

## 터널 라이닝 비파괴 조사를 위한 충격 반향법과 레이더탐사의 현장적용 사례

Case History of Impact Echo and Radar Exploration for the  
Non-Destructive Test of Tunnel Lining



하 희 상<sup>1)\*</sup>

Ha, Hee Sang



박 종 현<sup>2)</sup>

Park, Jong Heon

이번 해외번역기사에서는 충격 반향법(Impact Echo)과 레이더 탐사를 이용하여 터널 라이닝 비파괴 조사를 수행한 결과를 소개한다. 본 기사의 원문은 NDT.net The e-Journal of Nondestructive Testing 2008년 12월 호에 게재된 Frank Lehmann의 논문이며 NDT & E International, 38호(2005년)에 Allen G. Davis 등이 작성한 논문과 Ki-il Song 등이 GeoFlorida 2010에서 발표한 터널 스킷크리트 라이닝 건전도 조사 논문 및 정연문, 하희상의 지구물리와 물리탐사 3호 토목공학 분야에서의 충격 반향법의 응용 논문을 참고하여 편집하였다.

### 1. 머리말

충격 반향법(impact echo method)이란 인위적으로 발생되어 물체 내부를 전파하다가 물성의 변화가 존재하는 경계면이나 결함 부위에서 반사되는 탄성파를 이용하는 비파괴 조사법이다. 충격 반향법은 콘크리트 슬래브나 포장체의 두께 측정에 사용될 수 있으며 콘크리트 구조물 내부 또는 포장체 직하부 보조기층 내부의 균열, 박리, 공극, 허니콤, 탈착과 같은 결함의 위치와 대략적인 크기를 결정하는데 사용될 수 있다. 충격 반향법의 적용 가능 구조물은

도로 포장체, 교량, 교각, 건물, 터널, 댐, 벽체 등으로서 대부분의 토목 구조물에 적용이 가능하나 조사의 성공적 수행을 위해서는 조사 원리 및 조사 대상체의 구조에 관한 충분한 이해가 필수적이다.

전통적인 콘크리트 조사 방법으로는 코어링, 드릴링 또는 일부분을 제거한 후의 육안 검사와 같은 파괴법이 널리 이용되어 왔다. 이와 같은 방법들이 높은 신뢰도를 가지고 있지만 많은 시간과 비용이 필요하며 조사시 발생된 결함이 추후의 문제를 야기시키기도 한다. 최근 십 수년간 콘크리트뿐만 아니라 다른 재료의 물체 내부 조사를 위하여 X선, 감마선, 레이더, 적외선, thermography, 음향법 등과 같은 비파괴 조사법이 시도되어 왔다. 그 중에서도 가장 오랜 역사를 가지고 있으며 가장 널리 사용되고 있는 비파괴 조사법인 음향법은 물체 내부에서의 응력파의 전파에 기초를 두고 있으며 파동-속도법, 공진법, 반향법의 세 가지 방법으로 구분될 수 있다.

반향법에서, 응력파는 변환기(transducer) 또는 기계적인 충격에 의해서 물체 표면으로부터 내부로 전파된다. 변환기 또는 기계적 충격이 사용되었을 때, 이 방법을 각각 파동 반향법(pulse-echo method) 또는 충격 반향법(impulse-echo)이라고 부른다. 1940년대 초반에 도입된 이래로, 널리 사용되고 있는 초음파 파동 반향법은 특히 금속이나 플라스틱과 같은 균질한 물질의 비파괴 조사에 효과적으로 사용되고 있으나 콘크리트의 두께나 내부 결함 조사에서는 좋

1) GS건설 기술연구소 인프라 해양연구팀

2) GS건설 기술연구소 인프라 해양연구팀

\* E-mail : hsha@gseconst.co.kr

은 결과를 제공하지 못하였는데, 그 이유는 물질의 불균질성으로 인하여 고주파수(100 kHz 이상)의 응력파가 빠르게 감쇄하기 때문이다.

이 연구에서는 충격 반향법의 원리 및 자료획득 시스템을 간략하게 서술하고 현장 시험을 수행하여 토목공학 분야에서의 충격 반향법 및 GPR의 적용 가능성 및 한계성을 논의하고자 한다.

## 2. 충격 반향법의 원리

충격 반향법은 탄성 충격에 의하여 발생된 응력파에 기초를 두고 있으며 그 원리가 Fig. 1에 도시되어 있다. 물체의 표면에서 작은 강철구의 짧은 타격에 의한 기계적인 충격은 응력파를 발생시키며 이 응력파는 물체의 내부를 통과하다가 내부의 결함이나 반대편의 표면에서 반사되어 되 돌아온다. 반사파의 변위가 타격점 근처에 설치된 변환기에 기록되며 시간 영역에서의 변위는 주파수 영역에서의 진폭으로 변환될 수 있다. 타격 표면과 내부의 결함 또는 반대편의 표면 사이에서의 응력파의 다중 반사는 순간적인 공진을 야기시키며 이는 주파수 스펙트럼상에서 쉽게 파악될 수 있고 이를 이용하여 내부의 건전도를 평가하거나 결함의 위치를 결정할 수 있다.

내부 결함의 존재 여부나 위치 또는 구조물의 두께 등에 관한 정보를 제공하는 것은 바로 시간 영역에서의 파형과 주파수 영역에서의 스펙트럼의 특징적인 형태이다. 내부에 결함이 존재하는 경우에는 파형이나 스펙트럼의 형태가 왜곡되며 특징적인 형태의 분석을 통하여 결함의 존재 여부나 위치에 관한 정성적이고 정량적인 정보를 획득할 수 있다.

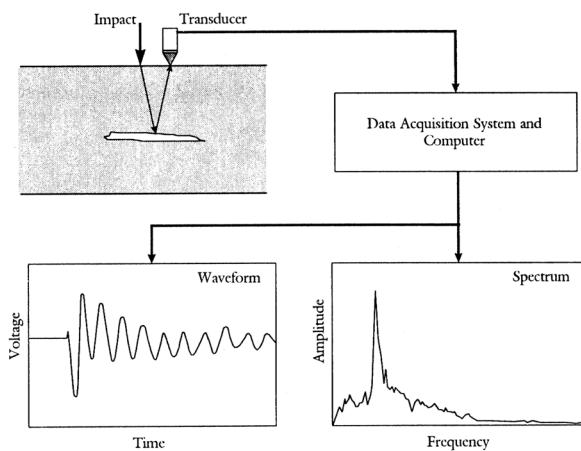


Fig. 1 Principle of impact echo method (Sansalone and Streett, 1997)

판상(plate)은 충격 반향법을 적용할 수 있는 대상중에서 가장 간단하고 또 가장 일반적인 구조물이다. 충격 반향법 조사에 있어서 이상적인 판상이란 평행한 두 개의 표면이 있으며 측면으로부터의 다중 반사가 결과에 영향을 미치지 않을 정도로 크기가 충분해야 한다. 즉, 마주보고 있는 두 표면사이의 다중 반사에 의해 발생된 변위가 변환기에 수신된 신호를 결정해야 한다.

두께가 T이고 양 쪽 표면이 공기와 접촉하고 있는 판상 모델이 Fig. 2에 나타나있다. 변환기에 수신된 파형은 모델 내부를 통과하고 경계면에서 다중 반사된 P파와 표면을 따라 전파된 R파에 의한 것이다. P파의 다중 반사가 Fig. 2(a)에, 그에 따른 파형이 Fig. 2(b)에 개략적으로 표시되어 있다. 이때, 판상의 크기가 두께에 비해서 충분히 크다면 측면으로부터의 R파의 반사는 기록되지 않으므로 R파는 파형 초기에만 나타날 것이다. R파는 P파와 S파보다 느린 속도로 표면을 따라 전파하며 주로 진폭이 큰 half sine 곡선의 모양을 갖고 있다. 그림에서  $t_c$ 는 충격원의 접촉 시간인데 충격으로 야기되는 충격파의 주파수 특성을 결정하는 요소이다.

물체 내부에서의 P파의 다중 반사가 충격 반향법에서 가장 중요한 정보를 제공한다. 다중 반사파는 반사될 때마다 위상이 변하는데, 초기의 파를 P라고 하면 아래 경계면에 도달하는 P, 3P, 5P, 7P는 압축파(compressive wave)이고 충격면으로 돌아오는 2P, 4P, 6P는 인장파(tensional wave)이다. 충격 시점부터 표면에서 2P의 도달시간인  $t_1$ 은 충격파가 전파한 시간이며 이것은 충격파가 전파한 거리 2T를 충격파의 전파 속도  $C_p$ 로 나눈 값이다. 동일한 시간 간격으로 반사파들이 계속 충격면으로 돌아오는데, 이것은 주기성이 파형의 지배적인 특성이 되는 것을 의미한다. 이 때, 주파수  $f$ 는 주기의 역수이므로  $1/t_1$ 이 된다. 이로부터 충격 반향법에서 가장 핵심적인 관계식이 아래와 같이 유도된다.

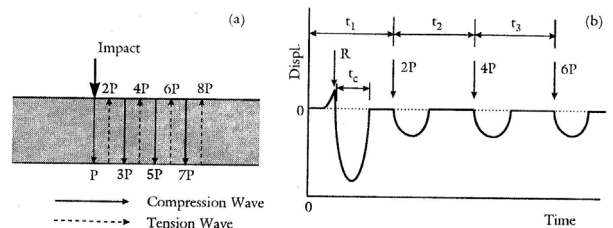


Fig. 2 Schematic diagram of impact echo test in a plate (a) P wave multiple (b) wavelet

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

다시 말해서, 판상체의 두 경계면 사이에서 발생하는 P파의 다중 반사파형은 파의 속도를 판상 두께의 두 배로 나눈 주파수를 가진 주기 함수에 의해 지배된다. 그러나 앞에서 언급한 수식은 이론적인 것이며 현실적인 적용에서는 약간의 보정이 필요하게 된다.

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

위의 수식은 고체 형태의 구조물에서의 충격 반향법의 기본적인 수식이며  $\beta$ 는 대상체의 모양에 의해 결정되는 shape factor이다. 고체 판상의 경우에 있어서  $\beta$ 의 값은 0.96이다.

파장 또는 주파수 관점에서 생성된 응력파의 특징은 매질을 통과한 파동이 경계면을 찾는 신호의 능력이다. 일반적으로, 신호의 파장이 짧을수록 분해능은 높으나 침투심도는 작아진다. 깊이 측정은 측정 오차  $\pm 4\%$  이내에서 이루어진다. 그러나 이것은 주로 콘크리트의 품질에 좌우된다.

조건은 재료 경계면이 어느 정도까지는 음향 임피던스 차이가 나야한다는 것이다. 콘크리트에 대해 측정 가능한 결함의 최소 수평 크기는 한파장과 심도의 1/4 이다. 공진 주파수는 만약 두 경계면의 거리가 파장의 절반보다 클 때 나타나며 충격 반향법으로 찾을 수 있는 표면에 수직하게 열려있는 균열의 최소간격은 0.08mm이다. 또한 균열의 형상과 두께는 알 수가 없다.

음향 임피던스 차이가 높은 재료의 경계면은 대부분 잘 찾아낸다. 공극을 찾거나 물로 포화되어 있는 공극, 철근의 위치나 구조체의 깊이 등의 일반적인 문제는 음향 임피던스가 매우 높은 경우이다. 콘크리트와 콘크리트, 콘크리트와 그라우팅 또는 잘 붙어있는 콘크리트와 암반의 경계는 찾기 매우 어렵다.

### 3. 지표투과 레이더(Ground Penetrating Radar, GPR)

비파괴 검사에 많이 사용되는 레이더는 0.5~1.7GHz 범 위내의 전자기파를 사용하는 방법이다. GPR로 비파괴 조사를 할 때는 재료의 전기와 자기적인 특성 차이를 이용하게 된다. 구조체 내부에서 레이더파의 반사는 유전상수의

급격한 변화에 기인한다. 이러한 예는 구조체 내부나 슬라브의 철근을 들 수 있다. 반사체와의 거리는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$d = \frac{c_0 \cdot t}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

여기서,  $d$  [m] 경계면의 깊이,  $c_0$  [m/s] 광속, 299,792,458 m/s,  $\epsilon_r$  [-] 유전상수

콘크리트와 철( $10^6$  단위)의 큰 유전상수 차이로 인해 경계면에서 강한 반사파를 나타낸다. 이 성질을 이용하여 콘크리트 내부에 매립되어 있는 철근, 강선 또는 케이블과 같은 금속의 위치를 찾는 데 이용될 수 있다.

금속 타겟으로부터의 강한 반사파는 GPR의 주요한 한계점을 만들어낸다. 즉, 비록 알루미늄과 같이 얇은 금속이라도 그 하부를 조사하기는 힘들다. 일반적으로 침투 심도는 매질의 전기전도도에 의해 결정된다. 전도성이 낮은 매질에서 침투심도가 깊고 전도성이 높은 매질에서는 침투심도가 얇다. 콘크리트-PVC 또는 콘크리트-지반과 같이 전도성 차이가 크게 나지 않는 경계면은 탐지하기 어려우며, 콘크리트-콘크리트 또는 콘크리트-암반의 경계는 거의 탐지하기 힘들다.

### 4. 탐사 순서와 장비

충격 반향법은 터널 라이닝의 두께 측정을 위해 적용되었다. 일반적으로 철근 간격이 충분히 넓다면 GPR도 사용될 수 있다. 탐사방법은 부지 특성과 현장 특성을 고려하여 선정한다. 이 프로젝트에서는 두가지 방법을 모두 사용하였다.

터널 라이닝에 비파괴 조사를 위해 조사 격자 크기는 75×80cm 로 설정하였다. 터널 천단부는 콘크리트 타설 시 가장 문제가 되는 곳이므로 천단부를 중심으로 조사를 수행하였다. RI-ZFP-TU 에 나와 있는 조사스펙 보다 많은 축선을 설정하여 천단부와 평행하게 총 7개의 축선을 조사하였다.

터널길이 2,550m에 대해 24,000개의 측정자료를 측정하였다. 각 측정마다 측정표시와 자료획득에 1분이 걸린다고 가정하면 전체 조사시간은 400시간이 넘는다. 측정과 신호 분석에는 슈투트가르트의 MPA 대학에서 만든 IEDA 2.30 장비를 사용하였다. GPR은 Geophysical Survey Systems,

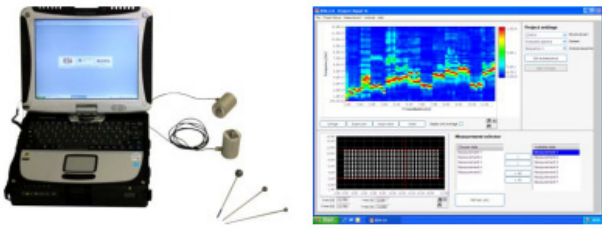


Fig. 3 MPA Stuttgart IE device, IEDA 2.3 Software

Inc.(GSSI) 사 장비인 SIR-3000과 콘트롤 유닛으로 Model 5100B, 1.6GHz 안테나를 사용하였다.

### 5. 조사 스펙과 충격 반향법의 한계

앞에 기술한 일반적인 한계에 덧붙여서, 아래에 기술한 케이스 스펙 문제가 다루어져야 한다. 수직 균열, 공극, 그라우트와 배수구에서 반사파는 이상한 결과를 나타내기도 한다. 음파 반사파의 대상체를 모를 때는 이와 같은 반사 파들은 깊은 층으로부터 반사된 것으로 해석될 수 있다. 가장 위험한 것은 라이닝 두께를 더 두껍게 예측하는 것이다. 이러한 위험을 해소하기 위해서는 탐사시에 관련된 상황을 야장에 정확하게 기록해 놓는 것이다. 충격 반향법의 결과와 야장을 한 그래프에 놓고 검토해보면 오류를 줄일 수 있다.

천공 및 발파로 터널을 굴착하는 경우, 그라우트/콘크리트 그리고 그라우트와 숏크리트의 들쭉날쭉함으로 인한 거친 터널 면은 종종 시간영역과 주파수 영역에서 모호하게 나타난다. 층의 경계면에서 명확한 반사파가 없이, 일반적인 신호 잡음 중에서 특정 깊이의 주파수를 선택하는 것은 매우 부정확할 수 있다. 분석시에는 적정 라이닝 두께까지 특정 재료의 존재여부를 확인할 수 있는 최대 반사 심도를 선정하는 것이 매우 중요하다.

Fig. 4에 나타나 있듯이 거친 표면으로 인하여 바로 주변에서 측정된 값과 비교를 하기 어려우며 따라서 결과를 확인하기도 어렵다. 그리고 알고 있는 깊이 근처로부터 음

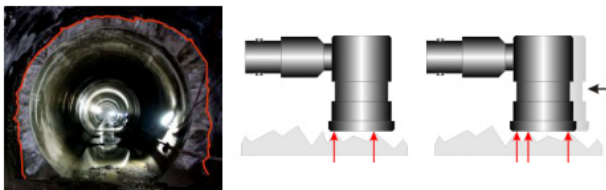


Fig. 4 센서 커플링에 따른 이론과 실제 라이닝 두께

속의 속도보정을 하기 어렵게 만든다. 이 문제를 해결하기 위해 2,550미터가 굴착되는 동안 12개의 콘크리트 코어를 회수하였다. 음속은 3,370m/s~4,190m/s 범위안인 것으로 조사되었다. 이러한 속도 오차범위는 약 ± 4%의 심도 오차로 나타난다. 1차 조사 때, 센서와 콘크리트 표면의 커플링 때문에 많은 문제가 발생하였다. 콘크리트로 완전히 덮인 표면도 풍화로 인하여 넓은 영역에 걸쳐 매우 거칠었다. 20mm 센서의 접촉 지름으로 인하여 표면과 커플링 문제가 발생할 수 있기 때문에 각 지점에서 특이점을 확인할 수 있도록 최소 5회를 측정하였다.

### 6. 제일 깊은 반사면에 기초한 충격 반향법 분석

시간영역과 주파수 영역에서의 신호의 변동은 자동 분석을 어렵게 하는 주요 요인이다. 따라서 라이닝 두께 40cm에 해당되는 깊이까지 수동으로 최대값을 추출하였다.

일반적으로 주파수 영역에서 기록된 신호는 몇 가지 카테고리 나눌 수가 있는데, 터널 라이닝에 대한 품질 기준에 따라 터널 라이닝의 내부 결함의 특성을 추측할 수 있다.

- Case 1. 이 경우는 일반적으로 0.2~0.8V 정도의 낮은 진폭 신호일 때 나타난다.
- Case 2. 깨끗하게 나타나는 몇 개의 최대값은 주로 세가지 이유로 나눌 수 있다.
  - 콘크리트/그라우팅, 그라우팅/숏크리트, 또는 숏크리트/암반과 같이 명확한 표면을 가지는 층서 구조
  - 입력 파형을 부분적으로 반사시켜 반사파를 분산시키는 미소 공극
  - 수직 균열로부터 발생한 다중반사파 또는 그라우트나 배수구에 의한 다중 피크. 이것은 설계 도서나 표면의 이상체를 조사함으로써 확인가능함.
- Case 3. 구조체 내부에 생긴 허니콤 구조에 의한 영향 또는 수평 회절체에 의하여 주파수 영역에서 다중 피크 발생. 허니콤 구조에 의한 P파 회절 뿐만 아니라, 심부의 반사면으로부터 주파수 감쇠에 의한 영향. 거친 표면에서 발생한 회절

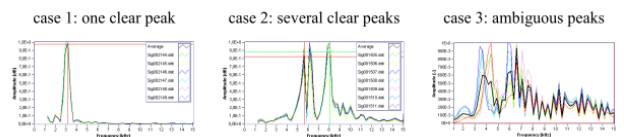


Fig. 5 FFT Category

반사파는 어느 정도 파형을 왜곡시켜 잡음 수준 이하로 감쇠되기도 함. 따라서 명확한 라이닝 두께를 측정하기는 어려움

이상의 모든 것을 고려하여 해석을 하여야하며, 측정 격자는 다음의 두가지 중요한 사항을 포함하여야 한다.

- 단일 측정의 해상도가 225mm라 하지만, 이것이 존재하는 모든 결함을 측정할 수 있다는 것은 아니다. 80 × 75cm의 측정 격자 해상도에 못 미치는 공극은 탐지 못할 수도 있다.
- 각 측정 자료는 인접한 지역의 무작위 지점을 대표한다고 할 수 있으며, 따라서 인근 지역과 완전히 다른 결과가 나올 수 있다.

이러한 문제점에도 불구하고 충격 반향법은 터널의 건전도를 조사하는데 유용한 방법이다. 이상의 결과를 종합해보면 충격 반향법으로 정확한 결함의 위치를 찾는 쪽보다는 결함의 빈도(밀도)를 찾는 쪽이 적절하다고 보여진다. 터널 보수를 고려해보면, 이 방법은 터널의 건전도 문제를 해결하는 적절한 해결책이 될 수 있다. 격자 측정 방법을 통하여 측정한 단일 결과는 인접한 결함을 포함하므로 더 중요하다. 예를 들면, 단일 측정결과는 두께가 얇은 구간의 가능성이 높은 구간의 경계를 나타낼 수 있다.

### 7. 지표 투과 레이더

#### (Ground Penetrating Radar, GPR) 측정결과

GPR로 몇 회의 탐사가 수행되었으며, 라이닝 내부의 지하수로 인하여 침투심도는 매우 감소하였다. 부분적으로 심도의 신뢰구간은 목표치인 40 cm 아래에 있었으며 따라서, 전체 터널 라이닝을 조사하는데 요구되는 신뢰성을 확보하지는 못했다. 게다가 전기적인 임피던스의 차이가 거의 없는 콘크리트-그라우팅 경계는 거의 찾을 수가 없다. 숏크리트 내의 철근을 확인하자는 아이디어는 대부분의 결과 단면도에서 확인되지 않았다(Fig. 6). 반면에 음향학적으로 확인된 바리를 GPR로 확인하거나 콘크리트

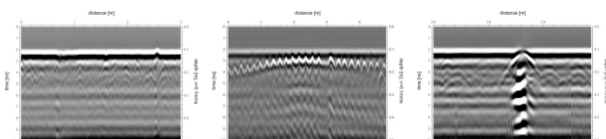


Fig. 6 GPR 결과 단면도

파이프의 다중 반사파(Fig. 6 오른쪽), 철근 구간(Fig. 6 중간)의 확인 등에 더 유용하였다. Fig. 6(중간)은 횡방향의 GPR단면도인데 천단부로 갈수록 콘크리트 커버가 얇아지고 있는 것이 명확하게 나타나 있다. 최종 확인된 콘크리트 커버는 겨우 5mm에 불과하였다.

### 8. Verification of the measurements

충격 반향법으로 터널의 결함이 있는 라이닝 두께 조사에 공식적으로 이용되며, 측정값과 예측값이 잘 들어맞고 있다.

콘크리트 코어 chainage 2691에서 상당한 누수가 관측되었다. 누수지역에 다짐이 불량한 콘크리트가 확인되었으나(Fig. 8) 충격 반향법의 조사전에 수행한 코어링 결과에는 특별한 공동은 관측되지 않았다. FFT 결과를 살펴보면 49 cm 부근에서 경계면이 예측되었다(Fig. 7). 회수된 콘크리트 코어 검토 결과, 콘크리트와 숏크리트 사이 약 34 cm 부근에 공극이 발견되었다. 충격 반향법에서 콘크리트 내부의 P파 속도는 3,510 m/s로 선정하면, 4.8 ~ 5.2 kHz 사이에서 공극에 대한 최대 값이 나타나야 한다. Fig. 7의 FFT 결과에 따르면 부합되는 피크가 있다. 그러나 이것은 딱 맞는 것이라고 말하기는 어렵다. 대상지역의 조사 기록에 누수는 기록되어 있으나, 라이닝 구조는 40 cm 이상까지 건전하다고 판단된다.

이 현상에 대해 수긍할만한 설명은 공극이 수평으로는 아주 작다는 것이다. 상세조사결과 음파는 49cm 부근에 그라우트로 둘러싸인 결함으로부터 반사된 것으로 확인되었다.

코어 분석을 통하여 34cm 부근의 콘크리트와 쇼크리트 사이에 존재하는 공극을 확인하였다. 충격 반향법 적용시

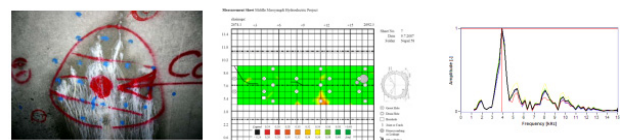


Fig. 7 코어 위치 2691과 야장 및 FFT 결과



Fig. 8 Chainage 2691 콘크리트 코어

콘크리트의 음파 속도는 3,510 m/s로 공극에 대하여 4.8 ~ 5.2 kHz 대역에 존재한다. Fig. 7에 FFT 단면도를 보면 대응하는 피크값을 확인할 수 있으나 명확하게 확인되지는 않는다. 이 지역에 대한 야장에는 누수가 기록되어 있으나 구조체는 40cm 이상의 깊이로 건전한 것으로 판단된다.

이 결과로부터 공극의 수평적인 분포가 매우 제한되어 있다는 것을 추정할 수 있다. 음파는 약 49cm 부근의 균열에서 반사되었으며 이 부분은 그라우트 층으로 확인되었다. 앞에서 기술한 충격 반향법의 일반적인 한계를 살펴보면, 공극에 대한 가탐 크기에 대해 2개의 값이 주어졌다. 최소 수평 범위는 구 반경 내지 심도의 1/4 배보다 14 배 크다. 이것은 각각 126mm 또는 113mm에 해당한다. 100mm 코어와 비교해보면 실제 공극은 예상되는 크기보다 작다.

이것과는 다르게 코어 2691의 콘크리트 배면은 심하게 파쇄되어 있다. 면을 형성하지 못하고 있으며 파동 또한 깨끗하게 반사되지 않았다. 반사파는 49 cm 깊이의 경계에서 보다 더 산란되어 나타나고 있다. 게다가, 이렇게 특수한 경우에는 충격 반향법은 두가지 효과가 서로 간섭을 하게 된다. 좀 더 얇은 심도의 공극이 높은 공진 주파수를 나타내게 되나 고주파 파동은 저주파 파동보다 흡수가 되거나 확산이 되기 쉽다. 이 경우 파동 중첩은 큰 문제가 되지 않으며 공극이 많은 경우에 고주파 파동은 200 mV 이하의 진폭으로, 표면까지 거의 반사되지 못한다.

두 번째 예는 체인번호 3,952의 콘크리트 코어에 나타나 있다. 두 번째의 경우 FFT(Fig. 9) 단면도는 층서 구조를 나타내고 있으며 코어 위치로부터 음속을 보정하였다. 충격 반향법의 결과는 코어를 비교함으로써 확인이 가능할데 54.2 cm와 37.9 cm의 FFT 피크 값은 37 cm와 52 cm(Fig. 9)의 콘크리트 코어 경계면과 ±4% 이내의 오차 범위 안에서 일치한다. 48 cm의 경계는 주파수 영역에서는 보이지 않으며 이것은 두 층이 단단하게 밀착되어 있음을 의미한다.



Fig. 9 Chainage 3952의 콘크리트 코어 및 대응되는 FFT 결과

### 9. 측정결과의 평가와 NDT 방법

주로 충격 반향법은 해석과 분석을 위하여 적용되었다. 충격 반향법의 결과들은 라이닝 두께에 대한 절대값보다 ‘결함 밀도’의 개념으로 일반화하였다. 이러한 개념은 충격 반향법의 주요 절차인 스캐닝을 통한 주변 지역의 결과와 비교가 불가능하기 때문에 반드시 필요하다. 그러나 이것만으로는 충분하지 않으며 특히 성공적인 충격 반향법의 적용을 위해서는 ‘결함 밀도’ 정도로는 원하는 결과로 충분하지 않다. 그럼에도 불구하고, 주변 구조에 대한 결론을 이끌어 낼 수 있는 가능성이 높다.

이 개념을 적용할 때 가장 큰 단점은 근접 확인이 불가능하다는 것이다. 코어 회수 결과를 이용하여 분석하면 잘 맞지 않는 경우가 있으며 앞에서 설명한 콘크리트 코어와 비교 분석을 통하여 잘 알 수 있었다. 따라서 결과 검증이 어려운 경우에도 적용해 볼 필요가 있다. 충격 반향법의 일반적인 결과 해석방법을 사용하더라도 성공적으로 적용이 가능하다.

라이닝 두께 결정을 위한 GPR 탐사는 다음 두가지 이유로 인하여 초기부터 적용성이 떨어졌다.

GPR 탐사로는 가탐심도가 너무 얇은 경우와 라이닝 두께가 적절했을 경우를 구별할 수 없었다.

주변 지층과의 전기 임피던스 차이가 크지 않았고 공극 두께가 6mm 이상이어야 한다는 조건은 결함 접촉면의 상태에 대한 평가를 하기에는 너무 크다.

GPR은 철근이나 콘크리트 파이프가 매설된 곳에는 매우 유용하나 젖은 콘크리트로 인하여 합성 포일이 없이 시공된 곳의 라이닝 두께를 결정하기에는 유용하지 않다.

### 10. 결론과 전망

네팔의 수력 발전소에서, 5 Km의 도수터널이 건설되었다. 시공하는 중에 이미 도수터널의 결함이 발견되어 문제가 되어 MPA 슈투트가르트는 비파괴 검사를 이용하여 손상의 정도 조사를 요청받았다. 육안검사와 종방향/횡방향의 균열, 심각한 풍화, 라이닝의 얇은 두께와 충분하지 않은 콘크리트 커버에 대한 사전 검토를 실시하였다. 비파괴 검사는 충격 반향법과 레이더를 수행하였다. 표면과 구조적인 상태가 달라서 표준화된 자료처리와 해석을 하기는 어려웠으며 모든 터널 조사 위치에 대하여 라이닝 두께를 구하기도 어려웠다. ‘결함 밀도’의 개념은 결과 해석시에

적용하였다. 이것은 조사 지역 전반에 걸친 결과를 확인할 수 있었고 비파괴 조사의 적용성을 확인하였다.

비파괴 조사 외에도 선정된 지점에 코어 채취가 수행되었다. 코어는 충격반향법의 보정용과 일축압축 강도 및 탄성 계수를 결정하기 위해 사용되었다.

만약 표준화된 양의 에너지를 구조체로 보낼 수 있다면, 결함의 심도나 형태는 반사파의 진폭으로부터 좀 더 쉽게 얻어질 수 있을 것이다. 결과적으로 새로운 충격 반향법 장비는 이러한 요구들을 만족시키기 위해 개발 중에 있다.

참고문헌

1. 정연문, 하희상, “토목공학 분야에서의 충격 반향법의 응용”, 지구물리와 물리탐사3(3), pp.94-120.
2. Allen G. Davis, Malcolm K. Lim, Claus Germann Petersen, “Rapid and economical evaluation of concrete tunnel linings with impulse response and impulse radar non-destructive methods”, NDT&E International, 38, 2005, pp.181-186.
3. Frank Lehmann, “Practical application of non-destructive test methods at a single-shell tunnel lining”, NDT.net-The e-Journal of Nondestructive Testing, Dec., 2018.
4. GSSI Handbook for Radar Inspection of Concrete, Geophysical Survey Systems, Inc., Salem, NH, 8. 2006.
5. Ki-II Song, Gye-Chun Cho, M. ASCE., “Health Monitoring of Tunnel Shotcrete Lining using Nondestructive Testing Methods”, GeoFlorida 2010, Advances in Analysis, Modeling & Design, 2010 ASCE, pp.2368-2377.
6. RI-ZfP-TU, Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen, Bundesanstalt für Straßenwesen (bast), Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 14/2001, Reg.-Nr. 05. 72.
7. Sansalone, M. J. and Streett, W. B., “Impact-Echo”, Bullbrier Press, Ithaca, NY, 1997.

담당 편집위원: 한종욱  
(명지대학교 연구교수)  
jwhan@mju.ac.kr