

셰일가스 저류암 탄성과 특성화: 해설

이광훈^{1)*} · 신창훈²⁾ · 김영완²⁾ · 권영인³⁾

Seismic Characterization of Shale-Gas Reservoirs: A Review

Gwang-Hoon Lee*, Chang-Hoon Shin, Yong-Wan Kim and Young-In Kwon

Abstract : The goals of seismic characterization of shale-gas reservoirs are to delineate natural fractures and predict the rock properties and fracability of the shales. Faults and fracture zones can be identified from coherence-group and curvature attributes. P and S impedances and density from pre-stack inversion can be combined to compute Young's modulus, Poisson's ratio, and other elastic parameters for the prediction of the brittleness and fracability of shale-gas reservoirs. The elastic parameters from pre-stack inversion should be calibrated to represent the values at in-situ conditions. The azimuthal anisotropy due to vertical fractures causes variations of seismic amplitude and velocity with azimuth that can be observed from wide-azimuth seismic data. The fracture density and orientation can be predicted from the azimuthal anisotropy. S-wave data can also help predict the azimuthal anisotropy. The stress state of shale-gas reservoirs estimated from wide-azimuth data can be used to identify areas for fracking.

Key words : Shale gas, Seismic reservoir characterization, Inversion, Azimuthal anisotropy, Seismic attributes

요 약 : 셰일가스 저류암의 탄성과 저류암 특성화(seismic reservoir characterization)란 탄성과 자료를 이용하여 균열(fracture)의 분포 및 방향과 파쇄성(fracability)을 결정하는 취성(brittleness) 및 응력 등을 유추하는 것이다. 탄성과 속성 중에서 일관성(coherence) 계열 속성과 곡률(curvature) 속성이 균열대를 가장 잘 보여준다. 역산 결과물인 P 임피던스, S 임피던스, 밀도로부터 포아송비(Poisson's ratio)와 영률(Young's modulus) 등을 계산하여 취성을 유추할 수 있다. 광방위(wide-azimuth) 탄성과 탐사자료에서 확인되는 균열 암석의 방위 이방성(azimuthal anisotropy)으로부터 자연균열의 분포 및 방향을 예측할 수 있다. 광방위 탄성과 자료는 암석의 응력 예측에도 이용된다. 또한 S파가 수직 균열이 발달한 암석을 지날 때 분할(splitting)된다는 성질로부터 암석의 방위 이방성을 유추하고 따라서 균열의 분포 및 방향을 예측할 수 있다.

주요어 : 셰일가스, 탄성과 저류암 특성화, 역산, 방위 이방성, 탄성과 속성

서 론

저류암 특성화(reservoir characterization)란 다양한 지질 및 지구물리학적 자료를 분석하여 저류암의 분포, 암상, 공극률, 공극내의 유체 등에 대한 정보를 유추하는 것이다. 셰일가스 저류암의 경우는 저류암과 근원암이 동일하며 공극률(porosity)이 10% 이하로 높지 않고 공극의

크기도 작고 연결되어 있지 않아서 투과도(permeability)가 0.01 md 이하로 매우 낮다(Lewis *et al.*, 2004). 따라서 셰일가스 저류암의 경우 사암이나 석회암과 같은 일반적인 저류암과 다르게 자연균열(natural fracture)의 분포와 수압파쇄(hydraulic fracturing)로 파쇄균열(induced fracture)이 발달할 수 있는 정도, 즉 파쇄성(fracability)을 판단하는 것이 가장 중요하다. 그러므로 셰일가스 저류암의 탄성과 저류암 특성화란 탄성과 자료로부터 자연균열의 분포, 밀도, 방향과 파쇄성을 결정하는 취성(brittleness) 및 응력 상태(stress state) 등을 유추하는 것이라고 할 수 있다. 특히 탄성과 저류암 특성화에서 시추공 물리검층 자료를 추가적으로 이용할 경우 더욱 정확한 해석이 가능하다.

탄성과 자료에서 셰일가스 저류암의 개별적인 자연균열은 직접 관찰이 불가능하지만 균열을 포함하는 단층이

2012년 9월 27일 접수, 2012년 11월 23일 심사완료
2013년 2월 14일 게재확정

- 1) 부경대학교 에너지공학과
- 2) 한국가스공사 연구개발원
- 3) (주)지오스캔

*Corresponding Author(이광훈)

E-mail; gwanglee@pknu.ac.kr

Address; Department of Energy Resources Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

나 균열대 또는 균열이 집중적으로 분포하는 스위트 스팟(sweet spot)은 일차적으로 중합후(post-stack) 자료의 탄성과 속성(seismic attribute)으로부터 유추할 수 있다(Chopra and Marfurt, 2007a). 또한 중합전(pre-stack) 탄성과 자료로부터 암석의 강도(rock strength)를 유추하여 세일가스 저류암의 취성을 계산할 수 있다(Gray *et al.*, 2010). 그리고 탄성과 반사 신호가 입사각뿐 아니라 방위(azimuth)에 따라 다르다는 성질, 즉 암석의 방위 이방성(azimuthal anisotropy)의 영향을 받는 것을 이용하여 광방위(wide-azimuth) 탄성과 탐사자료로부터 자연균열의 분포와 방향, 응력 상태를 예측할 수 있다(Gaiser, 2003). 일반적으로 3성분(3-component, 3C) 자료를 취득하는 수직 탄성과 탐사(vertical seismic profiling, VSP)로부터 시추공 주변 지역의 방위 이방성을 유추할 수 있다. 광방위 탄성과 탐사자료는 세일가스 저류암의 균열 양상을 결정하는 수평 응력을 유추하는데도 이용된다. 다성분(multi-component) 탄성과 탐사로 취득된 S파(횡파) 자료로부터는 취성 계산에 필수적인 S파 속도를 직접적으로 얻을 수 있을 뿐 아니라 방위 이방성을 예측하여 자연균열의 분포밀도 및 방향을 유추할 수 있다(Kendall, 2006). 본 논문에서는 탄성과 탐사자료를 이용하는 다양한 세일가스 저류암의 특성화 기법에 대해서 검토하였다. 세일가스 저류암에 특성화를 위한 시추공 물리검층 기술은 Hwang과 Jin(2012)의 기술동향 논문에 종합적으로 정리되어 있으므로 참고할 수 있다.

균열대(fracture zone) 지시자로서의 탄성과 속성(seismic attributes)

탄성과 속성이란 탄성과 자료로부터 직접 관찰할 수 있거나 계산할 수 있는 정량적 성질로서 지층의 지질학적 및 구조적 특징을 보다 잘 드러나게 하여 자료 분석을 도울 수 있는 모든 것을 지칭한다(Taner, 2001; Chopra and Marfurt, 2007a). 다양한 탄성과 속성 중에서 인접한 탄성과 트레이스(trace)들을 함께 분석하여 기하학적(geometrical) 특징을 계산하는 기하학적 탄성과 속성이 세일가스 저류암의 단층과 균열대를 유추하는데 효과적이다. 기하학적 탄성과 속성 중에서 특히 탄성과 트레이스들의 유사성을 지시하는 일관성(coherence) 계열의 속성과 곡률(curvature) 속성이 균열대의 공간적 분포를 잘 지시한다(Chopra and Marfurt, 2007a). 그러나 소규모의 단층이나 간극(aperture)이 수 mm 이하인 균열은 일반적으로 해상도가 20-30 m인 탄성과 자료에서는 직접 확인할 수 없으며, 따라서 탄성과 속성은 소규모 단층이나 균열이 집중적으로 분포하는 균열대의 누적된 효과

(cumulative effect)를 지시하는 것이라고 할 수 있다(Wild, 2011). 탄성과 속성은 자연 균열대를 인지하는데는 효과적이지만 수압파쇄로 형성되는 파쇄 균열의 발달을 미리 예측하기는 어렵다.

일관성 계열의 속성은 또한 반대로 불연속 속성(discontinuity attribute)이라고도 하며 일관성(Bahorich and Farmer, 1995), 셈블런스(semblance)(Lees, 1999), 분산(variance)(van Bemmell and Pepper., 2000), 유사도(similarity) 등이 있는데 지질학적 경계나 단층과 같은 불연속 특성을 잘 보여준다. 일반적으로 값이 1일 때 유사도가 최고로서 모든 트레이스들이 동일한 것이며 값이 0이면 모든 트레이스들이 전혀 다른 것이다. Fig. 1은 미국 오클라호마주의 Woodford 세일층에서 취득한 3차원 탄성과 자료의 분산 및 일관성 속성 반사면과 탄성과 단면으로서 균열대를 잘 확인할 수 있다.

앤티-트래킹(Ant-tracking)은 슬럼버저(Schlumberger)사의 특허 기술로서 일관성 계열 속성의 3차원 자료에서 단층이나 균열대 또는 다른 선구조들을 추출하는 기법이다

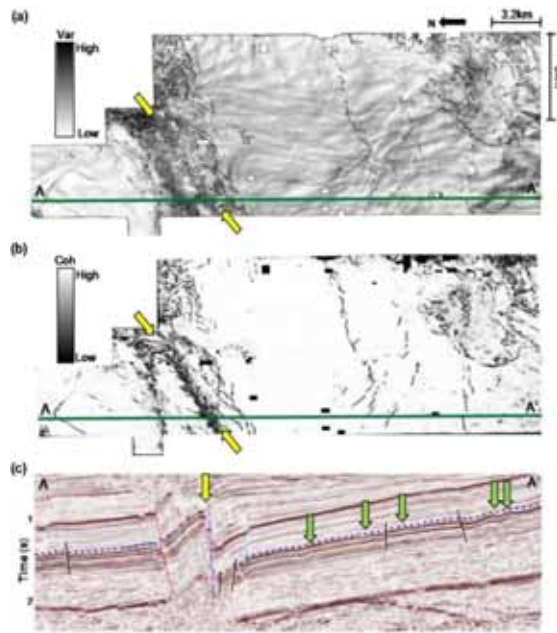


Fig. 1. Horizon slices of (a) variance and (b) coherence along top Woodford Shale and (c) seismic vertical section AA' with faults and fractures interpreted. Blue dots indicate top Woodford Shale. Yellow arrows indicate highly deformed area. Green arrows indicate subtle anticline folds. Two attributes provide good delineation of fracture distribution. From Guo *et al.*, (2010). Image courtesy of CGGVeritas. Used by permission.

다. 마치 개미가 서로 연락하면서 가장 효과적인 경로를 따라서 이동하는 것처럼 불연속면들이 추적되어 단층면 또는 균열대를 상세하게 파악할 수 있다. Fig. 2는 시추공 위치에서 지층 미세주사 이미지(formation micro-scanner image, FMI) 검층 자료로부터 관찰된 높은 밀도의 균열분포와 앤트(ant) 밀도의 높은 값이 일치하는 것을 보여주고 있다.

일관성 계열의 속성이 균열대를 유추하는데 매우 유용함에도 불구하고 균열대나 단층뿐 아니라 단순히 모든 탄성파적인 불연속을 나타낸다. 반면에 곡률 속성은 지층면의 특정 지점이 얼마나 휘어있는가, 즉 구조적인 변형을 나타내는 것으로서 트레이스들의 일관성 또는 유사성과 무관하게 지층면의 기하학적 변화를 지시할 수 있다(Chopra and Marfurt, 2007a). 일관성 계열의 속성은 상대적으로 변위가 큰 단층이나 선구조들을 보여줄 수 있지만 곡률 속성은 균열대의 분포와 밀접한 관련이 있는 감지하기 어려운 정도의 작은 습곡 구조(fold)나 굴곡 구조(flexure)를 보여줄 수 있어서 단층과 균열대의 상세한 분포를 유추할 수 있는 가장 효과적인 탄성과 속성이 다(Al-Dossary and Marfurt, 2006; Blumentritt *et al.*, 2006; Chopra and Marfurt, 2007a; Guo and Marfurt, 2011). 일반적으로 습곡 정도가 클수록 균열 밀도가 높은 것으로 알려져 있다(Lisle, 1994). 그러나 곡률 속성이 균열을 직접 지시하는 것이 아니며 균열 밀도와 구조 변형의 정도가 서로 직접적인 관련이 있기 때문에 균열대의 분포를 예측할 수 있는 것이다. 곡률 속성에는 평균 곡률, 최대 곡률, 주향 곡률, 경사 곡률, 가우시안 (Gaussian) 곡률, 최대 음곡률(most negative curvature),

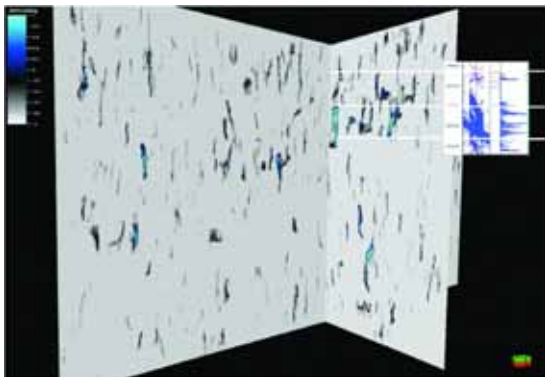


Fig. 2. Section view of Ant density cube with formation micro-scanner image (FMI) interpretation of fracture density (right track) overlain. Higher Ant density at well location coincides with high fracture density determined from FMI data. From Godfrey and Bachrach (2008). Used by permission.

최대 양곡률(most positive curvature) 등이 있는데 특히 최대 음곡률과 최대 양곡률이 단층과 균열대, 습곡, 굴곡 구조 등을 유추하는데 가장 유용하다(Chopra and Marfurt, 2007a)(Fig. 3). 최대 음곡률과 최대 양곡률은 각각 지층면의 한 점에서 음의 방향으로 가장 큰 그리고 양의 방향으로 가장 큰 곡률이다. 따라서 최대 음곡률이라도 양의 값을 가질 수 있고 최대 양곡률이라도 음의 값을 가질 수 있다. Fig. 4는 탄성과 단면에서 확인되는 단층이나 균열대와 관련된 미세한 굴곡들이 곡률 속성에 서 매우 뚜렷하게 드러나는 것을 보여주는 예이다.

세일가스 저류암의 암석 성질 유추

세일가스 저류암의 주요 암석 성질을 알면 자연균열이 잘 발달되어 있을 가능성이 높은 곳을 예측할 수 있을

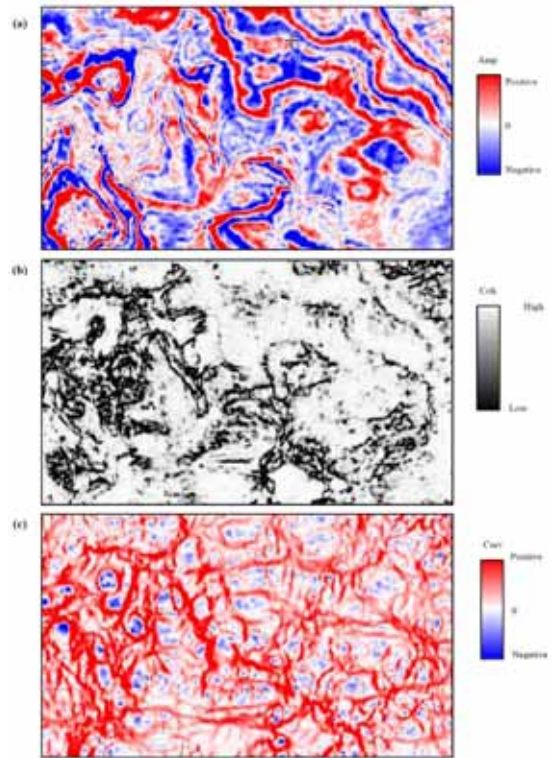


Fig. 3. Time slices through (a) seismic amplitude, (b) coherence, and (c) most-positive curvature volumes. While coherence display is featureless in high coherence (white) areas, most-positive curvature reveals NS flexures in those areas. Curvature display also shows through-going EW flexure in southern part of area. From Chopra and Marfurt (2007b). Used by permission.

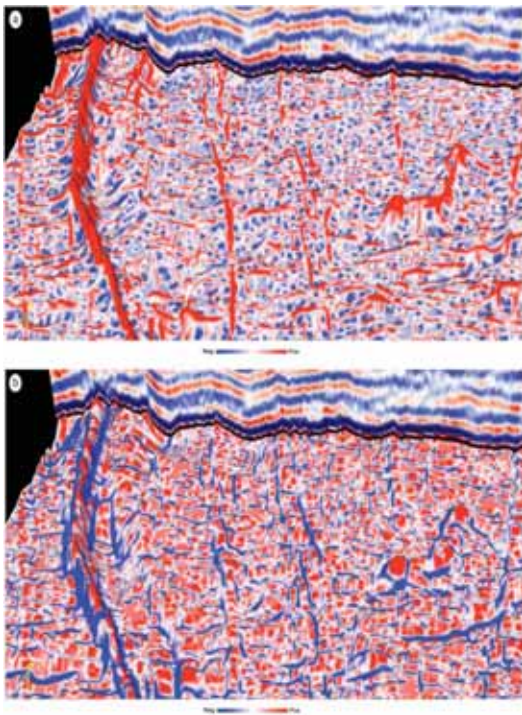


Fig. 4. (a) Most-positive curvature attribute horizon slice shown intersected with seismic section. (b) Most-negative curvature attribute horizon slice shown intersected with seismic section. Curvature attributes reveal very small peaks and troughs in seismic section, which are associated with faults and fracture zones. From Chopra and Marfurt (2007c). Used by permission.

뿐만 아니라 수압파쇄로 형성되는 파쇄균열의 진행 정도 및 방향 등도 예측할 수 있다. 탄성과 탐사자료 분석 방법 중에서 특히 역산이 암석의 성질을 유추하는데 가장 효과적인 기술이다(Pendrel, 2006). 탄성과 역산을 위해서는 기본적으로 탄성과 탐사자료와 시추공 음향(sonic) 검층 및 밀도(density) 검층 자료가 필요하다. 중합후 자료의 경우 역산 결과물이 밀도와 P파 속도의 곱인 음향 임피던스(acoustic impedance), 즉 P 임피던스로서 암석의 성질을 지시하는 중요한 물리량이다. 셰일가스 저류암은 밀도가 낮은 유기물을 함유하고 있어서 일반적으로 P 임피던스의 값이 낮다(Løseth *et al.*, 2011). 또한 균열이 발달한 곳이 낮은 P 임피던스 값을 보이는 것으로 알려져 있다(Rutledge and Phillips, 2003; Guo and Marfurt, 2011; Refunjol *et al.*, 2011)(Fig. 5). 그러나 P 임피던스만으로는 균열 발달을 결정하는 취성을 유추하는데 필수적인 영률(Young's modulus)과 포아송비(Poisson's ratio)를 계산할 수 없다. 영률은 탄성체인 암석의 강도(stiffness)를 나타내며 포아송비는 암석의 횡변형과 종변형의 비율이다. 따라서 셰일가스 저류암의 특성화를 위해서는 P 임피던스뿐만 아니라 S 임피던스와 밀도를 유추할 수 있는 중합전 역산이 보편적으로 수행된다.

중합전 역산은 P 임피던스와 S 임피던스를 개별적으로 계산하는 방법과 P 임피던스, S 임피던스, 밀도를 동시에(simultaneous) 계산하는 방법이 있는데 밀도까지 계산이 가능한 동시 계산법이 주로 이용되고 있다(Hampson-Russell, 2007). 중합전 역산의 가장 보편적인 알고리즘은 물리검층 자료를 이용하여 구성된 P 임피던스와 S 임

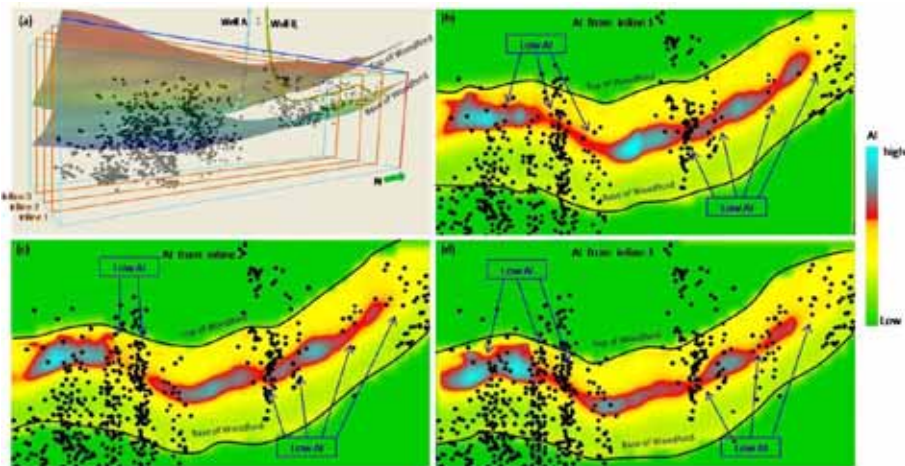


Fig. 5. (a) Microseismic events from two hydraulic fracturing wells. (b)-(d) Acoustic impedance images from three inline sections with microseismic events displayed in foreground. Majority of microseismic events are located in low impedance zones. From Guo and Marfurt (2011). Used by permission.

피턴스 모델로부터 반사계수를 계산하고 탄성과 자료에서 추출한 파형과 컨볼루션(convolution)한 후에 실제 종합전 탄성과 자료와 비교하여 차이를 최소화하도록 P 임피턴스와 S 임피턴스 모델을 반복적으로 수정하는 것이다(EERL, 2006). 종합전 역산으로 계산되는 P 임피턴스, S 임피턴스, 밀도로부터 라메 상수(Lamé parameter)인 λ (incompressibility, 비압축성)와 μ (rigidity, 강성률)도 계산할 수 있다(Goodway *et al.*, 1997; Schmid and Schmidt, 2011). λ 는 공극내의 유체에 민감하고 μ 는 입자들의 연결성에 영향을 받는다(Dufour *et al.*, 2002). Chopra 등(2003)은 P파 속도와 S파 속도의 교차도시(crossplot)와 $\lambda\rho$ 와 $\mu\rho$ 의 교차 도시로부터 가스를 함유하고 있는 Barnett 셰일층과 다른 암상의 층들을 구별할 수 있었으며, Refunjol 등(2011)은 $\lambda\rho$ 와 $\mu\rho$ 의 값이 작은 곳에서 파쇄균열이 보다 잘 발달하는 것을 확인하였다. 만약 다성분 탄성과 자료를 취득했다면 직접적인 S파 자료가 있으므로 보다 정확하게 S 임피턴스를 계산하여 셰일가스 저류암의 암성 유추에 이용할 수 있다. 다성분 탄성과 탐사에 대해서는 탄성과 이방성을 다루는 단원에서 보다 상세히 다룬다.

영률은 종합전 역산 결과인 물리량들의 일차원적인 조합으로부터 계산할 수 있으며(Schmid and Schmidt, 2011), 포아송비는 P파 속도와 S파 속도로부터 계산된다. 포아송비는 응력을 받은 암석에서 얼마나 잘 균열이 형성되는지를 결정하고 영률은 발생한 균열이 얼마나 잘 유지되는지를 결정한다(Rickman *et al.*, 2009). 포아송비가 작을수록 영률은 클수록 암석의 취성이 크며, 취성이 큰 셰일일수록 자연균열의 가능성이 높고 수압파쇄

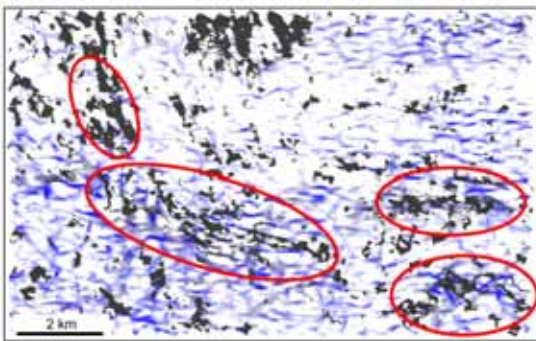


Fig. 6. Brittleness (black) and most-negative curvature (blue and white) of top of a reservoir. Brittle zones, marked by red ellipses, generally coincide with large values (blue) of most-negative curvature. Data courtesy of Nova Scotia Department of Energy and Canada Nova Scotia Offshore Petroleum Board.

에 의한 파쇄균열이 잘 발달한다. 일반적으로 파쇄성이 높은 셰일가스 저류암의 경우 포아송비는 약 0.25 이하, 영률은 약 25 GPa(약 3.5 MMPSI) 이상 이다(Britt and Schoeffler, 2009; Sondergeld *et al.*, 2010). 탄성과 자료에서 계산된 포아송비와 영률은 실제 저류암 조건에서의 값과 다르기 때문에 현장값으로 보정을 해주어야 한다(Britt and Schoeffler, 2009). 특히 영률은 탄성과 자료에서 계산된 값이 저류암 조건에서의 값의 거의 두 배가 될 수 있다. Fig. 6은 셰일층의 영률과 포아송비가 각각 25 GPa 이상, 0.25 이하인 부분과 최대 음곡률 속성을 함께 도시한 예로서 취성이 높은 부분과 최대 음곡률 값이 큰 부분이 대체로 일치함을 보여주고 있다.

방위 이방성(azimuthal anisotropy)을 이용한 균열 방향 및 밀도 유추

층이 발달해 있는 암석은 횡등방성(transverse isotropic) 매질로서 대칭축이 수직이면, 즉 수직의 축에 대해서 횡방향으로 등방성인 경우 수직 횡등방성(vertically transverse isotropic, VTI) 매질이라고 하며 대칭축이 수평이면, 즉 수평축에 종방향으로 등방성인 경우 수평 횡등방성(horizontally transverse isotropic, HTI) 매질이라고 한다(Zheng, 2006). 따라서 수직 방향의 균열이 발달해 있는 일반적인 셰일가스 저류암은 HTI 매질이다. 탄성과 균열이 발달한 매질을 이동할 때 균열에 입사하는 방향에 따라 다르게 기록되어 일반적으로 알려진 것처럼 입사각뿐 아니라 방위각에 따라 탄성과 신호가 달라진다. 그러므로 셰일가스 저류암의 방위 이방성을 이해하면 이미 분포하고 있는 자연균열의 방향 및 분포 밀도를 유추할 수 있으며 파쇄균열의 발달 방향도 예측이 가능하다. 이러한 방위 이방성을 분석하기 위해서는 광방위 탄성과 탐사를 수행해야 한다. 그리고 수직 방향의 균열이 수직으로 입사한 S파가 속도가 다른 두 개의 파로 분할(splitting 또는 birefringence)되는 현상을 야기하기 때문에 VSP를 포함하는 다성분 탄성과 탐사의 S파 기록으로부터 셰일가스 저류암의 이방성을 보다 정확하게 유추할 수 있다(Kendall, 2006). 본 논문에서는 시추공 주변의 제한적인 지역에 대한 방위 이방성을 유추하는 VSP는 다루지 않는다.

광방위 탄성과 탐사자료를 이용한 이방성 유추

암석의 방위 이방성 때문에 발생하는 탄성과 신호의 변화는 각각의 오프셋에 대해서 방위각에 따른 진폭변화(amplitude variation with azimuth, AVAZ)와 전달 시간, 즉 속도의 변화(velocity variation with azimuth,

VVAZ)로 관찰된다(Lynn *et al.*, 1996; Mallick *et al.*, 1996; Craft *et al.*, 1997; Rüger, 1998). AVAZ와 VVAZ는 중합전 탄성과 자료를 공통 오프셋-공통 방위각(common-offset-common-azimuth, COCA)으로 도시하면 관찰할 수 있다(Fig 7 and 8). 탄성과 속성과 마찬가지로 AVAZ

와 VVAZ도 개별적인 균열이 아니라 균열대의 누적 효과 결과이다(Gray, 2008). 또한 균열이 수직이거나 수직에 가깝게 발달하여 세일가스 저류암이 HTI 매질이어야 한다. AVAZ와 VVAZ 분석을 위해서는 광방위 탄성과 탐사가 수행되어야 하는데 통상적으로 취득되는 제한적 방위의 P파 탄성과 자료와 비교하여 자료준비, 편집, 처리, 분석 등에 훨씬 많은 시간이 필요하다. 북미 지역에서 수행된 많은 육상 3차원 탄성과 탐사의 경우는 전통적으로 방위각의 범위가 30도 이상인 광방위 탐사였기 때문에 기존의 자료를 광방위 자료처리를 통하여 분석할 수 있다(Gray, 2008).

AVAZ는 균열이 발달한 암석의 경우 균열의 방향과 나란한 방향보다 수직 방향에 대해서 강도가 낮고 순응하여 수직방향의 응력에 보다 잘 반응하기 때문에 균열이 발달한 세일가스 저류암에 서로 다른 방향으로 입사한 탄성파가 서로 다른 탄성과 진폭으로 기록되는 것이다(Gray, 2008)(Fig. 9 and 10). AVAZ 자료 분석법은 일반적으로 광방위 탄성과 자료로부터 영오프셋(zero-offset) 진폭(또는 절편), 등방성 변화도(isotropic gradient), 이방성 변화도(anisotropic gradient), 대칭축(symmetry axis)을 유추하는 것이다(Rüger, 2002). 균열의 방향과 수직인 대칭축으로부터 균열의 방향을 유추하고 이방성 변화도로부터 균열 밀도를 유추할 수 있다(Fig. 11 and 12). 일반적으로 방위각의 범위가 클수록 신호대잡음비(signal to noise ratio, S/N)가 높아서 좋은 AVAZ 분석 결과를 얻는다(Gray, 2008).

VVAZ 자료(Fig. 13) 분석법에는 크게 (1) 수직경로시차(normal moveout, NMO) 속도법, (2) 잔여 경로시차(residual moveout) 법, 그리고 (3) Thomsen 요소(Thomsen's parameter δ)(Thomsen, 1986) 역산법이 있다. 수직경로시차 속도법에서는 균열 저류암의 하부 경계면 반사신호의 방위각에 따른 수직경로시차 속도 변화를 측정하는데(Tsvankin, 1997) 균열의 방향과 나란하게 이동하는 P파가 수직방향으로 이동하는 P파보다 빠르기 때문에 빠른 수직경로시차 속도가 균열의 방향과 나란한 것이라고 가정한다(Lynn, 2004). 따라서 빠른 수직경로시차 속도와 느린 수직경로시차 속도의 차이가 균열 밀도를 지시한다. 그러나 이 방법은 일반적으로 정확한 속도 분석이 쉽지 않기 때문에 이방성을 판단하는데 적합하지 않을 수 있다(Zheng, 2006). 잔여 경로시차법은 모든 방위에 대해서 평균으로 계산된 등방성 속도로 수직경로시차 보정이 이루어진 광방위 탐사자료에서 균열 저류암의 하부 경계면의 잔여 경로시차를 측정하는 것이다(Li, 1999). 잔여 경로시차는 방위각에 대해서 사인파 모양의 곡선 형태를 보이는데 가장 음의 값이 큰 경로시차가 최소 전

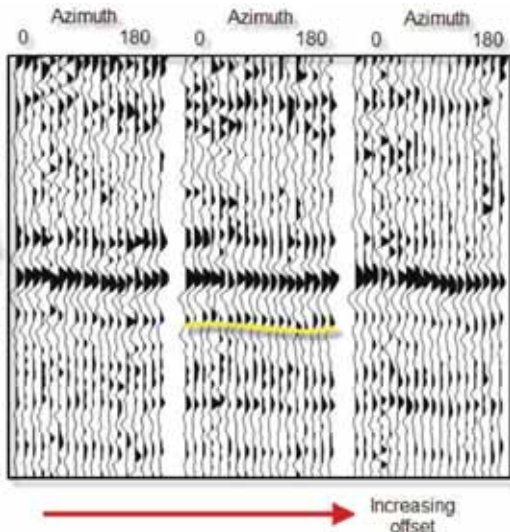


Fig. 7. Common-offset-common-azimuth (COCA) plot illustrating traces from specific offset ranges arranged by azimuth. In horizontally transverse isotropic (HTI) media, horizontal reflectors appear as sinusoidal events in COCA plot. From Close *et al.*, (2010). Used by permission.

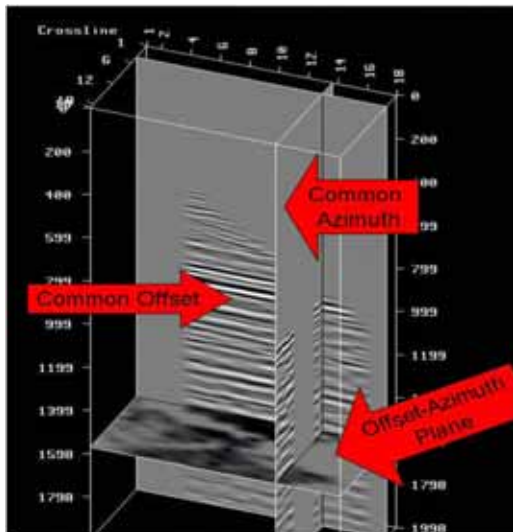


Fig. 8. Common-offset-common-azimuth (COCA) cube displayed in 3D. From Gray (2007). Used by permission.

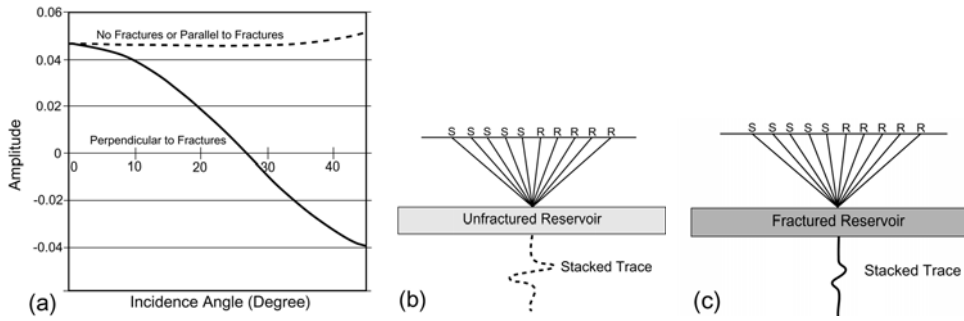


Fig. 9. (a) Amplitude variation with offset (AVO) for the interface between unfractured seal and an unfractured and fractured reservoirs, assuming that the acoustic impedance of the reservoir is slightly greater than that of the seal. If the reservoir is unfractured or the incident P-wave strike the fractures in the fractured reservoir at or near zero degree, there is little AVO response and stacking produces a large amplitude (b). If the incident P-wave perpendicularly strike the fractures, there is a strong AVO response, resulting in a very low amplitude in the stacked trace (c). Adapted from Williams and Jenner (2002).

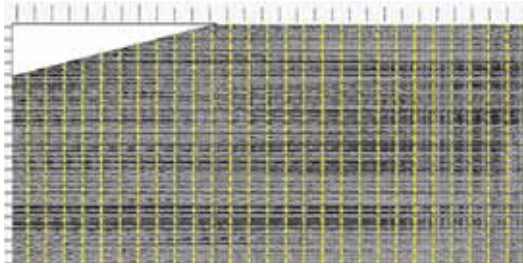


Fig. 10. Common-offset-common-azimuth (COCA) data, showing azimuthal amplitude anisotropy, displayed in 2D with offsets increasing from right to left. Yellow lines divide individual common-offset data sets and each common-offset data set contains 0-180 degree azimuths. Amplitude variation with azimuth (AVAZ) is seen at longer offsets. From Gray (2007). Used by permission.

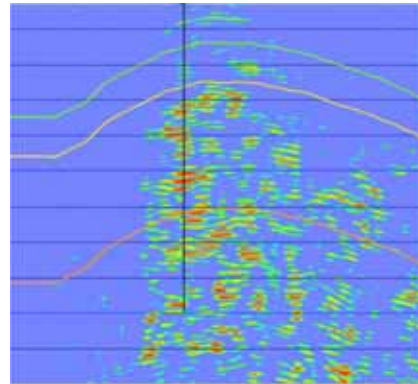


Fig. 12. Amplitude variation with azimuth (AVAZ) fracture density section. Well indicated by the black line penetrated stacked large fracture density anomalies (red). From Gray (2008). Used by permission.

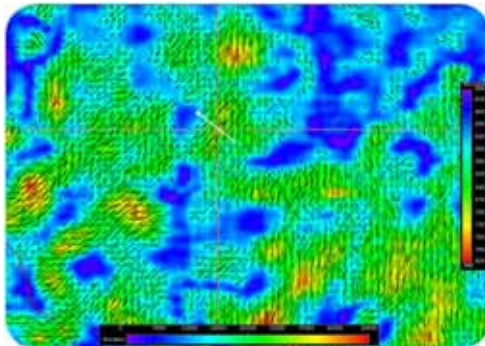


Fig. 11. Fracture density and orientation predicted from amplitude variation with azimuth (AVAZ). Well path, marked in white, crosses reservoir at cross-hairs indicating moderately intense fracturing with strike of NNE at well location. Image courtesy of CGGVeritas. Used by permission.

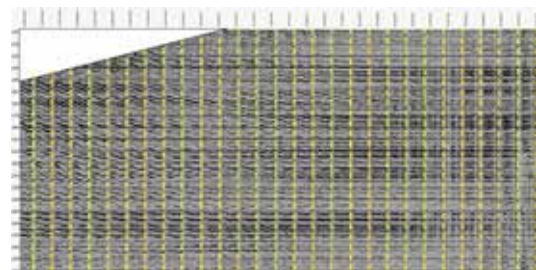


Fig. 13. Common-offset-common-azimuth (COCA) data, showing azimuthal velocity anisotropy, displayed in 2D with offsets increasing from right to left. Yellow lines divide individual common-offset data sets and each common-offset data set contains 0-180 degree azimuths. Velocity variations with azimuth, observable as wobbles across reflections, are seen at longer offsets. From Gray (2007). Used by permission.

달시간으로서 균열의 방향을 지시하며 경로시차의 절대 크기는 균열 밀도를 지시한다. Thomsen 요소 역산법 (Zheng, 2006)은 균열 저류암의 상부 경계와 하부 경계의 잔여 수직경로시차의 차이를 이용하여 Thomsen의 HTI 요소인 δ 를 직접 역산으로 계산하는 것이다. 역산 과정에서 공심점 모음(CDP gather)의 모든 방위각과 오프셋에 대한 전달시간이 이용된다. VVAZ는 속도변화가 충분히 인지될 수 있을 정도의 비교적 두꺼운 자연균열 저류암의 평균적인 균열 특성을 유추하는데 적합하다 (Xu and Tsvankin, 2007; Treadgold *et al.*, 2008). 또한 탄성파의 속도가 응력의 증가에 따라서 증가하며 최대 응력 방향으로 최대의 속도를 갖는다는 성질을 이용하면 현재의 응력 상태를 유추할 수 있으므로 파쇄균열의 방

향을 예측할 수 있다. Fig. 14는 VVAZ 분석으로 예측한 균열 밀도이다. VVAZ 결과물의 해상도는 보통 탄성파 자료의 해상도에 준하는 해상도를 갖는 AVAZ보다 낮다(Xu and Tsvankin, 2006)(Fig. 15).

S파 자료를 이용한 이방성 유추

P파 자료를 이용하여 세일가스 저류암의 균열을 예측하려면 광방위 탐사를 수행하여 탄성파 진폭과 속도를 정밀하게 분석해야 하지만 S파 자료가 있으면 보다 직접적이고 정확하게 균열을 분석할 수 있다. 일반적으로 S파 자료는 다성분 탄성파 탐사에서 P파 자료와 함께 취득한다. P파가 수직성분을 기록하는 반면에 S파는 다른 두 방향의 신호도 기록하므로 매질의 방향에 따른 특성을 보다 잘 파악할 수 있다. 세일가스 저류암처럼 수평적으로 층을 이루고 있는 매질의 경우 P파 신호는 매질의 수직방향 반응을 기록하고 S파 신호는 층에 나란한 방향의 반응을 기록한다. 진동 방향에 따라 S파는 다시 SH파와 SV파로 구분되는데 SH파는 매질이 음원, 반사점, 수신기로 정의 되는 수직면에 수직 방향으로 진동하고 SV파는 매질이 이 수직면에 한정되어서 파선에 수직으로 진동한다(Fig. 16). 이론적으로는 다성분 탄성파 탐사에서 수직 및 수평 두 방향의 음원, 즉 세 방향의 음원을 이용하여 각각에 대해서 다시 다른 3성분(3-component, 3C) 신호를 기록하면 총 9성분(9-component, 9C)의 다른 탄성파 기록이 가능하다. 그러나 현실적으로는 수직 성분인 P파 음원을 이용하여 매질의 반사면에서 반사된 P파와 S파로 변환된 것을 기록한다(Cary, 2001). 따라

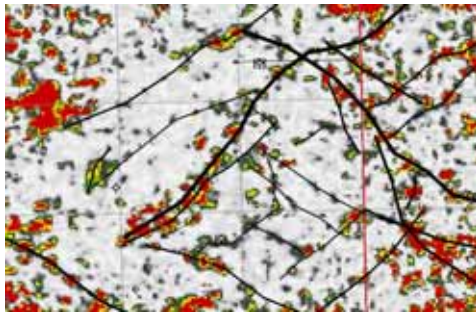


Fig. 14. Fracture density from velocity variation with azimuth (VVAZ). Fracture trends show good correlation with faults. Image courtesy of Arcis Seismic Solutions. Used by permission.

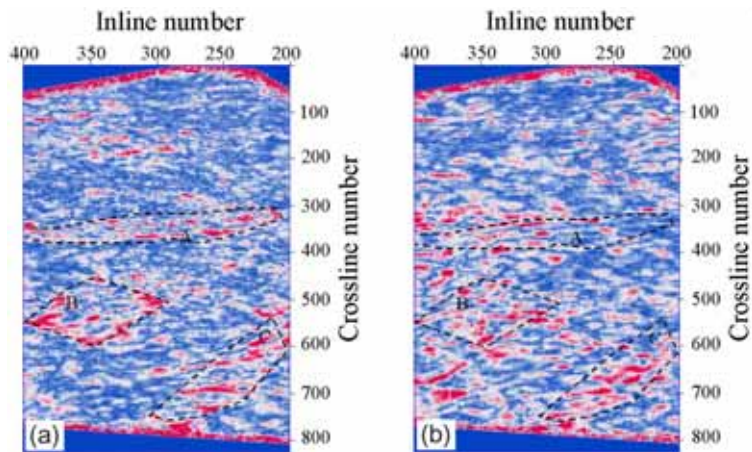


Fig. 15. (a) Fracture density from velocity variation with azimuth (VVAZ). (b) Fracture density from amplitude variation with azimuth (AVAZ). Three zones, marked by A, B, and C, with large fracture density are predicted. From Wang *et al.*, (2007). Used by permission.

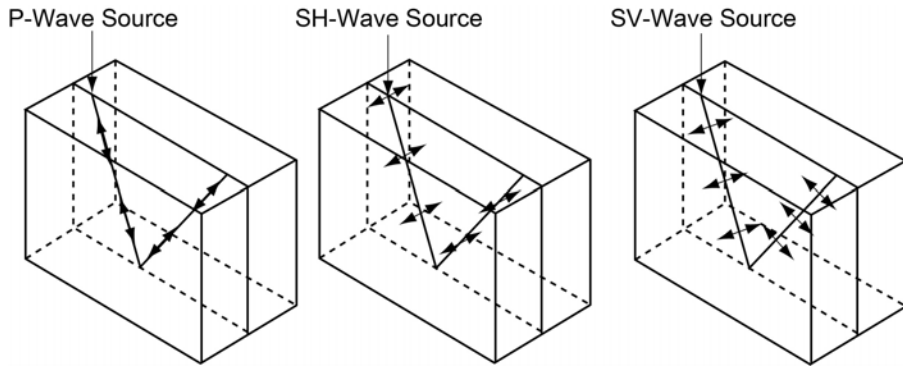


Fig. 16. P-, SH-, and SV-wave propagation. In SH-wave, particle motion is perpendicular to vertical plane defined by source, receiver and reflection point. In SV-wave, particle motion is confined to plane and parallel to source-receiver line.

서 다성분 탄성과 탐사를 변환파 탄성과 탐사(converted-wave seismic survey)라고도 부른다.

육상의 경우는 수직방향, 수평 두 방향의 총 세 개의 수진기로 자료를 기록하는 3성분(3C) 탐사이고 해양의 경우는 하이드로폰(hydrophone)을 추가한 4성분(4C) 탐사이다. P파는 수직성분의 수진기(해양의 경우 하이드로폰과 수직성분 수진기)에 기록되며 S파는 두 개의 수평 방향 수진기로 기록된다. 다성분 탄성과 탐사에서는 수직 성분의 에너지로 생성된 P파가 반사면에서 P파와 변환된 SV파로 반사된 것을 기록한다(Hardage *et al.*, 2011).

S파는 HTI 매질, 즉 수직 균열이 발달한 셰일가스 저류암과 같은 매질을 통과할 때 속도가 다른 S1 모드와 S2 모드로 분할된다(Fig. 17). 이 두 모드의 S파가 두 개의 수평성분의 수진기에 기록되는데 음원에 대한 수진기의 방향을 정확하게 알 수 없으므로 호도그램(hodogram) 분석과 같은 방법을 이용하여 S1과 S2의 방향을 유추한다. 이 때 S1 모드는 균열의 방향과 같은 방향으로 진동하여 속도가 빠르고, S2 모드는 균열의 방향과 수직 방향으로 진동하여 속도가 느리다. S1 모드의 속도는 균열이 없는 매질을 통과할 때의 S파 속도와 거의 같다(Hardage, 2011a). 따라서 셰일가스 저류암의 경우 S파의 속도가 최대인 방향이 균열의 방향을 지시하는 것이다. 그러나 셰일가스 저류암이 충분히 두껍지 않으면 S1 모드와 S2 모드의 도달 시간차이가 크지 않아서 자료의 정확한 분석이 쉽지 않다(Hardage, 2011b).

또한 S1 모드와 S2 모드의 전달시간을 분석하면 균열 밀도를 유추할 수 있다(Hardage, 2011c). 파동물리학에 따르면 파가 균열이 없는 매질에서 균열이 발달한 매질, 즉 이방성이 큰 매질로 이동할 때 P파 속도와 S1 모드의 속도 감소는 무시할 정도이지만 S2 모드의 속도는 크게 감소한다(Xu and King, 1989)(Fig. 18). VVAZ처럼 P파

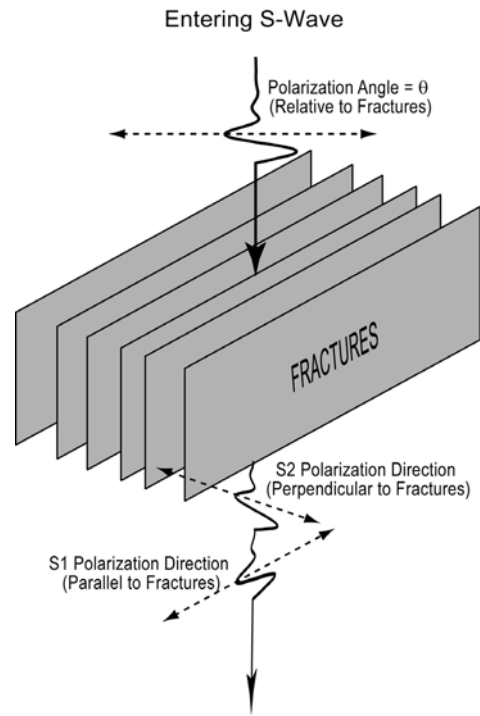


Fig. 17. S-wave splitting in fractured rock. S wave splits into two components - S1 and S2 - that transmit through fracture zone. S1 is fast-S mode and its particle-displacement is parallel to fracture orientation. S2 is slow-S mode and its particle displacement is perpendicular to fracture planes. Adapted from Hardage (2011a).

신호도 방위에 따라 속도가 다르지만 S파처럼 큰 차이를 보이지 않기 때문에 S파 자료를 이용하는 것이 VVAZ 분석보다 암석의 방위 이방성을 훨씬 정확하게 예측할

광방위 탐사자료를 이용한 응력 예측

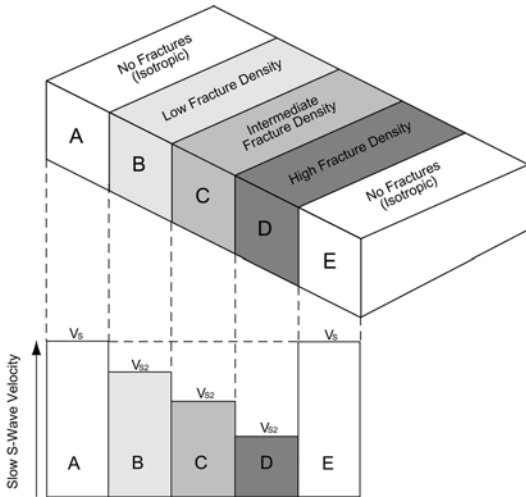


Fig. 18. Relationship between slow-S velocity and fracture density. S2 velocity decreases with increasing fracture density. S1 velocity and P-wave velocity change little across blocks A through E. There is no S-wave splitting in isotropic blocks A and E. Adapted from Hardage (2011c).

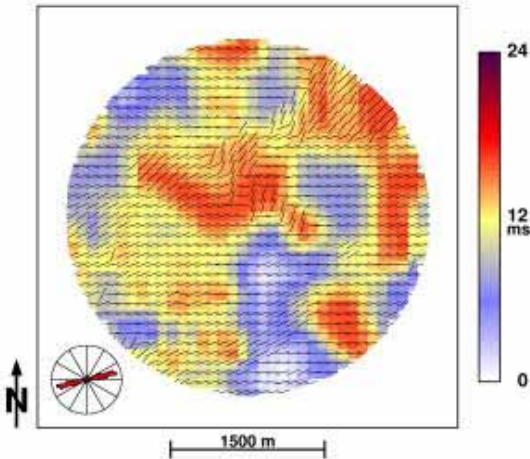


Fig. 19. Polarization orientation (individual vectors) and time-delay magnitude (color) predicted from multi-component data. Rose plot illustrates distribution of fast shear (S1) polarizations. Image courtesy of CGGVeritas. Used by permission.

수 있다. S파 자료 분석을 통하여 수% 정도의 정밀한 방위 이방성 예측이 가능한 것으로 알려져 있다(Thomsen, 1988). Fig. 19는 다성분 탐사자료 분석으로 예측한 이방성 방향과 S1 모드와 S2 모드의 시간차이로 계산한 균열 밀도이다.

탄성과 역산이나 다성분 탐사자료로부터 계산된 영률, 포아송비 등은 수압파쇄에 적합한 지점을 결정하는데 충분한 정보를 제공하지 못할 수 있다(Gray *et al.*, 2010). 따라서 세일가스 저류암에 수압파쇄로 응력을 주었을 때 어떻게 파쇄균열이 발달할 것인가를 보다 정확히 판단하기 위해서는 암석의 응력 상태를 이해해야 한다. 심부의 저류암이 자연 상태에서 변형이 없다고 가정하면 탄성과 탐사자료에서 유추한 암석의 탄성 정보와 이방성으로부터 암석의 응력상태를 결정하는 수직응력(vertical stress, σ_v), 최대 수평응력(maximum horizontal stress, σ_{Hmax}), 최소 수평응력(σ_{Hmin})을 예측할 수 있다(Iverson, 1995).

Schoenberg(1980)의 선형 변위 이론(linear slip theory)에 따르면 암석내의 균열을 등방성 비균열 암석의 배경(background) 순응도에 대한 작은 변화(perturbation)로 가정할 수 있다. 그리고 변형과 응력의 탄성관계를 설명하는 가장 기본적인 Hooke의 법칙(변형은 순응도(compliance) 또는 강성도의 역수와 응력의 곱)을 전체 암석의 순응이 균열이 없는 배경 암석의 순응과 균열 순응의 합이라는 행렬식으로 단순화할 수 있다(Schoenberg and Sayers, 1995). 또한 균열을 트랙션(traction)은 연속적이지만 변위(displacement)는 불연속적인 불완전하게 결합된 접면(interface)라고 가정할 수 있다(Downton *et al.*, 2011). 이때 균열에 수직인 전위 불연속이 균열에 수직으로 작용하는 응력에 비례하고 비례상수가 수직 균열 순응도이다. 이러한 관계를 바탕으로 하면 광방위 탐사나 다성분 탐사자료로부터 암석의 탄성과 관련된 성질들을 유추할 수 있으며(Varela *et al.*, 2009), 더 나아가 Iverson(1995)의 이방성 응력 방정식으로부터 암석의 응력을 계산할 수 있다(Gray *et al.*, 2010). 수직 응력은 시추공 물리검층 자료의 밀도나 탄성과 역산자료에서 계산된 밀도를 이용하여 단순한 적분으로 계산할 수 있으며 수평응력은 수직응력, 영률, 포아송비, 균열과 수직 균열 순응도로부터 계산한다(Gray *et al.*, 2010). 탄성과 자료에서 유추한 이러한 응력들은 시추공에서 측정된 응력자료나 광역적 응력자료 등을 이용하여 보정해주어야 한다.

응력의 계산중에서 차등 수평응력비(differential horizontal stress ratio, DHSR), 즉 최대 수평응력과 최소 수평응력과의 차이와 최대 수평응력의 비 $[(\sigma_{Hmax} - \sigma_{Hmin}) / \sigma_{Hmax}]$ 가 암석에 어떻게 균열이 발달하는지를 지시하는 중요한 요소로 알려져 있다(Gray *et al.*, 2010). 차등 수평응력비가 낮으면, 인장 균열이 여러 방향으로 발달하여 집중적인 균열대(fracture swarm)를 형성하는 경향이 있는 반면에, 최대 수평응력이 최소 수평응력보다 훨씬 크면 균열이

최대 응력방향에 나란하게, 즉 한 방향으로 발달하는 경향이 있다(Gray *et al.*, 2010). 따라서 취성이나 영률과 차등 수평응력비 등을 조합하여 분석하면 수압 파쇄균열이 어떻게 발달할 것인지를 보다 정확하게 예측할 수 있다(Gray *et al.*, 2010; Gray *et al.*, 2012)(Fig. 20 and 21).

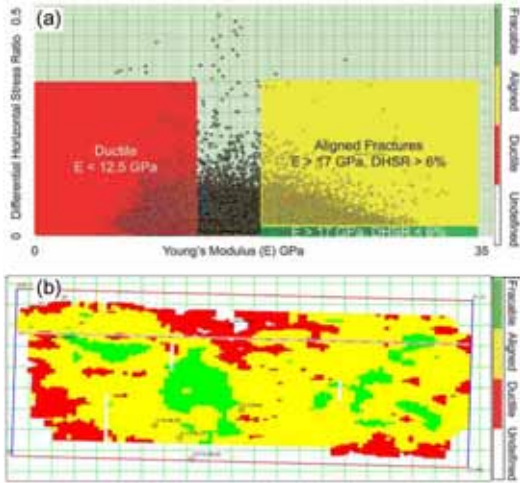


Fig. 20. (a) Crossplot of differential horizontal stress ratio (DHSR) versus Young's modulus. Preferred areas for hydraulic fracturing are indicated in green, less desirable areas in yellow, and poor areas in red. (b) Map of zones highlighted in crossplot in (a). Fracture swarms are likely form in green areas whereas red areas are where rocks are more ductile and thus less likely to fracture. Yellow areas are where aligned fractures are likely to occur. Modified from Gray *et al.*, (2010). Image courtesy of CGGVeritas. Used by permission.

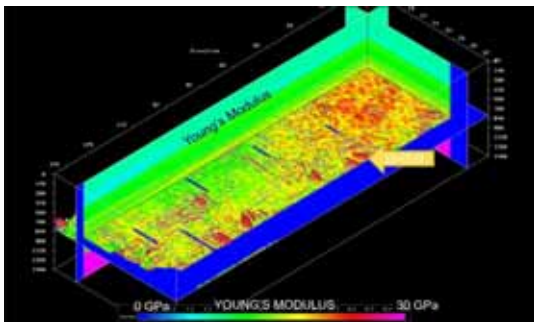


Fig. 21. Young's modulus and plates for differential horizontal stress ratio (DHSR). Size of plate is proportional to magnitude of DHSR and direction of plate shows direction of local maximum horizontal stress. Modified from Gray *et al.*, (2010). Image courtesy of CGGVeritas. Used by permission.

결론

탄성과 저류암 특성화는 탄성과 자료를 분석하여 시추공과 시추공 사이의 지역에 대해서 저류암 성질을 유추하는 것으로서 사암이나 석회암과 같은 재래 저류암의 탐사와 개발에 매우 중요한 역할을 하고 있다. 재래 저류암에 적용되는 다양한 탄성과 특성화 기법은 셰일가스 저류암과 같은 비재래 저류암의 탐사나 개발에도 성공적으로 적용이 되고 있다. 종합후 자료의 일관성 계열 및 곡률 속성 분석으로부터 균열대의 분포를 유추하고, 종합전 역산 결과물로부터 취성 및 파쇄성을 계산할 수 있으며, 탄성과 진폭과 속도의 방위각에 따른 변화 양상과 S파 자료로부터 균열 밀도 및 방향을 유추할 수 있다. 그러나 탄성과 탐사로 유추한 암석의 탄성 물리량은 저류암 조건에 맞게 변환해주거나 시추공에서 확인된 실제 자료와 직접적인 대비를 통하여 보정해 주어야 한다.

사사

본 연구는 한국가스공사의 2012년 대학협력과제 사업(셰일/치밀가스 저류층 특성분석 연구)의 지원으로 수행되었으며, 자료 분석의 일부는 “국가 CO₂ 폐기물 저장지 도 구축 및 실증부지 선정” 사업의 지원을 받았습니다. 본 논문을 검토해주신 익명의 심사자들에게 감사드립니다. 그리고 그림의 이용을 허락해 준 모든 단체(Society of Exploration Geophysicists, Canadian Society of Exploration Geophysicists, CGGVeritas, Arcis Seismic Solutions) 및 개인에게 감사드립니다.

참고문헌

Al-Dossary, S. and Marfurt, K.J., 2006, “3-D volumetric multispectral estimates of reflector curvature and rotation,” *Geophysics*, Vol. 71, pp. 41-51.

Bahorich, M.S. and Farmer, S.L., 1995, “3-D seismic coherency for faults and stratigraphic features,” *The Leading Edge*, Vol. 14, pp. 1053-1058.

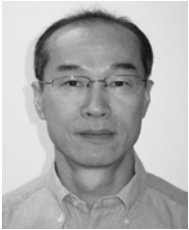
Blumentritt, C., Marfurt, K.J. and Sullivan, E.C., 2006, “Volume-based curvature computations illuminate fracture orientations, Lower-Mid Paleozoic, Central Basin Platform, West Texas,” *Geophysics*, Vol. 71, pp. B159-B166.

Britt, L.K. and Schoeffler, J., 2009, “The geomechanics of a shale play: What makes a shale prospective!,” SPE 125525 presented at the *SPE Eastern Regional Meeting*, Charleston, West Virginia, USA, September 23-25.

Cary, P., 2001, “Multicomponent seismic exploration in

- Canada - one person's perspective," *CSEG Recorder* (September), Vol. 26, pp. 62-67.
- Chopra, S. and Marfurt, K.J., 2007a, "Seismic Attributes for Prospect Identification and Reservoir Characterization," *Society of Exploration Geophysicists*, Tulsa, OK, p. 456.
- Chopra, S. and Marfurt, K.J., 2007b, "Seismic attributes for fault/fracture characterization," presented at *2007 CSPG CSEG Convention*, Calgary, Canada, May 14-16.
- Chopra, S. and Marfurt, K.J., 2007c, "Curvature attribute applications to 3D surface seismic data," *The Leading Edge*, Vol. 26, pp. 404-414.
- Chopra, S., Alexeev, V. and Xu, Y., 2003, "3D AVO crossplotting - An effective visualization technique," *The Leading Edge*, Vol. 22, pp. 1078-1089.
- Close, D., Stirling, S., Cho, D. and Horn, F., 2010, "Tight gas geophysics: AVO inversion for reservoir characterization," *CSEG Recorder* (May), Vol. 35, pp. 28-35.
- Craft, K.L., Mallick, S., Meister, L.J. and Van Dok, R., 1997, "Azimuthal anisotropy analysis from P-wave seismic traveltimes data," *Annual Meeting, Society of Exploration Geophysicists*, Expanded Abstracts, Vol. 18, pp. 1214-1217.
- Downton, J., Roure, B. and Lee, H., 2011, "Azimuthal Fourier coefficients," *CSEG Recorder* (December), Vol. 36, pp. 22-36.
- Dufour, J., Squires, J., Goodway, W.N., Edmunds, A. and Shook, I., 2002, "Integrated geological and geophysical interpretation case study, and Lamé rock parameter extractions using AVO analysis on the Blackfoot 3C-3D seismic data, southern Alberta, Canada," *Geophysics*, Vol. 67, pp. 27-37.
- EERL (Earthworks Environment and Resources, Ltd), 2006, *Understanding Stochastic Seismic Inversion*, Earthworks Technical Note, p. 27.
- Gaiser, J.E., 2003, "Reservoir cracks tell many tales," *AAPG Explorer* (April), pp. 26-27.
- Godfrey, R. and Bachrach, R., 2008, "Seismically guided fracture characterization," *CSEG Recorder* (March), Vol. 33, pp. 30-36.
- Goodway, W., Chen, T. and Downton, J., 1997, "Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters; "Lambda-Rho", "Mu-Rho", & "Lambda/Mu fluid stack", from P and S inversions," *Annual Meeting, Society of Exploration Geophysicists*, Expanded Abstracts, Vol. 16, pp. 183-186.
- Gray, D., 2007, "Observations of azimuthal anisotropy in prestack seismic data," presented at *2007 CSPG CSEG Convention*, Calgary, Canada, May 14-16.
- Gray, D., 2008, "Fracture detection using 3D seismic azimuthal AVO," *CSEG Recorder* (March), Vol. 33, pp. 40-49.
- Gray, D., Anderson, P., Logel, J., Delbecq, F. and Schmidt, D., 2010, "Principal stress estimation in shale plays using 3D seismic," presented at *GeoCanada 2010*, Calgary, Canada, May 10-14.
- Gray, D., Anderson, P., Logel, J., Delbecq, F., Schmidt, D. and Schmid, R., 2012, "Estimation of stress and geomechanical properties using 3D seismic data," *First Break*, Vol. 30, pp. 61-68.
- Guo, Y. and Marfurt, K.J., 2011, "Seismic attribute analysis of fractures in Woodford Shale," *EAGE Conference & Exhibition*, Vienna, Austria, May 23-26.
- Guo, Y., Zhang, K. and Marfurt, K.J., 2010, "Seismic attribute illumination of Woodford Shale faults and fractures, Arkoma Basin, OK," *Annual Meeting, Society of Exploration Geophysicists*, Expanded Abstracts, Vol. 29, pp. 1372-1376.
- Hampson-Russell, 2007, *Strata Guide Tutorial*, CGGVeritas, p. 44.
- Hardage, B.A., 2011a, "S waves prove their worth with fractures," *AAPG Explorer* (April), pp. 46.
- Hardage, B.A., 2011b, "Turn, turn, turn: Rotating for S-wave data," *AAPG Explorer* (May), pp. 30-31.
- Hardage, B.A., 2011c, "S-waves on crack? Not so much," *AAPG Explorer* (June), pp. 32-33.
- Hardage, B.A., DeAngelo, M.V., Murray, P.E. and Sava, D., 2011, *Multicomponent Seismic Technology*, *Society of Exploration Geophysicists*, Geophysical References Series 18, p. 318.
- Hwang, S. and Jin, G., 2012, "Unconventional reservoirs: Review on geophysical well logging for shale plays," *The Journal of Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 49, pp. 248-260.
- Iverson, W.P., 1995, "Closure stress calculations in anisotropic formation," SPE 29598 presented at *Low Permeability Reservoirs Symposium*, Denver, Colorado, March 19-22.
- Kendall, R., 2006, "Advances in land multicomponent seismic: Acquisition, processing and interpretation," *CSEG Recorder*, 2006 *Special Edition*, pp. 65-75.
- Lees, J.A., 1999, "Constructing faults from seed picks by voxel tracking," *The Leading Edge*, Vol. 18, pp. 338-340.
- Lewis, R., Ingraham, D. and Percy, M., 2004, "New evaluation techniques for gas shale reservoirs," *Schlumberger Reservoir Symposium 2004* (<http://www.sipeshouston.org/presentations/Pickens%20Shale%20Gas.pdf>).
- Li, X.-Y., 1999, "Fracture detection using azimuthal variation of P-wave moveout from orthogonal seismic survey lines," *Geophysics*, Vol. 64, pp. 1193-1201.
- Lisle, R.J., 1994, "Detection of zones of abnormal strains in structures using Gaussian curvature analysis," *AAPG*

- Bulletin*, Vol. 78, pp. 1811-1819.
- Løseth, H., Wensaas, L., Gading, M., Duffaut, K. and Springer, M., 2011, "Can hydrocarbon source rocks be identified on seismic data?," *Geology*, Vol. 32, pp. 1167-1170.
- Lynn, H.B., 2004, "The winds of change: Anisotropic rocks -their preferred direction of fluid flow and their associated seismic signatures-Part 1," *The Leading Edge*, Vol. 23, pp. 1156-1162.
- Lynn, H.B., Simon, K.M., Bates, C. and Van Dok, R., 1996, "Azimuthal anisotropy in P-wave (multiazimuth) data," *The Leading Edge*, Vol. 15, pp. 923-928.
- Mallick, S., Craft, K., Meister, M. and Chambers, R., 1996, "Computation of principal directions of azimuthal anisotropy from P-wave seismic data," *Annual Meeting, Society of Exploration Geophysicists*, Expanded Abstracts, Vol. 17, pp. 1862- 1865.
- Pendrel, J., 2006, "Seismic inversion-A critical tool in reservoir characterization," *Scandinavian Oil-Gas Magazine*, No. 5/6, pp. 19-22.
- Refunjol, X.E., Marfurt, K.J. and Le Calvez, J.H., 2011, "Inversion and attribute-assisted hydraulically induced microseismic fracture characterization in the North Texas Barnett Shale," *The Leading Edge*, Vol. 30, pp. 292-299.
- Rickman, R., Mullen, M., Petre, E., Grieser, B. and Kundert, D., 2009, "Petrophysics key in stimulating shales," *The American Oil & Gas Reporter* http://www.halliburton.com/public/solutions/contents/Shale/related_docs/0309%20Halliburton%20Eprint.pdf.
- Rüger, A. 2002, "Reflection Coefficients and Azimuthal AVO Analysis in Anisotropic Media," *Society of Exploration Geophysicists*, Geophysical Monograph Series 10, p. 189.
- Rüger, A., 1998, "Variation of P-wave reflectivity with offset and azimuth in anisotropic media," *Geophysics*, Vol. 63, pp. 935-947.
- Rutledge, J.T. and Phillips, W.S., 2003, "Hydraulic stimulation of natural fractures as revealed by induced microearthquakes, Carthage Cotton Valley gas field, east Texas," *Geophysics*, Vol. 63, pp. 441-452.
- Schmid, R. and Schmidt, D., 2011, "Seismic derived geomechanical properties for shale gas exploitation," presented at the *2011 CSPG CSEG CWLS Convention*, Calgary, Canada, May 9-13.
- Schoenberg, M. and Sayers, C.M., 1995, "Seismic anisotropy of fractured rock," *Geophysics*, Vol. 60, pp. 204-211.
- Schoenberg, M., 1980, "Elastic wave behavior across linear slip interfaces," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 68, pp. 1516-1521.
- Sondergeld, C.H., Newsham, K.E., Comisky, J.T., Rice, M.C. and Rai, C.S., 2010, "Petrophysical considerations in evaluating and producing shale gas resources," SPE 131768 presented at *SPE Unconventional Gas Conference*, Pittsburg, Pennsylvania, USA, February 23-25.
- Taner, M.T., 2001, "Seismic attributes," *CSEG Recorder (September)*, Vol. 26, pp. 48-56.
- Thomsen, L., 1986, "Weak elastic anisotropy," *Geophysics*, Vol. 51, pp. 1954-1966.
- Thomsen, L., 1988, "Reflection seismology over azimuthally anisotropic media," *Geophysics*, Vol. 53, pp. 304-313.
- Treadgold, G., Sicking, C., Sublette, V. and Hoover, G., 2008, "Azimuthal processing for fracture prediction and image improvement," *CSEG Recorder (May)*, Vol. 34, pp. 38-41.
- Tsvankin, I., 1997, "Reflection moveout and parameter estimation for horizontal transverse isotropy," *Geophysics*, Vol. 62, pp. 614-629.
- van Bommel, P. and Pepper, R.E.F., 2000, "Seismic signal processing method and apparatus for generating a cube of variance values," *US Patent Number* 6,151,555,2000.
- Varela, I., Maultzsch, S., Chapman, M. and Li, X.-Y., 2009, "Fracture density inversion from a physical geological model using azimuthal AVO with optimal basis functions," *Annual Meeting, Society of Exploration Geophysicists*, Expanded Abstracts, Vol. 28, pp. 2075-2079.
- Wang, J., Zheng, Y. and Perz, M., 2007, "VVAZ vs. AVAZ: practical implementation and comparison of two fracture detection methods," *Annual Meeting, Society of Exploration Geophysicists*, Expanded Abstracts, Vol. 26, pp. 189-183.
- Wild, P., 2011, "Practical applications of seismic anisotropy," *First Break*, Vol. 29, pp. 117-124.
- Williams, M. and Jenner, E., 2002, "Interpreting seismic data in the presence of azimuthal anisotropy; or azimuthal anisotropy in the presence of the seismic interpretation," *First Break*, Vol. 20, pp. 771-774.
- Xu, S. and King, M.S., 1989, "Shear-wave birefringence and directional permeability in fractured rock," *Scientific Drilling*, Vol.1, pp. 27-33.
- Xu, X. and Tsvankin, I., 2006, "Azimuthal AVO analysis with anisotropic spreading correction: A synthetic study," *The Leading Edge*, Vol. 25, pp. 1336-1342.
- Xu, X. and Tsvankin, I., 2007, "A case study of azimuthal AVO analysis with anisotropic spreading correction," *The Leading Edge*, Vol. 26, pp. 1552-1561.
- Zheng, Y., 2006, *Seismic Azimuthal Anisotropy and Fracture Analysis from PP Reflection Data*, unpublished PhD dissertation, University of Calgary, p. 110.



이 광 훈

1981년 서울대학교 해양학과 이학사
1983년 서울대학교 해양학과 이학석사
1990년 Texas A&M 대학교 해양학과 이학박사

현재 부경대학교 에너지자원공학과 교수
(E-mail; gwanglee@pknu.ac.kr)



신 창 훈

1992년 부산대학교 공과대학 기계공학부 공학사
1997년 부산대학교 공과대학 기계공학과 공학석사
2003년 부산대학교 공과대학 기계공학과 공학박사

현재 한국가스공사 연구개발원 가스전기술연구팀 책임연구원
(E-mail; chshin@kogas.or.kr)



김 영 완

1998년 전남대학교 자원공학과 공학사
2004년 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 공학석사
2008년 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 공학박사

현재 한국가스공사 연구개발원
(E-mail; ywkim1@kogas.or.kr)



권 영 인

1985년 연세대학교 이과대학 지질학과 이학사
1989년 연세대학교 이과대학 지질학과 이학석사
1997년 연세대학교 이과대학 지질학과 이학박사

현재 (주)지오스캔 연구소장
(E-mail; kwon4966@hotmail.com)