

## 천부 탄성파 반사법 자료의 주파수 특성 - 강원도 삼척시 도계지역

고광범<sup>1)</sup> · 이두성<sup>2)</sup>

### Frequency Characteristics of Shallow Seismic Reflection Data - Dogye, Samchuck, Kangwon

Kwang Beom Ko and Doo Sung Lee

**요 약 :** 28 Hz와 100 Hz 지오폰을 사용하여 탄광 채굴공동에 의한 지반침하 지역에서 탄성파자료를 획득하고 지오폰에 따른 탄성파 자료의 주파수 특성을 고찰하였다. 파동의 전파거리가 짧아 고주파수 성분의 감쇠가 적은 근거리 오프셋(1~10 m)에서는 100 Hz 지오폰 자료가 28 Hz 지오폰 자료에 비하여 상당히 높은 주파수 성분(최대 300 Hz)을 보유하며, 중거리 오프셋(11~39 m)에서는 28 Hz 지오폰 자료의 신호대역 주파수 특성은 근거리 오프셋 자료와 전체적으로 유사하고 100 Hz 지오폰의 경우는 신호로 간주할 수 있는 최대 주파수는 높은 반면 상대적으로 높은 수준의 고주파 잡음이 존재하며, 원거리 오프셋( $\geq 40$  m)에서는 150 Hz 이상의 영역에서 신호가 대부분 잡음수준까지 감쇠된 결과를 보여주었다.

**Abstract :** Seismic reflection data was obtained by using 28 and 100 Hz geophones at the ground subsidence sites in an old coal mine area. Frequency spectrum of the geophone analyzed with offset revealed that 1) In the near offset (1~10 m), the signals in the 100 Hz geophone data contains higher frequency components (up to 300 Hz) than that of the 28 Hz (<200 Hz), 2) In the intermediate offset (11~39 m), although the 28 Hz geophone data showed very similar frequency characteristics as the near offset data, the 100Hz geophone data seemed to be contaminated by noise at high frequency zone (>200 Hz). In the far offset ( $\geq 40$  m), the signals in both the 28 and 100 Hz geophone data are attenuated to noise level at high frequency zone more than 150 Hz.

**Keywords :** frequency spectrum, near offset, intermediate offset, far offset

## 서 론

고해상 천부 탄성파 반사법은 지표 천부의 지하구조를 효과적으로 규명할 수 있는 장점으로 80년대 이후 다양한 분야에 활발히 적용되고 있다. 천부 탄성파 탐사는 통상 석유탐사와는 달리 천부의 반사이벤트에 대한 분해능을 높이기 위해 광대역의 고주파수 성분이 요구되는 반면 주로 지표에서 수행되기 때문에 파원에 기인한 각종 잡음, 천부 지형의 기복 등에 의해 해석이 어렵고 오류를 범하기 쉽다(Steeple et al., 1998). 성공적인 고해상 탐사자료의 획득은 탐사시 최적의 획득변수를 설정함으로써 달성될 수 있다. 획득변수로서는 탐사지역의 지질학적인 특성에 따라 결정되는 지질환경 변수와 탐사장비, 파원, 수신기의 종류, 그리고 최소 및 최대 오프셋의 범위 등의 자료획득 변수로 크게 구분할 수 있다. 천부의 지질구조를 효과적으로 파악하기 위해서는 해당 지질조건에 적합한 파원(Wiederhold et al., 1998; Ghose et al., 1998; Doll et al., 1998; Buhmann et al., 1998)과 지오폰의 적정 공진주파수, 최소

및 최대 오프셋 등(Whiteley et al., 1998)을 결정하여야 한다. 지오폰과 진원간의 오프셋 범위는 규명하고자 하는 지하구조 및 공동 등 탐사 대상체의 심도에 따라 결정되는데 일반적으로 최소 오프셋의 범위는 대상지역의 최상층 지질구조와 관련되며, 최대 오프셋은 관심있는 지하구조의 최대 심도 및 사용된 파원에 의하여 결정된다.

본 연구의 조사지역은 강원도 삼척시 도계읍 마교리 일대로 폐광도에 의한 지반침하지역이며 지반보강 계획이 현재 석탄 산업 합리화사업단에 의해 추진되고 있다. 본 조사는 해머를 파원으로 최대 오프셋은 대략 50 m이며 최소 오프셋과 최대 오프셋을 기준으로 10 m 이내의 오프셋을 근거리 오프셋(near offset), 40 m 이상의 오프셋을 원거리 오프셋(far offset), 그리고 그 사이의 중간지대를 중거리 오프셋(intermediate offset)으로 구분하여 각 오프셋에서 얻은 탄성파 기록의 주파수 특성을 비교하였다. 각 오프셋에서의 탄성파 자료의 주파수 특성과 주파수-파수 영역에서의 주파수 특성을 종합적으로 분석하였으며, 반사파 신호의 주파수 대역과 천부층의 분해능을 종합적

\*2000년 1월 21일 접수

1) 한성대학교 영상화기술연구소

2) 한성대학교 정보시스템공학과

으로 분석하기 위해 주파수·파수 영역 필터와 주파수 대역필터링을 통한 자료의 분해능을 분석하였다.

**지질 개요**

조사지역은 도계역과 고사리 지역의 중간지점으로 도계역으로부터 약 2.2 km 거리에 위치하며 행정구역상으로는 강원도 삼척시 도계읍 마교리로 영동선 철도와 태백-삼척간 38번 국도가 지나가는 오십천 주변이다(Fig. 1). 이 지역은 조선 누층군의 대석회암통을 기저로 평안누층군의 만항층, 금천층, 장성층 및 함백산층, 도사곡층의 순으로 구성되어 있으며 지역의 서남부에서는 경상계의 적각리층이 함백산층, 도사곡층을 부정합으로 피복하며 분포되어 있다. 이 지역은 수개 조의 단층 및 습곡구조들이 발달하며 일반적인 주향은 N30~40E이며 경사는 습곡의 영향으로 NW 방향과 SE 방향으로 나타난다(Fig. 2).

오십천 일대의 오십천 대단층은 수직 내지는 서쪽으로 급경사지며 이에 의해 평안누층군의 함백산층이 직접 대석회암통과 경계를 이루고 있으며, 북부에서는 홍전스러스트에 의해 만항층이 함백산층과 접하며 중앙부의 중부단층등 비교적 규모가 큰 단층에 의해 함탄대가 중첩 분포되기도 한다. 단층면의 주향은 N20~40E이며 30° 내외로 북서경한다. 이 단층에 의해 이 지역의 동부 배사구조 서익부와 서부의 향사구조가 접하며 중첩 분포하게 된다. 배사 및 향사 구조들은 일반적으로 N20~40E 방향의 축을 가지며 남서측으로 약 10° 내외의 저각도로 프런지하고 있다(석탄산업 합리화 사업단, 1996).

**자료 획득**

본 연구 자료는 지반침하 지역의 고해상 천부 반사법 탐사 자료를 얻기 위한 기초조사로서 획득되었다. 사용된 지오폰은 공진주파수가 각각 28 Hz와 100 Hz이며 자료획득 장비는

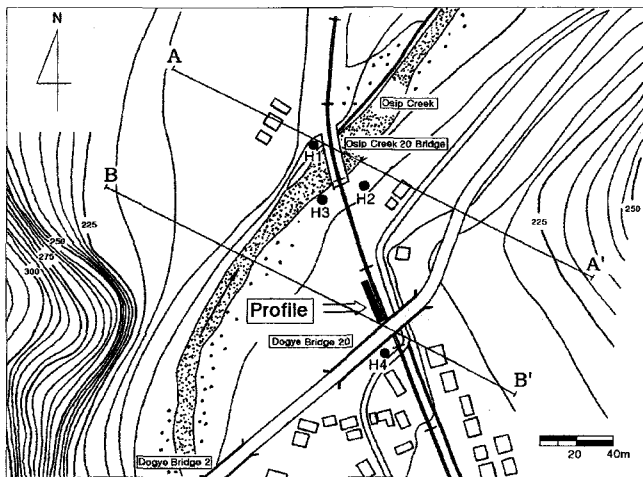


Fig. 1. Geographic map of the survey area.

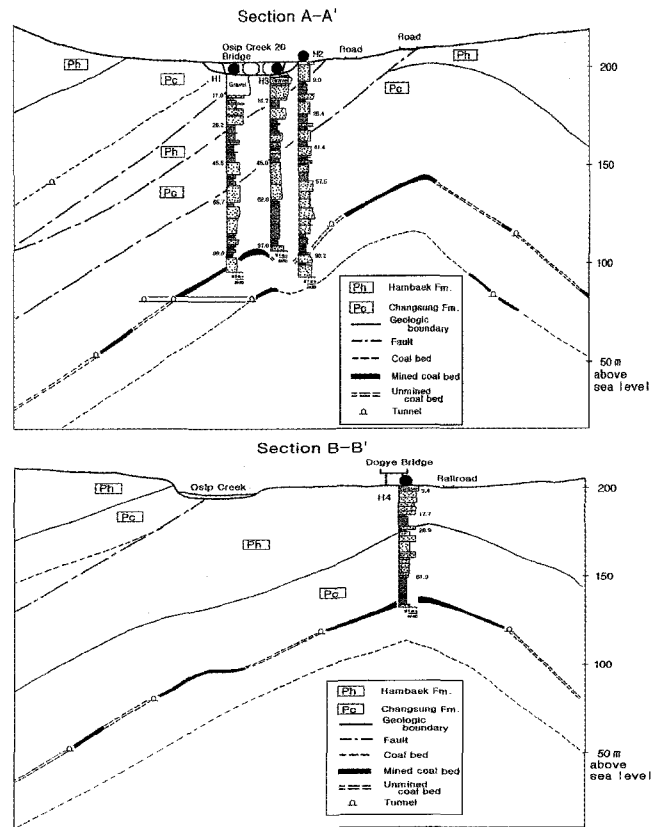


Fig. 2. Geologic section and drilling log data (A-A', B-B'). (after Coal Industry Promotion Board, 1996)

Geometrics사의 StrataView 24 channel 시스템이다. 탄성과 신호의 기록시간은 공동의 심도와 자료획득 변수의 검토라는 본 조사의 목적을 최대한 감안하여 발파 후 0.5초까지로 하였으며 충분한 고주파신호를 얻기 위하여 샘플링 간격을 0.25 ms로 설정하였다. 일반적으로 사용되는 탄성과 파원 중 천부 반사파를 분리할 수 있는 척도인 고주파수 발생능력은 이동식 진동기가 가장 유리하고 비교적 넓은 대역의 고주파수 성분과 상대적으로 심부까지 탄성과 에너지를 전달하는 측면에서는 해머가 적합하다고 알려져 있으며(홍종국 등, 1999) 본 조사에서는 탄성과 파원으로서는 해머를 이용하였다.

측선배열은 신호 및 잡음특성 분석에 많이 이용되는 워커웨이 배열을 이용하였으며 지오폰간의 간격은 1 m이다. Fig. 1에서 남북방향으로 지오폰을 배열시키고 배열 끝단의 지오폰, 그리고 양 배열 끝단과 24 m 떨어진 곳에서 각각 진원을 주어 총 4개의 공통 발파점 자료를 합한 워커웨이 자료를 구성하였

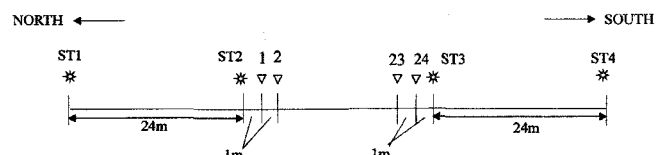
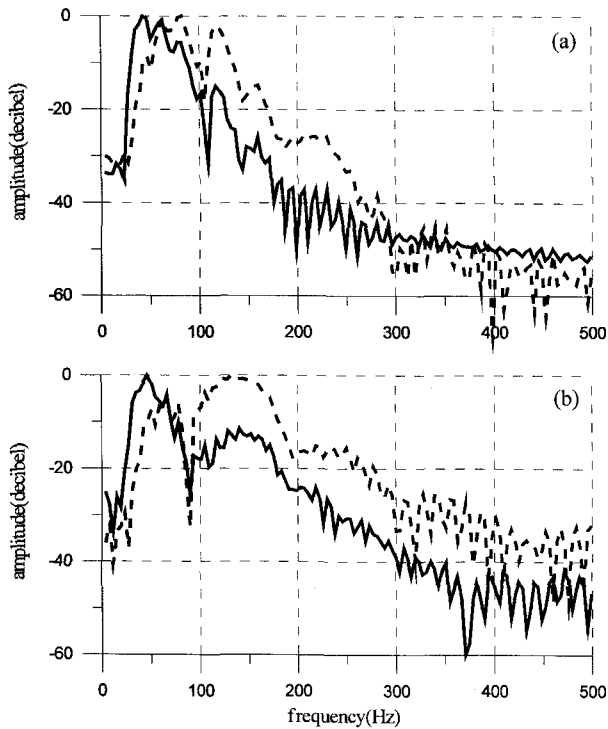


Fig. 3. Schematic diagram for the walkway profile. 28Hz and 100Hz geophone is used.

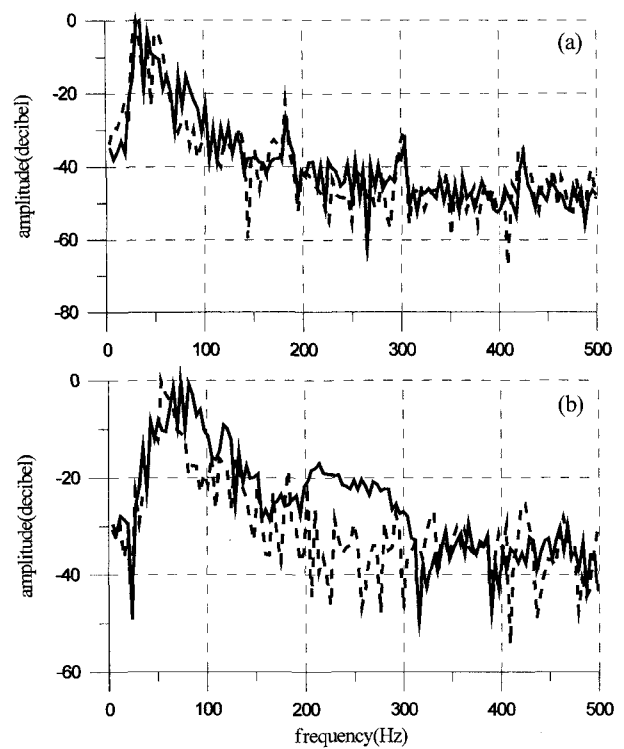


**Fig. 4.** Amplitude spectrum of the near offset data. The dashed and solid line denotes -1 m and -5 m offset, respectively. (a) 28 Hz geophone data, and (b) 100 Hz geophone data.

다(Fig. 3). 이때 동일한 위치에서 28 Hz 및 100 Hz 지오폰을 사용하여 자료를 획득하였다. 천부 탄성파기록은 반사파, 굴절파와 더불어 잡음이 포함되게 된다. 본 조사는 지반침하 지역의 탄성파자료의 주파수특성을 파악하기 위한 기초조사이므로 원시자료 취득시 아무런 아날로그 필터를 적용하지 않았다.

### 주파수 성분분석

Fig. 4는 오프셋이 각각 -1 m 및 -5 m인 위커웨이 자료에 대한 진폭스펙트럼을 decibel로 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 28 Hz 지오폰 자료의 진폭스펙트럼으로 최대진폭을 기준으로 -40dB 이상의 진폭을 가지는 주파수대역은 오프셋이 -1 m의 경우 270 Hz까지로 비교적 넓은 영역이나 오프셋이 -5 m에서의 스펙트럼에서는 고주파수 성분은 급격히 감쇠하기 시작하며 신호대역이라고 판단되는 최대 주파수는 200 Hz까지이다. 반면에 100 Hz 지오폰을 사용한 Fig. 4(b)의 경우 -5 m의 오프셋에서 신호의 주파수에 따른 감소 양상이 상대적으로 완만하며 -40dB 이상의 주파수 대역이 300 Hz까지로서 과동의 전파거리가 짧아 고주파수 성분의 감쇠가 적은 근거리 오프셋 자료에서는 공진주파수가 높은 지오폰을 사용함이 유리함을 확인할 수 있다. 또한 근거리 오프셋자료의 주파수 특성은 조사지역의 신호의 최대주파수 수준에 대한 정성적 정보를 지시한다고 볼 수 있으며 따라서 본 조사지역은 해머파원을 사용할 경우 최대 300 Hz까지의 주파수 대역의 신호를 얻을 수 있으며



**Fig. 5.** Amplitude spectrum of the intermediate offset data. The dashed and solid line denotes -23 m and -28 m offset, respectively. (a) 28 Hz geophone data, and (b) 100 Hz geophone data.

그 이상의 고주파수 성분은 대부분 잡음이라고 할 수 있다.

Fig. 5의 중거리 오프셋 자료에서 -40dB 이상 신호대역의 주파수 특성은 28 Hz 지오폰의 경우(Fig. 5(a)), 근거리 오프셋의 주파수 특성과 비교할 때 200 Hz까지 전체적으로 유사함을 알 수 있다. 오프셋 -23 m와 -28 m의 주파수 스펙트럼의 양상이 비슷했으므로 미루어 중간거리 오프셋에서는 200 Hz까지의 주파수 성분의 감쇠가 상당히 이루어졌음을 볼 수 있으며 28 Hz 지오폰의 경우, 중간거리 오프셋에서의 신호로 간주할 수 있는 최대 주파수 대역은 대략 150 Hz까지라고 볼 수 있다. Fig. 5(b)의 100 Hz 지오폰의 경우에는 500 Hz까지 전 주파수 대역에 걸쳐 진폭이 -40dB를 넘는데 근거리 오프셋자료의 주파수 특성과 진폭스펙트럼의 감쇠양상을 고려할 때 신호라고 간주할 수 있는 주파수 영역은 최대 200 Hz를 넘지 못할 것으로 생각된다. 또한 중거리 오프셋자료에서는 앞서 살펴보았던 근거리 오프셋자료에서 볼 수 없었던 특징을 알 수 있는데, 그라운드롤이 지배적인 100 Hz 이하 구간에서 28 Hz 자료는 30 Hz 부근에서 최대진폭을 가지며 이로부터 선형적으로 감소하는 양상을 보이는 데 반해 100 Hz 자료는 진폭이 저주파수에서 선형적으로 증가하다가 50 Hz 이후 일정한 스펙트럼을 보임을 알 수 있다. 이는 공진주파수 근방의 성분들을 집중적으로 통과시키는 지오폰의 특성이 반영된 결과이다.

Fig. 6의 원거리 오프셋에서는 중거리 오프셋자료와 비교하여 볼 때 공진주파수 근방에서 진폭비를 최대치로 선형적으로

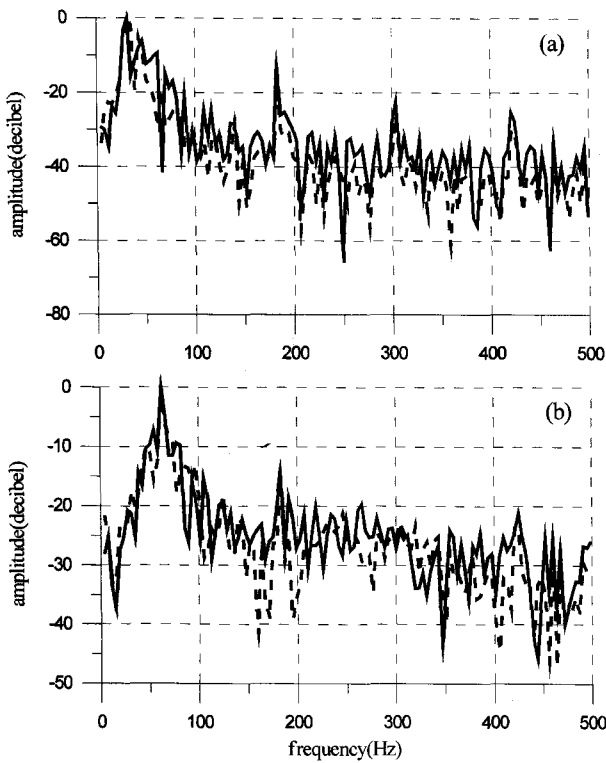


Fig. 6. Amplitude spectrum of the far offset data. The dashed and solid line denotes -43 m and -48 m offset, respectively. (a) 28 Hz geophone data, and (b) 100 Hz geophone data.

감소하는 양상을 보이며 각 지오폰의 공진주파수 특성을 뚜렷이 보여준다. 28 Hz 및 100 Hz 자료 모두 전 주파수 영역에 걸쳐 -40dB 이상의 진폭을 보이는데 이는 150 Hz 이상의 고주파수 대역에서 신호 대 잡음비가 극히 불량하며 잡음으로 심하게 오염되었음을 의미한다. 주파수에 따른 스펙트럼의 변화 양상을 검토하여 신호로 간주할 수 있는 최대 주파수는 28 Hz 자료의 경우 150 Hz, 100 Hz 자료의 경우 최대 160 Hz 정도로 추정할 수 있다. 반면 신호대 잡음비(S/N ratio)는 100 Hz 자료가 상대적으로 낮아 원거리 오프셋 영역에서는 100 Hz 지오폰을 이용하여 얻은 자료는 28 Hz 자료보다 해석 가능한 신호의 주파수 대역의 고주파수 성분이 그다지 많지 않고 오히려 잡음에 취약하다고 볼 수 있다.

탐사 장비, 파원, 지오폰, 오프셋의 범위 등의 자료획득 변수를 결정하는 것은 조사지역의 지질학적 특성을 나타내는 지질환경변수와 연관되어 판단할 매우 어려운 문제이다. 천부 탄성파 반사법의 목적은 천부 지하구조 정밀탐지에 있으며 따라서 신호의 고주파수 손실을 최소한으로 하도록 하여야 하므로 수신기로서는 가능한 고유 주파수가 높은 지오폰을 사용함이 유리하다 할 수 있다.

**F-K 필터와 Bandpass 필터를 사용한 자료 분석**

앞서 살펴본 바와 같이 획득한 자료는 저주파수의 반사파

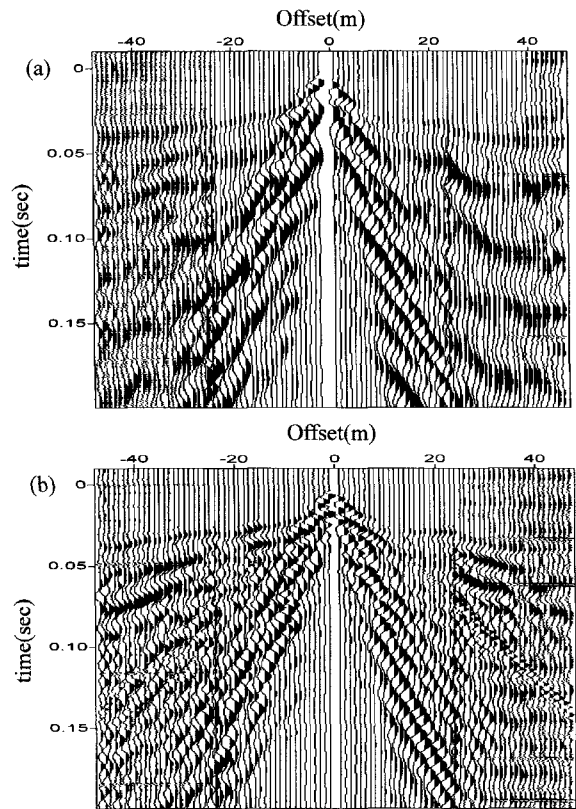


Fig. 7. Raw data. (a) 28 Hz geophone and (b) 100 Hz geophone.

성분은 상당부분 고주파수의 그라운드롤과 겹치고 오프셋에 따른 신호의 감쇠가 심하여 신호의 고주파수 성분이 미약하므로 반사파 이벤트를 추출하기에 어려움이 있다. 반사파 신호는 대략 100 Hz에서 최대 200 Hz까지의 주파수 대역에 걸쳐 분포하고 있으며 이중 100 Hz 내외의 주파수 대역에서 비교적 고주파수 성분이 우세한 그라운드롤과 저주파수의 반사파와 겹치고 있다. 본 연구에서는 이 대역에서의 반사파 신호의 손실을 최소화하면서 지오폰의 공진주파수에 따른 반사파 신호의 분해능을 분석하기 위하여 f-k 필터링으로 자료의 주파수-파수 영역의 특성의 검토를 통한 그라운드롤의 제거와 오프셋에 따른 탄성파 자료의 주파수 특성을 고려한 신호의 최대 주파수까지만을 통과시키는 고주파수 차단필터링 기법을 적용하였다.

Fig. 7은 원시자료를 도시한 것이며 Fig. 8은 28 Hz와 100 Hz 자료의 주파수-파수 영역 스펙트럼을 나타낸 것이다. 주어진 샘플링 간격과 이벤트의 기울기 그리고 속도로부터 알리아싱이 일어나지 않는 최대 허용 주파수(maximum threshold frequency)는 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다(Yilmaz, 1987).

$$f_{threshold} = \frac{v}{4\Delta x \sin\theta}$$

여기서 공통 발파점 자료의 경우,  $\Delta x$ 는 샘플링 간격,  $\theta$ 는 이벤트의 기울기 그리고  $v$ 는 자료의 최소 moveout 속도이다. 본

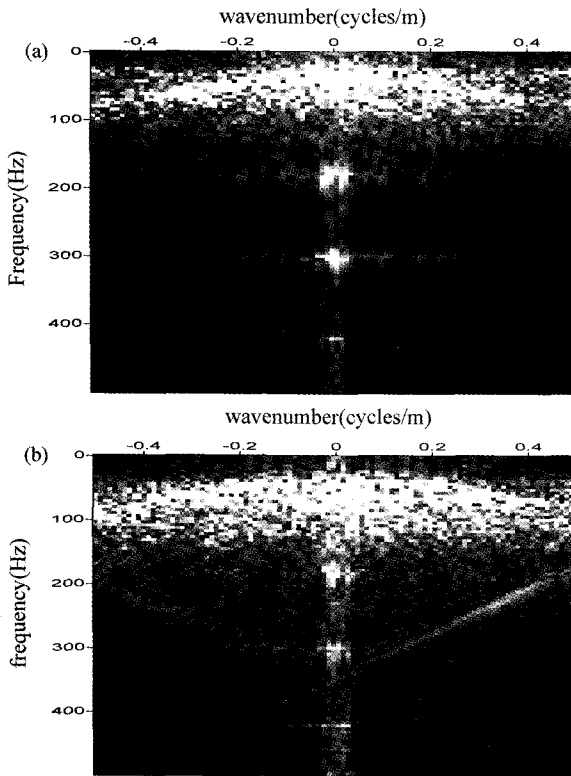


Fig. 8. F-k spectra of the raw data shown in Fig. 6.

조사지역의 그라운드롤의 최소 moveout 속도는 대략 208 m/sec이며 대응하는 기울기는 0.0048 sec/m이고 이때 최대 허용 주파수는 약 180 Hz이다. Fig. 7에서 보면 100 Hz 자료에서 대략 180 Hz에서 알리아싱이 일어남을 알 수 있다. 두 자료 모두 공간주파수가 0인 위치에서 주파수에 따라 불연속으로 나타나는 신호는 주변 송전선에 의한 전기적 잡음으로 생각된다. 이로부터 본 조사지역의 천부 및 공동의 정보를 얻기 위해 f-k필터를 적용하는 속도 구간은 208 m/sec에서 280 m/sec까지의 대역으로 설정하였으며 대역필터를 적용하기 위한 주파수 구간은 고주파수 성분을 최대한 통과시키기 위해 200 Hz에서 210 Hz까지 선형적으로 감쇠하는 고주파 차단필터를 채택하였다. f-k필터와 대역필터를 적용한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 원시자료와 비교하였을 때 전반적으로 두 자료 모두 분해능이 향상되었음을 알 수 있으나 아직도 남아 있는 그라운드롤의 영향으로 근거리 오프셋 근방에서는 반사파 이벤트의 관찰이 어렵다. 위커웨이 자료의 우측 축선을 볼 때, 왕복주시 0.06초(심도 50 m)근방의 반사파의 이벤트가 28 Hz 자료가 하나로 관측되는 반면 100 Hz 자료에서는 두 개의 이벤트로 뚜렷이 분리됨을 알 수 있는 바, 반사파 이벤트는 지오폰의 공진주파수가 높을수록 상대적으로 높은 분해능을 가짐을 확인할 수 있다.

### 결론

본 연구에서는 지반침하 지역에서 획득한 데이터의 주파수

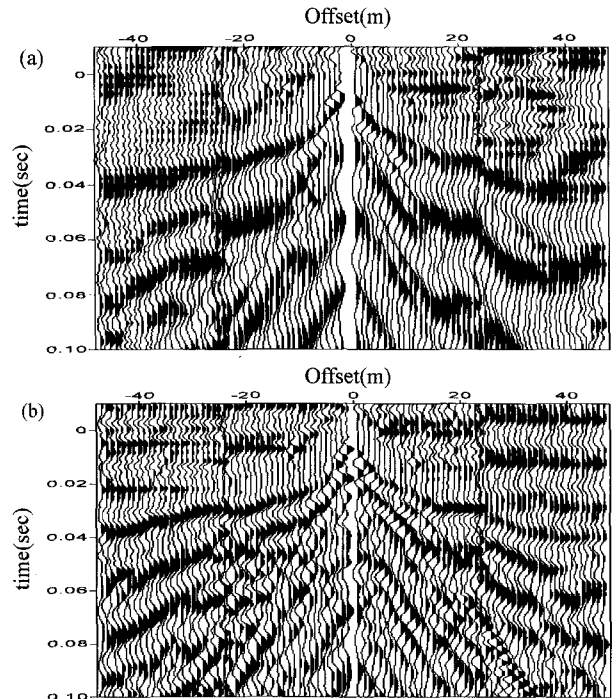


Fig. 9. F-k and highcut filter are applied on the data shown in Fig. 7. (a) 28 Hz geophone data, and (b) 100 Hz geophone data.

특성을 분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 근거리 오프셋 자료에서 28 Hz 지오폰의 경우, -40dB 이상의 신호대역이라고 판단되는 최대 주파수는 200 Hz까지인 반면 100 Hz 지오폰을 사용하였을 때 주파수 대역이 300 Hz까지로서 근거리 오프셋 자료에서는 공진주파수가 높은 지오폰이 유리함을 확인할 수 있었다. 근거리 오프셋자료의 주파수 특성은 조사지역의 신호의 최대주파수 수준에 대한 정성적 정보를 말해주며 본 조사지역은 최대 300 Hz까지의 주파수 대역을 신호로 간주할 수 있다.
- 2) 중거리 오프셋 자료에 대한 신호대역의 주파수에 따른 양상은 28 Hz 지오폰의 경우 근거리 오프셋의 주파수 특성과 비교할 때 200 Hz까지 전체적으로 유사한 양상을 보이며 신호로 간주할 수 있는 최대 주파수 대역은 대략 150 Hz까지라고 볼 수 있다. 100 Hz 지오폰의 경우에는 신호라고 보여지는 최대 주파수는 200 Hz까지이나 비교적 큰 진폭의 고주파수 잡음이 존재함을 볼 수 있다. 그라운드롤이 지배적인 100 Hz 미만 구간에서 지오폰의 공진주파수 근방의 성분들을 집중적으로 통과시키는 지오폰의 특성을 보여준다.
- 3) 원거리 오프셋에서는 28 Hz 및 100 Hz 자료 모두 전 주파수 영역에 걸쳐 -40dB 이상의 진폭비를 보여주는 데 이는 신호가 대부분 잡음수준까지 감쇠되었음을 말하며 신호로 간주할 수 있는 최대 주파수는 28 Hz 자료의 경우 150 Hz, 100 Hz 자료에서는 최대 160 Hz 정도인 반면 잡음의 진폭은 100 Hz 자료가 상대적으로 높아 원거리 오프셋 영역에서는 100 Hz 지오폰을 이용하여 얻은 자료보다 28 Hz 자료가 상대

적으로 안정적인 특징을 보인다.

4) f-k 필터링과 고주파수 차단 필터링을 적용한 결과, 반사파라 추정되는 이벤트는 100 Hz 지오폰 자료에서 보다 잘 나타난다. 따라서 적절한 자료처리가 이루어진다면 가능한 높은 공진주파수를 가지는 지오폰을 이용하는 것이 바람직하다.

## 사 사

이 연구는 한국과학기술 평가원의 국가지정연구실 과제 “탄성파 영상화 기술개발 및 응용”에 의하여 지원되었다. 이 기관에 감사한다.

## 참고문헌

석탄산업 합리화 사업단, 1996, 고사리지역 지반 안정성 조사.  
 홍종국, 김기영, 김한준, 1999, 조간대 지역에서의 고해상 탄성파 탐사를 위한 파원 특성 분석: 대한지구물리학회지, v. 2, n. 2, p. 100-110.  
 Buhneemann, J., and Holliger, K., 1998, Comparison of high-

frequency seismic sources at the Grimsel test site, central Alps, Switzerland: *Geophysics*, **63**, 1363-1370.  
 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.  
 Steeples, D. W., and Miller, R. D., 1998, Avoiding pitfalls in shallow seismic reflection surveys: *Geophysics*, **63**, 1213-1224.  
 Wiederhold, H., Bunes, H. A., and Bram, K., 1998, Glacial structures in northern Germany revealed by a high-resolution reflection seismic survey: *Geophysics*, **63**, 1265-1272.  
 Whiteley, R. J., Hunker, J. A., Pullan, S. E., and Nutalaya, N., 1998, “Optimum offset” seismic reflection mapping of shallow aquifers near Bangkok, Thailand: *Geophysics*, **63**, 1385-1394.  
 Yilmaz, O., 1987, Seismic data processing: *Soc. Expl. Geophysics*.