

음파검층에서의 속도결정 - monopole 및 dipole 소스의 비교

공남영¹⁾, 이성진¹⁾, Weijun Zhao¹⁾, 김영화¹⁾

¹⁾강원대학교 지구물리학과, melongkong@naver.com

Sonic Velocity Determination using Data from Monopole and Dipole Sources

Namyong Kong¹⁾, Sung Jin Lee¹⁾, Weijun Zhao¹⁾, Yeounghwa Kim¹⁾

¹⁾Dept. of Geophysics, Kangwon National University,

요약 : 음파검층을 사용하여 획득한 파형으로부터 정확한 속도분석을 하기 위한 연구의 일환으로 일반적으로 많이 이용되고 있는 STC 방법(Slowness-Time Coherence)을 비롯하여, 파의 분산성을 고려한 Tang et al.의 방법(1995)을 검층시험용 모형공에 적용해 보고 그 결과를 비교하였다. P파와 Stoneley파 에서는 매우 일관된 속도값을 보여 STC방법의 효과가 확인되었다. Tang et al.의 방법(1995)에서 구해진 S파 속도는 monopole source의 S파속도와 잘 일치되고 dipole source의 자료에 대한 monopole technique의 STC방법에서의 S파속도 범위 내에 있는 것이 확인되었다.

주요어 : 음파검층, semblance, s파, 속도, 분산성

Abstract : As a study of efficient velocity analysis in sonic log, several preexisting techniques have been adopted to the sonic data taken from model borehole in Kangwon National University, and the results were compared. For the data taken from monopole source, Slowness-Time Coherence method which is a common technique for nondispersive wave was used. For the data taken from dipole source, conventional STC and Tang's method(Tang et al., 1995) were used. From the good matches in the P and Stoneley wave velocities, we could confirm the effectiveness of STC computation. We also could find that shear velocity obtained from Tang's method were exactly matched with shear velocity obtained from monopole source, and that the velocity were within the range of S wave velocity values obtained from conventional STC application to dispersive flexural waves.

Keywords : sonic log, semblance, s wave, velocity, dispersive

1. 연구 배경

시추공에서의 물리검층은 시추공 주변의 암반 물성들을 원위치상태에서 측정하는 물리탐사방법이다. 그 중에서 음파검층은 지반의 원위치 탄성과 속도를 제공해주는 검층방법으로 시추공 내에서 음파 방생장치와 수신 장치로 구성된 검출기를 이용하여 시추공 주변의 구성 암반의 P파 및 S파의 속도의 수직적 분포를 파악하는 검층법이다(Keys, 1989). 밀도검층과 함께 동적탄성계수의 산출과 지하수 흐름의 측정 등에 이용되고 있으며, 특히 토목목적의 지질조사에서 효과적으로 활용되고 있다.

정확한 P파와 S파의 속도를 결정하기 위해 여러 방법들이 개발되어 왔으며, monopole 소스로부터의 압축파, 즉 비분산성 파(nondispersive wave)를 처리하는 방법과 dipole 소스로부터의 flexural wave, 즉 분산성 파(dispersive wave)를 처리하는 방법들에 대한 연구로 구분될 수 있다. Nondispersive wave의 처리방법으로는 Semblance 기법을 이용한 파형의 일관성에 대하여 측정하는 방법인 STC(Slowness-Time Coherence) 방법(Kimball and Marzetta, 1984)과, McFadden et al.(1986)에 의해 개발된 N-th root 방법, 그리고 Fourier transform과 phase shifting등을 이용하는 MLM(Maximum Likelihood Method)(Hsu, et al., 1986)등이 일반적으로 많이 사용되어지고 있다.

Dispersive wave의 처리방법은 acoustic wave의 속도가 주파수에 따라 변하는 분산 효과를 이용하는 기법으로, Receiver에서 획득한 파형과 receiver로부터 수학적으로 계산되어진 다른 receiver의 파형을 비교함으로써 S파의 속도를 결정하는 방법과(X. M. Tang et al., 1995), STC기법에 dispersion wave의 특징을 활용하여 semblance를 계산하는 DSTC(Dispersion Slowness Time Coherence)방법(C. V. Kimball, 1998), Nolte and Huang(1997)에 의해 개발된 Weighted Spectral Semblance 방법 등이 있다.

본 논문에서는 음파검층을 사용하여 획득한 파형으로부터 정확한 속도분석을 하기 위하여 일반적으로 많이 이용되고 있는 STC 방법과 파의 분산성을 고려한 Tang et al.의 방법을 적용, 비교하였다.

2. 자료 획득

강원대학교 내에 위치한 K LW-4 모형공을 대상으로 음파검층을 실시하였으며, 이때 장비는 Mount Sopris사의 2SAA-1000/F Sonic probe를 사용하였다. 사용된 Sonic probe는 음원을 발생하는 하나의 transmitter와 3개의 receiver로 구성되어 있으며(Fig. 1), 1~30 kHz의 다양한 주파수대역을 갖는다. 또한 음원이 시추공에 대칭인 monopole source와 시추공에 비대칭인 dipole source의 음원을 사용할 수 있다. 검층 시 Sonde의 이동속도는 stack interval 과 number of samples 등을 고려하여 2~2.5 m/min의 속도로 상향식으로 측정이 이루어졌다.

실험은 monopole source를 이용한 측정과 dipole source를 이용한 측정을 병행했으며 두 소스에서 모두 1, 3, 5, 10, 20, 30 kHz의 주파수로 데이터를 획득하였다. 자료의 처리는 정확한 상호 비교를 위해 calibration zone 내의 같은 심도에서의 자료를 이용하였다.

Fig. 2는 K LW-4 시추공에서 음파검층으로 획득한 파형이다.

실험이 진행된 K LW-4 시추공은 지구물리 검층 보정용 모형 시추공으로, 보정 구간의 밀도가 1.741 g/cm³인 NX 크기의 시추공이다(김영화 외, 2005).

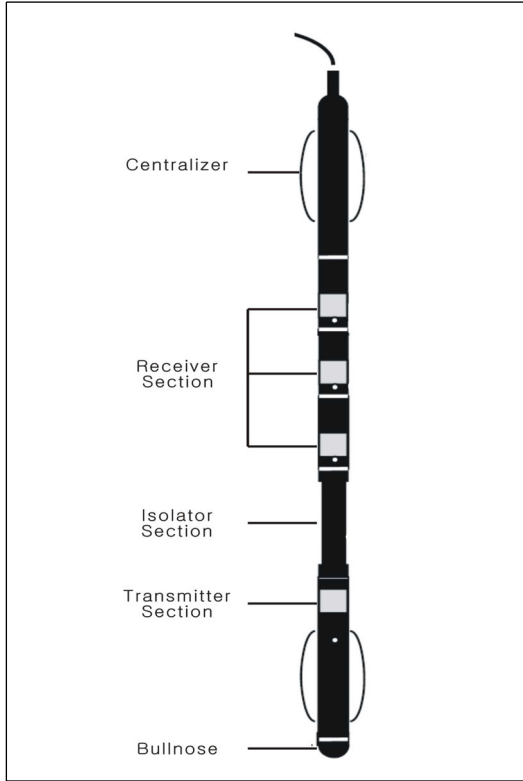


Fig. 1. 2SAA-1000/F Sonic probe

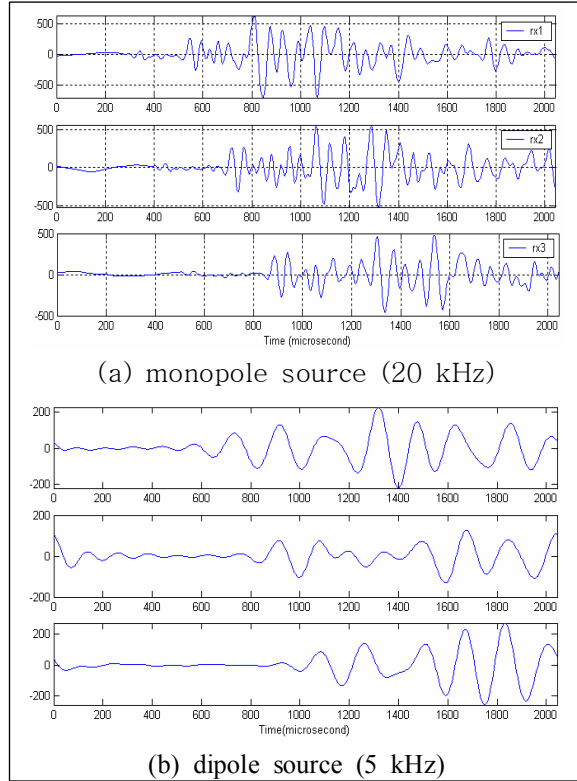


Fig. 2. Waveforms obtained from borehole K LW-4(21th data)

3. Monopole source 속도분석

음파 검층의 속도 분석을 위하여 Semblance 기법을 이용한 파형의 일관성에 대하여 측정하는 방법인 STC(Slowness-Time Coherence)을 사용하였다. STC Method는 sonic waveform으로부터 속도나 travel time을 picking하는 cross-correlation의 한 형태로, 여러 receiver 간의 일관성에 대하여 측정하여 P파와 S파 등 각 모드의 속도를 결정하는 방법이다(Kimball and Marzetta, 1984).

STC method는 monopole source에서 P파와 S파, 그리고 Stoneley wave 등 다양한 파를 결정하는데 사용된다. Semblance 방정식은 arrival time과 slowness의 함수로 정의되며, 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\rho^2(s, \tau) = \frac{\frac{1}{M} \int_{t=0}^{Tw} \left[\sum_{m=1}^M r_m [t + s(z_m - z_1) + \tau] \right]^2 dt}{\sum_{m=1}^M \int_{t=0}^{Tw} r_m [t + s(z_m - z_1) + \tau]^2 dt} \quad (1)$$

이때, Tw는 window width 이고, s는 slowness로써 속도의 역수이며, τ 는 첫 번째 receiver까지 arrival time 이다. 식 1에서 ρ 값은 0에서 1사이의 값을 보이는데, 일정한 window width(Tw) 범위 내에서 receiver 간의 일관성이 가장 좋을 때는 ρ 값이 1에 근접하며, 그렇지 않을 경우에는 0에 근접한 값을 보인다. 따라서 ρ 값이 최대가 되는 peak에서 s(slowness)를 결정하여 속도를 구하였다. Fig. 3은 1, 3, 5, 10, 20, 30

kHz의 주파수를 사용하여 계산된 semblance를 contour plot 한 결과이다.

Monopole의 경우 저주파(1, 3, 5 kHz)에서 P파의 에너지가 너무 작아 P파의 영역이 잘 나타나지는 않으며 20 kHz 이상에서 뚜렷하게 나타났다. 이에 비하여 S파 peak는 전체적으로 잘 나타나며 3 kHz 이하의 경우는 불명확하다. P파와 S파의 속도는 각각 2.89 km/s, 1.78 km/s로 대부분의 측정에서 일관된 결과를 얻을 수 있었다. Stoneley 파의 경우, 일반적으로 잘 관찰되는 Monopole에서는 5kHz이하에서 잘 관찰되고 있으며, 속도값은 1.3 km/s로 나타났다.

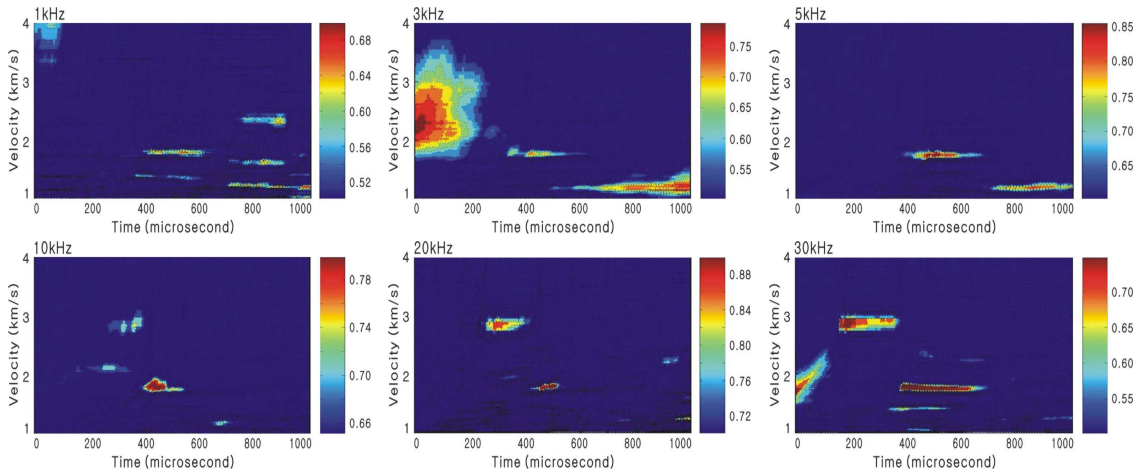


Fig. 3. Semblance results in the center frequency ranging from 1 to 30 kHz for monopole source at calibration zone of K LW-4.

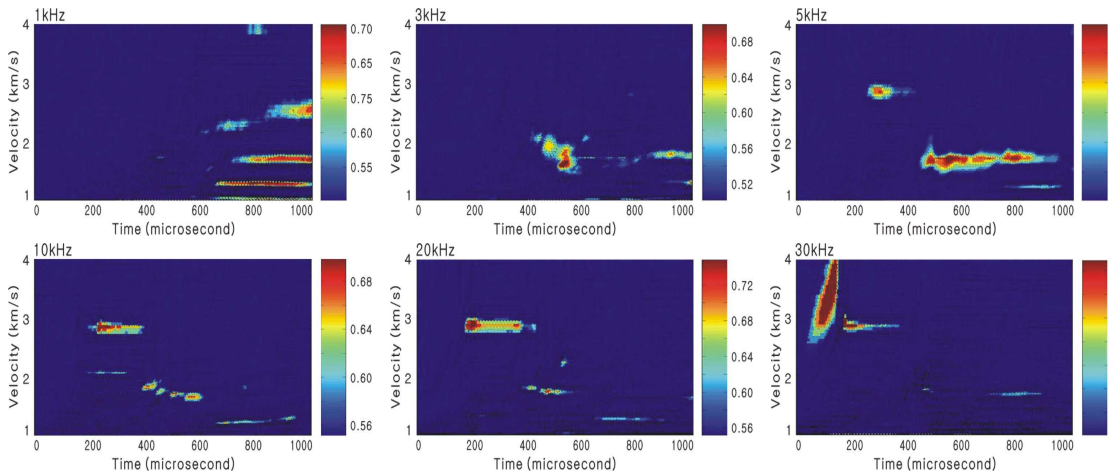


Fig. 4. Semblance results in the center frequency ranging from 1 to 30 kHz for dipole source at calibration zone of K LW-4.

4. Dipole source 속도분석

S파의 속도 결정에 있어서, 특히 slow formation에 있어서는 한 방향으로 에너지를 방사하여 지층의 이방성을 추정할 수 있는 Dipole source를 사용한다. Dipole source는 fast formation과 slow formation 모두에서 강한 s파를 발생시키는데, 이 파를 flexural wave 또는 bender wave라 한다. Fig. 4은 dipole source를 사용하여 얻은 1, 3, 5, 10, 20, 30 kHz의 주파수 자료를 monopole processing technique으로 동일하게 처리한 결과이다.

Dipole의 경우 P파 peak는 미약하며 5 kHz이상의 주파수에서 약하게 나타났다. S파

는 5~20 kHz 주파수에서 여러 개의 peak로 관찰되어 분산성 파의 특징을(Kimball, 1998) 시사하고 있다. 얻어진 P파 속도는 2.89 km/s로서 monopole의 경우와 동일하게 나타났다. S파의 속도는 1.65~1.85 km/s의 범위 내에 있다. Stoneley 파의 경우 dipole에서는 1 kHz에서만 관찰되었는데, 1.3 km/s로 monopole에서와 동일한 속도 값을 나타내고 있다.

Dipole source 속도분석을 위한 두 번째의 적용으로 Tang et al.(1995)이 제시한 아래의 과정에 의하여 일차 receiver의 파형으로부터 다음에 오는 각 receiver의 파형을 모델링하여 구하고, 각 receiver에서 모형 파형들과 실제 얻어진 파형을 비교하여, 파형간의 위상차가 최소가 될 때의 속도를 구했다.

(1) Frequency domain에서 Fourier transform을 사용하여 파형을 변환한 후, amplitude spectrum(fig. 5)과 phase spectrum(fig. 6)을 얻었다.

$$W(w, z_j) = A(w, z_j) e^{i\phi_j}, \quad (j=1, 2, 3) \quad (2)$$

$$RX_1(f) = A_1(f) e^{i\phi_1(f)}, \quad RX_2(f) = A_2(f) e^{i\phi_2(f)}, \quad RX_3(f) = A_3(f) e^{i\phi_3(f)}$$

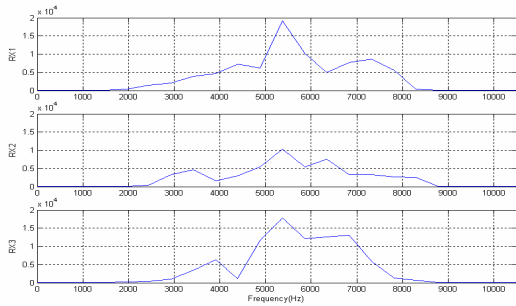


Fig. 5. Amplitude spectrum for common source waveforms.

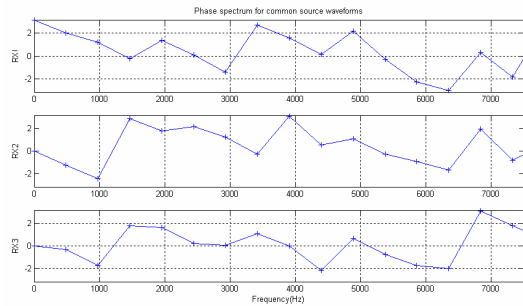


Fig. 6. Phase spectrum for common source waveforms.

(2) Trial shear velocity (V_{s0})를 입력하여, 관심 주파수 대역에서 dispersion 방정식으로 flexural wave 위상속도를 얻었다(Fig. 7).

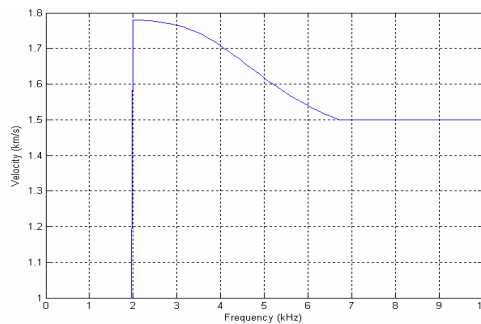


Fig. 7. Flexural waves dispersion curves in amplified KLW-4 boreholes.

(3) Receiver의 파형을 이용하여 다른 receiver 파형을 수학적으로 계산하여 simulate한 다음 위상과 평균진폭을 계산하고, receiver에 기록된 파형과 비교하여 위상차와 평균진폭을 계산하였다.

(4) Trial shear velocity (V_{s0})를 변화시켜 (2)~(3)의 과정을 반복 계산하였다.

(5) 최소화를 위한 cost function, 식 (5)를 이용하여 \mathcal{W} (simulated waveforms)와

W(received waveforms)의 위상차가 최소일 때의 Vs를 결정하였다.

$$E(V_s) = \sum_w A(w) \left| \sum_j \tilde{\phi}(V_s, w, z_j) - \phi(w, z_j) \right| \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\phi}_{12}(V_s, f, z_2) &= \phi_1(f, z_1) + k_0(V_s, f) \Delta z \\ \tilde{\phi}_{13}(V_s, f, z_3) &= \phi_1(f, z_1) + 2k_0(V_s, f) \Delta z \\ \tilde{\phi}_{23}(V_s, f, z_3) &= \phi_2(f, z_1) + k_0(V_s, f) \Delta z \end{aligned}$$

(6) Forward prediction으로 얻어진 Vs값은 1.77 km/s로 나타났다. 또한 위와 똑같은 방법을 마지막 receiver(세번째 receiver)를 기준으로 역으로 적용(backward prediction)하였을 때는 2.08 km/s의 Vs의 속도값이 얻어졌다.

5. 결과요약 및 토의

음파검층을 사용하여 획득한 파형으로부터 정확한 속도분석을 하기 위한 연구의 일환으로 일반적으로 많이 이용되고 있는 STC(Slowness-Time Coherence) 방법을 비롯하여, 파의 분산성을 고려한 Tang et al.의 방법(1995)을 적용해 보고 그 결과를 비교하였다.

Monopole source의 자료를 속도분석 한 결과, 상대적으로 고주파에서는 P파, 저주파에서 Stoneley 파가 잘 관찰되는 현상이 뚜렷하게 나타났으며, S파는 5~30 kHz범위 내에서 잘 관찰되었다. P파와 S파 및 Stoneley 파의 속도는 각각 2.89 km/s, 1.78 km/s, 1.3 km/s로 일관된 결과를 얻었다.

Dipole source의 자료에 대하여 monopole technique의 STC방법을 적용한 결과는, 일부 주파수영역에서 monopole source에서의 얻어진 값과 동일한 2.89 km/s, 1.3 km/s의 속도값을 가지는 P파와 Stoneley 파의 peak와 1.65~1.85 km/s의 범위를 갖는 여러 개의 S파 semblance peak로 나타났다. 일부 주파수영역에서 나타난 P파와 Stoneley 파의 피크는 필터적용 과정에서 이 주파수 영역을 완전히 제거하지 못함에 따른 결과이나 동일한 속도값의 산출은 semblance방법의 효과 내지 정확성을 시사하고 있다. S파에서의 여러 개의 semblance peak는 flexural wave의 분산성 파의 특징에 해당(Kimball, 1998)하는 것으로 판단된다.

Dipole source의 자료에 대하여 Tang et al.(1995)에 의한 방법으로 속도 분석을 한 결과는 forward prediction 와 backward prediction 상황에서의 Vs가 각각 1.77 km/s 와 2.08 km/s의 결과를 얻었다. 이 값을 monopole source에서의 속도와 비교하였을 때, forward prediction에서는 2.9%의 오차를 보였고, backward prediction의 경우는 20.9%의 오차를 보였다. 아울러 이 결과를 monopole기법에 근거한 dipole source의 STC 결과와 비교할 때, forward prediction에서는 1.6~1.9 km/s 범위 내에 드는 반면에 backward prediction의 경우는 1.6~1.9 km/s 범위를 벗어난 결과로 나타났다. 이는 backward 방법이 forward 방법보다 상대적으로 transmitter로부터 receiver의 거리가 멀어서 noise에 대한 영향을 많이 받은 것으로 판단하였다.

정확한 S파의 속도 결정을 위해 현재 dispersive wave에 대한 연구로 DSTC(Dispersion Slowness Time Coherence)방법(C. V. Kimball, 1998)과 Nolte and Huang(1997)에 의해 개발된 Weighted Spectral Semblance 방법의 적용, 비교를 진행 중에 있으며, 이로부터 현장 음파 검층 속도결정에 보다 확실한 기준 제시가 가능할 것으로

기대된다.

참고문헌

- 김영화, 김지훈, 공남영, Weijun Zhao, 2005, 밀도검층의 효과적인 현장 적용을 위한 모형보정공
건설과 밀도 보정 기초연구, 한국물리탐사학회 제7회특별심포지엄, 73-82.
- Keys, W. S., 1989, Borehole Geophysics applied to groundwater investigation, *National
Water Well Association*, 209-220
- Kimball, C. V., Marzetta, T.L., 1984, Semblance processing of borehole acoustic array
data, *Geophysics*, **49**, 274-281.
- Kimball, C. V., 1998, Shear slowness measurement by dispersive processing of the
borehole flexural mode, *Geophysics*, **63**, 337-344.
- Tang, X. M., E. C. Reiter, D. R. Burns, 1995, A dispersive-wave processing technique
for estimating formation shear velocity from dipole and Stoneley waveforms,
Geophysics, **60**, 19-28.