

양산단층의 구조적 특성과 운동학적 고찰

Structural Characteristics and Kinematic Analysis of the Yangsan Fault

장 천 중(Chun-Joong Chang)

한전 전력연구원

장 태 우(Tae Woo Chang)

경북대학교 지질학과

요약

지금까지 양산단층에 대한 운동학적 해석은 단지 지질분포 특성의 차이를 근거로 단순 우수주향이동으로 해석해왔다. 그러나 일반적으로 대규모 단층들은 단계적으로 서로 다른 운동체계에서 복합적인 발달과정을 거치면서 현재의 모습으로 보인다. 따라서 양산단층의 주변 지질구조와 운동학적 관계를 알아보기 위하여 양산단층 주변의 지질분포, 지질구조, 단층 주변의 소단층들에 대한 특성을 분석하였다. 양산단층 주변 퇴적암의 층리면 자세는 양산단층이 동일한 사건의 주향이동으로 형성된 단층에인의 특성이 아니라 서로 다른 응력축의 지배를 받았거나 서로 다른 크기의 운동을 받았음을 암시하고 있다. 또한 단층의 주향을 따라 단층대 폭의 변화를 살펴본 결과 크게 5개의 주기를 가지면서 변화되고 각각의 주기는 약 25-30 km 로 규칙적으로 나타난다. 또한 단층조선이 발달된 소단층의 분석결과들은 양산단층이 한번의 운동으로 발달한 것이 아니라 매우 복잡하고 다양한 사건들을 겪은 다중 변형의 산물임을 지시하고 있다.

서론

양산단층은 자인단층, 밀양단층, 모량단층, 동래단층 등과 평행한 조를 이루며 한반도 동남부에서 가장 뚜렷하고 긴 단층으로써, 육지에서는 낙동강 하구에서 북으로 양산, 경주를 거쳐 영덕에 이르기까지 150 km 이상에 이르고 남으로는 남해바다 속으로 약 200 km 이상의 연장성을 갖는 대단층으로 발달하고 있다 (Fig. 1). 이 단층에 대한 연구는 1920년대 일본인 지질학자들이 지질조사를 시작하면서 그 윤곽을 추정하였으나 구체적인 연구결과를 제시하지 못하였고, 1960년대부터 이 단층을 따라서 지질도폭 조사가 실시되면서 점차 그 실체가 드러나기 시작하였다. 이들 연구의 대부분은 양산단층에 대한 구조지질학적 연구 결과라기 보다는 평면 상에서의 지질분포가 양산단층을 중심으로 동측과 서측에서 많이 다르다는 점을 발견하고 양산단층이 단순 (monophase)하게 우수주향이동만을 겪은 대규모 구조선으로 기술하고 있다. 그 후 한반도 동남부 지구조 연구, 동해의 확장과 일본열도의 회전이라

는 동아시아 지구조 연구의 활성화와 함께 동해의 연변부 한반도 동남부에 위치하고 있고 단순 우수주향이동이라고 언급된 양산단층의 운동체계는 동해의 확장과 일본열도의 회전을 설명하려는 연구자들에게 매우 중요한 도구가 되었다 (Lallemant and Jolivet, 1986; Jolivet

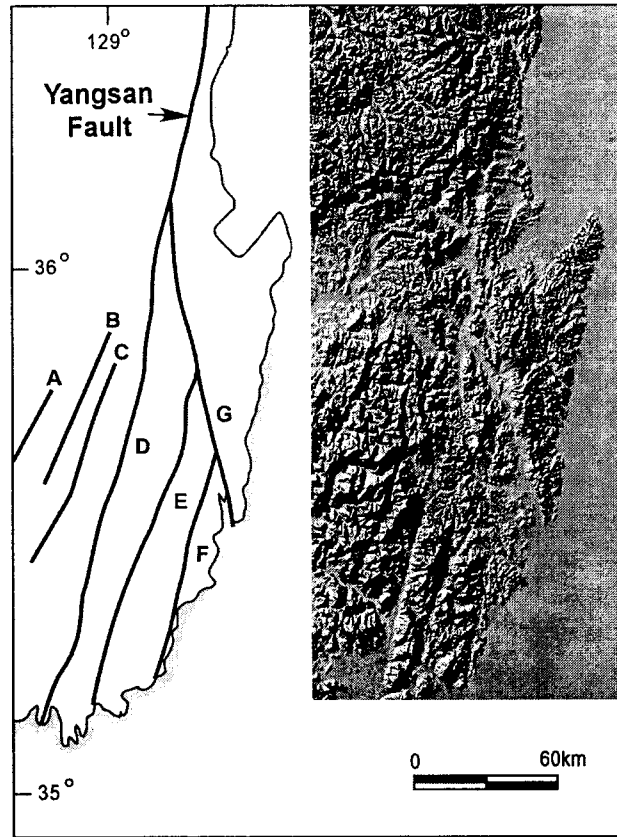


Fig. 1. Yangsan fault system shown on the shaded relief map of southeastern part of the Korean peninsula. A, Jain fault; B, Milyang fault; C, Moryang fault; D, Yangsan fault; E, Dongrae fault; F, Ilgwang fault; G, Ulsan fault.

et al., 1991). 이와 같이 양산단층에 대한 세분된 운동특성의 해석 없이 일관되게 우수주향이동이라는 하나의 단층운동으로만 강조되어 여러 논문에서 인용되게 된 것이다.

본 연구에서는 양산단층의 운동학적 특성을 파악하고자 양산단층 주변의 지질분포, 층리면의 자세, 양산단층 주변 소단층들의 기하특성과 단층대 폭의 변화 양상 등을 조사함과 동시에 주변 소단층의 단층이동자료를 이용하여 양산단층 운동과 연관된 구조적 특성들을 살펴보았다.

층리면의 자세 분석

양산단층을 중심으로 경상분지 지역에는 백악기 경상누층군의 퇴적암류와 화산암류들이

광범위하게 분포하고 있다. 남부의 언양 서측 지역은 안산암류와 불국사화강암류가 분포하고 동측 언양-울산지역은 하양층군의 백악기 퇴적암류가 분포하고 있다. 북부지역은 반대로 단층 서측은 백악기 하양층군의 퇴적암류가 분포하고 동측은 불국사화강암류 및 제3기의 퇴적암류가 주로 분포하고 있다 (Fig. 2). 이와 같이 양산단층을 경계로 양쪽의 지질분포가 뚜렷한 차이를 보임에 따라 양 지역 퇴적암의 평면적인 지질분포의 차이를 근거로 양산단층으로 절단된 양 지괴의 엇갈린 지질분포를 원상 복귀시켜 그 거리를 환산함으로써 과거부터 이 양산단층이 25 km (엄상호 외, 1983) 혹은 35 km (장기홍, 1990) 의 변위를 가진 단순 우수주향이동한 것으로 해석하여 왔다.

연구지역의 퇴적암류에서 측정된 층리면의 자세는 양 지역 모두 완만한 습곡을 이루는데, 층리면의 경사가 전반적으로 10° ~ 30° 내외의 저각이고 뚜렷한 파이원(π -circle)을 나타내지는 않는다. 다만 층리면 자료에 의한 파이축(π -axis)은 북부지역에서는 10° N88 $^{\circ}$ W (Fig. 2a), 남부지역은 9° S68 $^{\circ}$ W (Fig. 2b)로 습곡축의 경사는 10° 내외로 저각이며 그 방향은 각각 서쪽과 남서쪽 방향이다. 즉, 연구지역의 중앙부를 중심으로 북부지역의 퇴적암류는 서쪽 방향으로 남부지역의 퇴적암류는 남서쪽으로 서로 다른 방향으로 기울어진 완만한 습곡을 보임으로써 과거에 부분적으로 언급되었던 양산단층의 동일한 사건의 주향이동으로 형성된 단층작용 수반 습곡은 아닌 것으로 판단되며 양 지역이 서로 다른 사건의 응력축의 지배를 받았거나 서로 다른 크기의 운동을 받았음을 암시하고 있다. 이는 전체 단층이 동시기에 동일한 응력장에 의한 운동으로 변형을 받았다고 가정하면 이론적으로 단층대 내의 소규모 습곡과 주변의 단층작용에 수반한 퇴적암의 층리면들의 습곡축들은 중간 주응력축의 방향 (B-axis)과 같은 방향의 파이축을 보여야할 것이다.

단층운동과 층리면 교란의 전체적인 형태가 어떤 관계를 가지는가를 좀더 세밀히 파악하기 위하여 양산단층에 의한 양쪽 지괴의 층리면에 대한 야외 조사와 더불어 성형선 (form line)을 작성하여 검토하여 보았다 (장천중, 2001). 양산단층 서측 경주-안강 지역에 N-S 방향으로 약간 신장된 모양을 보이는 돛구조를 보이는데, 돛구조의 중심에 있는 관입 화성암 근처의 퇴적암에서는 층리면이 비교적 고각 (30° ~ 40°)이고 관입암에서 멀어질수록 층리면의 경사가 조금씩 작아짐 (15° ~ 25°)으로써 그 영향을 생각할 수 있고, 다음으로 N-S 방향의 신장된 돛구조는 단층운동에 의해 지배받을 수도 있다. 양산단층 동측부인 경주-언양-울산 지역의 퇴적층이 나타내는 돛구조를 살펴보면 최북단부인 경주시 내남면 이전리 틈수골-백양골못 지역은 습곡의 향사구조가 뚜렷하게 나타난다. 이 향사구조의 축의 선주향 (trend)은 S85 $^{\circ}$ E이고 선경사 (plunge)는 3° 이다. 이 향사구조는 단층의 중지부분 즉, 양산단층의 분절된 지역으로 압축응력의 산물로 추정될 수 있을 것이다. 본 역에서 이러한 분절된 증거로는 단층의 폭이 현저하게 좁아지는 것으로 고려될 수 있으며 이는 양산단층의 운동이 한번의 운동이 아닌 복합적인 운동사를 가진 단층임을 지시하는 좋은 증거가 될 수 있을 것이다. 다음으로 보다 남쪽인 울주군 두동면 월평리와 구미리의 구삼다리못-뒷골지 지역은 습곡의

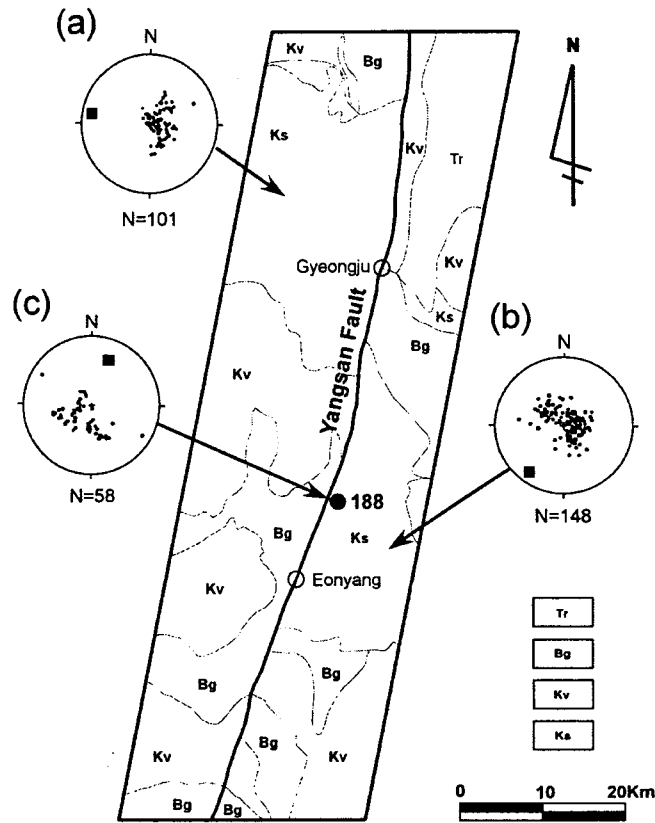


Fig. 2. Orientation of the bedding plane in the sedimentary rocks of the study area. Three stereonet diagrams represent poles to bedding in (a) northwestern and (b) southeastern areas, and (c) location No. 188. Solid square marks are π -axes of bedding poles in lower hemisphere. Ks: Hayang Group; Kv, Yucheon Group; Bg: Bulguksa granitic rocks; Tr, Tertiary Formations.

배사축이 뚜렷하다. 이 지역의 습곡축의 선주향은 NS방향이고 선경사는 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 이다. 이는 이 지역의 단층의 선주향이 $N15^{\circ}\sim 25^{\circ}E$ 이며 습곡축의 선주향과 비교했을 때 우수주향이동의 좋은 증거가 된다. 울주군 삼동면 둔기리 중리-산티고개 지역의 돛구조는 배사구조를 보인다. 이 지역의 습곡축은 선주향은 $S25^{\circ}\sim 30^{\circ}W$ 이고 선경사는 $6^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 이다. 이는 본 지역 단층의 선주향이 $N20^{\circ}\sim 25^{\circ}E$ 인 것과 비교했을 때 거의 비슷하게 놓여있으므로 충분히 설명하기 어렵지만 이 지역의 동측에 위치하고 있는 동래단층이 양산단층과 평행하게 발달하고 있는 점으로 보아 이러한 선주향을 갖는 배사구조는 여러 단층들에 의한 복합적인 산물이라고 볼 수 있을 것이다. 이와 같이 양산단층 주변의 서로 상이한 층리면의 자세는 양산단층이 서로 다른 시기에 서로 다른 응력체계를 가진 지질사건에 의하여 다중변형을 받았음을 암시하고 있다.

단층대 폭의 변화

단층대 물질은 그 자체가 단층운동에 의한 변형의 산물로써 단층대폭은 단층작용으로 인한 변형사를 내포하고 있다고 할 수 있다. 양산단층의 단층대에 대해서는 많은 부분이 고속도로와 단층계곡으로 덮여 있기 때문에 단층대의 폭을 정확하게 측정하기가 쉽지 않다. 지구물리탐사에 의한 단층대의 파쇄정도 및 변화에 대해서 일부 연구결과가 있었는데 단면에서 보면 일부 지역에서 중심부로 가면서 파쇄정도가 증가하고 주향방향을 따라서는 국지적으로 폭의 변화를 설명하고 있다 (김영화, 1987).

단층암의 파쇄정도에 따른 단층대 폭의 크기는 분절된 단층구조에서 여러 번의 단층작용을 받은 종합적인 변형 산물로 나타난다. 일반적으로 대규모 단층에서 단층의 길이-변위량 혹은 단층대의 폭-변위량 등과 같이 단층요소들은 경험적으로 선형적인 관계가 있다는 사실이 알려졌고 (Hull, 1989; Evans, 1990; Wells and Coppersmith, 1994), 이러한 사실은 단층대 폭의 변화는 단층의 성장과 단층의 운동특성을 해석하는데 중요한 단서가 될 수 있다는 것을 의미한다.

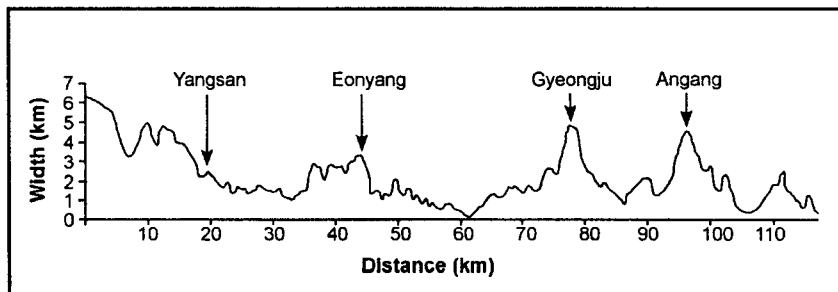


Fig. 3. The diagram showing the cyclic variation of width of the Yangsan fault. The length of cyclic variation is about 25~30km.

이러한 관점에서 지형적으로 단층계곡과 주변 산지의 급격한 지형변화를 보이는 경계부를 설정하고 야외 노두에서 지시하는 단층암의 산출상태를 근거로 양산단층을 따라서 남쪽의 양산시에서 북쪽으로 경북 포항시 신평면까지 지형적 및 지질학적 특징을 근거로 그 폭의 변화를 살펴보았다 (Fig. 3). 그림에서 보는 바와 같이 주기적인 단층대 폭의 변화를 관찰할 수가 있는데 크게 5개의 주기로써 각각의 주기는 약 25-30 km 정도로 규칙적으로 나타나며 전반적으로 남쪽지역이 비교적 더 넓은 폭을 보여준다. 특히 부산에서 약 60 km지점인 울주군 두동면 봉계리 부근에서 단층대의 폭이 아주 좁게 나타나는데, 이 지역은 특히 지질분포가 교차하고 주단층의 주향이 갑자기 변화되는 지역이기도 하다 (장태우 외, 1993).

양산단층 주변 소단층의 기하분석

큰 규모의 단층에 대한 운동을 해석하기 위해서는 주단층의 운동학적 경향이 기록된 주변 지역의 소단층의 자료를 이용하여 운동특성을 파악하는 것이 유용한데 이를 위하여 주향을 따라 단층조선이 발달된 1,300여개의 소단층 자료를 측정하였다. 이들의 주향 분포는 NS 및 NNE 방향과 NNW 방향이 뚜렷한 편이며 전반적으로 고각의 경사와 저각의 선주각 (rake) 을 보인다 (Fig. 4). 또한 개개 단층들에 대한 경사각과 선주각의 관계를 살펴보면 경사는 50° 이상의 고경사를 보이며 선주각은 40° 이하의 저각으로 주향이동성의 특징들이 잘 보인다. 좀 더 세밀히 통계적으로 살펴보면 소단층들의 주된 주향인 NS 및 NNE 방향과 NNW 방향 계열의 방향성이 전체자료의 약 70% (893개)에 이른다. 소단층의 경사는 79% (993개)가

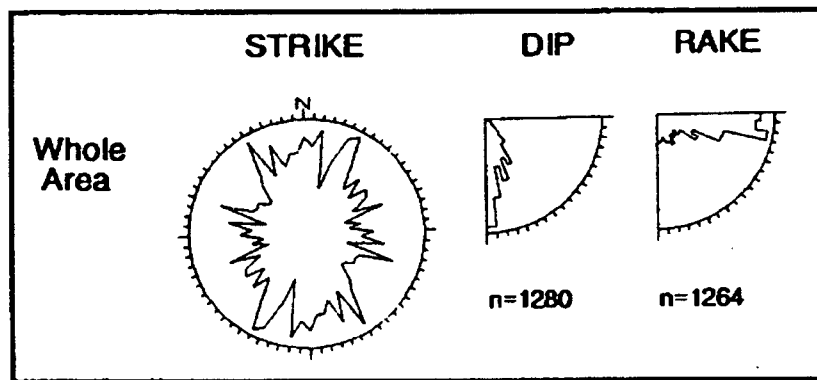


Fig. 4. Distribution of strikes, dips and rakes of the fault slip data measured in the study area.

60° 이상의 고각도 경사를 보이며 단층조선의 선주각은 62% (785개)가 30° 이하로 나타나고 있다. 또한 소단층의 경사와 선주각의 분포에서 단층의 경사는 대부분이 60° 이상의 고각도를 보이며, 선주각은 전반적으로 20° 이하를 보인다. 특히 주향이동성 운동의 특징을 잘 나타내는 75° 이상의 고각도 경사를 가지는 594개의 단층들만을 가지고 분석한 결과 20° 이하의 선주각을 보이는 것이 매우 뚜렷하게 우세함을 보여준다. 따라서, 양산단층의 운동영향 범위 내의 소단층들의 기하분석 결과는 양산단층이 고각도의 경사를 가지면서 주향이동성 운동이 주도했음을 의미한다.

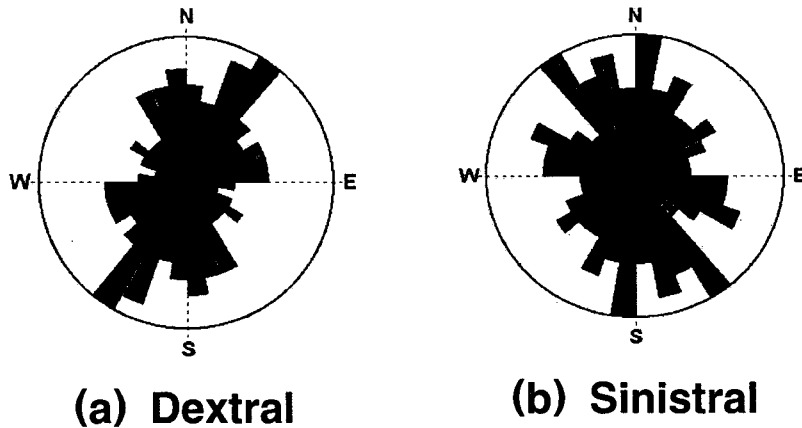


Fig. 5. Rose diagrams of the small faults depending on shear sense along the strike of the Yangsan fault in the study area. (a) Dextral small faults, (b) Sinistral small faults.

앞에서 설명한 소단층의 자료들은 연구지역 전반에 대한 자료들이다. 이들은 양산단층의 운동을 주로 지배했던 특성에 대한 설명이 가능하나 그 자료들은 개개 소단층들의 운동감각의 개념이 포함되지 않은 것으로 이것으로만 단층의 운동특성을 설명하기가 충분치 못하다. 이에 따라 소단층들의 방향성을 운동감각에 따라 구분하고 저각도의 선주각을 보이는 것들만으로 우수운동을 보이는 소단층들과 좌수운동을 보이는 단층들을 분리하여 살펴보았다 (Fig. 5). 즉 특정 운동성향을 보이는 자료들만을 두고 볼 때 우세 방향성들이 나타나면 이들을 근거로 모아-쿨롬 (Mohr-Coulomb)의 단층이론 개념을 적용하여 간편한 방법으로 최대 주응력축의 방향을 추정할 수 있을 것이며, 이들로부터 양산단층의 운동특성을 간접적으로 유추할 수 있을 것이다. 연구지역 전반에 대한 우수이동의 소단층들 집합의 방향성은 $N30^{\circ}E$, $N10^{\circ}W$, $N70^{\circ}E$ 로 크게 3방향의 우세한 방향성을 보이며 (Fig. 5a), 좌수이동의 소단층 집합의 방향성은 $N30^{\circ}W$, $N10^{\circ}E$, $N70^{\circ}W$ 의 우세한 방향성을 보인다 (Fig. 5b). 이들 운동감각에 따른 단층주향의 방향성들을 근거로 양산단층의 운동특성을 파악한다는 것은 이들 자료들이 서로 다른 응력장의 다중변형작용에 따른 여러 사건을 겪은 소단층들이 혼재되어 있을 수 있고, 주단층의 위치에 따른 지역적인 고려함이 없이 분석했을 뿐 아니라 주향이동 단층 혹은 경사단층을 구분하기 위한 단층조선의 선주각에 대한 세밀한 고려 없이 분석한 결과이기 때문에 이들 자료들만으로 양산단층의 운동특성을 엄밀하게 설명하기는 쉽지 않다. 다만 각각의 운동감각을 고려하여 일반적인 단층이론으로 살펴보면 우수이동의 자료들은 (1) ENE-WSW 압축 혹은 SSE-NNW 신장, (2) NNE-SSW 압축 혹은 ESE-WNW 신장, (3) ESE-WNW 압축 혹은 NNE-SSW 신장을 지시하는 응력장을 고려할 수 있고, 좌수이동의 자료들은 (1) WNW-ESE 압축 혹은 NNE-SSW 신장, (2) NNW-SSE 압축 혹은 ENE-WSW 신장, (3) E-W 압축 혹은 N-S 신장을 지시하는 응력장에 의한 것으로 추정할 수 있을 것이다. 이러한 결과는 소단층들의 기하 특성만으로 양산단층의 운동특성을 충분히 해석하기는 불충분하지만 이들 소단층들의 운동을 포함하고 있는 양산단층이 매우 복잡

하고 다양한 사건들의 산물임을 지시하기에는 충분하다고 생각된다.

결론

양산단층의 운동에 대해서는 과거부터 여러 가지 의견이 있었다. 본 연구에서는 양산단층의 운동을 유발한 단층 주변의 여러 가지 지질구조 요소들을 측정하여 단층운동의 특성을 살펴보았다. 양산단층을 포함한 경상분지 내의 선상구조 분석 결과들은 양산단층을 포함한 같은 방향성을 보인 유사한 단층들이 매우 연장이 긴 대단층으로 뚜렷한 양상을 보인다. 이 단층을 따라 양측지괴의 퇴적암에서 보여주는 층리면의 교란은 양산단층이 다양한 사건 및 조건에서 운동하였음을 의미하고 있다. 또한 단층대 폭의 분석결과는 전반적으로 연구지역 남쪽이 북쪽에 비하여 큰 폭의 단층대를 이루고 단층대 폭의 변화는 연구지역 중앙부에서 매우 좁은 경향을 보이며 주기는 25~30 km의 변화를 보인다. 또한 양산단층대를 따라 관찰된 소단층들의 기하학적 특징들을 살펴보면 N-S 주향, NNE-SSW 주향, 그리고 NW-SE 주향들이 지배적이다. 이들 단층 대부분은 고각도의 경사를 가지며 선주각이 저경사로써 전형적인 주향이동성 특징을 보인다. 따라서 양산단층은 단순한 주향이동 단층이 아니라 다양한 운동사를 겪었으며, 주도적인 운동성향은 주향이동성이 지배했음으로 해석된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중장기 계획사업으로 일부 수행되었으며, 이에 깊이 감사드린다.

참고문헌

- 김영화, 1987, 양산단층의 구조에 관한 지전기학적 연구. 서울대학교 대학원, 박사학위논문, 107p.
- 엄상호, 최현일, 손진담, 오재호, 곽영훈, 신성천, 윤현수, 1983, 경상분지의 경상누층군에 대한 지질 및 지화학적 연구. 연구특보-36, 자원개발연구소, 118p.
- 장기홍, 1990, 경상분지 동부 지질발달사. 1989년도 전국대학 기초과학연구소 지구과학(지질) 분야 학술 심포지움, 경북대학교, 1990. 2. 12, pp.1-3.
- 장천중, 2001, 양산단층의 구조적 특성과 진화. 경북대학교 대학원, 박사학위논문, 259p.
- 장태우, 장천중, 김영기, 1993, 언양지역 양산단층 부근 단열의 기하분석. 광산지질, Vol.26, pp.227-236.
- Evans, J.P., 1990, Thickness-displacement relationships for fault zones. Jour. of Stru.

- Geol., Vol.12. pp.1061-1065.
- Hull, J., 1988, Thickness-displacement relationships for deformation zones. *Jour. of Stru. Geol.*, Vol.10, pp.431-435.
- Jolivet, L., Huchon, P., and Brun, J.P., 1991, Arc deformation and marginal basin opening: Japan Sea as a case study. *Jour. of Geophy. Rese.*, Vol.96, pp.4367-4384.
- Lallemand, S. and Jolivet, L., 1986, The Japan Sea: A pull-apart basin ?. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, Vol.76, pp.375-389.
- Wells, D.L., and Coppersmith, K.J., 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement. *Seismological Soc. Ame. Bull.*, Vol.83, pp.974-1002.