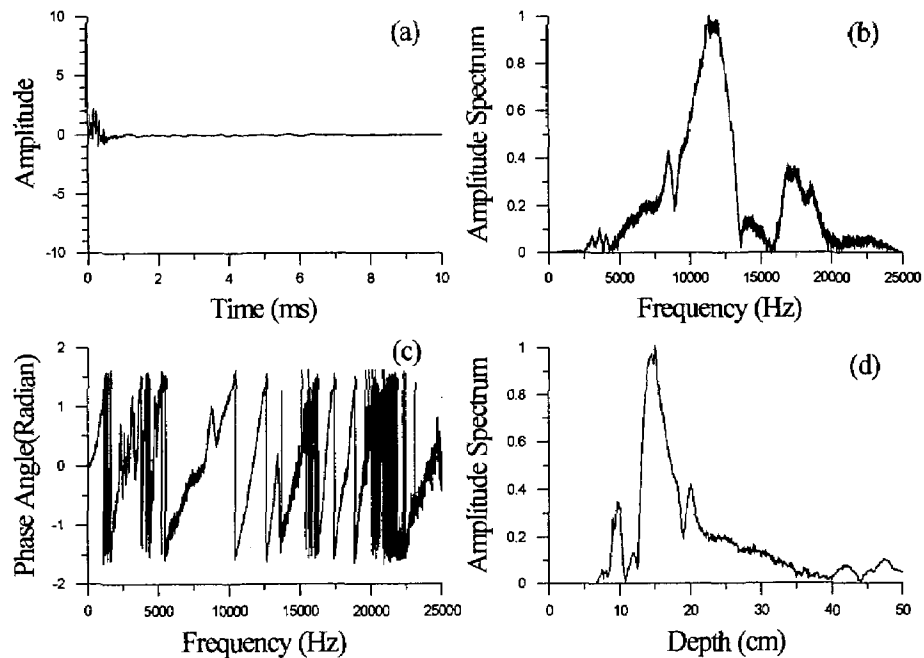


Fig. 9. (a) Y-component observed with triaxial accelerometer (b) power spectrum and (c) phase angle in frequency domain. The frequency of maximum amplitude is 11000 Hz (d) depth conversion. The depth estimated from maximum amplitude (15 cm) is poor agreement with the true thickness of concrete plate.

Fig. 10(a)에 있으며 일측 가속도계로 측정된 경우(Fig. 7(a))와 매우 비슷한 양상을 보이며, 주파수 영역 자료인 Fig. 10(b)는 최대 진폭이 16500 Hz 부근에서 나타나며

두 번째로 큰 진폭이 18500 Hz에서 나타난다. 위상각은 (Fig. 10(c)) 앞에서와 달리 상대적으로 변화가 약하며, 심도전환한 결과(Fig. 10(d)) 최대 진폭이 10.4 cm 부근에,

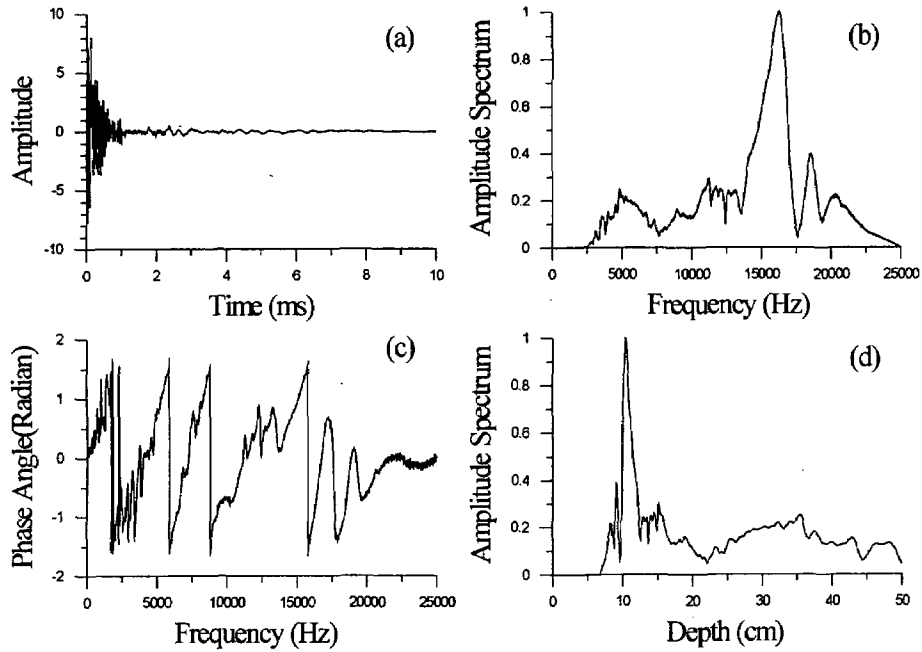


Fig. 10. (a) Z-component observed with triaxial accelerometer (b) power spectrum and (c) phase angle in frequency domain (d) depth conversion.

두 번째 진폭은 9.1 cm로서 실제두께와 비교적 일치한다.

콘크리트 구조물의 두께 및 배면공동을 탐지하기 위한 목적의 충격반향법을 적용할 때는 공진현상을 이용하므로 측정된 신호의 영점통과(Zero-Crossing)를 정확히 측정할 수 있는 여부가 중요하며 일축 가속도계만을 사용하여도 충분히 좋은 결과를 얻을 수 있으며, 3축 가속도계를 사용한다고 할 때 음원과 수진기가 나란한 방향의 성분은 두께 추정에 심각한 오차를 유발할 수 있으나 그 이외의 수평방향 및 수직성분은 실제두께와 비교적 양호하게 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 주파수 영역에서 최대 진폭을 나타내는 주파수 대역에서의 위상각은 안정된 변화를 보이지만 진폭스펙트럼이 작은 주파수 대역에서의 위상각은 변화가 매우 심하게 나타난다.

현장적용 사례

자료취득

지하철터널 ×× 구간에서 터널 라이닝 배면공동 탐지를 위하여 일축 가속도계를 사용한 충격반향법 탐사가 시행되었다. 터널의 조사면은 그라인더로 정리한 후 그리스를 가속도계와 라이닝면 사이에 발라 터널라이닝 표면에 밀착되도록 설치하여 접촉상태를 최상으로 하였고, 수진기는 음원과 15 cm의 이격거리를 유지하였다. S/N비 (Signal

Table 2. Seismic data acquisition parameter

Time		Distance	
Sampling Interval	Sampling Number	Trace Distance	Trace Number
25 μs	512	0.25 m	81

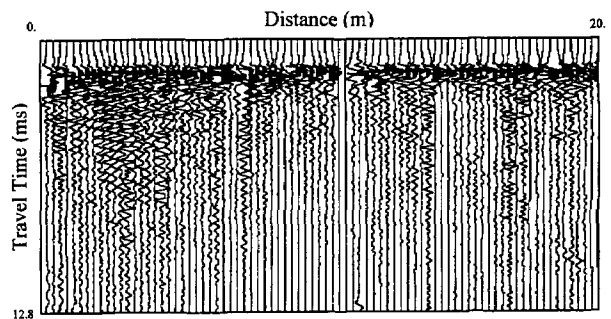


Fig. 11. Seismic section obtained along the crown of subway tunnel.

to Noise Ratio)를 높이기 위하여 각 측정점마다 4번의 Stacking을 하였고, 육안조사시 취약성이 의심되는 터널 천장의 중단면을 따라 20 m 구간에 대하여 실시하였다. Table 2에 측정시의 자료획득변수(Data Acquisition Parameter)를 나타내었으며, Fig. 11은 일축 가속도계를 사용하여 취득한 자료를 나타낸 단면도로서 탄성과 반사

단면도는 지층의 경계 또는 지질구조를 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 제시할 수 없다. 2~4 m 부근의 트레이스는 자유감쇠진동(Free Damped Oscillation) 특성을 보여주고 있다.

자료처리 및 해석

공진모드는 시간 영역에서 보다 주파수 영역에서 파악하는 것이 이해가 쉽기 때문에 거리-시간의 탄성과 단면도인 Fig. 11을 고속후리에변환(Fast Fourier Transform)을 통하여 Fig. 12와 같이 거리-주파수의 단면도로 변환하였다. 전체 트레이스에 대한 파워스펙트럼 중에서 최대값을 1로 하고 모든 트레이스를 정규화 하였다. 최대 파워스펙트럼의 40% 이상치는 검은색으로 나타내었다. 500 Hz 이하의 저주파수에서 비교적 큰 스펙트럼 에너지가 나타나며 2~4 m 부근 2500 Hz에서 매우 큰 파워스펙트럼을 나타내고 있다. Fig. 12를 통하여 통상적인 탄성과 단면도에 비하여 거리-주파수의 단면도가 결함의 위치를 효과적으로 나타낼 수 있을 것으로 판단된다. 충격반향법에 의해서는 라이닝의 두께도 파악되지만 본 경우에는 두께파악은 가능하지 않았다. 라이닝 두께가 50 cm 이상으로 매우 두텁기 때문에 원지반과 콘크리트 라이닝이 밀착된 상태에서는 뚜렷한 공진 주파수의 형성이 어려웠기 때문이라고 해석된다. Fig. 13은 전체 트레이스에 대하여 파워스펙트럼을 거리-

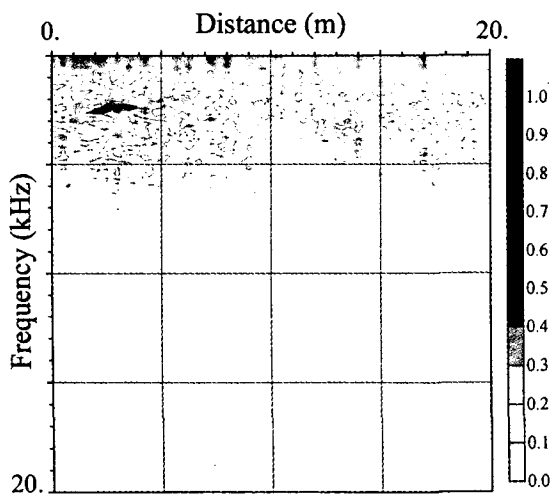


Fig. 12. The image section of power spectrum in frequency domain. The response of the cavity behind the tunnel lining is clearly isolated in the frequency band of 2000 Hz to 3000 Hz.

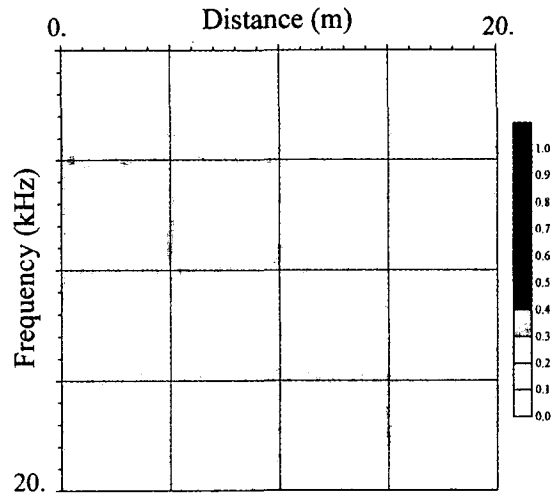


Fig. 13. The image section of power spectrum in depth domain. The applied frequency band is from 500 Hz to 20000 Hz.

심도의 단면도로 나타낸 것으로, 거리가 2~4 m 이며 심도가 0.7~0.75 m 부근에 매우 큰 스펙트럼이 나타난다. 이것은 터널 라이닝 배면공동에 의한 것이거나 또는 라이닝과 원지반의 밀착상태가 불량하거나 원지반의 파쇄상태가 심한 곳으로 추정되어 코어링(Coring)에 의한 확인작업이 바람직하였으나 현장 여건상 확인작업은 이루어지지 않았다.

결 론

본 연구에서는 실시간 자료측정과 해석이 가능한 Impact-Echo 시스템을 구성하여 기존에 널리 사용되는 1축 가속도계와 함께 3축 가속도계를 사용하여 판형 콘크리트 모형에 대한 실험을 실시하여 그 반응 특성에 대하여 고찰하였으며, 지하철 터널에 대한 현장적용 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 일축 및 3축 가속도계를 이용한 판형 콘크리트 모형에 대한 충격반향법 실험 결과 두께 및 배면공동 탐지용으로 일축가속도계 사용만으로 충분하였고, 오차 10% 이내의 정확한 결과를 나타내었다.
2. 3축 가속도계를 사용하여 두께를 측정할 때 X와 Z 성분의 측정결과는 실제두께와 비슷한 결과를 보였지만, 음원파수진기가 나란한 방향인 Y 성분은 많은 오차를 포함하였다.
3. 주파수 영역에서 진폭스펙트럼이 매우 큰 값을 나타내는 주파수 대역의 위상각은 변화가 완만하지만 진폭스펙트럼이 작은 주파수 대역의 위상각은 변화가 매우 심하였다.
4. 충격반향법에서 거리-주파수를 거리-심도에 대한 단면도로 변환할 때 저주파수 대역이 훨씬 민감하게 거동하

며 확장효과(Stretching Effect)가 나타난다. 즉, 심도가 깊을수록 오차가 커진다.

5. 충격반향법의 현장적용 결과 탄성과 반사단면도에 의해서는 배면공동 또는 라이닝과 원지반의 밀착이 불량한 부위에 대한 정성적인 파악이 가능하지만 주파수 영역 영상화 처리 단면에서는 심도가 확인되어 더욱 정량적인 해석이 가능하다.

시공 중 품질관리와 터널구조물의 유지관리 및 안전진단과 관련하여 라이닝 배면공동의 존재탐지는 매우 중요한 요소이므로 보다 효과적인 현장조사가 수행될 수 있는 음향을 이용한 탐사시스템 개발이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 1999년 (재)한국해양대학교 학술진흥회의 일 반연구지원과제인 “탄성과 탐사법을 이용한 콘크리트 구조물의 안전진단” 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 신성렬, 조철현, 신창수, 양승진, 장원일, 1998, “GPR

및 단일채널 탄성과 탐사에 의한 터널라이닝 배면공동 조사,” 한국구조물진단학회지, Vol. 2, No. 4, pp. 148-158.

2. 시설안전기술공단, 1996, “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(터널편)”.

3. 김영근, 장정범, 정한중, 조철현, 1996, “터널라이닝 진전도 평가를 위한 비파괴 조사법의 적용연구,” 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp. 383-386.

4. 조성호, 1998, “SASW 기법에 의한 터널 라이닝의 방수막 확인과 위치 추정에 관한 연구,” 대한토목학회 논문집, Vol. 18, No. III-3, pp. 435-443.

5. 이세경, 김영환, 구자용, 김병주, 김영길, 1988, “콘크리트 구조물에 대한 초음파 탐상법 개발(III),” 과학기술처 특정연구개발사업 연구보고서, KSRI-88-88-IR, 과학기술처.

6. 김동수, 박형춘, 이광명, 1995, “충격반향기법과 표면파기법을 이용한 콘크리트 부재의 비파괴검사,” 한국콘크리트학회 추계학술발표회 논문집, pp. 164-168.

7. 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, Vol. 10, No. 4, pp. 413-431.

8. 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.