

지반교란 영역 규명을 위한 고분해능 천부 탄성과 반사법 탐사

고광범¹⁾ · 이두성²⁾

High Resolution Shallow Seismic Reflection Survey for the Investigation of Ground Disturbance Area

Kwang Beom Ko¹⁾ and Doo Sung Lee²⁾

요 약 : 지반침하하는 지난 3년간의 본 연구실의 중요한 연구 주제로 본 연구에서는 채굴적 붕괴로 육안상 지표침하하는 뚜렷이 관찰되지 않으나 그 하부 지반은 이미 교란되었다고 판단되는 영역을 천부 탄성과 반사법을 이용하여 고찰함으로써 향후 예상 침하영역을 정량적으로 도출하였다. 지반교란에 의한 탄성과 신호의 왜곡 및 감쇠를 최소화하고자 좁은 송수신 간격(0.3m) 및 가능한 짧은 오프셋(<30m)의 0.15m의 CMP 간격을 가지는 측선배열로써 고주파수 천부 탄성과 자료를 획득하였다. 짧은 측선길이(43m)를 감안하여 고정된 지오폰에 대하여 송신원을 이동하는 배열법을 선택하였다. 침하에 의해 지반교란이 심한 조사지역의 탄성과 자료의 특성과 획득자료 대부분이 짧은거리 오프셋 탄성과 자료임을 고려하여 신중한 뮤팅과 잔여정보정 처리과정을 거쳐 탄성과 중합단면을 작성하였다. 지표 침하양상과 대비하여 중합단면을 해석, 정량적인 예상 침하영역을 분리하였다.

주요어 : 지반침하, 지반교란, 탄성과 반사법, 잔여 정보정

Abstract : A problem of ground subsidence has been a focus of our research over the past 3 years. The purpose of this study is to investigate the disturbed stratigraphic structure by mining and to separate the possible ground subsidence area using shallow seismic reflection survey and processing. To overcome the problems such as the distortion and attenuation of seismic signal caused by ground disturbance and to acquire the high frequency data, an array with short spacing (0.3m) for both the shot and receivers, yielding near-offset (<30m) and CMP spacing of 0.15m was implemented. Data were acquired along the survey line with length of about 43m by fixed receiver array. By considering statics caused by the ground disturbance and offset distribution of data, careful processing steps such as muting and residual statics correction were applied for successful shallow reflection imaging. By correlating the ground subsidence data and stack section, possible subsidence zone could be interpreted quantitatively.

Keywords : ground subsidence, ground disturbance, seismic reflection survey, residual static correction

서 론

본 연구의 조사 대상지역은 과거 탄광이 활발히 가행된 바 있고 이후, 채굴적 붕괴로 시간에 따라 점진적으로 지표침하가 확장되는, trough형 침하가 발생하고 있는 곳이다. 지표의 점진적 침하는 인근 가옥, 교량 및 철도 등 구조물의 균열 및 변형을 유발함으로써 시설물의 안정성을 위협하는 위협요소로 작용하고 있다(석탄산업합리화 사업단, 1999). 이와 같이 침하를 겪고 있는 지역은 물리탐사 기술의 공학적 목적에의 적용성 여부를 가늠할 수 있는 흥미있는 지역이며, 본 조사지역의 경우, 진행하고 있는 trough형 지반침하 양상을 고찰하고 예상 침하 가능영역을 제시함으로써 시설물의 안정성을 판단하는데 직접적 도움을 줄 수 있는 역할을 하는 데 있다.

본 연구실에서는 3년간에 걸쳐 수차례의 3차원 탄성과 탐사를 수행한 바 있으며(고광범 등, 2000; 고광범과 이두성, 2002) 하부의 지반교란 영역은 육안으로 관찰되는 지반침하 영역보다 더 진전되어 있음을 밝힌 바 있다. 본 연구의 목적은 위 연구결과를 토대로, 육안으로 지반침하가 뚜렷이 관찰되지 않으나 하부 지반은 이미 교란이 진전되었다고 판단되는 영역을 선정하고 2차원 천부 탄성과 반사법을 이용하여 천부(<50m, Ghose *et al.*, 1998) 교란구조의 정밀한 규명을 통하여 교란 시작부와 향후 침하 예상영역을 정량적으로 규명하고자 하는 데 있다.

조사지역의 주된 지질은 두께 2~4m 정도의 표토층 하부, 탄층을 포함하는 윤희 장성층이다(대한지질학회, 1998). 심도 60m 이내의 채굴에 의해 지반침하가 발생(석탄산업합리화 사

*2003년 1월 9일 접수

1) 한성대학교 영상화기술 연구실

2) 한성대학교 소프트웨어 시스템 공학

업단, 1999)한 것을 감안할 때 그 상부의 천부~극천부(<50m) 교란 장성층이 주된 고찰영역이되며 고분해능의 해석단면이 필요하다. 또한 윤희 장성층 층서 두께 및 침하지역의 탄성과 자료의 주파수 특성을 고려할 때(이두성, 2001) 지반교란에 의해 유발되는 탄성과 신호의 왜곡 및 감쇠(고광범과 이두성, 2002)를 극복하고 고주파수 탄성과 자료를 획득할 수 있는 적절한 축선설계가 요구된다. 본 연구에서는, 향후 침하 예상영역을 포함하는, 총길이 약 40m의 축선에 대해서 짧은거리 오프셋(<30m) 탄성과 자료와 좁은 송수신 간격을 가지는 축선 배열을 선택하여 탄성과 신호의 왜곡 및 감쇠를 최소화함으로써 가능한 고주파수 탄성과 자료를 획득하고자 하였다. 또한 짧은 축선길이를 고려하여 보편적 배열인 split-spread나 end-on 배열보다는 지오폰 위치를 고정시키고 발파점의 위치를 연속적으로 이동하면서 자료를 얻는 방법을 선택하였다.

지반침하 지역의 탄성과 자료의 특징은 탄성과의 교란매질 내 전파에 기인하는 반사신호의 왜곡 및 불량한 신호대 잡음 비로 요약된다. 본 연구에서 획득한 탄성과 자료 대부분이 오프셋이 비교적 짧은 자료이므로 신중한 뮤팅과 잔여 정보정 자료처리를 거쳐 고분해능 탄성과 중합단면을 작성하였다. 중합단면과 지표 침하양상과 대비하여 하부 지반교란 영역을 해석하고 향후 예상침하 영역을 정량적으로 제시하였다.

축선 배열 및 자료획득

육상 탄성과 반사법 탐사자료는 송수원에 기인하는 일관성 잡음, 불규칙한 지형 등에 의하여 반사신호 크기는 미약하고 왜곡되는 경우가 대부분이다(Steeple and Miller, 1998). 이러한 일반적인 사항과 함께 특히 본 연구의 지반침하 지역의 탄성과 자료의 특성에서 대두되는 또다른 문제점은 지반교란에 기인한 non-surface consistent statics 및 감쇠로 인한 신호의 왜곡과 낮은 신호대 잡음비이다(고광범과 이두성, 2002).

침하지역에서 획득한 탄성과 자료의 특성을 살펴보고자 Fig. 1에 이 지역에서 얻은 3차원 천부 탄성과 자료를 도시하였다. 스파이킹 디컨벌루션 및 70~120 Hz 대역 필터링, 150% 스트레치 뮤트 및 1000 m/sec의 NMO 보정을 적용한 1m×1m bin 크기의 공통중간점 자료이다. 반사신호는 왕복주시 대략 0.05 초까지 3개가 식별 가능하며 그 이후의 시간대에도 반사파로 짐작되는 이벤트가 있으나 뚜렷한 연속성을 파악하기가 매우 어려운, 침하지역의 탄성과 자료의 특성을 보여준다. 결론적으로 침하지역의 탄성과 자료의 특성을 요약하면 첫째, 탄성과가 교란매질 내를 전파하는 동안의 심한 감쇠로 인한 고주파수 정보의 손실, 둘째로 송수신원 간 매질의 국부적 지반교란에 의한 non-surface consistent statics에 의한 것으로 설명할 수 있으며 송수신원이 모두 심한 교란영역에 위치할 경우 근거리 오프셋자료까지 왜곡시킨다(고광범과 이두성, 2002). 3차원 탄성과 자료의 경우, 전 방위각에 걸친 송수신원 자료를 취합하

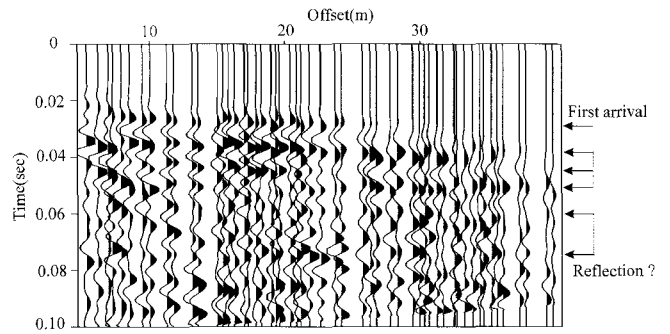


Fig. 1. Example of 3-D seismic CMP gather with bin size of 1m×1m after spiking deconvolution and bandpass filtering.

여 자료처리를 수행하므로 이러한 신호의 왜곡은 크게 나타나 반사신호의 연속성 향상 및 심하게 왜곡된 부분의 제거 등 자료처리시 상당한 노력이 요구된다.

본 연구에서는 국부적 지반교란에 의한 신호의 왜곡 및 감쇠를 최소화하는 고주파수 탄성과 자료획득을 목표로 효율적인 2차원 천부 탄성과 탐사를 수행하였다. 국부적 지반교란에 의한 신호의 왜곡 가능성은 짧은거리 오프셋(<30m) 자료획득으로, 신호의 극심한 감쇠는 송수신 간격을 좁게 하는 축선 배열을 설계함으로써 신호대 잡음비 문제를 극복할 수 있다. 또한 가능한 고주파수 송수신원을 사용함이 유리하나 본 연구에서는 파원으로써 해머를 이용하였다. 탐사축선은 3차원 탄성과 연구결과를 토대로 선정한, 길이 약 43m의 축선으로서 육안으로는 침하가 뚜렷이 관측되지 않으나 향후 침하가 예상되는 구간이 포함되도록 하였다. 탐사 대상지역(강원도 삼척시 도계읍 늑구리 남풍갱 부근)과 축선을 Fig. 2에 도시하였다.

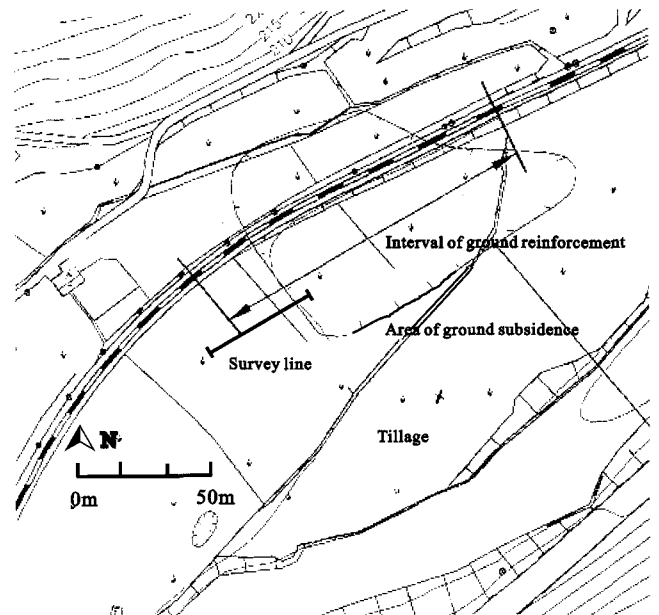


Fig. 2. Location map of survey area showing seismic reflection profiles (After Coal Industry Promotion Board, 1999).

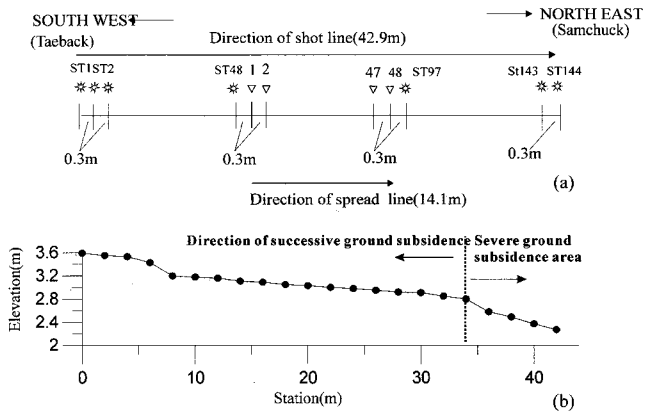


Fig. 3. (a) 2-D seismic profile array with fixed receivers and (b) Display of relative elevation of 2-D profiling line.

Table 1. Data acquisition parameters

· Survey area : 강원도 삼척시 도계를 녹구리 남풍갱 부근
· Data acquisition equipment : DAS-1™
· Data acquisition parameter setup
· Source type : 10 kg sledgehammer
· Number of vertical stack : unit stack
· Geophone used : 40 Hz vertical geophone
· Survey array : Receiver fixed
· Number of channel : 48 channel
· Sampling interval : 0.5 msec
· Record length : 0.5 s
· Geophone spacing : 0.3m
· Shot spacing : 0.3m
· Size of CMP : 0.15m

Fig. 3(a)는 본 연구의 측선배열을 나타낸 것이다. 송신원 및 수신원의 간격은 0.3m이고 중앙의 고정된 수신기 배열을 중심으로 대략 남서-북동 방향으로 42.9m 길이에 걸쳐 0.3m 간격으로 총 144개의 해머에 의한 탄성과 자료를 획득하였다 (Table 1). 공통중간점 간격은 0.15m이며 자료를 획득하는 데는 약 3시간이 소요되었다.

대응하는 지표의 고도를 Fig. 3(b)에 함께 도시하였다. 스테이션 약 34m 이후부터 침하의 뚜렷한 양상을 보이며 이러한 trough형 침하 확장방향은 삼척에서 태백쪽이다. Fig. 4는 획득한 탄성과 자료의 공통중간점-오프셋 분포를 도시한 것이다. 공통 중간점 자료의 중합수는 측선 중앙부분에서 최대 48개, 최대 오프셋은 약 ±28m로서 공통중간점 양 끝부분, 공통중간점 중간부분에 10m 이내의 근거리 오프셋이 집중적으로 분포한다. 아울러 본 배열의 단점을 보여주고 있는데 각 공통중간점 자료마다 오프셋 분포가 일정하지 않아서 공통중간점 취합 자료 처리시 어느 정도의 번거로움이 따른다.

탄성과 자료처리

본 연구의 자료처리는 ISU3D 패키지(신동훈 등, 2002)를 이

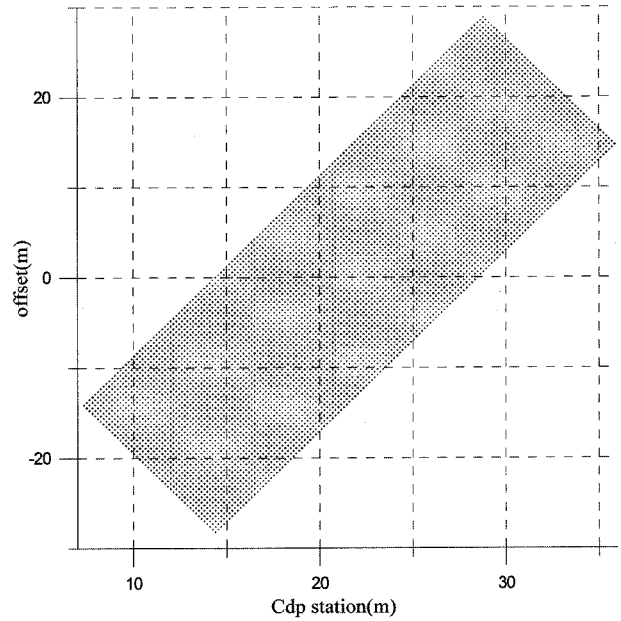


Fig. 4. CMP-Offset chart.

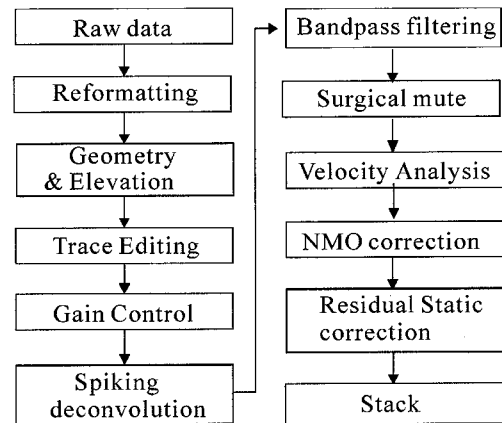


Fig. 5. Seismic data processing procedure.

용하여 수행하였다. 중점을 둔 자료처리 과정은 크게 세 부분이다. 첫째는 일관성 잡음을 억제하고 반사신호를 강조하기 위한 자료처리 과정으로 스파이킹 디컨볼루션 및 대역필터링의 조합, 둘째, 탄성과 자료가 30m 미만의 짧은 오프셋 분포만을 가지며 그중 10m 안팎의 근거리 오프셋자료는 초동, 일관성 잡음, 공기와 등 각종 잡음이 혼재하며 측선의 중앙부에 집중되어 있다. 따라서 잡음을 정확히 제거하면서 동시에 신호의 오프셋 대역을 최대한 보존하는 정밀한 뮤팅 과정이 필요하다. 마지막으로 반사신호의 연속성을 강화하여 고분해능 해석단면을 도출하기 위한 자료처리 과정으로 속도분석 및 잔여 정보가 포함된다.

한편, 측선의 길이가 상대적으로 짧고, 표도층 하부 2~4m 이하에 주 고찰대상인 장성층이 존재하므로 조사심도를 고려하여 정보정은 적용하지 않았다. Fig. 5는 적용한 자료처리 과정을 흐름도로 도시한 것이다.

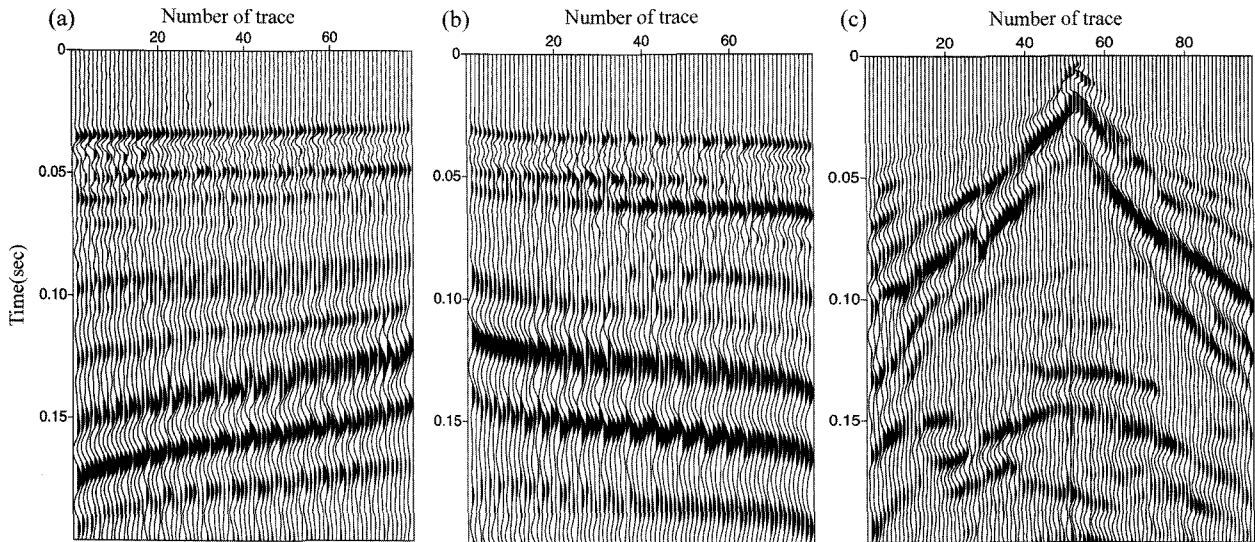


Fig. 6. Raw CMP super gather composed of (a) 11 adjacent CMP gathers (CMP range of 7.35~9.00m with less ground subsidence), (b) 11 adjacent CMP gathers (CMP range of 34.20~35.85m with severe ground subsidence) and (c) 2 adjacent CMP gathers (CMP range of 20.90~21.20m, central part of survey line).

디컨볼루션 및 대역 필터링

Fig. 6은 침하정도에 따른 반사신호의 왜곡정도를 살펴보기 위하여 100 ms 자동이득을 준 공통중간점 자료모음(CMP super gather, Büker *et al.*, 2000) 원시자료를 도시한 것이다. Fig. 6(a)는, 침하에 의한 영향이 최소라고 생각되는, Fig. 2에서 가장 바깥부분의 태백쪽 송신원에 의한 CMP 7.35~9.00m 간 11개의 공통중간점 자료모음이고 Fig. 6(b)는, 이와 대칭되는, 침하의 영향이 가장 큰 삼척쪽의 CMP 34.20~35.85m 간 11개의 공통중간점 자료모음이다. 오프셋 분포는 각각 $\pm 10.8\text{m} \sim \pm 17.4\text{m}$ 로서 상대적으로 중간거리 오프셋 자료에

해당한다.

초동과 미약하나 왕복주시 0.1초까지 반사파, 그리고 육상자료의 대표적 잡음인 그라운드 롤을 관찰할 수 있다. 중간거리 오프셋 분포를 가지므로 반사신호와 그라운드롤 구분이 비교적 양호하다. 반면 Fig. 6(c)는 10m 미만의 근거리 오프셋이 집중적으로 분포하는 측선 중앙부, CMP 20.90~21.20m의 2개의 공통중간점 자료모음으로서 반사신호는 초동, 직접파 및 그라운드롤과 혼재하고 더욱이 근거리 오프셋 분포만을 가지므로 오프셋범위에서 신호영역이 상당히 협소해지는 본 연구의 측선배열의 단점을 보여주고 있다.

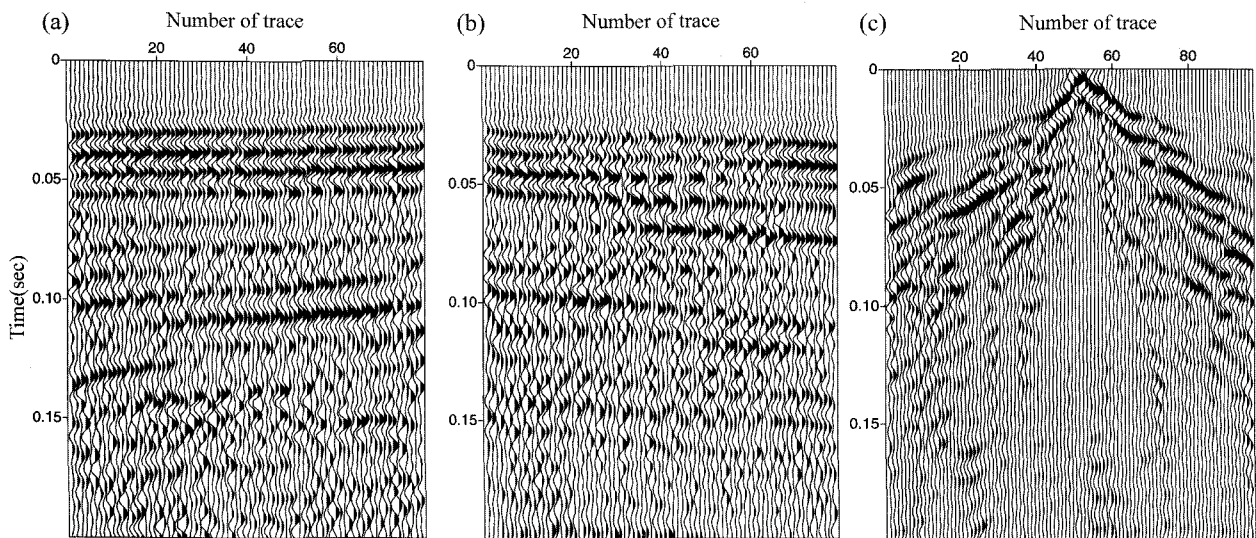


Fig. 7. Spiking deconvolution and bandpass filtering. CMP super gather composed of (a) 11 adjacent CMP gathers (CMP range of 7.35~9.00m with less ground subsidence), (b) 11 adjacent CMP gathers (CMP range of 34.20~35.85m) and (c) 2 adjacent CMP gathers (CMP range of 20.90~21.20m, central part of survey line).

육상 탄성파자료의 반사신호를 강화시키고 각종 잡음을 효과적으로 억제하고자 스파이킹 디컨벌루션과 대역필터링의 조합(Büker et al., 1998)을 적용하였다. 필터분석을 통하여 적절한 필터링 대역을 결정하였으며 Fig. 7은 최종적으로 그림 5의 자료에 대하여 스파이킹 디컨벌루션과 70~150 Hz의 대역필터링을 적용한 결과이다. 왕복주시 0.1초까지의 반사신호가 양호하게 강조되었다. 또한 Fig. 7의 (a) 및 (b)를 비교하였을 때, 송신원이 지반침하 영역 내에 있는 7(b)의 경우 7(a)에 비해 반사파 이벤트의 연속성이 상대적으로 불량함을 알 수 있는 바, 이는 하부 매질의 국부적 지반교란에 기인한 결과이다. 반사신호는 효과적으로 강조되었으나 반사신호의 수평적 연속성이 불규칙함을 보여주고 있으며 이는 곧 반사파에 근거한 잔여정보정이 중합단면의 질을 결정하는 중요한 자료처리 과업임을 의미한다.

한편 근거리 오프셋이 집중적으로 분포하는 Fig. 7(c)의 경우 스파이킹 디컨벌루션 및 대역필터링 조합으로서 반사신호를 강조하였으나 오프셋 범위에서 신호대역이 협소하므로 반

사파 신호를 포함하는 영역을 최대한 보존하는 정교한 뮤팅이 요구된다.

속도분석 및 잔여 정보정

지표침하는 채굴적 붕괴에 의해 상부지반의 연속적인 교란이 발생하며 그 영향이 지표면에 다다랐을 때 발생한다. 따라서 지표침하 영역 하부는 지반교란이 이미 상당히 진전되었음을 의미하며 이와 같은 지반교란은 탄성파 속도를 감소시킨다. 본 연구의 탄성파자료는 침하량이 각기 다른 영역에 걸치는 송신원에 의해 획득한 것이므로 짧은 측선길이에도 불구하고 지반교란에 의해 기인하는 속도편차를 감안하는 속도분석이 필요하다.

Fig. 8은 지반교란에 의해 속도편차가 가장 클 것으로 여겨지는 Fig. 6의 (a) 및 (b)에 대한 속도분석 결과로서 썸블런스 분석 및 대응하는 무브아웃 속도의 반사쌍곡선을 공통중간점 자료모음에 함께 도시한 것이다. Fig. 8(a)는 왕복주시 0.06초 정도까지 심도에 따라 900~1000 m/sec 정도의 무브아웃 속도

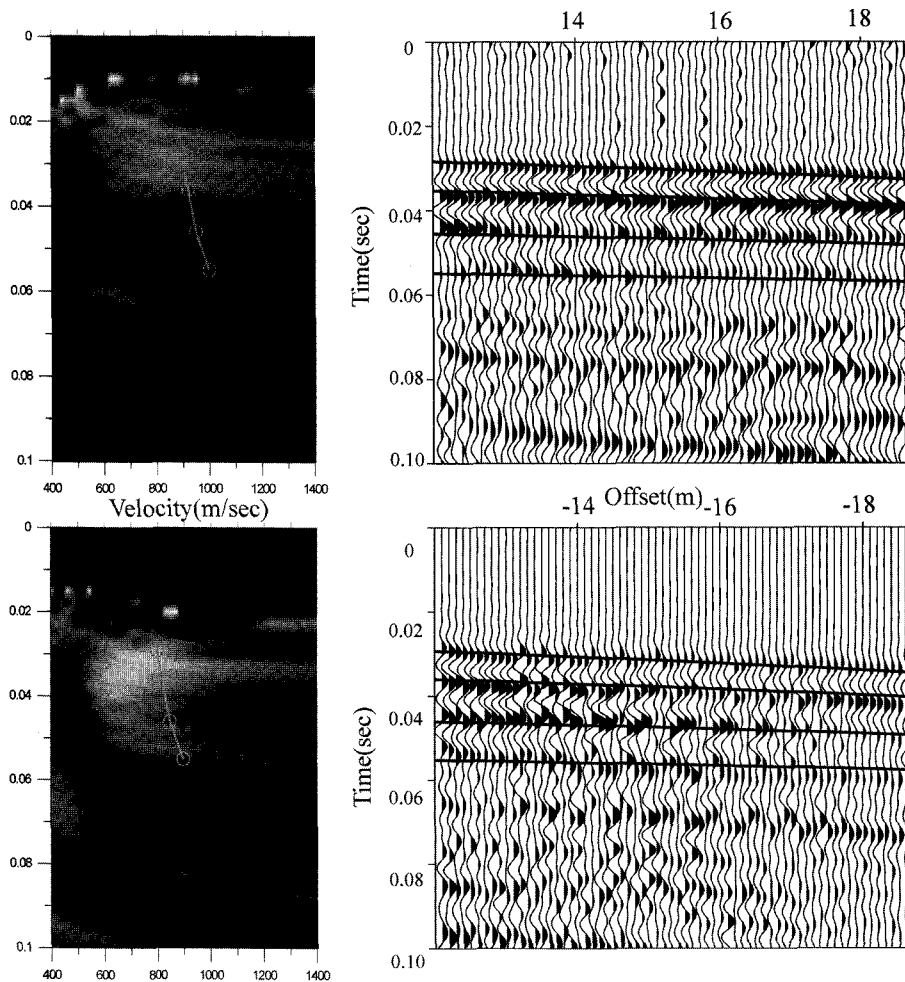


Fig. 8. Velocity analysis via semblance plot. (a) Semblance and (b) corresponding CMP super gathers (CMP 7.35~9.00m), (c) Semblance and (d) corresponding CMP super gathers (CMP 34.20~35.85m).

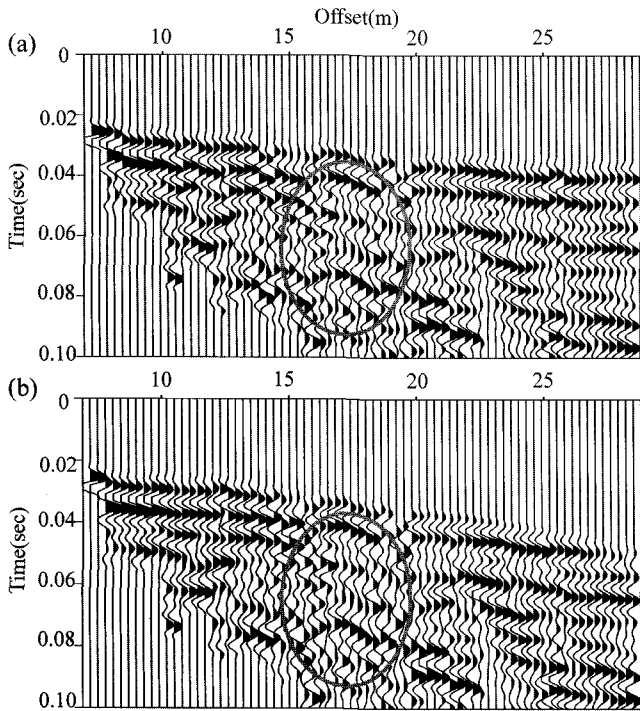


Fig. 9. Example of residual static correction after spiking deconvolution and bandpass filtering. (a) Before residual static correction. (b) After residual static correction.

를 보이는 반면 8(b)의 지반교란이 가장 큰 지역에서의 무브아웃 속도는 800~900 m/sec 정도로서 교란에 따른 속도편차는 약 100 m/sec을 나타낸다. 이는 동일한 곳에서 고광범과 이두성(2002)의 결과보다 무브아웃 속도가 다소 적게 추정(<150 m/sec)된 결과이며 그 이유는 본 연구의 탄성과 자료가 정밀한 속도분석을 수행하기에는 오프셋이 충분치 못한데서 기인한 것이라 생각된다. 지반교란에 따른 속도편차와 짧은 축선길이

를 감안하였을 때 속도분석 구간간격은 10m면 충분하다고 판단되며 여기에서는 분석구간을 세 구간으로 나누고 속도분석을 수행하였다.

한편, 고분해능 중합단면을 얻기 위해서는 단파장 송수신 statics에 의하여 불규칙하게 나타나는 반사신호의 수평적인 불연속을 보정하여야 한다. Fig. 9는 중합과위 최대화 기법(Ronen and Claerbout, 1985)에 의한 잔여 정보정을 적용한 일례로서 40 msec의 상호상관 구간과 5회의 반복을 통한 최대 보정량 변위 ± 3 msec 이내의 적용 결과로서 반사 이벤트의 연속성이 뚜렷이 향상되었음을 보여준다.

한편 오프셋 15m~20m 구간에서 나타나는 불규칙한 반사 이벤트는 송수신 위치 사이의 국부적인 지반교란에 기인한 non-surface consistent statics가 있음을 보여주며 적절한 트레이스 편집과 뮤팅으로 제거할 수 있다(고광범과 이두성, 2002).

중합단면 작성 및 해석

Fig. 10은 일련의 자료처리 과정을 통하여 작성한 중합단면을 지표면의 고도와 함께 도시한 것이다. 육안으로 뚜렷이 관측되는 지표침하하는 CMP 34m 지점부터이므로 중합단면 상의 축선은 고도차가 30m 거리에서 약 0.3m 정도로서 침하 관측은 어려우나 하부 영역은 지반교란이 상당히 진전되었다고 판단되는 영역이다.

중합단면상에서 왕복시간 0.1초까지 반사면이 인지된다. 침하를 유발하는 지반교란의 정도 및 그 영역은 반사면의 크기 및 연속성을 살펴봄으로써 도출할 수 있다. 반사면의 연속성은 침하가 뚜렷이 관측되지 않는 CMP 17m 부근부터 현저히 떨어지는 양상을 보이고 있다. 따라서 CMP 17m 지점 이후는 향후 지표침하가 예상된다. 또한 중합단면의 CMP 15m 지점에

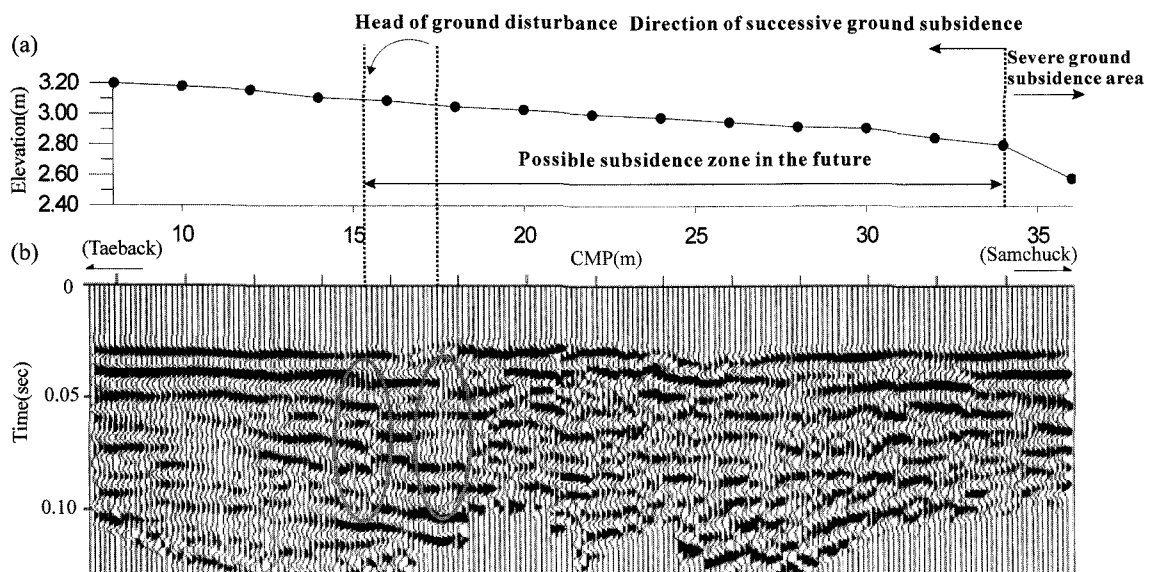


Fig. 10. 2-D stack section and interpretation. (a) Relative surface elevation and (b) Stack section.

서 수직한 반사면의 불연속이 인지되는 바, 이는 지반교란이 확장되는 선단부로 생각되며 이는 trough형 지반침하의 속성상 지반교란이 진행되는 첫 번째 징후로 판단된다. 결론적으로 이미 상당히 침하가 진행된 CMP 34m 지점 이후의 침하의 심화와 함께, 현재 침하가 뚜렷하지 않은 영역에 포함되는 CMP 15m을 기점으로 삼척에서 태백쪽으로의 지속적 침하가 발생할 것으로 예측된다.

결 론

본 연구는 지표침하는 뚜렷이 관측되지 않으나 채굴에 의해 그 하부는 이미 교란되었다고 판단되는 영역을 천부 탄성과 반사법을 이용하여 고찰함으로써 향후 예상 침하영역을 제시하고자 하였다.

좁은 송수신 간격(0.3m) 및 가능한 짧은 오프셋(<30m)의 0.15m의 CMP 간격을 가지는 축선배열로써 지반교란에 의한 탄성과 신호의 왜곡 및 감쇠를 최소화하여 낮은 신호대 잡음비 문제를 극복하고자 하였다. 스파이킹 디컨벌루션 및 대역필터링의 조합으로써 일관성 잡음을 억제하고 반사신호를 효과적으로 강조하였으며 짧은거리 오프셋 분포를 가지는 획득자료를 고려하여 신호의 오프셋 대역을 최대한 보존하는 정밀한 뮤팅을 수행하였다. 또한 속도분석 및 잔여 정보정의 신중한 적용으로 고분해능 중합단면을 도출하였다.

중합단면을 지표면 침하양상과 대비, 해석하였으며 육안으로 침하가 관측되지 않으나 하부 지반교란은 이미 상당히 진전되어 향후 지반침하가 예상되는 영역과 지반교란이 진행되는 선단부를 정량적으로 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 국가지정 연구실 사업(NRL)과제 ‘탄성과 영상화

연구개발 및 응용’의 일부로 수행된 연구이다. 한국과학기술원(KISTEP)의 재정지원에 감사를 드린다.

참고문헌

- 고광범, 지준, 이두성, 2000, 천부 탄성과 탐사 자료획득을 위한 3차원 축선배열 설계: 한국자원공학회지, **37**(4), 232-239.
- 고광범, 이두성, 2002, 지반침하 지역에서의 3차원 탄성과 반사법 탐사: 한국자원공학회지, **39**(5), 338-351.
- 대한지질학회, 1998, 한국의 지질, 550-556.
- 석탄산업합리화 사업단, 1999, 고사리지역 지반보강공사 실시계획 지반조사 보고서, 142-152.
- 신동훈, 박재우, 지준, 이두성, 2002, 지반조사를 위한 3차원 탄성과 자료처리 시스템: 한국자원공학회지, **39**(6), in press.
- 이두성, 2001, 천부 탄성과 기록의 잡음특성: 한국자원공학회지, **38**(1), 52-57.
- Büker, F., Green, A. G., and Horstmeyer, H., 1998, Shallow 3-D seismic reflection surveying: Data acquisition and preliminary processing strategies: *Geophysics*, **63**(4), 1434-1450.
- Büker, F., Green, A. G., and Horstmeyer, H., 2000, 3-D high-resolution reflection seismic imaging of unconsolidated glacial and glacio-lacustrine sediments: Processing and interpretation: *Geophysics*, **65**(1), 18-34.
- 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**(4), 1295-1309.
- Ronen, J., and Claerbout, J. F., 1985, Surface-consistent residual statics estimation by stack-power maximization: *Geophysics*, **50**(12), 2759-2767.
- Steeple, D. W., and Miller, R. D., Avoiding pitfalls in shallow seismic reflection surveys: *Geophysics*, **63**(4), 1213-1224.