

메탄하이드레이트 부존층에서의 지진파 감쇠치 산출

이광호¹⁾, 마츠시마 준¹⁾

¹⁾도쿄대학 공학계연구과 에너지·자원 프론티어센터, nepy@hotmail.com

Estimating attenuation in methane hydrate bearing sediments from surface seismic data

Kwangho Lee¹⁾, Jun Matsushima¹⁾

¹⁾ Frontier Research Center for Energy and Resources,
Graduate School of Engineering, University of Tokyo

요약: 메탄하이드레이트는 새로운 에너지원으로의 가능성뿐 아니라 지구 온난화의 원인으로도 알려져 이에 대한 연구가 활발하다. 메탄하이드레이트 부존층의 평가에 대한 연구는 BSR의 존재와 지진파 속도로부터 메탄하이드레이트 부존량을 추정하는 연구가 주가 되고 있으나, 최근에는 지진파 감쇠특성으로부터 메탄하이드레이트의 분포를 추정하는 연구도 시도되고 있다. 본 연구에서는 일본 난카이 트러프에서 취득된 2차원 반사법 지진파 데이터로부터 지진파 감쇠치(Q^{-1})를 산출하여 메탄하이드레이트 부존층에서의 지진파 감쇠특성을 분석하였다. QVO법을 이용하여 주파수 범위 30~70Hz와 오프셋 범위 125~1,575m내에서 제로오프셋 감쇠치를 추정된 결과, BSR상부의 메탄 하이드레이트 부존층에서 지진파 감쇠치가 크게 증가하는 것을 관찰 할 수 있었다. 따라서 본 연구의 결과를 통해 위 주파수 범위내 반사법 지진파의 메탄하이드레이트 부존층내 감쇠 특성을 확인하였으며, 이를 이용한 메탄하이드레이트 농축대의 추정 가능성을 확인하였다.

주요어: 메탄하이드레이트, 지진파 감쇠, quality factor, QVO법, Spectral ratio법

Abstract: Methane hydrates are considered important in terms of their effect on global warming and as potential energy resources. Now, mainly the presence of a BSR and seismic velocity are used for estimation of methane hydrate concentration in the seismic reflection survey. But recent studies on seismic attenuation show that it can be used also to estimate methane hydrates concentration. In this study, we tried to estimate attenuation from 2D seismic reflection data acquired at Nankai Trough in Japan and analyzed attenuation properties in methane hydrate bearing sediments. Seismic attenuation estimated by QVO method in an offset range 125~1,575m. We observed high attenuation in methane hydrate bearing sediments over BSR in a frequency range of 30–70Hz. Thus, this result demonstrates that seismic reflection wave within this frequency range are affected significantly by the existence of methane hydrate concentration zone.

Keyword: methane hydrate, seismic attenuation, quality factor, Q versus offset method, Spectral ratio method

1. 서론

메탄하이드레이트는(Methane Hydrate)는 메탄 분자가 물 분자와 저온고압의 조건에서 물리적으로 결합된 고체상의 물질로 종래의 화석에너지의 대체 가능성뿐만 아니라 지구 온난화의 원인으로서는도 알려져 이에 대한 연구가 활발하다.

메탄하이드레이트를 경제적으로 산출하여 에너지원으로서 활용하기 위해서는 메탄 하이드레이트의 농축지역을 추정하여 그 농축 메커니즘을 해명할 필요가 있다. 현재 이에 대한 연구는 BSR(Bottom simulating reflector)의 존재 및 탄성과 속도와 메탄 하이드레이트의 포화율 사이의 정량적 관계를 추정하여 자원량을 평가하는 방법이 주를 이루고 있다. 하지만 탄성과의 P파 속도는 메탄 하이드레이트 그 자체가 아닌 메탄 하이드레이트, 입자, 공극내 유체로 이루어진 혼합계의 탄성특성을 반영하기 때문에 단순히 메탄하이드레이트 포화율과 P파 속도를 관계 짓기는 어렵다. 이러한 이유 때문에 속도정보 이외의 탄성과 감쇠현상을 이용하여 메탄하이드레이트를 추정하는 연구도 시도 되고 있으며, Matsushima(Sonic log, 2005; VSP, 2006)등은 일본 난카이 트러프지역 (Fig.1.)에서 취득된 다양한 주파수 대역의 지진파 데이터분석을 통해 메탄하이드레이트 부존층에서의 지진파 감쇠현상에 대해 연구하고 있다. 만약 지진파 감쇠정보를 속도정보와 결합하여 분석할 수 있다면 메탄하이드레이트 농축지역 추정이 보다 용이해 질 것이다.

본 연구는 이에 대한 연구의 일부로 메탄하이드레이트 부존층에 대해서는 처음으로 QVO법(Q versus offset method; Dasgupta and Clark, 1998)을 적용하여 2차원 반사법 지진파 데이터로부터 지진파 감쇠치를 산출하였다.

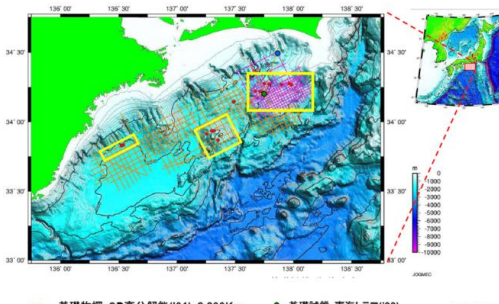


Fig. 1. Location Map of Nankai Trough

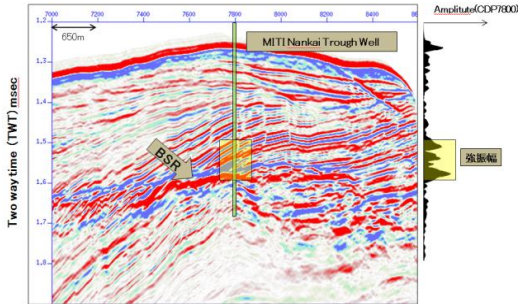


Fig. 2. Seismic section across the MITI Nankai Trough Well (PSW1). BSR can be recognized around TWT 1.6s.

2. 지진파 감쇠

지진파의 진폭은 주행거리에 따라 감소하며, 크게 구형발산 (spherical divergence or geometrical spreading), 내부감쇠(intrinsic attenuation), 산란 (Scattering)의 3가지 형태로 감쇠된다. 여기서 내부감쇠는 탄성과 에너지가 매질을 통과하는 동안 에너지가 마찰열로 변환되어 매질에 흡수되는 것을 말하며, 탄성과가 정확히 어떠한 메커니즘으로 감쇠하는지는 아직 명확하지 않으나 지수함수로 감쇠하는 것은 이미 잘 알려져 있다(Reynolds, 1997). 이는 식(1)과 같이 나타내어 진다.

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{r_1}{r_2} \cdot \exp[-\alpha(r_2 - r_1)] \tag{1}$$

여기서, A_1 와 A_2 는 발진점으로부터의 거리 r_1 과 r_2 에서의 진폭이며, α 는 탄성과 속도 V 와

주파수 f 와 관계하는 감쇠계수(attenuation coefficient)로 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$\alpha = \frac{\pi f}{VQ}, \quad Q^{-1} = 2\alpha\lambda \quad (2)$$

따라서 주파수가 증가함에 따라 감쇠계수도 증가하고, 고주파수 성분이 저주파수 성분보다 더 빨리 감쇠한다. 감쇠계수는 매질의 종류에 따라 다르게 나타나는 단위거리당 에너지 손실률이며, 파장에 따른 손실률은 $2\pi/Q$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 Q 는 비탄성감쇠계수(anelastic attenuation factor)이며, 대부분 식(3)의 표현으로 정리된다(Knopoff & Macdonald's, 1958)

$$Q = 2\pi \frac{E_0}{\Delta E} \quad (3)$$

여기서, E_0 는 최대 응력 에너지이며, ΔE 는 1주기 동안 손실된 에너지이다. 따라서 Q^{-1} 값이 에너지 손실을 나타내는 비손실 함수(specific dissipation function)가 된다.

Q 값의 예측은 inverse Q deconvolution 처리를 통해 탄성파데이터의 분해능을 향상시키고 진폭분석(amplitude analysis)을 용이하게 하는 한편, 그 자체로서 암석의 물성을 나타내는 값으로도 유용하다(Dasgupta and Clark, 1998).

3. QVO법

QVO법은 NMO보정된 CDP gather에 창함수(Window function)를 적용하여 단시간 푸리에변환(Short time fourier transform : STFT)으로 주파수 영역으로 변환 후, NMO stretch의 보정과 3~5개의 트레이스간 부분적인 중합으로 S/N비를 향상시킨 후, Spectral ratio법과 최소자승법을 이용한 직선 근사로 두 반사이벤트간의 제로오프셋(Zero offset) 감쇠치를 구하는 방법이다.

Spectral ratio법은 두 리시버간의 파형의 변화로부터 감쇠치를 구하는 방법으로 스펙트럼 진폭의 로그가 주파수 축에서 거의 직선으로 감소하는 것을 기초로 하고 있다.

$$A_2(f, x_2) = B \cdot A_1(f, x_1) \cdot e^{-\frac{\pi \Delta t}{Q}} \quad (4)$$

여기서 f 는 주파수, x_1 과 x_2 는 거리, Δt 는 x_1 과 x_2 사이의 지진파 도달시간의 차이이며, B 는 발신기 및 리시버의 특성, 기하학적 특성을 포함한 매개변수이다. 이 식은 로그를 취하여 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln \left[\frac{A_2}{A_1} \right] = -\frac{\pi \cdot \Delta t}{Q} + C \quad (5)$$

따라서 두 진폭 비의 로그는 주파수축상에서 직선으로 나타나며 그 기울기는 $-(\pi \cdot \Delta t)/Q$ 가 된다. 그러므로 두 반사면 간 진폭 비를 로그를 취하여 주파수축상에서 그래프로 나타내어 직선을 근사하여 기울기(Spectral ratio slope)를 구하고, Δt 를 대입 함으로서 Q 값을 계산할 수 있다. 반사법 데이터에서는 이를 각각의 오프셋에 대해 실시한 후, 오프셋자승에 대한 직선근사로 제로오프셋에서의 기울기(zero-offset spectral ratio slope)를 구할 수 있다.

4. 현장데이터에의 적용

본 연구에서는 일본 난카이 트러프에서 취득된 2차원 탄성과 탐사 데이터로부터 QVO법을 이용하여 지진파 감쇠치를 산출하였다. 전처리 과정에서 진폭 및 주파수에 대해 Surface constant correction 처리 및 저주파수 필터링을 통한 노이즈 저감 처리가 실시된 CDP gather가 사용되었으며, Reference signature로는 소스신호(Source signature)대신 해저 반사면 신호를 사용하였으며, S/N비를 향상시키기 위해 NMO보정 후 근거리 오프셋 4개의 트레이스를 부분적으로 중합(stack)하여 사용하였다. 한편, 반사면 신호 (reflector signature)는 NMO stretch에 의한 주파수 왜곡(spectral distortion)을 피하고 정확한 분석을 위하여 NMO보정 실시 없이 각각의 트레이스 별로 파형을 선택하여 창 함수를 적용하였다. 파형의 주기는 평균 2주기이며 경우에 따라 3주기를 선택하였다.

Spectral ratio slope를 도출하기 위한 주파수 범위는 30~70Hz부터 심도에 따라 40~60Hz의 범위로 줄여 적용하였으며, Spectral ratio의 분포가 불안정하여 주파수 범위가 확보되지 않은 경우에는 다른 파형을 선택하여 반복하여 실시하였다. 적용된 오프셋 범위는 125m에서 평균1575m까지며, 먼 오프셋(far offset)데이터의 질에 따라 범위를 줄여 적용하였다.

Fig. 3. a는 해저 반사면에서 BSR 상부까지의 범위에 대해 오프셋에 따른 Log Spectral Ratio(LSR)변화를 나타내고 있으며 대체적으로 주파수 범위 30-80Hz범위에서 LSR이 직선에 가깝게 나타나며 오프셋이 증가함에 따라 기울기도 조금씩 급해지는 것을 알 수 있다. Fig. 3. b는 각 오프셋 자승에 대한 LSR을 나타내고 있으며 직선근사에 의한 Y절편을 구함으로써 제로오프셋에서의 LSR과 감쇠치를 구할 수 있다.

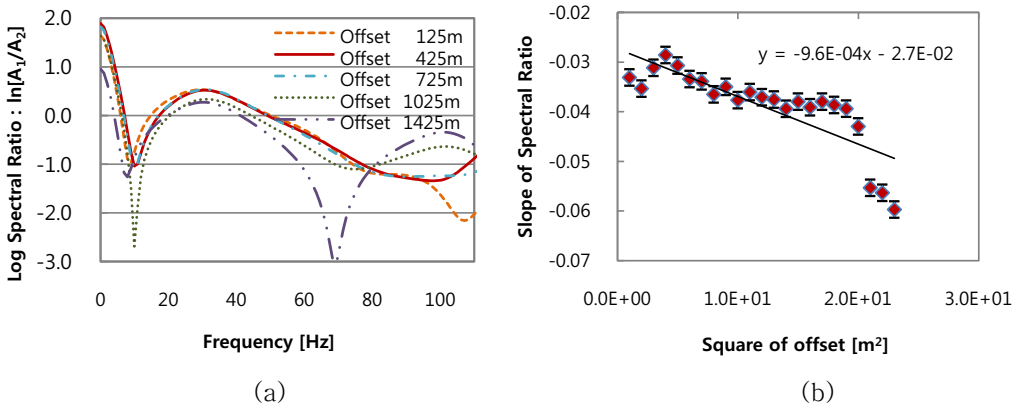


Fig. 3. (a) Log spectral ratio and (b) Slope of log spectral ratio in the frequency range 30-70Hz, from sea bottom reflector to BSR (TWT 1266-1587ms) at CDP7800

5. 산출 결과

해저 반사면에서 각각의 반사이벤트간의 평균 Q값을 산출한 후 식(6)에 의해 각 반사면 간의 구간 감쇠치(Q_i^{-1})를 산출하였다.

$$\frac{t_n - t_{n-1}}{Q_i} = \frac{t_n}{Q_n} - \frac{t_{n-1}}{Q_{n-1}} \quad (6)$$

여기서 t_n 와 Q_n 는 소스에서 n번째 반사면까지의 도달시간 및 평균 Q값이다.

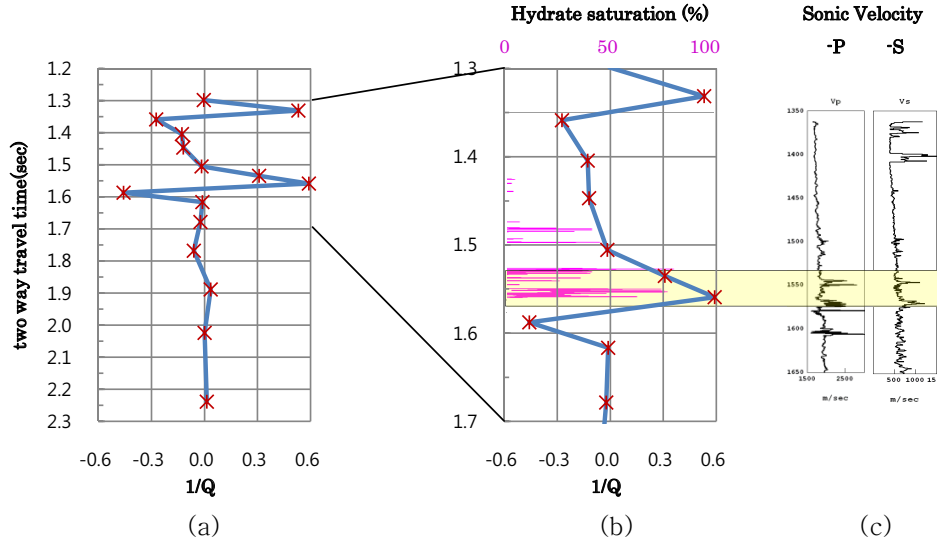


Fig. 4. (a) Average attenuation(Q^{-1}) of 2CDPs (b) with hydrate saturation and (c) sonic velocities

또한 보다 안정적인 Q값을 산출하기 위해 2개의 CDP데이터로부터 Q^{-1} 를 구하여 평균치를 구하였다. Fig. 4. 는 시간 축 상에서 심도에 따른 감쇠치 변화를 보여준다. 시간구간 1.5~1.6s에서 Q^{-1} 값이 크게 증가하는 것을 알 수 있다(+, -양방향). 이는 물리검층 데이터에서 지진파 속도와 비저항이 증가하고 하이드레이트 포화도가 크게 나타나는 구간과 일치하는 것으로 하이드레이트 부존층에서 지진파 감쇠치가 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 여기서 한가지 특이한 점은 물리적으로는 나타날 수 없는 마이너스의 Q^{-1} 값이 나타나고 있는 것인데, 이는 산란(scattering effect)이나 노이즈(ambient noise)등이 원인으로 생각된다(Matsushima, 2006). 또한 시간구간 1.3~1.4s에서도 Q^{-1} 값이 크게 나타나고 있으나 이 역시 지진파가 해저면에 입사한 직후 산란에 의한 에너지 변화가 크게 일어나는 것이 원인으로 생각된다(Lee, 2009).

6. 결론

본 연구에서는 일본 난카이 트러프 메탄하이드레이트 부존층에 대하여 QVO법을 이용하여 2차원 탄성과 데이터로부터 지진파 감쇠치(Q^{-1})를 산출하였다. 물리검층으로 얻어진 속도데이터 및 하이드레이트 포화율과 비교 분석한 결과 BSR 상부의 메탄하이드레이트 부존층에서 지진파 감쇠치가 크게 증가하는 것을 관찰 할 수 있었다. 따라서 주파수 범위 30~70Hz의 반사법 지진파가 메탄하이드레이트 부존층에서 크게 감쇠하는 특성을 가지고 있다고 할 수 있다. Q값은 그 자체로서 암석의 물성을 나타내는 값으로 유용하기 때문에 이와 메탄하이드레이트 포화율과의 정량적 관계를 분석한다면, 이를 이용한 메탄 하이드레이트 농축대의 추정이 가능할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구를 실시하는데 있어 이하의 데이터 사용 및 발표를 허가해주신 일본석유천연가스·금속광물자원기구(JOGMEC)에 감사를 드립니다.

- 1999년도 기초시추 「Nankai Trough」 물리검층 데이터
- 2001년도 기초물리탐사 「Tokaioki - Kumanonada」 물리탐사데이터

참고문헌

- Dasgupta, R. and Clark, R. A., 1998, Estimation of Q from surface seismic reflection data, *Geophysics*, 63, 2120–2128
- Knopoff, L. and McDonald, G.J.F., 1958, Attenuation of small amplitude stress waves in solids : Reviews of modern physics, 30, 1178–1192
- Lee, K., 2009, Seismic attributes and attenuation in methane hydrate bearing sediments at Nankai Trough, M.S. Thesis, The University of Tokyo
- Matsushima, J., 2005, Attenuation measurements from sonic waveform logs in methane hydrate-bearing sediments at the Nankai Trough exploratory well off Tokai, central Japan, *Geophysical research letters*, 32, L03306
- Matsushima, J., 2006, Seismic wave attenuation in methane hydrate-bearing sediments : VSP data from the Nankai Trough exploratory well, offshore Tokai, central Japan, *Journal of Geophysical research*, 111, B10101
- Reynolds, J. M., 1997, An introduction to applied and environmental geophysics, Wiley