

# 충격반향기법과 표면파기법을 이용한 콘크리트 부재의 비파괴 검사

## Nondestructive Evaluation of Concrete Members using Impact Echo and SASW Methods

김동수\*                      박형준\*\*                      이광명\*\*\*  
Kim, Dong Soo      Park, Hyung Choon      Lee, Kwang Myong

### 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 and SASW methods are introduced. Both techniques are based on the stress wave propagations. Experimental tests were performed using beam type concrete member where voids and cracks are included. Within reasonable accuracy, void locations were detected using impact echo method and the dynamic modulus of concrete were measured using SASW method. Both NDT methods showed a feasibility for the implementation into quality evaluation of concrete members in practice

## 1. 서론

구조물의 유지관리 및 사용연한 증진을 위하여 기건설된 구조물의 손상이나 결함, 건설중인 구조물의 적정시공여부등에 대한 객관적인 분석 및 평가를 하는 것은 매우 중요하다. 최근 선진국에서는 재료나 구조물의 손상없이 조사대상물의 성질, 상태등을 알아보기 위한 비파괴 조사기법이 현업에 사용되고 있다. 이 기법은 종전의 다른 기법과는 달리 구조물의 손상없이 특정 장비를 이용하여 조사가 수행되기 때문에 신속하게 이루어질 수 있고, 육안으로 볼 수 없는 내부의 결함이나 손상 등을 탐지 할 수 있으며, 조사결과의 객관성을

높일 수 있기 때문에 매우 유용한 기법으로 알려져 있다.(1, 2) 본 연구에서는 응력파를 이용한 비파괴 검사법인 충격반향기법(Impact Echo)과 표면파기법(Spectral Analysis of Surface Wave)을 이용하여 콘크리트부재의 공동과 균열위치 및 콘크리트의 강성도를 추정하고자 한다.

## 2. 응력파를 이용한 비파괴 검사기법

매질을 따라 전파하는 응력파는 매질내부를, 따라 전파하는 체적파(P파와 S파)와 매질표면을 따라 전파하는 표면파로 나눌 수 있다. 충격반향기법에서는 P파의 속도를 이용하고 표면파기법에서는 표면파의 분산특성을 이용한다.

### 2.1 충격반향(IE)기법

시험체 표면에 충격하중이 가해질 때 생

\* 한국과학기술원 토목공학과 조교수  
\*\* 한국과학기술원 토목공학과 석사과정  
\*\*\* 성균관대학교 토목공학과 조교수

기는 P파는 시험체내의 균열, 공동과 같은 불연속 경계에서 반사되어 표면으로 돌아오며, 다시 표면에서 반사되어 매질속으로 전파된다(그림 1). 이러한 표면파 매질내의 불연속 경계사이에서 파의 다중반사에 의해 생기는 표면의 변위는 주기성을 가진다. 따라서 표면변위의 power spectrum은 첫 번째 모드의 공진 주파수에서 최대진폭을 보인다. 이러한 첫 번째 모드의 공진주파수,  $f_1$ , 파의 속도,  $V_p$ , 표면에서 불연속 경계까지의 깊이, T, 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다

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

식 1을 사용하여 시험체의 치수를 알고 있을 경우 구성재료의 강성도 결정을 통한 콘크리트의 불량도를 추정할 수 있고 재료의 P파 전파속도를 알고 있다면 반사파의 도달시간을 측정하여 시험체 내부에 존재하는 불연속면의 위치를 알아낼 수 있다. 구성부재의 강성도(동탄성계수)는 P파의 전파속도를 구하여 다음식으로부터 얻는다.

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

$$E = \rho v_c^2 \quad (3)$$

$$M = \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} E \quad (4)$$

여기서

M : constrained modulus

E : Young's modulus

$\rho$  : 밀도

$\nu$  : 포아송비

$v_p$ : 횡방향 변위가 구속된 매질의 P파 속도

$v_c$ : 횡방향 변위가 자유로운 매질의 P파 속도

## 2.2 표면파기법

표면파기법은 층상구조에서 분산된 표면파의 측정과 해석에 그 바탕을 두고 있다. 표면파의 분산은 파의 전파속도가 주파수(또는 파장)에 따라 변하는 것을 의미한다. 이러한 분산특성은 깊이에 따른 표면파성분입자의 거동분포에 기인한다. 파장이 증가함에 따라 시험체단면의 점점 깊은 곳에서 입자의 거동이 생긴다. 표면파의 속도는 이러한 입자의 거동이 나타나는 깊이(약한 파장길이)까지의 재료의 강성도에 의해 대표된다.

표면파기법의 장비 구성은 그림 2와 같다. 충격하중에 의해 생기는 응력파는 두개의 감지기에 의하여 감지된다. 표면파는 여러가지 주파수 성분으로 구성되어 있으며 이러한 각 주파수 성분의 속도를 위상속도(phase velocity)라고 한다. 위상속도는 각 주파수 성분의 파가 두개의 감지기 사이를 통과하는데 걸리는 시간을 측정하여 결정한다. 다층구조의 경우 깊이에 따라 물성치가 변하기 때문에 파장이 변함에 따라 파속이 변하는 분산특성을 보인다. 분산곡선이 정해지면 시험부재의 기하학적구조(각 층의 두께) 및 물성치를 역산에 의해 구한다. 이렇게 얻어진 표면파 속도를 이용하여 다음의 식으로 탄성계수, E와 전단탄성계수, G를 구할 수 있다.

$$V_s = CV_R \quad (5)$$

$$G = \rho V_s^2 \quad (6)$$

$$E = 2G(1+\nu) \quad (7)$$

여기서 C는 포아송비의 함수로서 대략 1.047에서 1.144사이의 값을 가진다.

## 3. 실험계획 및 결과분석

### 3.1 시험부재

실험을 위하여 길이 100cm, 폭 40cm, 두께 30cm 의 콘크리트 시험부재를 제작하여

A, B, C 세구역으로 나누어 실험을 수행하였다. A구역은 무결함부위, B구역은 공동부위, C구역은 연직 균열부위를 나타낸다. 시험부재의 형상은 그림 3에 나타내었다.

### 3.2 실험상비

본 연구에서 PCB사의 353B15 가속도계와 HP사의 35665A Dynamic Signal Analyzer를 사용하여 실험을 수행하였다. 가진원으로는 직경이 다른 6개의 강철구를 사용하였다. 각 강철구의 직경 및 발생가능한 가장 높은 주파수성분은 표1에 주어져 있다.

표 1. 강철구의 직경 및 발생가능 최대 주파수

번호	직경(mm)	최대 주파수(KHz)
1	4.76	43.09
2	6.32	32.46
3	7.99	25.67
4	9.25	22.18
5	10.99	18.66
6	14.28	14.36

### 3.3 실험방법

무결함 단면인 A구역에서 충격반향실험을 위한 콘크리트 부재의 P파속도를 측정하였고 연직방향의 균열이 있을때의 분산곡선과의 비교를 위한 무결함단면의 분산곡선을 얻기 위해 표면파 실험을 수행하였다. B구역에는 각각의 공동위에 4cm간격의 감지점(B1 ~B5, B6 ~B10)을 5개씩 설치하여 충격반향기법에 의한 공동측정 실험을 수행하였다. C구역에서는 연직균열의 유무 및 깊이추정을 위하여 감지점의 중심이 연직균열 위에 위치하게 하여 표면파실험을 수행하였다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 공동 위치 추정

#### - P파의 속도 측정

감지점 A1에서 측정된 첫번째 모드의 공진주파수 6.78KHz와 부재의 두께 30cm를 이용하여 P파의 속도를 계산하면 4070 m/sec 가 된다.

#### - 가진 주파수의 영향

본 연구에서 가진원으로 사용한 강철구는 표1에서 볼 수 있듯이 강철구의 직경에 따른 한계주파수가 존재하며 이 주파수 이상에서는 분포된 에너지가 상당히 작다. 따라서 만약 찾고자 하는 공동의 깊이에 해당하는 다중반사에 의한 공진주파수가 한계주파수 이상에 존재하면 공동을 찾을 수가 없다. 깊이 10cm인 공동위에 위치하는 감지점 B8에서 P파속도를 4070m/sec로 볼 때 예상되는 공진주파수는 20.3KHz이다. 따라서 20.3KHz이상의 주파수성분을 가지는 가진원을 사용하여야 올바른 결과를 얻을 수 있다. 그림 4를 보면 강철구1에서 강철구5까지는 올바른 결과를 보이거나 한계주파수가 20.3KHz보다 작은 강철구6의 경우 6.9KHz에서 최대진폭을 가진다. 이는 시험체의 바닥과의 다중반사에 의한 최대진폭주파수를 나타낸다.

#### - 공동의 위치 측정

구역B에서 충격반향기법을 적용하여 얻은 결과를 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 감지점B1, B5, B6, B10에서의 최대진폭주파수는 각각 6.78, 6.78, 6.40, 6.78KHz로서 이 값은 깊이30cm(시험체 바닥)에 해당하는 공진주파수이다. 감지점 B2, B3, B4에서의 최대진폭주파수는 모두 11.39KHz로 깊이 17.8cm에 해당하는 공진주파수이며 감지점 B7, B8, B9에서의 최대진폭주파수는 각각 18.30, 18.43, 19.33KHz로 깊이11.1, 11.1, 10.5cm에 해당하는 공진주파수이다. 실험결과에 의하면 충격반향기법이 공동의

위치를 비교적 정확히 찾을 수 있음을 알았고, 감지심의 위치를 변화시키며 데이터를 연속적으로 획득하면 시험대상체의 결선도를 신속하게 검사할 수 있다.

#### 4.2 표면파기법을 이용한 강성도 추정

그림 7에 나타난 분산곡선에서 표면파의 속도는 약 2000 m/sec이다. 대상시험체의 밀도 2360 kg/m<sup>2</sup>와 식5, 6, 7을 사용하면 콘크리트의 동탄성계수 27.4GPa을 얻을 수 있다. 이 값은 정탄성계수시험을 통하여 얻은 값인 24GPa에 비해 다소 큰 값인데 이는 측정이 이루어지는 변형율의 범위가 다르기 때문이다.

#### 4.3 연직방향 균열의 추정

연직방향으로 균열이 있는 매질을 따라 표면파가 전파되는 경우 표면파의 속도는 파장이 길이질수록 균열의 영향을 덜 받게 되며 충분히 파장이 길어지면 균열이 없는 경우의 표면파 속도에 수렴하게 된다. 따라서 무결함 단면의 표면파 속도와 비교하여 속도 차이가 생기는 파장으로부터 균열의 깊이를 추정할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 시험부재의 전체 두께에 비하여 균열의 깊이가 너무 깊고 구역C가 협소하여 충분히 긴 파장의 표면파를 측정할 수 없어 균열깊이는 구하지 못하였고 구역A에서의 표면파 속도(2000m/sec)와 구역C에서의 표면파 속도(320m/sec)의 차이로부터 구역C에서의 균열의 존재만을 알아낼 수 있었다.

### 5. 결론

1. 공동과 균열을 찾는 데 있어 응력파를 이용한 충격반향기법과 표면파기법의 가능성을 확인하였다.
2. 충격반향기법에서의 가진원은 관심주파수영역 전체에 걸쳐 충분한 에너지를 포

함하여야 한다.

3. 충격반향기법은 공동의 위치를 찾아내는 데 효과적임을 확인하였다.
4. 표면파기법을 사용하여 콘크리트의 동탄성계수값을 쉽게 구할 수 있었다.

#### 참고문헌

1. Carino, N.J.; Sansalone, M., "Detection of Void in Grouted Ducts Using the Impact-Echo Method," ACI Material Journal V. 89, No3, May-June, 1992.
2. J. A. Bay and K. H. Stokoe II, "Field and Laboratory Determination of Elastic Properties of Portland Cement Concrete Using Seismic Techniques," In Transportation Research Record 1355.

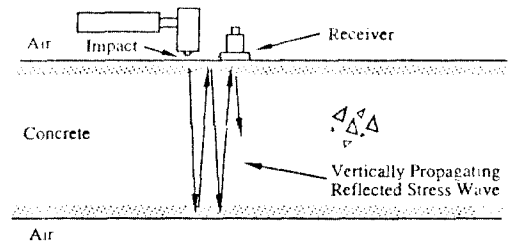


그림 1. 충격반향기법의 장비구성 및 파의 다중반사

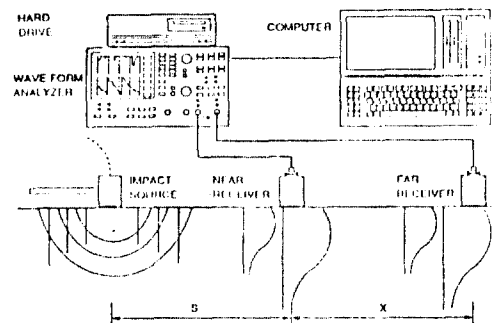
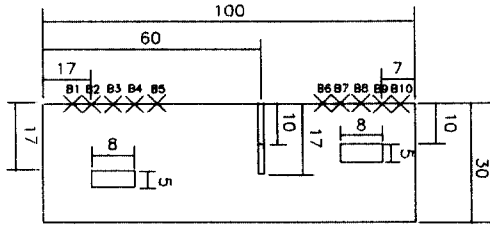
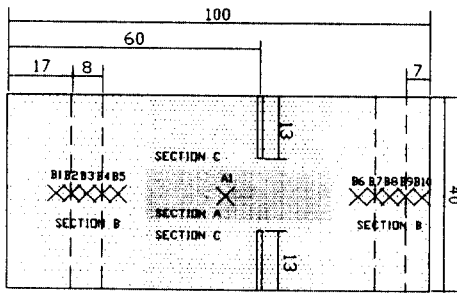


그림 2. 표면파기법의 장비구성

(단위 : cm)



(a) 시험체의 측면도



(b) 시험체의 평면도

그림 3. 시험체의 형상 및 감지점의 위치

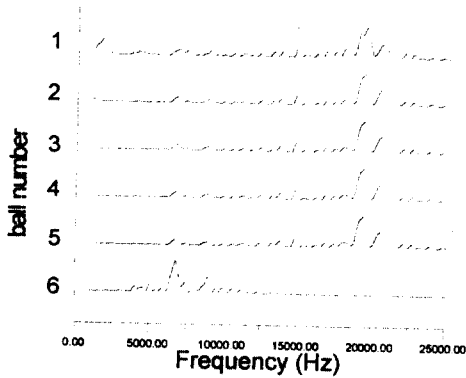


그림 4. 직경이 다른 6개의 강철구를 사용하여 얻은 power spectrum

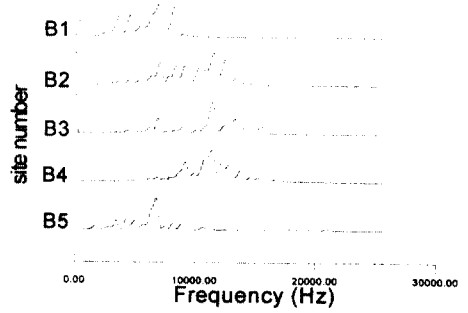


그림 5. 감지점 B1, B2, B3, B4, B5에서의 power spectrum

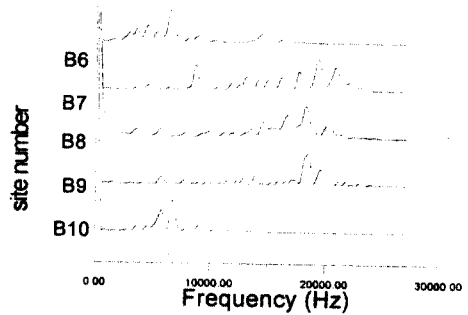
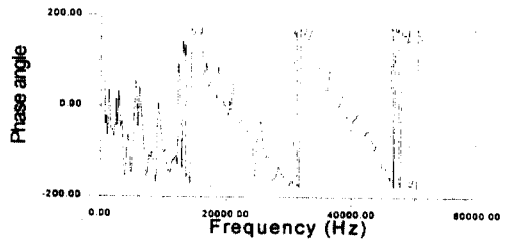
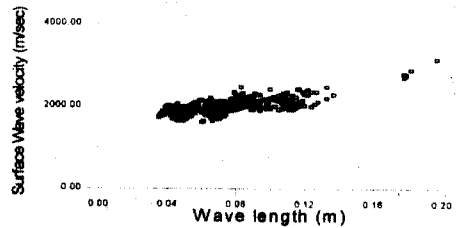


그림 6. 감지점 B6, B7, B8, B9, B10에서의 power spectrum



(a) cross power spectrum



(b) 분산곡선

그림 7. 구역A에서의 cross power spectrum 및 분산곡선