

# 터널 지보구조 진단을 위한 고주파수 탄성과 반사법의 응용성 연구 - 모형 실험을 중심으로 -

## Study on the Applicability of High Frequency Seismic Reflection Method to the Inspection of Tunnel Lining Structures - Physical Modeling Approach -



김중열\*  
Kim, Jung-Yul



김유성\*  
Kim, Yoo-Sung



신용석\*  
Shin, Yong-Suk



현혜자\*  
Hyun, Hye-Ja



정현기\*  
Jung, Hyun-Key

### Abstract

In recent years two reflection methods, i.e. GPR and seismic Impact-Echo, are usually performed to obtain the information about tunnel lining structures composed of concrete lining, shotcrete, water barrier, and voids at the back of lining. However, they do not lead to a desirable resolution sufficient for the inspection of tunnel safety, due to many problems of interest including primarily ① inner thin layers of lining structure itself in comparison with the wavelength of source wavelets, ② dominant unwanted surface wave arrivals, ③ inadequate measuring strategy. In this sense, seismic physical modeling is a useful tool, with the use of the full information about the known physical model, to handle such problems, especially to study problems of wave propagation in such fine structures that are not amenable to theory and field works as well. Thus, this paper deals with various results of seismic physical modeling to enable to show a possibility of detecting the inner layer boundaries of tunnel lining structures. To this end, a physical model analogous to a lining structure was built up, measured and processed in the same way as performed in regular reflection surveys. The evaluated seismic section gives a clear picture of the lining structure, that will open up more consistent direction of research into the development of an efficient measuring and processing technology.

\*1 한국자원연구소 책임연구원

\*2 한국자원연구소 선임연구원

\*3 시설안전기술공단 부장

**Keywords :** Tunnel lining structure, Seismic reflection method, Seismic physical modeling, Ultrasonic source, Surface wave

## 요 지

콘크리트 라이닝, 방수막, 슛크리트 및 공동 등으로 구성된 터널 지보구조는 탄성과 반사법 응용면에서 일종의 박층구조로 간주될 수 있다. 그런데, 각 구성 매질의 경계면 및 물성은 무엇보다 터널 안정성평가를 위한 주요 정보가 되기 때문에 이에 대한 정밀 조사기법의 개발이 크게 요구되고 있는 실정이다. 최근, 국내·외에서 시도된 바 있는 GPR이나 Impact-Echo는 우선 박층에 대한 발생원 파형 길이(파장)면에서도 타당성을 잃게 되어 내부구조 분해능에 대한 상당한 불확실성을 나타내고 있다. 더구나, 현장응용에서 얻게되는 탄성파기록에는 여러 가지 불필요한 탄성과 도달 즉, 큰 진폭의 표면파, S파 반사파 및 변환파는 서로 중첩되어 지배적으로 발달될 것이 기대되기 때문에 이에 대처한 효율적인 측정 및 분석기법 개발이 불가피하다. 탄성과 모형 실험은 바로 상기 복합적인 문제를 구체화하고 또한 그에 따른 기술 개발을 촉진할 수 있는 유용한 기능을 갖고 있다. 따라서, 본 논문에는 터널 지보구조에 대등한 모형을 대상으로 탄성과 반사법 본연의 측정기법(roll-along법) 및 전산처리 과정에 의해 데이터를 취득하고 또한 전산처리 함으로써 주어진 내부구조를 어느 정도까지 재현할 수 있는가를 보여주고 있다. 비록, 측정 데이터에는 유용한 반사파보다는 이미 예상한 바 상기 불필요한 탄성과의 도달이 지배적으로 발달되고 있음이 관찰되었으나 적절한 측정 및 전산처리 과정은 주어진 내부구조에 대한 바람직한 결과를 초래하였다. 이러한 연구결실은 우선 선진국에서도 난제로 되어온 터널 지보구조 규명을 위한 하나의 계기를 마련함은 물론 나아가서 그의 현실화를 위한 기술개발을 가속화할 것으로 사료된다.

**주요어 :** 터널 지보구조, 탄성과 반사법, 탄성과 모형실험, 초음파 발생원, 표면파

## 1. 서론

터널 지보구조는 대체로 라이닝, 방수막, 슛크리트, 원지반 순으로 구성되어 있으며 그들도 서로 빈틈없이 인접되고 있다. 그런데, 각 구성 매질의 두께 및 물성(예:탄성파속도, 강도)이 주어진 설계 기준치를 벗어나거나 혹은 배면(예:스�크리트/원지반 사이)에 괄목할만한 공동이 존재하게 되면 터널 안정성은 그만큼 기대될 수 없게 되는 것이다. 따라서, 터널 지보 안정성 진단은 무엇보다 지보 구성 매질간의 경계면 규명에 귀결된다고 볼 수 있다. 이러한 경계면(암층 경계면) 혹은 일반적으로 지층경계면을 재현할 수 있는 정통적인 물리탐사법은 바로 탄성과 반사법이다. 탄성과 전달 측면에서 상기 구성 매질은 서로 물성(임피던스 = 탄성파속도×밀도)을 달리하기 때문에 그들간의 경계면은 바로 탄성과 반사면이 된다. 이때 반사된 탄성과의 진폭은 그 경계면의 반사계수에 의해 결정되

며 그 값은 양 매질간의 임피던스 대조와 상관된다. 예를 들면, 방수막과 라이닝 혹은 슛크리트는 서로 상당한 임피던스 차이를 보여주고 있기 때문에 그 경계면에 의한 반사파의 도달은 관찰될 수 있다고 할 수 있다. 특히, 공동 경계면은 최대의 반사계수(±1)로 인해 탄성과 반사법의 훌륭한 표적이 된다. 만약, 터널 벽면상 임의의 측선을 따라 발생원에 대한 수신기들이 배열되면 발생원에 의해 생성된 탄성과  $w(n)$ (흔히 wavelet라 함)은 터널 내벽 방향으로 전달되며 그 과정 중 각 경계면에 의해 반사되는 각 탄성과는 서로 주시차를 두면서 수신기에 도달된다. 여기서 수신기 배열에 의해 측정된 결과를 흔히 탄성파기록  $s(n)$ 이라 한다. 탄성과 이론에 의하면  $s(n)$ 은 일차근사로  $w(n)$ 과 각 경계면의 반사계수로부터 얻어지는 임펄스 반응(impulse response)  $p(n)$ 과 연계된 소위 반사모델(reflection model)에 바탕을 두고 있으며 그들은 콘볼루션(convolution)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$s(n) = w(n) * p(n) \quad (1)$$

\*: convolution

식 (1)에서  $p(n)$ 은 바로 터널 지보구조 경계면의 존재 및 위치에 대한 정보를 제시한다. 그림 1은 상기 반사모델에 대한 이해를 돕기 위해 식 (1)에 근거한 간단한 수치모형 실험을 예시하고 있다. 여기서  $r(n)$ 은 단지 각 반사면의 반사계수를 왕복주시에 대해 표현한 것이며(흔히 reflector series라 함)  $p(n)$ 은 이에 부가하여 각 경계면 간의 다중반사를 고려하여 계산한 결과이다. (b)에 나타난  $w(n)$ 은 소형 햄머로 터널벽에 충격을 가했을 경우 주로 관찰되는 주 주파수 3kHz의 파형을, (c)는 초음파 발생원(예: 압전소자)에 의해 생성되는 주 주파수 100kHz 파형을 나타내고 있다. (f) 및 (g)는 각각 햄머(b) 및 초음파 발생원(c)이 사용되었을 경우 기대되는 탄성파기록  $s(n)$ 을 보여주고 있다. 여기서 햄머 파형의 길이는 라이닝 전체 두께보다 약 두 배에 달하고 있기 때문에 기대되는 기록 (f)에서는 경계면에 대한 정보가 전혀 인식되지 않고 있다. 이러한 경우 경계면에 대한 정보 추출은 단지 특별한 분석기법에 의해서만 가능하다고 할 수 있다. 반면, 고주파수 초음파 파형에 의한 기록 (g)에서는 이미 경계면의 정보가 뚜렷이 관찰되고 있음을 볼 수 있다. 그러나, 터널 현장 응용면에서 이러한 주파수(100kHz)의 초음파는 그의 전달과정에서 매질의 흡수성으로 인한 에너지 감쇠효과로 인하여 거의 소멸될 것이 기대된다. 따라서, 발생원 주파수 선정 과정에는 무엇보다 ① 라이닝 두께에 대한 파형 길이(주파장), ② 발생원 제작 및 응용의 용이성, ③ 매질의 흡수성, ④ 분석의 효율성 등이 동시에 고려되어야 함이 바람직하다. 그림 2는 상기 여건을 바탕으로 선정된 40kHz 발생원에 대해 기대되는 기록( $p(n)$ 은 그림 1(e)와 동일)을 나타내고 있다. 여기서 실선은 파형  $w(n)$ 이 전달과정에서 불변일 경우이며 점선은 매질의 흡수성과 파형의 overswing 효과 등을 고려하여 실제 현장에서 기대되는 기록을 나타내고 있다. 비록, 파형이 다소 중첩된 상태에

서 경계면에 대한 정보( $p(n)$ )는 모호하나 그의 분해능은 적절한 분석기법에 의해 쉽게 높일 수 있다.

상기 반사모델은 어디까지나 반사파에 대해서만 적용된다. 그러나, 벽면 측정에서는 발생원과 수신기가 서로 떨어져 있기 때문에 벽면 표면을 따라 전달되는 소위 표면파(혹은 레일리파)의 도달이 불가피하다. 그런데, 그의 진폭 및 파형 길이는 대부분의 경우 반사파의 것보다 훨씬 크게 나타나고 있다. 따라서, 반사법에 의한 터널 지보구조 규명은 무엇보다 측정 및 분석 과정에서 어느 정도 표면파를 약화시킬 수 있는냐에 달려있다고 할 수 있다. 최근, 라이닝 두께 측정을 위해 시도된 충격반향법(발생원: 소형 햄머)(정연문 등, 2000)은 반사파라기 보다는 오히려 표면파의 공진 현상을 이용하고 있다고 볼 수 있기 때문에 그의 응용성은 극히 제한적이라 할 수 있다. 이와 병행하여 시도된 또 다른 물리탐사법으로는 바로 레이더를 이용한 반사법(GPR)을 들 수 있다. 그의 반사법 응용면에서 보여준 발생원(900MHz)의 파형 및 파장은 터널 지보구조 규명을 위한 훌륭한 여건이 되고 있다. 그러나, 레이더파는 일종의 전자기파이기 때문에 터널 지보구조에 전기전도도가 대단히 높은 매질(예: 철재 구조물)이 존재하는 경우 레이더파는 그로 인해 차폐된다. 즉, 철근 구조물 배면에 대한 반사파의 정보는 취득될 수 없다는 것이다. 이러한 면에서 탄성과 혹은 초음파는 전기전도도와는 무관하게 단지 매질의 탄성계수 및 밀도에 의해 영향을 받기 때문에 탄성과 반사법은 세계적인 현 기술수준에서 터널 지보구조에 대한 총체적인 정보를 얻기 위한 유일한 조사기법으로 간주될 수 있는 것이다. 그러나 이에 대한 체계적인 연구는 선진국에서도 극히 미흡한 실정이다. 따라서, 본 논문의 주요 내용은 터널 지보구조에 대응한 모형을 제작하고 또한 측정 및 분석함으로써 주어진 내부구조를 어느 정도 재현할 수 있는가를 규명하는 데 있다. 여기서 초음파 발생원은 주 주파수 40kHz 펄스를 방사하며 수신기로는 성분 압전소자(band swinger)가 사용되었다. 측정을 위해서는 탄성과 반사법에서 상용되

는 roll-along법이 선정되었으며 그로 인한 방대한 데이터는 탄성과 반사법 정규 전산처리 시스템인 "FOCUS" 시스템에 의해 처리되었다. 이러한 실험 과정에는 무엇보다 현장 탐사에서 대두되는 여러 가지 문제점(예: 표면과의 발달, 제반 반사파의 중첩)들이 반영되기 때문에 그 결과는 바로 현장에서 응용될 수 있는 하나의 새로운 측정 시스템 개발을 위한 바탕이 되는 것이다. 다음은 우선 모형 제작 및 데이터 취득 과정을 서술하고 있으며 나아가서 분석을 위한 주요 전산처리 과정을 요약하고 있다.

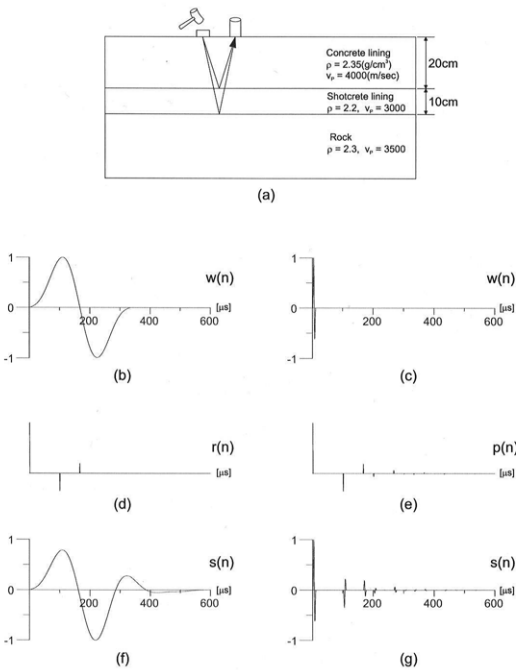


그림 1. 터널 지보구조 수치모델링.  
 발생원 주파수 변화에 따른 합성 탄성파기록.  
 (a) 콘크리트 지보구조에 대한 수치모델  
 (b) 3kHz source wavelet ( $\lambda \approx 1.3m$ )  
 (c) 100kHz source wavelet ( $\lambda \approx 0.04m$ )  
 (d) reflector series  $r(n)$ ,  
 (e) impulse response  $p(n)$ ,  
 (f) 3kHz source wavelet에 대한 합성 탄성파기록  
 (g) 100kHz source wavelet에 대한 합성 탄성파기록 :  $s(n) = w(n)*p(n)$   
 \*: convolution,  $s(n)$ : 합성 탄성파기록.

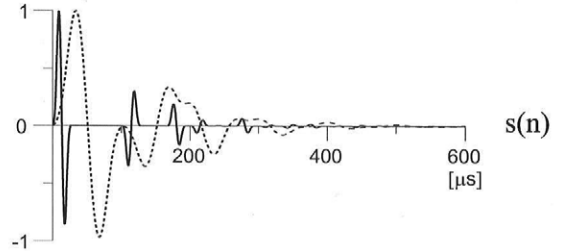


그림 2. 터널 지보구조 수치모델링.  
 발생원 주파수 40kHz에 따른 합성 탄성파기록  $s(n) = w(n)*p(n)$ , 실선: 40kHz 주파수 내용이 탄성과 전달 과정에서 유지되는 경우, 점선: 현장 측정에서 고주파수 성분의 감쇠효과가 고려된 경우.

## 2. 조음파 모형 실험

그림 3은 라이닝(Bakelite)과 숏크리트(Epoxy) 사이에 방수막(PVC)이 협재된 구조를 모형화한 것을 나타내고 있다. 여기서, 실제 라이닝 배면을 보다 현실화하기 위해 각 층의 두께도 수평적으로 변환시켜 제작되었다. 한편, 방수막 내의 불균질성을 유사화 하기 위해 PVC에 작은 구멍들이 천공되었으며 숏크리트 배면의 공동은 빈 공간으로 처리되었다. 원지반(Aluminum) 하부는 두 개의 경계면(화살표로 표시)으로 이루어져 있으며 이는 암반 내 형성된 불연속면 내지 암층경계면에 대응된다고 할 수 있다. 사용된 발생원(주 주파수 40kHz)은 수치단일힘의 점원에 대응되며 그에 따른 P파 및 S파 에너지 방사형은 그림 4에 나타나 있다. 즉, P파는 연직 방향으로, S파는 좌우 약 45° 방향으로 최대의 에너지를 방사하고 있다. 그림 3의 상단에는 기본 발생원-수진기 배열(36 채널 기록)이 일정 간격으로 도합 104 차례 이동하면서 측정되는 과정(roll-along기법)을 나타내며(그림 5 참조) 그로부터 104개의 발생원 기록(shot gather)을 얻게 된다. 그림 6에는 그 중 방수막의 불균질성 및 숏크리트 배면 공동에 의한 반사파의 반응이 잘 반영될 수 있는 두 개의 발생원-수진기 배열(shot 7 및 shot 62)을 대상으로 그들 각각의 반사파 진행상태를 파선추적법(Cerveny,



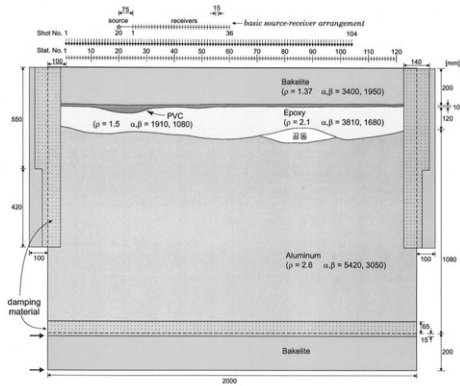


그림 3. 터널 지보구조 모형에 대한 초음파 실험. 콘크리트 라이닝, 방수막, 슛크리트 및 원지반은 각각 Bakelite, PVC, Epoxy 및 Aluminum 매질에 의해 모형화 되었다. 여기서 방수막 배면 불균질성은 작은 구멍을 밀집하게 천공함으로써 유사화 되었으며, 슛크리트 배면 공동은 빈 공간으로 처리되었다. 또한 모형 상단에는 측정을 위한 기본 발생원-수진기 배열, 발생원 및 station 번호가 동시에 표현되고 있다.

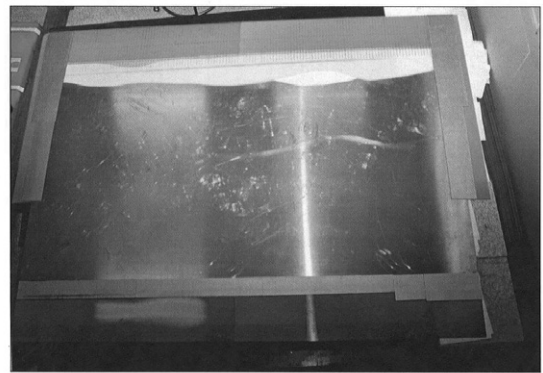


그림 5. 터널 지보구조 모형에 대한 초음파 실험. 터널 지보구조 모형(하) 및 그에 대한 측정 장면(상).

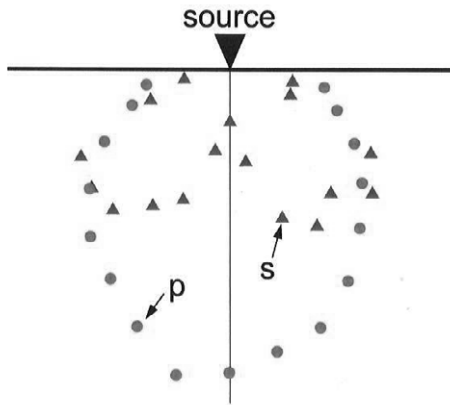


그림 4. 탄성과 발생원 에너지 방사형. 터널 내벽에 수직으로 가격(수직단일힘의 점원)하면 P 파는 연직 방향으로, S파는 좌·우 약 45° 방향으로 각각 최대의 에너지를 방사한다. 수직단일힘의 점원은 햄머 발생원, 압전소자 발생원, weight drop 발생원 등에 의해 구사될 수 있다.

1981)에 의해 나타내고 있다. (b)는 라이닝/방수막 경계면에 대한 일관성을 띤 P파 반사파를, (c)는 방수막 하부 경계면에 대한 P파 반사파를, (d)는 슛크리트/원지반 경

계면에 대한 P파 반사파의 파선 진행도를 각각 예시하고 있다. 여기서 방수막 불균질성은 무엇보다 파선진행의 일관성을 잃게 하고 있음을 즉, 하나의 수진기에 동일한 경계면으로부터 두 개 이상의 반사파가 도달됨을 볼 수 있다. 그림 7은 발생원 기록 7과 각 경계면에 대한 반사파의 주시곡선(traveltime-distance curve)을 상호 대조하여 나타내고 있다. 측정기록((a) 참조)에는 경계면 규명을 위해 전혀 도움이 될 수 없는 큰 진폭의 레일리파(빈 화살표로 표시) 도달이 가장 두드러지게 관찰되며 동시에 S파 반사파(S1S1)도 뚜렷하게 인식되고 있다. 반면, 경계면 규명을 위해 주요 정보가 되는 P파 반사파들은 그들과 상호 중첩되고 있으며 더구나 상기 표면파 및 변환파(P1S1)와도 중첩되고 있어 그들의 식별이 용이하지

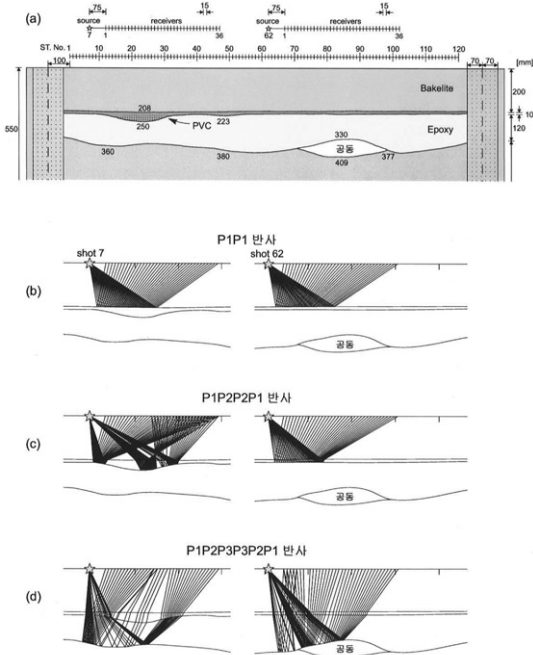


그림 6. 터널 지보구조 모형에 대한 초음파 실험.  
 (a) 파선추적법 응용을 위해 선정된 두 개의 발생원-수진기 배열(shot 7 및 62)  
 (b) 라이닝/방수막 경계면에 대한 반사  
 (c) 방수막/숏크리트 경계면에 대한 반사  
 (d) 숏크리트/원지반 경계면에 대한 반사

않다. 그러나, 공동에 의한 반사파(그림 8 참조)는 높은 반사계수로 인하여 상대적으로 큰 진폭을 나타내고 있음(그림 8에서 화살표로 표시)을 볼 수 있다. 이는 바로 터널 지보구조 배면에 공동이 형성되어 있는 경우 그에 대한 정보는 다른 어떠한 경계면의 것보다 쉽게 얻을 수 있음을 의미하는 것이다.

상기 발생원 기록들은 workstation에 내장된 "FOCUS" 전산처리 시스템에 의해 처리되었다. 이러한 탄성과 반사법 정규 전산처리 시스템은 지난 70여년간 수많은 학자들에 의해 개발된 방대한 프로그램들을 내장하고 있기 때문에 그의 응용은 고도의 전문성을 요구하게 된다. 그림 9는 국내 천부 탄성과 반사법 자료처리를 위한 최소한의 전산처리 과정을 요약하고 있다. 즉 현장 혹은 실내실험

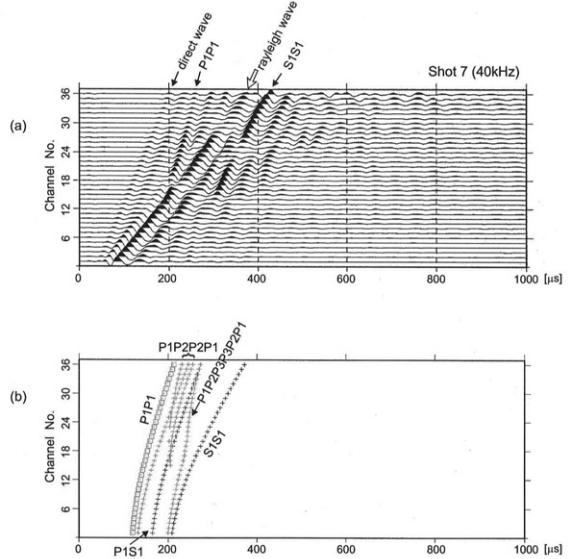


그림 7. 터널 지보구조 모형에 대한 초음파 실험.  
 (a) shot gather 70에 대한 측정기록(발생원 주파수 40kHz)  
 (b) 파선추적법에 의해 계산된 주시곡선(traveltime-distance curves). 여기서 P1S1 및 S1S1 이외의 주시곡선은 바로 경계면 규명을 위한 주요 정보가 된다.

에서 얻은 측정데이터는 우선 "FOCUS"에 입력될 수 있는 data format로 전환되어야 한다. 다음의 Geometry file 설정에는 각 발생원-수진기 배열에 따른 그들의 위치, 이동 간격, 각 station의 고도 및 측선에 대한 편차, 수진기 간격 등을 포함한 정보가 정확하게 입력되어야 하며 이를 바탕으로 필요에 따라 정보정정이 수행된다. 이미 예시한 바 각 발생원 기록에는 불필요한 탄성과 도달이 실제로 유용한 반사파 도달보다 우세하기 때문에 이들의 제거는 바로 지층구조 단면도의 분해능과 크게 연관된다. 예를 들어 F-K 필터는 무엇보다 상기 표면파 제거에 기대할 수 있는 유용한 기법이라 할 수 있다. 이에 부가하여 적절한 디콘기법 내지 주파수 필터가 수행되면 대체로 유용한 반사파 도달이 우세한, 보다 정돈된 발생원 기록을 얻게되며 그로부터 속도 분석 및 동보정(NMO: Normal Move Out)이 수행된다. 만약, 경계면이 수평 내지 수직

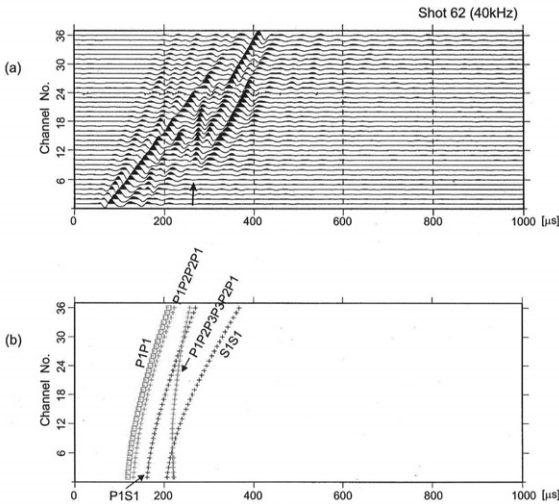


그림 8. 터널 지보구조 모형에 대한 초음파 실험.  
 (a) shot gather 62에 대한 측정기록(발생원 주파수 40kHz)  
 (b) 파선추적법에 의해 계산된 주시곡선(traveltime-distance curves). 여기서 P1S1 및 S1S1 이외의 주시곡선은 바로 경계면 규명을 위한 주요 정보가 된다.

으로 변화할 경우 겹보기 경계면을 실제 경사로 전환하는 소위 구조보정(migration)이 적용된다. 그림 10은 하나의 보기로서 발생원 기록 4를 대상으로 수행한 주요 전산처리 과정을 예시하고 있다. (a)에 나타난 측정 데이터(raw data)에는 이미 언급한 바 표면파(주로 레일리파)의 발달로 인하여 기대되는 반사파의 도달은 거의 인식되지 않고 있다. 그러나, FKFILT(d 참조) 및 DECONA(e) 참조) 이후의 결과는 표면파가 거의 약화되어 기대되는 반사파의 도달이 뚜렷하게 드러나고 있다. 그림 11은 구조보정(그림 9 참조) 이후의 결과를 나타내고 있다. 여기에는 주어진 모형(그림 3 참조)과 비교하여 방수막 상·하 경계와 원지반 상부 및 공동 상부 경계가 전체적으로 훌륭하게 재현되고 있음을 볼 수 있다. 더구나 공동에 의한 반사파도 그의 특징(반전된 위상, 큰 진폭)을 잘 반영하고 있으며 나아가서 원지반 하부 경계도 뚜렷이 관찰되

### 탄성파 반사법 전산처리 과정

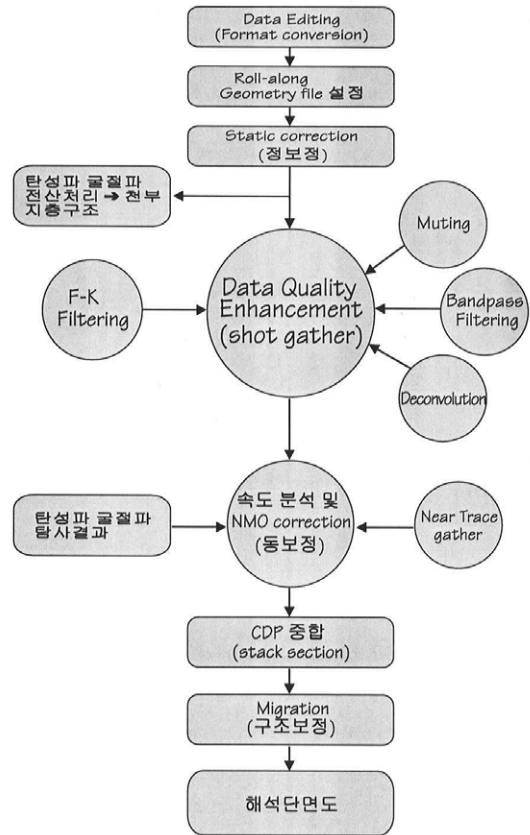


그림 9. 탄성파 반사법의 응용. 국내 전부 탄성파 반사법 자료를 처리할 수 있는 일련의 전산처리 과정.

고 있다. 참고로, 본 전산처리 과정에서 언급된 각 기법의 기능 및 이론적인 배경은 국내에서 발간된 연구보고서(김중열 등, 1989)에 상술되고 있다.

### 3. 결론 및 제언

터널 지보구조는 그 두께가 불과 60cm 미만인 하나의 박층구조로 간주된다. 여기서 관심의 초점은 차례로 배면



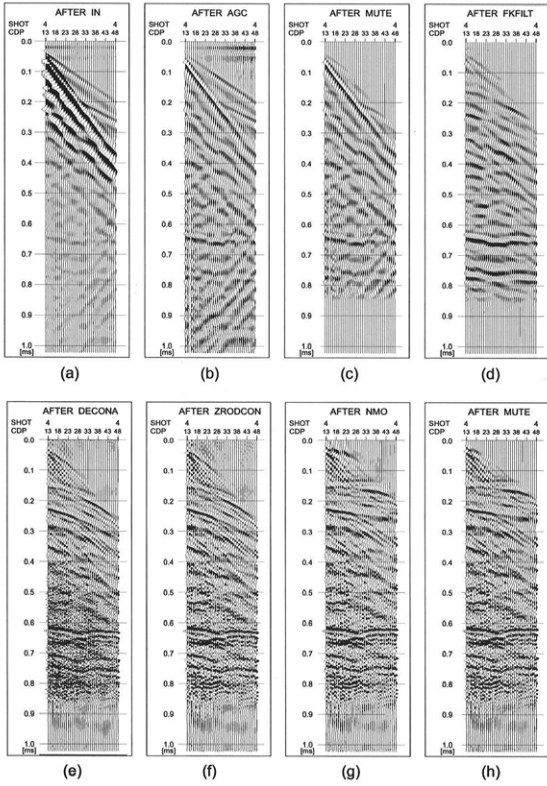


그림 10. 터널 지부구조 모형에 대한 초음파 실험. 측정데이터(a)에는 불필요한 탄성파도달 즉, 표면파, 변환파, 직접파, S 반사파 등이 지배적으로 발달되고 있다. 이러한 탄성파 도달을 제거하고 동시에 유용한 반사파 도달을 뚜렷하게 하기 위하여 AGC(Automatic Gain Control)(b), Muting(c), F-K filtering(d), Spike deconvolution(e), Zero phase deconvolution(f), NMO(Normal Move Out)(g) 및 Muting(h)이 적용된 결과를 예시하고 있다

공동의 존재 및 규모, 방수막 박층 두께의 수평적인 변화, 슛크리트의 물성(예: 탄성파속도) 및 그의 두께 변화를 규명하는 데 있다. 이러한 조사 목적에 다다르기 위해서는 무엇보다 탄성파 반사법이 유일한 조사 기법이라 할 수 있다. 그러나, 그의 응용과정(측정 및 데이터 분석)에는 다음과 같은 여러 가지 문제점이 제기되고 있다. 즉, ① 발생원 파형길이(파장)는 대체로 라이닝 두께의 두 배 미만이 되는 것이 바람직하므로 이를 위한 고주파수 탄성파

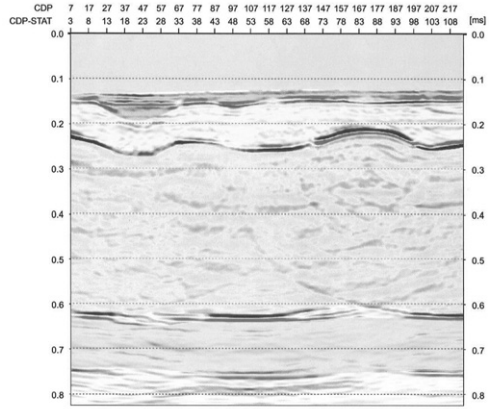


그림 11. 터널 지부구조 모형에 대한 초음파 실험. 최종 전산처리 과정(Migration)에 의해 재현된 터널 지부구조 단면. 공동에 의한 반응(위상반전, 큰 진폭), 방수막 두께의 수평적인 변화, 원지반 하부경계 등이 고분해능으로 재현되고 있다.

발생원 즉, 초음파 발생원의 운용에 따른 에너지 전달 문제, ② 고주파수 탄성파를 수신하기 위한 가속 수신기(acceleration geophone)의 선정(예: 압전소자), ③ 유용한 반사파 도달보다 크게 우세한 표면파(레일리파)의 약화문제, ④ 신속한 측정을 위한 적절한 발생원 및 수신기 배열의 선정 등이 내부구조의 분해능 향상을 위한 주요 요인이 될 것으로 보고 있다. 따라서, 본 논문의 주요 목적은 탄성파 전달 측면에서 터널 지부구조에 대등한 모형을 대상으로 우선 상기 지적한 제반 문제점 등을 구체화하고 나아가서 탄성파 반사법 본연의 측정기법(roll-along법)에 의해 데이터를 취득하고 또한 전산처리(탄성파 반사법 정규 전산처리 과정)함으로써 주어진 내부구조를 어느 정도 재현할 수 있는가를 규명하는 데 있었다. 이를 위해 사용된 발생원은 수직단일힘의 점원에 대응되는 40kHz 초음파 압전소자이며, 수신기로는 성분기록이 가능한 압전소자(band swinger)가 사용되었다. 측정데이터(raw data)에는 유용한 반사파보다는 이미 예상한 바 불필요한 변환파 및 큰 진폭의 표면파가 지배적으로 발달되고 있음이 관찰되었으며 더구나 방수막 두께의 변화는



반사파 전달의 일관성을 크게 잃게 하였다. 반면, 공동에 의한 반사파는 그 경계면의 높은 반사계수로 인하여 그대로 쉽게 관찰될 수 있었다. 한편, 짧은 주시구간 내에 도달된 다양한 탄성파가 서로 중첩되고 있음에도 불구하고 정규 전산처리 시스템에 내장된 프로그램들의 적절한 운용은 상기 표면파의 약화를 가능하게 함으로써 주어진 내부구조에 대한 바람직한 결과를 초래하였다. 여기에는 방수막 두께의 변화, 공동에 의한 특징적인 반사파 반응 및 원지반 하부 경계면이 높은 분해능으로 재현되었다. 이러한 연구 결실은 우선 지금까지 선진국에서도 난제가 되어 온 터널 지보구조 규명을 위해 하나의 새로운 계기를 마련함은 물론 나아가서 그의 현실화를 위한 기술 개발을 촉진할 것으로 사료된다. 여기에는 측정 및 분석면에서 표면파를 약화시킬 수 있는 보다 효율적인 발생원의 개발이 향후 우선적으로 다루어야 할 과제라고 할 수 있겠다.

3. Cervený, V. and Psencik, I. (1981), "2-D Seismic ray package : program seis 81", Charles University, Prague.

## 감사의 글

본 연구는 '99 건설교통기술혁신 5개년 사업의 일환으로 수행되고 있는 고주파수 탄성파 탐사를 통한 터널 진단기술 개발의 1차년도 개발 결과 중 일부이며, 건설교통부 및 한국건설기술연구원의 지원에 감사드린다. 자료 정리 및 도면화 작업에 큰 도움을 주신 남지연씨께 감사드린다.

## 참고 문헌

1. 김중열, 구자학, 김상엽, 현혜자, 김기석 (1989), "탄층연속성 조사를 위한 채널파의 연구(II)", 한국동력자원연구소, 과학기술처.
2. 정연문, 하희상, 송명준 (2000), "물리탐사기술의 토목분야 적용연구 사례", 2000년 공동특별강연 논문집, 한국지구물리탐사학회, 한국지반공학회 지반조사위원회, pp. 87-120.