

# 탄성과 충격공진법에 의한 기초 콘크리트의 두께 측정

## Thickness Measurements of the Base Concrete by the Impact-Resonance Test

김 영 환\* 이 세 경\*\* 김 호 철\*\*\*  
 Kim, Young Hwan Lee, Se Kyung Kim, Ho Chul

### 요 약

시험체의 공진모드를 분석하여 대형 기계용 기초 콘크리트의 두께를 측정하였다. 시험체에 강철구 자유낙하에 의한 기계적인 충격을 가하여 진동을 발생시키고, 이 진동신호를 광대역 원추형 압전 탐촉자로 수신하였다. 수신된 진동신호를 FFT를 사용하여 주파수 분석하고, 얻어진 공진 주파수로부터 시험체의 두께를 결정하였다. 여러 층으로 이루어진 콘크리트 블록의 경우, 이 방법으로 결정되는 두께는 경계면에서의 음향 반사계수에 따라 달라진다. 100 cm 두께 범위내에서 이 방법에 의해 결정된 값은 실제의 두께와 잘 일치하였다. 또한 이 방법은 두께 측정 뿐만 아니라 경계면의 접합 상태 파악에 활용될 수 있다.

### Abstract

Thicknesses of the base concrete blocks supporting large machines were estimated by analyzing the resonance modes of mechanical vibrations. The vibration was produced by the mechanical impact with steel ball drop and detected by a wideband conical piezoelectric transducer. The detected signals were analyzed by FFT and thicknesses of specimen were determined by the resonant frequency of vibration. For the layered concrete block, the estimated thickness is dependent on the acoustic reflective index at the boundary between layers. The estimated thickness up to 100cm were in good agreement with the real value. In addition, this technique could be applicable to the estimation of the bonding status of the layered structures.

### 1. 머릿말

대형구조물이나 지하 매설물의 두께를 측정하고자 할 때, 직접 두께측정이 곤란한 경우 간접적인 측정법을 사용하게 된다. 두께의 간접적인 측정은 파동의 성질을

이용하면 가능한데, 일반적으로 불투명한 고체에서는 탄성파를 이용한다. 콘크리트와 같이 구성성분의 입자 크기가 큰 시험체에서는 구성입자에 의한 탄성파의 산란이 크므로 금속에서 사용하는 병용의 초음파 시험법을 사용하기가 어렵고 공진법에 의한 시험을 실시하는 것이 바람직하다.<sup>1-4</sup> 시험체의 공진 주파수는 물체의 크기에 의해 결정되는데, 간단한 경우에 공진이 일어나는 탄성파의 파장은 물체의 치수의 2배로 결정된다. 따라서 탄성파

\* 정회원, 한국표준연구소 비파괴평가연구실 선임 연구원

\*\* 한국표준연구소 정밀측정기기 센터 부장

\*\*\* 한국과학기술원 물리학과 교수

공진법을 이용하면 주파수 분석을 통하여 시험체의 크기, 결함 유무 등의 정보를 얻을 수 있다.

공진법은 광대역 탄성파원을 필요로 하는데, 과형발생기를 사용하여 구동 주파수를 바꾸어 주면서 공진 주파수를 측정하는 방법<sup>1,2)</sup> (frequency sweep)과 물체 표면에 짧은 시간 폭의 기계적 충격을 가하여 여러 주파수 성분을 지닌 구면파를 발생시키는 방법<sup>3-8)</sup> (impact-resonant)이 있다. Frequency sweep은 진기적인 신호를 사용하기 때문에 재측이 용이하나, 발생되는 탄성파의 크기가 작아서 시험체의 크기에 제한을 받는다. 충격공진법(impact-resonance method)은 큰 탄성파 에너지를 발생시킬 수 있기 때문에 대형 구조물에 적용이 가능하여 최근에 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

설치한 지 오래되어서 도면이 없어진 대형기용 기초 콘크리트의 안전도 진단을 위하여 충격공진법에 의하여 두께를 측정하였다. 여러가지 충격원을 사용하여 충격공진 시험을 실시하고 이신호에 대한 주파수 분석을 통하여 콘크리트 블록의 두께를 산출하였다. 이 기초 콘크리트는 두 층의 콘크리트로 구성되어 있어서 단일 층으로 구성된 콘크리트 블록에 대한 충격공진 시험에 비하여 분석이 복잡하므로, 보다 신뢰적인 시험결과 분석을 위하여 시험 조건과 유사한 경우에 대하여 컴퓨터를 사용한 simulation을 실시하였다. 또한 산출된 두께는 코어 채취 결과와 비교되었다.

## 2. 탄성파 충격공진법

초음파 pulse-echo 시험에 의하여 시험체의 두께를 측정하고자 할 때에는, 시험체의 표면에 탐촉자를 부착하여, 탄성파를 보내고 이 탄성파가 바닥에서 반사되어 표면의 탐촉자에 도달할 때까지 소요되는 시간  $\delta t$ 를 측정한다. 시험체에서의 탄성파의 속도  $c$ 를 알고 있으면 시험체의 두께  $D$ 는

$$D = c \delta t / 2 \quad (1)$$

과 같이 주어진다. 초음파 pulse-echo 방법은 탄성파에 대한 산란이 적은 재질에 대하여 사용이 가능하나, 재질 내에서의 탄성파의 산란이 크거나 사용된 탄성파의 폭(duration)이  $\delta t$ 보다 클 경우에는 이 방법의 적용이 어렵다. 이러한 경우에 유용하게 사용될 수 있는 방법은 탄성파의 공진현상을 이용하는 방법으로 표면에 부착된 탐촉자에 일정한 주파수를 지닌 진동을 가하여 반사되는 탄성

파와 가한 진동사이에 일어나는 간섭현상을 이용한다. 즉 되돌아 오는 시간  $\delta t$ 가 탄성파의 진동 주기  $T$ 에 정수배가 될 경우는 공진이 되어서 진폭이 커지고 그렇지 못할 경우는 진폭이 작아지게 된다. 따라서 공진이 일어날 조건은

$$\delta t = n T = n / f (n = 1, 2, 3 \dots) \quad (2)$$

와 같이 주어진다. 일반적으로 식(2)의 조건 중에서  $n = 1$ 인 기본 공진 모드가 가장 잘 일어나고 여기서 가하여진 진동의 주파수를 바꾸어 기본공진이 일어나는 주파수,  $f$ 를 측정하면 두께  $D$ 는 식(1), (2)로부터

$$D = c \delta t / 2 = c / 2f \quad (3)$$

와 같이 표시된다.

실제의 경우는 구동 주파수를 변경시키면서 탄성파를 발생시켜서 공진 주파수를 측정할 예<sup>2)</sup>도 있으나 이는 현장에서 사용하기에는 실용적이지 못하다. 이를 개선하기 위하여 충격공진 시험을 실시하는데, 이때의 탄성파원은 강철구 낙하와 같은 기계적 충격에 의해 발생하는 탄성파를 사용한다.<sup>3-8)</sup> 짧은 시간폭의 기계적 충격을 표면에 가하면 여러 주파수 성분을 지닌 탄성파가 시험체 내부를 진행하게 되고 충격에 의한 표면의 진동은 여러 주파수 성분의 탄성파 중에서 공진조건을 만족하는 주파수 성분이 주로 나타나게 된다. 따라서 충격후에 표면의 진동을 검출하여 이의 주파수를 분석하면 시험체의 두께를 측정할 수가 있다.

충격시 발생하는 탄성파는 종파, 횡파, 표면파 등이 동시에 발생되고, 식(3)의 탄성파 속도  $c$ 는 각각 파의 종류에 따른 속도를 사용한다. 표면파의 경우는 표면을 따라서 전파하므로 시험체의 두께 측정에는 유용하지 못하고, 두께에 대한 공진을 일으키는 주된 탄성파는 종파이므로 탄성파의 속도는 종파의 속도  $c_p$ 를 사용하게 된다. 탄성파의 속도와 공진 주파수는 시험체의 형상, Poisson 비, 경계 조건(boundary condition)등에 의하여 달라지는데 Bankroft 등의 실험에서 보정 계수  $a$ 와 함께 식(3)은

$$D = a c_p / 2f \quad (4)$$

와 같이 표시되고,<sup>9)</sup> Poisson 비  $\sigma = 0.16$ 일 경우에는 보정 계수  $a = 0.8$ 로 주어진다.

또한 충격공진 시험시 중요한 인자는 충격에 의해 발생하는 탄성파의 주파수 영역으로서, 측정하고자 하는 두께

의 범위로부터 식(3)에 의해 예측되는 공진 주파수 범위를 포함해야 한다. 기계적 충격에 의하여 발생하는 탄성파의 주파수 영역  $\delta f$ 는 충격의 시간폭  $t_c$ 에 의하여 결정되는데

$$\delta f \cdot t_c = 1 \quad (5)$$

와 같은 관계로 표시된다. 특히 탄성체 표면에 강철구를 자유낙하하여 얻어지는 충격의 시간폭은

$$t_c \propto H^{-0.1}R \quad (6)$$

와 같이 강철구의 직경, R에 비례하고 자유낙하하는 높이, H와는 거의 무관하게 주어진다.<sup>10)</sup> 식(5), (6)으로부터 강철구의 직경을 바꾸면 발생하는 충격파의 주파수 폭을 바꿀 수 있음을 알 수 있고, 이때에 발생하는 탄성파의 크기도 따라서 변하게 된다. 따라서, 대상 콘크리트의 두께가 두꺼울수록 큰 탄성파 에너지가 필요한 반면에 낮은 공진주파수를 지나므로 직경이 큰 강철구를 사용하는 것이 바람직하고, 두께가 얇은 콘크리트 블록의 경우는 높은 공진 주파수를 지나므로 직경이 작은 강철구를 사용하여 충격시간폭,  $t_c$ 를 줄이는 것이 바람직하다.

### 3. 두층으로 구성된 시험체의 공진 모드

두 층으로 구성된 시험체에서 충격공진 시험시 가능한 공진 모드는 윗층의 두께에 의한 공진, 밑층의 두께에 의한 공진 및 전체 두께에 의한 공진으로 구성되며 이들은 각 층의 두께 및 음향특성(acoustic properties)에 따라서 그 크기가 달라진다. 두 층의 음향특성이 같으면 이는 전체 두께에 해당하는 한 층의 시험체로 생각할 수 있으나, 두층사이의 이물질 여부, 접합정도에 따라서 경계면에서의 탄성파의 반사계수가 달라질 수 있다.

따라서 시험 대상체는 Fig.1과 같이 두께가 A+B인 시험체내에 깊이 A, 탄성파의 반사율 R인 무한한 평판형 결함이 존재하는 것으로 가정할 수 있다. 반사율이 작을수록 이 시험체는 마치 하나의 동일한 시험체와 같이 전체 두께에 대한 공진 모드가 주로 일어나고, 반사율이 커질수록 각각의 층에 대한 공진 모드가 각각 일어날 수가 있다. 이 경우 반사율이 1에 가까워지면 윗층의 표면에서 가한 충격에 의해 발생한 탄성파는 밑층에 전파되지 못하기 때문에 밑층에 의한 공진 모드는 발생되지 않는다. 또한 반사율이 중간 정도에서는 세가지 공진모드가 모두 존재할 수가 있으나 이 경우에도 윗층의 표면에

서는 밑층의 공진 모드를 검출할 수가 없다. 따라서 윗층의 표면에서는 충격공진 시험에 의해 검출이 가능한 공진 모드는 윗층 두께에 의한 공진 모드와 전체 두께에 의한 공진 모드로 국한 된다.

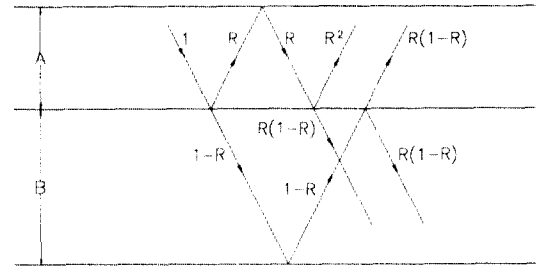


Figure 1 Schematic diagram of the stress wave propagation in the layered concrete slab.

이를 검증하기 위한 방법으로 computer에 의한 simulation을 실시하였다. 한예로 윗층의 두께 A=20cm, 밑층의 두께 B=50cm 이고 각 층에서의 탄성파의 속도를 4000m/s로 동일하다고 가정하였다. 반사율 R=0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 이고, 충격원의 시간폭(tc)이 30, 60, 120, 250 $\mu$ s인 경우에 대하여 고찰하였으며, 시험체 내에서의 탄성파의 산란은 고려 하지 않았다. 그 중에서 대표적으로 R=0.1 및 0.9 이고 충격원의 시간폭이 30 및 120 $\mu$ s인 경우의 분석되는 주파수 스펙트럼을 Fig.2에 나타내었다. 이 computer simulation 결과는 반사계수 R < 0.5 인 경우는 두 층의 두께의 합 A+B의 공진 모드가 주로 나타났으며, R > 0.5 인 경우는 윗층의 두께 A의 공진 모드가 주로 나타났다. R  $\approx$  0.5인 경우에는 두가지 공진 모드들이 복합적으로 나타나서 구분하기가 어려웠다. 밑층의 두께 B에 대한 공진 모드는 검출할 수가 없음을 알 수가 있었다. 또한 각각의 경우에 대하여 식(2)에 나타낸 바와 같이 배진동이 나타나고 있으나, 콘크리트에 대한 실험 결과는 콘크리트 내부에서의 탄성파의 감쇠로 인하여 배진동을 거의 나타나지 않게 된다.

### 4. 콘크리트 블록에서의 impact-echo 시험

충격공진 시험장치의 구성도는 Fig.3에 나타내었다. 직경 25.4mm, 16mm, 12.5mm, 및 9.7mm 강철구 낙하를 충격원으로 사용하였고, 원추형의 광대역 압전 탐촉자<sup>11)</sup>를 사용하여 시험체의 표면 진동 신호를 검출하였다. 탐촉자에 의해 수신된 신호는 filter의 amplifier를 거쳐서 digital

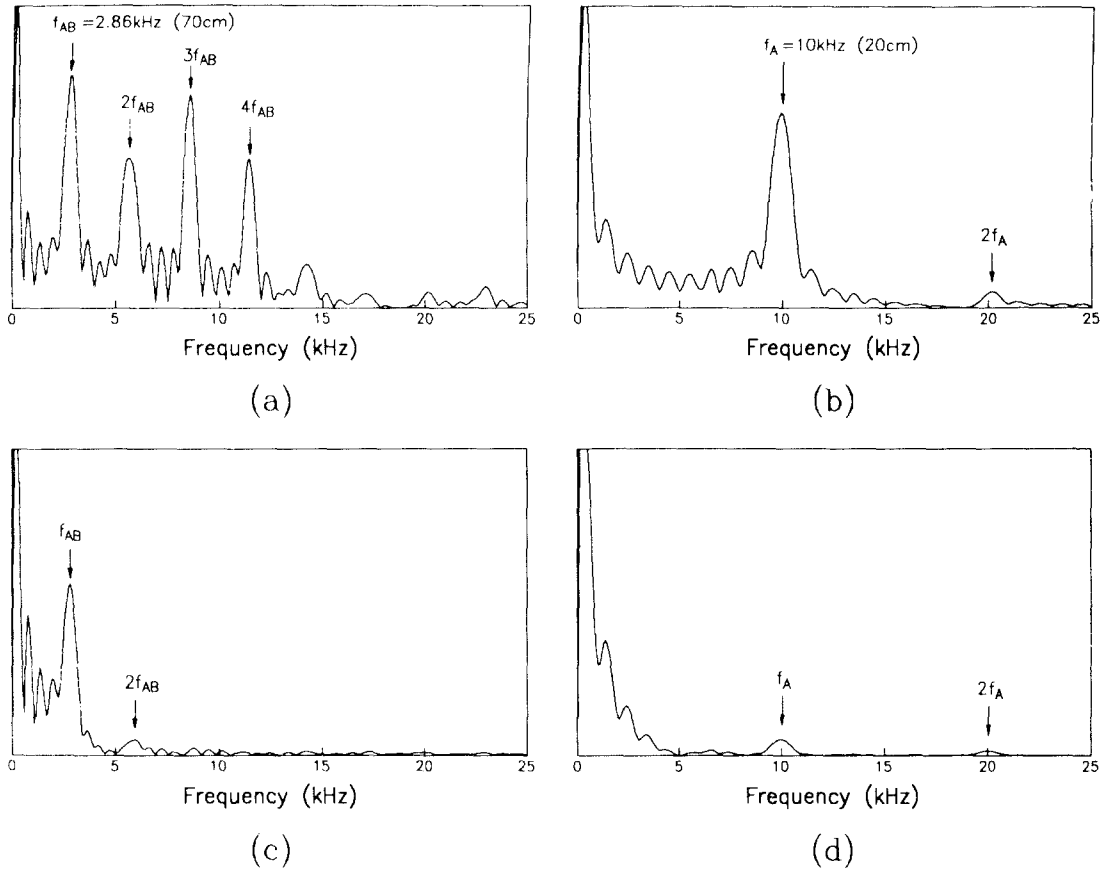


Figure 2 Computer simulated frequency spectra for the impact-resonance test of two-layered slab with (a)  $R=0.1$ ,  $t_c=30\mu s$ ; (b)  $R=0.9$ ,  $t_c=30\mu s$ ; (c)  $R=0.1$ ,  $t_c=120\mu s$ ; (d)  $R=0.9$ ,  $t_c=120\mu s$ .

oscilloscope에 입력되었고 이 신호는 플로피 디스크에 저장되었다. 저주파 신호를 줄이기 위하여 cutoff frequency가 1kHz인 highpass filter를 사용하였다. 충격공진 시험신호는 컴퓨터에 의하여 주파수 성분이 분석되었다.

Digital oscilloscope의 sampling rate와 data 갯수는 주파수의 분해능, 주파수의 영역에 의하여 결정되는데, 본 연구에서 관심있는 주파수 영역은 1kHz-20kHz이고 주파수의 정밀도를 5% 정도로 유지하기 위하여 sampling 간격을 10μs, data 갯수를 2048로 하여 주파수 분해능이 48.8Hz이고 주파수 영역은 DC-50kHz가 되도록 하였다.

시험 대상 기초 콘크리트는 Fig.4에 나타낸 바와 같이 모두 4개로 부여된 번호는 시험을 실시한 순서와 같다. 각각의 콘크리트 블록의 크기는 5m×10m이고 기초 콘크리트는 잘린 콘크리트이고 그 위에 부른 콘크리트가 덮혀 있었다. 1번 위치는 기초 콘크리트가 노출되어 있고 2

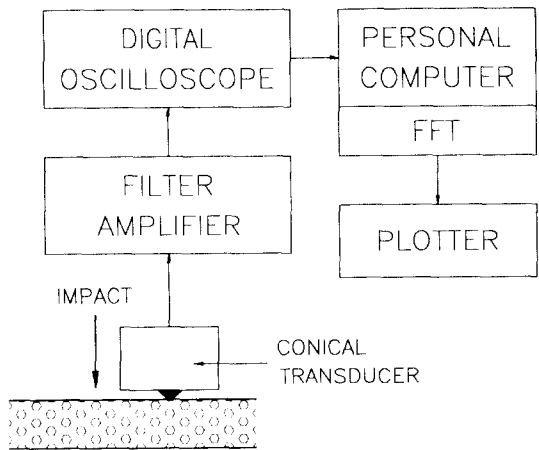


Figure 3 Schematic diagram of the impact-resonance testing system.

번 위치는 기기가 설치되어 있으며 두께 18cm의 부근 콘크리트로 덮혀있다. 나머지 부분에는 기기가 설치되어 있으며 몇 겹층 부근 콘크리트의 두께는 20-30cm 정도이다. 2번 위치는 기초 콘크리트 위를 분탈로 처리한 후에 두께 콘크리트가 타설되었으며 다른 위치는 기초 콘크리트 위에 직접 부근 콘크리트가 타설되었다. 1번 위치에서는 코어를 채취하여 전체의 두께를 알아내었고, 7-8번 위치는 비교적 최근에 타설이 되어서 기초 콘크리트의 두께가 65cm, 윗층의 부근 콘크리트의 두께가 30cm임을 알고 있었다.

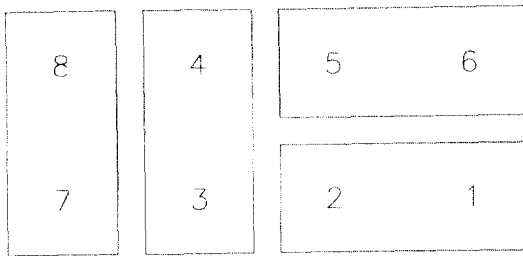


Figure 4 Layout of the concrete blocks tested.

## 5. 토의

충격공진 시험에서 측정된 공진주파수로부터 식(4)에 의하여 두께를 산출하기 위해서는 정확한 탄성파의 속도  $C_p$  값이 요구된다. 일반적으로 콘크리트에서의  $C_p$ 는 약 3000-4200m/s 정도의 값을 지니므로 정확한 값을 모를 경우는 20% 정도의 오차가 유발된다. 시험체에서의 탄성파의 속도는 1번 위치의 기초 콘크리트와 4, 6번 위치의 윗층의 부근 콘크리트 부분에서 채취된 코어에 대하여 초음파 투과법에 의하여 측정하였다. 그 결과로 대상 콘크리트에서의 탄성파의 속도는 4154m/s, 4108m/s 및 4186m/s로 나타났다. 따라서 시험 대상체에서의 탄성파의 속도는 약 4150m/s로 하면 이는 전체적으로 약 1% 정도 이내의 값이다. 공진법에 의한 두께 측정시 이 속도는 약 80-90%로 보정하여 사용해야 하며, 본소의 다른 인공시 약 87%로 보정하는 것이 타당한 것으로 나타났다.<sup>12)</sup> 따라서, 본 연구에서는 탄성파의 속도를 3730m/s로 하여 가리를 산출하였다.

Fig.5에 1번 위치에서의 시험 결과를 나타내었다. 8번 위치에 있는 기기가 가동으로 인하여 남측자에 짐승신호가 비교적 크게 수신되었고 이 신호에 대한 시간대역

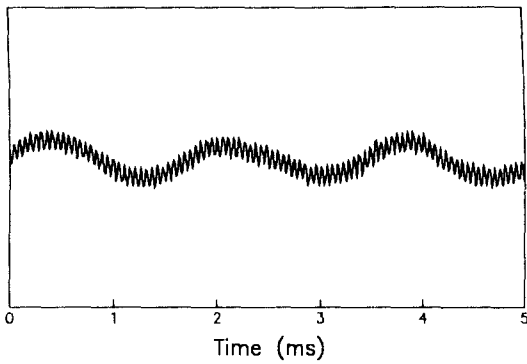
파형과 그 주파수 스펙트럼을 Fig.5(a)와 (b)에 각각 나타내었다. 잡음 신호의 주파수 성분은 약 600Hz와 약 19kHz의 신호로서 식(4)에 의해 주파수에 해당하는 두께는 310cm와 9.8cm에 해당하여 본 실험에서의 관심 영역인 15-150cm 밖의 값이다. 충격공진 시험 결과의 분석시 이 잡음 신호에 의한 공진 주파수는 제외하였다.

직경이 9.7mm인 강철구의 자유낙하에 의한 충격공진법의 결과는 Fig.5(c)-(f)와 같다. 각각의 시간대역 파형으로부터 차이점은 발견이 되었으나, 이들로부터 유용한 정보는 얻을 수 없었으나, 주파수 스펙트럼에서는 뚜렷한 공진 주파수의 차이를 나타내었다. Fig.5(d)의 4.34kHz는 콘크리트 블록의 표면과 저면 사이를 왕복하는 탄성파의 공진 주파수로서, 이를 두께로 환산하면 43cm이다. 또한 Fig.5(f)의 14.5kHz, 20kHz는 두께 12.9cm 및 9.3cm로서 이는 철근에 의한 공진 주파수로 측정이 된다. 실제로 이 부위에서 코어를 채취한 결과로 전체 두께가 42cm이고 철근까지의 깊이는 12cm이고, 두 철근의 연결부위에서 철근의 굵기 2.5cm를 고려하면 9.5cm 깊이가 예상 된다. 이들 수치들은 충격공진 시험 결과로 얻은 값과 잘 일치한다.

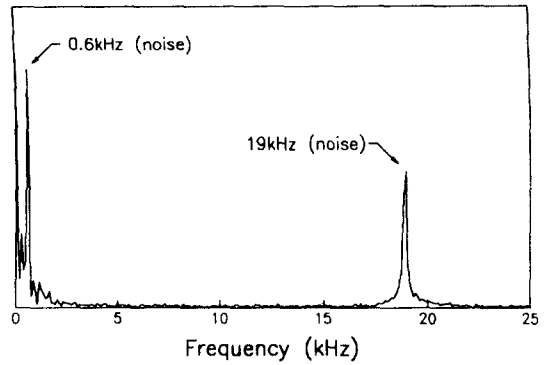
다른 위치에서의 충격 공진 시험 결과의 주파수 스펙트럼을 Fig.6에 나타내었다. Fig.6(a)는 2번 위치에서 직경이 16mm인 강철구 낙하에 의한 충격공진 시험 결과로서, 10.7kHz는 두께 17.4cm에 해당하는 공진 주파수로서 윗층 부근 콘크리트의 두께 18cm와 잘 일치한다. 따라서, 이 부위는 기초 콘크리트와 윗층의 부근 콘크리트의 경계면이 분탈로 처리됨에 따라서 탄성파가 계면에서 많이 반사됨을 알 수가 있었다.

Fig.6(b)-(f)는 각각 3, 4, 5, 6 및 7번 위치에서 직경이 25mm인 강철구의 자유낙하에 의한 충격공진 시험의 결과이다. 이들 주파수 스펙트럼에서의 공진주파수는 각각 2.8kHz, 2.6kHz, 2.9kHz 및 1.9kHz로서 두께 67cm, 72cm, 69cm 및 98cm에 해당된다. 이들 두께는 윗층의 부근 콘크리트의 두께 20-30cm에 비하여 매우 큰 값으로서 두 계면의 집합이 잘 되어서 탄성파의 반사가 거의 없는 상태이고 측정된 수치는 전체 두께를 나타내는 것으로 판단된다. 특히 7번 위치는 실제의 두께 95cm로 측정치와 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

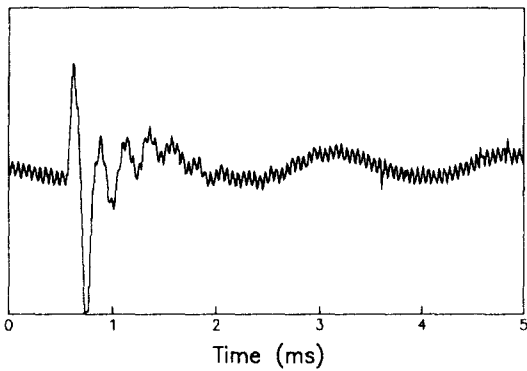
일반적으로 직경 25.4mm 강철구와 같이 시간 폭이 큰 충격원에 의한 충격공진 시험 결과는 50cm 보다 작은 거리에 대한 정보를 얻기가 힘들었으며, 상대적으로 짧은 시간 폭의 충격원인 직경 9.7mm 및 16mm 강철구를 사용한



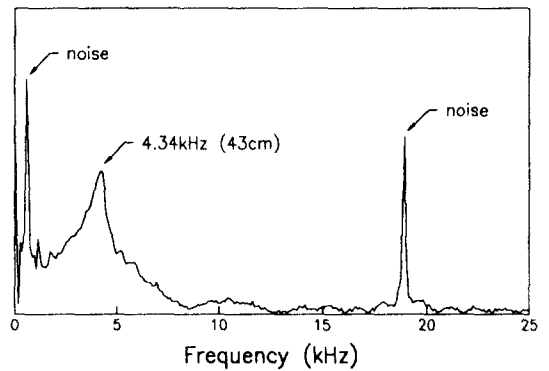
(a)



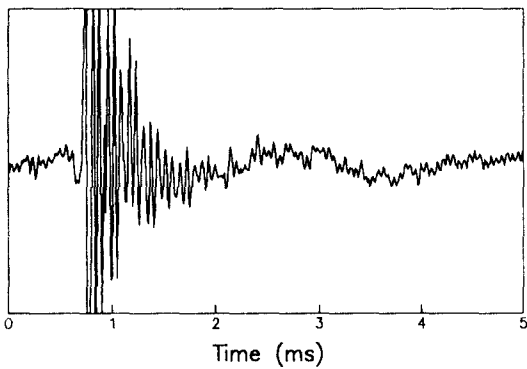
(b)



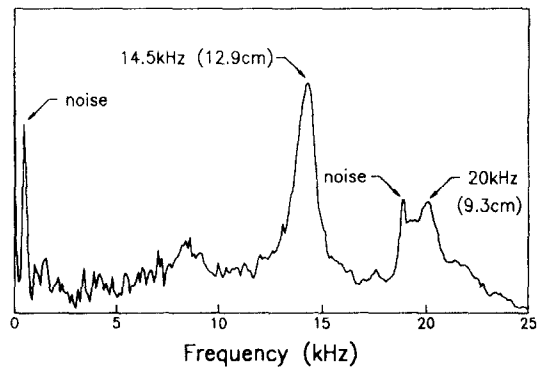
(c)



(d)

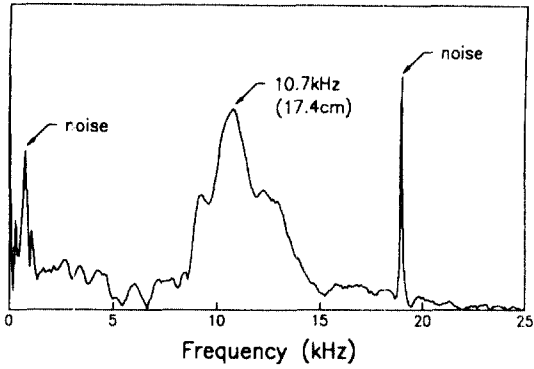


(e)

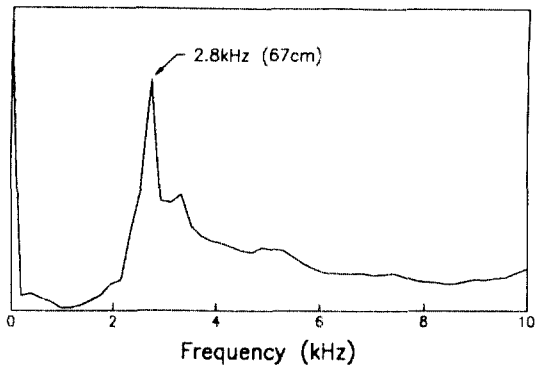


(f)

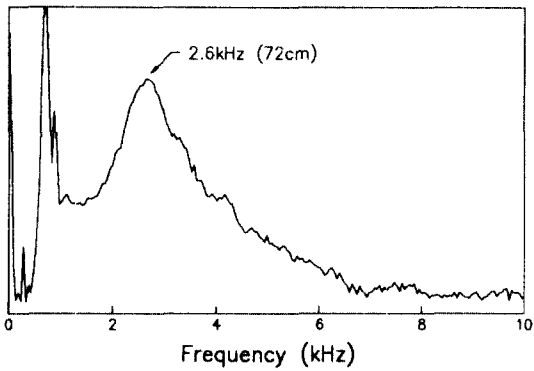
Figure 5 Typical impact-resonance test results at the position 1. (a) Realtime waveform of the noise and (b) its frequency spectrum. (c) Real-time waveform of the impact-resonance test results for the bottom plates and (d) its frequency spectrum. (e) Real-time waveform for the steel bars and (f) its frequency spectrum.



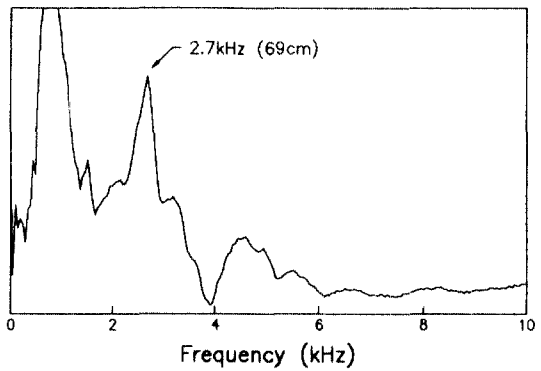
(a)



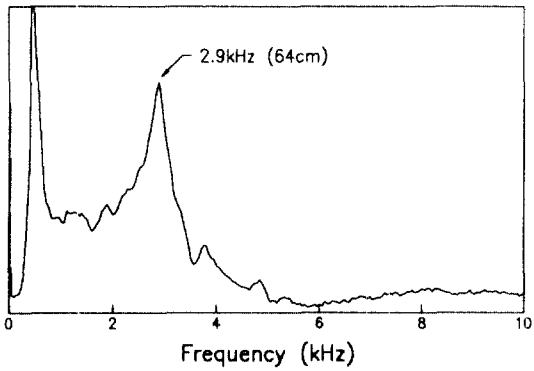
(b)



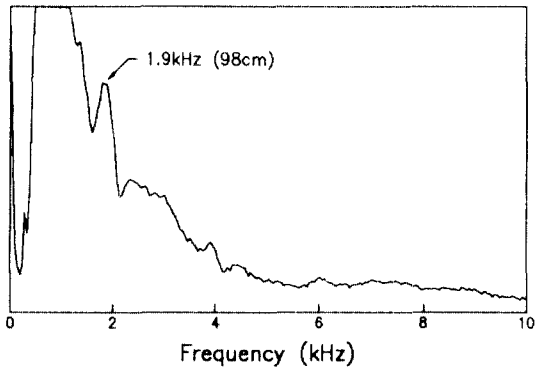
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure 6 Typical frequency spectra for the impact-resonance tests. (a) At the position 2 using 16mm dia. steel ball. (b) At the position 3. (c) position 4, (d) position 5, (e) position 6 and (f) position 7 using 25mm dia. steel ball.

경우는 깊은 깊이에 대한 정보를 판단하기가 곤란하였다.

## 6. 결론

탄성과 충격공진 시험에 의하여 두층으로 경계지어진 콘크리트 블록의 두께측정이 가능하였다. 충격공진 시험 시 수신된 탄성과 신호에 대하여 주파수 분석을 실시하여 얻은 두께 정보는 두 경계면에서의 탄성파의 반사도 및 충격원에 따라서 다른 값이 나타났다.

경계면에서의 탄성파의 반사도가 클 경우는 두층 각각의 두께에 해당하는 공진 모드들이 가능하고 이중에서 표면에서 검출이 가능한 모드는 윗층의 두께에 의한 공진 모드이다. 또한 경계면에서의 반사도가 작을 경우는 전체 두께에 대한 공진 모드가 가능하고 이는 표면에서 검출이 가능하다.

이 결과는 두층으로 이루어진 활주로, 고속도로 등의 콘크리트 구조물의 두께 및 두 층간의 경계면의 상태를 파악하는데 활용할 수가 있다.

## 감사의 글

본 연구의 연구비는 '86-'88 과학기술처 국제 공동연구 과제로 일부 지원받았습니다.

## References

1. "Standards method of tests for fundamental transverse, longitudinal and torsional frequencies of concrete specimens", ASTM C 215-60, Book of ASTM standards Pt 10, American Society for Testing and Materials, Philadelphia (1972) pp.136-140.
2. T.Takabayashi and H.Ishida, "Measurement of thickness of concrete pavement and structural members", Proc. Int'l Conf. on In Situ/NDT of Concrete, Oct., 1984, Ottawa, Canada.
3. M.Sansalone and N.J.Carino, "Impact-echo: A method for flaw detection in concrete using transient stress waves", NBSIR86-3452, Nat'l Bur. Stds., Gaithersburg, MD, Sep., 1986.
4. N.J.Carino, M.Sansalone and N.N.Hsu, "Flaw detection in concrete by frequency spectrum analysis of impact-echo waveforms", Int'l Adv. Nondetr. Test., Vol.12, p.117(1986).
5. M.Sansalone and N.J.Carino, "Transient impact response of plastes containing flaws", J.Res.NBS, Vol.92, No.6, p.369(1987).
6. J.Koo, S.Lee, Y.Kim and H.S.Lew, "Quantitative spectral analysis of the flaw detection in concrete", Proc. 12-th world conf. NDT, p.1255, Amsterdam, Netherlands, Apr, p.23-28(1989).
7. Y.H.Kim, S.Lee and H.C.Kim, "Quantitative vibration made analysis of mortar and concrete blocks containing flaws", NDT Int'l Vol.23, No.2, pp.67(1990).
8. A.K.Maji, S.Paul and M.L.Wang, "Improved impact-echo technique by signal processing", Res. Nondetr. Eval., Vol.2, No.1, pp.45(1991).
9. D.Bancroft, "The velocity of longitudinal waves in cylindrical bars", Phys. Rev., 59, pp.549(1941).
10. Young H. Kim, "Effects of attenuation and dispersion on frequency spectrum of vibration in multi-phase materials", Ph.D thesis, KAIST, Seoul (1990).
11. T.M.Proctor, Jr., "Some details of the NBS conical transducer", J.Acoust.Em., Vol.1, p.173(1982).
12. 이세경 등저, "콘크리트 구조물에 대한 초음파 탐상법 개발", KSRI-87-45-IR (1987), KSRI-88-88-IR (1988).

(접수일자 : 1991. 7. 22)