

철도교량 설계 지반조사를 위한 고분해능 수면 탄성과반사법의 응용 사례 High Resolution Hydroacoustic Investigation in Shallow Water for the Engineering Design of Railroad Bridge

김중열¹⁾, Jung-Yul Kim, Swoboda Ulrich²⁾, 김유성³⁾, Yoo-Sung Kim,
김기석⁴⁾, Ki-Seok Kim

¹⁾ 한국지질자원연구원 책임연구원, Principal Researcher, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources.

²⁾ project manager, DMT GeoTec.

³⁾ 한국지질자원연구원 책임연구원, Principal Researcher, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources.

⁴⁾ (주) 희송지오택, Hee Song GeoTek Co., LTD.

SYNOPSIS : To investigate the underground structure of shallow water, Han-river near Yangsou-Ri, high resolution hydroacoustic measurements were carried out for the engineering design of railroad bridge. The acoustic source was a Boomer with an energy of 90 to 280J and in a frequency range up to about 16kHz. The reflected signals were received by using both traditional hydrophones(passive element) and a specially devised receiver unit(active element) mainly composed of piezofilms and preamplifier. They are connected to the "SUMMIT" data acquisition system(DMT-GeoTec company), where the sampling interval was set to 1/32ms. The source position was continuously monitored by a precision DGPS system whose positioning accuracy was on the order of 10cm. For the quality control purposes, two different source-receiver geometries were taken. That is to say, the measurements were repeated along the profile everytime depending on the different source energy(175J, 280J), the receiving elements(passive, active) and two different source-receiver geometries. It was shown that the data resolution derived from a proper arrangement with the active hydrophone could be greatly enhanced and hence the corresponding profile section caused by the regular data processing system "FOCUS" accounted excellently for the underground formation below the shallow water.

Key words : hydroacoustic measurement, Boomer, active hydrophone, source-receiver geometry, precision DGPS

1. 서 론

물리탐사 분야에서 탄성과반사법은 바로 각 암층의 경계면을 규명할 수 있는 유일한 탐사법이기에 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 토목분야 지반조사에서 요구하는 탄성과반사법의 기능은 천부 지층구조(예 : 암층경계, 각 암층

탄성과속도)를 규명하는 데 있다. 여기에는 그림 1에서 예시한 바 상기 발생원-수진기 배열이 적용되는 지표면이 수면(예 : 하천, 호수)이나 아니면 지면(예 : 표토층)이나에 따라 크게 수면 탄성과반사법(shallow water reflection method)과 지면 탄성과반사법(shallow land reflection method)으로 구분된다. 비록 그들이 탄성과 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 탄성과반사법은 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 탄성과반사법 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 탄성과반사법의 응용은 최근 국내에서도 제반 교량설계 및 시공을 위한 하상(항만, 호수) 퇴적상태, 수중 구조물 상태 및 수중 환경오염 상태 파악을 위해 점차 촉구되고 있다. 그러나, 그에 따른 지금까지의 국내·외 기술수준은 아직까지 기대되는 탐사 분해능을 제시하지 못하는 실정이며 국내에서는 더욱 그러하다. 여기에는 무엇보다 수중 발생원의 고주파수 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 다양한 국내 현장실험을 바탕으로 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 교량설계 지반조사)를 통하여 보여주고 있다.

2. 수면 탄성과반사법 측정 시스템의 선진화

수면 탄성과반사법 측정데이터의 질은 주로 탄성과 발생원의 선정, 수진기능, 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 탄성과 발생원

일반적으로 탄성과 발생원의 특성은 그의 파형요소 $w(n)$ 의 길이, 주파수내용, 에너지의 크기, 에너지 방사형 등에 의해 판단된다. 수중에서는 S파가 전달될 수 없기 때문에 탄성과 발생원은 단지 P파만 생성하고 수진기 역시 P파만 받아들여지게 된다. 대체로 수면에서 수직 단일힘의 점원 발생원(예 : 부머발생원)이 구사되면 그로 인한 $w(n)$ 의 주파수내용이 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. 본 현장실험에서 부머 발생원을 우선적으로 선정한 주요 요인은 ① 그의 파형요소가 대단히 짧고, ② 그로인해 16kHz까지의 고주파수 파형이 생성될 수 있으며, ③ 그의 에너지 방사형이 수면에 연직방향으로 거의 빔(beam)화 되고 있다는 데 있다. 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 내과형(implosion)을 띤 수압파(pressure wave) 즉, 탄성과가 발생된다. 이러한 내과형 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.

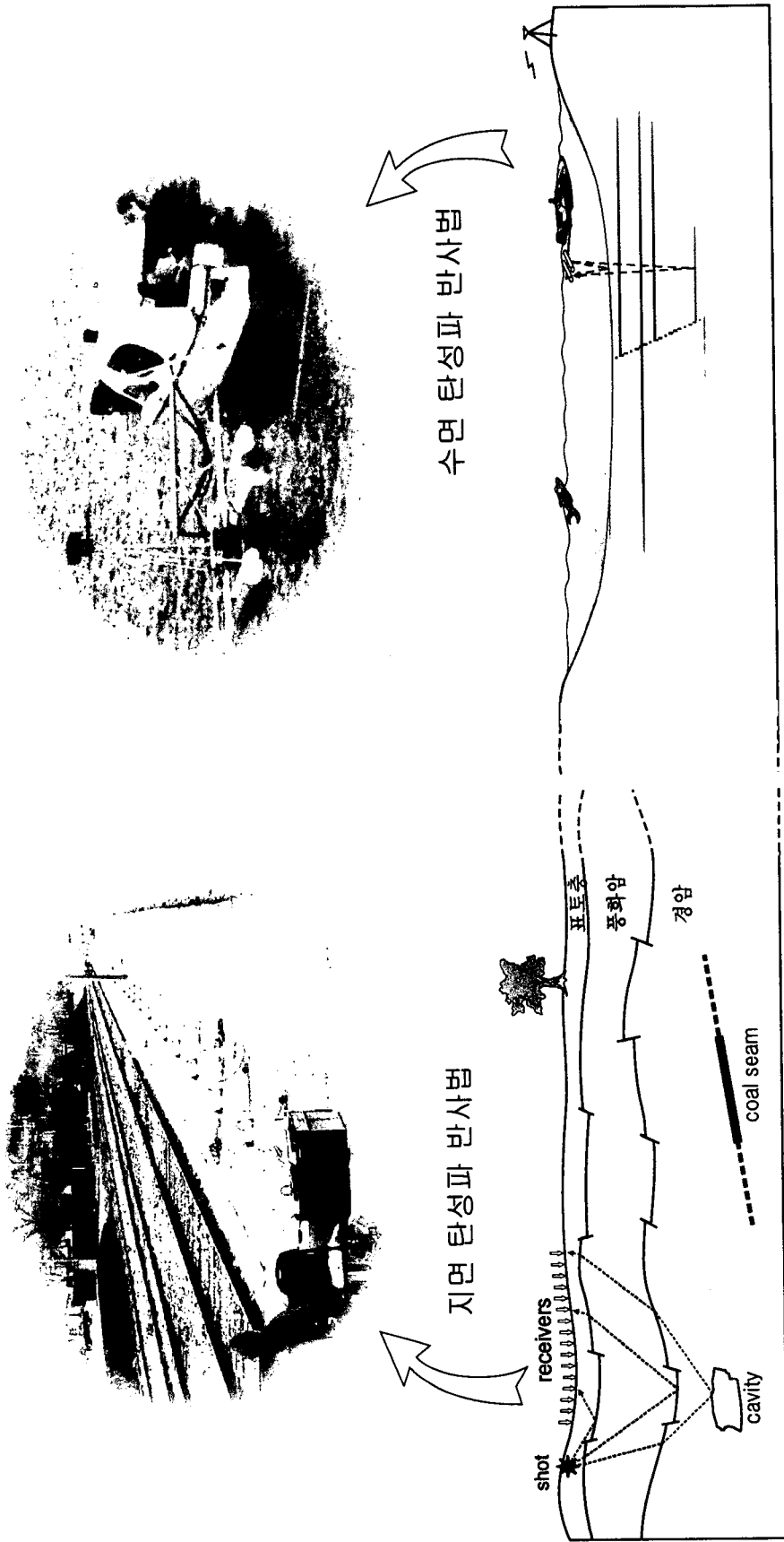


그림 1. 탄성파반사법의 응용.
 탄성파반사법은 대체로 기본 발생원-수진기 배열이 지면에 놓일 경우(지면 탄성파반사법 탐사)와 수면(하상, 호수, 항만)에 놓일 경우(수면 탄성파반사법 탐사)로 구분되어 발전되어 왔다. 국내 지면 탄성파탐사 응용에서 대두되는 큰 문제점 중 하나는 표토층을 따라 전달되는 표면파가 탄성파기록에서 지배적으로 발달되고 있다는 데 있다. 반면, 수면 탄성파탐사는 무엇보다도 발생원 파형의 고주파수화, 수진기능의 극대화, 측정위치의 정확성, 적절한 발생원-수진기 배열상태 및 분석의 고도화가 동시에 충족될 경우 그 실효성을 찾을 수 있다.

2.2 수신 장치

하이드로폰(hydrophone)은 수중에서 탄성파를 감지하기 위해 상용되는 수신기이다. 그의 핵심 부분은 이온 크리스털 재질(예 : 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. 그런데, 하이드로폰은 어디까지나 모든 방향의 탄성파를 그대로 받아들이는 기능을 갖고 있기 때문에 기대되는 반사파의 진폭이 커지면 그만큼 그 이외의 즉, 다른 방향으로부터의 탄성파(예 : 발생원과 수신기 간의 직접파 내지 다중반사(peg-leg multiple)) 진폭도 증대된다. 따라서, 이상적인 수신기능은 바로 하부 지층경계면으로부터 반사되는 탄성파만 고감도로 받아들일 수 있는 것(성분 수신기능)이 되겠다. 이를 위해 하나의 새로운 수신장치가 개발되었다. 여기에는 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 수신기능은 뚜렷한 지향성을 보여주고 있으며 더구나 그 정도(성분 수신기능)는 도달되는 탄성파의 주파수가 높을수록 뚜렷하게 나타나고 있었다. 편의상, 이러한 수신장치를 능동형 하이드로폰(active hydrophone), 재래의 하이드로폰을 수동형 하이드로폰(passive 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(수신기와는 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 다중 경로 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 2의 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 상응된다고 볼 수 있다. 그림 2의 아랫부분에는 각 측정점에 대한 GPS 데이터가 영상화되고 또한 그들은 발생원 트리기 시점과 연계되어 취득된 측정데이터의 축선 자료로 반영된다. 전력공급장치(power supply, 90~280J)에 연결된 부머(plate model 5813B)는 약 0.5m~1m 이동할 때마다 탄성파를 방사하며 수신장치에 도달된 탄성파 시그널은 해상용 "SUMMIT UNIT"(DMT-GeoTec사, Germany)에 의해 디지털화(샘플링 간격 1/32ms)되어 저장되고 동시에 영상화된다(그림 2 참조).

2.4 데이터 분석

그림 3에는 본 현장 실험이 수행된 하천(양수리 인접)의 평면도를 나타내고 있으며 동시에 PDGPS에 의해 추적된 발생원의 진로(축선)를 표현하고 있다. 확인된 위치 오차는 약 10cm에 달하였다. 그러나,

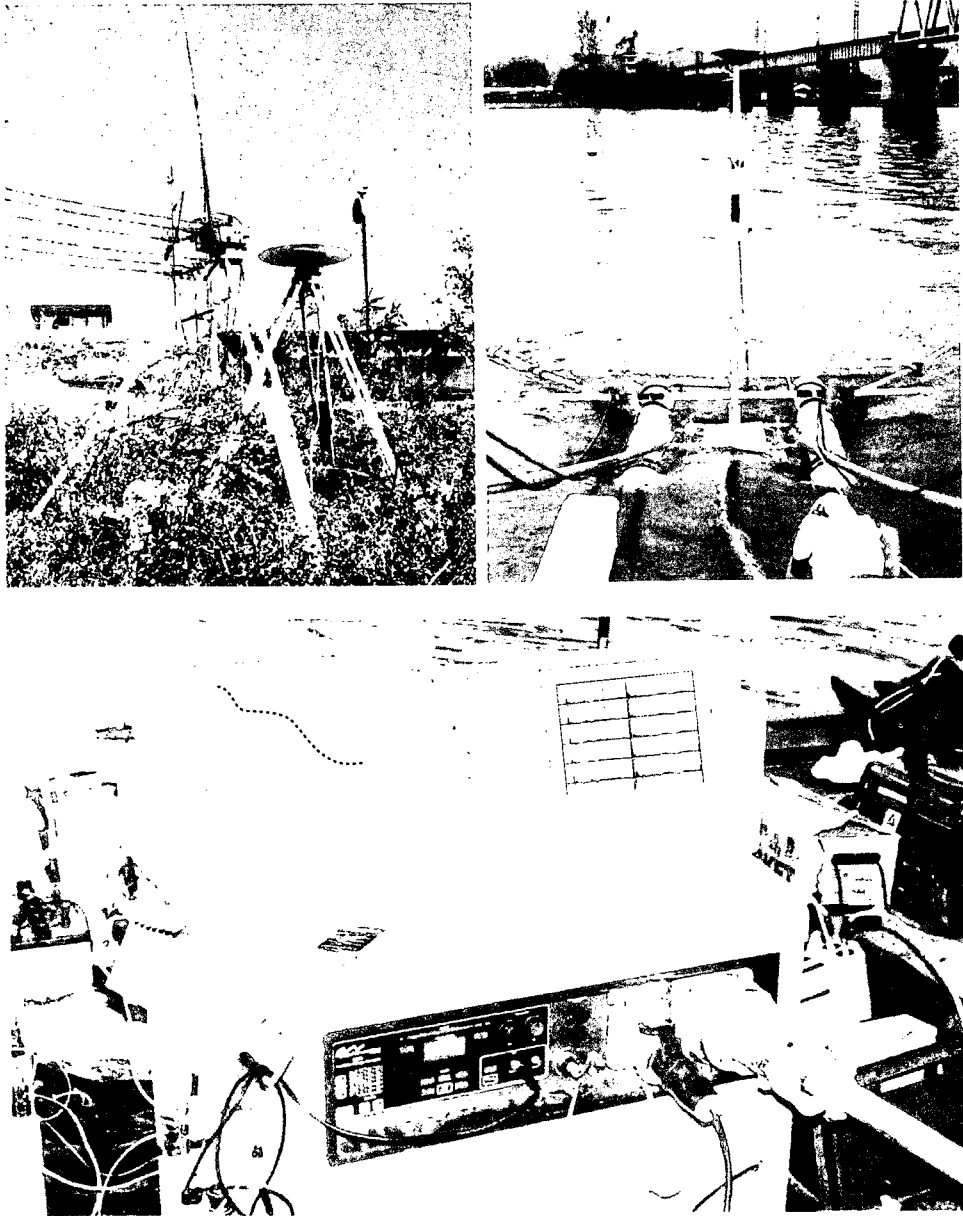


그림 2. 수면 탄성파반사법 측정시스템의 전모. 발생원(부머)-수진기(능동형 하이드로폰) 방사형 배열에 의해 얻어진 측정데이터와 또한 베이스 스테이션과 부머에 장착된 GPS수진기에 의한 위치측정 결과는 상호 모니터링 되어 영상화되고 동시에 저장된다.

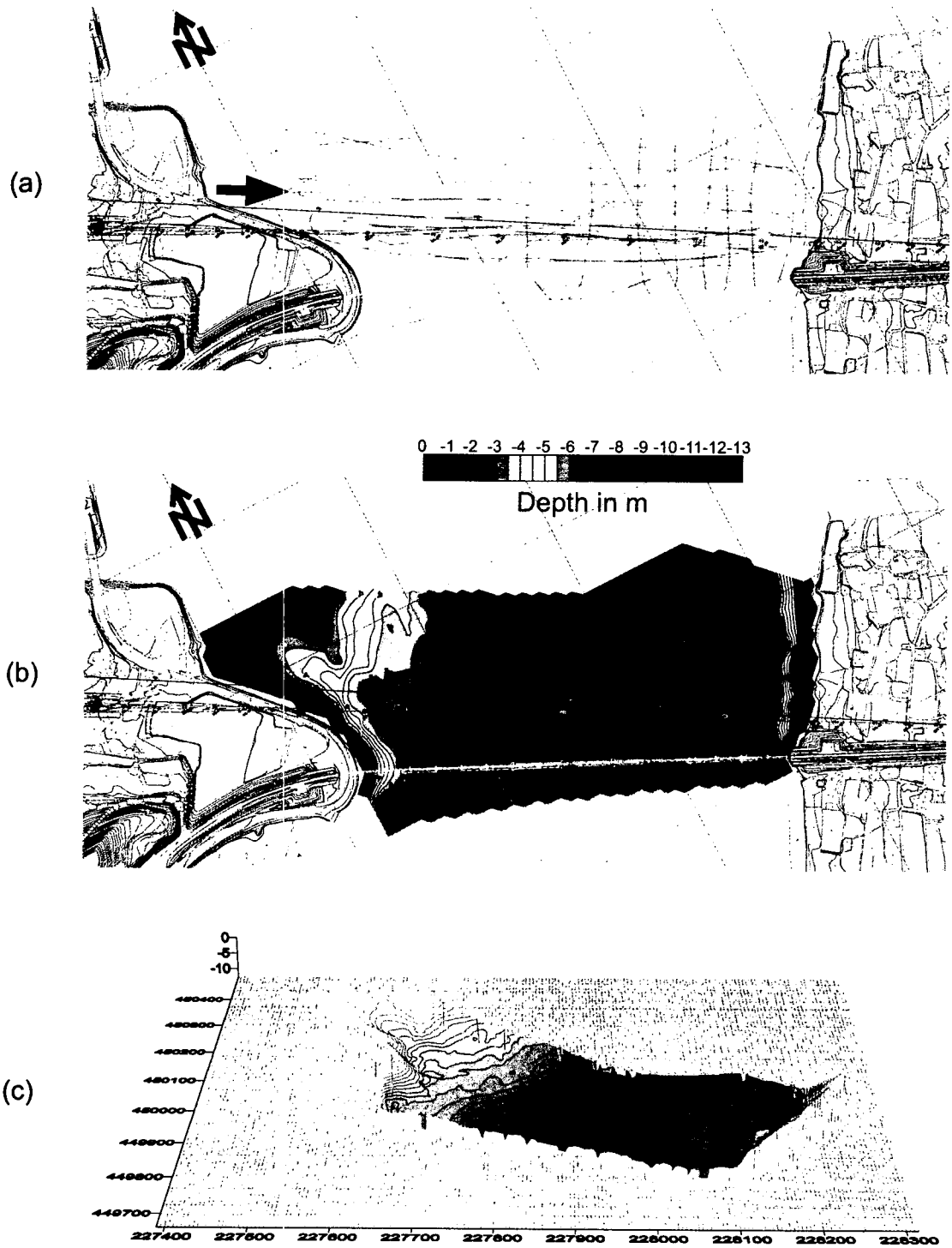


그림 3. 수면 탄성파반사법에 의한 하저경계면 규명. (a) PDGPS에 의해 추적된 탐사 측선 전모, (b) 및 (c) 하저경계면을 입체화하여 나타내고 있다.

기존 철로교각 사이를 통과할 때에는 철재의 전파 방해로 인해 큰 폭의 측위오차가 발생하였다. 그림 3(b) 및 (c)에는 하저면의 뚜렷한 반사파 도달을 이용하여 그 경계면을 입체화하여 나타내고 있다. 그림 4는 기존 철도와 평행하면서 약 20m 떨어진 측선(그림 3(a)에서 화살표로 표시)을 대상으로 얻어진 반사파 자료에 대해 전산처리(예 : AGC, Spiking Deconvolution, Muting, Depth convolution)한 결과를 나타내고 있다. 이를 위해 탄성과반사법 정규 전산처리 시스템 “FOCUS”가 사용되었다. 우선, 풍화암/연암 경계면의 연장성(화살표로 표시)이 뚜렷이 관찰되고 있으며 더구나 그 경계면의 상·하부 암층도 세분화되고 있음을 볼 수 있다. 나아가서, 각 경계면 연장의 일관성을 띤 단절은 절리 내지 소단층의 존재를 잘 반영하고 있으며 특히 재현된 하저경계면의 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. 상기 암반상태는 대체로 측선에 인접한 시추공의 자료와 훌륭한 대조를 보여주었으며 부분적으로는 오히려 시추 데이터의 불확실성을 보완하는 것이 되었다.

3. 결 론

수심이 낮은 하천, 호수 및 항만 등을 대상으로 하는 수면 탄성과반사법은 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 $2 \times$ 수심)는 그만큼 낮아지게 되며 이에 부가하여 발생원의 주파수가 낮아지게 되면(대체로 $f < 1000\text{Hz}$) 수중 내의 다중 반사가 탄성파기록에서 지배적으로 발달되어 소기의 탐사목적 상실하게 되는 경우가 허다하다. 따라서, 본 논문의 주요 내용은 우선 발생원 파형의 고주파수화와 그에 따른 수신기능의 극대화, 발생원-수진기 배열의 최적화 및 위치 측정의 고정밀화에 따른 기술 축적 내지 다양한 요소기술 개발과정을 서술하고 나아가서 그로 인한 새로운 측정시스템의 효율성이 국내 현장실험을 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 수신기에 해당하기 때문에 그의 탁월한 수신기능은 비록 부머발생원이 비교적 약한 에너지를 방사하더라도 반사파의 도달을 고분해능으로 취득하게 하였다. 이와 병행하여 시도된 방사형 발생원-수진기 배열은 무엇보다 수면에서 발생하는 여러 가지 불필요한 탄성과 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 탄성과반사법의 국내 자립화는 향후 하천은 물론 호수 및 항만에서 대두되는 환경 오염문제 및 제반 지반조사 분야에서 상당한 기여를 할 것으로 사료된다.

4. 참고 문헌

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, S.271 ff.

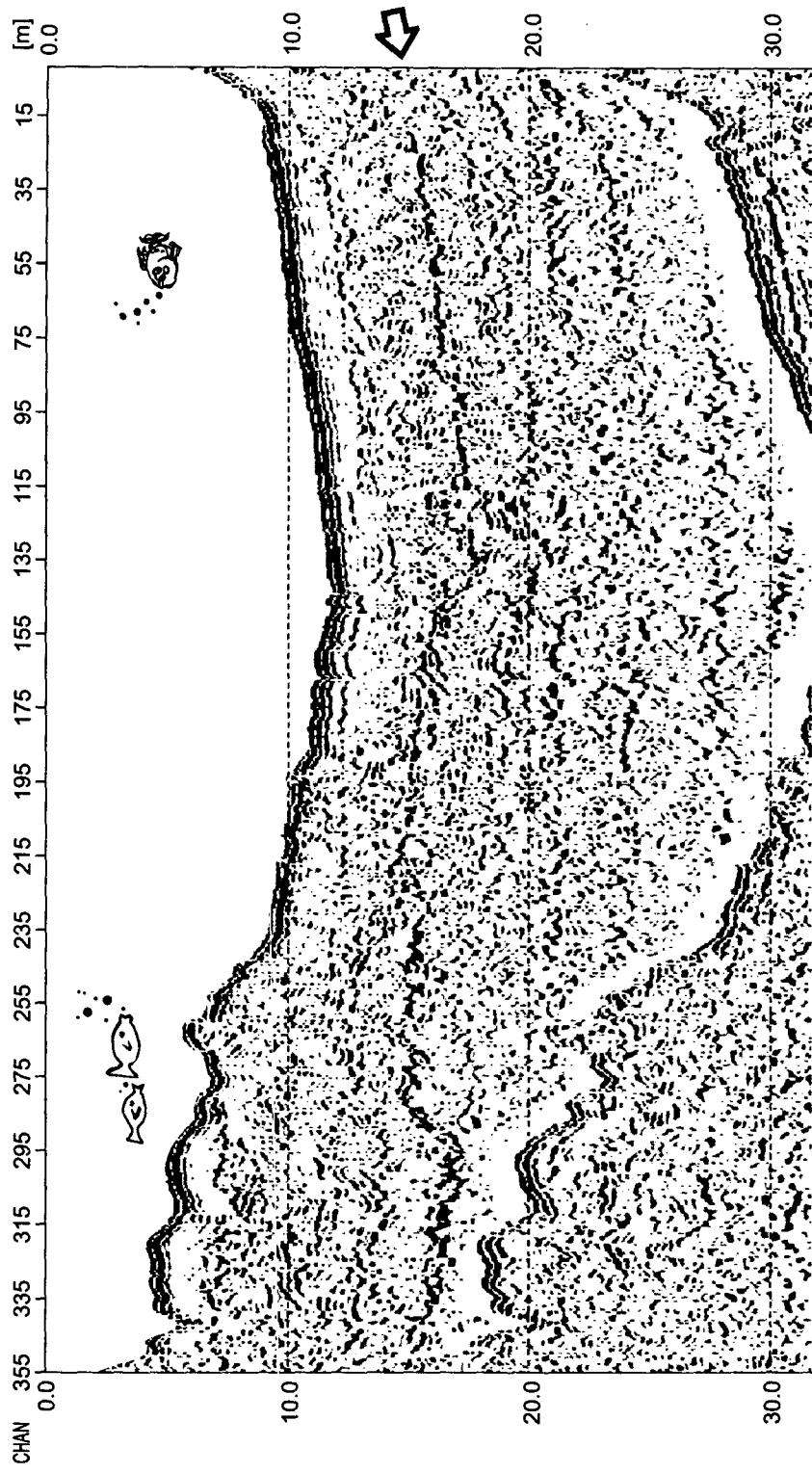


그림 4. 수면 탄성파반사법에 의한 하저 지층구조 단면도. 화살표는 풍화암/연암 경계면을 나타내고 있다. 암층은 고분해능으로 세분화되고 있음을 볼 수 있으며 또한 각 암층 경계면의 일관성을 띤 단절은 절리 등에 대한 정보를 제시하고 있다. 특히, 하저경계면의 미소단절은 그와 인접한 암층상태외도 잘 대조되고 있다. 이러한 결과는 단순히 수심 측정을 위해서라도 훌륭한 자료가 되고 있다.