

## 콘크리트 지반구조물의 비파괴검사를 위한 충격반향-표면파 병행기법 : I. 수치해석적 연구

### IE-SASW Method for Nondestructive Testing of Geotechnical Concrete Structure : I. Numerical Studies

김 동 수\*<sup>1</sup> Kim, Dong-Soo

서 원 석\*<sup>2</sup> Seo, Won-Seok

이 광 명\*<sup>3</sup> Lee, Kwang-Myong

#### Abstract

The Impact-Echo(IE) method has been used to evaluate the integrity of concrete structures. In this method, the P-wave velocity of concrete is a crucial parameter in determining the thickness of concrete lining, the location of cracks or other defects. In many field applications of the IE method, the P-wave velocity is obtained by testing the core or the portion of a structure where the exact thickness is known. Occasionally, however, the core can not be obtained in specific structures and the P-wave velocity determined from core testing may not be a representative value of the structure. This study introduces an IE-SASW method that may determine the P-wave velocity on a surface of each testing area using the Spectral Analysis of Surface Wave (SASW) method. Results obtained from numerical studies are presented in this paper (Part I), and results obtained from experimental studies are presented in the companion paper (Part II). In this paper, numerical analyses using ABAQUS were carried out to investigate the effectiveness and the limitations of the IE-SASW method.

#### 요 지

콘크리트 지반구조물의 건전성 평가에 사용되는 충격반향기법에서는 콘크리트의 P파 속도가 부재의 길이 및 결함의 위치를 찾는 데 있어서 매우 중요한 요소이다. 일반적으로 충격반향기법을 현장에 적용시에는 코어를 채취하거나 정확한 두께를 아는 위치에서 콘크리트의 P파 속도를 구한 후 이를 부재의 대표값으로 사용하여 부재의 두께 및 결함을 탐지한다. 그러나 경우에 따라서는 코어를 채취할 수 없고 대형 구조물의 경우 위치에 따라 콘크리트의 P파 속도가 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 표면파기법을 이용하여 시험이 수행되는 위치에서 완전 비파괴적으로 P파 속도를 구하여 충격반향기법에 적용하고자 하였다. 이와 같이 제안된 충격반향-표면파 병행기법의 적용성 연구를 위해 먼저 유한요소법을 이용한 수치해석적 연구의 결과를 본 논문에, 모형부재 제작을 통한 실험연구의 결과를 다음 동반 논문에 소개하고자 한다. 수치해석 연구를 다루는 본 논문에서는, 표면파기법으로부터 P파 속도 추정의 검증을 위해 상용프로그램 ABAQUS를 이용한 슬래브 형태의 구조물의 모델링을 통하여 해석을 수행하였다. 또한 콘크리트와 다른 매질로 이루어진 이질 매질층과 여러 가지 결함 형태를 포함하는 콘크리트 슬래브에 대한 충격반향기법에 대한 수치해석을 수행하여 기법의 적용성을 검증하였다.

\*1 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 (Member, Prof., KAIST, Dept. of Civil and Environmental Engrg., dskim@kaist.ac.kr)

\*2 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Student, KAIST, Dept. of Civil and Environmental Engrg.)

\*3 성균관대학교 토목공학과 부교수 (SungKyunKwan Univ., Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg.)

## 1. 서론

최근 신설 중 구조물의 품질관리 또는 기존 구조물의 유지 및 보수관리가 중요한 문제로 대두되고 있는 실정이며, 옹벽 및 기초슬래브, 현장타설말뚝, 터널라이닝 등과 같은 지반구조물에 있어서도 이를 위한 비파괴검사가 필요한 실정이다. 지반구조물에 있어서 비파괴검사의 효용은 크게 구조물 내부의 공극, 균열, 불량콘크리트 등의 결함을 탐지하거나, 콘크리트와 지반 또는 암반과의 접촉상태를 파악하는 목적으로 고려할 수 있는데, 구조물의 안정측면에서 이는 매우 중요하다.

이와 같은 비파괴검사기법의 일환으로 사용되는 충격반향(IE)기법에서는 일반적으로 코어를 채취하거나 정확한 두께를 알고 있는 위치에서 콘크리트의 파속도를 구한 후 이를 구조물의 대표값으로 사용하여 부재의 두께 및 결함을 탐지한다(Carino 등, 1986). 그러나 경우에 따라서는 방수 및 손상 방지등의 이유에 의해 코어를 채취하지 못할 수도 있고, 같은 구조물이라도 위치에 따라 콘크리트 물성치가 다를 수 있으므로 코어에서 결정된 파속도가 구조물 전체를 대표한다고 볼 수 없다. 따라서 코어를 채취하지 않고 원하는 위치에서 완전 비파괴적으로 구조물의 상태를 신뢰성 있게 검사하는 기법이 필요하다.

지반조사 등에 사용되고 있는 표면파(SASW)기법은 표면에서 발생된 충격에 의한 표면파의 분산특성을 이용하여 재료의 깊이별 파속도와 강성을 파악하는 현장 시험법이다(Heisey 등, 1982). 따라서 표면파기법을 사용하면 코어 채취없이 대상구조물의 표면에서 시험을 수행하여 부재의 깊이별 강성변화를 알아낼 수 있다. 단순히 표면파와 P파의 도달시간 차이를 이용하여 P파 속도를 추정하는 방법(Lin and Sansalone, 1994; Sansalone 등, 1997)은 표면 근처의 콘크리트가 전체 매질을 대표할 수 없을 때에는 사용할 수 없지만 표면파기법은 부재의 전체 깊이에서의 표면파 속도를 얻을 수 있기 때문에 보다 신뢰성 있는 평가를 할 수 있다.

본 연구에서는 표면파기법을 이용하여 시험 위치에서의 P파 속도를 구하고 이를 충격반향기법에 적용하는 IE-SASW 병행기법을 제안하고자 한다. 이와 같이 제안

된 충격반향-표면파 병행기법의 적용성 연구를 위해 먼저 유한요소법을 이용한 수치해석적 연구의 결과를 본 논문에, 그리고 모형부재 제작을 통한 연구의 결과를 다음 동반 논문에 소개하고자 한다. 본 논문에서는 충격반향기법과 표면파기법의 이론적 배경과 실험방법을 간단히 설명하였고 IE-SASW 병행기법의 적용성 검증을 위한 예비단계로 상용프로그램 ABAQUS를 이용한 슬래브 형태의 구조물의 모델링을 통하여 수치해석을 수행하였다.

## 2. 비파괴시험기법

### 2.1 충격반향(IE)기법

시험체 표면의 한점에서 기계적 충격을 가하면 시험체 내부로 전파되는 응력파는 시험체 내부의 균열, 또는 공동과 같은 결함에 의한 불연속면이나 내부 및 외부의 이질 매질층 사이의 경계면에서 반사되어 표면으로 돌아온다. 따라서 응력파가 발생한 표면과 내부 결함 또는 외부 경계면 사이에는 다중 반사에 의한 공진 상태가 유발된다. 이때 표면에서 감지기가 가진원 근처에 위치하면 반사된 P파에 의한 표면 변위가 S파에 의한 표면 변위보다 훨씬 크므로, 감지되는 파형은 P파에 의한 파형으로 볼 수 있다. 그림 1은 충격반향기법의 개요도를 나타낸 것이다(Carino 등, 1986; Lin 등, 1992).

표면위의 감지기에 의하여 측정되는 시간영역에서의 기록을 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform)을 사용하여 주파수 영역으로 변환하면 다중반사에 의한 공진주파수를 얻게 된다. 이와같이 주파수 영역에서 해석

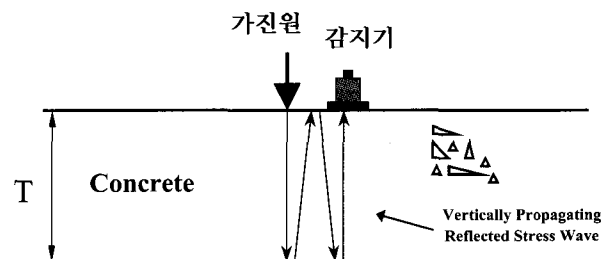


그림 1. 충격반향기법의 개요도

하는 이유는 시간영역에서는 반사파의 도달시간을 명확히 찾아낼 수 없는 반면에 주파수영역에서는 공진주파수를 쉽게 얻을 수 있어 반사파의 도달 주기를 결정할 수 있기 때문이다.

충격반향기법의 적용시에 첫 번째 모드의 파장과 두께(관심의 대상인 균열, 공동, 이질 매질층 등으로부터 감지기가 부착되어 있는 표면까지의 거리, T) 사이의 관계는 경계 조건에 의해서 결정되는데, 이러한 경계 조건은 크게 자유단-자유단과 자유단-고정단이다. 자유단-자유단과 같은 경계 조건은 공동, 균열 등이 존재할 때의 경계 조건으로서 매질의 P파 전파 속도를 알고 있을 때 이질 매질층까지의 두께 T는 다음 식에 의하여 구할 수 있다.

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

여기서  $V_p$ 는 매질의 P파 속도를,  $f_1$ 은 1차 모드에 의한 공진주파수를 나타낸다.

한편, 자유단-고정단과 같은 경계 조건은 매질 내부에 매질에 비해 현저하게 강성도가 큰 이질 매질이 존재할 때의 조건으로, 콘크리트 구조물이 콘크리트보다 임피던스가 큰 매질에 접해있는 경계 조건이다. 터널라이닝이 암반에 밀착된 경우나 콘크리트 말뚝이 암반에 근입된 경우 등이 이에 속한다. 매질의 P파 전파 속도를 알고 있을 때 이질 매질층까지의 두께 T는 다음 식에 의하여 구할 수 있다.

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

두 개의 층으로 이루어진 부재에서는 이론적으로 두 개의 공진 주파수가 존재하게 된다. 두 층의 경계로부터 반사된 반사파에 해당하는 주파수와 전체 층에 대한 공진 주파수가 그것이다. 경계층으로부터 반사된 파에 의한 공진 주파수는 경계 조건에 따라 식 (1) 또는 식 (2)로부터 계산할 수 있고 전체층에 대한 공진주파수는 다음의 식으로 알아낼 수 있다.

$$f_T = \frac{1}{t_1 + t_2} \quad (3)$$

여기서  $t_1$ ,  $t_2$ 는 층1과 층2에서 파가 전파되는데 걸리는 시간으로 다음과 같다.

$$t_1 = \frac{2T_1}{V_{P1}}, \quad t_2 = \frac{2T_2}{V_{P2}} \quad (4)$$

여기서,  $T_1$ 과  $T_2$ 는 각각 층1과 층2의 두께를,  $V_{P1}$ 과  $V_{P2}$ 는 각각 층1과 층2의 P파 속도를 나타낸다. 식 (4)를 식 (3)에 대입하면 다음과 같이 전체층에 해당하는 공진주파수를 이끌어낼 수 있다(Sansalone 등, 1997).

$$f_T = \frac{1}{\frac{2T_1}{V_{P1}} + \frac{2T_2}{V_{P2}}} \quad (5)$$

## 2.2 표면파(SASW)기법

표면파기법(SASW, Spectral Analysis of Surface Wave Method)이란 표면파의 분산 특성을 이용하여 재료의 파속도와 강성을 파악하는 현장시험법이다. 표면파의 에너지는 깊이방향을 따라 표면으로부터 지수함수적인 감쇠를 나타내며 파에너지의 대부분은 거의 한 파장에 해당되는 깊이 안에 존재한다. 그러므로 다층구조에서 표면파시험을 수행하면 첫 번째 층 두께보다 짧은 파장을 가지는 파에 의한 입자거동은 첫 번째 층에만 국한되므로, 파의 속도는 첫 번째 층의 강성도에만 영향을 받는다. 그러나 파장의 길이가 증가함에 따라 입자의 거동은 첫 번째층 하부의 층의 성질에도 영향을 받게 된다. 따라서 층상구조 매질에서 파의 전파속도는 파장의 길이(또는 주파수)에 따라 변하는 분산특성을 갖게된다. 그러므로 파장 길이에 대한 표면파 속도를 측정하여 깊이에 따른 각 층의 강성도를 추정하는 것이 가능하다(Heisey 등, 1982).

일반적으로 다층 구조에서 표면파기법을 수행하여 각 층에 따른 물성치를 구하기 위해서는 실험분산곡선과 이론분산곡선을 비교하여 일치할때까지 반복 계산하는 역산과정이 필요하다(Joh, 1996). 그러나 콘크리트 구조물은 일반적으로 단일층으로 구성되어 있기 때문에 콘크리트 구조물에서 표면파기법을 적용할 때는 역산기법을 수행하지 않고도 실험분산곡선만으로 쉽게 표면파 속도를 구할 수 있다. 표면파 속도로부터 P파 속도를 구하는 방법은 다음과 같다.

반무한체 매질을 통해 전파되는 표면파(Rayleigh wave)의 속도 ( $V_R$ )는 포아송비 ( $\nu$ )의 함수로서 S파의 속도 ( $V_S$ )와 다음과 같은 상관관계가 있다(Richart et al, 1970, Sansalone 등, 1994).

$$V_s = \frac{1+\nu}{0.87+1.12\nu} V_R \quad (6)$$

또한, S파의 속도 ( $V_s$ )는 매질의 전단탄성계수와 밀도 ( $\rho$ )에 의해서 결정된다.

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (7)$$

여기서, 전단탄성계수  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$  이다. P파의 속도 ( $V_p$ )는 측방향 변위가 구속되어 있는 경우로서 다음과 같다.

$$V_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (8)$$

즉, 식 (6)으로부터  $V_R$ 을 구하면 식 (7)과 식 (8)의 관계를 이용하여 다음과 같이 매질의 P파 속도  $V_p$ 를 결정할 수 있다.

$$V_p = \frac{1+\nu}{0.87+1.12\nu} \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)}} V_R \quad (9)$$

포아송비를 일반적인 콘크리트의 경우에서처럼 0.15에서 0.2의 범위로 가정했을 때, 측방향 변위가 구속되어 있는 경우 식 (9)로부터 P파 속도와 R파 속도 사이의 관계는 다음과 같다.

$$V_p = 1.73 V_R \quad (\nu=0.15) \quad (10)$$

$$V_p = 1.79 V_R \quad (\nu=0.2) \quad (11)$$

즉, 콘크리트의 포아송비 범위내서는 포아송비에 따른 P파 속도의 변화가 크지 않으므로 일반적으로 콘크리트의 포아송비를 0.2로 가정하여 P파 속도를 간단히 구할 수 있다.

### 3. 충격반향-표면파기법(IE-SASW Method)의 수치 해석 연구

충격반향기법을 이용하여 구조물의 두께 및 결함을 추정하는데 있어서는 식 (1) 또는 식 (2)에 나타난 바와 같이 재료의 P파 속도를 미리 알고 있어야 한다. 따라서 본 논문에서는 표면파기법으로 P파 속도를 구하여 충격반향기법에 적용하는 충격반향-표면파 병행기법을 제시하고자 한다. 이를 위해 표면파기법을 이용하여 P파 속도를 구하는 방법의 타당성과 비파괴검사기법으로서

충격반향기법의 적용성의 검증을 위하여 수치해석 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 상용프로그램 ABAQUS를 이용하였고, 적용한 유한요소 및 무한요소에서 파의 전파(wave propagation)에 대한 해석은 일반적인 파전달에 대한 지배방정식을 각 요소, 절점마다 시간에 따라 해석하는 방법이다. 즉, 파의 전달에 대해 식 (12)와 같은 평형방정식과 식 (13)과 같은 지배방정식을 만족한다.

$$-\rho \ddot{u} + \frac{\partial}{\partial x} \cdot \sigma = 0 \quad (12)$$

여기서,  $\rho$  = 밀도,

$\ddot{u}$  = 입자 가속도,

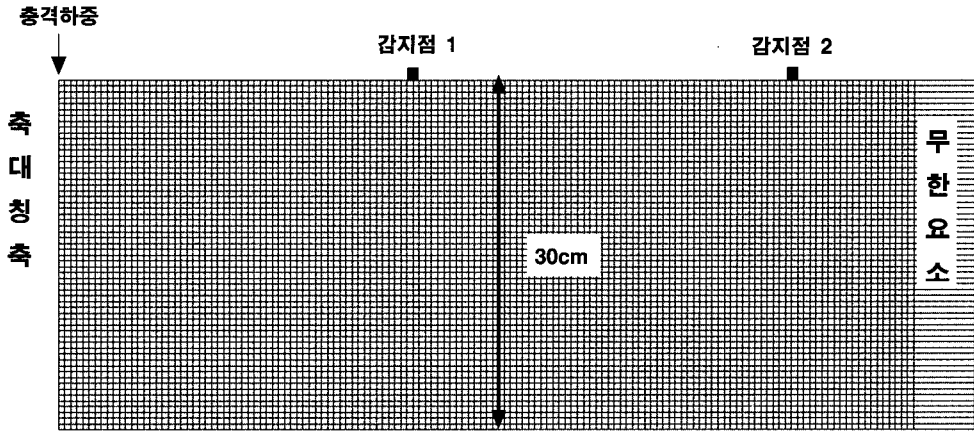
$x$  = 위치,  $\sigma$  = 응력

$$\rho \ddot{u}_i = G \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + (\lambda + G) \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_j} \quad (13)$$

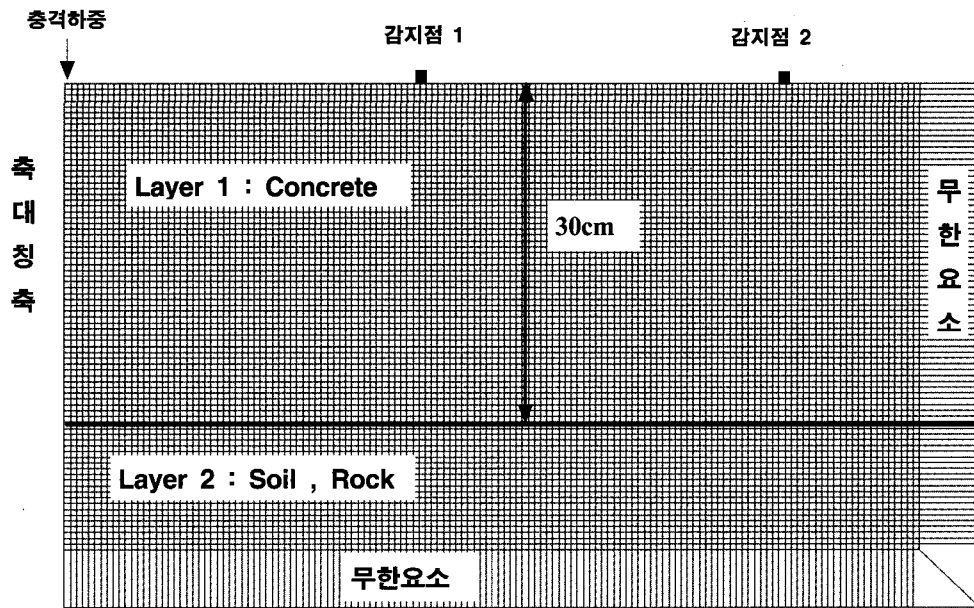
여기서,  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ ,  $\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$   
 $E$  = 탄성계수  $\nu$  = 포아송비

#### 3.1 표면파기법

표면파기법을 이용한 P파 속도 추정의 신뢰성을 알아보기 위해 슬래브 형태의 부재를 상용프로그램 ABAQUS를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 먼저 공기중에 놓인 두께 30cm의 콘크리트 슬래브에서 표면파기법의 적용성을 살펴보았다. 또한 대상 부재의 외부 경계 요소에 의한 영향을 알아보기 위해 콘크리트 슬래브 모델의 하단 경계층에 무한요소를 이용하여 콘크리트 슬래브가 지반에 접한 경우와 암반에 접한 경우를 모사하였다. 모든 해석 모델은 0.5cm×0.5cm 정사각 축대칭 유한요소를 사용하였고, 모델의 측면에는 축대칭 무한요소를 사용하여 반사파의 간섭을 억제시켰으며 하단부는 축대칭 무한요소를 이용하여 이질층의 경계조건을 표현하였다. 콘크리트 슬래브의 물성치는 영계수 33.2GPa, 포아송비 0.2, 밀도 2300kg/m<sup>3</sup>로써 P파 속도 4000m/s를 나타낸다. 작용하중은 반파장의 사인형태의 충격하중으로 접촉시간 0.00008sec(80  $\mu$ s), 최대에너지는 0.09N·m인데, 이는 실제 콘크리트 슬래브 부재에서 실험을 수행 시 강철구에 의한 충격하중(강철구의 위치에너지)에 해당하는 것이다. 파의 전파해석은 시간영역에서의 단계별 적분법을 적용하였으며, 샘플링간격은 4  $\mu$  sec이고



(a) 단일 콘크리트 슬래브 모델 (Conc\_Air)



(b) 콘크리트 슬래브와 이질층 경계 모델 (Conc\_Conc, Conc\_Soil, Conc\_Rock)

그림 2. 표면파기법에 적용된 수치해석 모델

표 1. 표면파기법에 적용된 수치해석 모델

모델	슬래브 두께 (cm)	무한요소	경계 매질	샘플링 간격 ( $\mu$ sec)	기록길이 (sec)	충격하중
Conc_Air	30	측면 (>70cm)	Air	4	0.008912	최대크기 : 0.09N · m 접촉시간 : 80 $\mu$ sec
Conc_Conc		측면 (>70cm) 저면 (>40cm)	Concrete ( $V_p=4000$ m/s)			
Layer		측면 (>70cm)	상부 10cm ( $V_p=4000$ m/s) 하부 20cm ( $V_p=3000$ m/s)			
Conc_Soil		측면 (>70cm) 저면 (>40cm)	Soil ( $V_p=400$ m/s)			
Conc_Rock		측면 (>70cm) 저면 (>40cm)	Rock ( $V_p=6000$ m/s)			

총 샘플링길이는 0.008192sec 이다. 본 연구에서 적용한 표면파기법의 해석모델을 그림 2와 표 1에 정리하였다.

(1) 단일 콘크리트 슬래브 모델

표면파기법을 이용한 재료의 P파 속도 추정은 두 감지점 사이의 위상차로부터 구할 수 있다. 일반적으로 관심이 있는 대상 깊이와 감지점 사이의 거리를 같게 두어야 대상 깊이 전체 부분에 관한 표면파의 정보를 얻을 수 있다. 본 모델의 경우 콘크리트 두께가 30cm이므로 거리가 30cm인 콘크리트 표면위의 두 절점에서 충격하중에 의한 가속도 신호를 획득하여 해석을 수행하였다.

그림 3은 단일 콘크리트 슬래브 모델에서 두 절점(감지점)의 크로스 파워 스펙트럼의 위상(그림 3 (a)) 및 위상정보를 분석하여 얻은 분산곡선(그림 3 (b))이다. 그림 3 (a)에 나타난 주파수에 따른 위상을 살펴보면, 대략 주파수 6300Hz 부분에서 부드럽게 연결되지 못하고 점프된 형상을 볼 수 있는데, 이는 콘크리트 P파 속도가 4000m/s, 부재 두께가 30cm 임을 감안하여 식 (1)을 적용하면 대략 부재 두께에 해당하는 주파수임을 알 수 있다. 이러한 이유는 부재 하단부와 상단부의 경계조건이 자유단이기 때문에 P파로 전달된 파의 반복되는 반사에 의한 공진의 영향으로 볼 수 있다. 그림 3 (b)에 나타난 분산곡선은 종축은 파장 길이를, 횡축은 각 파장에 해당하는 위상속도를 나타낸다. 분산곡선을 살펴보면 단파장(파장 0.1m 이하부분), 즉 부재의 상층부에서는 중간 깊이에서 보다 약간 작은 값을 나타내고 있는

데, 이는 수치해석에서 각 요소의 크기 및 샘플링 간격에 대한 영향으로 생각할 수 있다. 또한, 장파장(파장 0.3m 이상부분)에 해당하는 위상속도의 감소는 하단부가 강성이 없는 자유단이므로 그에 대한 영향이 콘크리트 층을 지나는 위상속도에 영향을 끼쳤기 때문이다. 따라서 이러한 영향이 감소된 중간정도의 파장에서 위상속도를 취함이 부재의 표면파속도의 결정에 합리적으로 판단된다. 그림 3 (b)의 분산곡선으로부터 파장이 0.1m~0.3m 지점에서 표면파속도의 평균값을 취하면 2220m/s이고 포아송 비가 0.2이므로 식 (11)로부터 P파 속도를 3970m/s로 계산할 수 있다. 이는 실제 모델링값인 P파 속도 4000m/s와 상당히 근접한 결과로써 표면파기법으로부터 콘크리트 구조물의 P파 속도 추정이 신뢰성이 있음을 확인할 수 있다.

위에서 설명한 단일 콘크리트 슬래브 모델의 해석결과에서 나타난 슬래브 두께에 해당하는 위상 정보와 장파장에서의 위상속도 감소 원인을 규명하기 위하여 슬래브 하단부에 콘크리트 물성으로 무한요소를 두어 해석을 수행하였다. 해석 모델의 형상은 그림 2 (b)에 해당하고, 표 1의 Conc\_Conc에 해당하는 모델이며, 그림 4에 해석 결과를 나타내었다. 그림 4 (a)를 살펴보면 Conc\_Air 모델의 위상정보(그림 3 (a))에서 나타난 슬래브 두께에 해당하는 공진주파수의 정보를 볼 수 없다. 이와 같은 이유는 Conc\_Air 모델과는 달리 슬래브 하단에 무한요소를 두어 하단으로부터의 반사에 의한 공진이 발생하지 않았기 때문이다. 또한 분산곡선(그림 4 (b))을 살펴보

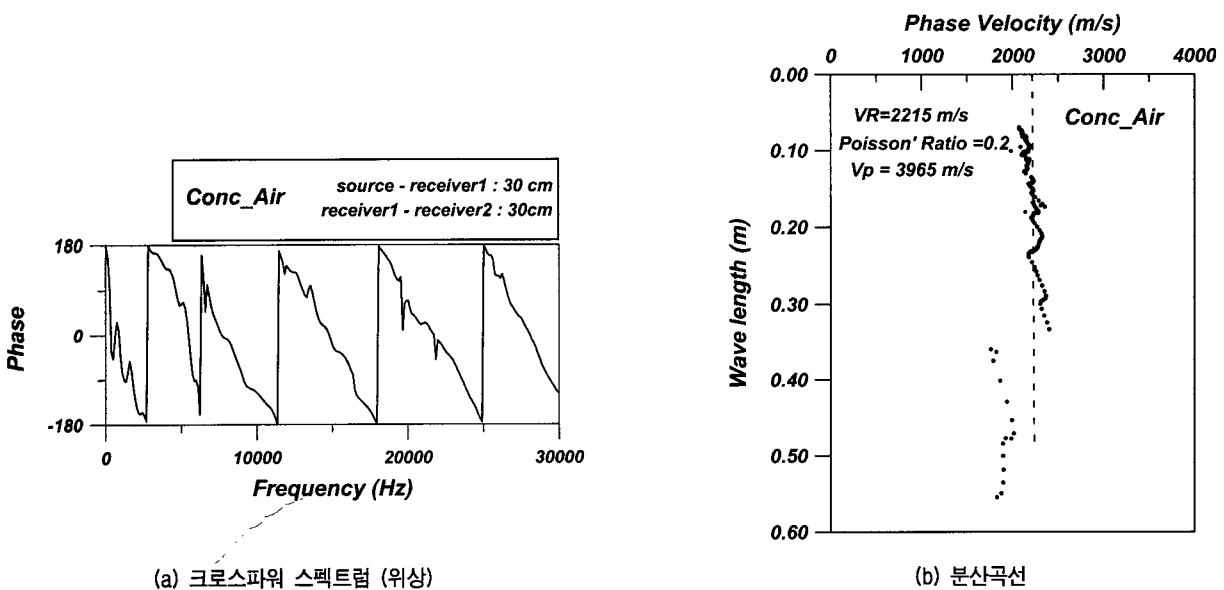
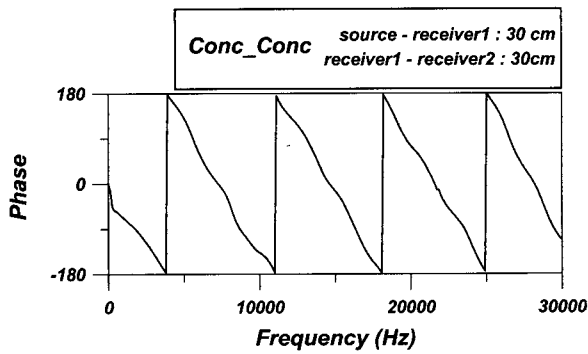
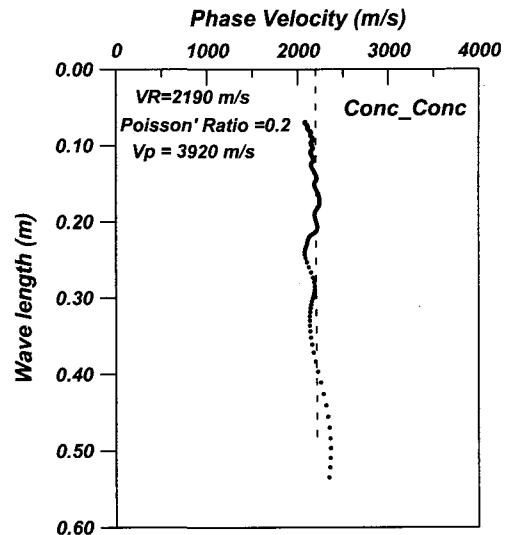


그림 3. 단일 콘크리트 슬래브 모델의 표면파기법 해석 결과



(a) 크로스파워 스펙트럼 (위상)



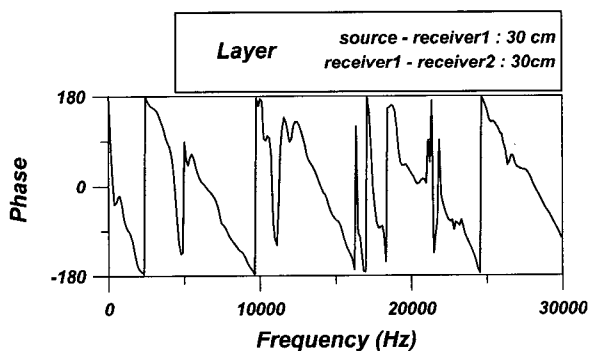
(b) 분산곡선

그림 4. 콘크리트 경계모델의 표면파기법 해석 결과

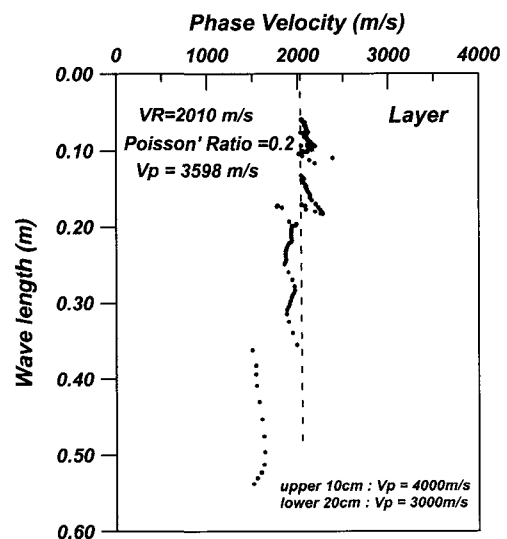
면 슬래브 하단이 강성이 없는 자유단이 아니므로 그림 3 (b)에서 나타난 장파장에서의 위상속도 감소가 나타나지 않았다. 이로부터 장파장에서의 위상속도 변화는 슬래브 하단부 경계조건에 영향을 받음을 알 수 있다. 그림 4 (b)의 분산곡선으로부터 파장이 0.1m~0.6m 지점에서 표면파속도의 평균값을 취하면 2215m/s이고 식 (11)로부터 P파 속도를 3965m/s로 계산할 수 있다. 이는 실제 모델링값인 P파 속도 4000m/s와 상당히 근접한 결과이다.

부재의 P파 속도를 추정하는 방법으로 부재 표면에서 두 감지기 사이의 도달시간 차이를 이용하여 결정하는

방법(Lin and Sansalone, 1994 ; Sansalone 등, 1997)이 있다. 그러나 이러한 방법은 시간영역에서 P파 또는 R파의 정확한 도달시간을 결정하는 것이 어렵고, 또한 시공과정에서 부재의 상층부와 하층부의 P파 속도가 다를 경우 상층부의 P파 속도만을 구하여 부재 전체의 P파 속도로 대표하는 오류를 범할 수 있다. 그러나 표면파기법은 부재 전체 두께의 평균적인 P파 속도를 도출하기 때문에 이와 같은 문제점을 해결할 수 있다. 이를 알아보기 위하여 상층부 10cm는 P파 속도 4000m/s를, 하층부 20cm는 P파 속도 3000m/s로 구성된 슬래브 구조물에 대하여 표면파기법을 모델링하였다. 해석 모델의 형



(a) 크로스파워 스펙트럼 (위상)



(b) 분산곡선

그림 5. 층으로 이루어진 콘크리트모델의 표면파기법 해석 결과

상은 그림 2 (a)에 해당하는데 두 층으로 나누어 물성을 달리하였고, 표 1의 Layer 모델에 해당하며, 해석 결과를 그림 5에 나타내었다.

그림 5 (a)에 나타난 위상정보를 살펴보면, 대략 주파수 5000Hz 부분에서 점프된 형상을 볼 수 있는데, 이는 상부 10cm 콘크리트 P파 속도가 4000m/s, 하부 20cm의 P파 속도 3000m/s 임을 감안하여 식 (5)를 적용하면 대략 부재 전체 두께에 해당하는 주파수임을 알 수 있다. 그 이외에 고주파영역(15000Hz 이상)에서 단일콘크리트 모델에 비하여 깨끗하지 못한 형상을 나타내는 이유는 슬래브가 두 층으로 이루어진 것에 대한 영향이다. 이와 같이 위상정보만으로 대략적인 부재의 층상구조를 살펴볼 수 있다. 한편, 그림 5 (b)에 나타난 분산곡선을 단일 콘크리트모델(Conc\_Air, 그림 3 (b))과 비교해보면 파장 0.2m 이상인 부분에서 위상속도가 감소함을 볼 수 있다. 이는 하층부 강성이 작은 실제 모델링의 결과를 반영한 것으로 파장 0.1m~0.3m 지점에서 표면파 속도의 평균값을 취하면 2010m/s이고 포아송 비가 0.2 이므로 식 (12)로부터 P파 속도를 3598m/s로 계산할 수 있다. 이는 부재 전체의 P파 속도 평균값과는 다소 차이가 있지만, 표면위의 시간영역에서 P파 속도를 직접 결정하는 방법에 비해 부재의 층상을 보다 잘 반영하는 것으로 부재 전체의 평균적인 P파 속도를 도출하는 표면파기법의 장점을 나타내고 있다.

## (2) 콘크리트 슬래브와 이질층 경계 모델

콘크리트 구조물이 지중에 건설될 경우 콘크리트와의 이질 경계면은 크게 지반과 암반으로 나눌 수 있다. 이를 모사하기 위하여 두께 30cm의 콘크리트 슬래브 아래에 P파 속도 430m/s를 갖는 지반과, 6000m/s를 갖는 암반을 유한요소와 무한요소를 이용하여 처리하였다. 해석 모델의 형상은 그림 2 (b)에 해당하고, 표 1의 Conc\_Soil, Conc\_Rock 모델과 같고 해석 결과를 각각 그림 6과 그림 7에 나타내었다.

Conc\_Soil 모델의 결과인 그림 6 (a)에 나타난 주파수에 따른 위상을 살펴보면, Conc\_Air 모델에서와 같이 부재 두께에 해당하는 공진 주파수(6300Hz) 부분에서 부드럽게 연결되지 못하고 점프된 형상을 볼 수 있는 반면에, Conc\_Rock 모델의 결과(그림 7 (a))에서는 이러한 현상을 볼 수 없다. 이러한 이유는 경계조건이 지반인 경우는 콘크리트와의 임피던스 차이가 커서 슬래브 하단부의 경계조건이 자유단으로 작용하여 P파로 전달된 파의 대부분의 에너지가 반사되어 공진을 일으킨 반면에, 암반의 경우는 콘크리트와의 임피던스 차이가 상대적으로 작고, 자유단이 아닌 고정단으로 작용하여 전달된 파가 반사가 일어나기 보다는 상당 부분 경계층으로 전달되어 공진이 발생되지 않았기 때문이다. 이와 같이 표면파기법을 수행시 부재의 P파 속도의 결정 이외에도 크로스파워 스펙트럼의 위상정보를 효율적으로 활용하면 구조물의 경계조건 판단과 경계조건이 자유단(지반)인 경우에는 부재의 두께를 부수적으로 얻을

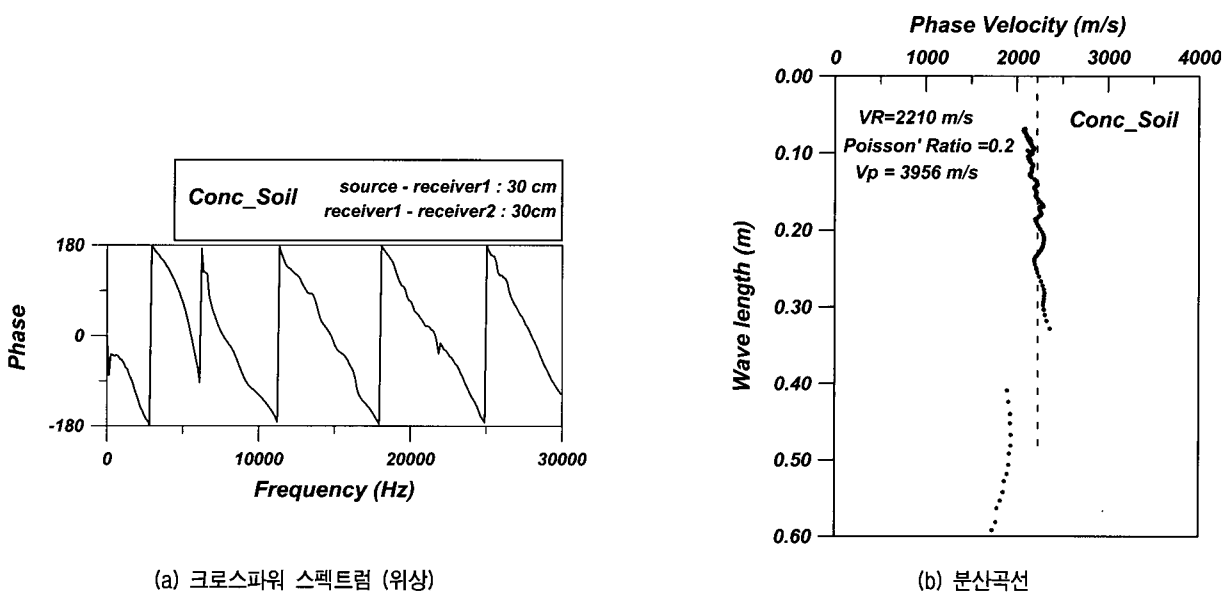
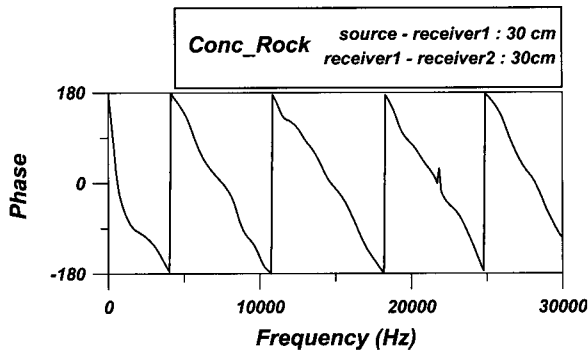
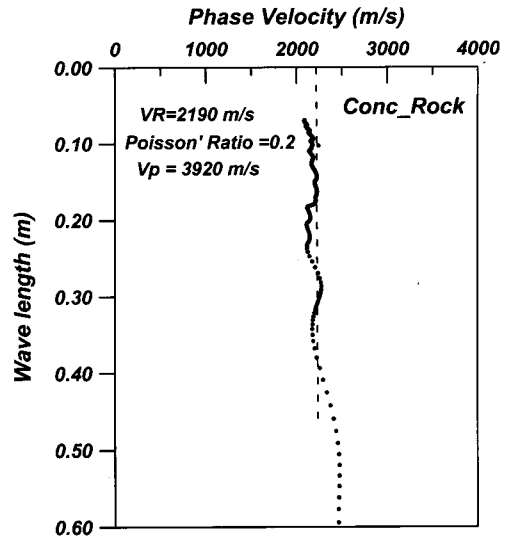


그림 6. 지반 경계모델의 표면파기법 해석 결과





(a) 크로스파워 스펙트럼 (위상)



(b) 분산곡선

그림 7. 암반 경계모델의 표면파기법 해석 결과

수 있을것으로 판단된다.

분산곡선(그림 6 (b), 그림 7 (b))을 살펴보면 부재의 상층부에서는 두 경우 모두 Conc\_Conc 모델과 같은 형상을 나타내지만 파장이 긴 부분(0.4m 이상)에서는 각각 다른 경향을 나타낸다. 즉, Conc\_Soil 모델에서는 콘크리트 슬래브 아래의 경계조건이 콘크리트에 비해 임피던스가 작은 지반이기 때문에 그의 영향으로 위상속도가 작게 나타난 반면, Conc\_Rock 모델에서는 콘크리트에 비해 임피던스가 큰 암반의 영향으로 Conc\_Conc 모델에 비해 위상속도가 크게 나타남을 알 수 있다. 두 경우에 있어서 비교적 경계조건의 영향을 받지 않는 중간층(0.1m~0.3m)에서 콘크리트의 표면파 속도를 구하면 각각 2210m/s, 2190m/s이고 이로부터 P파 속도를 3956m/s와 3920m/s로 추정할 수 있는데 이들 값 역시 실제 모델링 값인 4000m/s와 유사한 값을 도출함을 알 수 있다.

경계조건을 바꾸어 가면서 표면파기법에 관한 일련의 수치해석을 수행한 결과 표면파기법으로부터 대상 부재의 P파 속도를 추정하는 방법이 신뢰성이 있음을 알 수 있었고, 아울러 분산곡선의 형태를 이용하여 대략적으로나마 경계조건을 파악할 수 있으리라 판단된다.

### 3.2 충격반향기법

충격반향기법을 모사하기 위해 슬래브 형태의 부재로 모델링하였고, 실제와 같은 점하중을 구현하면서 효

율적인 계산 시간을 위하여 3차원 요소 대신 축대칭(axisymmetric) 요소를 이용하였다. 지반구조물에 대한 충격반향기법의 적용성을 검토하기 위하여 콘크리트 구조물과 암반 또는 지반과의 접촉상태 파악을 위한 이질 매질층에 대한 해석과 구조물 내부의 결합위치 파악을 위한 결합 종류에 따른 해석으로 구분하였다.

#### (1) 이질 매질층에 대한 연구

대상 부재의 외부 경계 층에 대한 영향을 알아보기 위하여 콘크리트 슬래브 모델을 두 개의 층으로 분리하여 하단부 재료의 성질을 바꾸어 가며 수치해석을 수행하였다. 일반적으로 콘크리트 지반구조물에서 발생할 수 있는 경계층은 지반과 암반 그리고 불량콘크리트 층으로 구분할 수 있다. 따라서 본 영향연구에서는 지반에 접한 경우와 암반에 접한 경우, 그리고 불량콘크리트에 접한 경우를 유한요소와 무한요소를 이용하여 모사하였다. 콘크리트 물성치는 영계수 33.2GPa, 포아송 비 0.2, 밀도 2300kg/m<sup>3</sup>로써 P파 속도 4000m/s를 나타낸다. 작용하중은 반파장의 사인형태의 충격하중으로 접촉시간 0.00004sec(40 μs), 최대에너지는 0.03N·m이다. 이는 대략 40kHz의 고주파 영역까지 관찰할 수 있는 가진원의 범위로써 깊이로는 콘크리트의 P파 속도를 4000m/sec로 가정할 때 표면으로부터 5cm 깊이부터 관찰이 가능한 범위이다. 본 연구에서 적용한 충격반향기법의 이질 매질층에 대한 해석모델을 표 2에 정리하였고, 대략적인 모델형태를 그림 8에 나타내었다.

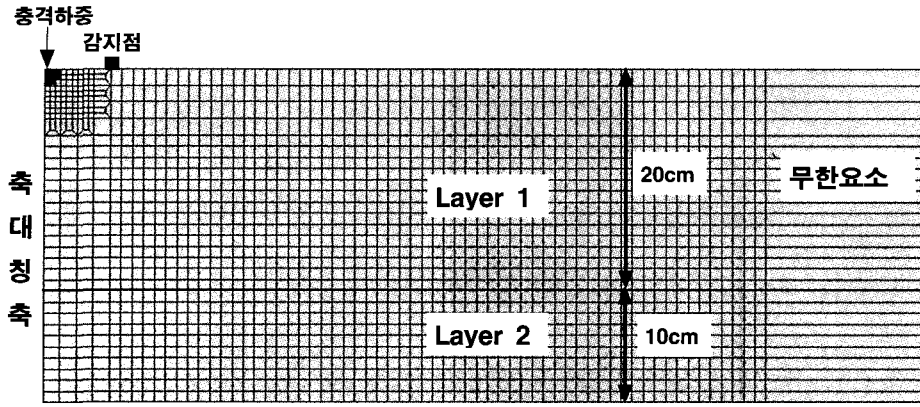


그림 8. 충격반향기법 이질매질층 영향연구에 사용된 해석 모델

표 2. 충격반향기법 이질매질층 영향연구에 사용된 해석 모델

모델	이질매질층	콘크리트층 두께	이질매질층 두께	샘플링 간격 ( $\mu$ sec)	기록길이 (sec)	충격하중
Slab_L1	.	30cm	.	4	0.004096	최대크기 : 0.03 Nm  접촉시간 : 0.00004sec
Slab_L2	Soil ( $V_p=400m/s$ )	20cm	10cm			
Slab_L3	Poor Concrete ( $V_p=2000m/s$ )	20cm	10cm			
Slab_L4	Poor Concrete ( $V_p=3000m/s$ )	20cm	10cm			
Slab_L5	Rock ( $V_p=5000m/s$ )	20cm	10cm			
Slab_L6	Rock ( $V_p=6000m/s$ )	20cm	10cm			

각 모델로부터 두께를 추정하는데 있어서 경계조건은 중요한 역할을 한다. Slab\_L1 모델은 완전 자유단이고, 지반이 경계조건인 Slab\_L2 모델과 불량콘크리트가 경계조건인 Slab\_L3, Slab\_L4 모델은 완전 자유단으로 볼 수는 없지만 해석의 용이상 자유단으로 간주할 수 있다. 또한 암반이 경계모델인 Slab\_L5, Slab\_L6 모델인 경우 콘크리트와의 임피던스 차이가 크지는 않지만 고정단으로 간주하여 해석하였다. 각 모델의 주파수영역에서의 결과를 그림 9에 나타내었다. 결과를 살펴보면 콘크리트 층만으로 이루어진 Slab\_L1 모델의 경우 6400Hz에서 공진 주파수가 뚜렷이 나타남을 볼 수 있고, 하단부의 경계조건은 자유단이므로 식 (1)을 적용하면 31cm의 두께를 계산할 수 있다. 이는 실제 모델의 30cm값과 상당히 유사함을 나타내고 있다. Slab\_L2 모델의 경우에는 크게 두 개의 공진주파수 1600Hz와 9400Hz를 볼 수 있는데 전자의 경우에는 콘크리트층과 지반의 두 층을 모두 왕복한 주기이며 후자는 지반과의 경계층에서 반사된 콘크리트층만의 공진주파수로 해석할 수 있다. 식

(5)를 적용한 이론적인 전체층의 공진주파수는 1667Hz이고, 식 (1)을 적용한 콘크리트층만의 공진주파수는 10000Hz인데 이들 역시 해석값과 크게 다르지 않다. 이와같은 방법으로 나머지 모델에서도 전체층에 해당하는 공진주파수와 콘크리트층만의 공진주파수를 이론적인 값과 해석값을 비교하여 표 3에 정리하였다.

이상과 같이 콘크리트와 다른 물성치를 지나는 2개의 층으로 이루어진 구조물에서의 수치해석 결과를 정리하면 다음과 같다.

전체층에 해당하는 공진 주파수는 모든 경우에 대해 비교적 신뢰성 있게 찾아낼 수 있었다. 지반은 완전한 자유단으로 간주할 수 있고, 불량콘크리트는 완전한 자유단으로 간주할 수는 없지만 자유단으로 간주하고 해석을 수행하여도 신뢰성이 있음이 나타났다. 한편, 암반은 접촉면적이 콘크리트 층과 같아 고정단으로서의 역할을 하기에는 콘크리트 층에 비해 임피던스가 크지 못하였고 따라서 고정단으로 해석하기에는 다소 신뢰성이 결여됨이 나타났다. 그러나 실제 지반 구조물에 있어

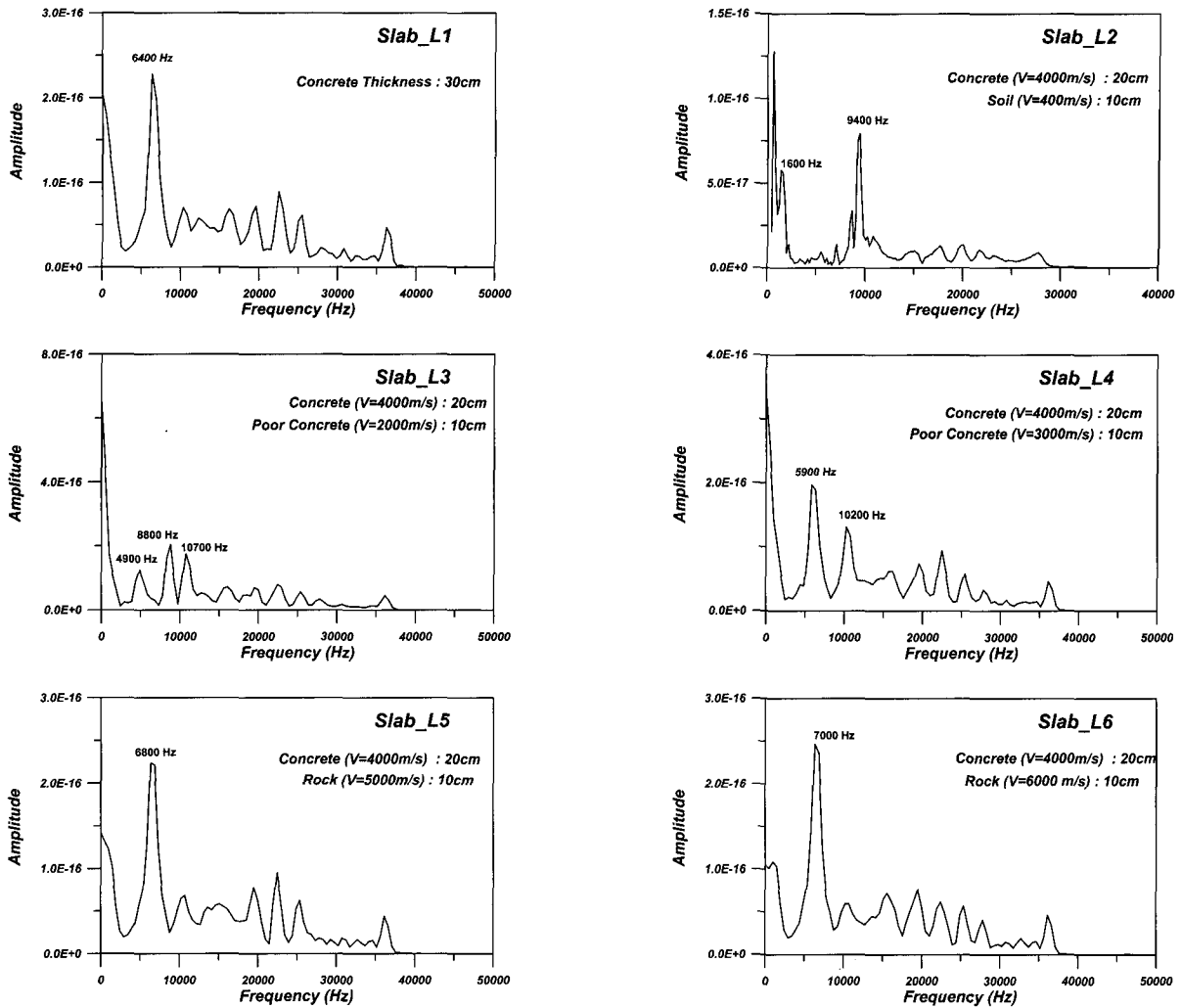


그림 9. 충격반향기법 이질매질층 모델의 해석 결과 (주파수 영역)

표 3. 충격반향기법 이질매질층 모델의 해석 결과

모델	전체층 두께에 해당하는 공진 주파수		콘크리트층에 해당하는 공진 주파수	
	이론값 (Hz)	해석값 (Hz)	이론값 (Hz)	해석값 (Hz)
Slab_L1	6670	6400	6670	6400
Slab_L2	1667	1600	10000	9400
Slab_L3	5000	4900	10000	10700
Slab_L4	6000	5900	10000	10200
Slab_L5	7140	6800	5000	.
Slab_L6	7500	7000	5000	.

서 암반에 근입된 말뚝 또는 암반에 접한 터널의 경우, 본 해석과는 달리 암반의 면적이 구조물의 면적에 비해 크기 때문에 암반을 고정단으로 간주하여 해석함이 바람직할 것으로 판단된다.

## (2) 결함 종류에 따른 연구

콘크리트 구조물 타설시 부재내에는 국부적인 공극,

불량콘크리트 또는 균열등이 발생할 수 있다. 충격반향기법을 사용하여 구조물 내부에 발생할 수 있는 결함의 존재 및 위치를 신뢰성있게 파악할 수 있는지 알아보기 위해 수치해석을 수행하였다. 사용한 결함의 종류는 공극, 불량콘크리트와 수평균열을 적용하였다. 또한 터널과 같이 차수를 필요로 하는 구조물에서의 방수포가 해석기법에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다.

표 4. 충격반향기법 결함종류에 따른 영향연구에 사용된 해석 모델

모델	결함종류	부재 두께	결함위치 및 크기		샘플링 간격 ( $\mu$ sec)	기록 길이 (sec)	충격하중
			위치 (상부기준)	Size (두께 $\times$ 길이)			
Slab_V1	공극	30cm	15cm	5cm $\times$ 6cm	4	0.004096	최대크기 : 0.03 Nm 접촉시간 : 0.00004sec
Slab_V2	공극		20cm	5cm $\times$ 6cm			
Slab_P1	불량콘크리트 ( $V_p=2000$ m/s)		15cm	5cm $\times$ 6cm			
Slab_P2	불량콘크리트 ( $V_p=2000$ m/s)		20cm	5cm $\times$ 6cm			
Slab_C1	수평균열		15cm	0.2cm $\times$ 6cm			
Slab_C2	수평균열		20cm	0.2cm $\times$ 6cm			
Slab_W1	방수포 ( $V_p=95$ m/s)		15cm	0.2cm $\times$ 33cm			
Slab_W2	방수포 ( $V_p=95$ m/s)		20cm	0.2cm $\times$ 33cm			

수치해석에 사용된 콘크리트의 P파 속도와 작용하중, 요소의 종류 및 형태 등은 앞선 이질층의 경우(그림 8)와 같고, 두께 30cm의 단일층에 각 결함형태만을 임의의 위치에 표현하였는데 이와같은 수치해석 모델을 표 4에 나타내었다.

각 결함의 종류에 따라 결함이 상부로부터 15cm에 위치한 경우에 대한 주파수영역에서의 결과를 그림 10에 나타내었다. 우선 공극에 관련한 결과(Slab\_V1)를 살펴보면 크게 2개의 공진주파수가 나타남을 알 수 있다. 공극의 위치에 해당하는 공진주파수는 13200Hz로 볼

수 있고, 이보다 저주파 성분인 5400Hz의 공진주파수는 공극을 우회하여 슬래브 바닥으로부터 반사되어 다시 표면으로 되돌아온 영향으로 생각할 수 있다. 이와 같은 현상은 공극의 크기가 슬래브 전체 크기에 비해 상대적으로 작기 때문에 나타난 현상이라 판단되며, 만약 공극이 슬래브 전체에 넓은 부분에 분포되어 있다면 대부분의 체적파가 공극에서 반사되기 때문에 공극의 위치에 해당하는 공진주파수가 바닥으로부터의 공진주파수보다 보다 뚜렷이 나타날 것이다. 이는 나머지 결함의 결과에서 증명할 수 있다. 즉 그림 10의 불량콘크리트

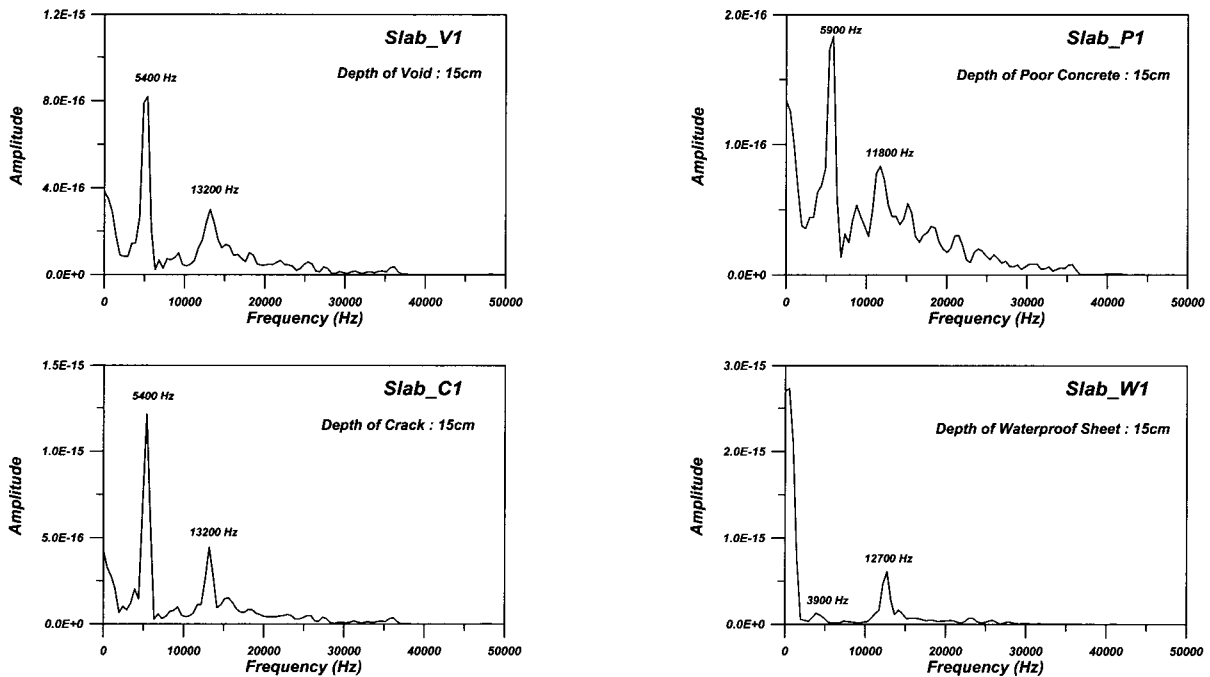


그림 10. 충격반향기법 결함종류에 따른 모델의 해석 결과 (주파수 영역)

표 5. 충격반향기법 결함종류에 따른 모델의 해석 결과

Model	결함의 형태	결함 위치에 해당하는 공진 주파수		결함 위치 (cm)	
		이론값 (Hz)	해석값 (Hz)	이론값	해석값
Slab_V1	공극 (5cm×6cm)	13333	13200	15	15.2
Slab_V2	공극 (5cm×6cm)	1000	10500	20	19.1
Slab_P1	불량콘크리트 (5cm×6cm)	13333	11800	15	16.9
Slab_P2	불량콘크리트 (5cm×6cm)	1000	9500	20	21.0
Slab_C1	균열 (0.2cm×6cm)	13333	13200	15	15.2
Slab_C2	균열 (0.2cm×6cm)	1000	9800	20	20.4
Slab_W1	방수포 (0.5cm×33cm)	13333	12700	15	15.7
Slab_W2	방수포 (0.5cm×33cm)	1000	9500	20	21.0

(Slab\_P1), 수평균열(Slab\_C1)의 경우에는 공극에서와 같이 결함부에서의 반사파에 의한 공진주파수 이외에 바닥으로부터의 반사에 의한 공진주파수가 뚜렷이 나타난 반면, 슬래브 전체에 분포하는 방수포의 경우 (Slab\_W1)에는 방수포에서 반사되는 체적파에 의한 공진주파수만이 뚜렷이 나타남을 알 수 있다. 불량콘크리트(Slab\_P1)의 경우 바닥으로부터의 공진주파수 5900Hz는 콘크리트층과 불량콘크리트를 모두 지나는 슬래브 전체 두께에 해당하는 공진주파수로 볼 수 있는데, 이질 매질층에 대한 이론적인 공진주파수는 식 (5)로부터 5714Hz로써 해석치와 거의 일치한다. 이와같이 전체 두께에 해당하는 5400Hz 및 5900Hz의 공진주파수는 결함이 없는 경우의 공진주파수인 6400Hz보다 작은값을 나타내며, 이를 바탕으로 부재내에 결함이 존재함을 추측할 수 있고, 두 번째 공진주파수를 이용하여 각 결함들의 위치를 추정할 수 있다. 각 결함들은 경계조건이 모두 자유단으로 구분되므로 식 (1)을 사용하면 결함의 위치를 신뢰성 있게 알아낼 수 있다. 모든 경우에 대한 결함의 위치에서 발생하는 공진주파수의 이론적인 값과 해석적인 값을 표 5에 나타내었는데 비교적 잘 일치함

을 알 수 있다.

그림 10에 나타난 방수포에 대한 결과(Slab\_W1)를 살펴보면 3900Hz 부분에서 미약한 공진주파수를 볼 수 있다. 모델에 적용된 방수포의 P파 속도와 두께는 각각 95m/s와 0.5cm이고, 콘크리트의 P파 속도와 두께는 각각 4000m/s와 29.5cm인데 이를 식 (5)에 적용하면 전체 층에 해당하는 공진 주파수 3956Hz를 얻을 수 있다. 이와 같은 이론값은 해석값인 3900Hz와 거의 일치하지만, 실제 현장실험에서 방수포의 물성치와 두께를 정확히 알 수 없고, 방수포 외부에 전달된 파의 에너지가 작기 때문에 충격반향기법을 이용하여 방수포를 포함한 전체 라이닝 두께 및 지반 또는 암반과의 접촉상태 파악에는 어려움이 있다. 그림 11에 방수포를 포함한 부재내의 충격에 의한 변위 분포를 나타내었는데, 방수포를 경계로 변위 분포가 단절되는 현상을 볼 수 있다. 이는 방수포에서 체적파가 대부분 반사됨을 입증하는 것이다.

수치해석을 통해 충격반향기법을 이용한 콘크리트 부재내의 결함 종류에 따른 영향연구를 수행한 결과 신뢰성있게 공극, 불량콘크리트, 균열 등의 결함의 위치와 방수포의 위치를 파악할 수 있음이 나타났다. 그러나 방수포 외부의 슬래브 전체에 대한 두께의 추정은 방수포에서 체적파의 대부분의 반사로 인하여 알아낼 수 없었고, 실제 터널 구조물에서 방수포 외부의 정보가 중요한 점을 고려하면 이에 대한 연구는 차후에 다른 기법에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

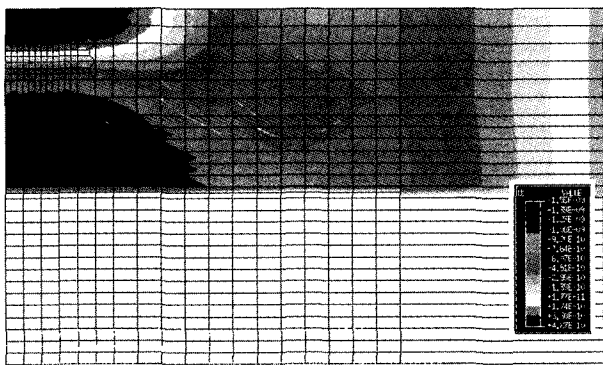


그림 11. 방수포를 포함한 부재내의 변위 분포(Slab\_W1, 시간 0.003896 초 후)

#### 4. 결론

본 논문에서는 콘크리트 구조물의 상태 및 결함검사를 위해 충격반향-표면파 병행기법을 제안하고 이에 대한 신뢰성 검토를 위해 상용프로그램 ABAQUS를 이용

하여 유한요소 해석을 수행하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

## 참 고 문 헌

- (1) 슬래브 형태의 콘크리트 구조물에 대한 표면파기법의 해석결과, 분산곡선으로부터 P파 속도를 추정한 값이 모델의 P파 속도와 2.5% 이내의 오차를 얻었고, 이는 표면파기법으로부터의 P파 속도 추정이 신뢰성이 있음을 나타낸다. 또한, 크로스파워 스펙트럼의 위상정보를 이용하면 경계조건 또는 부재 두께 파악 등의 부수적인 결과를 얻을 수 있었다.
- (2) 층상구조로 되어 있는 슬래브에 대한 충격반향기법의 수치해석을 수행한 결과 신뢰성 있게 부재의 두께를 추정하였다. 콘크리트-불량콘크리트의 경우에는 경계조건을 자유단으로 가정하여 공진주파수를 이용한 두께 추정이 가능한 반면에, 콘크리트-암반의 경우에는 접촉면적이 같을 경우 암반을 고정단으로 간주하여 상층부의 두께를 추정하는 데는 어려움이 있었다. 한편, 강성 차이에 상관없이 이질층으로 이루어진 전체층의 두께에 해당하는 공진주파수는 뚜렷이 나타났다. 만약 각 층의 두께를 알고 있다면 공진주파수를 이용하여 역으로 각 층의 강성을 구할 수 있으리라 판단된다.
- (3) 부재내에 공극이나 수평균열과 같은 결함이 존재하는 경우, 충격반향기법을 이용하여 결함의 위치를 신뢰성 있게 추정할 수 있었다. 한편, 두께 0.5cm의 방수포를 부재내에 설치한 경우에는 방수포가 자유단으로 거동하여 체적파의 대부분이 반사되기 때문에 방수포의 위치는 정확히 찾아낼 수 있었지만 전체 두께를 구하기는 어려워 방수포 외부의 정보를 알아내기에는 어려움이 있었다.

1. 김동수, 이광명(1998), "탄성파를 이용한 콘크리트 구조물의 비파괴 검사", *콘크리트학회지*, 제10권 2호, pp.40-49.
2. 김동수, 윤중구, 이병식, 박형춘(2001), "SASW 기법에 대한 수치해석 적용성 연구", *한국지반공학회논문집*, 제17권1호, pp. 67-76.
3. 서원석(2000), *콘크리트 구조물의 비파괴검사를 위한 충격반향 표면파 병행기법*, 한국과학기술원 석사학위논문.
4. Carino, N. J., Sansalone, M., and Hsu, N. N.(1986), "A Point Source - Point Receiver, Technique for Flaw Detection in Concrete", *ACI JOURNAL, Proceedings* Vol.83, No.2, Apr. pp.199-208.
5. Heisey, J. S., Stokoe, K. H. II, Hudson, W. R., and Meyer, A. H.(1982), *Determination of in Situ Shear Wave Velocities from Spectral Analysis of Surface Waves*, Research Report No. 256-2, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.
6. Joh, S. H.(1996), *Advances in Interpretation and Analysis Techniques for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves(SASW) Measurements*, Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
7. Lin, J. M. and Sansalone M.(1994), "Impact-Echo Response of Hollow Cylindrical Concrete Structure Surrounded by Soil and Rock: Part I -Numerical Studies, Part II -Experimental Studies", *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.17, No.2, June, pp. 207-226.
8. Lin, Y. and Sansalone, M. J.(1992), "Detecting Flaws in Concrete Beams and Columns Using the Impact-Echo Method", *ACI Materials Journal*, Vol.89, No.4, pp.394-405.
9. Park, H. C. and Kim, D. S.(2001), "Evaluation of the Dispersive Phase and Group Velocities using Harmonic Wavelet Transform", *NDT&E International*, Vol.37/7, pp.457-467.
10. Richart, F. E. Jr., Hall, J. R. Jr., and Woods, R. D.(1970), *Vibrations of Soils and Foundations*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
11. Sansalone, M. J. and Streett, W. B.(1997) *Impact-Echo*, Bullbrier Press.
12. Sansalone, M., J. and Lin, J. M., and Streett, W. B.(1997), "A Procedure for Determining P-wave Speed in Concrete for Use in Impact-Echo Testing Using a P-wave Speed Measurement Technique", *ACI Material Journal*, Vol.94, No.6, pp.531-539.

(접수일자 2002. 4. 23, 심사완료일 2002. 6. 10)

## 감사의 글

본 연구는 한국통신 정보통신 기초연구(98-10)와 두뇌한국21(BK21)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사를 표합니다.