

터널 콘크리트 라이닝의 구조적 특성평가를 위한 탄성파 기법, MiSA의 개발 MiSA (Method of Integrated Spectral Analysis) to Evaluate Structural Integrity of Tunnel Concrete Lining

김기봉¹⁾, Ki-Bong Kim, 추진호²⁾, Jin-Ho Choo, 조성호³⁾, Sung-Ho Joh, 조미라⁴⁾, Mi-Ra Cho

¹⁾ 중앙대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang University

²⁾ 중앙대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang University

³⁾ 중앙대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang University

⁴⁾ 중앙대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang University

SYNOPSIS : The techniques to make assessment of the structural integrity of underground structures include infrared thermography, GPR using the reflection of the electromagnetic wave, ultrasonic test, seismic methods using the propagation of elastic wave, and etc. These methods have pros and cons in the assessment of the structural integrity in the complex environment of the underground structure, so that a single method alone is not enough to evaluate parameters required for the assessment. In this study, a new seismic method was proposed to improve the existing methods and to provide an additional information like stiffness of concrete. The proposed method combines the advantages of the modified impact-echo test and the SASW method. To verify the validity of the proposed method, a large scale model of a tunnel concrete liner was built and the proposed method was applied to the center of the model and also to the corner of the model which has several distinct reflection boundaries.

Key words : structural integrity, integrity assessment, impact-echo test, SASW test, tunnel concrete liner.

1. 서 론

지하공간이 인간의 문화적, 경제적 활동에 기여하는 범위와 그 질적 향상은 더욱 증가하고 있다. 이에 따라 지하공간의 규모도 대형화, 장대화되고 있으며, 지하공간이 건설되는 지반공학적 여건도 더욱 열악한 지역까지 확대되고 있다. 한편, 이러한 지하공간의 활용 및 건설 빈도의 증가와 더불어 간과할 수 없는 것은 지하공간의 안정성이라고 할 수 있다. 지하공간의 활용주체가 인간이기 때문에, 지하공간의 기능적인 측면과 더불어 안정성 측면도 동일한 비중으로 강조되어야 한다.

현재 지하공간의 안정성 평가를 위하여 활용되고 있는 기법들은 전자기파의 반사와 굴절, 열전달 메카니즘, 초음파의 전파특성, 탄성파의 전파특성 등을 이용하는 기법들이 다양하게 개발되어 있으며, 여

러 측면에서 지하공간의 안정성 평가를 위해 활용되고 있다. 지하공간의 안정성 평가항목 중에서 구조적인 측면에서의 안정성 평가는 주로 콘크리트 라이닝의 두께 및 일축압축 강도, 강지보재의 설치간격 및 심도 등으로 국한되고 있다. 이를 위해서 국내에서는 주로 전자기파를 이용하는 GPR을 적용하고 있으며, 성공적인 사례도 많이 보고되고 있다. 그러나, 전자기파를 이용하는 기법은 콘크리트 재료의 공학적 특성을 평가할 수 없는 단점이 있고, 이를 위해서는 별도로 콘크리트 라이닝 벽체의 코어를 채취해야 하는 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서는 기존의 안전진단 기법을 보완하고 콘크리트 라이닝의 전단강성과 같은 추가적인 정보를 제공할 수 있는 탄성과 기법을 제안하고자 하였다. 이를 위해서 본연구진이 제안한 수정충격반향기법(Modified Impact-Echo Testing)과 SASW 실험 등의 탄성과 기법을 비교 검토하였고, 콘크리트 벽체의 실대형 모델을 제작하여, 콘크리트 라이닝에서의 탄성과 전파특성을 연구하였다. 콘크리트 라이닝이라는 구조체에서의 탄성과 전파 특성을 시간영역, 주파수 영역, 시간-주파수 영역 등에서 평가하였다.

2. 탄성과에 의한 비파괴 실험기법

2.1 Impact-Echo 시험

Impact-Echo 시험은 1983년 Sansalone와 Carino에 의해 처음 개발된 비파괴 검사 기법으로, 충격에 의한 탄성파를 외부표면에서 매질 내에 발생시켜 내부균열 및 외부표면에서 반사되어온 파를 감지하고 그 반사파의 공진 현상을 이용함으로써 콘크리트 내의 균열뿐만 아니라, 다짐부족으로 인한 공극, 도로의 아스팔트 층의 진단 등 여러 가지 단면의 기둥, 보, 중공 구조물의 성능을 평가하는 비파괴 시험법이다. Impact-Echo 시험의 기본 개념도를 그림 1에 도시하였다.

2.2 Modified Impact-Echo (ModIE) Testing

Impact-Echo 시험은 기법적인 측면이나 실험수행 측면에서 매우 간단하고 용이하여, 여러 가지 콘크리트 구조물에 적용되어 왔다. 그러나, 수평 반사면을 가지고 있는 비교적 넓은 표면의 구조물의 경우를 제외하고는 대부분의 경우 Impact-Echo 시험결과는 난해하여 의미있는 결과를 도출하기가 어려운 단점이 있었다. 이에 본 연구진에서는 Impact-Echo 기법의 단점을 보완하는 수정 Impact-Echo 시험을 제안하였는데, 수정 Impact-Echo 시험은 두 개의 감진기를 사용하여 변위 크로스 파워 스펙트럼으로부터 주 반사경계면에 대한 공진 주파수를 보다 명확하게 결정할 수 있는 장점이 있다. 수정 Impact-Echo 시

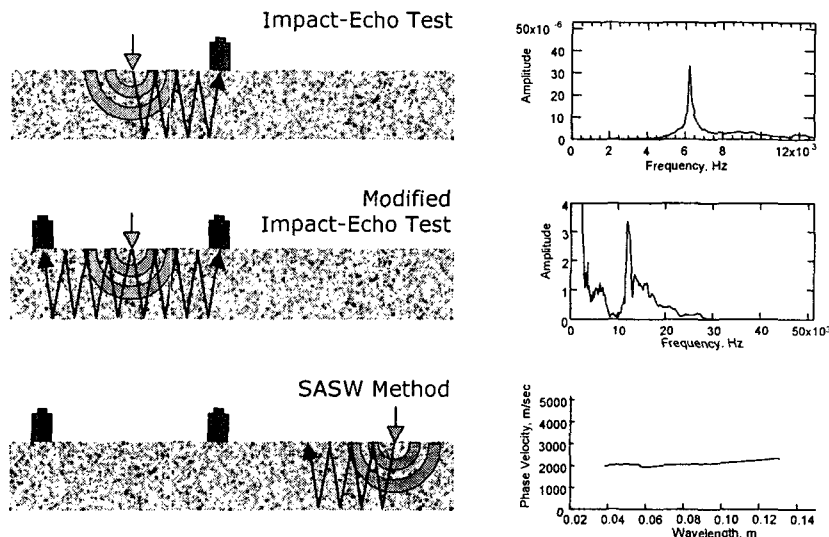


그림. 1 탄성파를 이용한 콘크리트 구조물의 비파괴 건전도 평가기법

험에서 두 개의 감진기를 사용한 것은 다수의 반사면이 존재하는 경우, 하나의 감진기로 집중되는 불필요한 반사파의 영향을 완하시키기 위함이다. 그림 1에 수정 Impact-Echo 시험의 개념도를 나타내었다.

2.3 SASW (Spectral-Analysis-of-Surface-Waves) Method

SASW (Spectral-Analysis-of-Surface-Waves) 기법은 지반이나 구조물에 대하여 전단 강성의 깊이별 변화를 추정하기 위하여 비파괴적으로 수행하는 현장 실험법이다. SASW 실험은 기본적으로 지표면이나 구조물의 표면에서 물리적인 충격이나 진동을 가하여 응력파를 발생시키는 것으로 시작이 된다. 충격이나 진동에 의해서 발생한 응력파는 지반이나 구조물의 매체를 통하여 사방으로 전파되어 나가는 데, 진동원에서 일정 거리만큼 떨어진 지표면에 설치한 진동 감진기에 의해 지반이나 구조물의 진동을 측정하게 된다. 이렇게 지표면에서 응력파를 발생시키고 일정 위치만큼 떨어진 곳에서 진동에 의한 지반의 진동을 측정하여 하부지반의 지층구조와 깊이에 따른 S-파 속도분포를 구하는 것이 SASW 실험이라고 할 수 있다. SASW 실험의 기본 개념도가 그림 1에 도시된 바와 같다.

3. 터널 콘크리트 라이닝의 구조적 특성평가를 위한 MiSA 기법

탄성파를 이용하는 다른 비파괴 건전도 평가기법처럼, 본 연구에서 제안한 MiSA 기법도 체적파 및 표면파의 전파특성을 활용하여 터널 콘크리트 라이닝의 구조 및 재료 특성을 파악하고자 하는 기법이다. 일반적으로 반사경계가 존재하는 시스템에서 체적파가 전파되어 갈 때, 반사경계면에서의 굴절·반사는 직접 전파되는 체적파와 혼재하게 되며, 표면파의 경우에 있어서도 반사경계면에서 굴절·반사된 체적파는 표면파의 전파를 간섭하게 된다. 이와 같이 반사경계면에서의 굴절·반사된 체적파는 Impact-Echo 시험과 같은 체적파를 활용하는 시험에 있어서는 시스템의 특성을 파악하기 위해 주로 활용되는 주 정보가 되지만, SASW 실험과 같은 표면파 시험의 경우에 있어서는 표면파의 신호를 교란시키는 잡신호로 간주되어 문제시된다. 그러나, 한편으로는 탄성파 측정시 간섭을 야기하는 특정 성분의 잡음이 존재한다는 것은 오히려 측정하고자 하는 시스템의 정보를 가지고 있는 신호가 존재한다는 것을 의미하기 때문에, 본 연구에서는 일반적인 실험에서 잡신호로 간주되는 것을 오히려 중요한 시스템 정보를 가지고 있는 신호로 활용하여, 측정 대상의 시스템 분석에 있어서 정밀도와 정확도를 향상시키려고 하였고, 결과적으로 정립된 기법이 MiSA (Method of Integrated Spectral Analysis) 기법이다.

MiSA 기법은 체적파의 다중반사 특성을 활용하는 Impact-Echo 기법과 표면파의 전파특성을 활용하는 SASW 기법의 원리를 복합적으로 적용한 기법으로서, 그 기본적인 알고리즘은 그림 2에 도시된 바와 같다. MiSA 기법은 크게 세 가지 단계로 구성되는데, 각각 P-파 속도의 결정, 후보 공진주파수의 선정, 주 공진주파수의 결정 등이다. 각각의 단계에 대해서는 아래에 구체적으로 설명하였다.

3.1 P-파 속도의 결정

MiSA 기법은 근본적으로 Modified Impact-Echo (ModIE) 기법을 근본으로 하고 있기 때문에, 표면과 반사경계면 사이에 발생하는 다중반사파의 P-파 속도측정이 가장 우선되어야 한다. Sansalone and Streett (1997)에 의하면, 측정하고자 하는 매질의 표면에서 두 개의 감진기를 P-파 전파 방향과 동일하게 배치하고, P-파를 표면을 따라 전파되도록 발진하여 두 감진기 사이를 전파하는 P-파의 전파시간을 측정함으로써 P-파의 속도를 계산하도록 추천하고 있다. 이러한 방법은 콘크리트 구조체의 표면 및 내부 모든 곳에서 균질하다는 것을 가정하여야 하는 문제점이 있다. 또한, P-파는 일반적으로 매질이 모든 방향으로 구속된 상태에서 발생하는 구속압축파이기 때문에, 표면에서 측정되는 압축파는 반드시 구속압축파라고 할 수 없는 문제점도 존재하고 있다. 한편, 이와 같이 매질의 표면에서 P-파 속도를 측정하는 방법이 가지고 있는 문제점을 배제할 수 있는 방법은 SASW 실험에 의한 P-파 속도의 추정이다. SASW 실험은 측정 매질의 S-파 속도를 심도별로 결정할 수 있기 때문에 측정된 S-파 속도로부터 Poisson 비를 가정하여 P-파 속도를 추정할 수 있으나, P-파 속도를 S-파 속도로부터 추정하기 위해서는 Poisson 비의 가정이 필요하기 때문에, 이 또한 완벽한 P-파 속도 측정방법은 아니라고 할 수 있다.

3.2 후보 공진 주파수의 선정

MiSA 기법에서 최종적으로 결정하고자 하는 것은 주 반사면까지의 깊이인데, 이를 위해서는 주 반사 경계면에서 반사되어 오는 체적파의 공진 주파수를 파악하여야 한다. 일반적으로 Impact-Echo 시험에 있어서 측정장소가 넓은 콘크리트 슬라브의 중심인 경우를 제외하고는 대부분 두 개 이상의 반사면이 존재하여 여러 개의 공진 주파수가 측정된다. 이렇게 여러 개의 공진 주파수가 존재할 때 주 반사경계면에서 공진된 주파수의 신뢰성 있는 선택은 본 연구진이 제안한 ModIE (Modified Impact-Echo Testing) 기법의 적용에 의해서 가능하다. ModIE 기법에서는 두 개의 감진기를 이용하여 결정한 변위 크로스 파워 스펙트럼(ModIE-G₂₁)을 이용하여 측정하기 때문에, 보다 정확한 공진 주파수의 최종 결정을 위해서는 오토 파워 스펙트럼(ModIE-G₁₁ 또는 ModIE-G₂₂)을 이용하여야 한다.

3.3 주 반사경계면으로부터의 공진 주파수 결정

대부분의 경우 ModIE 기법으로 결정한 후보 공진 주파수가 1 개이지만, 반사경계면이 다수 존재하는 경우, ModIE 기법에 의한 공진 주파수는 2 개 이상인 경우가 있다. 이러한 경우, 주 반사경계면에 대한 공진 주파수를 찾기 위해서는, SASW 실험구성으로 측정된 감진기 1에 대한 감진기 2의 주파수 응답 (Frequency Response)의 진폭스펙트럼 역수곡선(SASW-H₂₁⁻¹)을 이용하여야 한다. 주파수 응답의 진폭 스펙트럼 역수곡선은 주 반사경계면에 대한 공진 주파수 부분에서 매우 큰 값을 보여 주는데, 이는 주 반사면에 대한 공진 주파수의 조화진동이 시스템에 가해졌을 때, 감진기 2가 절점(Nodal Point)이 되기 때문이다.

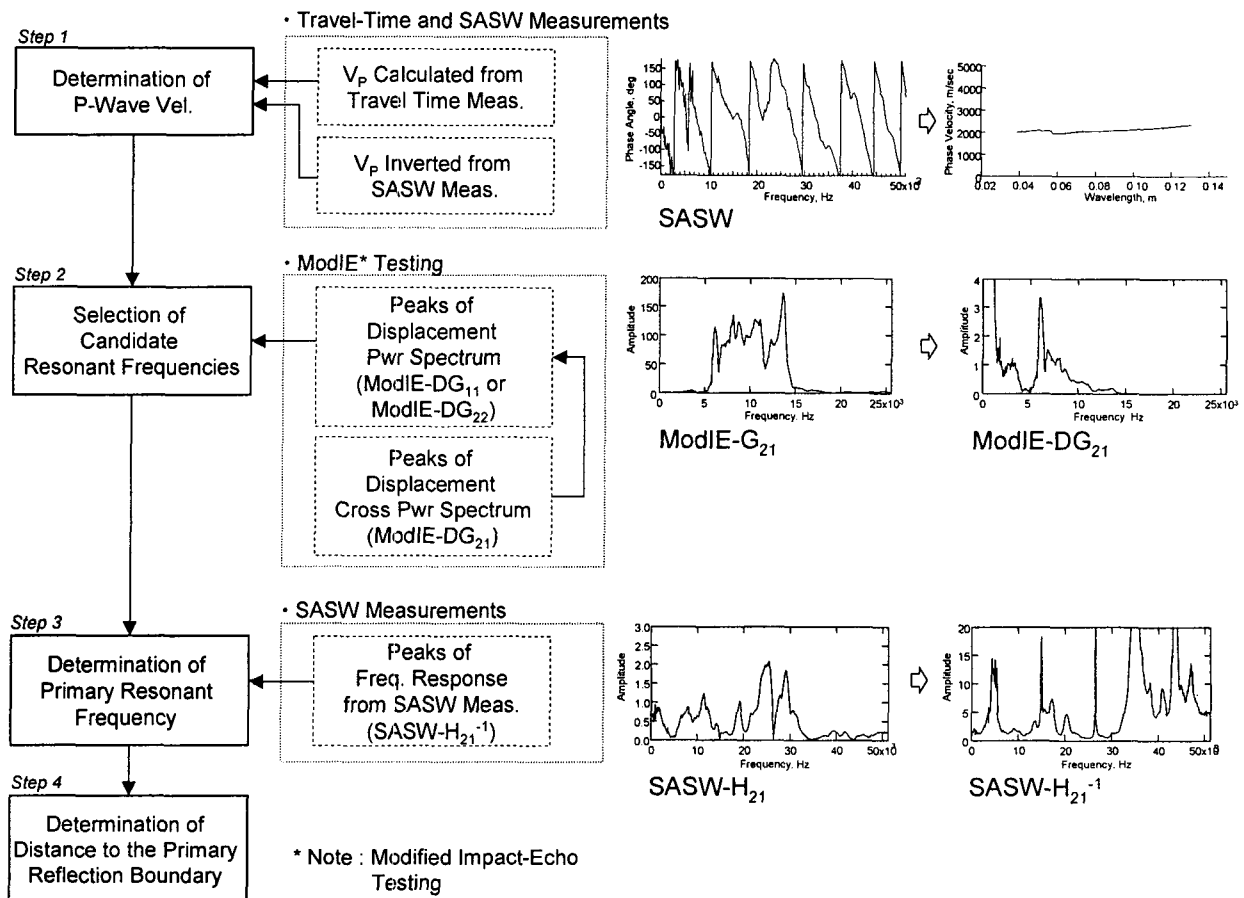


그림. 2 MiSA 기법의 알고리즘

3.4 주 반사경계면까지 거리 계산

최종적으로 주 반사 경계면에 대한 공진 주파수가 결정되어지면, 탄성파의 주파수-파장-속도 사이의 관계로부터 표면에서 주 반사경계면까지의 거리를 구할 수 있다. 터널 콘크리트 라이닝의 경우, 탄성파가 발진되는 표면과 주 반사경계면이 되는 방수막 모두 자유단이기 때문에, 자유단-자유단에서의 공진에 대한 탄성파의 주파수-파장-속도 사이의 관계는 식 (1)과 같이 표현되어지며, 표면에서 주 반사경계면까지의 거리가 된다.

$$h = \frac{V_P}{2 f_R} \quad (1)$$

여기서, h 는 표면에서 반사면까지의 거리, V_P 는 매질의 P-파 속도, f_R 은 주반사면에 대한 공진 주파수를 의미한다.

4. 터널 콘크리트 라이닝 모델에 대한 MiSA 적용사례

4.1 터널 콘크리트 라이닝 모델

터널 콘크리트 라이닝에 대한 구조적 특성평가를 위하여 본 연구에서 제안한 MiSA 기법의 타당성 및 적용성 평가의 목적으로, 그림 3에서와 같은 대형 터널 콘크리트 라이닝 모델을 제작하였다. 그림 3의 모델은 수직의 터널 콘크리트 라이닝을 수평으로 놓은 것과 같은 것으로서, 슛크리트, 방수막, 방수포, 콘크리트 라이닝의 구조로 되어 있다. 본 연구에서 사용한 모델의 재료는 실제 터널에서 사용하는 콘크리트 배합 및 강도, 방수막 및 방수포 재료 등을 채택하였다. 그리고, 터널 라이닝 두께 변화 및 슛크리트 내부결함, 콘크리트 라이닝 내부 결함 등을 스티로폴, 합판 등과 같은 매우 연약한 재료로서 모형화 하였다.

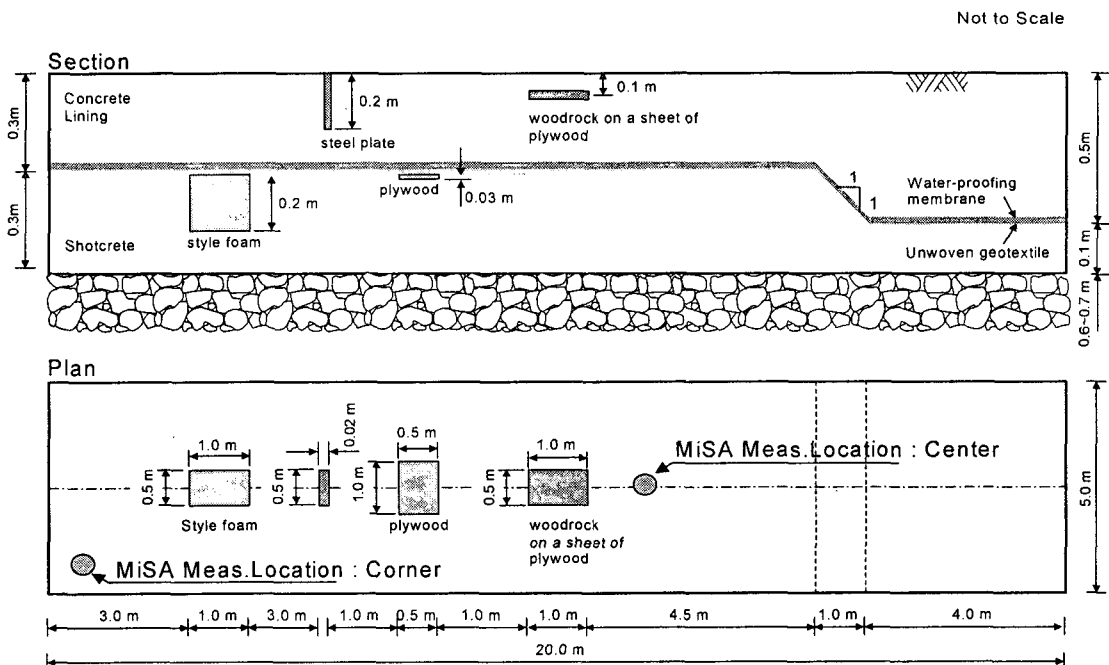
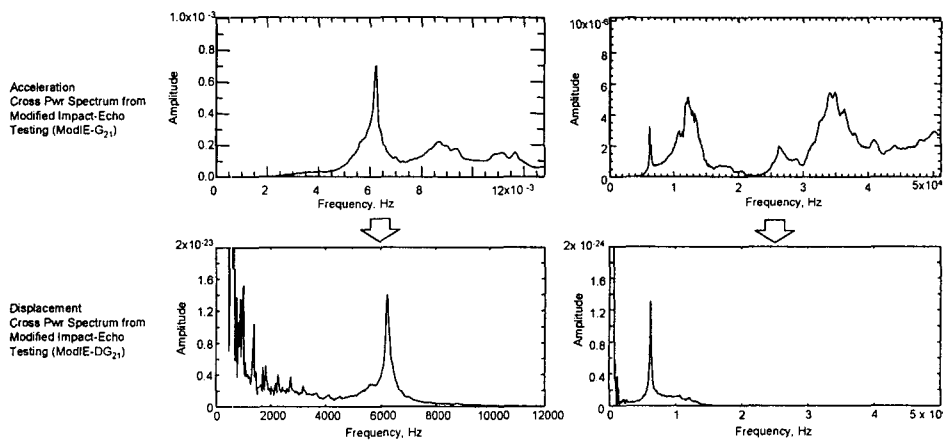


그림. 3 MiSA 실험을 수행한 터널벽체 모델

4.2 MiSA 실험을 위한 실험구성 결정

터널 콘크리트 라이닝에서의 MiSA 실험을 위하여 기본적으로 결정되어야 하는 것은 탄성과 발진방법과 감진기간 간격이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 효율적인 탄성과 발진을 위하여 고주파의 충격파를 발생시킬 수 있는 소형 스패너와 직경 5 mm의 쇠구슬을 비교하였다. 그림 4에 도시된 바와 같이, 스패너 발진과 쇠구슬 낙하 발진에 대한 크로스 파워 스펙트럼을 측정하였으며 각각 그림 4의 상단에 도시하였다. 두 개의 가속도계로 측정하여 구한 크로스 파워 스펙트럼은 스패너 발진이 쇠구슬 낙하발진보다 우수한 것으로 보이나, 변위 크로스 파워 스펙트럼을 계산하여 비교하면, 두 발진방법이 모두 양호함을 볼 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 스패너 발진을 이용하여 MiSA 실험을 수행하였다.

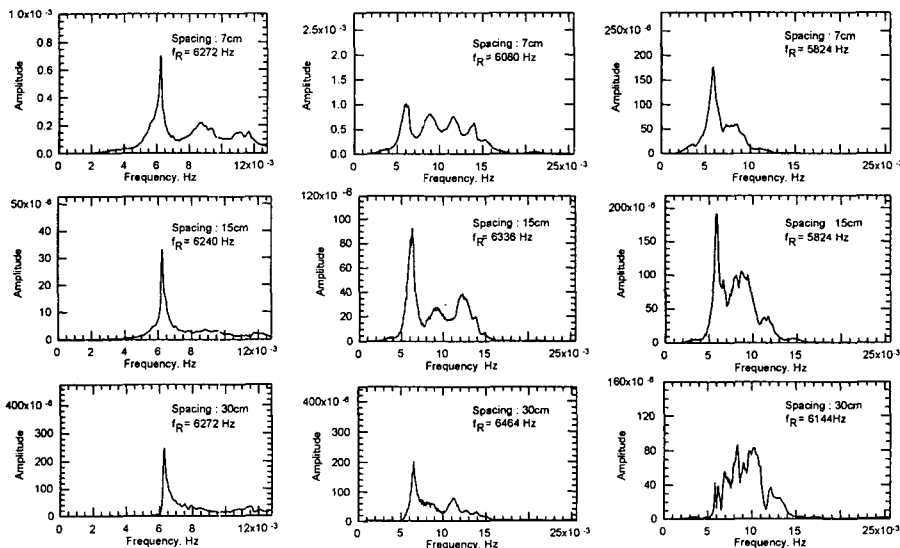
한편으로는 MiSA 실험을 위한 감진기간 간격을 결정하기 위하여 터널모델의 중심, 모서리, 코너 세 부분에서 각각 7 cm, 15 cm, 30 cm 간격에 대하여 ModIE 실험을 수행하여 결과를 비교하였다. 그림 5에 도시된 바와 같이, 15 cm 간격으로 감진기를 설치하였을 때, 실험위치에 관계없이 모두 우수한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 MiSA 실험을 위하여 15 cm 간격을 채택하였다.



(a) 스패너에 의한 발진

(b) 쇠구슬 낙하에 의한 발진

그림 4. MiSA 실험에서 발진방법에 의한 영향



(a) 터널모델의 중심

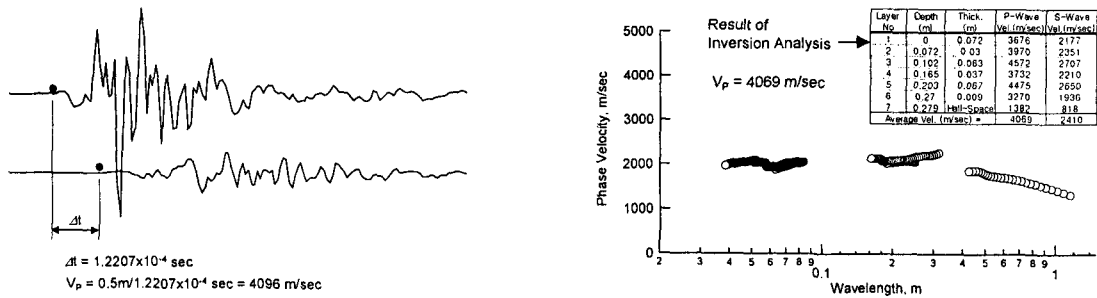
(b) 터널모델의 가장자리

(c) 터널모델의 코너

그림 5. MiSA 실험위치와 감진기간 간격에 따른 크로스 파워 스펙트럼

4.3 P-파 속도의 결정

터널 콘크리트 라이닝에서의 MiSA 실험을 위해서는 측정대상의 P-파 속도가 필요하다. 그림 2의 알고리즘에서 언급한 바와 같이 P-파의 속도는 전파시간 측정법 또는 SASW 실험으로 결정할 수 있다. 그림 6에 각각의 방법에 의한 P-파 속도 계산 예가 소개되어 있다. 본 연구의 경우, 전파시간 측정법과 SASW 실험에 의한 P-파 속도의 추정값은 거의 동일한 값으로 귀결된다. 따라서, 본 예제에서는 SASW 실험으로 결정된 4,069 m/sec의 값을 이용하였다.



(a) 터널벽체 모델의 표면에서 측정된 주시곡선 (b) SASW 실험에 의한 분산곡선과 역산해석 결과

그림. 6 터널벽체 모델의 P-파 속도결정

4.4 MiSA 기법의 적용

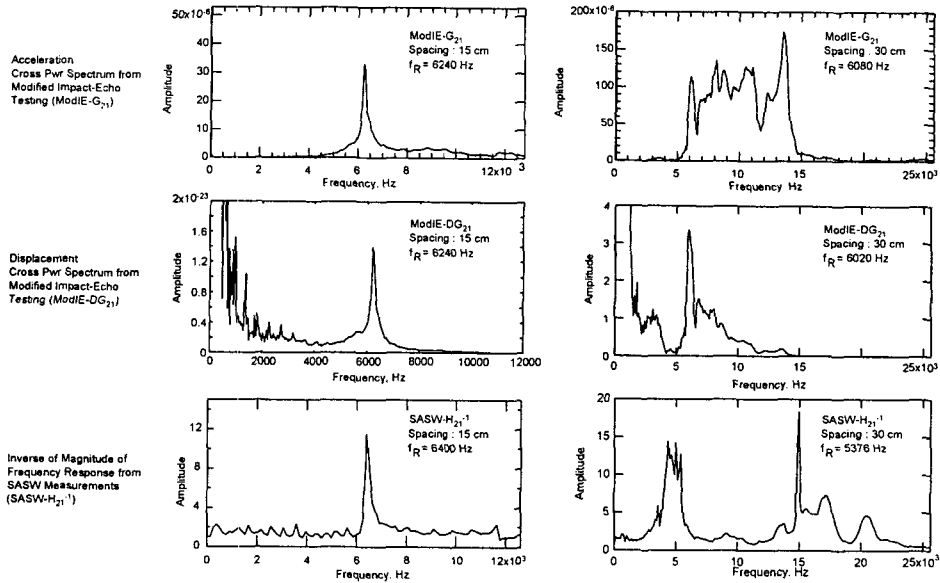
그림 3의 터널모델에서 표시된 바와 같이, 터널콘크리트 라이닝 모델의 중심부분과 코너부분에서 MiSA 실험을 수행하였다. 각 실험위치에서의 MiSA 실험은 ModIE 실험과 SASW 실험으로 구성되는데, 각 실험 모두 두 개의 가속도계를 사용하는 것이기 때문에, ModIE 실험이후 발진위치만 변경하여서 SASW 실험을 연속하여 수행하였다.

터널벽체 모델의 중심부에서 수행한 ModIE 실험의 경우는 그림 7에 도시한 것처럼, 가속도 크로스 파워 스펙트럼(ModIE-G₂₁)의 경우는 6,240 Hz에서 단 하나의 공진이 발생하였고, 가속도 크로스 파워 스펙트럼으로부터 변환한 변위 파워 크로스 파워 스펙트럼의 경우도 매우 명확히 6,240 Hz에서 공진이 발생하였다. 이러한 경우는 반사면으로부터 공진되는 주파수가 단 하나만 존재하기 때문에, SASW 실험의 주파수응답곡선 진폭의 역수곡선(SASW-H₂₁⁻¹)은 구할 필요가 없지만, MiSA 기법의 예시를 위하여 구해 보면, 6,400 Hz에서 침두치가 한 개 존재하는 것을 알 수 있는데, 이 또한 ModIE에서 찾아 낸 공진 주파수에 근사한 값이므로, ModIE에서 구한 6,240 Hz가 주 반사경계면에서 공진된 주파수임이 확인된다. 공진 주파수 6,240 Hz에 대한 반사면까지의 깊이를 구해 보면, 콘크리트 매질의 P-파 속도가 4,069 m/sec 이므로, 식 (1)에 의해서 표면에서 반사면까지의 깊이는 32.6 cm가 된다.

한편, 터널벽체모델의 코너에서 실험한 경우는 콘크리트 라이너와 방수막의 경계이외에도 두 개의 콘크리트 슬라브 측면이 반사면으로 작용하기 때문에, ModIE 실험으로 구한 가속도 크로스 파워 스펙트럼은 여러 개의 공진주파수를 보여주고 있다. 그러나, 가속도 파워 스펙트럼을 변위 크로스 파워 스펙트럼으로 변환하여 보면, 하나의 지배적인 공진주파수(6,080 Hz)와 다소 미약한 공진 주파수 몇 개를 살펴 볼 수 있으나, 이 경우도 6,020 Hz에서의 진폭의 크기가 타 주파수에 비해 지배적이어서, 6,020 Hz의 주파수가 주반사경계면으로부터의 공진되는 주파수라는 것이 거의 확실하다. 그러나, 보다 명확한 확인을 위하여 SASW 실험의 주파수응답곡선의 역수곡선을 살펴보면, 5,376 Hz에서 침두치를 보여주고 있으므로, 변위 크로스 파워 스펙트럼에서 확인한 공진주파수가 주된 공진주파수임을 확인할 수 있다. 따라서, 터널벽체 모델의 코너에서의 MiSA 실험은 주반사면으로부터의 공진 주파수가 6,080 Hz임을 확인하였고, 이에 해당되는 주반사면까지의 깊이를 계산해 보면, 33.5 cm가 된다.

터널 벽체 모형은 제작시 그 두께가 시공여건을 고려하여 28~32 cm 정도 유지되도록 하였으므로, 본 연구에서 MiSA 실험으로 구한 32.6 cm와 33.5 cm는 충분히 신뢰성이 있는 결과라고 판단된다. 이와 같

이 MiSA 기법은 주반사면이 하나만 있는 경우는 물론 여러 개의 반사면이 존재하는 경우에도 주반사면까지의 깊이를 정확하게 추정할 수 있었고, 또한 여러 개의 복잡한 반사면으로부터의 교란 신호를 배제하고 주 반사면으로부터의 공진 신호를 분리해 낼 수 있었으므로, 본 연구에서 제안하는 MiSA 기법의 타당성과 적용성은 만족스럽다고 판단된다.



(a) 터널모델의 중심

(b) 터널모델의 코너

그림 7. MiSA 실험에 의한 결과: 주 반사경계면에 대한 공진주파수의 결정

5. 결론 및 요약

본 연구에서는 터널콘크리트 라이닝에 대한 기존의 안전진단 기법을 보완하고 콘크리트의 전단강성과 같은 추가적인 정보를 제공할 수 있는 탄성과 기법인 MiSA (Method of Integrated Spectral Analysis)를 제안하였다. 본 연구에서 제안한 MiSA 기법은 수정 Impact-Echo Method와 SASW 기법을 결합한 방법으로서, 여러 개의 반사면이 존재하는 복잡한 여건에서 주 반사면까지의 거리를 신뢰성 있게 측정할 수 있도록 개발된 방법이다. 본 연구에서 제안한 MiSA 기법의 신뢰성과 적용성을 확인하기 위해 대형 터널벽체 모형을 제작하였고, 제작된 터널벽체 모형의 잠반사파의 간섭이 적은 중심부와 잠반사파의 교란이 많은 코너부분에서 MiSA 기법을 적용하였다. MiSA 기법에 의해서 추정된 터널벽체 모형의 두께는 모델 제작시 기록된 터널벽체두께 기록과 거의 일치하였으며, 반사경계면의 간섭이 심한 경우에도 신뢰성 있게 만족스러운 결과를 도출하였기에, 본 연구에서 제안한 MiSA 기법은 신뢰성이 있는 기법으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 1999년 한국과학기술재단 특정기초연구비(과제번호:1999-1-311-003-3)에 의해 이루어진 것으로서 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Sansalone, M. J., Streett, W. B. (1997), IMPACT-ECHO: *Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*, Bullbrier Press, 339 p.
2. 조성호, 배규진, 나경준, 이성원, 오상덕 (1998), 터널 국부정밀 안전진단을 위한 탄성과 기법의 적용성에 관한 연구, pp.415-422.