

경상남북도 경계부근의 울산단층지역에서 속도 이방성 측정 및 분석

김기영 · 이광자 · 김우혁 · 정용희 (강원대학교 지구물리학과)

1. 서 론

균열, 절리, 단층, 파쇄대 등의 지질구조는 탄성파 속도가 방향에 따라 변하는 이방성을 나타내는 원인으로, 탄성파 속도를 방향에 따라 측정함으로써 단층의 특성을 밝힐 수 있다(Kim et al., 1996). 이 연구는 울산단층의 분절특성 구명을 목적으로 실시한 연구의 일부로, 위커웨이 방식을 통하여 단층구간과 분절구간의 탄성파 속도 이방성을 측정, 분석하였다.

2. 자료 획득

조사지는 경주시와 울산시 사이의 울산단층 지역으로, 행정구역상 경상북도 경주시 입실리에서 경상남도 농소읍 매곡리에 해당하며, 경주-울산간 7번 국도에 인접한 지역에서 17개 조사측점에 대하여 P파 속도이방성을 측정하였다(그림 1). 주변 지형으로부터 이 지역의 예상단층선 주향이 N18°W 정도인 것으로 추정되어, 단층의 주향과 평행한 N18°W 방향과 이에 수직인 N72°E 방향으로 P파 조사측선을 설정하였다. 이 지역은 두꺼운 퇴적물로 덮혀 있어서 단층의 노두를 볼 수 없고 대체로 평탄한 지형을 이루는 지역으로, 농한기에 평탄한 논에서 자료를 획득하였다. 굴절파의 겹보기 속도로부터 굴절파 속도를 산출하기 위하여 예상 주향 및 경사방향으로 위커웨이 왕복측정 방식을 채택하였다. P파 트레이스 자료를 측정점 S1~S11에서는 각각 72개, 측정점 S12~S17에서는 각각 96개씩 기록하여 모두 2736개의 트레이스 자료를 얻었다. 그림 2와 3은 측정점 2에서 기록한 주향 및 경사 방향의 P파 굴절파 자료와 초동 위치를 표시한 것이다.

지면에 놓여 있는 알루미늄 판에 5 kg의 해머를 수직으로 타격함으로써 P파를 발생시켰으며, 12채널 Bison 8012A 장비와 24채널 OYO사의 McSEIS-SX 디지털 기록계를 이용하여 자료를 획득하였다.

측점 S1~S11에서는 인공지진파 신호를 1 m 간격, 인 라인(in-line)으로 배열된 8 Hz

수직지오폰 12개로 수신하였으며, 윗셋 1-36 m 구간에서 12채널 Bison 8012A 기록계에 0.2 ms 샘플률로 192 ms 동안 기록하였다(Bison Instrument, 1985). 측정 S12~S17에서는 신호를 1 m 간격, 인 라인(in-line)으로 배열된 100 Hz 수직지오폰 24개로 수신하였고, 윗셋 1-48 m 구간에서 24채널 OYO사의 McSEIS-SX 디지털 기록계에 0.1 ms의 샘플률로 기록하였다.

현장조사시 알리아싱 방지용 고주파 차단필터만을 사용하였고, 채널당 상수이득(constant gain)만을 적용하였다. 자세한 야외획득 변수는 표 1에 요약하였다.

3. 자료 처리

자료처리는 주로 Power Macintosh 7600에 설치된 Seismic Processing Workshop (SPW)을 이용하였으며, 최소자승법에 의한 굴절파 속도분석은 PC를 이용하여 수행하였다. 그림 4는 이방성 계수를 구하는 처리과정 순서도를 보여준다.

현장에서 SEG-1과 SEG-2 포맷으로 기록된 자료들은 실내처리를 위하여 SPW 내부 포맷으로 변화시켰다. 타격점 기록들을 측정별로 묶은 후, 샘플률, 기록시간, 파원과 지오폰 위치에 관한 정보 등 자료에 관한 기초정보를 컴퓨터에 입력시킨 후, 윗셋에 따라 분류하였다. 비교적 평탄한 논에서 자료를 획득하였지만 약간의 고도차가 있는 곳에서 기록한 자료는 고도변화에 따른 정보정을 실시하였으며, 일부 타격점별로 정보정을 실시하였다. 정보정 과정을 거친 자료를 대상으로 동일 굴절면에 의한 굴절파 초동을 측정하였으며, 측정된 초동을 최소자승법을 이용하여 겹보기 속도를 구하였다. 동일한 지오폰 스프레드별로 왕복측정한 자료의 굴절파 겹보기 속도 쌍을 이용하여, 굴절면의 속도와 경사각을 구하였다.

측점별로 주향 및 경사 방향의 굴절파 속도 쌍을 이용하여, P파 속도 이방계수(Thomsen, 1986) ϵ

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

을 이용하여 구하였다(김기영 외, 1998). 결과를 표 2에 요약하였다.

4. 자료 분석

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

이방성은 평균 0.056으로 구조선이 주향방향으로 놓여있음을 간접적으로 시사한다. 그러나 전체 17개 측정중 절반 가량인 8개 측정에서 음(-)의 이방성을 갖는 것은 (1) 실제로 동서 방향의 구조선이 남북방향 못지 않게 많이 발달되어 있거나, (2) 측정오차가 파쇄대에 의한 속도 이방성보다 더 큰 경우 중의 하나로 판단된다.

그러나 경상북도 경주시 모화리 부근의 7개 측정에서는 절반 이상인 4개 측정에서 이방성이 음수(-)로 측정되어 이 부근 울산단층의 주향으로 예상한 $N18^\circ W$ 의 주향방향보다도 경사방향의 구조선이 발달해 있을 가능성을 제시한다. 한편 도경계를 기준으로 남쪽에서는 예상 주향방향의 속도가 예상 경사방향의 속도보다 빠른 정상적인 이방성을 보여, 도경계 남쪽에서는 울산단층이 예상 주향방향으로 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.

5. 결 론

울산단층의 분절특성을 연구하기 위하여, 경주-울산 사이의 17개 측정에서 P파 속도 이방성을 측정한 결과, 기록된 P파는 평균속도 1787 m/s의 기반암 풍화층의 상부에서 굴절된 파로 해석되며, 속도이방성은 평균 0.056으로 단층파쇄대에 의한 영향이 미약하게 나타난다. 지역별로는, 도경계 남쪽에서는 울산단층이 예상 주향방향으로 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.

참 고 문 헌

1. 김기영, 홍종국, 김교홍, 1998, 양산단층 지역에서의 수직균열에 의한 탄성과 이방성 측정, 지질학회지, v. 34, n. 1, p. 73-80.
2. Bison Instruments, 1985, Geopro instruction manual. Minneapolis.
3. Kim, K.Y., Hong, J.K., and Lee, K., 1996, Determination of fracture parameters from surface seismic data, Jour. Geol. Soc. Korea, v. 32, n. 6, p. 459-466.
4. Thomsen, L., 1986, Weak elastic anisotropy, Geophysics, v. 51, p. 1954-1966.

표 1. 탄성파 속도이방성 조사 야외변수.

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

표 2. 워크웨이 굴절파 속도 및 P파 속도이방성.

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

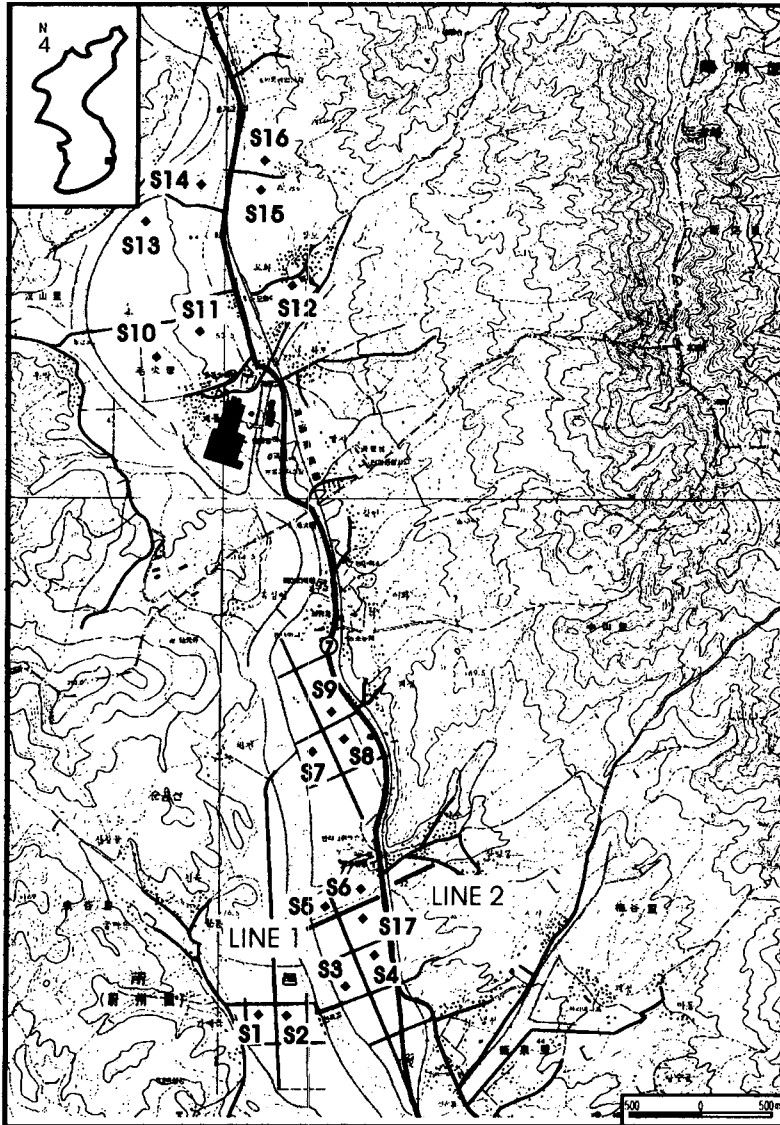
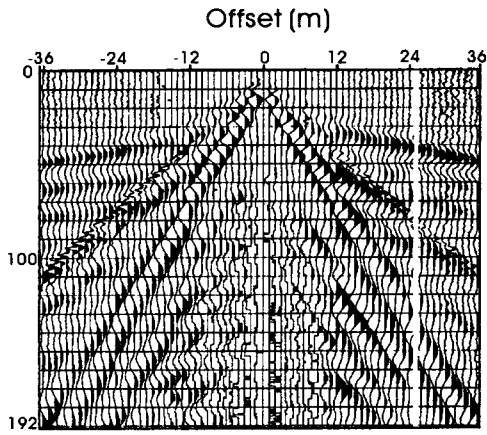


그림 1 . 울산단층대의 탄성과 속도이방성 측정 위치도.

(a)



(b)

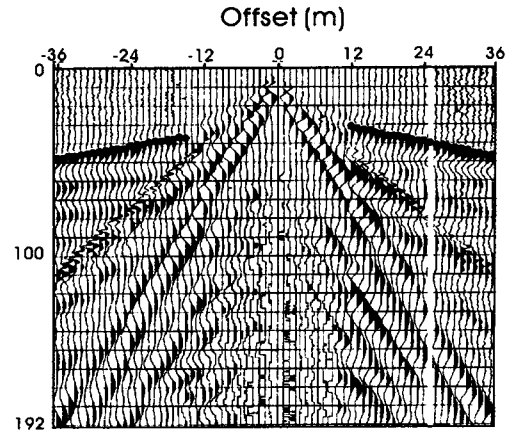
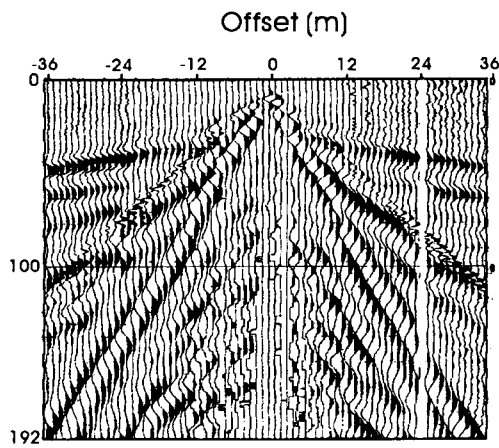


그림 2. (a) 위커웨이 굴절파 자료(N-S 방향). (b) 그림 (a)의 자료 위에 초동 위치 표시.

(a)



(b)

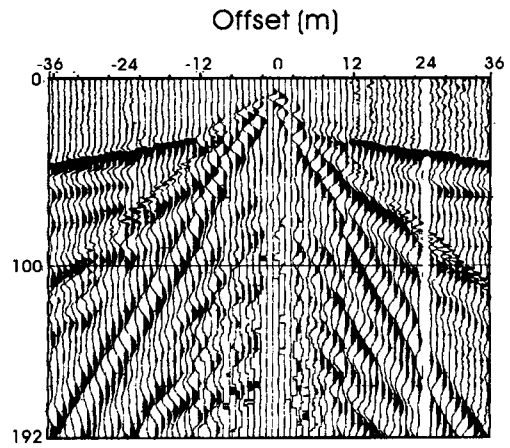


그림 3. (a) 위커웨이 굴절파 자료(E-W 방향). (b) 그림 (a)의 자료 위에 초동 위치 표시.

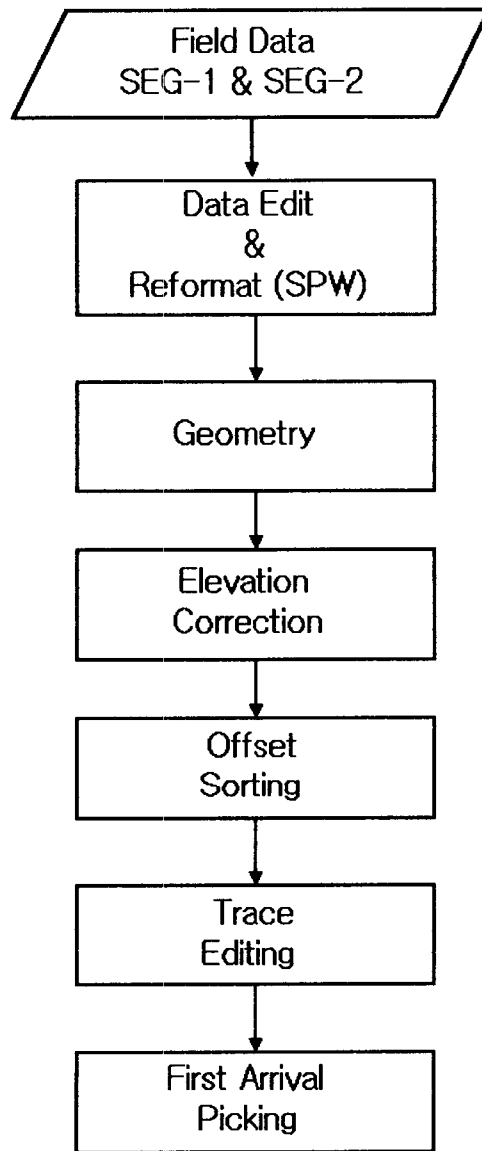


그림 4. 속도이방성 자료처리 순서도.