

터널 국부정밀 안전진단을 위한 탄성파 기법의 적용성에 관한 연구

Feasibility Study of Seismic Measurements for the Safety Assessment of Tunnel Concrete Lining

조성호¹⁾, Sung-Ho Joh, 배규진²⁾, Gyu-Jin Bae, 나경준³⁾, Kyung-Joon Na, 이성원⁴⁾ Sung-Won Lee, 오상덕⁵⁾, Sang-Duk Oh

- ¹⁾ 중앙대학교 건설대학 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang University
- ²⁾ 한국건설기술연구원 수석연구원, Research Fellow, Korea Institute of Construction Technology
- ³⁾ (재)한국건설품질관리연구원 본부장, Director, Korea Construction Quality Research Center
- ⁴⁾ 한국건설기술연구원 연구원, Researcher, Korea Institute of Construction Technology
- ⁵⁾ 중앙대학교 지구환경시스템공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Urban Engineering, Chung-Ang University

SYNOPSIS : The increasing construction of underground space has initiated and developed the technology of maintaining underground facilities in safety. Recently variety of technologies are widely adopted for the safety assessment of tunnel concrete lining, but the more efficient and reliable methods need to be developed. Seismic methods such as Impact Echo testing and SASW measurements have been successfully used to investigate the geotechnical sites and to evaluate the structural integrity of concrete structures. Feasibility of SASW technique and Impact Echo technique for the safety assessment of tunnel concrete lining were investigated at a tunnel located in KangWon-Do. Additionally, at the same locations, GPR testing was performed by a group specialized in the safety assessment of tunnels. The results of seismic measurements, GPR testing and velocity measurements of a core collected at the adjacent area were compared, and the validity of seismic methods for the safety assessment of tunnels were proved.

KEYWORDS : Seismic Measurements, Safety Assessment, Non-Destructive Evaluation, Tunnel Concrete Lining, SASW Measurements, Impact Echo Testing

1. 서론

현대 사회의 문화공간 증대와 여러 사회간접시설의 확충으로 인하여 지하철, 고속 전철, 수로터널 등의 지하공간 활용에 대한 수요 및 건설이 급증하고 있다. 더불어, 건설된 지하공간의 안전성 문제에 대해서도 사회적 관심이 높아지면서 이를 진단하기 위한 다양한 기술의 적용이 활발해지고 있는 추세이다. 그러나, 안전진단에 적용되고 있는 여러 기술들의 대부분이 외국기술 및 장비에 의존적이고 새로운 기술개발에 노력이 부족한 상태이다.

최근들어 지반조사 및 콘크리트 구조물 건전도 평가에 있어서 탄성파를 활용하는 기법들이 널리 활용되고 있다. 탄성파를 이용하는 기법은 비파괴적으로 수행되기 때문에 대상 구조물에 파손을 가하지 않고 수행할 수 있으며, 신속하고 경제적으로 수행되는 장점이 있다. 이러한 탄성파 기법중 대표적인 것은 SASW 기법과 Impact Echo 기법인데, 이들 기법은 지반조사뿐만 아니라 도로포장, 교량, 콘크리트 중력식 댐 등과 같은 구조물에서도 구조물의 건전도를 평가하는데 있어서 매우 효과적이라고 보고되어 있다. 본 연구의 대상인 터널 라이닝의 경우에 있어서도 상기 탄성파 기법이 적용된 사례가 있는데, 1·2차 숏크리트, 방수막, 2차 콘크리트 라이닝 등이 복합적으로 구성하고 있는 터널 라이닝 구성 전체에 대한 적용이라기 보다는 가장 외부에 노출되어 있는 2차 콘크리트 라이닝에 대한 적용이어서, 터널 라이닝 구성전체에 대한 탄성파 기법의 적용성 평가로는 다소 미흡하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 타 구조물에서 많이 활용되고 있는 탄성파 기법 중 SASW 기법과 Impact Echo 기법을 강원도 ○

○도로 터널의 안전진단시 동행하여 현장의 터널 라이닝에 적용하여 건전도 평가 수단으로서 적합한지를 조사하였다. 또한 최근 터널안전진단에 필수적으로 활용되고 있는 GPR 탐사 결과와 비교하고 인접 지역에서 채취된 콘크리트 코아에 대한 탄성과 실험 등을 통하여 이들 탄성과 기법의 장단점을 분석하였다.

2. 콘크리트 코아에 대한 탄성과 실험

일반적으로 도로터널의 경우 5년마다 1회 이상(1종 시설물일 경우)의 정밀안전진단을 받도록 규정되어 있다. 도로터널의 정밀안전진단을 수행할 경우 콘크리트 라이닝의 압축강도의 측정과 기타 물성을 측정하기 위하여 최소한의 수에 한하여 콘크리트 라이닝에서 코아를 채취한다. 본 연구를 위하여 탄성과 시험이 수행된 강원도 ○○터널에서도 여러 개의 코아를 채취하였는데, 그 중 하나는 SASW 실험과 Impact Echo 시험이 수행된 곳에서 채취되었다. 시험위치와 코아 채취 위치에 대하여는 그림 2.b에 도시되어 있다.

채취된 코아에 대하여 탄성과 속도, Poisson 비, 감쇄비를 측정하기 위한 시험을 수행하였는데, 코아에 대한 탄성과 시험방법은 그림 1에 보여진 바와 같다. 탄성과 속도로는 P-파(constrained) 속도, S-파 속도, Rod 파(unconstrained) 속도를 측정하였는데, S-파 속도와 Rod 파 속도는 응력파가 양쪽 자유단에서 다중 반사되는 주파수 성분을 측정함으로써 구할 수 있고, P-파 속도는 응력파가 한쪽 단에서 반대쪽 단으로 전파되는 시간을 측정함으로써 구할 수 있다. 이러한 방식으로 측정된 S-파 속도는 2,089m/sec이고, Rod 파 속도는 3,303m/sec이며, P-파 속도는 3,819m/sec이다. Poisson 비는 두 가지의 탄성과 속도를 이용하여 계산할 수 있는데, S-파 속도와 Rod 파 속도로부터 결정한 Poisson 비는 0.25, S-파 속도와 P-파 속도로부터 결정한 Poisson 비는 0.29가 된다. 이 중 콘크리트의 Poisson 비로 0.29는 다소 과다한 것으로 S-파 속도와 Rod 파 속도로부터 추정된 Poisson 비가 더 합리적이다. S-파와 P-파 속도로부터 추정된 Poisson 비가 과다하게 계산된 것은 P-파 속도를 측정하기 위하여 사용한 측정장비의 해상도 문제로 인하여 보다 더 정확한 측정이 용이하지 않았기 때문이라고 할 수 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 P-파의 속도를 직접 측정된 것보다는 S-파 속도와 Rod 파 속도로부터 추정된 Poisson 비를 이용하여 S-파 속도로부터 추정된 값을 사용하기로 하였는데, 추정된 P-파 속도는 3,618 m/sec이었다. 이렇게 탄성과 실험에 의해서 측정된 코아의 탄성과 속도는 Impact Echo 시험 자료 분석에 활용하였다. Impact Echo 시험은 다중반사 주파수 (multiple-reflection frequency), 매질의 속도, 매질의 길이(두께)의 세가지 변수를 결정하게 되는데, 이 중 다중반사 주파수는 실험에 의해서 측정하는 것이고, 매질의 속도와 매질의 길이 두 가지 중 하나는 기지의 변수이어야 한다. 따라서, 코아의 탄성과 속도는 Impact Echo 시험에서 사용하는 세가지 변수 중 하나를 제공하기 때문에, Impact Echo 자료 분석에 있어서 보다 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다.

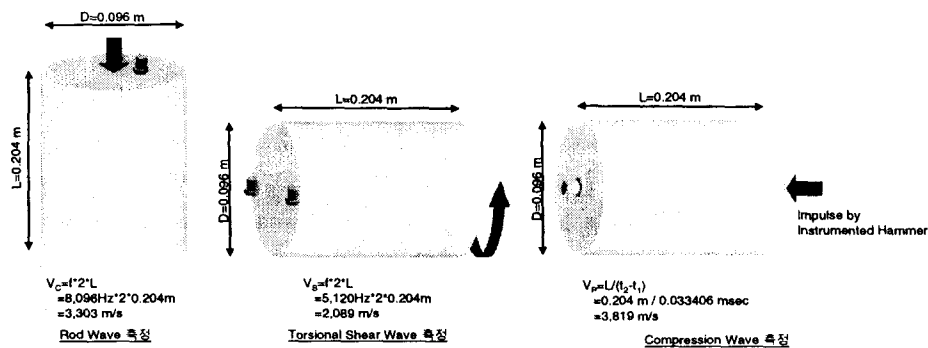
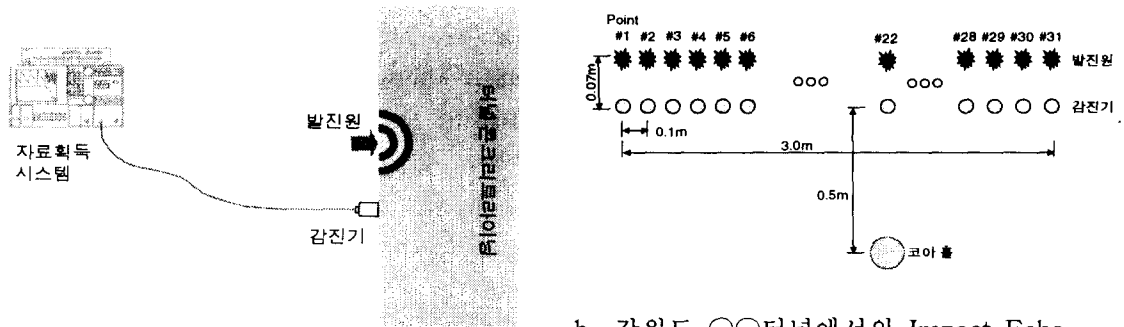


그림 1. 콘크리트 코아에 대한 탄성과 속도의 측정

3. Impact Echo 시험

3.1 시험 개요

표면에서 발생된 탄성파가 매질 내부로 전파되다가 공극이나 균열, 층상 박리, 연약층 등과의 경계면을 만나면 반사되어 표면으로 되돌아 오게 되는데, 표면으로 돌아온 탄성파는 표면에서 또 반사되어 매질 내부로 전파되는 현



a. Impact Echo 시험의 기본 개념도

b. 강원도 ○○터널에서의 Impact Echo 시험 구성

그림 2. Impact Echo 시험의 기본 구성도

상이 발생하고, 이러한 현상은 계속 반복된다. 이 때 표면과 반사면에서 다중반사 (multiple reflections)를 일으키는 지배주파수를 측정하여 매질의 반사면까지 깊이나 매질의 탄성과 속도를 구하는 탄성과 기법이 Impact Echo 기법이다. 터널 콘크리트 라이닝의 경우 그 하부에 부직포와 방수막이 일반적으로 존재하는데, 이 부직포와 방수막은 상부 콘크리트 라이닝과 비교하였을 때 음향 임피던스(acoustic impedance)의 차이가 매우 크므로 탄성파는 방수막과 콘크리트 라이닝에서 대부분 반사되게 된다. 따라서, 콘크리트 라이닝은 Impact Echo 시험의 측면에서 볼 때, 탄성파의 반사면이 매우 명확하여 Impact Echo 시험의 적용성이 우수하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 강원도 ○○터널에서 터널 라이닝의 측벽부, 터널 바닥면으로부터 약 1.5m 지점에서 Impact Echo 시험을 수행하였는데, 시험 구성의 기본 개념도는 그림 2.a에 제시한 바와 같고, 구체적인 시험 구성은 그림 2.b에 도시되어 있다. 측선의 길이는 터널 종방향으로 3m로 이 구간에 대해서 콘크리트 라이닝 두께의 변화를 조사하기 위하여 31개소 (Point #1 ~ #31)에서 Impact Echo를 수행하였으며 각 측정점간의 간격은 0.1m로 하였고, 발진원과 감진기 사이의 간격은 0.07m로 일정하게 유지하였다. 본 시험을 위하여 발진원으로는 공진주파수가 10.0kHz 인 Instrumented Hammer를 사용하였고, 감진기로는 PCB 사의 353B65 가속도계를 사용하였다. Impact Echo 시험의 신호획득을 위해서는 HP사의 HP35670A Dynamic Signal Analyzer를 사용하였다.

3.2 Impact Echo 자료 분석 및 해석

Impact Echo 시험 자료 분석에 있어서 가장 중요한 과정은 다중 반사를 일으키는 지배 주파수를 파악하는 것이다. 다중 반사에 해당하는 주파수의 파악은 주로 주파수 영역에서 이루어지는데 일반적으로 감진기에서 획득한 신호의 Power Spectrum을 이용한다. 경우에 따라서는 발진기 신호의 특성을 감진기 신호에서 배제하기 위하여 감진기 신호를 발진기 신호로 나누어준 Transfer Function을 사용하기도 한다. 그림 3에 강원도 ○○터널의 Point #3 (그림 2.b 참조)에서 수행한 Impact Echo 시험 결과를 도시하였는데, 이를 이용하여 Impact Echo 자료 분석 및 해석 방법을 설명하면 다음과 같다.

1) Power Spectrum에 의한 방법

○○터널의 Point #3에서 측정된 감진기 신호에 대한 Power Spectrum은 그림 3.a와 같은데, 이를 참고하면 다중 반사 주파수는 5,367Hz라는 것을 알 수 있다. 그리고 터널 콘크리트 코어의 P-파 속도는 3,618 m/sec이므로, 탄성파의 반사면인 방수막까지의 깊이는 식 (1)에 의해 약 0.337m가 된다.

$$l = v_p / (2 \cdot f_R) = 3618 / (2 \cdot 5367) \approx 0.337m \quad (1)$$

2) Transfer Function에 의한 방법

Transfer Function은 감진기 신호를 발진원 신호로 나누어준 것으로, 발진원의 에너지가 특정 주파수에 집중되어 있을 때 감진기에 미치는 영향을 제거하기 위한 목적으로 사용한다. 따라서, 발진원이 측정 주파수 대역에서 골고

루 에너지를 발생시키지 못할 경우 Transfer Function를 사용하여 다중반사 주파수를 파악하는 것이 Power Spectrum을 사용하는 것보다 더 바람직하다고 할 수 있다. 그림 3.b에 발진원과 감진기 신호를 사용하여 구한 Transfer Function의 진폭 스펙트럼이 도시되어 있는데, Transfer Function의 진폭스펙트럼은 Power Spectrum보다 경향이 다르며, 약 5 kHz 부근의 peak모양도 상이하지만, Transfer Function의 경우 5408Hz에서 나타나는 peak가 탄성파의 다중반사에 해당되는 주파수가 된다. 다중반사 주파수 5408Hz와 P-파 속도 3618m/sec를 이용하여 방수막까지의 깊이를 계산하여 보면, 식 (2)에 의해서 0.335m가 된다.

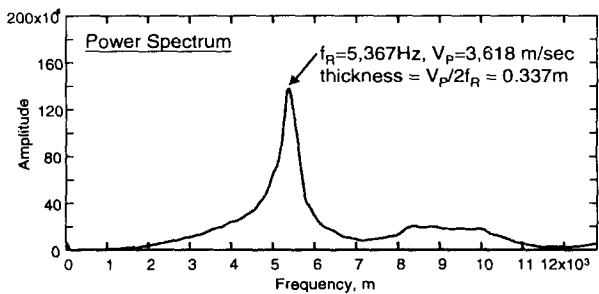
$$l = v_p / (2 \cdot f_R) = 3618 / (2 \cdot 5408) \approx 0.335m \quad (2)$$

2) Filtered Transfer Function에 의한 방법

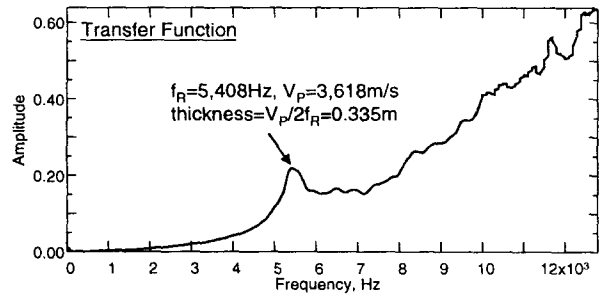
그림 3.c에는 탄성파의 전파를 시간-주파수 영역에서 시각화하여 주는 프로그램 SEISM의 처리화면이 도시되어 있다. SEISM에 의하면, ○○터널 Point #3에서 측정된 탄성파의 전파에는 초기에 표면을 타고 직접적으로 전파되는 탄성파가 있음을 알 수 있는데, 이를 IRF (Impulse-Response-Filtration; Joh and Stokoe, 1997) 기법으로 처리하면, 5 kHz 부근의 탄성파만 잔류하게 된다. 이러한 신호처리 후의 Transfer Function 진폭스펙트럼은 그림 3.c에서 보듯이 5376 Hz에서 강한 peak를 갖게 되고, 이 부분의 에너지가 다중반사에 의한 것이라는 것이 더욱 확실시 된다. 이렇게 Filtered Transfer Function에 의한 다중반사 주파수 5376Hz는 감진기 신호의 Power Spectrum으로부터 구한 5376Hz와 같으며, 따라서 방수막까지의 깊이도 0.337m로 동일하다.

3.3 터널 콘크리트 라이닝에서의 Impact Echo 시험

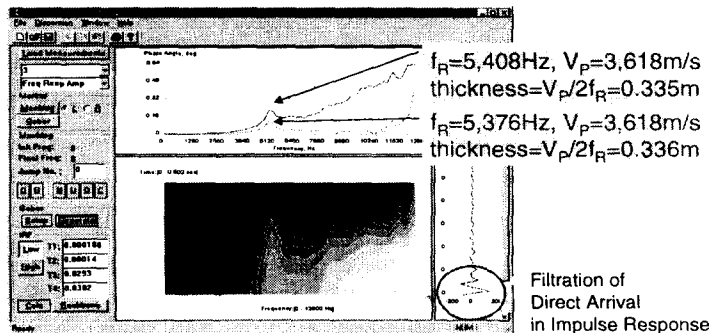
강원도 ○○터널에서의 Impact Echo 시험은 1998년 5월 27일과 7월 16일 동일한 방법과 시험 구성으로 반복하여 수행하였다. 첫 번째 Impact Echo 시험을 수행하였을 때에는 다소 건조한 날씨가 계속되었었고, 두 번째 시험을 수행하였을 때는 3일간 연속적으로 비가 온 바로 다음 날이었다. 따라서, 두 번째 시험시에는 콘크리트 라이닝 뿐만 아니라 부직포와 방수막이 건조한 기후일 때 보다는 상당히 젖어 있었을 것이라 추정된다. 본 연구에서는 첫 번째 경우를 건조한 콘크리트(dry concrete), 두 번째 경우를 습한 콘크리트(wet concrete)라고 칭하였다. 각각의 경우에 시험 축선 3m에 걸쳐서 조사한 콘크리트 라이닝 두께를 그림 4.a에 도시하였다. 대체적으로 습한 콘크리트에



a. Power Spectrum에 의한 방법



b. Transfer Function에 의한 방법



c. Filtered Transfer Function에 의한 방법

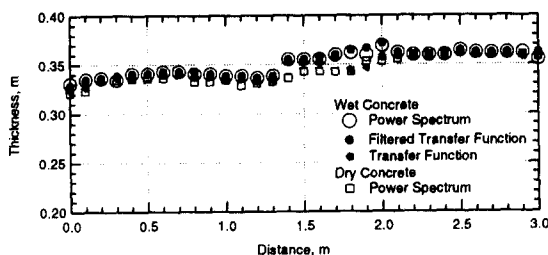
그림 3. Impact Echo 시험의 자료 분석 및 해석 방법

대한 라이닝 두께가 1cm 정도 더 두꺼운 것으로 나타났으며, 1.4m~2.0m 구간에서는 약 2~3cm 정도의 차이를 보였다.

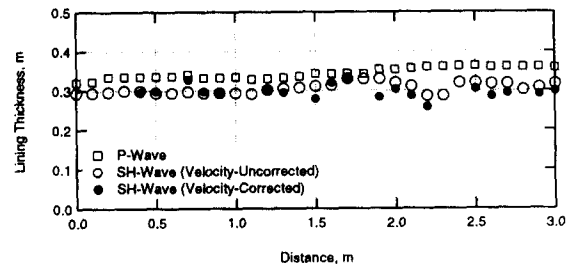
이러한 차이는 일차적으로 습한 콘크리트의 P-파 속도가 건조한 콘크리트의 P-파 속도보다 약 50m/sec 정도 더 높은 것 때문이라고 생각할 수도 있지만, 강원도 ○○터널의 경우는 사정이 다르다. 동일 지점에서 다중반사 주파수를 보면, 건조한 콘크리트는 5120Hz, 습한 콘크리트는 4896Hz로서 오히려 습한 콘크리트의 다중반사 주파수가 더 작은 것을 알 수 있다. 만약, 습윤도의 증가로 인하여 콘크리트의 P-파 속도가 증가되었다면, 다중반사 주파수는 오히려 증가해야 하는 것인데, 실제로는 그 반대로 감소하였다. 따라서, 콘크리트 라이닝의 두께가 더 두꺼워진 것은 습윤도의 증가로 인한 콘크리트 P-파 속도의 증가로는 설명이 되지 않는다. 결국, 이러한 현상에 대한 유일한 설명은 실제로 P-파의 반사면 위치가 더 깊어졌다는 것이다. 강원도 ○○터널에 대하여 정밀안전진단을 수행한 결과보고에 의하면, 실제로 콘크리트 라이닝 배면에 전반적으로 1~2cm 정도의 배면공극이 존재한다고 한다. 바로 Point #3 이면에도 이러한 배면공극이 존재한다고 하면, 집중강우에 의하여 부직포와 방수막이 물로 포화되어 궁극적으로 P-파의 반사면이 부직포 이면에 존재하는 미지의 공극으로 후퇴했으리라는 추측이 가능하다.

Impact Echo 시험으로 추정된 매질의 두께에 대한 신뢰도는 매질의 P-파 속도에 크게 좌우된다. 특히, 대상 매질이 깊이 방향으로 균질하지 않으면 더욱 그러하다. 일반적으로 Impact Echo 시험의 자료 분석을 위하여 필요로 하는 P-파 속도는 현장에서 주시곡선(travel-time records)의 측정으로 결정하는데, 강원도 ○○터널의 경우는 약 4500m/sec로 측정된 반면, 코아 실험으로 측정된 것은 3819m/sec, S-파와 Rod 파로 추정된 것은 3618m/sec 이었다. 이렇듯 콘크리트 라이닝의 P-파 속도는 신뢰성있게 결정하기가 용이하지 않다. 따라서, 본 연구에서는 보다 신뢰성있게 측정하기가 용이하고 Poisson 비의 가정이 필요없는 S-파 속도를 이용하기로 하고, SH 파를 발진원으로 하여 Impact Echo 시험을 수행하였다. 그림 4.b에 SH 파를 이용한 Impact Echo 시험 결과인 콘크리트 라이닝 두께가 P 파를 이용한 Impact Echo 시험결과와 비교되어 있다. SH 파에 의한 시험은 습윤한 콘크리트 라이닝에 대해서 수행된 것으로서 콘크리트 라이닝 두께 결정을 위해서 코아 실험으로 구한 S 파 속도를 이용하였다. 참고로, 동일 그림에 SASW 실험으로 각 Point에 대해서 구한 평균 S-파 속도를 이용하여 보정한 콘크리트 라이닝 두께도 같이 도시하였다. 그림 4.b에 의하면, P 파를 이용한 Impact Echo 시험 결과로는 실험측선 3m 구간에서 콘크리트 라이닝의 두께가 약 32~37cm 정도이고, SH 파를 이용한 Impact Echo 시험 결과로는 26~33cm 정도이다.

P 파를 이용한 Impact Echo 시험결과와 SH 파를 이용한 Impact Echo 시험 결과 중 어느 것이 더 정확한지는 현재 이를 판단하기 위한 객관적인 자료가 결여되어 있어서 정확한 결론을 내리기 어려운 실정이다. 실험 측선 인 접지역에서 채취한 코아도 방수막까지 굴착되지 않고 중간에서 절단되었으며, 당 ○○터널에서 안전진단 수행시의 GPR 탐사 결과(그림 8)로도 명확하게 방수막 위치를 제시하기 어렵다. 이 이외에 간접적인 자료인 설계도면에 의하면, 콘크리트 라이닝은 30cm 두께로 하도록 설계되어 있으며, 동 터널의 타지점에서 수행한 코아채취에 의하면 라이닝 두께가 0~33cm인 것으로 보아 SH 파를 이용하여 측정된 26~33cm가 더 타당하리라고 사료된다.



a. 습한 콘크리트와 건조 콘크리트의 비교 (P-파)



b. P-파와 SH-파의 비교

그림 4. 강원도 ○○터널에서 Impact Echo 시험에 의해 측정된 콘크리트 라이닝 두께

4. SASW 실험

4.1 실험개요

SASW(Spectral-Analysis-of-Surface-Waves, 주파수 영역 표면파 해석) 기법은 지반공학적인 환경에서 깊이별 전단 강성도(shear stiffness)의 변화를 비파괴적으로 평가하는 현장 실험법이다. SASW 실험은 한 지점에서 충격 또는 진동을 가하고, 일정 거리만큼 떨어진 위치에서 충격이나 진동으로 인한 지반 및 구조물의 진동을 측정함으로써 지표면하의 매질의 물성 및 층상구조를 규명할 수 있는 비파괴·비관입적인 기법이다. 기본적인 SASW 실험 구성이 그림 5.a에 도시되어 있다. SASW 실험도 동일한 터널현장에서 수행하였는데, 실험이 수행된 지점 또한 그림 2.b에 도시된 Impact Echo 시험 축선 및 개소와 동일하다. SASW 실험이 수행된 축선 및 세부 실험 계획도는 그림 5.b에 도시된 바와 같다.

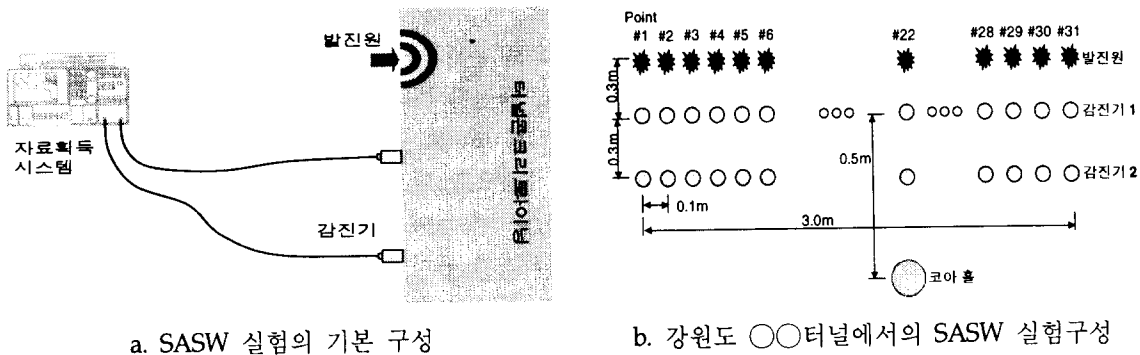


그림 5. SASW 실험의 기본 구성과 강원도 ○○터널에서의 SASW 실험 축선

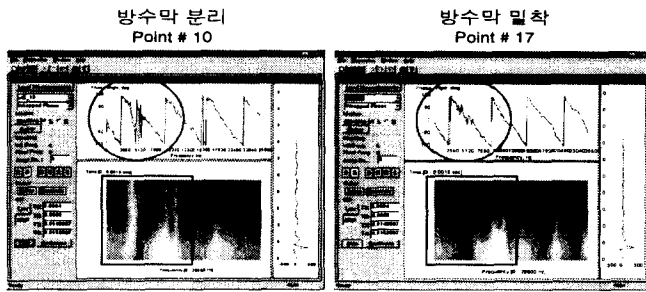
SASW 실험 수행을 위해서 하나의 발진원과 두 개의 감진기를 사용하였는데, 발진원으로는 고주파수의 에너지를 발생시키기 위하여 소형 망치를 이용하였고, 감진기로는 PCB 353B65를 사용하였다. 감진기에서 측정된 신호는 Hewlett Packard 사의 Dynamic Signal Analyzer인 HP 35670A에 의해서 Transfer Function 형태로 획득·저장되었다. 저장된 Transfer Function은 IBM-PC 호환 퍼스널 컴퓨터의 윈도우즈 환경하에서 실행되는 소프트웨어인 SEISM(Joh, 1997)으로 위상각 스펙트럼을 분석하였고, 분석된 결과를 근거로 결정한 분산곡선에 대하여 FIT7(Joh, 1996)을 이용하여 역산해석하여 S-파 속도 추상도를 결정하였다.

4.2 터널 콘크리트 라이닝에서의 SASW 실험

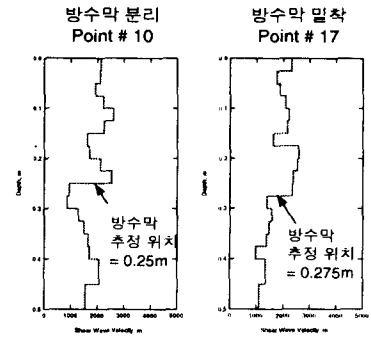
터널 콘크리트 라이닝에서의 SASW 실험으로 콘크리트 라이닝의 1차 라이닝과의 밀착상태와 콘크리트 라이닝의 두께, 터널 라이닝의 층상구조와 각 층의 S-파 속도 등을 평가할 수 있었다.

그림 6.a는 콘크리트 라이닝의 밀착상태를 판단하는 방법을 도시하고 있다. 즉, 콘크리트 라이닝이 1차 라이닝과 분리되어 있는 경우에는 위상각 스펙트럼에 있어서 불연속성이 나타나고, 거보 스펙트럼에서는 콘크리트 라이닝이 슬랩으로 거동하는 횡모드에 해당하는 좁고 긴 파군이 나타난다. Point #10의 경우는 콘크리트 라이닝이 확실하게 분리되어 있는 경우이고, Point #17의 경우는 콘크리트 라이닝이 1차 라이닝과 상당히 잘 밀착되어 있는 경우이다. 이러한 사실은 그림 7의 S-파 속도 컨투어 도표에서도 분명하게 나타난다. Point #10에 해당하는 부분, 즉, 0.9m에 해당하는 부분에서는 25cm 아래부분에서 상당히 연약한 층이 나타나고 있고, Point #17, 즉, 1.6m에 해당하는 부분에서는 콘크리트 라이닝과 1차 라이닝의 강성에 거의 차이가 나타나지 않고 있다.

그림 6.b는 Point #10과 #17에서 수행한 SASW 실험으로 구한 S-파 속도 추상도를 도시하고 있는데, 이 S-파 추상도에 의해 방수막 위치의 추정이 가능하다. 즉, 방수막이 존재하는 경우 S-파 속도가 약 1000m/sec 이하이어야 하고, 방수막의 위치를 경계로 하여 갑작스런 S-파 속도의 감소가 있어야 한다. 이러한 기준에 근거하여 판단하였을 때, Point #10의 경우 0.25m, Point #17의 경우 0.275m에 방수막이 있으리라고 추정할 수 있다.



a. 위상각 스펙트럼 및 거보 스펙트럼에 의한 방수막 밀착상태의 확인



b. 전단과 속도 주상도에 의한 콘크리트 라이닝 두께의 확인

그림 6. SASW 실험에 의한 방수막 밀착상태와 콘크리트 라이닝 두께의 확인

그림 7은 실험 축선 3m 구간에 대해 콘크리트 라이닝의 층상구조를 도시한 것이다. 이는 SASW 실험 축선위 31개소에서 결정된 31개 분산곡선을 각각 역산해석한 후, 이로부터 결정된 S-파 주상도를 이용하여 작성한 컨투어 도표로서 거리-깊이의 2차원적 영역에서 강성분포를 시각화한 것이다. 그림 7의 S-파 속도 컨투어 도표에 의하면, 약 0.0~0.2m, 0.4m~1.5m, 2.0~2.2m, 2.5m~3.0m 구간에서 콘크리트 라이닝이 1차 라이닝과 분리되어 있음을 보여주고 있고, 기타 구간에서는 밀착정도가 상당히 양호함을 알 수 있다. 콘크리트 라이닝이 1차 라이닝과 분리되어 있는 구간에서 약 5cm 이상의 연약한 층을 볼 수 있는데, 이는 실제로 이 정도의 두께로 연약한 층이 있다라기보다는 경계면에서 탄성파의 불연속으로 인하여 왜곡된 결과라고 이해하는 것이 바람직하다.

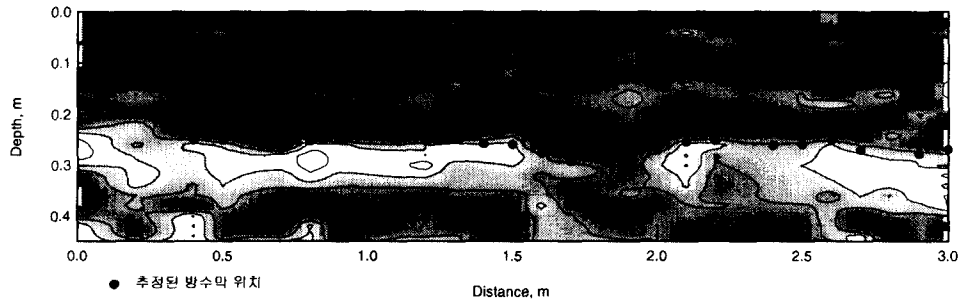


그림 7. SASW 실험에 의한 콘크리트 라이닝의 층상구조

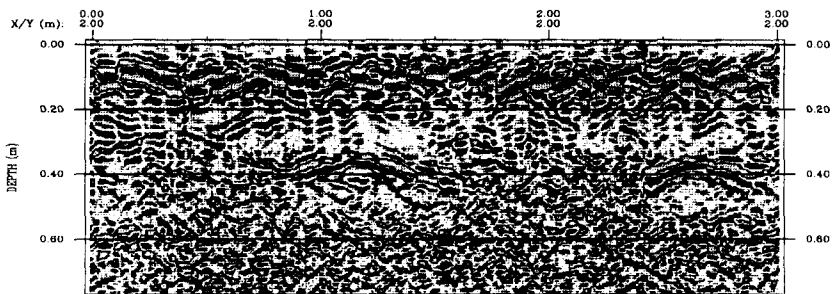


그림 8. GPR 탐사에 의한 콘크리트 라이닝의 층상구조

그림 8에는 국내 ○○기관이 SASW 실험 축선과 동일한 축선에 대하여 수행한 GPR 탐사 결과를 보여주고 있다. 그림 8의 GPR 탐사 결과는 약 1.2m 구간과 2.7m 구간에 초생달 모양의 특이한 부분이 있는데, 이 부분을 라이닝 배면의 부분적인 공극에 의한 현상으로 본다면 1차 라이닝과 콘크리트 라이닝의 경계, 즉, 방수막이 있는 곳으로 추정할 수 있다. 한편, 해당 터널의 경우 1.5m 간격으로 강지보재가 설치되어 있다고 보고되어 있는데, 두 초생달 모양이 관측되는 두 지점 사이가 정확하게 1.5m라는 것과 이 이외의 지점에서는 강지보재 흔적이 발견되지 않는 것으로 보아, 이 두 특이한 현상이 발견되는 지점이 강지보재일 가능성도 배제할 수 없다. 만약, 이 두 지점이 강지보재라고 한다면, 당 GPR 탐사결과로는 방수막을 확인할 수 없게 된다. 즉, 전체적으로 콘크리트 라이닝과 1차 지보재 사이의 밀착 상태가 매우 양호하여 GPR로는 방수막 위치를 확인하는 것이 불가능한 것이다.

5. 결론

지반조사와 일반 콘크리트 구조물의 비파괴 건전도 평가에 널리 활용되고 있는 탄성과 기법이 터널 구조물의 국부정밀진단에 적용시, 그 적용성을 평가하기 위하여 강원도 ○○터널의 터널 라이닝을 대상으로 SASW 실험과 Impact Echo 시험, 콘크리트 코아에 대한 탄성과 실험 등을 수행하였다. 또한, 탄성과 실험이 수행된 동일 축선에 대하여 국내 ○○기관이 GPR 탐사를 수행하였고, 이 GPR 탐사의 결과를 총체적인 판단 자료로 활용하였다. 상기와 같은 탄성과 실험, 코아 실험, GPR 탐사 결과를 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 콘크리트 라이닝 두께의 추정은 SASW 실험, Impact Echo 시험, GPR 탐사 등에 의해서 가능하다. 각 방법의 신뢰성 및 정확성은 콘크리트 라이닝 상태에 따라서 각기 다르며, 각 방법의 절대 우열을 판단하기 보다는 상황에 따라서 적절한 방법을 선택하는 것이 바람직하다.
- 콘크리트 라이닝에 대한 2차원적 층상구조의 조사는 SASW 기법, GPR 탐사 등에 의해서 가능하였다.
- 본 연구에서 시도한 탄성과 기법중 콘크리트 라이닝 강성(stiffness)의 추정은 SASW 기법에 의해서만 가능하였다. 단, 콘크리트 라이닝의 정확한 두께가 기지의 정보라고 하면, Impact Echo에 의해서도 콘크리트 라이닝의 평균 강성을 추정하는 것이 가능하다.

참고문헌

1. Haack, I. A., Schreyer, J., and Jackel, G. (1995). "State-of-the-art of Non-destructive Testing Methods for Determining the State of a Tunnel Lining," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 10, No. 4, pp. 413-431.
2. 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
3. Joh, S.-H. (1996). "Advances in data interpretation technique for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves(SASW) measurements." Ph.D. Dissertation, the University of Texas at Austin, Austin, Texas, U.S.A.
4. Joh, S.-H. (1996). FIT7: Program for Forward Modeling Analysis, Inversion Analysis and Time Trace Generation, the University of Texas at Austin, Austin, Texas, U.S.A.
5. Joh, S.-H. (1998). SEISM: A program for Stable Determination of Experimental Dispersion Curve Using IRF Technique from SASW Measurements, Chung-Ang University at AnSung.
6. Joh, S.-H. and Stokoe, K. H., II (1997). "Impulse response filtration technique for the determination of phase velocities from SASW measurements." *한국지반공학회지*, 제 13권 1호.
7. Olson, L.D., Sack, D.A., Stokoe, K.H., II, and Buchinski, K. W. "Stress-Wave Nondestructive Testing of Tunnels and Shafts," *Transportation Research Record* 141.
8. 시설안전기술공단(1997). 안전점검 및 정밀안전진단 실무요령(터널편)
9. 중앙대학교 (1998). 탄성과 탐사기법을 이용한 국부정밀 안전진단 장비개발의 타당성 연구. (In Preparation)
10. 한국건설기술연구원 (1998). 터널의 안전진단 체계정립 및 균열자동측정 시스템 개발. (In Preparation)