

울산단층대에서의 굴절과 속도이방성 연구

이광자* · 김기영* · 김우혁* · 임창복**

*강원대학교 지구물리학과 · **한국원자력안전기술원 구조부지실

요 약

울산단층의 단층분절 연구의 일환으로, 울산단층의 파쇄대로 추정되는 경주-울산간 7번국도와 인접한 지역 17개 측정에서 워커웨이 자료를 획득하였으며, 1-48 m의 윗셋구간에서 기록된 굴절파의 속도이방성을 측정하였다. 기록된 굴절 P파 속도는 평균 1787 m/s로 기반암의 풍화층 상부에서 굴절된 파로 해석되며, 속도이방성은 평균 0.056으로 구조선이 예상주향방향과 일치함을 간접적으로 시사한다. 경상북도와 경상남도의 도경계선을 기준으로 남쪽에서는 예상주향방향의 속도가 예상경사방향보다 빠른 정상적인 이방성을 보이나, 북쪽으로는 단층의 주향이 여러 방향으로 갈라져 있거나, 예상경사방향으로 발달된 구조선이 많이 발달해 있을 가능성이 높은 것으로 분석되었다. 이는 단층이 도경계선 부근을 경계로 울산단층이 분절되어 있을 가능성을 시사한다.

주요어: 속도이방성, 단층분절, Tomsen의 이방계수, 울산단층, 굴절파

Lee, Kwang-Ja, Kim, Ki Young, Kim, Woo-Hyuk, and Im, Chang-Bock, 2000, Seismic Studies on Velocity Anisotropy in the Ulsan Fault Zone. *Journal of the Korean Geophysical Society*, v. 3, n. 1, p. 49-56.

ABSTRACT: As a part of geophysical studies on segmentation of the Ulsan fault, walkaway refraction seismic data were measured at 17 stations near National Road 7 between Kyungju and Ulsan. Seismic anisotropy was analyzed in the offset range of 1-48 m. The average refraction velocity of 1787 m/s indicates the refractor is the upper boundary of weathered basement. P-wave anisotropy is computed to be 0.056 in average, which may serve as a weak evidence that the strike of major geologic structure coincide with the inferred fault direction. In the south of the province boundary between Kyungsangnam-do and Kyungsangbuk-do, the velocity anisotropy is normal in that P-wave velocity in the strike direction is faster than the one measured in the dip direction. On the contrary, it appears that the fault strikes in many directions or that fractures may be developed better in the dip direction in the northern part. Such a difference in anisotropic pattern is believed to be a seismic evidence indicating that a segmentation boundary of the Ulsan fault locates near the province boundary.

Key words: velocity anisotropy, fault segmentation, Thomsen's anisotropic parameters, Ulsan fault, refraction

(Lee, Kwang-Ja, Kim, Ki Young, and Kim, Woo-Hyuk, Department of Geophysics, Kangwon National University, 192-1 Hyoja-2-dong, Chunchon 200-701, Korea; Im, Chang-Bock, Structural Systems & Site Evaluation Department, Korea Institute of Nuclear Safety (KINS), P.O. Box 114, Yusung-Gu, Taejon 305-600, Korea. email: sindy@mirae.kangwon.ac.kr)

1. 서 론

단층분절(fault segmentation)은 다양한 척도로 기술될 수 있으며, 큰 규모의 지진분절(earthquake segmentation)은 하나 혹은 그 이상의 단층분절로 이루어져 있다(DePolo *et al.*, 1991). 단층대의 불연속성

을 지시하는 인자는 기하학적, 구조적, 거동적, 고지진학적, 지형학적, 지질학적, 지구물리학적, 유동학적 자료가 포함되나(McCalpin, 1996), 이 중에서 대부분의 일반적인 단층대의 불연속성은 기하학적, 구조적, 거동적인 인자가 주로 사용된다.

단층분절에 관한 지구물리학적 연구로는 DePolo *et*

al. (1991)이 북아메리카 서쪽 Basin and Range 구역에서 11개 역사지진에 의한 지표파열 분포로 지진분절을 분석한 바 있다. Schwartz · Lund (1991)은 현재 역사지진 자료를 이용하여 미국 유타주의 Wasatch 단층대의 분절을 밝힌 바 있으며, Koukouvelas · Doutsos (1996)은 그리스 코린트만의 1995년 Egion 지진 자료로 지진이 발생하는 동안에 구조적 분절이 일어났음을 논의한 바 있다. 국내에서는 Lee · Jin (1991)이 양산단층대에서 발생한 126개의 역사지진과 14개의 계기지진 자료를 분석하여, 북위 36.2도와 북위 35.5도를 경계로 북부, 중부, 남부의 3개 구역으로 나누어질 가능성을 시사한 바 있으며, 이기화 · 이전화(1993)는 옥천대의 지진 자료를 분석하여, 북위 36도와 북위 37.2도를 경계로 남부, 중부, 북부의 세 구역으로 나눌 수 있음을 제시하였다. Lee · Lee (1995)는 경기육괴의 지진활동을 분석하여 이 단층대를 북위 37.1도와 북위 38.2도를 경계로 북부, 중부, 남부의 세 구역으로 나눌 수 있음을 논의한 바 있다.

단층분절에 관한 지구물리학적 연구는 대부분 자연지진 자료에 의존하여 왔다. 그러나 지진에 의해 파쇄대가 발달해 있을 경우, 지진파 속도이방성을 측정함으로써 파쇄대 발달상태를 알 수 있다(Kim et al., 1996). 홍종국 · 김기영(1995)은 수직균열이 한 방향으로 발달한 경우, 균열방향과 균열밀도 그리고 중횡비 등 균열계수의 실제 예상되는 범위 내에서 균열이 P파의 속도이방성 및 AVO 반응에 미치는 영향을 밝힌 바 있다. Kim et al. (1996)은 Eshelby-Hudson의 균열모형(Eshelby, 1957)을 적용하여 황해에서 얻은 이방성 지진파 자료로부터 균열계수를 구한 바 있으며, 황세호 외(1994)는 이방성 지층에서 탄성과 반사주파 자료의 해석에 관한 연구를 수행한 바 있다. 이두성 · 김현규(1999)는 시추공을 이용한 다방위 다성분 역수직 탄성파(Inverse Vertical Seismic Profiling) 자료를 사용하여 매질의 이방성을 연구하였다. Kim et al. (1998)은 P파 및 SH파 위커웨이 자료로부터 지하 매질의 이방계수 및 균열밀도를 산출하여, 균열이 남북방향으로 매우 잘 발달되어 있음을 지시한 바 있다.

이 연구는 울산단층의 단층구간과 분절구간의 지진파 속도이방성 차이를 측정, 분석함으로써 이들 구간사이의 지진파 특성을 밝히고자 수행되었다.

2. 이론적 배경

이방성 매질의 탄성계수와 탄성과 속도와의 관계는 이미 잘 알려져 있다(Thomsen, 1986). 이 중 자연현상에서 자주 발견되는 횡적등방성(transversely isotropic) 모델은 대칭축을 수평으로 놓을 경우, 수직으로 발달된 파쇄대에 적용시킬 수 있다. 이러한 이방성 매질의 탄성계수 C의 행렬은 Love (1934)의 표기법을 사용할 경우, 5개의 독립적인 요소로 이루어진 다음과 같은 대칭행렬이 된다.

$$C_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{11}-2C_{66} & C_{13} & & & \\ C_{11}-2C_{66} & C_{11} & C_{13} & & & \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & & & & C_{44} & \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix} \quad (1)$$

횡적등방성 매질의 P파 위상속도 v_p (Daley · Hron, 1977)는

$$\rho v_p^2(\theta) = \frac{1}{2} [C_{33} + C_{44} + (C_{11} - C_{33}) \sin^2 \theta + D(\theta)], \quad (2)$$

이다. 여기서 ρ 는 밀도, θ 는 파면의 법선과 대칭축과의 사잇각이며, $D(\theta)$ 는

$$D(\theta) = \{ (C_{33} - C_{44})^2 + 2[2(C_{13} + C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})(C_{11} + C_{33} - 3C_{44})] \sin^2 \theta + [(C_{11} + C_{33} - 2C_{44})^2 - 4(C_{13} + C_{44})^2 \sin^4 \theta]^{1/2} \}. \quad (3)$$

로 정의된다. 약한 이방성을 갖는 횡적등방성 매질의 경우, $v_p(\theta)$ 는

$$v_p(\theta) = \alpha_0 (1 + \delta \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \epsilon \sin^4 \theta), \quad (4)$$

의 근사식으로 표시되며(Thomsen, 1986), 여기서 P파 이방계수 ϵ , 등방성 매질의 P파 속도 α_0 및 Thomsen 이방계수 δ 는 각각

$$\epsilon = \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}}, \quad (5)$$

$$\delta = \frac{(C_{13} + C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})^2}{2C_{33}(C_{33} - C_{44})}, \quad (6)$$

$$\alpha_0 = \sqrt{C_{33}/\rho}. \quad (7)$$

이다.

2.1. 이방계수 산출

굴절면의 경사각이 적은 경우에, 굴절파의 실제 속도 v_2 는 다음 근사식으로 계산할 수 있다.

$$v_2 = \frac{2v_{A_2}v_{B_2}}{(v_{A_2} + v_{B_2})} \quad (8)$$

이 식에서 v_{A_2} 와 v_{B_2} 는 각각 2층의 동서 및 남북 방향의 길보기 속도를 나타낸다.

대칭축이 수직인 약한 횡적등방성 매질의 경우,

Thomsen (1986)이 제시한 P파 이방계수 ϵ 은 식 (5)로 정의되며, 남북방향의 주향을 갖는 수직균열을 가정하면 대칭축이 동서방향이 되므로 식 (5)는 지진파 속도의 함수로 다음과 같이

$$\epsilon = \frac{v_{ns}^2 - v_{ew}^2}{2v_{ew}^2} \quad (9)$$

의 형태로 표시할 수 있다.

3. 주변지질

단층구간과 분절구간을 연구하기 위하여 실시된 본 연구의 조사지는 행정구역상 경상북도 경주시 입실리에서 경상남도 농소읍 매곡리에 해당하는 지역으로, 울산단층이 지나가는 경상분지 동부에 해당하며 경주-울산간 7번국도에 인접한 지역이다 (Fig. 1). 이 지역은 지리상 폭이 좁고 직선으로 잘 발달된 단층구간과 지형적으로 볼 때 넓어지며 주향방향이 불분명한 예상분절구간을 지형도상에서 선정하였다. 조사지 일대는 충적층으로 덮여 있는 저지대로 단층노두를 발견할 수 없으며, 대체로 평탄한 지형을 이룬다(송무영·경제복, 1996). 이 지역 단층 발달은 주로 불국사 변동과 관계되며 불국사 화강암 복합체의 관입 환경하에 이루어졌다고 추정된다(Kim, 1975).

이 일대의 기저는 경상누층군과 하양층군으로 이루어져 있고 그 상위는 유천층군과 불국사화강암류가 분포하고 있으며(장기홍, 1975), 조사지 북부와 남부에는 흑회색의 세일, 사암, 역암 등으로 구성되어 있는 하양층군의 퇴적암이 분포한다(송무영·경제복, 1996). 울산단층 파쇄대로 추정되는 7번국도 인접부에는 수백 m에서 수 km의 폭으로 충적층이 피복되어 있으며, 울산단층선의 동부에는 주로 제3기 화산암류와 퇴적암류가 넓게 분포하고 있다(김인수 외, 1997).

4. 자료획득

1999년 11월과 2000년 2월 경상북도 경주시 외 동읍과 경상남도 울산시 농소읍 사이에서 울산단층의 지진파 특성을 구명하기 위한 지진파 반사단면조사와 속도이방성 연구가 실시되었다. Fig. 1은 반사파 측선위치와 함께 P파 속도이방성을 측정할 17개 조사측점을 보여준다. 주변 지형으로부터 이

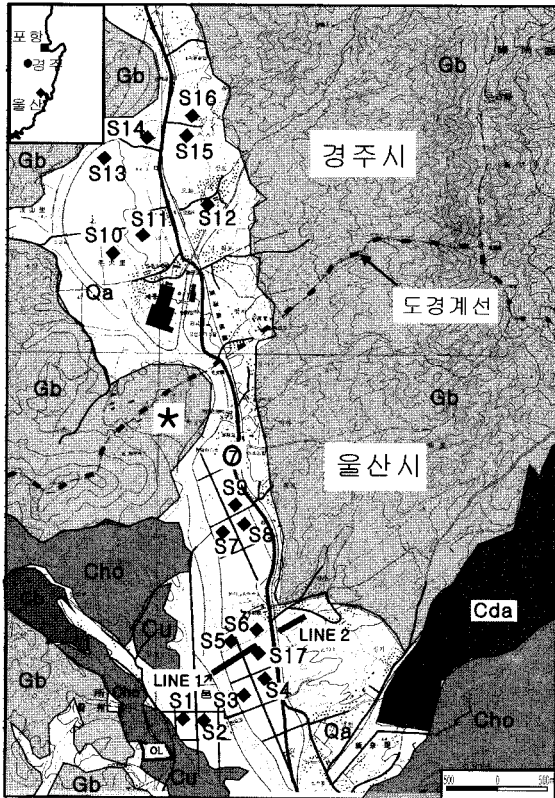


Fig. 1. Location map showing location of the walkaway test. High-resolution seismic reflection lines 1 and 2 are also indicated in conjunction with the walkaway analysis. The following symbols are used for lithology: Qa, alluvium; Gb, biotite granite; Cda, Daeansi andesite porphyry; Cu, purple shale, sandstone, grayish green shale, conglomerate; OL, crystalline limestone; Cho, hornfels.

Table 1. Acquisition Parameters.

	S1~S11	S12-S17
SOURCE		
Type	5 kg hammer	5 kg hammer
Shot Interval	12 m	24 m
Vertical Stack	100 %	100 %
RECEIVER		
Type	8 Hz geophones	100 Hz geophones
Interval	1 m	1 m
RECORDER		
Instrument	BISON 8012A	OYO McSeis-SX
Record Length	192 ms	205 ms
Sampling Interval	0.2 ms	0.1 ms
Number of channel	12	24
Analog Filter	35~1000 Hz	35~1000 Hz
LAYOUT		
Type	walkaway	walkaway
Trace Interval	1 m	1 m
Near-trace Offset	1 m	1 m
Far-trace offset	36 m	48 m

지역의 예상단층선 주향이 N18°W 정도인 것으로 추정되어, 단층의 주향과 평행한 방향과 이에 수직인 N72°E 방향으로 P파 조사축선을 설정하였다. 이 지역은 두꺼운 퇴적물로 덮여 있어서 단층의 노두를 볼 수 없고 대체로 평탄한 지형을 이루는 지역으로, 농한기에 비교적 평탄한 논에서 자료를 획득하였다. 굴절파의 겉보기 속도로부터 굴절파 속도를 산출하기 위하여 예상주향 및 경사방향으로 위커웨이 왕복측정 방식을 채택하여 자료를 획득하였다. 예상주향 및 경사방향으로 측정된 P파 트레이스 자료는 측정점 S1~S11에서는 각각 72개씩, 측정점 S12~S17에서는 각각 96개씩 모두 2,736개의 트레이스를 기록하였다. 자료획득 당시 조사지는 농한기라 경작소음이 거의 없었으나, 조사지역을 북북서-남남동 방향으로 가로지르는 경주-울산간 7번국도를 통행하는 차량소음과 바람으로 인한 잡음이 수신되어 대형차량이 지나갈 때와 바람이 심하게 불 때를 피하여 기록함으로써 인위적인 소음을 최소화하였다.

상세한 야외 자료획득 변수를 Table 1에 요약하

였다. 파원으로는 5 kg 해머를 알루미늄 판에 수직으로 타격하는 방법을 택하였으며, 12채널 Bison 8012A 기록계와 24채널 OYO사의 McSeis-SX 디지털 기록계를 이용하여 자료를 획득하였다. 측정점 S1~S11에서는 인공지진파 신호를 1 m 간격, 인 라인(in-line)으로 배열된 8 Hz 수직지오폰 12개로 수신하였으며, 읍셋 1-36 m 구간에서 12채널 Bison 8012A 기록계에 0.2 ms 샘플률로 192 ms 동안 기록하였다. 측정점 S12~S17에서는 인공지진파 신호를 1 m 간격, 인 라인(in-line)으로 배열된 100 Hz 수직지오폰 24개로 수신하였고, 읍셋 1-48 m 구간에서 24채널 OYO사의 McSeis-SX 디지털 기록계에 0.1 ms의 샘플률로 205 ms 동안 기록하였다. 수신된 인공지진파 신호는 Bison 8012A 디지털 기록계에는 SEG-1 포맷으로 기록하여, 매 30개 기록마다 RS232 연결선을 이용하여 노트북 컴퓨터에 옮겼으며, OYO사의 McSeis-SX 기록계는 SEG-2 포맷으로 기록하였다. 현장조사시 알리아싱 방지용 고주파 차단필터만을 사용하였고, 채널당 상수이득(constant gain)만을 적용하였다.

Fig. 2와 3은 측정 2에서 기록한 주향 및 경사 방향의 P파 굴절파 자료와 이 자료 위에 초동 위치를 반원으로 표시한 것이다. 시간축상의 화살표는 층 2의 상부 경계면에서 굴절된 파를 보여준다. 수직축은 기록시간(192 ms)을 나타내며, 수평축은 오프셋으로 -36 m부터 +36 m까지를 보여준다. 오프셋이 양(+)의 부호를 갖는 트레이스들은 타격점의 위치가 지오폰의 동쪽 및 북쪽에 위치하고, 음(-)의 경우에는 타격점의 위치가 서쪽 및 남쪽에 나타낸다.

5. 자료처리

Fig. 4는 이방성 계수를 구하는 주요 처리과정 순서도를 보여준다. 자료처리는 주로 Power Macintosh 7600에 설치된 Seismic Processing Workshop (SPW)을

이용하였으며, 최소지승법에 의한 굴절파 속도분석은 PC를 이용하여 수행하였다.

수신기 전개별로 근접 및 원거리 타격 자료를 분류한 후, 현장에서 SEG-1 포맷과 SEG-2 포맷으로 기록된 자료들을 ASCII 형태로 변화시켰다. 각 측정별로 샘플률, 기록시간, 파원과 지오폰 위치 등에 관한 기초정보를 컴퓨터에 입력시킨 후, 오프셋에 따라 분류하였다. 비교적 평탄한 논에서 자료를 획득하였지만 약간의 고도차가 있는 곳에서 기록한 자료는 표층속도를 이용하여 고도변화에 따른 정보정을 실시하였다. 정보정 과정을 거친 자료를 대상으로 근접 및 원거리 자료로부터 동일 굴절면에 의한 굴절파 초동을 측정하였으며, 측정된 초동을 최소지승법을 이용하여 걸보기 속도를 구하였다. 동일한 지오폰 스프레드별로 왕복측정한 자료의

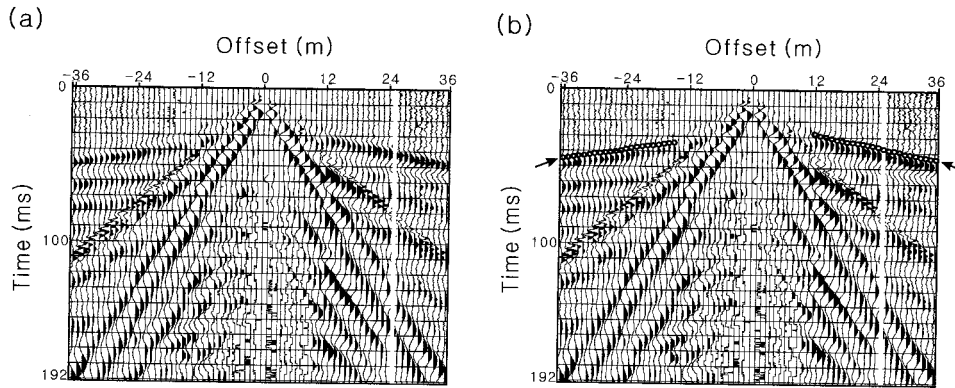


Fig. 2. P-wave walkaway data along the N-S direction at Site 2 (a) Refraction data and (b) the ones on which first arrivals are identified, respectively.

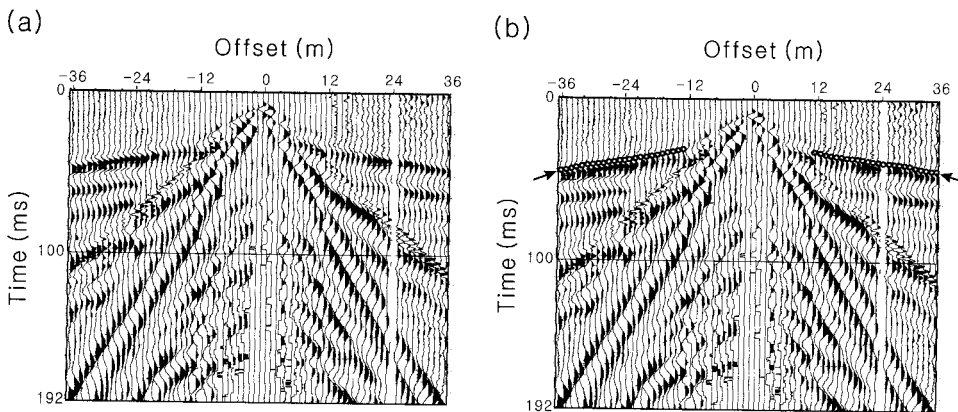


Fig. 3. P-wave walkaway data along the E-W direction at Site 2 (a) Refraction data and (b) the ones on which first arrivals are identified, respectively.

굴절과 겹보기 속도 쌍을 이용하여, 굴절면의 속도와 경사각을 구하였다. Fig. 5는 주향 및 경사방향의 P파 굴절과 자료의 초동 위치를 나타내는 그림 Fig. 2b와 3b로부터 구한 회귀직선이다. 최소자승법을 이용하여 구한 이 직선들의 역기울기는 남북방향 측선에서는 1797.2 m/s와 1481.6 m/s이고, 동서방향 측선에서 1470 m/s와 1930.1 m/s이다. 굴절면이 평탄하다는 가정하에, 이들 겹보기 속도로부터 구한 남북 및 동서방향 굴절과 속도는 각각 1570.7 m/s와 1783.5 m/s로 계산되며, 1.402° S와 0.665° W의 굴절면의 경사를 보인다.

측점별로 주향 및 경사방향의 굴절과 속도 쌍을 이용하여, P파 속도 이방계수(Thomsen, 1986) ϵ 은 앞에서 기술한 식 (9)

$$\epsilon = \frac{v_{str}^2 - v_{dip}^2}{2v_{dip}^2}$$

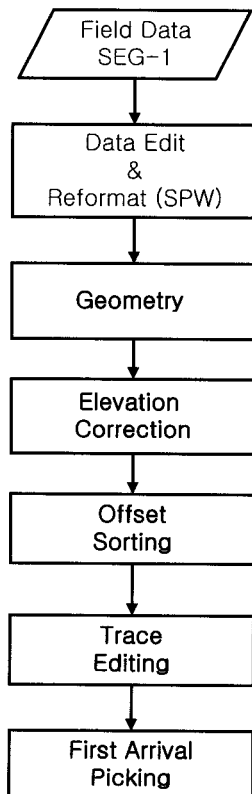


Fig. 4. Flow chart showing the processing sequence for analysis of the velocity anisotropy.

을 이용하여 구하였으며(Kim et al., 1998), 결과를 Table 2에 요약하였다.

6. 자료해석 및 토의

17개 측정점에서 기록한 P파 속도는 평균 1787 m/s로, 기반암 풍화층의 상부에서 굴절된 파로 해석된다(Table 2). 또한 이 굴절파의 겹보기 속도로부터 계산한 굴절면의 최대경사는 8° 미만(평균 0.3° 정도)으로 거의 수평으로 놓여 있는 것으로 분석된다.

이방성은 평균 0.056으로 구조선이 주향방향(N18°W)으로 놓여있음을 간접적으로 시사한다. 그러나 전체 17개 측정점 중 절반 가량인 8개 측정점에서 음(-)의 이방성을 갖는 것은 (1) 실제로 동서방향의 구조선이 남북방향 못지 않게 많이 발달되어 있거나, (2) 측정오차가 파쇄대에 의한 속도이방성보다 더 큰 경우 중의 하나로 판단된다. 그러나

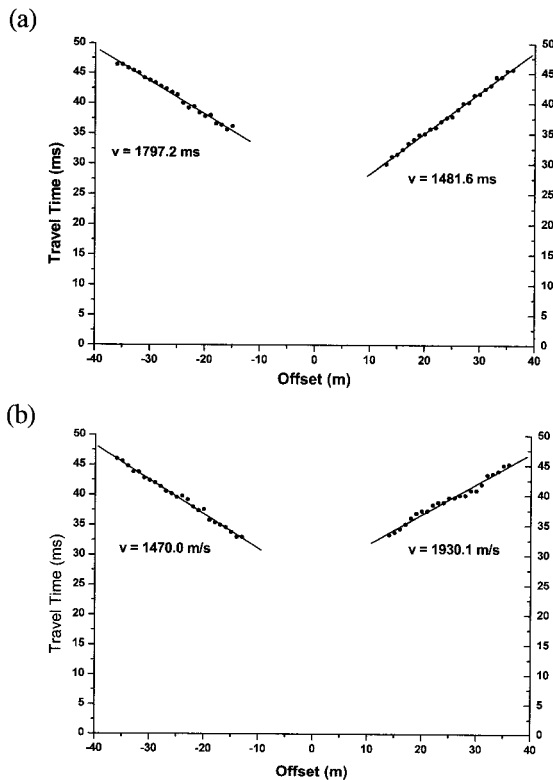


Fig. 5. Travel times for the refracted P waves along the (a) N-S direction and (b) E-W directions, respectively. The time picks are indicated with solid circles.

Table 2. Refraction velocity and velocity anisotropy of the walkaway test.

	Apparant Velocity (m/s)		Refr. Vel. (N-S) m/s	Dip (degree)	Apparant Velocity (m/s)		Refr. Vel. (E-W) m/s	Dip (degree)	이방계수 (ϵ)		
	N-S	S-N			E-W	W-E					
S1	2051.6	1527.5	1702.1	1.969°	N	1595.0	1925.5	1695.5	1.267°	E	0.004
S2	1481.6	1797.2	1570.7	1.402°	S	1930.1	1740.0	1783.5	0.665°	W	-0.112
S3	1463.3	2678.4	1847.7	3.638°	S	1336.1	1478.7	1339.8	0.863°	E	0.451
S4	2030.3	1959.4	1951.9	0.208°	N	1567.5	2112.9	1752.3	1.936°	E	0.120
S5	1767.0	1790.6	1730.6	0.088°	S	1659.5	2359.4	1905.1	2.093°	E	-0.087
S6	2051.0	1817.9	1883.5	0.732°	N	1481.8	2445.2	1799.1	3.123°	E	0.048
S7	2028.7	1687.1	1795.9	1.172°	N	1603.3	1766.8	1629.7	0.681°	E	0.107
S8	1768.8	2082.5	1868.5	0.998°	S	1061.4	3275.0	1548.8	7.562°	E	0.228
S9	1168.6	1069.4	1029.0	0.974°	N	1215.8	1130.7	1090.0	0.755°	W	-0.054
S10	1514.0	1956.8	1656.6	1.762°	S	1883.0	1048.7	1279.6	5.079°	W	0.338
S11	2088.1	2020.3	2012.7	0.188°	N	2308.6	2039.9	2127.3	0.665°	W	-0.052
S12	2274.1	1258.6	1566.7	4.200°	N	2308.6	1863.1	2021.3	1.210°	W	-0.200
S13	1966.8	1767.3	1816.0	0.673°	N	2103.5	1848.8	1925.0	0.767°	W	-0.055
S14	3183.0	2624.9	2848.6	0.773°	N	2689.5	1976.7	2242.1	1.561°	W	0.307
S15	1929.4	1528.9	1655.4	1.601°	N	2289.9	1684.9	1897.7	1.837°	W	-0.120
S16	2303.8	2000.3	2102.2	0.768°	N	1886.8	1631.8	1701.0	0.975°	W	0.264
S17	2200.9	1440.8	1692.2	2.824°	N	2303.8	2364.7	2298.2	0.130°	E	-0.229
Ave.	1957.1	1824.0	1807.7	0.482		1836.7	1923.1	1766.8	0.244		0.056
Max.	3183.0	2678.4	2848.6	4.200		2989.5	3275.0	2298.2	7.562		0.451
Min.	1168.6	1069.4	1029.0	3.683		1061.4	1048.7	1090.0	5.079		-0.229
Std.	446.431	416.729	357.203	1.802		451.435	520.623	327.819	2.657		0.197

경상북도 경주시 모화리 부근의 7개 측정에서는 절반 이상인 4개 측정에서 이방성이 음수(-)로 측정되어, 이 부근의 울산단층의 주향으로 예상한 N18°W의 주향방향보다도 경사방향의 구조선이 발달해 있을 가능성을 제시한다.

한편 도경계를 기준으로 남쪽에서는 예상주향방향의 속도가 예상경사방향의 속도보다 빠른 정상적인 이방성을 보여, 도경계 남쪽에서는 울산단층이 예상주향방향으로 발달되어 있을 가능성이 높은 것으로 분석된다. 그러나 도경계선 북쪽으로는 단층의 주향이 여러 방향으로 갈라져 있거나, 경사방향으로 발달된 구조선이 많이 발달해 있을 가능성이 높은 것으로 분석되어 단층이 도경계선 부근을 경계로 분절되어 있을 가능성을 시사한다. 울산단층에서의 분절경계에 대한 기존 연구자료를 접

하지 못하여 다른 지질·지구물리학적 자료와 비교할 수는 없으나, Fig. 1상에 **로 표시한 도경계 부근에 위치한 고도 114 m의 구릉을 중심으로 단층계곡의 폭이 급격히 변하는데, 이러한 지형적 특징은 분절경계에서 인지되는 일반적인 현상(King, 1986)과 잘 일치한다.

조사지역의 예상구조선방향과 실제구조선방향이 정확히 일치하지 않을 경우, Kim et al. (1998)이 밝힌 바와 같이 P파 속도는 $(\delta \cos^2 \theta + \epsilon \sin^2 \theta) \sin^2 \theta$ 만큼의 차이가 생긴다(Thomsen, 1986). 예를 들어 예상주향방향과 실제주향방향의 차이가 10° 미만일 경우, $\theta = 10^\circ$ 일 때 $\epsilon = \delta = 0.056$ 을 적용하면 P파 속도의 오차는 0.17%로 그 영향은 매우 작게 되어 무시할 수 있다.

7. 결 론

울산단층의 분절특성을 연구하기 위하여 경주-울산 사이의 17개 측정에서 P파 속도이방성을 측정된 결과, 기록된 P파는 평균속도 1787 m/s로 기반암 풍화층의 상부에서 굴절된 파로 해석되며, 속도이방성은 평균 0.056으로 단층파쇄대에 의한 영향이 미약하게 나타난다. 지역별로는 도경계 남쪽에서는 울산단층이 예상주향방향으로 발달되어 있을 가능성이 높으나, 도경계선 북쪽으로 단층의 주향이 여러 방향으로 갈라지거나 경사방향으로 발달된 구조선이 발달해 있을 가능성이 높은 것으로 분석된다. 이는 도경계선 부근을 경계로 단층이 분절되어 있을 가능성을 시사한다.

사 사

이 연구는 '99원자력연구개발 중장기계획사업'의 일환으로 수행되었음을 밝히며, 강원대학교 자원개발연구소의 부분적 지원에 감사드립니다. 아울러 한 겨울의 매서운 새벽바람 속에서 강추위를 견디며 탄성과 자료획득에 수고하여 주신 강원대학교 지구물리학과 대학원생 김교홍, 이소영, 김종민, 학부생 정용희에게 깊은 감사를 드립니다. 그리고 논문을 심사해 주시고 좋은 의견을 주신 박춘병 박사님과 서만철 교수님께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

김인수, 손문, 정현정, 이준동, 김정진, 백인성, 1996, 경주-울산일원에 대한 지역지질 특성연구 : 울산단층 주변 화강암류의 잔류자기와 대자율, *지질환경지질학회지*, 31, 31-43.
 송무영, 경제복, 1996, 울산단층 중부일대의 지구물리 탐사 및 단층특성, *지구과학회지*, 17, 205-212.
 이기화, 이진희, 1993, 옥천대와 영남육괴 경계의 지진구역화 : 옥천대 주요단층의 지구물리학적 연구, *지질학회지*, 29, 576-584.
 이두성, 김현규, 1999, 이방성 조사를 위한 다방위 연속적 탄성파, 한성대 정보처리연구소, 춘계 공동학술발표회 논문집, 97-99.
 장기홍, 1975, 경성분지 상부 중생대의 층서, *지질학회지*, 11, 1-23.
 홍종국, 김기영, 1995, 한 방향으로 수직균열이 발달한 매질에서의 P파 이방성 및 AVO 특성분석, *지질학회지*, 31, 404-415.
 황세호, 양승진, 장성형, 김중열, 1994, 이방성 지층에서의 탄성파 반사 주시자료의 해석에 관한 연

구, *자원환경지질학회지*, 27, 201-207.
 Daley, P.T. and Hron, F., 1977, Reflection and transmission coefficients for transversely isotropic media, *Bulletin of Seismological Society of America*, 67, 661-675.
 DePlore, C.M., Clark, D.G., Burton Slemmons, D., and Ramelli, A.R., 1991, Historical surface faulting in the Basin and Range Province, western North America: Implications for fault segmentation, *Journal of Structural Geology*, 13, 123-136.
 Eshelby, J.D., 1957, The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems. *Proc. R. Soc. London*, A241, 376-369.
 Kim, K.Y., Hong, J.K., and Kim, K.H., 1998, In-situ measurement of seismic anisotropy due to vertical fractures in the Yangsan fault area, *Journal of the Geological Society of Korea*, 34, 73-80.
 Kim, K.Y., Hong, J.K., and Lee, K., 1996, Determination of fracture parameters from surface seismic data, *Journal of the Geological Society of Korea*, 32, 6, 459-466.
 Kim, O.J., 1975, Granite and tectonics of South Korea, *Journal of the Korea Institute Mining Geology*, 8, 223-230.
 King, G.C.P., 1986, Speculation on the geometry of the initiation and termination processes of earthquake rupture and its relation to morphology and geological structure, *Pure & Applied Geophysics*, 124, 567-585.
 Koukouvelas, I.K. and Doutsos, T.T., 1996, Implications of structural segmentation during earthquakes: the 1995 Egeion earthquake, Gulf of Corinth, Greece, *Journal of Structural Geology*, 18, 1381-1388.
 Lee, K.W. and Jin, Y.G., 1991, Segmentation of the Yangsan Fault System: Geophysical Studies on Major Faults in the Kyongsang Basin, *Journal of the Geological Society of Korea*, 27, 434-449.
 Lee, K.W. and Lee, J.H., 1995, Segmentation of the chugaryeong fault set: geophysical studies on major faults in the kyeonggi massif, *Journal of the Geological Society of Korea*, 31, 116-124.
 Love, A.E.H., 1934, A treatise on the mathematical theory of elasticity, Cambridge University Press.
 McCalpin, J.P., 1996, Application of Paleoseismic Data to Seismic Hazard Assessment and Neotectonic Research: in McCalpin, J.P., Ed, *Paleoseismology*. Academic Press Inc., California.
 Schwartz, D.P. and Lund W.R., 1991, The Wasatch fault zone, Utah-segmentation and history of Holocene earthquakes, *Journal of Structural Geology*, 13, 137-149.
 Thomsen, L., 1986, Weak elastic anisotropic, *Geophysics*, 51, 1954-1966.

1999년 11월 3일 원고접수
 2000년 3월 21일 원고채택