

한반도 지각의 무브아웃 속도 및 유효비타원율 시험적 산출

김기영¹ · 박이슬¹ · 변중무² · 이정모^{3*}

¹강원대학교 지질 · 지구물리학과

²한양대학교 자원환경공학과

³경북대학교 지질학과

Moveout Velocities and Effective Anellipticity of the Crust in the Korean Peninsula

Ki Young Kim¹, Iseul Park¹, Joongmoo Byun², and Jung Mo Lee^{3*}

¹*Division of Geology and Geophysics, Kangwon National University*

²*Department of Natural Resources and Environmental Engineering, Hanyang University*

³*Department of Geology, Kyungpook National University*

요약: 2002년에 기록한 굴절과 시험자료에 지진파 간섭학적 방법을 적용하여 구한 가상파원자료를 이용하여 한반도 지각의 무브아웃 속도와 이방계수 유효비타원율을 8개 장소에서 시험적으로 구하였다. 대략적 모호 깊이의 반사파 이벤트 무브아웃 속도는 6.30 ± 0.25 km/s이며, 원거리 윗셋 반사파 주시를 테일러 근사식 3항까지 전개하여 구한 지각의 유효비타원율은 0.18 ± 0.07 이다.

주요어: 지진파 간섭학, 지각, 무브아웃 속도, 유효비타원율

Abstract: Virtual source data were produced by applying the seismic interferometry to the 2002 experimental seismic refraction data. Using the data, moveout velocities and effective anellipticity were experimentally computed for the crust at eight sites in the Korean peninsula. The moveout velocities of reflection events at approximate Moho depths were yielded to be 6.30 ± 0.25 km/s using near-offset traveltimes. Expanding the Taylor approximation to the 3rd term for far-offset traveltimes, the effective anellipticity parameters were computed to be 0.18 ± 0.07 for the crust material.

Keywords: seismic interferometry, crust, moveout velocity, effective anellipticity

서 론

물질의 특성이 방향에 따라 변할 때 이방성을 갖는다고 말한다. 반사된 지진파를 이용하여 지하 지질구조를 영상화할 때, 수직경로시차보정(normal moveout correction) 및 구조보정(migration) 등을 위한 속도에 영향을 미치는 이방성은 발생 원인에 따라 몇 가지로 나눌 수 있다. 본질적(inherent) 이방성은 광물의 결정구조나 암석 구성입자의 형태에 의해 발생하며

(Crampin, 1984), 유도성(induced) 이방성은 응력에 의해 암석이 우세한 방향으로 늘어서거나 균열 발생에 기인하고, 장파장(long wavelength) 이방성은 등방성 지층이 얇게 쌓여 있는 경우에 대표적으로 발생한다(Tatham and McCormack, 1991).

비교적 윗셋이 큰 경우와 본질적 및 유도성 이방성 매질 경계면에서 반사된 지진파 주시는 고차 근사식을 이용하여 비교적 잘 표현될 수 있으므로(Alkhalifah and Tsvankin, 1995), 윗셋이 비교적 먼 반사파 자료를 이용하여 지층의 속도와 이방성을 구할 수 있다(Abbad *et al.*, 2009). 그러나 윗셋에 따른 진폭변화(amplitude variation with offset: AVO) 등의 특수한 목적을 제외하면 대부분의 반사파 탐사의 경우에 임계거리 이내의 윗셋 자료만을 기록하므로, 원거리 윗셋(far offset) 자료가 흔하지 않다. 더욱이 국내에서는 수십 km 깊이의 지각구조 영상화를 위한 반사파 탐사가 수행된 바 없으며, 2000년대 3차에 걸쳐 굴절과 탐사자료가 얻어진 것이 전부이다(Kim *et al.*, 2007a; Cho *et al.*, 2006; Cho *et al.*, 2013).

따라서 이 연구에서는 2000년 이후 본격적으로 연구되기 시

Received: 30 March 2017; Accepted: 7 April 2017

*Corresponding author

E-mail: jung@knu.ac.kr

Address: Department of Geology, Kyungpook National University, 80 Daehakro, Bukgu, Daegu 41566 Korea

©2017, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

작한 지진파 간섭학적 방법(seismic interferometry; Schuster, 2009)을 적용하여, 한반도 지각의 속도 이방성을 밝히고자 한다. 이를 위하여 굴절과 탐사자료로부터 작성한 가상파원자료(virtual source data)를 이용하여, 한반도 지각의 무브아웃(moveout) 속도와 이방계수인 유효비타원율(effective anellipticity)을 시험적으로 구하였다.

반사파 주시

반사파의 무브아웃은 $t^2(x)$ 의 테일러 전개식,

$$t^2(x) = A_0 + A_2x^2 + A_4x^4 + \dots, \quad (1)$$

으로 근사하게 나타낼 수 있으며(Taner and Koehler, 1969),

여기서 $A_0 = t_0^2$, $A_2 = \frac{dt^2}{dx^2}\Big|_{x=0}$, $A_4 = \frac{1}{2} \frac{d}{dx^2} \left(\frac{dt^2}{dx^2} \right)\Big|_{x=0}$ 이다. t_0 는 영거리 반사주시로서 최적 쌍곡선으로 구한 수직 반사주시 t_v 와는 일반적으로 차이가 있고, 짧은 배열의 무브아웃 속도인 V_{nmo} 는 $1/\sqrt{A_2}$ 의 관계를 갖는다. 일반적 반사파 탐사 시, 배열길이(L)가 최대 반사깊이(H)보다 크지 않다고 가정하고(즉, $L < H$), 테일러 전개의 2항까지만 취하여

$$t^2(x) \approx t_v^2(x) = t_v^2 + \frac{x^2}{V_{nmo}^2}, \quad (2)$$

근사 형태를 많이 사용한다. 이 식은 배열이 짧을 뿐만 아니라 등방성 수평층을 가정할 수 있는 경우에 적용할 수 있다.

이방성

약한 VTI (vertical transverse isotropy) 매질에서 V_{nmo} 는

$$V_{nmo}^2(P) = V_{PV}^2(1+2\delta), \quad (3)$$

의 형태로 나타낼 수 있으며(Thomsen, 1986), 여기서 δ 는 Thomsen 이방계수라고 불리우기도 한다. Thomsen (1986)은 이방성이 약한 VTI 매질의 탄성텐서(stiffness tensor) 계수를 대칭축 방향의 P파 속도(V_P) 및 S파 속도(V_S)와 3개의 이방계수 ϵ , γ , δ 로 나타낸 바 있다. 이 중, γ 는 SH파 이방계수로 P-SV파와 분리되어 있으므로 VTI 매질에서 V_P 에는 영향을 주지 않는다.

P파 이방계수라고도 흔히 불리는 ϵ 은

$$\epsilon = \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}} = \frac{V_{PH}^2 - V_{PV}^2}{2V_{PV}^2}, \quad (4)$$

으로 정의된다. 여기서 C_{ij} 는 탄성텐서를 행렬형태로 표시한 것으로 i 번째 행 j 번째 열의 요소값이며, V_{PH} 와 V_{PV} 는 P파의 수평 및 수직 속도이다. 한편 또 다른 이방계수 δ 는 거의 수직으로 입사하는 P파에 영향을 많이 미치고 SV파 속도에도

영향을 주며

$$\delta = \frac{(C_{13} + C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})^2}{2C_{33}(C_{33} - C_{44})}, \quad (5)$$

으로 정의된다.

식 (3)과 식 (4)로부터, $\epsilon = \delta$ (즉, 타원형 이방체)인 경우에만 $V_{PH} = V_{nmo}$ 가 되어 P파 무브아웃이 쌍곡선이 된다(Levin, 1978). 대다수의 지각 구성 암석들의 경우에는 $\epsilon > \delta$ 인 본질적 이방성(intrinsic anisotropy)이 있으며(Thomsen, 1986), 얇은 등방성 층구조에 의한 외부 이방성(extrinsic anisotropy)의 경우에는 비타원율,

$$\eta = \frac{\epsilon - \delta}{1 + 2\delta}, \quad (6)$$

는 항상 양의 값을 갖는다. 이 이방계수 η 는 VTI 매질 내에서 반사된 P파의 시간영역 자료처리 시, 주시를 결정하는 핵심적 역할을 한다.

배열길이(L)가 반사깊이(H)와 2H 사이에 있을 때 (즉, $H < L < 2H$), 테일러 식 (1)에서 처음 2개항 뿐만 아니라 3번째 항 까지도 고려해야 한다. 3번째 항 계수는 Tsvankin and Thomsen (1994)의 식을 수정한

$$A_4 = - \frac{2\eta}{V_{nmo}^2 [t_0^2 V_{nmo}^2 + (1 + 2\eta)x^2]}, \quad (7)$$

의 형태로 간단히 나타낼 수 있다(Alkhalifah, 1997). 다층구조 일 때는 유효비타원율(effective anellipticity)

$$\bar{\eta}(t_0) = \frac{1}{8} \left[\frac{1}{t_0 V_{nmo}^4(t_0)} \int_0^{t_0} V_{nmo}^4(t) \{1 + 8\eta(t)\} dt - 1 \right], \quad (8)$$

를 η 대신 사용한다. 원거리 윗셋자료가 있을 때, 전개길이가 $L < H$ 와 $H < L < 2H$ 범위인 반사파 주시로부터 식 (2)와 식 (7)을 이용하여 V_{nmo} 와 $\bar{\eta}$ 를 각각 구할 수 있다.

지각 속도 및 이방성

한반도를 가로질러 3개 축선을 따라 굴절파 시험자료를 2000년대에 기록한 바 있다. 이 중, 한반도 지각의 무브아웃 속도 및 이방성을 시험적으로 분석하기 위하여, 195개 수신점에서 2 Hz 이동식 지진계로 기록한 2002년도 서산발파 자료를 사용하였다(Fig. 1). 지진파 간섭학적 방법을 적용하기 전에 각 수신기 위치의 고도정보를 이용한 고도보정 및 대역필터(3-4-5-7 Hz)를 적용하여 신호대 잡음비를 높였다. 각 수신점을 가상파원으로 하여 나머지 194개 기록자료와 상호상관함으로써, 195개 가상파원(virtual source data)별로 194개 트레이스를 작성하였다. 이 후 각 수신점의 위치정보를 이용하여 중앙점(midpoint)을 구하고, 이를 3.75 km 간격의 공중점으로 분류하

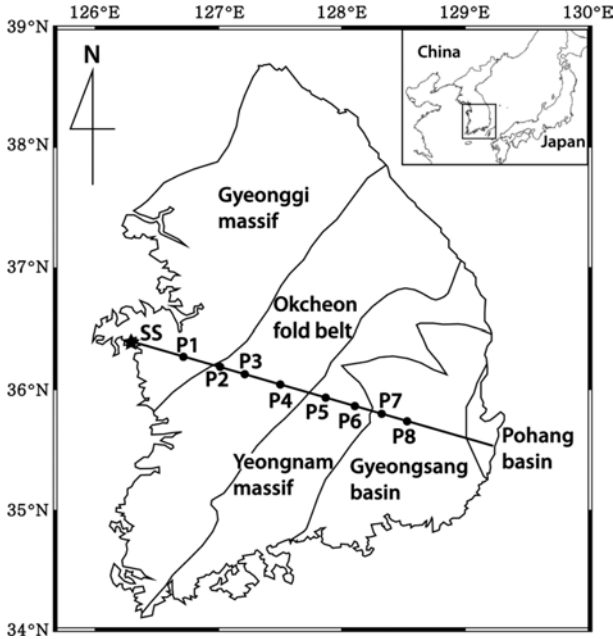


Fig. 1. Simplified tectonic map of the southern part of the Korean peninsula. Locations of the real shot location at Seosan (star) and the selected eight common-midpoint sites (solid circles) are indicated on the KCRT 2002 profile across the peninsula.

였다. 중첩도가 100 이상이며 최대 윗셋이 80 km 이상인 공중점 자료 중, 비교적 신호대 잡음비(S/N)가 높아서 분석대상으로 선정한 위치는 지체구조상 경기육괴 1곳, 옥천계 3곳, 영남육괴 2곳, 경상분지 2곳이다. 선정된 8개 지점에서, 대부분 대륙에서 모호 반사파가 기록되는 영거리 주시 10 s 부근의 S/N 비가 큰 반사 이벤트 왕복주시를 각각 구하였다(Table 1).

측선 중앙부에 위치한 공중점 P5 자료는 윗셋범위가 1.4 ~

Table 1. Computed vertical reflection time t_v , moveout velocity V_{nmo} , effective anellipticity $\bar{\eta}$, and number of samples n at the eight selected sites along the KCRT 2002 profile across the Korean peninsula (Fig. 1).

Site	t_v (s)	V_{nmo} (km/s)	$\bar{\eta}$	n
P1	8.94	6.40	0.15	9
P2	10.16	6.31	0.17	7
P3	9.89	6.68	0.12	8
P4	9.93	6.59	0.06	12
P5	10.03	5.99	0.26	13
P6	10.12	6.10	0.21	11
P7	9.92	6.07	0.27	12
P8	10.15	6.26	0.20	9
Average	9.89	6.30	0.18	10.13
Standard Deviation	0.40	0.25	0.07	

79.4 km로 넓고 중첩도가 129로 시험분석자료로 적합하다고 판단된다(Fig. 2a) 그러나 전체적으로 겔보기속도 10 ~ 20 km/s 정도의 잡음에너지에 의해 반사와 신호의 S/N비가 낮아지는 양상을 보인다. 따라서 용이한 주시선택을 위하여 $t_v = 10.04$ s, $V_{nmo} = 6.20$ km/s이고 $\bar{\eta}$ 값이 각각 0.0, 0.1, 0.2인 등방성과 약한 이방성에 해당하는 주시곡선을 식 (1) ~ (7)을 이용하여 계산하고 이를 자료에 중첩하였다(Fig. 2b). 비교적 S/N비가 높은 10 ~ 50 km의 윗셋범위에서는 모델에 사용한 t_v 나 V_{nmo} 값이 실제 반사와 자료와 대략적으로 일치하며, $\bar{\eta} = 0.2$ 주시곡선과 잘 일치하는 경향을 보인다.

윗셋 32 km 이내의 자료만을 대상으로 $t^2 - x^2$ 분석 결과, 8개 공중점에서의 t_v 는 평균 9.89 s로 최대 10.16 s, 최소 8.94 s의 값을 갖는다(Table 1). 이렇게 비교적 넓은 t_v 의 범위는 분석에 사용한 반사이벤트가 모호하면 반사파 뿐만 아니라 모호

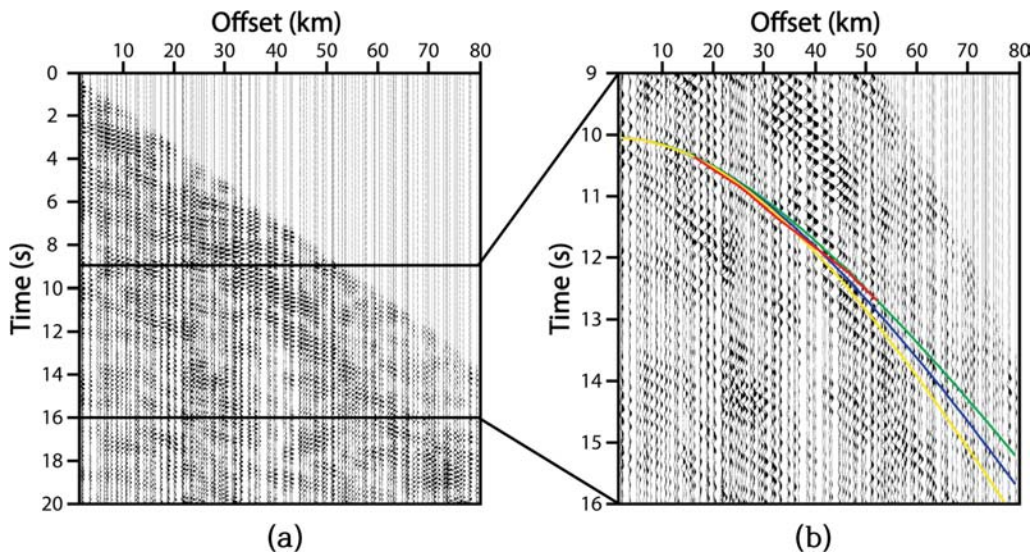


Fig. 2. (a) Virtual common-midpoint gather at site P5 (Fig. 1) yielded by the seismic reflection interferometry and (b) its time-enlarged data to depict anisotropic effects on traveltimes. Picked traveltimes (red line) match better with the anisotropic model of $\bar{\eta} = 0.2$ (green line) than the isotropic model (yellow line) or the anisotropic model of $\bar{\eta} = 0.1$ (dark blue line).

부근 하부지각의 비연속적 반사이벤트일 가능성도 있음을 지시한다. 그러나 전반적으로 굴절법 토모그래피 분석(Kim *et al.*, 2007a; Cho *et al.*, 2006)과 100% 중첩도의 반사파 영상(Kim *et al.*, 2007b)에 나타난 모호면의 깊이와 대략적으로 일치한다.

$t^2 - x^2$ 분석 시 t_v 와 동시에 구한 V_{nmo} 는 최대 6.68 km/s, 최소 5.99 km/s, 평균 6.30 km/s의 값을 갖는다. 이는 굴절법 토모그래피 분석(Kim *et al.*, 2007a; Cho *et al.*, 2006)으로 구한 지각속도를 평균한 값 6.22 ± 0.71 km/s 및 반사파 영상(Kim *et al.*, 2007b)에 사용한 속도 6.20 km/s와 대략적으로 일치한다.

한편 유효비타원을 $\bar{\eta}$ 는 최대 0.27, 최소 0.06로 평균 0.18의 값을 갖는다(Table 1). 이는 쇄설성 퇴적암과 탄산암 중심의 58개 암석시료의 $(\epsilon - \delta)$ 의 평균값 0.10 (Thomsen, 1986) 및 일본 Hidaka 변성대에서 채취한 암석시료의 $(\epsilon - \delta)$ 의 평균값 0.09 (Takanashi *et al.*, 2001) 보다 약간 큰 편이다. 이는 시험적으로 분석한 측정점이 8곳에 불과한 점과 표준편차가 0.07로 비교적 큰 점 등을 감안하면 측정오차일 수 있다. 그러나 암석시료의 채취 깊이보다 훨씬 깊은 지각에서는 높은 압력과 온도로 인해 이방성이 더 커졌을 가능성도 배제할 수 없다.

결 론

지진과 간섭학적 방법을 굴절법 시험자료에 적용하여 구한 가상파원자료를 이용하여 한반도 지각의 무브아웃 속도와 이방계수 유효비타원을 8개 장소에서 시험적으로 구하였다. 윗 32 km 이내의 근거리 윗자료를 이용하여 구한 10 s 부근 반사면까지의 무브아웃 속도는 6.30 ± 0.25 km/s이며, 원거리 윗 반사파 주시를 테일러 근사식 3항까지 전개하여 구한 지각의 유효비타원은 0.18 ± 0.07 이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 지진기술개발사업(KMIPA2015-7010)의 지원으로 수행되었으며, 2016년도 강원대학교 학술연구조성비(과제번호-520160194) 및 2014년도 경북대학교 전임교원 연구년 교수 연구비로 연구하였음을 밝힙니다.

References

Abbad, B., Ursin, B., and Rappin, D., 2009, Automatic non-

- hyperbolic velocity analysis, *Geophysics*, **74**, U1-U12.
- Alkhalifah, T., 1997, Velocity analysis using nonhyperbolic moveout in transversely isotropic media, *Geophysics*, **62**, 1839-1854.
- Alkhalifah, T., and Tsvankin, I., 1995, Velocity analysis for transversely isotropic media, *Geophysics*, **60**, 1550-1566.
- Cho, H.-M., Baag, C.-E., Moon, W., Lee, J. M., Jung, H., Kim, K. Y., and Asudeh, I., 2006, Crustal velocity structure across the southern Korean Peninsula from the first crustal-scale refraction experiment, *Geophysical Research Letters*, **33**, L06307, doi:10.1029/2005GRL025145.
- Cho, H.-M., Baag, C.-E., Lee, J. M., Moon, W., Jung, H., and Kim, K. Y., 2013, P- and S-wave velocity model along crustal scale refraction and wide-angle reflection profile in the southern Korean Peninsula, *Tectonophysics*, **582**, 84-100.
- Crampin, S., 1984, An introduction to wave propagation in anisotropic media, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **76**, 17-28.
- Kim, K. Y., Lee, J. M., Moon, W., Baag, C.-E., Jung, H., and Hong, M. H., 2007a, Crustal structure of the southern Korean peninsula from seismic waves generated by large explosions in 2002 and 2004, *Pure and Applied Geophysics*, **164**, 97-113.
- Kim, K. Y., Lee, J. M., Moon, W., Baag, C.-E., Jung, H., and Lee, S. Y., 2007b, Seismic reflection image of the crust structure along the KCRT-2002 profile in the southern Korean peninsula, *Geosciences Journal*, **11**, 219-228.
- Levin, F. K., 1978, The reflection, refraction, and diffraction waves in media with an elliptical velocity dependence, *Geophysics*, **43**, 528-537.
- Schuster, G. T., 2009, *Seismic Interferometry*, Cambridge University Press, 260 p.
- Takanashi, M., Nishizawa, O., Kanagawa, K., and Yasunaga, K., 2001, Laboratory measurements of elastic anisotropy parameters for the exposed crustal rocks from the Hidaka Metamorphic Belt, Central Hokkaido, Japan, *Geophys. J. Int.*, **145**, 33-47.
- Taner, M. T., and Koehler, F., 1969, Velocity spectra - digital computer derivation and applications of velocity functions, *Geophysics*, **34**, 859-881.
- Tatham, R. J., and McCormack, M. D., 1991, *Multicomponent seismology in petroleum exploration*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 248p.
- Thomsen, L., 1986, Weak elastic anisotropy, *Geophysics*, **51**, 1954-1966. (Discussion in GEO-53-04-0558-0560 with reply by author).
- Tsvankin, I., and Thomsen, L., 1994, Nonhyperbolic reflection moveout in anisotropic media, *Geophysics*, **59**, 1290-1304.