

# 탄성파 공진법에 의한 기초 콘크리트의 두께 측정

Thickness Measurements of the Base Concrete by the Impact-resonance test

김 영 환\*  
Young H. Kim

## ABSTRACT

Thicknesses of the base concrete blocks for large machines were estimated by analyzing the resonance modes of mechanical vibrations. The vibration was produced by the mechanical impact and detected by a wideband conical transducer. These signals were analyzed by FFT and thicknesses were obtained by the peaks of frequency spectrum. The estimated thickness upto 100cm are in good agreement with the real ones. For the layered concrete block, the estimated thickness is dependent on the acoustic reflective index at the boundary of the two layers.

### 1. 머릿말

비파괴 시험적 두께측정은 결함탐지, 내부 구조 확인 등의 비파괴 시험을 위한 가장 기초적인 과정이다. 특히 대형 구조물, 지하 매설물 등에 대한 직접적인 두께측정이 용이하지 못한 경우에는 간접적인 측정이 유용하다. 간접 측정의 한 예로 탄성파를 이용하는 방법이 많이 사용된다.

콘크리트와 같이 구성성분의 입자 크기가 큰 시험체의 경우는 금속에서 사용하는 범용의 초음파 시험법을 사용할 수가 없고 공진법에 의한 시험을 실시하는 것이 바람직하다. 물체 표면에 짧은 시간 폭의 기계적 충격을 가하게되면 이는 여러 주파수 성분을 지닌 구면파의 형태로 물체 내부를 전파하고 여러 주파수 성분을 지닌 탄성파중에서 물체의 형태에 따른 공진 주파수에 해당하는 탄성파가 가장 잘 검출된다. 이 공진 주파수는 물체의 크기에 의해 결정되며 간단한 경우에는 탄성파의 파장이 물체의 치수의 2배와 같을 때로 정의된다. 따라서 이 탄성파 공진법을 이용하면 주파수 분석을 통하여 시험체의 크기, 결함 유무 등의 정보를 얻을 수 있다.

설치한 지 오래되어 도면이 없어진 대형기기용 기초 콘크리트의 안전도진단을 위하여 여러 충격원에 의한 impact-resonance 시험을 실시하고 이 신호에 대한 주파수 분석을 통하여 두께를 산출하였다. 이 기초 콘크리트는 두 층의 콘크리트로 구성되어 있어서 단일 층으로 구성된 콘크리트 블럭에 대한 impact-resonance 시험에 비하여 분석에 있어서 고려할 사항이 많아진다. 따라서 보다 신뢰적인

시험결과 분석을 위하여 시험조건과 유사한 경우에 대하여 컴퓨터를 사용한 simulation을 실시하였다. 또한 산출된 두께는 코어 채취 결과와 비교되었다.

### 2. 탄성파 공진법

일반적인 초음파 pulse-echo 시험에 의하여 시험체의 두께를 측정하고자 할 때에는 시험체의 표면에 부착한 탐촉자를 사용하여 탄성파를 보내고 이 파가 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. 이 방법은 사용한 탄성파에 대한 산란이 적은 재질에 대하여 사용이 가능하나, 재질내에서의 탄성파의 산란이 크거나 사용된 탄성파의 폭(duration)이  $\delta t$ 보다 클 경우는 적용이 어렵다.

이러한 경우에 유용하게 사용될 수 있는 방법은 탄성파의 공진현상을 이용하는 방법으로 표면에 부착된 탐촉자에 일정한 주파수를 지닌 진동을 가하면 반사되는 탄성파와 가한 진동사이에서 일어나는 간섭현상을 이용한다. 즉 되돌아 오는 시간  $\delta t$ 가 진동 주기  $T$ 에 정수배가 될 경우는 공진이 되어서 진폭이 커지고 그렇지 못할 경우는 진폭이 작아지게 된다. 따라서 공진이 일어날 조건은

$$\delta t = nT = n/f \quad (n=1,2,3..) \quad (2)$$

\* 정회원 한국표준연구소 비파괴시험연구실

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 주파수를 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 측정한 예/1/도 있으나 이는 현장에서 사용하기에는 실용적이지 못하다. 이를 개선하기 위하여 impact-resonance 시험을 실시하는데, 이때의 탄성파원은 충격에 의해 발생하는 탄성파를 사용한다/2/. 일반적으로 좁은 시간폭의 기계적 충격을 표면에 가할 경우는 이 충격원은 여러 주파수 성분을 지닌 탄성파로 시험체 내부를 진행하게 된다. 이 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, 따라서 식(3)의 탄성파 속도  $c$ 는 각각 파의 종류에 따른 속도를 사용한다. 여기서 표면파는 표면을 따라서 전파하므로 시험체의 두께 측정에는 유용하지 못하고, 두께에 대한 공진을 일으키는 주된 파는 종파이므로 탄성파의 속도는 종파의 속도  $c_l$ 을 사용하여야 한다. 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

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

와 같이 표시된다/3/. 여기서 poisson 비  $\sigma=0.16$  일 경우 보정 계수  $a=0.8$  이다.

또한 impact-echo 시험시 중요한 인자는 탄성파의 주파수 성분으로 이는 식(3)에서 나타난 바와 같이 측정하고자 하는 두께에 의해서 결정된다. 기계적 충격에 의하여 발생하는 탄성파의 주파수 영역  $\delta f$ 는 충격의 시간폭  $t_c$ 에 의하여 결정되는데

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

와 같은 관계로 표시된다. 특히 탄성체 표면에 탄성구를 자유낙하하여 얻어지는 충격의 시간폭은 탄성구의 직경에 비례하고 자유낙하하는 높이와는 거의 무관하게 주어진다/4/. 따라서 탄성구의 직경을 바꾸면 충격파의 주파수 폭을 변경시킬 수가 있는데 측정하고자 하는 두께에 따라서 적절한 선택하여 사용하는 것이 바람직하다.

### 3. 두층으로 구성된 시험체의 공진 모드

시험체가 두 층으로 경계를 이루고 있을 때의 impact-echo 시험시 가능한 공진 모드는 윗층의 두께에 의한 공진, 밑층의 두께에 의한 공진 및 전체 두께에 의한 공진이다. 두 층이 경계면을 이루고 있을 때, impact-echo 시험에 영향을 미치는 인자는 두 층의 두께 및 음향특성 (acoustic properties)이다. 이때 두 층의 음향 특성이 같으면 이는 전체 두께에 해당하는 한 층의 시험체로 생각할 수 있으나, 경계면의 조건 - 이물질 여부, 두 시험체 사이의 접합정도 - 에 따라서 계면에서의 탄성파의 반사계수가 달라질 수 있다.

따라서 시험 대상체는 두께가  $A+B$ 인 시험체내에 깊이  $A$ , 탄성파의 반사율  $R$ 인 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 발생된 탄성파는 밑층에 전파되지 못하기 때문에 밑층에 의한 공진 모드는 발생되지 않는다. 또한 반사율이 중간 정도에서는 세가지 공진 모드가 모두 존재할 수가 있으나 이 경우에도 윗층의 표면에서는 밑층의 공진 모드를 검출할 수가 없다. 따라서 윗층의 표면에서의 impact-echo 시험에 의해 검출이 가능한 공진 모드는 윗층 두께에 의한 공진 모드와 전체 두께에 의한 공진 모드로 국한된다.

이를 검증하기 위한 방법으로 computer에 의한 simulation을 실시하였다. 한 예로 윗층의 두께  $A=20\text{cm}$ , 밑층의 두께  $B=50\text{cm}$  이고 각각의 층에서의 밀도와 탄성파의 속도가 같다고 가정하고 탄성파의 속도를  $4000\text{m/s}$ 로 가정하고, 반사율  $R=0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$  이고, 충격원의 시간폭( $t_c$ )이  $30, 60, 120, 250 \mu\text{s}$  인 경우에 대하여 고찰하였다. 이때 시험체 내에서의 탄성파의 산란은 고려하지 않았다. 그 중에서 대표적으로  $R=0.1$  및  $0.9$  이고 충격원의 시간폭이  $30$  및  $120 \mu\text{s}$ 인 경우의

분석되는 주파수 스펙트럼을 그림1에 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.  $R \approx 0.5$ 인 경우에는 두가지 공진 모드들이 복합적으로 나타나서 구별하기가 어렵다. 또한 밑층의 두께 B의 공진 모드는 발생되더라도 표면에서 검출할 수가 없음을 알 수가 있다.

또한 두께가 얇은 경우는 시간 폭이 좁은 충격원이 바람직하고, 두께가 두꺼운 경우는 시간폭이 충분히 큰 경우가 배진동 신호를 억제하여 좋은 결과를 가져오나, 시간 폭이 너무 큰 경우는 기본진동마저도 잃어버릴 우려가 있다.

#### 4. 콘크리트 블록에서의 impact-echo 시험

Impact-echo 시험장치의 구성도를 그림2에 나타내었다. 여기서 충격원으로는 직경 25.4mm, 16mm, 12.5mm 및 9.7mm 강철구와 Equio-Tip사의 충격장치 망치등을 사용하였고, 수신용 탐촉자로는 원추형의 광대역 탄성파 수신자를 사용하였다. 수신된 신호는 filter와 amplifier를 거쳐서 digital oscilloscope에 입력되었고 이 신호는 플로피 디스크에 저장되었다. Filter는 cutoff frequency가 1kHz인 highpass filter이다. Impact-resonance 시험신호는 컴퓨터에 의하여 주파수 성분이 분석되었다.

Digital oscilloscope의 sampling rate와 data 갯수는 주파수의 분해능, 주파수의 영역에 의하여 결정된다. 관심있는 주파수 영역은 1kHz-10kHz이

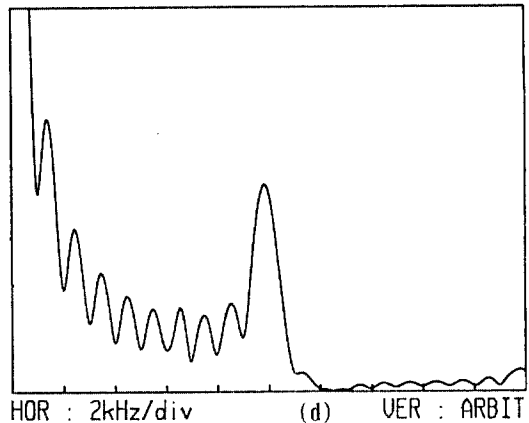
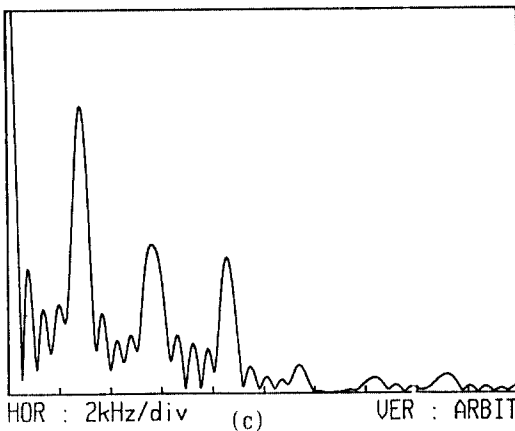
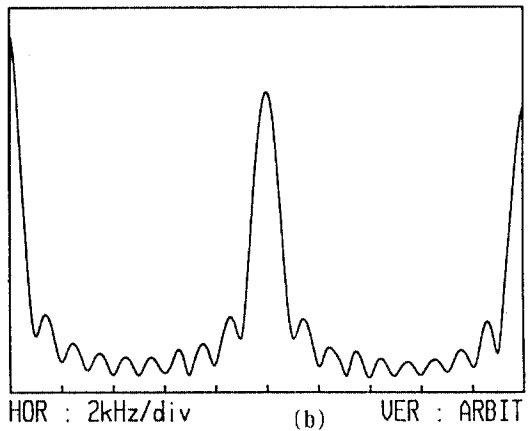
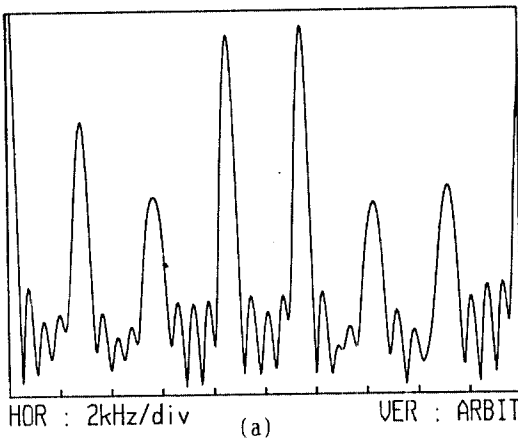


그림1 두층으로 이루어진 콘크리트 구조물에 대한 시뮬레이션 파형의 주파수 스펙트럼.

(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)  $R=0.9$ ,  $t_c=120 \mu s$ .

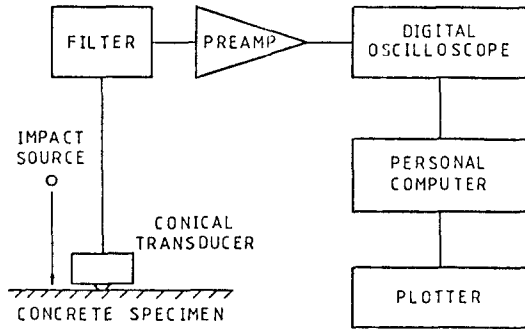


그림2 Impact-resonance 시험장치 구성도.

고 주파수의 정확도를 5%이내로 하기 위하여 분해능을 50Hz 정도로 유지하기 위하여 sampling 간격을  $10 \mu s$ , data 갯수를 2048로 하여 주파수 분해능이 48.8Hz이고 주파수 영역은 DC-50kHz가 되도록 하였다.

시험 대상 기초 콘크리트는 모두 4개로 부여된 번호는 시험을 실시한 순서와 같다. 1번 블록의 절반(1-A)은 기기가 설치되지 않은 채 기초 콘크리트가 노출되어 있고 절반(1-B)은 기기가 설치되어 있으며 두께 18cm의 무근 콘크리트로 덮혀있다. 2, 3, 4번 블록에도 기기가 설치되어 있으며 덧씌운 무근 콘크리트의 두께는 20cm 정도이다.

4번 블록에 있는 기기가 가동으로 인하여 탐촉자에 잡음신호가 비교적 크게 수신되었고 이 신호의 주파수 성분은 약 600Hz와 약 19kHz의 신호이다. 콘크리트에서의 탄성파 속도를 약 4000m/s라 하면 식(4)에 의해 이 주파수에 해당하는 두께는 330cm와 10.5cm이다. 해당한다. 이는 본 실험에서의 관심 영역인 20 - 150cm 밖의 값으로 결과 분석에 큰 영향을 주지 않는다.

Impact-resonance 시험에서 측정된 공진주파수로부터 식(4)에 의하여 두께를 산출하기 위해서는 정확한 탄성파의 속도  $c_1$  값이 요구된다. 일반적으로  $c_1$ 는 약 3000-4200m/s 정도의 값을 지니므로 정확한 값을 모를 경우는 20% 정도의 오차가 유발된다. 시험체에서의 탄성파의 속도는 1, 4 및 6번 위치에서 채취된 코어에 대하여 초음파 투과법에 의하여 측정되었다. 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 연구시 약 87%로 보정하는 것이 타당한 것으로 나타났다. 따라서 식(4)에 나타난 보정계수 0.8을 0.87로 하여 거리를 산출하였다.

공진 주파수에 의하여 두께를 측정할 때에 충격에 의한 진동 신호의 주파수 스펙트럼에서 공진 주파수를 깊이로 환산하는 것 보다는 주파수 스펙트럼의 주파수  $f$ 를 식(4)에 의하여 거리로 환산하여 표시한 거리 스펙트럼(distance spectrum)이 보다 더 가시적이므로 시험 결과 중에서 대표적인 예를 그림3에 거리 스펙트럼으로 나타내었다.

그림3-a는 1번 블록의 기초 콘크리트의 표면이 노출된 부위에서 G형 충격장치를 사용하였을 때의 시험 결과이다. 1번 블록중 기기가 설치된 부위에서 직경 9.7mm인 강철구를 충격원으로 사용하였을 때의 시험 결과를 그림3-b에 나타내었고 망치를 충격원으로 사용한 경우에 대하여 그림3-c에 나타내었다. 그림3-d는 2번 블록에서 직경 16mm인 강철구를 사용하였을 경우, 그림3-e는 3번 블록에서 직경 9.7mm인 강철구를 사용하였을 경우 및 그림3-f는 4번블록에서 직경 12.5mm인 강철구를 사용하였을 경우의 시험 결과이다.

## 5. 토 의

그림3-a에서 표시된 두께는 약 43cm로 실제로 코어 채취에 의하여 알려진 두께 42cm와 잘 일치한다. 그림3-b에서 표시된 두께는 약 17cm로 이는 윗층의 두께 18cm와 잘 일치하고 그림3-c에서 나타난 두께 67cm는 전체 두께 60cm보다는 큰 값으로 나타났으나, 콘크리트 블록 전체에 대한 두께의 편차가  $\pm 5cm$  정도이므로 67cm는 전체 콘크리트의 두께로 가정할 수가 있다. 또한 여기서 이 부분은 윗층 부분과 전체 두께를 뚜렷히 얻을 수 있으므로 두층간의 경계면의 상태가 양호하지 못한 것으로 판단된다.

그림3-d에서는 약 20cm 및 70cm의 두께가 표시되는데 이는 각각 윗층의 두께 및 전체 두께로 판단된다. 그림3-e에서는 22-23cm의 불분명한 신호와 72cm의 신호가 나타나는데 이는 각각 윗층 두께와 전체 두께로 판단된다. 그림3-f에서는 30-40cm의 불분명한 신호와 98cm의 신호가 나타나는데 이도 각각 윗층의 두께와 전체 두께로 판단된다.

일반적으로 망치, G형 impact-device 또는 직경

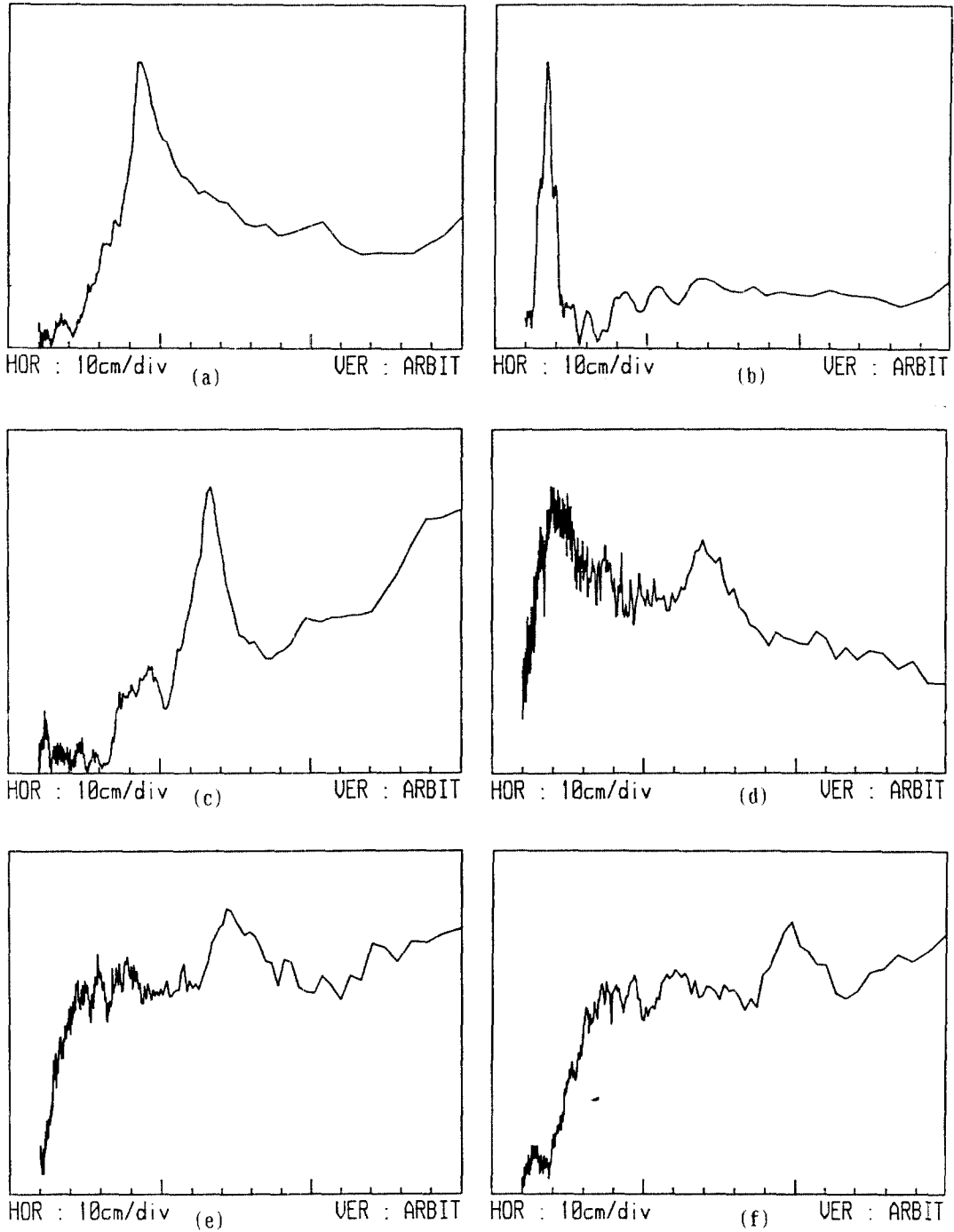


그림3 Impact-resonance 시험에서 얻어진 대표적인 거리 스펙트럼. (a) 1-A 블록 (G형 충격장치); (b) 1-B 블록 (직경 9.7mm 강철구); (c) 1-B 블록 (망치); (d) 2 블록 (직경 16mm 강철구); (e) 3 블록 (직경 9.7mm 강철구); (f) 4블록 (직경 12.5mm 강철구).

25.4mm 강철구와 같이 시간 폭이 큰 충격원에 의한 impact-resonance 시험의 거리 스펙트럼은 50cm 보다 작은 거리에 대한 정보를 얻기가 힘들었으며 따라서 전체 두께에 대한 정보만 얻을 수 있었다. 상대적으로 짧은 시간 폭의 충격원인 직경 9.7mm 및 16mm 강철구를 사용한 경우는 깊은 깊이에 대한 정보를 판단하기가 곤란한 경우가 있다. 따라서 예상되는 두께나 상태에 따라서 적합한 충격원을 사용하는 것이 바람직하다.

## 6. 결 론

탄성파 Impact-resonance 시험에 의하여 두층으로 경계지어진 콘크리트 블록의 두께 측정이 가능하였다. Impact-resonance 시험시 수신된 탄성파 신호에 대하여 주파수 분석을 실시하여 얻은 두께 정보는 두 경계면에서의 탄성파의 반사도 및 충격원에 따라서 다른 값이 나타났다.

경계면에서의 탄성파의 반사도가 클 경우는 두 층 각각의 두께에 해당하는 공진 모드들이 가능하고 이 중에서 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. 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
2. 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
3. D.Bancroft, "The velocity of longitudinal waves in cylindrical bars", Phys.Rev., 59, 549pp (1941)
4. 이세경 외, "콘크리트 구조물에 대한 초음파 탐상법 개발", KSRI-87-45-IR, 한국표준연구소 (1987)
5. T.M.Proctor, Jr., "Some details of the NBS conical transducer", J.Acoust.Em., 1, 173 (1982)