

굴절과 GRM 해석방법을 응용한 고경사 단층 인지 (II) -실제 자료 적용-

김기영* · 우남철*
강원대학교 지구물리학과*

요 약

양산단층이 통과하는 언양 부근에서 기록한 굴절과 4개 측선자료를 대상으로 구배변화 지시자를 구하고 단층 분포상태를 해석하였다. $XY=3$ m인 속도분석 함수를 이용하여 구한 대상 굴절면의 평균속도는 2,250-2,870 m/s 정도이며, 가장 서쪽에 위치한 측선 1은 다른 측선보다 굴절과 속도가 약 600 m/s 정도 작게 나타난다. XY 값이 6 m와 0 m인 속도분석 함수의 차이를 이용하여 구한 구배변화 지시자의 진폭이 0.5 ms/m 이상인 곳은 고해상도 반사파 단면상에 해석된 단층위치와 대체로 일치하며, 전반적으로 한 개의 측정간격(3 m) 정도 벗어난 양상을 보인다. 진폭이 큰 구배변화 지시자는 35번 국도를 중심으로 밀집되어 나타나며, 가장 큰 단층은 지질도상의 예상단층선에서 약 930 m 서쪽에 위치하는 것으로 해석된다.

주요어: 양산단층, 굴절과, 속도분석 함수, 구배변화 지시자, 단층 분포

Kim, Ki Young and Woo, Namchul, 1999, Identification of high-dip faults utilizing the GRM technique of seismic refraction method (II) -Application to real data-. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 2, n. 1, p. 65-74.

ABSTRACT: From refraction data along four seismic profiles near Eonyang which the Yangsan fault passes through, the Slope Variation Indicators (SVI) are computed and interpreted in terms of fault distribution. The average velocities of 2,250-2,870 m/s are estimated using velocity-analysis functions for the target boundary along those profiles. The average velocity for Line 1 is approximately 600 m/s lower than ones for the other lines. The SVI's with amplitude greater than or equal to 0.5 ms/m are turned out to be located near faults shown on the high-resolution reflection section, as closely as one station spacing (3 m). Large amplitude SVI's are densely distributed near National Road 35, and the fault having the largest vertical slip is indicated to be located approximately 930 m west of the inferred fault on the published geologic map.

Key words: Yangsan fault, refraction, velocity-analysis function, slope variation indicator, fault distribution

(Kim, Ki Young and Woo, Namchul, Department of Geophysics, Kangwon National University, 192-1 Hyoja-2-dong, Chunchon, 200-701, Korea, email: kykim@cc.kangwon.ac.kr)

1. 서 론

이번 호(지구물리 2권 1호)에 게재된 이 논문 1부(김기영, 1999; 이하 '1부'로 칭함)에서는, GRM 해석법(Palmar, 1980)의 시간-깊이 및 속도분석 함수를 고찰하였고, 수직변위가 있는 단층 부근에서

이들 함수의 특성을 컴퓨터 모델링을 통하여 분석하였다. 또한 적정값보다 큰 경우와 작은 경우의 XY 값을 갖는 두 속도분석 함수 값의 차이를 수평 1차 미분하여 '구배변화 지시자(Slope Variation Indicator)'로 명명하였으며, XY 값의 차이, 굴절면의 경사방향, 경사도, 상부층과의 속도 비 등에 따

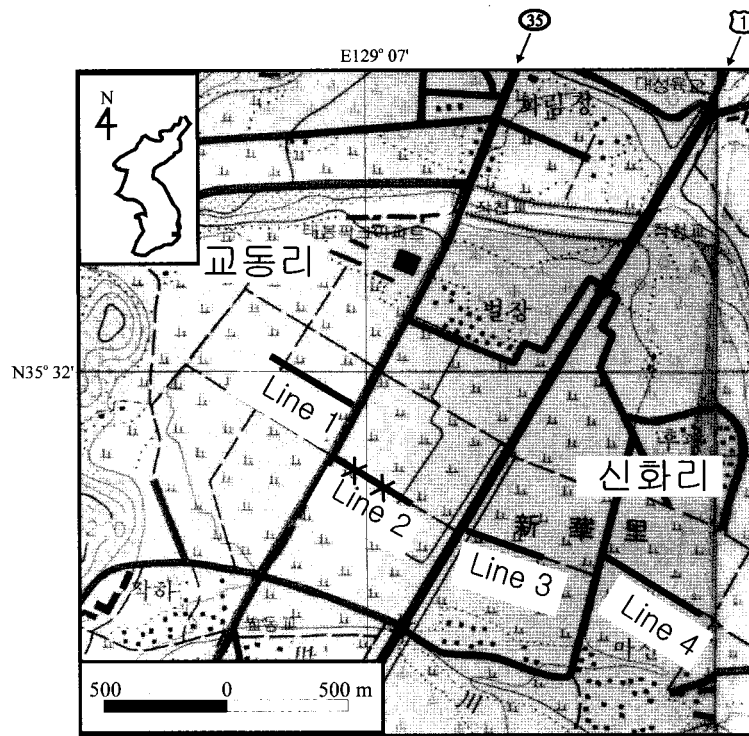


Fig. 1. Geologic map of the study area. Four seismic refraction lines are indicated with solid lines. In the range between two X's on Line 2, the reflection data in Fig. 7b were recorded.

른 이 지시자의 거동을 구명하였다.

2부에서는 경상남도 언양 부근의 양산단층 지역에서 기록한 굴절과 자료를 대상으로 구배변화 지시자를 구하고, 반사파 중합단면(stack section) 자료와의 비교를 통하여 신뢰도를 검증하며, 이 지시자의 크기 및 분포를 바탕으로 지표 근처에 존재하는 단층의 분포양상을 밝히고자 한다.

양산단층은 경상퇴적분지에 존재하는 북북동 방향의 여러 지질구조선들 중에서 가장 규모가 크고 뚜렷한 구조선으로, 지진발생 빈도가 아주 높은 것으로 알려져 있으며(이동영 외, 1996), Lee · Na (1983), Lee *et al.* (1984, 1985, 1986), Lee · Jin (1991), Lee · Lee (1997) 등은 역사지진 및 계기지진자료 분석을 통하여 양산단층의 활동 가능성을 제시한 바 있다. 이를 뒷받침하는 간접적인 증거로서, Kim *et al.* (1997)은 고해상도 반사파 자료

를 이용하여 속도 600 m/s 이하의 속도를 갖는 지층이 단층에 의해 단절된 모습을 영상화하였고, 김기영 · 이광자(1998)는 세밀한 중력측정과 정밀한 지표고도 측량을 통하여 이 단층의 운동시기가 오래되지 않았을 가능성을 제시하였다.

2. 자료획득

Fig. 1은 경상남도 양산군 삼남면 교동리와 신화리에서 1996년 12월에 실시한 측선길이 405 m (측선 1), 315 m (측선 2), 312 m (측선 3), 453 m (측선 4)의 4개 굴절과 조사측선 위치를 보여준다. 북북동 방향의 예상 단층선과 거의 직각방향으로 설정된 서북서 방향의 굴절과 측선을 따라 총 145개의 자료를 획득하였으며, 이 자료를 현장에서 분석하여 반사파 조사측선의 위치를 결정하는데

활용하였다.

자료획득 당시 조사지는 농한기로 경작 소음이 거의 없는 상태였으나, 조사지역을 북북동-남남서 방향으로 가로지르는 경부고속도로와 35번 국도를 통행하는 차량소음과 국도 확·포장 공사소음이 일부 기록되었다. 측선은 자료획득 시간과 고도보정을 최소화하기 위하여 동남동-서북서 방향으로 잘 발달되어 있는 기존 농로로 설정하였으며, 각 측선의 시작점에서 6채널 위성위치측정 시스템을 이용하여 1초 간격으로 수 시간 동안 위치자료를 기록한 후, 평균하여 수 m 이내로 오차범위를 줄였다. 측정 간격은 위키웨이 소음분석 결과(우남철, 1999)를 바탕으로 3 m로 정하였으며, 광과거리 측량기를 이용하여 측정간격 및 고도를 ± 3 mm/km의 정밀도(Geotronics AB, 1996)로 측량하였다. 전체적인 고도는 서북서쪽이 높고, 동남동쪽으로 갈수록 낮아지는 지표고도 변화를 보이며, 평균 경사 1° 로 매우 완만한 양상을 보인다.

파원으로는 5 kg 해머를 알루미늄 판에 타격하는 방법을 택하였으며, 신호대 잡음비 향상을 위하여 기록당 2-5회 타격하여 수직중합하였다. 신호는 3 m 간격 인 라인(in-line)으로 배열된 8 Hz 수직 지오폰 12개로 수신하였으며, 35 Hz 저주파 차단 기능이 있는 GeoPro 8012A 기록계에 수치형식으로 96 ms 동안 기록하였다(Bison Instruments, 1985). 타격방식은 양쪽 가장자리 수신기로부터 3 m 떨어진 곳에서 타격하는 근접 양단타격법과, 21 m 떨어진 외곽에서 추가로 타격하는 원거리 양단타격법을 사용하였다. 자세한 야외획득 변수는 Table 1에 요약하였다.

3. 자료처리 및 분석

3.1. 자료처리 순서

Fig. 2는 측선별로 구배변화 지시자를 구하는 처리과정 순서도를 보여준다. 수신기 전개별로 근접 및 원거리 타격 자료를 분류한 후, SEG-1 기록 포맷을 ASCII 형태로 바꾸고 근접 및 원거리 자료로부터 초동을 읽었다. 근접 자료에 기록된 표층속도를 이용하여 고도보정을 실시하고, 속도분석 함수를 이용하여 적정 XY값을 구하였다. XY 적정값을 이용하여 시간-깊이 단면 및 속도분차이를 이용한 구배변화 지시자를 측선별로 계산하였다. 일정값 이상을 갖는 구배변화 지시자의

Table 1. Acquisition parameters for the refraction profiling.

Source type	5 kg Hammer
Receiver type	8 Hz geophone
Receiver interval	3 m
Record length	96 ms
Sampling interval	0.1 ms
Analog filter	35 ~ 1000 Hz (Butterworth)
Gain type	Constant Gain
Shooting method	End-on
Number of channel	12
Near-trace offset	3 m / 21 m

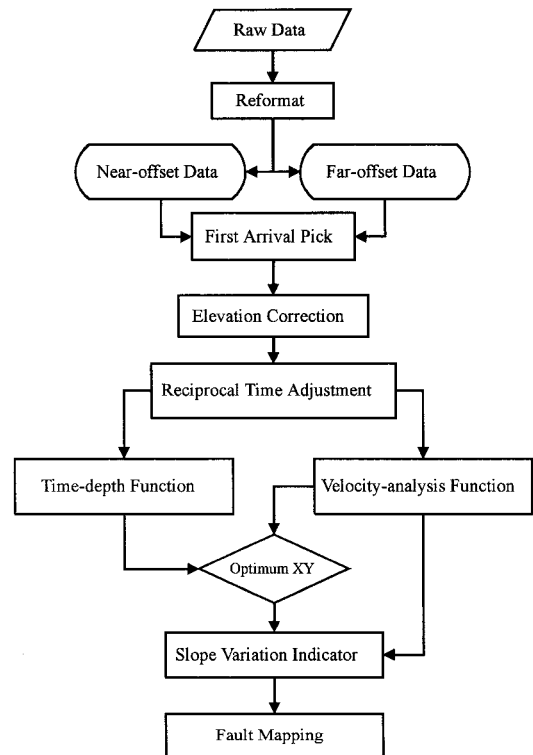


Fig. 2. Processing sequence.

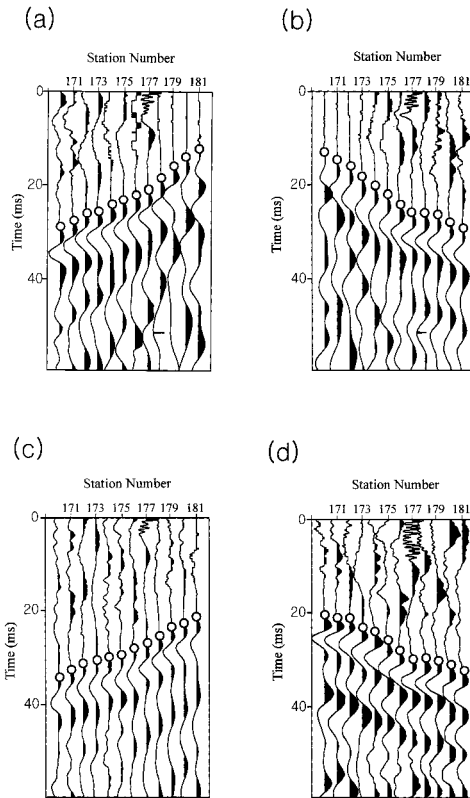


Fig. 3. Raw data recorded through geophones at stations 170-184. First arrivals are marked with empty circles. (a) Near-offset forward, (b) near-offset reverse, (c) far-offset forward, and (d) far-offset reverse shot data.

위치를 평면도에 표시하여 분석한 후, 이를 기초로 단층 파쇄가 심한 구간을 결정하였다.

3.2. 초동

Fig. 3은 축선 2의 측정점 170-181 구간에 설치된 수신기에 수신된 근접(a, b) 및 원거리(c, d) 원시 자료를 일레로 보여주며, 작은 원은 초동 위치를 표시한다. 자료획득 부분에서 기술한 바와 같이, 수신기 간격은 3 m, 기록길이는 96 ms이나 60 ms 까지만 도시하였다. Fig. 4는 이 초동시간에 고도 보정(elevation correction)을 실시한 후, 동일한 경

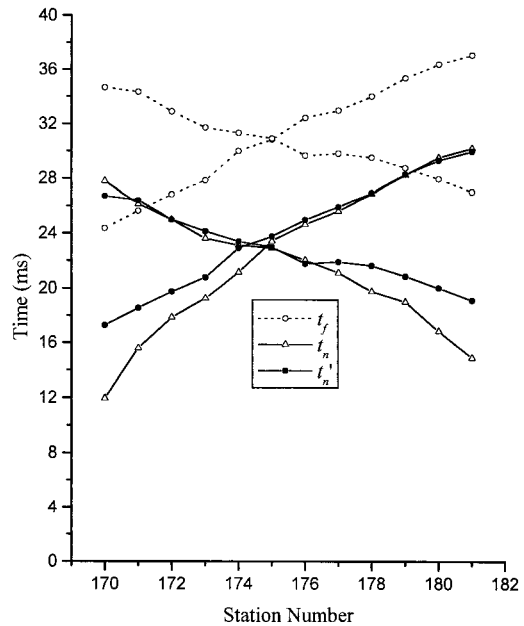


Fig. 4. Travel-time curves derived through elevation correction from the first arrivals in Fig. 2. The characters t_f , t_n , and t_n' denote far-offset, near-offset, and the difference between t_f and t_n , respectively.

계면에서 굴절되어 도달한 원거리 초동시간 t_f 과 근접 초동시간 t_n , 최소자승법으로 구한 이 두 초동시간의 차이 Δt , t_f 에서 Δt 를 빼주어 구한 t_n' 을 보여준다. 측정점 173-174, 175-176, 177-178 번 구간의 원거리 초동시간에 변화가 인지된다.

3.3. 속도분석 함수

이렇게 구한 t_n' 값들을 이용하여 구한 속도분석 함수(1부 식(2))를 Fig. 5에 도시하였다. 자료획득 시, 타격점에는 수신기가 위치하지 않아 역행주시 t_{AB} 를 기록하지 않았으며, 속도분석 함수의 절단시간(intercept time)의 절반을 이용한, 일명 ‘나비 조정법(butterfly adjustment)’을 이용하여 역행주시를 구하였다(Palmar, 1980).

1부에서 살펴본 바와 같이, 속도분석 함수는 굴절면의 구배변화가 없을 경우에 XY값에 따라 변하지 않지만, 수직변위 단층 등 굴절면의 구배변화가 있는 곳에서는 XY값이 적정값보다 작을 때

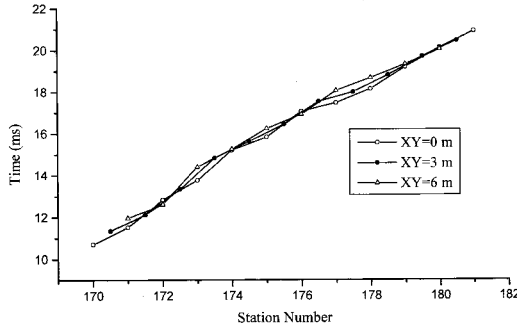


Fig. 5. Velocity-analysis functions for XY-values of 0 (empty circle), 3 (solid circle), and 6 m (empty triangle) using the data in Fig. 4.

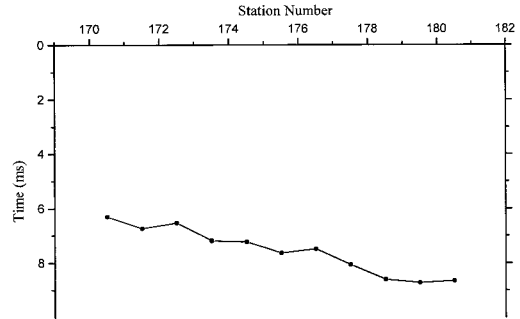


Fig. 6. Time-depth for XY=3 m using the data in Fig. 4.

는 아래로, 클 때는 위로 휘는 특성이 있다. 따라서 XY값에 따라 속도함수의 차이가 큰 부분은 굴절면의 구배변화가 있음을 지시한다. Fig. 5의 경우는 측점 173번과 177-178번 사이 구간에서 이러

한 차이가 보이며, 측점 175번에서도 작은 차이가 발견된다. 최적 XY값은 Fig. 5의 속도분석 함수가 직선에 가장 가까운 형태를 보이는 3 m로 택하였으며, 수진기 전개(geophone spread)별 굴절파 속

Table 2. Refractor velocities for the Lines 1-4.

	Line 1		Line 2		Line 3		Line 4	
	v_n' (m/s)	95% Confidence Range	v_n' (m/s)	95% Confidence Range	v_n' (m/s)	95% Confidence Range	v_n' (m/s)	95% Confidence Range
1	2114	±22.89	2360	±36.13	2565	±19.15	2352	±24.60
2	1722	±22.67	3084	±60.57	2883	±38.79	2852	±48.87
3	2018	±18.13	3296	±50.34	2708	±43.27	2710	±43.12
4	2038	±22.06	2724	±44.19	3236	±82.6	2984	±64.80
5	2070	±43.43	2652	±35.03	2737	±49.29	2562	±45.11
6	2092	±30.19	2978	±30.04	2745	±38.93	2434	±36.16
7	2280	±20.41	2970	±34.83	3186	±46.90	2920	±60.18
8	2566	±67.89	2852	±37.93	2556	±35.10	3632	±60.93
9	2840	±48.68					2884	±93.46
10	2798	±40.27					3124	±65.12
11							2894	±44.12
Ave.	2253	±33.66	2864	±41.13	2827	±44.25	2856	±53.31

도를 Table 2에 요약하였다. 측선 1의 평균속도는 2,253 m/s로써 측선 2의 2,864 m/s, 측선 3의 2,827 m/s, 측선 4의 2,856 m/s보다 약 600 m/s 정도 작게 나타난다. 각 수신기 전개별로 구한 95 % 신뢰구간의 속도 폭은 평균 43 m/s로 속도분석 함수로 구한 굴절과 속도의 신뢰도가 매우 높음을 알 수 있다.

3.4. 시간-깊이 함수

시간-깊이 함수는 굴절면의 속도만을 필요로 하며, 굴절면 상부의 암영대(blind zone), 속도 역행(velocity inversion), 수평적 속도변화(lateral velocity variation) 등에 영향을 받지 않는다(Palmar, 1980). 다만 대상 굴절면보다 더 하부의 빠른 속도를 갖는 굴절면을 통해 전달된 신호가 초동으로 기록된 부분은 편집과정에서 제거하였다. 1부에 주어진 식(1)에 $XY=3$ m를 적용하여 구한 시간-깊이 함수를 Fig. 6에 도시하였다. 대략 6-9 ms 범위로 동쪽으로 갈수록 깊어짐을 보인다. 속도분석 함수에서 주목하였던, 측점 173.5번과 177.5-178.5번 사이 구간에서 시간-깊이 함수값의

변화가 심하게 변하며, 측점 175.5번에서도 작은 변화가 발견된다.

3.5. 구배변화 지시자

Fig. 7은 XY값이 6 m와 0 m인 속도분석 함수의 차이를 이용하여 측선 2의 측점 170-207번 구간에서 구한 구배변화 지시자와 동일 구간에서 얻은 반사와 중합단면도를 보여준다. Fig. 7a는 구배변화 지시자가 측점 173, 177, 185, 190번 부근에 진폭이 상대적으로 큰 0.5 ms/m 이상의 극대값이 위치함을 보인다. 큰 진폭을 갖는 구배변화 지시자의 위치는 Fig. 7b의 반사와 해석단면상의 단층 위치와 대체로 일치하나, 전반적으로 서북서쪽으로 하나의 측점간격(3 m) 정도 이동한 양상을 보인다. 이는 1부에서 관찰한 바와 같이, XY값의 차이나 굴절면 경사 등에 의한 효과와 두 조사방법의 수평 해상도 차이에 기인한다고 분석된다.

3.6. 측선별 구배변화 지시자 진폭

측선별 구배변화 지시자를 Fig. 8에 나타내었다. 0.5 ms/m 이상인 구배변화 지시자는 측선 1상에

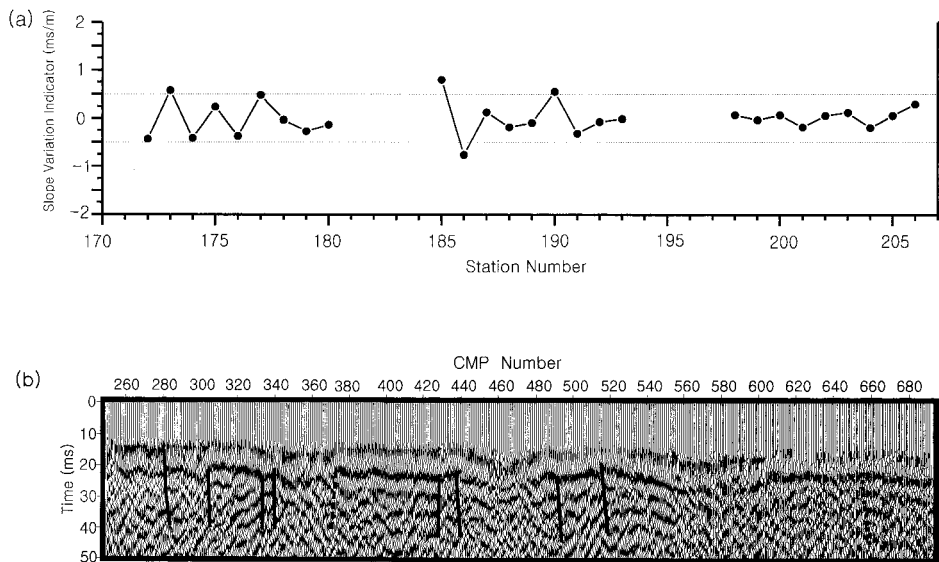


Fig. 7. (a) Slope variation indicators and (b) reflection stack section between stations 170 and 207 on Line 2.

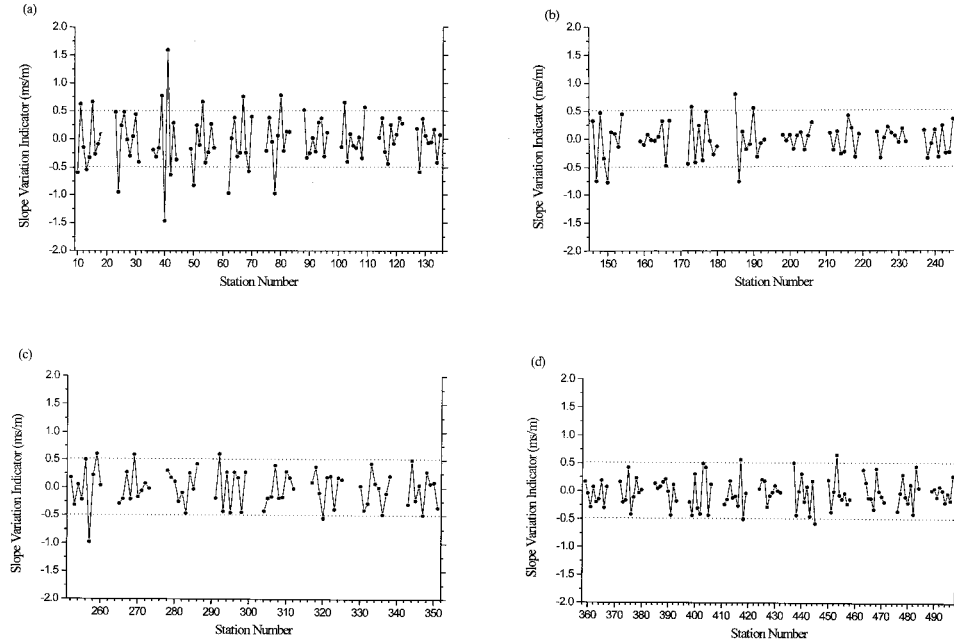


Fig. 8. Slope variation indicators for XY=3 m of Lines (a) 1, (b) 2, (c) 3, and (d) 4, respectively.

14개, 축선 2상에 5개, 축선 3상에 4개, 축선 4상에 4개 가량 존재하며(Fig. 8), 밀도로 환산하면 각각 0.035, 0.016, 0.013, 0.009 개/m가 된다. Table 3은 구배변화 지시자의 절대값을 대상으로 평균, 표준편차, 최대 및 최소값 등을 축선별로 요약한 것으로, 축선 1의 평균값이 다른 3 축선의 평균값보다 48 % 이상 크게 나타난다. 또한 축선 1은 1 ms/m 이상인 구배변화 지시자도 발견되어, 비교적 낙차가 큰 단층이 존재할 가능성을 시사한다. 속도분석 함수를 이용하여 구한 평균속도도 다른 축선에서 구한 값보다 600 m/s 정도 작게 구해진 점도 축선 1의 기반암이 많이 파쇄되어 있을 가능성을 보여주는 증거이다.

3.7. 추정단층 분포

추정단층의 위치 분포를 파악하기 위하여 구배변화 지시자가 0.5 ms/m 이상인 곳을 평년상에 표시하였다(Fig. 9). 밀도는 서북서쪽으로 대체로 증

가하는 모습을 보이며, 가장 밀도가 높은 구간은 축선 1과 축선 2의 서북서쪽 구간으로 35번 국도

Table 3. Slope variation indicators for the Lines 1-4.

	Slope Variation Indicator (ms/m)			
	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4
Ave.	0.349	0.237	0.262	0.204
Std. Dev.	0.458	0.307	0.319	0.257
Max.	1.596	0.801	0.604	0.659
Min.	-1.466	-0.772	-0.972	-0.572

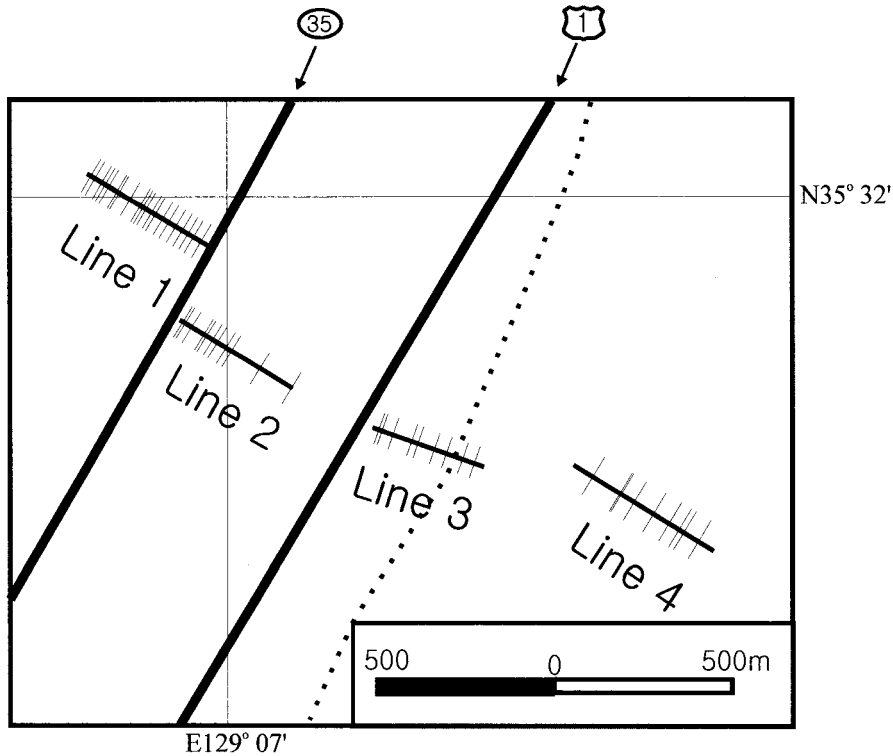


Fig. 9. Possible faults from the SVI analysis. High density area near National Road 35 is located several hundred meters NWW of the inferred fault line on the published geologic map.

를 중심으로 분포한다. 이는 언양면 직동리(김인수·김종렬, 1983)와 가천리(Kim·Lee, 1987)의 전기비저항 탐사 결과 밝혀진 저비저항대를 직선으로 연결하는 선상에 놓인다. 이는 1:50,000 지질도(이윤종·이인기, 1972)상에 나타나 있는 예상 단층선에서 서북서 방향 500-1,000 m 부근에 많은 단층이 존재할 가능성을 보여주며, 특히 가장 수직변위가 큰 단층은 1.5 ms/m 이상의 구배변화 지시자가 있는 축선 1의 40-41번(예상단층선에서 약 930 m 지점)에 위치하는 것으로 해석된다.

4. 토 의

굴절면의 구배는 단층만이 아니라 여러 가지 요인에 의해 변할 수 있으며, 구배변화 지시자는 단

지 굴절면의 구배가 변하는 정도만을 나타내기 때문에, 구배변화 지시자의 진폭이 크다고 해서 반드시 지하에 단층이 존재한다고는 볼 수 없다. 그러나 이 논문의 조사지역은 지질학적으로 볼 때, 단층이 통과할 것이 확실시되며 여러 지구물리학적 증거(김인수·김종렬, 1983; Kim·Lee, 1987)는 이를 뒷받침하고 있으므로, 단층이 굴절면(기반암 상부면) 구배변화에 직접적인 영향을 미친 요소로 판단된다.

추정단층 위치 및 분포 파악을 위한 구배변화 지시자의 진폭 기준은, 동일한 조사축선에서 획득한 반사파 중합단면상에서 해석된 단층과 잘 부합하는 크기인 0.5 ms/m로 주관적으로 결정하였다. 그러나 반사파 중합단면도도 주파수, 암상, 대상심도, 처리방법 등에 따라 변하므로 객관적인 기

준이라고 볼 수는 없으며, 객관적인 기준 마련을 위하여는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

언양 부근의 양산단층 지역에서 기록한 굴절파 4개 축선자료를 대상으로 1부에서 정의한 구배변화 지시자를 구하고, 이를 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻었다

1. $XY=3$ m인 속도분석 함수를 이용하여 구한 대상 굴절면의 평균속도는, 축선 1-4에서 각각 2,253, 2,864, 2,827, 2,856 m/s로 구해지며, 축선 1은 다른 축선보다 굴절파 속도가 약 600 m/s 정도 작게 나타난다.

2. 시간-깊이 함수값이 상대적으로 크게 변하는 지점은 초동시간의 변화와 속도분석 함수의 휘는 양상 등이 관찰된 구간과 일치한다.

3. XY 값이 6 m와 0 m인 속도분석 함수의 차이를 이용하여 구한 구배변화 지시자의 진폭이 0.5 ms/m 이상인 곳은 동일한 구간의 고해상도 반사파 단면상에 해석된 단층위치와 대체로 일치하나, 전반적으로 서쪽으로 한 개의 축점간격(3 m) 정도 이동한 양상을 보인다.

4. 0.5 ms/m 이상인 구배변화 지시자는 축선 1-4에서 각각 14, 5, 4, 4개 가량 존재하며, 밀도는 각각 0.035, 0.016, 0.013, 0.009 개/m이다.

5. 축선 1과 2에 진폭이 큰 구배변화 지시자가 많이 존재함을 알 수 있으며, 특히 축선 1은 1 ms/m 이상인 구배변화 지시자도 발견되고, 속도도 다른 축선보다 평균 600 m/s 작아서, 기반암 파쇄가 심하며 비교적 낙차가 큰 단층이 존재할 가능성을 시사한다.

6. 진폭이 0.5 ms/m 이상인 구배변화 지시자는 축선 1과 축선 2의 서북쪽 구간으로, 35번 국도를 중심으로 가장 밀집되어 나타나며, 기존 비저항 연구결과와 부합된다. 또한 지질도상의 예상 단층선으로부터 북서북 방향 500-1,000 m 부근에 많은 단층이 존재할 가능성을 보여주며, 가장 큰 단층은 예상단층선에서 약 930 m 지점에 위치하는 것으로 해석된다.

사 사

이 연구는 한국과학재단에서 지원하는 '96 목적 기초 연구과제(96-0703-05-04-3) 연구결과와 일부

입을 밝히며, 강원대학교 자원개발연구소의 부분적 지원에 감사드립니다. 이 논문을 심사하면서 좋은 의견을 많이 주신 충북대학교 김지수 교수님과 한국해양연구소의 홍종국 박사님과, 당시 대학 원생으로 추운 겨울에 탄성파 자료를 획득하느라 수고하여 준 한성대학교의 김현규 석사, 한국해양연구소의 정미숙 석사에게 고마움을 표합니다.

참고문헌

- 김기영, 1999, 굴절파 GRM 해석방법을 응용한 고경사 단층 인지(I) -컴퓨터 모델링 연구, 지구물리, 2, 57-64.
- 김기영, 이광자, 1998, 안강부근 양산단층 지역에서 의 중력 및 지자기 연구, 지구물리, 1, 31-40.
- 김인수, 김종렬, 1983, 경상분지 언양 단층 지역에 대한 전기비저항 탐사연구, 광산지질학회지, 16, 11-18.
- 우남철, 1999, 언양 부근의 천부 단층탐지 및 영상화를 위한 탄성파 종합연구. 강원대학교 석사학위논문.
- 이동영 외 16인, 한반도 지진활동 및 지각변형 연구, 한국자원연구소.
- 이윤종, 이인기, 1972, 한국 지질도(1:50,000), 언양 지질도폭 및 설명서, 국립지질조사소.
- Bison Instruments, 1985, GeoPro instruction manual. Minneapolis.
- Geotronics AB, 1996, Geodolite 506 user manual, EkonomiPrint AB, Sweden.
- Kim, K.Y., Woo, N., Kim, H. and Jung, M.S., 1997, Seismic reflection studies near Eonyang in the Yangsan Fault system of Korea, International symposium on the occasion of the 50th anniversary of the Geological Society of Korea.
- Kim, Y. and Lee, K., 1987, A Study on the Structure of the Yangsan Fault in the southern part of Kyongju, Journal of the Korean Institute of Mining Geology, 20, 247-260.
- Lee, K., Jeong, B, Kim, Y. and Yang, S.J., 1984, A geophysical study of the Yangsan fault area, Journal of the Geological Society of Korea, 20, 222-240.
- Lee, K., Jeong, B. and Kim, Y., 1985, A geophysical study of the Yangsan fault area (II), Journal of the Geological Society of Korea, 21, 79-89.
- Lee, K. and Jin, Y.G., 1991, Segmentation of the Yangsan fault system: Geophysical studies on major faults in the Kyeongsang Basin, Journal of the Geological Society of Korea, 27, 434-449.
- Lee, K., Kim, K.H. and Chang, T.W., 1986, Seismicity of the Korean peninsula (II): Seismicity of the northern part of the Yangsan fault, Journal of the Geological

Society of Korea, 22, 347-365.
Lee, K. and Lee, J., 1997, Geoelectric study on the probable seismic segment boundaries of Yagsan fault zone, Geoscience Journal, 1, 16-25.
Lee, K. and Na, S.H., 1983, A study of microearthquake activity of the Yangsan fault, Journal of the Geological Society of Korea, 19, 127-135.

Palmar, D., 1980, The generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation, Society of Exploration Geophysicists.

1998년 10월 25일 원고접수

1999년 3월 17일 원고채택