

## 박층 오일샌드 영상화를 위한 다성분 역VSP 탐사

정수철 · 변중무\*

한양대학교 자원환경공학과

### Multicomponent RVSP Survey for Imaging Thin Layer Bearing Oil Sand

Soocheol Jeong and Joongmoo Byun\*

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

**요 약:** 오일샌드는 고유가로 인하여 최근 활발하게 탐사 및 개발이 진행되고 있다. 오일샌드는 일반적으로 박층으로 존재하기 때문에 이의 탐지를 위해서는 지표 탄성파탐사보다는 시추공 주변의 고해상도 영상화가 장점인 다성분 VSP 탐사가 효과적이다. 또한 중합전 위상막 구조보정의 경우, 단방향 파동방정식을 이용하기 때문에 다성분 자료를 이용한 영상화에 효과적이다. 이 연구에서는 박층 오일샌드의 영상화를 위하여, 다성분 역VSP 탐사자료를 이용한 중합전 위상막 구조보정의 적용성을 고찰하였다. 중합전 위상막 구조보정에 사용할 다성분 역VSP 탐사자료의 전처리 과정으로 입사각과 회전변환을 이용한 파 분리 방법을 제안하고, 이를 합성탄성파탐사자료를 통하여 검증한 결과 파 분리가 효과적으로 되는 것을 확인하였다. 또한 분리된 P파와 PS파 자료를 이용하여 구조보정을 실시하였을 시, PS파 구조보정 결과가 P파 구조보정 결과보다 넓은 반사면의 영상화가 가능하고 고해상도의 영상을 획득하였다. 그리고 캐나다 오일샌드 매장지역을 모사한 합성탄성파탐사자료를 생성하고 이를 영상화 한 결과, P파 구조보정 결과보다 PS파를 이용한 구조보정 결과가 박층 오일샌드의 상·하부 경계면을 정확하게 영상화하였다.

**주요어:** 오일샌드, 다성분 수직 탄성파탐사, 파 분리, 중합전 위상막 구조보정, 영상화

**Abstract:** Recently, exploration and development of oil sands are thriving due to high oil price. Because oil sands reservoir usually exists as a thin layer, multicomponent VSP, which has the advantage of the high-resolution around the borehole, is more effective than surface seismic survey in exploring oil sand reservoir. In addition, prestack phase-screen migration is effective for multicomponent seismic data because it is based on an one-way wave equation. In this study, we examined the applicability of the prestack phase-screen migration for multicomponent RVSP data to image the thin oil sand reservoir. As a preprocessing tool, we presented a method for separating P-wave and PS-wave from multicomponent RVSP data by using incidence angle and rotation matrix. To verify it, we have applied the developed wavefield separation method to synthetic data obtained from the velocity model including a horizontal layer and dipping layers. Also, we compared the migrated image by using P-wave with that by using PS-wave. As a result, the PS-wave migrated image has higher resolution and wide coverage than P-wave migrated image. Finally, we have applied the prestack phase-screen migration to the synthetic data from the velocity model simulating oil sand reservoir in Canada. The results show that the PS-wave migrated image describe the top and bottom boundaries of the thin oil sand reservoir more clearly than the P-wave migrated image.

**Keywords:** oil sand, multicomponent VSP, wavefield separation, prestack phase-screen migration, imaging

## 서 론

최근 유가상승과 자원보유국의 자원민족주의로 인하여 세계적으로 유가스전 확보에 대한 관심이 높아지고 있으며, 2009

2011년 7월 27일 접수; 2011년 8월 9일 수정; 2011년 8월 16일 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

년 기준 석유소비량 세계 9위인 우리나라에서도 자원 확보를 위하여 다방면으로 노력하고 있다. 이러한 상황에서 오일샌드(oil sand)와 같은 신석유자원에 대한 관심도 증가하여, 이를 탐사하고 개발하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 최근 각광을 받고 있는 캐나다의 오일샌드 개발은 세계 석유 수요의 지속적인 증가 및 중동지역의 지정학적 분쟁 위험에 따른 고유가로 인해 관심이 증폭되고 있어 국내 공기업에서도 캐나다의 오일샌드 개발 사업에 참여하고 있다.

일반적으로, 오일샌드는 수평적으로 널리 분포하는 층서구조의 특성으로 수평적인 규모를 확인하기 위해서는 지표 탄성

파탐사가 효과적이다. 그러나 오일샌드 층 자체의 두께가 얇은 박층의 특성을 지녀 지표 탄성파탐사만으로는 정확한 상·하부 경계면의 영상화에 한계가 있다. 따라서 박층 오일샌드 탐지 및 매장량 계산에는 지표 탄성파탐사자료를 이용하기보다는 해상도가 높은 VSP(Vertical Seismic Profiling) 탐사가 효과적이다. 또한 다성분 VSP 탐사를 통해서 S파 자료를 얻을 경우 동일 주파수의 송신원을 사용했을 때 P파에 비해 파장이 더 짧기 때문에 P파 자료보다 더 고해상도의 자료를 얻을 수 있으며, P파 속도와 S파 속도비를 이용할 경우 공극내 유체의 종류를 규명하는데 효과적이다. 이러한 VSP 탐사자료를 위한 구조보정 알고리즘은 국내에서도 개발이 되었지만(최윤경 등, 2006; 신승일 등, 2010; 송호철 등, 2010) 다성분 VSP 탐사자료의 적용에 관한 연구는 거의 전무하다.

다성분 VSP 탐사자료의 자료처리 및 구조보정을 위한, 필수적인 전처리 과정은 다성분 자료에서 P파와 S파를 분리하는 것이다. 국내의 경우, 김기영과 이소영(2005)에 의하여 지표 탄성파탐사에서 레일리파를 제거하고 S파를 강화하기 위하여, 분극(polarization) 필터를 이용한 다성분 탐사자료의 파 분리에 대한 연구가 진행되었다. 하지만 다성분 VSP 탐사자료에서의 파 분리에 관한 연구는 전무하다.

이 연구에서는 다성분 역VSP(RVSP: Reverse Vertical Seismic Profile) 탐사자료의 구조보정 적용 시 전처리 과정으로 P파와 S파의 효과적인 파 분리 방법을 제안하고, 박층 오일샌드 지역의 영상화를 위한 중합전 위상막 구조보정 (prestack phase-screen migration)의 적용에 대하여 고찰하였다. 또한 캐나다 박층 오일샌드 지역을 모사한 합성탄성파탐사자료에 중합전 위상막 구조보정을 적용하여, P파 자료와 PS파 자료의 구조보정 결과를 비교 및 분석 하였다.

## 다성분 역VSP 탐사자료에서의 P파와 S파의 분리

### 다성분 탐사 방법에 따른 P파와 S파의 분리

다성분 탐사자료의 중합전 위상막 구조보정 적용 시, P파 및 PS파의 정확한 분리가 선행되어야 한다. 다성분 탄성파탐사자료의 일반적인 자료처리 시, 수직성분(vertical component)자료는 P파 이벤트를 주로 포함하고, 수평성분(inline-horizontal component)자료는 S파 성분의 이벤트를 주로 포함한다는 가정을 하고 파 분리 과정을 생략하는 경우도 있다. 그렇지만 이러한 가정은, 오프셋(offset)이 증가함에 따라서 성립하지 않기 때문에(Al-anboori *et al.*, 2005), 더욱 정확한 구조보정 결과를 위해서는 P파 S파 분리과정이 선행 되어야 한다.

지표 탄성파탐사 및 VSP 탐사에서 획득한 다성분 자료의 P파와 S파를 분리하는 대표적인 방법으로 주파수-파수 영역에서 분리 필터를 적용하여 분리하는 방법이 있다. Dankbarr (1985)는 수직성분 수신기와 수평성분 수신기에서 기록된 자료의 진폭의 세기를 입사각에 따라서 분석을 한 후, 주파수-파

수 영역에서 분리 필터를 제작하여 파 분리를 하는 방법을 제안하였고, 이를 수평층 모델의 합성탄성파탐사자료를 이용하여 검증하였다. 이 방법은 지표 탄성파탐사 및 VSP 탐사에 동시 적용이 가능하고, 수직성분 수신기와 수평성분 수신기에 기록된 신호의 입사각에 따른 반응 특성을 분석하기 때문에 입사각에 대한 위상변이를 고려하는 장점이 있다. 또한 합성탄성파탐사자료에서 잡음을 10% 추가하여 파 분리를 실시하였을 때에도 파 분리가 원활하게 이루어지는 것으로 보아 잡음의 영향을 덜 받는 장점이 있다. 하지만, 입사각에 대한 수직성분 및 수평성분 수신기의 진폭 분석을 통한 분리 필터 제작이 번거로우며, 분리 필터 제작 시 P파와 S파의 천부 속도를 사용하기 때문에 천부 속도의 수평적 변화가 클 경우 P파와 S파의 분리가 잘 안 되는 한계가 있다.

또 다른 방법으로는, P파와 S파의 입자 운동방향과 파 진행 방향의 관계를 이용하여, 입사각 및 분극각(polarization angle)을 변수로 하여 회전변환을 하는 방법이 있다. 입사각은 스넬의 법칙을 이용하여 계산할 수 있으며, 분극각은 파의 입자의 운동방향의 각도로서 호도그램 분석등과 같은 방법으로 구할 수 있다. 이러한 입사각 및 분극각을 이용한 회전변환의 대표적인 방법으로 지표 탄성파탐사자료에서 레이파라미터(ray-parameter)와 천부의 P파 속도와 S파 속도를 이용하여 입사각의 근사값을 계산하고, 이를 이용한 회전변환을 통하여 분리하는 방법(Greenhalgh *et al.*, 1990; Al-Anboori *et al.*, 2005), VSP 탐사에서 분극각을 이용하여 회전변환을 하는 방법(Liu *et al.*, 2009) 등이 있다. 이러한 방법들은 입사각 또는 분극각을 이용하여 수직성분의 자료와 수평성분의 자료 자체를 회전 변환 행렬에 곱하기 때문에, Dankbarr (1985)가 제안하였던 수신기에서의 진폭의 세기 분석을 통한 분리필터의 제작이 필요 없으며, P파와 S파가 겹치는 부분이 존재하더라도 분리가 잘 되는 장점이 있다. 하지만, 수신기의 진폭 분석을 따로 하지 않기 때문에 입사각이 클 경우에 나타나는 위상변이에 대한 고려가 안 되는 단점이 있다. 또한 천부 속도를 기준으로 입사각이나 분극각을 근사하기 때문에 천부의 속도의 수평적인 변화가 클 경우 P파와 S파의 분리가 정확하게 되지 않는 한계가 있다.

### 다성분 역VSP 탐사자료의 파 분리 방법

이 연구에서는 다성분 역VSP 탐사자료의 P파와 PS파의 분리를 위하여, 시간-공간영역에서 공통송신원모음 자료의 첫 번째 반사파의 입사각의 근사값을 기준으로 정하고 이를 이용한 회전변환의 방법을 사용하였다. Fig. 1(a)는 P파와 PS파의 수평 1층 구조에서 파의 경로를 나타낸 모식도이다. P파의 경우 파의 진행방향과 입자의 운동방향이 같지만, PS파의 경우 경계면에서 모드변환(mode-conversion)에 의해 생성된 S파이기 때문에 파의 진행방향과 입자의 운동방향이 수직이다(Fig. 1(b)). 이러한 P파와 PS파의 특성을 이용하여 P파의 입사각 또

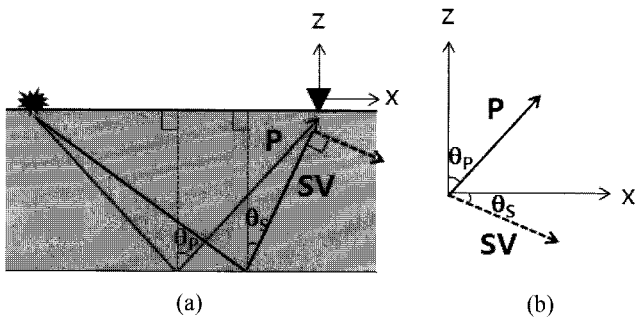


Fig. 1. (a) P-wave and PS-wave ray path for a simple one-layer model and (b) their polarization vectors with incidence angles in a Cartesian coordinates (x, z).

는 SV파의 입사각의 근사값을 계산한 후, 직교좌표계의 회전 변환을 통하여 P파와 PS파를 분리한다. 이 경우 회전 변환에 사용되는 P파 및 PS파의 입사각의 결정이 핵심부분이다.

Al-Anboori *et al.* (2005)이 레이파라미터와 첫 층의 P파 속도 및 S파 속도를 이용하여 입사각을 근사한 것과 달리, 이 연구에서는 오프셋, 첫 층의 깊이, 첫 층의 P파 및 S파 속도를 이용하여 입사각을 근사하였다. 역VSP 탐사에서 입사각의 근사를 설명하기 이전에 지표 탄성파탐사에서는, P파의 입사각 ( $\theta_p$ )은 단순한 1층 수평구조에서의 파의 경로를 묘사한 Fig. 2(a)를 통하여 확인할 수 있듯이, 식 (1)과 같이 근사하여 계산할 수 있다.

$$\theta_p = \tan^{-1}\left(\frac{\text{offset}/2}{1^{\text{st}} \text{ layer depth}}\right) \quad (1)$$

여기서 *offset*은 오프셋, *1<sup>st</sup> layer depth*는 첫 층의 깊이를 의미한다. 하지만 역VSP 탐사와 같이 송신원이 지표면으로부터 수직 하부로 내려가 위치할 경우에는 식 (1)을 적용하기가 힘들다.

이 연구에서는 송신원이 역VSP 탐사와 같이 지표면으로부터 *dz* 만큼 하부에 위치할 경우, 역VSP 탐사에서의 파의 경로를 나타낸 Fig. 2(b)에서처럼 도형의 닮음을 이용하여 식 (2)와 같이 P파의 입사각( $\theta_p$ )을 계산하였다.

$$\theta_p = \tan^{-1}\left(\frac{x}{dz}\right) \quad (2)$$

식 (2)에서의  $\frac{x}{dz}$  는 식(3)의 비례식을 통하여 구할 수가 있다.

$$x:dz = \left(x + \frac{\text{offset}-x}{2}\right): 1^{\text{st}} \text{ layer depth} \quad (3)$$

여기서 *offset*은 송신원이 수신기와 같은 지표면에 있을 때의 오프셋을 의미하며, *1<sup>st</sup> layer depth*는 첫 층의 깊이, *dz*는 지표면으로부터 송신원의 수직하부 심도이다. 식 (3)을 정리하게 되면  $\frac{x}{dz}$  의 계산값인 식 (4)를 얻을 수 있고, 이를 식 (2)에 대

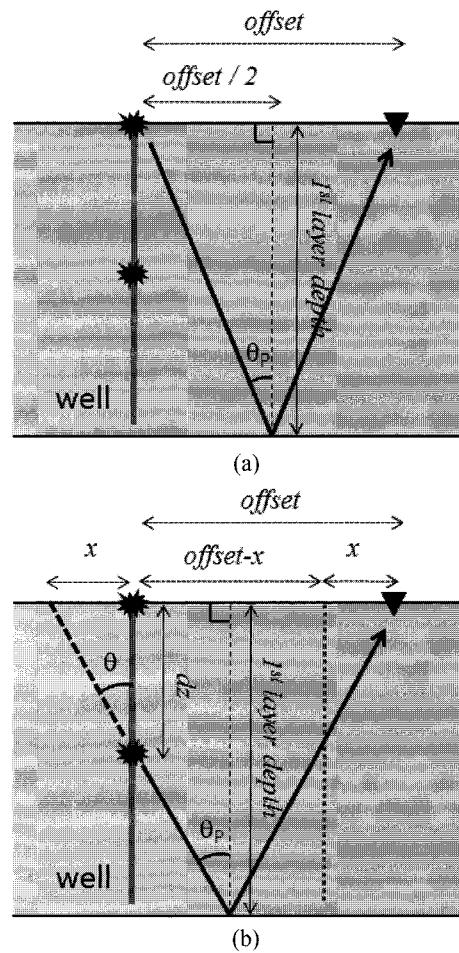


Fig. 2. (a) Ray paths of the surface seismic survey and (b) the RVSP survey in simple one-layer model.

입한 식 (5)를 통하여 P파의 입사각( $\theta_p$ )을 계산할 수 있다.

$$\frac{x}{dz} = \frac{(\text{offset}/2)}{(1^{\text{st}} \text{ layer depth} - 1/2 \cdot dz)} \quad (4)$$

$$\theta_p = \tan^{-1}\left(\frac{\text{offset}/2}{1^{\text{st}} \text{ layer depth} - dz/2}\right) \quad (5)$$

또한 S파의 입사각의 경우, 송신원이 지표면에 있을 때 입사각을 구하는 식 (1)과 송신원이 *dz*만큼 수직하부로 이동하였을 때의 입사각을 구하는 식 (5)에서 계산한 P파의 입사각( $\theta_p$ )을 스넬의 법칙(Snell's law)인 식 (6)에 적용하여 계산할 수 있다.

$$\frac{\sin \theta_p}{V_{P1}} = \frac{\sin \theta_s}{V_{S1}} = p \rightarrow \theta_s = \sin^{-1}\left(\frac{\sin \theta_p V_{S1}}{V_{P1}}\right) \quad (6)$$

여기서  $V_{P1}$ 은 첫 층의 P파 속도이고,  $V_{S1}$ 은 첫 층의 S파 속도, *p*는 레이파라미터를 의미한다. 위의 과정을 거쳐서 구한 각 트레이스(trace)의 P파의 입사각( $\theta_p$ )과 S파의 입사각( $\theta_s$ )을 이용하여, 수평성분 수신기에서 획득된 자료(*X*)와 수직성분 수신기에서 획득된 자료(*Z*)에 회전변환 행렬을 곱하는 식 (7)을

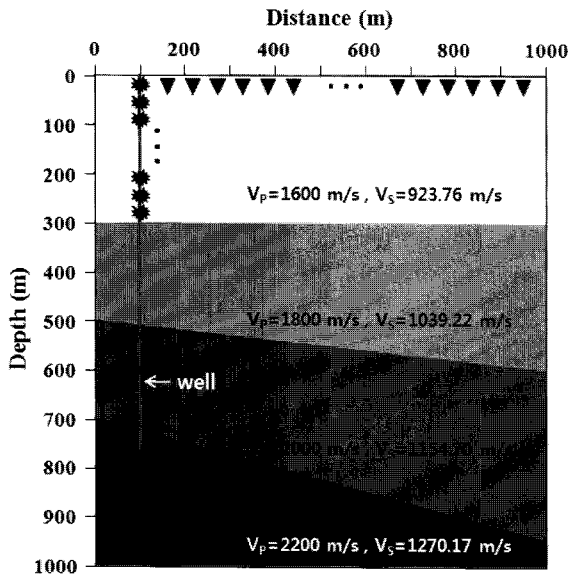


Fig. 3. Velocity model used in synthetic RVSP modeling.

Table 1. Parameters used in numerical modeling of model shown in Fig. 3.

Number of shots	29 (x = 100 m / z = 10 m ~ 290 m)
Source interval	10 m
Source wavelet	Ricker wavelet ( $f_{main} = 50$ Hz)
Number of receivers	79 (x = 120 m ~ 900 m)
Receiver interval	10 m
Sampling interval	1 ms
Record length	1.5 s

계산하면 분리된 P파 자료(P)와 PS파 자료(SV)를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} SV \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_s & -\sin\theta_p \\ \sin\theta_s & \cos\theta_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Z \end{bmatrix} \quad (7)$$

이 연구에서 제안하는 파 분리 방법의 경우, 첫 층의 속도와 첫 층에서 반사된 파의 입사각의 근사값을 이용하여 수평성

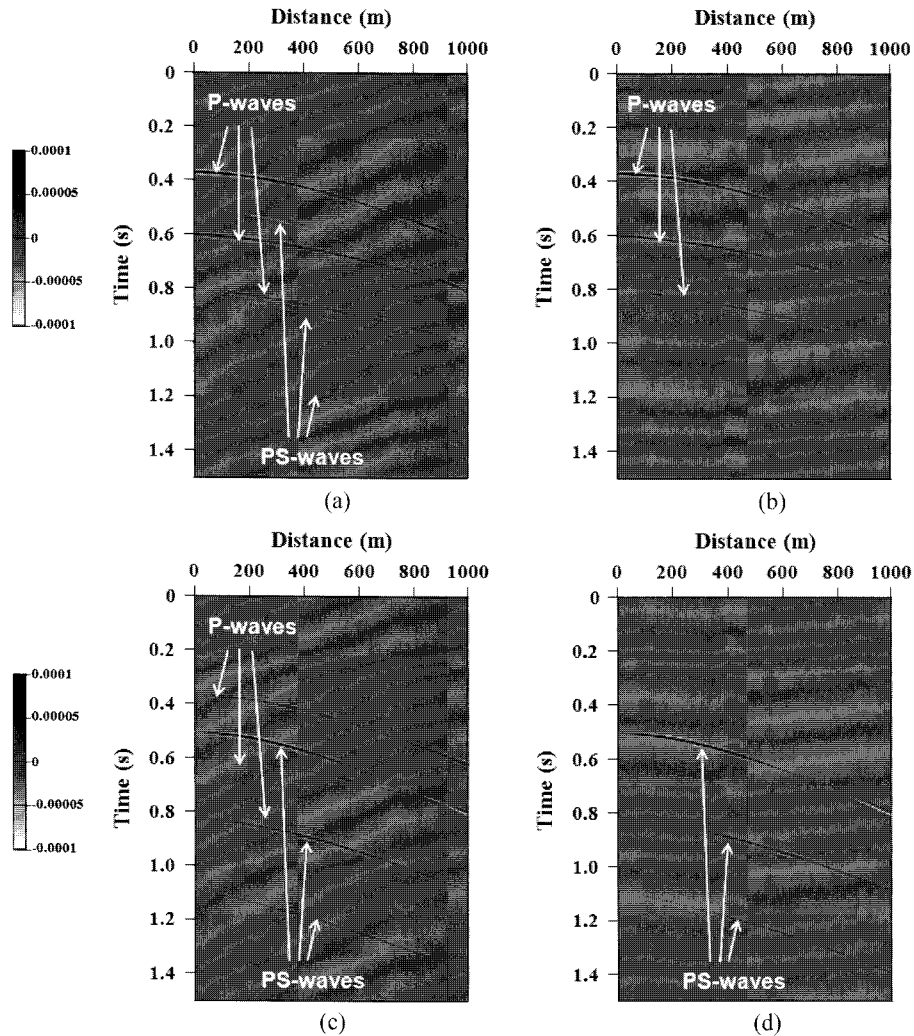


Fig. 4. (a) A common shot gather in the vertical component receiver when the source was located at z = 10 m and (b) P-waves separated from (a). (c) A common shot gather in the horizontal component receiver when the source was located at z = 10 m and (d) PS-waves separated from (c).

분 수신기와 수직성분 수신기의 신호자체에 회전변환을 곱하여 파 분리를 실시하기 때문에, 수신기의 진폭의 반응 분석을 통한 분리필터(Dankbarr, 1985)의 제작 단계가 필요 없으며 각 트레이스별 레이파라미터 분석을 통한 입사각 계산(Greenhalgh *et al.*, 1990; Al-Anboori *et al.*, 2005)을 생략하더라도 급경사 구조가 아닌 구조에서의 원활한 P파와 S파의 분리를 할 수 있는 장점이 있다. 그리고 수신기에 기록된 수직성분과 수평성분의 신호를 모두 사용하여 회전변환을 하기 때문에, P파와 S파가 겹치는 곳이 있더라도 원활하게 분리가 가능하다. 또한 탐사의 목표층의 대략적인 깊이와 속도를 알고, 상부 층에서의 반사파 대신 하부 목표층에서 반사된 파의 정확한 P파와 S파의 분리를 원할 경우, 입사각 계산 시 기준 속도와 깊이를 조정하여 상부층의 정확한 P파와 S파의 분리 대신에 하부 목표층의 보다 정확한 분리를 할 수 있도록 확장이 가능하다. 하지만 한가지 속도와 한 층에서 반사된 파의 입사각을 이용

하기 때문에, 속도가 급변하는 층이 존재하거나 급경사 구조일 경우 파 분리가 전체적으로 원활하게 되지 않는 한계가 있다.

#### 합성탄성파탐사자료에의 적용

이 연구에서 사용된 P파와 PS파 분리법의 다성분 역VSP 탐사자료에 대한 적용성을 검토하기 위하여 상부 수평층과 하부 경사층이 존재하는 속도모델을 Fig. 3으로 설정하고 합성탄성파탐사자료를 생산하였다. 이 때 사용된 탐사변수는 Table 1과 같다. 지표 탄성파탐사와 달리, 역VSP 탐사의 경우 송신원이 수직하부로 내려갈 경우에는 송신원이 지표면에 있을 때보다 입사각이 더 커지게 된다. 이러한 입사각의 크기에 의한 파 분리의 효율성도 함께 고려하기 위하여 지표면에서 10 m의 깊이에 위치할 때와 송신원이 수직하부 200 m에 위치하였을 때의 결과를 비교하였다.

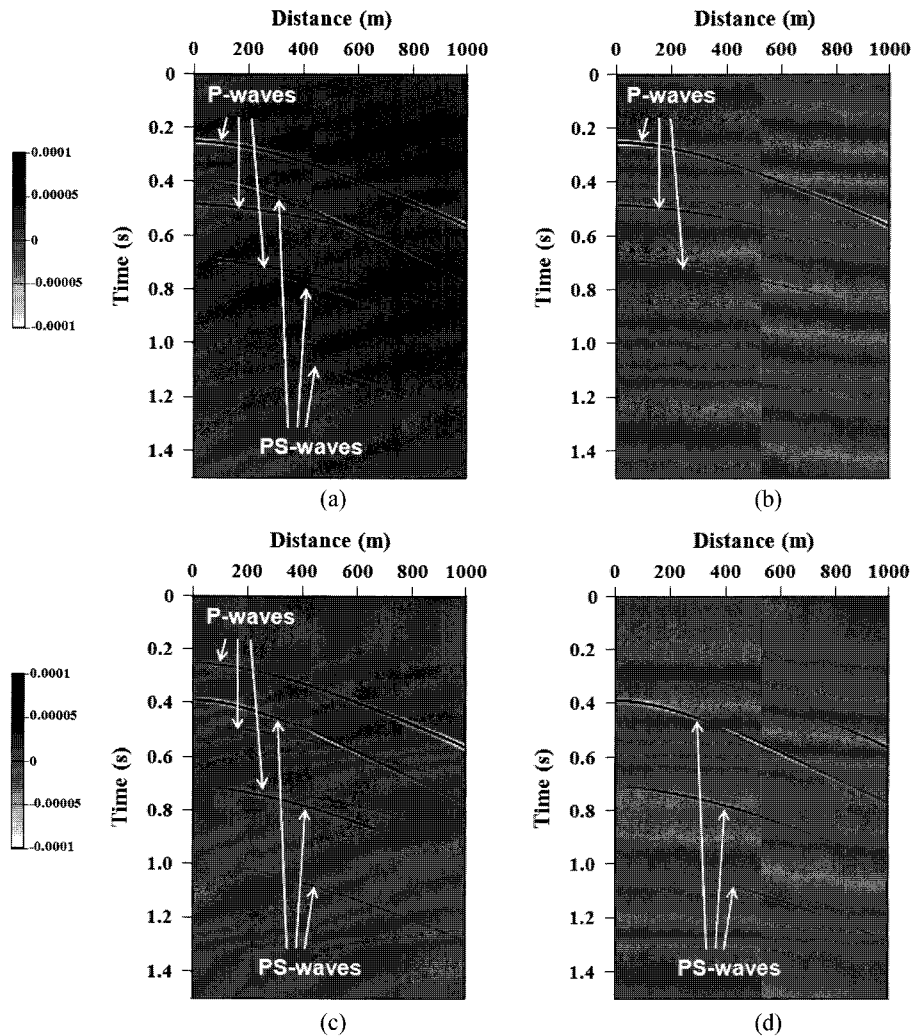


Fig. 5. (a) A common shot gather in the vertical component receiver when the source was located at  $z = 200$  m and (b) P-waves separated from (a). (c) A common shot gather in the horizontal component receiver when the source was located at  $z = 200$  m and (d) PS-waves separated from (c).

Fig. 4(a)와 Fig. 4(c)는 송신원이 지표면에서 10 m의 깊이에 위치 할 때의 수직성분 수신기에서의 공통송신원모음과 수평성분 수신기에서의 공통송신원모음 자료이다. Fig. 4(b)와 Fig. 4(d)는 각각 Fig. 4(a)에서 파분리가 이루어진 후 남은 P파의 공통송신원모음과, Fig. 4(b)에서 파분리 후 남은 PS파의 공통송신원모음이다. Fig. 4(b)와 Fig. 4(d)에서 확인할 수 있듯이, 송신원이 지표면 부근( $z = 10$  m)에 위치하였을 때의 경우 수평층 및 경사층에서 획득한 P파와 PS파 자료 모두 전체적으로 분리가 잘 되었다.

Fig. 5(a)와 Fig. 5(c)는 송신원이 수직하부 200 m에 위치하였을 때의 수직성분 수신기에서의 공통송신원모음과 수평성분 수신기에서의 공통송신원모음 자료이며, Fig. 5(b)와 Fig. 5(d)는 파 분리가 이루어진 후의 P파 및 PS파만 남은 공통송신원모음 자료이다. 분리된 두 자료 모두 P파와 PS파가 겹치는 부분이 존재하더라도 원활하게 분리가 되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 PS파만 분리된 자료(Fig. 5(d))에서는 수신기의 위치가 약 500 m 보다 멀어질 경우, 확실한 분리가 이루어지지 않는 것을 볼 수 있다. 이것은 입사각이 클 경우에 나타나는 위상변이에 의한 영향으로 볼 수 있다. 하지만, 파 분리 과정이 이루어지기 전의 자료와 비교하였을 시, 수직성분에서는 PS파의 에너지가 약화되고 수평성분에서는 P파의 에너지가 약화 된 것을 확인할 수 있다.

### 다성분 역VSP 탐사자료의 종합전 위상막 구조보정 적용

#### 종합전 위상막 구조보정법

역VSP 탐사와 같이 고주파수 자료를 이용한 복잡한 구조의 정확한 영상화를 위해서는 양방향 파동방정식에 기초한 시간 영역에서의 외삽을 이용하는 역시간 구조보정(reverse time migration)이 가장 이상적인 방법이다. 하지만 역시간 구조보정법의 경우 일반적으로 요구되는 정확도를 얻기 위해서 이에 필요한 계산량과 소요시간이 크다는 단점이 있다(신승일 등, 2010).

이 연구에서는 계산상의 효율을 높이면서 급격한 속도구조 변화 환경에도 적용이 가능한 종합전 위상막 구조보정을 사용하였다. 종합전 위상막 구조보정은 주파수-파수 영역에서 단방향 파동방정식을 이용하기 때문에 빠른 계산 속도로 수평적 속도변화를 고려할 수 있다. 또한 단방향 파동방정식을 기초로 하기 때문에 송신원에서의 전방향전파(forward propagation)와 수신기에서는 역방향전파(backward propagation)시 P파와 S파 속도를 선택적으로 사용할 수 있다(최윤경 등, 2006). 따라서 다성분 역VSP 탐사자료의 모드 변환된 PS파를 이용하여 영상화를 할 경우, 송신원의 전파에서는 P파 속도를, 수신기에서의 역전파시에는 S파 속도를 이용함으로써 PS파를 이용한 영상화에 효과적이다.

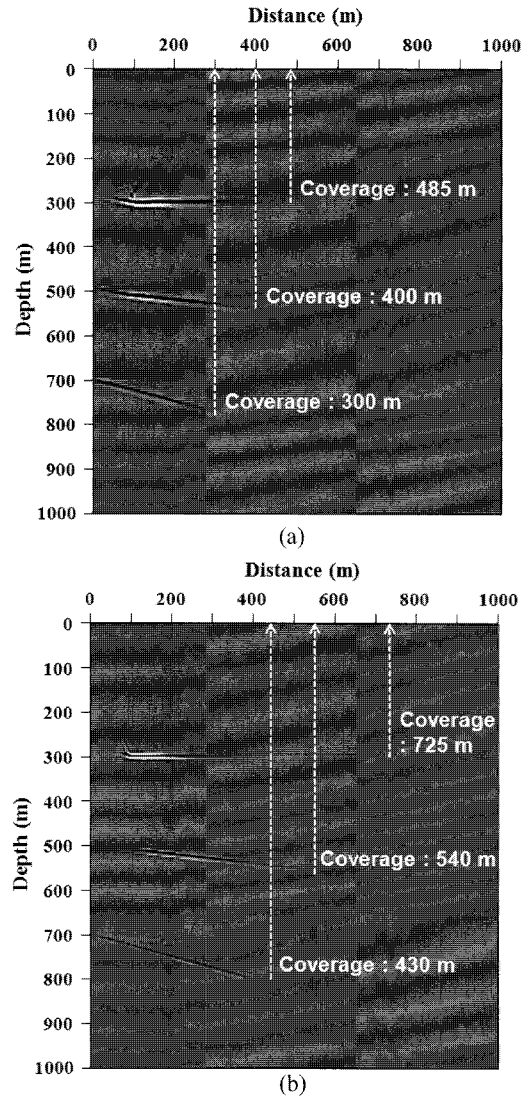


Fig. 6. (a) The P-wave migrated image and (b) the PS-wave migrated image obtained by prestack phase-screen migration for the model shown in the Figure 3.

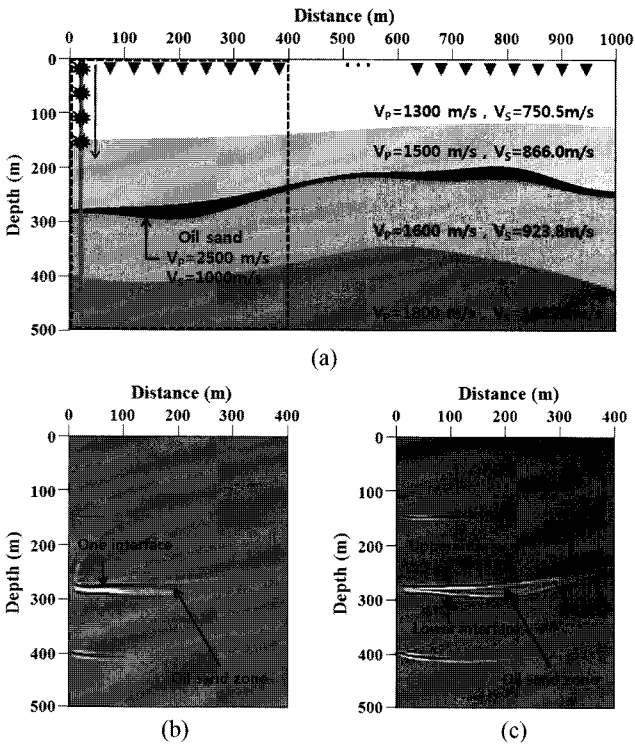
#### P파와 PS파를 이용한 구조보정 결과 비교

앞 절에서 분리한 P파와 PS파 자료에 종합전 위상막 구조보정을 적용하였다. Fig. 6(a)는 Fig. 3의 속도모델에서 획득한 다성분 자료를 이용하여 앞 절에서의 파 분리 과정을 거친 후 분리된 P파 자료를 이용한 종합전 위상막 구조보정 결과이고, Fig. 6(b)는 분리된 PS파 자료를 이용한 종합전 위상막 구조보정 결과이다. 두 구조보정 결과 모두 수평층 및 경사층의 경계면을 정확히 영상화 하였다.

하지만 Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)에서 영상화의 커버리지를 비교하였을 시, PS파 구조보정 결과가 P파 구조보정 결과보다 각각 1층 경계면의 경우 240 m, 2층 경계면의 경우 140 m, 3층 경계면의 경우 130 m 더 넓게 경계면을 영상화 하였다. 모드 변환이 일어나지 않는 순수한 반사 P파나 S파의 경우, 수평층을 가정할 시 반사점이 송신기 거리의 중간지점이 된다. 하

**Table 2.** Parameters used in numerical modeling of model shown in Fig. 7(a).

Number of shots	40 ( $x = 10 \text{ m} / z = 10 \text{ m} \sim 400 \text{ m}$ )
Source interval	10 m
Source wavelet	Ricker wavelet ( $f_{\text{main}} = 50 \text{ Hz}$ )
Number of receivers	94 ( $x = 50 \text{ m} \sim 980 \text{ m}$ )
Receiver interval	10 m



**Fig. 7.** (a) Velocity model simulating oil-sand reservoir in Canada. The rectangle box with dashed line indicates region of the migrated image. (b) The P-wave migrated image and (c) the PS-wave migrated image obtained by prestack phase-screen migration for the model shown in (a).

지만 모드변환 된 PS파의 경우, 스넬의 법칙에 의하여 하향 전파하는 P파의 입사각보다 상향 전파하는 S파의 입사각이 더 작으므로, 반사점이 송신원과 수신기의 중간 지점이 아닌 수신기 쪽으로 이동한 위치에서 생성된다. 따라서 P파 보다 PS파의 커버리지가 커지므로 넓은 경계면을 영상화 할 수 있다. 그리고 해상도를 비교하였을 시, 동일 주파수의 송신원을 사용하였을 때 P파에 비하여 PS파의 파장이 짧기 때문에 박층 오일샌드에 효과적인 고해상도의 영상을 획득하는 것을 확인할 수 있었다.

**캐나다 박층 오일샌드 매장지역을 모사한 2D 합성탄성파탐사자료에 적용**

다성분 역VSP 탐사자료를 이용한 중합전 위상막 구조보정의 적용이 박층 오일샌드 영상화에 적합한지 검증하기 위하여,

현재 오일샌드 개발이 활발히 이루어지고 있는 캐나다 박층 오일샌드 매장지역을 모사한 합성탄성파탐사자료에 적용을 하였다(Fig. 7(a)). 오일샌드의 물성은 Mochinaga *et al.* (2006)의 논문을 참고하여, 오일샌드 층의 P파 속도는 2500 m/s로, S파의 속도는 1000 m/s로 설정하였다. 오일샌드 층의 깊이는 280 m에 위치하였고, 두께는 10 m ~ 50 m로 두께가 변하도록 설정 하였으며, 탐사변수는 Table 2와 같다.

Fig. 7(b)와 (c)는 각각 P파와 PS파가 분리된 합성탄성파탐사자료로부터 P파와 PS파를 이용한 구조보정 결과이다. 역 VSP 탐사의 경우 시추공 주변의 고해상도 영상화를 위해 사용되는 탐사이기 때문에, 실제적인 커버리지는 Fig. 7(a)에서 점선 네모 박스로 표시된 400 m까지의 부분이므로, 이 부분을 확대하여 결과를 비교하였다. 박층 오일샌드 지역이기 때문에 P파 구조보정의 결과의 경우 오일샌드 층의 상부와 하부의 경계면을 정확하게 영상화 하지 못하고 하나의 층으로 나타나지만, PS파 구조보정의 결과 오일샌드 층의 상부와 하부의 경계면이 뚜렷하게 구분되어 오일샌드 층의 두께를 정확하게 계산 할 수 있어서 수평정 시추 계획 수립이나 매장량 평가에 더 효과적임을 알 수 있다.

**결 론**

박층 오일샌드의 정확한 매장량 계산 및 개발을 위해서는 오일샌드 층의 경계면에 대한 정확한 영상화가 필수적이다. 그러므로 탐사 대상 목표층과 근접한 곳에서 신호를 획득할 수 있고, 상대적으로 고주파를 이용할 수 있는 다성분 역VSP 탐사가 지표 탄성파탐사보다 효과적이다.

다성분 역VSP 탐사자료의 구조보정 적용 시, 전처리 과정으로 P파와 PS파의 분리과정이 필요하다. 첫 층의 속도와 깊이를 이용하여 입사각을 계산하고, 계산 된 입사각을 이용한 회전 변환을 통하여 P파와 PS파를 효과적으로 분리할 수 있었으며, 이를 합성탄성파탐사자료를 통하여 검증하였다. 하지만, 입사각이 큰 지점에서 위상변이가 일어날 때에는 원활한 분리가 이루어지지 않는 한계가 있었다. 또한, PS파 구조보정 결과가 P파 구조보정 결과보다 고해상도 및 넓은 커버리지의 영상화가 가능함을 확인하였다.

마지막으로, 캐나다 박층 오일샌드 매장지역을 모사한 합성 탄성파탐사자료의 P파 및 PS파 영상화 결과, 두께 10 m ~ 50 m 사이의 박층 오일샌드에서 P파 영상은 오일샌드 층의 경계면을 정확하게 영상화 하지 못하고 하나의 층으로 나타내지만, PS파를 이용한 영상화의 경우 박층 오일샌드의 상·하부 경계면을 정확하게 영상화 하였다.

**사 사**

이 연구는 2008년도 한국에너지기술평가원에서 시행한 ‘시

추공 물리탐사를 이용한 비재래 유전의 특성화 및 모니터링 기술 개발' 과제의 일환으로 수행되었습니다. 이에 감사를 드립니다.

### 참고문헌

김기영, 이소영, 2005, 복소트레이스 분극필터를 이용한 다성분 탄성파자료 신호분리, 지구물리, **8**, 35-38.  
 송호철, 설순지, 변중무, 2010, 2차원 중합전 일반화된-막 구조보정, 지구물리와 물리탐사, **13**, 315-322.  
 신승일, 변중무, 고승원, 전재호, 2010, 3차원 중합전 위상막 구조보정, 한국지구시스템공학회, 춘계학술발표 논문집, 49-51.  
 최윤경, 변중무, 신승일, 2006, 가스하이드레이트를 위한 VSP 자료의 중합전 위상막 구조보정의 적용에 관한 연구, 한국지구시스템공학회지, **43**, 310-319.  
 Al-Anboori, A., van der Baan, M., and Kendall, J. M., 2005,

Approximate separation of pure-mode and converted waves in 3-C reflection seismics by t-p transform, *Geophysics*, **70**, 81-86.  
 Dankbaar, J., 1985, Separation of P- and S-waves, *Geophysical Prospecting*, **33**, 970-986.  
 Greenhalgh, S. A., Mason, I. M., Lucas, E., Pant, D., and Eames, R. T., 1990, Controlled direction reception filtering of P- and S-waves in  $\tau$ -p space, *Geophysical Journal International*, **100**, 221-234.  
 Liu, J., Zeng, X., Xia, J., and Charles, S., 2009, The separation of P-wave and S-wave from crosswell seismic data and application, *SEG Expanded Abstracts of the 79<sup>th</sup> Annual International Meeting*, 1320-1324.  
 Mochinaga, H., Trc, J., Onozuka, S., Kono, F., Ogawa, T., Takahashi, A., and Torigoe, T., 2006, Properties of Oil sands and Bitumen in Athabasca, *CSPG-CSEG-CWLS Convention*, 39-44.