

지열지대 VSP 자료를 이용한 파쇄대 영상화 연구

이상민¹ · 변종무^{1*} · 송호철¹ · 박권규² · 이태종²

¹한양대학교 자원환경공학과

²한국지질자원연구원

Imaging Fractures by using VSP Data on Geothermal Site

Sangmin Lee¹, Joongmoo Byun^{1*}, Hocheol Song¹, Kwon Gyu Park², and Tae Jong Lee²

¹Dept. of Natural Resources and Geoenvironmental Engineering, Hanyang Univ.

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요약: 지열은 외부 연료 공급요건에 영향을 받지 않고 연중 가동할 수 있는 장점을 가지기 때문에 최근 해외에서 주목받고 있는 대체 에너지원이다. 그리고 국내의 온천 및 지열이상대는 화강암 지역의 심부 파쇄대를 통한 지열수의 순환에 의한 것이 대부분으로 알려져 있다. 따라서 국내에서의 지열탐사는 지하유체의 주요 통로인 심부 파쇄대의 분포상태를 정확하게 파악하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 석모도에서 취득한 수직 탄성파탐사(Vertical Seismic Profiling, VSP) 자료의 전처리와 심부 파쇄대의 영상화를 수행하기 위하여 급경사 파쇄대 지역과 퇴적층 구조를 모사한 속도모델로부터 합성탄성파 자료를 생성하고, 이 자료에 일반적인 VSP 자료처리방법과 급경사 파쇄대를 고려한 VSP 자료처리방법을 각각 적용한 결과를 비교·분석하였다. 그 결과 파쇄대에 의한 반사 이벤트의 손실을 없애기 위해서는 단순히 모든 하향파를 제거하는 일반적인 전처리 과정이 아닌 파쇄대를 고려한 전처리 과정이 필요하다는 것을 확인하였다. 또한 파쇄대를 고려한 전처리 과정이 수행된 석모도 거꿀 수직 탄성파탐사(Reversed VSP, RVSP) 현장자료에 3차원 겹쌓기전 위상막 참 반사보정을 적용하여 석모도 탐사현장의 지하구조를 영상화하였다. 참 반사보정 결과 파쇄대로 추정되는 구조가 확인되었으며, 이는 시추공 자료에서 추정되는 균열대의 심도와 일치하였다.

주요어: 파쇄대, VSP 자료 전처리과정, 3차원 겹쌓기전 위상막 참 반사보정

Abstract: Attention has been focused on geothermal energy as an alternative energy because it is continuously operable without external supply. Most of geothermal anomalies in Korea are related to deep circulation of groundwater through a fracture system in granite area. Therefore it is very important to understand the distribution of the fracture system which is the main channel of ground water. In this research, we constructed the velocity models with a fracture system and the layered sediments, respectively, and generated synthetic data sets with them to verify the presented vertical seismic profiling (VSP) preprocessing scheme. We compared the results from conventional VSP preprocessing flow to those from VSP preprocessing flow considering fracture system. We noticed that the preprocessing flow considering fracture system retains more sufficient signal including down-going wave than conventional preprocessing. In addition, we applied 3D VSP prestack phase screen migration to the preprocessed reversed VSP (RVSP) data from Seokmo Island so that we were able to image fracture structure of the geothermal site in Seokmo Island.

Keywords: fracture system, VSP data preprocessing, 3D prestack phase screen migration

서 론

지열은 날씨나 계절의 영향이나 기후조건 등 외부 열원 공급요건에 영향을 받지 않고 연중 가동할 수 있고 온실가스의

배출이 적은 장점을 가지기 때문에 최근 원자력발전소의 안전 문제나 온실가스 감축과 관련되어 국내외적으로 주목받고 있는 대체 에너지원이다. 해외에서는 이미 100여년 전부터 화산 지역에서 150°C 이상의 고온의 증기를 개발하여 전기를 생산하는 전통적인 열수형 지열발전 기술이 발달해, 2010년에는 전세계적으로 10.7 GW의 지열발전 설비가 구축되어 있다 (Dickson and Fanelli, 2003; Bertani, 2010). 이와 더불어 최근에는 비화산지대에서도 지열발전을 가능케 하는 EGS (Enhanced Geothermal System) 기술이 개발되어 프랑스, 독일, 호주 등에서 활발히 연구되고 있다. EGS란 지하심도 5 km 내

2011년 7월 13일 접수; 2011년 7월 28일 수정; 2011년 8월 8일 채택
*Corresponding author

E-mail: jbyun@hanyang.ac.kr

Address: Dept. of Natural Resources and Geoenvironmental Engineering, Hanyang University, 17 Haengdang1-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

외에 부존하는 고온의 열을 심부시추와 수압파쇄를 통하여 추출하는 방법으로서 주입정으로부터 고압의 물을 주입함으로써 수압파쇄를 통하여 지하 심부에 인공적인 지열저류층을 생성하고 별도의 생산정을 통해 열수를 생산함으로써 지열발전 등에 활용하는 기술이다.

이러한 세계적인 지열개발 기술의 추이에 발맞추어 우리나라에서도 지열발전에 대한 관심이 고조되고 있다. 2009년부터는 한국지질자원연구원을 중심으로 인천광역시 석모도를 대상으로 열수형 지열발전을 위한 프로젝트를 진행중이다(이태중 등, 2009). 동 프로젝트에서는 석모도지역 3 km 내외의 심도에서 약 100°C의 지열수를 개발하여 지열발전 및 지역난방에 활용하는 것을 목표로 한다. 또한 2010년 12월부터는 경상북도 포항시를 중심으로 국내 최초의 EGS 지열발전 프로젝트가 진행중에 있다(윤운상 등, 2010). 과거 국내에서 심부 지열에너지의 이용은 주로 온천에 국한되어 왔으나 최근 석모도나 부곡 등에서 지열수를 건물, 주택, 온실의 난방에 이용하는 몇몇 사례가 발표된 바 있다(Song *et al.*, 2010). 화산이 없는 우리나라의 경우 이러한 온천 및 지열이상대는 주로 화강암지역의 심부 파쇄대를 통한 지열수의 순환에 의한 것이 대부분으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 2010). 따라서 국내에서의 지열 탐사는 지하유체의 주요 통로인 심부 파쇄대의 분포양상을 정확히 파악하는 것이 매우 중요하다.

일반적으로 지열 저류층 구조의 정보를 얻는데는 지표탄성파탐사가 쓰여왔다. 그러나 지표탄성파탐사만으로는 해상도와 급경사의 파쇄대 구조에 의한 영향 때문에 파쇄대의 영상을 정확하게 구현하는데 한계가 있으므로 심부시추공을 이용한 수직 탄성파탐사(Vertical Seismic Profiling, VSP)가 더불어서 수행될 경우 더욱 정확한 파쇄대의 정보를 획득할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 급경사 파쇄대를 모사하는 속도모델을 구축하고 이를 수치모형실험을 통해 급경사 파쇄대로부터 반사된 신호의 특성을 고려한 VSP 탐사자료 전처리 과정에 대해 고찰하고 VSP 탐사가 급경사 파쇄대 영상을 획득하는데 적합함을 확인하고자 하였다. 일반적인 VSP 탐사 전처리 과정은 층서구조에서 반사된 신호의 특성을 고려한 것이기 때문에 이를 그대로 적용할 경우 급경사 파쇄대로부터 반사된 신호를 제거할 수도 있으므로 급경사 파쇄대로부터 반사된 신호를 보존할 수 있는 전처리 과정을 제안하였다. 마지막으로 석모도 지열사이트에서 획득된 거울 수직탄성파 탐사(Reversed VSP, RVSP) 현장자료에 대하여 본 연구에서 제안한 전처리과정과 3차원 겹쌓기전 위상막 참 반사보정(2010, 신승일)을 적용하여 시추공 주변의 급경사 파쇄대를 갖는 지하구조에 대한 현장 적용성을 고찰하고자 하였다.

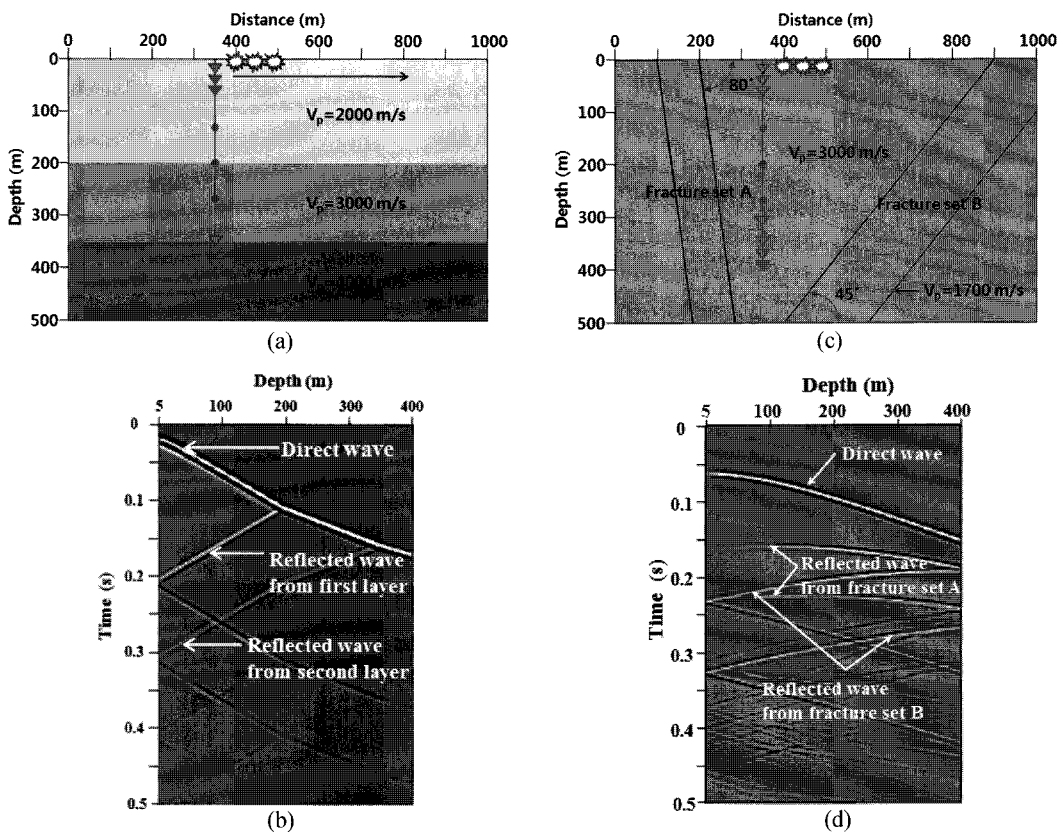


Fig. 1. (a) A velocity model including three horizontal layers for VSP survey. (b) A synthetic shot gather from the velocity model in Fig. 1a. (c) A velocity model including fractures for VSP survey. (d) A synthetic shot gather from the velocity model in Fig. 1c.

파쇄대가 존재하는 VSP 자료에서의 일반적인 전처리 과정 적용

일반적으로 대부분의 지열이상대가 퇴적층에 존재하는 국외의 사례와 지열이상대가 화강암 지역의 심부 파쇄대에 존재하는 국내의 사례를 모사하기 위해 매질의 속도를 달리한 3층 층서구조의 속도모델(Fig. 1a)과 균질한 매질에 파쇄대가 존재하는 속도모델(Fig. 1c)을 설정하였다. 이 속도모델들에 대해 Table 1의 탐사변수를 적용하여 시간영역에서 유한차분 음향 파동방정식 모델링 프로그램(Falk, 1994)을 이용하여 VSP 합성탄성과 탐사자료(Fig. 1b, 1d)를 생성하였다. 층서 속도모델에 대하여 계산된 VSP 합성탄성과 탐사자료는 Fig. 1b에서 보듯이 직접파는 하향 전파를, 일차반사파는 상향 전파하는 특성을 보인다. 반면에 Fig. 1d의 파쇄대가 존재하는 구조에서 취득한 VSP 합성탄성과 탐사자료는 하향 전파하는 직접파와 상향 전파뿐만 아니라 하향 전파하는 특성을 보이는 일차반사파가 존재한다.

Fig. 1b와 1d에 보이는 VSP 공통송신원모음을 이용하여 정확한 지하구조를 영상화하기 위해서는 일차반사파를 제외한 나머지 다중반사파와 직접파는 모두 제거되어야 한다. 이를 위해 일반적인 VSP 자료처리 전처리 과정에서는 지하매질이 층

서구조로 되어있다는 가정하에 상향 전파하는 반사파만을 분리한다. Fig. 2는 f-k 필터와 같은 경사필터(dip filter)를 적용하여 하향 전파하는 이벤트를 제거하고 상향 전파하는 반사파의 이벤트만을 나타낸 결과이다. Fig. 2a에서 보듯이 층서구조의 경우에는 직접파는 하향 이벤트로 반사파들은 상향 이벤트로 나타나기 때문에 f-k 필터와 같은 경사필터로 간단하게 상향 반사파를 분리해 낼 수 있다. 반면에 급경사의 파쇄대가 존재하는 경우, 층서구조에서와 같은 방법으로 상향파를 분리하면 직접파와 동일하게 전파하는 파쇄대 A에서 반사되는 반사파가 제거되었을 뿐만 아니라 파쇄대 B에서 반사되는 반사파의 일부도 손실됨을 확인할 수 있다(Fig. 2b). 경사필터를 이용하여 전처리 과정을 수행한 자료들에 겹쌓기전 위상막 참 반사보정(최윤경 등, 2006)을 적용한 결과가 Fig. 3에 나타나 있다. 층서구조의 경우에는 200 m와 350 m의 2개의 수평층이 정확하게 나타나는 것을 볼 수 있으나, 급경사의 파쇄대가 존재하는 경우에는 전처리 과정에서 파쇄대의 반사 이벤트의 손실로 인하여 참 반사보정 결과(Fig. 3b)에서 점선으로 표시된 파쇄대 A가 영상화되지 않았으며 파쇄대 B의 구조 역시 일부 손실되어 나타나게 된다. 따라서 파쇄대가 존재하는 지역의 VSP 탐사자료에서는 일반적인 VSP 전처리 과정에서처럼 단순히 상향파만을 분리하여서는 안 된다는 것을 확인할 수 있다.

Table 1. Parameters used in numerical modeling.

Number of shots	100 (x = 370 m ~ 865 m, z = 5 m)
Shot interval	5 m
Number of receivers	80 (x = 350 m, z = 5 m ~ 400 m)
Receiver interval	5 m
Source wavelet	100 Hz Ricker wavelet
Record length	0.5 sec
Sampling interval	2 ms
Number of samples per trace	251

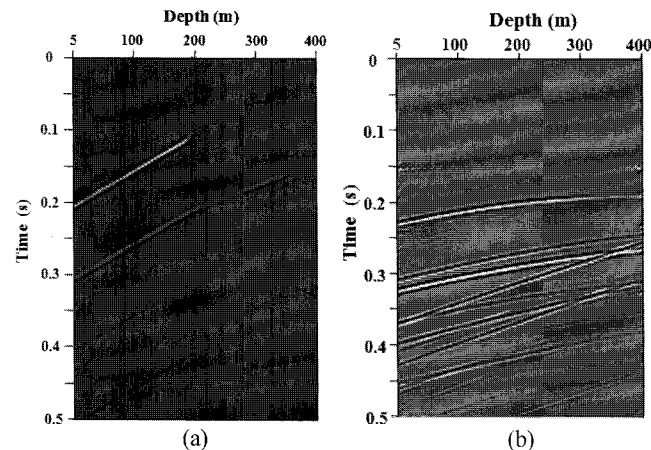
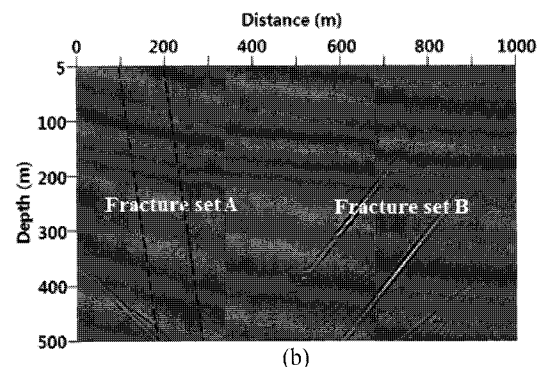
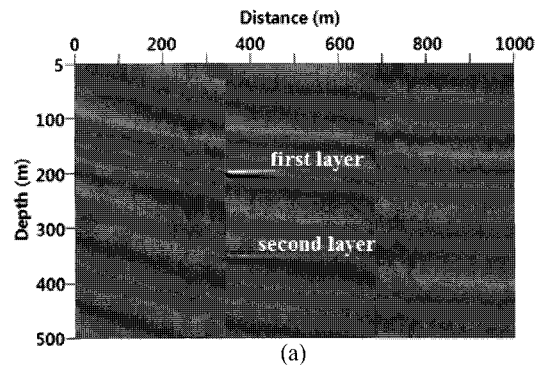


Fig. 2. VSP synthetic shot gathers after removing all downgoing waves by applying f-k filter to raw shot gathers (a) in Fig. 1b and (b) in Fig. 1d.

Fig. 3. (a) A migrated section after removing all downgoing waves from the synthetic data with 3-layered velocity model. (b) A migrated section after removing all downgoing waves from the synthetic data with the velocity model including fractures. The dashed lines show real location of fracture set A.

급경사 파쇄대를 고려한 VSP 전처리 과정의 적용

VSP 탐사자료 전처리시 파동장 분리 방법에는 중앙값 필터, f-k 필터, τ -p 필터를 이용하는 방법 등이 있다. 그러나 파쇄대 지역의 전처리시 f-k 필터나 τ -p 필터와 같은 경사필터를 이용하여 하향 반사파를 제거하는 경우 앞 절에서 보듯이 파쇄대 영상의 일부가 손실될 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 파쇄대로부터 반사된 일차 반사파의 손실을 피하기 위해 파동장 분리시 Fig. 4a에서의 같이 모든 하향 반사파들을 제거하는

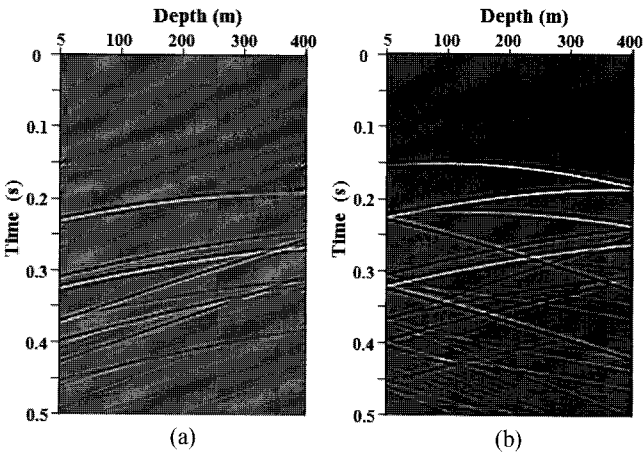


Fig. 4. (a) A synthetic shot gather after removing all downgoing waves. (b) A synthetic shot gather after removing only direct wave with the preprocessing flow considering fracture.

것이 아니라 직접파만을 제거하기 위해 중앙값 필터(median filter)등을 이용하여 전처리 과정을 수행하였다(Fig.4b). 이렇게 전처리 과정을 적용한 자료에 겹쌓기전 위상막 참 반사보정을 적용한 결과를 Fig. 5b에 나타내었다. 일반적인 VSP 자료 전처리 과정에서처럼 상향 반사만을 분리시켜 참 반사보정을 수행한 결과(Fig. 5a)와는 달리 파쇄대 A와 B의 영상이 정확하게 구현되는 것을 확인할 수 있다.

위에서 보듯이 일반적인 퇴적층 구조에서는 경사필터 등을 이용하여 상향 반사파만을 분리시키는 VSP 자료처리 과정으로 정확한 지하구조 영상획득이 가능하다. 그러나 국내의 지열 사이트와 같이 파쇄대가 존재하는 지역에서는 파쇄대로부터 반사 이벤트가 상향파뿐만 아니라 하향파로도 존재하기 때문에 상향파만을 분리하는 과정으로 자료처리를 수행하여서는 정확한 파쇄대 영상을 획득할 수 없다. 따라서 파쇄대가 존재하는 지역에서의 VSP 탐사자료는 중앙값 필터 등을 이용하여 직접파 또는 대롱파만을 제거하는 과정으로 전처리 과정이 이루어져야만 정확한 파쇄대 영상을 획득할 수 있다는 것을 알 수 있다.

석모도 지열사이트 현장자료 전처리 결과

현장자료에 수치모형 실험으로 검증된 전처리 과정의 적용성을 검토하기 위해 석모도 지열 개발 현장에서 획득된 RVSP 자료에 적용하였다. RVSP 탐사는 VSP 탐사의 송수진기 위치를 바꾼 탐사법으로 시추공 내에 송신원을 위치시키고 지표에 수신기들을 배열하여 반사면에서 반사되는 파를 이용하여 지하구조를 영상화하는 방법이다. RVSP 자료는 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 YG-4호공에서 송신원을 운용하고, 주변에 지표 반사법 탄성파탐사를 위해 설치한 측선들인 L1, L2 및 L3에서 자료를 획득하였으며 이때 자료취득 매개변수는 Table 2에 정리한 바와 같다. Fig 6에서의 같은 측선 배치와 송신공의 위치는 RVSP 자료의 획득 관점에서는 최적의 측선 배치는 아니다. RVSP 탐사는 이 측선들에 대한 지표 반사법 탐사를 보완하고, 파쇄대 발달 양상에 대한 고분해능 영상화를 위해 수행되었으나 측선들의 교점 주변에 위치한 시추공이 가용하지 않아 부득이 YG-4를 송신공으로 활용하였다. RVSP 자료획득을 위한 송신원으로는 탄성과 전용뇌관과 최대 250 g의 화약을 이용하였으며 20~900 m 깊이까지 일부 발파에 의한 유실 구간을 빼고 10 m 간격으로 운용하였다. 수신기는 14 Hz 수직 지오폰을 이용하였으며, 수신기 간격은 4 m를 기본으로 하되 L1 측선의 경우에만 일부구간에 대해 2 m 간격을 사용하였다.

석모도 현장자료를 통한 정확한 파쇄대 영상을 획득하기 위해 일반적인 전처리 과정과 직접파 및 대롱파만을 제거시키는 과정으로 각각 자료처리를 수행하였다(Fig. 7). Fig. 7a는 석모도 지열사이트에서 얻은 현장자료로서 직접파와 시추공벽에서 생성되는 강한 진폭의 대롱파를 확인할 수 있다. 이를 일

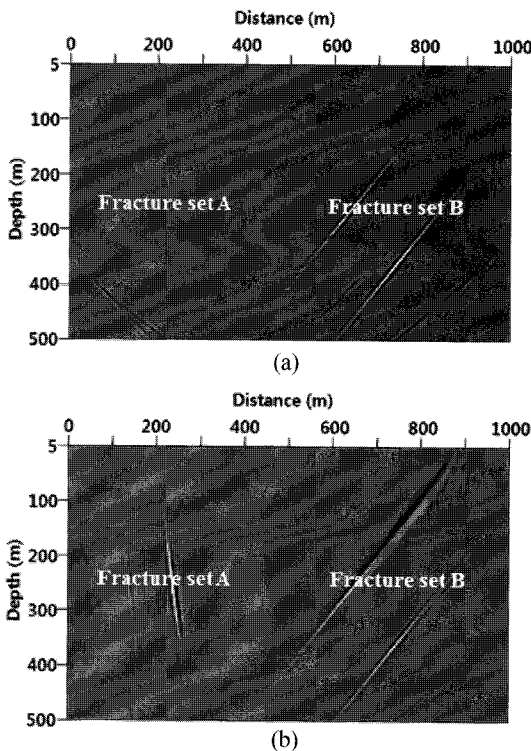


Fig. 5. (a) A migrated section after removing all downgoing waves. (b) A migrated section after removing only direct wave.

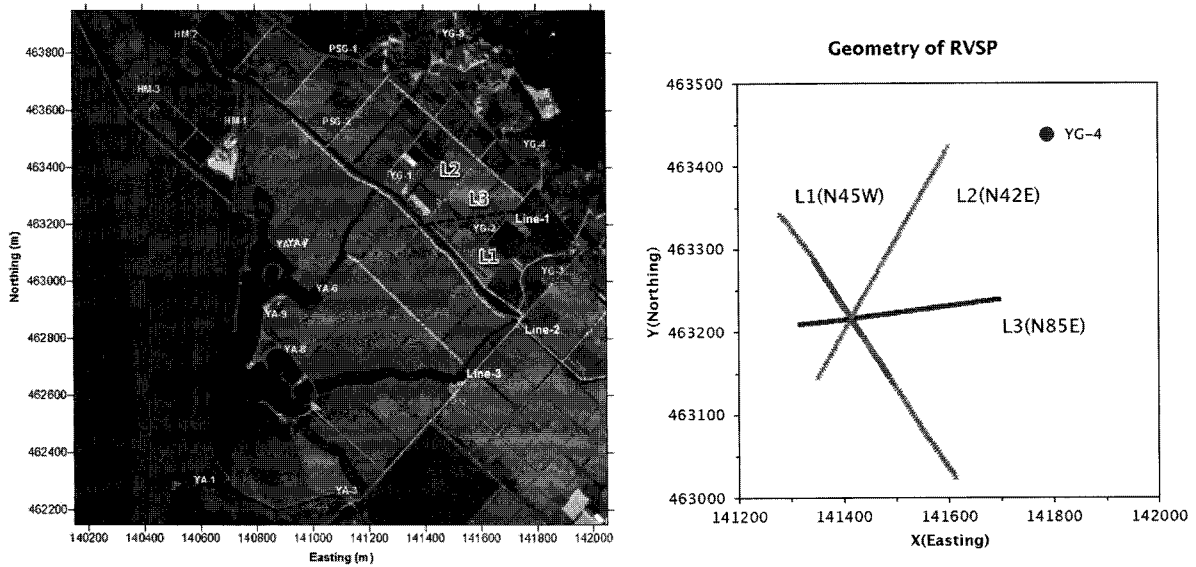


Fig. 6. Geometry of the RVSP survey in Seokmo Island.

Table 2. Parameters used for the RVSP survey in Seokmo Island.

Type of Source		Dynamite (≤ 250 g)
Number of shots		74 (20 ~ 900 m)
Shot interval		10 m
Receiver spacing	L1 line	2/4 m (168 ch.)
	L2 line	4 m (96 ch.)
	L3 line	4 m (96 ch.)
Receiver interval		2 m, 4 m
Sampling interval		0.5 ms
Record length		3 s

반적인 VSP 전처리 과정에서처럼 상향 반사파만을 분리시키기 위해 경사 필터를 적용하게 되면 Fig. 7b에서 보듯이 직접파와 대롱파뿐만 아니라 파쇄대의 반사파로 생각되는 대부분의 이벤트까지도 손실되는 것을 볼 수 있다. 이와는 달리 Fig. 7c는 수치모형 실험을 통해 파쇄대의 반사이벤트가 상향뿐만 아니라 하향으로도 전파되는 것을 확인하고 이를 토대로 직접파와 대롱파만을 중앙값 필터 등을 통해 제거시키는 전처리 과정을 수행한 결과이다. Fig. 7c에서 나타나듯이 직접파와 대롱파만이 제거되고 직접파와 유사한 경향의 파쇄대의 반사 이벤트의 손실은 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

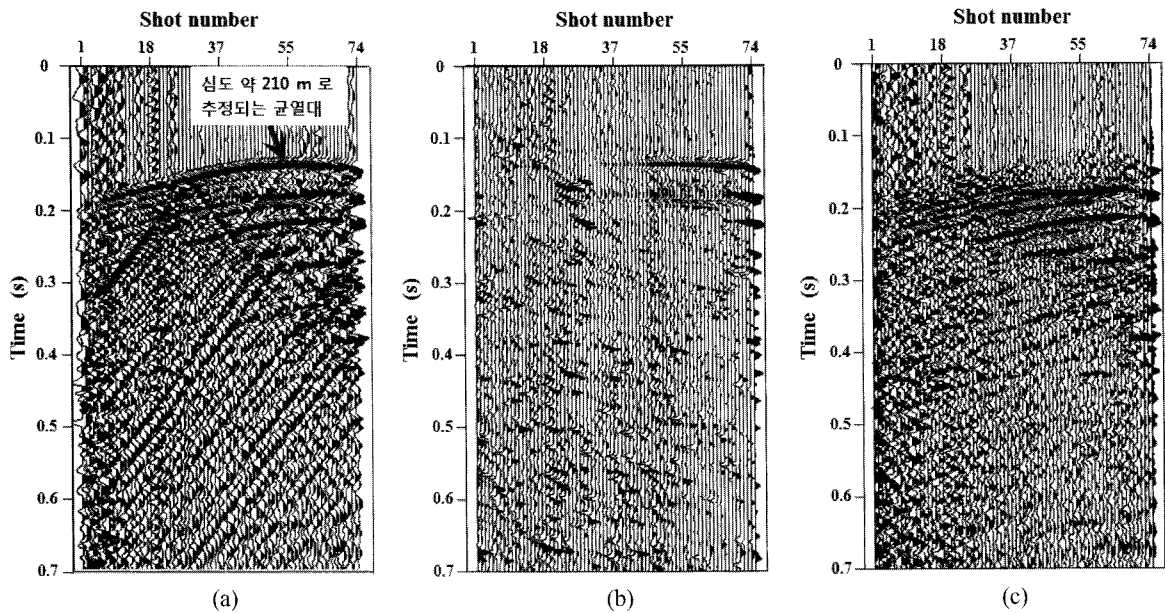
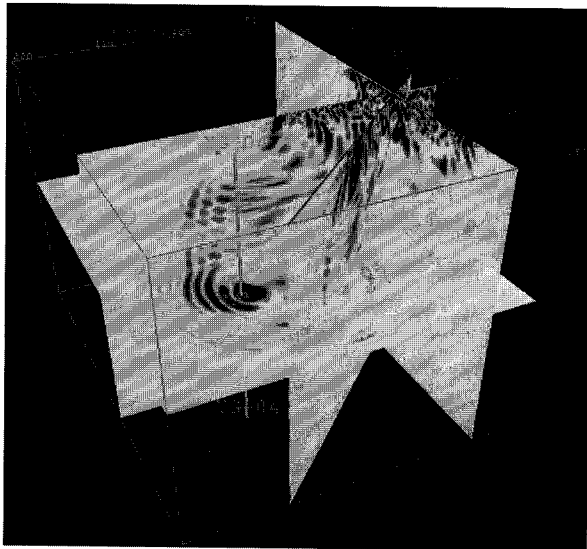
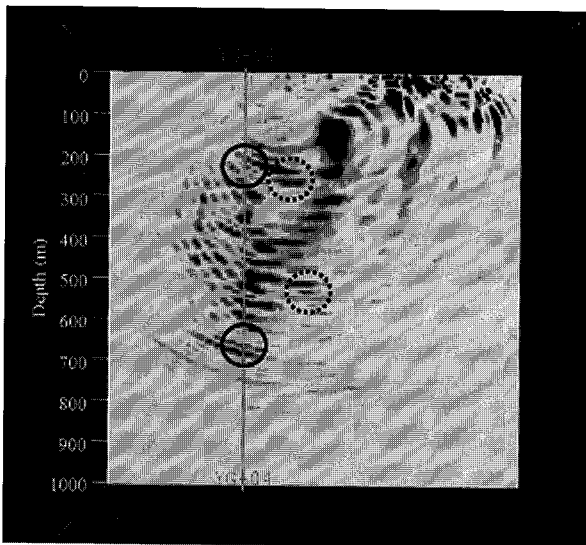


Fig. 7. (a) A common receiver gather acquired in Seokmo Island. (b) A common receiver gather after removing all downgoing waves and tube waves. (c) A common receiver gather after removing only direct wave and tube waves.



(a)



(b)

Fig. 8. (a) 3D fence migrated images by using 3D VSP prestack phase screen migration. The green line indicates the borehole YG-04. Images between L3 and the well along the cross line. (b) In-line = 170; The red dashed circles are interpreted as reflection events from the horizontal reflectors and the blue dashed circles are interpreted as reflection events from the fractures.

석모도 현장자료의 3D 겹쌓기전 위상막 참 반사보정 결과

파쇄대를 고려한 VSP 자료 전처리 과정을 수행한 석모도 현장자료에 수평층 속도모델로 검증을 거친 3D 겹쌓기전 위상막 참 반사보정 알고리즘을 적용하여 참 반사보정을 수행하였다. 참 반사보정시 정확한 속도모델이 없는 관계로 이전 탐사에서 획득한 굴절법 탐사자료를 확장시켜 속도모델을 생성하여 사용하였다. Fig. 8a는 탐사를 수행한 석모도 지역의 3개의 탐사축선 L1, L2, L3에서 나타난 참 반사보정 결과를 fence

diagram으로 나타내고 있으며, 송신원이 위치한 시추공을 회색 선으로 도시하였다. Fig. 8b는 시추공과 L3축선 사이의 영상이며, 점선으로 표시된 지점(심도 230 m, 540 m)에서 수평층으로 판단되는 반사층이 나타남을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 8b의 실선으로 표시된 시추공 주변 210 m, 670 m 부근에서 파쇄대로 추정되는 구조가 확인되었으며, 특히 심도 210 m의 경우에는 Fig. 7a의 현장자료에서 나타나는 대룡파를 발생시킨 시추공벽상의 균열대의 심도와도 일치함을 보인다.

결 론

본 연구에서는 국외와는 다른 국내의 지열발전 여건으로 인해 국외의 퇴적층을 모사한 층서구조와 국내의 파쇄대 지역을 모사한 속도모델을 설정하여 VSP 자료처리 전처리 과정에 따른 파쇄대 영상을 비교·분석해 보았다. 그 결과 층서구조에서는 일반적인 VSP 자료처리 과정 중 하나인 경사필터 등을 이용하여 간단하게 상향 반사파만을 분리시킬 수 있었다. 반면에 파쇄대가 존재하는 지층의 경우에는 파쇄대의 반사 이벤트가 상향뿐만 아니라 하향 이벤트로도 나타나기 때문에 전처리 과정에서 단순히 상향파만을 분리하는 일반적인 VSP 자료처리 과정을 수행하는 것이 아니라 중앙값 필터 등을 이용하여 직접파 또는 대룡파만을 제거하는 과정으로 전처리 과정을 수행하여야만 정확한 파쇄대 영상 획득이 가능함을 확인하였다.

파쇄대를 고려한 전처리 과정을 석모도 현장자료에도 적용시켜본 결과 2개의 수평층과 시추공 주변 210 m, 670 m 부근에서 파쇄대로 추정되는 구조를 확인할 수 있었다. 특히 210 m 지점의 경우에는 RVSP 공동수신기모음 자료에 나타난 대룡파를 발생시킨 시추공벽상의 균열대의 심도와도 일치함을 확인하였다.

그러나 보다 정확한 파쇄대의 구조정보를 추출하기 위해서는 시추공을 중심으로 방사상으로 수신기를 설치한 RVSP 탐사의 수행과 정확한 속도정보가 있어야 할 것이다. 본 연구에서 제안된 방법을 통해 전처리 과정을 수행함으로써 국내 지열사이트의 파쇄대 분포상황을 정확히 파악할 수 있을 것이며 이를 통해 지열 자원 개발에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

이 연구는 2010년 한국지질자원연구원의 기본사업 '저온 지열 열병합 발전에 활용 가능한 심부 지열수 자원 확보 기술 개발'의 연구비 지원을 받은 '지표-시추공 탄성파탐사 영상화 기술(II)' 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

신승일, 변중무, 고승원, 전재호, 2010, 3차원 중합전 위상막 구

- 조보정, 한국지구시스템공학회 제94회 춘계학술발표논문집, 한국지구시스템공학회, p49.
- 윤운상, 송윤호, 이태중, 김광엽, 민기복, 조용희, 전종욱, 2010, MW급 EGS 지열발전 상용화 기술개발사업의 추진 배경 및 계획, 한국암반공학회지(터널과지하공간), **21**, No. 1, p. 11-19.
- 이태중, 송윤호, 이창범 외 26인, 2009, 저온 지열 열병합 발전에 활용가능한 심부 지열수 자원 확보 기술 개발, 한국지질자원연구원 연구보고서 GP2009-016-2009(1), p177.
- 최윤경, 변중무, 신승일, 2006, 가스하이드레이트를 위한 VSP 자료의 종합전 위상막 구조보정의 적용에 관한 연구, 한국지구시스템공학회지, 41권 2호, pp. 310-319.
- Bertani, R., 2010, Geothermal power generation in the world: 2005-2010 Update Report, Proceeding World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.
- Dickson, M. H., and Fanelli, M., 2003, What is geothermal energy?, International Geothermal Association.
- Falk, J., 1994, Diploma thesis, Univ. of Hamburg, in German language.
- Lee, T. J., Han, N., and Song, Y., 2010, Magnetotelluric survey applied to geothermal exploration: An example at Seokmo Island, Korea, *Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa*, **13**, 61-68.
- Song, Y., Kim, H.-C., and Lee, T. J., 2010, Geothermal development in Korea: Country Update 2005-2009, Proceeding World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.