

지중레이다와 충격반향기법에 의한 지하 통신구 터널의 라이닝 두께 추정

김형우, 한진우, 최광철, 강호경, 박종호
 KT 기술연구소 네트워크인프라연구팀 기초시설연구실

Prediction of lining concrete thickness for cable tunnel by GPR and impact-echo method

Kim, Hyung-Woo, Han, Jin-Woo, Choi, Kwang-Chul, Kang, Ho-Kyung, Park, Jong-Ho
 KT Technology Laboratory, Infrastructure Technology Division

Abstract - 지하 30m 암반에 건설된 통신구 터널의 안전성을 검토하기 위하여 콘크리트 라이닝 두께를 지중레이다(Ground Penetrating Radar)와 충격반향기법(Impact-Echo Method)으로 추정하였다. 지중레이다에 의한 콘크리트 라이닝 단면의 연속적인 화상으로부터 라이닝 두께의 상대적인 변화를 파악하였으며, 라이닝 두께가 얇은 구간은 충격반향기법에 의해 일정 간격으로 두께를 추정하였다. 터널 천장의 라이닝 두께는 각각 32.45cm, 32.97cm로서 설계 값인 30cm와 비교적 잘 일치하는 것으로 파악되었다. 지중레이다와 충격반향기법을 조합한 본 방법은 터널 라이닝 콘크리트 두께를 추정하는데 있어서 매우 효율적이고 신뢰성 있는 방법으로 분석되었다.

1. 서 론

많은 조수의 케이블을 수용하는 통신구는 건설방법에 따라 개착(open cut)형식과 터널형식이 있으며, 터널형식은 공법에 따라 Shield공법과 NATM공법으로 구분된다. 이 중 NATM 터널은 지하 25~30m에 건설되며, 토압과 수압에 견딜 수 있도록 설계, 시공된다. 특히, 수압을 지지하기 위해 통신구 터널 내부에 두께 30cm의 라이닝 콘크리트를 설치하는데, 암반 굴착면 형상에 의해 라이닝의 두께가 일정하게 유지되지 않는 경우가 발생한다. 본 논문에서는 라이닝의 두께를 지중레이다와 충격반향기법으로 추정하였으며, 두께 30cm 미만인 지점에 대해서는 라이닝 뒷편에 공동(void)이 존재하는 지도 탐사하였다.

2. 이론적 배경

2.1 지중레이다법(GPR Method)

본 방법은 전자파(electromagnetic wave)를 지표에서 송신 안테나로 지하로 방사한 후 지표하부의 지층경계면, 파쇄대, 공동, 매설관과 같은 불균질층(체)으로부터 반사된 반사파를 수신안테나로 기록, 처리 분석하는 탐사법이다(그림 1 참조). 레이더 기술은 원래 비행기나 군함 등의 탐지를 위한 군사적 목적으로 시작되었으나, 현재는 군사용뿐만 아니라 항공분야, 상업적인 용도로 광범위하게 활용되고 있다. GPR의 기본 원리는 지상레이다와 같지만, 지상레이다는 파의 전달 매질이 균질한 공기이고, 탐지목적은 단순히 탐지대상의 공간상 위치파악에 있지만, GPR은 대상 매질이 매우 불균질한 지반이므로 정밀한 자료처리 및 해석기법이 필요하고, 탐사목적도 대상물의 위치 파악뿐만 아니라 연속적인 탐사를 통해

지하단면, 구조물의 단면영상을 획득하는데 있다. 탐사결과는 유전상수(dielectric constant), 전기전도도(electrical conductivity)에 크게 영향을 받는다. 유전상수는 전하를 저장할 수 있는 물질의 능력으로 정의되는데, 유전상수가 높으면 전자파의 전파는 어려워진다. 또한, 실트, 모래, 점토의 유전상수는 공극률이 증가할수록 거의 선형적으로 증가하며 모든 재질에서 유전상수는 함수비가 클수록 증가하는 경향을 보인다. 한편, 전기전도도는 매질내의 수분함량과 전도성 물질의 함량에 의해 영향을 받는다. 매질 내에 전기 전도 물질이 많이 존재하거나 함수비가 높으면 전기전도도는 높아지게 되며, 전자파의 전파가 어렵게 된다. 따라서 조사지역의 전기전도도를 미리 예측하는 것은 조사결과의 품질을 높이는데 매우 중요한 요소이다(Bungey and Millard, 1995).

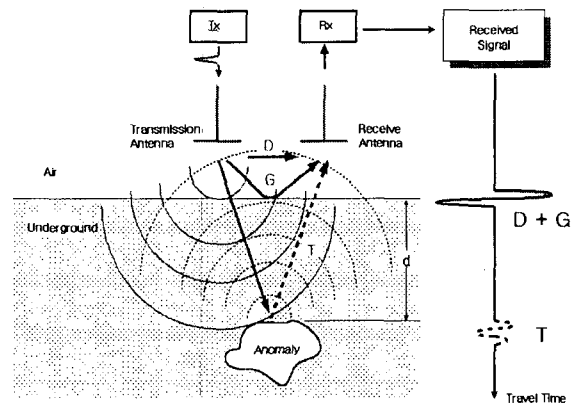


그림 1. 지중레이다법의 개요도

2.2 충격반향기법(Impact-Echo Method)

본 방법은 시험체의 표면에 기계적 충격을 가하여 발생된 탄성파(elastic wave)가 불연속면이나 이질 매질층 사이의 경계면에서 반사되어 표면으로 돌아온 파형을 검토하여 구조체의 품질 판정, 두께 측정, 또는 균열과 공동을 탐사하는 방법이다. 즉, 구조체 표면에 기계적 충격을 가하면, 탄성파가 발생하며 이때 불연속면을 만나면 반사되어 표면으로 돌아온다. 표면에 도달한 파는 표면에서 반사되어 다시 구조체 내부로 전파되며, 이 파는 다시 불연속면에서 반사된다. 이와 같이 표면과 불연속면 사이의 다중 반사에 의한 공진(resonance) 상태가 유발되는데, 이때, 구조체의 탄성파 전파 속도를 알고 있다면 반사파의 도달 시간을 측정하여 불연속면의 위치를 알아낼 수 있다(Sansalone, 1997). 충격원(impact source)은

해머를, 감지기는 가속도계를 사용한다. 감지기의 신호를 신호조정기(signal conditioner)로 증폭하여 동적신호분석기(FFT analyzer)로 보낸 후 신호처리를 수행하게 된다(그림 2 참조).

충격반향기법 적용 시, 시험체 선단의 경계조건은 크게 자유단-자유단과 자유단-고정단으로 구분할 수 있다. 자유단-자유단의 경계 조건은 시험체 내부에 공동, 균열 등이 존재하는 상태를 말하며, 입력된 압축파가 자유단의 경계면을 반사할 때 인장파로 반사되어 돌아온다. 그리고 다시 자유단인 표면에서 인장파가 압축파로 바뀌어 매질 속으로 전파하게 되는데, 시험체의 탄성파(P파)전파 속도(Cp)를 알고 있을 때, 공동 또는 균열까지의 깊이 또는 시험체의 길이 T는 다음 식 (1)에 의하여 구할 수 있다.

$$T = \frac{C_p}{2f} \quad (1)$$

한편, 자유단-고정단과 같은 경계 조건은 콘크리트 시험체가 강성이 큰 철근 위에 놓여 있는 경우의 경계 조건이다. 이러한 경계 조건에서는 입력된 압축파가 위상을 바꾸지 않고 압축파로 반사하게 되며, 다시 자유단인 표면에 도달하여 압축파가 인장파로 바뀌게 된다. 공동 또는 균열까지의 깊이 또는 시험체의 길이 T는 다음 식 (2)에 의하여 구할 수 있다.

$$T = \frac{C_p}{4f} \quad (2)$$

시험체의 길이, 또는 결함의 위치를 찾아냄에 있어, 첫 번째 모드의 공진 주파수만을 가지고는 우리가 얻은 최대 진폭 주파수가 시험체의 표면과 공동 사이의 다중 반사에 의한 것인지 정확히 구별할 수 없다. 따라서 두 번째 모드의 공진 주파수를 고려하여야 하는데, 공동과의 다중 반사에 의한 두 번째 모드의 공진 주파수 값은 첫 번째 모드의 공진 주파수의 두 배가 되므로, 주파수 영역 신호인 파워 스펙트럼에서 두 번째 모드의 공진 주파수 값이 첫 번째 모드의 공진 주파수 값의 몇 배인가를 확인하여야 한다.

충격반향기법에서는 구조물의 P파 속도를 정확히 산정하는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 터널 라이닝 구조물의 P파 속도를 측정하는 방법에는 구조물에서 코어를 채취하는 직접법과, 표면파기법에 의한 간접법이 있으나, 본 논문에서는 문헌에 제시하는 3,000m/s를 사용하였다(Malhotra, 1991).

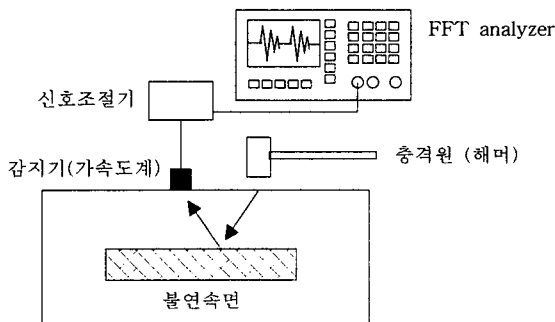


그림 2. 충격반향기법의 개요도

3. 통신구 터널 라이닝 두께 추정

2.1 지중레이다에 의한 라이닝 두께

NATM 터널의 단면도는 그림3에 제시되어 있다. 라이닝 콘크리트의 두께는 25~30cm이며, 외부에 방수시트가 설치되어 있으며, 보강재인 슛크리트(shotcrete)에 의해 구조적인 안정을 이루고 있다.

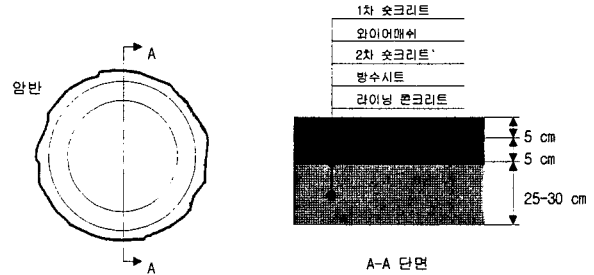
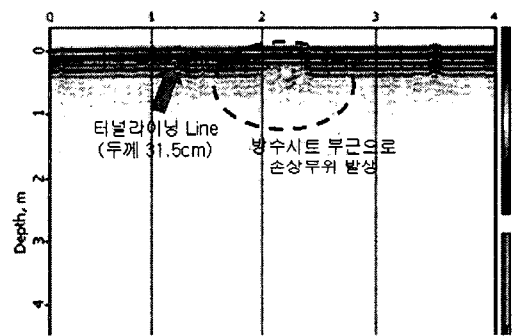
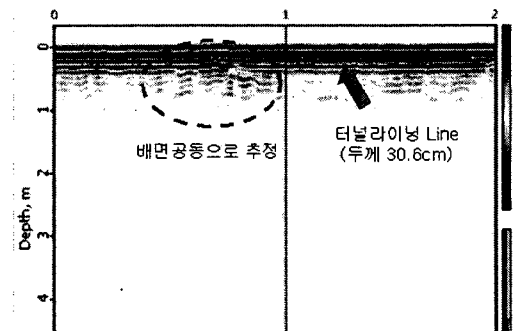


그림 3. NATM 터널의 구조도

통신구 터널 라이닝 및 그 배면의 상태를 탐사하기 위하여 900MHz의 안테나를 사용하였으며, 탐사화상을 노트북 컴퓨터에 저장 한 후, 신호처리 하였다. 지중레이다에 의한 라이닝 콘크리트 단면 화상은 그림 4에 제시되어 있다.



(a) 방수시트 부위의 손상



(b) 배면 공동

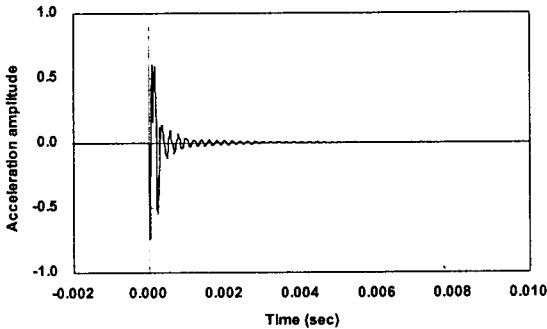
그림 4. 지중레이다에 의한 통신구 터널 단면 화상

그림 4(a)는 라이닝 콘크리트의 두께가 상대적으로 감소한 지점(점선으로 표시)의 화상을 나타낸 것으로서, 암반 굴착 단면이 일정하지 않아 슛크리트의 두께 부족 및 방수시트 손상이 발생한 것으로 추정된다. 실제 현장에서도 이 지점에서 누수가 발생하고 있는 것으로 조사되었다. 그림 4(b)는 라이닝 콘크리트

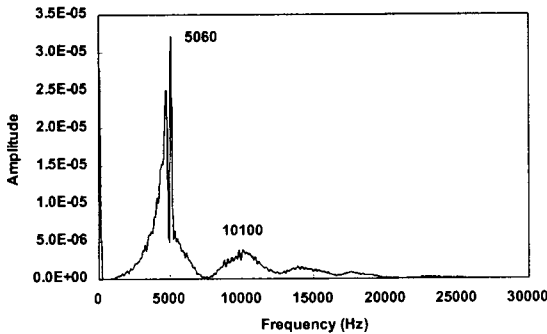
리트의 두께가 상대적으로 변화하면서, 배면공동 또는 쏿크리트의 두께 감소지점으로 추정되는 화상을 나타낸 것이다. 이는 NATM 터널과 같이 암반을 발파한 후 암석의 버력처리를 충분히 하지 않을 때 발생할 수 있는 현상이다. 지중레이다법에 의한 라이닝 콘크리트 두께는 30cm 이상인 것으로 추정되었다.

2.2 충격반향기법에 의한 라이닝 두께

0.8m 간격으로 통신구의 천장부, 좌측 측벽부, 그리고 우측 측벽부의 라이닝 콘크리트 두께를 충격반향기법으로 추정하였다. 천장부(측점 270번)에 대한 가속도의 시간영역의 신호와 주파수 영역의 신호는 그림 5에 제시되어 있다.



(a) 가속도의 시간영역 신호

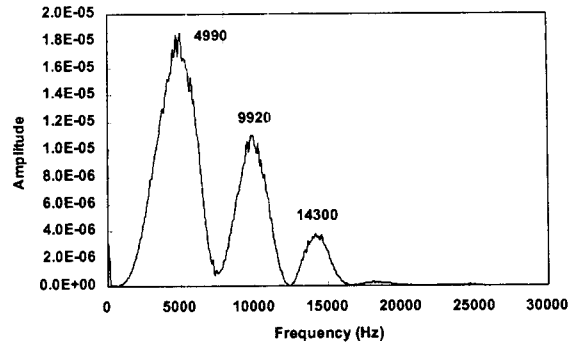


(b) 가속도의 주파수영역 신호

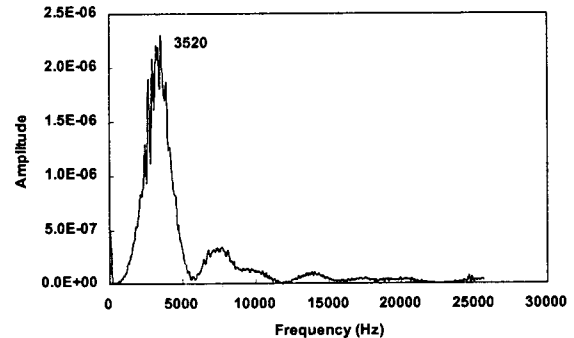
그림 5. 천장부에 대한 충격반향기법 시험결과

라이닝 콘크리트의 외부에는 방수막이 설치되어 있으므로 충격반향기법의 선단조건은 자유단 조건이며, 그림 5(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 두 번째 모드의 공진주파수가 첫 번째 모드의 공진주파수의 약 2 배라는 사실이 이를 입증하고 있다. 따라서, 라이닝 콘크리트의 두께는 식 (1)에 의해 $T=3000/(2 \times 5060)=29.64$ cm로 계산되며, 설계값인 30cm와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

측점 270번에 대한 좌측 측벽부와 우측 측벽부의 가속도 스펙트럼은 그림 6에 제시되어 있으며, 이 경우에도 라이닝 콘크리트 두께가 설계값인 30cm와 비슷한 값을 보이고 있는 것으로 나타났다.



(a) 좌측 측벽부에 대한 가속도 스펙트럼



(b) 우측 측벽부에 대한 가속도 스펙트럼

그림 6. 측벽부에 대한 충격반향기법 시험결과

좌측 측벽부와 우측 측벽부의 라이닝 콘크리트 두께는 식 (1)에 의해 각각 30.06cm, 42.61cm로 계산되며, 설계값인 30cm를 모두 만족하고 있는 것으로 나타났다.

4. 결 론

통신구 터널 라이닝의 두께를 추정하기 위하여 지중레이다(GPR)와 충격반향기법을 적용하였으며, 적용결과 라이닝의 두께를 신속하고 정확하게 추정할 수 있음을 확인하였다. 특히, 탐사 대상 터널의 길이가 긴 경우 지중레이다로 먼저 탐사를 수행한 후, 라이닝의 두께가 변화하는 지점에 대하여 충격반향기법을 적용한다면 탐사효율 및 정밀도를 보다 높일 수 있을 것으로 기대된다.

(참 고 문 헌)

[1] Bungey, J.H., and Millard, S.G., Testing of Concrete in Structures, 3rd ed. Blackie Academic and Professional, pp. 196-211, 1995.
 [2] Sansalone, M., and Streett, W.B., Impact-Echo Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., 1997.
 [3] Malhotra, V. M., Testing Hardened Concrete: Nondestructive Methods, Iowa State University Press, Ames, Iowa, and American Concrete Institute, Detroit, Mich., p. 87, 1976.