

반사법 탄성파 탐사를 이용한 천부 지질 구조

김규한¹⁾ · 공영세²⁾ · 오진용³⁾ · 이정모¹⁾

Subsurface Geological Structure Using Shallow Seismic Reflection Survey

Kim, Gyu-Han, Kong, Young-Sae, Oh, Jinyong and Lee, Jung-Mo

요 약 : 반사법 탄성파 탐사는 높은 해상도로 지하 지질구조를 구현할 수 있는 물리탐사방법중의 하나이지만 육상에서의 천부지층에 대한 반사법 탐사는 지표의 미고결층에 의한 고주파 에너지의 심한 감쇠현상과 진원근원의 강한 표면파로 인하여 고해상도의 반사단면 획득이 어렵다. 그러나, 자료취득시 장비 및 야외조건에 최적인 자료 취득상수의 선택과 자료처리시 세심한 주의를 기울일 경우, 높은 해상도의 중합단면도의 획득이 가능하다. 이번 반사법 탐사에서는 자료취득시 소형망치와 같은 저수준 에너지원의 진원과 40 Hz의 수직속도 수진기를 사용하였다. 진원점에서는 알루미늄판에 해머스타터를 부착하여 트리거신호를 얻었으며, 지면에 놓인 알루미늄판을 반복가져 후 수직중합하여 신호대 잡음비가 높은 기록을 획득할 수 있었다. 또한, 전통적인 공심점 기법과는 달리 이번 연구에서 고안 사용된 개량 공심점 기법은 야외에서 효율적으로 높은 중합수의 자료 취득을 가능하게 했으며 그 결과도 양호한 것으로 밝혀졌다. 자료처리는 Linux를 운영체제로 하는 일반 PC에 접목된 SU (Seismic Unix)를 이용하여 기계발전 기법들을 적절하게 적용하였다.

Abstract : In terms of high resolution, seismic reflection survey is by far the most significant geophysical method applied to define subsurface structure. In shallow seismic reflection survey, it is, however, difficult to obtain high resolution image due to both the wave attenuation in the unconsolidated layer and the existence of source-generated surface waves. Therefore, when collecting data, it is imperative to select proper equipments and choose optimum field data acquisition parameters for acquiring high S/N data. In this survey, a small size hammer was used as a low energy source and 40-Hz vertical geophones were used as receivers. Trigger signal was obtained from the hammer starter attached in the aluminum plate and thus it was possible to control the source onset time for the vertical stack. During the field work, a modified standard CMP technique was introduced to achieve the many-fold CMP data effectively. Data processing was conducted by the "Seismic Unix" which is mounted on PC with a Linux operating system. The main distinctions were the emphasis and detail placed on near-surface velocity analysis and the extra care exercised in muting.

Keywords : shallow seismic reflection survey, field data acquisition parameters, vertical stack, Seismic Unix, near-surface velocity analysis, muting

서 론

탄성파 반사법은 탄성파 굴절법이 해결하지 못하는 속도역 전층이나 박층의 문제와 같은 난점이 없기 때문에 각종 지구 물리탐사 방법중 지하의 지질구조 및 층서 상태를 가장 정밀하고 상세히 탐사할 수 있는 방법이다. 1970년대까지만 해도 지질 공학 및 환경문제의 관심영역인 지하 100여 미터내의 천부 지하구조 해석에 대한 문제에는 주로 굴절법이 "정상적인" 탐사방법으로 이용되었다. 이러한 지반공학적인 문제 및 지하수 응용에 있어서 반사법이 실용적 도구로 고려되지 않았던 주된 이유는 굴절법이 고가의 디지털 반사법 탐사장비

에 비해 훨씬 저가의 아날로그 혹은 저성능 디지털 탐사장비로도 천부구조 조사를 충분히 수행할 수 있었으며, 또한 육상에서의 천부 반사법탐사에서는 지표의 미고결층에 의한 고주파에너지의 심한 감쇠현상과 진원에 의해 발생하는 강한 표면파 잡음으로 인해 신호 대 잡음비가 매우 저하되어 고해상도의 반사단면 획득이 어렵기 때문이다(Dobecki and Romig, 1985; Goforth and Hayward, 1992; Miller and Xia, 1998; Holliger and Robertsson, 1998; Milkereit and Eaton, 1998).

한편, 1980년대부터의 급속한 디지털 전자산업의 발전에 의하여 고성능의 저가형 디지털 탐사장비가 보급되고, 또한 높은 정밀도의 지하구조에 대한 요구가 증가되면서 육상 천

*1998년 11월 13일 접수

1) 경북대학교 지질학과 (Department of Geology, Kyungpook National University)

2) 부경대학교 탐사공학과 (Department of Exploration Engineering, Pukyong National University)

3) 충남대학교 기초과학연구소 (Research Institute of Basic Sciences, Chungnam National University)

부에서의 반사법 탐사의 적용이 활성화되어 여러 가지 자료 수집기법과 분석기법들이 본격적으로 개발되기 시작하였다 (Hunter *et al.*, 1984; Dobecki and Romig, 1985; Pullan and Hunter, 1985; Knapp and Steeples, 1986a, 1986b; Miller *et al.*, 1989; Miller and Steeples, 1990; Goforth and Hayward, 1992; Miller and Xia, 1998; Baker *et al.*, 1998; Steeples and Miller, 1998). 본 논문은 한반도 동남부에 위치하는 동래단층 지역에서(한국자원연구소, 1998) 천부 반사법탐사를 시행하여 반사법 자료의 취득기법의 숙지와 취득된 반사법 자료에 다양한 자료처리를 적용하여 고해상도의 반사법 단면도를 획득, 천부 지각 구조를 해석하는데 그 목적을 두고 있으며, 또한 자료처리과정에 있어서는 새로운 기법의 개발보다는 이미 개발되어 있는 정상적인 기법들을 적절하게 적용하는 것에, 즉 여러 매개변수(parameter)들의 최적치(optimal values)를 구하는 데 연구의 중점을 두었다.

조사지역 및 자료취득

본 연구 대상 지역(이하 본역)은 행정구역상 경상남도 양산시 웅상읍 용당리 일대이며 경위도 상으로는 동경 129°11'32", 북위 35°26'00"에 해당된다(Fig. 1). 조사지역은 북동-남서 방향으로 흐르는 회야강을 중심으로 발달한 표고 70-80m의 하상 충적지대에 자리잡고 있으며, 동북방향으로 인접하여 한창제지공장이 위치하고 서쪽으로는 울산-부산간을 잇는 7번 국도에 접해 있다. 조사지역 주변으로는 동래단층이 지나가는 것으로 알려져 있으며(한국자원연구소, 1998), 조사지역 일대의 지질분포는 회야강을 경계로 하여 본역을 포함하

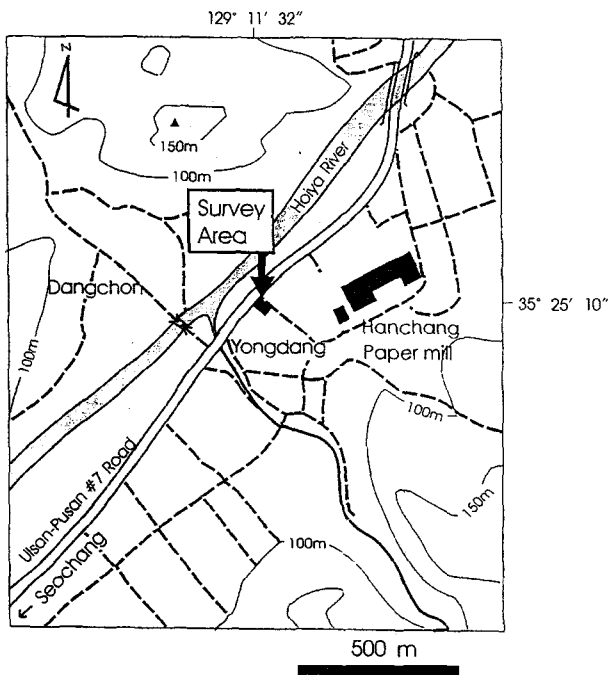


Fig. 1. Location map of the survey area.

는 남쪽으로는 백악기의 경상누층군 유천층군의 주산안산암 질암이, 북서쪽으로는 이들을 관입한 불국사 관입암군의 흑운모 화강암이 분포하고 있으며, 이들 기반암을 제4기 충적층이 피복하고 있다(이민성 등, 1964; 장기홍, 1984; Fig. 2).

탐사는 북북동 방향과 서북서 방향의 길이가 각각 34m와 54m되는 두 측선에서 이루어졌다(Fig. 3). 탐사지역의 지형이 평탄하여 야외작업의 복잡성을 줄일 수 있었으며, 진원점과 수신점간의 고도차이가 거의 없는 평지에서 탐사를 실시하였기 때문에 육상 반사법 탐사에서 필수적이라 할 수 있는 기하학적 보정(geometric correction)의 자료처리과정을 생략할 수 있었다.

탐사 장비로는 Geometrics사의 24채널 seismograph인 StrataView를 기록장치로 사용하였다. 육상 천부 반사법에서

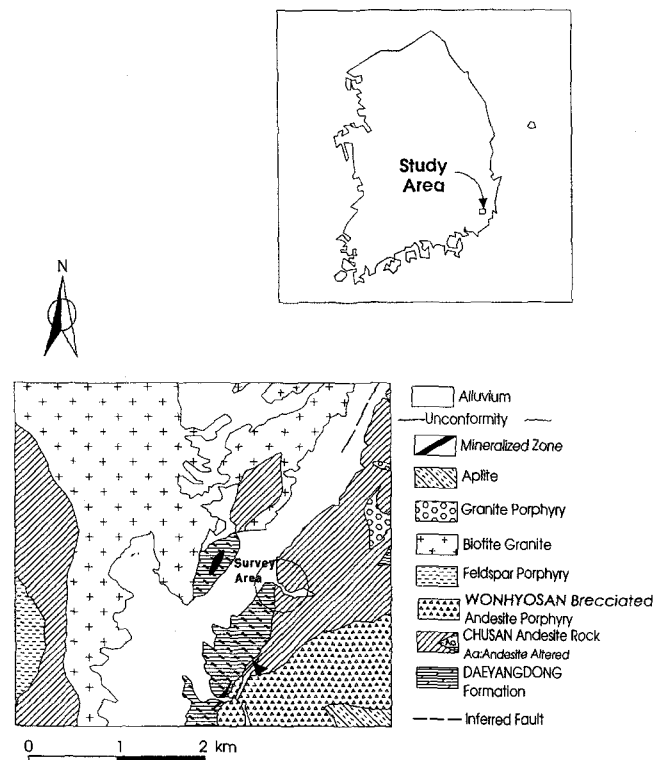


Fig. 2. Geological map of the survey area (after Lee, 1964).

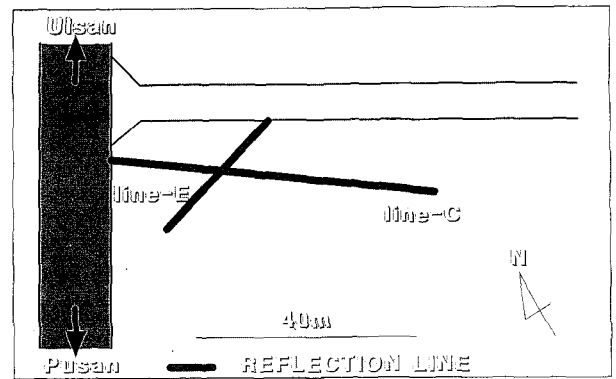


Fig. 3. Seismic reflection lines of the survey area.

자료 취득시 가장 중요한 요인중의 하나인 진원(source)과 수신기(geophone)의 선택에 있어서는 진원으로 측선 C에서는 각각 2 kg과 4 kg의 망치(hammer)를, 측선 E에서는 2 kg의 망치를 사용하였으며, 수신기로는 망치진원(hammer source)의 사용에 적합한 40 Hz 수직 속도 수신기를 이용하였다 (Steeple and Miller, 1998). 진원점 간격은 측선 C에서는 각각 1m와 2m로, E에서는 2m로 하였으며, 각 진원점에서의 기록은 지면에 놓인 알루미늄판(aluminum plate)을 망치로 10회 가격한 후 수직중합하여 취득하였다. 1970년대까지 주로 폭발물과 같은 높은 에너지원의 진원을 이용했던 것과는 달리 망치와 같은 저수준 에너지의 진원으로 반사법 탐사가 가능하게 된 것은 저가격의 디지털 탐사 기록기가 보급되고 (Dobacki and Romig, 1985), 이러한 동일 진원점을 반복하여 두드린 후 합하는 수직중합(vertical stack) 방법이 기록의 신호대 잡음비를 향상시킬 수 있었기 때문이다. 트리거(trigger) 신호는 알루미늄판에 해머스타터(hammer starter)를 부착하여 획득하였다. 이는 해머트리거를 직접 해머에 부착하여 사용하는 경우 망치의 속도 등에 따라 트리거 시간이 일정하지 않아 수직중합을 하여도 신호대 잡음비가 많이 증가되지 않는 반면, 본 연구에서 고안된 방법을 이용할 경우 일정한 트리거 시간을 제공, 트리거 시간의 정확도가 향상되어 수직중합을 할 경우 신호대 잡음비가 높은 기록을 획득할 수 있기 때문이다. 수신기 배열(array)을 취하지 않고 단일 수신기를 사용하였으며, 수신기 간격(geophone spacing)은 0.5m로 하였다. 이러한 좁은 수신점 간격을 취할 경우 공간적으로 알리아싱된 그라운드롤(spatially aliased ground roll)은 줄어드는 반면 반사신호의 일관성은 향상되는 것으로 알려져 있다(Steeple and Miller, 1998).

반사법 탐사에서는 공심점(Common Mid Point; CMP) 기법이라 불리는 기록 방법을 대부분 이용하는데, 육상 천부 반사법 탐사(shallow seismic reflection, SSR; Steeples, 1998)에서도 최적 진원-수진기 간격법("optimun offset" method)과 최적 윈도우 기법("optimun window" technique)과 더불어 사용되어 왔다(Hunter *et al.*, 1984; Knapp and Steeples, 1986b). 이번 연구에서도 공심점 기법으로 자료를 취득하였으며, 수신기 전개 방법은 끝점전개(single ended or end-on spread)방법을 이용하였다(Fig. 4). 일반적인 끝점 전개법(Fig. 4-a)에서는 진원점 간격과 수신점 간격이 같을 경우 24채널로 얻을 수 있는 중합수는 채널수의 절반인 12중합이다. 그러나, 이번 탐사에서는 중합 차아트(stack chart)에 나타나 있는 바와 같이 일반적인 수신기 전개법과는 다른 방법을 취하였다(Fig. 4-b). 그 이유로는 수신기 설치 작업의 부담을 줄이는 대신 진원점에서의 작업을 늘려 24중합 혹은 그 이상의 중합수를 얻을 수 있고, 인력 및 시간 이용 등에 있어서 탐사의 효율을 높일 수 있기 때문이다. 이상과 같은 현장탐사에서 사용된 탐사 장비와 취득된 야외자료 상수들을 정리하면 다음과 같다 (Table 1).

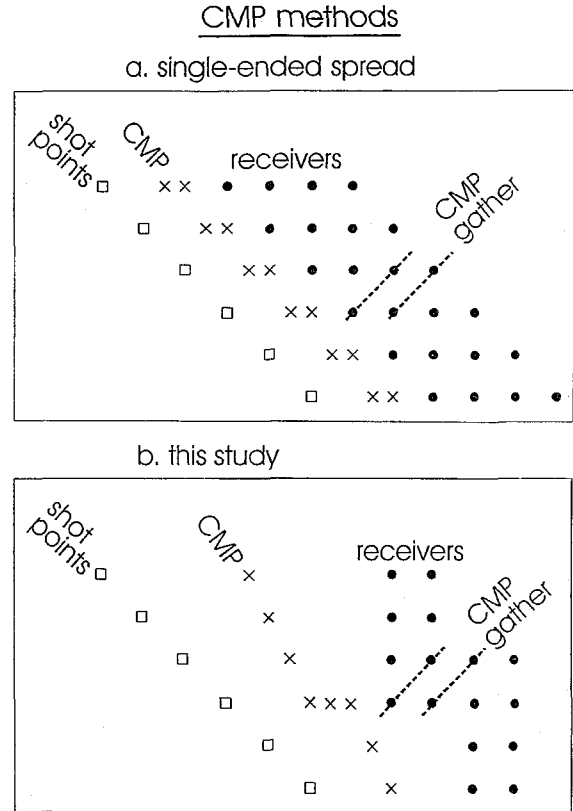


Fig. 4. CMP method with single-ended spread (a), and the spread used in this study (b).

Table 1. Field data acquisition equipment and parameters for seismic lines

	Line C	Line E
Recorder	24 channel StrataView seismograph	
Length of profiles	54 m	34 m
Energy source	2, 4 kg hammer	2 kg hammer
Receivers	40 Hz single (vertical)	40 Hz single (vertical)
Shot spacing	1, 2 m	2 m
Receiver spacing	0.5 m	0.5 m

자료 분석 및 처리

반사법 자료의 전산처리를 위해 이용한 자료처리용 소프트웨어로는 CSM(Colorado School of Mines)의 CWP(Center for wave Phenomena)에서 무료로 제공하는 SU(Seismic Unix)를 이용하였으며, Linux를 운영체제로 하는 200 MHz Pentium Processor를 장착한 일반 PC를 사용하였다. 이번 탐사에서 획득된 자료의 포맷은 디멀티플렉스 SEG2 포맷(demultiplexed SEG2 format)으로, SU를 이용하기 위해 SEG2 포맷으로 자료의 포맷을 변환하였다. 이는 SU의 자료 포맷이 SEG2 포맷의 트레이스 부분(trace portion)에 근거를 두고 있기 때문이다(Stockwell and Cohen, 1998).

육상 천부 반사법 탐사에서는 자료처리 하지않은(un-

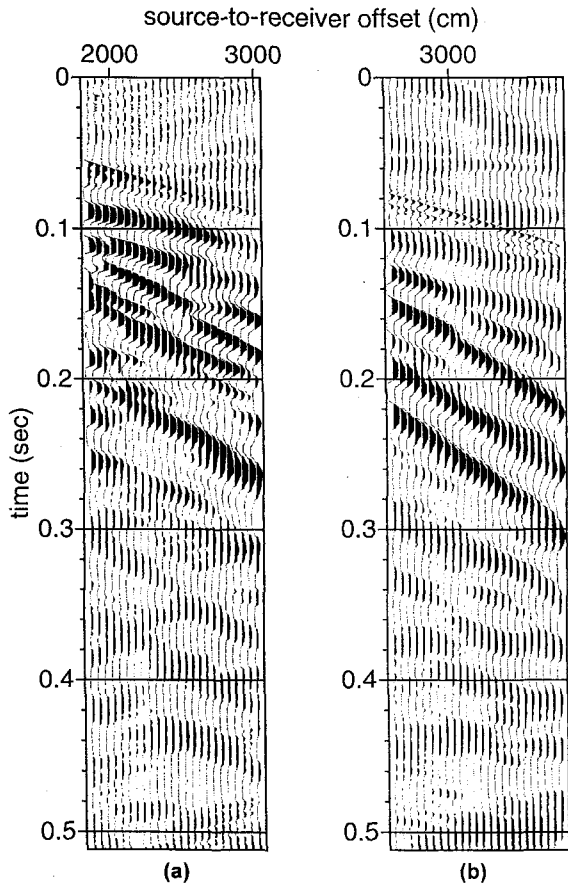


Fig. 5. Two unfiltered shot gathers from different locations along the Line C (a), and Line E (b); Each trace was balanced their rms values.

processed) 원시 현장자료(raw field file or common shot gather)에서 반사파를 찾는 것은 필수적이다(Steeple and Miller, 1998). 왜냐하면 반사이벤트 존재여부의 확인은 천부 반사법 CMP 중합단면도(CMP stacked shallow seismic section)에서 지질 구조나 층서를 알 수 있는 유일한 열쇠가 되기 때문이다 (Miller and Steeples, 1998). 탐사결과 취득된 현장자료를 보면(Fig. 5) 뚜렷한 반사 이벤트(reflection event)의 확인이 어려움을 알 수 있다. 이는 육상천부 반사법에서 흔히 나타나는 특징으로(Steeple and Miller, 1998; Miller and Xia, 1998), 천부층에서의 심한 감쇠로 인하여 시간이 증가함에 따라 탄성에너지의 주파수 내용(frequency content)과 진폭이 급격하게 감소함을 볼 수 있다(Holliger and

Robertsson, 1998). 이상과 같은 현장자료의 수집결과를 정리 하면 다음과 같다(Table 2).

천부 반사법에서는 대역통과필터(band-pass filter)의 적용 사례를 많이 볼 수 있으며, 흔히 사용되는 하부통과대역(lower band edge)은 100에서 200 Hz 내외이다(Baker et al., 1998). 특히, 지표층에서의 심한 감쇠와 진원근원의 잡음의 주파수내용이 반사파의 주파수내용보다 급격히 낮아질 때는 단순한 대역통과필터가 효과적인 것으로 알려져 있다(Holliger and Robertsson, 1998). 본 논문에서는 현장자료(shot gather)에 대하여 자동이득조절을 적용한 후, 큰 진폭의 저주파 성분을 감쇠시키기 위하여 통과 대역이 각각 150, 195, 1560, 1760 Hz인 대역통과 필터를 적용하였다(Fig. 6). 필터 적용 전의 현장자료(Fig. 5)에 비하여 진폭이 큰 저주파 성분은 많이 감쇠된 반면, 이에 가려져있던 고주파 성분들이 많이 나타남을 볼 수 있다. 또한, 쉽게 확인되지 않던 쌍곡선(hyperbola)의 반사 이벤트들을 90-ms(Fig. 6-a)와 120-ms(Fig. 6-b)에서 확인할 수 있다.

육상 천부 반사법 탐사에서 자료 처리 과정 중 속도분석(velocity analysis)과 함께 가장 세심한 주의를 필요로 하는 것은 뮤우팅(muting)이다(Miller et al., 1989; Miller and Steeples, 1990; Baker et al., 1998). 특히, 자료처리 초기에 원시 혹은

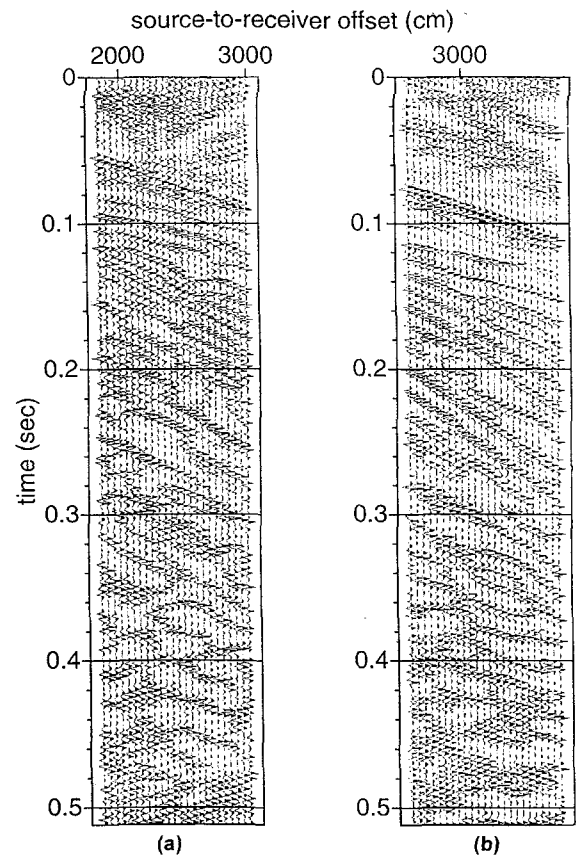


Fig. 6. Two digitally filtered and AGC scaled shot gathers; The reflection events at 90 ms in (a) and at 120 ms in (b) are perceptible on these gathers.

Table 2. Recording parameters for the 2 seismic lines

Feature	Measurement
Vertical stack	10
Number of channels	24
Sampling interval	0.25 ms
Number of samples	2048
Record length	0.512 sec

필터링된 현장자료(raw or filtered shot gather)에서 천부 굴절파(shallow refraction)를 뮤우팅하는 것은 심부 반사법과는 달리 천부 반사법에서는 매우 중요하다 (Steeple and Miller, 1998; Steeples, 1998). 그 이유는 진원-수진기 간격이 커질수록 원거리(far offset)에서는 굴절파에 의한 간섭(interference)으로 반사신호의 감쇠가 일어나며(Miller, 1992; Miller and Xia, 1998) 또한, 지표층에서 반사된 에너지는 직접파나 굴절파의 주파수 내용과 유사하기 때문에 주파수 필터링 만으로는 굴절파로부터 반사파를 분리할 수가 없기 때문이다 (Steeple and Miller, 1998). 시간-공간영역에서의 뮤우팅이 필터링으로 생각될 수는 없지만 분리 가능한 신호와 잡음의 확인에는 주의가 필요하며, 또한 원하지 않은 부산물(unwanted artifacts)의 생성을 막기 위해 적절한 뮤우트 테이퍼(mute taper)를 설정해야 한다(Baker et al., 1998). 천부 반사파는 그라운드롤(ground roll)이나 공기파(air wave), 그리고 굴절파보다 진폭이 작으며(Miller et al., 1989), 굴절파는 직선으로 나타나는 반면 반사파는 쌍곡선 궤적을 보인다. 또한, 초동(first-arrival)보다 낮은 주파수의 반사파로 생각되어지는 이벤트는 반사보다는 그라운드롤에 의한 것으로 알려져 있어 (Steeple and Miller, 1998), 상대적으로 반사파에 비해 굴절

Table 3. Header values of CDP sorted data, where *tracf* represents the trace number within field record, *offset* represents the distance from the source point to the receiver point in cm, *cdpt* is the trace number within CMP ensemble, *cdp* is the CMP ensemble number, *sx* is the source coordinates in cm, *gx* is the group coordinates in cm, *dt* is sampling interval in micro-seconds and *ns* is the number of sample in the trace

tracf	offset	cdp	cdpt	sx	gx	dt	ns
1	4200	95500	2100	93400	97600	250	2048
1	4150	95525	2075	93450	97600	250	2048
2	4250	95525	2125	93400	97650	250	2048
1	4100	95550	2050	93500	97600	250	2048
2	4200	95550	2100	93450	97650	250	2048
3	4300	95550	2150	93400	97700	250	2048
1	4050	95575	2025	93550	97600	250	2048
2	4150	95575	2075	93500	97650	250	2048
3	4250	95575	2125	93450	97700	250	2048
4	4350	95575	2175	93400	97750	250	2048
1	4000	95600	2000	93600	97600	250	2048
2	4100	95600	2050	93550	97650	250	2048
3	4200	95600	2100	93500	97700	250	2048
4	4300	95600	2150	93450	97750	250	2048
5	4400	95600	2200	93400	97800	250	2048
1	3950	95625	1975	93650	97600	250	2048
2	4050	95625	2025	93600	97650	250	2048
3	4150	95625	2075	93550	97700	250	2048
4	4250	95625	2125	93500	97750	250	2048
5	4350	95625	2175	93450	97800	250	2048
6	4450	95625	2225	93400	97850	250	2048
1	3900	95650	1950	93700	97600	250	2048
2	4000	95650	2000	93650	97650	250	2048
3	4100	95650	2050	93600	97700	250	2048
4	4200	95650	2100	93550	97750	250	2048
5	4300	95650	2150	93500	97800	250	2048
6	4400	95650	2200	93450	97850	250	2048
7	4500	95650	2250	93400	97900	250	2048
1	3850	95675	1925	93750	97600	250	2048
2	3950	95675	1975	93700	97650	250	2048
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

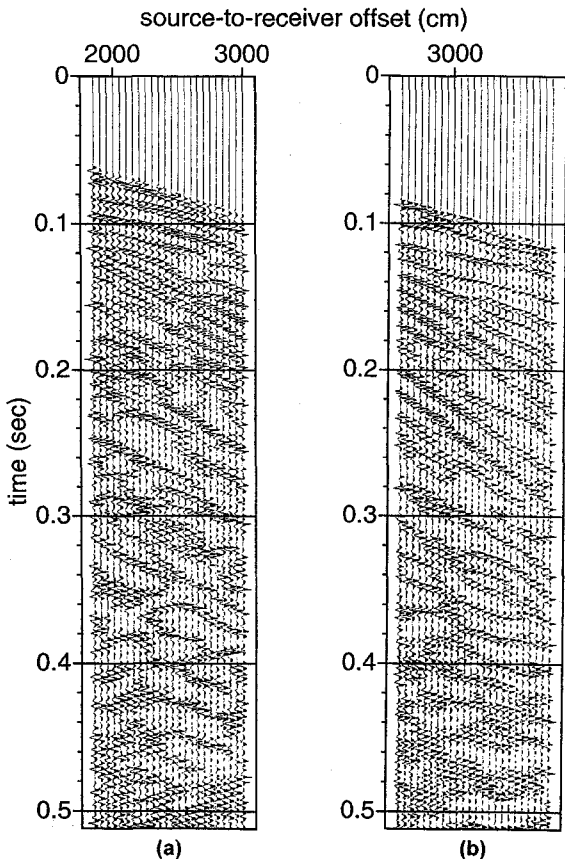


Fig. 7. Shot gathers after application of first-arrival mute; A 10-ms taper was used at the edges of all mute regions. The unmuted field files are presented in Fig. 6.

파는 저주파임을 알 수 있다. 본 논문에서는 상기 근거에 의하여 뮤우팅을 실시하였으며, Fig. 7은 필터링된 현장자료에 10-ms의 뮤우트 테이퍼를 사용하여 직선상의 굴절파로 보이는 초동을(Fig. 6) 뮤우팅한 후의 결과이다.

공심점 취합

중합 차아트(Fig. 4)에 나타낸 바와 같이 이번 탐사에서 이용한 공심점 기법은 전통적인 기법과는 달리, 수진기를 고정시킨 상태에서 진원점만 이동하여 자료를 취득하였기 때문에 공심점 중합수(CMP fold)는 증가한 후 다시 감소하며(Table 3), 두 축선에 대하여 각각 다른 중합수를 기록한다. 이는 두 축선에서의 수진점 간격은 0.5m로 고정되어 같은 반면, 진원점 간격은 1m와 2m로 각각 달랐기 때문이다. 그러므로, 축선 C에서는 최대 24 fold, E에서는 6 fold의 중합수를 기록한다.

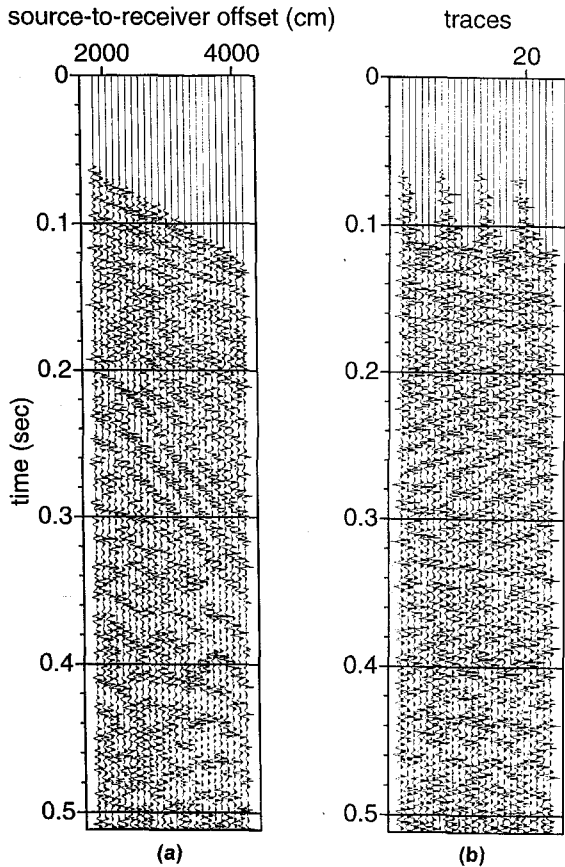


Fig. 8. Selected CMP gathers from different locations along the Line C (a) and the Line E (b), after first-arrival muting.

그리고, 진원점과 수신점이 일치하는 0 오프셋(zero offset)이 후의 기록에서는 양측전개(split-spread)하여 얻을 수 있는 탄성과 트레이스들이 기록되며, 0 오프셋 이전의 기록과 반대 방향의(minus offset) 트레이스에 대하여는 플러스 오프셋(plus offset)으로 변환한 후 다시 공심점 분류를 하였다. Fig. 8은 이러한 과정을 거친 후 최종으로 공심점 취합된 자료이다.

두 측선에 대하여 공심점 취합을 한 후의 결과를 분석해 보면 측선 C에서는 공심점 번호(CDP number)가 97875인 하나의 공심점에 대하여 공심점 중합수가 24 fold인 반면, E에서는 공심점 번호가 각각 97200-97225-97250-97275인 네 개의 공심점에서 중합수가 6 fold이다. 또한, 높은 중합수를 기록하는 측선 C에서는 80-ms와 190-ms에서 쌍곡선궤적을 보이는 반사이벤트의 확인이 용이한 반면, 6 fold의 적은 중합수를 기록하는 측선 E의 공심점 기록에서는 이러한 반사이벤트의 확인이 어렵다(Fig. 8).

속도분석

탄성과 탐사 자료의 처리과정에서 지하속도정보는 중합(stacking), 시간-심도전환(time-depth conversion), 구조보정

(migration) 등의 작업을 하는데 있어서 필수적으로 알아야 할 가장 중요한 변수이다. 그러나, 육상 천부 반사법에서의 속도 분석에는 다음과 같은 어려움이 있기 때문에 많은 주의가 필요하다. (1) 천층수대(vadose zone)와 포화대 경계, 기반암 표면사이에서, 그리고, 비고화와 고화된 퇴적물, 포화와 비포화대 사이에서 급격한 속도 증가가 일어나고, 또한 높은 감쇠가 일어나는 미고결의 박층이나 풍화대에서도 층경계에서는 높은 속도 대조(velocity contrast)를 가진다는 것이다(Holliger and Robertsson, 1998). 특히, 비고화 물질에서는 지하수면 위에서의 NMO 속도는 250 m/s 보다 작은 반면, 지하수면 바로 밑의 속도는 1250 m/s를 넘어 속도구배(velocity gradient)가 매우 크다(Miller and Xia, 1998). 그리고, 이러한 지하수면에서의 매우 큰 음향임피던스는 심부 반사e면의 분해능(resolution)을 저하시킨다(Goforth and Hayward, 1992). (2) 두층간의 속도 차이가 매우 클 때는 위상변화(phase change)가 일어나며, 이러한 반사파의 특징(character)에 변화가 생길 경우에는 기반암으로부터의 반사이벤트 식별을 어렵게 하여 속도분석 또한 어렵게 한다(Pullan and Hunter, 1985). (3) 건조한 충적층에서는 매우 짧은 수평거리에 있어서 중합속도의 수평적 변화가 심하며(Steeple and Miller, 1998), 또한 신호대역폭(signal bandwidth)이 감소되고 지하수면의 반사계수(reflection coefficient)가 기반암의 것보다 크기 때문에 이 두면에서의 반사 이벤트를 구별하기 어렵게 한다는 것이다(Goforth and Hayward, 1992). (4) 기반암과의 접촉부에서 속도 차이가 크지 않을 경우에도 광각(wide-angle)의 반사파는 위상이동(phase-shift)의 현상이 일어나 파형이 왜곡되고, 이러한 광각의 반사파는 단층처럼 일관성이 없는(incoherent) 방식으로 부분적으로 중합될 수 있다(Hunter et al., 1984; Pullan and Hunter, 1985; Miller et al., 1998).

육상 천부에서의 전형적인 탄성파의 P파 속도는 500-2000 m/s이며(Holliger and Robertsson, 1998), 풍화대의 평균 구간 속도는 약 500 m/s 내외임이 밝혀져 있다(Miller and Steeples, 1990). 그리고, 건조한 충적층에서의 NMO 속도는 225-400 m/s의 범위를 보이며, 평균 P파 속도는 300 m/s 내외로 알려져 있다(Miller et al., 1989; Steeples and Miller, 1998). 본논문의 경우 상속도 중합이나 샘플런스(semblance)를 이용한 속도분석 등의 방법으로 속도분석을 시도하였으나 실제 속도 분석에서는 좋은 결과를 얻지 못하였다. 그 원인은 천부층의 속도변화가 심하기 때문으로 사료되며 coherency를 증진시키기 위해서는 residual static analysis가 필요하다. 그러나, 본 연구에서는 실제 적용의 효용성과 적용 비용을 고려하여 생략하였다. 따라서, 보고되어 있는 충적층에서의 평균 P파 속도의 범위에서 trial and error 방식으로 속도 분석을 시행하였으며, 또한 속도분석의 보완적인 방법으로 뮤우팅 하기 전의 필터링 된 현장자료에서(Fig. 6) 굴절파로 보이는 초동의 속도를 측정함으로써 간접적인 속도분석의 결과를 얻을 수 있었다. 이 직선상의 굴절파 속도는 약 350 m/s 내외의 값으로

측정되었으며 이는 trial and error 방식으로 얻은 NMO 보정 속도와 일치한다.

NMO 보정과 중합

천부 반사법에서 NMO 보정시 긴 오프셋(far offset)에서의 유해한 이완(stretch)효과는 매우 중대한 문제이다. 그 이유는 과감한 뮤우팅으로 이완 과정에서의 부산물(artifacts)을 제거시키지 않으면 분해능의 감소, 진폭 특징(amplitude characteristic)의 변화, 신호대 잡음비의 저하 등의 결과를 가져오기 때문이다. 또한, 천부 반사법에서의 NMO 보정이 힘든 이유로는 고주파의 자료와 낮은 신호대 잡음비 그리고, 진원근처의 오프셋과 최적 반사 윈도우(optimum reflection window)내에서 반사 이벤트 확인이 가능한 트레이스의 수가 적다는 것 등이 있다(Miller and Xia, 1998). 일반적으로 50m 보다 얇은 반사파에 대한 최적 이완 뮤우트 한계(stretch mute limit)는 20% 보다 적으나(Miller, 1992), 근거리(near-offset)에서는 최대 5%의 이완 뮤우트를 그리고 원거리(far-offset)에서는 50%의 허용 이완 뮤우트를 적용한 후에 다시 중합하면 신호대 잡음비는 증가되는 것으로 알려져 있다(Miller and Xia, 1998). 본 논문에서는 공심점 취합된 자료

(Fig. 8)에 대하여 NMO 보정시 100%의 이완 뮤우트를 적용하였다. 그 이유는 20% 미만의 값으로 이완 뮤우트를 실시할 경우 자료의 너무 많은 부분을 잃게 되고, 각각의 공심점에서 오프셋이 작기 때문에 유해한 이완 효과는 무시할 수 있을 정도로 미약했기 때문이다. 또한, NMO 보정을 위한 중합 속도는 trial and error 방식으로 시행한 속도분석의 결과를 적용하였으며, 각 시간별 중합속도는 측선 C의 경우 0.08(초)-340(m/s), 0.19-346, 0.33-416으로, E에서는 0.085-340, 0.12-347, 0.21-419, 0.32-690의 결과를 얻을 수 있었다(Fig. 9). Fig. 9에서 0.08초 부근의 반사파 이벤트들은 이 연구에서 생략한 정보정의 필요성을 보여준다.

본 논문에서는 NMO 보정된 공심점 자료에 대하여(Fig. 9) SU의 중합 프로그램인 sustack을 이용하여 각각의 공심점에서 중합을 실시하였다. 공심점 취합 질에서 설명하였듯이 두 측선의 각 위치(location)에서의 공심점 중합수는 6 fold에서 24 fold의 다양한 값을 보이기 때문에 중합을 실시할 때 서로 다른 중합수로 인한 영향을 고려하여 중합을 실시하였다.

자료 해석 및 토의

상기한 모든 자료처리과정에서 사용한 탄성과 기록 도시법은 위글 트레이스와 가변면적법(wiggle-trace and variable-area method)이며, 각 단계에서 자료처리 후 그 결과의 확인을 위해 SU의 도시(display)프로그램인 supswig를 이용하여 도시하였다. 이상의 자료취득 후 공심점 중합 단면도 작성까지의 모든 자료처리단계를 Table 4에 요약하였다.

대략적인 시간-심도 전환을 실시한 후의 최종 반사법 단면

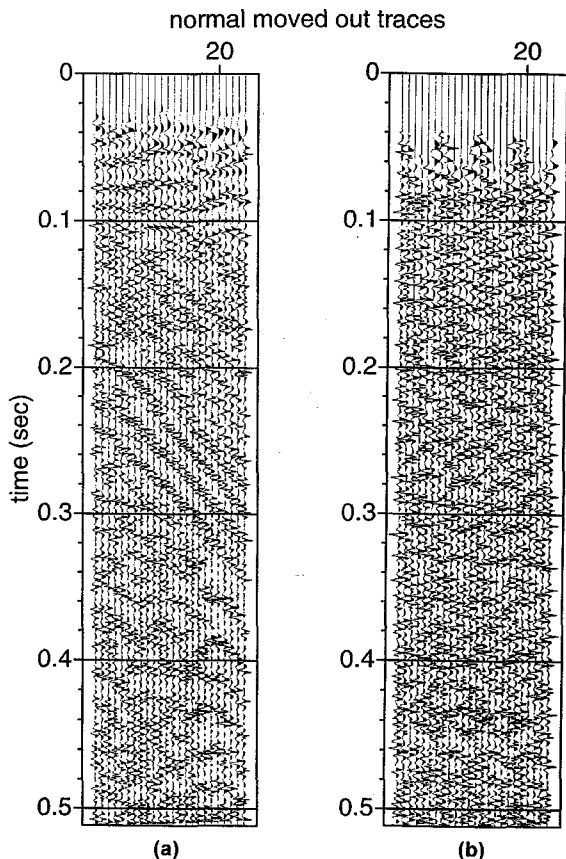


Fig. 9. NMO corrected CMP gathers with a 100% stretch mute; These are the same CMP gathers presented in Fig. 8.

Table 4. Processing flow for the seismic reflection data. The data were processed using SU (Seismic Unix) processing package from CWP, CSM on a Personal Computer with the Linux OS

Processing step	Description
(1) Data reformat	Data format conversion from SEG-2 to SEG-Y
(2) Editing and Analysis of shot gather	Identifying reflection event in shot gather
(3) Gain control	Display with a 50-ms AGC window
(4) Frequency filtering	Band-pass filter; 195-1560 Hz
(5) Muting	First-arrival mute with a 10-ms mute taper
(6) Common-depth-point (CDP) sort	Sorting from source gathers to CDP gathers
(7) Velocity analysis	By trial and error manner
(8) NMO correction	Based on optimum stacking velocities with 100 % stretch mute
(9) Common-depth-point (CDP) stack	Sum common midpoints to simulate a cross-section profile
(10) Approximate time-depth conversion	By multiplying interval velocity by one way travel time

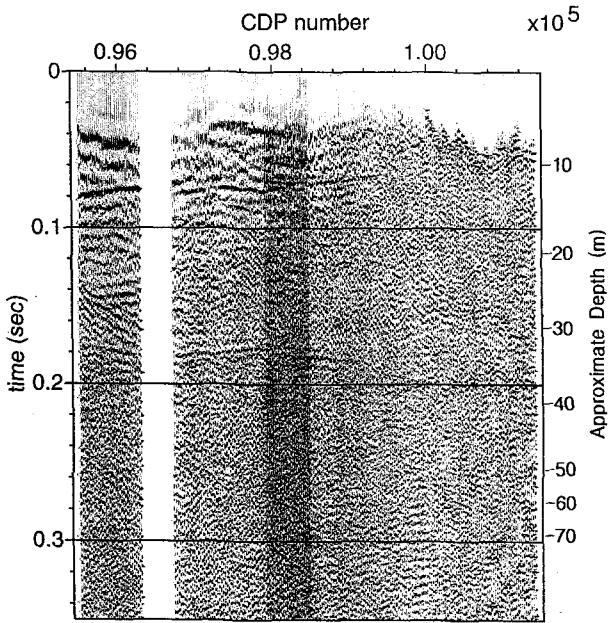


Fig. 10. CMP stacked section of Line C.

도에서 측선 C의 단면에서는(Fig. 10) 연속성이 양호한 두 개의 반사면을 0.08초와 0.18초에서 볼 수 있으며, 측선 E의 단면에서는(Fig. 11) 0.09초와 0.18초에서 수평적 연속성이 약한 반사면이 나타남을 볼 수 있다. 즉, 측선 C의 단면에서는 지표면 아래 14미터와 35미터 부근에서 북서-남동 방향의 비교적 평탄한 지하구조를, 이와 사교하는 방향인 측선 E의 단면에서는 약 17미터와 32미터에서 동-서 방향으로의 평탄한 지하구조를 보여준다. 측선C의 중합 단면도에는 두 종류의

진원과, 다른 중합수에 의한 결과가 같이 나타나 있다(Fig. 10). 단면의 오른쪽 반은 2 kg, 왼쪽은 4 kg의 망치를 진원으로 사용한 결과이며, 2 kg의 망치를 진원으로 사용한 경우가 4 kg의 망치의 경우보다 높은 주파수 내용을 보이는 것을 알 수 있다. 중합수가 24, 12, 9 및 6 fold로 변화하는 것에 대한 차이는 현저하게 나타나지 않으나, 공심점 번호 99200 이상의 6중합 영역에서는 두 반사면의 연속성이 약해지며 잡음이 많음을 볼 수 있다. 이는 적은 중합수로 인한 영향뿐만 아니라 도로 공사시 이루어진 복토와 7번 국도와 접해 있어 자동차 진동의 영향이 더 많았던 것으로 보인다.

측선 E는 2 kg의 망치 진원만을 사용하였으며 최대 중합수는 6 fold이다. 이 중합 단면에서는 연속성이 좋은 반사면의 확인이 어려움을 알 수 있다(Fig. 11). 이는 진원과 낮은 중합수로 인한 것과 공심점 번호 98700부터 99500 까지 급경사의 직선상으로 나타나는 일관성 있는 잡음(coherent noise)으로 인한 결과로 보인다. 한편, 그라운드롤이라 불리는 잡음은 큰 진폭과 저주파, 그리고 저속도의 특징이 있으며 반사신호를 가리는 경향이 있다(Steeple and Miller, 1998). 또한, 그라운드롤은 진원-수진기 간격이 너무 짧은 경우에도 나타나는 것으로 알려져 있다(Hunter et al., 1984). 이러한 점을 고려하면 측선 E는 C에 비하여 오프셋이 작으며 또한 측선 C에서는 보이지 않는 상기한 바와 같은 특징을 보이는 잡음이 측선 E에서는 우세하게 나타나기 때문에 이 잡음은 그라운드롤인 것으로 사료된다. Fig. 11에서 확인할 수 있는 바와 같이 반사면의 연속성이 이 잡음으로 인해 급격하게 약해짐을 볼 수 있다.

결론

용상읍 용당에서 시행된 이번 반사법 탐사에서는 자료 취득시 소형망치를 진원으로 사용하였으며, 각 진원점에서는 해머스타터를 알루미늄판에 부착하여 정확한 트리거 신호를 얻을 수 있도록 하였다. 또한, 이번 탐사에서 고안 사용된 공심점 기법은 야외에서 전개되어 있는 수진기 이동을 최소화하고 진원을 자주 이동하는 것으로, 특히 망치진원과 같은 이동이 용이한 진원을 사용할 경우 매우 효과적이다. 상기의 방법으로 신호대 잡음비가 높은 기록을 획득, 최소의 탐사비용으로 지표면 아래 50m 내외의 지하구조를 밝힐 수 있었다. 또한, 이러한 방법들은 야외에서 효율적으로 높은 중합수의 기록을 가능하게 했으며 그 결과도 양호하여 육상천부 반사법 탐사에서 효율적이며 저렴한 탐사방법으로 이용될 수 있는 것으로 생각된다.

자료처리 프로그램은 CSM(Colorado School of Mines)의 CWP(Center for Wave Phenomena)에서 제공하는 SU(Seismic Unix)를 이용하였다. 새로운 기법의 개발보다는 기개발된 기법을 적절하게 적용하여 천부 반사법 탐사에서 가장 좋은 결과를 얻을 수 있는 분석매개변수들의 값을 찾아내고 이론적

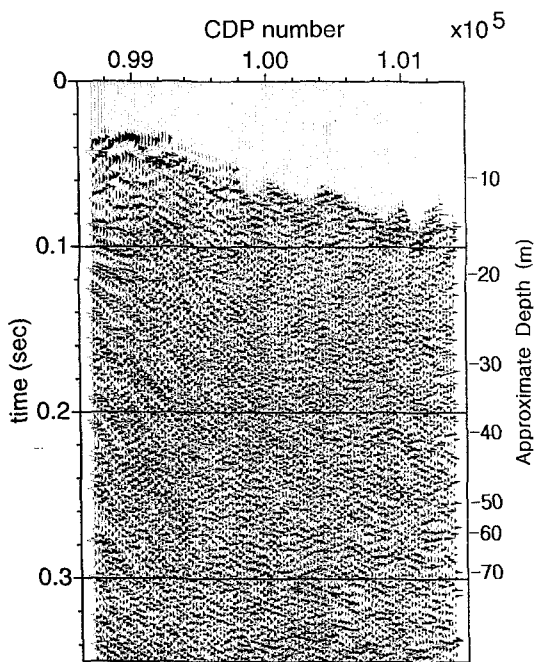


Fig. 11. CMP stacked section of Line E.

배경을 추구하였다. 또한, 이 프로그램은 비상업용 공개프로그램으로 누구나 무료로 얻을 수 있는 장점이 있어 기본 자료 분석에 많이 이용할 수 있을 것으로 사료된다. 향후 정확한 속도분석과 NMO 보정시 각각의 공심점에서의 최적 이완 뮤우트의 적용 등의 세부적인 자료처리기법을 적용하고, 특히 정보정을 적용하면 더 좋은 결과를 가져올 것으로 예상된다.

이번 탐사결과에서도 알 수 있듯이 육상천부 반사법에서는 공간적으로 알리아싱된 그라운드롤과 반사파로 보일 수 있는 공기파의 잘못된 해석, 그리고 굴절파를 반사파로 오인할 수 있는 경우 등 많은 난점이 있다. 이러한 문제점들은 긴 진원-수진기 간격과 좁은 수진점 간격의 설정, A/D 변환전의 아날로그 저역차단 필터의 적용, 그리고 강력한 채단 뮤우팅(surgical muting), 주시곡선도의 작성을 이용한 굴절파의 속도 측정 등과 같은 방법을 이용하면 적절히 해결 될 수 있는 것으로 알려져 있다(Steeple and Miller, 1998). 또한, 탐사지역 근처에서의 시추자료가 이용 가능하다면 중합단면상에서의 반사면들과 비교, 대비함으로써 지하구조와 층서 상태를 더욱 정밀하게 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 1996년도 및 1997년도 교육부 기초과학연구소 학술연구조성비(과제번호: BSRI-96-5421 및 BSRI-97-5421)에 의하여 수행되었음.

참고문헌

- 이민성, 강필중, 1964, 양산도폭 지질보고서(1:50000): 국립지질조사소.
- 장기홍, 1984, 한국지질론: 민음사, pp. 128-138.
- 한국자원연구소, 1998, 양산단층을 고려한 설계기준 지진의 재평가 최종 보고서: 한국전력공사, pp. 102-115.
- Baker, G. S., Steeples, D. W. and Drake M., 1998, Muting the noise cone in near-surface reflection data: An example from southeastern Kansas: *Geophysics*, **63**(4), 1332-1338.
- Dobecki, T. L. and Romig, P. R., 1985, Geotechnical and groundwater geophysics: *Geophysics*, **55**(12), 2621-2636.
- Goforth, T. and Hayward, C., 1992, Seismic reflection investigations of a bedrock surface buried under alluvium: *Geophysics*, **57**(9), 1217-1227.
- Holliger, K. and Robertsson, J. O. A., 1998, Effects of the shallow subsurface on upper crustal seismic reflection images: *Tectonophysics*, **286**, 161-169.
- Hunter, J. A., Pullan, S. E., Burns, R. A., Gagne, 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**(8), 1381-1385.
- Knapp, R. W. and Steeples, D. W. 1986a, High-resolution common-depth-point seismic reflection profiling: Instrumentation: *Geophysics*, **51**(2), 276-282.
- Knapp, R. W. and Steeples, D. W. 1986b, High-resolution common-depth-point seismic reflection profiling: Field acquisition parameter design: *Geophysics*, **51**(2), 283-294.
- Milkereit, B. and Eaton, D., 1998, Imaging and interpreting the shallow crystalline crust: *Tectonophysics*, **286**, 5-18.
- Miller, R. D., 1992, Normal moveout stretch mute on shallow-reflection data: *Geophysics*, **57**(11), 1502-1507.
- Miller, R. D., Steeples, D. W. and Brannan, M., 1989, Mapping a bedrock surface under dry alluvium with shallow seismic reflections, *Geophysics*, **54**(12), 1528-1534.
- Miller, R. D. and Steeples, D. W., 1990, A shallow seismic reflection survey in basalts of the Snake River Plain, Idaho: *Geophysics*, **55**(6), 761-768.
- Miller, R. D. and Xia, J., 1998, Large near-surface velocity gradients on shallow seismic reflection data: *Geophysics*, **63**(4), 1348-1356.
- Pullan, S. E. and Hunter, J. A., 1985, Seismic model studies of the overburden-bedrock reflection: *Geophysics*, **50**(11), 1684-1688.
- Steeple, D. W., 1998, Shallow seismic reflection section-Introduction: *Geophysics*, **63**(4), 1210-1212.
- Steeple, D. W. and Miller, R. D., 1998, Avoiding pitfalls in shallow seismic reflection surveys: *Geophysics*, **63**(4), 1213-1224.
- Stockwell, Jr. J. W. and Cohen, J. K., 1998, CWP/SU: Seismic Unix Release 2.0.2: a free package for seismic research and processing, Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines.