

## 합성탄성파자료를 이용한 지진파 간섭법의 가상반사파 영상 특성

김기영<sup>1\*</sup> · 박이슬<sup>2</sup> · 변중무<sup>3</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 지질 · 지구물리학과

<sup>2</sup>캔터베리대학교 지질학과

<sup>3</sup>한양대학교 자원환경공학과

## Characteristics of Virtual Reflection Images in Seismic Interferometry Using Synthetic Seismic Data

Ki Young Kim<sup>1\*</sup>, Iseul Park<sup>2</sup>, and Joongmoo Byun<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Division of Geology and Geophysics, Kangwon National University

<sup>2</sup>Department of Geological Sciences, University of Canterbury

<sup>3</sup>Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University

**요약:** 지진파 간섭법으로 구한 심부 가상 반사파 영상 특성 분석을 위하여, 벌림 범위, 무작위 잡음, 손실 자료, 정적 이상 등의 요인이 간섭파 단면에 미치는 영향을 분석하였다. 중심주파수 5 Hz의 지표 점원에서 발생한 지진파 입자운동 속도의 수직성분을 1 km 간격으로 100 m 깊이에 매설된 201개 수신기에서 유한차분법으로 계산하였다. 모든 합성지진파 트레이스의 쌍을 교차 상관하여 간섭파를 구하였고, 통상적인 반사파 처리방법으로 반사단면을 작성하였다. 분석결과, 반사파 간섭법의 광각반사에 따른 문제점들은 최대 벌림범위를 설정하여 최소화할 수 있었으며, 무작위 잡음, 손실 자료, 정적 이상 등은 수직 시간차 보정시 이완뮤트의 영향으로 가상 샘으로부터 퍼져나가는 형태의 처리잡음이 발생함이 밝혀졌다. 이들 처리잡음의 수준은 공통 중간점 겹쌓기 단면상에서 배경잡음의 크기 및 지속시간에 가장 민감하며, 손실된 자료의 수와 정적 이상의 증가에 따라서도 증가하는 특성을 보인다.

**주요어:** 지진파 간섭법, 가상 반사파 영상, 합성탄성파, 이완뮤트, 처리잡음

**Abstract:** To characterize virtual reflection images of deep subsurface by the method of seismic interferometry, we analyzed effects of offset range, ambient noise, missing data, and statics on interferograms. For the analyses, seismic energy was simulated to be generated by a 5 Hz point source at the surface. Vertical components of particle velocity were computed at 201 sensor locations at 100 m depths of 1 km intervals by the finite difference method. Each pair of synthetic seismic traces was cross-correlated to generate stacked reflection section by the conventional processing method. Wide-angle reflection problems in reflection interferometry can be minimized by setting a maximum offset range. Ambient noise, missing data, and statics turn to yield processing noise that spreads out from virtual sources due to stretch mutes during normal moveout corrections. The level of processing noise is most sensitive to amplitude and duration time of ambient noise in stacked sections but also affected by number of missing data and the amount of statics.

**Keywords:** seismic interferometry, virtual reflection image, synthetic seismic data, stretch mute, processing noise

## 서론

Schuster (2001)에 의해 처음 명명된 지진파 간섭법(seismic interferometry)이란 다중산란파를 이용하여 지하 지질구조를 밝히는 새로운 지구물리학적 방법이다. 뉴우턴의 환(Newton's ring)으로 잘 알려진 광학적 간섭현상이 일찍이 1600년대 중반에 소개된 바 있으나(Hooke, 1665), 지진파 분야에서는 매설된 샘에서 발생한 지진파의 자기상관함수로 지표상에서 그린함수(Green's function)를 구할 수 있음을 Claerhout (1968)가 보인 것이 간섭학적 방법의 효시로 여겨진다. 이후 발전된

Received: 27 March 2018; Revised: 28 May 2018; Accepted: 28 May 2018

\*Corresponding author

E-mail: [kykim@kangwon.ac.kr](mailto:kykim@kangwon.ac.kr)

Address: Division of Geology and Geophysics, Kangwon National University, Gangwondaehak-gil 1, Chuncheon, Gangwon-do 24341, Korea

©2018, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Claerbout 가설, 즉 두 수신기 위치에서 기록된 트레이스를 교차 상관하여 한 수신기 위치에 샘플이 놓이고 다른 수신기에서 수신한 가상 기록(virtual record)을 얻을 수 있다는 가설의 수학적 근거는 Wapenaar *et al.* (2002)이 제시했다.

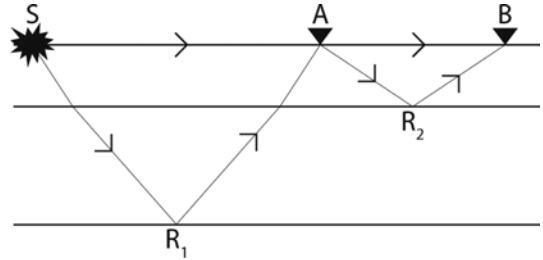
지진파 간섭법은 샘플 종류에 따라 능동적(Schuster, 2001; Bakulin and Calvert, 2004)과 수동적 간섭법, 지진파 종류에 따라 실체파(Claerbout, 1968; Draganov *et al.*, 2009)와 표면파(Campillo and Paul, 2003; Kang and Shin, 2006) 간섭법, 파선 경로에 따라 직접파(Snieder, 2004; Lin *et al.*, 2009), 굴절파(Bharadwaj *et al.*, 2012; Mikesell *et al.*, 2009), 반사파(Schuster, 2009; Draganov *et al.*, 2004) 간섭법 등으로 나눌 수 있다. 유가스 자원탐사 분야에서는 가상 샘플(Bakulin and Calvert, 2004, 2006)으로도 잘 알려져 있으며, 지층 영상 및 유전 감시(Bakulin *et al.*, 2007), 암염 측면의 정밀 영상(Ferrandis *et al.*, 2009), 단단한 기반암 지역의 지하구조 영상화(Hurich and Deemer, 2013), 내림식(downhole) 수신기 위치로의 기준면 보정(Mehta *et al.*, 2010) 등 여러 분야에 다양하게 적용되고 있다.

이러한 지진파 간섭법은 시간과 공간의 규모에만 차이가 있을 뿐이며 원리가 동일하기 때문에 지각 및 맨틀 내부를 대상으로 하는 지구 심부 연구에도 적용할 수 있다. 2000년대 한 반도를 가로지르는 대규모 굴절과 탐사가 3차에 걸쳐 실시된 바 있으며(Cho *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2007), 샘플의 크기가 강력했던 이 굴절과 자료에 반사파 간섭법을 적용할 경우에 한반도 암권의 반사파 구조를 밝힐 수 있을 것이다. 따라서 이 연구에서는 일반적인 반사법에 비하여 샘플의 수가 제한적인 굴절과 자료를 이용한 간섭과 반사영상 해석 시, 처리잡음을 반사 신호로부터 구별하는데 활용할 목적으로 합성탄성파 자료를 이용하여 이 잡음의 특성을 밝히고자 한다.

### 반사파 간섭법의 이론적 배경

간섭법은 음향 상반성 이론(acoustic reciprocity theorem; de Hoop, 1988; Fokkema and van den Berg, 1993)에 바탕을 두고 설명될 수 있다. 음향 상태에 따라 간섭현상이 시간영역에서는 곱셈기(convolutoin) 및 상관(correlation)의 2가지 형태로 표시되며, 이들은 복소주파수 영역에서 서로 켈레의 관계를 갖는다. 이러한 곱셈기 및 상관 형태의 상반성 방정식은 문헌에 이미 널리 소개된 바 있으므로(Schuster, 2009), 여기서는 반사법에 실제로 적용되는 상관 상반성에 관한 이론적 배경을 간략히 설명한다.

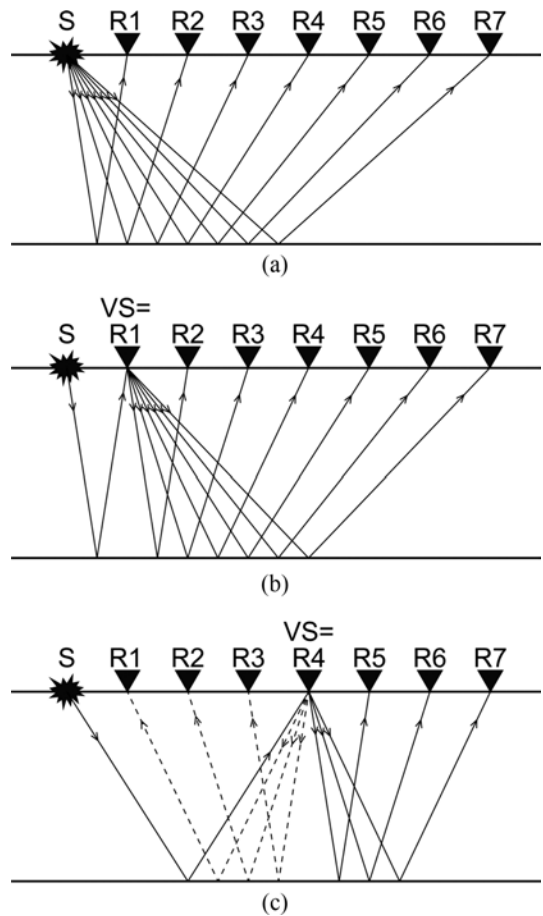
샘  $S$ 에서 발생한 지진파  $s(t)$ 가 수신기  $A$ 를 거쳐 수신기  $B$  방향으로 진행할 경우(Fig. 1), 수신기  $A$ 와  $B$ 의 위치  $X_A$ ,  $X_B$ 에서의 기록을 교차 상관하면 마치 샘플이  $A$ 에 위치하고  $B$  위치에서 수신한 1차원 그린함수를 얻을 수 있다. 이를 Wapenaar *et al.* (2010)는 다음 식으로 표시하였으며,



**Fig. 1.** Schematic diagram of ray paths emanating from a point source (S) as used in both direct and reflection active-source interferometry. Correlation of a surface-related multiple recorded at receiver B, with a primary reflection recorded at receiver A, yields a redatumed primary reflection.  $R_1$  and  $R_2$  are subsurface reflection points.

$$G(X_B, X_A, t) * S_s(t) = u(X_B, X_S, t) * u(X_A, X_S, -t) \quad (1)$$

여기서  $G$ 는 그린함수, \*는 곱셈기, 괄호 안의 인수는 차례로 수신기 위치, 샘플 위치, 주시를 각각 뜻한다. 또한  $S_s(t)$ 는 샘플의



**Fig. 2.** Schematic diagrams of geometry and raypaths for (a) a real source gather, and virtual source (VS) gathers at station locations (b) on the left end and (c) in the middle of the profile, respectively. For the latter case, reflected energy arrived at receivers closer to the real source than the virtual source is negligible.

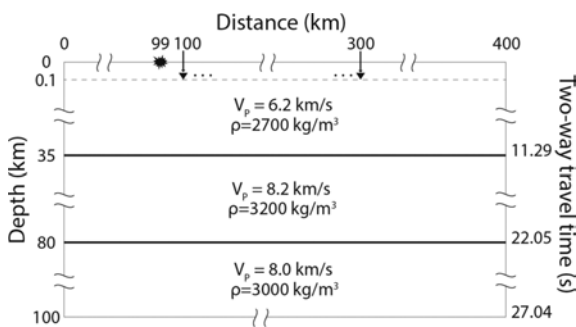
자기상관함수(auto-correlation function)  $s(t)*s(-t)$ ,  $u(t)$ 는 그린 함수와 샘의 곱셈기인  $G(t)*s(t)$ 를 나타낸다.

반사파의 경우, 샘  $S$ 에서 발생한 지진파  $s(t)$ 가 반사점  $R_1$ 에서 반사되어 수신기  $A$ 에 도달한 후 다시 지하로 반사되어 내려간 파가  $R_2$ 에서 반사되어 수신기  $B$ 에 도달한 경우를 가정하자(Fig. 1). 이 경우, 수신기  $A$ 와  $B$ 에 기록된 트레이스를 교차 상관하면 샘에서 수신기  $A$ 까지의 동일한 경로가 상쇄된다. 따라서 식 (1)과 같이 교차 상관한 트레이스를 샘 요소파(source wavelet)의 자기상관함수로 곱풀기(deconvolution)해서 가상 샘이  $A$ 에 위치하고  $B$  위치에서 수신한 반사파 그린함수를 얻을 수 있다.

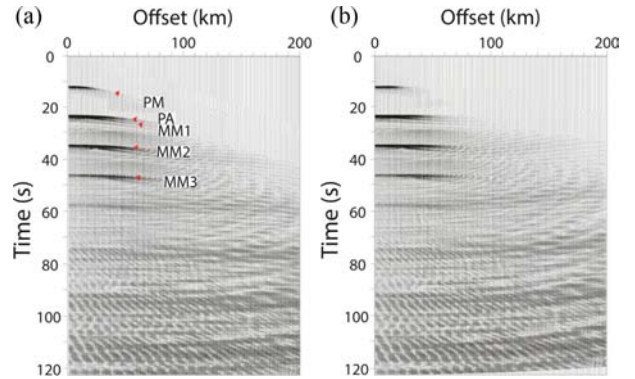
이는 간섭법에서는 모든 가능한 수신기 쌍의 조합만큼 가상 공통샘 모음(common source gather)가 생성됨을 뜻하며, 모든 수신기 위치가 가상 샘의 위치가 된다. 따라서 샘의 수가 하나인 경우(Fig. 2a)에도 수신기 수보다 1이 적은 수의 가상 공통샘 자료가 구해지기 때문에 중첩도가 높은 간섭파 반사영상을 만들 수 있다. 교차 상관으로 구한 간섭파 자료를 가상 샘별로 분류하면 공통샘자료(Fig. 2b, 2c)가 되며, 공통중간점별로 분류하면 공통 중간점 모음(common midpoint gather)이 된다. 이렇게 생성된 자료를 대상으로 반사파 처리방법을 적용시켜서 간섭파 반사단면을 얻을 수 있다. 또한 실제샘의 수가 하나가 아니라 2개 이상이면, 겹쌓기(stacking method)를 이용하여 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio, S/N)를 향상시킬 수 있다. 다만 굴절과 자료의 경우에 샘의 깊이나 크기, 지층과의 결합도 등에 따라 발생하는 파형이 일정하지 않으므로, 모든 간섭파 트레이스를 공통 중간점으로 분류한 후에 겹쌓기를 한번에 수행하는 것이 아니라, 실제 샘별로 구한 겹쌓기 단면들을 겹쌓기하는 방법이 효과적이다(Wapenaar *et al.*, 2010).

### 지하모델 및 합성탄성과 작성

합성탄성과 자료를 작성하기 위한 지층모델(Fig. 3)은 기존



**Fig. 3.** Subsurface model for which synthetic seismic data were generated by the finite difference method. The source is at the surface and receivers are 100 m below the surface. The interfaces at depths of 35 and 80 km represent the Moho and lithosphere-asthenosphere boundary (LAB), respectively.



**Fig. 4.** Synthetic source gathers for the subsurface model in Figure 2, (a) before and (b) after normal moveout correction. Primary reflections reflected at the Moho (PM) and top of asthenosphere (PA) are at approximately 11 and 22 s, respectively. The 1<sup>st</sup> (MM1), 2<sup>nd</sup> (MM2) and 3<sup>rd</sup> (MM3) surface multiples for the Moho are near 23, 34 and 45 s, respectively.

의 전지구적 속도 및 밀도 모델을 참고하였다(Kennett and Engdahl, 1991; Dziewonski and Anderson, 1981). 이 모델은 균질한 등방성 지층이 수평으로 쌓여 있는 것을 가정하며, P 파 속도( $V_p$ ) 6.2 km/s, 밀도( $\rho$ ) 2,700 kg/m<sup>3</sup>, 두께( $h$ ) 35 km인 지각과  $V_p = 8.2$  km/s,  $\rho = 3,200$  kg/m<sup>3</sup>,  $h = 45$  km인 암권맨틀이  $V_p = 8.0$  km/s,  $\rho = 3,000$  kg/m<sup>3</sup>인 약권맨틀 위에 놓여 있는 단순한 형태로 구성하였다. 모델 공간의 크기는 수평거리 400 km, 깊이 100 km로, 지표는 자유면 경계, 지하 3면은 흡수면 경계(absorbing boundary)로 둘러 쌓여있다(Clayton and Engquist, 1977). 99 km 떨어진 지표에 점샘(point source)이 위치하고 수직성분 속도계가 원점으로부터의 100 ~ 300 km 구간 지하 100 m 깊이에 1 km 간격으로 총 201개가 놓여 있는 것을 가상하였다. 2차원 유한차분법을 이용하여 시간간격 약 3 ms, 깊이간격 50 m로 총 122 s의 길이로 합성탄성과 모델을 계산하였고, 샘으로는 우세주파수 5 Hz의 Ricker 파형을 사용하였다.

계산된 원시 합성탄성과 자료(Fig. 4a)는 모두 영위상의 요소파가 지구의 충격반응(earth impulse response)과 곱셈기된 형태를 보여주며, 샘으로부터의 거리(이하 ‘원점거리’,  $D$ ) 1 km에 위치한 수신기 기록자료(1번 트레이스)의 주시 11 s와 22 s 부근에 모호한 반사파와 암권/약권 경계(LAB)에서 반사된 일차반사파 쌍곡선이 있고 23 s, 34 s, 45 s 부근에는 모호한 1차, 2차 및 3차 지표 다중반사파의 모습이 보인다. 23 s 부근에 모호 일차 다중반사파와 22초 부근의 LAB 일차반사파가 거의 동시에 도달하여 서로 간섭을 일으키나, 별림(X)이 증가함에 따라 겹보기 속도의 차이를 보인다.

### 간섭파 반사단면 작성

이렇게 합성한 자료를 이용하여, 이득조절 및 트레이스 균등

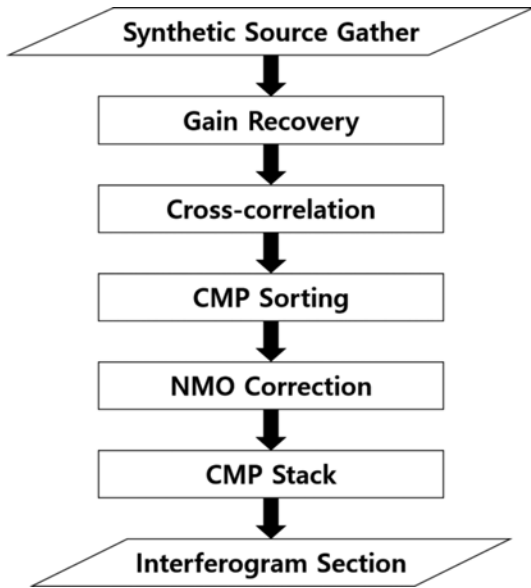


Fig. 5. Processing flow for the stacked interferogram sections in Figure 8.

화, 공통 중간점 분류, 수직 시간차 보정, 겹쌓기 등 일반적 처리과정에 따라 간섭파 반사단면을 작성하였다(Fig. 5). 이득조절은 기록시간의 제곱에 비례하는 일반적인 이득함수를 원시 합성자료에 곱해 주었고, 트레이스 균등화 과정에서는 각 트레이스의 평균제곱근(root-mean-squared) 진폭의 크기를 같도록 맞추어 주었다. 반사파 그린함수만을 추출하기 위해서는 요소파의 자기상관함수를 수직 시간차 보정 전에 곱풀기하여 제거하여야 한다. 그러나 대규모 굴절파를 이용한 암권구조 파악을 목적으로 하는 심부반사파 간섭법의 경우에는 S/N비가 매우 낮으며 또한 곱풀기 처리과정에서 발생하는 처리잡음의 영향을 최소화하기 위하여, 이 처리과정을 생략함으로써 더욱 현실에 가깝고 정확하게 특성을 밝히고자 하였다.

식 (1)을 이용하여 모든 트레이스 쌍의 교차 상관을 구하여서 200 개의 가상 공통샘 모음자료(virtual source gathers)를 생성하였다. 이 때 반사파 신호 주기가 거리에 따라 증가하므

로, 길이 60 s의 교차 상관 창이 가상 샘-수신기간 거리(이하 '가상 벌림',  $X$ )에 따라 선형으로 미끄러지는 이동창(moving window) 방식을 적용하였다. 원점거리( $D$ ) 1 km와 100 km에 위치한 수신기와 나머지 수신기에서 기록된 자료들을 교차 상관하여 구한 가상 공통샘 자료를 보여준다. 가상 샘이  $D = 1$  km에 위치한 수신기인 경우, 즉 측선 좌측 끝에 위치한 경우(Fig. 2b)는 측선의 우측 끝까지 모든 수신기 자료와 교차 상관하여 반사파 그린함수를 얻을 수 있다(Fig. 6a). 그러나, 가상 샘이 측선의 중간 지점( $D = 100$  km)인 경우(Fig. 2c)에는 측선의 좌측 부분에서 가상 반사파선의 수평 겹보기 진행방향이 반대가 되어 불균질한 지표에서 회절된 일부 에너지만 도달하기 때문에 신호가 거의 생성되지 않는다(Fig. 6b), 따라서 겹보기 진행방향이 반대쪽에 있는 수신기 위치에서는 간섭파를 계산하지 않았다. 그러나 상반성 이론에 따라 좌측의 수신기가 가상 샘이고 측선중앙에 수신기가 있는 경우와 마찬가지로, 공통 중간점 모음자료에는 이 부분에서 반사된 자료도 포함된다.

### 특성 분석

#### 교차 상관 전후의 자료 비교

공통 중간점 분류 후, 지층모델 작성 시 사용한 속도정보를 이용하여 수직 시간차(Normal Moveout; NMO)를 보정하였다. Fig. 7은 수직 시간차를 보정하고 300% 이완무트를 적용한 후,  $D = 7.5$  km와 17.5 km인 공통 중간점 15번과 35번의 모음자료(CMP gather)를 보여준다. 교차 상관 전의 단면자료(Fig. 4b)는 100% 중첩도를 가지며, 측선 길이의 절반인 원점거리 100 km까지만 존재한다. 그러나 교차 상관으로 구한 간섭파 겹쌓기 자료(Fig. 8)는 측선 전 구간에 걸쳐 존재하며, 중첩도는 벌림 한계를 설정하지 않을 경우, 측선 중앙에서 수신기 수의 절반인 최대 100까지 증가한다(Fig. 8). 이는 반사파 간섭법을 사용할 경우, 지층 반사면위와 S/N비가 크게 증가할 수 있음을 지시한다. 그러나 단 하나의 샘자료만을 이용할 경우, 샘의 위치로부터 멀어질수록 교차 상관이나 수직 시간차 보정

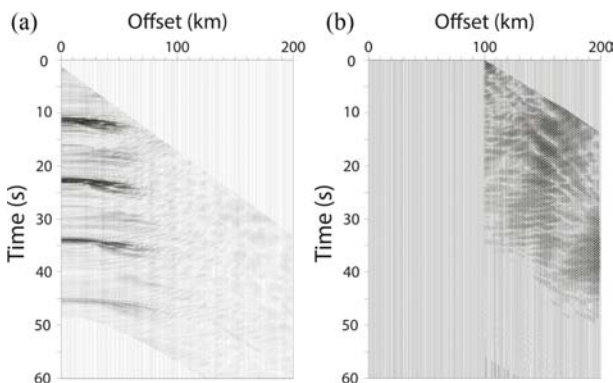


Fig. 6. Virtual source gathers at station locations (a) on the left end and (b) in the middle of the profile, respectively.

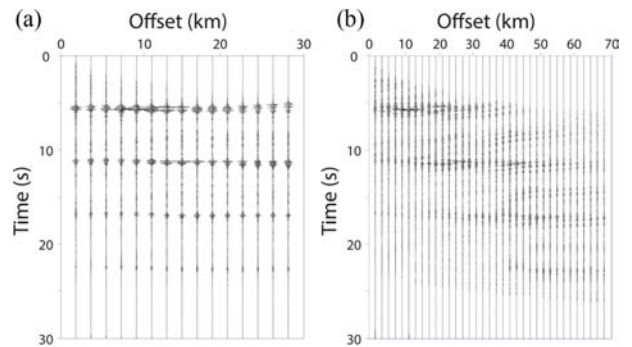
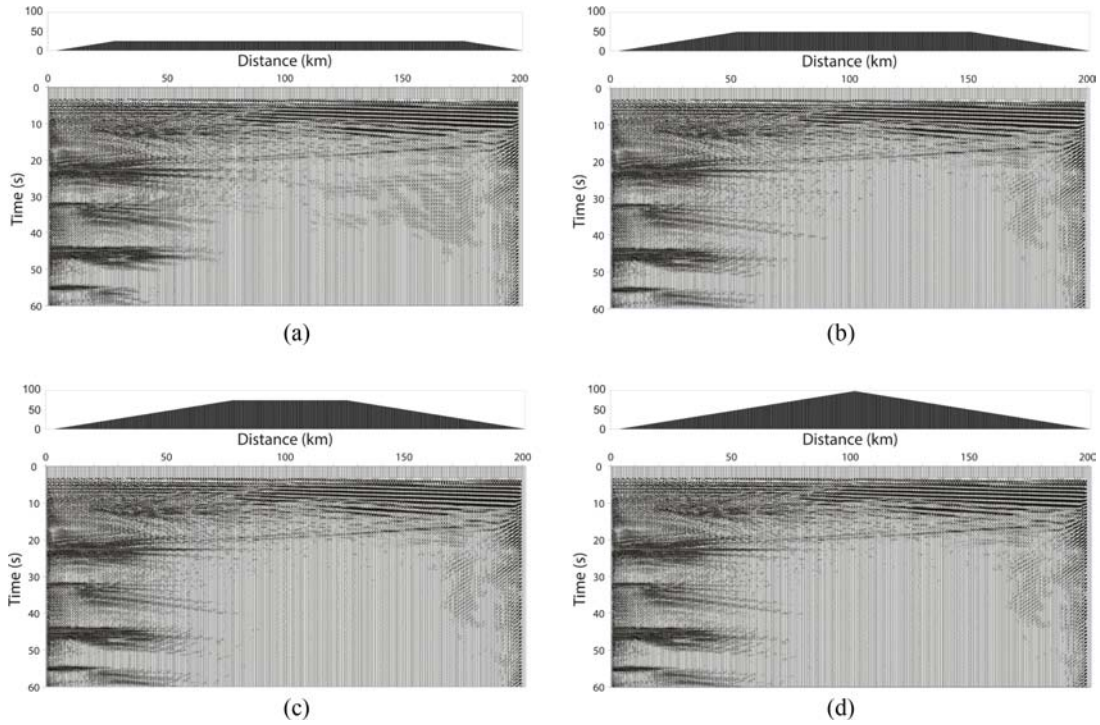


Fig. 7. NMO-corrected CMP gathers at CMP (a) 15 and (b) 35, respectively.



**Fig. 8.** Stack sections using virtual synthetic seismic data with maximum offsets of (a) 50, (b) 100, (c) 150, and (d) 200 km, respectively. CMP folds above the stacked sections show tapers toward both ends of the profile with maximum folds in the middle. Noise near the right edge of the section is due to the boundary used in finite-difference modeling.

시 야기된 처리잡음이 11 s와 22 s 부근의 신호보다 강하게 나타난다. 따라서 여러 샘플자료가 있을 경우에는 샘플 겹쌓기 (source stack)를 통해 S/N비를 향상시킬 필요가 있다.

**최대 벌림의 영향**

일반적인 수직 시간차 보정은 쌍곡선 방정식에 의존하며 최대 벌림( $X_{max}$ )이 반사면 깊이의 2배보다 훨씬 작을 때 유효하고(Yilmaz, 2001), 이완뮤트(stretch mute)에도 영향을 받는다. 벌림이 작을수록 쌍곡선 가정에 적합하지만, 일반적으로 가상 반사파의 신호 크기가 작기 때문에 벌림 범위를 늘려서 중첩도를 최대한 높일 필요가 있다. 따라서  $X_{max}$ 가 다소 큰 값인 50, 100, 150, 200 km인 겹쌓기 그림을 작성하고 비교하였다(Fig. 8). 상기 지층모델(Fig. 3)에서 암권/약권 경계가 80 km 깊이에 위치하므로, 이론적으로  $X_{max} > 40$  km 인 모든 경우에 원거리 벌림에서 반사면이 과소보정(under-correction)되며, S/N비가 낮아짐을 보인다. 따라서 이후의 분석에서는 상기 4 가지 중에서 이러한 원거리 벌림의 영향이 가장 적은  $X_{max} = 50$  km 자료를 대상으로 수행하였다.

**잡음의 영향**

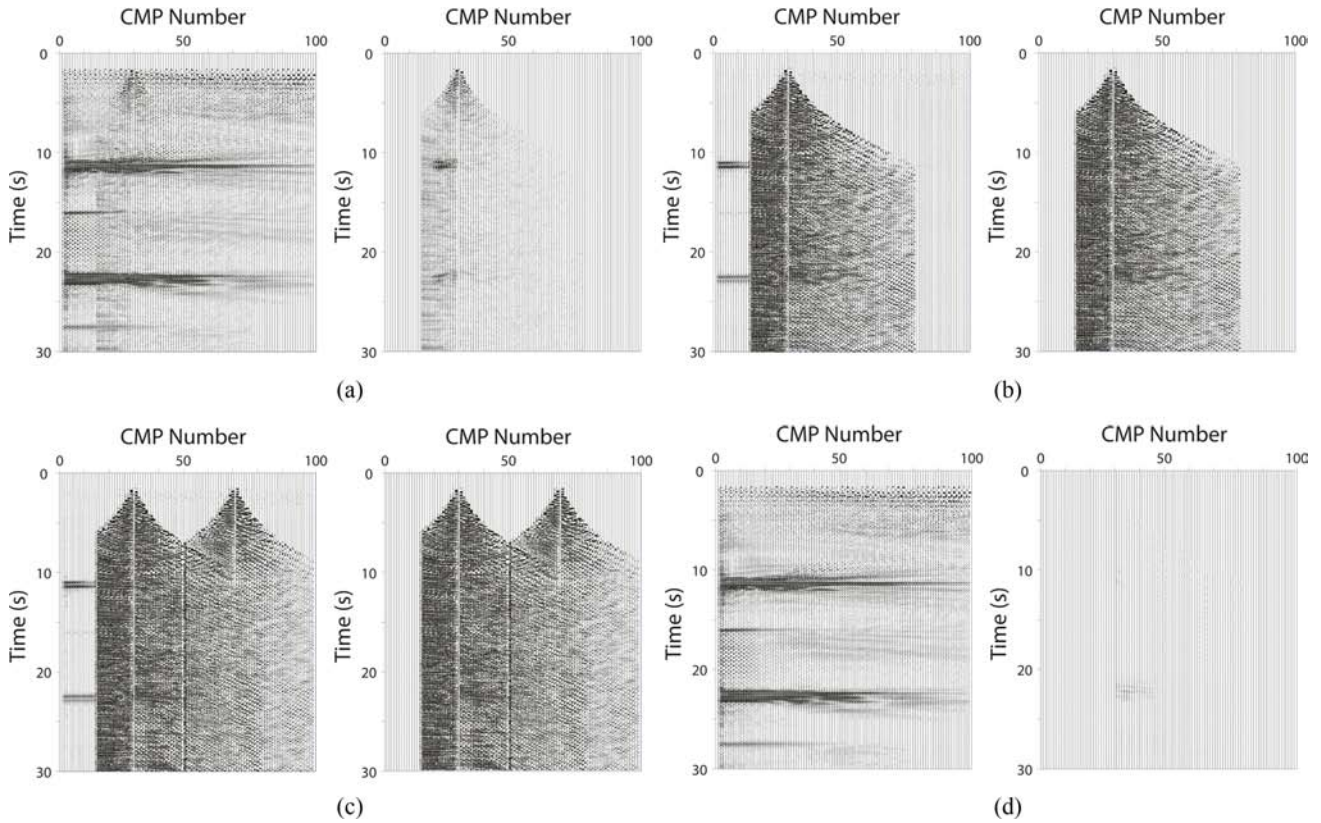
수신기가 잡음이 심한 곳에 위치할 경우를 가상하여, 공통 중간점 30번에 위치한 수신기의 원시합성자료에 S/N비가 1.0 과 0.01이 되도록 무작위 잡음을 추가하고 간섭법 겹쌓기 자

료에 미치는 영향을 살펴보았다(Fig. 9). 무작위 잡음을 추가하기 전(Fig. 8a)과 후(Fig. 9a left)의 차이를 보여주는 차이그림(Fig. 9a right)은 가상 샘플 위치(CMP 30)로부터 퍼져나가는 형태의 잡음이 생성된 양상을 보인다. 이는 수직 시간차 보정시 개략적 겹보기 속도가 1.5 km/s(근거리) 내지 4 km/s(원거리) 이상인 기록자료는 300% 이완뮤트로 제거되었기 때문이다. 따라서 S/N비가 작은 실제자료의 경우, 이완뮤트 선을 따라 경사 이벤트가 있는 것처럼 나타날 가능성이 있다. 또한  $D < 7.5$  km인 경우는 지중 반사범위가 벗어나 있고,  $D > 39.5$  km 인 경우는 최대벌림 허용범위( $X_{max} = 50$  km)를 벗어났기 때문에 모든 트레이스가 0으로 기록되어 있다.

잡음의 영향을 정량적으로 표시하기 위해서 출력자료에서 입력자료를 뺀 차이(차이자료)의 평균제곱근 진폭( $D_{ra}$ )과 입력 자료의 평균제곱근 진폭( $I_{ra}$ )의 비( $E$ ), 즉

$$E = \frac{D_{ra}}{I_{ra}} \tag{2}$$

를 계산하였다.  $7.5 < D < 39.5$  km 구간 트레이스에 미치는 영향은, 트레이스 전체의  $S/N = 1.0$ 인 경우의  $E = 0.03$ 보다  $S/N = 0.01$ 인 경우에  $E = 24.74$ 로 크게 증가하여 S/N가 감소할 수록 경향성이 더 커진다(Table 1). 곱쌓기는 선형 연산자이지만 잡음 진폭의 크기만큼 정확히 100배 커지지 않은 이유는 수직 시간차 보정 및 겹쌓기 과정에서 발생한 파형간섭에 의



**Fig. 9.** Virtual stacks (left) obtained after adding noise to (a, b, and d) a single record at station 30 or (c) multiple records at CMPs 30 and 70, and difference plots (right) equal to the noisy minus noise-free stacks. Signal-to-noise ratios (S/N) are (a) 1.0, (b) 0.01, (c) 0.01, respectively, for constant-amplitude noise in the entirety of the contaminated records, and (d) 1.0 with noise confined to a window covering only 3% of that record. Relative gains were applied for each cases for display purpose.

한 것이다.

또한 한 지점이 아니라 여러 수신기 위치에서 잡음이 심한 경우를 가상하여, 공통 중간점 70번 위치의 수신기에 S/N = 0.01이 되도록 무작위 잡음을 추가하고 간섭법 겹쌓기 자료에 미치는 영향을 살펴보았다(Fig. 9c). 두 곳의 수신기가 잡음에 노출된 이 경우에는 E = 113.89로 2배 보다도 더 크게 증가하였는데, 그 주된 이유는 공통 중간점 모음자료의 트레이스 수가 2배보다 더 커졌기 때문이다(Fig. 8a 중첩도 참조). 교차 상관 창 길이의 약 3%(2 s)에만 신호와 같은 크기의 잡음(S/N = 1.0)을 공통 중간점 30번 모음자료에 추가한 경우(Fig. 9d)는 E

=  $4.7 \times 10^{-3}$ 으로 트레이스 전체에 잡음을 추가한 경우(Fig. 9a)의 14%에 불과하여(Table 1), 전체 기록길이가 잡음의 영향을 받았을 때보다 훨씬 미약한 영향을 미친다. 따라서 단시간 기록된 일시적 잡음의 영향은 비교적 크지 않을 수 있음을 보인다.

**자료 손실의 영향**

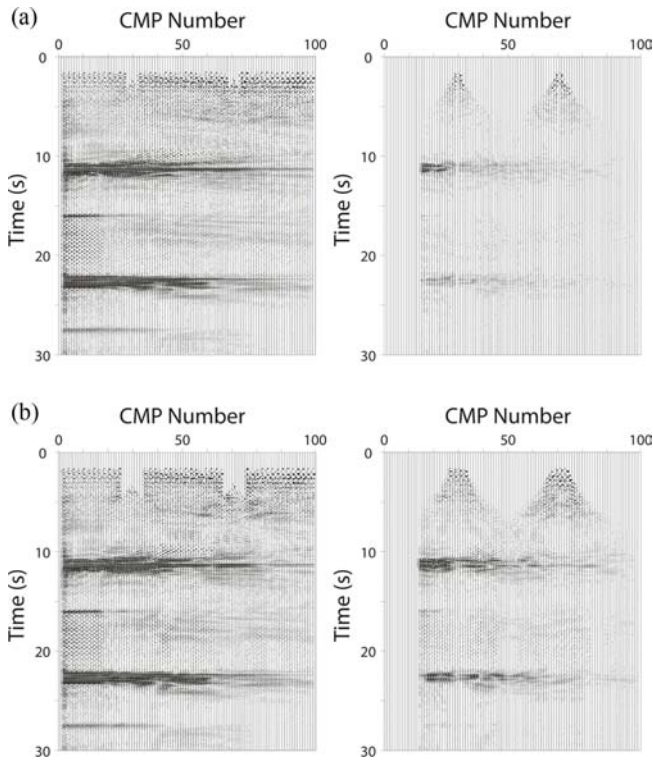
실제 현장에서는 여러 가지 원인으로 자료를 일부 기록하지 못하거나 심하게 잡음이 기록된 경우가 종종 발생하여 처리과정에서 해당 자료를 삭제하기도 한다. 따라서 잡음의 영향을

**Table 1.** Effects (E) of ambient noise, missing data and statics on stacked reflection interferograms.

	Ambient noise				Missing data			Statics	
Number of Station	1 (100%)	1 (100%)	1 (100%)	1 (3%)	2	6	1	1	2
S/N	1.0	0.01	0.01	1.0	-	-	-	-	-
Δt (ms)	-	-	-	-	-	-	16.13	161.29	161.29
*E	0.03	24.74	113.89	*0.00	0.04	0.11	0.01	0.02	0.02

\*E =  $D_{rms}/I_{rms}$  where  $I_{rms}$  and  $D_{rms}$  are average root-mean-squared amplitudes for input data and the difference between output and input data, respectively.

\*0.00 means 0.0047.



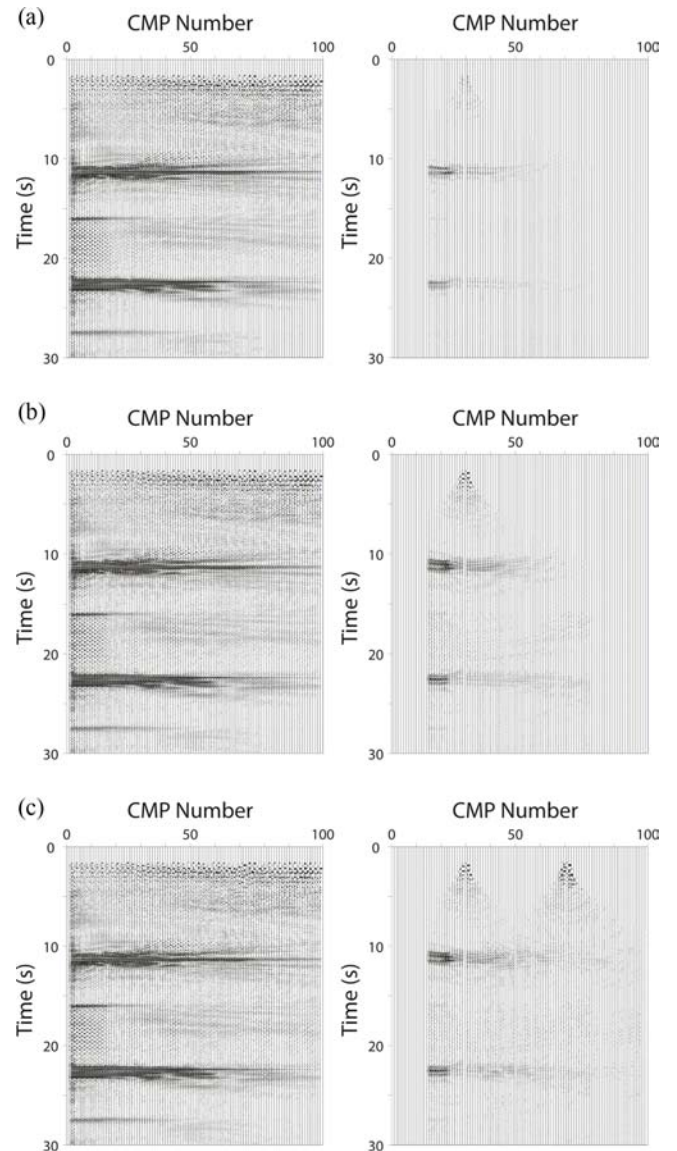
**Fig. 10.** Virtual stacks (left) and difference plots (right) showing the effects of missing data for (a) one record at CMPs 30 and 70, and (b) the three adjacent records centered on those same locations.

살펴보았던 수신기 위치와 동일하게 공통 중간점 30번과 70번에 위치한 수신기의 기록이 삭제된 경우를 가상하고, 간섭법 겹쌓기 자료에 미치는 영향을 살펴보았다(Fig. 10a). 오른쪽 행의 차이그림은 가상 샘플로부터 퍼져나가는 형태의 잡음이 생성된 양상을 보여주어 무작위 잡음의 경우와 마찬가지로 수직 시간차 보정과정에서의 이완뮤트에 의한 것임을 지시한다. 이 특정한 경우, 모두 105개 트레이스에 영향을 미쳤으며 식 (2)로 계산한 효과는  $E = 0.04$ 로 구해져서  $S/N = 1$ 인 잡음과 대략 비슷한 정도의 영향을 미치는 것으로 분석된다(Table 1).

또한 한 지점이 아니라 일부 지역이 문제가 있어서 손실된 자료의 수가 증가하는 경우를 가상하여, 공통 중간점 28, 30, 32번 및 68, 70, 72번의 위치의 6개 수신기 자료를 모두 삭제하고, 간섭법 겹쌓기 자료에 미치는 영향을 살펴보았다(Fig. 10b). 삭제한 수신기 자료 수를 2개에서 6개로 3배 증가시키자  $E = 0.11$ 로 그 효과도 대략 3배 정도로 더 커졌음을 보인다(Table 1). 따라서 교차 상관 처리과정 이전에 손실된 자료 수를 보간 등의 방법으로 최소화 하는 것이 필요하다.

#### 정적 이상(statics anomaly)의 영향

수신기 고도나 풍화대 두께 등으로 발생하는 정적 이상이 간섭법 겹쌓기 자료에 미치는 영향을 살펴보았다. 공통 중간점 30번의 수신기 고도가 기준면보다 100 m (Fig. 11a)와 1000 m



**Fig. 11.** Virtual stacks (left) and difference plots (right) generated by static shifts of (a) 16.13 ms and (b) 161.29 ms at CMP 30, and (c) 161.29 ms at CMPs 30 and 70, respectively.

(Fig. 11b) 높은 경우를 가정하고 각각 지각속도 6.2 km/s로 계산한 16.13 ms와 161.29 ms 만큼 도달시간을 지연시켰다. 두 경우 모두의 차이그림은 잡음이나 손실된 자료의 경우와 유사하게, 가상 샘플 위치로부터 거리가 증가함에 따라 시간이 증가하는 형태의 잡음이 생성된 모습을 보인다. 이들 정적 이상의 효과는  $E = 0.01$ 과  $0.02$ 로 계산되어(Table 1), 고도 10배 증가는 약 2배의 처리잡음 증가를 야기했다고 볼 수 있다.

한편, 공통 중간점 30번과 70번 두 곳의 수신기에 동시에 161.29 ms의 시간지연을 둔 경우(Fig. 11c)도 유효숫자 범위 내에서  $E = 0.02$ 로 구해져서 큰 차이를 보이지 않는다. 이는 전처리과정의 이득조절 및 트레이스 균등화 과정으로도 심부 반사이벤트에 대한 기하학적 보정이 완벽하게 이루어지지 않

은 점과 입사각에 따른 반사도 차이에 주된 원인이 있다고 판단된다. 실제로 트레이스 균등화만을 곱셈기 전 자료에 다시 적용시켜서 구한 효과는 수신기 하나보다 두 곳에서 정적이상이 있을 때 25% 정도 증가하여, 이 판단과 일치하는 결과를 보인다. 이밖에도 두 수신기 효과가 겹치는 부분에서의 간섭현상과 허용된 벌림범위 내 트레이스 숫자의 변동 등도 부분적인 원인이 될 수 있다. 그러나 완전한 기하학적 보정이 이 논문의 목적이 아니므로 더 이상의 정밀한 처리를 실시하지 않았다.

### 결 론

지진파 간섭법으로 구한 가상 샘 자료를 이용할 경우, 단 하나의 샘자료를 이용해서도 반사 중첩도는 최대 수신기 수의 절반까지 늘릴 수 있으며, 지중 반사범위가 2배 정도 늘어남을 보여 준다. 이 때 발생할 수 있는 광각반사에 따른 문제점들은 최대 벌림범위를 최대 목표심도의 절반정도가 되도록 설정하여 최소화할 수 있다. 잡음이 심하거나 손실된 자료 및 정적 이상이 있는 경우에, 수직 시간차 보정단계의 이완뮤트 영향으로 가상 샘 위치로부터 퍼져나가는 양상의 처리잡음 (processing noise)이 발생한다.

그 처리잡음 수준은 잡음의 크기와 지속시간에 크게 영향을 받으며, 손실된 자료의 경우는 S/N = 1인 잡음자료와 거의 효과가 같게 나타났다. 또한 고도차이 등에서 발생하는 정적 이상의 크기에 따라서도 증가하는 것으로 분석되었다. 따라서 수신기 설치 시 배경잡음이 적은 위치에 설치하는 것이 매우 중요하며, 자료의 손실이 있는 경우에는 보간법으로 채우고, 고도차이 등은 고도보정을 통하여 그 효과를 최소화 하는 전처리과정을 수행하는 것이 바람직하다. 또한 이러한 요인들에 의해 발생하는 처리잡음을 해석과정에서 반사 신호로 오인되는 일이 없도록 유의해야 한다.

### 감사의 글

이 연구는 기상청 지진기술개발사업(KMIPA2015-7010)의 지원으로 수행 되었습니다. 아울러 2017년도 강원대학교 학술 연구조성비로 연구하였음(과제번호-520170507)을 밝힙니다.

### References

Bakulin, A., and Calvert, R., 2004, Virtual source: New method for imaging and 4D below complex overburden, *74th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 2477-2480.  
 Bakulin, A., and Calvert, R., 2006, The virtual source method: Theory and case study, *Geophysics*, **71**(4), SI139-SI150.

Bakulin, A., Mateeva, A., Mehta, K., Jorgensen, P., Ferrandis, J., Herhold, I. S., and Lopez, J., 2007, Virtual source applications to imaging and reservoir monitoring, *The Leading Edge*, **26**(6), 732-740.  
 Bharadwaj, P., Schuster, G., Mallinson, I., and Dai, W., 2012, Theory of supervirtual refraction interferometry, *Geophys. J. Inter.*, **188**(1), 263-273.  
 Campillo, M., and Paul, A., 2003, Long-range correlations in the diffuse seismic coda, *Science*, **299**(5606), 547-549.  
 Cho, H.-M., Baag, C.-E., Lee, J. M., Moon, W. M., Jung, H., and Kim, K. Y. 2013, P- and S-wave velocity model along crustal scale refraction and wide-angle reflection profile in the southern Korean Peninsula, *Tectonophysics*, **582**(1), 84-100.  
 Claerbout, J., 1968, Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response, *Geophysics*, **33**(2), 264-269.  
 Clayton, R., and Engquist, B., 1977, Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equations, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **67**(6), 1529-1540.  
 de Hoop, A. T., 1988, Time-domain reciprocity theorems for acoustic wave fields in fluids with relaxation, *J. Acoust. Soc. Am.*, **84**(5), 1877-1882.  
 Draganov, D., Campman, X., Thorbecke, J., Verdel, A., and Wapenaar, K., 2009, Reflection images from ambient seismic noise, *Geophysics*, **74**(5), A63-A67.  
 Draganov, D., Wapenaar, K., and Thorbecke, J., 2004, Passive seismic imaging in the presence of white noise sources, *The Leading Edge*, **23**(9), 889-892.  
 Dziewonski, A. M., and Anderson, D. L., 1981, Preliminary reference Earth model, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **25**(4), 297-356.  
 Ferrandis, J., Mateeva, A., Jorgensen, P., Lopez, J., and Dijkerman, H., 2009, Application of virtual-source technology to the Zuidwending gas storage project, *The Leading Edge*, **28**(3), 296-301.  
 Fokkema, J. T., and van den Berg, P. M., 1993, *Seismic applications of acoustic reciprocity*, Elsevier Scientific Publ. Co., Inc.  
 Hooke, R., 1665, *Micrographia: or Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses. With Observations and Inquiries Thereupon*, The Royal Society.  
 Hurich, C., and Deemer, S., 2013, Combined surface and borehole seismic imaging in a hard rock terrain: A field test of seismic interferometry, *Geophysics*, **78**(3), B103-B110.  
 Kang, T.-S., and Shin, J. S., 2006, Surface-wave tomography from ambient seismic noise of accelerograph networks in southern Korea, *Geophys. Res. Lett.*, **33**(17), L17303-1-L17303-5.  
 Kennett, B. L. N., and Engdahl, E. R., 1991, Traveltimes of global earthquake location and phase identification, *Geophys. J. Int.*, **105**(2), 429-465.  
 Kim, K. Y., Lee, J. M., Moon, W., Baag, C.-E., Jung, H., and Hong, M. H., 2007, Crustal structure of the southern Korean peninsula from seismic waves generated by large explosions in 2002 and 2004, *Pure Appl. Geophys.*, **164**(1), 97-113.



- Lin, F.-C., Ritzwoller, M. H., and Snieder, R., 2009, Eikonal tomography: Surface wave tomography by phase front tracking across a regional broadband seismic array, *Geophys. J. Int.*, **177**(3), 1091-1110.
- Mehta, K., Kiyashchenko, D., Jorgensen, P., Lopez, J., Ferrandis, J., and Costello, M., 2010, Virtual source method applied to crosswell and horizontal well geometries, *The Leading Edge*, **29**(6), 712-723.
- Mikesell, D., Wijk, K., Calvert, A., and Haney, M., 2009, The virtual refraction: Useful spurious energy in seismic interferometry, *Geophysics*, **74**(3), A13-A17.
- Schuster, G. T., 2001, Theory of daylight/interferometric imaging: Tutorial: *63rd Conference and Technical Exhibition, European Assoc. Geoscientists and Engineers, Extended Abstracts*, A32.
- Schuster, G. T., 2009, *Seismic Interferometry*, Cambridge University Press.
- Snieder, R., 2004, Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase, *Phys. Rev. E*, **69**(4), 046610-1-046610-8.
- Wapenaar, K., Draganov, D., Snieder, R., Campman, X., and Verdel, A., 2010, Tutorial on seismic interferometry: Part 1 – Basin principles and applications, *Geophysics*, **75**(5), 75A195-75A209.
- Wapenaar, K., Draganov, D., Thorbecke, T., and Fokkema, J., 2002, Theory of acoustic daylight imaging revised, *72nd Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 2269-2272.
- Yilmaz, O., 2001, *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*, Society of Exploration Geophysicists.