

단층변위를 이용한 단층의 총 이동량 계산법

황 재 하

A New Method Calculating Total Slip of Fault with Fault Separation

Jae Ha Hwang

ABSTRACT : A new trigonometrical method for calculating total slip (T) of faulting is presented. The parameters for the calculation are used rake of fault striation, strike and dip of fault and of index planar structure such as bedding plane. The faults are grouped into three types. The direction of plunging of fault striation is out of a range $\pm 90^\circ$ to the bedding dip direction in 360° system, which is grouped into the type I. Meanwhile, the case of the direction lies in the above range can be separated into two different types, type II and type III, according to relative largeness of the angles rake of fault striation and i (see text). The type II has smaller rake than angle i and the type III has larger rake than angle i . Here I propose a few equations for calculating not only total slip (T) but strike slip (L) or dip slip (S) of the faulting. The equations are adapted selectively to the types of fault mentioned before. The limitation of the method is that the equations do not fit to polyphase faulting.

서 론

단층들의 이동량을 측정한다는 것은 특별한 대응점 (matching point)을 확인하지 못하는 대부분의 경우에 단순히 수직변위량 혹은 수평변위량을 추정하는데 그친다. 그러나 단층의 상반과 하반의 상대적인 이동량을 안다는 것은 그 단층의 운동성향 뿐 아니라, 조구조적 의미를 해석하는데도 중요한 도움을 줄 수 있다.

단층의 특성규명을 위하여 Angelier (1984), Costa *et al.* (1997)은 단층면의 경사각과 단층면상의 단층조선의 면선각 (rake)을 이용한 통계기하학적 연구를 수행한바 있다. Costa *et al.* (1997)은 여기서 얻어진 벡터 (vector) 비에 의해 총이동 (total slip)량을 계산하는 방법을 제시하였다. 그러나 일반적으로 단층의 이동량은 한쪽 팁 (tip)에서 다른쪽 팁에 이르기까지 모두 동일하게 나타나기 어렵기 때문에 (Cartwright and Mansfield, 1998) 이러한 통계적 처리 방법에는 적용성이 제한될 수 밖에 없다. 따라서 단층의 전체 연장 상에서 어떠한 측정지점에

서의 단층구조자료 (fault tectonic data)들이 전체단층을 대표할 수는 없으나 국부적 자료 (point data)로서의 정확도를 최대한 확보할 수 있다면, 이러한 신뢰도 높은 국부적 자료들의 종합으로 전체단층을 보다 정확하게 이해할 수 있을 것이다.

특정한 위치에 있어서 단층이 어떠한 이동량을 보이는가를 알기 위해서는 통계적인 방법이 아닌 다른 방법이 이용되어야 한다. 이 논문에서는 총리와 같은 기존의 면구조가 잘 발달하는 지역에서 이들의 기하학적 배열을 이용하여 총 이동량을 계산해 낼 수 있는 간편한 방법을 제시하고자 한다. 이 방법은 삼각도해법에 기초하여 주향변위량 (strike separation) 혹은 경사변위량 (dip separation)를 이용하였다.

원 리

단층의 상,하반의 상대적 이동 (slip)의 최대전단응력 방향을 단층면상에 투영시키면 이것은 단층조선의 형태로 단층면상에 나타난다고 할 때 이단층의 총 이동 벡터는 단층조선과 동일한 방향성을 가진다 (Bott, 1959; Angelier, 1984; Costa *et al.*, 1997). 노두상에 나타나는 단층의 정확한 총 이동 벡터 D는 알 수 없으나 Fig. 1과 같

* 한국자원연구소 (Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 30, Kajung-dong, Yusung-gu, Taejon 305-350, Korea), E-mail: hajh@kigam.re.kr.

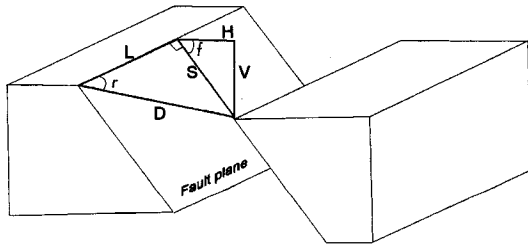


Fig 1. Relationship of slip components. D; net slip, L; strike slip, S; dip slip, H; horizontal slip, V; vertical slip, r; rake of the fault striation, f; dip angle of the fault.

이 주향이동 (strike slip) L, 경사이동 (dip slip) S, 수평이동 H, 수직이동 V 성분 벡터로 분리할 수 있다. 여기서 주향이동 벡터와 경사이동 벡터는 직각의 각관계에 있다. 따라서 주향이동 벡터의 크기 L과 경사이동 벡터의 크기 S는 각각 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$L = D \times \cos r \quad (1a)$$

$$S = D \times \sin r \quad (1b)$$

여기서 각 r은 단층조선의 면선각이다.

주향이동 벡터의 크기 L은 단층의 주향이동량으로, 경사이동 벡터의 크기 S는 경사이동량으로 표현될 수 있다. 단층의 총 이동량을 T라하면, 총 이동량은 단층의 주향이동량과 경사이동량의 합이다. 따라서 단층의 총 이동량 T는

$$T = L + S = D \times \cos r + D \times \sin r \quad (2)$$

로 표현될 수 있으며 총 이동량 T와 주향이동량 L의 비는 다음과 같다.

$$T : L = D \times \cos r + D \times \sin r : D \times \cos r \quad (3)$$

$$T = L(D \times \cos r + D \times \sin r) / (D \times \cos r) \quad (4)$$

여기서 D를 소거하면

$$T = L(\cos r + \sin r) / \cos r \quad (5)$$

단층의 면선각에 대한 단순화된 단층의 총 이동량과 주향이동량의 관계식이 얻어졌다. 같은 방법으로 총 이동량에 대한 경사이동량 S에 대한 관계식도 다음과 같이 얻어진다.

$$T = S(\cos r + \sin r) / \sin r \quad (6)$$

단층에서 주향이동량 L 혹은 경사이동량 S를 알면 식 (5) 혹은 (6)을 이용하여 총 이동량 T를 계산으로 구할

수 있다. 또한 역의 방법으로 주향이동량 혹은 경사이동량 가운데 하나만 알 수 있으면 다른 이동량도 쉽게 구할 수 있다.

주향변위 (strike separation)에 의한 주향이동 (lateral slip)L의 계산

수평면 상에서 단층에 의해 변위된 층리의 주향변위량을 측정할 수 있을 경우 노두상에서 관찰 가능한 것은 단층의 주향과 경사, 층리의 주향과 경사, 단층조선의 방향과 면선각 등이 될 것이다. 이들을 이용하여 단층의 총 이동량을 계산하기 위해서는 주향이동량을 먼저 계산하는 것이 필요하다. 이 경우 주향변위량을 측정할 수 있는 기준면 (index plane)은 층리 뿐 아니라 판상 맥암 등 어떠한 종류의 면구조의 변위에 의해서도 가능하다. 그러나 이 때에도 주향변위량은 면구조와 단층의 태위 및 단층조선의 선경사 (plunge) 방향에 따라 간섭당하여 나타난다. 따라서 우리는 각각의 경우를 따로따로 취급하여야 할 것이다.

단층은 단층면에 발달하는 단층조선의 선경사 방향과 기준면의 경사방향과의 상관관계에 따라 3가지 유형으로 구분할 수 있다. 첫번째 유형은 단층조선의 선경사 방향이 기준면의 경사방향과 상반된 방향성을 지시하는 경우이다. 즉 360° 범으로 측정되는 단층조선의 선경사 방향이 기준면의 경사방향에 90°의 범위밖에 있는 경우로 제1형 (Type I)으로 구분한다. 이와 다른 경우로 단층조선의 선경사 방향이 기준면의 경사방향에 90°의 범위안에 있는 때는 다시 단층조선의 면선각과 각 i (다음 단원에서 설명)와의 상관관계에 의하여 제2형 (Type II) 및 제3형 (Type III)으로 나뉘어진다. 제2형은 단층조선의 면선각의 크기가 각 i보다 작은 경우이며, 제3형은 단층조선의 면선각의 크기가 각 i보다 클 경우이다. 노두에서 제1형을 구분하는 것은 어렵지 않으나 제2, 3형의 구분은 불가능하다. 따라서 이러한 구분은 몇가지 계산법이 필요하고 이러한 계산은 PC를 이용하면 편리하게 이루어 질 수 있다.

본 연구에서는 각 수식을 유도하기 위하여 변위를 인식할 수 있는 기준 면구조로 편의상 층리면을 취한다.

층리면의 경사 방향 (dip direction)이 단층조선의 선경사 (plunge) 방향과 반대일 경우 (type I)

단층면 상에서 단층조선의 선경사 방향과 층리의 궤적 (trace)이 상반된 방향을 지시할 경우로 Fig. 2에서 L은 단층의 주향이동이며 K는 단층에 의해 변위된 층리의 주

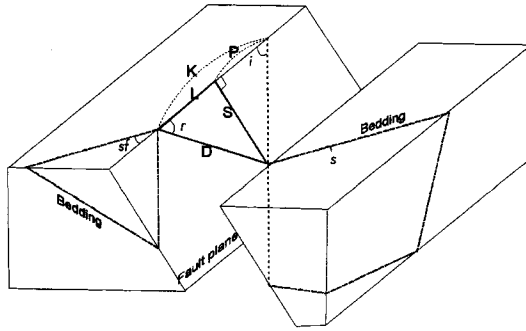


Fig. 2. Trigonometrical relationship of the type I for calculating with strike separation of the fault. D; net slip, L; strike slip, S; dip slip, K; strike separation, P=K-L. r; rake of the fault striation, f; dip angle of the fault, i; angle between the fault trace on the horizontal surface and the bedding trace on the fault plane, sf; angle between the fault trace and the bedding trace on the horizontal surface, s; dip angle of the bedding.

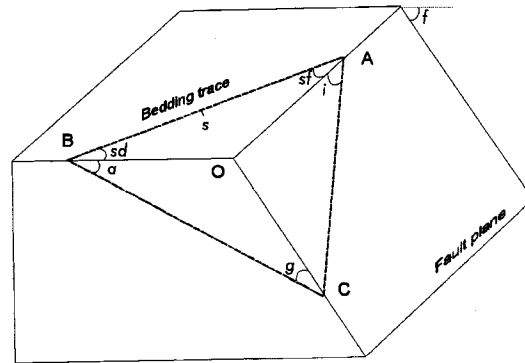


Fig. 3. Angular relationship between the fault plane and the bedding plane. sd; angle between bedding trace and dip direction of the fault on the horizontal surface. a; apparent dip angle of the bedding plane on the orthogonal plane to the fault, g; angle between fault trace and bedding trace on the vertical plane included dip direction of the fault. Other parameters are the same as those in Fig. 2.

향변위, 각 sf 는 수평면상에서 층리의 궤적과 단층의 궤적의 사이각, 각 f 는 단층면의 경사각, 각 s 는 층리면의 경사각이며 단층면 상에서 단층면에 나타나는 층리면의 궤적이 단층면의 수평적 (horizontal trace)과 이루는 교각을 i 라 할때

$$\begin{aligned} K &= L + P \\ \tan i &= S/P \quad S = P \times \tan i \\ \tan r &= S/L \\ \tan r &= P \times \tan i/L \quad P = K - L \text{ 이므로} \\ \tan r &= (K - L) \times \tan i/L \end{aligned}$$

따라서

$$L = K \times \tan i / (\tan r + \tan i) \quad (7)$$

이 식에서 주향이동량 L 의 값이 정의 되었다. 여기서 K , 각 f , 각 s 는 노두상에서 측정 가능하고 각 sf 는 계산 가능하다. 그러나 각 i 는 단층면 상에서 측정할 수도 있으나 일반적으로 어려우므로 다음과 같은 방법으로 구할 필요가 생긴다.

각 i 의 결정

단층의 궤적위의 임의의 지점 O 를 선정하고 수평면 상에서 층리의 궤적이 단층의 궤적과 만나는 지점을 A 로, O 에서 단층면 위로 경사방향 (dip direction)의 투영선과 층리 궤적이 만나는 지점을 C 라하자. 또 수평면상에서 단층의 궤적에 직각되며 점 O 에서 단층면의 경사방향에 반대되는 방향의 임의의 직선과 층리의 궤적이 만나는 지점을 B 라 하였을 때, 각 AOB , AOC 는 모두 직각이다 (Fig. 3).

각 a 는 단층의 경사방향을 포함하는 수직면에 대한 층리면의 위경사각 (apparent dip angle)이다. 각 g 는 단층의 경사방향을 포함하는 수직면상에서 층리면의 궤적과 단층면의 궤적이 만드는 교각으로 단층의 경사각 f 에서 각 a 를 제한 값과 동일한 값이 된다.

층리의 위경사각을 구하는 공식에 따라

$$\begin{aligned} \tan a &= \tan s \times \sin sd \\ sd &= 90 - sf \\ \tan a &= \tan s \times \sin (90 - sf) \\ \tan a &= \tan s \times \cos sf \end{aligned} \quad (8)$$

선분 AO 의 크기를 알 수 없으므로 단위값으로 취하면 \sin 법칙에 의하여

$$\begin{aligned} OB/\sin g &= OC/\sin a \\ OC &= (OB \times \sin a)/\sin g \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \tan sf &= OB/OA \\ OB &= OA \times \tan sf \end{aligned} \quad (10)$$

(10)을 (9)에 대입하면

$$OC = (OA \times \tan sf \times \sin a)/\sin g \quad (11)$$

또한

$$\tan i = OC/OA \quad (12)$$

이므로 (12)에 (11)를 대입하면

$$\begin{aligned} \tan i &= ((OA \times \tan sf \times \sin a)/\sin g)/OA \\ \tan i &= (\tan sf \times \sin a)/\sin g \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 각 i 는 $\tan i$ 를 전환 (inversion)시켜 얻을 수 있다. 또 각 a 는 식 (8)에서 탄젠트 (tangent)값을 전환시켜 얻을 수 있으나 각 g 는 알 수 없으므로 g 를 결정할 필요가 있다.

각 g 의 결정

선분 BC가 이루는 각은 각 a 와 동일하고, 이선분과 선분 OC가 이루는 각은 각 f 와 동일하다. 그러나 점 C는 선분 BC 상을 이동하며 이에 따라 각 g 도 변화하게 되므로 각 g 는 결국 단층면의 경사방향에 따라 달라지게 된다. 즉, 수직단층이나 단층면의 경사 방향과 층리면의 경사 방향과 동일하면

$$g=f-a \tag{14}$$

가 되며, 단층면의 경사 방향과 층리면의 경사 방향이 반대 방향일 경우는

$$g=180-(f+a) \tag{15}$$

가 된다.

따라서 식 (8)과 (14) 혹은 (15)에서 각 a 와 각 g 를 얻을 수 있고 이에 따라 각 i 도 식 (13)으로 정의 되었으므로 주향이동량 L 을 구하기 위한 식 (7)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$L=K \times \frac{(\tan sf \times \sin a) / \sin g}{(\tan r + \tan sf \times \sin a / \sin g)}$$

$$L=K \times \tan sf \times \sin a / (\tan r \times \sin g + \tan sf \times \sin a) \tag{16}$$

이 식 (16)에서 K 와 모든 각을 측정하거나 계산을 통하여 알 수 있으므로 주향이동 변위 L 을 구할 수 있고 그 값을 식 (5)에 적용하여 이 단층의 총 이동량 (T)와 경사이동량 S 를 모두 구할 수 있다.

층리면의 경사방향이 단층조선의 선경사 방향과 일치할 경우

단층면 상에서 단층조선의 선경사 방향과 층리의 궤적이 동일한 방향을 지시할 경우 수평면 상에서 주향변위 (strike separation)는 주향이동 (strike slip) 보다 작게 나타난다 (Fig. 4, 5). 따라서 주향변위가 항상 주향이동보다 크게 나타나는 식 (7)은 여기에 적용할 수 없다. 이 경우에도 단층조선의 면선각과 층리의 교선이 수평면과 이루는 각 i 의 크기에 따라 주향이동을 구하는 식이 달리 유도되어야 한다.

단층조선의 면선각이 단층면상의 층리의 교선과 단층

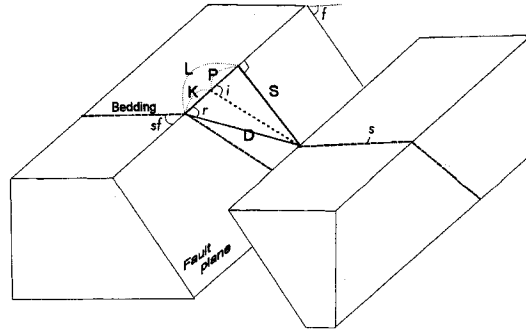


Fig. 4. Trigonometrical relationship of the type II for calculating with strike separation of the fault. $P=L-K$. Other parameters are the same as those in Fig. 2.

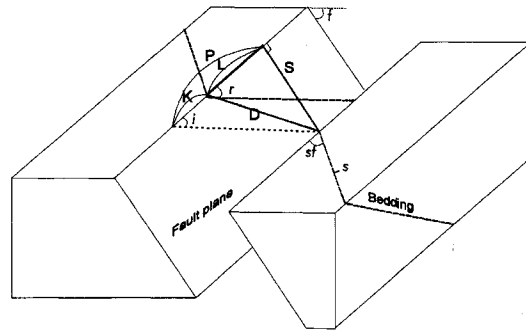


Fig. 5. Trigonometrical relationships of the type III for calculating with strike separation of the fault. $P=L+K$. Other parameters are the same as those in Fig. 2.

면상에서 수평면의 궤적이 이루는 각 i 보다 저각도일 경우 (type II)는 Fig. 4에서

$$L=K+P$$

$$\tan r=S/L$$

$$\tan i=S/P$$

$$S=P \times \tan i \text{ 이므로}$$

$$\tan r=P \times \tan i/L \quad P=L-K$$

$$=(L-K) \times \tan i/L$$

$$L \times \tan r=L \times \tan i - K \times \tan i \text{ 이므로}$$

$$L=K \times \tan i / (\tan i - \tan r) \text{ 이 성립하므로}$$

여기에 식 (13)을 대입하면 주향이동량을 결정하기 위한 다음과 같은 관계식이 얻어진다.

$$L=K \times \tan sf \times \sin a / (\tan sf \times \sin a - \tan r \times \sin g) \tag{17}$$

단층조선의 면선각이 단층면상의 층리의 교선과 수평면이 이루는 각 i 보다 고각도일 경우 (type III)는 Fig. 5에서

$$P=L+K$$

$$\begin{aligned} \tan r &= S/L \\ \tan i &= S/P \\ S &= P \times \tan i \text{ 이므로} \\ \tan r &= P \times \tan i / L \quad P \text{를 대치하면} \\ &= (L+K) \tan i / L \\ L \times \tan r &= L \times \tan i + K \times \tan i \text{ 이므로} \\ L &= K \times \tan i / (\tan r - \tan i) \text{가 성립한다.} \end{aligned}$$

여기에 식 (13)을 대입하면 또 하나의 주향이동량을 계산할 수 있는 관계식이 얻어진다.

$$L = K \times \tan sf \times \sin a / (\tan r \times \sin g - \tan sf \times \sin a) \quad (18)$$

이와 같은 식 (16) 및 (17), (18)을 각각의 유형에 따라 적용하여 얻어지는 주향이동량 L 값을 식 (5)에 적용하면 단층의 총 이동량과 경사이동량 S가 구하여 진다.

경사변위 (dip separation)에 의한 경사이동 (dip slip) S의 계산

주향변위를 이용하여 주향이동량을 계산하는 것과 동일한 방법으로 경사변위를 이용하여 경사이동량을 계산할 수 있다. 단층면과 교차되는 수직단면을 이루는 노두에는 수직방향의 단층면의 궤적이 나타난다. 층리 등과 같은 면구조들의 변위량이 이 단층면의 궤적 위에 나타나고 이것은 경사변위로 측정될 수 있다. 그러나 이 경우 경사변위는 단층의 운동 방향에 따라 달라진다. 단층의 운동 방향은 단층면에 단층조선의 형태로 나타나므로 경사변위는 단층조선의 선경사 방향과 층리의 경사 방향에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

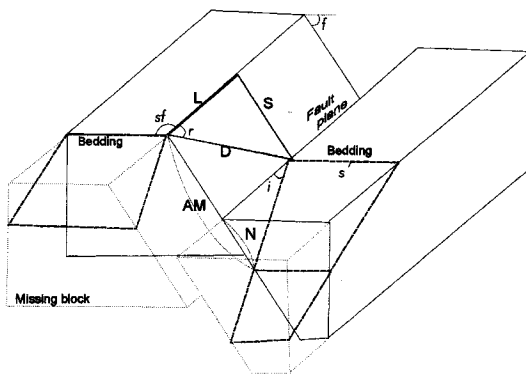


Fig. 6. Angular relationship among the fault plane, the bedding plane and vertical cutting plane orthogonal to the fault. AM; dip separation. N=AM-S. Other parameters are the same as those in Fig. 2.

층리의 경사 방향이 단층조선의 선경사 방향과 반대 일 경우 (type I)

단층면의 경사방향에 평행한 수직면으로 나타나는 노두가 있다고 하자. Fig. 6에서 노두에서 측정 가능한 경사변위를 AM이라하면, AM은 경사이동 S와 층리의 경사로 발생하는 변위량 N의 합이다.

$$\begin{aligned} N &= AM - S \\ \tan r &= S/L \\ \tan i &= N/L \\ L &= N / \tan i \text{ 이므로} \\ \tan r &= S / (N / \tan i) \\ &= S \times \tan i / N \\ N &= AM - S \text{ 이므로} \\ \tan r &= S \times \tan i / (AM - S) \end{aligned}$$

따라서 경사이동량 S는 다음과 같이 유도된다.

$$S = AM \times \tan r / (\tan r + \tan i) \quad (19)$$

여기서 tan i는 식 (13)에 의해 정의 되었으므로 이를 식 (19)에 대입하면

$$\begin{aligned} S &= AM \times \tan r / (\tan r + (\tan sf \times \sin a) / \sin g) \\ S &= AM \times \tan r \times \sin g / (\tan r \times \sin g + \tan sf \times \sin a) \quad (20) \end{aligned}$$

가 성립한다. 그러나 단층면의 경사방향에 평행한 수직면으로 나타나는 노두는 일반적인 경우가 아니므로 이 수직단면을 일반화할 필요가 있다. 이 경우 노두 상에서 측정될 수 있는 경사변위는 임의의 방향인 수직단면과 단층면과의 교선으로 단층의 정확한 경사변위가 될 수 없다.

여기서 노두상에서 측정될 수 있는 수직단면과 단층면의 교선이나 정확한 경사변위는 모두 동일한 단층면상에 있게 된다. Fig. 7a는 임의의 방향의 수직단면에 의해 절단된 단층면과 층리면과의 관계를 보여준다. 여기서 각 c는 수평면상에서 단층면의 궤적과 수직단면의 수평면 상의 궤적 사이의 교각이다. Fig. 7b에서 각 b는 임의의 수직단면과 단층면의 교선이 수평면 상의 단층의 궤적과 이루는 각이다. 선분 AB로 표시된 AM은 노두상에 나타나는 측정 가능한 정확하지 않은 경사변위이고, 선분 AO로 표시된 AN은 단층면 상에 나타나는 층리에 의한 실경사 변위 (real dip separation)이다.

각각의 각관계에서 r, i는 알 수 있으나 m, n, b는 계산되어야만 한다. 각 m은 단층면 상에서 임의의 수직단면이 단층면과 만드는 교선과 동일한 단층면 상에서 단층면과

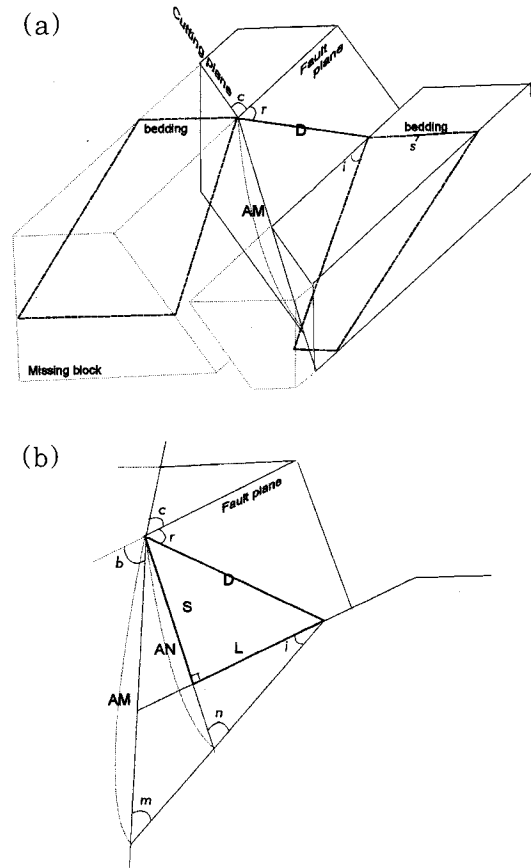


Fig. 7. Angular relationship among the fault plane, the bedding plane and an arbitrary vertical cutting plane of the fault type I (a). Parameters for calculating with dip separation of the fault (b). AM; apparent dip separation, AN; real dip separation, c; angle between fault trace and trace of the vertical cutting plane on the horizontal surface. Other parameters are the same as those in Fig. 2.

층리면의 교선이 이루는 각이다. 각 n 은 단층면상에 나타나는 단층면의 경사방향의 투영이 단층면과 층리면의 교선과 이루는 각이라 하자.

$$\begin{aligned} \text{각 } m &= 180 - (r+i+(90-r)+(90-b)) \\ \text{각 } n &= 180 - (r+i+(90-r)) \end{aligned}$$

따라서

$$\text{각 } m = b - i \tag{21}$$

$$\text{각 } n = 90 - i \tag{22}$$

여기서 각 b 가 각 i 에 비해 작을 경우 각 m 은 음의 값이 나오나 경사변위 AM은 음의 수가 될 수 없으므로 $b - i$

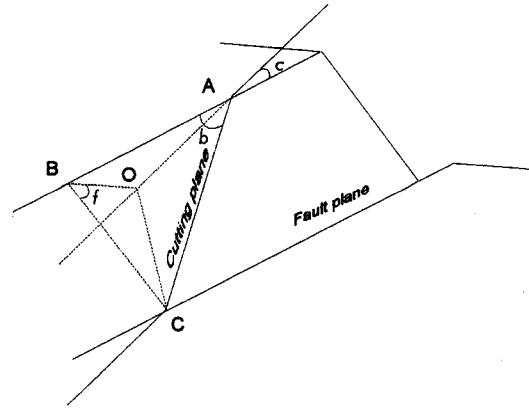


Fig. 8. Angular relationship of the angle b . b ; angle between the fault trace on the horizontal surface and a trace of arbitrary vertical cutting plane on the fault plane, c ; angle between fault trace and trace of the cutting plane on the horizontal surface, f ; dip angle of the fault.

값을 절대값으로 취한다.

즉

$$\text{각 } m = |b - i| \tag{23}$$

그런데 여기서 각 i 는 공식 (13)에 의해 구해지나 각 b 를 얻기 위해서는 다시 다음과 같은 방법이 필요하다. Fig. 8에서

$$\begin{aligned} \sin c &= OB/AB \\ \cos f &= OB/BC \end{aligned}$$

따라서

$$\begin{aligned} \sin c &= BC \times \cos f / AB \\ \tan b &= BC / AB \end{aligned}$$

따라서

$$\tan b = \sin c / \cos f \tag{24}$$

이제 $\tan b$ 를 전환하여 각 b 가 구해졌다. 그러면 실경사 변위 AN을 구하기 위하여서는 Fig. 7b에서 sin 법칙에 이용하면

$$\begin{aligned} AN / \sin (r+i) &= D / \sin n \\ D &= AN \times \sin n / \sin (r+i) \end{aligned} \tag{25}$$

$$\begin{aligned} AM / \sin (r+i) &= D / \sin m \\ D &= AM \times \sin m / \sin (r+i) \end{aligned} \tag{26}$$

(25)와 (26)에서

$$AN \times \sin n / \sin (r+i) = AM \times \sin m / \sin (r+i)$$

$$AN=AM \times \sin m / \sin n$$

여기에 (22)과 (23)을 대입하면

$$\begin{aligned} AN &= AM \times \sin |b-i| / \sin (90-i) \\ AN &= AM \times \sin |b-i| / \cos i \end{aligned} \quad (27)$$

이제 정확한 실경사변위가 얻어졌다. 이 실경사변위를 경사이동량 계산을 위한 식 (20)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻게된다.

$$\begin{aligned} S &= (AM \times \sin |b-i| / \cos i) \times \tan r \times \sin g / \\ & \quad (\tan r \times \sin g + \tan sf \times \sin a) \\ S &= AM \times \sin |b-i| \times \tan r \times \sin g / (\cos i \times \\ & \quad (\tan r \times \sin g + \tan sf \times \sin a)) \end{aligned} \quad (28)$$

여기서 AM과 단층면, 단층조선, 노두단면, 층리면 들의 태위가 노두 상에서 확인 된다면 단층의 경사이동량 S를 구할 수 있으므로 총 이동량 T 및 주향이동량 L을 구할 수 있게 된다.

층리면의 경사 방향과 단층조선의 선경사 방향이 일치할 경우

단층면 상에서 단층조선의 선경사 방향과 층리의 궤적이 동일한 방향을 지시할 경우는 동일한 방향의 경우에서 유도된 식 (28)을 사용할 수 없다. 따라서 경사변위가 단층조선의 면선각의 크기와 층리의 경사에 따른 각 i의 크기에 따라 달라지므로 각각의 경우를 분리하여 유도한다.

단층조선의 면선각이 단층면상의 층리 궤적이 수평면과 이루는 각 i 보다 저각도일 경우 (type II) 같은 방법으

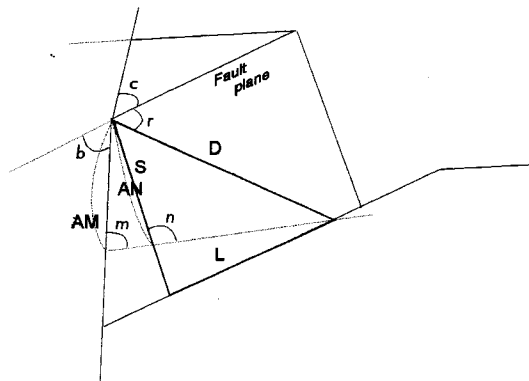


Fig. 9. Trigonometrical relationship of the type II for calculating with dip separation of the fault. AM; apparent dip separation, AN; real dip separation, c; angle between fault trace and trace of arbitrary vertical cutting plane on the horizontal surface. Other parameters are the same as those in Fig. 2.

로 식을 유도할 수 있다. 실경사변위와 노두에서 볼 수 있는 경사변위의 관계는 Fig. 9에서

$$\begin{aligned} m &= 180 - (180 - b - r) - (r - i) = b + i \\ n &= 180 - (90 - r) - (r - i) = 90 + i \end{aligned}$$

식 (25)와 같은 방법으로 sin 법칙에 따라 식을 유도하면

$$AN=AM \times \sin (b+i) / \sin (90+i)$$

가 된다. 따라서 경사이동량은 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} S &= AM \times \sin (b+i) \times \tan r \times \sin g / (\sin (90+i) \times \\ & \quad (\tan sf \times \sin a - \tan r \times \sin g)) \end{aligned} \quad (29)$$

단층조선의 면선각이 단층면상의 층리 궤적이 수평면과 이루는 각 i 보다 고각도일 경우 (type III) 같은 방법으로 유도하면 경사이동량 S는 다음과 같은 식으로 나타난다.

$$\begin{aligned} S &= AM \times \sin (b+i) \times \tan r \times \sin g / (\sin (90+i) \times \\ & \quad (\tan r \times \sin g - \tan sf \times \sin a)) \end{aligned} \quad (30)$$

노두상에서 단층면과 층리면의 상호관계를 알고 각각의 경우에 따라 식 (29), (30)을 이용하여 야외에서 관찰할 수 있는 AM과 단층면과 단층조선, 노두단면, 층리면 들의 태위 등으로 경사이동량 S를 구하고 총 이동량 T를 구할 수 있다.

응 용

이러한 방법으로 야외에서 측정 가능한 지질구조 요소들을 이용하여 단층의 특정지점에서의 총 이동량을 산정할 수 있으며 단층의 연장 방향에 따른 각 지점의 총이동을 복원할 수 있다. 이 방법을 울산시 남부지역에서 관찰되는 소단층군들에 적용하여 각각의 총이동, 경사이동, 주향이동량을 계산하여 보았다. Table 1은 각지점의 구조요소들의 측정치, 매개변수들과 복원된 이동량을 보여준다.

Table 1에서 주향, 경사가 022 77W인 단층과 152 57W의 단층들은 각각 주향이동단층과 정단층의 형태를 보여주고 있으나 층리의 경사방향과 단층조선의 선경사 방향이 상반된 방향을 지시하고 있어 이들은 같이 type I에 해당한다. 여기서는 경사변위를 알고 있으므로 type I의 식 (28)를 이용하여 총 이동량을 얻을 수 있다. 계산 결과 022 77W의 단층은 단층조선의 선경사각이 15°를 보이고 있으므로 주향이동량이 총이동량의 80%에 달하고 있으며, 노두에서 위경사변위가 30 cm를 보이므로 (Fig. 10) 주향이동량은 약 80 cm에 이르는 것으로

Table 1. An example of the total slip calculated with dip separation of the fault. Apparent strike separations are possible distance calculated with strike slip of each fault.

Strike & dip of fault and rake of fault striation	Strike & dip of bedding	Apparent dip separation (AM: cm)	Direction of cutting	sf	c	a	b
022/77W/15S	170/09E	30	102	32	80	7.65	77.13
152/57W/88N	050/18S	15	060	78	88	3.86	61.41
115/80S/01E	040/22E	210	020	75	85	5.96	80.11
095/82N/21W	090/26N	12	010	5	85	25.91	82.04

Strike & dip of fault and rake of fault striation	g	i	Strike slip (cm)	Dip slip (cm)	Total slip (cm)	Estimated apparent strike separation (K cm)	Type
022/77W/15S	95.35	4.77	81.45	21.83	103.28	342.85	I
152/57W/88N	119.13	19.95	0.36	10.33	10.69	28.79	I
115/80S/01E	74.03	21.98	573.27	10.00	583.28	548.56	II
095/82N/21W	56.08	2.63	35.41	13.59	49.00	238.89	III



Fig. 10. A fault corresponds to the type I. AM; apparent dip separation.



Fig. 11. A fault corresponds to the type III. AM; apparent dip separation.

나타난다. 이에 반해 152 57W의 단층은 선경사각이 88°를 보임에 따라 주향이동량이 총이동량의 1%에 불과한 값을 보인다.

주향, 경사가 115 80S인 단층과 095 82N 단층은 모두 주향이동단층들로 층리의 경사방향이 단층조선의 선경사방향과 일치하는 경우이다. 그러나 이들 가운데 115 80S의 단층은 단층조선의 면선각이 각 i 보다 작아 이들은 type II의 경우가 되며 여기서는 type II의 식 (29)를 이용하여 총 이동량이 계산되었다. 이단층은 노두에서 약 210 m의 위경사변위를 보이고 있어 계산에서 총 이동량은 약 605 m에 이르는 것으로 나타나며 경사이동량은 약 10 cm에 불과하다. 이렇게 위경사변위에 비해 극히 작은 경사이동량은 주향, 경사가 040 22E의 태위를 보이는 층리와 단층면의 간섭현상에 따른것이다. 한편 095 82N 단

층 (Fig. 11)은 type III의 경우로 식 (30)을 적용하여 총 이동량을 구할 수 있다.

적용조건

일정한 방향을 가지는 기존 단열면상에서 발달하는 단층운동의 최대전단응력은 주어진 면상에서 모든 방향으로 배치될 수 있다 (Bott, 1959). 또 최대전단응력방향은 단층조선의 형태로 단층면상에 투영 되므로 선행단층 (inherited fault)의 단층조선은 그보다 전기의 단층조선과 상관관계를 가지지 않는다. 즉 어떠한 단층면에 또다시 후기 단층운동이 일어나면 그 단층운동이 정확하게 동일하지 않을 경우 단층면상에는 앞의 단층운동에 따른 단층조선이 후기의 단층조선과 공존하던가 혹은 전기의 것

이 삭제되고 후기의 단층조선만 인지된다. 이러한 경우 단층면을 경계로하는 단층 상, 하반의 변위는 두번의 단층운동에 의해 발생한 변위의 총량이 된다. 이와 같이 두번 이상의 단층운동을 한 복합단층 (Polyphase fault)의 경우는 현재 인지되는 단층 상, 하반의 변위량과 단층면 상에서 인지되는 단층조선이 뜻하는 단층 변위량과 일치할 수 없다. 따라서 이 경우 단층면상에 나타나는 단층조선에 의해 전술한 방법으로 계산된 총 이동량은 정확한 값이 되지 못한다.

여기서 제의된 각각의 계산식에 따른 단층의 이동량 계산은 여러 가지의 매개변수를 이용하고 여러번의 부속식들을 이용하여야 하므로 실제 적용에서는 PC 등을 이용하는 것이 편리하며 필요한 경우 필자에게 준비되어 있으므로 제공받을 수 있다.

사 사

이 연구에서 수학적 도움을 주신 백대현 선생과 이대하 박사께 그리고 또 많은 의견을 제시하여주신 최범영박사와 이사로씨에게도 감사드립니다.

참고문헌

Angelier J. (1984) Tectonic analysis of fault slip data sets. *Jour. Geophys. Res.*, v. 89, p. 5835-5848.
 Bott M. H. P. (1959) The mechanics of oblique slip faulting. *Geol. Magaz.*, v. 96, p. 110-117.
 Cartwright J.H. and Mansfield C.S. (1998) Lateral displacement variation and lateral tip geometry of normal faults in the Canyonlands National Park, Utah, *Jour. Struc. Geol.*, v. 20, 3-19.
 Costa C.H., Cesco J.C. and Moran R.J. (1997) A simple graphical method for estimating the components of the fault-slip vector. *Jour. Struc. Geol.*, v. 19, p. 1245-1247.

부호의 정의

- AM : 수직노두에서 측정 가능한 경사이동변위
- AN : 실경사변위 (real dip separation)
- T : 총 이동량 (total slip)
- L : 주향이동량 (strike slip)
- K : 단층에 의해 변위된 층리의 주향변위 (strike separation)
- N : 단층면에서 층리의 경사로 발생하는 변위량
- S : 경사이동량 (dip slip)
- <a : 단층의 경사방향 (dip direction)을 포함하는 수직면에 대한 층리면의 위경사각 (apparent dip angle)
- <b : 임의의 수직단면과 단층면의 교선 (intersection)이 수평면 상의 단층의 궤적 (trace)과 이루는 각
- <c : 수평면상에서 단층면의 궤적과 수직단면의 궤적 사이의 교각
- <f : 단층면의 경사각
- <g : $f - a$
- <i : 단층면 상에서 단층면과 층리면의 교선이 단층면과 수평면이 이루는 교선이 만드는 사이각
- <m : 단층면 상에서 임의의 수직단면이 단층면과 만드는 교선과 단층면과 층리면의 교선이 이루는 각
- <n : 단층면상에 나타나는 단층의 경사방향의 투영 (projection)이 단층면과 층리면의 교선과 이루는 각
- <r : 단층조선의 면선각 (rake)
- <s : 층리의 경사각
- <sd : 단층의 경사방향을 포함하는 수직면의 수평면상의 궤적과 수평면에서 층리의 궤적이 만드는 교각, $90 - \sigma$ 가 된다.
- <sf : 수평면상에서 층리의 궤적과 단층의 궤적의 사이각

1998년 5월 8일 원고접수, 1998년 10월 9일 게재승인.