

콘크리트 지반구조물의 비파괴검사를 위한 충격반향-표면파 병행기법 : II. 실험적 연구

IE-SASW Method for Nondestructive Testing of Geotechnical Concrete Structure : II. Experimental Studies

김 동 수*¹ Kim, Dong-Soo
서 원 석*² Seo, Won-Seok
이 광 명*³ Lee, Kwang-Myong

Abstract

P-wave velocity of concrete is a crucial parameter in determining the thickness of concrete lining, the location of cracks or other defects in Impact-Echo(IE) method. 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. In numerical studies(Part I), it was verified that P-wave velocities could be obtained from SASW. In this paper(Part II), experimental studies were made in slab type concrete model specimens in which voids and waterproof sheet were included at the known locations. Accordingly, the feasibility of the proposed method was evaluated. The IE-SASW method was also performed in the precast model tunnel on ground and open-cut tunnel in ground. SASW tests were performed to determine the P-wave velocity of the concrete and then IE tests were carried at regularly spaced points along the testing lines to determine the thickness of structures. The nondestructive testing method which combined SASW and IE tests showed the great potential in the field applications.

요 지

콘크리트 구조물의 건전성 평가에 사용되는 충격반향기법에서는 콘크리트의 P파 속도가 부재의 두께 및 결함의 위치를 찾는 데 있어서 매우 중요한 요소이다. 본 논문의 동반논문인 수치해석편에서 표면파기법을 이용하여 콘크리트 부재의 P파 속도를 신뢰성 있게 추정함을 알 수 있었다. 수치해석 연구에 이어서 본 논문에서는 공극, 불량콘크리트 등의 결함이 내재된 콘크리트 모형 슬래브를 제작하여 제안된 충격반향-표면파 병행기법의 실제 구조물에 대한 적용성 연구를 수행하였다. 실험결과, 표면파기법으로부터 구한 부재의 P파 속도는 두께를 알고 있는 부분에서 충격반향기법으로부터 구한 P파 속도와 거의 일치하였으며, 표면파기법으로부터 구한 P파 속도를 적용하여 충격반향기법을 수행한 결과, 여러 결함의 위치를 신뢰성 있게 찾아낼 수 있었다. 또한, 실제 지중에 매설되는 관 형태의 지중 구조물과 지중에 매설된 개착식 터널에서 제안된 비파괴검사기법을 수행한 결과, 구조물의 두께를 신뢰성 있게 구하여 실제 지반구조물에서의 현장 적용성을 확인하였다.

Keywords : Experimental studies, Field applications, IE-SASW method, Model slab, Open-cut tunnel, Precast model tunnel

*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, PhD. Student, KAIST, Dept. of Civil and Environmental Engrg.)

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

1. 서론

본 연구에서는 표면파기법을 이용하여 시험 위치에서의 P파 속도를 구하고 이를 충격반향기법에 적용하는 IE-SASW 병행기법을 제안하고자 한다. 앞선 Part 1 수치해석 연구부분에서는 충격반향기법과 표면파기법의 이론적 배경과 실험방법을 각각 간단히 설명하였고 IE-SASW 병행기법의 적용성 검증에 위해 상용프로그램 ABAQUS를 이용한 슬래브 형태의 구조물의 모델링을 통한 수치해석 결과를 나타내었다(김동수 등, 2001). 본 논문에서는 실제 콘크리트 부재를 제작하여 표면파기법으로부터 P파 속도를 유추하고, 이를 충격반향기법에 적용하여 부재내의 결함 및 부재 두께를 알아내는 충격반향-표면파 병행기법의 실험연구를 수행하였다(김동수 등, 1998).

먼저 콘크리트 구조물에서 일반적으로 발생할 수 있는 공극, 불량콘크리트 등의 결함이 내재된 모형 슬래브를 제작하여 제안된 충격반향-표면파 병행기법의 적용성 연구를 수행하였다. 표면파기법으로부터 구한 각 부재의 P파 속도와 두께를 알고 있는 부분에서 충격반향기법으로부터 구한 P파 속도를 비교하여 실제 구조물에서의 적용성을 알아보았으며, 표면파기법으로부터 구한 P파 속도를 적용하여 충격반향기법을 수행하였다. 또한, 실제 지중에 매설되는 관 형태의 지중 구조물과 지중에 매설된 개착식 터널에서 제안된 비파괴검사기법을 수행하여, 실제 지반구조물에서의 적용성을 확인하였다(서원석, 2000).

2. 충격반향-표면파 병행기법(IE-SASW Method)

충격반향기법을 이용하여 구조물의 두께 및 결함을 추정하는데 있어서는 재료의 P파 속도를 미리 알고 있어야 한다. P파 속도는 경계조건과 두께를 알고 있는 부위에서 충격반향기법을 통하여 알아낼 수 있다. 일반적으로 터널이나 바닥슬래브와 같은 현장에서는 한쪽면만이 노출된 상태이므로 정확한 두께를 알고 있는 위치가 없기 때문에 코어를 채취하여 파속도를 구한 후 이를 전체 구조물의 대표값으로 사용하여 충격반향기법에 적용하였다. 그러나 경우에 따라서는 구조물 특성상 방수 및 손상방지등의 이유로 코어를 채취하지 못함수도 있고, 같은 구조물이라도 위치에 따라 콘크리트 물성치가 틀릴 수 있으므로 코어로부터 결정된 파속도가 구조물 전체를 대표한다고 볼 수 없다. 따라서 표면파기법으

로 P파 속도를 구하여 충격반향기법을 적용하면 코어를 채취하지 않고 실험이 수행되는 위치에서 완전 비파괴적인 검사를 할 수 있다(Carino et al., 1986).

표면파(Rayleigh wave)의 속도 (V_R)는 포아송비 (ν)의 함수로서 다음과 같이 P파의 속도 (V_P)와 상관관계가 있다(Richart et al, 1970).

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

포아송비를 일반적인 콘크리트의 경우에서처럼 0.15에서 0.2의 범위로 가정했을 때 측방향 범위가 구속되어 있는 경우 식 (1)로부터 P파 속도와 R파 속도 사이의 관계는 다음과 같다(서원석, 2000).

$$V_P = 1.73 V_R \quad (\nu = 0.15) \quad (2)$$

$$V_P = 1.79 V_R \quad (\nu = 0.2) \quad (3)$$

즉, 콘크리트의 포아송비 범위내서는 포아송비에 따른 P파 속도의 변화가 크지 않으므로 일반적으로 콘크리트의 포아송비를 0.2로 가정하여 P파 속도를 식 (3)으로부터 간단히 구할 수 있다.

이와 같이 실험이 수행되는 위치에서 표면파기법을 통해 P파 속도를 구한 후 충격반향기법에 적용하면 완전 비파괴적으로 구조물의 두께 및 구조물내에 위치한 결함의 위치를 찾을 수 있다.

충격반향기법의 적용시 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, 불량콘크리트 등의 경계 조건으로서 이질 매질층까지의 두께 T는 다음 식에 의하여 구할 수 있다(Lin et. al., 1992; Sansalone et. al., 1997; Sansalone et. al., 1997).

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

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, 암반에 근입되어 있는 콘크리트 말뚝과 같이 임피던스가 큰 매질에 접해있는 경계 조건이다.

매질의 P파 전파 속도를 알고 있을 때 이질 매질층까지의 두께 T는 다음 식에 의하여 구할 수 있다.

$$T = \frac{V_P}{4f_1} \quad (5)$$

3. 모형부재를 이용한 충격반향-표면파 병행기법의 적용성 실험

본 논문에서 제안한 충격반향-표면파 병행기법의 실제 부재에서의 신뢰성을 알아보기 위해 기하학적 형상과 특성을 알고 있는 콘크리트 슬래브 부재를 제작하여 실험을 수행하였다. 앞선 수치해석에서 수행했던 영향요소를 파악하기 위해 불량콘크리트와 암반을 이용하여 만든 이질 매질층으로 이루어진 부재와, 기지의 위치에 공극을 설치한 부재에 대하여 실험을 수행하였다. 표면파기법으로 부재의 P파 속도를 측정하여 표면파기법의 실제 적용성을 파악하였으며, 충격반향기법을 이용하여 공극 등의 위치를 찾아냄으로써 본 논문에서 제안한 충격반향-표면파기법의 적용성을 검토하였다(Heisey et. al., 1982; Lin et. al., 1992).

3.1 불량콘크리트를 포함한 부재

콘크리트와 불량콘크리트의 접촉 경계면에서의 실측 결과를 얻기 위해 불량콘크리트를 타설하여 부재를 제작하였다. 또한 방수포의 영향을 알아보기 위하여 합성 고무로 이루어진 방수포와 섬유재질로 이루어진 방수포를 두겹으로 설치하였다. 이와 같은 부재의 단면을 그림 1에 나타내었다. 실험은 먼저 표면파기법을 감지기 간격을 30cm로 두어 일반콘크리트만 존재하는 위치에서부터 방수포가 존재하는 위치, 불량콘크리트가 존재하는 위치 등에서 부재의 P파 속도를 평가하는 시험을

수행하였다. 표면파기법으로부터 얻은 P파 속도의 신뢰성은 방수포 및 불량콘크리트가 존재하지 않는 부분에서 충격반향기법을 이용하여 검토하였다. 제작한 부재이므로 두께를 측정할 수 있고 충격반향기법으로부터 얻은 공진 주파수와 두께를 알면 식 (4)를 이용하여 부재의 P파 속도를 구할 수 있다.

그림 2에 위치 #1~ #7과 #8~ #14에서 두 감지기 사이의 간격을 30cm로 설치하여 얻은 표면파기법의 결과를 나타내었다. 분산곡선을 살펴보면 위치 #1~#7 사이의 평균적인 표면파 속도가 대략 2300m/s임을 알 수 있다. 이를 콘크리트 부재의 포아송 비를 0.2로 가정하여 식 (3)으로부터 P파 속도를 추정하면 4110m/s를 구할 수 있다. 같은 방법으로 나머지 위치 #8~#14에서 추정한 P파 속도 값은 3940m/s로 구할 수 있었다. 한편, 표면파기법으로부터의 P파 속도 추정의 검토를 위하여 #2의 위치에서 충격반향기법을 수행하여 알아보았다. 그림 3에 그 결과를 나타내었는데, 부재의 두께에 해당하는 공진 주파수는 6500Hz로 나타났다. 부재의 두께는 30.2cm이므로 식 (4)를 이용하면 P파 속도 3926m/s를 구할 수 있다. 이는 표면파기법으로부터 구한 P파 속도 값들과 유사함을 알 수 있다. 콘크리트는 위치에 따라 균질한 재료가 아님을 고려하면 시험이 수행되는 위치에서의 평균적인 속도를 도출해내는 표면파기법의 신뢰성을 모형부재 실험을 통해서도 확인할 수 있었다.

표면파기법으로부터 구한 P파 속도를 이용하여 방수포와 불량콘크리트가 없는 단일의 콘크리트로 이루어진 부분(#1)부터 불량콘크리트 존재하는 위치의 끝(#14)까지 10cm의 간격으로 총 14개의 위치에서 충격반향기법을 수행하여 두께 및 결함의 위치를 구해 이를 실제의 값과 비교하였다. 그림 4는 각각의 위치에서의 대표적인 결과를 나타내고 있다.

콘크리트 단일층으로 구성된 부분(그림 4 (a))의 전체

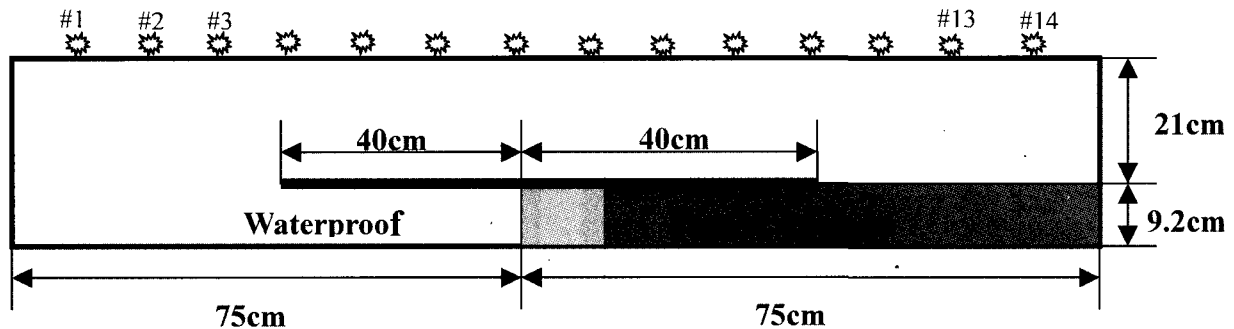
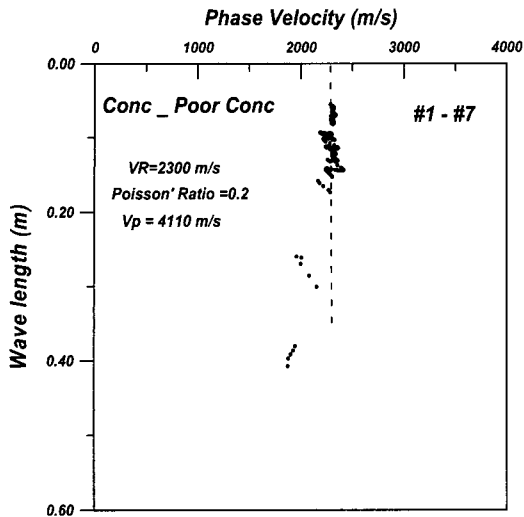
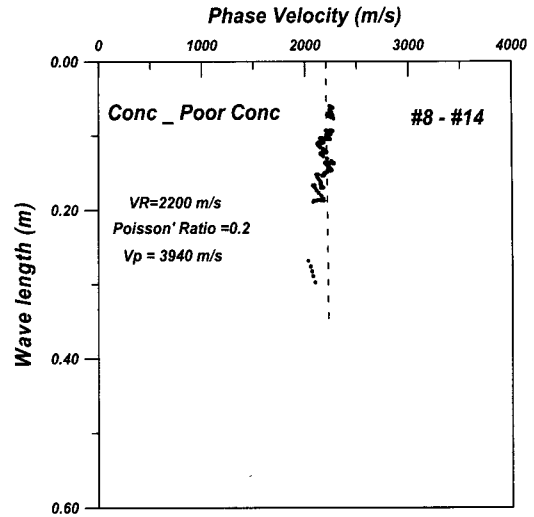


그림 1. 불량콘크리트를 포함한 부재의 단면



(a) 위치 #1-#7에서의 결과



(b) 위치 #8-#14에서의 결과

그림 2. 불량콘크리트를 포함한 부재의 표면파기법 결과

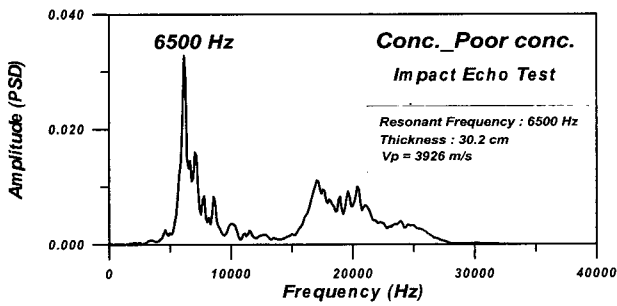


그림 3. 불량콘크리트를 포함한 부재의 P파 속도 검증 결과

두께에 해당하는 공진 주파수는 6500Hz로 나타났고, 부재 하단의 경계조건을 자유단으로 가정할때, 표면파기법으로부터 구한 P파 속도 4110m/s를 식 (4)에 적용하면 부재의 두께는 31.5cm이다. 이는 실제 부재의 두께 30.2cm에 상당히 유사한 값을 나타낸다. 그림 4 (b)는 방수포 위의 위치인 #7 지점에서의 결과인데 10000Hz에서 확인한 공진 주파수를 볼 수 있다. 이는 하중이 가진된 표면과 방수포 사이에서의 공진에 의한 결과인데 표면파기법으로부터 얻은 P파 속도를 이용하여 방수포의 위치를 계산하면 20.5cm를 얻을 수 있다. 마찬가지로 방수포의 실제의 위치 20cm를 비교하면 상당히 신뢰성 있게 방수포의 위치를 추정할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 그림에서 알 수 있듯이 부재 전체 두께에 해당하는 공진 주파수는 나타나지 않았다. 이는 수치해석과 동일한 결과를 얻을 수 있는데, 이러한 이유는 이중으로 설치되어 있는 방수포가 완전 자유단으로 작용하기 때문에 하중에 의해 전달된 파의 에너지를 대부분 반사시키기 때문이다. 본 논문에 결과를 나타내지는 않

았지만 지점 #7 이외의 방수포를 포함하는 지점 #4~#11 모두에서 방수포의 위치에 해당하는 공진 주파수를 얻을 수 있었다.

불량콘크리트와 콘크리트의 두 층으로 이루어진 부분의 결과는 그림 4 (c)와 같다. 먼저 6100Hz 부근에서 뚜렷한 공진 주파수를 볼 수 있는데 이는 두 개의 층을 포함한 전체 층에 대한 공진 주파수로 생각된다. 타설한 불량 콘크리트에 대해 공시체를 제작하여 P파 속도를 측정된 결과 3100m/s로 나타났고, 표면파기법으로부터 얻은 이 위치에서의 P파 속도 3940m/s를 이용하여 두 층 전체에 해당하는 공진 주파수를 계산하면 약 6030Hz이다(Part I의 식 (5) 참조). 한편, 불량콘크리트의 존재를 모르고 있다면 실험으로부터 얻은 공진 주파수를 한 개의 층만으로 이루어진 부재의 두께에 해당하는 공진 주파수로 생각하여 두께를 산정할 수 있다. 이 경우 식 (4)로부터 부재의 두께를 32.3cm로 산정할 수 있다. 이는 실제의 두 층을 합한 두께 30.2cm와 상당히 유사하다. 이러한 이유는 타설된 불량콘크리트와 일반 콘크리트와의 강성차가 크지 않기 때문이다. 만약 강성차가 크다면 보다 저주파쪽으로 공진 주파수가 이동할 수 있고, 한 층으로 가정하여 두께를 산정하였을 때 실제의 값보다 과다 측정할 수 있다. 그러나 불량층에서의 반사에너지가 상당량 발생하게 되면 크게 두 개의 공진 주파수가 나타나므로 이의 정보를 이용하면 불량콘크리트의 위치를 예측할 수 있고 아울러 불량층의 강성 추정도 가능하다. 그림 4 (c)의 경우 9900Hz에서 이러한 공진 주파수를 찾아볼 수 있으며 이를 이용하여 불량콘크리트의

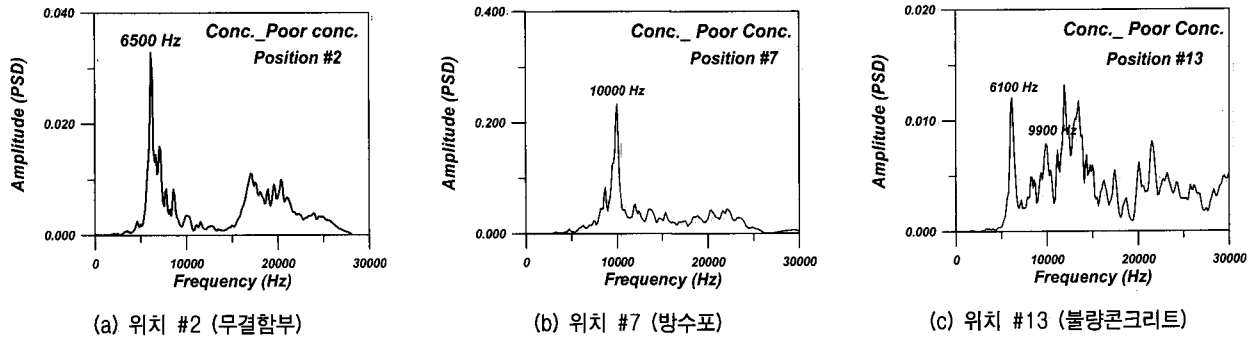


그림 4. 불량콘크리트를 포함한 부재의 충격반향기법 결과

표 1. 불량콘크리트를 포함한 부재의 충격반향-표면파기법 실험결과

위치	두께		위치	두께	
	실험값 (cm)	실제값 (cm)		실험값 (cm)	실제값 (cm)
# 1	29.3	30.2	# 8	19.5	20 (방수포)
# 2	32.3	30.2	# 9	19.9	20 (방수포)
# 3	26.3	30.2	# 10	19.7	20 (방수포)
# 4	20.3	20 (방수포)	# 11	19.5	20 (방수포)
# 5	21.6	20 (방수포)	# 12	29.8	30.2
# 6	20.7	20 (방수포)	# 13	32.3	30.2
# 7	20.5	20 (방수포)	# 14	32.7	30.2

위치를 추정하면 19.8cm를 얻을 수 있고, 이는 실제의 불량 콘크리트 위치 21cm와 유사함을 알 수 있다. 그러나 본 실험에서는 불량층과의 강성차가 크지 않으므로 불량층으로부터의 공진 주파수는 그리 뚜렷이 나타나지는 않았다. 이외의 모든 지점에서 수행한 결과를 표 1에 나타내었다. 위치 #12~#14는 실제로는 두 개의 층으로 이루어져 있지만 실험값 계산시는 층의 분리를 무시하고 하나의 층으로 계산하였다.

3.2 암반을 포함한 부재

콘크리트와 암반의 접촉 경계면에서의 실측 결과를 얻기 위해 화강암재를 부재내에 설치하였다. 암의 크기

는 80cm×120cm, 두께는 6.7cm이고 P파 속도는 약 4800m/s이며 위치는 표면으로부터 23.3cm에 설치되어 있다. 또한 불량콘크리트의 경우와 같이 방수포를 설치하였다. 이와 같은 부재의 단면을 그림 5에 나타내었다. 실험은 불량콘크리트의 경우에서와 같이 표면파기법을 감지기 간격을 30cm로 두어 수행하였다. 표면파기법으로부터 얻은 P파 속도의 신뢰성 역시 콘크리트-불량콘크리트 부재의 경우에서와 같이 두께를 알고 있는 위치에서 충격반향기법을 이용하여 검토하였다.

부재의 P파 속도를 측정하기 위해 실시한 표면파기법의 결과를 그림 6에 나타내었다. 분산곡선을 살펴보면 위치 #1~#7 사이의 평균적인 표면파 속도가 대략 2300m/s임을 알 수 있다. 이를 콘크리트 부재의 포아송 비를 0.2

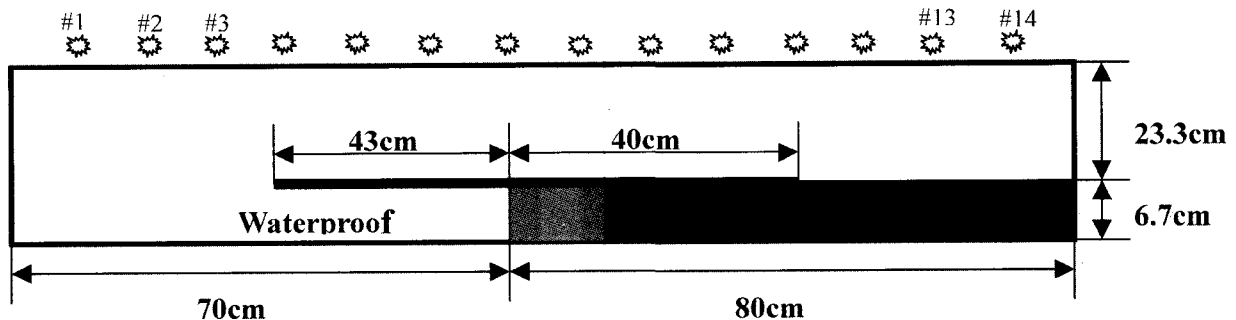


그림 5. 암반을 포함한 부재의 단면

로 가정하여 식 (3)으로부터 P파 속도를 추정하면 대략 4117m/s를 구할 수 있고, 같은 방법으로 나머지 위치 # 8~#14에서 수행한 표면파기법으로부터 추정된 P파 속도 값은 4060m/s를 얻었다. 이의 신뢰성을 알아보기 위해 #2 지점에서 충격반향기법을 수행한 결과 P파 속도 4020m/s를 구할 수 있다. 이는 불량콘크리트를 포함한 부재에서와 같이 표면파기법으로부터 부재의 P파 속도 추정이 신뢰성이 있음을 나타낸다.

표면파기법으로부터 얻은 P파 속도 4117m/s와 4060m/s로부터 대략적인 P파 속도 4100m/s를 이용하여 10cm의 간격으로 총 14개의 위치(그림 5 참조)에서 충격반향기법을 수행하였다. 그림 7에 각각의 위치에서의 대표적인 결과를 나타내었다.

콘크리트 단일층으로 구성된 부분(그림 7 (a))의 전체 두께에 해당하는 공진 주파수는 6530Hz로 나타났다. 표면파 기법으로부터 구한 이 위치에 해당하는 P파 속도 4100m/s를 식 (4)에 적용하면 부재의 두께는 31.4cm이

다. 그림 7 (b)는 방수포 위의 위치인 #7 지점에서의 결과인데 9100Hz에서 확인한 공진 주파수를 볼 수 있다. 표면파기법으로부터 얻은 P파 속도 4100m/s를 이용하여 방수포의 위치를 계산하면 22.5cm를 얻을 수 있었지만, 부재 전체 두께에 해당하는 공진 주파수는 찾아볼 수 없었다. 암반과 콘크리트의 두 층으로 이루어진 부분의 결과는 그림 7 (c)와 같다. 암반을 고정단으로 간주하면 암반의 위치를 나타내는 이론적인 공진주파수는 식 (5)로부터 4400Hz를 얻을 수 있다. 그러나 실험결과에서는 이에 해당하는 공진주파수는 볼 수 없었고 6700Hz 부근에서 뚜렷한 공진 주파수가 나타났다. 이러한 이유는 암반의 P파 속도는 4800m/s이고 콘크리트의 P파 속도는 4100m/s인데 두 이질층의 접촉면적은 오히려 콘크리트가 더 크므로 두 층 사이의 임피던스 차이는 거의 없기 때문에 하나의 층으로 작용했을 것으로 판단된다. 결과에 나타난 공진주파수 6700Hz에 P파 속도 4100m/s를 적용하면 식 (4)로부터 30.5cm를 얻을 수 있는데 이

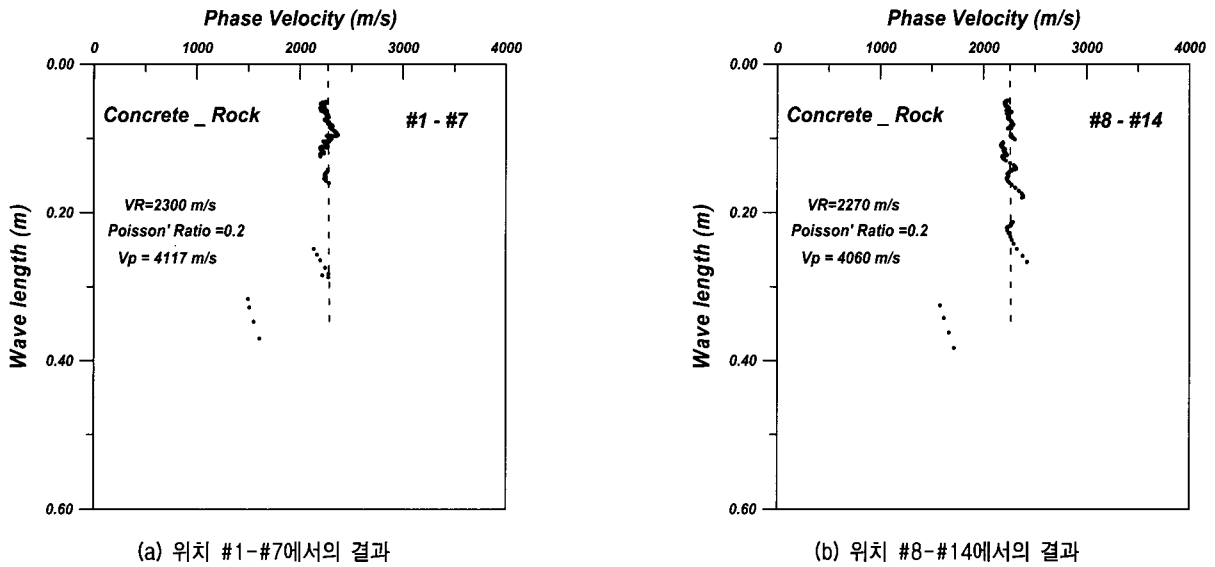


그림 6. 암반을 포함한 부재의 표면파기법 결과

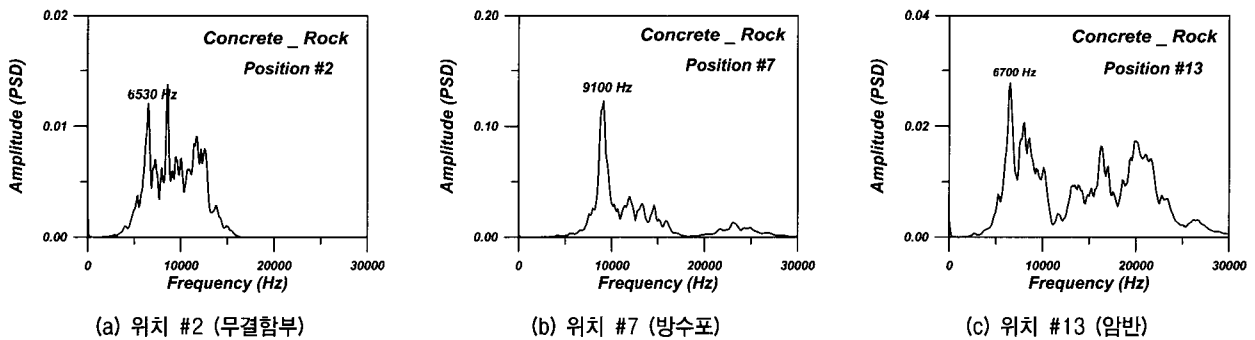


그림 7. 암반을 포함한 부재의 충격반향기법 결과

표 2. 암반을 포함한 부재의 충격반향-표면파기법 실험결과

위치	두께		위치	두께	
	실험값 (cm)	실제값 (cm)		실험값 (cm)	실제값 (cm)
# 1	32.5	30	# 8	22.8	22 (방수포)
# 2	31.4	30	# 9	22.8	22 (방수포)
# 3	21.1	22 (방수포)	# 10	22.3	22 (방수포)
# 4	22.8	22 (방수포)	# 11	22.8	22 (방수포)
# 5	23.0	22 (방수포)	# 12	28.9	30
# 6	23.3	22 (방수포)	# 13	30.5	30
# 7	22.5	22 (방수포)	# 14	31.1	30

는 전체 두께 30cm와 상당히 일치된 결과이다. 이외의 모든 지점에서 수행한 결과를 표 2에 나타내었다. 각 두께를 계산시에는 표면파기법을 이용하여 얻은 P파 속도 4100m/s를 사용하였다. 불량콘크리트의 경우에서와 마찬가지로 #12~#14의 위치는 콘크리트 하나의 층으로 가정하여 계산하였다.

3.3 공극을 포함한 부재

실제 공극의 존재와 위치를 파악할 수 있는지 알아보

기 위하여 공극을 부재내에 설치하였다. 공극의 형상에 대한 영향을 알아보기 위하여 사각형 모양의 공극과 원형 모양의 공극을 각각 크기 5cm×15cm의 스티로폼과 지름 5cm의 PVC 파이프를 이용하여 부재내에 설치하였다. 공극의 위치는 스티로폼인 경우에는 표면으로부터 14.5cm의 위치에, PVC 파이프인 경우에는 16cm의 위치에 설치하였다. 이와 같은 부재의 단면을 그림 8에 나타내었다.

먼저 감지기 간격을 30cm로 두어 공극을 가로지르는 부재의 표면 위에서 표면파기법을 수행하여 P파 속도를

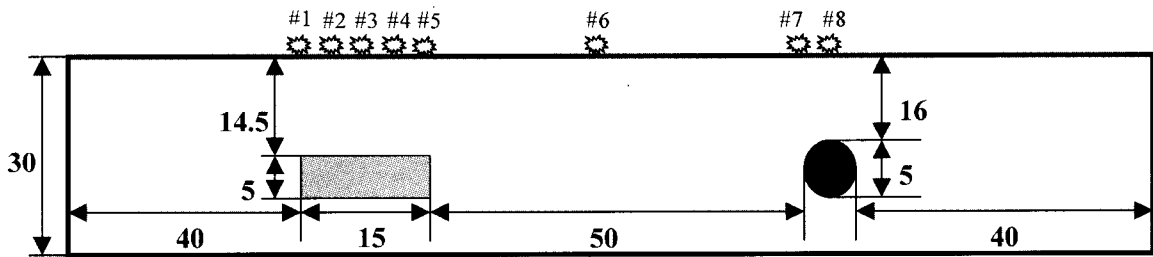
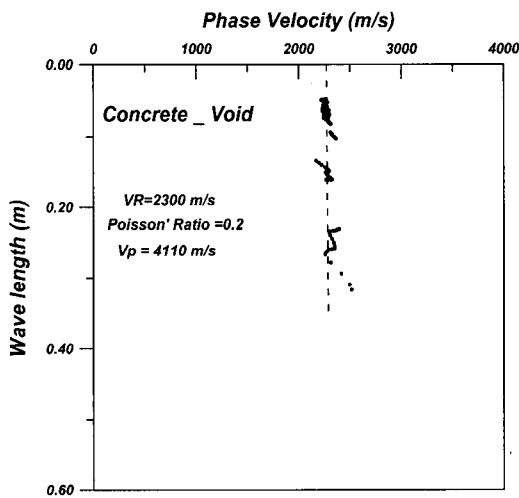
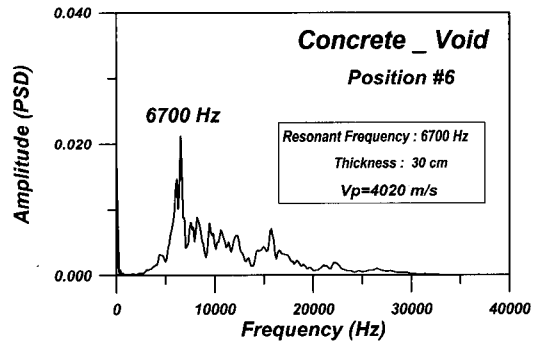


그림 8. 공극을 포함한 부재의 단면



(a) 표면파기법 결과



(b) 충격반향기법 결과

그림 9. 공극을 포함한 부재의 P파 속도 결정

추정하였고 이의 검토를 위해 공극이 존재하지 않고 두께를 측정할 수 있는 위치에서 충격반향기법을 수행하였다. 그림 9에 두 실험 결과를 나타내었다. 표면파 기법으로부터 얻은 분산곡선(그림 9 (a))을 살펴보면 평균적인 표면파 속도가 대략 2300m/s이고 콘크리트 부재의 포아송 비를 0.2로 가정하여 P파 속도를 추정하면 대략 4110m/s를 구할 수 있다. 이의 검토를 위하여 공극이 없는 #6의 위치에서 충격반향기법의 결과(그림 9 (b)), P파 속도 4020m/s를 구할 수 있었다. 따라서 표면파기법이 수행되는 측선상의 부재 중간에 공동이 존재하더라도 표면파기법으로부터 P파 속도의 추정은 신뢰성을 얻을 수 있다.

표면파기법으로부터 얻은 P파 속도를 이용하여 공극이 존재하는 위치에서 충격반향기법을 수행하여 각각의 파형을 검토하였고, 결과를 그림 10에 나타내었다. 실제 구조물에서는 내부의 상태를 전혀 모르는 상황에서 실험을 수행하게되므로 정확히 공극의 위에서 신호를 얻을 수도 있고 공극이 있는 지점과 없는 지점의 경계 위에서 실험이 수행될 수도 있다. 이러한 영향을 알아보기 위하여 공극의 중앙인 지점과 공극의 경계인 모서리 지점, 그리고 두 지점의 사이에서 실험을 수행하였다. 먼저 그림 10 (a)는 사각형 공극의 중앙에서의 실험 결과인데 13500Hz 위치에서 뚜렷한 공진 주파수가 나

타났다. 수치해석의 경우에는 공극의 위치에 해당하는 공진 주파수와 공극을 우회해서 발생하는 공진 주파수로 생각되는 저주파 성분이 나타났는데, 본 모형 부재의 실험결과에서는 그러한 공진 주파수는 찾아볼 수 없었다. 이러한 이유는 수치해석의 경우와는 달리 공극의 크기가 크고 또한 재료가 모델링한 경우에 비해 상대적으로 균질하지 못하여 체적파의 분산으로 우회파의 주기성이 미흡하기 때문이라 판단된다. 표면파기법으로부터 얻은 속도 4110m/s를 이용하여 공극의 위치를 추정하면 15.2cm를 얻을 수 있는데 이는 공극의 실제 위치 14.5cm와 유사하다. 그러나 사각형 공극의 모서리 경계 부근에서 얻은 그림 10 (b)를 보면 공극에 의한 영향과 전체 두께에 대한 영향이 동시에 나타나는 것을 볼 수 있다. 공극에 해당하는 공진 주파수 12000Hz는 공극의 중앙에서의 결과보다 저주파 쪽으로 이동하였고, 6000Hz 부근의 미약하지만 전체 두께에 해당하는 것이 나타나 있다. 이러한 경향을 살펴볼 때 현장에서 아무 정보도 없이 실험을 수행할 경우 주변 신호와 차이를 나타내어 공극이나 기타 결함의 위치라 판단되는 부분은 인접지역에서 보다 많은 실험 위치를 두어 결함의 위치 및 분포를 파악하는 것이 필요하다.

다음은 원형의 공극 위에서 실험을 수행한 결과이다. 그림 10 (c)는 원형 공극의 모서리 부분에서의 결과이고

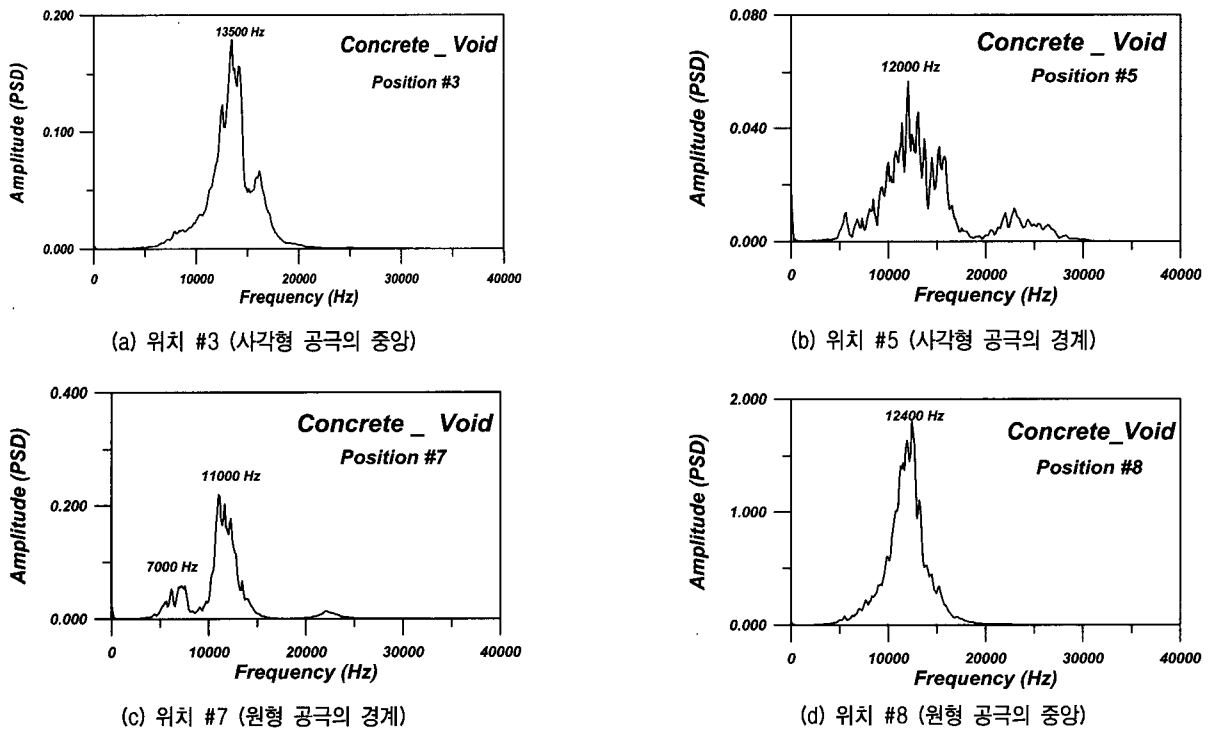


그림 10. 공극을 포함한 부재에서의 충격반향기법 결과

표 3. 공극을 포함한 부재의 충격반향-표면파기법 실험결과

위치	두께		위치	두께	
	실험값 (cm)	실제값 (cm)		실험값 (cm)	실제값 (cm)
# 3	15.2	14.5 (사각형공극 중앙)	# 6	30.7	30 (무결함)
# 4	15.4	14.5 (사각형공극 중앙)	# 7	18.7	16 (원형공극 경계)
# 5	17.1	14.5 (사각형공극 경계)	# 8	16.6	16 (원형공극 중앙)

(d)는 원형 공극의 중앙에서의 결과이다. 사각형의 경우와 마찬가지로 모서리 부분에서는 크게 두 형태의 공진 주파수를 볼 수 있다. 반면에 공극의 중앙에서는 공극의 위치에 해당하는 뚜렷한 공진 주파수 12400Hz를 얻을 수 있었다. 표면파기법으로부터 구한 P파 속도를 이용하여 위치를 찾아내면 16.6cm를 얻을 수 있는데, 이는 실제의 위치 16cm와 유사한 값이며 충격반향기법이 공극의 바로 위에서 수행되면 공극의 형상에 크게 영향을 받지않고 신뢰성있게 위치를 찾아냄을 알 수 있다. 각 위치에서의 결과를 표 3에 정리하였다.

4. 충격반향-표면파 병행기법의 현장 적용성 실험

본 연구에서 제안한 비파괴 검사기법인 충격반향-표면파 병행기법의 현장적용성에 대해 알아보기 위하여 프리캐스트로 제작된 관형태의 지하구조물과 개착식 터널에서 실험을 수행하였다. 프리캐스트 지하구조물은 지중속에 위치한 것이 아닌 일부 모형이므로 외부에서 부재의 기하학적 형상 파악이 가능하며, 개착식 터널에서는 실험이 수행된 부근에서 코어를 채취하여 두께를 검토하였다(서원석, 2000; Lin et. al., 1994).

4.1 프리캐스트 지하구조물

대상 구조물은 원형 형상의 내경 2m의 프리캐스트

지하구조물로서 길이는 4m이고, 후면부 1.1m 부분은 두 층으로 이루어져 점점 두께가 증가하는 형상이다. 전면부의 두께는 12cm이고 후면부의 두께는 두 층의 두께를 합하여 24cm 이다. 그림 11에 프리캐스트 형상을 나타내었다.

실험은 부재의 중앙에서 감지기 간격을 20cm로 두어 표면파기법을 먼저 수행하여 부재의 P파 속도를 추정하였다. 이로부터 얻은 P파 속도를 이용하여 단일층으로 이루어진 전면부(#1)에서 부터 두 층으로 이루어진 후면부(#19)까지 20cm의 간격으로 총 19개의 위치에서 충격반향기법을 수행하여 각 위치에서의 두께를 산정하였고, 실험결과를 그림 12에 나타내었다.

대상구조물은 지반 위에 놓인 형태라 하단의 경계조건은 자유단이라 할 수 있다. 따라서 그림을 보면 수치 해석 결과에서와 같이 크로스파워 스펙트럼의 위상 정보에서 대략 16000Hz~17000Hz 부근의 신호의 괴리 현상을 볼 수 있다. 이와 같은 정보를 이용하면 충격반향기법의 실험을 수행시 부재 두께에 대한 공진 주파수는 대략 16000~18000Hz 부근에서 나타날 것으로 예상된다. 분산곡선을 살펴보면 부재 두께에 해당하는 파장 0.1m 부근에서의 표면파 속도가 평균적으로 2400m/s를 보이며 이를 포아송비를 0.2로 가정하여 P파 속도를 추정하면 4300m/s이다. 분산곡선을 살펴보면 대략 파장 0.15m이상에서 표면파 속도의 감소현상을 볼 수 있는데 이는 경계면 하단부가 강성이 약한 지반의 영향 때문이

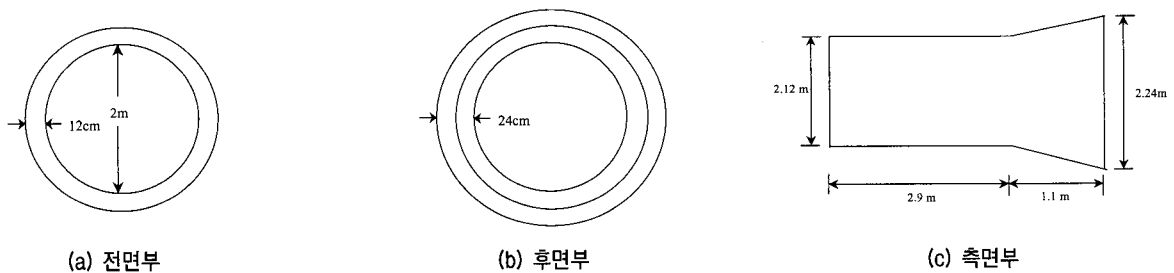
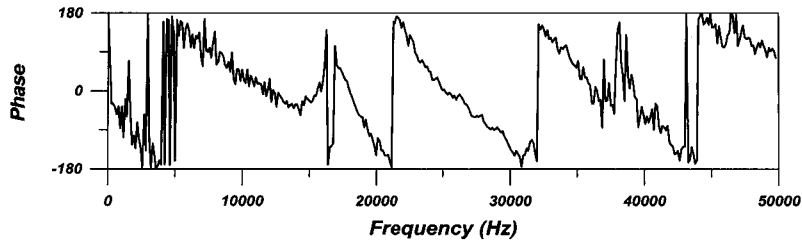
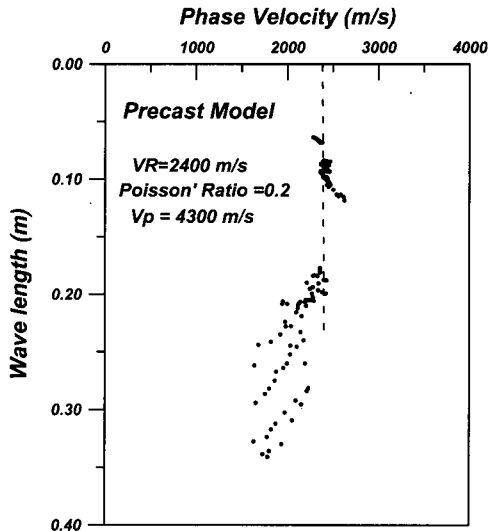


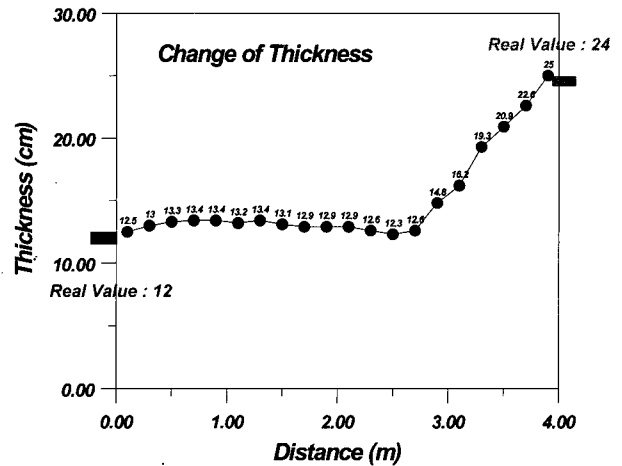
그림 11. 프리캐스트 모형 지하구조물의 형상



(a) 표면파기법 결과 (크로스파워 스펙트럼의 위상 정보)



(b) 표면파기법 결과 (분산곡선)



(c) 충격반향기법 결과 (두께변화 추정)

그림 12. 프리캐스트 모형 지구구조물에서의 실험결과

다. 이의 현상은 수치해석을 통해 이미 나타난 이질층의 영향 효과를 증명하는 것이라 하겠다(김동수 등, 2001). 이로부터 얻은 P파 속도를 이용하여 총 19개의 위치에서 충격반향기법을 통해 각 위치에서의 두께를 산정하였다. IE-SASW 병행기법을 통해 얻은 각 위치에서의 두께를 그림 12 (c)에 나타내었는데, 이는 실제 구조물의 두께와 거의 일치함으로써 제안된 기법의 현장적용성을 검증한 것이라 하겠다.

4.2 개착식 터널

프리캐스트 모형 구조물에 이어 개착식으로 시공된 터널형 구조물에서 충격반향-표면파 기법을 수행하였다. 터널의 단면을 살펴보면 바닥부분은 10cm의 버림콘크리트를 타설 후 30cm의 철근콘크리트 슬래브를 시공하였다. 천정부분은 바닥과 마찬가지로 30cm의 철근콘크리트를 타설하였는데 천정 외부는 지반과 직접 접한 구조이다. 그림 13에 이러한 터널의 형상을 나타내었다.

실험은 바닥부분과 천정 부분에서 표면파기법으로부

터 실험위치에서의 콘크리트 P파 속도를 추정하였으며, 이 결과를 이용하여 충격반향기법으로부터 두께를 추정하였는데, 그 결과를 그림 14에 나타내었다. 실험의 신뢰성은 실험이 수행된 천정 부분으로부터 인접한 지역에서 코어를 채취하여 두께를 확인하였다.

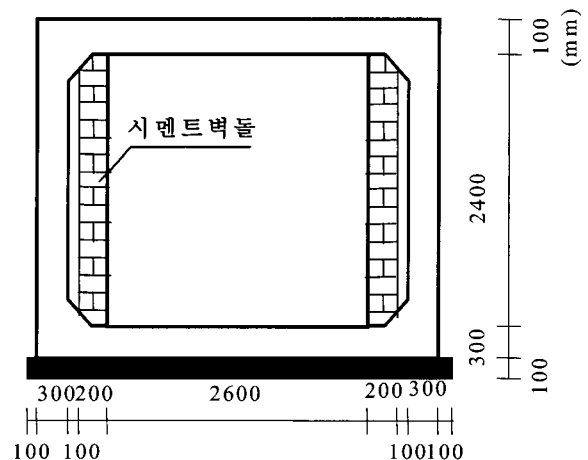
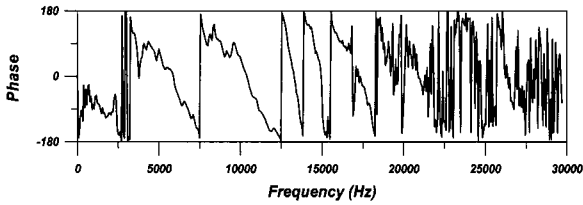
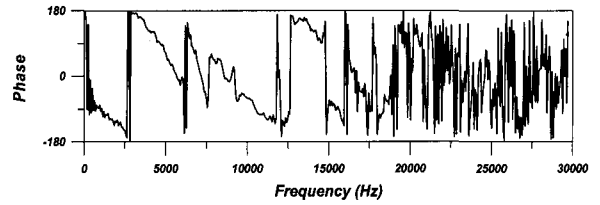


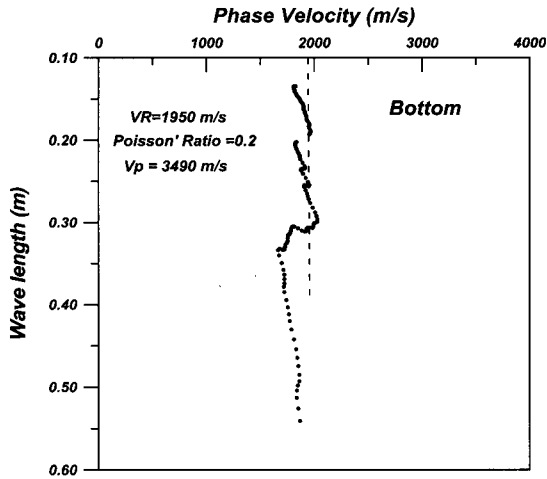
그림 13. 개착식 터널의 형상



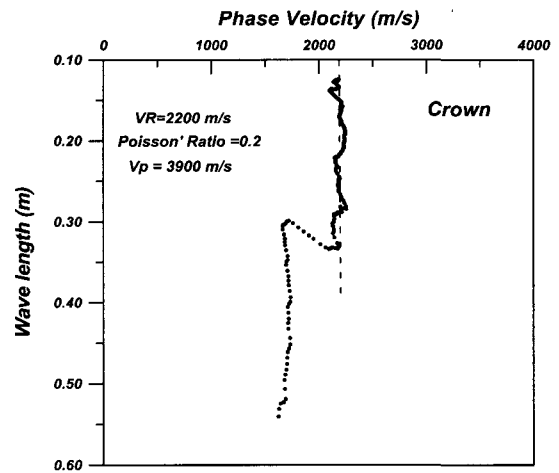
(a) 크로스파워 스펙트럼 (바닥)



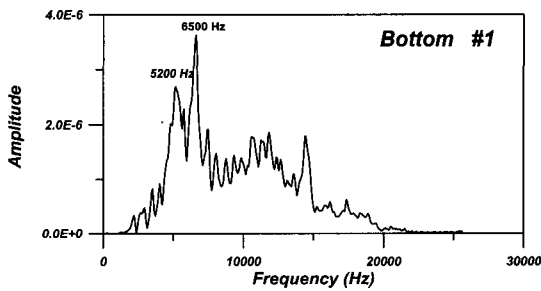
(b) 크로스파워 스펙트럼 (천정)



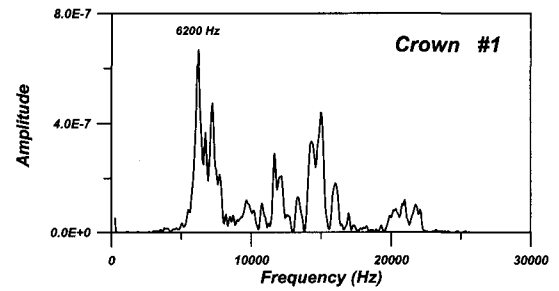
(c) 분산곡선 (바닥)



(d) 분산곡선 (천정)



(e) 충격반향기법 결과 (바닥)



(f) 충격반향기법 결과 (천정)

그림 14. 개착식 터널에서의 실험결과

표면파기법은 감지기의 간격을 30cm로 두어 바닥과 천정에서 실험을 수행하였는데 먼저 크로스파워 스펙트럼의 정보를 살펴보면 바닥 부분(그림 14 (a))은 버림 콘크리트가 존재하여 전체 두께에 해당하는 정보를 얻기 어려운 반면에, 천정 부분(그림 14 (b))은 바로 지반과 접해있어 이질층 사이의 임피던스 차이가 명확히 크기 때문에 크로스파워 스펙트럼의 위상정보에서 대략 6600Hz 부근의 두께에 해당하는 신호의 피리를 볼 수 있다. 분산곡선(그림 14 (c), (d))은 두 경우 모두 파장이 긴 영역에서 표면파 속도의 감소를 볼 수 있는데 이는 구조물과 접해있는 버림콘크리트와 지반이 상대적 강성이 약하기 때문에 나타난 현상이다(Joh, 1996; Park et. al., 2001). 분산곡선으로부터 바닥 부분은 부재 두께에

해당하는 파장 부근에서의 표면파 속도가 평균적으로 1950m/s를, 천정에 대해서는 평균 2200m/s이며 이를 포아송비를 0.2로 가정하면 P파 속도를 각각 3490m/s, 3900m/s로 추정할 수 있다.

또한, 터널의 바닥 부분과 천정 부분의 두께를 측정하기 위하여 표면파기법이 수행된 두 개의 감지기 위치에서 충격반향기법을 수행하였다. 바닥 부분(그림 14 (e))은 대략 6500Hz와 5200Hz 부근에서 두께에 해당하는 공진 주파수가 나타남을 볼 수 있다. 표면파기법으로부터 얻은 P파 속도 3500m/s를 적용하여 두께를 구하면 27.0cm와 33.7cm를 얻을 수 있다. 천정 부분(그림 14 (f))에 해당하는 결과를 살펴보면 6200Hz에서 두께에 해당하는 공진 주파수를 볼 수 있는데 표면파기법으로

부터 얻은 P파 속도 3900m/s를 적용하여 두께를 계산하면 31.5cm를 얻을 수 있다. 근처의 위치에서 코어를 채취하여 두께를 살펴본 결과 대략 30cm로써 본 시험 기법의 신뢰성을 검증할 수 있었다.

이상의 비교적 간단한 현장 실험으로부터 충격반향-표면파기법의 현장 적용성에 대해 알아보았다. 비록 많은 현장 적용을 수행해보지 못하였지만 본 기법의 신뢰성을 파악할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 콘크리트 구조물의 상태 및 결함검사를 위해 충격반향-표면파 병행기법을 제안하고 이에 대한 신뢰성 검토를 위해 모형부재를 제작하여 실험을 수행하였고, 간단한 현장시험을 수행하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 부재내에 불량콘크리트와 암반, 방수포를 설치한 모형 슬래브를 제작하여 실험을 수행하였다. 표면파기법으로부터 P파 속도를 추정하고 충격반향기법을 이용해 검토한 결과 0.9%~3.7%의 오차범위를 얻어 제안된 P파 속도 추정법이 실제 구조물에서도 신뢰성이 있음을 알아냈다. 이는 표면파기법으로부터 모델의 P파 속도를 2.5% 이내의 오차로 추정한 수치해석 결과와 일치한다. 또한, 추정한 P파 속도를 충격반향기법에 적용하여 부재의 두께를 추정한 결과 전체층에 대한 두께는 신뢰성있게 찾아낸 반면에 불량콘크리트의 위치에 대한 정보는 미약하게 알 수 있었으나 암반의 경우에는 콘크리트와 임피던스 차이가 크지 않아 경계층에 대한 정보는 알아낼 수 없었다. 방수포의 경우에는 방수포의 위치는 정확하게 찾아낸 반면에 방수포 외부의 정보는 알아낼 수 없었다. 이와 같은 결과는 수치해석 결과와 동일한 경향을 나타내고 있다.
- (2) 부재내에 스티로폼과 PVC 파이프를 이용하여 사각형과 원형 형태의 공극을 설치하였다. 표면파기법으로 추정한 P파 속도를 충격반향기법에 적용하여 공극의 위치를 비교적 정확하게 찾아낼 수 있었다. 공극의 바로 위에서 실험이 수행된 경우에는 위치를 정확히 찾아낸 반면에 공극의 모서리 위에서 실험이 수행된 경우에는 공극의 위치와는 다른 위치에서 공진 주파수가 나타났으며 보다 복잡한 신호를 볼 수

있었다. 따라서 실제 구조물에 적용시에는 공극으로 추정되는 부분에서는 보다 세밀한 간격의 실험이 필요하다.

- (3) 지반위에 놓인 프리캐스트 모형 구조물과 개착식 터널에서 표면파기법을 통해 P파 속도를 추정하고 이를 충격반향기법에 적용하여 두께를 추정하였다. 프리캐스트 모형 구조물의 경우 후면부의 두께가 점점 증가하는 형상을 비교적 정확하게 찾아내었다. 개착식 터널에서는 천정에서 코어를 채취하여 확인한 결과 시험으로부터 추정한 두께와 5% 이내의 오차범위에서 비교적 일치하여 본 제안된 기법의 현장 적용이 가능성이 있음을 살펴보았다.

본 논문에서 제안한 표면파기법으로부터 P파 속도를 구하여 충격반향기법에 적용하는 방법에 대한 수치해석적 연구와 실험적 연구를 통하여 제안된 시험법이 상당한 신뢰성을 가지고 있으며, 대상부재의 두께 및 결함의 위치를 찾아낼 수 있음이 밝혀졌다. 그러나 암반과의 경계층 파악이나 방수포 외부의 정보를 찾아내기 위해서는 보다 세부적인 영향요소 연구가 요구된다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 김동수, 이광명(1998), "탄성파를 이용한 콘크리트 구조물의 비파괴 검사", *콘크리트학회지*, 제10권 2호, pp.40-49.
2. 김동수, 윤종구, 이병식, 박형춘(2001), "SASW 기법에 대한 수치해석 적용성 연구", *한국지반공학회논문집*, 제17권 1호, 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.(1997a) *Impact-Echo*, Bullbrier Press.
12. Sansalone, M., J., Lin, J. M., and Streett, W. B.(1997b), "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)