

# 충격반향기법을 이용한 콘크리트 부재의 비파괴 검사

## Nondestructive Evaluation of Concrete Members Using Impact Echo Method



김동수\*

Kim, Dong Soo



박형춘\*\*

Park, Hyung Choon



이광명\*\*\*

Lee, Kwang-Myong

### 요 약

토건구조물의 사용연한 증가에 따른 기존 구조물의 손상도 및 적정시공여부를 추정하기 위해 비파괴검사의 중요성이 점점 증가하고 있다. 본 연구에서는 충격반향기법을 이용하여 콘크리트 부재에 대한 비파괴 시험을 수행하였다. 충격반향기법은 응력파의 전파에 그 기본을 두고 있다. 시험부재는 보형태의 콘크리트 부재로서 기지의 위치에 공동이 만들어져 있으며, 충격반향기법을 사용하여 아주 작은 오차 범위내에서 공동의 위치를 측정하였다. 연구결과를 이용하여 현장에서 콘크리트 구조물의 적정시공여부 및 손상도 추정에 대한 적용가능성을 확인할 수 있었다.

### Abstract

As nation's infrastructure is getting old, nondestructive evaluation of existing structures and construction quality control are getting important. In this paper non-destructive evaluations of concrete members using impact echo are introduced. This technique is based on the stress wave propagations. Experimental tests were performed using beam type

\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

\*\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

\*\*\* 정회원, 성균관대학교 토목공학과 조교수

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 6월 30일까지 학회로 보내주  
시면 1997년 8월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

concrete members where voids and cracks are included at known location. Within reasonable accuracy, void and poor concrete locations were detected using impact echo method. This NDT method showed a feasibility for the implementation into quality evaluation of concrete members in practice.

Keywords : Impact Echo Method, Stress Wave, FFT

## 1. 서론

최근 여러 대형사고의 발생으로 인하여 기존 토건 구조물의 유지관리 및 안정성의 확보가 중요한 과제로 떠오르고 있다. 토건구조물을 항상 안전하고 사용 가능한 상태로 유지하기 위해서는 토건구조물을 정기적으로 점검 평가하여 문제가 일어나기 전에 미리 조치를 취하여야 한다. 따라서 토건구조물의 손상이나 결함, 건설중인 구조물의 적정시공여부 등에 대한 객관적인 분석 및 올바른 평가방법의 개발이 매우 중요하다.

본 연구에서는 응력파를 이용한 비파괴검사법인 충격반향(Impact Echo : IE)기법을 사용하여 콘크리트부재의 결함탐지를 위한 검사방법을 연구하였다. 콘크리트 부재안의 기지의 위치에 공동, 불량콘크리트 등 손상을 유발시키고 IE기법으로 이들 결함을 탐지하였으며, 시험에 영향을 주는 요소들을 살펴 보았다. IE기법은 현장에서 천공없이 검사가 이루어지기 때문에 검사대상물에 대한 손상이 없으며, 같은 위치에 대하여 언제라도 반복적인 시험이 가능하기 때문에 지속적인 유지보수에 적절하고, 모든 검사대상물의 한면만을 사용하기 때문에 접근성의 문제가 발생하지 않는다.

## 2. 충격반향기법

### 2.1 기본원리

시험체의 표면에 기계적 충격(impact)을 가하여 발생된 체적파(P, S파)는 균열, 공동과 같은 불연속체나 이질 매질층간의 경계면을 만나면 반사되어 응력파가 발생한 표면으로 돌아온다. 표면에 도달한 파는 표면에서 반사되어 다시 매질속으로 전파되며 이

러한 파는 다시 불연속층에서 반사되어 표면과 불연속체 사이 또는 표면과 이질 매질층 사이의 다중반사에 의한 공진상태가 유발된다. 이때 시험체의 치수를 알고 있을 경우 구성재료의 강성도 결정을 통한 콘크리트의 불량도를 추정할 수 있고 재료의 압축과 전파속도를 알고 있다면 반사파의 도달시간을 측정하여 시험체 내부에 존재하는 불연속면의 위치를 알아낼 수 있다<sup>[2, 3, 6, 7, 8]</sup>. Fig. 1에 충격반향기법의 개요도를 나타내었다.

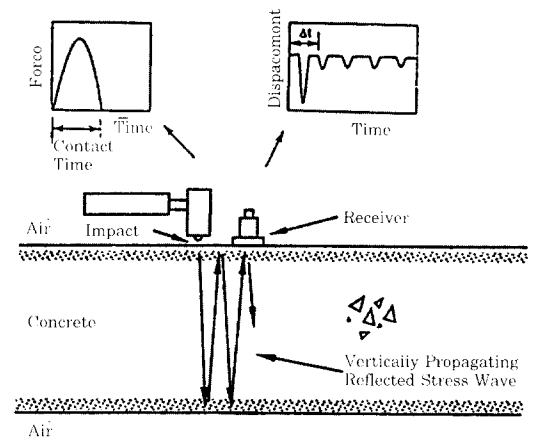


Fig. 1 General configuration of Impact Echo test

### 2.2 신호처리 및 분석

슬래브같은 구조체나 표면에서 깊이가 얇은 곳에 위치하는 균열·공동을 탐사하는 경우, 파의 이동거리가 짧기 때문에 감지기에서 얻는 시간영역상에서의 신호는 다양한 주파수의 여러파가 섞여 복잡한 형태를 가진다. 따라서 반사된 P파의 정확한 도달 시간을 감지하기가 어려우며, 이런 경우 고속 푸리에 변

환(fast fourier transform)을 통한 주파수 영역에서의 신호처리가 사용된다.

첫번째 모드의 파장과 두께(관심을 가지는 이질 매질층으로부터 감지기가 부착되어 있는 표면까지의 거리, T)사이의 관계는 경계조건에 의해서 결정된다. 부재내부에 공동, 균열 등이 존재할 때의 경계조건은 자유면-자유면 조건으로 첫번째 모드의 공진주파수는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$f_1 = \frac{V_p}{2T} \quad (1)$$

여기서,  $f_1$ : 첫번째모드의 공진주파수

$V_p$ : P파의 속도

이 경우 첫번째 모드의 파장,  $\lambda$ 는 두께의 2배가 된다. 따라서 매질의 P파 전파속도를 알고 있을 때 이질매질층까지의 두께, T를 구할 수 있다.

자유단-고정단 경계조건은 매질내부에 매질에 비해 강성도가 상당히 큰 이질 매질이 존재할 때 발생하며 콘크리트부재 내에 철근이 존재하는 경우 이 경계조건을 이용할 수 있다. 이때 첫 번째 모드의 공진주파수는 다음식으로 구할 수 있다.

$$f_1 = \frac{V_p}{4T} \quad (2)$$

이때 첫번째 모드의 파장,  $\lambda$ 는 두께의 4배가 된다.

IE기법을 사용하여 이질층까지의 두께를 측정함에 있어 매질에서의 응력파의 속도를 미리 알고 있어야 한다. 응력파의 속도는 경계조건과 두께를 미리 알고 있는 부위에서의 계측을 통하여 알아낸다. 이렇게 얻어진 속도는 두께를 구하는데 사용될 뿐 아니라 다음식을 사용하여 동탄성계수를 구할 수 있다<sup>11, 12</sup>.

$$M = \rho v_p^2 \quad (3)$$

$$E = \rho v_c^2 \quad (4)$$

$$M = \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} E \quad (5)$$

여기서, M: constrained modulus

E: Young's modulus

$\nu$ : 횡방향 변위가 구속된

매질의 P파 속도

$\nu$ : 횡방향 변위가 자유로운

매질의 P파 속도

### 3. 실험계획 및 방법

#### 3.1 실험 부재 및 장비

본 연구에서는 3개의 시험부재에 대하여 IE실험을 수행하였다. 시험부재 I은 길이 100cm, 폭 40cm, 두께 30cm의 콘크리트 시험부재로서 A, B 부분으로 나누어 실험을 수행하였다(Fig. 2). A구역은 무결합부위이고 B구역은 폭 8cm, 높이 5cm의 공동이 표면에서 공동의 천정까지의 깊이가 약 17cm와 10cm가 되도록 만들어져 있는 공동부위이다.

시험부재 II는 길이 80cm, 폭 25cm인 콘크리트 시험부재로서 두께는 10cm, 20cm, 30cm로 위치에 따라 다르게 만들어져 있다(Fig. 3). 시험부재 III은 길이 180cm, 폭 180cm, 두께 120cm의 콘크리트 시험부재로서 부재내부에 길이 60cm, 폭 60cm, 두께 120cm의 불량콘크리트를 모델링하기 위하여 시

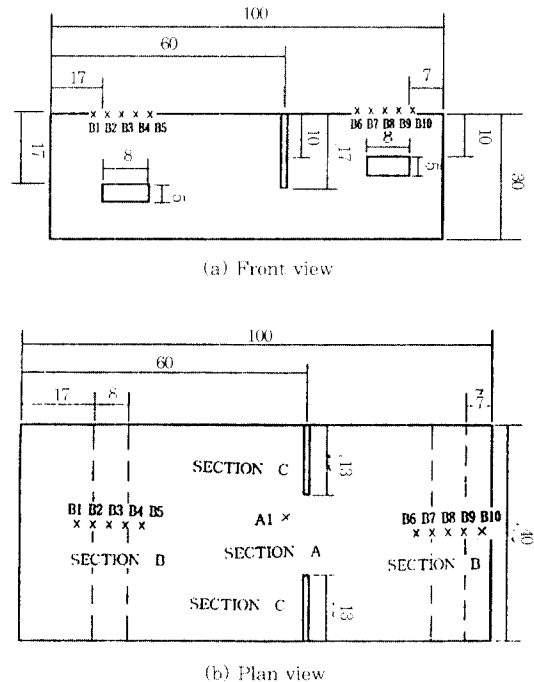
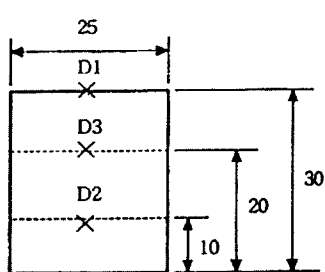
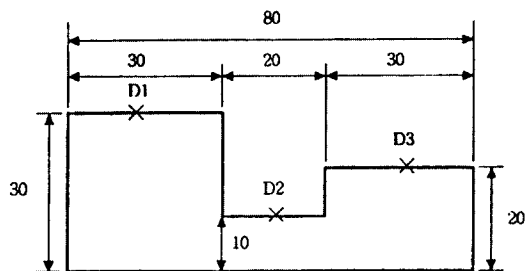


Fig. 2 Schematic layout of test specimen I and location of receiver



(a) Side view



(b) Front view

Fig. 3 Schematic layout of test spectimec II and location of receiver

멘트 모르타르 구역이 만들어져 있다(Fig. 4).

본 연구에서 사용한 진동감지기는 미국 PCB사의 모델명 353B15 압전식 가속도계를 진동신호 분석기는 미국 Hewlett Packard 사의 모델명 35665A

dynamic signal analyzer를 사용하였다.

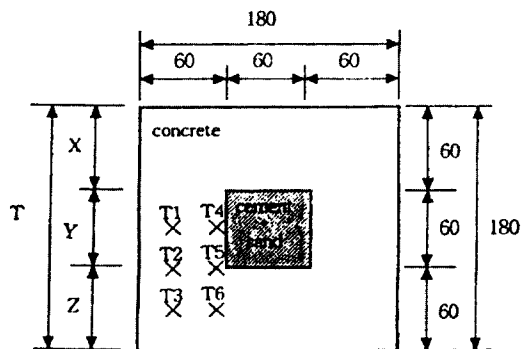
가진원으로는 6개의 직경이 다른 강철구와 미국 PCB사의 086C80 instrument hammer를 사용하였다. 이 hammer에 의해 발생가능한 진동의 최대 주파수는 약 15KHz이다. 본 실험에서 사용한 6개의 강철구를 30cm 높이에서 떨어뜨린 경우의 접촉시간 및 최대주파수 영역은 Table 1 과 같다.

Table 1 Diameter of steel ball and frequency content

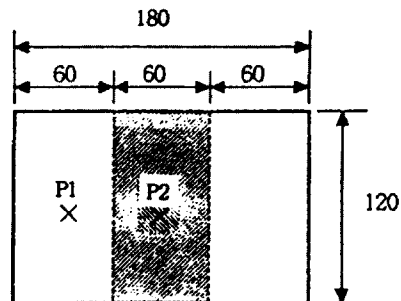
Number	Diameter (mm)	Contact Time ( $\mu$ sec)	Frequency Content (KHz)	Weight(g)
1	4.76	23.21	43.09	0.5
2	6.32	30.81	32.45	1.1
3	7.99	38.95	25.67	2.1
4	9.25	45.09	22.17	3.5
5	10.99	53.58	18.66	5.5
6	14.28	69.62	14.36	11.9

### 3.2 실험방법

시험부재 I을 이용하여 공동의 위치측정 실험을 수행하였다. A구역에는 밀면 이외에 다른 경계로부터의 반사를 최소화하기 위하여 시험부재의 중심선을 따라 좌측으로 부터 58cm 되는 곳에 감지점 A1을



(a) Plan view



(b) Front view

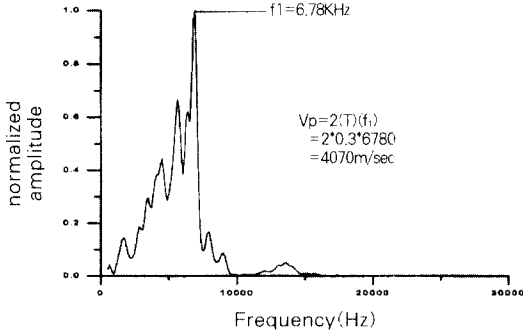
Fig. 4 Schematic layout of test spectimec III and location of receiver

설치하여 IE시험을 수행하였다. 구역 B에서는 각 공동의 중심으로부터 좌우로 감지점간격이 4cm가 되도록  $B_1 \sim B_3$ 과  $B_6 \sim B_{10}$ 을 시험부재의 중심선을 따라 설치하여 IE기법에 의한 공동측정실험을 수행하였다(Fig. 2).

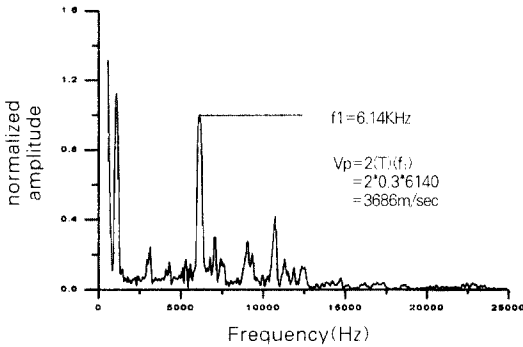
시험부재 II의 표면에 감지점 D1, D2, D3를 설치

하여 콘크리트 시험부재의 두께측정 실험을 수행하였다(Fig. 3).

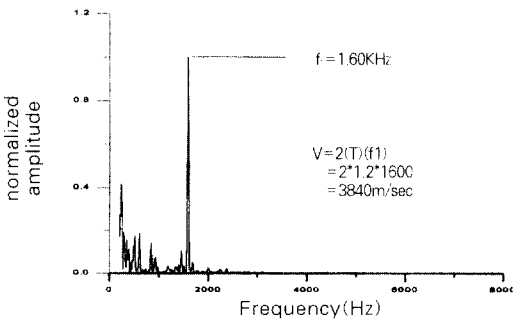
시험부재 III의 상부에 감지점 T1~T6을 설치하여 IE기법에 의한 콘크리트 시험부재의 두께측정 실험을 수행하였으며 옆면의 중심을 따라 왼쪽으로부터 30cm, 90cm 떨어진 곳에 감지점 P1, P2를 설치하여 불량 콘크리트의 위치 및 강성도를 알아내기 위한 실험을 수행하였다(Fig. 4).



(a) Power spectrum at receiver A1



(b) Power spectrum at receiver D1



(c) Power spectrum at receiver T1

Fig. 5 Power spectrum at receiver A1, D1, T1

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 P파속도의 측정

각 시험부재는 서로 다른 배합설계 및 환경에서 타설되어 제작되었기 때문에 서로 다른 P파 속도를 가지고 있다. 이를 측정하기 위하여 시험부재 I의 감지점 A1, 시험부재 II의 감지점 D1, 시험부재 III의 감지점 T1에서 측정된 정규화된 파워 스펙트럼을 사용하였다(Fig. 5). 본 연구에서 사용된 모든 파워 스펙트럼은 시험체의 두께에 해당하는 공진주파수에서의 진폭으로 정규화하여 사용하였다.

각 감지점에서 최대 진폭을 가지는 주파수는 감지점 A1에서 6.78KHz, 감지점 D1에서 6.14KHz 그리고 감지점 T1에서 1.60KHz이다. 이로부터 각 감지점에서의 기지의 두께(A1:30cm, D1:30cm, T1:120cm)를 이용하여 P파의 속도를 계산하면 시험부재 I, II, III에서 각각 4070m/sec, 3686m/sec, 3840m/sec가 된다.

### 4.2 가진 주파수의 영향

IE기법에서 가장 이상적인 가진원은 관심 주파수 영역진체에 걸쳐 충분한 에너지를 균등하게 분포시켜야 한다. 강철구는 이러한 관점에서 훌륭한 가진원이라 할 수 있으나, Table 1에서 보는 바와 같이 강철구의 직경에 따른 한계주파수가 존재하며 주파수별 에너지의 분포가 다르다. 따라서 시험부재의 크기 및 대상공동의 깊이에 따라 강철구의 직경을 변화시켜야 한다.

Fig. 6은 깊이 17cm인 공동위에 위치한 감지점 B3에서 6개의 강철구를 사용하여 얻은 파워스펙트럼을 비교하였다. P파 속도를 4070m/sec로 볼 때

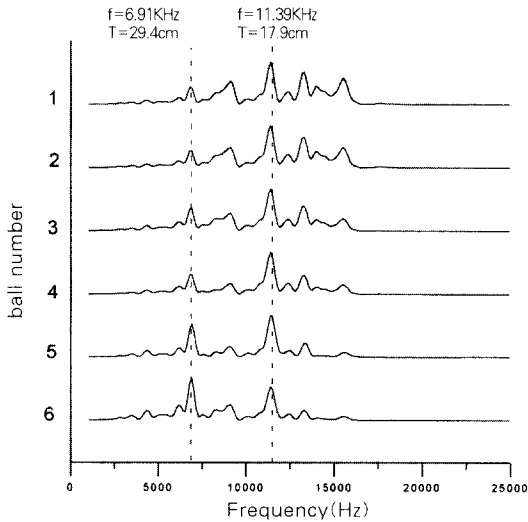


Fig. 6 Power spectrum at receiver B3 in test specimen using 6 steel ball with different diameter

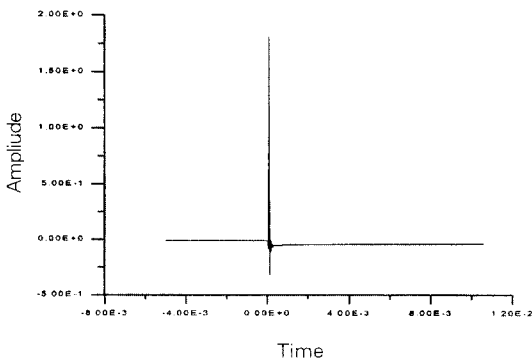
예상되는 공진주파수는 11.97KHz이다. 강철구 6개 모두의 한계주파수가 공진주파수보다 크며, 공동의 깊이에 해당하는 11.39KHz에서 공진을 나타낸다. 한편 공동깊이에 해당하는 공진주파수 이외에 6.91KHz에서 peak값을 가짐을 볼 수 있다. 이는 공동과 콘크리트매질이 이루는 불연속경계면에서 표면 가진원으로부터 전파되어 가는 파의 에너지중 일부가 반사되고 나머지 에너지는 콘크리트 시험부재의 바닥으로부터 반사되어 표면으로 돌아오기 때문이다.

강철구의 직경이 커질수록 시험체 바닥에 해당하

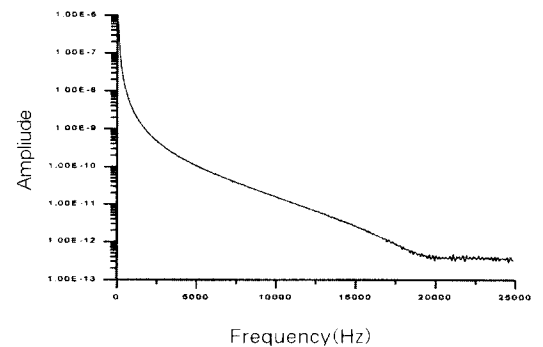
는 공진주파수인 6.91KHz에서의 peak값의 상대적 크기가 증가하며 약 12KHz 이상의 주파수 영역에서는 진폭 크기가 감소한다. 이는 강철구의 직경이 증가함에 따라 고주파수영역에 분포하는 에너지가 점점 감소하기 때문이다. 그러나 강철구에 의한 가진력의 주파수 영역에서의 에너지 분포를 직접 측정할 수 없으므로 가진주파수의 영향을 정량화할 수 없었다.

본 연구에서는 가진력의 주파수 특성을 얻기 위하여 Instrument Hammer를 병행하여 사용하였다. Fig. 7은 Instrument Hammer에 의해 측정된 시험부재 표면에 가해지는 충격의 전형적인 시간영역 기록과 주파수 영역에서의 에너지 분포이다. 이 그림을 보면 낮은 주파수 영역에서 높은 주파수 영역에 비하여 더 많은 에너지가 분포함을 볼 수 있다. 따라서 각 감지점에서 얻어진 신호의 파워 스펙트럼을 사용할 경우 낮은 주파수 영역에서 발생하는 flexural mode에 해당하는 공진이 이보다 높은 주파수영역에서 존재하는 관측두께에 해당하는 P파의 공진에 의한 진폭보다 과장되게 나타난다. 따라서 관측두께에 해당하는 P파의 공진주파수가 높은 주파수 영역에 위치할수록 파워 스펙트럼으로부터 그 주파수를 찾아내기가 어려워진다.

이러한 가진원의 주파수 특성에 따른 영향은 감지기에서 얻은 신호를 주파수 영역에서 가진원의 에너지로 정규화한 주파수응답함수를 이용하여 제거할 수 있다. Fig. 8은 시험부재 II의 두께 10cm인 구역에 위치하는 감지점 D2에서 얻어진 시간영역 결과의 파워 스펙트럼과 주파수응답함수이다. 파워 스펙트

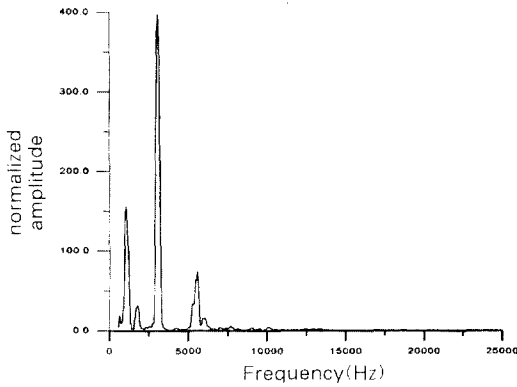


(a) Signal in the time domain

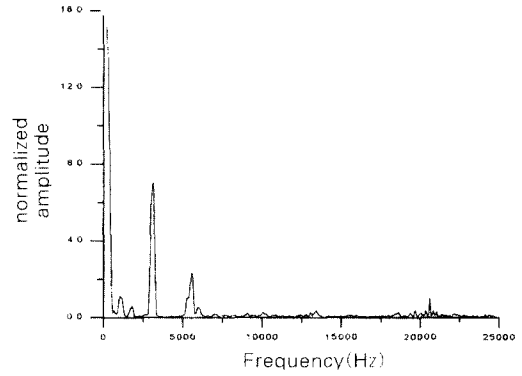


(b) Signal in the frequency domain

Fig. 7 Signal of mechanical disturbance by instrument hammer in the time domain and frequency domain



(a) Power spectrum



(b) Frequency responses spectrum

Fig. 8 Power spectrum and frequency Responses at receiver D2 in test specimen II

럼에서는 관측두께 10cm에 해당하는 주파수 영역 즉 20KHz부근의 peak값을 찾아볼 수 없고 flexural mode 해당하는 것으로 생각되는 6KHz이하의 peak값들을 얻을 수 있었다.

감지점 D2에 가해진 가진원의 주파수 특성을 보면 (Fig. 7(b)) 20KHz부근에 비하여 대략 6KHz 이하의 부분이 거의 100배 이상의 에너지를 가지고 있음을 알 수 있다. 파워 스펙트럼은 이러한 가진원의 주파수 특성을 고려하지 못하기 때문에 flexural mode 해당하는 것으로 생각되는 6KHz 이하의 peak값들이 실제보다 더 과장되는 잘못된 결과를 줄 수 있으나 주파수응답함수를 사용하면 관측두께 10cm에서 peak값을 얻을 수 있다.

### 4.3 공동의 위치 측정

시험부재 I에서의 공동의 위치를 측정하기 위하여 Fig. 2에서 보는 바와 같은 감지점 B1에서 B10까지 10개의 감지점에서 실험을 수행하였다.

충격반향기법을 사용하여 찾을 수 있는 공동의 크기 및 위치는 가진원의 주파수성분과 관계가 있다. 콘크리트 시험부재 표면의 가진에 의해 발생하는 P파는 구형의 형태로 전파되기 때문에 깊이가 증가할수록 전파되는 에너지는 시험부재 내부의 넓은 영역에 걸쳐 분포한다. 따라서 전파되는 파의 파장이 공동의 치수와 같거나 작은 경우에만 공동으로부터 충분한 양의 에너지가 반사되어 표면으로 돌아온다.

Fig. 9와 Fig. 10은 공동깊이 17cm와 10cm에서 시험한 파워스펙트럼을 나타낸다. 정규화된 파워 스펙트럼에서 최대진폭을 가지는 공진주파수와 이 공진주파수에 해당하는 두께를 식 (1)을 사용하여 계산한 결과를 Table 2와 Table 3에 나타내었다. 실험 결과에 의하면 충격반향기법이 공동의 위치를 1cm 내외의 오차범위내에서 비교적 정확히 찾을 수 있음을 알았고, 감지점의 위치를 변화시키며 데이터를 연속적으로 획득하면 시험대상체의 건진도를 신속하게

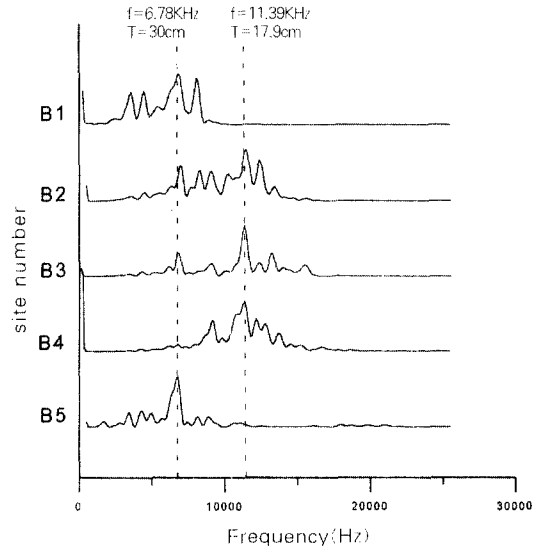


Fig. 9 Power spectrum receiver B1 B2 B3 B4 B5 in test specimen I

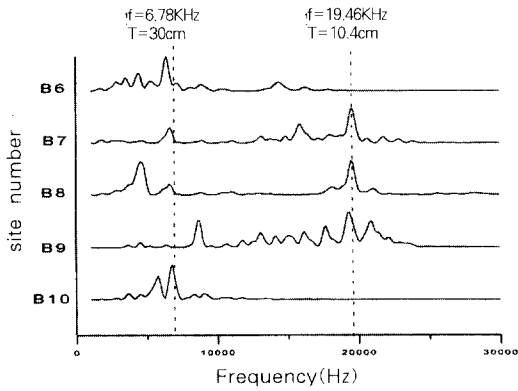


Fig. 10 Power spectrum at receiver B6 B7 B8 B9 B10 in test specimen I

Table 2 Resonant Frequency and depth at receiver B1-B5

Receiver Number	Resonant Frequency (KHz)	Depth (cm)
B1	6.78	30.0
B2	11.39	17.8
B3	11.39	17.8
B4	11.39	17.8
B5	6.78	30.0

Table 3 Resonant Frequency and depth at receiver B6-B10

Receiver Number	Resonant Frequency (KHz)	Depth (cm)
B6	6.40	31.8
B7	19.46	10.5
B8	19.46	10.5
B9	19.46	10.5
B10	6.78	30.0

검사할 수 있다.

#### 4.4 시험부재의 두께측정

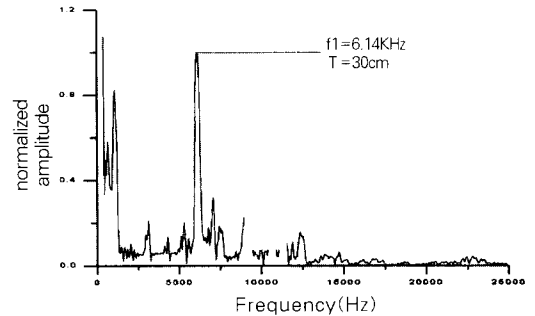
시험부재 II의 감지점 D1, D2, D3에서 시험한 정규화된 주파수응답함수를 Fig. 11에 나타내었고 최대 진폭을 가지는 공진주파수와 식 (1)을 사용하여

Table 4 Resonant Frequency and depth at receiver D1, D2, D3

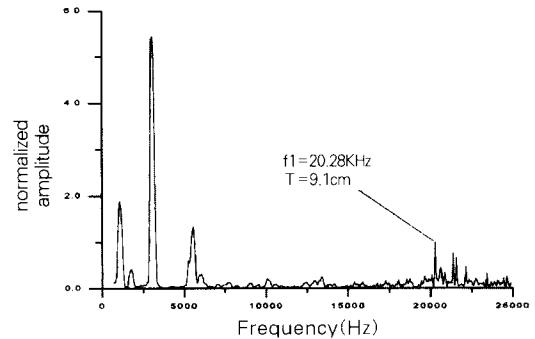
Receiver Number	Resonant Frequency (KHz)	Depth (cm)
D1	6.14	30.0
D2	20.28	9.1
D3	10.88	16.9

계산한 최대 공진주파수에 해당하는 두께를 Table 4에 나타내었다.

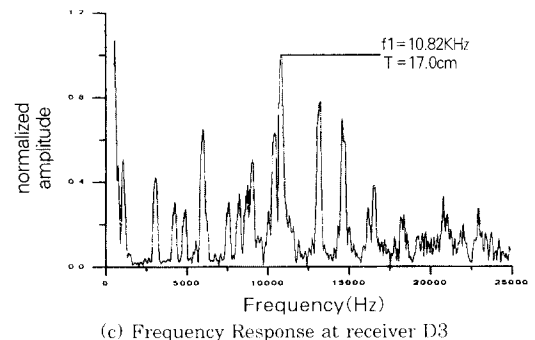
실험결과에 의하면 D1에서 측정된 P파 속도를 사용하여 계산한 감지점 D2, D3에서 계산된 결과가 그리 정확하지 않음을 볼 수 있다. 이러한 오류의 원인은 일차적으로 각 감지점에서 두께를 측정할 때 감지점 D1에서 측정된 파의 전파속도를 부재 전체에서 같다고 보고 사용하였기 때문으로 판단된다.



(a) Frequency Response at receiver D1



(b) Frequency Response at receiver D2



(c) Frequency Response at receiver D3

Fig. 11 Frequency Response at receiver D1, D2, D3 in test specimen I



또한, Fig. 11에 의하면 시험부재의 두께에 해당하는 주파수대역 이외에서 많은 공진이 발생함을 알 수 있다. 현단계에서는 구조물자체의 flexural mode에 의한 공진이나 시험부재의 복잡한 형상에 따른 관심있는 부재바닥면 이외의 경계로부터의 다중반사(cross-sectional mode)에 의한 공진으로 생각된다. 실제 현장적용의 경우 이들 공진현상은 시험결과 분석에 많은 혼란을 야기할 것으로 생각되며 따라서 추후에 부재유형별 수치해석을 통한 예비적인 파형분석을 통해 이들 공진현상을 구별해야 할 것으로 생각된다.

시험부재 III의 두께 측정을 위하여 감지점 T6에서 실험을 수행하였다. 각각의 정규화된 파워 스펙트럼을 Fig. 12에 나타내었고 식 (1)을 사용하여 두께를 계산한 결과를 Table 5에 나타내었다. 감지점 T1, T2, T6에서 계산된 두께는 거의 실제 값과 같으나 감지점 T3, T4, T5에서 계산된 두께가 실제보다 큰 값을 보인다. 이러한 값을 가지는 이유는 파의 전파속도가 감소하기 때문으로 판단된다.

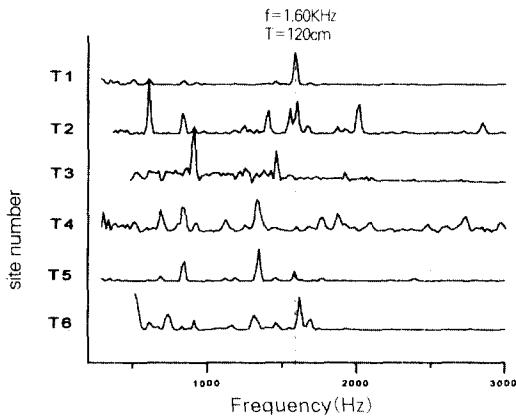


Fig. 12 Power spectrum at receiver T1, T2, T3, T4, T5 in test specimen III

Table 5 Resonant Frequency and depth at receiver  $B_1-B_6$

Receiver Number	Resonant Frequency(KHz)	depth(cm)
T1	1.60	120.0
T2	1.60	120.0
T3	1.46	131.9
T4	1.33	144.6
T5	1.34	142.9
T6	1.62	118.8

콘크리트 시험부재 표면의 가진에 의해 발생하는 P파는 구형의 형태로 전파되어 나가기 때문에 깊이가 증가할 수록 전파되는 에너지는 시험부재 내부의 넓은 영역에 걸쳐 분포된다<sup>5)</sup>. 따라서 불량콘크리트 바로 옆에 위치하는 감지점 T4, T5에서 가진에 의해 발생하는 P파의 에너지는 매질내부로 전파됨에 따라 정상적인 콘크리트와 불량콘크리트에 걸쳐 분포한다. 따라서 P파의 속도는 정상적인 콘크리트의 밀도와 탄성계수뿐만 아니라 불량콘크리트의 밀도와 탄성계수의 영향을 받게 되며 정상적인 콘크리트에서의 P파 전파속도보다 작은 전파속도를 가지게 된다. 또한 감지점 T3는 모서리에 위치하기 때문에 파의 전파속도는 감지점 T1, T2, T6에 비해 작은 값을 가지게 된다.

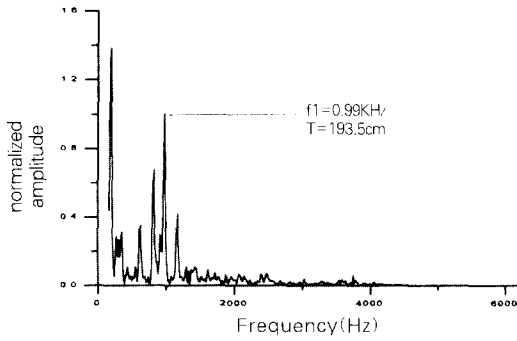
Fig. 12에 의하면 깊이 120cm에 대한 공진 주파수보다 낮은 1000Hz 미만의 주파수 영역에서 진폭이 큰 공진이 존재하는데 이는 부재 자체의 flexural 모드나 cross-sectional 모드에 의한 것으로 생각된다.

#### 4.5 불량콘크리트의 위치 및 강성도 추정

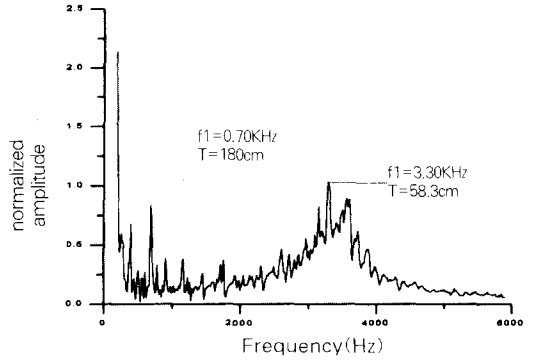
콘크리트 시험부재 내부에 존재하는 불량 콘크리트의 위치 및 강성도 추정을 위해 시험부재 III에 감지점 P1, P2를 설치하여 IE기법에 의한 실험을 수행하였다.

감지점 P1은 두께가 약 1.8m인 콘크리트 지역으로서 감지점 P1에서의 정규화된 주파수응답함수(Fig. 13(a))를 보면 0.99KHz에서 최대진폭주파수를 가진다. 이에 해당하는 두께는 식 (1)을 사용하여 계산하면 193.5cm로서 실제 두께인 180cm에 비해 약 7.5%의 차이를 보인다. 이러한 값의 차이는 4.4절에서 언급한 여러 요인에 의한 것으로 생각된다.

감지점 P2가 위치하는 구역에는 3개의 반사층(표면의 콘크리트와 불량콘크리트사이의 경계층, 불량콘크리트와 반대편 콘크리트 구역사이의 경계층, 반대쪽 콘크리트와 대기와의 경계층)이 존재한다. 감지점 P2에서 입사한 P파는 매질내부에 존재하는 각각의 경계층에서 반사 및 굴절을 일으키며 진행한다. Fig. 13(b)을 보면 0.70KHz와 3.30KHz에서 peak값을 가짐을 볼 수 있다. 공진주파수 3.30KHz



(a) Frequency Response at receiver P1



(a) Frequency Response at receiver P2

Fig. 13 Frequency Response at receiver P1, P2, P3 in test specimen III

는 깊이 58.3cm에 해당하는 공진주파수로서 첫 번째 경계면까지의 깊이를 거의 정확히 나타내고 있다. 공진주파수 0.70KHz는 깊이 180cm에 해당하는 공진주파수로서 감지점 P1에서 얻은 전체 두께, 180cm에 해당하는 공진주파수에 비하여 그 크기가 작다. 이는 감지점이 설치되어 있는 표면과 반대쪽 표면 사이에 존재하는 모래+시멘트 구역 때문이다.

이와 같이 시험부재 내부에 강성도가 틀린 어떤 구역이 존재할 경우 그 구역의 위치 및 두께 또는 그 구역에서의 파전파속도 측정을 통한 강성도를 다음과 같은 과정을 통하여 추정할 수 있다.

전체 두께,  $T = X + Y + Z$  (Fig. 4)에 해당하는 공진주파수  $f$

$$f_i = \frac{1}{t_x + t_y + t_z} \quad (6)$$

각각의 구역에서 파가 전파되는데 걸리는 시간.

$$t_x = \frac{2X}{V_{cp}}, \quad t_y = \frac{2Y}{V_{mp}}, \quad t_z = \frac{2Z}{V_{cp}} \quad (7)$$

$V_{cp}$ : 콘크리트 매질 내에서의 P파의 전파속도

$V_{mp}$ : 불량콘크리트 매질 내에서의 P파의 전파속도

식 (7)을 식 (6)에 대입하여 정리하면

$$f_i = 0.5 \frac{V_{cp} \cdot V_{mp}}{(T - Y) \cdot V_{mp} + Y \cdot V_{cp}} \quad (8)$$

불량콘크리트층의 두께,  $Y$

$$Y = \left( \frac{V_{cp} \cdot V_{mp}}{2 \cdot f_i} - T \cdot V_{mp} \right) \frac{1}{V_{cp} - V_{mp}} \quad (9)$$

불량콘크리트층에서의 P파의 전파속도,

$$V_{mp} = \frac{V_{cp} \cdot Y}{\frac{V_{cp}}{2f_i} - T + Y} \quad (10)$$

을 얻을 수 있다. 전체두께(감지점 P1등과 같은 부결함 콘크리트 단면에서의 시험을 통하여 얻을 수 있다)와 불량콘크리트층에서의 파의 전파속도를 알면 식 (9)를 사용하여 콘크리트 매질내부에 존재하는 불량콘크리트의 위치, 분포된 정도를 알 수 있다. 또한 전체두께와 불량콘크리트층이 분포된 두께를 알면 식 (10)을 이용하여 불량콘크리트층에서의 파의 전파속도를 알 수 있으며 이를 통하여 불량콘크리트층에서의 강성도를 식 (3), (4), (5)를 사용하여 구할 수 있다.

감지점 P2에서 얻은 결과와 식 (9)와 식 (10)을 이용하여 불량콘크리트층에서의 파의 전파속도, 불량콘크리트층까지의 깊이 및 층의 두께를 계산하면 감지점이 부착되어 있는 표면으로부터 깊이 약 58.3cm에 두께가 약 60.4cm이고 P파 전파속도가 약 1500m/sec인 불량콘크리트층이 존재함을 알 수 있다.

## 6. 결론 및 추후과제

본 논문은 응력파를 이용한 비파괴 검사법인 충격 반향기법을 이용하여 콘크리트부재의 공동, 불량콘크리트의 위치 및 콘크리트의 강성도 추정에 관한 연구를 수행하였다. 연구결과 얻어진 결론과 추후연구과제를 살펴보면 다음과 같다.

1. 콘크리트 부재의 두께나 부재의 내부에 존재하는 공동, 불량콘크리트의 위치 및 강성도를 추정하는데 있어 충격반향기법의 가능성을 확인하였다.

2. 충격반향기법에서의 가진원은 관심주파수영역 전체에 걸쳐 충분한 에너지가 균등하게 분포하여야 한다.

3. Instrument hammer를 사용하는 경우 각 주파수에서 가진력의 크기로 정규화된 주파수응답함수를 사용하여 좋은 결과를 얻을 수 있다. 향후 신호 발생기와 압전식 가진원을 사용하여 인위적인 오차요인을 제거하고 실험결과의 반복재현성을 향상시킬 계획이다.

4. 충격반향기법을 수행할 때 관심 있는 경계면에서의 P파의 공진이외에 구조물 자체의 flexural mode에 의한 공진이나 다른 경계면으로부터의 다중 반사에 의한 공진이 존재한다. 이러한 공진현상들은 부재의 유형별로 FEM 등의 수치해석을 통한 예비적인 파형분석을 통하여 구별할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. Bay, J. A., and Stokoe, K. H. II. "Field and laboratory Determination of Elastic Properties of Portland Cement Concrete Using Seismic Techniques". In Transportation Research Record 1355, pp. 67-74.
2. Carino, N. J., and Sansalone, M., "Detection of Void in Grouted Ducts Using the Impact-Echo Method", ACI Material Journal, V.89, No3, May.1992, pp. 296-303.
3. Carino, N. J., Sansalone, M., and Hsu, N. N., "Point Source - Point Receiver Technique for Flaw Detection in Concrete", ACI JOURNAL, Proceedings V. 83, No. 2, Apr. 1986, pp. 199-208.
4. Pessiki, S. P., and Carino, N. J., "Setting Time and Strength of Concrete Using the Impact Echo Method", ACI Material Journal, V. 85, No. 4, Sep-Oct. 1988.
5. Richart, F. E., Jr., Hall, J. R., Jr., and Woods, R. D., "Vibrations of Soils and Foundations", Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1970, 414p.
6. Sansalone, M., and Carino, N. J., "Detecting Delaminations in Concrete Slabs with and without Overlays Using the Impact Echo Method", ACI Materials Journal, V. 83, No. 2, Mar.-Apr. 1989, pp. 175-184.
7. Sansalone, M., and Carino, N. J., "Impact-Echo Method : Detecting Honeycombing, the depth of Surface-opening Cracks, and UngROUTED Ducts", Concrete International: Design & Construction, V. 10, No. 4, Apr. 1988, pp 38-46.
8. Yinchng Lin and Sansalone, M., "Detecting Flaws in Concrete Beams and Columns Using the Impact-Echo Method", ACI Materials Journal, V. 89, No. 4, Jul.-Aug. 1992, pp. 394-405.

(접수일자 : 1997. 1. 27)