

부산 이기대 지역의 단열 발달사 해석

이민주 · 양석준 · 최진혁 · 김영석*

부경대학교 환경지질학과와 지질구조재해연구실

요 약

이 연구는 우리나라 최대의 주향이동단층인 양산단층의 남동측에 위치한 부산 일원의 신생대 변형사를 알아 보기 위하여 수행되었으며, 이기대 지역은 해안가에 위치하여 노두가 넓고 구조요소들이 잘 발달하여 연구지역 으로 선정되었다. 연구지역인 이기대는 부산광역시 남구 대연동에 위치하며, 경상누층군의 유천층군에 해당하는 안산암류로 주로 구성되어 있다. 노두에서 관찰되는 단열들의 상대적인 발달사를 해석하기 위하여 정밀 야 외조사를 실시하고 대표적인 6개의 평면 노두에 대하여 정밀분석을 실시하였다. 단열들의 절단관계와 나무구조(tree structures)에 발달한 단열 내 세맥의 존재여부 등을 근거로 추정한 이 단열들의 발달순서는 (I) 동-서 방향의 인장력에 의한 NS/84°E 방향의 단열군 → (II) 북동-남서 압축력에 의한 N60°E/70°SE 방향의 단열군 → (III) 북서-남동방향의 압축력에 의한 N25°W/90° ~ 45°W/70°SW 방향의 공액상단열군 → (IV) 서북서-동남동방향의 압축력에 의한 N55°W/70°SW 방향의 좌수향 재활성과 N83°W/90° 방향의 2차 인장단열군 → (V) 동북동-서남서방향의 압축력에 의한 N75°W/82°SW 단층의 활성과 N80°E/82°SE의 2차 인장단열군 순으로 해석되었다. 이는 양산단층의 동측 일원에서 기존에 보고 된 일반적인 응력변화와 비교적 잘 일치하는 편이다. 따라서 이기대 지역은 양산단층의 동측 다른 지역과 유사한 변형사를 겪었던 것으로 해석된다.

주요어: 이기대, 단열 발달사, 응력변화, 나무구조, 세맥

Min-joo Lee, Seok-Jun Yang, Jin-Hyuck Choi and Young-Seog Kim, 2008, Developing history of fractures in the Igidae area, Busan, SE Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 44, no. 3, p. 00-00

ABSTRACT: This study was undertaken to understand the Cenozoic deformation history for the eastern part of the Yangsan fault, which represents a major strike-slip fault in Korea. The Igidae area was selected for examination because of its well-exposed outcrops and well-developed fractures. The area is composed of andesitic rocks from the Yuchon group, which are in turn part of the Gyeongsang supergroup. Developing relationships between fractures were examined from well exposed wave-cut outcrops. Based on cross-cutting relationships and interpretation of tree structures, the fractures developed in this area have the following deformation history: (I) E-W extension produced a NS/84°E trending fracture set → (II) NE-SW compression produced a N60°E/70°SE trending fracture set → (III) NW-SE compression produced a N25°W/90° ~ 45°W/70°SW trending conjugate fracture set → (IV) WNW-ESE compression produced reactivation of N55°W/70°SW trending fault generating N83°W/90° trending secondary extension fractures → (V) ENE-WSW compression produced a N75°W/82°SW trending fault generating N80°E/82°SE trending secondary extension fractures. This deformation history for the Igidae area is very similar to previous studies on the eastern parts of the Yangsan fault. The Igidae area experienced a very similar paleostress and deformation history to the other areas in the eastern part of the Yangsan fault.

Key words: Igidae, developing history of fractures, stress change, tree structure, veins

(Min-joo Lee, Seok-Jun Yang, Jin-Hyuck Choi and Young-Seog Kim, Geological Structure and Geohazard Research Group, Department of Environmental Geoscience, Pukyong National University)

* Corresponding author: +82-51-629-6633, E-mail: ysk7909@pknu.ac.kr

1. 서 론

양산단층과 소위 울산단층이 발달하고 있는 경상분지는 백악기초에 형성된 이후 퇴적물의 퇴적과 동시에 혹은 이후에 여러 번에 걸쳐 취성의 변형작용을 받았음이 이전의 여러 연구를 통하여 잘 알려져 있다(김영기 · 노병돈, 1989; 장기홍 외, 1990; 황재하 · Angelier, 1992)지. 경상분지 지역은 원자력발전소와 방사성폐기물처분장과 같은 국가의 주요시설물이 위치하여 최근 부지 안정성 및 지진 위험성과 관련하여 그 중요성이 부각되면서 이 지역의 신기단층운동에 대한 연구가 더욱 활발하게 진행되고 있다(이봉주 외, 1999; Kim and Park, 2006; 진광민 · 김영석, 2007; 최범영 외, 2007).

우리나라에서 최근에 발견된 대부분의 활성단층들은 양산단층과 울산단층 주위에 분포하고 있으며(최위찬 외, 1999; 경재복 · 장태우, 2001; 이용희 외, 2002; 이용혁, 2004), Lee and Na (1983)가 미소지진과 역사지진 자료에 근거하여 양산단층이 활성단층일 가능성을 제기한 이후 양산단층과 울산단층의 활성도에 대한 연구도 꾸준히 발표되고 있다(Lee and Jin, 1991; Kyung and Okada, 1995; 장태우, 2001; 김영석 · 진광민, 2006). 또한, 한반도의 지체구조적 관점에서 단층 및 단열 등을 이용한 고응력장의 복원에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다(황재하 · Angelier, 1992; 장천중 · 장태우, 1998; 강성승 외 2007).

양산단층의 남동 측에 위치하고 있는 부산은 인구밀도가 높으며 주변에 원전과 공업단지 등 국가의 주요 산업시설들이 위치하고 있어 지질학적 중요성이 인지되어 그 동안 고자기학적, 암석학적, 구조적, 층서학적 연구들이 진행되어 왔다(김인수, 1988; 김진섭 · 윤성호, 1993; 손문 외, 2002). 그러나 부산지역에서의 야외 노두를 대상으로 정밀한 구조요소 분석을 실시하고 이를 통해 구조변형사와 고응력장을 해석하는 연구는 시도되지 않았다.

이 연구는 부산지역에 작용하였던 고응력의 변화를 구조요소들의 상대적인 변형사 정립을 통해 알아보고 양산단층 주변의 다른 지역에서의 고응력장 변화와 비교하기 위하여 실시되었다. 이기대 지역은 해안가에 위치하여 파도에 침식된 노두가 비교적 넓게 발달하고, 구조요소들이 잘 관찰되어 연구지역으

로 선정되었다. 이번 연구에서는 이 지역의 노두에 발달하고 있는 단열들의 상대적인 변형사 연구를 위하여 소규모 단층, 절리, 세맥 등과 같은 구조요소에 대한 정밀 야외조사와 분석을 실시하였으며, 선후관계를 잘 보여주는 대표적 노두를 선택하여 정밀 격자분석을 통해 기하학적 분석을 실시하였다(그림 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10). 이러한 단열들의 발달사를 이해하는 것은 이 지역에 대한 고응력장의 해석뿐만 아니라 지체구조적 특성을 파악하고, 단열을 따른 유체나 열수의 유동을 이해하는데 많은 도움을 줄 수 있을 것이다.

2. 지질개요

경상분지의 남동부에 위치하는 연구지역은 서쪽으로는 양산단층이 북동쪽으로는 울산단층이 발달하고 있다(그림 1).

이 지역의 일반지질에 대한 연구로는 장태우 외(1983)에 의한 1:50,000 부산 · 가덕 지질도와 김동학 외(1998)에 의한 1:250,000 부산지질도가 있다. 부산시 일원의 지질은 퇴적암층을 기반으로 하여, 이를 덮고 있거나 관입 · 접촉하는 백악기말에 형성된 중성 및 산성 화산암류로 구성되며, 화산 분출 후 이들을 다시 심성암류가 관입하여 있는 일련의 화산-심성활동의 양상을 나타낸다(김진섭 · 윤성호, 1993). 연구지역인 이기대에는 안산암질 화산각력암이 주로 분포하고 있으며, 대부분이 휘석안산암으로 구성되어 있다.

3. 연구 방법

이 연구에서는 연구지역 내에 발달하는 각 구조요소들의 특징과 발달사를 알아보기 위하여 기하학적 분석을 실시하였다. 먼저 조사지역에 발달하는 구조요소들에 대한 공간적 분포를 알아보기 위하여 이 지역에서 측정된 모든 단열들을 등면적투영망에 도시하였다(그림 2A). 투영망에 도시한 결과를 바탕으로 대표적인 구조요소들을 구분하였고, 각 구조요소들 간의 상관관계를 정밀하게 분석하기 위하여 6개의 대표적인 평면노두에 대하여 분석을 실시하였으며, 구조가 잘 발달하고 있는 그림 5와 그림 7의 경우에는 1 m × 1 m의 격자를 이용해 정밀 단열분석을

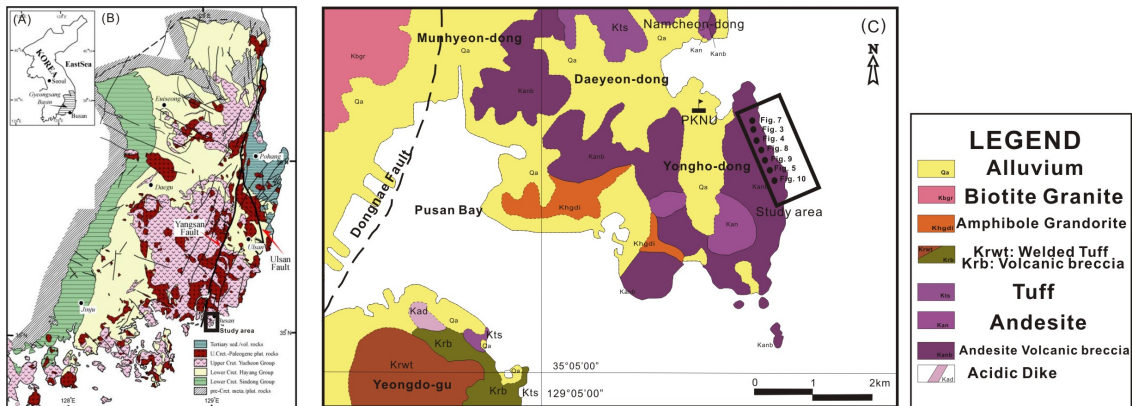


Fig. 1. (A) Locality map of the Igi-dae study area. (B) Regional geological map and major faults near the study area (modified from Lee, 2000). (C) Geological map of the study area and the location of selected outcrops.

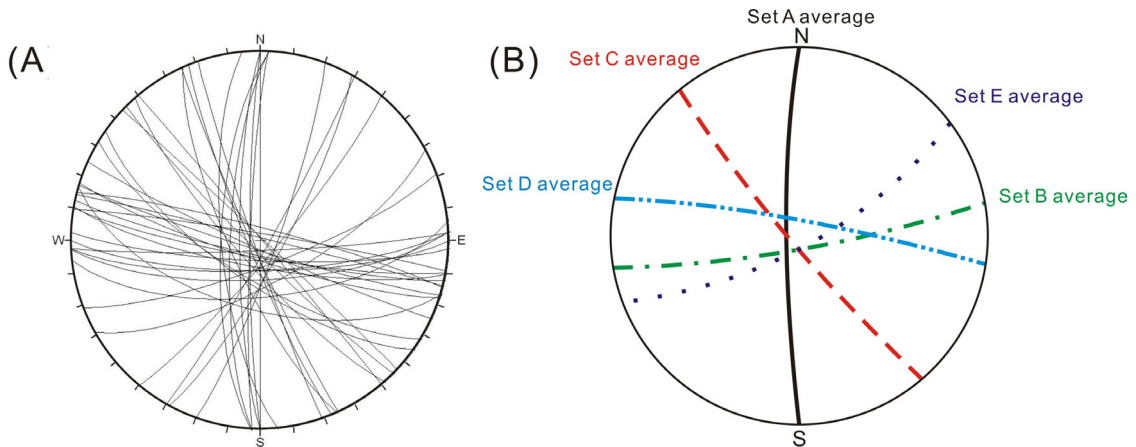


Fig. 2. Lower-hemisphere equal area stereoplot. (A) Distribution of fracture orientations in the study area. (B) Average trend for each fracture set.

실시하였다(그림 1C).

단열들의 발달순서와 특성을 알아보기 위하여 야외 스케치를 통하여 각 분석면에 발달하는 단열들의 상관관계를 자세하게 기재하고 해석하였으며, 실내에서는 합성된 사진을 바탕으로 이 면들에 대한 단열 구조도를 작성하였다(그림 3, 4, 5, 8, 9, 10). 작성된 단열구조도에 대해서는 수차례의 현장조사를 통하여 구조요소들 간의 관계를 확인하고 수정하는 작업을 실시하였다. 단열들 간의 선후관계는 단열들 간의 절단관계나 2차적인 단열들의 발달특성, 세맥들의 존재 유무 등을 통하여 분석하였으며, 이러한 해석들을 종합하여 이 지역의 단열발달사를 수립하고 이전의 다른 지역에서의 연구결과와 비교하여 검토하였다.

4. 정밀 단열분석

연구지역에 발달하고 있는 단열들 간의 절단관계와 응력의 변화를 자세히 보여주기 위하여 5개의 대표적인 단면에 대하여 정밀분석을 실시하였으며, 모두에서 관찰되는 단열군들은 단열의 방향, 채움 상태, 2차 단열들의 발달특성 등에 따라 분류하였다. 연구지역에서 두드러지게 발달하고 있는 단열들은 방향성과 운동방향, 세맥의 발달여부 등이 일정하게 중복되어 나타나고 있어 6개의 대표적인 단열군에 대해 상호관계를 분석하고 발달사를 수립하였다.

등면적투영망(그림 2)에는 모두에서 관찰한 단열들을 도시하여 우세하게 나타나는 대표적인 단열군

들을 인지하였으며 방향성과 특성에 따라 분류하였다(그림 2B). 또한, 이들 사이의 상관관계를 보여주기 위하여 각 분석면에서 인지된 대표적인 단열군들에 대해서는 각각 정밀 단열도(그림 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10)를 작성하여 그 관계를 도시하였다. 각 분석면의 특징과 단열군들 사이의 관계는 다음과 같다.

첫 번째 분석면에서는 NS/84°E와 N75°W/82°SW의 태위를 갖는 단열들이 우세하게 관찰된다(그림 3). 동-서 방향의 인장력에 의해 형성된 단열을 따라 관입한 것으로 보이는 NS/84°방향의 염기성 암맥은 최대 폭이 3 m 정도이며, 암맥의 내부에 발달되어 있는 절리들을 따라서는 암맥들과 평행한 방향의 석영 세맥들이 일부 발달하고 있다. 이 암맥은 이후의 동북동-서남서 방향의 압축력에 의해 운동한 N70°W/82°SW의 단층에 의하여 좌수향의 운동감각을 보이며 70 cm가량 변위되어 있는 것을 관찰할 수 있다(그림 3). 이들의 절단관계를 통하여 단열군 B의 운동감각과 단열군 A와의 선후관계를 파악할

수 있다. 이를 통해 동-서 방향의 인장력과 연관된 NS/84°E의 태위를 보이는 암맥들과 세맥들은 N80°E/82°SE의 2차인장단열을 가지는 N70°W/82°SW 좌수향 운동감각의 주향이동성 단층보다 전기인 것으로 해석할 수 있다(단열군 A → 단열군 B).

두 번째 분석면에서는 N25°W/90°, N40°W/80°NE, 그리고 NS/84°E의 태위를 갖는 3개의 단열들이 우세하게 관찰된다(그림 4). 남-북 방향의 관입암류와 평행하게 발달하고 있는 세맥들은 NS/84°E의 태위를 가지고 있어서 이전 분석면에서와 같이 동-서 방향의 인장력(단열군 A)에 의해 형성된 것으로 추정된다. 이들 세맥은 석영으로 채워져 있으며 최대 폭은 5 cm 정도이며, 길이는 1 m 이상인 것도 발달하고 있다. 또한 이 면에서는 공액상으로 발달하고 있는 단열군을 관찰할 수 있다. 이들은 좌수향 운동감각의 주향이동성 단층(N25°W/90°)과 우수향 운동감각의 주향이동성 단층(N40°W/80°SW)으로 발달하고 있다. 이들도 NS 방향의 단열군과 유사하

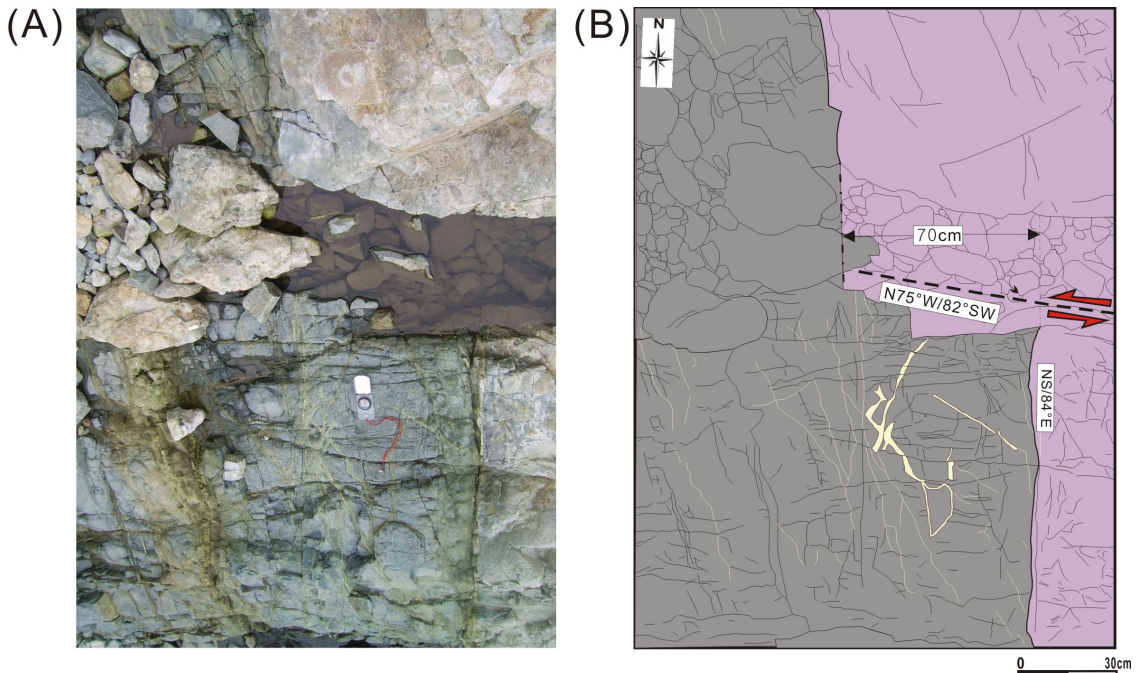


Fig. 3. Cross-cutting relationships between fracture set A (NS/84°E) and a N75°W/82°SW trending fault in andesite. (A) Photograph of the horizontal plane that shows the relationship between fracture set A and the N75°W/82°SW trending fault. (B) Sketch map of the main structural elements near fracture set A and the N75°W/82°SW trending fault. The N75°W/82°SW sinistral fault has N80°E/82°SE trending secondary tension fractures (set B) and cross-cuts the early-developed, N-S trending basic dyke, which formed during E-W extension. Displacement along the sinistral fault is about 70 cm.

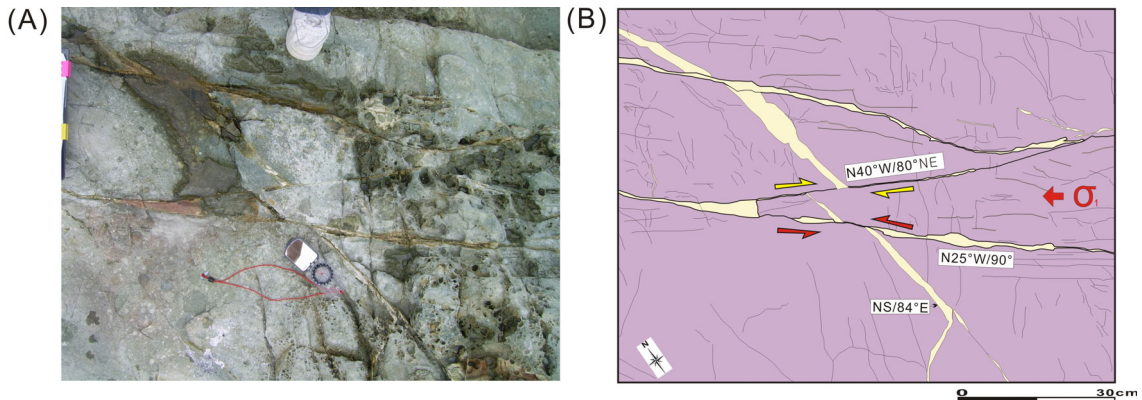


Fig. 4. Cross-cutting relationships between fracture sets A (NS/84°E) and C (N25°W/90°, N40°W/80°NE-conjugate set) in andesite. (A) Photograph of the horizontal plane that shows the cross-cutting relationship between fracture sets A and C. (B) Sketch map of the main structural elements near fracture sets A and C. The N40°W/80°NE and the N25°W/90° conjugate fractures cross-cut the early-developed N-S trending quartz veins, which formed during E-W extension.

게 석영으로 채워져 있으며 폭은 3 cm 정도이고, 1 m 이상의 연장성을 보이기도 한다. 이들에 대한 응력장 해석은 북서-남동방향의 압축응력을 지시하고 있다(단열군 C).

단열군 A와 단열군 C 사이의 선후관계는 단열군 A가 단열군 C에 의해 절단되어 최대 10 cm 가량의 변위를 보이고 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 동서 방향의 인장력은 북서-남동방향의 압축력보다 전기인 것으로 해석된다(단열군 A → 단열군 C).

세 번째 분석면에서는 N40°W/80°NE, N83°W/90°, 그리고 N55°W/70°SW의 태위를 갖는 단열들이 우세하게 관찰된다(그림 5). 이 노두에서는 단층 끝부분의 손상대(tip damage zone)에서 나타나는 말꼬리(horsetail)구조와 세맥들의 유무를 통하여 단층의 재활성 여부를 해석하였다. N55°W/70°SW의 태위를 갖는 단층에서는 단층의 재활성 여부를 판단할 수 있는 나무구조(tree structure; Kim *et. al*, 2001))가 잘 관찰된다. 나무구조는 하나의 단층 끝부분에서 우수향과 좌수향의 운동감각을 모두 보이는 두 개의 말꼬리 구조가 공존하는 구조로써 한 번의 운동에 의해 한 조의 말꼬리 구조가 만들어지고, 이 단층을 따른 반대방향의 운동감각을 가진 단층의 재활성에 의해 말꼬리 구조가 반대쪽에 다시 만들어지는 구조이다. 이러한 경우 이 단층을 따른 최종 변위량은 단층의 중심부에서는 우세한 운동감각의 변위를 나타내지만 단층의 말단부에서는 최

후기의 운동감각에 의한 변위량을 기록하게 된다(그림 6; Kim *et. al*, 2001).

이번 연구지역에서도 이러한 나무구조의 정의와 매우 유사한 구조가 관찰되는데 이 나무구조에서는 우수향의 운동감각을 지시하는 2차 단열들(N40°W/80°NE)에는 1 cm 미만의 폭을 가진 석영질의 세맥들이 발달하고 있지만, 좌수향의 운동감각을 지시하는 2차 단열들(N83°W/90°)에는 세맥들이 발달하고 있지 않는 것을 관찰할 수 있다(그림 5). 이는 우수향의 운동이 발생한 후, 열수의 상승이나 침전에 의해 세맥이 생성되고, 좌수향의 운동이 발생했었던 것으로 해석할 수 있을 것이다. 이를 통하여 북서-남동방향의 압축력이 서북서-동남동 방향의 압축력보다 전기인 것으로 해석할 수 있다(단열군 C → 단열군 D).

네 번째 분석면에서는 NS/84°E, N60°E/70°SE의 태위를 갖는 2개의 단열들이 우세하게 관찰된다(그림 8). 석영질 세맥은 최대폭이 5 cm 정도이며, 남북 방향으로 연장되어 발달하고 있다. 또한 이 분석면에서는 N60°E/70°SE의 좌수향성 주향이동단층이 발달하고 있는데 이는 N41°E/81°SE의 방향으로 발달하고 있는 2차 단열들로부터 최대주응력과 운동감각이 결정되었다.

이 두 단열간의 선후관계는 남북방향으로 발달되어 있는 세맥들을 N60°E/70°SE 방향의 단층이 절단하는 것으로 확인되었다. 이로써 동-서방향의 인

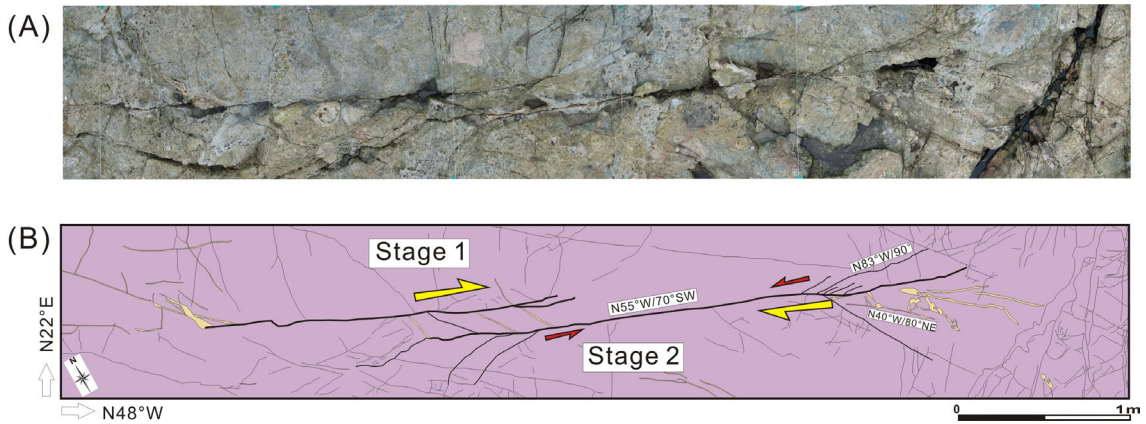


Fig. 5. Reactivated fault (N55°W/70°SW) associated with fracture sets C (N40°W/80°NE) and D(N83°W/90°) in andesite. (A) Photo mosaic of the horizontal plane that shows a reverse reactivated strike-slip fault. (B) Sketch map of the main structural elements associated with the fault reactivation. The N40°W/80°NE set is the first stage-related tension fracture, whereas the N83°W/90° set is the second stage-related tension fracture.

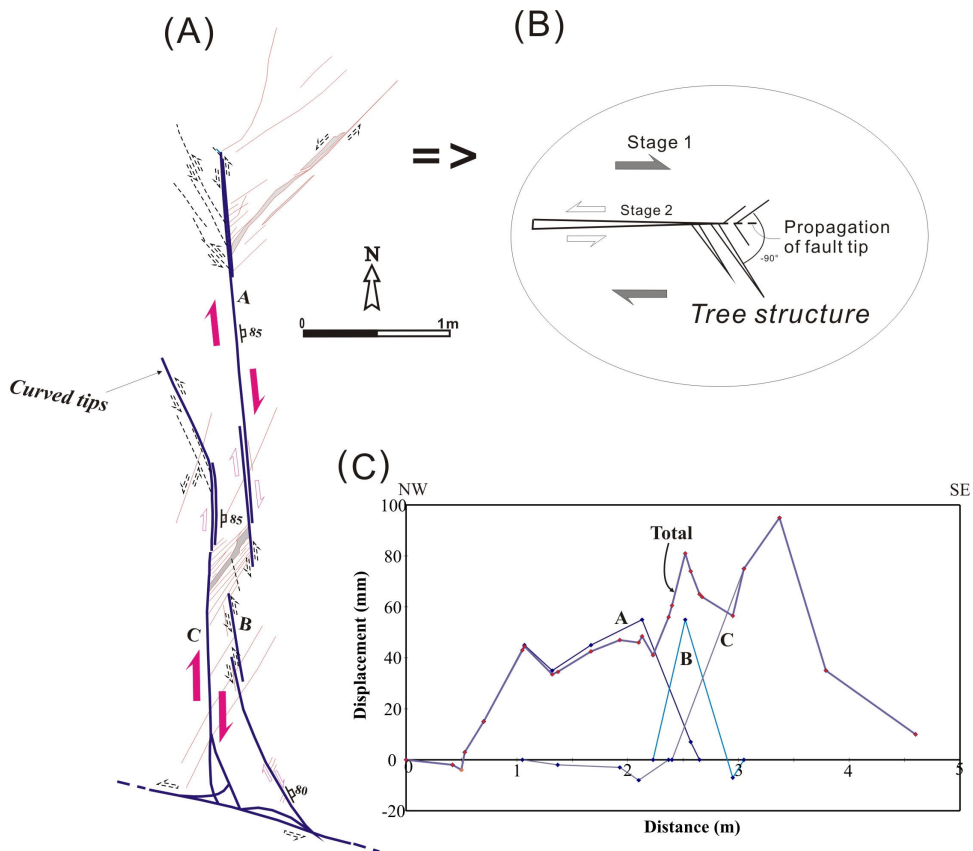


Fig. 6. Characteristics of tree structures (modified from Kim *et al.*, 2001). (A) Map of strike-slip fault showing tip cracks associated with right-lateral slip (thin continuous line) and left-lateral slip (dashed line). (B) Ideal model producing a typical "tree structure" at the tip of a reactivated strike-slip fault. (C) Displacement(d)-distance(x) profile for the reverse reactivated fault. Most segmented faults show low or negative displacement at fault tips. The bold line indicates the sum of the segment displacements at a position along the fault.

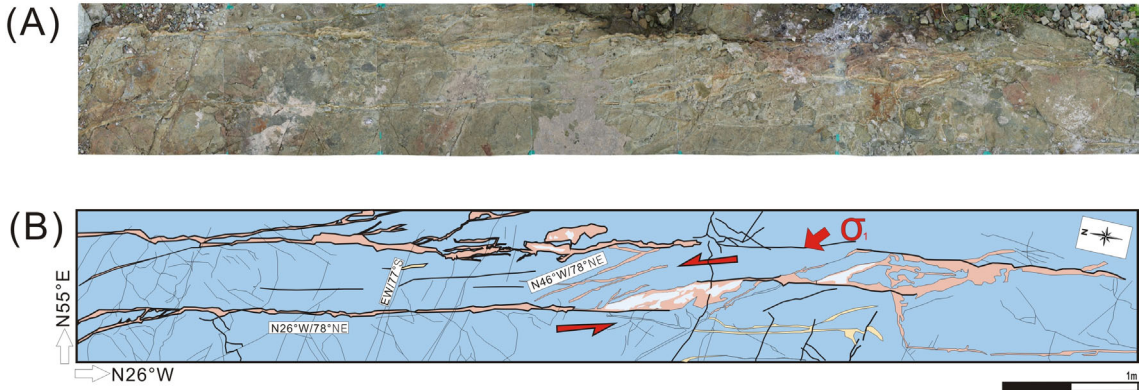


Fig. 7. Characteristics of a linkage zone around fracture set C ($N26^{\circ}W/78^{\circ}NE$) and associated tension fractures ($N46^{\circ}W/78^{\circ}NE$) in andesite. (A) Photo mosaic of the horizontal plane that shows the characteristics of set C. (B) Sketch map of the main structural elements in the vicinity of set C. The $N26^{\circ}W/78^{\circ}NE$ fracture set was activated with sinistral slip sense during NW-SE compression associated with the $N46^{\circ}W/78^{\circ}NE$ tension fracture.

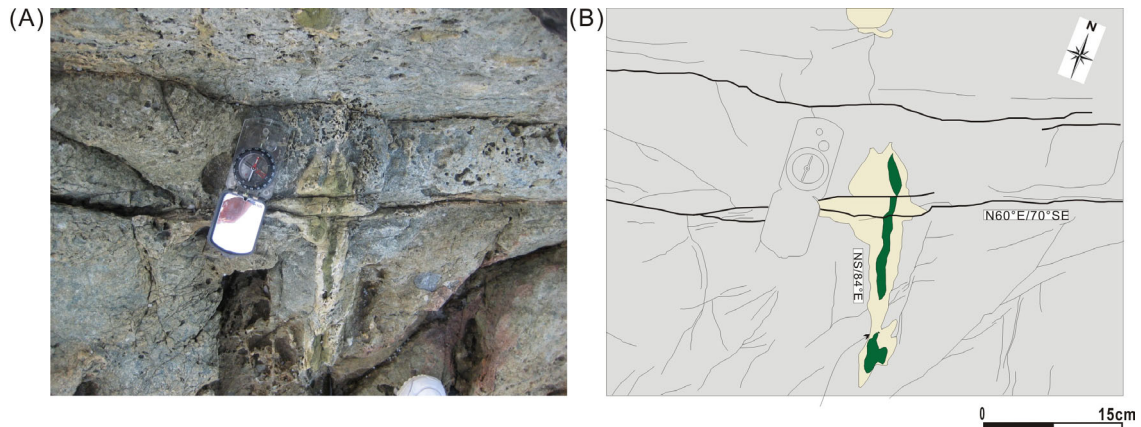


Fig. 8. Cross-cutting relationships between fracture set A ($NS/84^{\circ}E$) and E ($N60^{\circ}E/70^{\circ}SE$) in andesite. (A) Photograph of the horizontal plane that shows the fracture sets A and E. (B) Sketch map of the main structural elements associated with set A and E. The $N60^{\circ}E/70^{\circ}SE$ fractures cross-cut the early-developed N-S trending quartz veins, which formed during E-W extension.

장력은 북동-남서 방향의 압축력보다 전기인 것으로 해석된다(단열군A→단열군 E).

다섯 번째 분석면에서는 $N40^{\circ}W/80^{\circ}NE$, $N60^{\circ}E/70^{\circ}SE$ 의 태위를 가지는 단열군들이 우세하게 관찰된다(그림 9). 북서계열로 발달하고 있는 절리군들은 석영질 세맥들이 충전되어 있으며, 폭은 0.5 cm 미만으로 발달하고 있다. $N60^{\circ}E/70^{\circ}SE$ 의 단열군은 위의 네 번째 분석면에서 해석된 바와 같이 북동-남서방향의 압축력에 의해 형성되었다.

이들 사이의 상관관계는 $N60^{\circ}E/70^{\circ}SE$ 의 방향으

로 발달하고 있는 단층대를 $N40^{\circ}W/80^{\circ}NE$ 의 세맥이 채워져 있는 절리군들이 뚫고 지나가고 있으며, $N60^{\circ}E/70^{\circ}SE$ 방향의 좌수향 주향이동단층에 의한 변위가 관찰되지 않는다. 따라서 북동-남서계열의 압축력은 북서-남동계열의 압축력보다 전기인 것으로 해석된다(단열군E→단열군 C).

여섯 번째 분석면에서는 $N83^{\circ}W/90^{\circ}$, $N80^{\circ}E/82^{\circ}SE$ 의 태위를 가지는 단열군들이 우세하게 관찰된다(그림 10). 단열군 D에 해당하는 $N83^{\circ}W/90^{\circ}$ 의 태위를 가지는 단열들은 세번째 분석면에서 서북서-

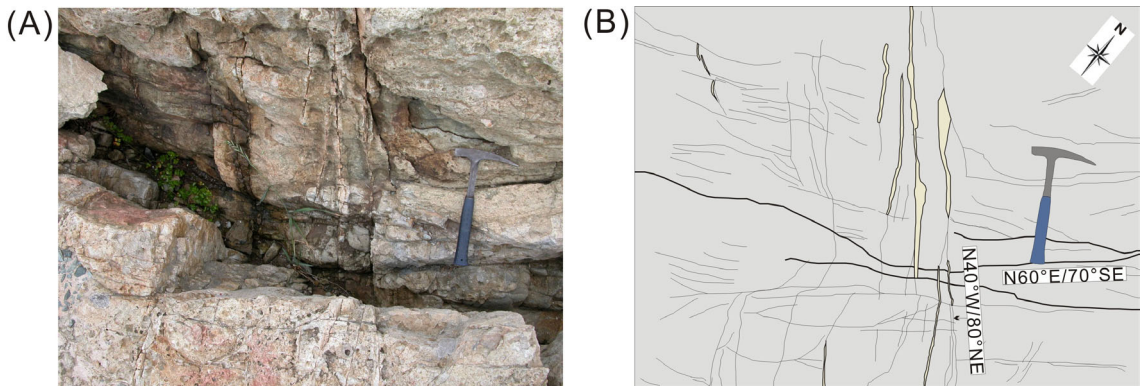


Fig. 9. Cross-cutting relationships between fracture sets C ($N40^{\circ}W/80^{\circ}NE$) and E ($N60^{\circ}E/70^{\circ}SE$) in andesite. (A) Photograph of the horizontal plane that shows the fracture sets C and E. (B) Sketch map of the main structural elements associated with set C and E. The $N40^{\circ}W/80^{\circ}NE$ trending extensional quartz veins and fractures are not displaced by the $N60^{\circ}E/70^{\circ}SE$ sinistral fault.

동남동의 압축력을 지시하는 $N55^{\circ}W/70^{\circ}SW$ 단층대의 2차 인장단열들이다. 그런데 이 단열들의 말단부에는 이들의 운동감각을 추론할 수 있는 더 상위 등급(higher order)의 2차 인장단열이 $N80^{\circ}E/82^{\circ}SE$ 의 태위를 갖고 말꼬리 구조로 발달한다. 이는 서북서-동남동 방향의 단열군들이 다시 동북동-서남서의 응력에 영향을 받아 $N80^{\circ}E/82^{\circ}SE$ 의 2차 인장단열들을 만들며 좌수향으로 활성화한 것으로 보인다. 그림 3에서 보이는 남북계열의 암맥을 절단한 서북서 계열의 좌수향 주향이동단층도 이러한 응력에 의해 활성화한 것으로 추정된다. 따라서 이 분석면에서는 서북서-동남동의 압축력이 동북동-서남서의 압축력보다 전기인 것으로 해석된다(단열군 D→단열군 B).

5. 단열 발달사 해석

앞에서 분석한 바와 같이 단열의 방향과 2차적인 단열, 암맥 또는 세맥의 발달 유무 등 구조요소들의 기하학적 증거를 바탕으로 추정된 단열군들에 대한 최대주응력의 방향과 이들의 발달 순서를 표 1과 그림 11에 종합 정리하였다. 이를 간단히 요약하면 아래와 같다.

- (1) 남-북 방향의 염기성 암맥과 세맥들은 동-서 방향의 인장력에 의해 형성된 것으로 해석된다(단열군 A).
- (2) 동북동-서남서 방향의 단열군은 좌수향의 성

격을 가지며, 북동-남서 방향의 압축력에 의해 형성된 것으로 추정된다(단열군 E).

- (3) 북북서-남남동 방향의 좌수향의 성격을 갖는 단열과 북서-남동 방향의 우수향을 보이는 단열은 북서-남동 방향의 압축력에 의해 형성된 것으로 해석된다 - 공역상 단열의 발달 (단열군 C).
- (4) 북서-남동 방향의 단열은 좌수향의 성격을 가지며, 서북서-동남동 방향의 2차 인장단열이 발달한다. 이는 서북서-동남동 방향의 압축력에 의해 형성된 것으로 추정된다(단열군 D).
- (5) 서북서-동남동방향의 단열군은 좌수향의 운동감각을 가지며, 동북동-서남서 방향의 2차인장단열들이 발달한다. 이는 동북동-서남서 방향의 압축력에 의해 형성된 것으로 추정된다(단열군 B).

6. 토론

6.1 유체유동과 지질구조의 연관성

최근 석유를 포함한 에너지 자원과 광물 자원에 대한 사회적 관심과 경제적 중요성이 강조되면서 유체의 유동을 제어하는 단층 및 단열에 대한 연구가 증가하고 있다(Randolph and Johnson, 1989; Scholz, 1990; Smith *et al.*, 1990; Caine *et al.*, 1993; Antonellini and Aydin, 1994; Forster *et al.*, 1994; Caine *et al.*, 1996; 진광민 · 김영석,

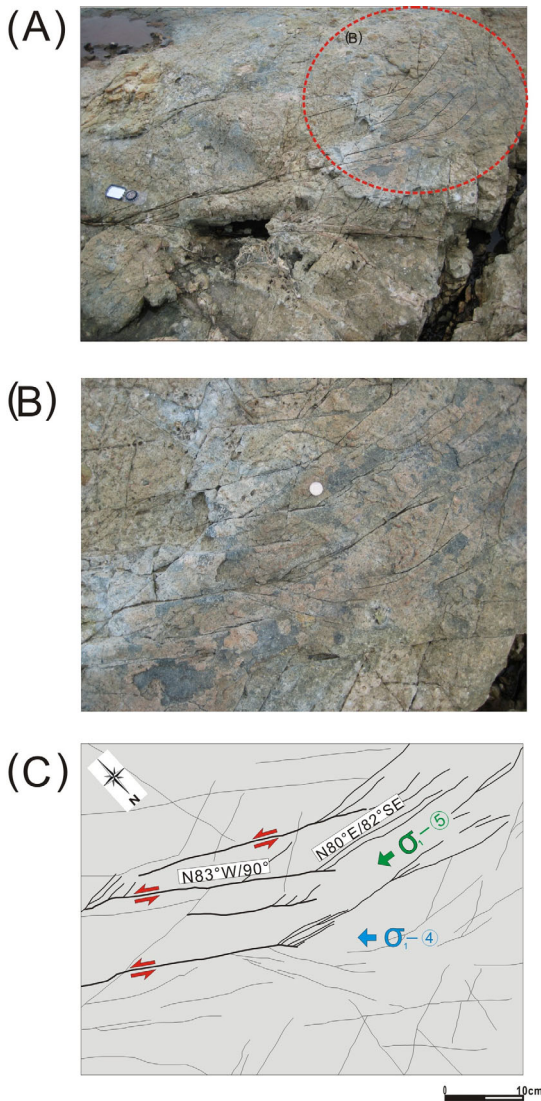


Fig. 10. Relationships between fracture sets D (N83°W/90°) and B (N80°E/82°SE) in andesite. (A) Photograph of the horizontal plane that shows fracture sets C, D and B. (B) Close-up photograph of the fracture sets D and B. (C) Sketch map of the main structural elements around fracture sets D and B. The N83°W/90° set D is a secondary tension fracture associated with the left-lateral movement of the set C, whereas the N80°E/82°SE set B is a higher order secondary tension fracture associated with the set D.

2007). 이와 같은 사회적 중요성과 학문적 관심에 의해 단층 및 단열의 특성과 기하학적인 해석에 대한 연구도 계속적으로 진행되고 있다(Yehuda and Sammis, 2003; Kim *et al.*, 2004; Brogi, 2008).

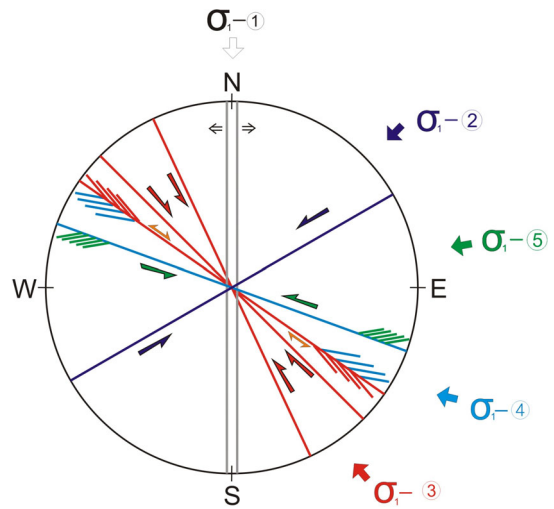















Fig. 11. A summary of inferred stress orientations during the five deformation events in the study area. The numbers in circles indicate the order of the paleostress direction of the maximum principal stress.

따라서 이번 연구에서는 단열들의 특성연구를 통하여 단열들의 상대적인 발달사를 수립하였을 뿐만 아니라 이러한 단열의 유체유동과의 연관성에 대한 연구도 일부 수행하였다. 그림 5에 나타나 있는 나무구조는 이전에 보고된 나무구조(Kim *et al.*, 2001)와 매우 유사한 특성을 보여주었으며, 단열의 발달 방향에 따라 세맥의 존재여부에 차이가 있었다. 이러한 세맥의 존재유무는 광상의 탐사에 있어서 탐사에 초점을 맞추어야 할 단열의 방향성을 인지하고 중점 탐사위치를 선정하는 데에도 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 또한, 그림 7에서 보여주는 바와 같은 주향이동단층에서의 분절 연결부(segment linkage zone)의 인지도 광상의 탐사에 매우 유용하게 활용될 수 있다. 특히, 인장형 연결부(dilational linkage zone)에서는 인장력에 의하여 공간이 확보되어 열수의 이동 및 침전에 좋은 장소를 제공할 뿐만 아니라 단층활동과 동시에 발생하는 확장력에 의해 열수가 이동할 수 있는 조건을 만들어 많은 열수에 의한 광상들이 발달할 수 있다(Sibson, 1989; Jianwei *et al.*, 2002). 또한 이들에 대한 기하학적 분석은 열수의 유입시기를 추정하는 데에도 이용될 수 있는데 그림 5와 그림 7에서 관찰되는 세맥들의 발달은 모두 단열군 C에 해당되는 단열에 발달된 세맥으로써 이러한 세맥이 단열군 D에는 발달하지 않

Table 1. Fracture development history in the study area and correlation with a previous study.

IN THIS STUDY		Geologic Time (non-scaled)				Kim & Park (2006)	
Timing of Tectonic Movements		EON	PERIOD	EPOCH	AGE (Ma)	Timing of Tectonic Events	
<div> (E5) WNW-SES trending left-lateral strike-slip fault (set B)</div> <div> (E4) NW-SE trending left-lateral strike-slip fault -reactivation set C (set D)</div> <div> (E3) NW-SE trending right-lateral strike-slip fault and NNW-SSE trending left-lateral strike-slip fault -conjugate fault set (set C)</div> <div> (E2) NE-SW trending left-lateral strike-slip fault (set E)</div> <div> (E1) Intrusion of N-S trending basic dike and vein(set A)</div>	C E N O Z O I C	T E R T I A R Y	QUATERNARY	HOLOCENE	0.01	 (E6) NNW high-angle r. fault & reactivation of pre-existing n. fault	NNW high-angle r. fault & reactivation of pre-existing n. fault
				PLEISTOCENE	1.8		
			NEOGENE	PLIOCENE	5.3	 (E5) NS r. fault, NE-ENE dextral s.-s. fault & NS folding in Tuff	NS r. fault, NE-ENE dextral s.-s. fault & NS folding in Tuff
				MIOCENE	 (E4) WNW low-angle n. faults & brittle deformation along pre-existing NW shear zone	WNW low-angle n. faults & brittle deformation along pre-existing NW shear zone	
					 (E3) NNE tension joint	NNE tension joint	
					 (E2) EW sinistral shear zone, its brittle reactivation, NE or ENE tension joint with mafic material & NE-ENE n. fault	EW sinistral shear zone, its brittle reactivation, NE or ENE tension joint with mafic material & NE-ENE n. fault	
					OLIGOCENE	23.8	
				PALEOGENE	EOCENE	33.7	
			PALEOCENE		54.8	 (E2) NW sinistral shear zone	NW sinistral shear zone
					65.0	 (E1) NS conjugate tension joint with mafic material	NS conjugate tension joint with mafic material
MESOZOIC	CRETACEOUS		LATE				NW tension joint in K-Sed

는 것으로 보아 단열군 D의 발달 이전에 이 단열들을 따른 열수의 이동과 침전이 있었다는 것을 지시한다.

이와 같이 단열 및 단층은 유체나 열수의 유용한 이동통로가 될 수도 있으며, 때로는 충전물의 특성에 따라 단층을 가로지른 방향으로의 유체유동을 제어하는 장애물의 역할을 할 수도 있다(Caine *et. al.*, 1996; Heynekamp *et. al.*, 1999; Sigda *et. al.*, 1999; Kazuo *et. al.*, 2008). 따라서 단층 및 단열의 발달 방향, 단열들의 기하학적 특징과 충전물을 포함한 단층면의 특성을 자세히 기재하고 해석하는 것은 증가되고 있는 에너지 및 자원의 탐사에 중요한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

6.2 구조변형사와 지체구조와의 연관성

한반도 남동부의 중요한 구조선인 양산단층과 울

산단층 지역에 대한 지체구조적 특성과 이들 단층의 활동성에 대한 많은 연구가 있었으나(채병곤 · 장태우, 1994; 황재하, 1994; 장천중 · 장태우 1998; Kim and Park, 2006), 아직도 이들의 특성을 명확히 규명하지는 못하고 있다. 한반도 남동부에 작용했던 지구조 운동에서 가장 관심이 되고 있는 현상은 동해의 확장운동과 일본 서남부의 지구조 운동이다. 지금까지의 연구결과에서는 대부분 유라시아판과 태평양판, 그리고 필리핀 해판의 상호작용에 의하여 동해의 확장과 일본열도의 회전을 설명하고 있다(Otsuki and Ehiro, 1978; Otofujii *et. al.*, 1985; Celaya and McCabe, 1987; Chough and Barga, 1987; 장천중 · 장태우, 1998).

동해의 확장기 이전의 시기인 50 Ma를 전후로는 인도판 충돌에 의한 태평양판의 이동방향이 북북서

에서 서북서 방향을 회전되면서 한반도 동남부에는 동-서방향의 인장력이 발생하였으며 이로 인해 남북-북북동 방향의 염기성 암맥군이 관입되었다(김종선 외 2005, 손문 외, 2005, 김종선 외, 2007). 연구지역에서 나타나는 남-북방향의 염기성 암맥군들은 이러한 동서방향의 지각 신장에 의해 만들어진 남북방향의 인장 균열을 통로로 관입한 것으로 보인다(표1, event 1).

한 때 당겨-열림형(pull-aprat) 형태의 이론들이 대두되면서(Jolivet, 1988) 동해의 서쪽에 있는 한반도 동남단의 양산단층과 쓰시마 단층으로 대표되는 북북동-남남서향의 우수향 주향이동 단층들을 동해의 전개와 결부시켜 설명하였다(황재하, 1994). 이러한 이론을 바탕으로 하여 황재하(1994)에 의해 복원된 북동-남서향의 압축응력과 이번 연구에서 복원된 북동-남서 방향의 압축응력인 단열군 E에 해당하는 고응력은 이러한 단층운동을 잘 지시해준다고 볼 수 있다 (표1, event 2). 이러한 응력과 단층운동은 한반도의 남동부 지역에서 가장 두드러지고 광범위하게 인지되고 있다. 또한 이 지역에서 인지되는 북서-남동방향의 압축응력(표1, event 3)은 필리핀 해판의 섭입과 연관된 동해의 닫힘과 관계된 것으로 해석되고 있다. 이는 한반도 남동부와 대마도 지역에서 널리 인지되고 있다 (Yoon and Chough, 1995; Fabbri et. al., 1996; Kim and Park, 2006). 제3기 마이오세에는 서북서-동남동방향의 압축응력에 의해 북서방향의 단열군들이 만들어진 것으로 보인다 (표1, event 4).

한반도 남동부는 제4기 동안 동-서 방향의 압축응력이 우세하게 작용하는 환경에 있었으며(표1, event 5), 이와 관련된 많은 제4기 단층들이 역단층성의 운동감각을 보이며 발달하고 있다(최범영 외, 2002; Kim and Park, 2006). 따라서 이번 연구에서 마지막 단열군에 해당하는 동북동-서남서의 압축응력은 아마도 이러한 최후기의 압축응력을 지시하는 것으로 해석된다. 그러므로 이번 연구에서 복원된 부산 지역의 고응력 변화는 근본적으로 양산단층 동측 다른 지역에서 보고된 응력의 변화(Kim and Park, 2006)와 대체적으로 잘 일치하고 있음을 보여준다.

이러한 단열 및 단층의 기하학적인 특성을 이용하여 한반도 동남부의 신기 고응력을 복원하는 것은 원자력발전소와 같은 국가의 주요 산업시설들이 밀

집한 이 지역에서의 단층 활동성과 지반 안전성을 이해하는데 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

7. 결 론

연구지역인 부산광역시 남구 용호동에 위치한 이기대는 경상누층군의 유천층군에 해당하는 안산암질 각력암으로 주로 구성되어 있다. 양산단층의 남동 측에 위치한 부산 일원의 지역적 응력변화를 알아보기 위하여, 이기대 지역에 대한 정밀 야외조사와 대표적인 노두에 대한 정밀 단열분석을 실시하였다. 이러한 단열들의 발달과 변형사에 기초한 고응력의 발달순서는 1) 남-북 방향의 암맥과 세맥을 발달시킨 동-서 방향의 인장력 → 2) 북동-남서 방향의 압축응력에 의한 동북동-서남서 방향의 좌수향 단층 운동과 남-북 방향 단층의 우수향 운동 (양산단층의 우수향 운동과 연관되었을 것으로 추정됨) → 3) 북서-남동 방향의 압축력에 의한 북북서-남남동의 좌수향 주향이동 단층운동과 북서-남동의 우수향 주향이동 단층운동 (양산단층의 좌수향 운동과 연관되었을 것으로 추정됨) → 4) 서북서-동남동 방향의 압축력에 의한 북서-남동 방향의 좌수향 주향이동 단층과 서북서-동남동 방향의 2차 인장단열 → 5) 동북동-서남서 방향의 압축력에 의한 서북서-동남동방향의 좌수향 주향이동 단층운동과 동북동-서남서 방향의 2차 인장단열의 순으로 해석된다. 이는 양산 단층 동측의 다른 지역에 대한 기존의 다른 연구들과 비교해 보았을 때(Kim and Park, 2006; 진광민 · 김영석, 2007), 비교적 잘 일치하는 것으로 해석된다. 따라서 부산 지역도 양산단층 동측의 다른 지역과 매우 유사한 구조변형사를 겪었던 것으로 해석할 수 있다.

이러한 단열들의 특성을 이용한 발달사를 이해하는 것은 연구지역의 동력학적, 지체구조적 특성을 파악하는데 중요한 정보를 제공할 수 있을 것이다. 또한 단열을 따른 유체나 열수의 흐름을 이해하는데에도 많은 도움을 줄 수 있어 이를 활용한다면 석유나 광상과 같은 자원의 개발에도 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

사 사

이 연구는 해양수산부 연안재해 (과제번호 #GFB

2005001)에 대한 한국지질자원연구원(KIGAM)의 “울산-부산 일원의 현생단층 구조 분석”에 대한 위탁과제의 지원과 2007년도 대한민국 교육과학기술부의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. M20702070004-07M0207-00410)임을 밝히며, 이에 감사드립니다. 이 연구를 위하여 야외조사와 실내작업에 많은 도움을 준 부경대학교 지질구조해연구실의 구성원들과 이 논문의 문제점을 꼼꼼히 지적하여 이 논문이 더 나은 모습으로 나올 수 있게 도와주신 한국지질자원연구원의 황재하 박사님과 부산대학교의 손문 교수님에게도 진심으로 감사사를 드린다.

참고문헌

- 강성승, 윤진신, 김영석, 김정민, 2007, 월성지역 단층대에 서 응력 변형사 및 단층 형태 예측. 한국지구시스템공학회지, 44, 95-106.
- 경제복, 장태우, 2001, 양산단층대 북부 유계리일대의 신기 단층운동. 지질학회지, 37, 563-577.
- 김동학, 황재하, 박기화, 송교영, 1998, 부산지질도폭설명서 (1:250,000). 한국지질자원연구원.
- 김영기, 노병돈, 1989, 상부경상누층군에 발달하는 분리면의 특성연구. 지질학회지, 25, 392-404.
- 김영석, 진광민, 2006, 트랜치 단면의 단층변위 자료를 이용해 산정한 유계단층의 지진규모. 지질학회지, 42, 79-94.
- 김인수, 1988, 부산지역 백악기 대대포층에 대한 고자기학적연구: 그의 층서적, 지구조적 의의. 지질학회지, 24, 211-233.
- 김종선, 손문, 김진섭, 김정민, 2005, 한반도 남동부 제3기 암맥군과 화산암류의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대. 암석학회지, 14, 93-107.
- 김종선, 손문, 김인수, 2007, 한반도 남동부 고제3기 암맥군과 지구조적 의미. 한국광물학회, 한국암석학회 공동학술발표회논문집, 68-71 p.
- 김진섭, 윤성효, 1993, 부산일원에 분포하는 화산암류의 암석학적 연구 (I). 암석학회지, 2, 156-166.
- 손문, 함세영, 김인수, 이용희, 정훈, 류춘길, 송원경, 2002, 부산시 금정산 일원의 지하수 유동 해석을 위한 단열계 분석. 지질공학회지, 12, 305-317.
- 손문, 김인수, 2005, 한반도 동남부 신생대 지각변형의 주요 특징과 그 지구조적 의의. 제21차 공동학술강연회 및 춘계학술답사, 7-31 p.
- 이용희, 손문, 류춘렬, 김인수, 최위찬, 2002, 울산단층대를 따라 출현하는 제4기 단층: 개곡단층, 활성리 단층, 진티 단층. 한국지구과학회 2002년도 춘계학술발표 논문요약집, 36 p.
- 이봉주, 최성자, 최위찬, 류춘렬, 1999, 양산 월평지역의 제4기 단층운동 특성. 지질학회지, 35, 179-188.
- 장기홍, 우병길, 이진형, 박옥순, 1990, 경상분지 동부의 백악기 및 전기신생대 층서 및 지사. 지질학회지, 26, 471-487.
- 장천중, 장태우, 1998, 고응력 분석을 통한 양산단층의 구조 운동사. 지질공학회지, 8, 32-49.
- 장태우, 강필중, 박석환, 황상구, 이동우, 1983, 부산-가덕 지질도폭 설명서(1:50,000). 한국동력자원연구원, 2 p.
- 장태우, 2001, 울산단층 동쪽지괴의 제4기 지구조 운동. 지질학회지, 37, 431-444.
- 진광민, 김영석, 2007, 경주시 봉길리 지역의 단열발달사 및 단열밀도 분석. 지질공학회지, 17, 455-469.
- 채병근, 장태우, 1994, 청하-영덕지역 양산단층의 운동사 및 관련 단열발달상태. 지질학회지, 30, 379-394.
- 최범영, 류춘렬, 권석기, 최위찬, 황재하, 이승렬, 이병주, 2002, 포항-울산 지역의 단층구조분석: 활구조 운동에 대한 접근. 지질학회지, 38, 33-50.
- 최범영, 박기화, 박관순, 황재하, 권석기, 2007, 한반도 남동부 제4기 지구조 운동 특성. 한국의 지질논문집, 3, 91-104.
- 최위찬, 이봉주, 최성자, 류춘렬, 이영주, 조동룡, 1999, 양산 단층계의 제 4기 단층 특성. 대한지질학회, 한국석유지질학회, 한국암석학회 제 54차 추계공동학술발표회 초록집, 18 p.
- 황재하, Angelier J., 1992, 경상분지 고응력장 복원 및 구조 운동사: 고령읍 부근의 경우. 지질학회지, 28, 471-482.
- 황재하, 1994, 백악기초 이후 한반도 남동부에 작용한 고응력 복원. 지질학회지, 30, 27-34.
- Antonellini, M., Aydin, A., 1994, Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones: Petrophysical properties. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 78, 355-377.
- Andrea Brogi, 2008, Fault zone architecture and permeability features in siliceous sedimentary rocks: Insights from the Papolano geothermal area (Northern Apennines, Italy). Journal of Structural Geology, 30, 237-256.
- Caine, J. S., Forster, C. B., Evans, J. P., 1993, A classification scheme for permeability structures in fault zones, Eos (Transaction, American Geophysical Union), 74, 677.
- Caine, J. S., James P. Evans, Craig B. Forster, 1996, Fault zone architecture and permeability structure. Geology, 24, 11, 1025-1028.
- Celaya M. and Mocabe R., 1987, Kinematic model for the opening of the Sea of Japan and bending of the Japanese islands. Geology, 15, 53-57.
- Chough, S. K. and Lee, K. E., 1992, Multi-stage volcanism in the Ulleung back-arc basin, East Sea (Sea of Japan). The Island Arc, 1, 32-39.
- Fabbri Olivier, Jacques Charvet, Marc Fournier, 1996,

- Alternate senses of displacement along the Tsushima fault system during the based on fracture analyses near the western margin of the Japan Sea. *Tectonophysics*, 257, 275-295.
- Forster, C.B., Goddard, J.V., Evans, J.P., 1994, Permeability structure of a thrust fault, in the mechanical involvement of fluids in faulting, U.S. Geological Survey Open-File Report, 94-228, 216-223.
- Heynekamp M. R., Goodwin L. B., Mozley P. S., Haneberg W. C., 1999, Control on fault-zone architecture in poorly lithified sediments, Rio Grand Rift, New Mexico: implications for fault-zone permeability and fluid flow. *American geophysical Union*, 113, 27-49.
- Jianwei LI, Zhou Meifu, Xianfu LI, FU Zhaoren & LI Zijin, 2002, Structural control on uranium mineralization in South China: Implications for fluid flow in continental strike-slip faults. *Science in China*, 45, 9, 851-864.
- Jolivet L., 1988, Evolution tectonique et géodynamique du Japon septentrional. *These de Doctrat de l'Univ. Pierre et Marie Curie, Paris*, 361.
- Jolivet, L. and Tamaki, K., 1992, Neogene kinematics in the Japan Arc. In: Tamaki, K., Suyehiro, K., Allan, J., McWilliams, M. (eds), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 127/128, Part 2, 1311-1331.
- Kaneoka, I., Notsu, K., Takigami, Y., Fujioka, K., Sakai, H., 1990, Constraints in the evolution of the Japan Sea based on ^{40}Ar - ^{39}Ar ages and Sr isotopic ratios for volcanic rocks of the Yamato Seamount Chain in the Japan Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 97, 195-204.
- Kazuo Mizoguchi, Takehiro Hirose, Toshihiko Shimamoto, Eiichi Fukuyama, 2008, Internal structure and permeability of the Nojima fault, southwest Japan. *Journal of Structural Geology*, 30, 513-524.
- Kim, Y.-S., Jim R. Andrews, David J. Sanderson, 2001, Reactivated strike-slip faults: examples from north Cornwall. *UK. Tectonophysics*, 340, 173-194.
- Kim, Y.-S., David C.P. Peacock, David J. Sanderson, 2004, Fault damage zones. *Journal of Structural Geology*, 26, 503-517.
- Kim, Y.-S., Park, J. Y., 2006, Cenozoic deformation history and its tectonic significance around Yangnam-Yangbuk area, SE Korea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26, 503-517.
- Kyung, J. B. and Okada, A., 1995, Liquefaction phenomena due to the occurrences of great earthquakes; some cases in central Japan and Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 31, 237-250.
- Lee, K. and Na, S. H., 1983, A study of microearthquake activity of the Yangsan fault. *Journal of Geological Society of Korea*, 19, 127-135.
- Lee, K. and Jin, Y. G., 1991, Segmentation of the Yangsan fault system; geophysical studies on major faults in the Kyeongsang basin. *Journal of Geological Society of Korea*, 27, 434-493.
- Lee, J. I., 2000, Provenance and thermal maturity of the lower Cretaceous Gyeongsang Supergroup, Korea. Unpublished Ph.D thesis, Seoul National University, 129.
- Otsuki, K., Ehiro, M., 1978, Major strike-slip faults and their bearing on spreading in the Japan Sea. *Jour. Phys. Earth*, 26, S537-S555.
- Randolph, L., Johnson, B., 1989, Influence of faults of moderate displacement on groundwater flow in the Hickory sandstone aquifer in central Texas, *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 21, 242.
- Richard H. Sibson, 1989, *Structure and Mechanics of Fault zones in Relation to Fault-Hosted Mineralization*. Australian Mineral Foundation Adelaide, 31-46.
- Scholz, C. H., 1990, *The mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge, Cambridge University Press, 439.
- Sigda, J. M., Goodwin L. B., Mozley, P. S., Wilson, J. L., 1999, Permeability Alteration in Small-Displacement Fault in Poorly Lithified Sediments: Rio Grande Rift, Central New Mexico, in *Faults and Subsurface Fluid Flow in the Shallow Crust* (Haneberg, W., Mozley, P. S., Moore, J. C., Goodwin, L. B. eds.), *AGU Geophysical Monograph Series*, 113, 51-68.
- Smith, L., Forster, C. B., Evans, J. P., 1990, Interaction of fault zones, fluid flow, and heat transfer at the basin scale, in *Hydrogeology of permeability environments*. International Association of Hydrogeologists, 2, 41-67.
- Yehuda Ben-Zion, Charles G. Sammis, 2003, *Characterization of Fault Zones*. *Pure and Applied Geophysics*, 160, 677-715.
- Yo-ichiro Otofujii, Takaaki Matsuda, Susumu Nohda, 1985, Paleomagnetic evidence for the Miocene counter-clockwise rotation of Northeast Japan — rifting process of the Japan arc. *Earth and Planetary Science Letters*, 75, 2-3, 265-277.
- Yoon, S. H., Chough, S. K., 1995, Regional strike slip in the eastern continental margin of Korea and its tectonic implication for the evolution of Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Geological Society of America Bulletin*, 107, 83-97.

투 고 일 : 2008년 0월 00일
 심사 일 : 2008년 0월 00일
 심사완료일 : 2008년 0월 00일