

육상 3차원 탄성파 자료의 정보정

신동훈¹⁾ · 박재우¹⁾ · 지준²⁾ · 이두성²⁾

Static Correction of Land 3D Seismic Data

Dong-Hoon Sheen¹⁾, Jae-Woo Park¹⁾, Jun Ji²⁾ and Doo-Sung Lee²⁾

요 약 : 정보정은 풍화층의 두께나 속도가 균질하지 않아 하부의 지층으로부터 전파된 신호의 왜곡을 보정하는 방법으로 굴절파에 근거한 정보정과 반사파에 근거한 잔여 정보정이 있다. 이 중 굴절파에 근거한 정보정은 일반적으로 분석자의 주관적인 해석에 의존하므로 많은 시간이 소요된다. 따라서 방대한 양의 자료를 처리해야하는 3차원 탄성파 탐사 자료의 정보정에 적용하는 데는 어려움이 있다. 이러한 굴절파에 근거한 정보정을 적용하기 위해서는 분석자의 해석을 최소한으로 하여 자동적으로 정보정을 수행하는 방법의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 굴절파에 근거한 정보정 방법을 육상 3차원 탄성파 탐사 자료에 대해 효과적으로 수행할 수 있는 방법에 대해 살펴보았다.

주요어 : 정보정, 육상 3차원 탄성파 탐사

Abstract : The static correction, which is classified into refraction based static correction and reflection based residual static correction, removes distortions caused by irregularities of thickness or velocity in near-surface. Generally, refraction statics is a time consuming process because of high dependence on the interpreter's analysis. Therefore, for huge 3D seismic data, automatic static correction which minimizes the interpreter's analysis is required. In this research, we introduce an efficient method of refraction static correction for land 3D seismic survey.

Keywords : static correction, land 3D seismic survey

서 론

육상 천부 탄성파 반사법 탐사는 지표 천부의 지하 구조를 효과적으로 규명할 수 있어 80년대 이후 다양한 분야에 활발히 적용되고 있다. 그러나 천부 탄성파 탐사는 지표의 기복에 의한 신호의 지연, 천부에 존재하는 풍화층의 지질학적 특성에 의한 잡음과 풍화층의 속도와 두께가 일정치 않아 발생하는 반사파 신호의 왜곡 등으로 인해 자료처리 및 해석 시 신중함이 필요하다. 특히 균일하지 않은 풍화층의 속도나 두께는 하부 수평지층으로부터의 반사파 신호를 굴곡된 지층에 의한 반사파 신호처럼 나타나게 할 수 있다. 이러한 반사파 신호의 왜곡을 제거하기 위해 정보정(static correction)을 실시하게 되며, 이러한 정보정은 자료 처리 후 얻어지는 중합 단면에서 관찰할 수 있는 구조적 특징의 연속성을 증가시켜 준다.

일반적으로 사용되는 정보정은 굴절파에 근거한 정보정(refraction static correction)과 반사파에 근거한 잔여 정보정(residual static correction)로 구분할 수 있다. 굴절파에 근거한 정보정은 공간영역에서 장파장의 왜곡성분을, 반사파에 근거

한 잔여 정보정은 단파장의 왜곡성분을 보정하는 것으로 알려져 있다. 그런데 굴절파에 의한 정보정은 중합 단면의 전반적인 영역에서 연속성을 증가시키지만, 지표 근처에서 반사면의 형태가 불규칙 할 경우, 이로 인해 발생하는 장파장의 왜곡성분 때문에 천부에서는 정보정의 효과가 충분치 못하다(Yilmaz, 1987). 따라서 본 연구에서는 굴절파에 근거한 정보정을 육상 3차원 탄성파 탐사 자료에 적용하는 방법에 대해서 살펴보았다.

굴절파에 근거한 정보정은 선두파의 초동을 분석하여 천부 지층의 속도와 깊이를 추정함으로써 풍화층에 대한 보정을 수행하는 것으로 1900년대 초반부터 다양한 방법들이 제안되어 왔고, 지금까지 꾸준히 사용되어 왔다. 기울기/절편법(slope/intercept method), 지연시간법(delay time method; Gardner, 1939), 이를 발전시킨 역행 주시법(reciprocal time method; Hawkins, 1961)과 이러한 방법을 더욱 일반화시킨 GRM(generalized reciprocal method; Palmer, 1981)이 있으며, 이는 양방향의 주시곡선에서 송신기와 수신기의 Reciprocity를 이용해 굴절면의 심도와 속도를 계산하는 방법으로 일반적인 2차원

*2002년 5월 21일 접수

1) 한성대학교 영상화기술 연구실(Imaging Technology Research Laboratory, Hansung University, Seoul 136-792, Korea)

2) 한성대학교 정보시스템 공학과(Dept. of Information System Engineering, Hansung University, Seoul 136-792, Korea)

탄성과 탐사에 많이 응용되어 왔다. 또한 Hampson and Russell(1984)은 초기 천부 속도모델을 이용해 파선추적을 통해 정보정을 계산하는 일반화된 선형 역산방법(*generalized linear inversion*)을 제안하였다. 하지만 이러한 방법들은 분석자의 해석이 필요하거나 속도모델에 따라 파선추적을 해야 하므로 처리해야 할 자료의 양이 많은 3차원 탐사 자료처리에는 적합하지 않다. 이러한 단점을 보완한 방법으로 Chun and Jacewitz(1980, 1981)과 Farrell and Euwema(1984)는 초동시간과 송신기, 수신기의 위치 정보를 이용한 역산을 통해 2차원 탐사 자료에 대한 *surface-consistent* 정보정을 수행하는 *time-term technique*을, Zanzi 등(2001)은 초동시간으로부터 파수(*wavenumber*) 영역에서 반복적인 계산을 통해 3차원 자료에 대한 정보정을 수행하는 방법을 제안하였다. 이 중 Zanzi 등(2001)의 방법은 시간-공간영역의 탄성과 자료를 시간-파수영역으로의 푸리에 변환을 필요로 하는데(박재우 등, 2002), 육상 3차원 탐사에서는 통상적으로 수신기 측선과 송신기 측선을 수직하게 배열하게 되며, 이 경우 공심점 모음에 대한 오프셋 분포는 균일하지 않게 된다. 따라서 균일한 오프셋 분포가 필요한 시간-파수 영역법(박재우 등, 2002)에의 효율적 적용이 어렵다.

따라서 본 연구에서는 *time-term technique*을 3차원으로 확장하여 육상 3차원 탄성과 탐사 자료에 대한 정보정을 수행하였다. 육상 3차원 탐사자료에 정보정을 적용한 결과, 중합이전의 자료에서는 정보정의 효과가 미약하나 중합단면에서는 구조적 연속성이 증가하였다.

Time-term technique

Fig. 1과 같은 파선 경로를 가지는 탄성과의 주행시간은

$$t = t_{AB} + t_{BC} + t_{CD} \tag{1}$$

로 주어지게 되고, *slant time*을 이용해 표현하면

$$t = t_{Ab} + t_{bc} + t_{cD} = \frac{h_1 \sqrt{1 - (v_1/v_2)^2}}{v_1} + \frac{x}{v_2} + \frac{h_2 \sqrt{1 - (v_1/v_2)^2}}{v_1} \tag{2}$$

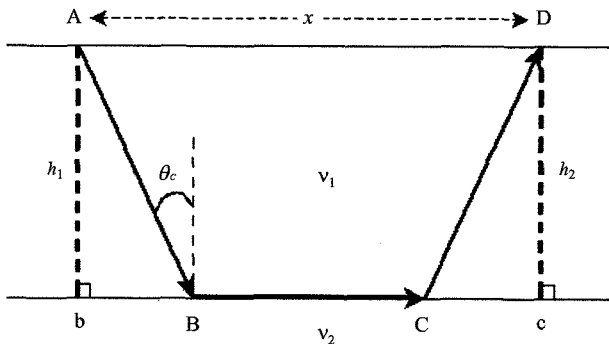


Fig. 1. Geometry for refracted arrival.

이 되며, 이를 송신기와 수신기 위치에서의 주행시간으로 정리하면 식 (2)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$t = s + \frac{x}{v_2} + r \tag{3}$$

이 식에서 *s*와 *r*은, 탐사영역 전체에서 풍화층 하부 암반층의 속도가 *v*₂로 결정되어질 때의 각각 송신기와 수신기 위치에서의 정보정량을 의미한다. 식 (3)을 *i*번째 위치의 송신기와 *j*번째 위치의 수신기에 대한 주행 시간 *t*_{*ij*}로 다시 쓰면 아래와 같다(Farrell and Euwema, 1984; 신동훈 등, 2002).

$$t_{ij} = s_i + r_j + \frac{x_{ij}}{v_2} \tag{4}$$

식 (4)에서 탄성과 자료에서 얻어진 초동시간(*t*_{*ij*})과 오프셋(*x*_{*ij*})을 이용해 *i, j* 위치에서의 정보정량과 하부 암반층의 속도(*v*₂)를 구할 수 있게 된다. 이 식을 통해 송신기와 수신기의 구분은 더 이상 필요하지 않음을 알 수 있으며, 따라서 식 (4)는 탐사영역에서의 송신기 혹은 수신기의 위치 정보에 근거한 형태로

$$t_{ij} = g_i + g_j + \frac{x_{ij}}{v_2} = g_i + g_j + x_{ij}u_2 \tag{4}$$

와 같이 쓸 수 있다. 여기서 *u*₂는 속도의 역수, 즉 *slowness*가 된다. 이 식을 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & \dots & x_1 \\ & & & & x_2 \\ & & & & \vdots \\ & & & & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & x_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_m \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_n \end{bmatrix} \tag{5}$$

식 (5)를 이용해 최소자승역산을 수행함으로써 송신기 혹은 수신기 위치에서의 정보정량과 *surface-consistent*한 특성을 가지는 풍화층 하부 암반층의 속도를 구할 수 있다.

탄성과 자료 획득/자료처리

육상 3차원 탄성과 자료획득은 2000년 3월에 강원도 삼척시 도계읍 늑구리에 위치한 남풍갱 주변에서 수행되었다(Fig. 2). 남풍갱 지역 주변에는 반경 80m 가량의 *trough*형 침하가 발생하였으며 탐사 영역은 지반침하가 발생한 지역을 포함하고 있다(석탄산업합리화사업단, 1999). 탐사 영역은 총 4개의 *template*로 구성되어 있으며 본 연구에서는 영동선을 포함하는 *swath2*만을 사용하여 정보정을 적용하였다. 10 Kg의 해머를 파원으로 사용하였으며, 자료기록은 0.5 msec의 샘플링 간격으로 0.5초동안 실시하였다. 자료는 모두 48 채널자료이며, Oyo-geospace사의 DAS-1 system을 이용하여 얻었고, 수신기

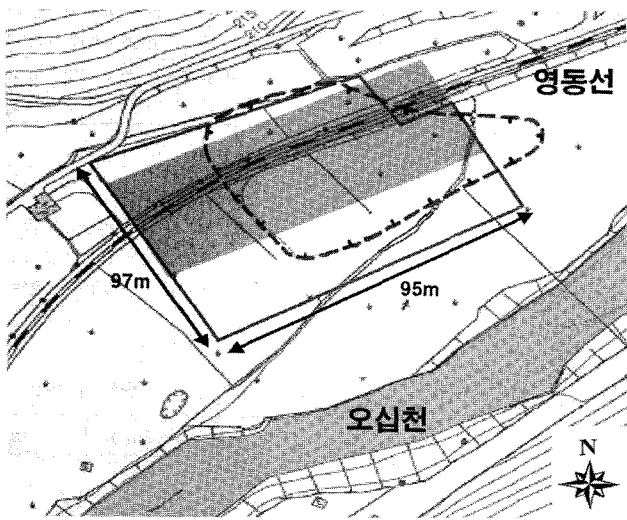


Fig. 2. Geographic map showing the location of the shallow 3D seismic reflection survey area. Dashed line indicates subsidence area.

는 40 Hz의 지오폰을 사용하였다.

Fig. 3의 (a)와 같이 4개의 수신기 배열로 48개의 수신기를 설치하였으며, 간격은 인라인과 크로스라인 방향으로 모두 5 m 간격이다. 송신기 배열은 인라인 방향으로 2 m 간격, 크로스라인 방향으로 1 m 간격으로 하여 2,210번 타격하여 총 트레이스의 수는 106,080개이다. 2차원 탄성과 자료처리 과정에서는 공심점(CDP; Common Depth Point) 취합을 통해 자료

분석에 이용하는데, 3차원 자료에서는 특정 격자내에 공심점이 위치하는 자료들, 즉 Common Cell 취합을 수행하며 이 과정을 Binning이라한다(신동훈 등, 2000, Yilmaz, 1987). 본 연구에 사용된 Cell의 크기는 2 m × 2 m이며, 최대 중합수는 384 개이다(Fig. 3(b)).

3차원 탄성과 탐사 자료의 반사법 자료처리는 본 연구실에서 개발한 3차원 반사법 자료처리 소프트웨어인 ISU3D(신동훈 등, 2000)를 활용하였으며, 정보정을 제외한 자료처리는 통상적인 자료처리 과정을 따랐다(Siahooki et al. 1998; Steeples et al., 1998).

정보정 계산

초동 발체를 공수점과 공진점 기록에서 수행하여 오차를 줄이도록 하였으며, 전체 106,080개의 트레이스 중 굴절파가 나타나는 임계거리 이상의 99,592개의 트레이스에서 정보정량을 식 (5)를 이용해 계산하였다. Chun and Jacewitz(1980, 1981)와 Farrell and Euwema(1984)는 식 (5)의 해를 계산하기 위해 Gauss-seidel method를 사용한 최소자승법을 이용하였다. 하지만 본 연구에서 사용한 3차원 탄성과 탐사자료에 이 방법을 적용할 경우, 식 (5)의 행렬은 99,592 × 2,257로써 약 850 MB에 달하는 방대한 크기의 메모리가 필요하다. 따라서 역산시 normal equation을 구성하여 반복적으로 해를 구하는 Gauss-Seidel method를 사용하는 것은 효율적이지 못하다. 일

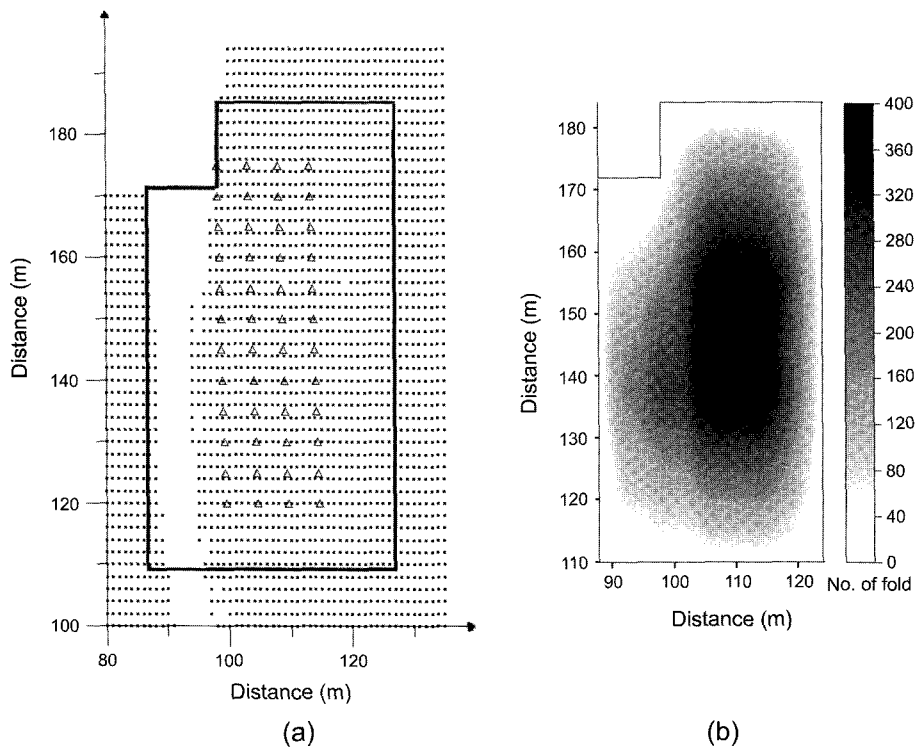


Fig. 3. Source-Receiver distribution (a) and folds distribution (b) of swath 2. Open triangles and dots denote receivers and sources, respectively. Solid line indicates outline of (b).

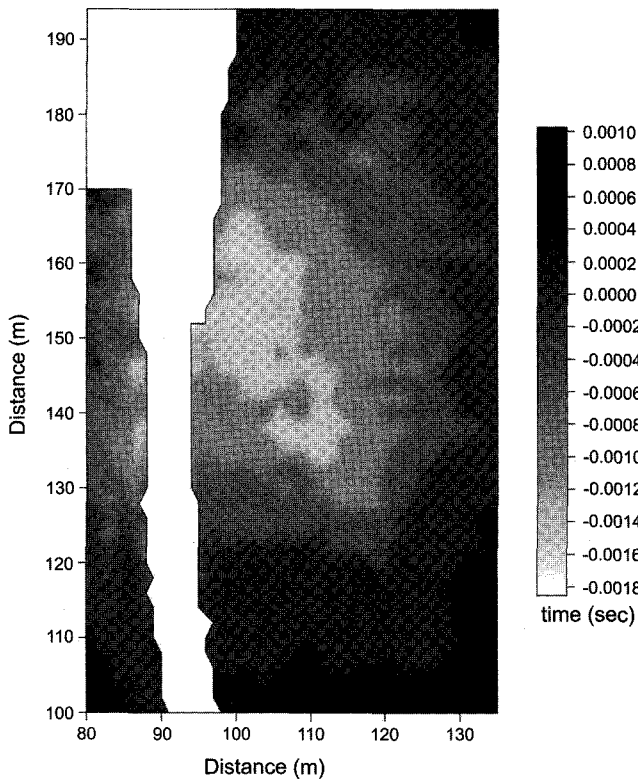


Fig. 4. Statics distribution of survey area.

반적인 컴퓨터의 경우 내장 메모리의 한계를 넘어서게 되면 부족한 메모리를 보충하기 위해 계산과정에서 계속 하드디스크의 일부를 사용하게 되고, 이는 극심한 계산속도의 저하를 초래하게 되기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 식 (5)의 행렬 구성의 필요성이 없는, Claerbout(1992)의 adjoint operator 개념을 활용한 conjugate-gradient method를 사용하여 역산을 수행하였다. 이 방법을 사용한 경우 계산과정에서 사용되는 메모리는 약 35 MB 정도로 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 역산을 통해 구해진 해는 각각의 탐사 지점(송신기 혹은 수신기의 위치)에서의 정보정량이며, 이 값들의 편차만큼 트레이스를 이동시켜 정보정을 수행하였다.

결과 및 해석

식 (5)를 이용해 탐사영역에 대한 정보정을 계산한 결과는 Fig. 4와 같이 구해진다. 탐사영역의 중앙부분에 풍화층이 침강되어 있음을 알 수 있으며, Fig. 2에서 나타난 지반침하 양상과 일치된다. 또한 정보정을 수행함으로써 중합 단면에 나타나는 반사파의 구조적 연속성이 증가하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 5). 하지만 Fig. 4에서 나타나는 바와 같이 정보정량이 -1.8 ms~1.0 ms에 지나지 않아 중합이전의 자료에서는 정보정에 의한 트레이스의 변화를 확인하기 힘들었다.

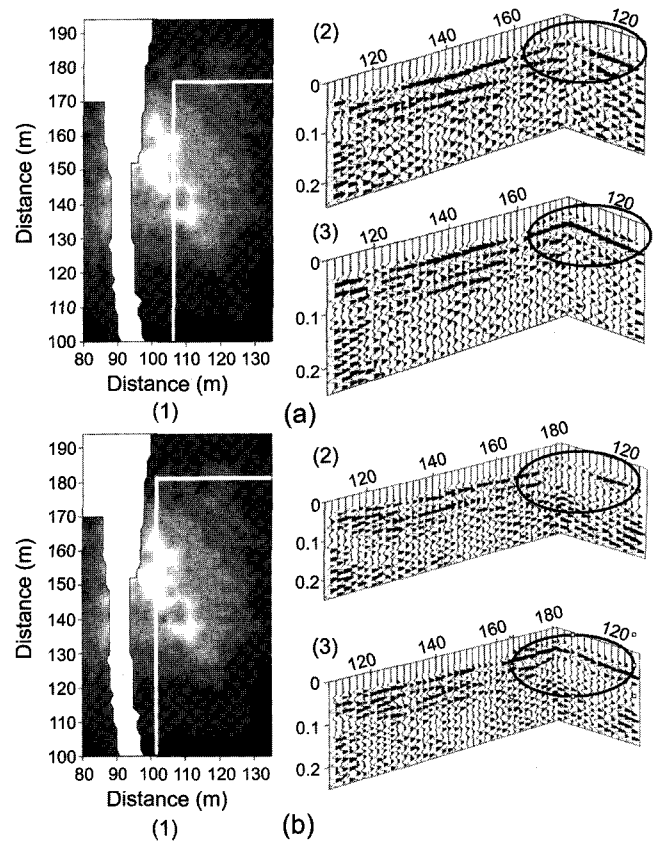


Fig. 5. Stack section illustrating the improvement as a result of static correction; (1) Location of stack section, (2) stack section without static correction and (3) stack section after static correction.

결론 및 토의

본 연구에서는 육상 3차원 탐사 자료에 대한 정보정을 수행하기 위해 초동시간과 송신기와 수신기의 위치 정보를 이용하여 자동적으로 surface-consistent한 속도구조에 부합하는 정보정량을 계산할 수 있었다. 중합이전의 자료에서는 정보정에 의한 효과가 크지 않았지만 중합 단면에서 구조적 연속성이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 중합하는 과정에서 많은 트레이스들에 대한 중합에 의한 효과로, 3차원 탄성과 탐사의 특성으로 해석할 수 있다.

육상 3차원 탐사 자료처리에서의 정보정은 처리해야 할 자료의 양이 방대하므로 상당한 해석자의 노력 및 시간을 요구한다. 반면, 본 연구의 time-term technique은 입력자료로써 송·수신 위치에서의 초동만을 요구하므로 자동역산의 특징을 가지며, 이는 3차원 탄성과 자료처리시 해석자의 노력을 최소화 할 수 있는 유리한 점을 가진다. 육상 3차원 탐사의 특성상 공심점 모음의 오프셋 간격이 일정하지 않은 3차원 탐사에도 적용이 가능하고, 탐사영역 전체에 surface-consistent한 정보정을 수행할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 이러한 조건을

만족시키는 time-term technique을 이용한 방법을 현장 자료에 적용시켜 효율성을 입증하였다. 특히 정보정 행렬의 특성인 거대 희소 행렬(large sparse matrix)에 적합한, 행렬 구성이 필요 없는 adjoint 연산을 이용한 conjugate-gradient method를 적용 시킴으로써 그 효율성을 확보할 수 있었다.

사 사

본 연구는 국가지정 연구실 사업(NRL) 과제 “탄성파 영상화 기술 연구개발 및 응용”의 일부로서 수행되었다. 이 한국과학기술원(KISTEP)의 재정지원에 감사드린다.

참고문헌

- 박재우, 신동훈, 지준, 이두성, 2002, 파수영역에서의 탄성파 자료 정보정 적용: 한국자원공학회지, submitted.
- 석탄산업합리화사업단, 1999, 고사리지역 지반보강공사 실시계획 지반조사 보고서, 19-64.
- 신동훈, 박재우, 지준, 이두성, 2002, 육상 3차원 탄성파 자료의 surface-consistent 정보정 적용 사례: 2002년도 춘계 공동학술 발표회 논문집, 한국자원공학회, 대한자원환경지질학회, 한국지구물리탐사학회, 대한지질학회, 한양대학교, 서울, 133-135.
- 신동훈, 지준, 이두성, 2000, 지하구조 영상화를 위한 3차원 탄성파 자료처리시스템 개발: 2000 가을 학술 발표회 논문집, 한국지반공학회, 대한주택공사, 경기도 성남, 585-592.
- Chun, J. H. and Jacowitz, C. H., 1980, Automated statics estimation utilizing first-arrival refractions: *Presented at the 50th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys.*
- Chun, J. H. and Jacowitz, C. H., 1981, Weathering statics problem and first arrival time surfaces: *Presented at the 51th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys.*
- Claerbout, F. J., 1992, *Earth Soundings Analysis: Processing versus Inversion*: Blackwell Scientific Publications, Boston, 103-132.
- Farrell, R. C., and Euwema, R. N., 1984, Refraction statics: *Proc. IEEE*, **72**, 1,316-1,329.
- Gardner, L. W., 1939, An areal plan of mapping subsurface structure by refraction shooting: *Geophysics*, **4**, 247-259.
- Hampson, D., and Russel, B., 1984, First-break interpretation using generalized linear inversion: *54th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys.*, Expanded Abstracts, 532-534.
- Hawkins, L. V., 1961, The reciprocal method of routine shallow seismic refraction investigations: *Geophysics*, **26**, 806-819.
- Palmer, D., 1981, An introduction to generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation: *Geophysics*, **46**, 1,508-1,518.
- Siahkoochi, H. R., and Geldart, L. P., 1996, 3-D seismic imaging of complex structures in glacial deposits: *66th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys.*, Expanded Abstracts, 873-876.
- Steeple, D. W. and Miller, R. D., 1998, Avoiding pitfalls in shallow seismic reflection surveys: *Geophysics*, **63**, 1,212-1,224.
- Yilmaz, O., 1987, Seismic data processing: *Society of Exploration Geophysics*, Tulsa. 220-230, 395.