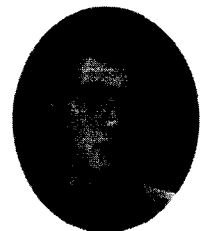

충격 공진법에 의한 대소 경계조건하 콘크리트 블록 내부결함 신호의 해석

Analysis of Vibration Modes of Small and Large Concrete Blocks
Containing Flaws by Impact Resonance Method



박석균*

Park, Seok-Kyun



윤석수**

Yoon, Seok-Soo

ABSTRACT

Impact resonance testing was carried out on small and large concrete blocks containing several types of artificial flaws respectively. Quantitative analysis of the observed peak frequencies in the impact resonance tests identifies the possible normal modes of concrete blocks containing flaws, and enables to determine the depth and size of the flaws in concrete blocks. In this study, concrete can be treated as a homogeneous and isotropic material.

The flaw size and location at each section of artificial flaw series in small and large concrete blocks, determined through two-dimensional scanning of impact point and real-time fast Fourier transform, are in good agreement with real size location, respectively. Consequently, quantitative analysis method of vibration modes in the impact resonance tests, which can be applied for homogeneous and isotropic material, can be useful for the detection of flaws in any case of small and large concrete blocks in this study.

* 정회원, 대전대학교 토목공학과 전임강사
** 안동대학교 물리학과 부교수

• 본 논문에 대한 토의를 1999년 6월 30일까지 학회로 보내
주시면 1999년 8월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

콘크리트내의 결함을 비파괴 검사방법으로 조사하기 위하여 많은 연구가 수행되어오고 있다. 그 중에서 특히, 충격 탄성파를 이용한 방법은 대상 시험체에 강한 에너지를 가할 수 있어 골재와 같이 비교적 큰 이질성의 구성재료를 갖고 중량물인 콘크리트내의 결함을 조사하기에는 적합하여, 국내에서도 최근 이 분야의 연구에 많은 관심을 보이고 있다^(1~8).

이 방법은 비접촉 주사방식인 레이더 등의 검사방법에 비해 측정속도 등의 효율성 면에서 불리하지만, 결함 탐사시에 있어 철근의 영향을 비교적 덜 받고, 측정면적이 작은 면적이더라도 측정이 용이하며, 동일 매질내에서는 충격원에 따라 약 100cm이상의 깊은 심도까지도 탐사가 가능한 특성이 있다. 이는 레이더법의 경우, 콘크리트내의 비교적 깊은 심도이상의 물체를 탐사하기 위해서는 저주파를 사용하는 만큼 상대적으로 안테나의 크기가 커져 많은 측정면적(최소한, 안테나의 크기와 수 배 이상의 주행거리)을 요구하는 것과는 대조적이다. 그러나, 보나기둥, 기계 기초부 등의 콘크리트 면은 충분한 측정면적을 갖고 있지 못한 경우가 많다.

따라서, 이러한 경우는 충격 탄성파를 이용한 탐사가 유리하지만, 아쉽게도 이들 부재에서와 같이 작은 경계를 갖는 시험체를 탐사대상으로 하면, 비교적 깊은 심도의 결함에 대해서는 이들로 부터의 반사파(P-파)와 주위의 각 경계로부터의 표면 반사파인 R-파(Rayleigh wave)가 서로 중복될 가능성이 커져 결함으로부터의 신호 해석이 곤란하게 된다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 대상 시험체의 경계조건(기하학적 조건)등에 따라 발생할 수 있는 각 진동신호를 정량적으로 해석함으로써, 결함으로부터의 신호를 분리해 낼 수 있어야 한다.

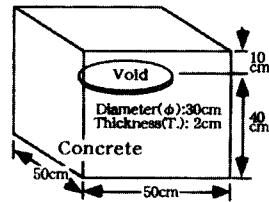
본 연구는 이를 위하여, 먼저 다양한 물시멘트비(W/C)와 결함 깊이를 갖는 작은 경계의 콘크리트 시험체(크기:가로50cm×세로50cm×두께50cm)를 제작하여 충격 공진법에 의한 실험을 실시하였다. 이로부터, 이들 시험체에서의 각 진동모드를 정량적으로 해석하여 결함으로부터의

신호를 검출하는 방법에 대한 연구를 실시하였고, 경계를 무시할 수 있는 대형 시험체내의 다양한 크기와 깊이를 갖는 결함에 대해서도 충격 공진법을 적용, 분석하여 각각의 특성을 비교 검토하였다.

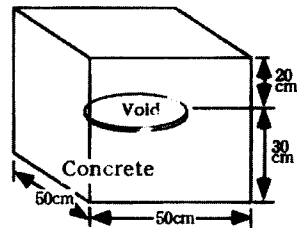
2. 실험개요

2.1 시험체

본 연구를 위한 시험체는 Fig.1에서와 같이 내부에 원판형 모의결함(小空洞)을 갖는 작은 경계 콘크리트 시험체와 Fig.2에서와 같이 경계면의 거리가 비교적 큰 대형 시험체로 나누어 제작하였다.



(a) W/C:45%, Defect depth:10cm



(b) W/C:45% (c) W/C:70%, Defect depth:20cm

Fig.1 Schematic diagram of the tes block I

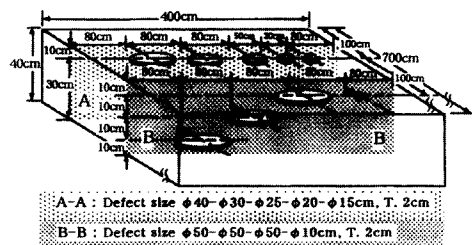


Fig.2 Schematic diagram of the test block II

Fig.1 시험체의 전체 크기는 가로 50cm×세로 50cm×두께 50cm이며, 콘크리트 배합조건은 모두 굵은 골재 최대치수를 25mm로 하고, (a),(b)의 경우는 W/C 45%, 슬럼프 12cm의 부배합으로, (c)의 경우는 W/C 70%, 슬럼프 18cm의 빈배합으로 하였다. 결합은 직경 30cm, 두께 2cm의 스티로폼으로 인공 제작하여 (a)의 경우는 10cm, (b),(c)의 경우는 20cm 깊이에 각각 매설하였다.

Fig.2 시험체의 전체 크기는 가로 400cm, 세로 700cm, 두께 40cm이며, 콘크리트 배합조건은 굵은 골재 최대치수 25mm, W/C 55%, 슬럼프 12cm로 하였다. 결합은 두께가 2cm로 일정하고 직경이 40,30,25,20,15cm인 원판형 인공결합을 10 cm의 일정 깊이에 매설한 A-A단면과, 직경 50cm, 두께 2cm의 원판형 인공결합을 깊이 10,20,30cm에 매설하고, 직경 10cm, 두께 2cm의 것을 깊이 10cm에 각각 매설한 B-B단면으로 나누어 배치하였다.

2.2 시험장비

본 연구에 사용된 시험장비의 구성도를 Fig.3에 나타내었다.

탄성파를 발생시키기 위한 충격장치는 스프링 방식의 금속용 반발경도 시험기인 Equis-Tip 경도기를 주로 사용하였고, 필요시 직경 6.35mm의 강철 구를 30cm높이에서 낙하시켜 사용하였다. 탄성파를 수신하기 위한 탐촉자 셋트는 한국표준연구원에 제작 의뢰한 것으로, 원추형(Conical-shaped) PZT (Piezo-electric Transducer)를 압전소자로 하고 S/N비를 향상시키기 위해 필터와 예비증폭기를 탐촉자에 가깝게 하여 같이 내장하였으며, 광대역(Wide-band) 주파수특성을 갖는 것을 사용하였다.

탐촉자로부터 얻어진 신호를 다시 증폭 조정하고, A-D변환 등을 실시하기 위해 175MHz용량의 디지털 오실로스코프를 신호획득 및 데이터변환 장치로 사용하였고, 데이터의 샘플링 시간간격은 500nsec ~ 200msec/div.의 싱글 샷 모드에서 2 μ s정도로, 데이터 수는 2500으로 하였다. 데이터 저장 및 해석, FFT(Fast Fourier Transform)

계산 등에 퍼스널 컴퓨터에 연결된 디지털 오실로스코프를 이용하였으며 결과를 플로터에 출력하였다.

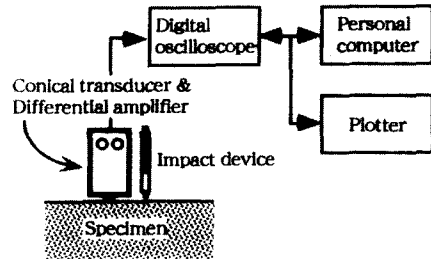


Fig. 3 Configuration of the impact resonance test

2.3 시험방법

결합 위 콘크리트 시험체의 표면을 평탄하게 연마한 후, Fig.4에서와 같이 결합 위 중앙을 중심으로 각각 x,y축으로 양분한 후 횡단 탐사하였다. 이 때 작은 경계 시험체의 경우는 (a)와 같이 x,y축을 45°회전시킨 x',y'축 방향으로, 대형 시험체에서는 (b)와 같이 x,y축 탐사를 각각 실시하였다. 또한, 탐사 포인트의 간격은 원칙적으로 결합 중심부에서는 5cm이하 단위로 크게 하였고, 결합의 테두리인 경계근처는 2.5cm이하

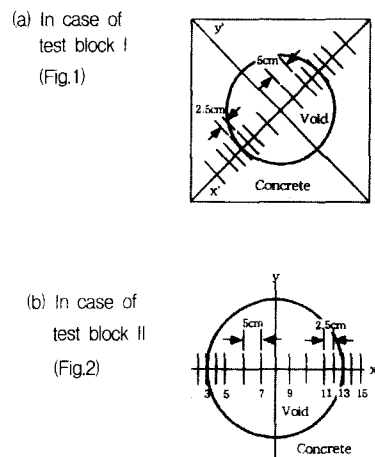


Fig. 4 Test points at each block surface

단위로 세분하였다. 또한 충격원과 수신원 간의 거리는 2cm로 일정하게 하였는데, 수신원의 PZT 엘리먼트부를 탐사 포인트에 맞추어 이동시켰고, 충격원 중심점은 이동축의 수직방향에 위치시켰다.

3. 이론적 고찰

3.1 작은 경계를 갖는 콘크리트 시험체내의 결함 탐사 특성

지금까지의 충격탄성파를 이용한 비파괴 검사 방법연구는 주로 측정개소로부터 수평방향의 각 경계면의 길이가 수직방향의 결함 또는 경계층의 깊이보다 충분히 커, 양자로부터의 반사신호의 구분이 비교적 용이한 경우가 많았다. 즉, 수직방향의 결함 또는 경계층으로부터의 반사신호(P-파)가 먼저 도달하고, 상대적으로 먼 거리의 수평방향의 각 경계면(모서리)으로부터의 반사신호(R-파)는 왕복 도달하는 동안 그만큼 감쇠의 영향을 크게 받아 약한 신호로 남게 될 뿐만 아니라 도달되는 신호의 시간차도 있어 수직방향신호와 뚜렷이 구분이 된다.

그러나, 작은 경계를 갖는 콘크리트 부재의 경우에는 수평방향을 왕복하는 R-파의 영향이 크기 때문에 수직방향으로부터의 P-파의 세기가 충분히 크지 못하면, 검출하기 어렵게 된다. 이들 R-파에 의한 신호는 노이즈가 아니기 때문에 대역필터(band pass filter)나 각종 신호처리기술로도 쉽게 제거되지 않아 해석시 전문적 기술에 의존할 수밖에 없다.

3.2 각 진동모드의 정량적 해석

Fig.5는 본 연구에서 주 해석대상으로 하고 있는 내부에 원판형 모의결함(小空洞)을 갖는 한정된 크기의 콘크리트 시험체를 나타낸 것이다. 이 시험체의 결함 중심 위에 충격탄성파를 가하였을 경우, 이 때 얻어지는 각 경우의 진동모드는 다음과 같이 각 형상 및 조건별로 나누어 해석해 볼 수 있다^{(2),(4)}. 물론, 이 경우의 시험체는 균질한(homogeneous) 재료의 이상적인 탄성체일 필요

가 있지만, 실제 콘크리트의 구성입자 중 가장 큰 이질 재료(heterogeneous)성분인 굵은 골재의 최대치수가 25mm인 점을 감안할 때 이는 사용탄성파의 파장보다 작으므로 산란 등에 의한 영향이 비교적 적을 것으로 판단하여 본 실험에서는 콘크리트 시험체를 균질 재료로 가정하였다.

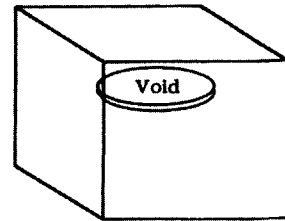


Fig.5 The actual shape of the possible vibration modes following fig.6~8

다음은 Fig.5의 실제형상 시험체의 결함 중심 위에 충격 탄성파가 가해졌을 경우, 얻어질 수 있는 가능한 진동모드 형상을 각 조건별로 세분하여 정량적으로 해석하는 방법에 대하여 고찰해 본다.

3.2.1 결함을 무시한 경우

먼저, Fig.5에서 결함을 무시한 경우의 구형(矩形)의 박스형 시험체를 Fig.6과 같이 고려해 볼 수 있다. 이 때, 얻어지는 표준 진동모드의 주파수는 식(1)에 의해 주어진다.

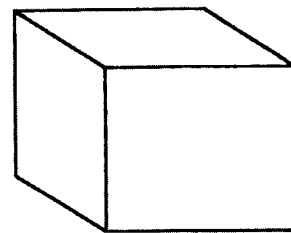


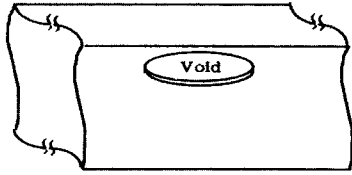
Fig.6 The shape of ignoring flaw from fig.5

$$f_{ijk} = \frac{v_c}{2} \sqrt{\left(\frac{i}{x}\right)^2 + \left(\frac{j}{y}\right)^2 + \left(\frac{k}{z}\right)^2} \quad (1)$$

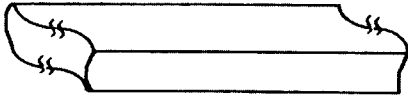
여기서, v_c 는 탄성파 속도, x, y, z 는 구형(矩形)박스의 3차원 공간에서의 치수, i, j, k 는 정수들이다.

3.2.2 수평경계를 무시한 경우

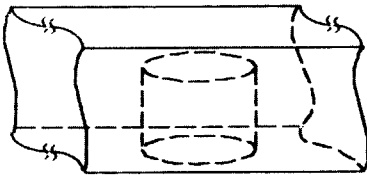
다음은 Fig.5에서 시험체의 수평방향 거리가 충분히 커 수직방향의 진동성분만을 고려할 수 있는 경우를 생각 할 수 있다. 수평경계를 무시한 진동모드의 형상은 Fig.7(a)와 같으며, 이는 다시 Fig.7 (b),(c)와 같이 각각 결함에 대해 수평방향과 수직방향으로 연장하여 생각할 수 있는 두 가지 경우로 세분하여 나타낼 수 있다.



(a) Removed horizontal boundaries from fig.5



(b) Horizontally extended flaw from (a)



(c) Vertically extended flaw from (a)

Fig.7 Each shape of removing horizontal boundaries from fig.5

Fig.7(b)에서 얻어지는 표준 진동모드의 주파수는 식(2)에 의해 계산할 수 있다.

$$f_n = \frac{nv_c}{2l} \quad (2)$$

여기서, n 은 정수이고 l 은 두께를 나타낸다.

또한, Fig.7(c)에서 얻어지는 표준 진동모드의 주파수는 식(3)에 의해 계산할 수 있다.

$$f_{jk} = \frac{\pi l}{4a^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\mu^2)}} (\beta_{jk})^2 \quad (3)$$

여기서, a 는 결함의 반경, E 는 영계수, ρ 는 밀도, μ 는 포와송비, β_{jk} 는 특성계수를 나타낸

다.

한편,식(3)은 진동모드의 형상이 Semi-clamped thin circular plate로 간주되고 기본모드의 고유주파수일 경우 식(4)와 같이 주어질 수 있다.

$$f_{01} = 1.87 \frac{l}{d_e^2} \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{1-\mu^2}} \quad (4)$$

$$d_e = d + 2l \tan \theta \quad (5)$$

여기서, d_e 는 식(5)로 주어지는 결함의 유효 직경 [d 는 결함의 원래 직경, θ 는 보정각, 여기서는 45° 로 계산함]을 나타낸다.

3.2.3 결함의 수평연장인 경우

끝으로 Fig.5에서 결함을 수평방향으로 연장한 경우인 Fig.8로부터 얻어지는 표준 진동모드의 주파수는 식(6)에 의해 계산할 수 있다.

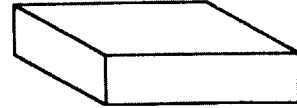


Fig.8 The shape of horizontally extended flaw from fig.5

$$f_{ij} = \frac{v_b}{2} \sqrt{\left(\frac{i}{x}\right)^2 + \left(\frac{j}{y}\right)^2} \quad (6)$$

여기서, v_b 는 멤브레인(membrane) 속도이다.

3.3 탄성과 속도의 측정

이상에서와 같이 결함의 깊이나 경계층의 두께 등을 정도 높게 검출하기 위해서는 식(2)에서 볼 수 있듯이 해당 매질을 전파하는 탄성파(P-파)의 속도를 정확히 산정하는 일이 중요하다. 이를 위해서는 조사 대상 콘크리트에서 파의 왕복거리를 아는 정상부분에 대하여 충격 탄성파를 가한 후 왕복 전파된 시간이나 주파수로부터 식(2)에 의해 속도를 계산하는 방법이 가장 좋다.

그러나, 현장 조건에서 한쪽 면만이 노출된 콘크리트 구조물에서 두께 등을 측정해야하는 경우는 이 방법의 적용이 곤란하므로, 일부분에 코아 보링을 하여 채취된 시편에 대하여, 간접측정을 실시하는 경우가 있다. 이와 같이 시편의 직경이

탄성파의 파장에 비해 작은 경계조건 등을 갖는 경우에 대해 탄성파 속도 (v_r)를 측정하는 경우는 현장 조건과 유사한 무한 거리의 대상 매질에서의 탄성파 속도 (v_c)보다 일반적으로 작은 경향을 나타내므로 다음 식(7)에 의해 보정해 사용하도록 한다⁽²⁾.

$$\frac{v_r}{v_c} = \sqrt{\frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu}} \quad (7)$$

3.4 충격원의 발생방법과 특성⁽¹⁾

3.4.1 스프링 방식의 경우

충격자가 스프링의 힘에 의해 발생되어 다른 탄성체에 충돌할 경우, 이 때의 충격자의 속도는 충격자가 스프링을 누르고 있을 때의 에너지 보존법칙에 의해 구해지고, 다시 충격자의 질량 (m)과 충격자가 스프링으로부터 얻는 속도와의 관계식에서 탄성에너지는 항상 일정한 원리로부터, 두 탄성체가 충돌할 경우의 접촉시간 t_c 는 식(8)과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$t_c = 2.94 \left(\frac{m_e^2}{k^2 v} \right)^{0.2} \quad (8)$$

여기서, m_e 는 유효질량 [= $mm'/(m+m')$, 이 때 m, m' 은 충돌하는 두 물체의 질량]이고, k 는 스프링의 영계수이다.

한편, 한 탄성체가 두껍거나 큰 평면을 가지면, 상기식은 다시 식(9)와 같은 비례관계로 표시할 수 있게 된다.

$$t_c \propto \sqrt{mR}^{-0.2} \quad (9)$$

여기서, R 은 충격자의 접촉면의 곡률반경 또는 충격자를 강철구라 가정할 경우는 강철구의 반경이다. 즉, 스프링 방식의 경우는 충격자의 질량이 클수록 접촉시간은 길어지며, 충돌시 가해지는 힘도 크게 된다.

3.4.2 강철구 낙하방식의 경우

두꺼운 탄성체의 수평한 표면으로부터 높이 h 에서 반경 R 인 강철구를 자유 낙하시키면, 이 강철구의 자유낙하 속도와 탄성체의 표면이 평면이고 강철구에 비하여 무게가 매우 크다는 조건을

이용하면, 이들 두 탄성체가 충돌할 경우의 접촉시간 t_c 는 식(10)과 같은 관계로 유도될 수 있다.

$$t_c = 5.32 (\rho D)^{0.4} (gh)^{0.1} R \quad (10)$$

여기서, $D = 7.5 \left(\frac{1-\mu^2}{E} + \frac{1-\mu'^2}{E'} \right)$ 로 주어지는 물질상수 (두 물체의 effective elastic stiffness)이고, μ, μ' 과 E, E' 은 각각 두 물체의 포와송비와 영계수, ρ 는 강철구의 밀도이며, g 는 중력가속도이다.

즉, 접촉시간은 강철구의 자유낙하 방식의 경우는 강철구의 낙하높이 보다는 강철구의 반경에 직접 비례하게 됨을 알 수 있으며, 충돌시 가해지는 힘을 크게 하기 위해서는 강철구의 반경을 크게 할 필요가 있다. 따라서, 탐사심도에 따라 강철구의 직경(반경), 스프링 충격자의 질량 등에 따른 적절한 충격원의 선정이 필요하다.

본 연구에서는 강철구의 낙하방식이 스프링 방식보다 이상적인 탄성충돌을 얻을 수 있어 불요 신호의 발생이 상대적으로 적지만, 현장 적용성 등이 우수한 스프링 방식을 주 충격원으로 하여 실험을 실시하였다. 또한, 이들 방식의 상대 비교 결과, 2.2절에서 언급한 스프링 방식의 충격장치에 가장 근접한 에너지를 갖는 자유낙하방식의 강철구의 직경은 6.35~7.9mm범위이며, 주로 6.35mm 직경의 강철구가 본 실험조건에서는 최적의 특성을 나타내었다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 작은 경계를 갖는 콘크리트 시험체내의 결함

Fig.9는 작은 경계를 갖는 Fig.1의 콘크리트 내 블록에 대해 결함 중앙위에서 충격 공진법으로 얻어진 신호의 주파수 스펙트럼을 보여준다. 이 때 3.2절의 이론을 바탕으로 예측되는 각 진동모드의 공진 주파수를 계산하여 Table1에 나타내었으며, 실제 측정된 주파수들과 비교하여 Table1과 Fig.9에 대응시켰다.

Table 1 Computed and tested results of vibration modes at the center of fig.1(a) specimen

진동모드 종류		이론식 및 계산치		실측치
결함을 무시한 경우 (Fig.6)		식(1)	$f_{100}=4.0\text{kHz}^{**}$ $f_{110}=5.6\text{kHz}$	- 5.6kHz
수평 경계를 무시한 경우 (Fig.7a)	수평방향 연장 (Fig.7b)	식(2)	$f_1=19.0\text{kHz}^*$	18.0kHz*
	수직방향 연장 (Fig.7c)	식(4)	$f_{01}=2.0\text{kHz}$ $f_{02}=7.8\text{kHz}$ $f_{03}=17.6\text{kHz}^*$ $f_{11}=4.2\text{kHz}$ $f_{12}=12.0\text{kHz}$ $f_{21}=6.7\text{kHz}$	2.7kHz 7.8kHz 18.0kHz* - 13.0kHz 6.5kHz
결함의 수평연장인 경우 (Fig.8)		식(6)	$f_{10}=3.8\text{kHz}$	3.8kHz

*결함에서의 신호. **바닥에서의 신호(여기서는 실측되지 않음)

은 경계 콘크리트 시험체에서도 결함을 갖는 균질 재료에서와 같은 각 진동모드 형상별 발생 주파수의 계산치와 실측치가 일부에서 약간의 차이를 보이기는 하지만 비교적 유사하게 양자의 값이 일치하는 경향을 나타내고 있다. 즉, 사용 탄성파의 파장보다 작은 굵은 골재 최대치수(25mm)를 사용할 경우는 콘크리트도 산란의 영향을 크게 받지 않는 것으로 사료되어 상당 부분 균질 재료로서의 특성을 보이며, 상기 이론에 의한 정량적 해석이 가능함을 알 수 있다. 그러나, 이와 같은 진동모드의 해석은 각 시험체의 경계조건을 사전에 충분히 알고 있을 때 가능하다. 그러한 경우에도 Fig.9의 결과로부터 결함으로부터의 신호를 구분하기는 쉽지 않음을 알 수 있으나, 본 해석과정에서 이론과 스펙트럼을 비교한 결과, 결함 위에서 새롭게 나타나는 피크중 가장

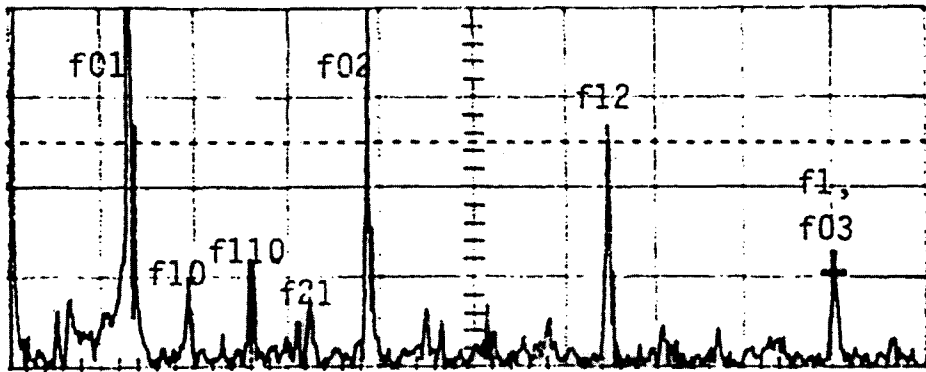


Fig.9 Frequency spectrum of impact resonance test at the center of test specimen of fig.1(a) [exampled on table 1]

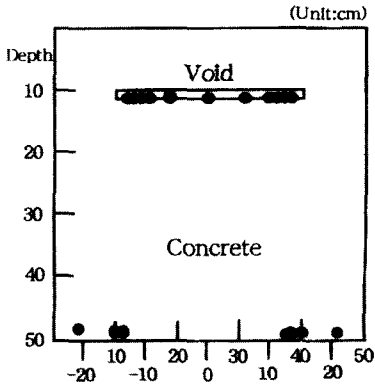
이 경우 계산에 사용한 콘크리트내의 탄성파 속도(v_c)는 직경 10cm, 높이 20cm의 원주형 공시체를 시험 대상 콘크리트와 동일한 재료로 별도 제작 한 후 측정하여 식(7)에 의하여 보정한 값 (이 때 콘크리트의 포와송비 $\mu=0.2$)인 4000m/s를 이용하였다. 그 밖에 콘크리트의 밀도는 2.32g/cm^3 , 식(6)에서의 멤브레인 속도(v_p)는 3800m/s로 하여 계산하였다.

물론 이들 관련 데이터는 다른 조건 콘크리트에서는 다른 측정치를 이용하였다. Fig.9와 Table 1의 결과로부터 알 수 있듯이 가로50cm × 세로50cm × 두께50cm의 비교적 큰 두께의 작

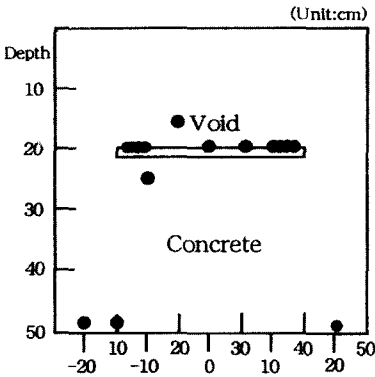
고주파 위치에 있는 피크가 결함에서 오는 신호임을 알 수 있었으며 이러한 방법으로 결함의 위치를 판정하였다.

이상의 해석방법을 이용하여 나머지 조건의 시험체인 Fig.1(b)(c)를 포함한 전체 콘크리트내 결함 및 바닥에 대한 1차원 탐사해석(Fig.4(a)의 x'축 방향)결과의 횡단면도를 Fig.10에 나타내었다.

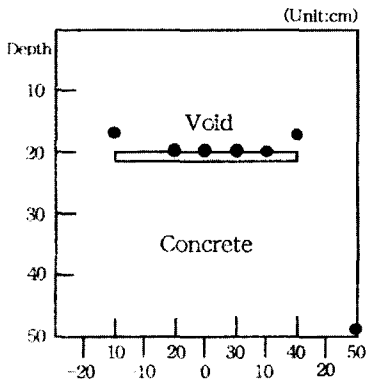
이들 결과로부터 알 수 있듯이, 전반적으로 해석결과와는 일부를 제외하고는 결함과 바닥의 위치를 유효하게 나타내고 있음을 알 수 있으나, 콘크리트의 강도와 밀도가 높을수록, 즉 W/C가 낮은



(a) In case of the condition of W/C:45%, Defect depth:10cm



(b) In case of the condition of W/C:45%, Defect depth:20cm



(c) In case of the condition of W/C:70%, Defect depth:20cm
Fig.10 Detected flaw positions by impact resonance testing for fig.1 specimen

부배합 일수록, 또한 결함의 매설깊이가 낮을수록 탐사에 따른 해석정도가 높게 나타남을 알 수 있다.

특히, W/C가 70%의 빈배합에 결함깊이가 20cm인 Fig.10(c)의 경우는 결함 경계부 신호 중 결함으로부터의 신호가 일부 검출되지 않은 경우가 발생되었다. 이는, 탄성파의 전파속도가 Fig. 10 (a),(b)의 다른 부배합 콘크리트에서 보다 낮은 상황하이고, 그 때의 측정점에서 결함으로부터 도달된 신호(P-파)가 표면의 경계면에서 도달된 신호(R-파)에 묻혔거나 위상차에 따른 상쇄 등의 영향으로 신호의 판독이 곤란하였던 것으로 사료된다. 또한, 이 경우에서 바닥으로부터의 반사신호도 잘 잡히지 않았는데, 이 역시 빈배합에 따른 탄성파 속도와 밀도 등의 저하에 따른 감쇠의 영향이 크고, 표면 경계면에서의 R-파의 영향 등에 의한 것으로 사료된다.

이들 결과에 의한 결함 직경 및 깊이, 바닥 깊이의 해석 오차 범위는 W/C 45%, 결함깊이 10cm인 경우가 3~4%, W/C 45%, 결함깊이 20cm인 경우가 4~7%, W/C 70%, 결함깊이 20cm인 경우가 5~ 10%로 각각 나타났다.

4.2 대형 콘크리트 시험체내의 결함

다음은 Fig.2의 실험조건과 같이 탐사심도에 비해 충분히 큰 수평경계조건을 갖는 대형 콘크리트 시험체내의 결함에 대하여 각 결함조건별로 충격 공진법에 의한 실험을 실시하였다. 여기서, 콘크리트 시험체의 보정 탄성파 속도는 평균 3280m/s이고, 변동폭은 ± 100 m/s 이내로 추정된다.

이 중에서 결함 직경이 40cm, 깊이가 10cm인 결함을 대표 조건으로 하여, 각 주요 탐사 포인트에서 측정된 시간대 파형과 계산된 주파수 스펙트럼 결과를 Fig.11에 나타내었다. 결함의 탐사는 각 결함의 크기에 따라 탐사 개소수를 달리했지만, 이 경우는 Fig.4(b)에서와 같이 x,y축 방향으로 각각 총 15개의 위치에서 탐사하였다. 또한, y축 방향 탐사결과는 다른 결함의 탐사시에도 x축 방향의 탐사결과와 거의 유사하게 나타나, 별도로 나타내지 않았다.

이들 각 결과로부터 알 수 있듯이, 탐사 포인트

트번호 3,13에서는 4.2~4.3kHz의 저주파 피크(B)가 존재하고, 이를 깊이로 환산하면 38 ~ 39cm가 되어 결함이 없는 경우의 바닥으로부터

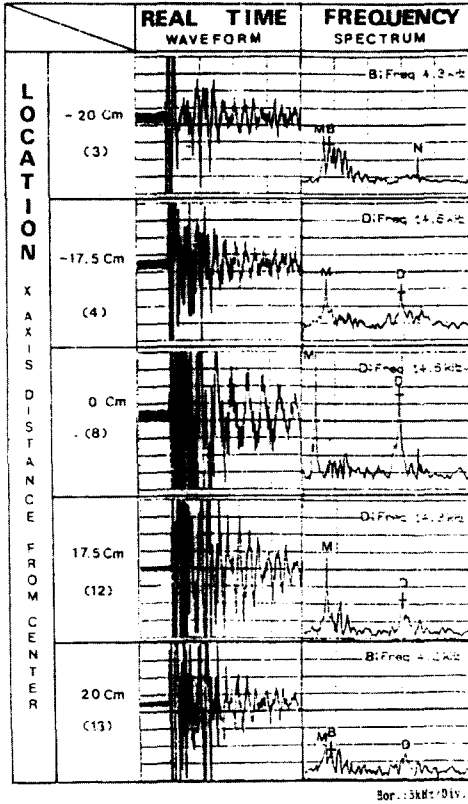


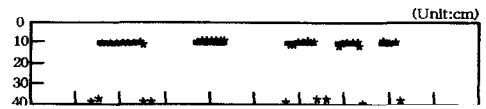
Fig.11 Wave forms and frequency spectra of impact resonance test for fig.2 specimen

의 반사신호에 해당하며, 이는 실제 깊이 40cm보다 1~2cm 작게 나타났다.

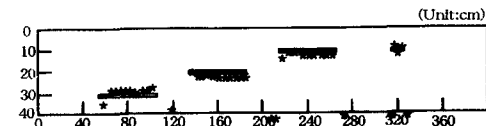
또한, 결함의 윗면에 해당하는 번호 4~12에서는 14.6~14.9kHz의 주파수 피크(D)가 뚜렷이 나타나고 있고 이는 약 11cm의 깊이에 해당하는 것으로 수평경계를 무시(수평방향 연장)한 경우의 반사신호[Fig.7(b)의 식(2), f_1]에 해당하며, 실제 깊이보다 1cm 크게 나타났다. 특히, 결함의 경계에 해당하는 번호13의 위치에서는 결함으로부터의 주파수 15.1kHz와 콘크리트 바닥으로부터의 주파수 4.2kHz가 약하게나마 공존하고 있어 본 위치가 결함의 경계에 해당함을 알 수 있다.

한편, 결함의 위치에서 뚜렷이 나타나는 2~4kHz의 주파수(M)는 결함과 콘크리트 표면사이의 층이 멤브레인 진동을 일으킬 때 나타나는 자유진동 모드의 주파수와 일치하였고, 이는 결함의 수평연장시의 반사신호[Fig.8의 식(6), f_0]와 수평경계를 무시한(수직방향 연장) 경우의 일부 반사신호[Fig.7(c)의 식(4), f_{01}]에 해당한다. 아울러, 번호 3,4,8의 위치에서 나타나는 17.4kHz의 주파수(N)는 근처 공사장으로부터 간헐적으로 얻어지는 노이즈로 판명되었다.

이상에서와 같이, 나타나는 주파수 피크가 바닥경계와 결함으로부터의 진동모드에 국한되어 발생되고 있어, 4.1절의 작은 경계 콘크리트내 결함 조건에서보다 스펙트럼상에 나타나는 각 종 피크 종류가 훨씬 간단(각 수평경계로부터의 반사신호 등의 영향이 없음)하여 결함으로부터 오는 피크를 쉽게 결정할 수 있음을 알 수 있다. 이에 따른 해석방법에 의해 콘크리트내 결함 및 바닥에 대한 탐사해석[Fig.4(b)의 x축 방향]결과의 횡단면도를 Fig.12에 나타내었다.



(a) in case of the condition of A-A section



(b) in case of the condition of B-B cross section

Fig. 12 Detected flaw positions by impact resonance testing for fig.2 specimen

이들 결과로부터, A-A단면과 B-B단면의 일부에 매설된 결함 크기 변화별 탐사에서는 결함의 깊이에 대한 직경비가 1이상인 경우 결함의 검출이 가능하며 그 비가 클수록 탐사정도는 향상되어, 본 조건에서의 결함 직경 및 깊이의 해석 오차 범위는 2~8%를 나타내었다. 또한, B-B단면의 결함 깊이 변화별 탐사에서는 결함이 표면으로부터 깊은 경우 즉 바닥에 가까울수록 바닥신호의 영향에 의해 탐사정도는 저하하였는데, 본

조건에서의 결함 직경 및 깊이의 해석 오차 범위는 각각 직경 탐사시에 2~10%, 깊이 탐사시에 3~8%를 나타내었다. 그러나, 작은 경계조건 시험체에서의 탐사에 비해 탐사 정도(精度)에서는 큰 차이가 없지만, 신호의 해석은 훨씬 용이함을 알 수 있다.

5. 결론

이상의 실험결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 결함을 갖는 50cm의 비교적 큰 두께의 작은 경계 콘크리트 시험체에서도 균질 재료로 가정한 각 진동모드 형상별 발생 주파수의 이론적 해석이 가능하여, 결함에 대한 정량적 신호해석이 가능하다.

2) 작은 경계조건 시험체의 경우, 콘크리트의 강도와 밀도가 높을수록, 결함의 매설깊이가 낮을수록 탐사에 따른 해석정도가 높게 나타났다.

3) 대형 시험체의 경우, 결함 크기 변화별 탐사에서는 결함의 깊이에 대한 직경비가 1이상이면 결함의 검출이 가능하며 그 비가 클수록 탐사 정도는 향상되고, 결함 깊이 변화별 탐사에서는 결함이 표면으로부터 깊은 경우 즉 바닥에 가까울수록 바닥신호의 영향에 의해 탐사정도는 저하하였다. 그러나, 각 경계로부터의 반사신호 영향이 적어 작은 경계 시험체에서 보다 결함에 대한 신호해석이 훨씬 용이하였다.

감사의 글

본 연구의 실험은 쌍용중앙연구소에서 행하여진 것으로, 협조해 주신 관계자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국표준연구소, "콘크리트 구조물에 대한 초음파 탐상법 개발(1~3차)", 과학기술처, 1986~88
2. Y.H.Kim, S.Lee and H.C.Kim, "Quantitative vibration mode analysis of mortar and concrete blocks containing flaws", NDT International Vol.23, No.2, 1990.4, pp.67~73
3. 김영환, 이세경, 김호철, "탄성과 충격공진법에 의한 기초 콘크리트의 두께 측정", 한국콘크리트학회 논문집, 제3권3호, 1991. 9, pp.121~128
4. 김영환, "감쇄와 분산이 다상재료의 진동주파수 스펙트럼에 미치는 영향", 한국과학기술원 박사학위논문, 1990
5. 박정만, "응력과 발생원 해석에 미치는 감쇄와 분산 효과", 한국과학기술원 박사학위논문, 1988
6. 朴錫均, 任昌應, "彈性波衝擊共振法によるコンクリート内部の缺陷検出", セメント・コンクリート論文集, No. 46, 1992, pp.308~313
7. 박석균, 임창덕, "충격탄성파법에 의한 콘크리트 내부의 결함검출", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제3권1호, 1991.5, pp.105~110
8. 김동수, 박형춘, 이광명, "충격반향기법을 이용한 콘크리트 부재의 비파괴검사", 한국콘크리트학회 논문집, 제9권2호, 1997. 4, pp.109~119
9. N.J.Carino, "Laboratory study of flaw detection in concrete by pulse echo method", Proc. Int. Conf. on In Situ/NDT of Concrete, Ottawa, 1984.10
10. N.J.Carino, M.Sansalone and N.N. Hsu, "Flaw detection in concrete by frequency spectrum analysis of impact echo waveforms", Int. Adv. Nondestr. Testing 12, 1986

요 약

본 연구는 비파괴 검사방법인 충격 공진법을 이용하여 결함을 갖는 콘크리트 시험체로부터의 반사신호를 정량적으로 해석하기 위한 연구이다. 충격 공진법은 비교적 저주파의 강한 에너지를 콘크리트내에 가하여 그 반사신호로부터 결함이나 경계층 등을 조사하기 때문에 굵은 골재 등을 포함하고 중량물인

콘크리트 구조물의 탐사에 유용하다. 그러나, 보나 기둥 등의 작은 경계를 갖는 콘크리트 시험체를 대상으로 할 경우에는 각 경계로부터 수평방향을 왕복하는 R-파의 영향이 크기 때문에 결함 또는 경계층으로부터의 반사신호인 수직방향으로부터의 P-파의 세기가 충분히 크지 못하면, 결함 등으로부터의 신호를 검출하기 어렵게 된다.

따라서, 본 연구에서는 시험체의 경계조건과 결함의 위치에 따라 발생 가능한 각 진동모드를 정량적으로 해석하는 방법을 연구하여 결함으로부터의 신호를 검출하는 방법에 대해 검토하였다. 그 결과, 각 모서리의 길이가 50cm이내의 작은 경계조건과 50cm의 깊은 두께를 갖는 콘크리트 시험체내의 결함에 대해서도 콘크리트가 부배합 조건이고 결함의 깊이가 30cm이내일 경우 정량적 탐사가 가능하며, 각 모서리의 크기가 충분히 큰 대형 시험체 조건에서는 보다 용이하고 폭넓게 다양한 조건의 결함 등에 대한 정량적 탐사가 가능하였다.

(접수일자 : 1998.8.26)