

파쇄대 반사에너지의 AVO 및 복소트레이스 분석에 관한 모형연구

한수형¹⁾ · 김지수¹⁾ · 하희상²⁾ · 민동주³⁾

A Modeling Study on the AVO and Complex Trace Analyses of the Fracture Zone Reflection

Han, Soo-Hyung, Kim, Ji-Soo, Ha, Hee-Sang and Min, Dong-Joo

요 약 : 천연가스 저류층의 부존 특성을 파악하는데 주로 이용되고 있는 AVO 및 복소분석법을 파쇄대와 같은 지반환경의 주요 불연속면에 적용하는데 그 초점을 두었다. 연구에 이용된 시험자료는 수평 파쇄구조에 대하여 일반화된 맥스웰체 근사법을 적용한 점탄성매질에서의 수치모형자료이다. 수평 파쇄구조에 대한 AVO 분석에서 반사 P파의 특성은 지하매질의 음향 임피던스 차이와 기하학적 계수인 오프셋에 따라 다양하게 나타나며 구배중합 단면도 및 오프셋조절 중합단면도에서 효과적으로 해석되는데, 입사각이 커질수록 진폭이 감소되는 특성을 보인다. 중합자료에 대한 복소트레이스 플롯(순간진폭, 순간주파수, 순간위상)에서 파쇄대의 상·하부 경계는 강한 진폭과 동일한 위상으로 특징 지워지며, 파쇄대 구간 및 직하부는 저주파 특성을 보인다. 파쇄대와 주위 매질의 Q-대비에 따라 다르게 나타나는 진폭감쇠와 파형분산은 역 Q-필터링으로 효과적으로 보상되었다.

Abstract : AVO and complex trace analyses mainly used to characterize natural gas reservoir were tested in this paper for a possible application to detection of major geological discontinuities such as fracture zones. The test data used in this study were calculated by utilizing a viscoelastic numerical program which was based on the generalized Maxwell body for a horizontal fracture model. In AVO analysis of a horizontal fracture zone, P-wave reflection appears to be variant depending upon the acoustic-impedence contrast and the offset distance. The fracture zone is also effectively clarified both in gradient stack and range-limited stack in which fracture zone reflection is attenuated with the increasing offset distance. In complex attribute plots (instantaneous amplitude, frequency, and phase), the top and bottom of the fracture zone are characterized by a zone of strong amplitudes and an event of the same phase. Low frequency characteristics appear at the fracture zone and the underneath. Amplitude attenuation and waveform dispersion are dependent on Q-contrast between the fracture zone and the surrounding media. They were properly compensated by optimum inverse Q-filtering.

Keywords : AVO, complex trace analysis, optimum inverse Q-filtering, gradient stack

서 론

반사이벤트의 진폭변화에 대한 AVO(amplitude variation with offset) 연구는 주로 천연가스 등 탄화수소의 부존 특성을 규명하는데 적용되어 왔는데(Swan, 1991; Castagna and Backus, 1993), 탄화수소 특히 천연가스가 집적된 곳은 탄성과 단면도에서 일반적으로 고진폭 이상(bright spot)으로 확인된다. 이러한 고진폭 이상은 석탄층이나 파쇄대 등의 음향임피던스의 차이가 큰 환경에서도 충분히 일어날 수 있어(Allen and Peddy, 1993; Kim *et al.*, 1994) 지질공학 측면에서 이들에 대한 진폭 분석을 충분히 검토할 필요가 있다. 또한, 저류층의 확인에 주로 이용되어 온 탄성파의 복소트레이스

(순간진폭, 순간주파수, 순간위상) (Taner and Sheriff, 1977; Taner *et al.*, 1979)를 파쇄대의 특성연구에 활용할 수 있을 것으로 보인다.

AVO 특성은 지층의 물성에 따라 크게 다르게 나타나며(Rutherford and Williams, 1989) 다양한 물성환경에 대한 AVO 특성 사례들이 그 동안 많이 발표되었다(Sengupta, 1993; Hall and Adamick, 1995). 최근에는 AVO 곡선의 역산으로 반사층의 밀도, 속도, 포아송 비, 공극까지 추출하는 연구도 활발히 진행되고 있다(Hilterman, 1990; Demirbag *et al.*, 1993; Mallick, 1995).

현장자료의 조건에 가장 적합한 탄성파 모형자료는 일반화된 맥스웰체 근사법(Maxwell body approximation)을 이용한

*1999년 1월 12일 접수

1) 충북대학교 지구환경과학과 (Dept. of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University)

2) 현대건설 기술연구소 (Hyundai Institute of Construction Technology)

3) 서울대학교 지구과학교육과 (Dept. of Earth Science Education, Seoul National University)

점탄성매질의 수치모형 알고리즘으로 얻어지는데 이 방법은 점탄성매질의 복소계수를 유리함수로 표현하는 방법으로 Emmerich와 Korn(1987)에 의해 제시되었다. 점탄성매질의 에너지 감쇠효과는 Quality factor(Q)로 표현할 수 있으며, 매질의 흡수작용으로 인한 주파수 손실과 분산현상으로 인한 위상의 왜곡이 그 원인이다. 이러한 감쇠효과는 다양하게 개발된 역 필터링 기법으로 진폭과 위상의 보정이 가능하다(Stolt, 1978; Hale, 1982).

이 연구에서는 우선 일반화된 맥스웰체 근사법을 이용하여 P-SV에 대한 점탄성매질의 수치모형 자료를 수평 파쇄구조에 대해 얻고 이들을 자료처리하고, 중합단면도를 작성·분석하여 수치모형 알고리즘의 특성을 개괄적으로 파악하고자 하였다.

또한, 파쇄대의 AVO 특성을 검토하기 위해 입사각이나 오프셋의 변화에 따른 오프셋조절 중합단면(range-limited stack), 구배중합단면(gradient stack)을 작성하여 거리에 따른 이벤트의 진폭변화, 주파수변화 등을 관찰하였고, 합성 탄성 파자료의 복소분석(complex attribute analysis)을 통하여 파쇄대에 대한 순간진폭, 주파수, 위상 성분의 특성을 알아보았다. 또한, Quality factor에 따른 파쇄대의 에너지 감쇠효과와 오프셋에 따른 AVO 특성을 알아보기 위해 오프셋모음 중합단면(offset stack)을 관찰하였고 역 Q-필터링을 통해 점탄성 효과에 의한 감쇠현상과 분산현상을 보상에 보았다.

시험자료

실제 지구는 완전 탄성매질이 아니며 파가 진행하는 동안 마찰 등에 의해 에너지의 감쇠와 분산이 일어나는 점탄성매질에 가깝다.

탄성매질의 특성은 스프링에 의해 가장 잘 표현되는데 일정한 응력을 가하면 일정한 속도로 변형이 생기다가 응력을 제거하면 바로 원상태로 회복된다. 반면에 점탄성매질의 특성은 스프링과 완충장치의 결합으로 표현되며 이 매질은 일정한 응력이 가해지는 동안 시간이 지남에 따라 변형속도가 조금씩 감소하다가 응력이 제거되면 반대쪽으로 변형이 나타난 후에 다시 원상태로 회복된다(Emmerich and Korn, 1987; 민동주, 1995).

점탄성매질의 에너지 감쇠효과는 quality factor(Q)로 표현하는데 이것은 정현파(sinusoidal wave) 변형의 한 주기 동안에 축적된 에너지량 E 와 감소된 에너지량 ΔE 의 비로서 정의되며(Aki and Richard, 1980) 또한 다음과 같은 주파수의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{Q} = \frac{\Delta E}{2\pi E} \quad (1)$$

$$Q(\omega) = \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^\gamma \quad (2)$$

여기서 ω_0 는 Q 값이 1이 되는 기준주파수로 탄성파의 주된 주

파수대역의 아래에 있다(Müller, 1983).

이 연구에 사용된 시험자료는 Q가 수반되는 일반화된 맥스웰체 근사법(generalized Maxwell body approximation)을 이용하는 점탄성매질에서의 파동방정식에 준하여 생성되었다. 일반화된 맥스웰체는 고주파수 대역에서는 탄성을 나타내고 저주파수대역에서는 점성을 나타내는 매질로서 이 경우 시간영역에서의 점탄성 파동방정식에 대한 탄성과 모델링이 가능해진다(Emmerich and Korn, 1987). 유한차분법(FDM: finite difference method)을 이용한 민동주(1995)의 알고리즘을 이 연구의 수치모형화 작업에 사용하였다.

수평 파쇄구조

지구물리학 개념으로 속도가 큰 결정질암에 발달한 여러 개의 균열은 크게 보아 어느 범위에 군집된 파쇄대로 생각할 수 있다(Soonawala, 1983; Soonawala, 1984). Fig. 1에서 보듯이 파쇄대는 주변 암석에 비해 공극 등의 영향으로 속도가 매

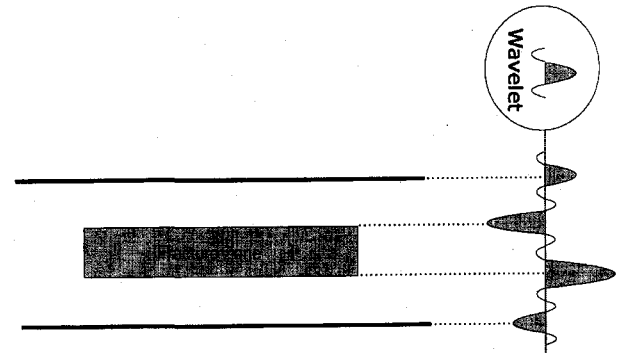


Fig. 1. Schematic seismic trace for fractured/unfractured contact. The source wavelet is shown in the inset ellipsoid.

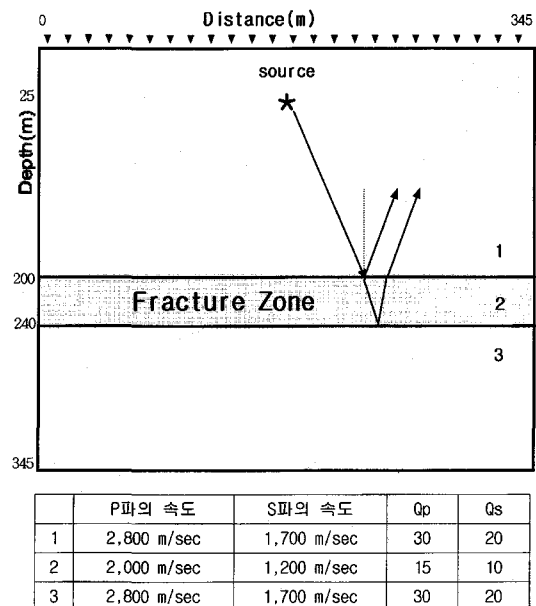


Fig. 2. Horizontal fracture model. Physical properties and ray-paths for the layers are included.

우 낮아 상·하부의 경계에서 음향임피던스의 차가 커 반사 진폭이 크게 나타난다.

이 연구에 적용된 수평 파쇄구조를 물성정보와 함께 Fig. 2에 나타냈는데 1층과 3층의 속도와 Q값은 서로 같고 2층은 파쇄대로서 이보다 낮게 설정했다. 먼저 25m 깊이의 ★로 표시된 발파원에서 P파를 발생시킬 때 지하 반사면에서 어떠한 파들이 형성되는가 살펴보고, 또한 탄성매질과 점탄성매질에서 거동하는 파의 양상을 서로 비교해 보자.

이 모형에 대한 파의 진행양상을 자세히 살펴보기 위해 변위의 수직방향 성분에 대한 스냅사진(snapshot)을 탄성매질(Fig. 3a)과 점탄성매질(Fig. 3b)로 구분하여 작성하였다. 이 모형에 대한 합성단면도(Fig. 4a, b)에서 각 경계면에 대한 반사 P파와 모오드 전환(mode conversion)으로 생긴 S 파도 관찰할 수 있다. 탄성매질에서의 경우(Fig. 4a), 첫 번째 경계면에 의해 생기는 반사 P파와 두 번째 경계면에 의해 나타나는 반사 P파의 진폭의 차이는 거의 없으나, 점탄성매질(Fig. 4b)에서는 두 번째 반사 P파의 진폭이 첫 번째 반사 P파에 비해 크게 감소하고 있음을 알 수 있다. 모오드 전환에 의해 형성된 S파의 경우, 송신원 부근에서는 나타나지 않고 있는데, 이는 입사각이 일정한 값 이상일 때만 모오드 전환이 일어나기 때문이다(Zeoppritz, 1919).

자료처리

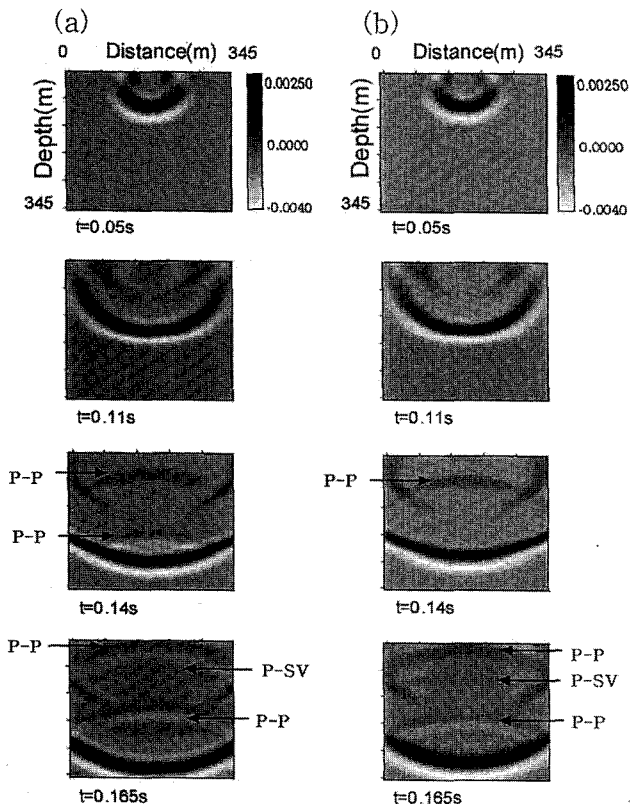


Fig. 3. Snapshots of horizontal fracture model at times of 0.051-0.165s for (a) elastic and (b) viscoelastic media.

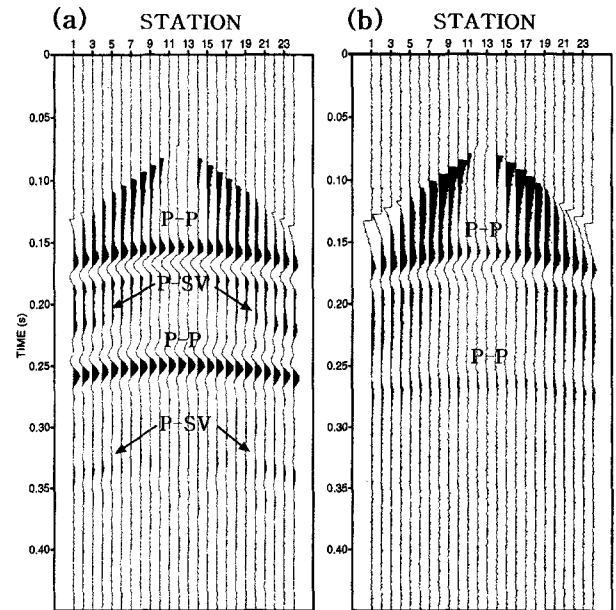


Fig. 4. Synthetic seismograms of horizontal fracture model for (a) elastic and (b) viscoelastic media.

표 1은 수평 파쇄구조의 수치모형반응 계산에 사용된 자료 수집인자(field acquisition parameter) 목록이다. 수치모형 자료의 탄성과 중합단면도 작성을 위해 탄성과 자료처리 프로그램 SU(1995)를 사용하여 크게 공심점 분류(CDP sorting), 수직경로시차(NMO: normal move-out) 보정, 중합(stacking)의 단계를 수행하였다(Fig. 5). 이 외에 S/N 비(signal-to-noise ratio)를 향상시키기 위해 모델링 과정에서 뮤팅(muting)작업을 실시하여 직접파를 제거했으며, 수직경로시차 보정(NMO correction)후 또 한번 뮤팅을 수행하여 잡음 스트레칭(stretched noise)이 완전히 제거 되도록 노력했다. 자료처리의 마지막 단계인 중합과정에서는 공심점중합(CDP stacking)과 오프셋중합(offset stacking) 외에 AVO 분석 소프트웨어인 AVO(1993)를 사용하여 오프셋조절 중합(range-limited stacking)과 구배중합(gradient stacking)을 수행하였다. 마지막으로 파쇄대에 대한 복소분석을 위해서 중합 단면도의 트레이스별 순간진폭, 주파수, 위상효과를 분석하였다.

공심점 중합(CDP stacking) 및 오프셋 중합(offset stacking)

수평 파쇄구조의 공심점 중합자료(stack)에서 점탄성매질

Table 1. Field acquisition parameters

Number of shot gathers	24
Number of channels	24
Line length	345m
Interval of geophone	15m
Interval of source	15m
Energy source frequency	30 Hz
Number of samples	750
Sampling interval	600 μ s
Recording time	450 ms

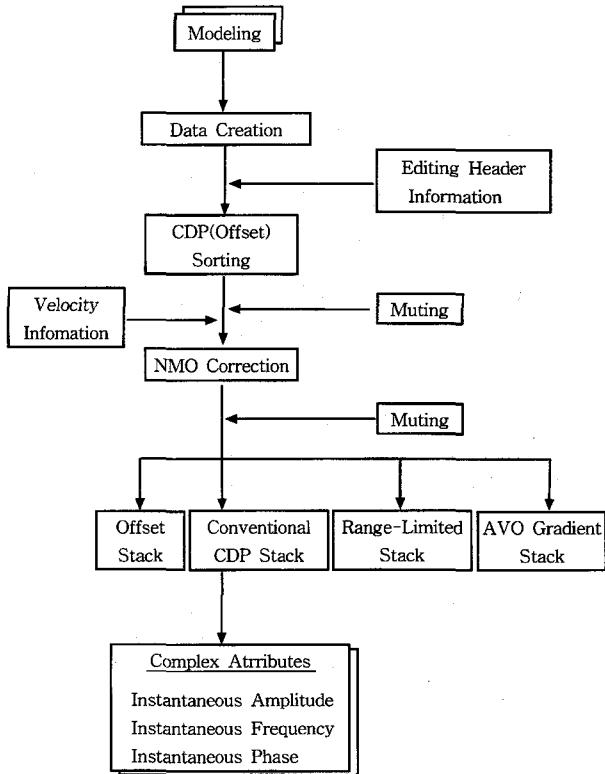


Fig. 5. Processing flowchart employed in this paper.

의 경우 진폭감쇠가 심하였으며(Fig. 6a, b), P파의 모오드 전환에 의해 생성된 S파의 경우, 발파점 부근에서는 나타나지 않고 진폭도 작아 신호강화를 위한 중합작업시 상대적으로 신호가 약화되었다.

발파점과 지오폰 사이의 거리단위로 합친 오프셋 중합자료

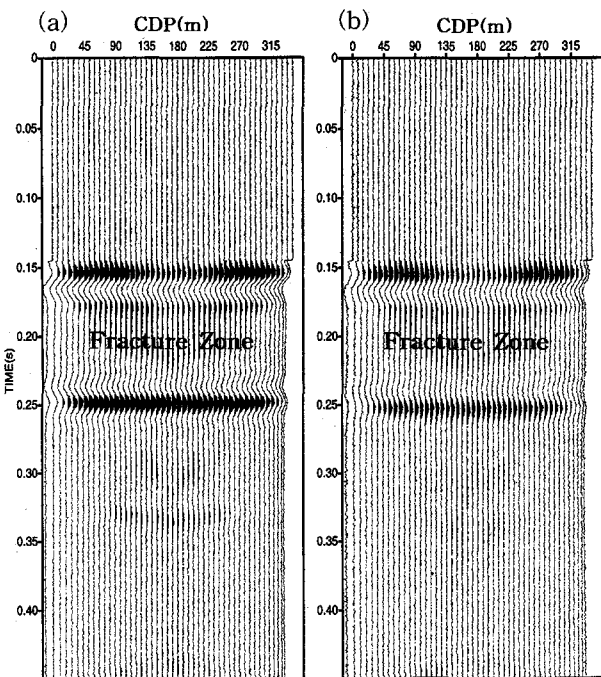


Fig. 6. CDP-stack section for (a) elastic and (b) viscoelastic media.

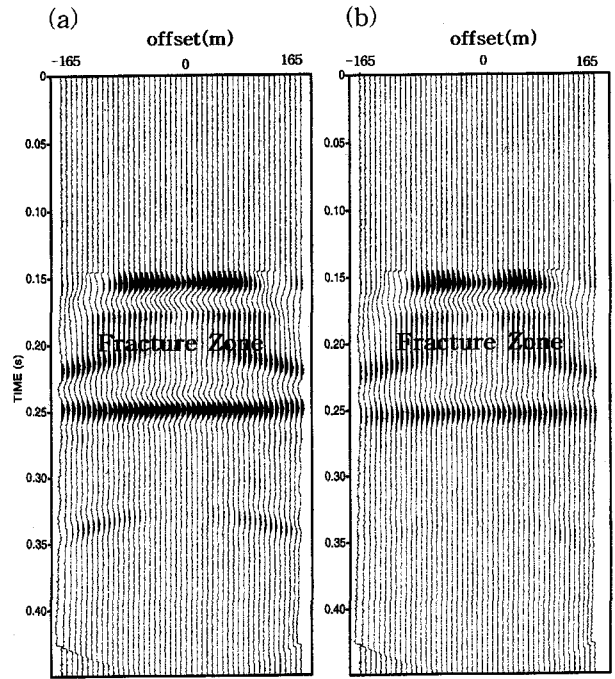


Fig. 7. Offset-stack section for (a) elastic and (b) viscoelastic media.

(Fig. 7a, b)에서 파쇄대의 상부경계면이 하부경계면 보다 오프셋이 증가할수록 반사진폭의 차이가 커지는데 이는 오프셋이 증가할수록 상부경계면에 대한 반사에너지의 양이 하부경계면 보다 큰 폭으로 크게 감소하기 때문이다(Fig. 8).

AVO 곡선

입사각 또는 발파점-지오폰 오프셋에 따른 반사파의 진폭은 Zoeppritz(1919) 방정식의 해로 다음과 같이 표현된다(Aki and Richards, 1980).

$$\begin{bmatrix} \sin \theta_1 & \cos \phi_1 & -\sin \theta_2 & \cos \phi_2 \\ -\cos \theta_1 & \sin \phi_1 & -\cos \theta_2 & -\sin \phi_2 \\ \sin 2\theta_1 & \frac{\alpha_1}{\beta_1} \cos 2\phi_1 & -\frac{\sigma_2 \beta_2 2\alpha_1}{\sigma_1 \beta_1^2 \alpha_2} \sin 2\theta_2 & -\frac{\sigma_2 \beta_2 \alpha_1}{\sigma_1 \beta_1^2} \cos 2\phi_2 \\ \cos 2\theta_1 & -\frac{\beta_1}{\alpha_1} \sin 2\phi_1 & -\frac{\sigma_2 \alpha_2}{\sigma_1 \alpha_1} \cos 2\phi_2 & -\frac{\sigma_2 \beta_2}{\sigma_1 \alpha_1} \sin 2\phi_2 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} R_p \\ R_s \\ T_p \\ T_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 \\ -\cos \theta_1 \\ \sin 2\theta_1 \\ -\cos 2\theta_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

이 식에서 θ 와 ϕ 는 각각 발파점-지오폰의 오프셋에 대한 P파와 S파의 입사각(또는 반사·굴절각), α 와 β 는 각각 P파와 S파의 속도, 아래 첨자 1과 2는 각각 입사지층과 굴절지층을 지시한다. 그리고, R_p , R_s , T_p , T_s 는 P와 S파의 반사계수 및 투

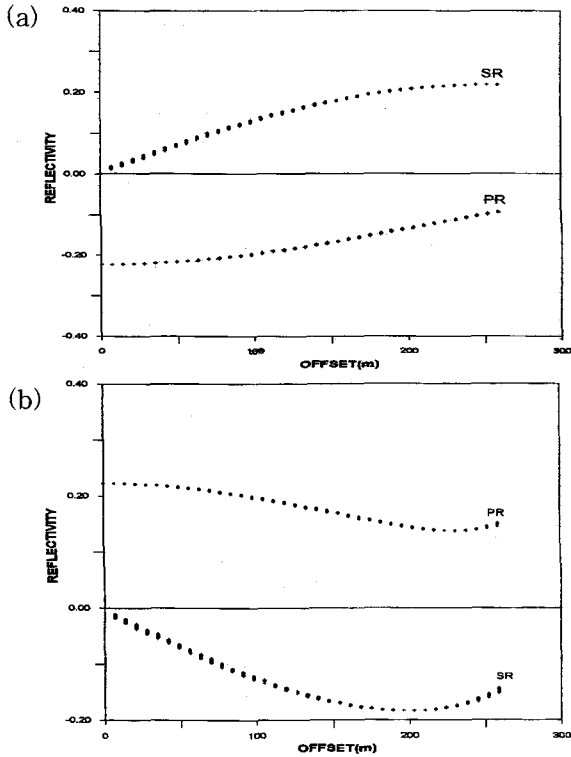


Fig. 8. P-wave and S-wave reflection coefficient versus offset for the (a) top interface and (b) bottom interface. Abbreviation; PR (P-P reflection), SR (P-SV reflection).

과계수들을 의미한다. 여기서 β/α 는 포아송 비 σ 의 함수, 즉 $\beta/\alpha = \{(2\sigma - 2)(2\sigma - 1)\}$ 이므로 반사계수는 결국 포아송 비와 음향임피던스의 함수이다.

파쇄대에 대한 AVO 특성을 위의 식과 관련시켜 고찰하기 위해 음향임피던스가 크게 차이 나는 모형(Fig. 2)에 대한 AVO 특성(Fig. 8)을 다시 살펴보자. 식 3을 풀어 계산된 반사계수 곡선(Fig. 8)에서 파쇄대에 대한 P파의 반사계수 PR은 입사각(오프셋)이 증가함에 따라 상부경계면은 그 크기가 급격히 감소하고, 하부경계면은 비교적 완만히 감소하는 특성을 보인다.

식 3은 반사계수와 β/α 또는 포아송 비 σ 의 관계가 명확하지 않기 때문에 그 관계를 명확하게 고찰해 보기 위해 주로 다음과 같은 근사식을 이용한다. 즉, 상·하부 지층에 대한 P파 속도, S파 속도, 밀도의 차(ΔV_p , ΔV_s , $\Delta \rho$), 입사각, 굴절각이 모두 작을 때 P파에 대한 반사계수의 근사식은

$$R(\theta) \approx \frac{1}{2} \left(1 - 4 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin^2 \theta \right) \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{1}{2 \cos^2 \theta} \frac{\Delta \alpha}{\alpha} - \frac{4\beta^2}{\alpha^2} \sin^2 \theta \frac{\Delta \beta}{\beta} \quad (4)$$

이 된다(Aki and Richard, 1980). 위의 식에서 α , β , ρ 는 각각 상·하 지층의 P파 및 S파의 속도와 밀도의 평균값이며, θ 는 입사각과 굴절각의 평균값이다. 위의 식을 달리 표현하면

$$R(\theta) \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \frac{1}{\cos^2 \theta} - \frac{4\beta^2}{\alpha^2} \left(\frac{\Delta \beta}{\beta} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \sin^2 \theta$$

$$- \frac{1}{2} \frac{\Delta \rho}{\rho} (\tan^2 \theta - \frac{4\beta^2}{\alpha^2} \sin^2 \theta) \quad (5)$$

이다. 여기서 오프셋에 따른 반사계수의 크기는 포아송 비에 따라 크게 변하는데(Koefoed, 1955) 이것을 상·하 지층의 포아송 비의 평균치 σ 와 포아송 비의 차이 $\Delta \sigma$ 의 함수로 표현하면

$$R(\theta) = R_0 + \left[A_0 R_0 + \frac{\Delta \sigma}{(1 - \sigma^2)} \right] \sin^2 \theta + \frac{1}{2} \Delta \frac{\alpha}{\alpha} (\tan^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (6)$$

이 된다. 여기서 첫 번째 항은 수직입사할 때의 진폭을 나타내고 두 번째 항은 입사각이 0~30°일 때의 진폭을 나타내는데 계수인 A_0 는 입사각이나 오프셋에 따라 감소한다. 그리고 세 번째 항은 임계각 가까이 입사할 때의 진폭을 나타낸다(Shuey, 1985).

여기서 수평구조에 대한 AVO 반사계수 함수는 식 6에서

$$R(\theta) \approx R_0 + G \sin^2 \theta(x), \quad (7)$$

$$G = \left[A_0 R_0 + \frac{\Delta \sigma}{(1 - \sigma^2)} \right] \quad (8)$$

으로 간단히 표현될 수 있다(Aki and Richards, 1980; Luh, 1988). 여기서 $R(\theta)$ 는 일반적인 공심점 중합자료이고, R_0 는 포아송 비나 S파에 영향을 받지 않고 오직 P파의 속도에 따라 변하는 영점 오프셋(zero-offset) 중합자료로서 P파 중합(P-wave stack)이라고도 한다. 반면 G 값은 입사각이나 오프셋에 따라 진폭이 증가하거나 감소하는 구배중합(gradient stack)으로서 이것은 이론적으로 포아송 비에 따라 민감하게 변하는 성질이 있다(Luh, 1988; 양동우와 양승진, 1996).

오프셋조절 중합(range-limited stack)

파쇄대의 상·하부 경계에 대한 P파의 반사에너지는 오프셋에 따라 진폭이 심하게 변한다. 이러한 특성을 보다 자세히 연구하기 위해 탄성매질의 수평 파쇄구조(Fig. 2)에 대한 자료를 오프셋범위에 따라 세 구간으로 나누어 구간별 오프셋 중합을 수행하였다(Fig. 9). 구간별 진폭 변화를 비교해 보면 오프셋 거리가 짧은 중합자료(0-115m)에서 진폭이 크게 나타나는 170 ms와 250 ms의 이벤트는 각각 파쇄대의 상부경계와 하부경계에 대한 반사에너지로서, 이들은 중거리 중합자료(115-230m), 원거리 중합자료(230-345m)로 갈수록 그 진폭이 감소한다. 이 현상은 입사각 또는 오프셋의 증가에 따른 반사계수의 감소특성(Fig. 8)과 잘 부합한다. 점탄성매질에 대한 구간별 오프셋 중합자료(Fig. 10) 또한 구간별 진폭변화 양상이 탄성매질과 비슷하나 점탄성매질의 비탄성효과에 의한 진폭감쇠가 상대적으로 심하게 나타난다.

구배중합(gradient stack)

식 7, 8에서 설명했듯이 구배중합 단면은 입사각이나 오프

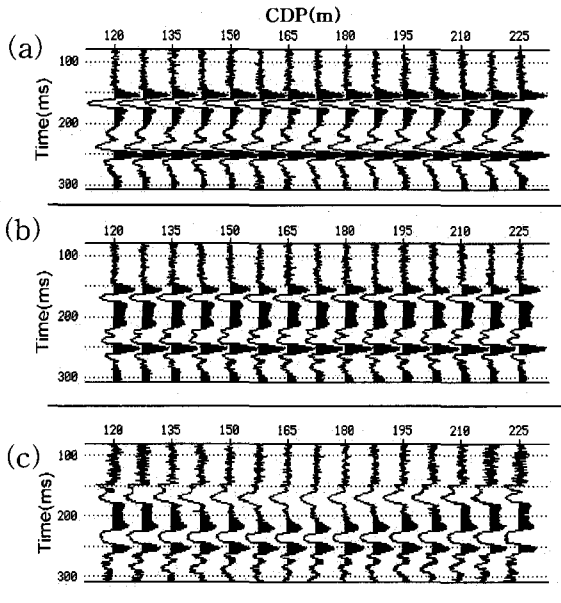


Fig. 9. Range-limited stack for elastic media. Stack with offset range of (a) 0-115m, (b) 115-230m, and (c) 230-345m.

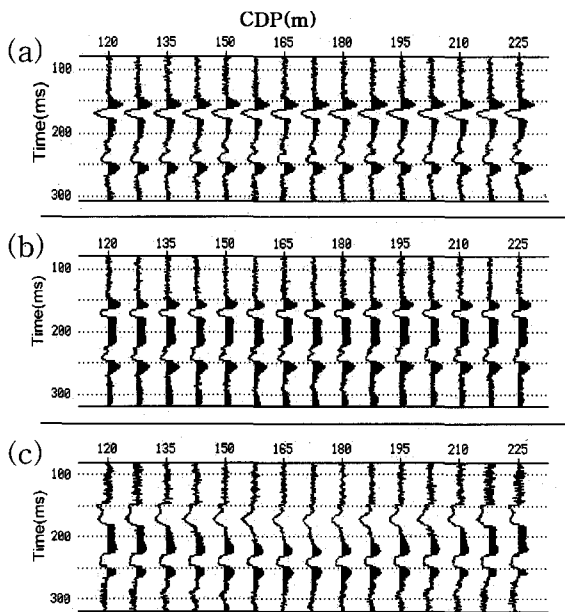


Fig. 10. Range-limited stack for viscoelastic media. Stack with offset range of (a) 0-115m, (b) 115-230m, and (c) 230-345m.

셋에 따라 진폭이 변하며 포아송 비에 특히 민감하게 반응한다. 이러한 특성을 정량적으로 알아보기 위해 오프셋을 세 구간으로 나누어 구간별 구배중합(range-limited gradient stack)과 영점 오프셋을 포함하는 통합 구배중합(range-integrated gradient stack)을 수행하였다. 즉, Fig. 11은 점탄성매질에 대한 구간별 구배중합자료로서 오프셋범위 0-115m, 115-230m, 230-345m로 구분한 자료이고, Fig. 12는 오프셋범위 0-115m, 0-230m, 0-345m로 구분한 통합 구배중합 결과이다. Fig. 11, 12은 모두 식 7의 공심점중합 $R(\theta)$, P파중합 R_0 , 구배중합 G

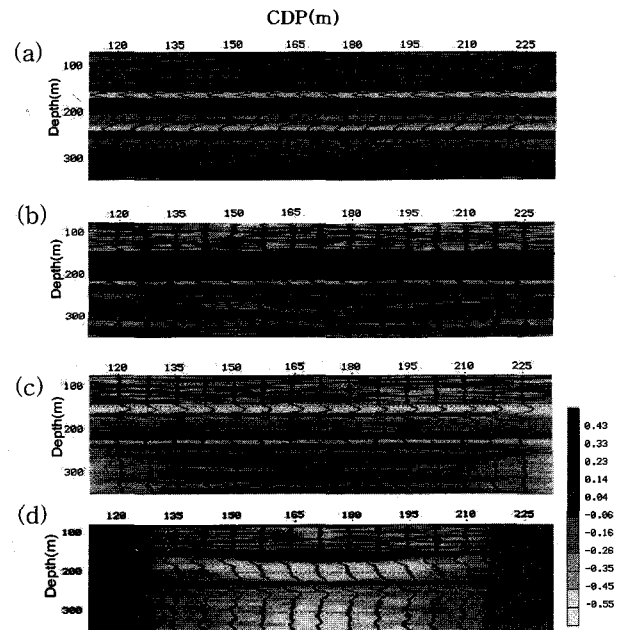


Fig. 11. Range-limited gradient stack for viscoelastic media. (a) Conventional CDP-stack and stack with offset range of (b) 0-115m, (c) 115-230m, and (d) 230-345m.

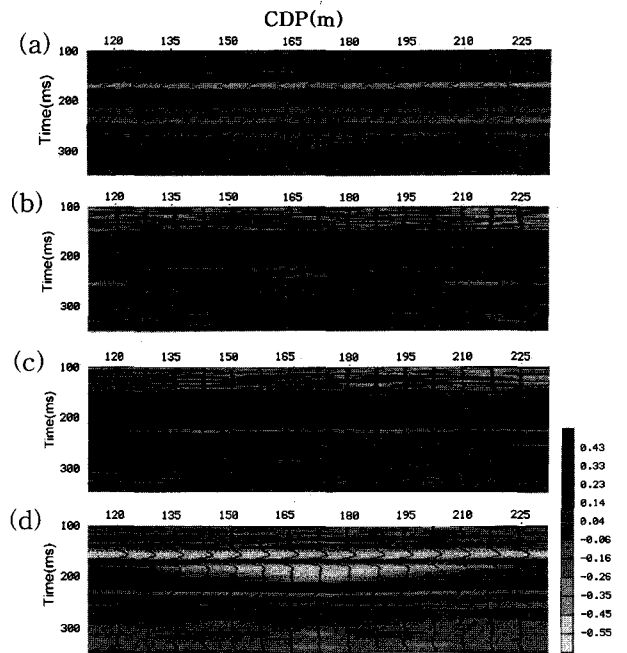


Fig. 12. Range-integrated gradient stack for viscoelastic media. (a) Conventional CDP-stack and stack with offset range of (b) 0-115m, (c) 0-230m, and (d) 0-345m.

를 모두 포함하고 있다. 식 7에서 구배중합 G 는 공심점중합 $R(\theta)$ 와 P파중합 R_0 의 차로써 Fig. 11b, c, d와 Fig. 12b, c, d에서 그레이 스케일 영상에 해당된다. 이 영상과 중첩된 위글트레이스(wiggle trace)는 오프셋의 변화와 무관하고 오직 수직경로의 입·반사와 관련된 P파중합이다.

구간별 오프셋 중합자료(Fig. 11)에서 근거리 오프셋(0-

115m) 중합자료는 진폭 감쇠가 적어 파쇄대 하부경계(250 ms)에서 구배성분은 약 -0.06~-0.26정도로 작게 나왔고, 중거리 오프셋(115-230m) 자료에서는 -0.26~-0.45, 원거리 오프셋(230-345m) 자료에서는 -0.45~-0.55로 크게 나타나 오프셋이 증가함에 따라 진폭감쇠가 심하게 일어나는데 이것 또한 오프셋의 증가에 따른 반사계수의 감소현상(Fig. 8)과 부합한다. 위글 트레이스로 표현되는 P파중합은 원거리 오프셋 자료로 갈수록 파쇄대 이하에서 공심점 중합과 비교할 때 트레이스의 극성(polarity)이 점차 달라지는 것으로 보아 그만큼 구배성분 G는 증가한다고 생각할 수 있다. 통합 구배중합자료(Fig. 12) 역시 구배성분(G)은 원거리 오프셋자료를 포함하는 중합자료에서 높은 수치를 보여 주었다. 또한, 구배값이 파쇄대의 하부경계(250 ms)에서 상부(170 ms)에 비해 크게 나타나는데 이 또한 파쇄대에 의한 에너지 감쇠 효과로 보인다.

복소트레이스 분석

저류층의 규명에 활발히 응용되어온 복소분석(complex attribute analysis) (Taner *et al.*, 1979)을 파쇄대 자료에 적용하여 트레이스별로 순간(instantaneous)진폭, 주파수, 위상을 구하여 파쇄대의 상·하부경계에서 순간진폭의 감쇠효과와 순간위상의 연속성을 파악하고 매질의 흡수작용으로 인한 파쇄대구간 및 직하부에서의 주파수 특성을 알아보려고 한다.

먼저 탄성과 트레이스 x_t 를 복소함수 X_t 의 실수로 간주할 때 그 허수 부분 y_t (quadrature trace)는 x_t 의 Hilbert 변환으로 구한다(Tracewell, 1965; Yilmaz, 1989).

$$y_t = x_t * \frac{1}{\pi} \tag{9}$$

여기서 *는 컨볼루션을 의미하고, 이때 X_t 의 진폭 A_t 와 위상 θ_t 는 아래 식을 만족한다(Fig. 13).

$$A_t = \{x_t^2 + y_t^2\}^{1/2} \tag{10}$$

$$\theta_t = \tan^{-1} \left\{ \frac{y_t}{x_t} \right\} \tag{11}$$

식 10의 진폭 A_t 는 $|x_t|$ 와 $|y_t|$ 의 반사 강도이며 식 11의 위상 θ_t 는 순간위상이다. θ_t 의 시간 변화율 f_t 를 순간주파수(instantaneous frequency)라 하며 이는

$$f_t = \frac{d\theta_t}{dt} = d(t) * \theta_t \tag{12}$$

에 의해 계산된다. 여기서 $d(t)$ 는 미분연산자로서 잡음 등의 고주파 성분의 영향을 억제하도록 적절히 조절한다.

순간 진폭, 주파수, 위상

탄성매질과 점탄성매질의 공심점 중합단면도의 복소분석

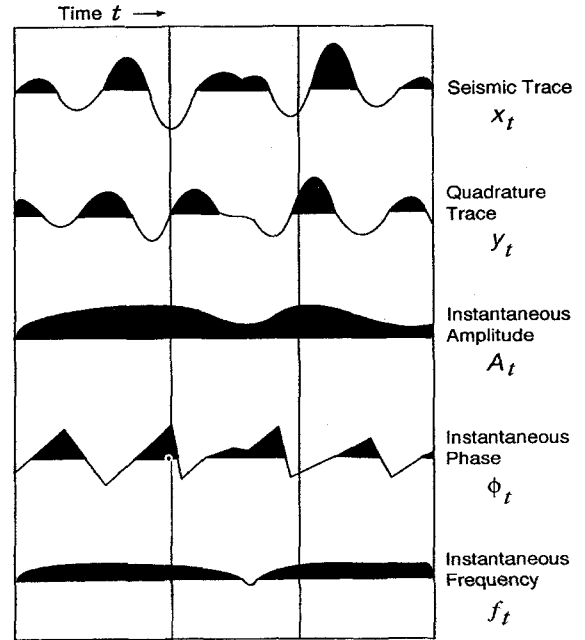


Fig. 13. Schematic description of the complex attributes (after White, 1991).

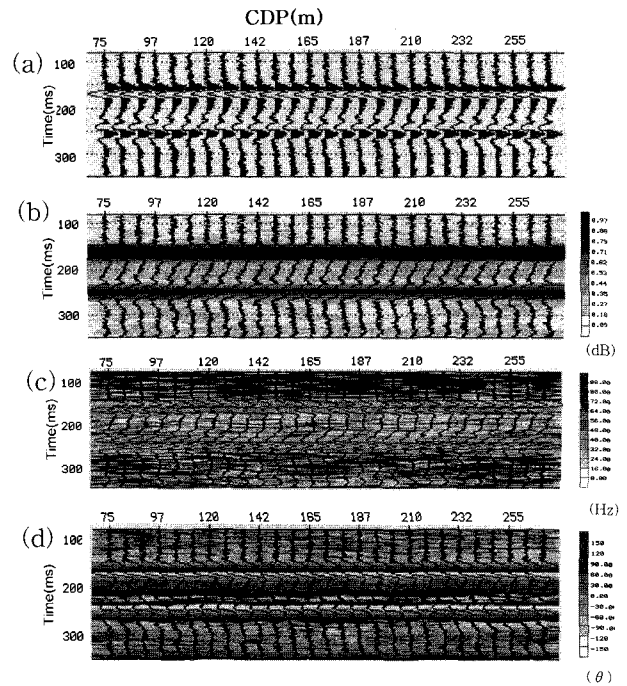


Fig. 14. Complex analysis of the stack section for elastic media; (a) CDP-stack section, (b) instantaneous amplitude, (c) instantaneous frequency, (d) instantaneous phase.

결과(Fig. 14, 15)에서 탄성매질에 대한 중합자료(Fig. 14a)의 순간진폭(Fig. 14b)은 상부경계(170 ms)와 하부경계(250 ms)에서 큰 차이가 없었다. 점탄성매질의 중합자료(Fig. 15a)에서는 하부경계(250 ms)에 대한 진폭이 감소되어 나타나는데 (Fig. 15b) 이는 점탄성매질의 비탄성효과로 인한 에너지 손실의 결과로 해석된다. 순간주파수는 두 경우 모두 파쇄대 구

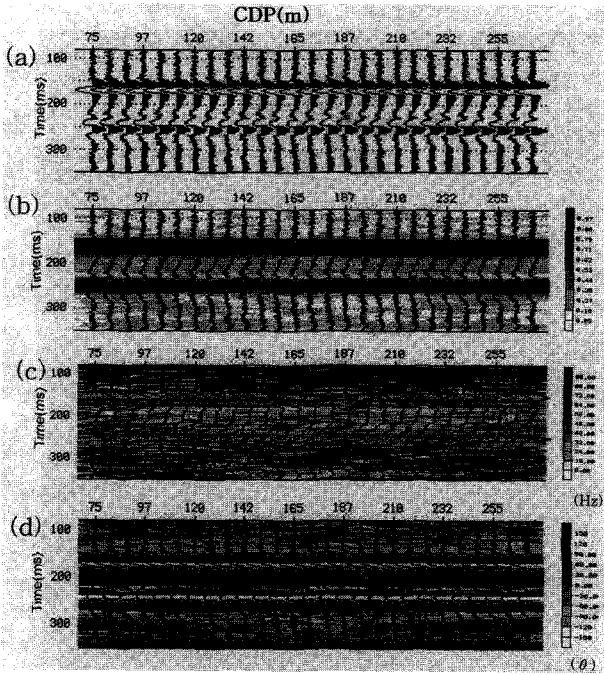


Fig. 15. Complex analysis of the stack section for viscoelastic media; (a) CDP stack section, (b) instantaneous amplitude, (c) instantaneous frequency, (d) instantaneous phase.

간에서 저주파 성분이 우세하게 나타났는데(Fig. 14c, 15c), 특히 점탄성매질에서는 하부경계(250 ms) 아래에서 탄성매질보다 저주파 성분이 뚜렷이 나타난다. 순간위상에서는 탄성매질과 점탄성매질에서 모두 비교적 연속성이 잘 나타나고 있으나, (Fig. 14d, Fig. 15d) 상·하부의 경계면 외에 다른 인공반사면(artifact)도 함께 강화되는 점으로 보아 해석할 때 유의할 필요가 있다.

Q 보상

점탄성매질의 에너지 감쇠효과는 Q 값에 의해 표현할 수 있는데, 일반적으로 Q의 값은 주파수에 따라 미세한 변화를 보이나, 탄성과 탐사에 사용되는 주파수 대역 내에서는 대체로 일정한 값을 보인다(Ricker, 1977).

감쇠현상은 매질의 흡수작용으로 인한 진폭감쇠와 주파수 손실이나 분산작용으로 인한 파형 왜곡을 초래하는데 감쇠효과는 보통 Hale(1982)의 위상 근사법과 Stolt(1978)의 주파수-파수 필터링(f-k filtering) 알고리즘을 기초로 한 역 Q-필터링 기법을 이용하여 보상(compensation)해준다.

여기에서는 구간속도를 이용해 구간 Q값과 순간 Q값을 구하고 최적의 Q보상 값을 얻는 Hale(1982)의 역 Q-필터링 기법을 이용하여 감쇠효과를 보정해 주었다. 점탄성매질의 수평 파쇄구조에서 Q값의 변화에 따른 감쇠현상을 관찰하기 위해 파쇄대의 Q값을 변화시켜가며 이에 대한 오프셋 모음 자료(Fig. 16)를 얻어 보았다. 반사 P파의 진폭은 대비가 200인 오프셋 모음자료 (Fig. 16d)에서 가장 크며, 대비가

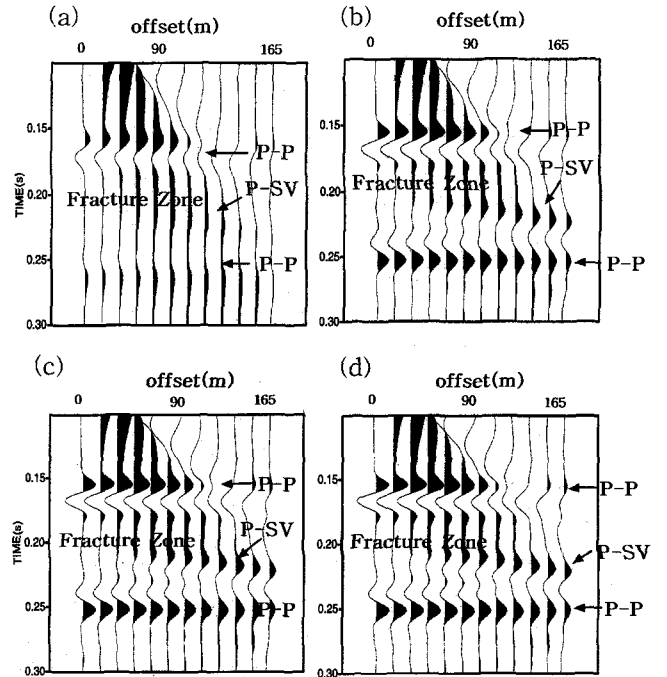


Fig. 16. Offset-stack for viscoelastic media at various Q-contrast between fracture zone and the surrounding media. Q-contrast of (a) 15, (b) 40, (c) 100, and (d) 200.

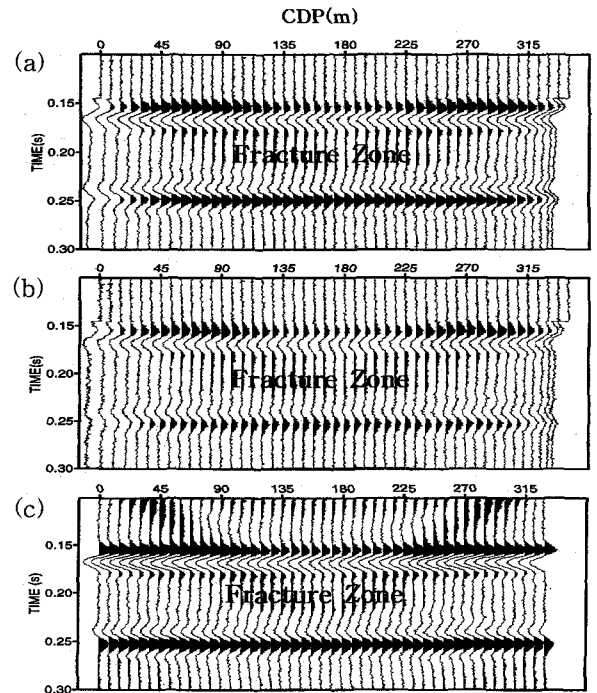


Fig. 17. Stack section for horizontal fracture model; (a) elastic, (b) viscoelastic, (c) viscoelastic with Q compensation.

15인 자료(Fig. 16a)에서 진폭이 가장 작게 나타났다. 또한 Fig. 16a, d는 하부경계에서 서로 $\pi/2$ 의 위상차가 보이는데 이는 Q값에 따른 분산현상으로 해석된다.

Fig. 17은 탄성매질, 점탄성매질의 중합자료, 역 Q-필터링

을 적용한 중합자료를 보여주고 있다. 점탄성매질에서의 감쇠효과(Fig. 17b)는 역 Q-필터링으로 효과적으로 보상되었는데(Fig. 17c) 그 보상효과는 탄성매질의 중합자료(Fig. 17a)의 영상에 거의 근접할 정도로 만족스럽게 나타나며, 특히 파쇄대의 상부(170 ms) 및 하부경계(250 ms)와 중첩이 작아 약한 진폭을 가지는 공심점 중합자료의 양끝에서 잘 보상되었다. 따라서, 파쇄대가 심하게 발달하고 있는 지역에서 얻어지는 탄성과반사법자료를 처리·해석할 때는 Q factor와 이에 수반되는 진폭감쇠와 파형의 분산현상을 정밀하게 관찰·실험하여 효과적인 역 Q-필터링으로 보상해 주는 작업이 요구된다.

결 론

이 연구에서는 고주파수 대역에서 탄성을 나타내고 저주파수 대역에서는 점성을 나타내는 일반화된 맥스웰체 근사법을 이용하여 시간 영역에서 점탄성 방정식을 수치모형화하였다. 수평 구조에 대한 AVO 분석과 복소분석을 수행하여 파쇄대에 대한 탄성과 특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모든 점탄성매질의 모형에서는 파의 진폭감쇠가 탄성매질에 비해 크게 나타난다.
2. 음향임피던스의 대비가 큰 경계에서 반사된 P파는 상부 경계에서 음의 최대 진폭, 하부경계에서 양의 최대진폭으로 나타난다.
3. 파쇄대에 대한 AVO 특성은 발파점-지오폰의 오프셋이 증가함에 따라 진폭의 절대값은 감소하는 특성을 보인다.
4. 중합자료의 복소분석 결과 순간진폭은 파쇄대의 상·하부 모든 경계에서 큰 이상을 보이고, 순간위상은 수평적인 연속성도 상·하부 경계에서 모두 잘 나타난다. 순간주파수는 파쇄대의 고주파 흡수 효과로 파쇄대 구간 및 직하부에서 저주파수가 우세하게 나타난다.
5. 파쇄대 상·하부 모든 경계에서 반사파의 진폭은 Quality factor의 대비와 관계되며 대비값이 작을수록 감쇠효과가 크게 나타난다.
6. 점탄성매질에 의한 감쇠효과는 역 Q-필터링으로 효과적으로 보상되는데, 이 기법은 저류층 문제뿐만 아니라 천부의 파쇄대 환경에도 그 적용성이 기대된다.

사 사

이 논문은 한국과학재단 특정기초과제(98-0703-02-01-3) "육상 주향이동 분지의 진화"의 일부인 탄성과 반사특성연구 지원으로 수행되었다(또한 자료처리와 Q-필터링의 시험에 자문해 주신 홍종국 박사와 황석연 박사께 감사드립니다).

참고문헌

1. 민동주, 1995, 일반화된 맥스웰체 근사법을 이용한 점탄성

매질의 탄성과 모델링, 교육학 석사 학위논문, 서울대학교.
 2. 양동우, 양승진, 1996, AVO 및 복소분석에 의한 천연가스 저류층 탐지에 관한 연구, 한국자원공학회지, **33**, 340-348.
 3. Aki, K. and Richards, P. G., 1980, Quantitative Seismology, San Francisco, W. H. Freeman and Co.
 4. Allen, J. L. and Peddy, C. P., 1993, Amplitude variation with offset, Gulf coast case studies, Tulsa, Soc. Expl. Geophys.
 5. AVO, 1993, AVO5 manual, Hampson-Russell Ltd.
 6. Bracewell, R., 1965, The Fourier transform and its application, New York, McGraw-Hill Book Co.
 7. Castagna, J. P. and Backus, M. M., 1993, Offset-dependent reflectivity theory and practice of AVO analysis, Soc. Expl. Geophys, Investigations in Geophysics ser., 8.
 8. Demirbag, E., Çoruh, C. and Costain, J. K., 1993, Inversion of P-wave AVO, in Castagna, J., and Backus, M.M. Ed., Offset-dependent reflectivity-theory and practice of AVO analysis, Soc. Expl. Geophys., **8**, 28-302.
 9. Emmerich, H. and Korn, M., 1987, Incorporation of attenuation into time-domain computation of seismic wave fields, Geophysics, **52**, 1252-1264.
 10. Hale, D., 1982, Q-adaptive deconvolution, Stanford Exploration Project, **30**, 133-158.
 11. Hall, D. H. and Adamick, J. H., 1995, AVO as an exploration tool, Gulf of Mexico case studies and examples, The Leading Edge, **14**, 863-868.
 12. Hilterman, F. J., 1990, Is AVO the seismic signature of lithology?, A case history of ship shoal-south addition, The Leading Edge, **9**, 15-16.
 13. Kim, J. S., Moon, W. M., Lodha, G. and Serzu, M., 1994, Imaging of reflection seismic energy for mapping shallow fracture zones in crystalline rocks, Geophysics, **59**, 75-765.
 14. Koefoed, O., 1955, On the effect of Poisson's ratio of rock strata on the reflection coefficients of plane waves: Geophys. Prosp., **3**, 381-387.
 15. Luh, P. C., 1988, Wavelet dispersion and bright-spot detection, in Kelly, K.R. and Marfurt, K.J., Ed., Numerical modeling of seismic wave propagation, Soc. Expl. Geophys., **8**, 190-198.
 16. Mallick, S., 1995, Model-based inversion of amplitude variation with offset data using a genetic algorithm, Geophysics, **60**, 939-954.
 17. Müller, G., 1983, Rheological properties and velocity dispersion of a medium with power-law dependence of Q on frequency, Geophysics, **54**, 20-29.
 18. Ricker, N. H., 1977, Transient waves in visco-elastic media, Elsevier Scientific Publishing Co.
 19. Rutherford, S. R. and Williams, R. H., 1989, Amplitude-versus-offset variations in gas sands, Geophysics, **54**, 680-688.
 20. Sengupta, M. K., 1993, Report on the joint SEG/EAEG summer research workshop, The Leading Edge, **12**, 41-49.
 21. Shuey, R. T., 1985, A simplification of the Zoeppritz equations, Geophysics, **50**, 609-614.
 22. Soonawala, N. M., 1983, Geophysical logging in granites: Geoexplor., **21**, 221-230.

23. Soonawala, N. M., 1984, An overview of the geophysics activity within the Canadian nuclear fuel waste management program: *Geoexplor.*, **22**, 149-168.
24. Stolt, R., 1978, Migration by Fourier transform, *Geophysics*, **43**, 23-48.
25. SU, 1995, The SU User's Manual, Colorado School of Mines.
26. Swan, H. W., 1991, Amplitude-versus-offset measurement errors in a finely layered medium, *Geophysics*, **56**, 41-49.
27. Taner, M. T., Koehler, F. and Sheriff, R. E., 1979, Complex seismic trace analysis, *Geophysics*, **44**, 1041-1063.
28. Taner, M. T. and Sheriff, R. E., 1977, Application of amplitude, frequency, and other attributes to stratigraphic and hydrocarbon determination, in applications to hydrocarbon exploration, in Payton, C.E., Ed., AAPG Memoir 26, Tulsa, Am. Assn. Petroleum Geologists, 301-329.
29. White, R. E., 1991, Properties of instantaneous seismic attributes, *The Leading Edge*, **10**, 26-32.
30. Yilmaz, Ö., 1989, Seismic data processing, Soc. Expl. Geophys., Investigations in Geophysics ser., 2.
31. Zoeppritz, K., 1919, Über reflection durchgang seismischer wellen durch unstetigkeitsfrachen, *Erdbebenwellen VIII B*, *tinger Nachr*, **1**, 66-84.