물리탐사 Mulli-Tamsa
Vol. 11, No. 3, 2008, p. 242~249

동해 가스전 탄성파 자료에서 나타나는 AVO 반응의 한계점에 대한 고찰

신승일[1] · 변중무[1]* · 최형욱[1] · 김건득[2] · 고승원[2] · 서영탁[2] · 차영호[3]

[1]한양대학교 지구환경시스템공학전공, [2]한국석유공사
[3]서울대학교 에너지자원공학과

Study on the Limitation of AVO Responses Shown in the Seismic Data from East-sea Gas Reservoir

Seungil Shin[1], Joongmoo Byun[1]*, Hyungwook Choi[1], Kundeuk Kim[2], Seungwon Ko[2], Youngtak Seo[2] and Young Ho Cha[3]

[1]Department of Geoenvironmental System Engineering, Hanyang University
[2]Korea National Oil Corporation, Petroleum Technology Institute
[3]Energy Resources Engineering, Seoul National University

요 약: AVO 분석은 지하의 가스 존재에 대한 직접적인 지시자로서 최근 탄성파 지하구조 단면도와 함께 석유탐사에 널리 이용되어져 왔다. 동해가스전과 같이 해저면 심부에 위치한 저류층의 경우 때때로 중합단면도 상에서 명점은 보이나 CMP 단면도 상에서 AVO 반응을 관찰하기가 어려운 경우가 종종 발생한다. 심부저류층의 경우 고결성이 증가하기 때문에 매질의 공극유체가 가스로 치환되더라도 매질의 P파 속도가 크게 감소하지 않으며 이로 인해 AVO 반응을 나타내는 주요 요소인 상부층과의 포아송비 차이도 크게 증가하지 않는다. 본 연구에서는 상·하부층의 포아송비를 달리하면서 포아송비의 차이가 AVO 반응에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 통해 상·하부층의 포아송비 차이가 작아질수록 입사각에 따른 반사진폭의 변화량이 작아져 AVO 반응이 미미해짐을 관찰할 수 있었다. 이 결과를 이용하여 동해가스전의 AVO 반응의 한계점을 고찰하기 위해 탄성파 자료와 물리검층 자료를 이용하여 고래 V 구조를 모사한 속도모델을 만들고 합성탄성파 탐사자료를 생성하였다. 매질의 성질을 이용하여 이론적으로 계산한 AVO 반응과 실제 합성탄성파 자료를 처리하여 얻은 AVO 반응을 비교한 결과, 상·하부층의 포하송비의 차이가 작을 경우 입사각에 따른 반사진폭 변화가 매우 작으며 잡음이나 전처리 과정 중에서 발생하는 진폭 왜곡에 의해 AVO 반응 특성이 가려짐을 확인할 수 있었다. 이러한 심부저류층의 AVO 분석의 한계점을 극복하기 위해서는 자료취득 단계부터 정확한 반사파 진폭을 획득해야 하며 자료처리 과정에서도 반사파 진폭을 보존할 수 있는 기술이 필요하다.

주요어: AVO 분석, 동해가스전, 심부저류층

Abstract: Recently, AVO analysis has been widely used in oil exploration with seismic subsurface section as a direct indicator of the existence of the gas. In the case of the deep reservoirs like the gas reservoirs in the East-sea, it is often difficult to observe AVO responses in CMP gathers even though the bright spots are shown in the stacked section. Because the reservoir becomes more consolidated as its depth deepens, P-wave velocity does not decrease significantly when the pore fluid is replaced by the gas. Thus the difference in Poisson's ratio, which is a key factor for AVO response, between the reservoir and the layer above it does not increase significantly. In this study, we analyzed the effects of Poisson's ratio difference on AVO response with a variety of Poisson's ratios for the upper and lower layers. The results show that, as the difference in Poisson's ratio between the upper and lower layers decreases, the change in the reflection amplitude with incidence angle decreases and AVO responses become insignificant. To consider the limitation of AVO responses shown in the gas reservoir in East-sea, the velocity model was made by simulation Gorae V structure with seismic data and well logs. The results of comparing AVO responses observed from the synthetic data with theoretical AVO responses calculated by using material properties show that the amount of the change in reflection amplitude with increasing incident angle is very small when the difference in Poisson's ratio between the upper and lower layers is small. In addition, the characteristics of AVO responses were concealed by noise or amplitude distortion arisen during preprocessing. To overcome such limitations of AVO analysis of the data from deep reservoirs, we need to acquire precisely reflection amplitudes in data acquisition stage and use processing tools which preserve reflection amplitude in data processing stage.

Keywords: AVO analysis, East-sea gas reservoir, Deep reservoir

2008년 8월 11일 접수; 2008년 8월 13일 채택
*Corresponding author
E-mail: jbyun@hanyang.ac.kr
Address: Department of Geoenvironmental System Engineering, Hanyang University, Haengdang 17 Sungdong-gu, Seoul

서 론

최근 동해 가스전의 발견은 그 가스전 주변지역이나 동해의 다른 지역에서도 경제성 있는 가스전이 존재할 수 있다는 가능성을 보여주고 있다. 또한 동해에는 차세대 청정에너지원으로 각광 받고 있는 가스하이드레이트의 부존 가능성이 매우 높은 것으로 알려져 있어 그에 대한 관심이 증가하고 있다(허식 등, 2004).

이렇게 탄화수소를 포함하고 있는 석유나 천연가스에 대한 탐사는 주로 탄성파 반사법을 이용한다. 일반적으로 탄성파 반사법에서는 탄화수소를 직접 찾기보다는 지하구조 단면도의 해석을 통하여 탄화수소가 집적될 수 있는 구조를 찾는다. 이와는 달리 AVO (Amplitude variation with offset) 분석은 오프셋의 변화에 따른 탄성파의 진폭변화를 관찰함으로써 지하의 가스층 존재 여부를 직접적으로 판단할 수 있는 방법이다. 따라서 최근 20년 동안 AVO 반응 분석은 석유탐사 시 탄성파 반사법 탐사 자료로부터 얻은 지하구조 단면도와 더불어서 다양하게 적용되어져 왔다(Chiburis, 1993; Hilterman, 2000).

과거 동해에서도 탄화수소의 존재여부를 확인하기 위하여 일부 가스저류층에 대해서 반사법 탐사 자료와 검층 자료를 이용하여 AVO 반응 분석이 시행되었다. 그 결과 중합단면도 상에서는 명점(Bright spot)을 뚜렷이 볼 수 있었지만 공심점 단면도 상에서는 예상된 AVO 반응을 확인할 수 없었다(Hilterman, 1992).

본 연구에서는 동해가스전의 AVO 분석에서 나타난 위와 같은 문제의 원인을 규명하고자 동해가스전처럼 해저면으로부터 깊은 곳에 위치하는 심부저류층 매질의 특성과 공극수가 가스로 치환될 때의 AVO 반응 변화를 고찰하였다. 이를 통해 심부저류층에서 발생할 수 있는 AVO 반응에서의 문제점을 규명하고 동해 5구조를 모사한 속도모델로부터 얻은 합성탄성파 탐사자료를 이용하여 이를 확인하였다.

심부저류층의 가스치환에 따른 포아송비 변화

암석이 등방성(isotropic)이고 균질(homogeneous)하면서 탄성체(elastic material)인 경우 암석의 P파 속도와 S파 속도는 다음과 같이 표현된다.

$$V_p=\left[\frac{k+4/3\mu}{\rho}\right]^{1/2} \tag{1}$$

$$V_s=\left[\frac{\mu}{\rho}\right]^{1/2} \tag{2}$$

여기서, V_p, V_s는 각각 P파와 S파의 속도이고 ρ는 밀도(Bulk density), k와 μ는 각각 암석의 체적탄성률(Bulk modulus)과 전단계수(Shear modulus)이다. 일반적으로 암석의 체적탄성률은 공극유체의 체적탄성률에 의해 영향을 받지만 암석의 전단계수는 유체의 영향을 받지 않는다. 그렇기 때문에 공극에 차 있는 유체가 가스로 치환될 때 암석의 P파 속도는 상당량 감소하는 반면에 S파 속도는 암석의 밀도 감소로 인하여 약간 증가할 뿐 거의 변하지 않는다. 따라서 공극내의 유체가 가스로 치환될 때 암석의 V_p/V_s 값은 일반적으로 감소하게 된다(Castagna *et al.*, 1993). 이러한 사실을 바탕으로 V_p/V_s에 의해 다음과 같이 표현되는 포아송비를 공극 사이의 가스 부존 여부를 위한 지시자로 사용할 수 있다(Koefoed, 1955).

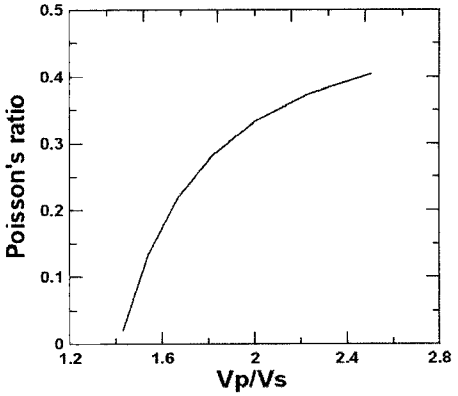

Fig. 1. Change in Poisson's ratio with Vp/Vs.

$$\sigma=\frac{\frac{1}{2}\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2-1}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2-1} \tag{3}$$

Fig. 1에서 보듯이 V_p/V_s 값이 증가하면 포아송비가 증가하며 포아송비는 0과 0.5사이의 값을 가짐을 알 수 있다.

Fig. 2는 암석의 고결 상태에 따라 공극내의 유체가 가스로 치환될 때 포아송비의 감소 정도가 어떻게 변화하는지를 보여주고 있다. Fig. 2(a)에서 보는 것과 같이 미고결 암석의 경우 가스포화도가 10%만 되어도 급격히 감소함을 알 수 있다. 이에 반해 고결 상태의 경우는 Fig. 2(b)와 같이 포아송비가 감소하기는 하지만 미고결 상태에 비해 매우 작은 변화를 보임을 알 수 있다.

탄성파 반사 계수 및 Zoeppritz 근사식

탄성파의 진폭의 변화는 반사계수에 의해 결정된다. 만약 수평층에 파가 수직으로 입사한다면 반사계수는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\rho_2V_2-\rho_1V_1}{\rho_2V_2+\rho_1V_1} \tag{4}$$

여기서, ρ_1, ρ_2, V_1, V_2는 각각 상·하부층의 밀도 및 속도이다.

만약 P파가 수직입사 하지 않는다면 반사, 투과 P파 뿐만 아니라 모오드 변환된 반사, 투과된 S파까지 생성되어 반사계수

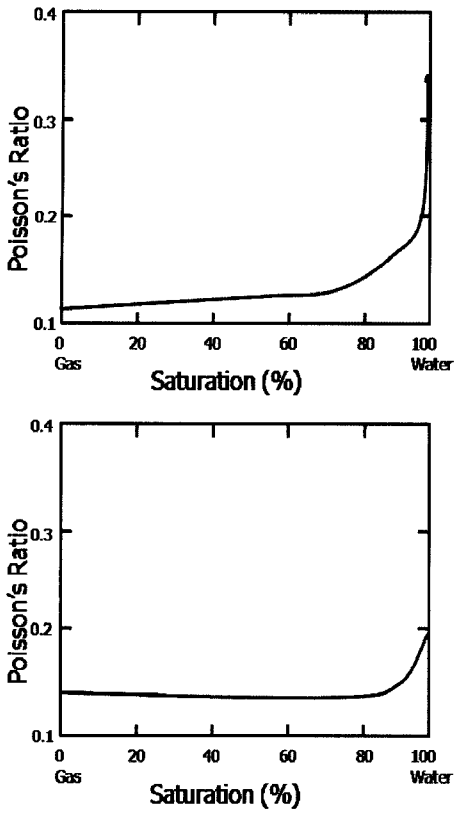

Fig. 2. Change in Poisson's ratio with increasing gas saturation in (a) unconsolidated and (b) consolidated medium (taken from Hilterman, 2001).

가 복잡한 형태를 가진다. 이 때 입사각에 따른 반사계수의 변화는 식 (5)와 같이 행렬 형태로 표현될 수 있다(Zoeppritz, 1919). 하지만 식 (5)의 Zoeppritz의 행렬식은 AVO 분석에 직접 사용하기에는 너무 복잡한 형태이므로, 분석하고자 하는 물성의 종류에 따라 여러 종류의 근사식들이 제안 되었다.

$$\begin{pmatrix} \sin\theta_1 & \cos\phi_1 & -\sin\theta_1 & \cos\phi_2 \\ -\cos\theta_1 & \sin\phi_1 & \cos\theta_2 & \sin\phi_2 \\ \sin2\theta_1 & \frac{\alpha_1}{\beta_1}\cos2\phi_1 & \frac{\rho_2\beta_2^2\alpha_1}{\rho_1\beta_1^2\alpha_2}\sin2\theta_2 & \frac{\rho_2\beta_2\alpha_1}{\rho_1\beta_1^2}\cos2\phi_2 \\ \cos2\phi_1 & -\frac{\beta_1}{\alpha_1}\sin2\phi_1 & -\frac{\rho_2\alpha_2}{\rho_1\alpha_1}\cos2\phi_2 & -\frac{\rho_2\beta_2}{\rho_1\alpha_1}\sin2\phi_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} RP \\ RS \\ TP \\ TS \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\theta_1 \\ -\cos\theta_1 \\ \sin2\theta_1 \\ -\cos2\phi_1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Zoeppritz 방정식의 근사식들은 강조하고자 하는 성질들에 따라 다양하게 표현되어져 사용된다. 그 중 일반적으로 사용되는 근사식으로 식 (6)과 같이 P, S파 속도 및 밀도에서의 변화를 강조하여 나타낸 Aki와 Richard 근사식(1980)이 있다.

$$RC(\theta)=\frac{1}{2}\left(1-\frac{4\beta^2}{\alpha^2}\sin^2\phi\right)\frac{\Delta\rho}{\rho}+\frac{1}{2\cos^2\phi}\frac{\Delta\alpha}{\alpha}-\frac{4\beta^2}{\alpha^2}\frac{\Delta\beta}{\beta}\sin^2\phi \quad (6)$$

여기서, $\alpha=(V_{p1}+V_{p2})/2$, $\beta=(V_{s1}+V_{s2})/2$, $\rho=(\rho_1+\rho_2)/2$, $\Delta\alpha=(V_{p2}-V_{p1})$, $\Delta\rho=(V_{s2}-V_{s1})$, $\Delta\rho=(\rho_2-\rho_1)$이다. 그리고 Shuey (1985)는 식 (6)의 Aki와 Richard 근사식을 오프셋과 관련된 입사각에 따라 근사를 하여 식 (7)과 같이 표현하였다. 식 (7)은 입사각이 약 30° 이내 일 때 유효하고 R_P는 수직입사반사계수로써 수직 입사 시 생기는 반사파의 진폭 값을 결정한다. 또한 두 번째 항은 중간부분의 입사각에 따른 영향을 나타내고 마지막 항은 임계각에 근접할 때 나타나는 진폭에 대한 영향을 나타낸다.

$$RC(\theta)=Rp+\left[A_0R_P+\frac{\Delta\alpha}{(1-\alpha)^2}\right]\sin^2\phi+\frac{1}{2}\frac{\Delta\alpha}{\alpha}(\tan^2\phi-\sin^2\phi) \quad (7)$$

여기서, R_p=수직입사반사계수, $A_0=B_0-2(1+B_0)\left(\frac{1-2\sigma}{1-\sigma}\right)$, $B_0=\frac{\frac{\Delta\alpha}{\alpha}}{\frac{\Delta\alpha}{\alpha}+\frac{\Delta\rho}{\rho}}$ 이다.

상 · 하부층의 포아송비의 차이에 따른 AVO 반응 비교

심부에 존재하는 저류층의 경우 고결성의 증가로 매질 내 공극수가 가스로 치환된다하여도 Fig. 2(b)에서 보여 지는 것처럼 포아송비의 감소가 상대적으로 작을 수 있다. 이로 인해 저류층의 상부층과의 포아송비의 차가 상대적으로 작을 수도 있다. 본 연구에서는 상 · 하부층의 포아송비의 차가 작을 때 입사각에 따른 반사계수의 변화가 어떻게 변화하는지 다음과 같은 가정 하에 조사 · 분석하였다.

1. 가스층의 P파 속도(V_{p2})를 2000 m/sec, 그 상부층의 P파 속도(V_{p1})를 3000 m/sec로 고정하였다.

2. S파 속도는 식 (3)을 이용하여 P파 속도와 포아송비에 의해 계산되었다.

3. 밀도는 V_p와 Gardner 방정식을 이용하여 구하였다(Gardner, 1974).

여기서는 $\rho=0.23\cdot\alpha^{0.25}$를 사용하여 결정하였다.

4. 입사각에 다른 반사계수를 계산하기 위해서 식 (8)에 보여 지는 Shuey의 근사식을 사용하였다.

위와 같은 가정을 한 뒤 상부층 포아송비는 0.15, 0.25, 0.35, 하부층 포아송비는 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35로 변화시켜 가면서 관찰하였다. 이 때 P파, S파 속도, 포아송비와 밀도의 관계는 Table 1과 같다. Fig. 3은 상부층 포아송비를 0.15로 고정시켰을 때 하부층 포아송비가 변화함에 따라 나타나는 입사각에 따른 반사계수의 변화를 보여주고 있다. 하부층의 포아송비가 감소할수록 입사각에 따른 전체적인 반사계수가 절대값이 큰 음의 반사계수를 가질려는 경향을 보인다. 또한 상부층과 하부층의 포아송비 차이가 작아짐에 따라 입사각에 따른 반사계수의 변화량이 상대적으로 감소한다. 이와 동일한 조건하에 상부층의 포아송비를 0.25로 증가시키면(S파 속도는 포아송비가 0.15일 때에 비해 약 10% 감소) Fig. 4에서 보이는 결과를

Table 1. Material properties used to investigate the AVO responses depending on the difference in Poisson's ratio.

Vp1 (m/sec)	Poisson's ratio 1	Vs1 (m/sec)	Density 1 (g/cc)	Vp2 (m/sec)	Poisson's ratio 2	Vs2 (m/sec)	Density 2 (g/cc)
3000	0.150	1925	1.700	2000	0.150	1283	1.539
3000	0.200	1837	1.700	2000	0.200	1224	1.539
3000	0.250	1732	1.700	2000	0.250	1154	1.539
3000	0.300	1603	1.700	2000	0.300	1069	1.539
3000	0.350	1441	1.700	2000	0.350	960	1.539
3000	0.400	1224	1.700	2000	0.400	816	1.539
3000	0.450	904	1.700	2000	0.450	603	1.539

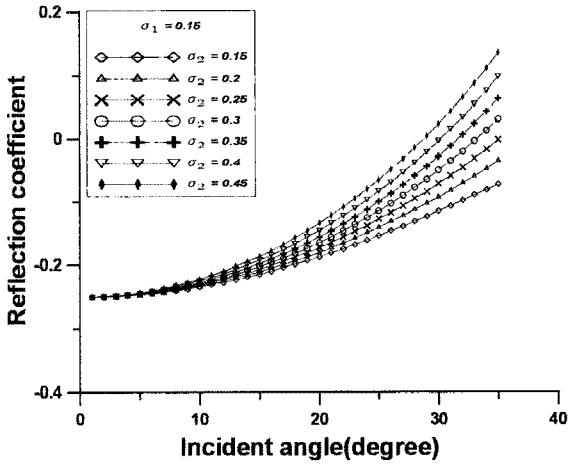

Fig. 3. AVO responses with Poisson's ratio of bottom layer (s_2). The Poisson's ratio of the top layer (s_1) is 0.15.

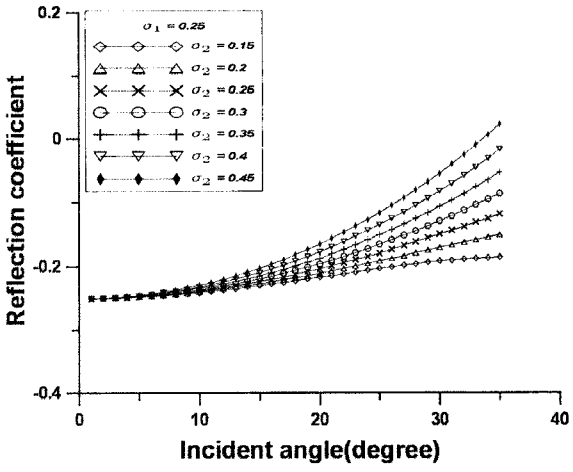

Fig. 4. AVO responses with Poisson's ratio of bottom layer (s_2). The Poisson's ratio of the top layer (s_1) is 0.25.

얻게 된다. Fig. 4는 하부층의 포아송비가 감소할수록 Fig. 3과 유사한 반응을 나타내지만 상부층의 포아송비가 0.25로 증가하여 하부층의 포아송비(0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35)와의 차이가 전체적으로 작아지기 때문에 입사각에 따른 반사계수의 변화가 Fig. 3에 비해 상대적으로 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 상부층 포아송비를 0.35로 고정했을 때 더욱 확연하게 나타난다(Fig. 5).

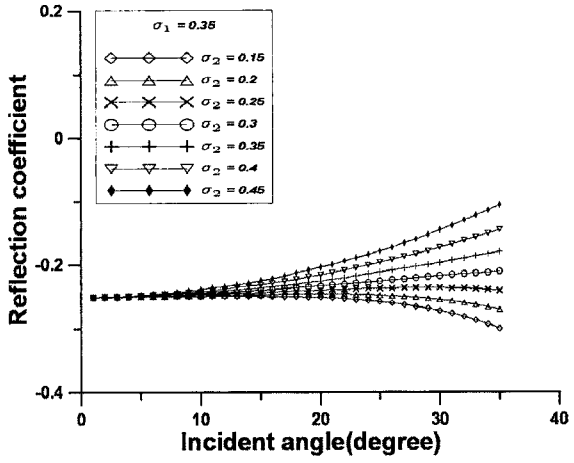

Fig. 5. AVO responses with Poisson's ratio of bottom layer (s_2). The Poisson's ratio of the top layer (s_1) is 0.35.

이렇게 상·하부층의 포아송비를 변화시키며 AVO 반응을 분석한 결과 상·하부층의 포아송비 차이가 작을 때는 입사각에 따른 반사계수의 변화가 작아져 AVO 반응이 미세하게 나타나는 것을 확인하였다. 이는 Koefoed (1955)에 의해 제시된 결과와도 일치함을 알 수 있다. 결과적으로 심부에 존재하는 저류층의 경우 상부층들의 압력에 의해 고결성이 증가하여 저류층의 공극수가 가스로 치환되어도 P파 속도의 변화가 크지 않으며 이로 인해 상부층과의 포아송비 차이도 크지 않아 AVO 반응이 약하게 나타날 가능성이 있다.

동해 가스전을 모사한 모델의 AVO 반응

앞에서 분석한 심부저류층 자료의 AVO 반응 특징이 해저면 2 km 부근에 존재하는 동해 가스전에서도 나타날 수 있는지를 확인하기 위하여 동해 고래 V 구조의 시추공에서 얻은 탄성파 반사법 자료와 물리검층 자료를 이용하여 동해 고래 V 구조를 모사한 속도 모델을 구성하였다. 이 속도 모델을 이용하여 합성탄성파 자료를 생성하였으며 현장 자료의 AVO 분석에 적용되는 기본적인 전처리 과정과 AVO 분석을 시행하였다. 이 때 나타나는 AVO 반응을 이론적으로 계산한 결과와 비교·분석하여 심부저류층에서 나타날 수 있는 AVO 반응 분석의 한계점을 고찰하였다.

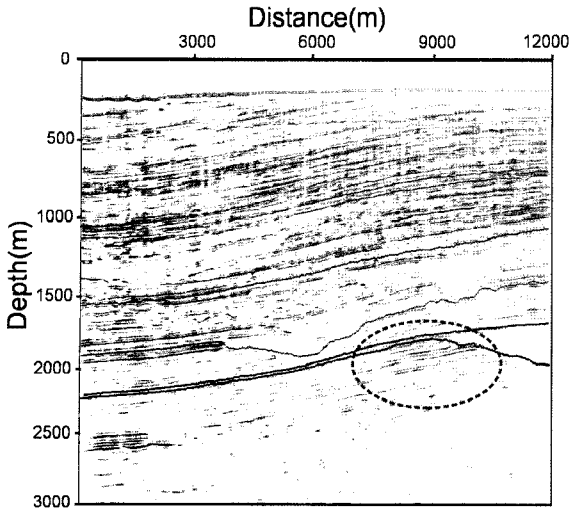

Fig. 6. Final stacked section for Gorae 5 reservoir.

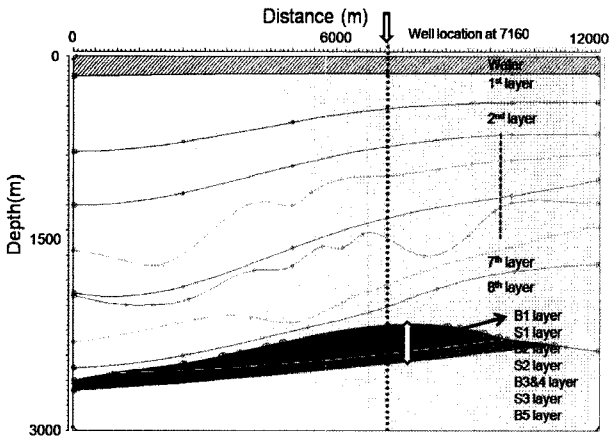

Fig. 7. Velocity model created by using the stacked section in Fig. 6 and geophysical logging data.

모델 설정 및 합성탄성파 자료 생성

Fig. 6은 동해 고래 V구조 지역의 현장 탄성파 탐사 자료를 이용한 최종 중합 단면도이다. 주요 지층의 경계면이 실선으로 표시되어 있고 점선 타원 부분이 가스저류층 지역이다. Fig. 7은 Fig. 6에 보이는 주요 지층의 경계면을 디지타이징(digitizing)하여 지층의 경계면을 만들고 NMO 속도 분석을 통해 얻은 구간 속도를 이용하여 중합단면도의 시간축을 심도에 대해 변환하여 실제 고래 V 구조와 유사하게 만든 2차원 속도 모델이다. 가스저류층 지역의 각각의 덮개암과 가스저류층의 경계면은 물리검층 자료를 참조하여 만들었다. 또한 가스저류층 지역의 각각의 층에 사용될 가스층들의 심도와 매질의 성질들도 가스층에 대한 AVO 반응의 정밀 분석을 위해서 물리검층 자료에 근거하여 Table 2와 같이 제작하였다. 이 때 사용된 시추공의 수평 좌표는 약 7160 m 지점이다. 로깅 자료를 통해서 가스층으로 추정되는 5개의 층을 선택하여 각 각의 층을 B1, B2, B3&4와 B5로 명명하고 Table 2에서처럼 그 속도와 매질의 탄성파 특성을 속도모델에 사용하였다.

본 연구에서는 실제 과거 동해가스전에서 수행된 탄성파 반사법 탐사와 유사하게 Fig. 7에 도시한 속도모델을 이용하여 합성탄성파 자료를 생성하였다. 모델크기는 x 방향으로 13 km, z 방향으로 3.5 km로 설정하였고 첫 번째 송신원은 12 km에 위치하였고 왼쪽 방향으로 5 km까지 20 m 간격으로 이동하였다. 그리고 수신기는 송신원의 좌측에 10 m 떨어지게 위치시켜서 10 m 간격으로 500개를 설정하였다. 즉 마지막 송신 지점인 5 km 지점에서 마지막 수신기의 위치는 0인 지점에 놓이게 하였다. 송신파형은 주파수 영역 안에서 5-10-50-60 Hz의 주파수 대역을 갖는 band-filtered wavelet을 역푸리에 변환하여 사용하였다(Fig. 8). 수치모형 반응계산은 시간 영역 유한차분법으로 작성된 ELA2D 프로그램(Joachin Falk, 1997)을 병렬처리가 가능하도록 수정한 후 40개의 CPU를 이용하여 수행하였다. Fig. 9는 대표적인 공통송신점모음(common shot gather)들을 보여주고 있다. 송신원과 멀리 떨어져 있는 일부

Table 2. Properties of the layers in the velocity model shown in Fig. 11. The properties were extracted from the well logs.

	Depth (m)	Vp (m/sec)	Vs (m/sec)	σ (Poisson' ratio)	Density (g/cc)
Water	0	1500	0	0.250	1.000
1층	135	1730	1000	0.250	1.990
2층	420	1990	1150	0.250	2.100
3층	725	2180	1260	0.250	2.150
4층	960	2390	1380	0.250	2.250
5층	1300	2580	1490	0.250	2.350
6층	1460	2920	1685	0.250	2.420
7층	1780	3290	1900	0.250	2.500
8층	2010	3350	1935	0.250	2.510
B1	2155	3330	1900	0.258	2.350
S1	2185	4280	1925	0.373	2.500
B2	2235	3330	1960	0.235	2.300
S2	2260	4280	1830	0.388	2.350
B3&B4	2270	3330	2050	0.195	2.300
S3	2330	4280	2080	0.345	2.450
B5	2385	3530	2080	0.234	2.300
9	2465	3600	2080	0.250	2.450

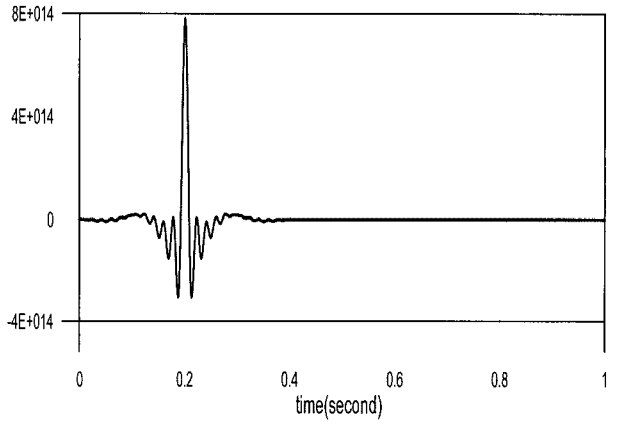

Fig. 8. Band-limited (5-10-50-60 Hz) source wavelet used in the elastic modeling.

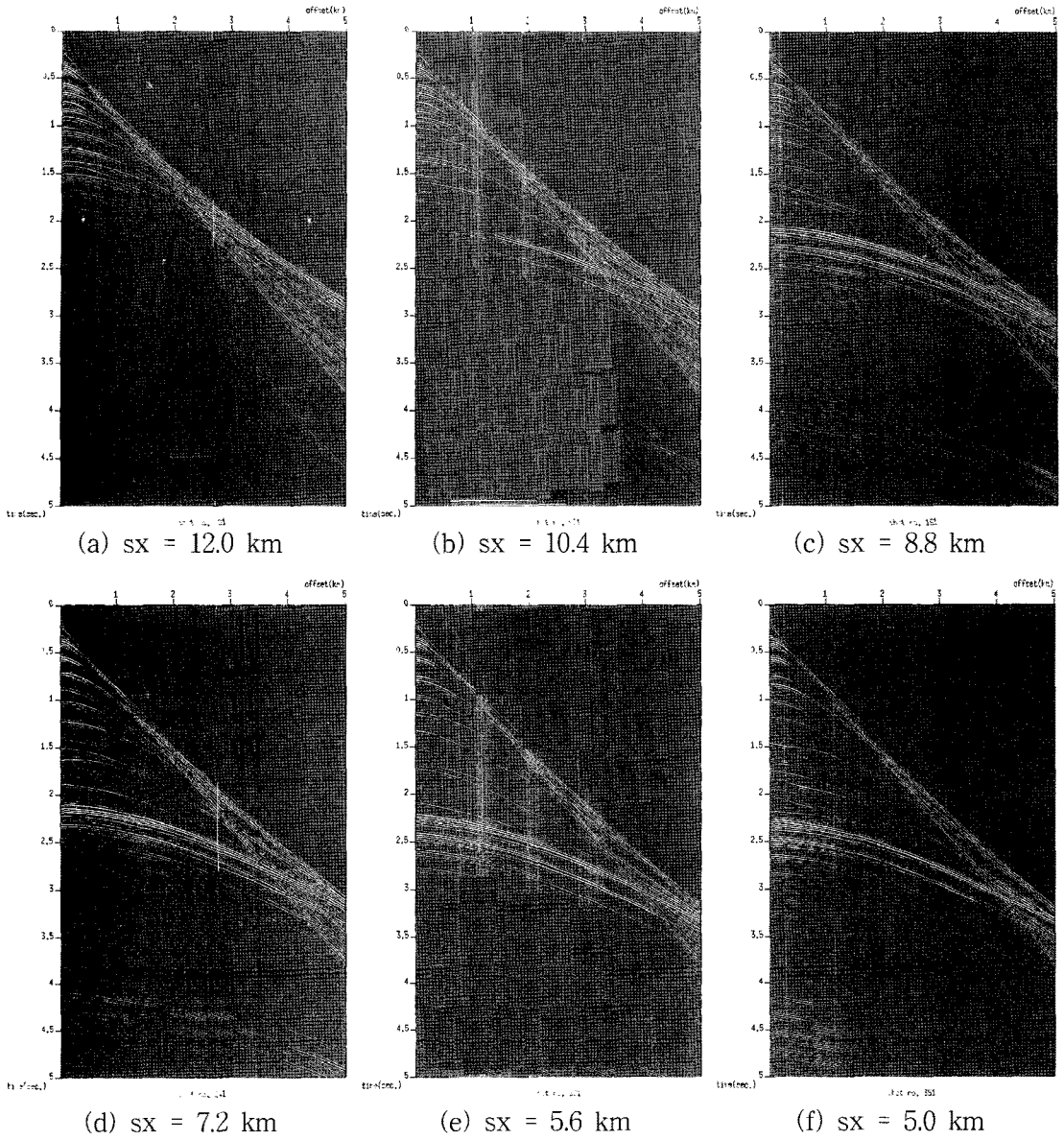

Fig. 9. Common shot gathers created with the velocity model in Fig. 7.

트레이스에서는 직접파와 반사파가 겹쳐져 있으며 이로 인한 AVO 분석 시 진폭의 왜곡을 피하고자 진폭의 왜곡을 자료처리 과정 중에서 직접파를 제거하였다.

이론적인 AVO 반응 계산

합성탄성파 탐사 자료의 AVO 분석에 앞서 Table 2의 가스층과 그 상부층의 매질의 변수들을 이용하여 입사각에 따른 반사진폭의 값을 이론적으로 계산하여 AVO 반응을 예측하였다. 이 때 사용한 Zoeppritz 근사식으로는 Shuey의 근사식을 사용하였다.

먼저 Table 2에서 보듯이 B1층은 상부층(8층)과 가스층간의 P파의 속도차이가 크게 나지 않는다. 따라서 이론적으로 계산된 결과는 수직입사 시 상대적으로 작은 음의 반사계수를 가진다. 또한 포아송비의 차이도 작기 때문에 입사각이 증가할 때 반사계수의 변화는 Fig. 10에서 보는 것과 같이 다른 가스층들에 비하여 매우 작게 나타나 AVO 반응을 관찰하기가 어렵다.

B2층, B3&4층 및 B5층은 상부층과 가스층간의 매질의 성질차이가 확연히 존재하며 수직 입사 시 음의 반사계수를 가지면서 입사각이 증가할수록 반사계수의 절대값이 증가하는 Class 3의 반응을 보인다. 3개의 가스층 중 상부층과의 포아송비 차이가 가장 크게 나는 B3&4층의 AVO 반응이 가장 뚜렷하게 나타나며 포아송비의 차이가 비슷한 B5층과 B2층의 경우는 입사각에 따른 반사계수의 변화량도 비슷하게 나타난다.

동해 고래 V 구조를 모사한 2차원 모델의 AVO 반응

Fig. 7의 2차원 속도 모델로부터 만들어진 합성탄성파 자료에 일반적인 AVO 전처리 과정을 적용하고 분석한 결과를 앞

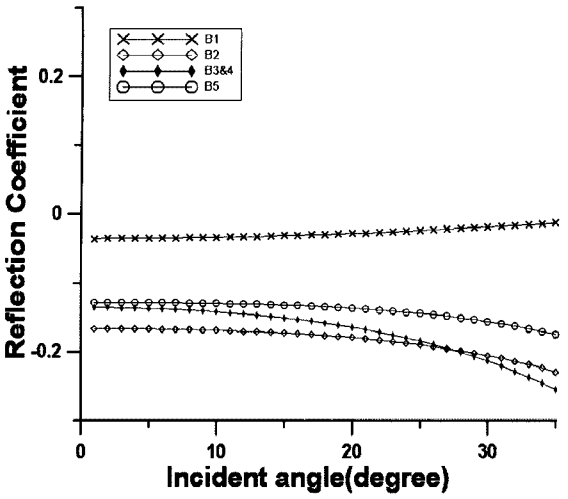

Fig. 10. Theoretical AVO responses at the top boundaries of gas reservoirs.

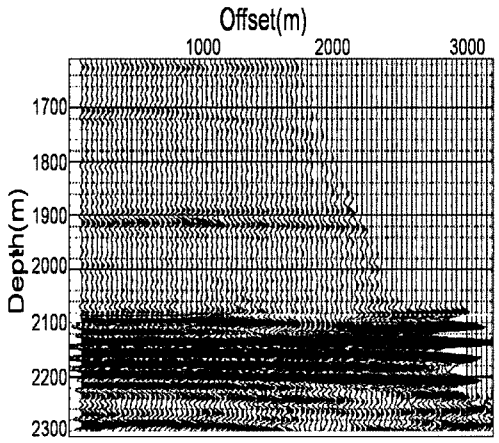

Fig. 11. A common midpoint gather (CMP = 7,000). The red cross line indicates the reflection event from the top boundary of B1 gas reservoir.

의 이론적으로 계산된 AVO 반응과 비교 · 분석하였다. AVO 반응 분석에 앞서 행해지는 전처리 과정에서는 반사층이 얇아서 생긴 직접 파와 하부층에서 생기는 반사파를 구분하기 위해서 중앙값 필터(median filter)를 이용하여 직접파를 제거하였다. 그리고 매질의 특성 이외에 진폭에 가장 큰 영향을 미치는 구형발산으로 인한 진폭 감쇠를 보정(Spherical spreading correction)하였다.

Fig. 11은 NMO 보정된 CMP 7000인 곳의 CMP 단면도를 보여주고 있다. 그림에서의 십자 표시는 B1층의 상부 경계면에서 반사된 이벤트를 표시한 것이다.

전처리 과정을 거친 가스층 B1, B2, B3&4와 B5층과 그 상부층간의 오프셋에 따른 반사 이벤트 진폭의 변화를 Fig. 12부터 Fig. 15에 도시하였다. B1층은 이론적으로 계산된 AVO 반응에서는 입사각 증가에 따른 반사진폭의 변화가 아주 미세하게 나타났다(Fig. 10). 이를 반영하듯 실제 자료의 AVO 분석에서는 Fig. 12(하부 진폭 변화선)에서처럼 Class 4의 AVO 반응 특성을 확인하기가 어렵고 진폭의 변화 또한 특정한 AVO

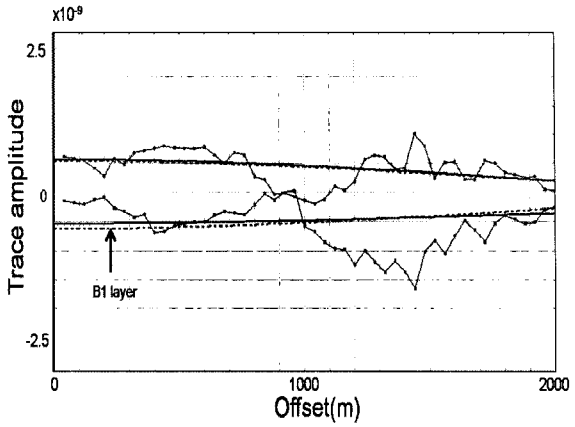

Fig. 12. The variation in the peak amplitude of the reflection event from the top of B1 gas reservoir (Bottom line).

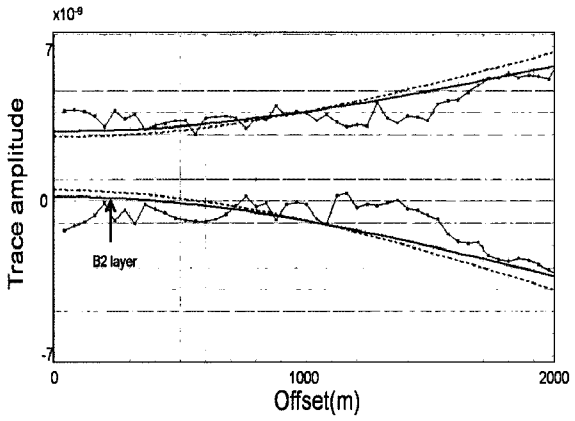

Fig. 13. The variation in the peak amplitude of the reflection event from the top of B2 gas reservoir (Bottom line).

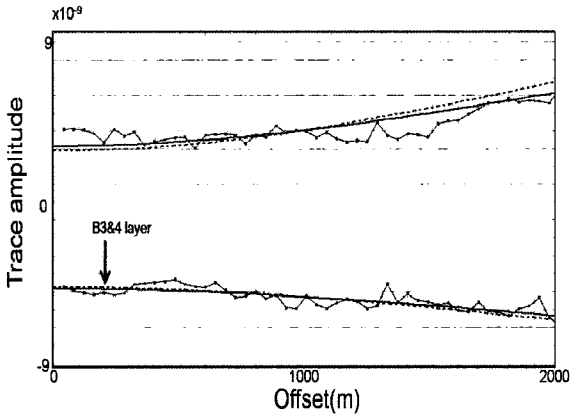

Fig. 14. The variation in the peak amplitude of the reflection event from the top of B3&4 gas reservoir (Bottom line).

분류 경향을 보이고 있지 않다. 물리검층 자료를 토대로 이론적으로 계산된 Fig. 10의 결과 분석에서 AVO 반응이 비교적 잘 나타난 B3&4층은 입사각에 따른 반사 진폭 변화가 Class 3의 경향을 나타내면서 일치하는 결과를 보였다(Fig. 14의 하부 진폭 변화선). 하지만 B3&4층에 비하여 이론 AVO 반응 곡선의 변화가 작았던 B2층의 경우 반사 진폭은 불규칙하게 나타나고 이를 선형화한 곡선과 차이를 보인다(Fig. 13의 하부

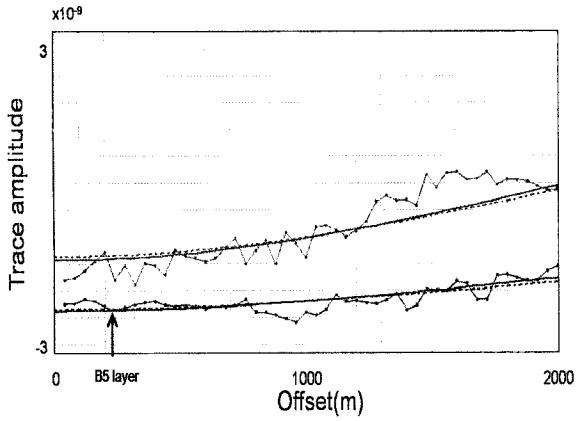

Fig. 15. The variation in the peak amplitude of the reflection event from the top of B5 gas reservoir (Bottom line).

진폭 변화선). 그리고 선형 회귀분석에서 나타나는 오차가 상대적으로 크게 나타나면서 실제 반사진폭의 변화는 특정한 AVO 반응을 보이지는 않는다.

B5층의 경우도 B2층과 마찬가지로 Fig. 15에서 보듯이 전체적으로 진폭이 변하는 경향은 이론적으로 계산했을 때 예측했던 것과 다르게 절대값이 감소하는 Class 4를 보인다. 이렇게 B1, B2, B5의 AVO 반응이 이론적으로 계산된 결과와 다르게 나타난 이유는 입사각에 따른 진폭변화가 너무 작아 잡음이나 전처리 과정 중에 발생한 진폭 왜곡에 의해 그 반응 특성이 가려지기 때문으로 생각된다.

결 론

동해 고래 V구조와 같이 해저면에서 심부에 존재하는 가스저류층의 AVO 분석에서 당면할 수 있는 문제점에 대해 고찰하였다. 또한 고찰한 결과를 확인하기 위하여 고래 V 구조를 모사한 속도모델을 만들고 이를 이용하여 합성탄성파 탐사 자료를 얻었다. 얻은 합성탄성파 탐사자료에 일반적으로 현장 자료에 적용되는 전처리과정과 AVO 분석방법을 수행하여 그 결과를 이론적으로 계산한 결과와 비교・분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 해저면으로부터 심부에 있는 가스저류층의 경우 상부층들의 압력으로 일반적으로 고결 현상이 두드러지며, 바로 상부층과의 탄성파 속도가 크게 차이가 나지 않는다.

2. 저류층 매질이 고결상태인 경우 미고결 상태에 비해 가스가 염수를 치환하며 포화될 때의 탄성파 P파 속도의 감소 정도가 미고결 암석에 비해 현저히 떨어진다. 이로 인해 가스가 포화된 가스저류층의 경우라도 그 상부층과 포아송비에서 큰 차이가 나지 않는다.

3. 상・하부층의 포아송비 차이가 작아질수록 입사각에 따른 반사파 진폭의 변화량도 작아진다.

4. 입사각에 따른 반사파 진폭의 변화량이 작은 경우 잡음이나 전처리 과정 속에서 왜곡된 진폭 변화에 의해 AVO 반응 특성이 가려질 수 있다.

5. 따라서 심부저류층의 경우 정확한 AVO 반응 분석을 위해서는 자료취득 단계부터 정확한 반사파진폭을 획득해야하며 자료처리 과정에서도 반사파 진폭을 보존할 수 있는 기술이 필요하다.

사 사

본 연구는 2007년도 한국석유공사의 지원에 의해 수행되었고('심부 AVO 반응포착을 위한 자료취득 변수설계연구') 이에 감사드립니다. 또한 논문 수정을 도와주신 설순지 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

허식, 유해수, 김한준, 한상준, 이용국, 2004, 동해 울릉분지 남부해역에 분포하는 가스 하이드레이트층의 특성 연구, 한국석유지질학회지, **10**, 19-22.

Aki, K., and Richards, P. G., 1980, Quantitative seismology-Theory and Methods, 1: W. H. Freeman and Co., San Francisco.

Castagna, J. P., Batzle, M. L., and Kan, T. K, 1993, Rock Physics-The Link between rock properties and AVO response; in Castagna, J. P. and Backus, M. M., eds., Offset-dependent reflectivity - Theory and practice of AVO anomalies, Soc. Expl. Geophysics. Investigations in Geophysics no. **8**, 135-171.

Chiburis, E. F., 1993, AVO applications in Saudi Arabia: in Castagna, J. P. and Backus, M. M., eds., Offset-dependent reflectivity - Theory and practice of AVO anomalies, Soc. Expl. Geophysics. Investigations in Geophysics no. **8**, 211-229.

Gardner, G. H. F., Gardner, L. W., and Gregory, A. R., 1974, Formation velocity and density-The diagnostic basics for stratigraphic traps: *Geophysics*, **39**, 770-780.

Hilterman, F. J., 1992, Offshore Korea Block VI-1 Area AVO Final report, KNOC.

Hilterman, F. J., 2000, AVO examples of long-offset 2-D data in the Gulf of Mexico: *The Leading Edge*, **11**, 1200-1213.

Hilterman, F. J., 2001, Seismic Amplitude Interpretation, Soc. Expl. Geophysics. Distinguished Instructor Series, No. **4**.

Joachim Falk, Hard- & Software of AGG Hamburg.: Finite-difference 2D full waveform modelling: ELA2D rel. 1.1, Finite-Difference modelling for 2D heterogeneous isotropic elastic media.

Koefoed, O., 1955, On the effect of Poisson's ratios of rock strata on the reflection coefficients of plane waves: *Geophys. Prosp.*, **3**, 381-387.

Shuey, R. T., 1985, A simplification of the Zoeppritz equations: *Geophysics*, **50**, 609-614.

Zoeppritz, K., 1919, Erdbebenwellen VIIIB, On the reflection and propagation of seismic waves: *Göttinger Nachrichten*, I, 66-84.F.