

## 터널 지보구조 진단을 위한 초음파 반사법을 이용한 3차원 모형실험 연구 Study on 3-D Physical Modeling for the Inspection of Tunnel Lining Structure by using Ultrasonic Reflection Method

김중열<sup>1)</sup>, Jung-Yul Kim, 김유성<sup>1)</sup>, Yoo-Sung Kim, 신용석<sup>2)</sup>, Yong-Suk Shin,  
현혜자<sup>3)</sup>, Hye-Ja Hyun

- 1) 한국지질자원연구원 책임연구원, Principal Researcher, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources
- 2) 시설안전기술공단 지하시설실 부장, Chief of Underground Facility, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation.
- 3) 한국지질자원연구원 선임연구원, Senior Researcher, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources.

**SYNOPSIS** : Thickness of concrete lining, voids at the back of lining or shotcrete are very important elements for inspecting the safety of tunnels. Therefore, the inspection of tunnel lining structure means to investigate the inner layer boundaries of the structure. For this purpose, seismic reflection survey is the most desirable method if it works in good conditions. However, the conventional seismic reflection method can not be properly used for investigating thin layers in the lining structure. In other words, to detect the inner boundaries, it is desirable for the wavelength of source to be less than the thickness of each layer and for the receiver to be capable of detecting high frequency(ultrasonic) signals. To this end, new appropriate source and receiver devices should be developed above all for the ultrasonic reflection survey. This paper deals primarily with the development of source and receiver devices which are essential parts of field measuring system. Interests are above all centered in both the radiation pattern, energy, frequency content of the source and the directional sensitivity of the receiver. With these newly devised ones, ultrasonic physical modeling has been performed on 3-D physical model composed of bakelite, water-proof and concrete. The measured seismograms showed a clear separation of wave arrivals reflected from each layer boundary. Furthermore, it is noteworthy that reflection events from the bottom of concrete below water-proof could be also observed. This result demonstrates the usefulness of the both devices that can be applied to benefit the ultrasonic reflection survey. Future research is being focus on dealing with at first an optimal configuration of source and receiver devices well coupled to tunnel wall, and further an efficient data control system of practical use.

**Key words** : ultrasonic reflection method, tunnel lining structure, 3-D physical modeling, source and receiver devices

## 1. 서 론

터널 지보구조는 대체로 콘크리트 라이닝, 방수막, 슛크리트로 구성되어 있으며 이에 대한 안정성 진단을 위해서는 라이닝 및 슛크리트의 두께 변화, 라이닝 및 슛크리트의 배면 공동 존재 여부 등이 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 즉, 터널의 안정성 진단은 바로 터널 지보구조 내부의 경계면(라이닝/스�크리트, 슛크리트/원지반)들을 규명하는 것으로 귀결될 수 있다. 이러한 경계면을 규명을 위해서는 바로 탄성과 반사법 탐사가 탐사여건만 충족될 수 있다면 가장 바람직한 방법이라 할 수 있다. 그러나, 터널 지보구조는 각 매질의 두께가 불과 수십 cm 정도이기 때문에 기존의 탄성과 반사법 차원에서는 상당한 박층구조라 할 수 있다. 이러한 박층구조인 터널 지보구조를 대상으로 탄성과 반사법을 수행하기 위해서는 우선 발생원의 파장이 각 매질의 두께보다 작은 것이 바람직하기 때문에 그 주파수 범위는 거의 초음파 수준에 도달해야 한다는 것이다. 발생원의 파장 및 콘크리트에서의 초음파 에너지의 감쇠 효과를 고려한다면 발생원 주파수는 약 40 kHz 내외가 타당하며, 이를 이용한 고주파수 탄성과(초음파) 반사법을 수행하게 되면 터널 지보구조를 규명할 수 있다는 것은 이미 2차원 초음파 모형실험을 통해 입증된 바 있다(김중열 외, 2000). 이는 2차원 초음파 모형실험에 사용된 발생원 및 수신기 장치가 반사법 탐사에서 요구하는 다음과 같은 선제 조건을 만족하고 있었다는 것을 의미한다. 즉, ① 발생원은 우선 수직 단일힘의 점원 특성을 가져야 한다. ② 발생원으로부터 방사되는 파형은 왜곡 현상(예: overswing 내지 ringing 현상)이 거의 없어야 한다. ③ 수신기는 성분 측정이 가능하여야 하며, 넓은 주파수 대역에서 거의 왜곡없이 진동(입자움직임)을 감지할 수 있어야 한다. 그러나, 2차원 모형실험에 사용되었던 발생원(piezoelectric disk swinger) 및 수신기(piezoelectric bend swinger)들은 콘크리트 라이닝에 직접 부착하기는 어려우며, 그 발생원 에너지도 현장에 응용하기에는 부적절하다는 문제점이 있다. 따라서, 2차원 모형실험에서 사용한 발생원과 수신기의 기능을 그대로 발휘할 수 있으면서 콘크리트 라이닝에 부착될 수 있는 발생원 및 수신기 장치의 개발은 불가피하다고 하겠다.

본 연구의 목적은 우선 터널 지보구조 규명을 위한 초음파 반사법 측정 시스템의 핵심적인 요소인 발생원 및 수신기 장치의 개발과정에서 고려되어야 할 사항을 점검하고 나아가서 현장 응용에 최적인 발생원 및 수신기 장치를 구축하는 데 있다. 또한, 터널 지보구조를 유사화한 3차원 모형을 제작하여 상기 발생원 및 수신기 장치에 대한 현장 응용 가능성도 타진하고 있다.

## 2. 발생원 및 수신기 장치 개발

발생원 장치 개발 과정에서는 다양한 발생원 장치(예: disk swinger, multi-piezoelectric transducer, single-piezoelectric transducer)가 제작되었으며, 이들 중 초음파 반사법에 적합한 발생원 장치를 선정하기 위해 그들에 대한 특성(주파수 내용, 에너지, 파형, 방사 패턴 등)이 실험을 통해 파악되었다. 그림 1은 이러한 발생원 장치들 중 현 기술수준에서 현장 응용에 적합하다고 판단되는 발생원 장치를 나타내고 있다. 이 발생원 장치의 주요 특성은 우선 생성되는 파형의 overswing을 최소화하도록 설계되었으며, 넓은 주파수 범위의 초음파를 거의 왜곡없이 생성할 수 있다는 것이다. 터널 지보구조에서는 흡수성이 높은 매질(예: 방수막)이 존재하기 때문에 발생원의 에너지를 효율적으로 높일 수 있는 방안이 모색되어야 한다. 이를 위해서는 주파수 내용이 연속적으로 변화하는 스위프 발생원의 운용도 고려 대상이 되고 있기 때문에(김중열 외, 2001) 상기 발생원 장치가 넓은 주파수 범위의 파형을 생성할 수 있다는 것은 그의 현장 응용성이 그만큼 크다는 것을 의미한다. 이러한 발생원 장치의 설계는 그의 기능 및 목적에 따라 다음과 같은 사항들이 고려되어야 한다. ① 발생원 장치에 사용되는 압전소자가 디스크형이나 실린더형이나에 따라 그로부터 생성되는 파형 및 에너지가 크게 달라지게 된다. ② 압전소자의 배열에 따라 생성되는 발생원 파형 내지 에너지 방사형을 바꿀 수 있다. ③ 압전소자로부터 생성된 초음파가 장치 내부에서 반사되지 않도록 damping을 어떻게 하느냐에 따라 발생원 장치로부터 생성되는 파형은 크게 달라지게 된다. 다음은 초음파 반사법 탐사에 적합한 수신기 소자 선정 및 그에 따른 부차적인 장치 개발에 대해 서술하고 있다.

## 50kHz-150kHz Mono Disk Transducer

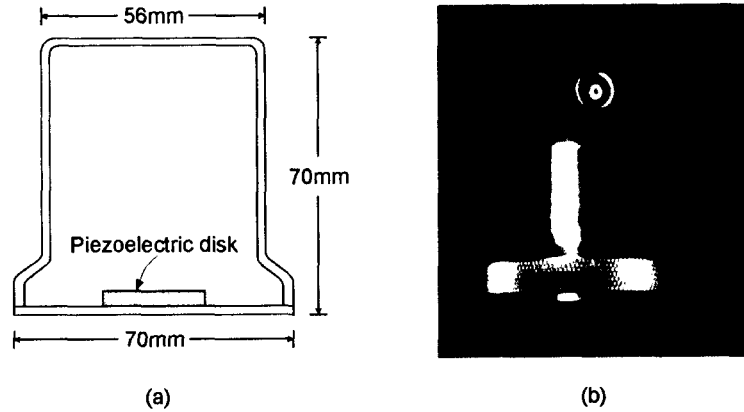


그림 1 발생원 장치의 개발.

생성된 파형의 *overswing*을 최소화하기 위해 고안된 50kHz-150kHz mono disk transducer. (a) 발생원 장치는 단일 디스크형 압전소자로 구성되고 있다. (b) 실물 사진.

그림 2는 반사법 탐사에서 표면파 및 반사파의 도달 경로((a) 참조) 및 비성분 수진기와 성분 수진기의 감도 특성((b) 및 (c) 참조)을 비교하여 나타내고 있다. 천부 탄성과 반사법 탐사의 측정 데이터에서 가장 우세하게 나타나는 파의 도달은 표면파이다. 이러한 표면파는 반사파에 비해 그 진폭이 상당히 클 뿐만 아니라 경우에 따라서는(특히 터널 지보구조에서는) 반사파와 중첩되어 나타나기 때문에 그의 약화는 해결되어야 할 하나의 주요한 난제로 남아 있다. 표면파를 약화시키기 위한 노력은 전산처리 측면 뿐만 아니라 현장 측정 측면에서도 계속적으로 시도되고 있다. 현장 측정 측면에서는 우선 수진기 선정에 있다고 하겠다. 탄성과 반사법 탐사에서 성분 측정 수진기인 지오폰을 사용하는 이유도 표면파를 측정 과정에서 약화시키기 위한 것이라 할 수 있다. 만일 비성분 수진기를 사용하게 되면 전 방향에서 도달되는 탄성파를 거의 동일한 감도로 동시에 취득하기 때문에((b) 참조) 측정 데이터에는 표면파의 *ringing* 현상이 유발되고 이로 인해 반사파의 식별이 거의 불가능해질 가능성이 높다. 다시 말해, 성분 수진기는 수직방향으로 입사되는 P파 반사파 도달에 대해서만 민감하게 반응하기 때문에((c) 참조) 수평적으로 전달되는 표면파에 대한 반응을 그만큼 약화시킬 수 있다는 것이다. 기존에 상용화되고 있는 초음파 측정 장치에 부착되어 사용되고 있는 수십 kHz의 초음파 수진기는 대부분 초동만을 다루고 있는 비성분 수진기이기 때문에 초음파 반사법 탐사에는 적절치 못하다. 수십 kHz 대역의 초음파를 감지할 수 있는 성분 수진기 소자로는 가속도계(*accelerometer*)를 들 수 있다. 가속도계는 대부분 10kHz 미만의 진동만을 감지하는 것이 대부분이었으며 최근에 이르러서야 수십 kHz의 주파수를 감지할 수 있는 가속도계가 개발되고 있다. 그림 3은 최근에 개발된 50kHz 주파수 범위까지의 진동을 왜곡없이 감지할 수 있는 가속도계의 구조((a) 및 (b) 참조), 주파수 내용((c) 참조) 및 가속도계에 내장된 *pre-amplifier*를 위한 전원 공급장치((d) 참조)를 나타내고 있다. 상기 가속도계의 주파수에 따른 반응 곡선을 살펴보면 50kHz까지 거의 균등하게 진동에 반응할 수 있는 특성을 나타내고 있다. 또한 가속도계에 감지되는 신호는 매우 미약하기 때문에 이를 증폭시킬 수 있는 *pre-amplifier* 기능이 추가되어 있다.

다음은 상기 발생원 및 수진기 장치의 현장 응용 가능성을 타진하기 위해 수행된 3차원 모형실험에 대해 서술하고 있다.

### Characteristics of receivers

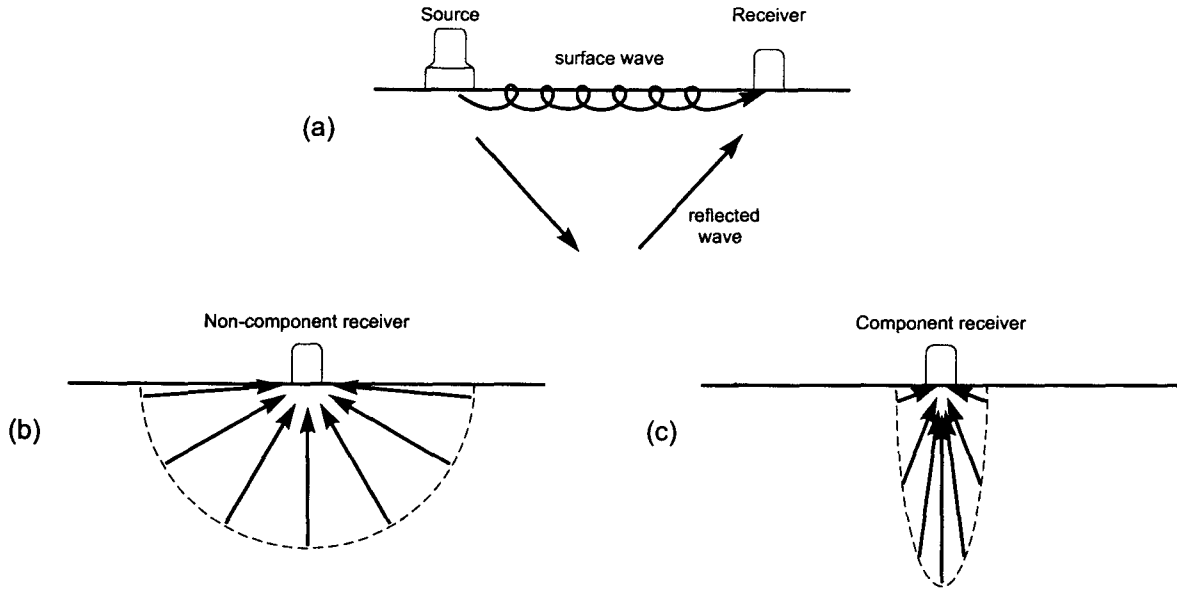


그림 2. 수신 장치의 감도 특성.  
 (a) 수신기에 도달하는 표면파 및 반사파의 전달 경로, (b) 비성분 수신기의 방향에 따른 감도 특성, (c) 성분 수신기의 방향에 따른 감도 특성.

### Wide Bandwidth Accelerometer (flat to 50kHz)

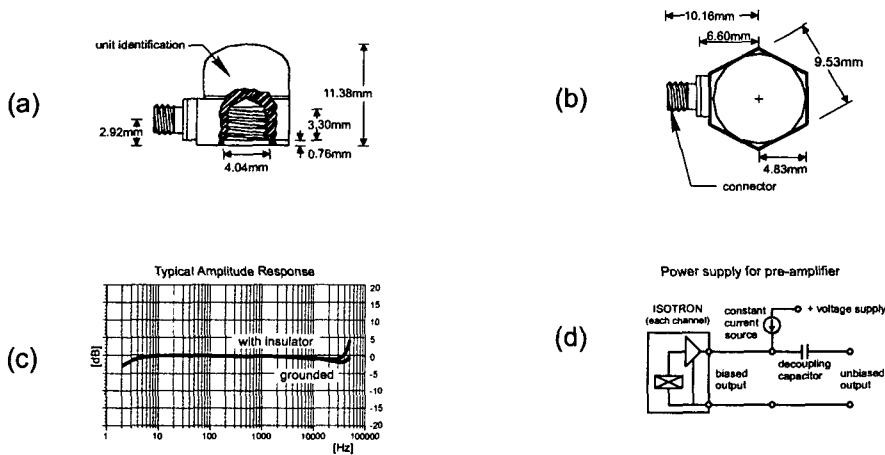


그림 3. 광대역 수신장치.  
 주파수 50kHz 대역까지의 초음파를 거의 왜곡없이 측정할 수 있는 광대역 가속도계, (a) 단면도, (b) 평면도, (c) 주파수 대역 반응 곡선, (d) 가속도계 내부에 내장된 pre-amplifier의 전원 공급 장치(20V).

### 3. 3차원 모형실험

탄성파(초음파)는 매질이 2차원이든 3차원이든 근본적으로 동일한 전달 양상을 보여주고 있다. 따라서, 3차원 초음파 모형실험의 목적은 무엇보다 측정 표면에서 사용할 수 있는 적절한 발생원 및 수신기 장치를 개발하고 그의 현장 응용 가능성을 타진하는 데 있다.

그림 4는 선정된 발생원(mono disk transducer, 50kHz~150kHz) 및 수신기(광대역 가속도계, flat to 50kHz)를 이용하여 3차원 모형실험을 수행하는 전경을 보여주고 있다. 이 실험은 우선 상기 발생원 및 수신기 장치가 2차원 모형실험에서 사용된 것들과 대등한 특성을 나타낼 수 있는가를 점검하고 나아가서 초음파 범위의 주파수를 갖는 발생원을 사용하여도 터널 지보구조에서 가장 흡수성이 높은 방수막을 통과하여 그 하부 경계면에 대한 반사파를 취득할 수 있는지를 확인하기 위해 수행되었다.

그림 5(a)는 bakelite, 방수막, 콘크리트로 구성된 3차원 모형에서 선정된 축선 하부의 단면을 나타내고 있으며 동시에 각 매질의 규격, 측정번호, 발생원 4 및 17에 대한 수신기 배열을 나타내고 있다. 여기서 방수막으로는 초음파 모형실험에서 초음파를 크게 약화시키기 위해 사용하는 흡수성이 큰 매질이 사용되었다. 그림 5(b) 및 (c)는 우선 발생원 4 및 17번에 대한 측정기록을 각각 보여주고 있으며, 이때 사용된 발생원의 파형은 50kHz 단일 펄스이다. 발생원 4번 측정기록((b) 참조)에서는 직접파(화살표로 표시), bakelite 하부 반사파(P1P1), 표면파(빈 화살표로 표시) 및 다중반사파(화살표 M으로 표시)의 도달이 뚜렷이 관찰되고 있다. 한편 발생원 7번 측정기록((c)참조)에서는 직접파, bakelite 하부 반사파 및 표면파의 도달은 발생원 4번 기록과 유사한 양상을 보이고 있으나 발생원 4번 기록에서 관찰된 다중반사파는 거의 인식되지 않는 반면 변환파 P1S1 및 콘크리트 하부 반사파(화살표 C로 표시)의 도달이 인식되고 있다. 3차원 모형에 대한 측정은 상기 기본 발생원-수신기 배열을 일정간격(station 간격)으로 총 50차례 이동하면서 수행되었으며 그로부터 도합 50개의 발생원 기록을 얻게 되었다. 이들에 대해서는 우선 표면파 약화를 위해 F-K 필터가 적용되었다. 그림 6은 F-K 필터가 적용된 50개의 발생원 기록으로부터 단지 첫 번째 채널만을 발췌하여 표현하는 near trace gather 측정과정((a) 참조) 및 그에 대한 결과((b) 참조)를 나타내고 있다. 여기서 bakelite 하부가 자유면(free surface)인 경우에는 그에 대한 반사파 및 다중반사파(빈 화살표로 표시)가 인식되고 있으며, bakelite의 하부가 방수막 및 콘크리트인 경우에는 콘크리트 하부 반사파가 뚜렷하게 관찰되고 있을 뿐만 아니라 bakelite/방수막, 방수막/콘크리트 반사파들이 서로 중첩되고 있는 양상도 인식되고 있다. 이러한 결과는 무엇보다 발생원 주파수를 초음파 범위까지 높더라도 방수막과 같이 흡수성이 큰 매질을 통과하여 그 하부 경계면에 대한 반사파를 취득할 수 있다는 것을 입증하는 것이라 하겠다.

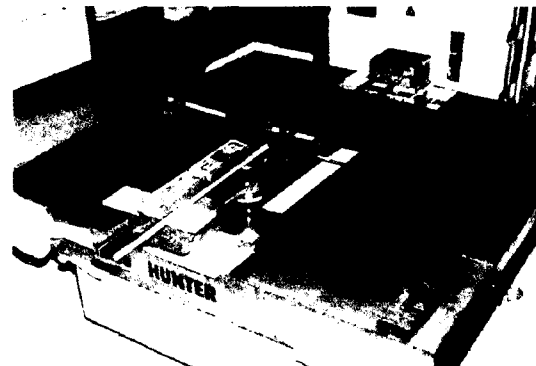
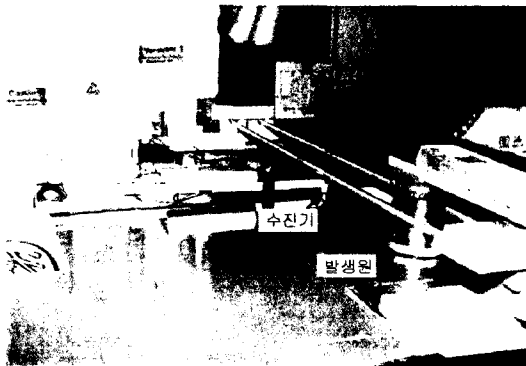
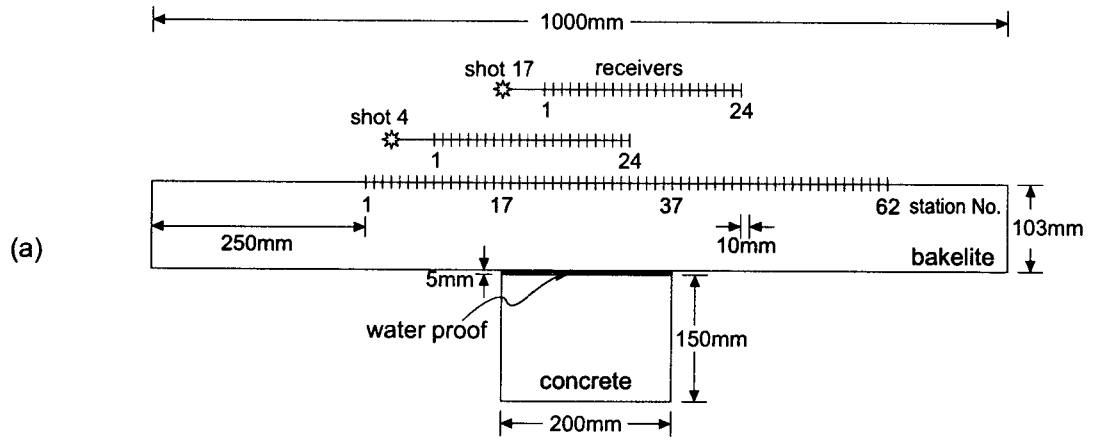
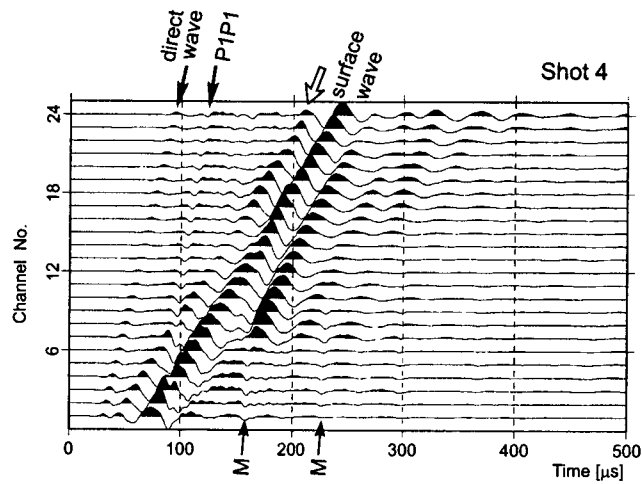


그림 4. 3차원 탄성파(초음파) 모형 실험 장면.

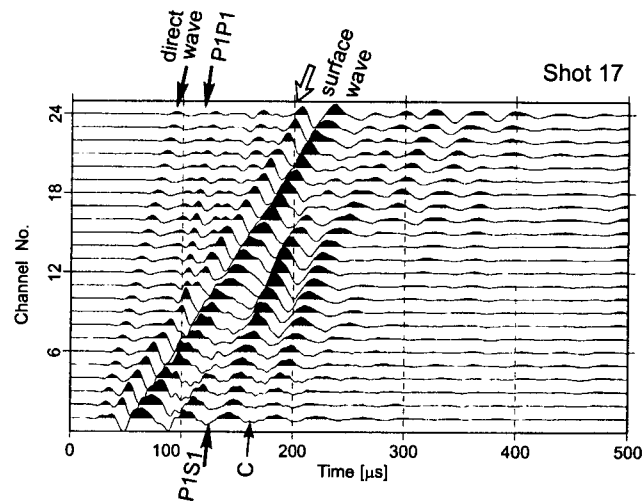
Bakelite, 방수막 및 콘크리트로 구성된 3차원 모형을 대상으로 현 기술 수준에서 최적의 발생원(mono disk transducer, 50kHz-150kHz) 및 수신기(광대역 가속계, flat to 50kHz)를 이용한 측정 과정을 보여주고 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 5. 3차원 탄성파(초음파) 모형실험.  
 (a) 3차원 모형에서 선정된 축선 하부 단면에 각 매질의 규격, 측정번호 및 발생원-수진기 배열이 표시되고 있다, (b) 단일 펄스 발생원에 의한 발생원 4번 위치에 대한 측정데이터, (c) 단일 펄스 발생원에 의한 발생원 17번 위치에 대한 측정데이터(sampling interval = 1 $\mu$ s).

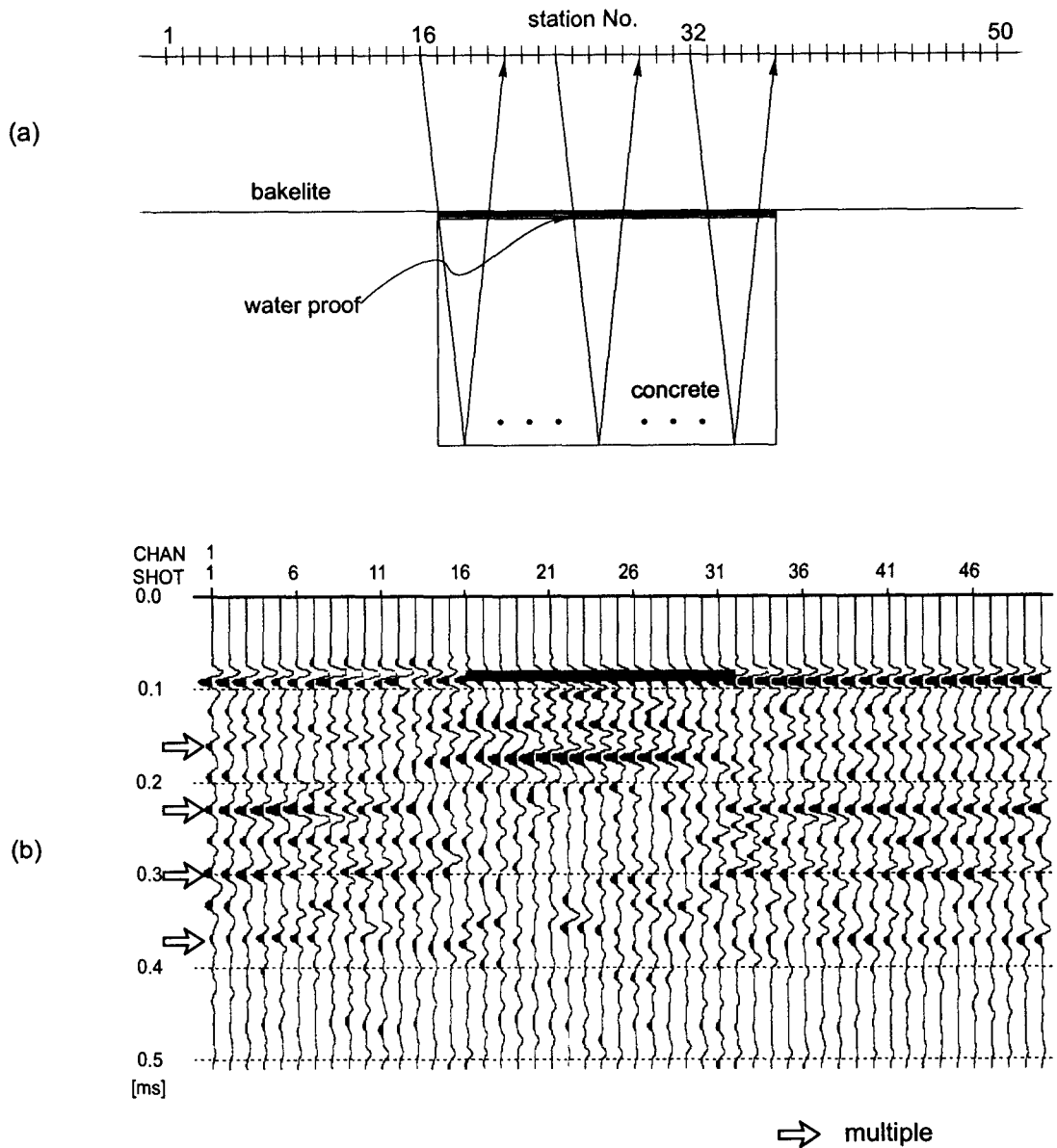


그림 6. 3차원 탄성파(초음파) 모형실험.  
 3차원 모형 축선 하부에 대한 단면(a)과 그에 대한 near trace gather 결과 (b)를 상호 대조하고 있다. Bakelite 하부가 자유면인 경우에는 다중 반사파 (빈 화살표로 표시)가, 방수막과 콘크리트인 경우에는 콘크리트 하부 경계면에 대한 반사파가 관찰되고 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 터널 지보구조 규명을 위한 탄성파(초음파) 반사법 측정 시스템에서 가장 핵심적인 부분인 발생원 및 수신기 장치가 개발되어 현 기술 수준에서 최적의 발생원-수진기 조합이 선정되었으며, 이들을 이용한 3차원 모형실험을 통해 그들의 현장 응용 가능성이 타진되었다.

발생원 장치 개발에 있어 발생원 에너지 문제, 파형의 *overswing* 문제, 임의 파형 발생 문제 등이 고려되었다. 한편, 수신기 장치는 우선 성분 측정이 가능하여야 하며 또한 초음파 주파수 대역(수십 kHz 범위)에서 진동 반응이 왜곡이 없어야 하고 동시에 증폭 기능도 우수해야 한다. 선정된 발생원-수진기 조합을 이용하여 수행된 3차원 초음파 모형실험에서는 각 경계면으로부터 반사파들의 파형들이 서로 분리되고 있음은 물론 터널 지보구조에서 가장 흡수성이 큰 방수막을 통과하여 그 하부 콘크리트 하부에 대한 반사파도 뚜렷하게 관찰되었다. 이는 향후 바람직한 현장 측정 시스템 구축에 밝은 전망을 보여주는 것이라 하겠다.

## 5. 감사의 글

본 연구는 '99 건설교통 기술혁신 5개년 사업의 일환으로 수행되고 있는 “고주파수 탄성파 탐사를 통한 터널진단 기술개발” 연구 결과 중 일부이며 이에 대한 건설교통부 및 한국건설기술연구원의 지원에 감사드린다.

## 6. 참 고 문 헌

1. 김중열, 김유성, 신용석, 현혜자, 정현기(2000), “터널 지보구조 진단을 위한 고주파수 탄성파 반사법의 응용성 연구 -모형실험을 중심으로-”, 터널협회 논문집 터널기술, Vol. 2, No.3, pp. 37-45.
2. 김중열, 김유성, 신용석, 현혜자(2001), “터널 지보구조 진단을 위한 초음파 스윙 발생원의 반사법 응용 가능성 연구 -모형실험을 중심으로-”, 한국지반공학회 2001 봄학술발표회 논문집, pp. 167-174.