

철도교량 설계를 위한 고분해능 수면 탄성파반사법의 적용 사례

김중열^{*1}, Swoboda Ulrich^{*2}, 김유성^{*3}, 김기석^{*4}

1. 서론

암반에 인위적으로 역학적인 힘(충격)을 가하면 암반은 진동하게 되며 그 진동은 하나의 특별한 형태(예: 파형, 진폭, 주파수내용, 속도)를 띠면서 사방으로 전달된다. 이러한 물리적인 전달현상은 학술적인 용어로 "탄성파가 전달된다"라고 표현한다. 탄성파를 일으키는 장치인 소위 탄성파 발생원은 항상 P파(종파)와 S파(횡파)를 동시에 생성한다. 탄성파가 전달되는 과정은 미시적 측면에서 하나의 입자움직임으로 관찰되며 이때 P파는 파의 진행에 평행한, S파는 그와 수직인 입자 움직임을 나타내고 있다. 탄성파 전달 측면에서 각 암층은 그들 각각의 임피던스(ρv : 밀도×탄성파속도)에 의해 차별화 된다. 즉, 지층경계면이란 그 경계면에 인접된 암반의 임피던스가 달라지는 경우를 말하며 탄성파가 이러한 경계면에 입사되면 그로부터 반사되고 동시에 굴절된다. 이러한 반사 및 굴절 과정은 지층경계면이 증가하면 할수록 그로 인해 파생되는 P파와 S파는 기하급수적으로 늘어나게 된다. 그들의 전달 상태를 전체적으로 관찰하면 이들은 지표로 상향하는 탄성파와 지하로 하향하는 탄성파로 구분된다. 여기서 관심의 대상은 바로 상향하는 탄성파(반사파)이며 그들은 지표에 놓여있는 수신기들(수진기 배열)에 의해 포착된

다(그림 1 참조). 주시적으로 빨리 도달되는 탄성파는 대체로 천부 지층경계면에서, 늦게 도달되면 심부 경계면에 의한 반사파로 간주되며 그들 각각은 그 나름대로 각 경계면에 대한 정보를 갖게 된다. 일반적으로 발생원과 수신기 배열은 하나의 직선상에 놓이게 되며 이러한 기본적인 배열은 탐사대상 심도, 지표면 상태, 지하 암반상태 및 탐사 목적을 고려하여 타당하게 선정되어야 한다.

물리탐사 분야에서 탄성파반사법은 각 암층의 경계면을 규명할 수 있는 유일한 탐사법이기 때문에 그의 응용범위는 대단히 넓다. 예를 들면 경계면의 단절은 단층 내지 절리에 대한 정보를 제시하며 지하에 형성된 공동(예: 폐갱도)도 역시 경계면의 높은 반사계수로 인해 쉽게 식별될 수 있다. 대부분의 경우 지반조사에서 요구하는 탄성파반사법의 기능은 천부 지층구조(예: 암층경계, 각 암층 탄성파속도)를 규명하는 데 있다. 여기에는 그림 1에서 예시한 바 상기 발생원-수진기 배열이 적용되는 표면이 수면(예:

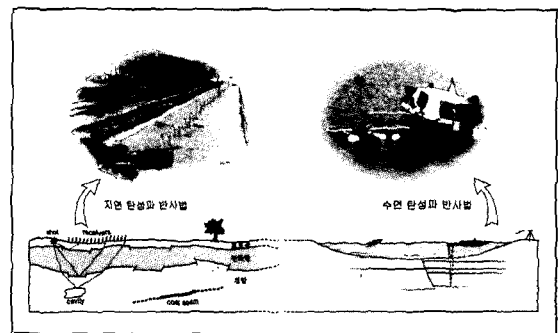


그림 1. 지면 및 수면 탄성파반사법의 응용

^{*1} 정회원, 한국지질자원연구원 책임연구원, E-mail. jykim@kigam.re.kr
^{*2} Project Manager, DMT GeoTec, Germany, E-mail. swoboda@dmtd.de
^{*3} 정회원, 한국지질자원연구원 책임연구원, E-mail. yskim@kigam.re.kr
^{*4} 정회원, (주)희승지오테 대표이사, E-mail. HSGEOTEK@chollian.net

하천, 호수)이나 아니면 지면(예: 표토층)이나에 따라서 크게 수면 탄성파반사법(shallow water reflection method)과 지면 탄성파반사법(shallow land reflection method)으로 구분된다. 비록 그들이 탄성파 전달 측면에서 동일한 근본원리를 갖고 있으나 그들 각자의 측정시스템 내용 및 측정기법은 서로 전혀 다른 면모를 나타내고 있을 뿐만 아니라 또한 기대되는 탐사분해능도 큰 차이를 보여주고 있다. 일반적으로 지면에서 수행되는 탄성파반사법은 주로 다중 채널 기록(수진기 배열에 의한 기록)에 바탕을 두고 있기 때문에(그림 1 참조) 그에 따른 지층구조 분해능은 무엇보다 전산처리 기법의 고도화에 의해 크게 좌우될 수 있다. 반면, 수면 탄성파반사법 응용에는 우선 주어진 불리한 탐사여건(예: 좁은 수면, 얇은 수심)만으로도 상기 다중채널에 대한 기록은 측정 및 분석 면에서 현실성을 잃게 된다. 따라서, 대부분의 수면 탐사에서는 단지 단일 채널에 대한 데이터 취득이 보편화되고 있다(그림 1 참조). 이러한 면에서 측정데이터 자체의 양질화는 바로 탐사분해능과 직접적으로 연계된다고 할 수 있는 것이다.

수면 탄성파반사법의 응용은 최근 국내에서도 교량설계 및 시공을 위한 하상(항만, 호수) 퇴적상태, 수중 구조물 상태 및 수중 환경오염 상태 파악을 위해 점차 촉구하고 있다. 그러나, 그에 따른 지금까지의 국내·외 기술수준은 아직까지 기대되는 탐사 분해능을 제시하지 못하는 실정이며 국내에서는 더욱 그러하다. 여기에는 무엇보다 수중 발생원의 고주파 수 파형 생성 및 그에 따른 수진기능의 극대화, 발생원-수진기 배열의 최적화 및 측선 위치의 정확도 등에 대한 불확실성이 복합적으로 연계되고 있다고 볼 수 있다. 따라서, 본 논문에는 우선 상기 불확실성을 배제할 수 있는 여러 요소기술의 선진화 과정을 서술하고 있으며 나아가서 그에 따른 측정시스템이 이전에는 기대될 수 없었던 대단히 바람직한 데이터를 생성할 수 있음을 국내 현장사례(양수리 인근 한강 : 철도 교량 설계 지반조사)를 통하여 보여주고 있다.

탄성파 발생원에 의해 생성된 탄성파의 파형 요소

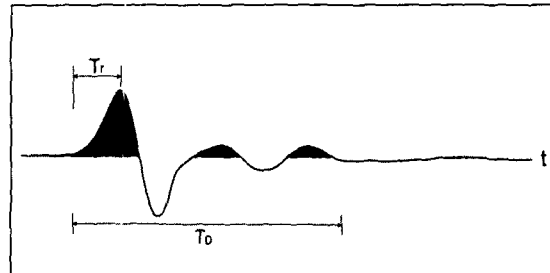


그림 2. 탄성파 발생원에 의해 생성되는 파형요소(wavelet) $w(n)$.

T_r : rise time, T_0 : wavelet length

(wavelet) $w(n)$ 은 탐사분해능을 결정짓는 주요 요인중의 하나이다. 그림 2는 물 속에서 측정된 $w(n)$ 을 예시하고 있다. 여기서 T_r 은 초동시점으로부터 처음으로 최대진폭치에 이르는 시점까지의 시간(rise time)을 의미하며 T_0 는 초동시점으로부터 진동이 소멸되는 시점까지의 시간(relaxation time)을 나타내고 있다. 수면 탄성파 탐사에서 기대되는 분해능을 얻기 위한 바람직한 파형 요소는 대체로 T_r 및 T_0 가 짧고 또한 T_r 에서 최대 진폭치에 도달하는 경우이다. 만약, 수면에 놓인 발생원과 수진기가 서로 인접할 경우 하부 각 경계면으로부터 반사된 탄성파의 기록 $s(n)$ 과정은 일차근사로써 다음과 같은 콘볼루션 모델(convolution model)에 바탕을 두고 있다. 즉,

$$s(n) = w(n) * r(n)$$

여기서, $*$: convolution (1)

식 (1)에서 $r(n)$ (reflection series)은 바로 각 경계면 위치에 대한 반사계수 $r_1(n), r_2(n), \dots$ 로 나타내고 있기 때문에 $w(n)$ 의 파형길이 T_0 는 측정기록 $s(n)$ 에서 암층경계면을 식별하기 위한 주요 변수가 된다. 여기서, 암층 두께에 대한 최소분해능 D_{min} 은 대체로 다음과 같이 표현된다.

$$D_{min} = \frac{1}{2} T_0 \cdot v$$

v : 암층의 탄성파속도 (2)

예를 들면, 하상 퇴적층의 풍화암 탄성파속도가 2500m/s일 경우 단지 $s(n)$ 에서 압층 두께 20cm의 분해능을 얻기 위해서는 $w(n)$ 의 T_0 는 약 0.16ms에 달하는 고주파수(최소 약 6kHz) 발생원 파형이 우선 생성되어야 한다는 것이다. 물론, $s(n)$ 에 대한 분해능은 다시 고도의 전산처리 과정을 통하여 크게 향상될 수 있겠으나 그래도 $w(n)$ 의 주 주파수가 약 3kHz는 되어야 압층두께 약 10cm의 분해능을 기대할 수 있다고 할 수 있는 것이다. 한편, 이러한 결과에 도달하기 위해서는 우선 발생원의 고주파수 $w(n)$ 생성 이외에 무엇보다 다음과 같은 측정 내용이 병행되어야 한다.

- 잡음 기록(예: 발생원과 수신기 간의 직접파 내지 peg-leg multiple)의 최소화를 위한 적절한 발생원-수진기 배열
- 수신기능의 극대화
- 수면 위에서 이동하는 발생원의 위치에 대한 고정밀화(약 10cm 미만의 오차)

본 고는 우선 다양한 국내 실험 결과를 바탕으로 상기 측정 내용에 해당하는 주요 요소기술의 개발 및 기술 축적 과정을 예시하고 있으며 나아가서 그로부터 얻게된 고분해능 하상 지층구조 단면도를 보여주고 있다.

2. 수면 탄성파반사법 측정 시스템의 선진화

수면 탄성파반사법 측정데이터의 질은 주로 탄성파 발생원의 선정, 수신기능, 발생원-수진기 배열 상태, GPS에 의한 측정 위치의 정확도, 데이터 제어 장치 등에 의해 영향을 받게 된다. 다음은 이들 각각의 최적화 과정을 요약하고 있다.

2.1 탄성파 발생원

일반적으로 탄성파 발생원의 특성은 $w(n)$ 의 T_0 및

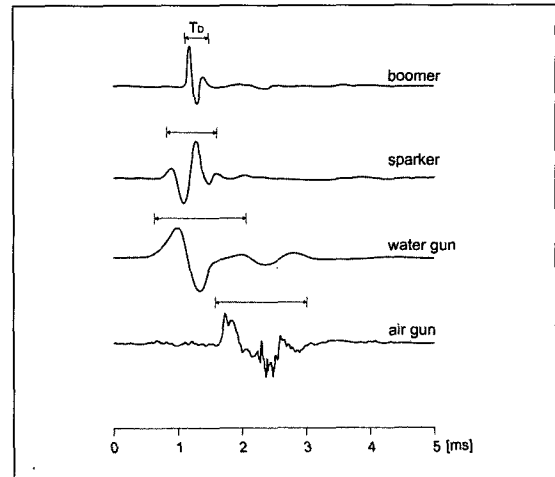


그림 3. 수면 탄성파반사법에서 사용되는 다양한 발생원의 파형요소의 상대 비교

T_1 , 주파수내용, 에너지의 크기, 에너지 방사형 등에 의해 판단된다. 수중에서는 S파가 전달될 수 없기 때문에 탄성파 발생원은 단지 P파만 생성하고 수신기 역시 P파만 받아들여지게 된다. 대체로 수면에서 수직 단일힘의 점원 발생원(예: 부머발생원)이 구사되면 그로 인한 $w(n)$ 은 kHz 범위에서 고주파수화 됨에 따라 방사되는 에너지는 매질의 흡수성에 의해 약화되며 동시에 그에 따른 에너지 방사형은 점차 지향성(수면에 연직 방향)을 띠는 경향을 보여주게 된다. 그림 3은 수면 탄성파반사법에서 지금까지 흔히 사용되고 있는 다양한 발생원의 $w(n)$ 을 나타내고 있다. 부머(boomer)는 우선 T_0 및 T_1 면에서 박층 퇴적 상태를 규명하기 위한 최적의 조건(식 (2) 참조)을 보여주고 있다. 반면, 워터건(water gun) 및 에어건(air gun)의 $w(n)$ 은 부머의 것보다 저주파수이나 상대적으로 큰 에너지를 방사하기 때문에 보다 심부 지층구조 규명에 유리하다고 할 수 있다. 스파커(sparker)의 큰 장점은 무엇보다 수중 어느 곳에서도 일관성을 띤 파형(상대적으로 고주파수)을 방사할 수 있다는 데 있다. 그러나, 그의 에너지는 상대적으로 낮게 관찰되고 있다. 그림 4는 부머의 외형과 그에 따른 $w(n)$ 의 주파수 내용을 나타내고 있다. 대

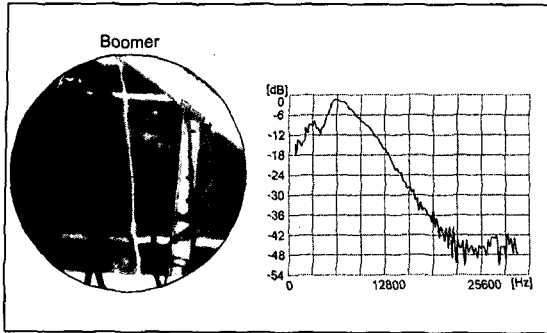


그림 4. 부머발생원(acoustic boomer plate model 5813B)과 그에 따른 파형요소 $w(n)$ 의 진폭 스펙트럼

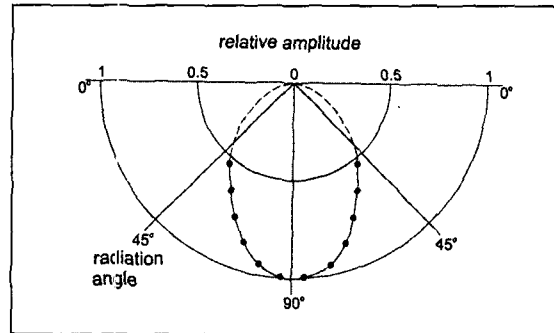


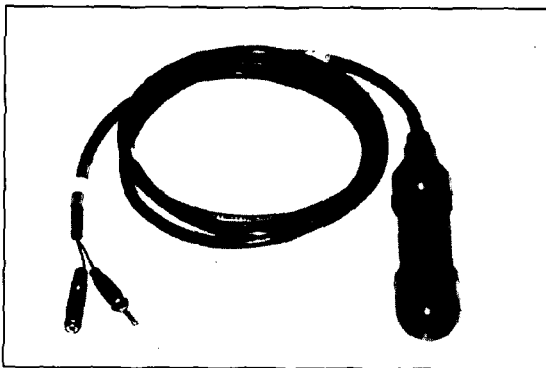
그림 5. 부머발생원의 에너지 방사형

체로 16kHz까지의 고주파수 파형이 생성될 수 있음을 볼 수 있다. 그림 5에는 실험을 바탕으로 얻어진 부머의 에너지 방사형(P파)을 보여주고 있다. 여기서 수면의 연직방향(90°)으로 최대 에너지를 방사하고 방사각이 작아짐에 따라 방사되는 에너지는 급감하는 소위 P빔(beam) 방사형 모양이 관찰되고 있다. 이러한 부머의 제반 유용한 특성은 바로 본 현장 실험에서 우선적으로 선정하게 된 주요 요인이 되었다. 부머의 핵심 부분은 여러 개의 알루미늄 판과 코일로 구성되어 있다. 코일에 전류를 보낸 후 급격히 차단하면 알루미늄 판 사이에는 로렌츠 힘이 가하게 되어 판을 서로 밀어내게 되며 그에 따라 순간적으로 큰 폭의 수압 차가 유발된다. 이러한 국부적인 압력

차는 주위의 물을 수압이 낮은 곳으로 밀려들게 하여 하나의 내파형(implosion)을 띤 수압파(pressure wave) 즉, 탄성파가 발생된다. 이러한 내파형 발생원(예: 부머, 스파커)은 에어건이나 화약과 비교하여 상대적으로 낮은 에너지를 방사하게 되나 반면, 넓은 주파수 영역의 짧은 파형을 반복적으로 전송할 수 있다는 큰 장점을 갖고 있다.

2.2 수신 장치

하이드로폰(hydrophone)은 수중에서 탄성파를 감지하기 위해 상용되는 수신기이다(그림 6(a) 참조). 그의 핵심 부분은 이온 크리스탈 재질(예:

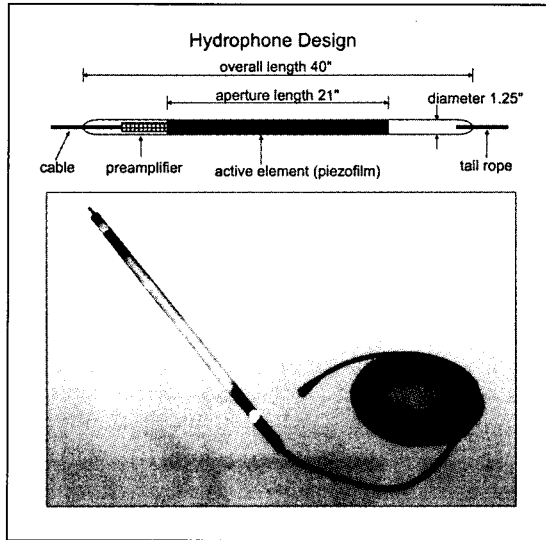


(a) 재래의 수동형 하이드로폰(Typ DH-5, Innovative Transducer Inc., Texas)



(b) 7개의 하이드로폰 압전소자를 배열하여 제작한 수동형 하이드로폰(passive hydrophone)

그림 6. 수면 탄성파반사법 탐사용 하이드로폰



(c) 압전소자 필름과 프리앰프로 구성된 능동형 하이드로폰 (active hydrophone)

그림 6. 수면 탄성파반사법 탐사용 하이드로폰

Turmalin, Quartz)로 구성된 센서면으로서 그의 기능은 압전소자 원리(piezoelectric principle)에 바탕을 두고 있다. 감지되는 진폭은 센서면에 가하는 압력 즉, 입자 움직임의 가속도에 거의 선형으로 비례하기 때문에 지면에서 사용되는 지오폰(geophone)보다 높은 주파수 대역의 시그널도 쉽게 받아들일 수 있다. 본 수면 탄성파반사법 탐사에서 선정된 부머발생원은 비교적 작은 에너지를 방사하기 때문에 이에 대처하여 수신기능을 그만큼 높여 주는 것이 바람직하다. 그림 6(b)는 하이드로폰(그림 6(a) 참조)의 센서를 일곱 개 배열하여 하나의 하이드로폰으로 제작한 결과를 나타내고 있으며 그로 인해 약 3배 이상의 진폭 증대효과를 얻을 수 있었다. 그러나, 이러한 부류의 하이드로폰은 어디까지나 모든 방향의 탄성파를 그대로 받아들이는 기능을 갖고 있기 때문에 기대되는 반사파의 진폭이 커지면 그만큼 그 이외 즉, 다른 방향으로부터의 탄성파(예: 발생원과 수신기 간의 직접파 내지 다중반사(peg-leg multiple)) 진폭도 증대된다. 따라서, 이상적인 수신기능은 바로 하부 지층경계면으로부터 반사되는 탄

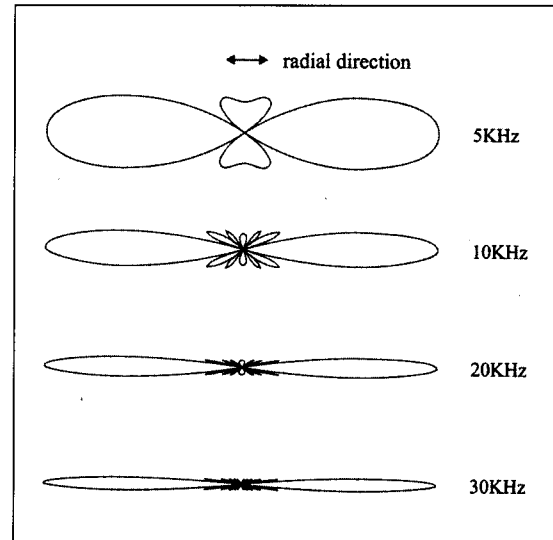


그림 7. 능동형 하이드로폰의 성분 수신기능

성파만 고감도로 받아들일 수 있는 것(성분 수신기능)이 되겠다. 그림 6(c)는 바로 성분 수신기능을 갖도록 특별히 제작된 하나의 새로운 수신장치를 나타내고 있다. 이번에는 얇은 필름에 Polyvinyl Fluorine을 압연한 것(piezofilm)을 원통형 봉 약 53.3cm 길이의 센서 표면에 피복함으로써 원통 길이에 수직인 방향으로 도달되는 탄성파를 최대한 감지하고자 하였으며 이에 부가하여 특별히 프리앰프(preamplifier)를 장착하였다. 그로 인한 수신기능(그림 7 참조)은 뚜렷한 지향성을 보여주고 있으며 더구나 그 정도(성분 수신기능)는 도달되는 탄성파의 주파수가 높을수록 뚜렷하게 나타나고 있음을 보여주고 있다. 편의상, 그림 6(a) 및 (b)에 나타난 하이드로폰 형을 수동형 하이드로폰(passive hydrophone), (c)의 경우를 능동형 하이드로폰(active hydrophone)으로 분류하고자 한다. 능동형 하이드로폰이 감지할 수 있는 최대 주파수는 약 100kHz에 달하고 있으며 그의 탁월한 수신기능은 본 현장 실험에서 크게 입증되고 있다.

2.3 PDGPS 및 데이터 제어장치

수면 탐사가 진행되는 동안 발생원(수진기와는 고정된 거리 유지)의 위치를 측정하는 것은 하나의 과업이 되고 있다. 더구나 그의 정확도는 지층구조 분해능과 대등함이 바람직하기 때문에 더욱 그러하다. DGPS(Differential Global Positioning System)는 두 개의 GPS 수신기를 이용하여 GPS운용에서 발생하는 측위오차(예: 대기권의 전파 지연, 인공위성의 배치 상황에 따른 기하학적 오차, 전파의 다중경로 등)를 상대적 측위에 의해 크게 줄이는 방법이다. 여기서 하나의 GPS수신기는 이미 알고 있는 GPS좌표 주위에 설치(base station)하여 위성간 거리 오차 보정치를 계산하며 그 결과는 발생원에 장착된 또 다른 GPS수신기(그림 8의 윗부분 참조)의 오차 보정에 이용된다. 각 인공위성은 두 개의 코드 즉, CA-코드(Coarse/Acquisition code ; 파장 약

300m)와 P-코드(Precision code ; 파장 약 30m)에 의해 L1 주파수(1575.42MHz, 파장 약 0.19m)와 L2 주파수(1227.6MHz, 파장 약 0.24m) 전파를 송신한다. 두 개의 코드는 L1 및 L2와 공조화되어 측위오차를 약 1m~10m 범위에 놓이게 할 수 있다. 이에 부가하여 L1 및 L2의 위상을 P-코드 위상과 적절히 공조하게 되면 측위오차를 거의 10cm 미만으로 줄일 수 있게 된다(PDGPS : Precision DGPS). 이러한 위치 정확도는 대체로 기대되는 퇴적층 박층 분해능에 상응한다고 볼 수 있다. 그림 8의 아랫부분에는 각 측정점에 대한 GPS 데이터가 영상화되고 또한 그들은 발생원 트리거 시점과 연계되어 취득된 측정데이터의 측선 자료로 반영된다. 전력공급장치(power supply, 90~280J)에 연결된 부머(plate model 5813B)는 약 0.5m~1m 이동할 때마다 탄성파를 방사하며 수신장치에 도달된 탄성과 시그널은 해상용 "SUMMIT UNIT" (DMT-GeoTec사, Germany)에 의해 디지털화(샘플링 간격 1/32ms)되어 저장되고 동시에 영상화된다(그림 8 참조).

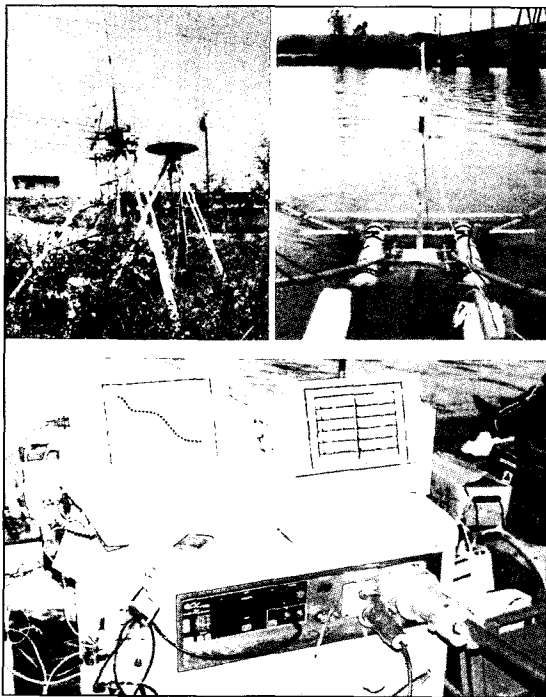
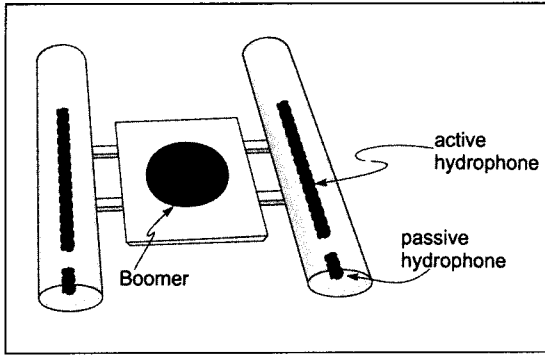


그림 8. 수면 탄성파반사법 측정시스템의 전모

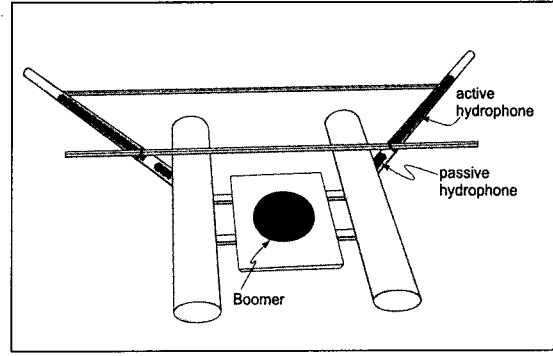
2.4 발생원-수진기 배열 상태

수면 탄성파반사법에서 발생원-수진기 간의 거리 및 심도, 그들을 고정하는 장치 및 주변 매질(예: 배)등을 고려하는 발생원-수진기 배열상태는 데이터의 질을 결정하는 큰 요인이 될 수 있다. 우선 반사파 진폭이 그의 위상면에서 동일한 경계면에 대조시킬 수 있게 하기 위해서는 발생원과 수신기 간의 최대 허용거리 D가 경계면의 프레넬 대(Fresnel zone) 반경을 고려하여 결정되어야 한다. 프레넬 대 반경은 수심이 깊어질수록 작아지기 때문에 그에 따라 발생원-수진기 간의 최대 허용거리는 짧아진다. McGee(1995)는 D에 대한 근사 공식을 다음과 같이 제시하였다.

$$D \approx \sqrt{\frac{CZ}{f}} \quad (3)$$



(a) 일반적인 배열 상태



(b) 방사형 배열 상태

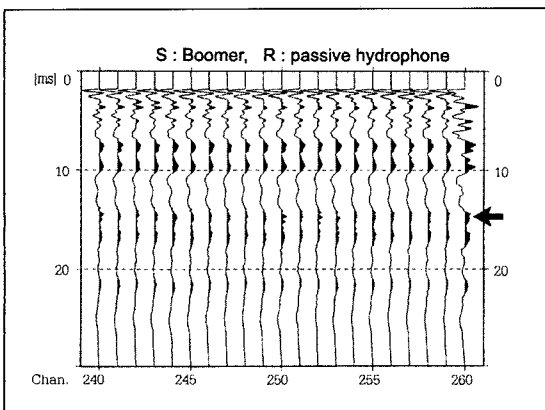
그림 9. 발생원-수진기 배열 상태

여기서, c : 물의 탄성파속도(1500m/s),
 z : 수심, f : $w(n)$ 의 주 주파수

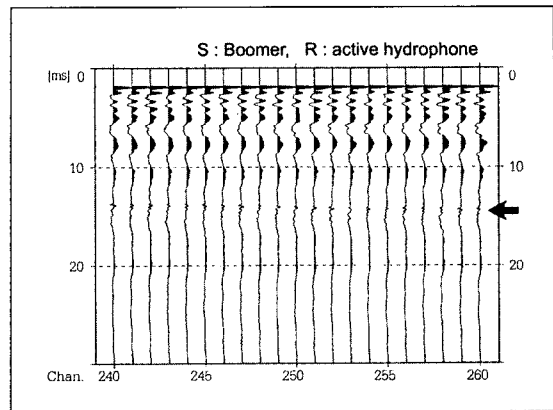
즉, 수심이 5m이고 $f = 5\text{kHz}$ 일 때 최대 허용거리 D 는 약 1.3m가 된다.

그림 9는 부머 주위에 수진기(passive, active)가 배열된 상태를 나타내고 있다. (a)의 경우는 일반적으로 상용되는 배열상태로서 여기에는 우선 부머 고정틀 사이에서 발생하는 다중반사(peg-leg multiple)가 기대된다. 반면, (b)는 수진기가 부머 중심부에서 일정 방사각 방향으로 배열된 상태로서 특히 능

동형 하이드로폰(active hydrophone) 응용에서는 직접파의 진폭이 최소화되어 수신될 것이 기대된다. 그림 10은 제래의 배열(그림 9(a) 참조)에 의해 얻어진 탄성파기록을 보여주고 있으며 여기서 화살표는 하저경계면 반사파 주시를 나타내고 있다. 전체적으로, 부머 고정틀 및 주위 매질(예: 바지선)에 의한 다중반사(peg-leg multiple)들이 서로 중첩되어 측정 주시 전 구간에서 지배적으로 발달되고 있음을 볼 수 있다. 비록, 능동형 하이드로폰에 의한 결과(그림 10(b) 참조)에서 상대적으로 하저경계면의 반사파가 뚜렷이 인식되고 있으나 그래도 데이터의 질 면에

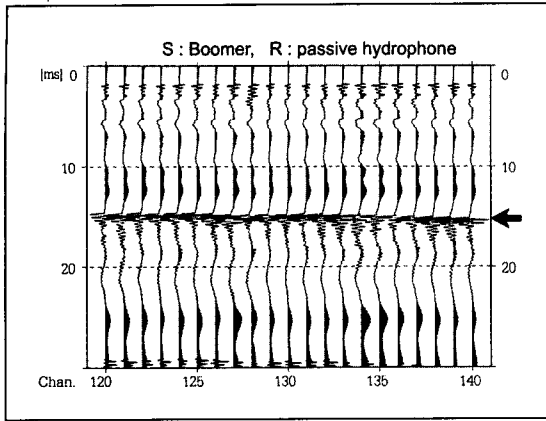


(a) 수동형 하이드로폰에 의한 기록

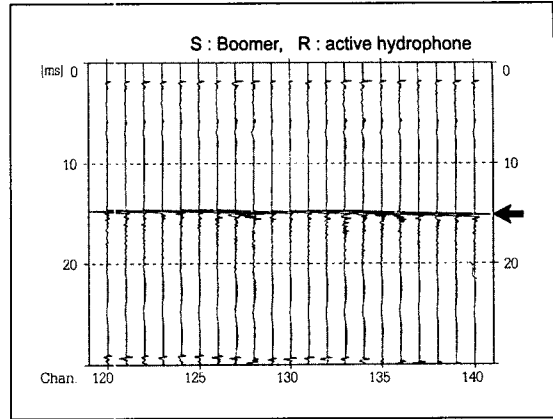


(b) 능동형 하이드로폰에 의한 기록

그림 10. 일반적인 발생원-수진기 배열(그림 9(a) 참조) 하의 부머 에너지 280J에 의한 탄성파기록(샘플링 간격 1/32ms)

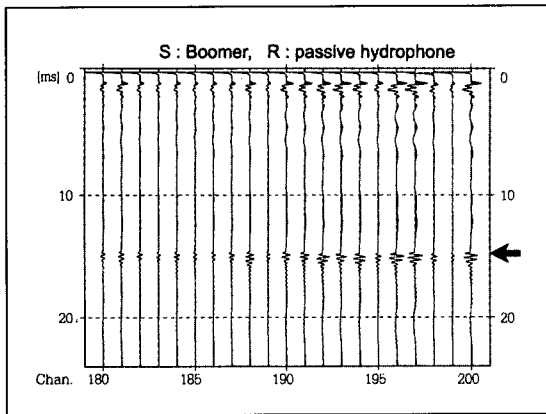


(a) 수동형 하이드로폰에 의한 기록

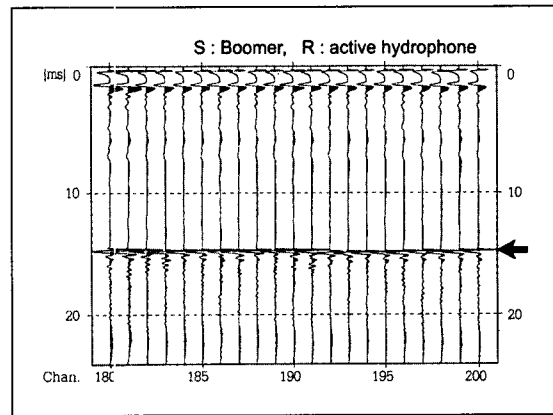


(b) 능동형 하이드로폰에 의한 기록

그림 11. 방사형 발생원-수진기 배열(그림 9(b) 참조) 하의 부머 에너지 280J에 의한 탄성파기록(샘플링 간격 1/32ms)



(a) 수동형 하이드로폰에 의한 기록



(b) 능동형 하이드로폰에 의한 기록

그림 12. 방사형 발생원-수진기 배열(그림 9(b) 참조) 하의 부머 에너지 175J에 의한 탄성파기록(샘플링 간격 1/32ms)

서는 바람직한 자료라 할 수 없다. 그림 11은 거의 동일한 축선 구간 내에서 이번에는 방사형 배열(그림 9(b) 참조)에 의한 기록을 나타내고 있다. 이번에는 하저경계면 반사파의 도달이 뚜렷하게 관찰되고 있으며 더구나 능동형 하이드로폰의 경우에는 제반 잡음이 거의 배제된 완벽한 수준의 데이터를 보여주고 있다. 그림 12는 이전과 동일한 여건 하에서 단지 부머발생원의 에너지를 약 38% 정도 약화시켰을 경우(부머 에너지 175 J) 얻어진 탄성파 기록을 나타내고 있다. 여기서도 능동형 하이드로폰의 성분 수진

기능이 극대화되고 있음을 볼 수 있다. 이러한 실험 결과는 바로 단순히 발생원 에너지의 크기보다는 오히려 파형의 T_D , 성분 기록 기능, 발생원-수진기 배열 상태가 양질의 데이터 취득을 위해 보다 큰 역할을 하고 있음을 여실히 보여주는 것이 되었다.

2.5 데이터 분석

그림 13(a)에는 본 현장 실험이 수행된 하천(양수리 인접)의 평면도를 나타내고 있으며 동시에 PDG-

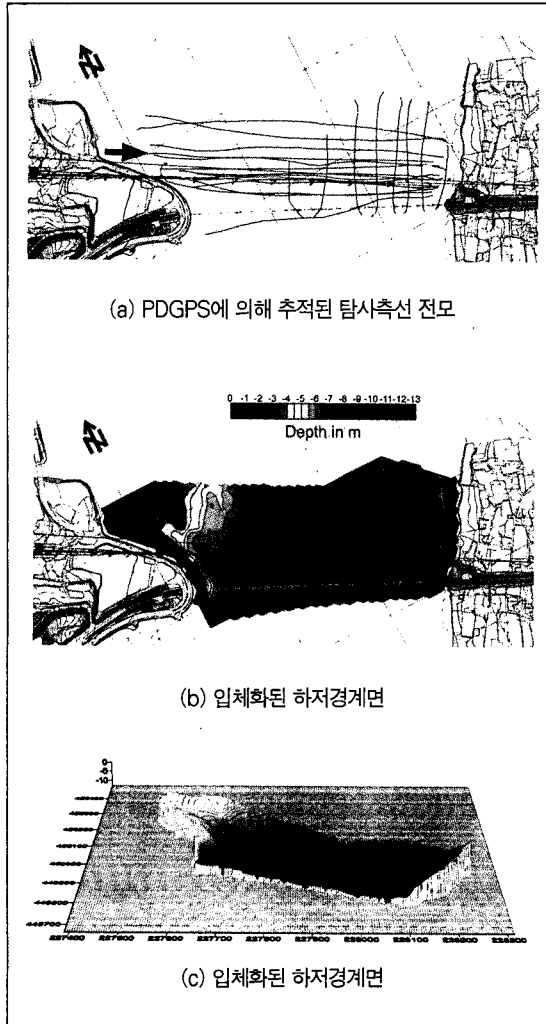


그림 13. 수면 탄성파반사법에 의한 하저경계면 규명

PS에 의해 추적된 발생원의 진로(축선)를 표현하고 있다. 확인된 위치 오차는 약 10cm에 달하였다. 그러나, 기존 철로교각 사이를 통과할 때에는 철재의 전파 방해로 인해 큰 폭의 측위오차가 발생하였다. 그림 13(b) 및 (c)에는 하저면의 뚜렷한 반사파 도달(그림 11(b) 참조)을 이용하여 그 경계면을 입체화하여 나타내고 있다. 그림 14(a)는 기존 철도와 평행 하면서 약 20m 떨어진 축선(그림 13(a)에서 화살표로 표시)을 대상으로 얻어진 반사파 자료에 대해 전

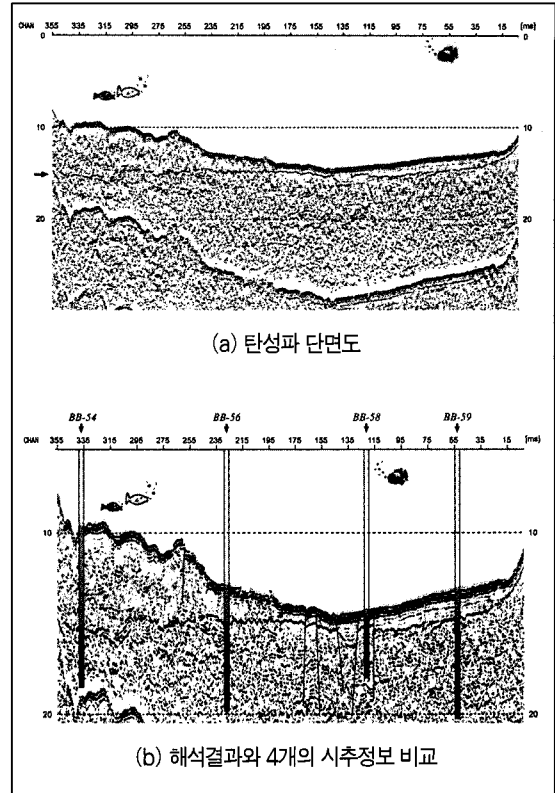


그림 14. 고분해능 수면 탄성파반사법에 의한 전산처리 및 해석결과

산처리(예: AGC, Spiking Deconvolution, Muting)한 결과를 나타내고 있다. 여기서 우선 화살표로 표시된 경계면의 연장선이 뚜렷이 관찰되고 있으며 이는 바로 하나의 암층 경계를 대변할 수 있다. 그림 14(b)는 상기 경계면을 시추데이터에서 확인된 풍화암/연암 경계면을 대조하여 나타내고 있으며 그 경계면에 대한 심도 및 반사파 도달 주시로부터 하상하부 지반의 풍화암 평균속도(BB-54 : 2600m/s, BB-56 : 3000m/s, BB-58 : 3300m/s, BB-59 : 3400m/s)가 산출될 수 있었다. 즉, 암층의 탄성파속도가 시추공 BB-54 위치로부터 시추공 BB-59 위치 방향으로 전진함에 따라 점차 높아짐을 볼 수 있다. 한편, 상기 단면도에는 각 암층(풍화암, 연암)이 보다 세분화된 암층상태를 나타내고 있으며 더구나, 각 경계면 연장의 일관성을 띤 단절은 절리 내지 소

단층의 존재를 잘 반영하고 있다. 특히 재현된 하저 경계면의 국부적인 미소 단절은 그 하부 암반 상태와 훌륭한 연계성을 보여주고 있다. 즉, 이러한 고분해능 데이터에는 단순히 수심 측정을 위해서라도 어느 조사기법(예: echo sounding)보다 신뢰성을 갖는 결과가 기대될 수 있다고 하겠다. 이러한 포괄적인 지반 정보는 오히려 시추 데이터의 불확실성을 부분적으로 보완하는 것이 될 수 있었다. 예를 들면, 천공 과정에서 수심이 알아지는 측선구간(channel No. 약 275~350 구간) 하부의 풍화암/연암 경계면이 깊게 관찰되어 상당한 의혹이 제기되었으나 본 탄성파 단면도는 무엇보다 상기 의문을 불식시킬 수 있는 암반상태를 훌륭하게 대변하는 것이 되었다.

3. 결론

수심이 낮은 하천, 호수 및 항만 등을 대상으로 하는 수면 탄성파반사법은 대부분의 경우 고분해능 암층구분(약 10cm 두께)을 전제로 하기 때문에 무엇보다 측정데이터의 양질화에 초점을 두고 있다. 특히, 하저면 경계면의 반사계수가 높은 경우 수심이 낮아질수록 암층에 대한 가탐심도(평균 약 2 × 수심)는 그만큼 낮아지게 되며 더구나 발생원 파형의 주파수가 낮아지게 되면(대체로 $f < 1000\text{Hz}$) 그로 인해 발생하는 수중 간의 다중 반사가 탄성파기록에서 지배적으로 발달되어 소기의 탐사목적이 달성될 수 없게 되는 경우가 허다하다. 따라서, 본 논문의 주요 내용은 우선 발생원 파형의 고주파수화와 그에 따른 수진기능의 극대화, 발생원-수진기 배열의 최적화 및 위치 측정의 고정밀화에 따른 기술 축적 내지 다양한 요소기술 개발과정을 서술하고 나아가서 그로 인한 새로운 측정시스템의 효율성이 국내 현장 실험을 통하여 입증되고 있음을 보여주는 데 있었다. 특히, 본 논문에서 소개한 능동형 하이드로폰(active hydrophone)과 발생원-수진기 간의 방사형 배열은

측정데이터의 질을 근원적으로 향상시킬 수 있는 결정적인 요소기술이 되었다. 즉, 능동형 하이드로폰은 수면에서 전달되는 탄성과 도달을 최소화하는 반면 하부 경계면 반사파의 진폭을 극대화할 수 있는 일종의 성분기록 수진기에 해당하기 때문에 그의 탁월한 수진기능은 비록 부머발생원이 비교적 약한 에너지를 방사하더라도 반사파의 도달을 고분해능으로 취득하게 하였다. 이와 병행하여 시도된 방사형 발생원-수진기 배열은 무엇보다 수면에서 발생하는 여러 가지 불필요한 탄성파의 도달(예: 직접파, peg-leg multiple)을 기록에서 근원적으로 약화시키는 기능을 보여주었다. 나아가서 PDGPS에 의한 위치 측정의 고정밀화 및 측정 시그널의 고분해능 디지털화 등이 첨부된 하나의 새로운 측정시스템은 지금까지 기대될 수 없었던 대단히 바람직한 지층구조 단면도를 낳게 하였다. 여기에는 시추자료로는 판단이 불확실한 암층 상태가 보다 세분화되어 밝혀질 수 있었으며 더구나 절리 등으로 인한 경계면의 일관성을 띤 단절도 뚜렷이 관찰되었다. 동시에, 하저경계면의 높은 반사계수는 수심측정을 위한 훌륭한 여건이 되었으며 그로 인한 하저면 입체화는 어느 수심 측정기법에 의한 것보다 신뢰성을 얻는 것이 되었다. 한편, 이러한 선진화된 수면 탄성파반사법의 국내 자립화는 향후 하천은 물론 호수 및 항만에서 대두되는 환경 오염문제 및 제반 지반조사 분야에서 상당한 기여를 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. McGee, T.M. (1995), "High-resolution marine reflection profiling for engineering and environmental purposes, Part A : Acquiring analogue seismic signals", Journal of Applied Geophysics 33, Issue 4. Elsevier Science Publishers, Amsterdam