

SASW 기법을 이용한 터널 벽체의 건전도 평가 Evaluation of Tunnel Lining Integrity Using Spectral-Analysis-of-Surface-Waves(SASW) Method

송 명준¹⁾, Myung-Jun Song, 조 성호²⁾, Sung-Ho Joh, 정 연문³⁾, Yun-Moon Jung,
이 영남⁴⁾, Young-Nam Lee

- ¹⁾ 현대건설 기술연구소 연구원, Research Engineer, Hyundai Institute of Construction Technology
²⁾ 중앙대학교 토목공학과 전임강사, Full-Time Lecturer, Chung-Ang University
³⁾ 현대건설 기술연구소 선임연구원, Senior Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology
⁴⁾ 현대건설 기술연구소 연구위원, Director, Hyundai Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : Spectral-Analysis-of-Surface-Waves(SASW) method uses the dispersive characteristics of surface waves to determine the stiffness variation of a layered system with depth. SASW testing is performed on the surface, which makes the method nondestructive and nonintrusive. The purpose of this study is to apply the SASW method to a nondestructive integrity testing for the shotcrete lining of the research tunnel located at HICT, Yong-In City. To verify results of SASW method, downhole tests at the turning shelter close to a SASW testing site and a numbers of core samplings were collected. After the comparison of the results of SASW test with the results of downhole tests and core samplings, SASW method is verified to be a cost-effective and well-suited nondestructive test as an integrity testing method for tunnel lining.

Key words : downhole test, NDT, SASW, shear wave velocity, tunnel lining,

1. 서론

20세기 후반의 현시대는 고도의 산업 발전과 인구 증가로 인하여 지하공간에 대한 수요가 급증하고 있다. 국내에서도 이러한 추세에 동반하여 지하철, 지중선 터널, 고속철도 터널, 도로 터널, 수로 터널 등과 같은 많은 형태의 터널공사 뿐만 아니라, 지하 유류 저장시설, 지하 암반의 농산물 저장시설, 핵 폐기물 저장 시설 등의 지하공동 건설이 활발히 시행되고 있는 실정이다. 이러한 활발한 지하 공간에 대한 건설에 더불어서 최근 관심이 되고 있는 영역은 터널 벽체에 대한 건전도 평가이다. 최근 지하공간 구조물의 건전도 평가를 위해서 탄성파 검사, 열전도 검사, GPR등과 같은 비파괴 검사방법의 활용에 관한 연구가 진행되고 있다.

표면파의 주파수영역 해석기법(SASW, Heisey et al, 1982; Stokoe et al, 1994; Joh, 1996)은 지표면 또는 구조물의 표면에서 수행되는 비파괴, 비관입 시험이며 다른 지반조사 방법들보다 단시간에 경제적으로 시험할 수 있는 장점을 가지고 있다. SASW 기법은 콘크리트 구조물을 대상으로 하는 비파괴 시험

영역에서 이미 그 가능성이 높고 평가된 기법인데, 터널의 벽체에 대해서는 본격적으로 시도된 적이 없 그림 2였다. 본 연구에서는 SASW 기법을 터널 벽체의 건전도 평가에 적용하기 위해서, 현재 용인시 마북리에 위치한 현대건설 기술연구소의 시험터널의 숏크리트 벽체에서 SASW 기법을 이용한 건전도 시험을 수행하였다. 또한, SASW 실험결과와 신뢰성 평가와 확인을 위하여 코어링 시험과 downhole 시험을 수행하였다. 이들 시험결과와 비교를 통하여 SASW기법의 터널 벽체의 건전도 시험법으로서의 가능성을 평가하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 현장 개요

본 연구에 사용된 터널은 경기도 용인시 마북리에 위치하고 있는 현대건설(주) 기술연구소 부지내에 시공된 연구용 시험터널이다. 본 지역의 기반암은 경기 용인 지역에 넓게 분포하는 선캠브리아기의 경기 편마암 복합체중에서 가장 대표적인 호상 흑운모 편마암(banded biotite gneiss)으로 구성되어있으며, 부분적으로는 규장편마암과 각섬석 편마암을 배태하고있다. SASW 실험이 실시된 벽체배면의 지질상태는 대체적으로 파쇄가 심한 편마암층이며, 0-1m 까지는 파쇄가 심한 RQD가 0이며, 1-2m 까지는 RQD가 35, 2-3m까지는 RQD가 50이며, 3-5m까지는 RQD가 80인 상태가 양호한 편마암층으로 구성되어있다. 본 연구에서 SASW 실험 및 downhole 시험이 실시된 시험터널의 입체 단면도가 그림 1에 도시되어 있다. SASW 실험을 실시한 진입터널은 1, 2차 숏크리트와 강지보재가 설치되어있다.

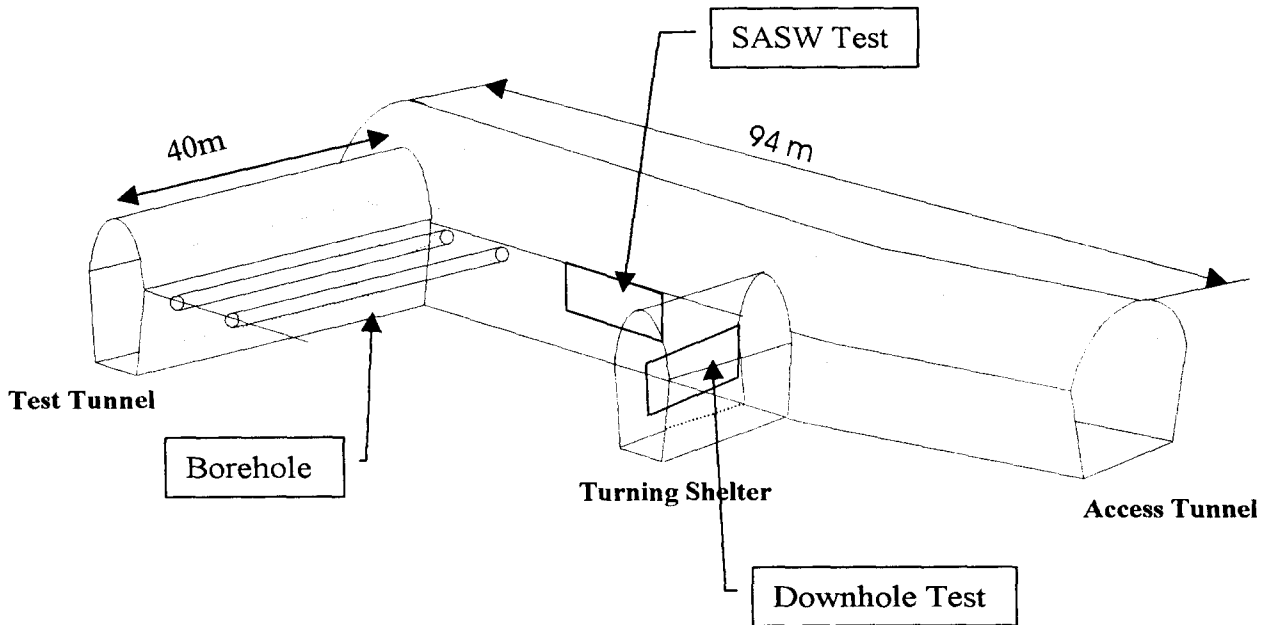


그림 1. 마북리 연구용 터널내 SASW 벽체 건전도 실험을 위한 입체 단면도

3. SASW 실험

3.1 SASW 기법

SASW(Spectral-Analysis-of-Surface-Waves, 주파수 영역 표면파 해석) 기법은 여러 지반공학적인 환경에서 깊이별 전단 강성도(shear stiffness)의 변화를 비파괴적으로 평가하기 위하여 성공적으로 적용

이 되어왔다. SASW 실험을 간략하게 정의하면 두 개 위치에서 기록된 응력과 진동 간의 위상각 차이 (phase difference)를 여러 감지기간 거리를 이용하여 측정하는 것이라고 할 수 있다.

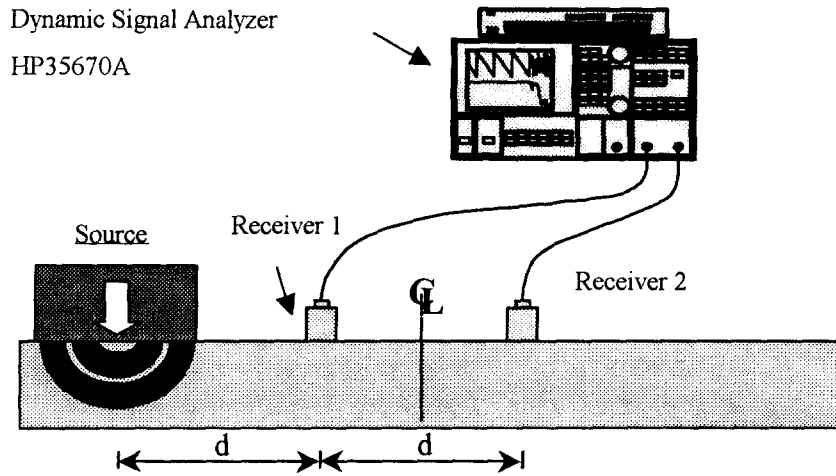


그림 2. 일반적인 SASW 실험장비와 구성(Joh, 1996)

현장에서 측정된 위상각 차이로부터 일련의 파장(wavelength)에 대해서 응력파의 위상 속도(phase velocity)를 결정하는데, 이러한 파장에 대한 위상속도의 관계를 분산곡선(dispersion curve)이라고 한다. 이 분산곡선은 평가 대상인 부지의 서명(signature)과도 같은 것으로서, 특정 부지에 대해 분산곡선이 유일하게 결정되어진다. 현장에서 실험에 의해 결정된 분산곡선은 실험분산곡선(experimental dispersion curve)이라고 하며, 각 감지기간 거리에 대한 실험분산곡선들을 모두 합친 곡선을 복합실험분산곡선(composite experimental dispersion curve)이라고 한다. 이 복합실험분산곡선은 부지의 전단파 속도 주상도를 도출하는데 사용이 된다. 전단파 속도 주상도의 도출은 역산해석(inversion analysis)이나 반복적 정모델링 해석(iterative forward modeling analysis)에 의해서 가능하다. 이는 근본적으로 전단파 속도 주상도를 가정하고 그에 대하여 이론적으로 계산된 분산곡선, 즉, 이론분산곡선(theoretical dispersion curve)과 실험분산곡선이 일치될 때까지 반복적으로 가정한 전단파 속도 주상도를 변화시켜 나가는 것이다. 이러한 전단파 속도 주상도의 가정에 대한 수정이 최적화 이론에 의해서 수행이 되면 이를 역산해석이라고 하고, 인위적으로 인간의 판단에 의해서 수정이 되면 반복적 정모델링 해석이라고 한다. 특히, 역산해석에는 복합실험분산곡선(composite experimental dispersion curve)을 추세선(curve fitting; 회귀분석)등의 기법을 이용하여 하나의 대표분산곡선(representative compact dispersion curve)을 만든 후, 이 대표분산곡선(representative dispersion curve)과 이론분산곡선(theoretical dispersion curve)이 일치시키는 역산기법인 전반역산(global inversion)과 각 감지기간 거리에 해당하는 일련의 실험분산곡선들을 이에 상응하는 이론분산곡선들과 개별적으로 일치시키는 역산해석인 배열역산(array inversion)해석이 있다.

3.2 실험 절차 및 구성

본 터널은 연구용 터널이어서 대부분의 터널 벽체는 슛크리트와 강재 지지보만 설치되어 있다. 이러한 터널벽체에서의 SASW 실험은 슛크리트 자체의 건전도를 파악하는 것뿐만 아니라, 슛크리트 이면의 원지반과의 접촉상태, 또한 원지반 자체의 강성 등을 파악하는데 주안점을 두었다.

본 터널의 벽체에 대한 SASW 실험은 횡방향으로 제약이 없는 관계로 가능한 긴 감지기간 거리를 이용하여 벽체 깊이 강성을 평가하고자 하였다. SASW 실험에서 채택된 감지기간 거리는 0.2, 0.5, 1, 2,

4 m이었으며, 구체적인 실험 구성은 표 1에 소개되어 있는 바와 같다.

표 1. 연구용 터널내의 슛크리트가 타설된 벽체에서 수행된 SASW 실험의 개요

감지기간 거리 (m)	발진기 위치 (m)	감지기 1의 위치 (m)	감지기 2의 위치 (m)	발진기 종류	주파수 대역 (kHz)
0.2	0.3	0.1	-0.1	소형 해머	51.2
0.5	0.75	0.25	-0.25	소형 해머	25.6
1.0	1.5	0.5	-0.5	소형 해머	12.8
2.0	3.0	1.0	-1.0	슬레지 해머	3.2
4.0	6.0	2.0	-2.0	슬레지 해머	1.6

3.3 실험자료의 분석 및 해석

마북리 연구용 터널의 벽체에 대한 SASW 실험자료 분석은 본 연구에서 개발된 SEISM을 이용하여 수행되었다. SEISM(Joh, 1997)은 SASW 실험으로부터 측정된 표면파를 주파수-시간 공간에서 탄성파의 에너지 분포를 시각화하여 주는 거보 스펙트럼(Gabor spectrum)을 계산하고 contour 그래프로 도시

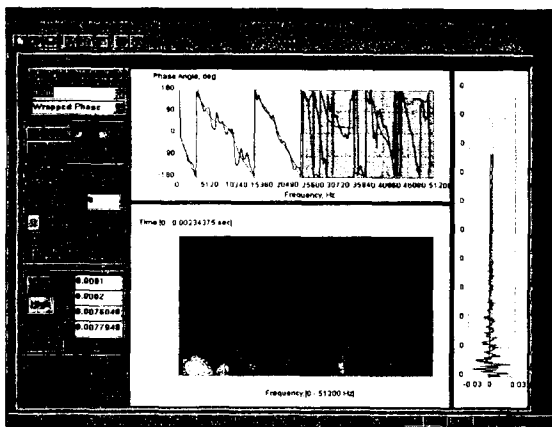


그림 3. 0.2m 감지기간 거리에 대한 SEISM 실행화면

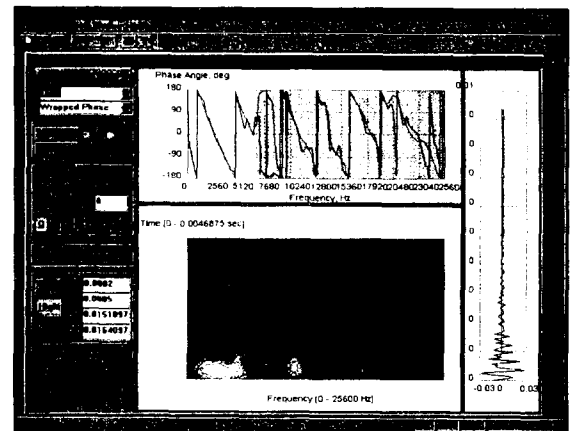


그림 4. 0.5m 감지기간 거리에 대한 SEISM 실행화면

하여, 거보 스펙트럼으로부터 구한 탄성파의 전파에 대한 이해를 위상각 스펙트럼의 전개에 활용하는 IRF(Joh, 1996) 기법을 적용한 SASW 데이터 해석 프로그램이다.

본 터널내의 벽체에 대한 SEISM 처리결과는 그림 3~7에 도시되어 있으며, 각 감지기간 거리에 대한 실험 자료의 분석결과인 위상속도 분산곡선은 그림 8에 주어져 있다. SASW 실험 자료 분석의 주안점은 응력파군의 전파 상황의 파악에 있다. 터널의 벽체에 대해서는 0.2m의 감지기간 거리에 대한 거보 스펙트럼으로부터 4m에 대한 거보 스펙트럼까지 하나의 맥락으로 살펴보면, 약 34, 15, 11, 2.5, 0.95, 0.3 kHz 등에 중심을 둔 응력파군을 살펴 볼 수 있다. 이러한 응력파의 전파 상황을 염두에 두고 마스킹을 한 결과가 동일한 그림 3~7에 표시되어 있다. 이렇게 거보 스펙트럼에 입각하여 분석한 위상각 스펙트럼은 그림 8의 위상각 분산곡선의 형태로 정리되어 있는데, 그림 8의 위상각 분산곡선에 의하면 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

표층의 두께를 암시하는 분산곡선의 수평부위 종료 지점에 해당하는 파장은 약 20 cm 정도인데, 이로부터 터널의 벽체의 두께는 약 20cm 정도임을 판단할 수 있다(Rössset et al, 1990). 그리고, 전체적인

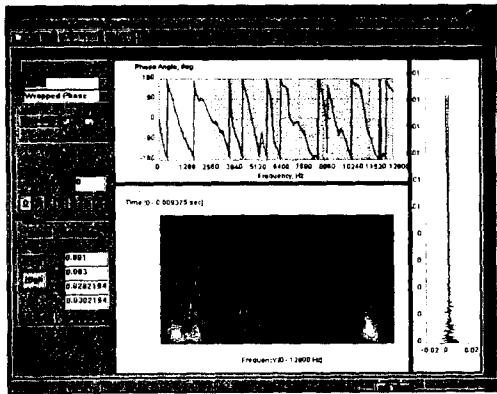


그림 5. 1m 감지기간 거리에 대한 SEISM 실행화면

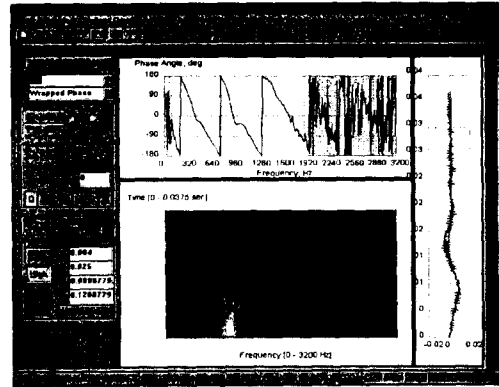


그림 6. 2m 감지기간 거리에 대한 SEISM 실행화면

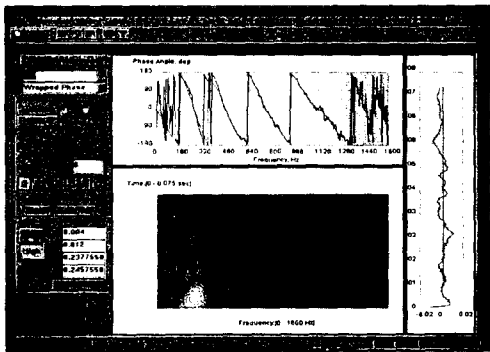


그림 7. 4m 감지기간 거리에 대한 SEISM 실행화면

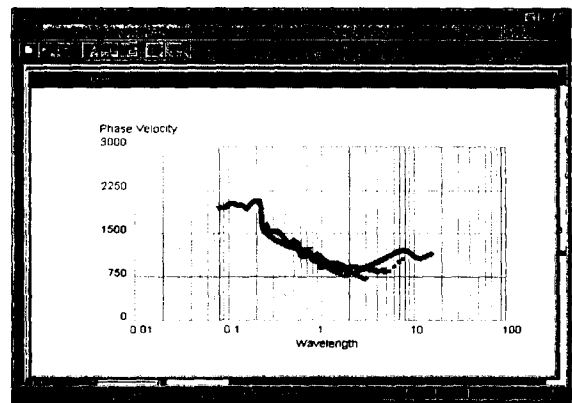


그림 8. SASW 실험으로 구한 복합분산곡선

분산곡선의 추이에 의하면, 본 실험이 행해진 벽체의 지층은 전단파 속도가 700 m/sec 보다 더 작은 층이 중간에 존재하고, 그 아래로 점진적인 강성의 증가를 보여주고 있음을 알 수 있다.

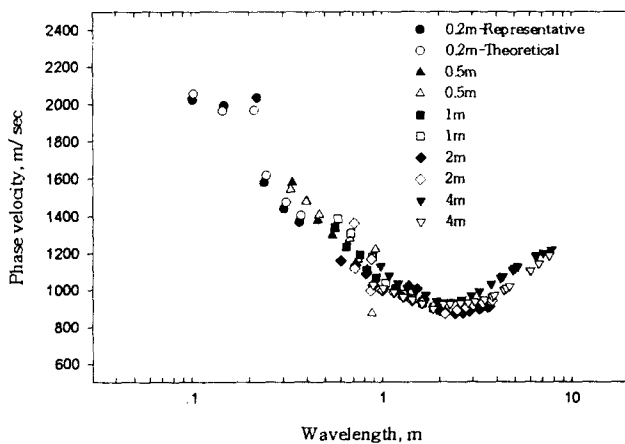


그림 9. 실험분산곡선과 이론분산곡선의 비교

이러한 분산곡선의 추이로부터의 개략적인 판단은 FIT7(Joh, 1996)에 의해서 수행된 배열역산(array inversion)결과로부터도 확인이 되고 있다. 그림 9에는 현장실험에서 구한 복합실험분산곡선과 각각의 감지기간 거리에서의 배열역산에 의한 이론 분산곡선이 비교되어 있으며 역산해석 결과인 전단파속도 주상도는 그림 10에 제시되어 있다. 그림 10에 제시되어 있는 전단파 속도 주상도에 의하면, 약 15cm 정도의 표층(숫크리트)이 있음을 알 수 있고, 또한 그 아래로 약 600 m/sec의 교란된 층이 존재하며, 약 80 cm 정도의 심도에서부터는 1300 m/sec 이상의 다소 단단한 지층이 시작되고 있음을 알 수 있다.

이상과 같은 SASW 실험으로부터 원지반을 덮고 있는 숫크리트의 두께가 약

15 cm이며, 그 아래로 600 m/sec 정도의 전단파 속도를 갖는 심한 파쇄대층이 존재하고, 지표면 아래 약 1-2m 에서는 약 1000 m/sec 정도의 다소 파쇄된층, 2-3m 에서는 약 1300 m/sec 정도의 지층이 이어짐을 알 수 있다. 이는 2장에 설명되어있는 인접한 시추공에서의 시추자료와도 잘 일치한다.

4. 코어링 시험 결과와의 비교

SASW 실험이 수행된 벽체의 인접한 벽체에서 약 8개의 슛크리트 두께확인을 위한 코어링 시험이 실시되었다. 각각의 코어링 시험공에서의 슛크리트의 두께는 16, 17, 19, 16, 12, 24, 27, 28cm 였다.

본 터널의 슛크리트면은 일반적인 슛크리트면(그림 11)과 일부 과도하게 슛크리트양이 많은 부분(24, 27, 28cm)으로 나눌 수 있는데, SASW 실험이 실시된 면과 같이 일반적인 슛크리트면의 슛크리트 두께는 평균적으로 약 16 cm였으며, 슛크리트의 과도한 타설로 배가 나온부분의 슛크리트 두께는 약 26 cm 정도였다. 따라서, 실제 코어링 시험결과로부터 SASW 실험 결과(스�크리트 두께=15cm)는 상당히 정확함을 알 수 있다.

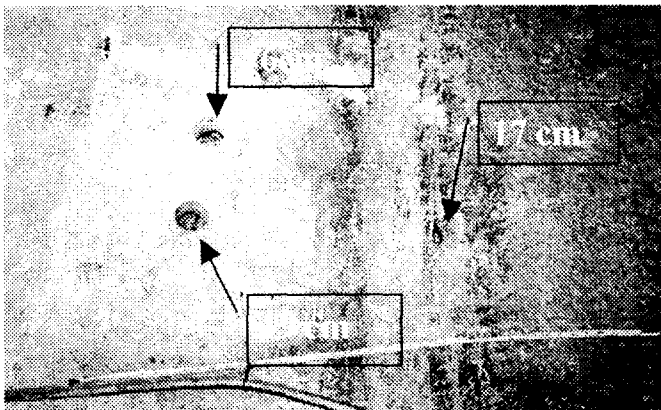


그림 11. 슛크리트 층 두께 확인을 위한 코어링을 한 일반적인 벽체와 슛크리트 두께

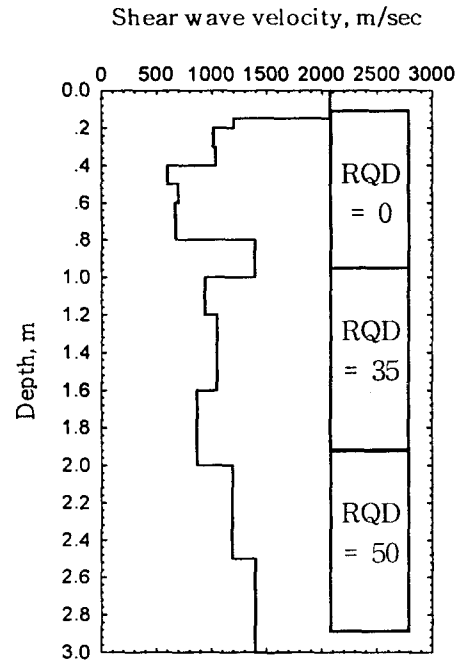


그림 10. 마북리 연구용 터널의 벽체에서 SASW 실험으로부터 구한 전단파속도 추상도

5. Downhole 시험 결과와의 비교

SASW 실험이 수행된 벽체의 인접 벽체에서 downhole 시험을 수행하였다. SASW 실험이 수행된 벽체와 약 2-4m 가량 떨어져있는 벽체면과 turning shelter를 이용하여, 수평 시추를 하지않고 양쪽 벽체면을 이용하여 downhole 시험을 실시하였다(그림 1, 12 참조). downhole 시험의 모식도는 그림 12에 잘 나타나 있다. 발전기로는 트리거가 부착된 망치를 사용하여, 슛크리트면을 양각으로 깎은 후 양방향으로 타격하여 전단파를 발생시켰다. 감지기는 가속도계(PCB 353B65)를 SV-파의 감지에 적합하게 수직방향으로 하여 hot glue를 사용하여 0.2m 간격으로 부착되었다.

Downhole 시험에서 측정된 파형은 그림 13에 깊이별로 SV파의 초동(first arrival)과 파형이 나타나 있다. 여기서 초동(first arrival)은 양방향의 타격으로 인한 SV파의 극성이 바뀌는 것으로 확인할 수 있다. 전단파 속도의 해석은 직선 전파경로법과 SVD(singular value decomposition)를 이용한 직접역산법(Song, 1995)을 사용하여 역산해석을 하였다. Mok(1987)등의 연구에 따르면, 시험방법이 쉬운 doehole 시험의 장점을 살리기 위해서는 해석시 반드시 역산해석을 수행할 것을 권장하고 있다.

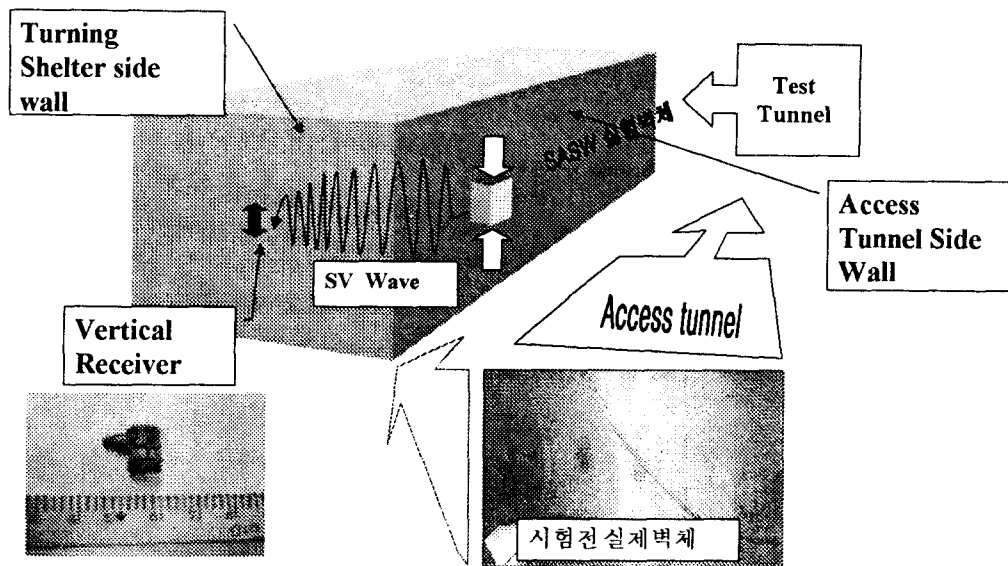


그림 12. 터널 벽체에서의 downhole 시험 개요도와 시험이 수행된 벽체

Downhole 시험결과는 그림 14에 SASW 실험결과와 함께 도시되어있다. 여기서 역산해석은 층을 10개로 나눈 역산해석결과가 도시되어있다. 역산해석결과, 벽체가 강한 층 사이에 약한 층이 있는 샌드위치 형태의 구조로 되어있음을 시추자료와 SASW 결과, 그리고 downhole시험의 역산결과로 알 수 있다. 따라서, 이러한 경우 time-distance 곡선법에 의한 결과는 역산결과보다 많은 오차를 가지며, 또한, downhole시험으로써 정확히 해석해 내기 힘든 경우이다.

Downhole 시험결과와 SASW 실험결과는 그림 14에 코어링에 의한 숏크리트의 두께와 함께 비교되어있다. 이 그림에서 downhole 시험 결과는 SASW 결과와 전체적인 추세는 유사하나 계산된 속도에서 다소 차이가 있는 것을 알 수 있다. 이는 downhole 시험 위치와 SASW 실험위치의 차이로 인한 벽체배면의 매질의 차이, 또는 그림 12에서와 같이 감지기가 위치한 turning shelter의 벽체 부분도 숏크리트로 얇게 타설되어 있기 때문에 파의 전파경로가 원지반보다 상대적으로 전단파속도가 빠른 숏크리트면을 따라서 전파됨으로써 실제 지반의 전단파 속도보다 빠른 속도가 산정된 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 SASW 기법을 터널 벽체의 건전도 평가에 적용하기 위해서, 용인시 마북리에 위치한 현대건설(주) 기술연구소의 연구용 시험터널의 숏크리트 벽체에서 SASW 기법을 이용한 건전도 시험을 수행하였다. 또한, SASW을 이용한 터널 벽체의 건전도 실험결과의 신뢰성 평가와 확인을 위하여 코어링 시험과 downhole 시험을 수행하였다. 전체적인

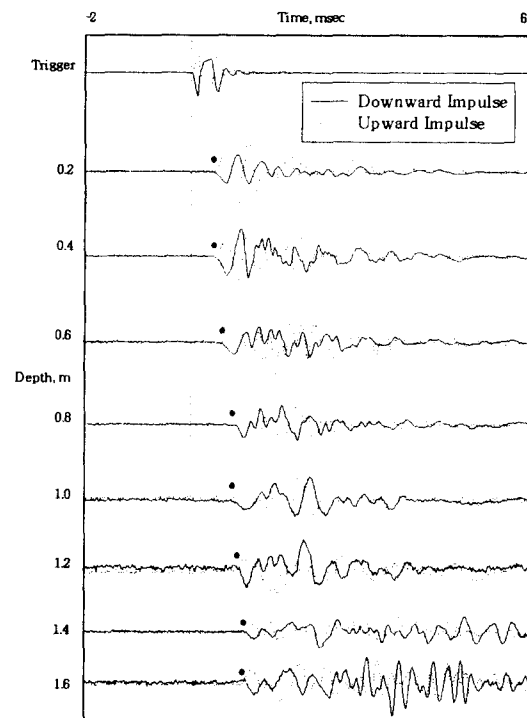


그림 13. downhole 시험에서 측정된 SV파와 초동

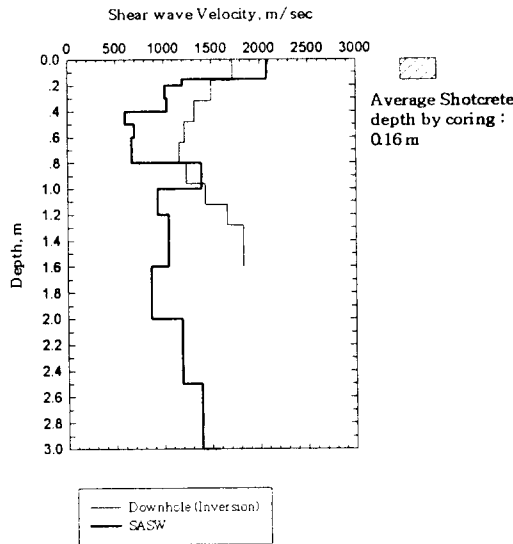


그림 14. 터널벽체에서의 SASW 실험, downhole 시험과 코어링 시험의 결과의 비교

암반층의 경향을 확인하기 위해서 인접벽체에서 수행된 downhole 시험 결과, SASW결과와 전체적인 추세는 유사하나 계산된 속도에서 다소 차이가 나는 것을 알 수 있었다. 이는 downhole 시험위치와 SASW 실험위치의 차이로 인한 벽체배면의 매질의 차이, 또는 감지기가 위치한 turning shelter의 벽체 부분도 슛크리트로 얇게 타설되어 있기 때문에 파의 전파경로가 원지반보다 상대적으로 전단파 속도가 빠른 슛크리트면을 따라서 전파되는 가능성등에 의해서 실제 지반의 전단파 속도보다 빠른 속도가 산정된 것으로 판단된다. SASW 실험으로부터 슛크리트의 두께와 벽체 배면의 심한 파쇄대층의 존재와 벽체 배면의 강성도(stiffness)를 알 수 있었고, 이는 인접한 시추공에서의 시추자료와도 잘 일치하였다. 또한, 슛크리트의 두께를 확인하기 위한 코어링 시험 결과, 실제 슛크리트의 평균 두께는 SASW 실험결과와도 잘 일치하였다. 따라서, SASW기법을 터널 벽체의 건전도 시험에 적용하면, GPR등과 같은 기존의 방법들이 제시할 수 있는 단순한 벽체의 두께 뿐만 아니라 벽체 배면의 강성도(stiffness)까지도 파악할 수 있다.

참고문헌

1. 송 명준(1995), " Seismic Geotomography를 이용한 지반 영상기법에 관한 연구", 석사학위논문, 경희대학교.
2. 현대건설(주) 기술연구소, 한국건설기술연구원(1997), "SASW 기법을 이용한 지반강성구조의 평가에 관한 연구".
3. Heisy, J. S., K. H. Stokoe, II, W. R. Hudson, and A. H. Meyer(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.
4. Joh, Sung-Ho(1996). "FIT7 : a Program for forward modeling, inversion, and time history generation for the surface waves.", The University of Texas at Austin.
5. Joh, Sung-Ho(1996), "Advances in the Data Interpretation Technique for Spectral-Analysis-of Surface-Waves(SASW) Measurements", Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
6. Joh, Sung-Ho(1997), "SEISM : Stable Determination of Experimental Dispersion Curve Using IRF Technique from SASW Measurements", Chung-Ang University.
7. Mok, Y. J. (1987), "Analytical and Experimental Studies of Borehole Seismic Methods", Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
8. Röesset, J. M., D. W. Chang, K. H. Stokoe, II and M. Aouad(1990), "Modulus and Thickness of Pavement Surface Layer from SASW Tests", *Transportation Research Record* 1260, 1990, pp. 53-63.
9. Stokoe, K. H. II, Wright, S. G., Bay, J. A. and Röesset, J. M. (1994), "Characterization of Geotechnical sites by SASW method", Technical Report : Geophysical Characterization of Sites, *Proc. XIII ICSMFE Technical Committee* 10, New Delhi.