

# 굴절과 GRM 해석방법을 응용한 고경사 단층 인지 (I) -컴퓨터 모델링 연구-

김기영

강원대학교 지구물리학과

## 요 약

지표 부근의 수직변위 단층을 굴절과 자료로부터 신속하게 인지하기 위한 효과적 방법을 모색하기 위하여, 컴퓨터 모델링을 통하여 GRM 해석법의 특성을 분석하였다. 속도분석 함수가 수진점 사이 거리인 XY값에 따라 단층 부근에서 형태가 변하는 특성을 이용하여, XY값이 적정값보다 큰 경우와 작은 경우의 속도분석 함수값의 차이를 수평 1차 미분하여 구한 함수를 구하였으며 '구배변화 지시자'로 명명하였다. 굴절면 경사가 작을수록, XY값의 차이가 클수록 구배변화 지시자의 최대치 진폭이 증가하고 진동거리가 짧아져 단층의 위치를 정확하게 지시하는 것으로 분석된다. 이러한 특성을 갖는 구배변화 지시자는 굴절법으로 얻어진 탄성과 자료를 이용하여 지표 근처의 고경사 단층 위치 및 분포 상태를 파악하는데 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 굴절과, 단층, GRM, 속도분석 함수, 구배변화 지시자

**Kim, Ki Young, 1999, Identification of high-dip faults utilizing the GRM technique of seismic refraction method (I) -Computer modeling-. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 2, n. 1, p. 57-64.**

**ABSTRACT:** To effectively identify near-surface faults with vertical slips from seismic refraction data, the GRM interpretation technique is tested and investigated in terms of various parameters through computer modeling. A characteristic change in shape of the velocity-analysis function near faults is noticed, and a new strategy of 'Slope Variation Indicator (SVI)' is developed and tested in this study. The SVI is defined as a first horizontal derivative of the difference of velocity analysis functions for a large XY value and a small one, respectively. As the dip of refractor decreases and as the difference in XY value increases, the peak value of SVI increases and its duration decreases. Consequently, the SVI indicates accurately the location of buried fault in the test models. The SVI is believed to be an efficient tool in seismic refraction method to investigate location and distribution of shallowly buried faults.

**Key words:** refraction, fault, GRM, velocity-analysis function, slope variation indicator

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

## 1. 서 론

기반암면의 급격한 기복 변화는 암상 변화나 단층 등 주요 지질구조에 의한 경우가 많으며, 대규

모의 토목공사나 주요 시설물을 설계할 때 고려해야 할 주요 대상 중의 하나이다. 지반지질 구조 및 특성을 파악하는데 시추조사 외에 여러 지구물리학적 조사방법이 사용되고 있지만, 그 중에서 탄

성과 굴절법이 가장 널리 보편적으로 사용되는 실정이다(Burger, 1992).

탄성과 굴절법은 1912년 Gutenberg가 굴절된 지진파를 이용하여 지구 핵의 존재를 발견하고 그 깊이를 계산한 이후, 자연 지진을 이용한 지구 내부구조 연구에 꾸준히 사용되어져 왔으며, 석유탄사 분야에서는 1923년 멕시코 유전탐사에 처음 적용되었다(Dobrin and Savit, 1988). 특히 저속도 퇴적층 하부에 속도가 높은 기반암이 존재할 경우에 퇴적층의 두께를 효과적으로 계산해 낼 수 있는 굴절법은 새로운 조사지역의 개략탐사에 역사적으로 많이 사용되어 왔다.

1980년 이전의 굴절과 자료해석법으로는 절편 시간법(intercept time method), 파면법(wavefront method), 지연시간법(delay time method) 등이 개발되고 사용되었다. 이 중 Gardner (1939)에 의해 개념이 처음 정립된 지연시간법은 Hawkins (1961)와 Hagedoorn (1959)에 의해 각각 reciprocal method와 plus-minus method로 계승·발전되었다. 이 방법은 10° 이내의 굴절면 경사가 있는 경우에도 간편하게 적용할 수 있는 장점으로, 디지털 컴퓨터의 보급과 함께 널리 사용되어 왔다.

지연시간법을 더욱 일반화시킨 GRM (generalized reciprocal method) 해석법은 Derecke Palmar가 1980년에 발표하였는데, 이 방법은 굴절면의 경사를 20° 까지도 다룰 수 있고, 탄성과 굴절법이 갖는 가장 큰 제약인 저속도층(velocity inversion) 및 박층(thin layer) 문제를 해결할 수 있어서 현재 전 세계적으로 가장 널리 사용되고 있다.

이 연구에서는 지표 근처에 분포하는 단층연구에 활용하기 위하여, GRM 방법의 속도분석 함수가 수직변위가 있는 단층 주위에서 XY값에 따라 형태가 변하는 특성을 분석하고, 단층 존재를 지시할 수 있는 지시자를 정의한 후, 그 특성을 살펴보고자 한다.

## 2. 방법

Fig. 1은 속도  $v_1$ 인 표층 하부에 속도  $v_2$ 의 굴절면이 존재하는 간단한 이층 구조 모델로서, A와 B는 각각 정방향(forward) 및 역방향(reverse) 측선의 파원 위치이다. X와 Y는 모두 수진점을 뜻하며, G는 X와 Y의 중간 지점을 나타낸다.

GRM 방법을 이용하여 비교적 수직변위가 큰

단층 위치는, 대상 굴절면의 겹보기 속도를  $v_n'$ 라 할 때, Palmar (1980)가 정의한 '시간-깊이(time-depth)' 함수  $t_G$

$$t_G = [t_{AY} + t_{BX} - (t_{AB} + XY/v_n')]/2 \quad (1)$$

로부터 알 수 있다. 시간-깊이 함수는 적절한 XY값을 사용할 때 단층 가장자리에서 구배가 크게 변하는 특성이 있다. 그러나 잡음의 영향으로 초동(first arrival)이 분산되거나 적절한 XY값을 모르는 경우 시간-깊이를 이용한 단층 인지는 어려움이 발생한다.

이보다 기반암 구배변화에 더욱 민감하게 반응하는 것이, 역시 Palmar (1980)에 의해 정의된 속도분석 함수  $t_v$

$$t_v = (t_{AY} - t_{BX} + t_{AB})/2 \quad (2)$$

인데, XY값을 적정한 값보다 크게 택할 경우에 단층부근에서 속도분석 함수는 위로 볼록해지고, 반대로 작게 택할 경우에 아래로 휘는 특성이 있다(Palmar, 1980). 따라서 XY값이 적정값보다 큰 경우의 속도분석 함수값  $t_{v+}$ 와 작은 경우의 속도분석 함수값  $t_{v-}$ 의 차이  $\Delta t_v$

$$\Delta t_v = t_{v+} - t_{v-} \quad (3)$$

는 단층을 포함한 기반암 구배의 급격한 변화가 있는 위치를 나타내는 지시자가 될 수 있다.

이 속도분석 함수 차이를 수평 1차 미분하여 구한 함수

$$\frac{d}{dx} \Delta t_v \quad (4)$$

는 상기 식(1)-(3)으로 각각 주어진 시간-깊이 함수, 속도분석 함수, 속도분석 함수 차이값 등 보다 변화 폭이 크고 수평 해상도가 높아서, 기반암 구배변화가 심한 곳의 위치 및 정도를 더욱 정확히 지시해 줄 수 있다. 따라서 식(4)로 주어진 속도분석 함수 차이의 1차 미분함수를 이하 '구배변화 지시자(Slope Variation Indicator)'라 칭한다.

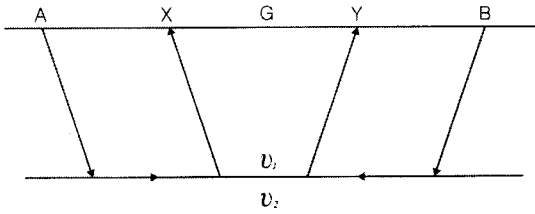


Fig. 1. Schematic diagram of the two-layer model and raypaths.

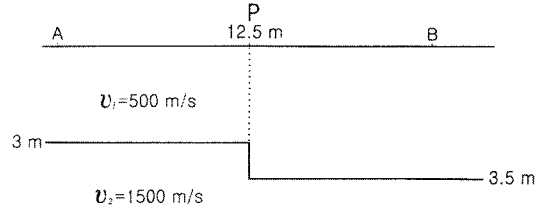


Fig. 2. Fault model used for the computation of first arrival time.

### 3. 모델연구

#### 3.1. 컴퓨터 모델

Fig. 2는 초동 계산을 위하여 설정한 지하구조 모델로서, 속도 500 m/s인 미고결층 하부에 속도 1500 m/s의 기반암이 3 m 깊이에 수평으로 놓여 있고, 발파점 A로부터 12.5 m 떨어진 곳 P에 수직변위 0.5 m인 수직단층이 존재하는 상태를 보여 준다. 양단 발파점 A와 B 사이의 거리는 25 m이고, 이 두 발파점 사이에는 24개 수신기가 1 m의 등간격으로 놓여 있는 상태를 설정하였다.

#### 3.2. 초동

Fig. 3은 Fig. 2의 모델을 대상으로 2점 파선추적법(Červený, 1985)을 이용하여 계산한 초동값을 보여 주는데, F와 R은 각각 A점과 B점에 파원이 놓인 순행 및 역행 측선모델을 나타내며, 점선으로 표시한 수직선은 단층이 놓여 있는 위치를 뜻한다. 순행 및 역행 측선모델의 단층에 의한 주시 변화는 A점으로부터 14-16 m와 11-12 m 구간, 교차거리(crossover distance)는 8-9 m와 15 m 부근에 각각 나타난다. 교차거리로부터 파원 위치까지 연장한 점선은 가상의 굴절파 주시로, 실제 상황에서는 원격발파 혹은 팬터밍 기법으로부터 얻을 수 있다.

#### 3.3. 시간-깊이 함수

Fig. 4는 Fig. 3의 팬터밍 주시자료를 이용하여 식(1)로부터 구한 시간-깊이 함수값으로 XY값을 0 m부터 5 m까지 1 m씩 증가시키면서 구한 결과가

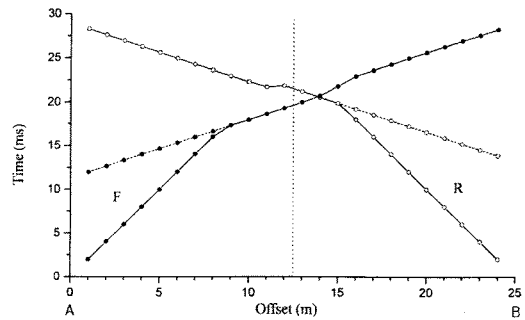


Fig. 3. Travel time curves derived from the model in Figure 2. The vertical dotted line indicates the location of fault.

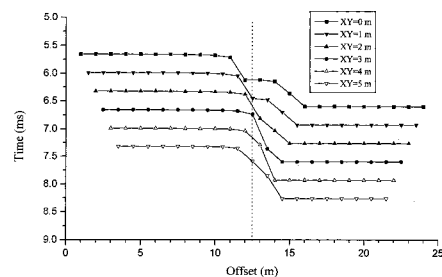


Fig. 4. Time-depth for XY-values from 0 to 5 m, derived from the traveltime data in Figure 3. The vertical dotted line indicates the location of fault.

다. 시간-깊이 함수값들은 수직 깊이가 아닌 굴절면까지의 직각 거리이므로 굴절면의 경사에 따라 다소 차이가 발생하기는 하지만, XY=3 m 일 때 실제 단층 위치에서 단층의 경사가 가장 크게 나타나며, XY값이 이보다 크거나 작은 경우에 단층 부근 구조가 완만하게 나타나는 모습을 뚜렷하게 보여준다. 한편 이론적인 최적 XY값(Palmar, 1980)인 임계거리(critical distance)는 단층 좌우에서 각각 2.12 m와 2.47 m로 계산된다. 따라서 시간-깊이 함수를 이용하여 모델로부터 계산한 XY 적정값은 이론적인 값보다 다소 크게 나타남을 알 수 있다.

3.4. 속도분석 함수

Fig. 5는 Fig. 3의 주시자료를 이용하여 식(2)로부터 구한 속도분석 함수로서, 시간-깊이 함수의 경우와 마찬가지로 XY값을 0 m부터 5 m까지 1 m 간격으로 증가시키면서 구한 결과이다. 앞에서 언급한 바와 같이, XY값이 적정한 값보다 큰 경우(즉, XY = 4, 5 m)에 단층 부근에서 속도분석 함수는 위로 볼록해지고, 반대로 작은 경우(즉, XY = 0, 1, 2 m)에 아래로 휘는 모습을 보인다. 속도분석 함수로부터 구한 XY 적정값은 시간-깊이 함수를 이용하여 구한 결과와 일치하는 3 m 정도로 나타나며, 이는 시간-깊이 함수의 경우와 마찬가지로, 이론적인 값보다 다소 큰 값이다.

3.5. 속도분석 함수 차이

Fig. 6은 Fig. 5의 속도분석 함수자료를 이용하여 식(3)으로부터 구한 속도분석 함수의 차이값으로, XY = 5 m인  $t_{v+}$ 와 XY = 1 m인  $t_{v-}$ 로부터 구한  $\Delta t_{v(5-1)}$  (검은색 원)과 XY = 4 m인  $t_{v+}$ 와 XY = 2 m인  $t_{v-}$ 로부터 구한  $\Delta t_{v(4-2)}$  (흰색 원)를 각각 보여 준다. XY값의 차이가 큰 경우에 속도분석 함수 차이의 진폭이 커짐과 동시에, 이상적인 속도분석 함수로부터 벗어나는 부분의 오프셋(파원에서 G점까지의 거리) 범위도 넓어져서 예리한 형태를 보이지 못하는 양상이 관찰된다. 이는 잡음이 전혀 없는 컴퓨터 모델의 경우, XY값의 차이가 클 필요가 없으나, 잡음이 존재하는 실제 기록자료의 경우는 적절한 XY값의 차이가 변할 수 있음을 지시한다. 두 경우 모두, 속도분석 함수 차이의 최대값이 단층으로부터 수신기 간격(1 m) 이내의 범위에 위치하고 있다.

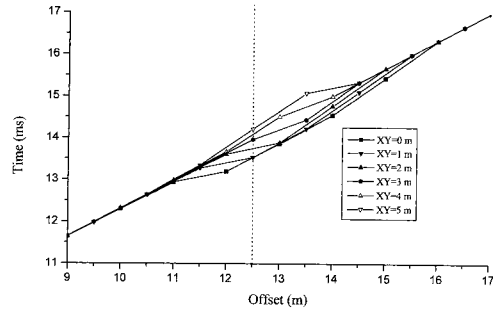


Fig. 5. Velocity analysis functions for XY-values from 0 to 5 m, derived from the travelttime data in Figure 3. The vertical dotted line indicates the location of fault.

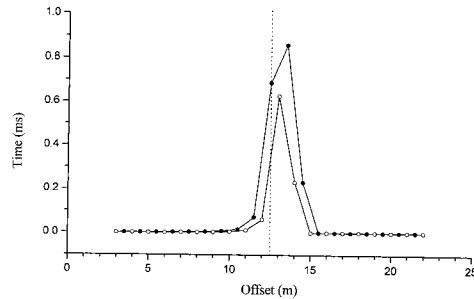


Fig. 6. Differences in velocity-analysis function for XY-values of 5 and 1 m (solid circle) and 4 and 2 m (empty circle). The vertical dotted line indicates the location of fault.

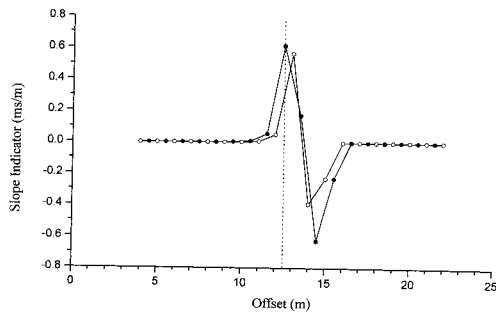


Fig. 7. Slope variation indicators for XY-values of 5 and 1 m (solid circle) and 4 and 2 m (empty circle). The vertical dotted line indicates the location of fault.

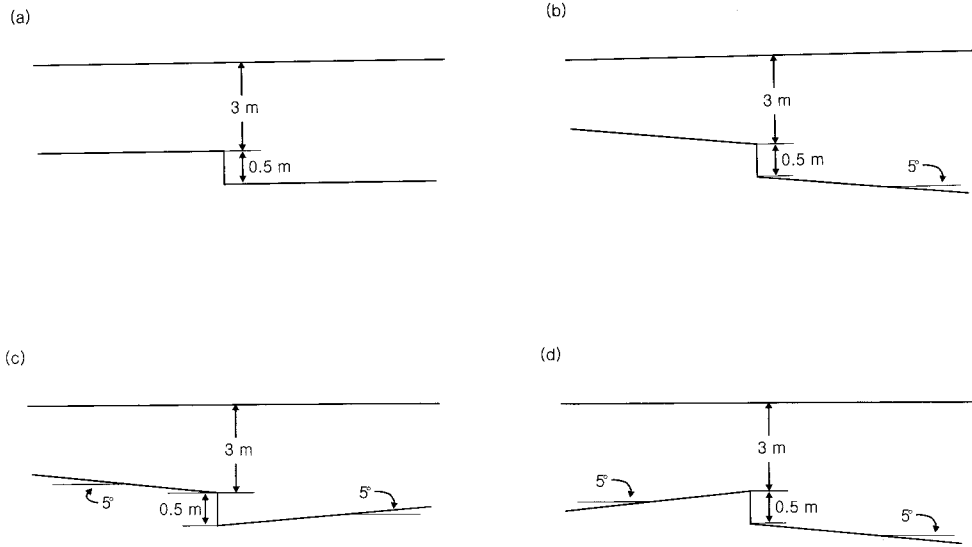


Fig. 8. Geologic models with a vertical fault for various dip patterns: (a) horizontal, (b) monoclinal, (c) synclinal, and (d) anticlinal, respectively.

### 3.6. 구배변화 지시자

Fig. 6의 속도분석 함수 차이를 식(4)를 이용하여 수평 1차 미분하여 구한 구배변화 지시자를 Fig. 7에 도시하였다. 각각 검은 원과 흰 원으로 표시한  $\Delta t_{v(5-1)}$ 와  $\Delta t_{v(4-2)}$ 의 속도분석 함수 차이를 이용한 두 경우 모두, 구배변화 지시자의 최대값이 단층 위치로부터 수신기 간격 한 개(1 m) 이상 벗어나지 않는 모습을 보인다. 또한 XY값의 차이가 큰 경우의 속도분석 함수, 즉  $\Delta t_{v(5-1)}$ 를 이용한 구배변화 지시자가 단층 위치와 더욱 잘 일치하는 양상을 보인다.

### 3.7. 경사에 의한 효과

기반암면의 경사 정도 및 방향이 구배변화 지시자에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 단층을 중심으로 좌우가 모두 수평인 경우, 한쪽 방향으로 5° 경사진 경우, 단층 쪽으로 좌우가 각각 5° 기울어진 경우, 단층으로부터 먼 방향으로 각각 5° 기울어진 경우의 지하구조 모델을 설정하였다(Fig. 8). Fig. 9는 Fig. 8에 제시한 4가지 모델에 대해, XY값이 5 m와 1 m인 속도분석 함수를 이용하여

구한 구배변화 지시자를 보여준다. 단층을 중심으로 굴절면이 위로 볼록할수록 양의 최대 진폭이 커지며, 음의 최대 진폭은 반대로 오목할수록 크게 나타난다.

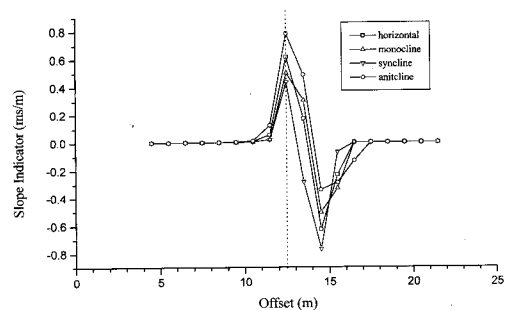
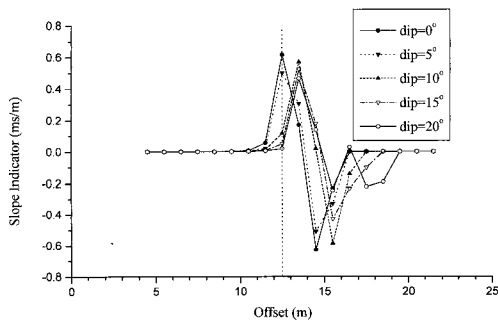
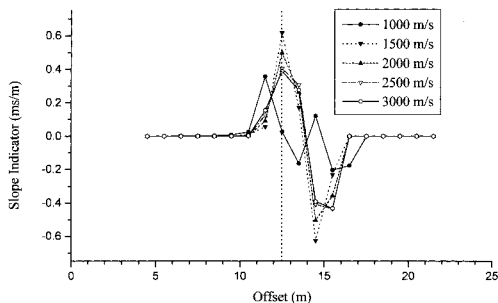


Fig. 9. Slope variation indicators for various dipping directions across the fault; horizontal (square), monocline (upward triangle), synclinal (downward triangle), and anticlinal (circle). The vertical dotted line indicates the location of fault.



**Fig. 10.** Slope variation indicators for various dips; horizontal (solid circle), 5o (downward solid triangle), 10o (upward solid triangle), 15o (downward empty triangle), and 20o (empty circle) across the fault The vertical dotted line indicates the location of fault.

Fig. 10은 굴절면 경사를 한쪽 방향으로 0° 부터 20° 까지 5° 간격으로 증가시키면서 구한 구배변화 지시자를 보여 준다. 경사가 5° 이내의 경우는, 단층 위치와 구배변화 지시자의 최대치가 일치하며, 5° 이상인 경우 1 m의 차이를 보인다. 구배변화 지시자의 최대치는 경사도에 따라 크게 변하지 않는 양상을 보이며, 경사가 클수록 구배변화 지시자가 오래 진동하는 특성을 보인다.



**Fig. 11.** Slope variation indicators for various  $v_2/v_1$  ratios; 2 (solid circle), 3 (downward solid triangle), 4 (upward solid triangle) 5 (downward empty triangle), and 6 (empty circle). The vertical dotted line indicates the location of fault.

### 3.8. 속도비( $v_2/v_1$ )에 의한 효과

굴절면 상부와 하부의 속도 비율이 구배변화 지시자에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 수평층 모델의 기반암 속도를 1000 m/s부터 3000 m/s까지 500 m/s 간격으로 변화시키면서 구한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 이 때 구배변화 지시자를 구하기 위하여, XY값이 5 m와 1 m인 속도분석 함수를 이용하였으며, 미고결층 속도는 500 m/s로 고정하였다.

이 모델의 경우에,  $v_2 = 1500$  m/s일 때 구배변화 지시자의 진폭이 최대가 되며,  $v_2$ 가 이보다 같거나 큰 경우 구배변화 지시자의 최대치가 단층위치와 잘 일치한다. 이는 기반암과 상부층의 속도 차이가 클 때, 굴절과 탐사의 정확성이 높아지는 일반적인 사실과도 부합한다. 그러나  $v_2$ 가 이보다 더 증가할수록 구배변화 지시자의 진폭은 오히려 감소하는 양상을 보이는데, 이는 임계거리는 점점 작아지는데 반하여 공간 주파수( $1\text{ m}^{-1}$ )는 고정되어 충분히 세밀한 샘플링이 이루어지지 못하는데 기인한다. 한편,  $v_2 = 1000$  m/s인 경우는 최대치 진폭도 작고, 진동거리도 길어지며, 최대치 위치도 단층 위치보다 왼쪽(기반암이 얇은 쪽)으로 수진기 간격 1개 만큼 이동된 양상을 보인다. 이러한 현상은  $v_2/v_1$  비가 상대적으로 크지 않은 경우, 구배변화 지시자를 계산하는데 몇몇 XY값들을 시험하여 가장 뚜렷한 양상을 보이는 값을 택하여야 할 필요성을 보여준다.

## 4. 토 의

Palmar (1980)는 XY 적정값이 임계거리와 같으며, XY 적정값보다 크게 택할 경우에 속도분석 함수는 단층부근에서 위로 블록해지고, 반대로 작게 택할 경우에 아래로 휘는 특성이 있다고 하였다. 그러나 컴퓨터 모델링을 통한 분석 결과, 시간-깊이 함수 및 속도분석 함수로부터 구한 XY 적정값은 이론적 XY 적정값인 임계거리보다 약간 크게 나타난다.

단층부근에서 XY값에 따라 속도분석 함수의 형태가 변하는 것은 식(2)로부터 자명하다. 그러나 XY 적정값에서 속도분석 함수가 반드시 일치선이 된다는 이유는 명확하지 않으며, 심지어 단층 좌우의 이론적 XY 적정값은 서로 일치하지 않는다.

또한 단층의 수직변위 및 경사,  $v_2/v_1$  등에 따라 파선이 변하게 되어 XY 적정값을 명확하게 정의하기 어려워진다. 따라서 Palmar (1980)가 XY 적정값보다 크게 택할 경우에 단층부근에서 속도분석 함수는 위로 블록해지고, 반대로 작게 택할 경우에 아래로 휘는 특성이 있다고 기술한 부분은 정확한 표현으로 받아들일 수 없고, 단지 속도분석 함수에 그러한 경향이 있음을 설명한 것으로 해석되어야 할 것이다.

### 5. 결론

수직변위가 있는 단층 주위에서 GRM 방법의 속도분석 함수가 XY값에 따라 형태가 변하는 특성을 컴퓨터 모델링을 통하여 분석한 결과, 시험범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 시간-깊이 함수는 XY 적정값을 사용한 경우에 단층부근 구조가 가장 뚜렷하게 나타나며, XY 값이 적정값보다 크거나 작은 경우에 완만하게 나타나는 양상을 보인다.
2. 속도분석 함수는 XY 적정값을 사용한 경우에 단층의 영향을 가장 적게 받으며, XY값이 적정한 값보다 큰 경우에 단층부근에서 위로 블록해지고, 반대로 작은 경우에 아래로 휘는 모습을 보인다.
3. 모델 계산을 통한 시간-깊이 및 속도분석 함수로부터 구한 XY 적정값은 이론적인 값인 임계거리보다 다소 크게 구해진다.
4. 속도분석 함수 차이는 XY값의 차이가 큰 경우에 최대치 진폭이 커지나 예리한 형태를 보이지 못하는 경향이 있으며, 이 최대치는 단층 위치로부터 수진기 간격 한 개 이내로 일치한다.
5. 속도분석 함수 차이를 수평 1차 미분하여 구한 구배변화 지시자의 최대값은 단층 위치로부터 수진기 간격 한 개 이상 벗어나지 않는 모습을 보이며, XY값의 차이가 큰 경우에 더욱 잘 일치하는 양상을 보인다.
6. 단층을 중심으로 굴절면이 위로 블록할수록 구배변화 지시자의 양의 최대 진폭이 커지며, 음의 최대 진폭은 그와 반대로 나타난다.
7. 경사를 한쪽 방향으로  $0^\circ - 20^\circ$  범위에서 시험한 결과, 경사가  $5^\circ$  이내의 경우에 단층 위치와 구배변화 지시자 최대치가 일치하며,  $5^\circ$  이상인

경우 약 1 m의 차이를 보인다. 구배변화 지시자의 최대치는 경사도에 따라 크게 변하지 않는 양상을 보이며, 경사가 클수록 구배변화 지시자가 오래 진동하는 특성을 보인다.

8.  $v_2/v_1$ 이 커질수록 구배변화 지시자의 최대치가 단층과 잘 일치하며, 작은 경우에는 최대치 진폭이 작고, 진동거리가 길어지며, 최대치 위치가 단층으로부터 벗어나는 경향을 보인다. 따라서  $v_2/v_1$ 가 상대적으로 크지 않은 경우, 몇몇 XY값들을 시험하여 가장 뚜렷한 양상을 보이는 값을 택할 필요가 있다.

9. 따라서 이 논문에서 정의한 구배변화 지시자는 탄성과 굴절파 자료를 이용하여 지표근처의 고경사 단층 위치 및 분포 상태를 파악하는데 효과적으로 사용될 수 있을 것이 기대된다.

### 사 사

이 연구는 한국과학재단에서 지원하는 '96 목적기초 연구과제(96-0703-05-04-3) 연구결과의 일부임을 밝히며, 강원대학교 자원개발연구소의 부분적 지원에 감사드립니다. 아울러 모델 계산시 2점 파선추적에 관해 여러모로 도움을 주신 경상대학교 김우한 교수님과 반복적인 컴퓨터작업과 자료 도시에 많은 도움을 준 강원대학교 우남철 석사에게 고마움을 표합니다.

### 참고문헌

- Burger, H.R., 1992, Exploration geophysics of the shallow subsurface, Prentice Hall, London.
- Červený, V., 1985, The application of ray tracing to numerical modeling of seismic wave fields in complex structure, Handbook of Geophysical Exploration, Section 1, v. 15A, Geophysical Press, London.
- Dobrin, M.B. and Savit, C.H., 1988, Introduction to geophysical prospecting, 4th ed., McGraw-Hill Book Co., New York.
- Gardner, L.W., 1939, An areal plan of mapping subsurface structure by refraction shooting, Geophysics, 4, 247-259.
- Hagedoorn, J.G., 1959, The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections, Geophysical Prospecting, 7, 158-182.
- Hawkins, L.V., 1961, The reciprocal method of routine shallow seismic refraction investigation, Geophysics,

26, 806-819.

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

---

1998년 10월 17일 원고접수

1999년 2월 26일 원고채택