연구논문

축소모형 실험을 이용한 다성분 탄성파 자료 취득 및 분석 연구

임경민¹ · 신성렬^{2*} · 정우근² · 김대철³¹한국지질자원연구원 포항지질자원실증연구센터 인턴, ²한국해양대학교 에너지자원공학과 교수,³한국해양대학교 해양에너지자원공학과 박사과정

Multi-component Seismic Data Acquisition and Analysis using Physical Modeling

Kyoungmin Lim¹, Sungryul Shin^{2*}, Wookeen Chung² and Daechul Kim³¹Intern, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources Pohang Branch, Pohang, Korea²Professor, Department of Energy and Resources Engineering, National Korea Maritime & Ocean University, Busan, Korea³PhD Student, Department of Ocean Energy and Resources Engineering, National Korea Maritime & Ocean University, Busan, Korea

*Corresponding Author. Sungryul Shin, srshin@kmou.ac.kr, Department of Energy and Resources Engineering, National Korea Maritime & Ocean University, Busan, Korea

Received

4 March 2021

Final version Received

16 July 2021

Accepted

26 August 2021

Abstract

Multi-component seismic survey is the method for acquiring various component data by generating P and S wave sources and using 3-axis receivers. The multi-component data is advantageous over P waves in obtaining additional information. However, there have been difficulties in the data processing and interpretation of multi-component data. In this study, as a prior study, a single channel 9-component seismic physical modeling was carried out on a model with faults and channels filled with air, water, and mineral oil. The applicability of the 9-component physical modeling was confirmed through characteristic analysis. Characteristics found in the field data were provided. A bright spot which is one of the gas reservoir indicators appeared in the P-P component data. The P and S wave component data was compared to the injected fluid in the time-frequency domain. Through the features of the data, the applicability of 9-component seismic physical modeling was confirmed. The results of this study can be used as a basis for multi-component seismic physical modeling data.

Key words : Multi-component seismic survey, seismic physical modeling, P wave, S wave

요약

다성분 탄성파 탐사는 P파 또는 S파를 발생시킬 수 있는 음원과 3축 수신기를 이용하여 다양한 성분의 자료를 취득할 수 있는 탐사 방법이다. 다성분 자료는 P파만을 이용한 탐사 자료에 비해 더 많은 정보를 얻을 수 있는 장점이 있으나 P파 자료에 비해 처리 및 분석이 어렵다. 본 연구에서는 다성분 자료의 처리 및 분석에 관한 선행 연구로서 축소모형 실험을 이용하여 단층과 채널이 있는 모델에서 채널 내에 공기, 물, 미네랄 오일을 주입하여 단일채널 9 성분 탄성파 자료를 취득하였으며 자료에 나타나는 특성을 분석하여 9 성분 탄성파 축소모형 실험의 현장성을 확인하고자 하였다. 취득된 자료에서 현장 탄성파 자료에 나타나는 회절, 다중반사파, SH 성분의 특성과 같은 현상이 확인되었다. P-P 성분 자료에서 가스 저류층 지시자 중 하나인 명점이 확인되었다. 또한 P파 및 S파 성분 자료를 시간-주파수 영역에서 비교하였다. 취득된 자료에 나타나는 특성으로부터 9 성분 탄성파 축소모형 실험의 적용성을 확인할 수 있었다. 본 연구 결과는 다채널 다성분 탄성파 축소모형 연구의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 다성분 탄성파 탐사, 탄성파 축소모형 실험, P파, S파

서 론

전통적인 탄성과 탐사 방법은 주로 송신원으로 P파를 이용하였으며, 다성분 탄성과 탐사(multi-component seismic survey)는 P파 또는 S파를 발생시킬 수 있는 음원과 3축 수신기를 이용하여 다양한 성분의 자료를 얻을 수 있는 탐사 방법이다. P파와 S파는 지층을 통과할 때 다른 전파 특성을 가지므로 다성분 탄성과 탐사 자료를 통해 더 많은 정보를 얻을 수 있다(Garotta, 1999). P파와 함께 S파를 음원으로 이용할 경우, S파 성분을 측선 방향과 수직인 방향(SH component)과 수평인 방향(SV component)으로 구분하여 3 성분(P, SH and SV component) 음원을 발생시킬 수 있으며 3축 수신기를 통해 최대 9 성분 탄성과 자료를 취득할 수 있다.

국외의 다성분 탐사 사례로 Al-Hawas *et al.*(2003)은 다 성분 탄성과 탐사를 통해 취득한 북-남, 동-서 측선 방향의 자료를 이용하여 균열대의 방향을 추측하는 연구를 수행한 바 있다. 또한, Cafarelli *et al.*(2006)은 브라질에서 취득한 4 성분 탄성과 자료를 이용하여 가스 지시자를 확인한 연구를 수행한 바 있다. 국내의 경우 해저면 케이블(OBS) 자료로부터 울릉분지 가스하이드레이트 유망지역의 P파 및 모 드전환 S파 속도에 관한 연구(Kim and Byun, 2011)를 수행한 바 있다. 또한 포항 영일만 해상에서 이산화탄소 지층 저장에 위한 OBS 탐사를 수행하였다(Shinn *et al.*, 2018; Park *et al.*, 2018). 이러한 다성분 탄성과 탐사 자료는 P파 자료만으로는 확인이 어려운 암상 구분, 균열대 방향, 저류층 확인 등이 가능하다는 장점이 있다(Potters *et al.*, 1999; Qian *et al.*, 2009; Ozdemir *et al.*, 2010). 그러나 기존의 P파만을 포함하는 자료에 비해 S파 자료를 포함하는 다성분 자료의 처리 및 분석에는 어려움이 있으며(Garotta, 1999; Chopra and Stewart, 2010; Galvis *et al.*, 2017), 다성분 탄성과 자료의 특성에 관한 연구가 필요하다. 다성분 자료의 특성 분석의 연구로 복소신호 분석(Rene *et al.*, 1986), 속도 분석(Gaiser, 1993), 극성 분석(Guevara and Stewart, 1998) 등이 수행되었다.

탄성과 자료의 특성 분석과 같은 연구를 수행함에 있어 현장 탄성과 탐사 자료를 이용하는 것이 이상적이나 시간 및 비용적으로 어려움이 있어 수치 실험(numerical modeling)과 축소모형 실험(physical modeling)과 같은 모형 반응을

이용하는 방법이 이용된다. 수치 실험은 전파하는 탄성과의 거동을 수학적으로 나타내는 방법으로(Alterman and Karal, 1968; Etgen and O'Brien, 2007) 현장성 반영이 어려운 단점이 있다. 축소모형 실험은 현장 탐사 환경을 모사하여 실제 탄성과와 지층 모델을 통해 자료를 취득하는 방법으로 수치 실험의 단점을 보완할 수 있다(Shin *et al.*, 2006). 또한 탐사 변수들의 축소를 통하여 현장 탐사와 유사한 조건을 설정하여 보다 물리적이고 실제적인 자료를 얻을 수 있다는 장점이 있다(Choi *et al.*, 1995; Stewart and Cheadle, 1989).

탄성과 축소모형 실험과 관련하여 국내외에서 연구가 이루어지고 있으며, 국외의 경우 Tatham *et al.*(1983)은 S파를 이용하여 취득된 CDP 자료를 P파 자료와 비교한 연구를 수행하였으며, 이방성 지층 모델에서 S파의 전파 시간(Ebrom *et al.*, 1988), 단층에서의 S파 이방성(Johnson *et al.*, 1989), 균열 밀도에 따른 S파 속도(Wei *et al.*, 2014)에 관한 연구도 수행되었다. 특히 Ebrom *et al.*(1989)는 돔이 포함된 지층 모델에서 9 성분 자료를 취득하였으며, 각 성분의 특성을 확인하는 연구를 수행하였다(Ebrom *et al.*, 1992). 또한 이방성 매질에서의 다성분 축소모형 연구(Cheadle *et al.*, 1990; Dewangan *et al.*, 2006), 레이저 초음파를 이용한 연구가 수행되었다(Bayon and Rasolofosaon, 1993). 한편 국내의 경우 1988년 처음 탄성과 축소모형 실험을 도입하여(Kim *et al.*, 1988) 지층 정보 및 물성 규명(Shin *et al.*, 2006), 이방성 매질의 이방성 계수 파악(Ha and Shin, 2010)에 관한 연구가 수행되었으나 국내에서 탄성과 축소모형 실험을 이용하여 9 성분 자료의 취득 및 특성 분석에 관한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 단일 채널 다성분 탄성과 축소모형 취득 시스템을 구성하여 단층과 채널을 모사한 모델에 대해 9 성분 자료를 취득하였으며, 취득한 자료에 나타나는 P파 및 S파 자료의 특성을 분석하여 9 성분 탄성과 축소모형 실험의 적용성을 확인하고자 하였다.

다성분 탄성과 축소모형 실험

다성분 탄성과 자료의 성분은 음원과 수신기의 성분에 따라 결정된다(Table 1). Table 1의 수신기 H 성분은 하이

Table 1. Options for acquiring multi-component seismic data

Acquisition option	Source	Receiver	Captured mode
9C	XYZ	XYZ	P-P, P-SH, P-SV, SH-P, SH-SH, SH-SV, SV-P, SV-SH, SV-SV
6C	YZ	XYZ	P-P, P-SH, P-SV, SV-P, SV-SH, SV-SV
4C	Z	XYZ & H	P-P, P-SH, P-SV, Pressure
3C	Z	XYZ	P-P, P-SH, P-SV
1C	Z	Z or H	P-P

Fig. 1. The diagram of P, SH and SV components.

드로폰을 나타내며 S파를 음원으로 이용하는 경우 최대 9 성분 탄성과 자료를 취득할 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 P, SV, SH 성분 송수신기를 이용하여 9 성분 자료를 취득하였다.

축소모형 실험을 이용하여 9 성분 탄성과 자료를 취득하기 위해 다성분 자료 취득 시스템(Fig. 2)을 구성하였다. 취득 시스템은 신호 제어부(source control unit)와 자료 취득부(data acquisition unit)로 구성되어 있다. 신호의 생성 및 제어를 위한 신호 제어부는 펄스/리시버와 트랜스듀

Fig. 2. Multi-component seismic physical data acquisition system.

Fig. 3. Source waveform of (a) P wave and (b) S wave and frequency spectrum of (a) P wave and (b) S wave.

서를 이용하여 P파와 S파를 발생시킨다. 펄서/리시버는 OLYMPUS사의 5058PR 이며, 트랜스듀서는 중심 주파수가 1 MHz인 OLYMPUS사의 콘택트 타입 트랜스듀서 V103-SM(P파)과 V153-SM(S파)을 이용하였다. 트랜스듀서와 모델의 커플링을 위해 커플런트(couplant)를 이용하였으며 특히 S파 트랜스듀서는 S파용 커플런트를 이용하였다. 자료 취득부는 탄성과 축소모형 실험 자료를 취득을 위한 디지털 오실로스코프와 취득된 자료를 저장하는 PC로 구성되어 있다.

탄성과 축소모형 실험의 탐사 변수는 현장 규모의 탐사 변수를 식 (1)과 같은 축소비를 고려하여 설계된다(Vogel *et al.*, 1985).

$$\alpha_c = \alpha_f \times \alpha_\lambda, \quad (1)$$

여기서 α_c 는 속도 변수, α_f 는 주파수 변수, α_λ 는 모델 크기 변수이다. 속도 변수의 경우 매질 자체의 특성으로 조절이 어렵다. 본 연구에서는 주파수 변수와 모델 크기 변수의 조절을 통해 1:20000의 축소비를 설정하였다. 등방성 매질에서 취득된 P파 및 S파 트랜스듀서의 파형과 현장 규모의 주파수 스펙트럼을 Fig. 3에 나타내었으며 축소모형 실험에서 취득된 P파의 중심주파수는 800 kHz, S파의 중심주파수는 400 kHz 이다. 축소비(1:20000)를 고려하여 현장 규모의 P파 및 S파 트랜스듀서의 중심 주파수는 각각 40 Hz, 20 Hz 이다.

Fig. 4. (a) The 2nd layered physical model comprising fault and channel and (b) upper section of lower layer.

Fig. 5. Diagram of survey for acquiring single channel data.

Table 2. The velocity and density of ABS, acrylic and injected fluids

	P wave velocity (m/s)	S wave velocity (m/s)	Density (g/cm ³)
ABS	2700	1140	1.149
Acrylic	2720	1370	1.151
Air	330	-	0.001
Water	1490	-	1.000
Mineral Oil	1400	-	0.838

Table 3. Survey parameter comparison of physical modeling and field scale (1:20000)

	Physical modeling scale	Field scale
Number of Shot		101
Shot interval	2 mm	40 m
Offset	24 mm	480 m
Number of sample		3839
Sampling time	0.050 μ s	1 ms
Recording length	200 μ s	4 s

Fig. 6. Variation in amplitude with the angle of S wave transducer on the VTI material.

본 연구에서는 탄성과 축소모형 실험을 이용하여 지층 모델(Fig. 4(a))에서 9 성분 자료를 취득하였다. 지층 모델은 상부는 ABS(acrylonitrile butadiene styrene), 하부는 acrylic으로 구성된 2층 모델이며 채널과 단층을 포함한다. 채널에 공기, 물, 미네랄 오일을 주입하여 주입 유체에 따라 다성분 자료를 취득하였다. 각 층은 등방성 매질로 가정하였으며 채널은 두 번째 층에 S자 형태로 존재하며(Fig. 4(b)) 폭은 30 mm, 깊이는 20 mm, 부피는 540 cm³이다. 각 층과 유체의 P파, S파 속도와 밀도를 측정하여 Table 2에 나타내었다. Fig. 5는 Fig. 4(b)에 나타난 탐사 축선의 단면

도이며 단일 채널 자료 취득을 위한 음원 및 수신기의 배치를 나타내었다. 설계된 축소모형 및 현장 규모의 탐사 변수를 Table 3에 나타내었다. 축소비를 고려하여 현장 규모로 나타내었을 때 오프셋은 480 m, 음원 간격은 40 m이며 총 음원 개수는 101개 이다.

S파 트랜스듀서는 떨림 방향이 고정되어 있어 송신 및 수신 트랜스듀서의 회전을 통해 SV 성분과 SH 성분을 나타낼 수 있다. 트랜스듀서의 떨림 방향을 확인하기 위해 횡등방성(VTI)매질에서 송수신 트랜스듀서를 10° 간격으로 회전하여 취득한 신호의 진폭 변화를 Fig. 6에 나타내었으며 최대 진폭을 갖는 방향을 0°로 설정하였다.

다성분 탄성과 자료 특성 분석

본 연구에서는 단층과 채널을 포함한 지층모델에서 채널 내에 공기, 물, 미네랄 오일을 주입하여 9 성분 단일 채널 자료를 취득하였다. 주입한 유체에 따라 취득된 자료를 축소비를 고려한 현장 규모로 Fig. 7-9에 나타내었다. Table 2에 나타난 P파 및 S파 속도를 이용하여 주시를 계산하였을 때 상하부층의 경계, 채널, 모델 바닥면의 주시와 일치하는 것을 확인하였으며, P-P, SH-SH, SV-SV 성분과 같이 방향성이 일치하는 자료에서 상대적으로 강한 진폭을 가지며, 방향성이 일치하지 않은 SH-SV, SV-SH 성분의 자료는 약한 진폭을 가진다. 또한 현장 탐사 자료에서 나타나는 현상 중 하나인 회절 현상과 다중 반사파가 기록되었다. 회절 현상

은 파장에 따라 다르게 나타나며, P파와 S파의 파형(Fig. 3)과 같이 파장이 서로 달라 P-P 성분과 SH-SH 성분의 회절 신호를 비교한 Fig. 10에서 P파와 S파의 회절 양상이 다르

게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

S파 성분 중 SH 성분의 경우 지층 경계면에서 반사가 일어날 때 다른 성분으로 변환이 잘 일어나지 않는 특성을 가

Fig. 7. The single channel multi-component seismic data with air filled in the channel. (a) P-P, (b) P-SH, (c) P-SV, (d) SH-P, (e) SH-SH, (f) SH-SV, (g) SV-P, (h) SV-SH and (i) SV-SV components.

진다(Hardage *et al.*, 2011). 이러한 SH 성분의 특성을 확인하기 위해 취득한 자료의 SH-P 성분과 SV-P 성분을 비교하였을 때(Fig. 7-9(b), (d)) SH-P 성분 자료의 진폭이 상대

적으로 약하게 나타나며, 이를 통해 축소모형 실험을 통해 취득된 자료에서 SH 성분의 특성이 확인되었다. Fig. 11은 채널 내의 유체에 따라 P-P 성분 자료의 2 s까지의 신호를

Fig. 8. The single channel multi-component seismic data with water filled in the channel. (a) P-P, (b) P-SH, (c) P-SV, (d) SH-P, (e) SH-SH, (f) SH-SV, (g) SV-P, (h) SV-SH and (i) SV-SV components.

나타낸 것이다. 주입 유체가 공기인 경우(Fig. 11(a)) 명점(bright spot)이 확인되었으며, 물과 미네랄 오일인 자료에서는 확인되지 않는다. 명점은 탄성과 단면에서 반사파의

진폭이 강하게 나타나는 현상으로 현장에서 취득된 자료에서 지층 내의 가스층에 의해 주로 나타난다. 따라서 현장 탄성과 자료에서 나타나는 명점, SH 성분의 특성이 축소모형

Fig. 9. The single channel multi-component seismic data with mineral oil filled in the channel. (a) P-P, (b) P-SH, (c) P-SV, (d) SH-P, (e) SH-SH, (f) SH-SV, (g) SV-P, (h) SV-SH and (i) SV-SV components.

실험을 통해 취득된 자료에서 확인이 가능하여 다성분 축소모형 실험의 적용성을 확인할 수 있었다.

채널 내에 물과 미네랄 오일을 주입한 자료(Fig. 11(b), (c))의 50~60 번째 트레이스에서 약 1.5 s에 회절에 의한 신호가 기록되었다. 공기의 경우 P파의 전파가 어려워 나타나지 않았다. 주시를 확인하였을 때 회절 신호는 채널 하부에 의한 신호로 판단되며 하부층에 비해 주입 유체에서의 P파 속도가 낮아 모델의 바닥면에 의한 신호보다 늦게 기록되었다.

채널에서 나타나는 P-P, SH-SH 성분의 55번째 트레이스와 80번째 트레이스를 시간-주파수 영역으로 변환하여 유체에 따른 P파와 S파의 시간에 따른 주파수 변화를 확인하였다(Fig. 12). 시간-주파수 영역의 P-P 성분 자료에서 주입 유체가 공기인 경우 고주파수 성분이 감쇠되어 저주파수 성분이 상대적으로 강하게 나타났다. 그러나 S파 성분인 SH-SH 성분의 경우 주입 유체에 관계없이 유사한 주파수 성분을 가졌으며 유체에서의 전파가 어렵기 때문에 판단된다.

Fig. 10. Diffraction patterns of (a) P wave and (b) S wave.

Fig. 11. The P-P component single channel data with the channel injected with (a) air, (b) water and (c) mineral oil.

Fig. 12. Time-frequency domain spectrogram of the P-P component of (a) air, (b) water, (c) mineral oil and (d) lower layer. Time-frequency domain spectrogram of the SH-SH component of (e) air, (b) water, (c) mineral oil and (d) lower layer.

결론

본 연구에서는 축소모형 실험을 이용하여 다성분 단일 채널 탐사를 수행하여 9 성분 탄성과 자료를 취득하였다. 다성분 자료 취득을 위해 단층과 채널을 모사한 모델을 이용하였으며 채널에 공기, 물, 미네랄 오일을 주입하여 채널 내의 유체에 따라 다성분 탄성과 자료를 취득하였다. 다성분 탄성과 단면을 취득을 위해 축소비를 고려하여 탐사를 설계하였으며 취득된 자료를 현장 규모로 나타내었다. 취득된 자료와 지층의 단면을 비교하였을 때 단층과 지층 경

계면 등이 일치하였으며, 송수신기의 방향성이 일치하는 성분(P-P, SH-SH, SV-SV)은 강한 진폭을 가지며, 방향성이 일치하지 않는 성분(SV-SH, SH-SV)의 경우 약한 진폭을 나타냈다. 또한 현장 탄성과 자료에서 나타나는 현상 중 하나인 회절과 다중 반사파를 확인할 수 있었다. 이를 통하여 다성분 탄성과 축소모형 실험이 적용성을 반영할 수 있다고 판단된다.

축소모형 실험을 활용하여 취득된 다성분 자료에서 S파의 특성 중 하나인 SH 성분의 특성을 P-SH 성분과 P-SV 성분의 비교를 통해 확인할 수 있었다. 채널 내의 유체가 공기

인 경우의 P-P 성분의 자료에서 채널의 반사와 진폭이 강하게 나타나는 명점 현상이 나타났다. 이를 채널이 존재하는 부분과 채널이 존재하지 않는 부분의 트레이스를 시간-주파수 영역에서 확인하였을 때 채널 내의 공기 층에 의해 고주파수 성분이 감쇠되어 채널의 반사와 신호에서 저주파수 성분이 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

주입 유체가 액상인 경우 P-P 성분 자료의 1.5 s 신호에서 채널의 하단부로부터 기인된 것으로 해석되는 회절신호가 기록되었다. 공기의 경우 탄성파의 전파가 어려워 기록이 되지 않았으며 S파의 경우 유체에서의 전파가 어려워 SH-SH 성분의 자료에서 기록되지 않은 것으로 판단된다. 따라서 지층 내에 유체가 존재할 때 탄성과 자료 해석에 주로 이용되는 P-P 성분 자료와 S파 성분 자료의 비교를 통해 해당 유체의 상(phase)을 구분할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 검층 자료와 같은 추가적인 자료를 통해 유체의 상 뿐만 아니라 유체의 종류 또한 구분이 가능할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 다성분 탄성과 자료의 처리 및 해석의 선행 연구로서 축소모형 실험을 이용하여 단일 채널 9 성분 탄성과 자료를 취득하였으며 취득한 다성분 자료에 나타나는 특성을 분석하였다. 축소모형 실험을 이용한 다성분 탄성과 탐사의 적용성을 확인할 수 있었으며 다성분 탄성과 자료의 처리 및 해석의 배경 연구로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 향후 축소모형 실험을 이용한 다채널 다성분 자료의 취득 및 분석 연구의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 3D 해저 정밀영상화를 위한 복합 탄성과 탐사 및 실규모 고분해능 처리기술 개발사업의 ‘탄성과 축소모형 시스템을 활용한 3차원 해저면 다성분 탐사자료 특성분석(21-3312-1)’과제에서 지원되었습니다.

References

Al-Hawas, K., Ameen, M., Wahab, M., Nebrija, E., and MacBeth, C., 2003. Delineation of fracture anisotropy signatures in Wudayhi Field by azimuthal seismic data, *The Leading Edge*, 22(12), p.1201-1211.

Alterman, Z. and Karal, F.C., 1968. Propagation of elastic waves in layered media by finite difference methods, *Bulletin of Seismological Society of America*, 58(1), p.367-398.

Bayon, A.I. and Rasolofosaon, Patrick N.J., 1993, *Three-Component Seismic Physical Modeling Using Laser Ultrasonics*, 1993 SEG Annual Meeting, Washington, DC, USA, p.930-933.

Cafarelli, B., Randazzo, S., Campbell, S., Sobreira, J.F.F., Guimaraes, M.A.G., Rodriguez, C., Johann, P., and Theodoro, C., 2006. Ultra-deepwater 4-C offshore Brazil, *The Leading Edge*, 25(4), p.474-477.

Cheadle, S.B., Brown, R.J., and Lawton, D.C., 1990. Orthorhombic anisotropy: A multicomponent physical model study, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, SEG, p.1420-1423.

Choi, W.S., Hyun, B.K., and Suh, J.H., 1995. A Study on the Development of Seismic Scale Modeling, *J. the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 32(6), p.437-444.

Chopra, S. and Stewart, R., 2010. Introduction to this special section: Multicomponent seismic, *The Leading Edge*, 29(10), p.1210-1211.

Dewangan, P., Tsvankin, I., Batzle, M., Van Wijk, K., and Haney, M., 2006. PS-wave moveout inversion for tilted TI media: A physical-modeling study, *GEOPHYSICS*, 71(4), p.135-142.

Ebrom, D.A., McDoland, J., and Tatham, R.H., 1992. Sideswipe in a 3-D, 3-C model survey, *The Leading Edge*, 11(11), p.45-51.

Ebrom, D.A., Tatham, R.H., and Sekharan, K.K., 1988. Physical modeling of anisotropy effects on shear-wave travel times, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, SEG, p.1148-1150.

Ebrom, D.A., Tatham, R.H., Sekharan, K.K., McDonald, J.A., and Gardner, G.H.F., 1989. Nine-component data collection over a reflection dome: A Physical modeling study, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, SEG, p.498-500.

Etgen, J.T. and O'Brien, M.J., 2007. Computational methods for large-scale 3D acoustic finite-difference modeling: A tutorial, *GEOPHYSICS*, 72(5), p.223-230.

Gaiser, J.E., 1993. Multicomponent Vp/Vs correlation analysis, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, SEG, p.719-722.

Galvis, I.S., Villa, Y., Duarte, C., Sierra, D., and Agudelo, W., 2017. Seismic attribute selection and clustering to detect and classify surface waves in multicomponent seismic data by using k-means algorithm, *The Leading Edge*, 36(3), p.239-248.

Garotta, R., 1999. Shear Waves from Acquisition to Interpretation, *Society of Exploration Geophysicists*, Oklahoma, US, 242p.

Guevara, S.E. and Stewart, R.R., 1998. *Multicomponent seismic polarization analysis*, CREWES Research Report, 10, p.7.1-7.19.

Ha, Y.S. and Shin, S.R., 2010. Seismic Anisotropy Physical Modeling with Vertical Transversely Isotropic Media, *Geophysics and Geophysical Exploration*, 13(4), p.307-314.

Hardage, B.A., DeAngelo, M.V., Murray, P.E., and Sava, D.,

2011. Multicomponent Seismic Technology, *Society of Exploration Geophysicists*, Oklahoma, US, 335p.
- Johnson, J.V., Tatham, R.H., McDonald, J.A., and Sekharan, K.K., 1989. Physical modeling of anisotropy, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, SEG, p.1026-1029.
- Kim, B.Y. and Byun, J.M., 2011. S-wave Velocity Derivation Near the BSR Depth of the Gas-hydrate Prospect Area Using Marine Multi-component Seismic Data, *Economic and environmental geology*, 44(3), p.229-238.
- Kim, J.Y., Behrens, J., and Dresen, L., 1988. New Operating System for Physical Seismic-modeling, *J. the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 25, p.385-392.
- Ozdemir, H., Flanagan, K., and Tyler, E., 2010. Lithology and hydrocarbon mapping from multicomponent seismic data, *Geophysical Prospecting*, 58(2), p.297-306.
- Park, M.H., Lee, C.S., Kim, B.Y., Kim, J.H., Kim, K.J., and Shinn, Y.J., 2018. Preliminary Results of the Pre-injection Monitoring Survey at an Offshore CO₂ Injection Site in the Yeongil Bay, *J. Engineering Geology*, 28(2), p.247-258.
- Potters, J.H., Groenendaal, H.M., Oates, S.J., Hake, J.H., and Kalden, A.B., 1999. The 3D shear experiment over the Natih field in Oman. Reservoir geology, data acquisition and anisotropy analysis, *Geophysical Prospecting*, 47(5), p.637-662.
- Qian, Z., Chapman, M., and Li, X.Y., 2009. Use of multicomponent seismic data for oil-water discrimination in fractured reservoirs, *SEG International Exposition and Annual Meeting*, SEG, Houston, Texas, US, p.4282-4283.
- Rene, R.M., Fitter, J.L., Forsyth, P.M., Kim, K.Y., Murray, D.J., Walters, J.K., and Westerman, J.D., 1986. Multi-component seismic studies using complex trace analysis, *GEOPHYSICS*, 51(6), p.1235-1251.
- Shin, S.R., Yeo, E.M., Kim, C.S., Park, K.P., Lee, H.Y., and Kim, Y.J., 2006. Geophysical Characteristics of Gas Hydrate Using 3-D Seismic Physical Modeling Experiment, *J. the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 43(3), p.181-193.
- Shinn, Y.J., Kwon, Y.K., Yoon, J.R., Kim, B.Y., and Cheong, S., 2018. Result of CO₂ Geological Storage Site Survey for Small-scale Demonstration in Pohang Basin, Yeongil Bay, SE Korea, *J. Engineering Geology*, 43(3), p.181-193.
- Stewart, R.R. and Cheadle, S.P., 1989. Ultrasonic modeling of borehole seismic surveys, *CREWES Research Report*, 1, p.206-224.
- Tatham, R.H., Goolsbee, D.V., Massell, W.F., and Nelson, H.R., 1983. Seismic shear-wave observations in a physical model experiment, *GEOPHYSICS*, 48(6), p.688-701.
- Vogel, J.A., Stelwagen, U., and Breeuwer, R., 1985. Seismic analysis of thin beds aided by 3D physical model experiments, *Proceeding of 14th international symposium of acoustic imaging*, Springer, 14, p.53-67.
- Wei, J., Di, B., Ding, P., Wang, L., and Di, X., 2014. Physical modeling of the effects of crack density on shear wave, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, SEG, p.378-382.

임 경 민

2019년 한국해양대학교 에너지자원공학과
공학사
2021년 한국해양대학교 대학원 해양에너지
자원공학과 공학석사

현재 한국지질자원연구원 포항지질자원실증연구센터 인턴
(E-mail; limkm@kigam.re.kr)

신 성 렬

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1990년 서울대학교 대학원 자원공학과 공
학석사
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과 공
학박사

현재 한국해양대학교 에너지자원공학과 교수
(E-mail; srshin@kmou.ac.kr)

정 우 근

2006년 서울대학교 지구환경시스템공학부
공학사
2008년 서울대학교 에너지시스템공학부
공학석사
2011년 서울대학교 에너지시스템공학부
공학박사

현재 한국해양대학교 에너지자원공학과 교수
(E-mail; wkchung@kmou.ac.kr)

김 대 철

2017년 한국해양대학교 에너지자원공학과
공학사
2019년 한국해양대학교 해양에너지자원
공학과 공학석사

현재 한국해양대학교 해양에너지자원공학과 박사과정
(E-mail; dckim@g.kmou.ac.kr)