

동래단층 주변 소단층의 분포 특성과 고응력장 복원

Geometric Analysis of Minor Faults and Paleostress Reconstruction around the Dongnae Fault

조 용 찬* 장 태 우** 이 정 모***
Cho, Yong Chan Chang, Tae Woo Lee, Jung Mo

국문요약

한반도 동남부에 위치하고 있는 동래단층은 단일 불연속면 단층이 아니라 수많은 소단층을 포함하는 단층대의 형태를 보여준다. 동래단층의 고응력을 해석하기 위하여 부산시 금정구에서 울산시에 이르는 단층 주변의 노두에서 329개의 소단층 자료를 측정하였다. 먼저 수집된 소단층 자료의 기하학적인 특징을 살펴보면 주향은 NE계열(N10E, N30E, N70E)이 우세하며, 경사의 경우는 65° 이상의 고각의 단층이 우세하게 분포한다. 그리고 선주각의 경우는 30° 이하가 전체의 절반 이상을 차지한다. 동래단층의 고응력을 해석하기 위해서 수집된 자료를 Angelier의 직접역산 방법과 Choi의 방법을 병행하여 실시하였다. 그 결과 동래단층 지역에서 확인된 지구조 사건은 (1) NNE-SSW 압축응력 및 ESE-WNW 인장응력 (사건 I), (2) NNE-SSW 인장응력 (사건 II), (3) ESE-WNW 인장응력 (사건 III), (4) ENE-WSW 압축응력 및 NNW-SSE 인장응력 (사건 IV)이다. 이들 지구조 사건에 따른 동래단층 운동을 살펴보면 먼저 사건 I에 의해서 동래단층 지역에 우수 감각의 NS주향, 좌수 감각의 ENE주향을 가지는 주향이동성 단층들이 형성되었고, 이후 사건 II, III에 의해서 정단층성 단층들이 발달되고, 사건 IV에 의해서 NNE주향의 동래단층이 우수 주향이동운동으로 길게 연장 발달한 것으로 추정된다.

주요어 : 단층대, 응력 텐서, 지구조 운동, 우수 감각, 좌수 감각

ABSTRACT

The Dongnae Fault in the southeastern part of the Korean Peninsular is not a single fault but a complex fault zone composed of numerous minor faults. In order to deduce the paleostress tensor evolving the Dongnae Fault, we measured 329 faults in outcrops around the fault zone and analyzed the geometries of them. Most of them are steeply dipping ($>65^\circ$) and fall into three groups striking N10E, N30E and N70E. More than one half of them show the rakes less than 30°. Paleostress tensor analysis using the collected fault data has been conducted with the Angelier's direct inversion method and the Choi's method. As result, four different principal paleostress axes each of which subtends an independent tectonic event are found. They are; (1) NNE-SSW compression and ESE-WNW extension (Event I), (2) NNE-SSW extension (Event II), (3) ESE-WNW extension (Event III) and (4) ENE-WSW compression and NNW-SSE extension (Event IV) in chronology. Therefore, the tectonic movement around the Dongnae Fault was firstly governed by strike-slip faulting related to Event I. Afterward, normal faults were formed by Event II and Event III. Finally, the dextral strike-slip faults along the major trace of the Dongnae Fault were formed in NNE direction related to Event IV.

Key words : fault zone, stress tensor, tectonic movement, dextral strike-slip fault

1. 서 론

광역적인 지질구조와 그의 변형작용 특성을 분석하거나, 단층생성 및 운동과 관련된 고응

력장 해석에 관한 시도는 Anderson(1951)에 의해 제시된 공액단층계 모델을 토대로 하여 오늘날까지 많은 학자들에 의해 계속되어 오고 있다. 특히 단층, 절리, 단열과 같은 취성 구조들(brittle structures)은 지표 부근에서의 지구조 사건(tectonic events)이나, 운동사를 복원하는데 매우 중요한 역할을 한다. 이런 이유

* 경북대학교 지질학과 석사
* 정회원 · 경북대학교 지질학과 교수
** 정회원 · 경북대학교 지질학과 조교수

로 많은 학자들이 단층이나 절리를 이용한 지구조 운동을 해석하려고 많은 노력을 기울이고 있다.^{(1)~(7)}

광역적인 지구조운동에서의 고응력장 분석은 야외에서 수집한 단층이동 자료를 역산(inversion) 하는데 그 기초를 두고 있는데, Carey 와 Brunier(1974)는 다양한 방향으로 위치하는 단층면에서 단층조성들의 방향을 이용하여 이동 벡터를 역산하는 방법을 처음으로 제안하였고, 그 이후 단층 이동자료를 이용한 통계학적인 고응력장 복원기법이 여러 학자에 의해 발전되어 왔다.^{(1)~(6),(8)}

동래단층은 동해안의 원자력 발전소와 관련하여 최근 단층운동의 의미가 크게 부각되고 있는 양산단층의 동측에 위치한다. 이 단층과 관련한 지질학적 연구를 살펴보면 양산도폭⁽⁹⁾과 언양도폭⁽¹⁰⁾에서는 이 단층을 '오복단층'으로 기재하면서 주변 암질과의 관계를 근거로 하여 우수 주향이동 단층으로 설명하고 있으며, 손치무외⁽¹¹⁾와 동래·월내도폭⁽¹²⁾에서는 울산에서 남으로 양산, 동래 및 부산에 걸쳐 뻗어 있는 북북동 주향의 대단층을 '울산단층'이라 명명하고, 이 단층을 동측이 하강한 경사이동 단층으로 기재하였다. 김옥준외⁽¹³⁾는 양산단층과 동래단층은 백악기말 이후에서 마이오세 이전인 고제3기에 형성되어 추가령지구대와 더불어 남한에서 알려진 가장 신기의 단층들이며, 이들의 형성은 판구조론에서 본 현재의 서북 태평양의 지구조 운동과 관련되어 있는 것으로 보고 있다.

최근에 들어와서는 단층을 대상으로한 연구가 단순히 지표지질의 변위만을 고려하는 것이 아니라 단층의 고응력장 분석을 통해 단층 운동시의 응력복원 및 단층 운동을 해석하려는 연구가 활발히 수행되고 있다.⁽⁸⁾ 하지만 아직까지 동래단층과 관련한 고응력 복원의 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 이 논문은 최근 구조지질학적 관점에서 취성단층의 운동 해석에 중요한 도구가 되는 주변 소단층의 분포 특성 및 고응력장 복원을 통하여 동래단층

의 특성을 해석하고자 한다.

2. 지질

연구지역에 분포하는 암층은 백악기 경상누층군에 속하는 하양층군, 유천층군과 이들을 관입하고 있는 불국사 관입암류와 그 상위에 분출 혹은 부정합적으로 놓이는 소규모의 제3기 지층, 제4기 충적층으로 구성되어 있다 (Fig. 1).

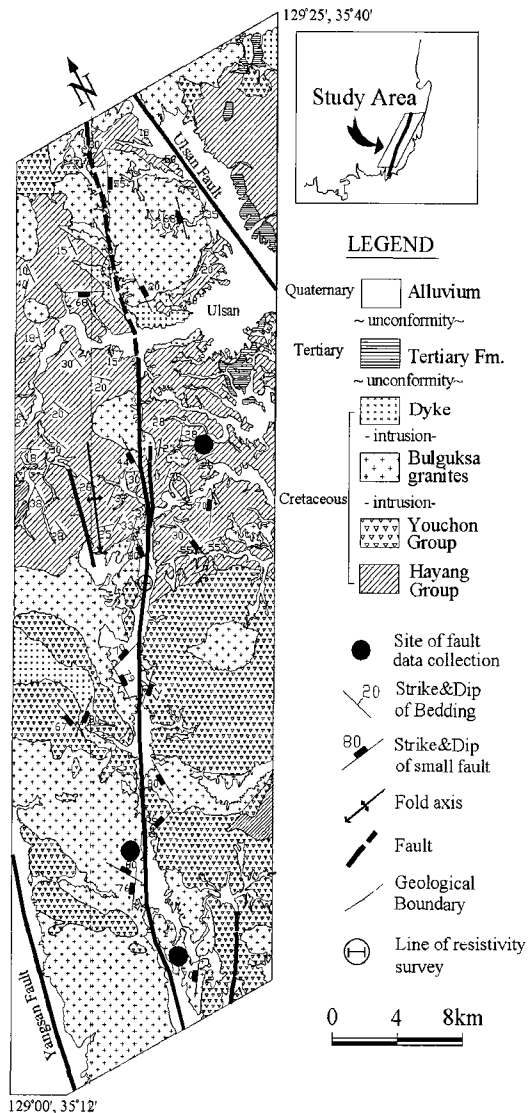


Fig. 1 Geological map of the study area

연구지역 중·북부지역에 광범하게 분포하고 있는 하양층군의 퇴적암류는 주로 적색, 녹회색, 암회색 사암과 셰일이 호층을 이룬다. 이들은 화강암 주변부에서는 접촉 변성작용으로 혼펠스화되어 있다. 퇴적암의 층리는 지역별로 다양하게 나타나는데 대체적인 주향과 경사는 N10~30W, 10~20NE와 N20~80E, 5~20SE를 보여준다. 이 지역 퇴적암류에서는 물결자국, 짐자국(load cast), 사층리 등의 퇴적구조의 발달도 관찰된다.

유천층군은 하부의 안산암질암류와 상부의 유문암질암류로 구성되는데 안산암질암류는 암청록색 및 암회색을 띠는 안산암, 조면 안산암, 휘석 안산암, 라필리 응회암, 화산 각력암 등의 다양한 암상을 보이고 있다. 특히 동래단층 주변부에서는 화강암류의 관입의 영향으로 열수 변질작용을 받아 암색이 백색 내지 담황색을 보이며 황철석의 미립을 함유하거나 납석화된 변질대가 다수 발달한다. 유문암질암류는 연구지역 남쪽에서 구과상 유문암, 유문암질 내지 석영 안산암질 용결응회암, 유문반암의 암상을 가지며 분포하고 있다.

불국사 관입암류는 화강암류와 각종 맥암류로 구성되는데 화강암류는 화강섬록암, 흑운모 화강암, 각섬석 화강암, 미문상 화강암 등의 암상으로 이루어지고 하양층군과 유천층군을 이 지역의 곳곳에서 관입하고 있으며, 지역에 따라 심한 접촉 변성작용을 일으키기도 하였다. 특히 미문상 화강암은 화강암류중 가장 마지막 관입 산물로서 연구지역 남쪽에서 흑운모 화강암을 관입하고 있다. 맥암류는 장석반암, 규장암, 석영반암, 안산암질 암맥들로서 이 지역 곳곳에서 전술한 암층들을 관입하고 있다.

연구지역의 제3기 지층들은 안산암류와 역암으로 구성되고, 연구지역의 북동쪽에서 백악기 지층 상위에 부정합적으로 소규모 분포한다.

3. 선상구조 분석

일반적으로 넓은 지역의 지형 및 지질을 거

시적으로 식별하기 위해서는 인공위성 영상 판독이나 음영기복도 분석 등이 주로 이용되는데, 이봉주의⁽¹⁴⁾는 한반도 동남부 지역의 선상구조를 랜드셋-5호 티엠자료와 수치지형고도자료를 토대로한 음영기복도를 이용하여 분석한 바 있다. 이 논문에서도 음영기복도를 이용하여 동래단층이 포함되는 경상분지 동남부 지역의 선상구조를 대략적으로 분석해 보았다.

Fig. 2는 경상분지 동남부 일대에 해당하는 음영기복도로서 NNE-SSW 방향의 선주향(trend)을 갖는 직선적인 계곡이 우세하게 발달하고 있다. 이러한 선상구조들중에는 경상분지 동남부에 분포하는 대표적인 단층인 자인단층, 밀양단층, 모량단층, 양산단층, 동래단층, 일광단층 등이 포함되고 NNW-SSE 방향의 선주향을 갖는 울산단층이 포함된다. 이들 단층들은 지형적으로 거의 직선으로 발달하는 현재의 계곡과 잘 일치하는데, 이는 단층을 따른 활발한 풍화 침식작용의 영향을 반영하며, 직선계곡은 대부분의 단층들이 주향이동운동의 산물임을 간접적으로 지시하고 있다. 단층이 통과하는 것으로 생각되는 계곡들 중에서 경상누층군 퇴적암류와 불국사 화강암류를 주로 절단하는 양산단층, 동래단층, 울산단층의 계곡이 상대적으로 폭이 넓고 수계가 계곡을 가로질러 발달하는 지세를 보이지만, 이에 반하여 비교적 풍화에 대한 저항력이 큰 유천층군의 화산암체를 통과하는 모량단층, 밀양단층, 자인단층의 계곡들은 폭이 좁고 계곡 벽이 가파른 지세를 보인다. 음영기복도를 컴퓨터를 이용하여 지역이 중첩되게 출력하여 입체경(stereoscope)으로 관찰하면, 이 지역에서 가장 긴 단층인 양산단층의 동측(퇴적암류와 화강암류가 주로 분포하는 지역임)이 서측보다는 낮고 구릉화된 양상을 관찰 할 수 있다. 이 연구의 대상인 동래단층에 해당하는 계곡의 경우에는 여러모로 양산단층과 비슷한 양상을 가지며 좌우 계곡 벽의 사면도 완만한 편이다. 계곡의 연장성에 있어서는 부산에서 울산까지는 어느 정도 직

선적인 계곡의 양상이 잘 나타나고 있지만, 그 이북에서는 계곡의 폭이 좁아지고 연장성도 상당히 미약하게 관찰된다. 이것은 동래단층의 세력이 울산 이북에서는 점차 약해지기 때문인 것으로 생각된다.

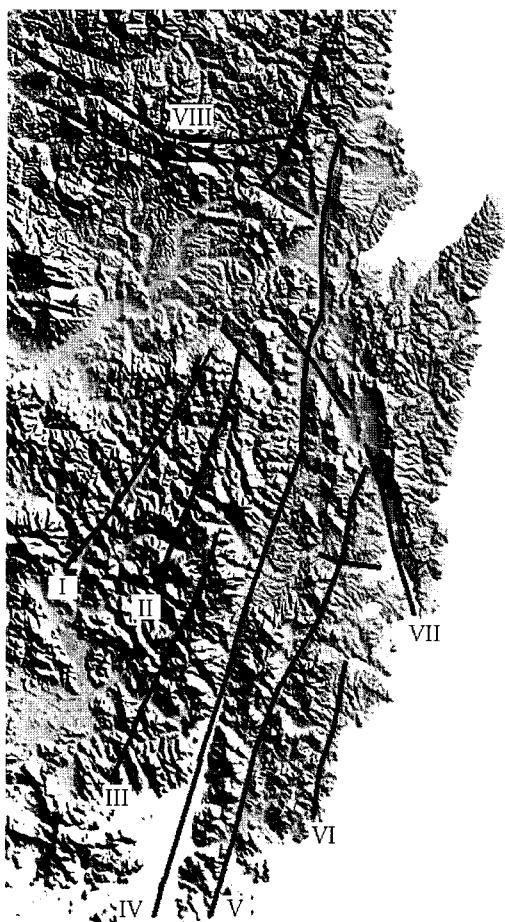


Fig. 2 Shaded relief map of southeastern part of the Korean Peninsula. I, Jain Fault; II, Miryang Fault; III, Moryang Fault; IV, Yangsan Fault; V, Dongnae Fault; VI, Ilkwang Fault; VII, Ulsan Fault; VIII, Geumcheon Fault

4. 지구물리 탐사

최근 이 지역 부근에서 발생한 지진이 단층 운동의 결과임을 감안할 때 현응력장에 의하여 재활될 가능성이 있는 단층이 진원단층으

로서 역할을 할 수 있다. 그러나 한반도에서 발생하는 지진은 대부분 중진 이하로 수반되는 지표 지진단층이 보고된 적이 없다. 지하에 매복된 단층이나 지표상에서 발견된 단층의 연장선을 확인하기 위해서는 물리탐사 방법이 동원되어야 한다. 단층 탐사에 있어서는 단층면을 따른 대수대(permeable zone)형성에 의한 비저항값 감소를 이용한 비저항 탐사법이 보편적으로 이용되고 있다. 동래단층은 그 연장부를 따라 심한 풍화 침식작용이 일어나 계곡이 형성되어 있다. 지금은 이 계곡이 지표물질로 피복 되고 경작이 이루어지고 있기 때문에 단층 노두를 야외 지질조사에서 직접 관찰하고 그 연장을 추적하는 작업은 현실적으로 거의 불가능하다. 그래서 동래단층의 지표 통과 위치를 확인해보기 위하여 경상남도 웅상 지역에서 쌍극자-쌍극자 비저항 탐사를 실시하였고 분석 결과 단면도를 Fig. 3에 제시하였다. Fig. 3에서 거의 수직으로 나타난 낮은 비저항치를 보이는 부분이 단층으로 사료된다. 더 정확한 위치와 기하학적 구조를 알기 위하여 탄성과 탐사 등의 물리탐사 방법이 추가되어야 하고 그 결과는 시굴(trench)로 확인되어야 할 것이다.

5. 지질 구조

이 지역의 중심부에는 NNE-SSW주향의 동래단층이 발달하고 있으며, 남서부에는 주향이 동래단층과 거의 평행한 양산단층의 일부가 포함되고, 북동부 지역에는 NNW-SSE주향의 울산단층의 일부가 포함된다. 이 외에도 동래단층과 평행한 몇몇의 단층들이 이 지역의 곳곳에서 인지된다(Fig. 1).

이 지역에 분포하는 노두크기의 소단층의 경우는 그 주향이 동래단층과 평행한 것들도 있으나 서로 사교하는 방향들도 많이 분포한다. 이것들 중에는 동래단층에 직접 수반된 2차 단열에 해당하는 단층과 각 지역별로 형성된 소규모의 단층이 포함되어 있다. 이들에 대해서는 뒤에서 자세히 분석된다.

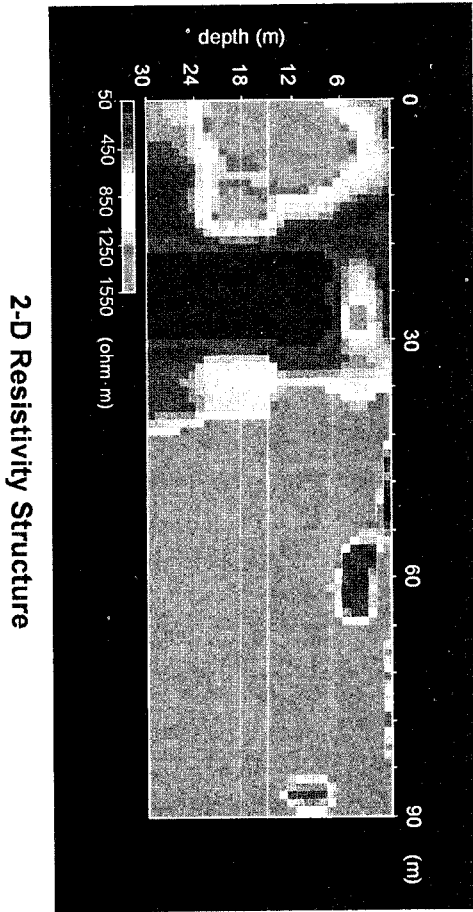


Fig. 3 2-D resistivity structure inverted from dipole-dipole geoelectrical survey at the Ungsang area, Kyongsangnam-do. It shows a distinctive vertical band of low resistivity that is considered as a fault

이 지역의 하양층군 퇴적암류의 층리의 자세는 지역에 따라서 많은 차이를 보여주고 있어서, 야외에서 측정한 퇴적암의 층리 자료를 토대로 하여 성형선 등고선도(form-line contour map)를 작성하였다(Fig. 4). 그림에서와 같이 퇴적암 분포 지역의 북서측, 남서측, 남동측 지역의 층리의 자세가 서로 상이함을 보여준다. 그래서 퇴적암류가 분포하는 지역을 3개의 지역(북서측 지역, 남서측 지역, 남동측 지역)으로 나누어 각 지역별로 퇴적암 층리의 자세를 입

체망 및 장미그림으로 도시하였다(Fig. 4A,B,C). 그림에서 볼 때 퇴적암류 분포지의 북서측에서는 주향이 N15E~NS, 경사가 8~15NW 방향인 층리가 가장 많이 분포하고 있다. 퇴적암류 분포지의 남서측에서는 층리의 주향이 N30E 방향이 가장 우세하긴 하지만 북서측과는 다르게 N40W와 N70E방향도 분포하며, 경사각은 5~30°이며 경사 방향은 SW와 SE의 두 방향이 모두 분포한다. 이러한 층리면 자세의 분포는 이 지역에 습곡의 존재를 지시하므로 습곡축의 자세를 구하면 08/208(08° S28W)로 나타난다 (Fig 4B). 그러므로 이 지역에는 습곡축의 선주향이 남서방향을 가리키고, 저각의 선경사 각을 가지는 이수평 개방 습곡이 발달하는 것으로 해석된다. 동래단층의 동측에서는 주향이 N40~85E, 경사는 10~25SE 방향의 층리가 발달하고 있다.

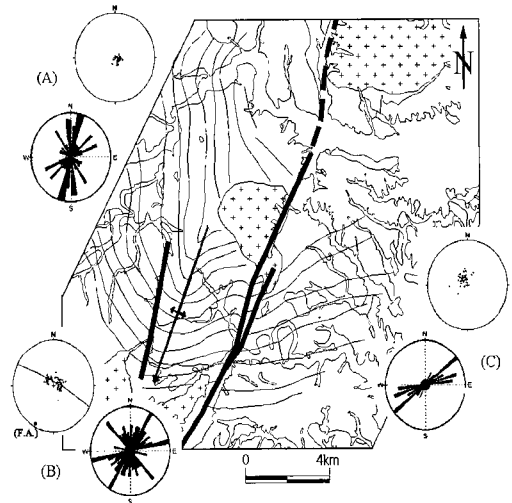


Fig. 4 Form-line contour map and orientations of the bedding plane at three parts of sedimentary rocks of Hayang Group. (A) northwestern part, (B) southwestern part, and (C) southeastern part. Note the fold axis(F.A.) in (B)

퇴적암류의 층리 자세의 변화는 단층 주변부와 화강암 관입절충부 부근에서는 교란되는 양상도 나타난다. 이러한 지역에서는 층리의 경사가 40~70° 정도로 아주 급해 지기도 한다.

이 지역의 전반에 걸쳐 분포하는 암맥들은 대부분이 중성의 안산암질 맥암류가 가장 많으며, 열수 변질을 받은 상태로 산출되는 것들이 흔하다. 암맥의 관입 방향은 여락리 노두에서는 N10~20E방향의 주향을 가지며 십여 매가 평행하게 발달하지만, 그 외의 지역에서는 관입 방향에 있어서 일관성이 없다.

6. 소단층의 기하학적인 특성

야외에서 소단층 자료를 수집할 때 측정해야 할 요소는 단층면의 주향과 경사, 단층면 상에 존재하는 단층조선의 선주향, 선경사(plunge), 선주각(rake) 그리고 단층의 이동감각 등이 있다. 동래단층 지역에서 수집한 소단층 자료는 모두 329개 이며, 다수의 자료를 집중적으로 수집한 지역은 모두 3곳인데 그 위치는 Fig. 1에서 남쪽에서 북쪽으로 가면서 부산광역시 금정구 선동 지역, 양산군 동면 여락리 지역, 울산시 청량면 삼정리 일대에 해당된다. 각 지역에 분포하는 소단층의 기하학적 양상을 살펴보기 위하여 지역별로 소단층의 기하학적 요소와 이동감각을 도시하여 보았다(Fig. 5).

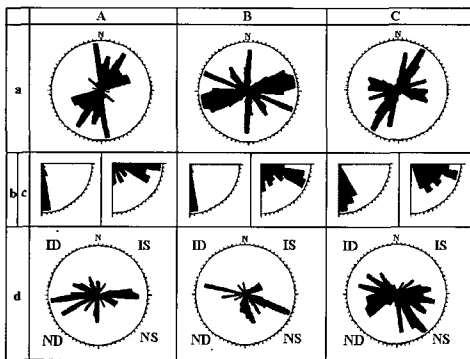


Fig. 5 Distributions of geometry of fault slip data. (a) fault strikes (b) fault dips (c) rakes of fault striations (d) classes of fault slip sense (ID: reverse dextral, IS: reverse sinistral. ND: normal dextral, NS: normal sinistral) (A) near Söndong (B) near Yörak-ri (C) near Samjöng-ri

부산광역시 금정구 선동 지역(Fig. 5A)은 불국사 관입암류중 흑운모 화강암이 분포하는 지역으로 부산시내에 위치하고 있지만, 병원 건물 신축을 위하여 절개한 사면을 대상으로 81개의 소단층 자료를 수집하였다. 단층면의 주향은 N5~10W, N10~15E, N30~35E, N70~75E의 방향이 상대적으로 우세하며 NW주향보다는 NE주향이 더 많이 분포한다. 단층면의 경사는 대부분의 소단층이 75° 이상의 고각이며 단층조선의 선주각은 대부분 45° 이하의 저각을 보인다. 이 사실로 미루어 볼 때 이 지역의 단층들은 경사이동보다는 주향이동 운동의 영향을 더 많이 받았음을 알 수 있다. 또한 단층 이동감각은 좌수감각과 우수감각이 비슷하게 나타나며, 경사이동 감각은 상대적으로 아주 적게 분포하고 있다.

양산시 동면 여락리 지역의 도로사면(Fig. 5B)은 부산에서 울산을 연결하는 7번 국도에서 양산으로 향하는 지방도로를 확장하기 위해 절개한 사면을 대상으로 하였는데, 암상은 불국사관입암류중 최후기에 해당하는 미문상 화강암이 관입한 지역이다. 이 지역은 약 10여 매의 중성 암맥들이 거의 평행한 주향으로 관입하고 있다. 이 지역에서는 62개의 소단층 자료를 수집하였다. 단층면의 주향은 N60~85E, N~S, N65~70W의 방향이 많이 분포하고, 남북 방향보다는 동서 방향에 가까운 주향이 더 많이 분포한다. 단층면의 경사는 거의가 80° 이상으로 고각이고, 단층조선의 선주각의 경우 30° 이내의 저각이 많이 분포하고 있다. 단층 이동감각의 경우 정단층성 좌수이동 감각이 가장 우세하다.

울산시 청량면 삼정리 지역의 도로 사면(Fig. 5C)은 웅촌면 석촌리에서 청량면 소재지로 향하는 도로 사면과 청량면 소재지의 우회도로 사면이며 하양층군 퇴적암류가 분포하는 지역이다. 이 지역의 퇴적암류는 적색 셰일, 녹회색 사암이 서로 호층을 이루고 있으며, 층리면의 배향이 N10E에서 N70E까지 심한 차이를 보이는데 이것은 단층작용에 의한 층리

의 교란 현상으로 추측된다. 이 지역에서는 180여개의 소단층 자료를 수집하였는데 단층면의 주향은 N30~40E, N10~15E, N50~60W 방향이 상대적으로 우세하며, 단층면의 경사는 대부분 75° 이상의 고각을 나타낸다. 그리고 단층조선의 선주각은 0~70° 사이에서 비교적 골고루 분포하고 있다. 단층 이동감각은 경사 이동성 감각보다는 주향이동성 감각이 우세한 사교이동 감각이 많다.

이 지역의 소단층들을 종합적으로 분석하여 보면 단층의 주향은 NE계열 (N10E, N30E, N70E)이 우세하며, 경사는 65° 이상이 약 91.2%, 75° 이상이 67.8%를 차지하므로 고각의 경사를 가지는 단층이 우세하게 분포한다. 선주각의 경우는 30° 이하인 경우가 전체의 49.3% 정도로 약 절반을 차지하며, 단층의 경사가 75° 이상인 경우에서 선주각이 30° 이하인 것이 56.3%로 절반 이상을 차지한다. 단층 이동감각의 경우는 경사이동 감각도 분포 하지만, 주향이동 감각이 더 우세하게 분포하고 있다. 소단층의 기하학적인 양상으로 볼 때 동래단층은 경사 이동성 운동보다는 단층면이 고각의 경사각을 가지는 주향이동성 운동이 더 많이 작용했으리라 생각된다.

7. 고응력장 분석

이 논문은 전술한 고응력장 분석 기법을 토대로 동래단층 지역 주변 암체에서 소단층 자료를 수집하여 Angelier(1)의 직접역산(direct inversion) 방법과 Choi(2)의 방법(DAGUR, BURIAT, ASI)을 이용하여 고응력장을 분석하였다.

소단층 자료를 수집할 때 가장 기본적인 중요한 것은 단층의 이동방향 및 이동감각의 결정이다. 단층의 이동방향은 단층조선을 통해서 알 수 있지만 이동감각을 결정하기 위해서는 그 기준이 필요하다. 지금까지 여러 학자들에 의해 단층 이동감각을 결정하기 위한 기준이 다양하게 제시되었다.^{(6),(15)} 단층 운동감각을 결정하는 방법 중에서 가장 뚜렷한 방법은 층

리면들의 어긋남(offset)을 측정하는 방법이지만 이러한 현상을 야외에서 소단층에서 관찰하는 것이 쉽지 않기 때문에, 단층면 상에서 관찰되는 2차 단열인 리델 전단(Riedel shear)의 특징과 석영과 같은 단단한 입자의 굽힘 흔적(tool mark), 부가 광물 계단 및 단층면상의 연마된 거친 면 (facets) 등의 기준을 이용하였다 (Fig. 6).

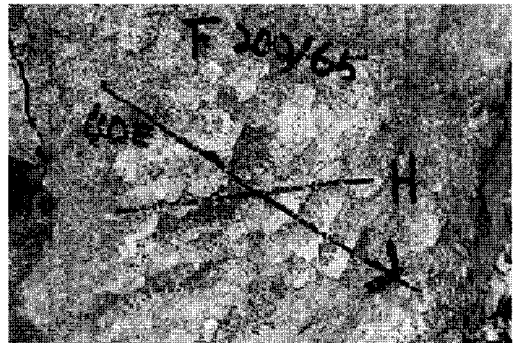


Fig. 6 Calcite fiber growth on fault plane, showing sinistral slip sense

소단층간의 선후 관계는 매우 중요하기 때문에 선후 관계 결정은 인접한 단층간의 상호 절단 관계, 동일 단층면상에 여러 개의 조선이 존재할 경우 이들의 상호 절단 관계 등을 이용하여 판단하였다(Fig. 7). 이렇게 수집된 자료는 나중에 복원된 지구조 사건의 선후 관계를 결정하는데 이용하였다.



Fig. 7 Cross-cutting relationship of fault striae. Steeply plunging striae cut gently plunging ones

동래단층 지역에서 수집한 소단층 자료는 다양한 배향과 이동감각을 가지고 있는데 이것은 단층작용에 의한 지반운동이 시작된 이후 현재까지의 여러 단계 운동사가 모두 포함된 복합 변형 자료(polyphase data)에 해당한다. 따라서 수집한 자료를 각각의 단일 지구조 사건의 군집(monophase event population)으로 분류를 해야 하는데, 이 과정은 야외에서의 자료 수집 단계에서 소단층의 선후 관계와 공액 관계 등을 고려하여 분류 하였다.

지역별로 수집한 자료를 먼저 Angelier(1)의 직접 역산 방법을 이용하여 각 지역별 응력텐서를 계산하였다(Fig. 8). 계산된 응력텐서를

지역별로 살펴보면 부산광역시 금정구 선동노두에서는 NNE-SSW 압축응력 및 ESE-WNW 인장응력과 ENE-WSW 압축응력 및 NNW-SSE 인장응력에 해당하는 2개의 주향이동성 응력장이 계산되었다. 양산시 동면 여락리 도로사면에서는 NNE-SSW 압축응력 및 ESE-WNW 인장응력의 주향이동성 응력장과 N-S 인장응력의 경사이동성 응력장이 계산되었다. 울산시 청량면 삼정리 도로사면에서는 2개의 주향이동성 응력장과 2개의 경사이동성 응력장등 모두 4개의 응력장이 계산되었는데, 먼저 주향이동성 응력장의 경우는 NNE-SSW 압축응력 및 ESE-WNW 인장응력, ENE-WSW 압축응력 및 NNW-SSE 인장응력이며, 경사이동성 응력장은 NNE-SSW 인장응력과 ESE-WNW 인장응력의 정단층성 응력장이다.

Choi⁽²⁾의 방법을 이용하여 이 지역의 응력텐서를 계산할 때 입력 자료는 Angelier⁽¹⁾의 방법에서 이용한 소단층자료를 그대로 사용하였으며, 그 결과는 Angelier⁽¹⁾의 방법에서 계산된 것과 대체로 비슷한 결과를 나타낸다(Fig. 9). 다만 선동지역에서 K-IV의 응력장이 약간 차이를 보여준다.

이상에서 계산된 각 지역별 응력텐서들간의 선후 관계는 야외에서 수집한 22개의 단층 조선들간의 상호 절단 관계, 단층과 단층들간의 상호 절단 관계 등의 자료를 이용하여 행렬분석(matrix analysis)⁽⁶⁾을 사용하여 도시하였다(Fig. 10). 그 결과 동래단층 지역에서의 지구조 사건은 최초 NNE-SSW 압축응력 및 ESE-WNW 인장응력(사건 I), 그 다음으로는 NNE-SSW 인장응력(사건 II)과 ESE-WNW 인장응력(사건 III), 마지막으로 ENE-WSW 압축응력 및 NNW-SSE 인장응력(사건 IV)의 순서로 나타났다.

각 지역별로 계산한 응력텐서들을 상대적인 선후 관계를 고려한 주응력축 (principal stress axis)의 방향, 응력비($\Phi = \sigma_2 - \sigma_3 / \sigma_1 - \sigma_3$), Δ (ANG)값은 Table 1에 나타내었다. 동래단층 지역에서 계산한 응력텐서의 신뢰도를 가늠할 수 있는 Δ (ANG)값은 8.6~15.3 정도로 대체로

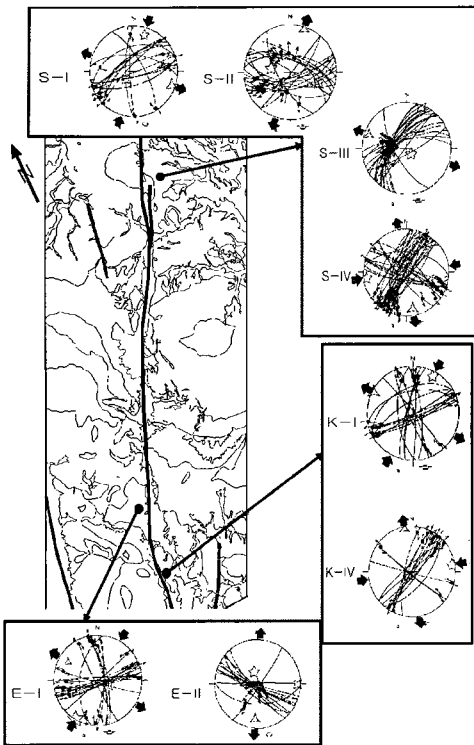


Fig. 8 Fault slip data and results of paleostress axis determinations(equal-area projection of lower hemisphere) in the Dongnae Fault area. Large solid arrows indicate the computed directions of extension and compression. Paleostress axes, σ_1 , σ_2 , σ_3 presented by 5-, 4-, and 3-branch stars were computed by using direct inversion method of Angelier(1990)

양호한 값을 보여준다.

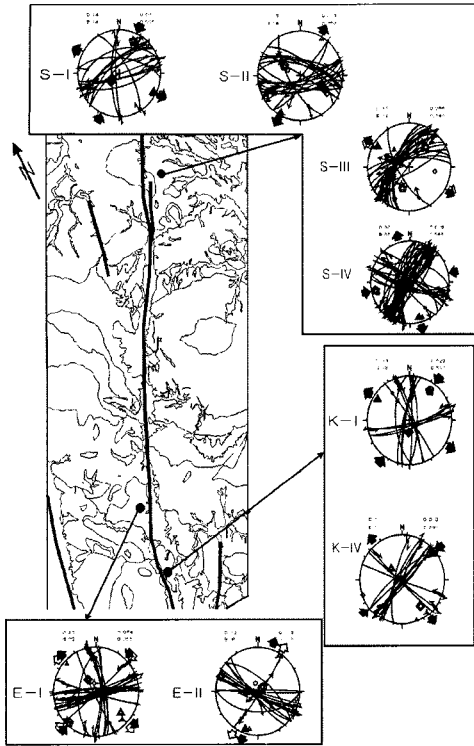


Fig. 9 Fault slip data and results of paleostress axis determinations(equal-area projection of lower hemisphere) in the Dongnae Fault area. Large arrows indicate the computed directions of extension and compression. Paleostress axes, σ_1 , σ_2 , σ_3 presented by 5-, 4-, and 3-branch symbols are computed by using DAGUR, BURIAT and ASI methods of Choi(1995)

	Poterior	I	II	III	IV
Prior					
I		2	3		
II			1	1	
III	1			4	
IV			1		

Fig. 10 Relative chronologies between tectonic events in matrix method

8. 토 의

전 절에서 복원한 동래단층 지역의 지구조 사건으로부터 단층운동을 고찰하면 연구지역의 3곳에서 복원한 지구조 사건 중에서 NNE-SSW 압축응력과 ESE-WNW 인장응력은 3개 지역에서 모두 확인되지만 그 이외의 사건들은 지역에 따라 나타나는 곳도 있고 그렇지 못한 경우도 있다. 이것은 동래단층 지역이 지역에 따라 각 단계별 운동이 조금 다르게 작용하였음을 의미할 수도 있다. 이런 점들과 각 응력텐서들간의 선후 관계 등을 충분히 고려하면 동래단층 지역에서 가장 먼저 작용한 응력텐서는 NNE-SSW 압축 및 ESE-WNW 인장응력이다. 이 응력텐서는 σ_2 가 수직 내지 아수직이며 σ_1 과 σ_3 가 수평 내지 아수평이며, 압축방향이 현재의 동래단층과 평행한 방향에

Table 1 Results of paleostress tensor determinations for the Dongnae Fault. σ_1 , σ_2 and σ_3 are principal stresses ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$). ϕ is stress ratio ($\sigma_2 - \sigma_3 / \sigma_1 - \sigma_3$). Δ is angular deviation.

Site	No.of Data	Stress Tensor								ϕ	Δ
		σ_1		σ_2		σ_3					
		Angelier	CHOI	Angelier	CHOI	Angelier	CHOI				
Samjung-li	I	16	017/18	026/21	225/70	226/67	110/09	119/07	0.701	0.680	10.1
	II	21	280/55	300/55	112/34	118/35	018/06	209/07	0.512	0.655	12.0
	III	23	139/77	198/48	021/06	042/40	290/11	302/12	0.494	0.286	8.6
	VI	38	262/08	258/11	016/72	026/72	170/17	165/14	0.626	0.516	14.0
Eurak-li	I	23	211/02	232/07	117/67	088/81	301/23	323/05	0.082	0.218	15.3
	II	15	343/67	259/82	091/07	111/07	184/22	020/04	0.503	0.063	11.0
Seon-dong	I	18	029/12	036/19	190/77	182/68	298/04	302/12	0.643	0.522	13.5
	IV	16	081/07	051/04	226/81	143/29	350/05	314/61	0.469	0.012	12.0

위치하면서 우수 이동감각의 N-S 주향과 좌수 이동감각의 ENE-WSW 주향을 가지는 소단층을 발달시켰다고 생각된다. 그리고 여락리 지역의 중성맥암류 약 10여매가 약 N15~30E의 주향을 가지고 관입을 하고 있는데, 이들의 대략적인 σ_3 의 방향은 ESE-WNW 방향으로 위의 응력텐서와 비슷한 방향을 보여주고 있다. 그러나 이 응력장의 압축 방향과 현재의 동래단층의 평균 주향이 거의 평행하기 때문에 이 응력장에 의해서는 NNE주향의 동래단층 방향의 주향이동 단층은 발달하지 않았을 것으로 생각된다.

다음은 삼정리와 여락리에 나타나는 NNE-SSW 인장응력인데 σ_1 이 아수직이며 σ_2 와 σ_3 가 아수평으로 작용하여, 주향이 E-W에 가까운 정단층성의 소단층을 발달시킨 것으로 생각된다. 이후 삼정리에만 나타나는 ESE-WNW 인장응력은 주향이 N10~80E인 정단층을 발달시켰으며, 앞의 NNE-SSW 인장응력과는 최소주응력축과 중간주응력축이 서로 위치만 바뀐 양상을 보여주고 있어서 이 두 개의 응력장은 시기적으로 아주 가깝게 내지는 거의 동시기적으로 작용하였을 수도 있다.

동래단층 지역의 마지막 응력장은 ENE-WSW 압축 및 NNW-SSE 인장응력이며, 우수 이동감각의 N10~40E주향과 좌수 이동감각의 N40~80W주향의 소단층을 발달시켰다. 특히 이 응력장의 영향하에서 현재의 동래단층의 평균방향과 평행한 소단층이 우수 주향이동을 겪게 된다. 이 단계가 동래단층의 연장을 길고 연속적인 상태로 만들면서 우수 주향이동 운동을 지배적으로 일으켰던 것으로 판단되는데, 이 단계의 단층운동으로 인하여 지질도상의 퇴적암의 어긋남이 단층을 중심으로 상대적으로 우수향 변위를 일으켰을 것이다.

동래단층의 운동시기를 대략적으로 추정해보면, 단층에 의해 절단된 주변의 관입암의 연령은 화강암의 경우 K-Ar에 의한 흑운모의 연령이 60~64Ma, 화산암의 경우는 K-Ar 전암법으로 64~65Ma^{(16),(17)}를 나타내고 동래단층

지역에서 단층 활동의 산물인 단층비지에서 추출한 일라이트를 포함하는 점토광물의 K-Ar 절대연령이 40.3~57.5Ma를 보여준다.⁽¹⁸⁾ 또 동래단층에 수반된 부수단층에 의해 절단되는 중성맥암의 경우 45.6Ma로 중기 에오세를 지시하고 있다. 이런 사실들로 미루어 보면 동래단층의 운동은 화강암이 관입한 팔레오세 이후에 시작하여 전 에오세에 걸쳐 활발하게 일어났던 것으로 추정된다.

9. 결 론

동래단층은 단일 불연속면 단층이 아니라 주변의 다른 대규모 단층도 그러하듯이 수많은 소단층이 모여서 형성하고 있는 복잡한 단층대라고 할 수 있다. 이 단층대를 따라 여러 매의 단층 파쇄대가 발달하고 일부는 단층비가 발달한다.

동래단층의 발달상태와 관련된 지구조 사건을 추적하기 위하여 동래단층의 주향을 따라 주변부 3개 지점에서 단층조선이 발달하는 소단층 329개를 측정하였다. 측정한 소단층의 기하학적인 양상은 주향은 NE계열 (NNE, NE, ENE)이 우세하며, 경사는 65° 이상 고각이다. 선주각은 30° 미만이 다소 우세하며, 단층면의 경사가 75° 이상의 고각의 경우만을 고려하면 30° 미만의 선주각이 더 뚜렷하게 나타나므로, 동래단층은 다소 고각의 경사를 가지면서 주향이동성 운동이 경사이동성 운동보다는 비교적 더 크게 지배했음을 추측할 수 있다.

단층구조 분석에 의해 복원한 지구조 사건은 NNE-SSW 압축응력 및 ESE-WNW 인장응력(사건 I), NNE-SSW 인장응력(사건 II), ESE-WNW 인장응력(사건III), ENE-WSW 압축응력 및 NNW-SSE 인장응력(사건 IV)에 해당한다. 동래단층 지역의 지구조 운동 특성을 살펴보면 먼저 사건 I에 의해 동래단층 지역에 우수 감각의 NS주향, 좌수 감각의 ENE주향을 가지는 주향이동성 단층들이 형성되었고, 이후 사건 II, III에 의해 정단층성 단층들이 형성되

고, 사건 IV에 의해서 본격적으로 NNE주향의 동래단층이 우수 주향이동 운동과 더불어 길게 연장 발달하였던 것으로 추정된다.

사 사

이 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(BSRI-97-5421)의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사한다.

참 고 문 헌

1. 김옥준, 정봉일, 엄상호, 장기홍, 박봉순, 강필중, "한반도의 지진지체구조에 관한 연구", 과학기술처, 1980, pp. 159.
2. 손치무, 정창희, 김봉균, 이상만, "중생대의 지각변동 화성활동 및 광화작용의 시기에 관한 연구", 과학기술처, 1968, 31p.
3. 손치무, 이상만, 김영기, 김상욱, 김형식, "한국지질도 동래·월내도폭(1:50000)", 자원개발연구소, 1978.
4. 신성천, 진명식, "한국 심성암 동위원소 연대지도(1:1,000,000)", 한국자원연구소, 1995.
5. 신성천, 진명식, "한국 화산암 동위원소 연대지도(1:1,000,000)", 한국자원연구소, 1995.
6. 이민성, 강필중, "한국지질도 양산도폭(1:50000)", 국립지질조사소, 1964.
7. 이봉주, 최위찬, 강필중, "한반도 동남부지역의 선구조선", 지질학회지, Vol. 33, No. 1, 1997, pp. 18-26.
8. 이윤중, 이인기, "한국지질도 연양도폭(1:50000)", 국립지질조사소, 1972.
9. 장태우, 추창오, "동래단층 지역 단층비지의 생성과정과 K-Ar연령", 지질공학, Vol. 8, No. 2, 1998, pp. 175-188.
10. Angelier, J., "Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population," *Tectonophysics*, 56, 1979, pp. T17-T26.
11. Angelier, J., "Tectonic analysis of fault slip data sets," *Jour. Geophys. Res.*, Vol. 89, No. B7, 1984, pp. 5835-5848.
12. Angelier, J., "Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress-III. A new rapid direct inversion method by analytical means," *Geophys. J. Int.*, Vol. 103, 1990, pp. 363-376.
13. Angelier, J., *Fault Slip Analysis and Paleostress Reconstruction*, In : P. Hancock (ed.), *Continental Deformation*, Pergamon Press, Oxford, 1994, pp. 53-100.
14. Choi, P.-Y., "Aspects of stress inversion methods in fault tectonic analysis," *Annales Tectonicae*, Vol. IX, No. 1-2, 1995, pp. 22-38.
15. Etchecopar, A., Vasseur, G., and Daigneires, M., "An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis," *Jour. Struct. Geol.*, Vol. 3, No. 1, 1981, pp. 51-65.
16. Nemcok, M. and Lisle, R. J., "A stress inversion procedure for polyphase fault/slip data sets," *Jour. Struct. Geol.*, Vol 17, No. 10, 1995, pp. 1445-1453.
17. Petit, J. P., "Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks," *Jour. Struct. Geol.*, Vol. 9, No. 5/6, 1987, pp. 597-608.
18. Stapel, G., Moeys, R., and Biermann, C., "Neogene evolution of the Sorbas basin (SE Spain) determined by paleostress analysis," *Tectonophysics*, Vol. 255, 1996, pp. 291-305.