엔지니어링 탄성파자료에서 방사변환을 통한 풍화대 및 기반암 표면의 영상강화

김지수* · 전수인 · 이선중
충북대학교 지구환경과학과

Image Enhancement of the Weathered Zone and Bedrock Surface with a Radial Transform in Engineering Seismic Data

Ji-Soo Kim*, Su-In Jeon, and Sun-Joong Lee

Dept. of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University, Chungbuk

엔지니어링 탄성파 반사법 자료에서 자주 부딪히는 문제는 천부 불연속면의 작은 반사 에너지가 발파로 인한 음파, 직접파, 굴절파 및 진폭이 큰 표면파와 같은 잡음으로 가려진다는 점이다. 자료처리 과정에서 그 동안 국내 지반탐사 자료에 적용되지 않았던 방사변환 기법을 통하여 현장에서 얻어진 거리-시간 영역의 자료를 단순히 속도-시간 영역의 자료로 변환시켜 일관성 잡음을 제거하고자 하였다. 적용성 평가를 위해 수백 미터 깊이를 대상으로하는 고품질의 퇴적분지 탐사자료와 수십 미터 깊이를 대상으로 하는 잡음이 많은 엔지니어링 탐사자료를 시험자료로 선택하였다. 이 방법은 대역 통과 필터링과 주파수-파수 필터링에 비해 반사파의 진폭을 약화시키지 않고 음파, 표면파, 직접파, 굴절파와 같은 천부의 일관성 선형 잡음을 효과적으로 약화시킬 수 있었다. 방사 트레이스 영역에서 잡음의 주파수 특성을 고려하여 설계된 저주파 제거 필터를 적용할 때 표면파 분산 구간은 물론 주파수-파수 필터링에서 통제하기 힘든 직접파, 굴절파 및 음파의 중첩 구간(50m 깊이 이내)에 있는 천부 반사면들이 효과적으로 부각되었다. 일관성 있는 선형 잡음에 제한되어 적용되는 이 방법은 앞으로 속도-시간 영역에서 각 종 잡음의 분포 특성을 정확히 파악할 때 엔지니어링 자료에 흔히 나타날 수 있는 절리, 파쇄대, 천부 단층에 의한 회절파와 역산란파와 같은 잡음도 충분히 조절할 수 있을 것으로 보인다.

주요어 : 엔지니어링 탄성파자료, 기반암, 방사변환, 선형 잡음, 주파수-파수 필터

A difficulty encountered in engineering seismic mapping is that reflection events from shallow discontinuities are commonly overlapped with coherent noise such as air wave, direct waves, head waves, and high-amplitude surface waves. Here, the radial trace transform, a simple geometric re-mapping of a trace gather ($x-t$ domain) to another trace gather ($v-t$ domain), is applied to investigate the rejection effect of coherent linear noises. Two different types of data sets were selected as a representative database: good-quality data for intermediate sounding (hundreds of meters) in a sedimentary basin and very noisy data for shallow (≤ 50 m) mapping of the weathered zone and bedrock surface. Results obtained with cascaded application of the radial transform and low-cut filtering proved to be as good as, or better than, those produced using $f-k$ filtering, and were especially effective for air wave and direct wave. This simple transform enables better understanding of the characteristics of various types of noise in the RT domain, and can be generally applied to overcoming diffractions and back-scatterings caused by joints, fractures, and faults commonly that are encountered in geotechnical problems.

Key words : engineering seismic data, bedrock, radial transform, linear noise, $f-k$ filter

*Corresponding author: geop22@cbnu.ac.kr

© 2012, The Korean Society of Engineering Geology
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.

서론

이론적으로 대부분의 암석들은 탐사의 규모 및 탄성파의 파장 관점에서 볼 때 매우 불균질하기 때문에 파

가 진행되는 동안 상당량의 에너지가 반사되어 지표로 되돌아오게 된다. 더욱이 결정암 환경에서는 지질구조가 매우 복잡하고 지반이 심하게 변형되어 있는 관계로 육상에서 얻은 탄성과 자료는 해양 자료에 비해 낮은 신호 대 잡음비(S/N), 불연속적인 영상, 불규칙한 지형으로 반사 에너지가 더욱 왜곡되어 자료의 질이 좋지 않다(Kim et al., 1994). 특히 토양층, 풍화대, 기반암 표면을 포함하는 천부 구조를 대상으로 하는 엔지니어링 탄성과 자료에서는 천부 물성의 불규칙한 변화로 반사 에너지가 작아져서 반사파가 발파로 인한 음파, 진폭이 크고 분산이 되는 표면파, 직접파 및 임계굴절파와 같은 잡음 등으로 가려진다.

그러나 최근 탄성파탐사 관련 하드웨어와 자료처리 소프트웨어의 발달에 따라 고분해능 현장자료를 가지고 자료처리 과정에서 서로 중첩된 잡음들을 약화시키면서 반사에너지가 작은 천부 경계면을 효과적으로 규명하는 방법들이 시도되어 왔다. 무작위 잡음 또는 표면파 제거에 흔히 사용하는 대역통과 필터링(bandpass filtering), 시변 필터링(time-variant filtering), 주파수-파수 필터링(frequency - wave number; f-k filtering)이 그들이다(Yilmaz, 2001). 이 중에서 주파수-파수 필터링은 표면파 제거에 매우 효과적으로 사용되고 있지만 반사파에 비해 진폭이 큰 굴절파, 직접파 및 음파 등의 중첩으로 천부 구조의 영상 효과는 기대하기 어려웠다.

Claerbout (1975)의 방사형 트레이이스에서 출발한 방사 변환의 개념은 일찍이 구조보정(Ottolini, 1979)과 다중 반사의 제거(Taner, 1980; Lamont et al., 1999) 기법으로 발전하였다. Henley (1999)는 천부 일관성 잡음을 제거하기 위해 거리-시간 영역의 현장자료를 겔보기속도-시간 영역으로 변환시켜 필터링하는 방사변환 기법을 처음 사용하였다. 그러나 이 방법은 주파수-파수(f-k) 변환이나 타우-파(tau-p) 변환만큼 실제 현장자료에 적용되지 못하다가 2000년대 중반 캐나다 CREWES 프로젝트 연구팀에 의해 더욱 발전되어 사용되기 시작하였다. 그들은 주로 시간깊이 2000-3000 ms까지의 퇴적환경 자료에 시도하여 선형 잡음을 제거한 바 있다.

주로 표면파의 제거에 효과적으로 사용되었던 주파수-파수 변환이 2D 푸리에 변환을 거치면서 인공잡음을 많이 수반하는 반면에 방사변환은 단순히 현장(거리-시간) 자료를 분류하여 재구성한 속도-시간 자료에 1D 푸리에 변환(저주파제거 필터링 또는 대역통과 필터링)만을 수행하는 관계로 반사에너지를 충실히 유지하면서 선형 잡음(음파, 직접파, 굴절파, 역산란파)을 약화시키는

장점이 있다(Bagheri et al., 2001; Henley, 2001). 따라서 이 방법은 음파, 표면파, 직접파, 굴절파와 같은 천부의 일관성 선형 잡음을 약화시켜 천부 경계면을 효과적으로 부각시킬 수 있다. 그러나 방사변환은 주파수-파수 필터링이나 타우-파 필터링에 비해 비선형 잡음이나 속도 변화가 심은 환경에서는 적용하는데 그 한계가 있다.

이 연구에서는 CREWES 팀이 주로 사용하였던 수백 미터 깊이를 대상으로 하는 캐나다 000 퇴적분지 자료에 대한 적용성 검토(Jeon et al., 2011)를 바탕으로 이보다 훨씬 얇은 약 50미터 이하의 깊이를 대상으로 하는 국내 천부 탄성과 자료에 대한 적용성을 주파수-파수 필터링 결과와 대비하여 검토해 보았다.

방사변환의 이해

방사변환(RT; Radial Transform)은 발파점 모음자료의 트레이이스 $S(x, t)$ 들을 $S'(v, t')$ 로 단순히 재구성하는 것으로 설명할 수 있다(Fig. 1)(Henley, 1999). 다시 말하면 방사변환은 거리-시간(x, t) 영역을 겔보기속도-시간(v, t') 영역으로 바꾸어 준다.

$$RT[S(x, t)] = S'(v, t') \quad (1)$$

$$t' = t - t_0, \quad v = \frac{x - x_0}{t - t_0}, \quad \tan \theta = v \quad (2)$$

여기서 (x_0, t_0) 는 기준점을 의미하며 v 는 겔보기 속도(apparent velocity)로서 수직축을 기준으로 분사각(injection angle) θ_i 에 따라 샘플링 된 각 트레이이스의 진폭들로 재구성된 새로운 트레이이스들이 (θ, t') 또는 (v, t') 로 펼쳐진다. Fig. 1에서 겔보기속도가 큰 직접파나 임계굴절파와 같은 선형 이벤트는 주어진 분사각(θ_i 주위)에서 샘플링될 때 모든 트레이이스들의 위상이 일치되는 관계로 진폭이 큰 저주파수 파형으로 나타난다. 발파점 주위에서 분산되는 겔보기속도가 작은 표면파(θ_{43}, θ_{44})는 분사각이 작아 주어진 트레이이스가 온전히 샘플링 되는 관계로 RT 영역에서도 거의 같은 형태로 주어진다. 또한 반사 신호는 분사각 증분이 충분히 작을 경우 완만하게 샘플링 되어 연속적인 쌍곡선의 형태로 나타난다. RT 영역에서 겔보기속도가 커질수록 분사선 길이가 작아져 샘플링 수가 감소하는 관계로 공백 구간이 커진다.

RT 영역($S'(v, t')$)의 가장자리에 분포하는 직접파와 굴절파는 적절한 저주파제거 필터링 또는 대역통과 필

Fig. 1. Mapping of seismic traces from the x - t domain $S(x, t)$ to the v - t domain $S'(v, t')$. The dashed contour shows the mapped outer edge of the x - t panel.

터링으로 제거하고 이를 방사역변환(IRT; Inverse Radial Transform)시켜 최종 자료 $\tilde{S}(x, t)$ 를 얻는다.

$$\text{IRT [Low-cut Filtering of } S'(v, t')] = \tilde{S}(x, t) \quad (3)$$

시험자료

현장자료에 대한 방사변환의 적용성을 검토하기 위해 2개의 시험자료를 선택하였다. 첫 번째 시험자료는 120 채널의 기록시간이 6 s인 캐나다 OOO 퇴적분지 기반의 양호한 자료를 선택하여 방사변환 필터링에 의한 천부 구조의 영상 효과를 주파수-파수 필터링의 결과와 비교하였다.

48 채널, 기록시간이 128 ms인 두 번째 시험자료는 강원도 OOO 천부(엔지니어링) 자료로서 VISTA(2000) 소프트웨어에 간단한 포트란 프로그램을 삽입하여 Kim et al.(2001)에 의해 자료처리 된 것으로서 이 연구에서는 방사변환을 새로이 적용하여 기반암의 표면, 풍화대 및 그 상부의 영상 효과를 살펴보았다.

시험자료 I (퇴적분지 자료)

현장자료(Fig. 2a)는 분산된 표면파, 직접파, 굴절파와 같은 일관성 선형잡음(coherent linear noise)들을 보여준다. 800 ms 부근(약 600 m 깊이 내외)의 뚜렷한 반사파는 표면파와 중첩된다.

Fig. 2b는 현장자료(Fig. 2a)를 방사변환시켜(RT [$S(x, t)$]) 만든 겉보기속도-시간 영역(이하 RT 영역) $S'(v, t')$ 이다. 변환을 위한 시간 기준점(x_0, t_0)은 현장자료가 중앙발파와 영시간(zero time)에서 시작되는 것을 고려하여 각각 0.0 m, 0.0s로 설정하였다. Fig. 2b에서 겉보기 속도 v (또는 주입각 θ)가 큰 가장자리에 보이는 저주파 이벤트는 직접파 및 굴절파와 관련된 모드이다. 이것은 특정 각도(또는 속도)에 걸쳐있는 모든 트레이스들의 위상이 일치되는 관계로 진폭이 크고 주파수가 작은 특성을 보인다. 또한 겉보기속도가 커질수록 분산선 길이가 작아져 샘플링 수가 감소하는 관계로 자료가 존재할 수 없는 공백 구간이 많아진다. 반사파는 쌍곡선의 형태를 보인다. 진폭이 크고 저주파 특성을 보이는 표면파는 분사각이 작아 수직으로 거의 모두 샘플링 되는 관계로 RT 영역에서도 수직축 가까이 분포한다.

RT 영역 $S'(v, t')$ (Fig. 2b)의 양쪽 가장자리에 분포하는 직접파와 굴절파, 중앙부에 분포하는 표면파를 동시에 제거하기 위해 저주파 제거(15Hz-cut) 필터링을 하였다. Fig. 2c는 필터링 후 역변환을 실시하여(IRT [$S'(x, t')$]) 얻어진 방사변환 자료($S(x, t)$)로서 표면파는 거의 제거되고 직접파 및 굴절파도 약화되었다. 반사파는 800 ms 부근 외에 표면파에 가려졌던 600 ms, 400 ms 부근에서도 부각된다. 직접파 및 굴절파의 약화 및 표면파의 제거 효과는 적용 이후(Fig. 2d)와 적용 이전(Fig. 2b)의 RT 영역에서 선명하게 볼 수 있다.

방사변환에 의한 잡음 제거의 효과를 주파수-파수 필

Fig. 2. Shot gathers and their RT domains: (a) shot gather and its (b) RT domain, (c) RT filtered gather and its (d) RT domain, and (e) f-k filtered gather and its (f) RT domain. R1, R2, R3: reflections, D+R: direct and head waves, S: dispersive surface wave. Compared to those in (e), shallower reflection event R2 is well focused in (c), with R3 newly shown. The effect of rejection of direct and head waves is distinctly shown in RT domain (d) where low-frequency and high-amplitude events are almost weakened.

터링 결과(Figs. 2e, 2f)와 비교하였다. 필터링에 사용한 속도인자는 ± 2000 m/s이다. Fig. 2e에서 표면파는 심부를 제외하고는 제거되었지만 길보기속도가 큰 저주파 성분, 즉 직접파와 굴절파는 그대로 남아있는데 이것은 또한 RT 영역(Fig. 2f)에서 길보기속도가 큰 저주파 특

성이 잔존하는 것으로 확인된다. 600 ms의 반사파는 희미하게 보이지만 400 ms 부근에서는 확인하기 어렵다.

방사변환과 주파수-과수 필터링의 적용 효과는 각 결과(Figs. 2c, 2d)를 1000 ms까지 확대한 자료(Figs. 3a, 3b)와 중합단면도(Figs. 4a, 4b, 4c)에서 보다 선명해진

Fig. 3. Enlarged shot gathers down to 1000ms: (a) RT filtered and (b) f-k filtered. R1, R2, R3, R4: reflections. Reflection event R2 is well focused and the shallower events of R3 and R4 are newly shown in (a), with direct and head waves much eliminated.

다. Fig. 3a에서 600 ms, 400 ms 외에 중앙부 300 ms 부근에서 짧은 쌍곡선의 반사파가 확인된다. Figs. 4a, 4b, 4c는 각각 무변환, 주파수-파수변환, 방사변환을 적용한 중합단면도이다. Fig. 4a에서 표면파는 전체 깊이에 걸쳐 경사진 선형 잡음으로 나타나고 천부는 직접파와 굴절파가 중첩되어 큰 진폭으로 나타난다. 표면파의 간섭은 Fig. 4b에서 현저히 줄어들었으나 400 ms 부근에 보이는 경계면은 선형잡음(직접파 + 굴절파 + 표면파 일부)의 중첩으로 부분적으로 가려진다. 특히 600 ms 부근의 경계면은 발파점 부근의 표면파 및 직접파 등의 간섭으로 CMP 70부터 잘 나타나지 않는다. Fig. 4c에서는 400 ms, 600 ms 부근의 경계면들이 모두 보인다. 그러나 Fig. 3a의 300 ms 부근에 나타난 이벤트는 중합단면도에서는 확인되지 않고 있는데 이것은 천부의 심한 속도변화로 NMO 보정 후 생기는 스트레치 등으로 중합에너지가 흐트러져 반사면이 가려진 것으로 해석된다.

시험자료 II (엔지니어링 자료)

시험자료 I에서 확인된 선형잡음에 대한 방사변환의 효과를 토목지질조사(교량건설부지 특성 조사) 목적으로 수집되어 처리된 고분해능 자료(Kim et al., 2001)에서

Fig. 4. (a) Brute stack, (b) f-k filtered section and (c) RT filtered section. R1, R2: reflections. The inclined features in (a) are related to the dispersive surface waves and linear noises of direct and head waves. The reflections(R2 and the underlying weak events) smeared by linear features from the CMP 70 eastwardly in (b) are well focused in (c).

검토하고자 한다.

시험자료는 에너지원으로 특수 뇌관을 2 m 간격으로 사용하였고 분해능을 높이고자 하천수를 유입시켜 1 m 간격으로 설치된 하이드로폰을 수신기로 사용하였다. 진폭 스펙트럼에 나타난 주파수대역은 10-1000 Hz이고 중심 주파수는 500 Hz 부근으로서 일반적인 육상탐사에 자료에 비해 상당히 높은 분해능을 보였다(Kim et al., 2001). 따라서 잡음이 없다고 가정하는 경우 이상적인 분해능은 평균 중합속도 3000 m/s에 대해 약 2 m의 두께이며, 에너지원의 방사 효과를 고려할 때 10-15 ms(약 7-8 m) 깊이부터 반사 경계면을 탐지할 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 그러나 현실적으로 표면파, 음파, 직접파, 굴절파 등의 천부잡음의 간섭효과로 천부 경계면의 분해능(resolution)과 탐지능(detection)이 훨씬 떨어지므로 시험자료 I에 성공적으로 적용한 방사변환 기법을 천부 엔지니어링 자료에 사용하여 그 적용성을 검토하였다.

Fig. 5. (a) Shot gather, (b) f-k filtered gather and (c) RT filtered gather. R1, R2: reflections, D+R: direct and head waves, A: air wave, E: electric wave, S: surface wave. Dispersive surface wave(S) shown in (a) is almost attenuated in (b), with air wave(A) and electric noise(E) remained intact. The shallower reflection R2 is clarified in (c), with air wave(A) completely removed.

자료처리에 있어서는 방사변환의 효과만을 살펴보기 위해 시변필터(time-variant filtering), 잔여 정보정(residual statics), 트레이스 균등화(trace equalizing) 과정을 생략하였다. 따라서 그 결과는 기존의 중합단면도(Kim et al., 2001)와 달라질 수 있다. 발파자료(Fig. 5a)에서 속도가 330 m/s인 선형 이벤트는 공기파이고 발파점 부근의 저주파/고진폭의 분산을 보이는 것은 표면파이다. 또한 50 ms와 60 ms 부근의 수평 이벤트는 뇌관으로 인한 전기적인 잡음으로 해석된다. 30 ms 부근의 강한 이벤트 R1은 기반암 표면에서 반사된 에너지로 해석하였다. 속도인자 ± 1600 m/s로 주파수-과수 필터링을 한 결과(Fig. 5b)에서 표면파는 제거되었지만 음파 및 전기적인 잡음은 그대로 포함되고 있다. 또한 직접파와 굴절파

Fig. 6. Enlarged shot gather down to 30ms: (a) f-k filtered and (b) RT filtered. R1, R2, R3: reflections, D+R: direct and head waves. Reflection event R2 is well focused and the shallower event R3 is newly shown in (b), with direct and head waves much eliminated.

가 효과적으로 약화되지 않아 천부의 반사파가 부각되지 못한다. 음파와 전기잡음은 방사변환과 저주파제거 필터링(300 Hz-cut)을 한 자료(Fig. 5c)에서 효과적으로 제거되었으며 직접파와 굴절파도 부분적으로 약화되어 20 ms 부근의 이벤트 R2가 뚜렷하게 보이는데 이것은 35 ms까지 확대된 자료(Figs. 6a, 6b)에서 잘 확인된다. 직접파와 굴절파가 약화된 13 ms 부근에서 진폭이 작은 반사 이벤트 R3가 새로이 부각되었다(Fig. 6b).

Figs. 7a, 7b는 각각 주파수-과수 변환, 방사변환을 수행한 중합단면도이다. 2개의 단면도 모두 기반암 표면(25-30 ms 부근)을 잘 보여주지만 풍화대 상부(15-20 ms 부근)는 선형잡음들이 모두 제거된 방사변환 단면도(Fig. 7b)에서 더욱 선명해진다. 10-15 ms 부근의 약한 이벤트 R2 (Fig. 7a) 또한 Fig. 7b에서 강한 진폭으로 나타난다. 강한 진폭은 방사변환 필터링이 주파수-과수 필터링에 비해 진폭 스펙트럼이 중심주파수에 밀집되기 때문이며 (Bagheri et al., 2007) 이것이 단속적으로 나타나는 것은 퇴적층에서 발달한 불연속체(균열, 절리 등)에 의해 반사 에너지가 왜곡되어 중합되기 때문으로 해석된다. 방사변환을 수행한 단면도(Fig. 7b)에서는 앞에서 설명한 바와 같이 RT 변환의 효과만을 검토하기 위해 잔여

Fig. 7. (a) f-k filtered section and (b) RT filtered section. Major subsurface interfaces are marked by R1(bedrock surface), R2(top of the weathered zone), and R3(several bands of sediments) which are well focused in RT filtered section. The position of borehole(BH) for the crosshole seismic tomography(Fig. 8) is included.

Fig. 8. Seismic tomogram (by courtesy of Dr. H.S. Kim). The round-shaped events at depth of approximately 30m are believed to be the bedrock surface, which is well correlated to the seismic reflection R1 in Fig. 7. However, the shallower events R1 and R2 in the seismic section(Fig. 7b) are not identified here, probably because they are beyond the low-cut limit of the velocity(2500m/s) for the sediment.

정보정(residual statics)을 비롯한 각종 시차보정을 수행하지 않은 관계로 구조보정이 안된 시간단면도에서 일반적으로 나타나는 나비넥타이(bow-tie) 현상을 볼 수 있다. 더욱이 천부 엔지니어링 탄성과 자료에서는 뚜렷한 지질구조가 없고 또 불규칙한 매질을 탐사 대상으로 하기 때문에 구조보정을 하지 않는 것이 일반적이고 또한 천부 속도가 심하게 변하는 관계로 깊이 변환은 간단히 시추조사에서 확인된 구간속도를 활용하였다. 단면도에서 해석된 27 ms(약 30 m 깊이)의 기반암 표면은 측선상의 한 지점에서 기록한 탄성과 토모그래프(Fig. 8)과 부합된다. 풍화대는 20 ms까지(약 15 m 깊이)까지 상부로 연장된 것으로 보인다.

결론

1. 토양층, 풍화대, 기반암 표면을 포함하는 천부 구조를 대상으로 하는 엔지니어링 탄성과 자료는 반사에너지가 발파로 인한 음파, 진폭이 크고 분산이 되는 표면파, 직접파 및 임계굴절파와 같은 잡음 등으로 가려진다.
2. 천부 잡음들을 제거하기 위해 흔히 쓰이는 주파수-파수 필터링을 대신하여 걸보기속도-시간 영역으로 변환시켜 필터링하는 방사변환 기법을 2개의 현장자료(퇴적분지 자료 및 엔지니어링 자료)에 사용하였다.
3. 고분해능 엔지니어링 자료에 대한 방사변환 기법은 특히 직접파, 굴절파, 음파와 같은 선형잡음을 효과적으로 제거하여 약 15-20 m 깊이까지 탐지할 수 있었다.
4. 주파수-파수 필터링에 비해 그 적용이 간단하고 반사 신호가 작은 자료에 적합하지만 선형 잡음에만 국한되는 단점이 있다. 그러나 엔지니어링 자료에 흔히 나타날 수 있는 절리, 파쇄대, 천부 단층에 의한 회절파와 역산란파와 같은 잡음도 부분적으로 구간을 설정하면 충분히 조절할 수 있을 것으로 보인다.

사사

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012R1A1A 2041933). 논문을 건설적으로 지적해주신 3명의 심사자님들께 감사드립니다.

참고문헌

Bagheri, M, Riahi, M. A., Khaxar, Z. O., Hossni, M., and Mohseni, D.R., 2007, Ground-roll attenuation in the

- radial trace domain, International Earthquake Symposium KOCAELI 2007, 201-205.
- Claerbout, J. F., 1975, Slant-stacks and radial traces: SEP Report SEP-5, 1-12.
- Henley, D. C., 1999, The radial trace transform: an effective domain for coherent noise attenuation and wave field separation: 69th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1204-1207.
- Henley, D. C.-CREWES, 2001, Revisiting the radial trace transform, Feature Article, CSEG Recorder, 21-25.
- Jeon, S. I., Ju, H. T., Lee, S. J., Kim, J. S., 2011, Radial trace transform for linear-noise suppression in land seismic reflection data, 2011 Fall Meeting of The Korean Society of Engineering Geology, Jeongsun-Gun, Nov. 10-11, 2011, 269-271 (In Korean).
- Kim, J. S., Han, S. H., Kim, H. S., Choi, W. S. and Jung, C. H., 2001, High-resolution seismic reflection profiling on land with hydrophones employed in the stream-water driven trench, The Journal of Korean Society of Exploration Geophysicists, 4, 133-144 (In Korean with English abstract).
- Kim, J. S., Moon, W. M., Lodha, G., and Soonawala, N., 1994, Imaging of reflection seismic energy for mapping shallow fracture zones in crystalline rocks: Geophysics, 59, 753-765.
- Lamont, M. G., Hartley, B. M., and Uren, N. F., 1999, Multiple attenuation using the NMO and ISR preconditioning transforms, The Leading Edge, 18, 110-114.
- Ottoloni, R., 1979, Migration of radial trace sections: SEP Report, SEP-20, 97-115.
- Taner, M. T., 1980, Long-period sea-floor multiples and their suppression: Geophys. Pros. 28, 30-48.
- VISTA, 2000, Seismic data processing software, Sis Ltd., Canada.

김지수

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
Tel: 043-261-3201
Fax: 043-273-9645
E-mail: geop22@cbnu.ac.kr

전수인

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
Tel: 043-261-3201
Fax: 043-273-9645
E-mail: dh4336@hanmail.net

이선중

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
Tel: 043-261-3201
Fax: 043-273-9645
E-mail: navit@hanmail.net

원고접수일 : 2012년 12월 11일
수정본채택 : 2012년 12월 23일(1차)
2012년 12월 26일(2차)
게재확정일 : 2012년 12월 26일