

**터널 지보구조 진단을 위한 초음파 스위프 발생원의 반사법 응용 가능성 연구
- 모형실험을 중심으로 -**

**Study on the Applicability of Reflection Method using Ultrasonic Sweep Source
for the Inspection of Tunnel Lining Structure
- Physical Modeling Approach -**

김중열¹⁾, Jung-Yul Kim, 김유성¹⁾, Yoo-Sung Kim, 신용석²⁾, Yong-Suk Shin, 현혜자³⁾, 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 : Reflection method using ultrasonic source has been attempted to obtain the information about tunnel lining structures composed of lining, shotcrete, water barrier and voids at the back of lining. In this work, two different types of sources, i.e. single-pulse source and sweep source, can be used. Single-pulse source with short time duration has the frequency content whose amplitudes tend to be concentrated around the dominant frequency, whereas sweep source with long time duration denotes a flat distribution of relatively larger amplitude over a broad frequency band, although the peak to peak amplitude of single-pulse source wavelet is equivalent to that of sweep source one. In traditional seismic application, a single-pulse source(weight drop, dynamite) is typically used. However, to investigate the fine structure, as it is the case in the tunnel lining structure, the sweep wavelet can be also a desirable source waveform primarily due to the higher energy over a broad frequency band. For the investigation purposes of sweep source, a physical modeling is a useful tool, especially to study problems of wave propagation in the fine layered media. The main purpose of this work was using a physical modeling technique to explore the applicability of sweep source to the delineation of inner layer boundaries. To this end, a two-dimensional physical model analogous to the lining structure was built and a special ultrasonic sweep source was devised. The measurements were carried out in the sweep frequency range 10~60 kHz, as performed in the regular reflection survey(e.g. roll-along technique). The measured data were further rearranged with a proper software (cross-correlation). The resulting seismograms(raw data) showed quite similar features to those from a single-pulse source, in which high frequency content of reflection events could be considerably emphasized, as expected. The data were further processed by using a regular data processing system "FOCUS" and the results(stack section) were well associated with the known model structure. In this context, it is worthy to note that in view of measuring condition the sweep source would be applied to benefit the penetration of high frequency energy into the media and to enhance the resolution of reflection events.

Key words : single-pulse source, sweep source, ultrasonic reflection method, tunnel lining structure

1. 서론

최근 국내에서는 고주파수 탄성파(또는 초음파) 반사파를 이용하여 터널 지보구조에 대한 정보를 제공할 수 있는 기법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다(김중열 등, 2000). 터널 지보구조는 대체로 콘크리트 라이닝, 방수막, 숏크리트, 원지반 순으로 구성되어 있다. 그런데, 각 구성 매질의 두께 및 물성(예: 탄성파속도, 강도)이 주어진 설계 기준치를 벗어나거나 혹은 배면(예: 라이닝 배면, 숏크리트 배면)에 괄목할만한 공동이 존재하게 되면 터널 안정성은 그만큼 기대될 수 없게 된다. 따라서, 터널 지보 안정성 진단은 무엇보다 지보 구성매질 간의 경계면 규명에 귀결된다고 볼 수 있다. 일반적으로 물리탐사 분야에서 탄성파 반사법 탐사는 지하의 지층경계면을 규명하기 위한 가장 적합한 방법으로 알려지고 있다. 그러나, 이러한 방법을 터널 지보구조 진단에 활용하기 위해서는 우선 매질간의 경계면으로부터의 반사파들이 서로 분리되어 식별될 수 있을 정도로 발생원의 주파수 대역을 크게 높이는 것이 바람직하다고 하겠다. 또한 터널 지보구조 내에는 방수막과 같이 흡수성이 큰 매질이 존재할 뿐만 아니라 경우에 따라서는 경계면의 반사계수가 작게 나타나기 때문에 매질 내부로 방사되는 발생원 에너지의 적절한 조정이 요구된다. 예를 들면, 지금까지 흔히 사용되고 있는 단일 펄스 발생원은 대체로 짧은 파형을 방사하며 또한 그 주파수 특성은 주 주파수에서 에너지가 집중되고 그 상하 주파수 대역으로 갈수록 에너지가 급격히 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 주파수 내용은 비록 발생원의 에너지를 높여도 유사하게 나타난다. 반면 지표 탄성파 반사법 탐사에서 흔히 사용되는 스위프 발생원(예: Vibroseis)은 폭 넓은 주파수 대역에서 거의 균등한 진폭을 보여주고 있으며 더구나 그의 에너지는 단일 펄스 발생원의 것보다 상대적으로 대단히 크다. 이러한 주파수 특성은 무엇보다 발생원 측면에서 터널 지보구조에 대한 분해능 향상을 위한 훌륭한 여건이 된다고 볼 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 단일 펄스 발생원에 비해 넓은 주파수 대역에서 상대적으로 큰 에너지를 효율적으로 발생시킬 수 있는 스위프 발생원의 현장 응용 가능성을 다양한 모형실험을 통하여 서술하고 있다. 다음은 우선 스위프 발생원의 특성에 대해 요약하고 있다.

2. 스위프 발생원의 특성

스윙 발생원은 다이내마이트와 같은 큰 에너지의 폭발성 발생원(일종의 단일 펄스 발생원)이 사용되기 곤란한 지역(예: 도심지)의 현장탐사에서 그와 대등한 에너지를 방사하기 위해 개발된 바이브로사이즈(Vibroseis) 발생원에 근원을 두고 있다. 스위프 파형요소(sweep wavelet)는 일정시간 동안 주파수를 변화시킴으로써 생성되며 그로 인해 폭넓은 주파수 범위에서 높은 에너지를 방사할 수 있게 된다. 일반적으로 스위프 발생원의 파형 요소는 다음과 같이 표현된다(Waters, 1978).

$$F(t) = A(t) \sin 2\pi \left(at + \frac{bt^2}{2} \right) \quad (0 < t < T) \quad (1)$$

여기서, a 는 초기 주파수, b 는 단위시간당 주파수 변화, $A(t)$ 는 진폭 함수이다. 진폭 함수 $A(t)$ 는 스위프 시작되는 부분 및 끝나는 부분에서의 급격한 진폭 변화를 막기 위해 시그널 양단 부분은 적절한 테이퍼 함수(taper function)로 처리되었다. 그림 1(a)는 단일 펄스 및 스위프 파형 요소를 상호 대조하고 있다. 여기서 단일 펄스 파형요소는 40kHz 정현 곡선(sine 곡선; 파형길이 25 μ s)이며, 스위프 파형요소는 300 μ s 동안 주파수를 10kHz부터 60kHz까지 연속적으로 변화하도록 하였다. 그에 대한 진폭 스펙트럼은 두 가지 형태로 표현되어 비교되고 있다. 그림 1(b)는 각 진폭 스펙트럼의 특성을 파악할 수 있도록 표현한 것(trace normalization)으로서 단일 펄스 발생원의 진폭 스펙트럼은 주 주파수에서 가장 큰 진폭을 나타내며 그 상하 주파수로 갈수록 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 반면 스위프 발생원의 진폭 스펙트럼은 대체로 넓은 주파수 대역에서 거의 대등한 진폭을 나타내고 있다. 그림 1(c)는 그들의 진폭을 상대적으로 비교하였다(file normalization). 여기서 스위프 발생원의 진폭이 단일 펄스 발생원의 것보다 월등히

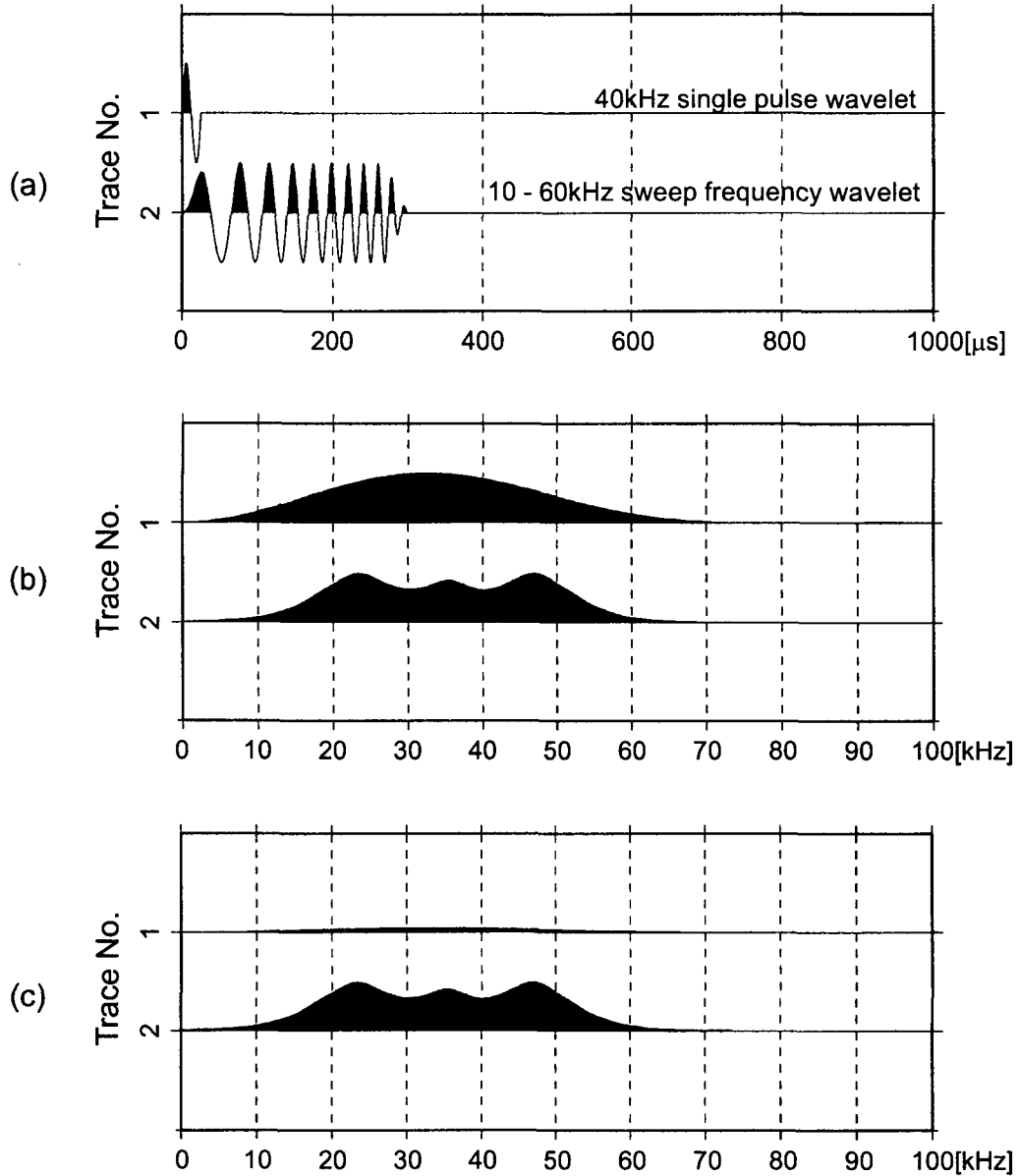


그림 1. 단일 펄스 발생원(40kHz) 및 스위프 발생원(10~60kHz)의 파형요소 및 그 주파수 내용을 상호 비교하고 있다. 여기서 트레이스 번호 1 및 2는 단일 펄스 발생원 및 스위프 발생원에 대응된다. (a) 파형요소, (b) 진폭 스펙트럼(trace normalization), (c) 진폭 스펙트럼(file normalization)

큰 에너지를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 즉, 스위프 발생원은 그의 진폭(peak to peak amplitude)면에서 단일 펄스의 것과 동일함에도 불구하고 단지 긴 시간의 파형을 갖게 됨으로써 전체적으로 높은 에너지를 방사할 수 있다는 것이다.

그림 2에는 임의의 반사모델에 대한 스위프 발생원(10~60kHz)과 단일 펄스 발생원(40kHz)의 수치모형 실험 결과를 상호 비교하고 있다. 그림 2(a)에서 스위프 파형 요소는 $w(n)$, 반사계수 시계열(reflector series)은 $r(n)$ 으로 표현하고 있으며, $\bar{s}(n)$ 은 $w(n)$ 과 $r(n)$ 의 콘볼루션에 의해 얻어진 반사파 기록을 나타내고 있다. 여기서 스위프 발생원에 의해 최종적으로 얻게되는 측정 기록 $s(n)$ 은 $\bar{s}(n)$ 과 $w(n)$ 의 cross-correlation으로부터 얻어지게 된다. $s(n)$ 에서 관찰되는 첨예한 반사파 파형은 다음과 같은 관계식에 의해 설명될 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned}
 s(n) &= \bar{s}(n) * w(-n) \\
 &= w(n) * r(n) * w(-n) \\
 &= r(n) * (w(n) * w(-n)) \\
 &= r(n) * \Phi_{ww}(n)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

여기서, $\Phi_{ww}(n)$ 은 $w(n)$ 의 autocorrelation을 의미하기 때문에 $s(n)$ 에서의 반사파는 하나의 첨예한 파형으로 나타나게 되는 것이다. 환원하면, 스위프 파형 요소 $w(n)$ 과 측정기록 $\bar{s}(n)$ 의 cross-correlation은 하나의 첨예한 파형과 $r(n)$ 과의 콘볼루션을 의미한다. 비교 효과를 위해 그림 2(b)에는 주 주파수 40kHz인 단일 펄스 발생원에 의한 상기 반사 모델에 대한 기록을 나타내고 있다. 일별하여, 단일 발생원 기록에서는 반사파의 초동 시점에 반사주파($r(n)$ 의 spike 주파)가 대응되고 있으나 스위프 발생원 기록에서는 그의 최대치가 바로 반사주파에서 나타나고 있다. 비록 이들에 의한 기록들이 그의 생성되는 측면에서 서로 다르게 표현되고 있으나 탐사 목적이 $r(n)$ 이라는 것을 고려한다면 스위프 발생원의 기록이 경계면 식별이나 전산처리 면에서 보다 유리한 자료가 될 수 있다. 다음은 상기 기록에 대한 서로 다른 관점을 탄성파(초음파)의 물리적인 전달 측면(모형실험)에서 관찰하고 있다. 이를 위해 터널 지보구조 모형이 제작되었다.

3. 모형실험(physical modeling)

그림 3은 콘크리트 라이닝, 방수막, 솟크리트, 암반 및 배면 공동으로 구성된 터널 지보구조 모형을 나타내고 있다. 여기에는 실제 터널 라이닝 배면을 현실화하기 위해 각 층의 두께도 수평적으로 변화시켜 제작되었다. 모형 상부에는 측정을 위한 기본 발생원-수진기 배열 및 각 측정 번호(station No.)가 표현되고 있으며, 각 층의 모형 재질은 각각 베크라이트(라이닝), PVC(방수막), Epoxy(솟크리트), Aluminum(암반)이다. 한편, 방수막 배면의 불균질성을 유사화하기 위해 PVC에 작은 구멍들이 천공되었으며, 솟크리트 매번의 공동은 빈 공간으로 처리되었다. 알루미늄 하부는 두 개의 경계면으로 이루어져 있으며 이는 암반 내 형성된 절리에 대응된다고 할 수 있다. 발생원으로는 주 주파수가 40kHz인 단일 펄스 발생원 및 주파수가 10~60kHz범위에서 가변되는 스위프 발생원이 사용되었다.

그림 4(a)는 발생원 7번 위치에서 40kHz 단일 펄스 발생원의 측정 기록을, (b)는 상기 스위프 발생원의 측정기록을 나타내고 있다. 여기서 스위프 발생원의 기록 자체(식(2)의 $\bar{s}(n)$)에서는 기대한 바 반사파의 식별이 용이하지 않음을 알 수 있다. 그러나, 그림 4(c)은 식(2)에 근거하여 cross-correlation한 결과(식(2)의 $s(n)$)를 나타내고 있기 때문에 스위프 발생원의 효과가 잘 반영되고 있다. 상기 두 실험 결과는 전체적으로 유사한 형태를 보여주고 있다. 단지, 스위프 발생원의 기록에서 일부 반사파(화살표로 표시)가 상대적으로 그 파형이 간결하면서 뚜렷하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 참고로 그림 4(d)는 파선추적

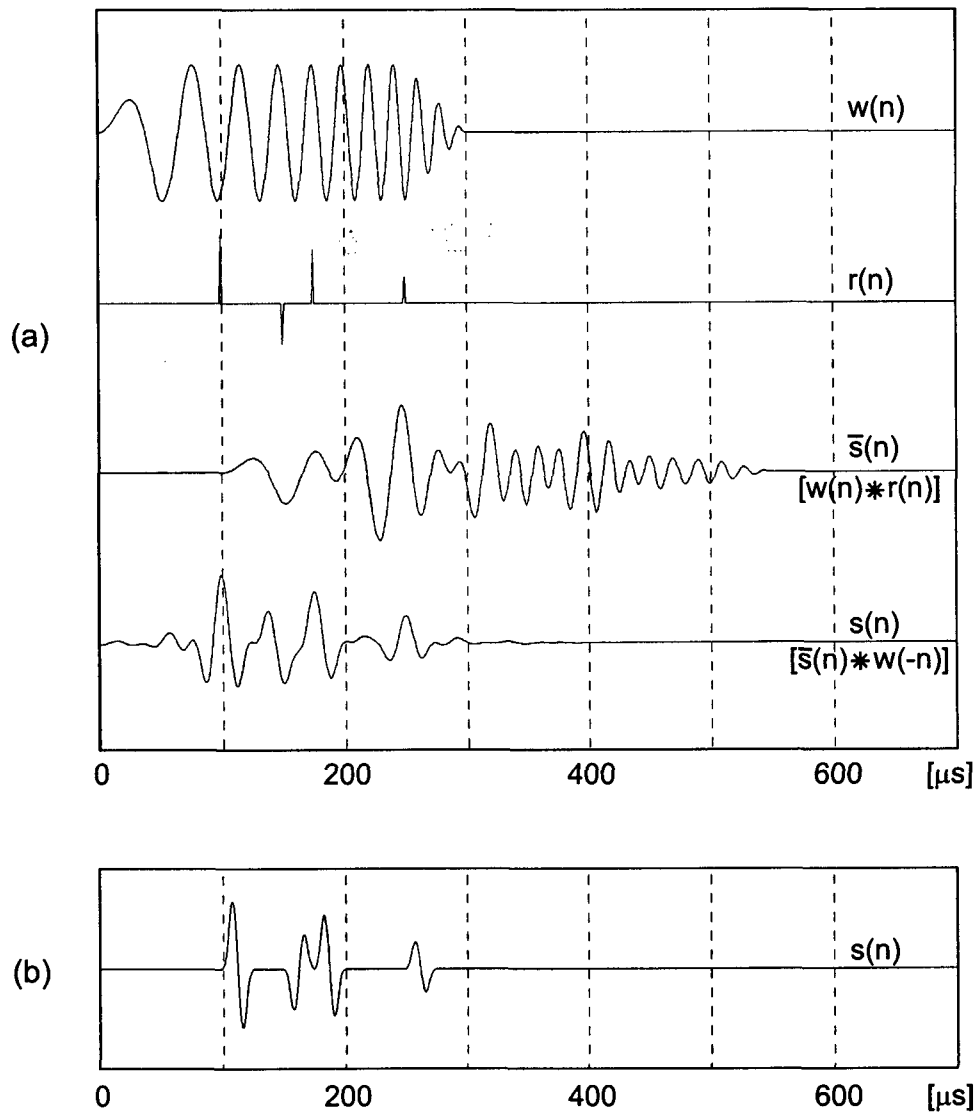


그림 2. 스위치 발생원(10~60kHz) 및 단일 펄스 발생원(40kHz) 응용에 대한 수치모형 실험. (a) $w(n)$ 은 스위치 발생원의 파형요소(wavelet)를, $r(n)$ 은 반사계수 시계열(reflector series)을, $\bar{s}(n)$ 은 $w(n)$ 과 $r(n)$ 과의 콘볼루션 결과를, $s(n)$ 은 $\bar{s}(n)$ 과 $w(n)$ 과 cross-correlation 결과를 나타내고 있다. (b) 단일 펄스 발생원 파형요소(40kHz)와 $r(n)$ 과의 콘볼루션 결과를 나타내고 있다.

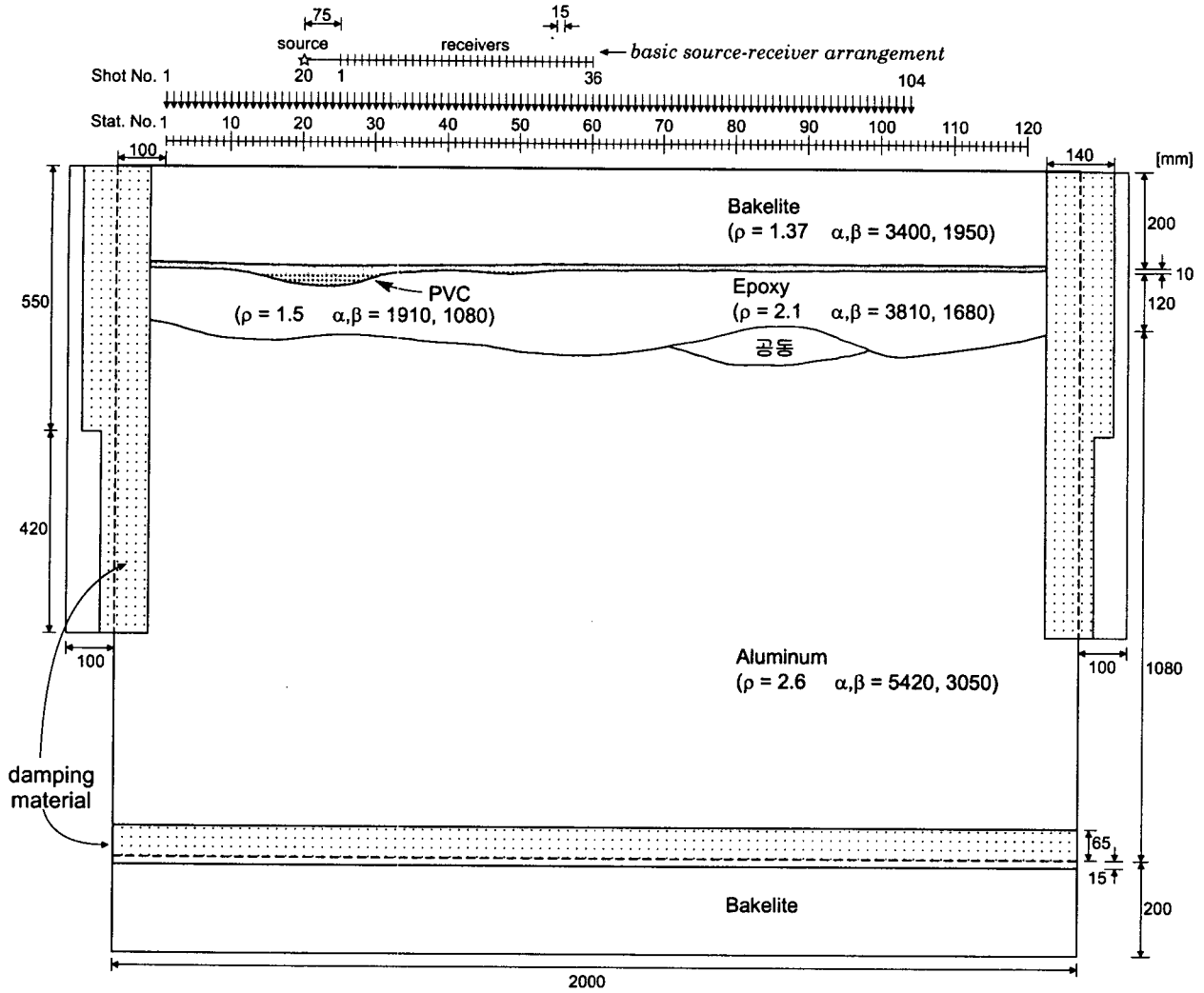


그림 3. 터널 지보구조 모형에 대한 초음파 실험. 콘크리트 라이닝, 방수막, 슛크리트 및 암반은 각각 Bakelite, PVC, Epoxy 및 Aluminum 매질에 의해 모형화되었다. 여기서 방수막 배면 불균질성은 작은 구멍을 밀집하게 천공함으로써 유사화되었으며, 슛크리트 배면 공동은 빈 공간으로 처리되었다. 또한 모형 상단에는 측정을 위한 기본 발생원-수진기 배열 및 측정번호가 동시에 표현되고 있다.

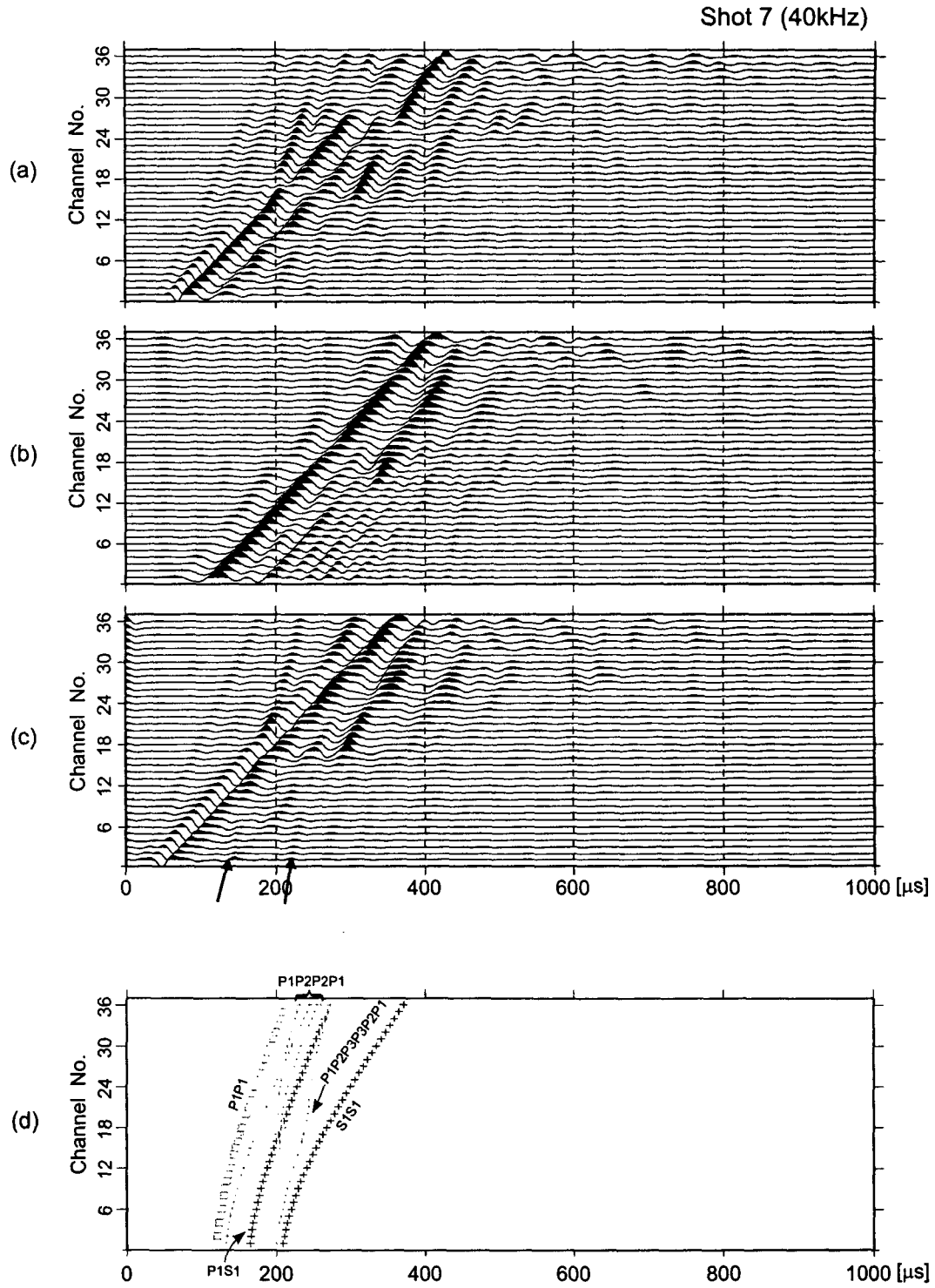


그림 4. 터널 지보구조 모형에 대한 초음파 실험. 단일펄스(40kHz) 및 스위프(10~60kHz) 발생원에 의한 기록(발생원 기록 7)을 상호 대조하고 있다. (a) 단일 펄스 발생원 기록, (b) 스위프 발생원 기록 $\bar{s}(n)$, (c) 스위프 발생원 기록 $s(n)$, (d) 파선 추적법에 의해 계산된 주요 주시곡선.

법(ray tracing; Cerveny, 1981)에 의해 계산된 반사파들의 주시곡선들을 상호 대조하고 있다. 여기서, 붉은 색으로 표현된 반사파들은 바로 전산처리를 통해 터널 지보구조 경계면 규명을 위해 활용된다. 상기 실험 결과를 고려한다면 스윙 발생원은 단일 펄스 발생원과 비교하여 우선 효율적으로 에너지를 크게 증대시킬 수 있다는 별도의 장점을 갖고 있을 뿐만 아니라 나아가서 전산처리(예: 주파수 대역별 분석)면에서도 보다 유리한 여건을 부여하는 것이라 할 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 터널 지보구조 규명을 위한 스윙 발생원의 응용성을 서술하고 있다. 스윙 발생원은 큰 에너지의 폭발성 발생원이 사용되기 곤란한 지역의 현장탐사에서 그와 대등한 에너지를 방사하기 위해 개발된 바이프로사이즈 발생원에 근원을 두고 있다. 그 스윙 파형요소는 일정시간동안 주파수를 연속적으로 변화시킴으로써 생성되며, 그로 인해 폭 넓은 주파수 범위에서 높은 에너지를 방사할 수 있게 된다.

단일 펄스 발생원과 스윙 발생원에 대한 수치모형실험에 의하면 그들 각각은 서로 다른 면모를 보여주고 있다. 즉, 단일 발생원 기록에서는 반사파의 초동 시점에 반사주시가 대응되고 있으나 스윙 발생원 기록에서는 그의 최대치가 바로 반사주시에서 나타나고 있다. 탐사 목적이 반사주시임을 고려할 때 스윙 발생원의 기록이 경계면 식별이나 전산처리 면에서 보다 유리한 자료가 될 수 있다. 이를 증명하기 위해 터널 지보구조 모형실험이 수행되었다. 여기서 스윙 발생원의 기록은 단일 펄스 발생원의 것과 매우 유사함을 볼 수 있었다. 이러한 실험 결과들을 종합해보면 스윙 발생원은 단일 펄스 발생원과 비교하여 우선 효율적으로 에너지를 크게 증대시킬 수 있다는 별도의 장점을 갖고 있을 뿐만 아니라 나아가서 전산처리면에서도 보다 유리한 여건을 부여하는 것이라 할 수 있다. 따라서, 스윙 발생원은 터널 지보구조 진단을 위한 초음파 반사법에 활용될 수 있는 또 하나의 바람직한 발생원이 될 것으로 기대된다.

5. 감사의 글

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

6. 참고문헌

1. 김중열, 김유성, 신용석, 현혜자, 정현기(2000), "터널 지보구조 진단을 위한 고주파수 탄성과 반사법의 응용성 연구 -모형실험을 중심으로-", 터널협회 논문집 터널기술, Vol. 2 No.3.
2. Cerveny, V. and Psensik, I.(1981), *2-D Seismic ray package : Program seis 81*, Charles University, Prague.
3. Waters, K.H.(1978), *Reflection Seismology* : New York, Wiley.