

충격반향기법의 주파수영역 해석을 이용한 구조물 안전진단에 관한 연구

안제훈¹⁾, 서백수^{2)*}

A Study of Structural Safety Diagnosis using Frequency Domain Analysis of Impact-Echo Method

Jehun An and Baeksoo Suh

Abstract Impact-echo is a method for non-destructive testing of concrete structure. This method is based on the use of impact-generated stress wave which is propagated and reflected from internal flaws within concrete structure and external surface. In this study, we performed non-destructive testing using impact-echo methods for safety diagnosis of civil engineering and building structures. There are testing cases for the three models having one-dimensional form; The first case is the measurement of thickness change of the model, the second is the detection of cavity in the model, and the third is the predictions of the lining thickness and the position of the cavity under tunnel lining condition.

KeyWords Concrete structure, Non-destructive testing, Impact-echo, Safety diagnosis

초 록 충격반향기법은 콘크리트 구조물 내부의 결함과 외부 표면 사이에서 반사되어 전파되는 충격생성응력파를 이용한 비파괴적 시험 방법이다. 본 연구에서, 토목 및 건축 구조물의 안전진단을 위하여 충격반향기법을 이용한 비파괴 시험을 수행하였다. 야외 시험 조건은, 터널라이닝 모델에 대한 주파수 영역에서, 모델의 두께 변화를 측정할 수 있는 경우와 모델 내 공동이 있는 경우의 공동의 위치를 파악하는 경우, 그리고 터널라이닝 조건에서의 라이닝 두께 및 공동위치를 파악하는 경우를 시험하였다.

핵심어 콘크리트 구조물, 비파괴 시험, 충격반향기법, 안전진단

1. 서 론

토목구조물에 콘크리트를 적용한 역사가 길어짐에 따라 우리나라를 비롯한 세계각지에서 기존 구조물의 노후화가 심각해지고 있고, 또한 우리나라에서도 최근 신규 건설 중인 대형 구조물의 붕괴사고가 잇달으면서 토목구조물의 안전진단 및 평가에 대한 필요성이 날로 증가하고 있다.

본 연구는 토목, 건축구조물의 안전진단 시 충격반향기법을 이용하여 비파괴검사를 수행하였다. 터널 라이닝에 대한 비파괴 조사법의 적용성을 살펴보기 위하여 여러 가지 발생할 수 있는 터널 구조물의 라이닝 형상

을 제작하여 측정 파라미터를 다양하게 변화시킴으로써 최적의 터널 내 형상을 구현하려 하였다. 또한, 교량의 안전성에 직접적인 원인이 될 수 있는 교각모델을 제작하여 교각 내 미세균열의 발달을 탐지하려 하였다¹⁻³⁾.

이 두 가지 연구는 응력파를 이용한 기존의 시간영역(time domain)에서의 정량적인 해석이 어려웠던 콘크리트 층에서의 내부결함 분석을 충격반향시험을 통하여 주파수 영역(frequency domain)에서 실시하였다. 충격반향시험은 모델의 두께 변화를 측정할 수 있는 경우, 모델 내 공동이 있는 경우에 공동의 위치를 파악하는 경우, 그리고 터널라이닝 조건에서의 라이닝 두께 및 공동위치는 파악하는 경우를 시험하였다⁵⁾.

2. 이 론

다중반사파에 의한 순간공진음의 시간영역에서의 파

¹⁾ (주)First Geo 팀장

²⁾ 강원대학교 지구환경공학부 교수

*교신저자(Corresponding Author): bssuh@kangwon.ac.kr

접수일: 2004년 1월 16일

심사 완료일: 2004년 2월 23일

형은 구조물의 두께를 측정하는 데는 분해능의 한계가 있다. 따라서 시간영역 기록을 푸리에 변화에 의한 주파수 영역에서의 최대주파수를 분석하는 것이 충격반향기법의 핵심 원리이다. 이러한 충격반향기법의 원리 및 특성을 살펴보면 다음과 같다.

2.1 충격반향기법(Impact echo method)

시험체 표면의 한점에서 충격생성응력파(impact-generation stress wave)가 기계적 충격에 의하여 생성되면, 이 응력파는 구형의 파면을 가지는 P파와 S파로서 시험체 내부로, 실린더 형태의 파면을 가지는 R파(Rayleigh wave)로서 표면으로 전달된다

이때 실체파(P파와 S파)는 균열, 공동과 같은 불연속체나 이질 매질층간의 경계면에 도달되면 반사응력파가 생성된다. 충분히 충격점 가까이에 감지기가 위치한다면 균열, 공동과 같은 매질내의 불연속체나 이질 매질층간의 경계면에서 반사된 파는 P파에 의한 표면변위가 S파에 의한 표면변위보다 훨씬 크기 때문에 표면에서 감지되는 파형은 반사된 P파에 의한 파형으로 볼 수 있다. 반사되는 파형은 표면에서 다시 반사되고 또 다시 시험체 내로 전파된다. 이와 같이 표면과 균열, 공동과 같은 불연속체 사이 또는 표면과 이질 매질층 사이의 다중반사에 의한 순간공명조건이 발생한다.

시험체의 치수를 알고 있을 경우 구성 재료의 강성도 결정을 통한 콘크리트의 불량도를 추정할 수 있고, 재료의 압축파(P파) 전파 속도를 알고 있다면 반사파의 도달 시간을 측정하여 시험체 내부에 존재하는 불연속면의 위치를 알아낼 수 있다. Fig. 1은 충격반향기법의 개요도를 나타낸 것이다⁶⁻⁸⁾.

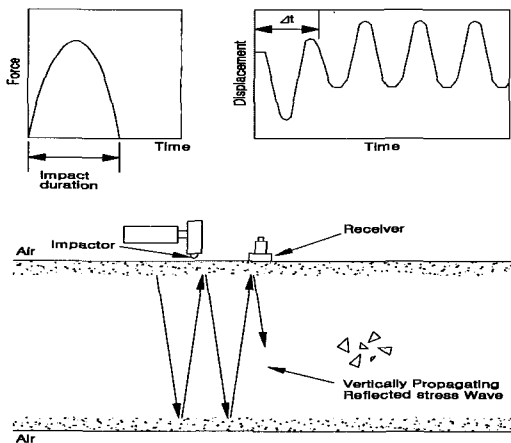


Fig. 1. Schematic diagram of impact-echo method

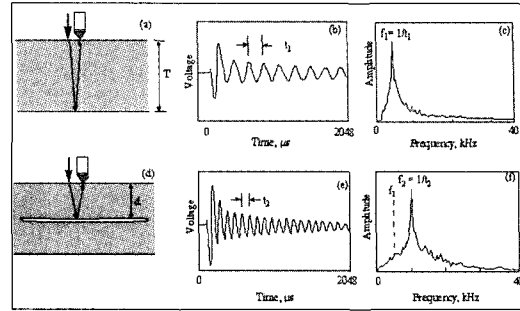


Fig. 2. Comparison of the impact-echo response of a solid plate(a, b, c) with the response of a plate and a large crack(d, e, f)

Fig. 2는 균질한 슬래브와 깊이 d에 넓은 범위의 균열을 가지는 슬래브 상에서 측정한 충격반향기법의 시험으로부터 나온 파형과 스펙트럼을 보여준다.

균질한 슬래브에서 얻은 파형은 주기 t1를 가지고 스펙트럼은 주파수 f1 = 5.0 kHz에서 하나의 큰 진폭 peak를 보여준다. 슬래브내 P파 속도가 4000 m/s면, 두께 T는, $T = Cp/(2xf_1) = 4000/(2 \times 5000) = 0.4$ m로 계산된다. 균열이 있는 슬래브에서는, 핵심주파수, f2,가 10.0 kHz이고 깊이는 $d = Cp/(2xf_2) = 4000/(2 \times 10000) = 0.2$ m로 계산된다.

2.2 자료처리

충격반향기법의 신호처리는 시간영역(time-domain) 해석과 주파수영역(frequency-domain)해석 두 가지로 나누어 생각할 수 있다. 가늘고 긴 말뚝이나 피어(pier) 기초에서는 충격파가 콘크리트 속으로 충분히 전달될 수 있도록 상대적으로 저주파의 파를 사용한다. 이러한 파는 시험체내의 반사체에 적당한 각도로 부딪히면 표면으로 돌아와 변위를 유발하며 이러한 표면변위를 시간영역상에서 해석하여 시험체의 건진도를 평가한다. 말뚝 같은 구조물은 기하학적 구조의 특성상 전파되는 파의 에너지를 좁은 경로에 집중 시켜 표면에서의 파형 분석을 쉽게 한다. 또한 파의 발생과 수신기 사이의 간격이 길기 때문에 반사파의 도착시간을 시간영역에서 비교적 정확하게 결정할 수 있다⁴⁾.

일반적으로 가속도계가 장치되어 있는 표면에서 파장보다 작은 깊이 내에 있는 균열, 공동과 같은 불연속체 또는 이질 매질층은 파가 타고 넘어가기 때문에 반사되어 오는 파가 없다. 따라서 상대적으로 얇은 슬래브, 벽 같은 구조물이나 표면에서 깊이가 얇은 곳에 위치하는 균열 공동과 같은 불연속체 또는 이질 매질층에 입사된 파가 반사되기 위해서는 충분히 높은 고주파수 성분을

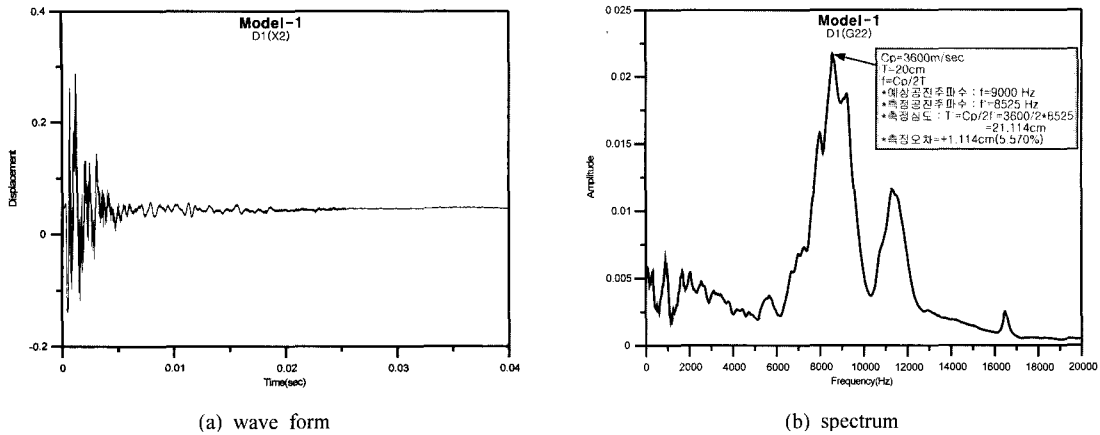


Fig. 3. Result obtained from an impact-echo test

가지는 파를 사용하여야 한다.

시간영역해석에서는 반사파의 도달시간을 명확히 찾아낼 수 없는 반면에 주파수영역해석에서는 공진주파수를 쉽게 얻을 수 있다.

파가 매질속을 전파할 때 고주파수성분일수록 감쇠가 커지기 때문에 전체파형에서 첫 번째 모드성분(주파수가 가장 작은 모드성분)의 영향이 가장 크다. 따라서 시간영역에서의 기록을 고속 푸리에 변환(FFT: Fast Fourier Transform)을 사용하여 주파수 영역으로 변환하면 첫 번째 모드의 주파수가 최대진폭주파수가 된다. 매우 낮은 파장을 갖는 공동이 있는 시험체라면 반사파의 도달 시간을 구분하기 어려운 반면 주파수영역에서는 공진 주파수의 해석을 명확히 할 수 있다.

3. 실험방법 및 계획

FFT 분석기를 이용하여 주파수영역에서 해석하였고, 터널라이닝 형상의 결함탐지는 모델의 두께 측정, 모델 내 공동의 탐지, 실제 터널 라이닝 형상에 대한 실험을 수행하였다.

3.1 실험장비

충격반향기법의 장비(impact echo test equipment)는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 가진원(impactor)과 가속도계(accelerometer) 데이터를 취득하여 처리하는 포터블 컴퓨터로 구성되어 있다.

3.2 실험모델

본 연구에서는 1차원 형상을 가지는 세 종류의 야외 모델과 3차원 형상을 가지는 한 개의 실험실 교각 시험

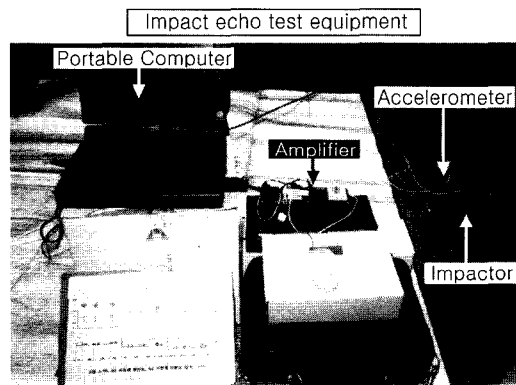


Fig. 4. View of the impact-echo test equipments

모델에 대해 탄성파를 이용한 충격반향기법인 비파괴 시험을 실시하였다. 모델 1, 2, 3은 모두 균질한 콘크리트 모델로 가정하여 실험하였다.

Fig. 5(a) 모델1은 길이 1200 cm, 폭 300 cm 이며, 두께는 20, 40, 60, 80, 100 cm의 다양한 두께와 100 cm에서 20 cm로 경사 15°로 시공한 부분으로 되어 있다.

Fig. 5(b) 모델2는 길이 1200 cm, 폭 300 cm 이며, 두께 30 cm 구역에는 10x10x10 cm, 20x20x20 cm, 30x30x20 cm의 공동, 두께 60 cm 구역 및 90 cm 구역에는 10x10x10 cm, 20x20x20 cm, 30x30x30 cm의 공동이 각각 포함되어 있다.

Fig. 5(c) 모델3은 길이 1200 cm, 폭 300 cm 이고, 터널 조건은 rockbolt 및 강지보(steel rib), 철망(wire-mesh), 방수포, 2차 콘크리트 라이닝 내 공동, shotcrete 와 배면 사이의 공동을 제작하였다.

또한, 실험실 교각 시험 모델인 Fig. 6은 너비 40x40

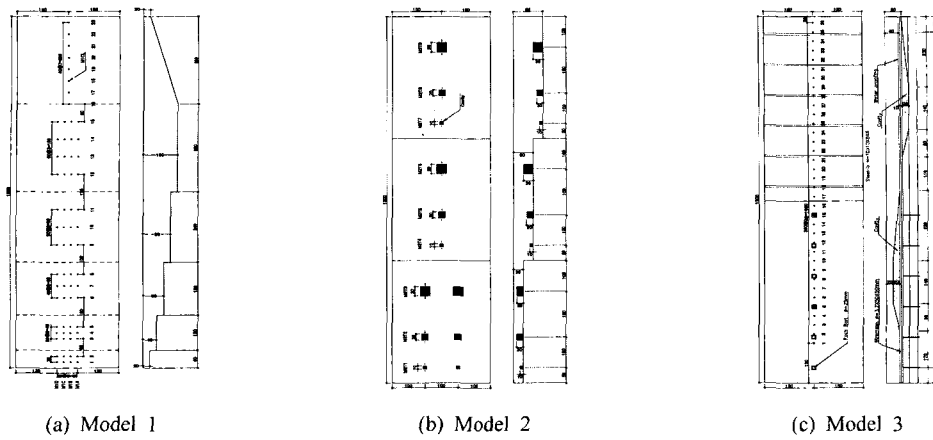


Fig. 5. Top and side views of the Model 1,2,3

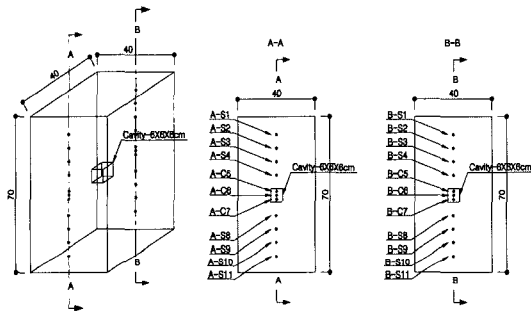


Fig. 6. Solid and front view of experimental pier Lab Model

cm, 높이 70 cm인 교각의 축소 모형으로서 내부에 6x6x6 cm의 공동이 제작되어 교각 내 균열 및 공동등의 결함 탐지를 위해 제작하였다

3.3 실험방법

모델 1, 2, 3 모두 균질한 콘크리트 표면상에서 실험이 수행되었고, 각 모델의 가속도계가 위치하는 측정점은 가진원에서의 거리가 약 3 cm 거리를 두어 이질 매질층 또는 불연속면의 반사면에서 반사되는 P파의 도달이 연직 반사된 파형으로 간주될 수 있도록 하였다. 또한, 불규칙한 콘크리트 표면을 그라인드(grind)로 부드럽게 같은 후, 콘크리트 표면과 가속도계간 사이에 그리스(grease)를 묻혀 충격파의 전달이 양호하도록 하였다.

모델 1에서는 충격반향기법을 이용한 콘크리트 라이닝의 각각의 두께를 측정하고, 변화하는 라이닝 두께를 측정하기 위해 실험을 수행하였다.

Fig. 5(a)와 같이 20 cm 간격을 가지는 M1A, M1B, M1C, M1D line에 1~15번의 측정점과 CL line에 1

6~23 측정점을 위치시켰다. M1A1~M1D2는 두께 20 cm, M1A3~M1D5는 두께 40 cm, M1A6~M1D8은 두께 60 cm, M1A9~M1D11은 두께 80 cm, M1A12~M1D15는 두께 100 cm, CL 16~23은 두께 100~20 cm의 구역에 가속도계를 위치하고 반경 3~10 cm의 범위에서 impact hammer에 의한 타격을 주어 다중 반사된 P파의 스펙트럼 결과로 해석하였다.

모델 2에서는 공동의 위치 측정 실험을 수행하였다.

Fig. 5(b)과 같이 30 cm, 60 cm, 90 cm 두께의 구역에 공동이 포함되어 있다. M2T1 지점에서 공동이 포함된 구간과, 균질한 콘크리트 구간에 각각 4개의 측정점을 두어 공동의 위치 및 두께를 측정하였다. M2T2 부분에는 공동 부분 콘크리트 표면의 불량화와 파장이 너무 짧은 관계로 실험이 불가능하였고, 균질한 콘크리트 구간에는 4개의 측정점 중 2개의 측정점 부근에서는 표면의 풍화 및 불량화로 실험이 불가능하여, 나머지 2개의 측정점에서만 측정하였다. M2T3 부분도 콘크리트 표면의 불량화 및 짧은 파장으로 인해 실험이 불가능하였다. M2T4 부분에는 공동이 포함된 구간에 2개의 측정점을 두고, 균질한 콘크리트 구간에는 4개의 측정점을 두어 공동의 위치를 측정하였다. M2T5 부분에는 공동이 포함된 구간에 4개의 측정점을 두고, 균질한 콘크리트 구간에는 4개의 측정점을 두어 공동의 위치를 측정하였다.

M2T6 부분에는 공동이 포함된 구간에 5개의 측정점을 두고, 균질한 콘크리트 구간에는 4개의 측정점을 두어 공동의 위치를 측정하였다. M2T7 부분에는 공동이 포함된 구간에 7개의 측정점을 두고, 균질한 콘크리트 구간에는 4개의 측정점을 두어 공동의 위치를 측정하였다. M2T8 부분에는 공동이 포함된 구간에 5개의 측정

점을 두고, 균질한 콘크리트 구간에는 4개의 측정점을 두어 공동의 위치를 측정하였다. M2T9 부분에는 공동이 포함된 구간에 5개의 측정점을 두고, 균질한 콘크리트 구간에는 4개의 측정점을 두어 공동의 위치를 측정하였다.

모델 3에서는 실제 현장 터널 라이닝 조건을 갖춘 형상으로 록볼트(rockbolt) 및 강지보(steel rib), 철망(wire-mesh), 방수포가 내설 되어 있다. 또한, 터널 배면에 노후화에 의한 공동의 발생 및 라이닝 강도의 저하 형상을 고려하여 모델 내에는 나무가 내설 되어 있어 터널 라이닝의 두께 파악 및 라이닝 내 공동을 파악하고자 실험을 수행하였다.

Fig. 5(c)와 같이 콘크리트 모델 폭의 중심에서 길이 방향으로 30 cm 간격의 측정점을 위치하였다.

CL1~2와 CL18~36은 50cm 콘크리트 두께를 측정하였고, CL3~17은 콘크리트내 공동의 위치를 측정하였다.

실험실 수준의 교각 시험 모델에서는 단면 A-A와 단면 B-B의 두 단면에 대하여 동일한 실험을 수행하였다.

단면 A-A 실험에서는 A-S1~A-S4, A-S8~A-S11 구간에서는 자유면-자유면 간 두께가 40 cm 로서 균질한 콘크리트 교각에 대한 건전도를 평가하였으며, A-S5~A-S8 부분은 교각 내 6x6x6 cm 규모의 공동으로 결함이 있는 부분에 대한 17 cm의 두께에 해당하는 실험을 수행하였다. 교각내 감지점의 위치는 6 cm의 간격을 유지하였고, 측벽 영향(side effect)이 8 cm의 거리를 두고 배치하였다. 마찬가지로, 단면 B-B도 같은 실험을 수행하였다.

4. 실험 결과

충격반향기법을 이용한 실험 결과 터널라이닝 형상의 Model-1, Model-2, Model-3은 1차원적 형상으로 최대 주파수 값이 예리한 극대점(peak)을 보이고 있으며, 이는 심도에 대한 극대점 값을 찾는 데 정확한 결과를 얻을 수 있다. 하지만 실험실 수준의 교각형상에 대한 모델은 3차원적 형상으로 자유면(개방면)이 터널라이닝 형상과 비교하여 상대적으로 많아, 구조물 자체 진동 모드가 커서 잡음(noise)이 발생하여 극대점 값을 정하는데 혼동이 있고, 교각내 공동의 위치에 대한 두께를 찾는 데는 어려움이 있다.

4.1 모델의 두께 측정(Model-1)

모델 1의 콘크리트 부재는 균질한 구조물이라고 보고, 콘크리트의 P파 속도는 여러번의 콘크리트모형의

탄성파속도측정에 의해 3600 m/sec로 설정하였다. 탄성파속도를 3600 m/sec로 설정한 이유는 콘크리트 부재를 제작할 때 P파의 속도가 3600 m/sec가 측정될 수 있도록 콘크리트의 배합을 하였으며, 제작후에 탄성파 측정장비를 통해 여러번 실험한 결과의 평균값이 3600 m/sec로 측정되었기 때문이다.

Fig. 7은 두께 20 cm의 콘크리트 형상에서 측정된 충격반향기법의 (a)시간파형, (b)파워 스펙트럼, (c)주파수

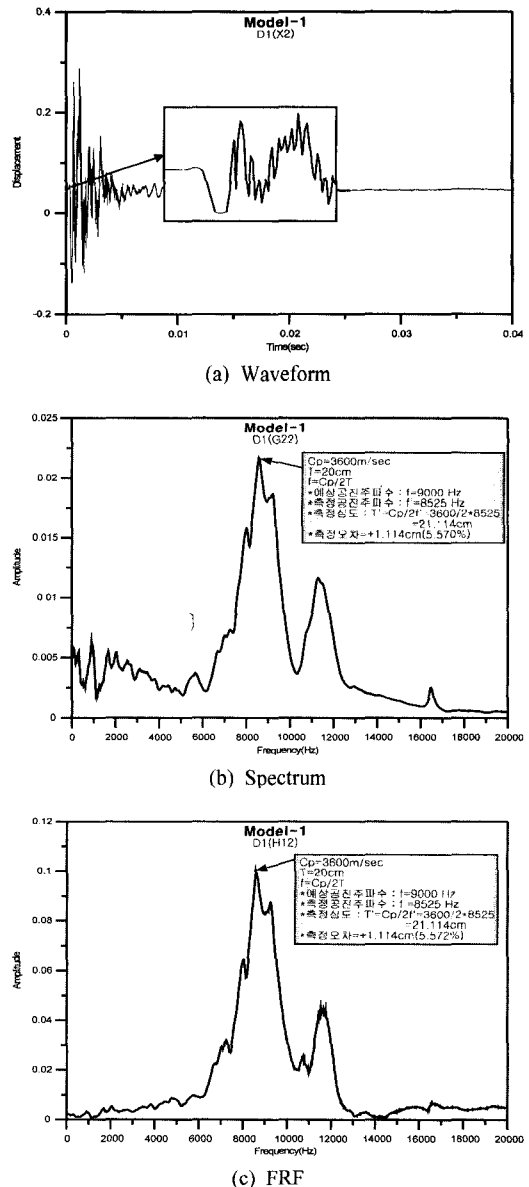


Fig. 7. Impact-echo test at MID1 on a plate of the Model 1; 20cm thick

응답함수(FRF: Frequency Response Function)를 나타낸 결과이다.

(a)는 시간영역(time domain)의 결과로 가진원에서 발생한 충격음이 다중 반사하여 감지기에서 표면 변위를 일으킨 것이다. 여기서 동적신호분석기(FFT Analyzer)에서 주 주기가 되는 구간을 첫 번째 공진모드로 푸리에 변환하면 (b), (c)와 같이 $f = 8525$ Hz로 측정된다. P파 속도가 3600 m/sec이므로, 심도 T는 식 $T = Cp/2f$ 에 의하여 21.114 cm로 실제 두께 20cm와 비교할 때 약 1 cm 정도의 측정 오차가 있으나 이는 거의 정확한 모델 두께를 유추한 것임을 알 수 있다.

20 cm와 같이 비교적 얇은 심도에서의 측정은 (b)파워스펙트럼 보다 (c)주파수응답함수(FRF: Frequency Response Function)를 이용해서 해석하는 것이 더 바람직하는데, 이는 전체 주파수범위에 대하여 진폭을 정규화 시킴으로써 고주파수 대역의 신호를 해석하기에 더 용이하기 때문이다

4.2 모델 내 공동의 위치 탐지(Model-2)

모델 2는 콘크리트 구조물내 이질 매질층 또는 불연속층으로 해석되는 공동이 매설되어 있으며, 공동 이외의 부분은 균질한 콘크리트이며, P파 속도는 3600 m/sec로 설정하였다.

Fig. 8(a)는 공동이 없는 30 cm 두께의 균질한 콘크리트 상에서 측정한 결과로 측정된 공진주파수 $f = 5800$ Hz이다. Cp가 3600 m/sec이고, 식 $T = Cp/2f$ 를 이용하면 측정된 두께는 31.034 cm로 실제 모델 두께 30 cm에 거의 정확한 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 8(b)는 30 cm의 균질한 콘크리트 내 10x10x10 cm의 공동이 포함된 구간에서의 측정 결과를 보여주고 있다. 측정 결과 콘크리트 표면에서 공동 상부까지의

실제 두께는 20 cm이고, 측정된 두께는 16.901 cm로 -3.099 cm (15.493%)의 측정오차가 나지만, 이는 천부 결함(shallow delamination)에서의 짧은 파장에 기인한 원인이거나 콘크리트 표면의 풍화에 의한 것으로 보인다.

모델 1과 마찬가지로 측정 결과 값은 모델 2의 형상을 잘 구현해 주고 있으나, 일부 구간(M2T2, M2T3)에서는 콘크리트 표면이 고르지 못한 점과 모델의 노후와 등 여러 가지 현장여건으로 인하여 실험이 불가능하였다. 또한, 이 구간에서는 모델 자체의 노후화 현상뿐만 아니라, 천부 결함(shallow delamination)의 영향인 모델 자체가 가지고 있는 두께에 해당하는 파장(10 cm)이 너무 짧아 실험이 잘 이루어지지 못한 점도 두께측정이 불가능한 원인으로 나타난다.

4.3 터널라이닝 조건의 두께 및 배면공동 탐지(Model-3)

모델 3은 실제 NATM 터널 라이닝 구조로 설계 제작되었으며, 공동 부분은 콘크리트 속도(3600 m/sec)와 임피던스 차이를 크게 하여 다중반사가 발생할 수 있도록 나무로 타설 하였다.

Fig. 9(a)는 배면 공동이 없는 콘크리트 부분에서 측정한 결과로, 측정공진주파수는 3550 Hz이고, 측정결과 계산된 심도는 50.704 cm로 실제 라이닝 두께 50 cm에 거의 정확한 결과를 얻었다. 또한, Fig. 9(b)는 배면 공동이 있는 표면에서 측정된 결과로 측정공진주파수는 9250 Hz로, 측정 심도는 19.459 cm이다. 즉, 공기로 차 있는 공동과 마찬가지로 콘크리트와 임피던스가 큰 나무로 제작된 공동은 실제 측정결과에서는 차이가 없는 것으로 나타난다.

4.4 교각 모델의 공동 결함 측정(Lab Model)

실험실 수준의 교각 모델은 실제 교각의 형상을 축소

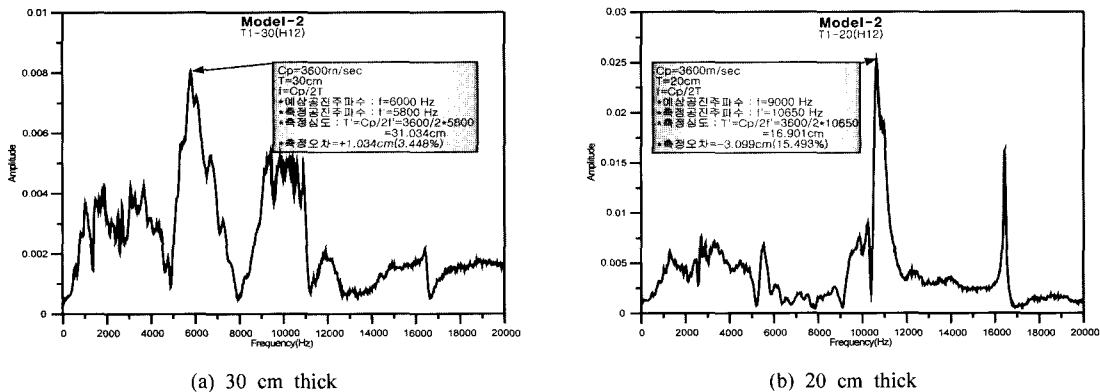


Fig. 8. Impact-echo test at M2T1 on a solid plate of the Model 2

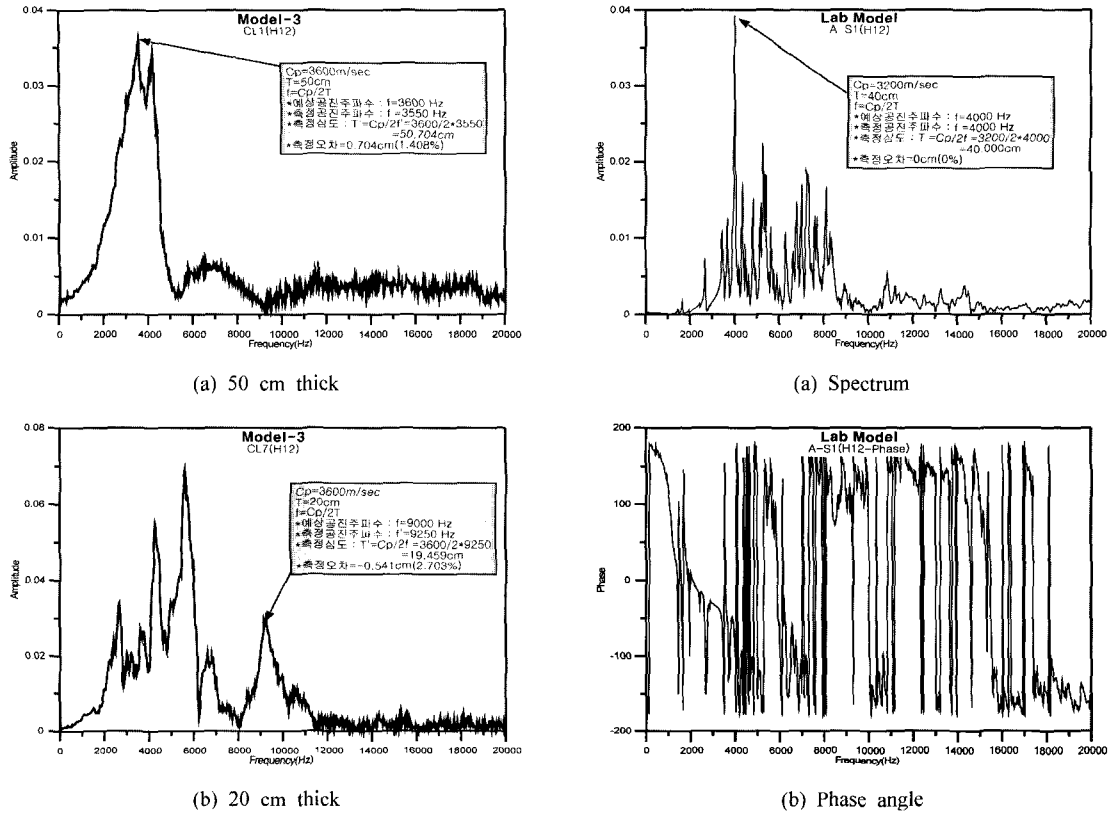


Fig. 9. Impact-echo test at M3CL1 on a solid plate of the Model 3

하여 실험실 수준으로 제작한 것이다. 충격반향기법 및 초음파 탐사법을 이용하여 균질한 표면에서의 직접 P파 속도를 측정된 결과 $C_p=3200$ m/sec로 나왔으며, 이를 대표속도로 설정하였다. Fig. 10은 공동이 없는 콘크리트 부분에서 측정된 결과의 (a)주파수응답함수, (b)위상각의 변화, (c)시간영역 그래프로, 측정공진주파수는 4000 Hz이고, 측정 결과 계산된 심도는 식 $T' = C_p/2f$ 에 의해 40 cm로 교각의 실제 단면거리인 40 cm와 일치한다. 그리고 Fig. 10(b)를 살펴보면 위상각의 변화가 -180° 에서 180° 까지 주기적으로 변화되는데 이는 감지점이 위치한 반대면에서 반사되는 면이 뚜렷하게 자유면임을 보여주는 것이다.

5. 결 론

본 연구는 기존 금속재료 공학과 지구물리탐사법에서 발달되어온 기법을 응용하여 터널의 안전진단 및 교각의 안전진단에 대한 시도를 하여 그 적용성 및 신뢰성을 알아보았다.

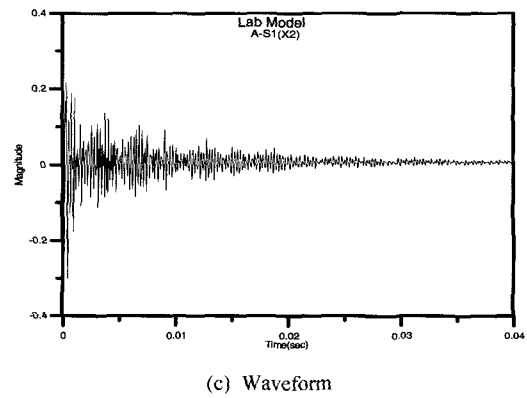


Fig. 10. Impact-echo test at A-S1 on a solid pier of the Lab Model

1) 터널의 안전진단 모델로 사용한 콘크리트 슬래브 형상인 Model 1, 2, 3은 각각 터널라이닝의 두께변화를 측정, 라이닝 내 균열 및 공동의 결함을 측정, 라이닝 내 공동 및 배면의 공극 현상을 측정하였다. 각각의 모델에서 측정된 시간영역 데이터를 푸리에 변환(FFT)하여 주파수 영역에서 분석한 결과 실제 모델의 두께를 찾을 수 있었다. 모델의 예상심도가 낮

은 지점에서 측정된 결과를 살펴보면 실제 모델의 심도와 비교할 때 약간의 심도편차를 보이는데, 이는 모델의 풍화 및 노후화에 따른 표면의 불균질한 원인 또는, 천부 결함(shallow delamination)에 기인한 것이고, 심도가 깊어질수록 측정 결과에 대한 오차가 크게 나타남을 알 수 있다.

- 2) 터널의 안전진단 뿐만 아니라, 교량도 중요한 토목구조물로서 실제 교각을 축소한 실험실 모델 실험을 적용하였다. 공동이 없는 균질한 콘크리트 표면에서 측정된 결과는 실제 모델의 두께를 정확히 알 수 있었다. 그러나, 교각 내 결함을 가정한 공동이 위치한 표면에서는 실제 두께를 정확히 나타내지 못하였다. 이는 교각 자체의 형상이 터널라이닝의 콘크리트 슬래브 형상처럼 고정된 1차원적 단면이 아니라 개방된 면이 상대적으로 많기 때문인 것으로 판단된다. 본 연구에서 교각내 공동이 위치를 정확히 찾는 것은 어려웠으나 균질한 지점에서의 주파수 값과 비교할 때 상이한 결과가 나타나므로 결함이 있음을 유출할 수 있었다.
- 3) 충격반향기법(impact-echo methods)에서 터널 라이닝 모델에 대한 결과가 실험실 교각 모델 결과보다 스펙트럼의 양상이 더 뚜렷이 나타나고 잡음이 없는 이유는 충격 생성 응력파가 다중반사하는 과정에서 터널 라이닝 형상에 비해 교각 구조물은 개방면(자유면)이 더 많이 존재하므로 푸리에 변환(FFT) 과정에서 구조물 자체의 진동모드가 크게 발생하기 때문

인 것으로 판단된다.

- 4) 실험실 교각 모델에서는 공동이 위치한 두께를 정확히 찾지 못하는 한계성을 보였다. 그러므로 교각과 같은 형태의 구조물을 대상으로 안전진단시 다른 비파괴 검사법과 병행하여 결함을 탐지하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 시설안전관리공단, 1996; 안전점검 및 정밀안전진단 세부 지침(터널).
2. 박칠림, 조철현, 1996; 터널안전관리를 위한 정밀 안전진단 시스템 개발.
3. 김영환, 구자용, 김병극, 김영길, 임우혁, 최재우, 1998; 콘크리트 구조물에 대한 초음파 탐상법 개발-3차년도(과학기술처 특정연구개발사업):한국표준연구소.
4. 우제윤, 1993; 현장타설말뚝의 비파괴 검사: 말뚝기초, 한국지반공학회 말뚝기초위원회/대한건축학회 기초분과위원회 학술발표집 제1집.
5. 박형춘, 1995; 충격반향기법과 SASW기법을 이용한 콘크리트 부재의 결함탐지. 한국과학기술대학교 대학원 석사학위논문, 15-19.
6. Richart, F. E., Jr., Hall, J. R., Jr., and Woods, R. D., 1970; Vibrations of soils and foundations, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 414p.
7. Lin, Y., Sansalone, M., and Carino, N. J., 1991; Impact echo response of concrete shaft, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, 14.2, 121-137.
8. Sansalone, M., and Carino, N. J., 1986; Impact Echo : A method for flaw detection in concrete using transient stress waves, Report No. NBSIR 86-3452.

안 제 훈

1999년 2월 강원대학교 자원공학과
공학사
2003년 8월 강원대학교 대학원 지구시스템공학과 공학석사

Tel: 02-2057-9602
E-mail: will6980@hanmail.net
현재 (주) First geo 팀장



서 백 수

1976년 2월 서울대학교 자원공학과
공학사

1978년 2월 서울대학교 대학원
자원공학과 공학석사
1988년 2월 서울대학교 대학원
자원공학과 공학박사

Tel: 033-250-6254
E-mail: bssuh@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 지구환경공학부 교수

