

경주시 봉길리 지역의 단열발달사 및 단열밀도 해석

진광민 · 김영석*

부경대학교 환경지질학과

Fracture Developing History and Density Analysis based on Grid-mapping in Bonggil-ri, Gyeongju, SE Korea

Kwangmin Jin and Young-Seog Kim*

Dept. of Environmental Geosciences, Pukyong National University

연구지역인 경상북도 경주시 봉길리 지역은 백악기 퇴적암을 기반암으로 제3기의 화성암과 암맥들이 관입하여 분포한다. 이 지역에 대한 단열의 발달 특성을 이해하기 위하여 비교적 균질하고 신선한 제3기 화강암에 대한 격자분석을 통하여 단열발달사와 단열밀도 분포에 대한 연구를 실시하였다. 단열군들은 북서-남동방향의 연성 전단미 (*set a*) → 북북서-남남동 방향의 인장단열 (*set d*) → 서북서-동남동 방향의 인장 또는 정단층성 단열 (*set b*) → 북동-남서 방향의 우수향 주향이동성 단열 (*set c*) → 서북서-동남동 방향의 정단층이 재활성된 역단층성 단열 (*set e*)의 순서로 발달되었음이 인지되었으며, 북서-남동방향의 연성 전단미 (*set a*)는 이후에 좌수향으로 취성의 재활성 운동을 겪었음을 보여 준다. 서로 다른 암상에 대한 단열 밀도분석 결과는 단열의 밀도가 암석의 생성시기보다는 암석의 물성에 더 강하게 영향을 받는 것으로 나타났으며, 같은 암상에서의 단열밀도는 단층운동상에서 급격하게 증가함을 보여주었다. 또한 이러한 단열밀도의 변화는 암상의 차이와 관입접촉부를 따른 단층운동뿐만 아니라 암맥의 관입시의 냉각에 의한 절리의 형성에도 일부 원인이 있을 것으로 해석된다. 그러나 그 원인에 상관없이 이러한 단열의 증가는 유체의 유동에 좋은 통로의 역할을 하게 되어 이를 따른 유체의 유동뿐만 아니라 이에 포함된 원소의 이동에도 매우 중요한 기여를 할 것으로 생각된다.

주요어 : 단층, 단열, 단열밀도분석, 단열발달사, 격자분석, 유체유동

The study area, Bonggil-ri, Gyeongju, SE Korea, is composed of Cretaceous sedimentary rocks, and Tertiary igneous rocks and dykes. A research on fracture developing history and density distribution was carried out on well exposed Tertiary granites. The fractures developed in this area have the following sequence; NW-SE trending ductile shear bands (*set a*), NNW-SSE trending extensional fractures (*set d*), WNW-ESE trending extensional or normal fractures (*set b*), NE-SW trending right-lateral fractures (*set c*), WNW-ESE trending reverse fault reactivated from normal faults (*set e*) and NW-SE trending left-lateral faults reactivated from shear bands (*set a*) under brittle condition. According to the result of fracture density analysis, the fracture density in this area depends on rock property rather than rock age, and also higher fracture density is observed around fault damage zones. However, this high fracture density may also be related to the cooling process associated with dyke intrusion as well as rock types and fault movement. Regardless of the reason of the high fracture density, high fracture density itself contributes to fluid flow and migration of chemical elements.

Key words : fault, fracture, fracture density analysis, fracture developing history, grid-mapping, fluid flow

서 론

최근 신월성 원자력발전소와 중저준위 방사성폐기물

처분장의 부지로 확정된 경주시 양북면 봉길리 지역은 대부분 경상누층군의 퇴적암과 제3기의 화강암질암으로 이루어져 있다 (KOPEC, 2002). 특히, 진통을 거듭하다

*Corresponding author: ysk7909@pknu.ac.kr

확정된 방사성폐기물처분장은 많은 국민들의 관심 대상이 되고 있으며, 가장 우려되는 것 중의 하나는 단층과 단열을 통한 지하수의 유동과 이에 수반된 핵종의 이동이라 할 수 있다 (e.g. Bear *et al.*, 1993).

최근의 연구(e.g. Caine *et al.*, 1996; Dholakia *et al.*, 1998)는 지하수나 석유와 같은 유체의 유동이 주로 단층이나 단열에 의하여 제어되고 있음이 밝혀지고 있다. 단열 및 단층은 이러한 유체와 이에 수반된 방사성 핵종과 같은 원소의 이동에 대해 통로역할을 하기도 하고, 단층을 채운 물질의 성질에 따라 장벽으로 작용하기도 한다 (e.g. Caine *et al.*, 1996). 따라서 특정한 지역에서의 유체이동에 대한 특성을 연구하기 위해서는 그 지역에서 발달하는 단층 및 단열의 특성과 그 간극을 채우는 물질에 대한 연구가 매우 중요하다. 이런 연구를 통하여 특정 지역에서의 유체유동에 대한 단층 및 단열의 역할을 이해할 수 있을 것이다.

단층 및 단열의 연구는 먼저 이러한 단층 및 단열 시스템을 기하학적으로 분석하는 것에서부터 시작하는데 최근 이러한 단열계를 3차원적으로 이해하려는 시도가 증가하고 있다(e.g. Cartwright & Lonergan, 1996; Martel & Boger, 1998; Kim *et al.*, 2003; Cowie & Shipton, 1998; Zhang & Sanderson, 1995, 1996a, b, 1998; Sanderson & Zhang, 1999). 실제로 야외에서 관찰되는 단층 및 단열망의 패턴은 간단한 모델링으로 묘사할 수 있는 것보다 훨씬 복잡하지만 서로 유기적으로 연관되어 있다. 따라서 단층의 성장에 관해서도 여러 가지 이론이 제시되어 있지만 (Peacock & Sanderson, 1991; Cartwright *et al.*, 1995; Kim *et al.*, 2003), 명확히 이러한 복잡한 단열과 단층의 성장과 진화를 설명해줄 모델은 아직 제시되지 못하고 있는 실정이다. 그러나 단층과 관련된 손상대 주변에서의 단열밀도의 증가(e.g. Kim *et al.*, 2004a)와 이들 단층 및 손상대에서의 유체유동의 증가에 대해서는 많은 학자들이 대체로 동의하고 있다 (e.g. Leckenby *et al.*, 2005). 따라서 이번 연구에서는 연구지역에서의 단열발달 특성과 이러한 단열의 밀도에 대한 연구를 통하여 이 지역의 유체유동 특성에 대한 기초적인 자료를 제공하고자 하였다.

연구지역의 남쪽에는 월성 원자력발전소가 위치하고 있으며, 서쪽으로는 중저준위 방사성폐기물처분장의 건설예정부지가 위치하고 있어서 이 지역에 발달하는 단층 및 단열의 특성을 이해하는 것은 매우 중요하다. 조사지역은 월성 원자력발전소의 북쪽, 그리고 대왕암의 남쪽 해안지역(GPS 좌표: N35° 43' 35.4", E129° 29'

18.7", 해발고도 7m)으로, 지질은 경상계 퇴적암류를 기반으로 신생대의 화강암류와 이들을 관입한 후기의 산성 및 염기성 암맥으로 구성되어 있다.

이 지역에 대한 지질조사는 1924년 Tateiwa에 의해 처음 수행되었고, 최근 해안선을 따른 제4기 단층들이 보고된 지역이다 (한국자원연구원, 1998; 이봉주 외, 1999; Kim *et al.*, 2004b). 이들 단층 및 제4기 해안단구층에 대한 연대는 ESR (Electrom Spin Resonance) 과 OSL (Optically Stimulated Luminescence)의 방법으로 연구되었다 (한국자원연구원, 1998; 정창식, 2002; Inoue *et al.*, 2002; Ree *et al.*, 2003; Choi *et al.*, 2003). 또한, 연구지역에 대한 지체구조, 퇴적암석학, 암석학적 연구가 여러 연구자에 의해 수행되었다 (e.g. 이현구 외, 1992; Yoon & Chough, 1995; 최범영 외, 2002; 손문 외., 2002). 그리고 최근 Kim & Park (2006)은 이번 연구지역 주변에서 격자분석을 실시하여 이 지역에 대한 변형사를 수립한 바 있다. 따라서 이번 연구에서는 기존의 연구 (Kim & Park, 2006)에서 사용한 단면과는 다른 단면을 선택하여 격자분석을 실시하여 기존의 연구 결과와 비교 및 검정을 시도하여 단열 발달사를 수립하고, 새롭게 단층대와 단열밀도의 관계에 대한 연구를 통하여 단층대가 단열에 미치는 영향을 연구하였다.

지질개요

경상분지에 속하는 연구지역은 백악기 퇴적암을 기반암으로 이를 관입한 제3기의 관입암류들로 구성되어 있고, 북으로는 제3기의 포항분지와 접하며, 서쪽으로는 울산단층과 양산단층이 발달하고 있다. 이 지역의 주요 변형작용은 판내부 변형작용으로 후기 울리고신에서 초기 마이오신 시기에 동해의 확장으로 시작되었다 (e.g. Kimura & Tamaki, 1986; Tamaki, 1988; Kaneoka *et al.*, 1992; Yoon & Chough, 1995). 이러한 동해의 확장과 연관된 제3기 분지들이 경상분지의 동쪽 해안선을 따라 발달하고 있다 (Chough & Barg, 1987). 이 지역의 지질연구는 Tateiwa (1924)에 의한 갑포지질도, 박양대와 율형대 (1968)에 의한 1:50,000 울산도폭, 그리고 김동학 외에 의해 1:250,000 부산지질도 (1998)가 발간되었다.

연구지역의 기반암인 백악기 퇴적암은 불국사 조산운동과 연일변동에 의해 영향 (Kim, 1996; 손문 외, 2002)을 받았으며, 주로 녹회색 세일 내지 흑색 세일

(Tatewa, 1924)이며, 양산단층의 서편에 발달하는 하양층군의 진동층과 대비 된다(김동학 외, 1998). 또한 이 층은 울산도폭 (박양대와 윤형태, 1968)에서는 울산층으로 명명되었다. 울산층은 연구지역에 넓게 분포(Fig. 1) 하며, 회색, 녹회색 및 암회색의 중립질 사암과 세립질의 셰일로 구성되며, 이 지역 울산층의 평균 주향과 경사는 N15°E/45°NW이다. 또한 제3기의 회색 중립질 화강섬록암, 알칼리장석 화강암, 장석반암, 석영안산암과 염기성 암맥이 연구지역 주변에 관입하여 분포 한다(Kim & Park, 2006). 연구지역에 분포하는 화강섬록암과 염기성 암맥에 대한 전암시료의 K-Ar의 연대측정에서는 각각 59.8±1.8 Ma (KOPEC, 2002)와 21.07±0.47 - 20.75±0.49 Ma (이현구 외, 1992)의 연대가 보고되었다. 또한 이들을 제3기의 융회암이 부분적으로 피복하고 있으며, 상기의 모든 층들을 제4기 충적층이 부정합으로 피복하고 있다(Kim & Park, 2006; Fig. 1).

연구방법

연구지역 내에 발달된 각 구조요소들의 3차원적 관계를 분석하기 위하여 비교적 잘 노출되고 신선한 4개의

수평 및 수직단면을 선정하고 이들에 대해 각각 1 m × 1 m의 격자를 설정하였다. 야외에서의 스케치 작업과 실내에서의 사진합성을 통한 단열분석을 결합하여 단열해석을 실시하였고(Fig. 2), 수차례의 현장답사를 통하여 이들 결과를 확인하고 검증하여 전체적인 단열발달사를 해석하였다. 단열발달의 순서는 주로 단열간의 절단관계나 2차적인 단열의 발달 등을 이용하여 해석하였고, 이를 이전의 연구결과와 비교, 검토하였다. 또한 가능한 곳에서는 이들 단열의 운동감각을 인지하려고 시도하였고, 이때 단열의 운동감각의 증거로 사용한 몇 가지 예들을 나열하였다(Fig. 3).

또한 3개의 서로 다른 암상이 관입접촉부를 따라 접하는 한 수직 노두에 대한 단열밀도 분석을 통하여 암석의 물성과 단열의 밀도간의 관계를 분석하였고, 동일한 암상에서의 단열밀도의 변화를 분석하기 위하여 관입접촉부를 가로지른 선밀도 분석을 통하여 암상의 접촉부 또는 단층대가 단열에 미치는 영향에 대해서도 검토하였다. 단열의 밀도는 격자분석을 통하여 격자에 포함된 단열의 개수를 이용하여 밀도에 따라 등급을 분류하고 통계처리를 하였다. 단열의 밀도측정은 컴퓨터를 이용하여 5 cm × 5 cm의 격자를 설정하여 격자 내에

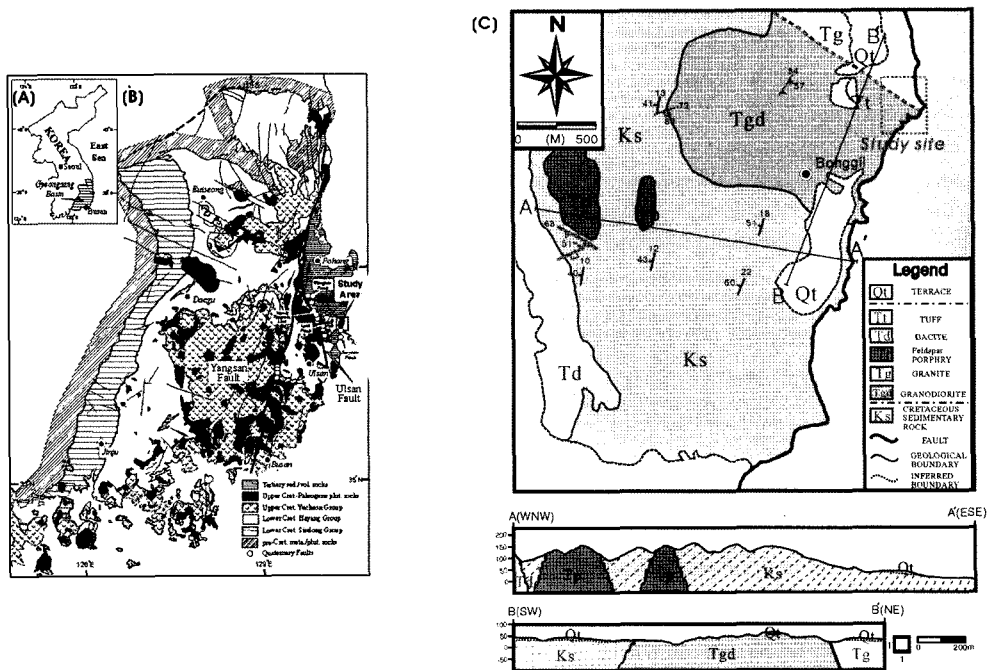


Fig. 1. (A) Locality map of the study area, (B) Regional geological map and major faults around the study area (modified from Lee, 2000), (C) Geological map and cross-sections of the study area (modified from Kim & Park, 2006).

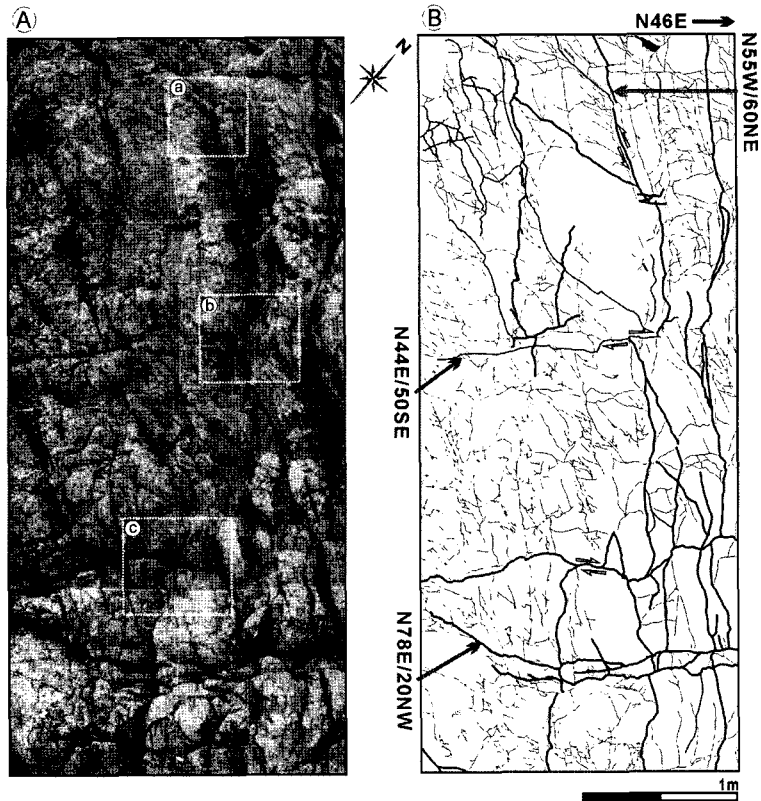


Fig. 2. Detailed grid map on the almost horizontal plane of the section 1. (A) Photo mosaic and locations of sense indicators of the fractures; (B) Sketch map of the structural elements of the section 1.

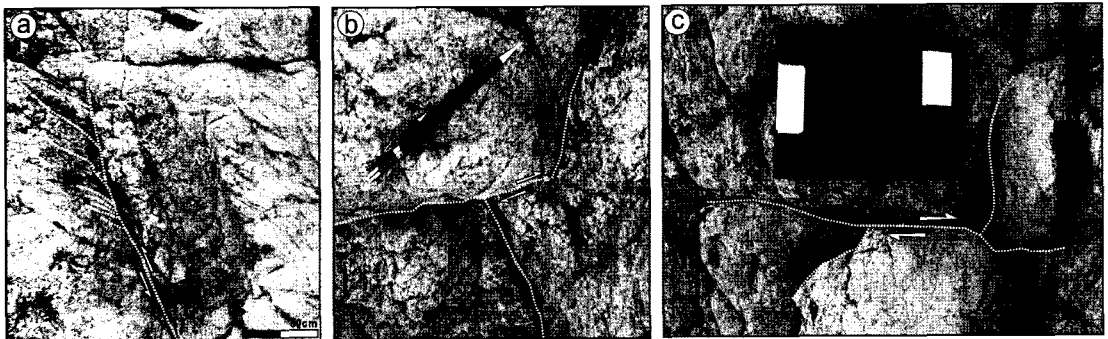














Fig. 3. Slip sense indicators on the almost horizontal plane of the section 1. (a) A left-lateral strike-slip fault shows horsetail structure indicating slip sense. (b) & (c) Right-lateral strike-slip faults show secondary fractures and displacements of pre-existing structures.

포함된 단열의 개수를 계산하는 방법으로 실시하였다. 각 격자 내에 포함된 단열의 개수를 최소 0개에서 8개 까지 5개의 등급(0, 1-2, 3-4, 5-6, 7-8) 으로 분류하여 각 등급별로 다른 색상을 주고 각 등급에 대한 가중치 (0, 0.5, 1, 1.5, 2)를 부가하였다. 각 암상의 영역 내에

서 이렇게 부가된 가중치와 각각의 가중치에 해당하는 격자의 개수를 곱하고 이들을 합한 값에서 각 암상별 총 격자수로 나눈 값을 각 암상의 단열밀도 값으로 정하였다.

$$d = \frac{\sum(n_i \times w_i)}{\sum n_i}$$

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

In this study		Kim & Park (2006)			
Relative sequence	Principal stress	Structural deformation inferred from outcrops	Relative sequence		
6		NW-SE trending high-angle reverse faulting (reactivation of pre-existing normal faults) - <i>set e</i>	6		NNW-SSE trending high-angle reverse faulting and reactivation of pre-existing normal faults
5		NE-SW trending right-lateral faulting - <i>set c</i>	5		NE-SW trending right-lateral faulting and N-S trending reverse faulting
4		WNW-ESE trending fracture: no evidence for slip - <i>set b</i>	4		WNW-ESE trending low-angle normal faulting
3		Brittle deformation (NW-SE to WNW-ESE trending left-lateral faulting) - <i>reactivation of set a</i>	3		Brittle deformation along the pre-existing NW-SE trending left-lateral ductile shear bands E-W trending left-lateral ductile shear banding ⇒ Uplifting, transition from ductile to brittle deformation along the shear bands ⇒ NE-SW to ENE-WSW trending tension joints filled with opaque materials ⇒ NE-SE trending left-lateral ductile shear banding
2		NNW-SSE trending fracture: no evidence for slip - <i>set d</i>	2		NNW-SSE trending high-angle normal faulting
1		NW-SE to WNW-ESE trending ductile shear banding - <i>set a</i>	1		NW-SE trending left-lateral ductile shear banding Intrusion of N-S trending (conjugate set) basic materials

여기서 d 는 각 암상의 단열밀도; n 은 격자 내에 포함된 단열의 개수; m 은 가중치이다.

또한, 같은 암상 내에서 두드러진 단열의 밀도변화를 보여주는 화강섬록암의 영역에 대하여 이러한 밀도차이의 원인을 분석하고자 급격한 변화를 보이는 경계에 대해 수직방향으로 단열의 선밀도 분석을 실시하였다. 선밀도 분석은 서로 평행하고 암맥 관입 면에 수직인 2개의 스캔라인을 1m 간격으로 설정하여 이 스캔라인과 만나는 단열에 대해 암맥의 접촉부로부터의 거리에 대한 누적밀도수로 표시하였다.

단열군들의 특성

단열군들의 단열특성을 분류하고 비교하기 위하여 2개의 수평단면과 1개의 수직단면에 대하여 격자분석을 실시하였다. 이를 통하여 각 단면에서 대표적인 단열군들(*sets*)을 주향, 경사 및 단열특성(주입물질 및 이동감각)에 따라 분류하고 이들을 다른 단면에서의 절리군과 비교하여 전체적인 절리군의 통일된 분류를 시도하였다. 대체적으로 대부분의 두드러진 절리군들은 중복되어 나타나고 있어서 세 단면에서 도출된 각 절리군들의 통합적인 분류가 가능하였으며 이들을 각각 평균적인 방향과 경사에 따라 분류하여 가장 대표적이고 두드러진 5개의 절리군에 대해 상호관계를 분석하고 발달사를 수립하였다. 그리고 이들 연구결과를 기존의 연구결과

(Kim & Park, 2006)와 비교, 검토하였다(Table 1).

각 단면에서 인지된 대표적인 단열군들은 각각 단열도(Fig. 2, 4, 6)와 등면적투영망에 도시하였다(Fig. 8). 3개의 단면에서 대체적으로 일치하고 공통적으로 인지되는 단열에 대해 단열군의 명칭을 정하여 분류하였고, 이들 사이의 관계를 수립하고자 시도하였다.

첫 번째 단면은 평면상의 노두이며, 이 단면에서는 크게 3개의 방향성이 관찰 된다(Fig. 2). 좌수향 운동감각의 주향이동성을 보이는 N55°W/60°NE 방향은 단면의 상중양부에서 말꼬리 구조가 관찰 되며, 이는 좌수향 운동감각을 지시 한다(Fig. 2, 3a). 그리고 기존의 단열들(N55°W/60°NE)을 우수향 운동감각의 주향이동성으로 절단하고 있는 N44°E/50°SE 방향과 N78°E/20°NW 방향이 관찰 된다(Fig. 2, 3b & 3c).

두 번째 단면은 수직상의 노두로서, 정확한 운동감각이 관찰되지 않는 N54°W/60°NE의 단열이 관찰된다. 그리고 이 단면에서는 저각의 정단층성 운동감각을 보이는 N66°W/50°NE 방향(Fig. 4)이 관찰되고, 이 단열들은 기존의 단열들(N54°W/60°NE)을 35~40° 위경사각을 갖고 절단하고 있다(Fig. 5b & 5c). 또한 정확한 운동감각이 관찰되지 않는 N58°W/62°SW 방향과 N54°W/67°NE방향의 단열군들은 공액상절리로 관찰 된다(Fig. 4). 그리고 이 단면에서는 저각의 역단층성의 단열이 발달(Fig. 4)하고 있으며, 역단층의 특징적인 발달 형태인 flat/ramp 구조가 발달하고 있다(Fig. 4). 이런

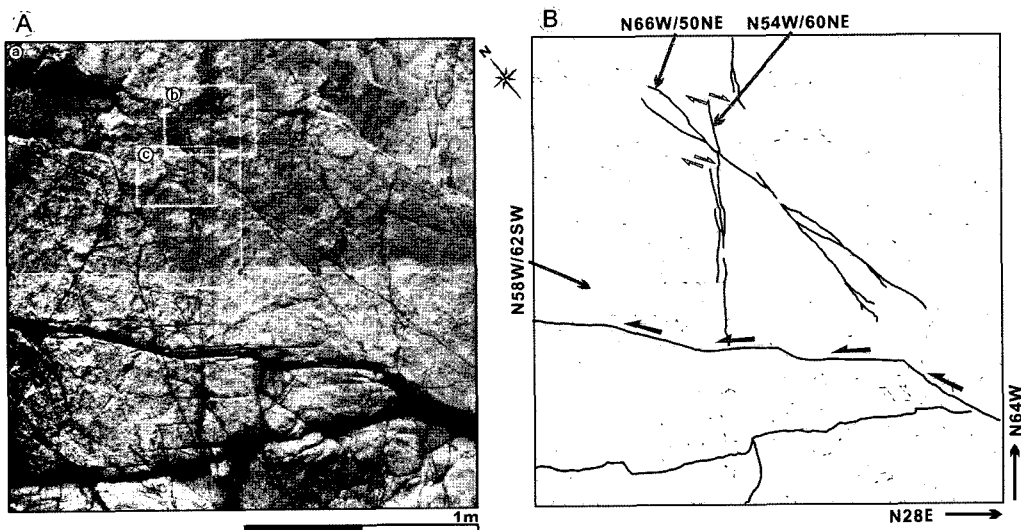


Fig. 4. Detailed grid map on the almost horizontal plane of the section 2. (A) Photo mosaic and locations of slip sense indicators of the section 2; (B) Sketch map of the structural elements of the section 2.

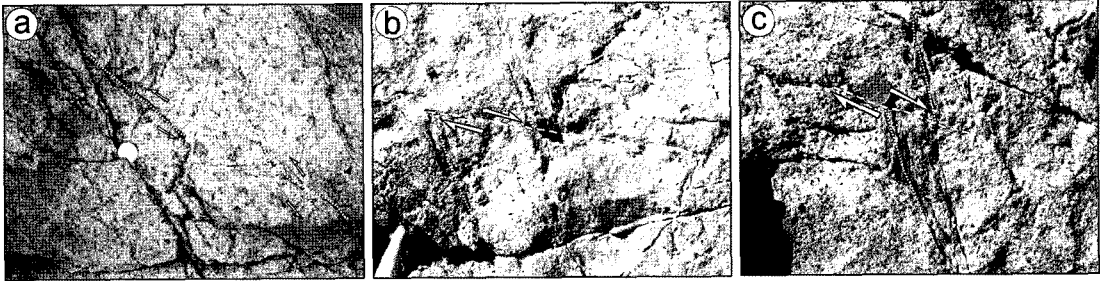


Fig. 5. Slip sense indicators on the almost vertical plane of the section 2. (a) Reverse fault showing extensional fractures in the overstep zone. (b) & (c) Low angle normal faults cross-cutting pre-existing fractures.

단열들은 더 큰 규모의 단층이나 습곡작용에 수반되는 이차구조로 해석 된다(e.g. Hancock, 1985; Dunne & Hancock, 1994). 또한 단면의 연장부에서는 역단층 운동 감각을 보이는 단열들이 관찰 되며, 이 단열들 주변의 overstep zone에서는 역단층의 운동감각을 지시하는 확장성 단열들이 발달 하고 있다(Fig. 5a).

세 번째 단면은 평면상의 노두이며, 이 단면에서는 4 개의 방향성이 관찰 된다(Fig. 6). 우수향 운동감각의 주향이동성을 보이는 N40°E/50°SE 방향이 가장 우세하게 발달하고, 좌수향 운동감각의 주향이동성을 보이는 N56°W/50°NE의 방향과 운동감각이 인지되지 않는 N21°W/87°SW와 N62°W/50°SW의 방향을 갖는 단열들이 발달하고 있다(Fig. 6, 7).

이러한 단열분석을 통하여 크게 대표적인 5개의 단열 군들이 인지되었으며 이들은 각각 N55°W/57°NE (set a), N64°W/50°SW (set b), N42°E/50°SE (set c), N21°W/87°SW (set d), N66°W/50°NE (set e)의 평균적인 자세들을 보여준다. 이들을 각각 set a-e 까지 임의로 명명하고 상호관계를 설정하였다. 연성의 전단띠를 보이는 북서-남동방향의 set a (Fig. 2, 4, 6)는 후기에 다시 취성의 상태에서 북서-남동 또는 서북서-동남동으로 좌수향 운동감각의 주향이동성 운동을 한 것으로 인지되었다. 서북서-동남동의 set b 단열은 운동의 감각을 인지할 수 없었으며(Fig. 4, 6), 가장 우세한 단열인 set c는 북동-남서 방향의 우수향 운동감각의 주향이동성을 보여주었다. 단열 및 주입물질의 절단관계와 2차적인 단열의 발달을 근거로 3개의 단면을 종합하여 살펴본 결과 이들 단열은 (set a) → (set d) → (set b) → (set c) → (set e)의 순서로 단열이 발달한 것으로 해석되었다.

이들 단열군들의 각각에 대한 특징과 기하학적 증거들을 바탕으로 추정되는 응력의 조건들을 요약하면 아래와 같고, 이를 Table 1에 정리하였다.

(1) 북서-남동 방향의 연성 전단띠(set a)는 변형초기에 비교적 심부의 연성상태에서 형성된 것으로 보이며, 후기에 용기하여 취성의 상태에서 재활성된 좌수향 운동감각의 주향이동성을 지시하고 있으며, 이는 서북서-동남동방향의 압축응력에 의해 형성된 것으로 해석된다.

(2) 북북서-남남동 방향의 단열(set d)은 명확한 운동감각을 보여주지 않고 고각을 보이는 것으로 보아 동북동-서남서 방향의 인장력에 의해 형성된 인장단열일 것으로 해석된다.

(3) 서북서-동남동 방향의 단열은 북동-남서 또는 북북동-남남서 방향의 인장력으로 인해 형성된 인장단열 또는 정단층성 단열 (set b)로 발생하여 발달한 것으로 해석된다.

(4) 가장 우세한 단열인 북동-남서 방향의 우수향의 운동감각을 보이는 단열 (set c)은 동북동-서남서 또는 동서 방향의 압축력으로 인해 형성된 것으로 해석된다.

(5) 최후기의 것으로 보이는 북서-남동 또는 서북서-남남동 방향의 단열 (set e)은 이전의 정단층성 단열이 후기에 북동-남서 방향의 압축력에 의해 다시 역단층으로 재활성화 된 것으로 해석된다.

이번 연구를 통하여 독립적으로 기재하고 해석한 이러한 단열들의 발달사는 기존의 연구 (Kim & Park, 2006)와 비교, 검토되었다 (Table 1). 단열의 발달정도나 연구지역의 범위 등이 동일하지 않아서 이들 결과가 정확히 일치하지는 않았지만 대체적인 단열들의 특성과 발달순서는 비교적 잘 일치하고 있음을 보여준다.

단열밀도 분석

암상에 따른 단열의 면밀도 분석

단열밀도 분석을 실시한 단면은 수직단면으로 이 단면에서는 크게 4개의 방향성 (N40°W/64°SW, N84°E/

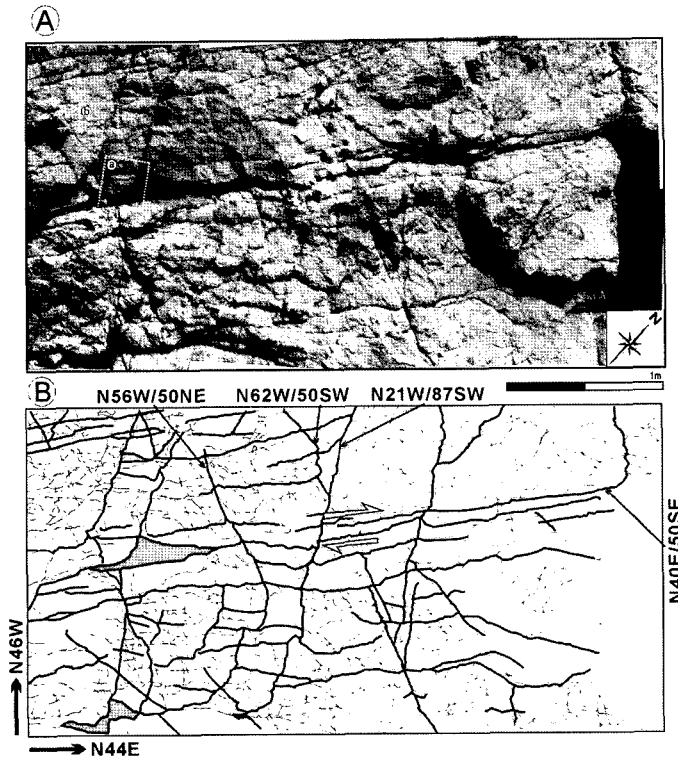


Fig. 6. Detailed grid map on the almost horizontal plane of the section 3. (A) Photo mosaic and locations of slip sense indicators of the section 3; (B) Sketch map of the structural elements of the section 3.

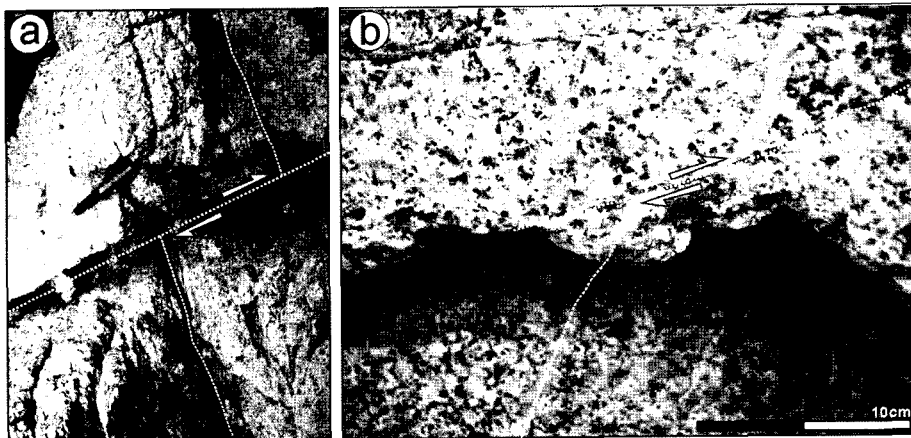


Fig. 7. Slip sense indicators on the almost horizontal plane of the section 3. (a) & (b) Right-lateral strike-slip faults cross-cutting pre-existing structures.

50°NW, N56°W/24°NE, N52°E/68°NW)이 관찰된다 (Fig. 9). N40°W/64°SW의 방향은 염기성 암맥의 관입 방향으로 단열군들 중 북동-남서 방향의 인장력으로 인해 인장단열 또는 정단층성 단열 (set b)로 발생하여 발

달하고, 이 단열을 따라 염기성 암맥이 관입한 것으로 해석된다. 이현구 외 (1992)은 K-Ar의 연대측정으로 이 지역의 염기성 암맥의 관입연대를 21.07±0.47 - 20.75±0.49 Ma로 보고하였다. N56°W/24°NE 방향의 단열

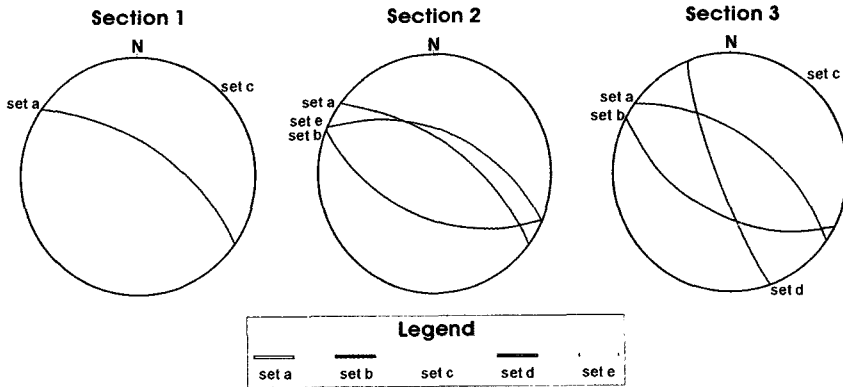


Fig. 8. Equal-area stereographic projections show fracture sets in each section.

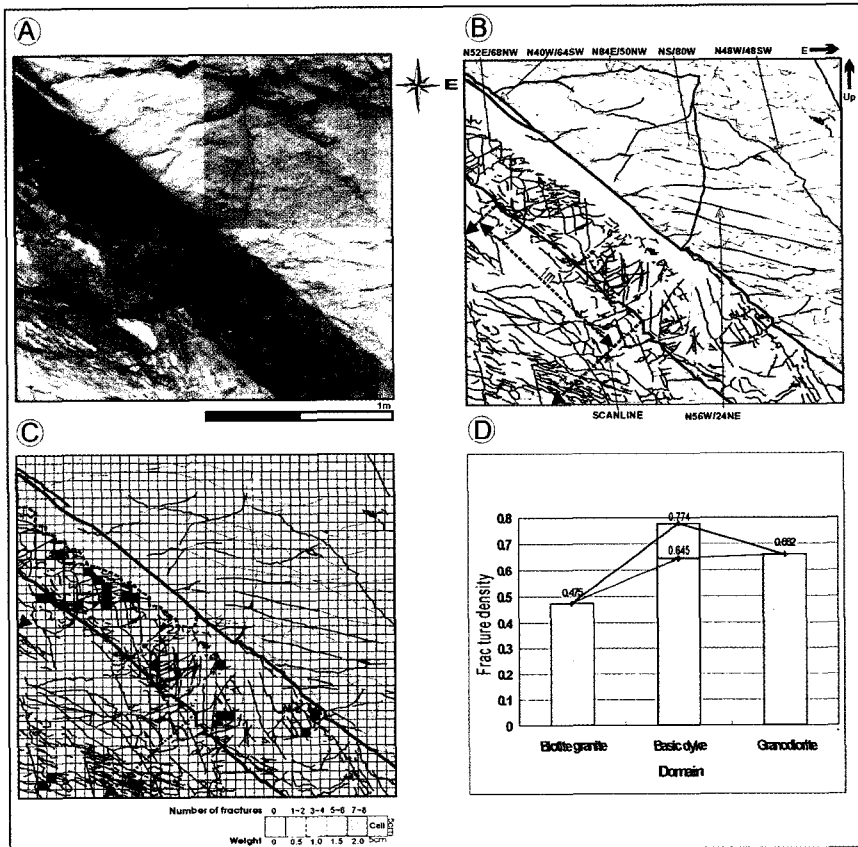


Fig. 9. Fracture density analysis on the almost vertical plane of the section 4. (A) Photo mosaic of the section 4, (B) Sketch map of the structural elements of the section 4, (C) 5 cm × 5 cm grids and weighted fracture densities, (D) Fracture density graph for each rock type. The shaded gray area indicates calibrated area developed by irregular surface.

(set a)은 서북서-동남동 방향의 압축응력에 의해 형성된 것으로 해석된다. 그리고 N52°E/68°NW 방향의 단열은

상위의 단열군 (set a-e)에서는 관찰되지 않으나, Kim & Park (2006)은 이 방향의 단열군을 북동-남서 방향의

인장력에 의해 형성된 인장단열로 그들의 연구지역에서 세 번째 형성된 단열균으로 보고하였다(Table 1).

이 단면에서 암석이 접촉하고 있는 관입접촉부에서의 접촉관계, 암석의 관입관계, 그리고 포획암의 발달형태(Fig. 10a) 등을 종합하여 해석한 결과 세 암석이 접촉하고 있는 부분에서의 암석의 관입순서는 흑운모 화강암 \Rightarrow 염기성 암맥 \Rightarrow 화강섬록암의 순서인 것으로 해석되었다. 그런데 이들에 발달한 단열밀도는 암석의 관입순서와는 무관하게 나타났다. 이러한 차이점을 정량적으로 비교하고 그 원인을 분석하기 위하여 각 암상별 단열밀도 분석을 실시하였고(Fig. 9), 각 암상에 대한 박편의 현미경관찰을 통해 암상의 특성을 구분하고자 하였다(Fig. 10b, 10c, 10d).

노두상의 암상의 상태(Fig. 9a, 9b)와 현미경관찰(Fig. 10b, 10c, 10d)에서도 나타나는 바와 같이 이 세 암석들은 뚜렷하게 구분되는 암석학적 특징을 보여주고

있다. 따라서 이러한 암석학적 특성의 차이가 비슷한 응력에 대해 역학적으로 다르게 반응하여 서로 다른 취성의 반응을 유도한 것으로 해석된다. 박편의 현미경관찰에서는 화강섬록암의 박편에서 흑운모 화강암이나 염기성 암맥들에 비해 파열된 입자들이 더욱 뚜렷하게 관찰된다(Fig. 10c). 이는 화강섬록암이 상대적으로 더 오래된 암석이거나 내부변형에 더 약한 암상일 수 있음을 암시하는 것으로 보인다.

이들 암상에 대한 단열밀도는 일반적으로 염기성암맥에서 상대적으로 높은 값을 보여주었으며(Fig. 9d), 이들은 아마 얇은 암맥의 급격한 냉각과도 연관이 있을 것으로 해석된다. 또한 후기의 관입접촉부를 따른 단층운동의 재할 가능성도 있을 것으로 생각된다. 이러한 해석은 아래의 선밀도 분석으로부터 추정이 가능하다. 염기성 암맥의 좌상부에서의 낮은 밀도분포는 염기성 암맥의 불규칙한 분리로 인한 단면의 굴곡 때문에 발생한

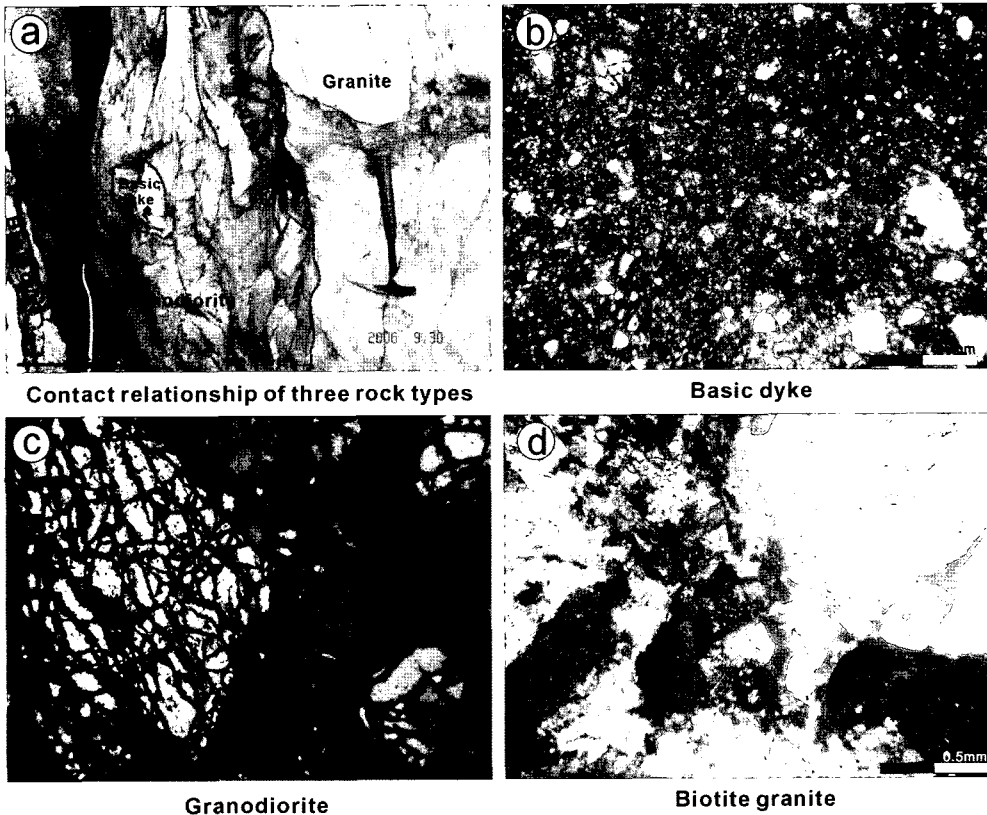


Fig. 10. Contact relationship among three rock types around the section 4 and microscopic photographs of each rock type. (a) Photograph of contact relationship among three rock types, (b) Microscopic photograph of the basic dyke, (c) Microscopic photograph of the granodiorite which shows highly fractured texture, (d) Microscopic photograph of the biotite granite.

현상으로 이 부분에 대한 보정을 실시한 단열밀도 값은 더 높게 계산되었다($d=0.774$; Fig. 9d). 따라서 이 세 암상 사이의 밀도분석은 Fig. 9에서 보여주는 바와 같이 염기성의 암맥에서 가장 높은 값을 보여주었으며, 이는 암상 자체의 고유의 물성차이뿐만 아니라 이들의 냉각 과정 및 단층으로부터의 위치와도 연관이 있을 것으로 해석된다.

선밀도 분석

앞에서 분석한 암상별 단열밀도 분석과는 독립적으로 또 다른 단열밀도 분석을 수행하였다. 이는 같은 암상인 화강섬록암 내에서의 단열밀도가 급격하게 변하는 현상이 관찰되었기 때문에 그 원인을 분석하고자 실시하였다. 이를 위해 화강섬록암과 염기성 암맥의 관입접촉면에 수직인 방향으로 각각 190 cm와 150 cm의 2개의 스캔라인을 1 m 간격으로 설정하여 단열선밀도 분석을 실시하였다.

염기성암맥과의 접촉부로부터 단열의 누적개수를 그래프에 도시한 결과 이들 단열밀도 그래프는 염기성암맥과의 접촉부로부터 각각 100 cm와 90 cm 거리에서 그래프에서 보여주는 바와 같이(Fig. 11) 급격한 기울기의 변화를 보여주었다. 이는 이 경계를 중심으로 단열의 밀도가 급격하게 감소하면서 변화함을 의미한다. 따라서 이 경계를 따라 횡적으로 면밀히 추적을 해본 결과 이 경계는 이 관입접촉부와 거의 평행하게 발달하고 있었고, 식별이 가능한 경계면으로 존재하고 있었다. 이러한

접촉부에서의 단열밀도의 증가는 후기에 관입한 것으로 해석되는 화강섬록암의 냉각접촉부를 따른 단열의 증가를 무시할 수는 없지만 이러한 확실한 단열밀도 변화의 경계가 존재하는 것은 이 접촉부를 따른 단층운동의 결과일 것으로 해석이 된다. 즉, 이 경계가 관입암류의 관입 이후에 이 관입접촉부를 따라 발생한 단층운동에 의해 단열의 밀도가 증가한 단층손상대(fault damage zone; e.g. Kim *et al.*, 2004a)를 지시하는 것으로 해석하였다. 따라서 여기서의 단층의 규모는 손상대의 폭이 평균 90-100cm 정도가 되는 단층인 것으로 해석된다.

이러한 단층 손상대에서의 강한 단열밀도의 증가와 변형작용은 이미 많은 이전의 연구에서 보고가 되었고(e.g. Kim *et al.*, 2004a; Micarelli *et al.*, 2006a, b), 이들 손상대는 유체유동에 아주 좋은 통로의 역할을 하는 것으로 알려져 있어서(Nelson *et al.*, 1999; Caine & Forster, 1999; Micarelli *et al.*, 2006a, 2006b) 수리지질학(Forster & Evans, 1991; Haneberg, 1995; Lopez & Smith, 1995; Caine *et al.*, 1996; Zhang & Sanderson, 1996b; Matthai *et al.*, 1998), 탄화수소의 이동(Fisher & Knipe, 1998), 폐기물 처분장(Ferrill *et al.*, 1999), 광상배태(Guilbert & Park, 1985; Sibson *et al.*, 1988), 지진의 생성과 전파(Sibson, 1989; Li *et al.*, 1988) 등의 다양한 분야의 연구에 응용되고 있다. 따라서 연구지역과 같이 방사성관련 시설이 존재하는 지역에서는 유체의 유동과 이를 따른 핵종의 이동특성이 중요하게 고려되어야하기 때문에 이와 같은 관입접촉부

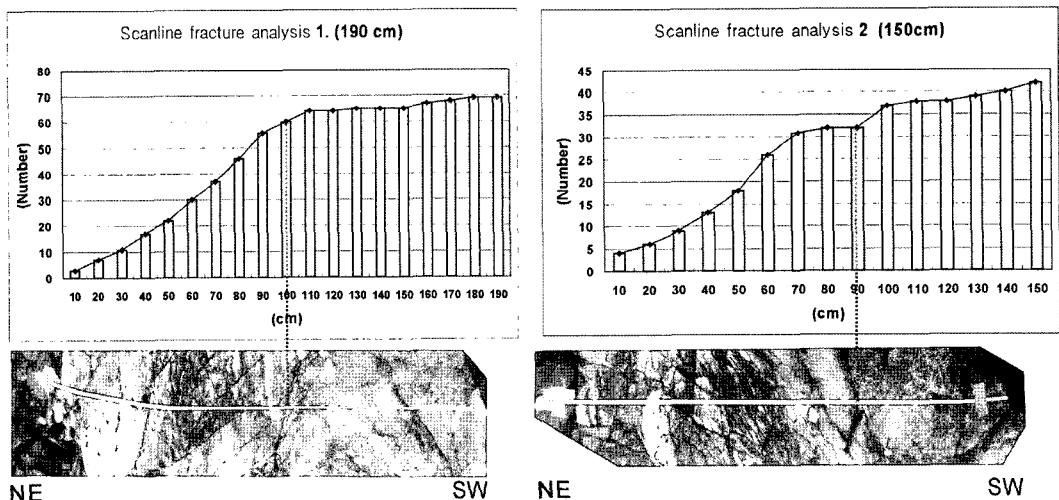


Fig. 11. Scanline analysis of the fracture density on the section 4. The two subparallel scanlines are drawn perpendicular to the intrusive contact of the basic dyke. The density is abruptly decreased around 90-100cm distance from the contact.

나 단층 및 단층손상대와 관련된 보다 정밀한 조사가 절실히 요구된다.

토 론

최근 지하수나 석유와 같은 유체의 유동이 주로 단층이나 단열에 의해 제어 된다는 연구들이 많이 보고되고 있다(e.g. Caine *et al.*, 1993; Caine *et al.*, 1996; Dholakia *et al.*, 1998, Randolph & Johnson, 1989; Smith *et al.*, 1990; Scholz, 1990; Forster *et al.*, 1994; Antonellini & Aydin, 1994; Newman & Mitra, 1994; Goddard & Evans, 1995). 또한, 단층과 단열들은 다양한 규모에 걸쳐 암석의 투수성에 영향을 준다(Leckenby *et al.*, 2005). 따라서 최근 이런 단층과 단열에서의 투수성에 대한 야외연구(e.g. Gudmundsson, 2001; Wibberley, 2002)와 모델링을 통한 연구(e.g. Zhang & Sanderson, 1995; Gudmundsson, 2001; Jourde *et al.*, 2002)들이 활발히 수행되고 있다.

실제로 야외에서 관찰되는 단층 및 단열의 기하학적인 형태는 간단한 모델링으로 묘사할 수 있는 것보다 훨씬 복잡하지만 서로 유기적으로 연관되어 있다. 단층 및 단열의 기하학적인 형태를 연구하려는 노력은 지속되고 있다. Barton *et al.*(1995)은 유체 유동이 높은 단열은 특정한 방향성을 갖는다고 보고하였다. 즉, 이는 단층과 단열에 의해 제어되는 유체는 단층과 단열의 특정한 방향을 따라 이동하는 것을 지시한다. Zhang & Sanderson(1995, 1996a, b, 1998)과 Sanderson & Zhang(1999)는 단열 투수성 진화의 모델링을 통하여 단층 및 단열의 방향성과 유체의 흐름의 관계를 연구하였다. 이들은 단층 및 단열망 내에서 단층의 변위와 국부적인 응력변화의 결과로 형성된 응력은 단층 및 단열을 제어하고 이런 단층과 단열을 따라 유체의 유동이 제어된다고 주장하였다. 이번 연구에서는 연구지역 내에 발달하는 단층 및 단열의 방향성을 측정하고, 각 단열군들의 절단관계로 단열군들의 발달사를 이해하고 단열밀도를 분석함으로써 유체 유동에 대한 영향성을 검토하였다.

그리고 Leckenby *et al.* (2005)는 유체의 흐름이 단열의 방향성과 밀도보다는 단열의 두께에 좌우된다고 보고하였다. 또한 이들은 1) 주향이동단층에서 압축되는 부분(transpression)에서의 유체유동은 단열밀도가 높은 분절의 연결부 보다 각각의 분절들을 따라 유체의 유동이 집중되며, 2) 확장성 단층 및 단열부(transtension)에서는 단열밀도와 상관없이 유체의 유동이 집중되고, 3)

정단층계에서는 단층들의 연결부인 릴레이 램프(relay ramp) 부분의 높은 단열밀도와는 상관없이 유체의 유동이 각각의 단층 분절들을 따라 집중된다고 보고하였다. 연구지역 내에는 주향이동단층, 정단층과 역단층이 모두 관찰되며, 각 단층과 단열들 사이에서는 연결대(e.g. overstep zone, pull-apart)가 관찰된다. 이러한 연결대와 연결대 내의 단열들의 특성을 연구함으로써 유체 유동이 낮은 곳과 집중되는 곳을 예측할 수 있을 것이다.

그러나 모든 단층과 단열대를 따라 유체유동이 원활하게 이동하는 것은 아니며, 유체의 유동을 제어하는 몇 가지 중요한 요인들이 있다. 일반적으로 단층작용에 의한 마찰력에 의해 형성된 단층점도 및 단층비지 등이 단열사이를 채우면서 단층에 수직인 방향의 유체유동에 대해 장벽의 역할을 하여 유체의 유동을 방해하기도 한다(Sigda *et al.*, 1999). Caine & Forster(1997)는 야외 조사를 바탕으로 단층대를 총 4가지로 분류하였고, Caine & Forster(1999)는 이 유형을 기준으로 유체의 유동 방향을 단층면에 수직방향, 단층면에 평행한 방향을 다시 단층의 변위와 평행한 방향과 직각인 방향의 총 세 가지로 분류하여 유체의 유동에 대한 3차원 모델링을 실시하였다. 이 결과 유체의 흐름은 단층면과 평행한 두 방향에서 높게 측정되었고 단층면에 직각인 방향으로의 흐름은 상대적으로 낮게 측정된 것으로 보고하였다. 연구지역에서 면밀도 분석(Fig. 9)과 선밀도 분석(Fig. 11)을 한 노두에서는 암상의 차이, 관입에 따른 수축작용과 단층작용 등에 따른 단열밀도의 차이가 나타난다. 또한 박편사진(Fig. 10)에서도 박편 내 입자들의 단열발달 상태가 노두상에서의 단열밀도와 비교적 잘 부합하며, 이런 단층작용 및 단열의 발달이 유체유동의 통로가 될 수 있고, 단층작용에 의해 형성된 단층점도 및 단층비지 등은 유체의 유동에 장벽 역할을 할 수 있다. 따라서, 단층 및 단열이 발달하는 지역에서의 유체유동을 고려할 때에는 단층 및 단열의 발달방향, 그리고 단열들의 기하학적 특징과 충전물을 포함한 단층의 발달 특성을 면밀히 검토하고 이해하는 것이 매우 중요하다.

연구지역은 방사성폐기물처분장과 신월성 원자력발전소의 부지 인근 지역으로서 특히, 단층과 단열을 통한 지하수의 유동과 이를 따른 핵종의 이동특성이 매우 중요하다(e.g. Bear *et al.*, 1993). 따라서 유체의 유동과 이에 수반된 핵종의 이동특성을 명확히 파악하기 위해서는 연구지역 내에 발달하는 단층과 단열의 발달특성을 정밀 야외조사와 모델링을 통하여 이해하는 것이 매우 중요하다고 하겠다.

결 론

연구지역인 경상북도 경주시 봉길리는 백악기 퇴적암을 기반암으로 제3기의 관입암류들이 분포하고 있으며, 이 지역에 발달하는 제3기 화강암에 대한 격자분석을 통하여 이 암석의 관입이후의 단열발달사와 단열밀도 분포에 대한 연구를 실시하였다. 단열은 북서-남동방향의 연성 전단띠(set a) → 북북서-남남동 방향의 인장단열(set d) → 서북서-동남동 방향의 인장 또는 정단층성 단열(set b) → 북동-남서 방향의 우수향 주향이동성 단열(set c) → 서북서-동남동 방향의 정단층이 재활성된 역단층성 단열(set e)의 순서로 발달되었음이 인지되었으며, 북서-남동방향의 연성 전단띠(set a)는 이후에 좌수향으로 취성의 재활성 운동을 겪었음을 보여 준다.

서로 다른 암상에 대한 단열 밀도분석 결과는 단열의 밀도가 암석의 생성시기보다는 암석의 물성에 더 강하게 영향을 받는 것으로 나타났으며, 같은 암상에서의 밀도의 변화는 단층선상대에서 매우 높은 단열밀도를 보여 주었다. 그러나 이러한 단열밀도의 변화는 암상의 차이와 관입접촉부를 따른 단층운동뿐만 아니라 암맥의 관입시의 냉각에 의한 절리의 형성에도 원인이 있을 것으로 해석된다.

그러나 그 원인에 상관없이 이러한 단열의 증가는 유체의 유동에 좋은 통로의 역할을 하게 되어 지하수의 유동뿐만 아니라 이를 따른 핵종의 이동에도 매우 중요한 기여를 할 것으로 사료된다. 따라서 이러한 단층 및 단열의 특성을 파악하는 연구는 방사성폐기물처분장과 원자력발전소 건설부지 등의 부지타당성 조사뿐만 아니라 혹시 있을지도 모를 핵종 누출에 대한 모델링과 사후 대책을 수립하는 데에도 큰 도움이 될 것으로 생각된다.

사 사

이 연구는 경주 방사성폐기물처분장의 부지기초조사의 일환으로 수행되었으며, 학진 신진교수연구지원사업(과제번호: C00286)과 부경대 BK21 지구환경시스템사업단의 지원에 의해 논문으로 발간되게 되었다. 이에 감사를 드린다. 특별히 이 연구를 위해 많은 지원과 조언을 하여 주신 한국지질자원연구원의 황재하 박사님에게 심심한 사의를 표하며, 아외작업과 실내작업을 성실히 수행해준 부경대 지질구조해연구실의 고경태, 양석준, 최진혁, 이민주 학생에게도 진심으로 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- 김동학, 황재하, 박기화, 송교영, 1998, 부산지질도폭설명서 (1:250,000), 한국자원연구원.
- 박양대, 윤형대, 1968, 한국지질도(1:50,000), 울산도폭, 국립지질조사소, 5.
- 손문, 정혜윤, 김인수, 2002, 한반도 남동부 연일구조선 남부 일원의 지질과 지질구조, 지질학회지, 38, 175-197.
- 이봉주, 류충렬, 최위찬, 1999, 경주시 양남면 일대의 제4기 단층, 지질학회지, 35, 1-14.
- 이현구, 문희수, 민경덕, 김인수, 윤혜수, Itaya, T., 1992, 포항 및 장기분지에 대한 고지자기, 층서 및 구조연구: 화산암류의 K-Ar 연대, 광산지질, 25, 337-349.
- 정창식, 2002, 해안단구에 대한 연대측정, 대한지질학회지, 38, 279-291.
- 최범영, 류충렬, 권석기, 최위찬, 황재하, 이승렬, 이병주, 2002, 포항-울산 지역의 단층 구조 분석: 활구조 운동에 대한 접근, 대한지질학회지, 38, 33-50.
- 한국자원연구원, 1998, 활성단층 조사평가 연구: 한반도 동남부 지역, 301.
- 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.
- Barton, C. A., Zoback, M. D., Moos, D., 1995, Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock, Geology, 23, 683-686.
- Bear, J., Tsang, C. -F., de Marsily, G., 1993, Flow and contaminant transport in fractured rock, Academic Press, San Diego, 560.
- Caine, J.S., Forster, C.B., Evans, J.P., 1993, A classification scheme for permeability structures in fault zones, Eos (Transactions, American Geophysical Union), 74, 677.
- Caine, J. S., Evans, J. P., Forster, C. B., 1996, Fault zone architecture and permeability structure, Geology, 24, 1025-1028.
- Caine, J. S., Forster, C. B., 1997, Architecture and permeability structure of the Stillwater normal fault, Dixie Valley, Nevada (abstract), Ann. Meeting Geol. Soc. Am., Salt Lake City, Utah, 29, A-226.
- Caine, J. S., Forster, C. B., 1999, Fault zone architecture and fluid flow: insights from field data and numerical modeling, 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, 101-127.
- Cartwright, J. A., Lonergan, L., 1996, Volumetric contraction during compaction of mudrocks: a mechanism for the development of regional-scale polygonal fault systems, Basin Research, 8, 183-193.
- Choi, J. H., Murray, A. S., Jain, M., Cheon, G. C. S., Chang, H. W., 2003, Luminescence dating of well-sorted marine terrace sediments on the southeastern coast of Korea, Quaternary Science Reviews, 22,

- 407-421.
- Chough, S. K., Barg, E., 1987, Tectonic history of Ullung basin margin, East Sea (Sea of Japan), *Geology*, 15, 45-48.
- Cowie, P. A., Shipton, Z. K., 1998, Fault tip displacement gradients and process zone dimensions, *Journal of Structural Geology*, 20, 983-997.
- Dholakia, S. K., Aydin, A., Pollard, D. D., Zoback, M. D., 1998, Fault-controlled hydrocarbon pathways in the Monterey formation, California, *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 82, 1551-1574.
- Dunne, W. M., Hancock, P. L., 1994, Paleostress Analysis of Small-Scale Brittle Structures. In Hancock, P.L. (Ed.), *Continental Deformation*. Pergamon press, 101-120.
- Ferrill, D. A., Winterle, J., Wittmeyer, G., Sims, D., Colton, S., Armstrong, A., Morris, A. P., 1999, Stressed Rock Strains Groundwater at Yucca Mountain, Nevada, *The Geological Society of America Today*, 9.
- Fisher, Q. J., Knipe, R. J., 1998, Fault sealing processes in siliciclastic sediments. In: Jones, G., Fisher, Q. J., Knipe, R. J. (Eds.), *Faulting, fault sealing and fluid flow in hydrocarbon reservoirs*, 147, Geological Society Special Publication, 117-134.
- Forster, C. B., Evans, J. P., 1991, Fluid flow in thrust faults and crystalline thrust sheets: Results of combined field and modeling studies, *Geophysical Research Letters*, 18, 979-982.
- 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.
- Goddard, J.V., Evans, J.P., 1995, Chemical changes and fluid-rock interaction in faults of crystalline thrust sheets, northwestern Wyoming, U.S.A, *Journal of Structural Geology*, 17, 533-547.
- Gudmunsson, A., 2001, Fluid overpressure and flow in fault zone: field measurements and models, *Tectonophysics*, 336, 183-197.
- Guilbert, J. M., Park, C. F., 1985, *The Geology of Ore Deposits*, W.H. Freeman, New York.
- Hancock, P. L., 1985, Brittle microtectonics: principles and practice, *Journal of Structural Geology*, 7, 437-458.
- Haneberg, W. C., 1995, Steady-state groundwater flow across idealized faults, *Water Resources Research*, 31, 1815-1820.
- Inoue, D., Sasaki, T., Yanagida, M., Choi, W. H., Chang, C. J., 2002, Stratigraphy of the marine terrace along the East coast in Korea by means of the loess-paleosol sequence and Japanese tephra, *The 55th Annual Meeting of the Geological Society of Korea*, Abstr., 81.
- Jourde, H., Cornaton, F., Pistre, S., Bidaux, P., 2002, Flow behavior in a dual fracture network, *Journal of Hydrology*, 266, 99-119.
- Kaneoka, I., Takigami, Y., Takaoka, N., Yamashita, S., Tamaki, K., 1992, ^{40}Ar - ^{39}Ar analysis of volcanic rocks recovered from the Japan Sea floor: Constraints on the age of formation of the Japan Sea, *Proceedings, Ocean Drilling Program, Scientific Results 127/128*, 819-836.
- Kim, J. H., 1996, Mesozoic tectonics in Korea, *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 13, 251-265.
- Kim, Y. -S., Peacock, D. C. P., Sanderson D. J., 2003, Mesoscale strike-slip faults and damage zones at Marsalforn, Gozo Island, Malta, *Journal of Structural Geology*, 25, 793-812.
- 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, 1-20.
- Kim, Y. -S., Peacock, D. C. P., Sanderson, D. J., 2004a, Fault damage zones, *Journal of Structural Geology*, 26, 503-517.
- Kim, Y. -S., Park, J. Y., Kim, J. H., Shin, H. C., Sanderson, D. J., 2004b, Thrust geometries in unconsolidated Quaternary sediments and evolution of the Eupchon Fault, SE Korea, *The Island Arc*, 13, 403-415.
- Kimura, G., Tamaki, K., 1986, Collision, rotation, and back-arc spreading in the region of the Okhotsk and Japan Seas, *Tectonics*, 5, 389-401.
- KOPEC, 2002, Preliminary Site Assessment Report for the New Site of Wolsung Power Plant (unpublished report), 2.5.-1-2.5.-281.
- Leckenby, R. J., Sanderson, D. J., Lonergan, L., 2005, Estimating flow heterogeneity in natural fracture systems, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 148, 116-129.
- Lee, J. I., 2000, Provenance and thermal maturity of the lower Cretaceous Gyeongsang Supergroup, Korea, Unpublished Ph.D thesis, Seoul National University, 129.
- Li, Y. G., Aki, K., Vidale, J. E., Alvarez, M. G., 1988, A delineation of the Nojima fault ruptured in the M7.2 Kobe, Japan, earthquake of 1995 using fault zone trapped waves, *Journal of Geophysical Research*, 103, 7247-7263.
- Lopez, D. L., Smith, L., 1995, Fluid flow in fault zones: Analysis of the interplay of convective circulation and topographically driven groundwater flow, *Water Resources Research*, 31, 1489-1503.
- Martel, S. J., Boger, W. A., 1998, Geometry and mechanics of secondary fracturing around small three-dimensional faults in granitic rock, *Journal of Geophysical Research*, 103, 21299-21314.
- Matthai, S. K., Aydin, A., Pollard, D. D., Roberts, S. G., 1998, Numerical simulation of departures from radial drawdown in a faulted sandstone reservoir with joints and deformation bands, In: Jones, G., Fisher, Q. J., Knipe, R. J. (Eds.), *Faulting, fault sealing and fluid flow in hydrocarbon reservoirs*, Geological Society Special Publication, 157-191.
- Micarelli, L., Benedicto, A., Wibberley, C. A. J., 2006a, Structural evolution and permeability of normal fault zones in highly porous carbonate rocks, *Journal of Structural Geology*, 28, 1214-1227.
- Micarelli, L., Morettia, L., Jauberta, M., Moulouela, H.,

- 2006b, Fracture analysis in the south-western Corinth rift (Greece) and implications on fault hydraulic behavior, *Tectonophysics*, 426, 31-59.
- Nelson, E. P., Kullman, A. J., Gardner, M. H., 1999, Fault-fracture networks and related fluid flow and sealing, Brushy Canyon formation, west Texas, 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, 69-81.
- Newman, J., Mitra, G., 1994, Fluid-influenced deformation and recrystallization of dolomite at low temperatures along a natural fault zone, Mountain City window, Tennessee, *Geological Society of America Bulletin*, 106, 1267-1280.
- Randolph, L., Johnson, B., 1989, Influence of faults of moderate displacement on groundwater flow in the Hickory sandstone sandstone aquifer in central Texas, *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 21, 242.
- Peacock, D. C. P., Sanderson, D. J., 1991, Displacements, segment linkage and relay ramps in normal fault zones, *Journal of Structural Geology*, 13, 721-733.
- Ree, J. -H., Lee, Y. -J., Rhodes, E. J., Park, Y., Kwon, S. -T., Chwae, U., Jeon, J. -S., Lee, B., 2003, Quaternary reactivation of Tertiary faults in the southeastern Korean Peninsula: age constraint by optically stimulated luminescence dating, *The Island Arc*, 12, 1-12.
- Sanderson, D. J., Zhang, X., 1999, Critical stress localization of flow associated with deformation of well-fractured rock masses, with implications for mineral deposits, In: McCaffrey, K.J.W., Longan, L., Wilkinson, J.J. (Eds.), *Fracture, Fluid Flow and Mineralisation*, Special Publication, 155. Geological Society of London, 69-81.
- Scholz, C.H., 1990, *The mechanics of earthquakes and faulting*, Cambridge, Cambridge University Press, 439.
- Sibson, R. H., Robert, F., Poulsen, K. H., 1988, High-angle reverse faults, fluid pressure cycling, and mesothermal quartz-gold deposits, *Geology*, 16, 551-555.
- Sibson, R. H., 1989, Earthquake faulting as a structural process, *Journal of Structural Geology*, 11, 1-14.
- Sigda, J. M., Goodwin, L. B., Mozley, P. S., Wilson, J. L., 1999, Permeability Alteration in Small-Displacement Faults 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.
- Tamaki, K., 1988, Geological structure of the Japan Sea and its tectonic implications, *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 39, 269-365.
- Tateiwa, I., 1924, Geological Atlas of Chosen, No. 2. Ennichi, Kyuryuho and Choyo sheets, Geological Survey, Governmental General of Chosen, 6.
- Wibberley, C. A. J., 2002, Hydraulic diffusivity of fault gouge zones and implications for thermal pressurization during seismic slip, *Earth, Planets and Space*, 54, 1153-1171.
- Yoon, S. H., Chough, S. K., 1995, Regional strike slip in the eastern continental margin of Korea and its tectonic implications for the evolution of Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan), *Geological Society of America Bulletin*, 107, 83-97.
- Zhang, X., Sanderson, D. J., 1995, Anisotropic features of geometry and permeability in fractured rock masses. *Engineering Geology*, 40, 65-75.
- Zhang, X., Sanderson, D. J., 1996a, Effects of stress on the two-dimensional permeability tensor of natural fracture networks, *Geophysical Journal International*, 125, 912-924.
- Zhang, X., Sanderson, D. J., 1996b, Numerical modelling of the effects of fault slip on fluid flow around extensional faults, *Journal of Structural Geology*, 18, 109-119.
- Zhang, X., Sanderson, D. J., 1998, Numerical study of critical behavior of deformation and permeability of fractured rock masses, *Marine and Petroleum Geology*, 15, 535-548.

2007년 8월 2일 원고접수, 2007년 9월 15일 게재승인

진광민

부경대학교 환경지질학과와 지질구조해연구실
608-737 부산광역시 남구 대연3동 599-1
Tel: 051-620-6246
Fax: 051-628-6432
E-mail: maxgarion@naver.com

김영석

부경대학교 환경지질학과와 지질구조해연구실
608-737 부산광역시 남구 대연3동 599-1
Tel: 051-620-6246
Fax: 051-628-6432
E-mail: ysk7909@pknu.ac.kr