

조간대 지역에서의 고해상 탄성과 탐사를 위한 파원 특성 분석

홍종국* · 김기영** · 김한준*

*한국해양연구소 해양지질연구단 · **강원대학교 지구물리학과

요 약

조간대 지역의 고해상 반사법 탐사에 적합한 탄성과 파원을 밝히기 위하여, 이동식 진동기, 1.2 kg 스패너, 4.7 kg 해머, 30 kg과 100 kg 중력추 등 모두 5 종류의 파원을 워커웨이 방식으로 시험하여 파원의 특성을 구명하였다. 원시자료 및 고주파 통과필터 적용 후의 자료를 이용하여 파원에 따른 탄성과 이벤트들의 수직분해능을 분석하였으며, 고해상 탄성과 탐사에 적합한 파원을 결정하기 위하여 파원별로 발생에너지 및 주파수 성분의 변화를 비교하였다. 분석결과에 의하면 20-30 m 정도의 천부 지층을 상세하게 구명하기 위해서는 주파수 대역이 가장 넓고 고주파 성분을 많이 발생시키는 이동식 진동기가 가장 적합한 것으로 나타난다. 반면 대상심도가 100 m 까지 증가하는 경우, 해머가 효과적인 파원으로 사용될 수 있을 것으로 분석된다.

주요어: 고해상 반사법 탐사, 탄성과 파원, 조간대, 워커웨이, 이동식 진동기

Hong, Jong Kuk, Kim, Ki Young, and Kim, Han-Joon, 1999, Analysis of source characteristics for high-resolution seismic surveys on a tidal flat. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 2, n. 2, p. 100-110.

ABSTRACT: In order to find a good seismic source for high-resolution reflection surveys on a tidal flat, characteristic features of several sources were examined through test recording by the walkaway configuration. The sources comprise portable vibrator, 1.2 kg monkey spanner, 4.7 kg sledge hammer, and weight drops with a 30 kg and a 100 kg iron ball, respectively. We analyzed raw and filtered seismic data for the resolution of individual events, then compared various seismic sources to define suitable one for the high-resolution survey in terms of energy level and frequency contents. The study reveals that the portable vibrator is the most suitable source for the detection of and imaging geologic structures less than 20-30 m deep in a tidal flat. We ascribe this to the wide frequency band and high-frequency contents of the portable vibrator. In contrast, the hammer may be an alternative where the target depth increases up to 100 m.

Key words: high-resolution reflection survey, seismic source, tidal flat, walkaway, portable vibrator

(Hong, Jong Kuk and Kim, Han-Joon, Marine Geology and Geophysics Division, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, 425-600, Korea; Kim, Ki Young, Department of Geophysics, Kangwon National University, 192-1 Hyoja-2-dong, Chunchon, 200-701, Korea. email: jkhong@kordi.re.kr)

1. 서 론

고해상 탄성과 탐사는 천부의 지질구조를 상세하게 밝히기 위한 탐사방법으로서 주로 건설, 토목, 지하수 조사 등에 기초자료를 제공하는 지질

공학적인 목적으로 활발하게 수행되고 있다(Hunter et al., 1984; Steeples-Miller, 1990). 고해상 탄성과 탐사시 탐사목적에 적합한 지층의 분해능, 투과심도 등을 만족시키기 위해서 탄성과 파원, 수신기, 기록 장비 등을 신중하게 선택하여야 한다. 특히

탄성과 파원은 종류에 따라 발생하는 탄성과 에너지의 크기 및 주파수 대역의 차이가 심하므로 탐사목적에 적합한 결과를 얻을 수 있는 파원을 선택하여야 한다.

일반적으로 양호한 탄성과 파원의 조건으로는 탐사목적에 적합한 가탐심도, 평탄한 진폭스펙트럼 및 넓은 주파수 대역, 높은 신호대 잡음비 등이다(Ziolkowski, 1980). 지금까지 알려진 파원에 대한 정량적인 파원비교를 위하여 SEG (Society of Exploration Geophysicists) 위원회에서는 몇 차례의 장비시험을 수행하여 탐사지역에 따라 파원의 에너지 및 주파수 분포를 밝힌 바 있다(Miller et al., 1986; Miller et al., 1992; Doll et al., 1998). 탄성과 파원에 대한 탄성과 에너지 및 주파수 특성은 파원의 종류뿐만 아니라 탐사지역의 지질학적 환경에 따라서도 변한다. 그러므로 특정지역의 탄성과 탐사에 적합한 파원을 선택하기 위해서는 그 지역에서 파원의 성능비교를 위한 시험탐사가 필요하다.

우리나라 서해안에는 준육상 환경인 조간대가 많이 발달되어 있다. 이 지역에서 수행되고 있는 각종 토목 및 건설활동에 필요한 지질정보 뿐만

아니라 환경오염 및 기후변화의 연구에 필요한 기초정보를 제공하기 위해서는 고해상 탄성과 탐사를 통한 현생 퇴적물의 층서 해석과 기반암 분포 파악이 필수적이다. 이번 연구에서는 조간대 지역에서 고해상 탄성과 탐사를 수행하기 위한 기초연구의 일환으로 고해상 탄성과 탐사에 사용되는 몇 가지 파원들의 특성을 비교 분석하였다. 이번 시험에 사용한 탄성과 파원은 진동식 파원(vibratory source) 1 종류와 충격파원(impulse source) 4 종류이며, 이들을 이용하여 조간대 지역과 유사한 지질환경을 갖고 있는 지역에서 자료를 획득하고 파원별로 각각의 에너지 및 주파수 특성을 비교 분석하였다.

2. 시험자료 획득

2.1. 지질환경

시험자료를 획득한 지역은 경기도 안산시 한국해양연구소 앞에 위치한 곳으로 시화호의 상류 지역이다(Fig. 1). 조사지역은 시화 방조제 완공 이전에는 평균 대조차가 약 7.5 m로 큰 조수간만 차이로 인한 조간대가 넓게 발달한 곳이다. 방조제의

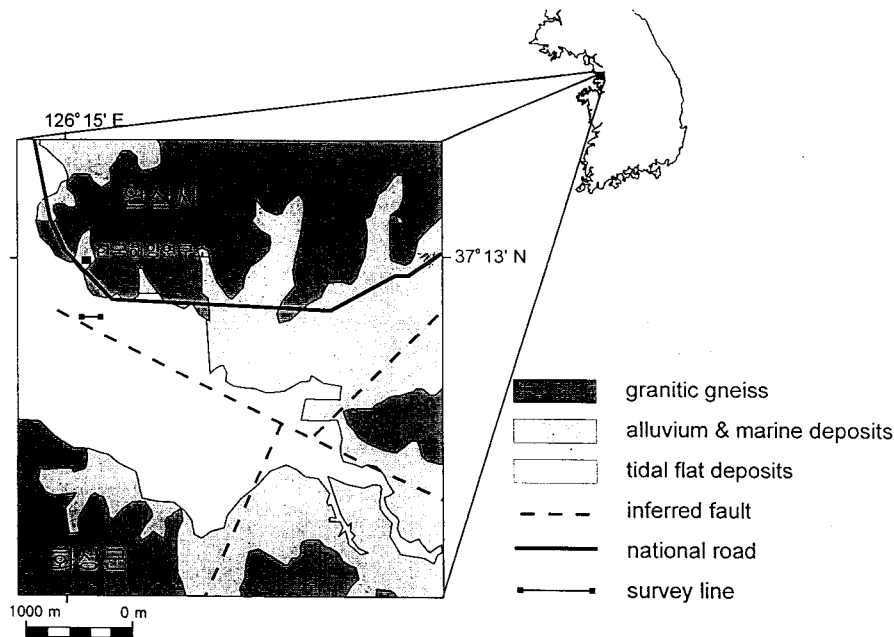


Fig. 1. Simplified geologic map showing the seismic test line.

건설 이후에는 환경오염문제로 인하여 방조제 수문을 통한 해수의 유입 및 방출을 계속하고 있으나, 현재는 조수간만의 차이가 거의 없는 지역으로 변화하였다. 이 시험조사지역은 과거 조간대에 형성된 퇴적물이 거의 원형 그대로 보존되어 있으며 지표 부근에 지하수가 위치하여 연약한 상태를 유지하고 있다. 따라서 간조시의 조간대 환경과 거의 유사하다.

남양도폭(박노영·김정환, 1972)에 의하면 조사지역 주변은 전지역에 걸쳐 화강편마암의 기반암이 하부에 위치하고, 저지대에는 기반암 위에 제4기 충적층 또는 조간대 퇴적물로 덮여 있으며 조간대 퇴적물은 주로 점토 및 빨질로 이루어져 있다. 기반암의 깊이는 이 지역에 대한 시추조사 자료를 구할 수 없어서 정확히 알 수는 없으나, 이번 연구에서 획득된 시험자료의 반사파를 분석한 결과 약 25 m 하부에 속도 3000 m/s 이상의 기반암이 존재하는 것으로 분석된다. 조사주변 지역의 주요한 구조선으로는 동쪽부터 이어져 오는 동서방향의 예상 단층선이 존재한다.

2.2. 자료획득

파원의 에너지 및 주파수 특성은 지질학적인 환경뿐만 아니라 자료획득 변수에 따라 다르게 나타날 수 있으므로, 각각의 파원에 대한 탄성과 자료 기록 시 동일한 수신기, 기록장비 및 획득변수를 적용하였다. 탄성과 기록장비로는 48채널을 기록할 수 있는 OYO DAS-1 시스템을 이용하였다. 이 시스템은 24 비트 수치화 시스템을 사용하여 변환된 정밀한 디지털 자료를 SEG-1, SEG-2 및 SEG-D 포맷 등으로 기록하는데(OYO instruments, 1997), 시험자료 획득시에는 SEG-2 포맷으로 저장하였다. 탄성과 신호는 심도 100 m 부근에 존재하는 지층까지도 감지할 수 있도록 발파 후 0.2초간 기록하였으며, 고주파 성분을 충분히 기록하기 위하여 샘플간격을 0.25 ms도 정하였다. 수신기로는

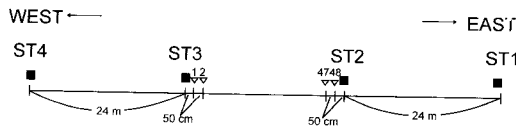


Fig. 2. Schematic diagram for the walkaway profile. ST1, ST2, ST3, and ST4 indicate the shot points.

Table 1. Acquisition parameters for field test.

Geometry	End-on
Receiver	100 Hz Geophone
Number of channels	48
Record length	200 ms
Sampling interval	0.25 ms
Receiver interval	0.5 m
Low-cut filter	3 Hz
Vibrator sweep length	4 s
Vibrator record length	4.2 s
Sweep frequency	50-600 Hz linear

100 Hz 지오폰을 사용하였으며, 48개의 지오폰을 50 cm 간격으로 동서방향으로 배열하였다. 이들 자료획득 변수들을 정리하면 Table 1과 같다.

탄성과 특성을 분석하기 위하여 반사파, 굴절파 등의 탄성과 신호와 일관성 잡음(coherent noise) 및 무작위 잡음(random noise) 등이 포함된 워커웨이(walkaway) 자료를 파원별로 획득하였다. 워커웨이 자료의 획득방법은 Fig. 2와 같이 동서방향으로

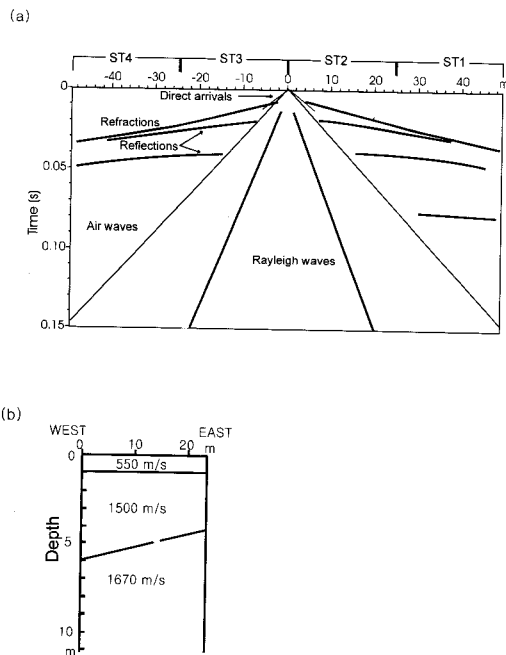


Fig. 3. (a) Schematic diagram for seismic waves shown in the walkaway data and (b) the interpreted cross-section using critically refracted waves.

배열된 수신기의 동쪽과 서쪽방향으로 각각 2개 지점에서 발파한 후 탄성과 기록을 합하여 위커웨이 자료를 구성하였다. 일반적으로 천부 탄성과 자료획득에서 수직중합을 통하여 잡음을 제거시키지만, 이러한 수직중합은 고주파 성분을 손상시켜 파원의 특성을 제대로 반영하지 못하므로(Doll *et al.*, 1998) 사용하지 않았다.

2.3. 위커웨이 자료해석

위커웨이 자료를 이용한 개략적인 지질구조 해석은 다음과 같다. Fig. 3은 여러 개의 파원들을 이용하여 획득한 위커웨이 자료를 종합하여 나타난 탄성파들을 모식적으로 나타낸 것이다. 굴절과 자료를 역행주시법(Hawkins, 1961; Palmer, 1986)으로 해석한 결과, 약 550 m/s의 속도를 갖는 1 m 두께의 사질토층 하부에 물에 포화된 빨질로 추정되는 속도 약 1500 m/s 정도의 층이 존재한다. 이 층은 지오폰 설치 지역의 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 6 m에서 4 m 정도의 깊이까지 존재하며, 이 층의 하부에는 약 1670 m/s의 P파 속도를 갖는 매질로 이루어져 있는 것으로 분석된다.

3. 탄성과 파원

파원시험에 이용된 장비로는 OYO사의 이동식 진동기(portable vibrator)와 충격파원인 스페너(1.2 kg), 4.7 kg 해머(sledge hammer), 30 kg 및 100 kg 중력추 등 모두 5 종류이다. 각각의 파원에 대한 개요는 다음과 같다.

3.1. 이동식 진동기

진동식 파원인 OYO사의 이동식 진동기는 스윙(sweep) 방식의 진동에너지를 발생시키는 파원으로, 20-1500 Hz의 비교적 고주파수의 탄성파를 발생시킬 수 있다. 일반적으로 널리 알려진 진동식 파원인 Vibroseis나 IVI 사의 MiniVib 등은 장비가 크고 무거워서 조간대와 같이 차량이동이 어려운 지역에서는 운용이 사실상 불가능하다. 반면 이동식 진동기 시스템은 천부 탄성과 탐사에 적용할 수 있도록 제작된 파원으로, 진동자(vibrator)의 중량은 사람에 의해 운반이 가능한 70 kg 정도이다. 이 시스템은 진동자, 전원공급용 발전기, 스윙 신호증폭기, 스윙 조절기 및 기타 연결 케이블로 이루어져 있다. Ghose *et al.* (1998)은 이 시스템을 이용하여 조간대를 비롯한 지역에서 천부 탄성과

탐사를 수행하여 천부의 지층 및 지하수면을 상세하게 구명한 바 있다. 시험자료 획득시 스윙의 범위를 50-600 Hz로 하고 이 구간 내에서 주파수가 선형으로 증가하도록 발생시켰다.

3.2. 스페너

충격파원으로 해머 대신에 공구의 일종인 1.2 kg의 스페너(일명 몽키스패너)를 이용하였다. 이 파원은 일반적으로 사용되는 탄성과 파원은 아니지만 조간대 상부의 지층구분에 이용가능한지 여부를 알아보기 위하여 이번 연구에 적용하였다. 발파점 바로 옆에 지오폰을 설치하여, 스페너를 칠 때 발생된 신호를 바로 감지한 후 이것을 기록계에 전하여 시작신호로 이용하였다.

3.3. 해머

고해상도 탄성과 탐사시 충격파원으로서 사용하기 쉽고 비교적 강한 에너지를 발생시켜 널리 이용되는 파원중의 하나가 해머이다. Doll *et al.* (1998)는 해머가 100 m 이내의 지층을 구분해 낼 수 있는 능력을 지닌 양호한 파원이라고 평가하였으며, 김기영·김현규(1997)는 해머를 파원으로 강원도 풍암퇴적분지 경계구조를 어론리 부근에서 100 m 이상의 깊이까지 구명하였다. 시험탐사시, 4.7 kg의 해머를 지표에 놓인 알루미늄 판에 타격함으로써 에너지를 발생시켰으며, 기록의 시작을 나타내는 시작신호는 해머에 부착된 스위치를 이용하여 발생시켰다.

3.4. 중력추

중력추는 중량이 있는 물체를 낙하시켜 탄성파를 발생시키는 충격파원의 한 종류이다. 이 파원 시험에 사용된 장비는 강원대에서 자체 제작한 것으로 철구를 2.7 m의 높이에서 철판으로 자유낙하시킴으로써 탄성파를 발생시킨다. 김현규·김기영(1998)은 이 중력추를 파원으로 강원도 풍암퇴적분지 경계구조를 수하리 부근에서 400 m 깊이까지 구명하였으며, 이 호에 게재된 김기영·허식(1999)은 이 자료를 층서퇴적학적 측면에서 해석하여 층서양태를 구명하였다. 이번 시험에는 무게가 각각 30 kg과 100 kg인 두 종류의 철구를 사용하였으며, 기록계에 전해지는 시작신호는 스페너와 동일한 방법으로 발생시켜 사용하였다.

4. 위커웨이 자료분석

위커웨이 방식은 탄성과 신호와 잡음의 특성을 파악하는데 사용하는 통상적인 방법으로 야외 획득변수 결정에 주로 이용된다(Sheriff, 1984). 획득한 위커웨이 자료의 처리 순서를 요약하면 다음과 같다. 야외에서 획득된 SEG-2 자료를 SEG-Y 포맷으로 변환한 후, Seismic Unix 소프트웨어(Cohen-Stockwell, 1997)를 이용하여 발파시 발생한 발파 지연을 정보정하여 굴절파가 연속성을 갖도록 하였다. 파원에 따른 탄성과 특성은 3 Hz의 차단주파수(cut-off frequency)를 갖는 기록장비로 획득한 원시자료(raw data)와 200 Hz의 저주파 차단필터를 적용한 자료에 대하여 각각 비교하였다. 자료 도시를 위하여 0.02초의 AGC를 적용하였다.

4.1. 원시자료

원시자료에서 나타난 파원별 탄성과 특성은 다음과 같다.

4.1.1. 이동식 진동기

Fig. 4a는 진동식 파원인 이동식 진동기를 이용하여 획득한 원시자료이다. 오프셋(offset) 거리 10 m 이내에 위치한 천부 반사파 신호는 직접도달파, 굴절파, 공기파, 레일리파에 의한 간섭으로 인하여 경계면이 뚜렷이 구분되지 않으며, 거리 20 m 이후의 자료에서는 반사파 신호들이 발견된다. 발파 점이 동쪽에 위치한 자료(ST1, ST2)에서는 반사파가 명확히 나타나지 않는 반면 서쪽 자료는(ST3, ST4) 반사파가 잘 나타난다. 또한 오프셋거리 -40 m에서 -25 m 구간의 왕복주시 0.11초부터 0.13초 사이에 음(-)의 속도를 갖는 이벤트가 나타나며 이와 같은 이벤트들이 단면의 다른 영역에서도 발견된다. 이와 같은 이벤트들은 탐사지역 주변에서 연습 중이었던 소형 항공기, 도로를 지나가는 차량, 및 이동식 진동기의 전기공급을 위한 발전기 등에 의한 주변잡음으로 해석된다.

4.1.2. 스페너

스패너를 사용하여 획득한 원시자료인 Fig. 4b의 경우 굴절파의 연속성이 양호하다. 서쪽자료에는 주변잡음으로 추정되는 음의 속도를 갖는 신호가 강하게 기록되어 있다. 전체적으로 왕복주시 0.06초 이후부터는 반사파 신호가 다른 음원에 비하여 미약하게 나타나므로 0.06초 이하의 비교적 심부구조를 명확히 밝히기 위하여서는 스페너 이외의 다른 음원을 사용하는 것이 적절할 것이다.

4.1.3. 해머

Fig. 4c는 해머를 사용하여 획득한 자료로서, 이동식 진동기를 이용하여 획득한 자료와 비교할 때 직접 도달파, 굴절파, 반사파의 연속성이 양호함을 보여준다. 10 m 이내의 자료에서는 이동식 진동기 자료와 마찬가지로 반사파를 굴절파, 레일리파로부터 구분하기 어렵다. 거리 20 m 이후의 자료에는 반사파 혹은 다중반사파로 추정되는 신호가 0.1초까지 나타나고 있다.

4.1.4. 30 kg 중력추

Fig. 4d에 제시된 30 kg 중력추 자료는 다른 자료와 마찬가지로 오프셋거리 10 m 이내에서 굴절파 이후에 나타나는 반사파의 구분이 용이하지 않다. 반면 거리가 35 m 이상인 기록에서는 0.05초 부근에 반사파로 추정되는 신호가 강하게 나타난다. 공기파의 파형이 다른 파원보다 길게(약 15 ms 가량) 나타나, 탄성과 에너지가 공기 중으로도 많이 전달되고 있음을 보여준다. 또한 중력추가 지면에 떨어져서 생기는 레일리파와 평행하게 보이는 파들이 기록되어 있는데, 같은 위상속도를 갖는 점으로 미루어 중력추 낙하 이전에 중력추를 낙하 위치까지 끌어올리는 과정에서 발생한 저주파수 레일리파가 발생되어 지면을 따라 전파한 것으로 추정된다.

4.1.5. 100 kg 중력추

Fig. 4e는 100 kg 중력추 자료로, 30 kg의 중력추를 사용하여 구한 자료와 유사하지만 파원을 ST 3에서 발생시킨 경우 파원 작동이 불량하여 잡음이 많이 기록되었다. 서쪽방향 자료는 주파수 성분이 매우 낮는데 반하여, 동쪽방향 자료는 고주파의 신호들이 선명하게 기록되어 대조적인 모습을 보인다. 30 kg의 중력추의 경우와 마찬가지로 저주파수 레일리파가 뚜렷이 기록되어 있다.

4.2. 주파수 필터적용

원시자료는 저주파 성분이 많이 포함되어 반사파의 경계면을 정확히 구분하기 힘들다. 자료에 존재하는 천부 반사파들을 상세하게 구분하기 위한 목적으로 야외획득자료에 0.02초의 AGC를 적용한 후, 200 Hz 이상의 고주파 성분만을 통과시키기 위하여 150 Hz부터 200 Hz 사이에 선형 기울기를 갖는 저주파 차단필터를 적용하였다. Fig. 5에 제시된 필터적용 후의 결과를 고찰해 보면 적

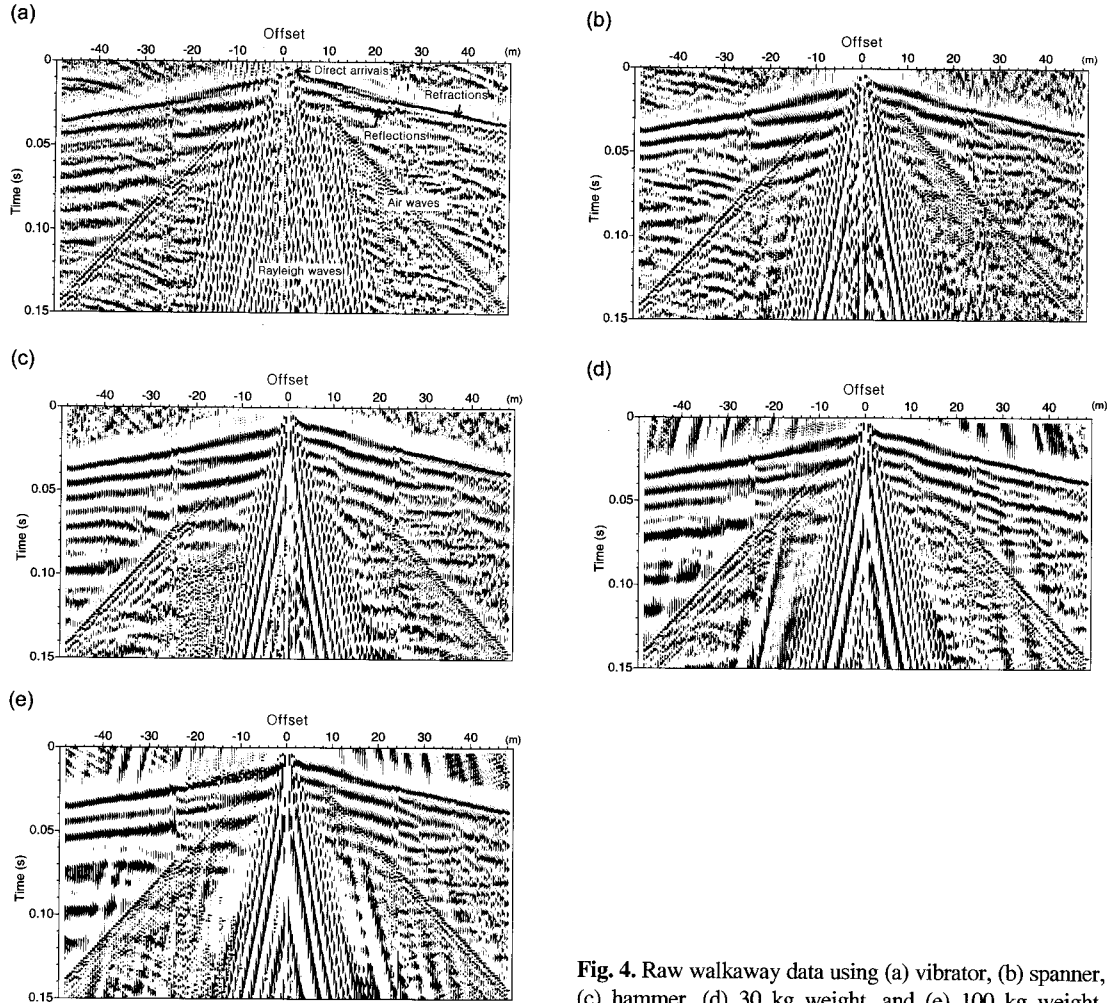


Fig. 4. Raw walkaway data using (a) vibrator, (b) spanner, (c) hammer, (d) 30 kg weight, and (e) 100 kg weight.

용전의 자료와 비교하여 다음과 같은 변화가 관찰되었다.

4.2.1. 이동식 진동기(Fig. 5a)

거리 10 m 이하, 왕복주시 약 0.03초 이내의 자료에서 필터 적용 전에 구분이 힘들던 반사파들이 잘 드러난다. 반면 왕복주시 0.03초 이하에 존재하는 반사면들은 주변 잡음으로 인하여 연속성이 불량한 모습을 보인다. 윗셋거리 40 m에서 -40 m 구간의 왕복주시 0.15 - 0.5초 하부에는 음의 속도를 갖는 이벤트들이 많이 나타나는데, 이는 주로 지오폰의 동쪽방향에 있었던 발전기에 의한 잡음으로 추정된다.

4.2.2. 스패너(Fig. 5b)

0.03초 이내의 반사파 신호는 이동식 진동기 자료와 유사한 분해능을 갖는 것으로 관찰되나, 0.03초 이후의 기록에서는 반사파의 구분이 힘들다. Fig. 3b의 지층단면구조를 가정하면 왕복주시 0.03초는 약 심도 20 m 정도에 해당하므로, 스패너는 약 20 m 이내의 천부 퇴적구조를 비교적 명확하게 구명할 수 있지만 보다 심도가 깊은 조간대 하부구조 및 기반암까지 연구하기에는 불충분한 것으로 분석된다.

4.2.3. 해머(Fig. 5c)

필터 적용전보다는 천부지층의 반사파들이 명확

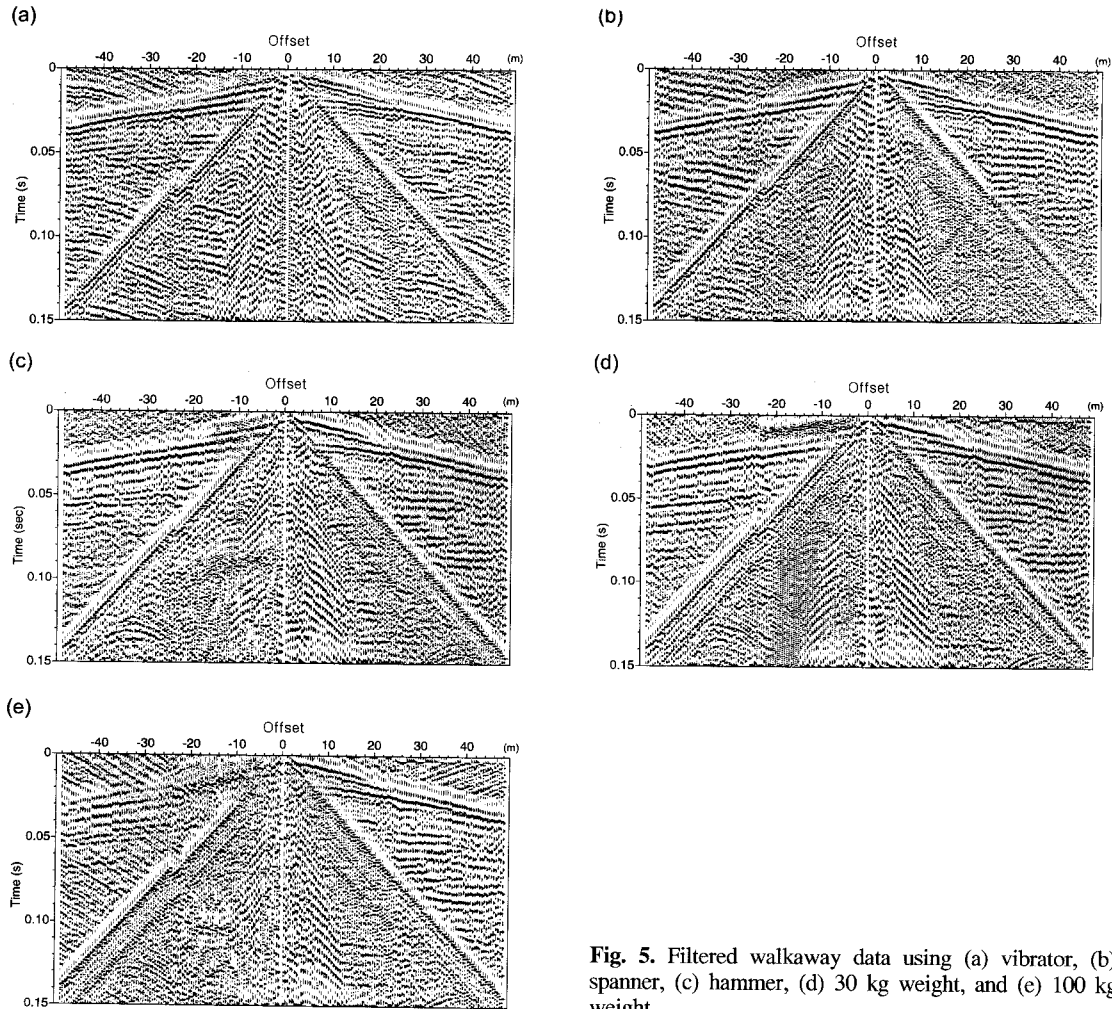


Fig. 5. Filtered walkaway data using (a) vibrator, (b) spanner, (c) hammer, (d) 30 kg weight, and (e) 100 kg weight.

히 드러나지만, 이동식 진동기 자료에 비하여 왕복주사 0.03초 이내의 자료에서는 수직해상도가 다소 떨어지는 양상을 보인다. ST 3에서 획득한 자료의 경우 거리 12 m 이내에서 잡음이 많이 발생하여 0.02초 상부에 존재하는 천부 지층 경계면이 불분명하게 나타났다. 반면, ST1 및 ST2의 자료에서 0.05초 이후의 심부 반사파는 이동식 진동기 자료보다 양호하게 드러난다.

4.2.4. 30 kg 중력추(Fig. 5d)

30 kg의 철구를 사용한 결과는 0.03초 이내의 천부 반사층의 분해능이 이동식 진동기 자료에 비하여 불량한 반면 0.05초 이후에 나타나는 비교적

심부의 반사파는 다른 파원들 보다 명확하게 드러난 모습을 보인다. 아울러 필터 사용 전의 원시자료에 기록된 레일리파들이 크게 감소되었으며, 특히 시작신호 이전의 레일리파들은 거의 사라진 모습을 보인다.

4.2.5. 100 kg 중력추(Fig. 5e)

100 kg의 추를 이용한 경우에는 서쪽 방향의 천부 자료가 불량하게 나타나며, 0.03초 이내에 존재하는 천부 반사파 또한 30 kg 추를 사용한 자료에 비하여 연속성이 불량하다. 그러나 읍셋거리 10-20 m 부근에서 레일리파와 함께 기록된 0.10-0.15초 사이에 기록된 이벤트는 에너지 투과는 어

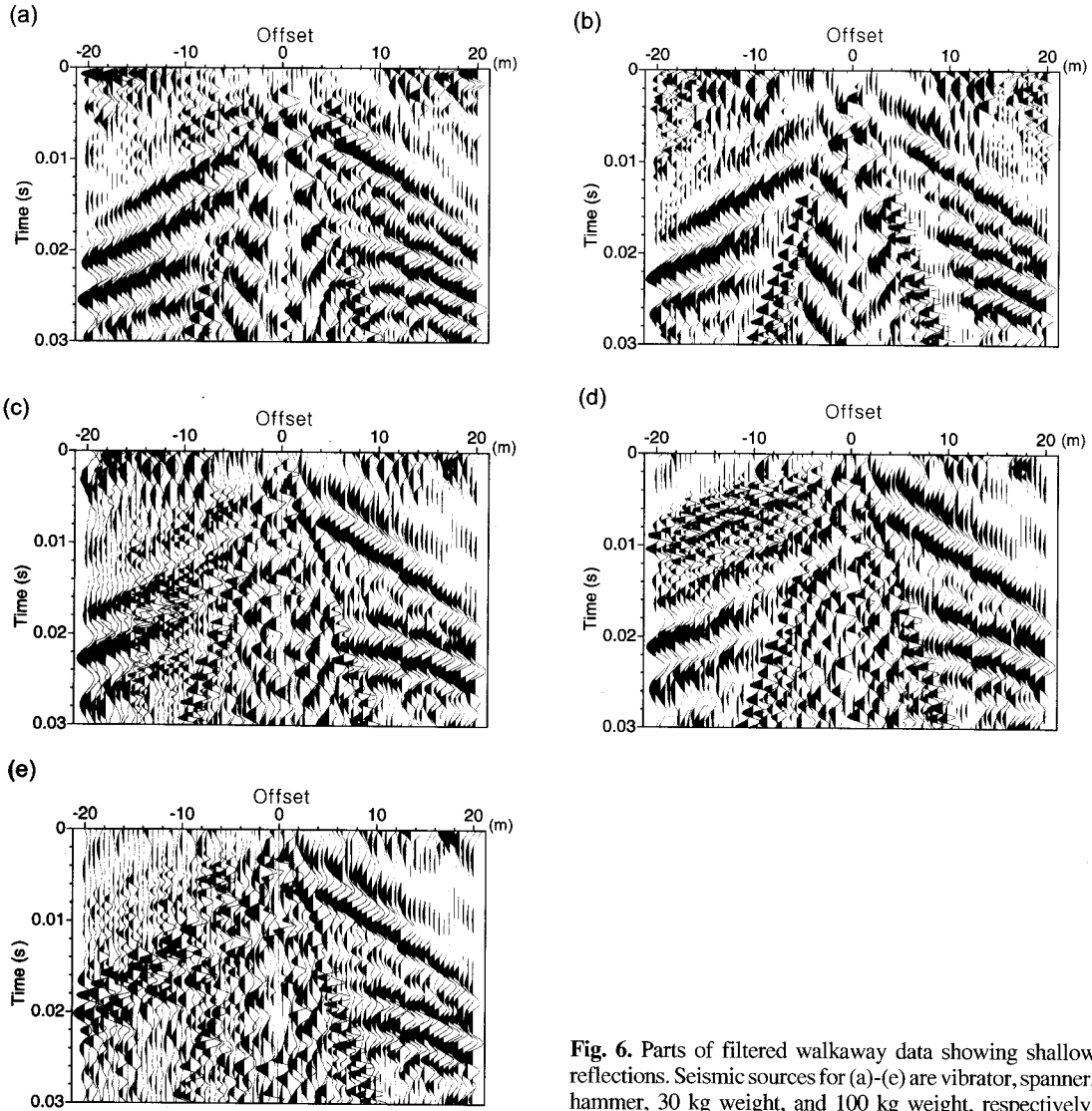


Fig. 6. Parts of filtered walkaway data showing shallow reflections. Seismic sources for (a)-(e) are vibrator, spanner, hammer, 30 kg weight, and 100 kg weight, respectively.

는 파원보다도 가장 깊이까지 이루어 지고 있음을 보인다.

4.3. 천부 반사파의 분해능

조간대 지역의 현생 퇴적환경을 연구하기 위해서는 천부 지층에 대한 높은 분해능을 갖는 파원이 필요하다. Fig. 6은 천부에 존재하는 지층의 분별능력을 알아보기 위하여 왕복주시 0.03초 이내 (깊이 약 20 m 이내)의 자료를 파원별로 확대하여 나타낸 것이다. 적용된 필터는 Fig. 5와 마찬가지로 150 Hz부터 200 Hz 사이의 선형기울기를 갖는

저주파 차단필터를 적용하였다. 단면에서 구분 가능한 지층 수는 발파지역(ST2, ST3) 및 파원에 따라 다르게 나타난다. ST2에서 발파한 자료(울셋거리 0-20 m)에서는 구분 가능한 반사면의 수가 이동식 진동기의 경우 6개, 스패너와 해머의 경우 5개, 중력추 파원에서는 4개 정도로 분석된다. ST3에서 발파한 자료(울셋거리 -20-0 m)는 ST2 자료에 비하여 구분이 가능한 천부지층의 수가 적으며, 이동식 진동기 자료에서는 4개의 반사면을 구분할 수 있으나, 다른 종류의 파원에서는 3개 정도만이 구분 가능하다. 이상의 결과를 종합하면

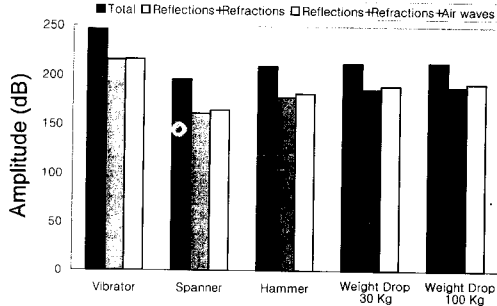


Fig. 7. Measured seismic energy for various seismic sources.

천부지층에 대한 분해능은 발파지역의 변화에 관계없이 이동식 진동기가 가장 우수한 것으로 분석된다.

5. 파원 특성 분석

5.1. 에너지 변화

파원에 따른 탄성과 에너지의 변화를 알아보기 위하여 획득자료의 포락선을 구하고 탄성과 영역 별로 포락선 값을 합하여 에너지 값을 구하였다. 탄성과의 영역은 Fig. 3a에 나타난 탄성과의 구분을 기준으로하여 전체 자료의 값을 이용한 전체 영역, 공기파 영역 직전의 값만을 이용한 반사파와 굴절파 영역, 공기파까지 값만을 이용한 반사파, 굴절파 및 공기파 영역의 세 가지로 구분하였으며, 각각의 영역에 대하여 파원별 에너지 변화를 구하였다. Fig. 7은 에너지의 변화를 나타낸 것으로 파원에 따른 반사파 및 굴절파 에너지는 이동식 진동기일 경우에 가장 크고, 100 kg 중력추, 30 kg 중력추, 해머, 스패너의 순서로 에너지가 약해진다. 이와 같은 에너지 변화는 레일리파를 제외한 경우에서도 유사하게 나타나고 있다. 이동식 진동기의 경우 다른 파원보다 에너지가 특징적으로 크게 나타나는데, 이는 파원을 장시간(약 4초간) 작동시켜 스윌 에너지를 발생시켰기 때문인 것으로 해석된다.

5.2. 주파수 성분변화

파원에 따른 주파수의 성분 변화는 굴절파와 반사파를 포함하고 있는 자료에 대하여 고찰하였다. Fig. 8은 ST4에서 획득한 자료에서 파원과 수진기

의 거리 40-43 m 사이의 기록 중, 왕복주시 0.1초 이내의 자료에 대하여 푸리에 변환을 수행한 후, 이를 파원별로 정규화하여 dB 단위로 나타낸 것이다.

5.2.1. 이동식 진동기

최대값을 기준으로 -30 dB 이상의 진폭을 갖는 주파수 구간은 20 Hz에서 417 Hz 이내로 그 폭이 약 400 Hz 범위에 걸쳐 넓게 나타나고 있으며, 600 Hz에서도 -42 dB로 기록되어 상당량의 에너지가 존재하는 것으로 분석된다. 그러나 자료획득

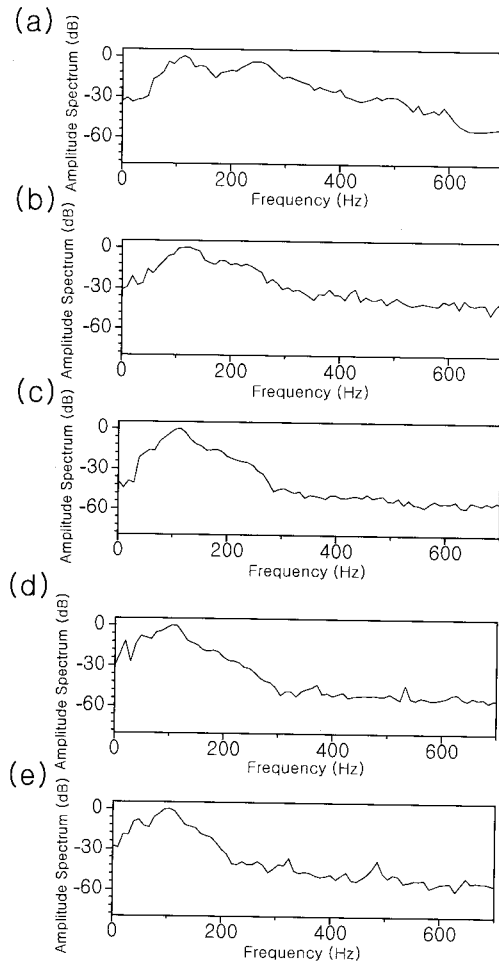


Fig. 8. Frequency contents of various seismic sources; (a) vibrator, (b) spanner, (c) hammer, (d) 30 kg weight, and (e) 100 kg weight, respectively.

Table 2. List of source evaluation.

	PV	Hammer	Spanner	30 kg weight	100 kg weight
Energy source	1	4	5	3	2
Frequency content	1	2	3	4	5
Cost	5	2	1	3	4
Site preparation	5	2	1	3	4
Cycle time	3	2	1	4	5
Environmental damage	2	3	1	4	5
Portability	3	2	1	4	5

당시 스윙 주파수를 600 Hz 까지로 설정하였기 때문에 그 이상의 고주파 성분은 잘 나타나지 않고 있다.

5.2.2. 스패너

-30 dB 이상의 주파수 범위가 7 - 309 Hz로 이동식 진동기보다는 적으나, 다른 충격파원보다는 넓게 나타났다. 특히 300 Hz 이상의 비교적 고주파 영역은 해머에 비하여 상대적으로 많은 에너지를 발생시키는 것으로 분석된다.

5.2.3. 해머

-30 dB 이상의 주파수 범위가 34 - 254 Hz로 이동식 진동기보다 매우 적은 주파수 범위에 대부분의 에너지가 모여 있는 것으로 분석된다. 250 Hz 이상의 고주파수 영역에서는 잡음 및 공기파의 성분으로 해석된다.

5.2.4. 30 kg 중력추

-30 dB 이상의 주파수 범위가 1 - 235 Hz로 상기 3개 파원보다 적으며, 280 Hz 이상의 영역에서는 대부분 공기파와 잡음 성분으로 추정된다.

5.2.5. 100 kg 중력추

30 kg 중력추보다도 더욱 좁은 대역을 보여주어, -30 dB 이상의 주파수 범위가 1 - 200 Hz로 나타난다. 부분적으로 고주파 성분이 크게 나타나는 것은 공기파 등에 의한 것으로 해석된다.

5.3. 파원 평가

파원을 평가하기 위한 항목으로는 파위의 에너지, 주파수 성분, 파형, 장비의 이동성, 장비의 설

치의 편이성, 반복성, 발파간격, 발파시 발생하는 환경훼손 등을 들 수 있다(Miller *et al.*, 1986). Table 2는 현장조사를 통하여 나타난 파원별 평가 항목간의 순위이다. 파원의 평가는 파원 에너지의 경우 Fig. 7에 제시된 파원별 에너지 크기, 주파수 성분의 경우 Fig. 8에 제시된 주된 주파수 스펙트럼의 폭을 기준으로 실시하였다.

6. 결론 및 토의

현생퇴적물이 분포하는 조간대와 유사한 환경에서 위커웨이 방식으로 기록한 파원별 탄성파의 특성을 시간 및 주파수 영역에서 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 이동식 진동기는 가장 넓고 평탄한 주파수를 발생시킬 수 있어, 왕복주시 0.03초 이내에 존재하는 천부 지층의 구분에 적합하다.

2) 스패너는 0.03초 이내의 천부 지층의 구분에 적합하나, 발생하는 에너지가 미약하여 20 m 이상의 심부 지층을 파악하는 데에는 부적절하다.

3) 해머는 왕복주시 0.03초 이내에 존재하는 천부의 지층구분 능력이 이동식 진동기나 스패너보다는 약하지만, 탄성파 에너지를 비교적 심부까지 전달시킨다.

4) 중력추는 추의 무게가 클수록 에너지를 많이 발생시키는 반면 주파수 영역은 오히려 좁아진다. 이 파원은 심부의 구조를 구명하는 데 적합한 것으로 판명되었다.

5) 주파수 특성은 이동식 진동기의 경우 고주파 성분을 가장 많이 포함하고 있으며, 스패너, 해머, 30 kg 중력추, 100 kg 중력추의 순서로 고주파 성분이 감소된다.

6) 파원에 따라 발생하는 에너지의 크기는 이동식 진동기, 100 kg 중력추, 30 kg 중력추, 해머, 스페너의 순서이다.

7) 그러나 이동식 진동기의 경우에 4초 가량 파원을 지속적으로 작동시키기 때문에 큰 에너지를 발생시키는 것으로, 탄성과 투과심도는 중력추에 비하여 미약한 것으로 관찰된다.

조간대 지역과 같이 지층의 속도가 1500 m/s 이상의 큰 속도를 지닌 지역에서는 높은 주파수 성분의 에너지를 발생시켜야 한다. 분해능이 필요한 곳에서는 고주파 영역까지 탄성과 에너지를 발생시킬 수 있는 파원이 필요하다. 이번 연구에서 수행한 시험탐사 결과를 종합하여 보면, 시험조사에 적용된 5 가지 파원 중 수십 m 깊이까지의 조간대 퇴적물 연구에는 이동식 진동기가 가장 적합한 것으로 판명되었다. 그러나, 이 보다 더 하부를 연구하기 위하여 이동이 간편하며 레일리파를 상대적으로 적게 발생시키는 해머가 좋을 것으로 분석되었다.

사 사

이 논문은 해양수산부에서 지원하는 ‘남극 해저 지질조사 사업 (PM99027-2)’ 연구결과와 일부임을 밝히며, 해양수산부의 연구비 지원과 강원대학교 자원개발연구소의 부분적 연구지원에 감사드립니다. 또한 추운 날씨에 시험자료 획득에 참여하여 주신 한국해양연구소 조현무 연구원, 강원대학교 우남철 석사, 그리고 김교홍, 김우혁, 이소영 대학원생에게 고마움을 표합니다. 또한, 이 논문을 심사하여 주시고 많은 의견을 주신 심사위원 두 분께 진심으로 사의를 표합니다.

참고문헌

김기영, 김현규, 1997, 풍암퇴적분지 어론리 경계부근에서의 고해상도 반사파 조사연구, 대한지질학회 제52차 정기총회 및 학술발표회 (초록), 서울 한국과학기술회관, 14.

김기영, 허식, 1999, 고해상도 탄성파자료를 이용한 풍암분지 북동부의 퇴적구조 및 퇴적환경 연구 지구물리, 2, 91-99.

김현규, 김기영, 1998, 중력추를 이용한 풍암분지 경계 부근에서의 고해상도 반사파 탐사, 자원환경지질학회지, 31, 519-526.

박노영, 김정환, 1972, 한국지질도 (1:50,000) - 남양도폭, 국립지질조사소.

Cohen, J.K. and Stockwell, Jr. J.W., 1997, CWP/SU: Seismic Unix Release 31: a free package for research and processing, Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines.

Doll, W.E., Miller R.D., and Xia, J., 1998, A noninvasive shallow seismic source comparison on the Oak Ridge Reservation, Tennessee, Geophysics, 63, 1318-1331.

Ghose, R., Nijhof, V., Brouwer, J., Matsubara Y., Kaida, Y., and Takahashi T., 1998, Shallow to very shallow, high-resolution reflection seismic using a portable vibrator system, Geophysics, 63, 1295-1309.

Hawkins, L.V., 1961, The reciprocal method of routine shallow seismic refraction investigations, Geophysics, 26, 806-819.

Hunter, J.A., Pullan, S.E., Burns, R.A., Cagne, R.M., and Good, R.L., 1984, Shallow seismic reflection mapping of the overburden-bedrock interface with the engineering seismograph-Some simple techniques, Geophysics, 49, 1381-1385

Miller R.D., Pullan, S.E., Waldner, J.S., and Haeni, F.P., 1986, Field comparison of shallow seismic sources, Geophysics, 51, 2067-2092.

Miller, R.D., Pullan, S.E., Steeples, D.W., and Hunter, J.A., 1992, Field comparison of shallow seismic sources near Chino, California, Geophysics, 57, 693-709.

OYO instruments, 1997, Das-1 data acquisition system operational manual, Houston.

Palmer, D., 1986, Refraction seismics, Geophysical Press.

Steeple, D.W. and Miller, R.D., 1990, Seismic reflection methods applied to engineering environmental, and groundwater problems: in Ward S.H. Ed., Geotechnical and environmental geophysics Volume I: Review and tutorial, Society of Exploration Geophysicists, Investigations in Geophysics, 5, 1-30.

Sheriff, R.E., 1984, Encyclopedic dictionary of exploration geophysics, Society of Exploration Geophysics, Tulsa.

Ziolkowski, A.M., 1980, Source array scaling for wavelet deconvolution: Geophys. Prosp., 28, 902-918.

1999년 2월 7일 원고접수

1999년 6월 2일 원고채택