

부산시 금정산 일원의 지하수 유동 해석을 위한 단열계 분석

Fracture Analysis for Evaluation of Groundwater Flow around the Geumjeong Mountain, Busan

손	문(Moon Son)	부산대학교 기초과학연구소
함	세 영(Se-Yeong Hamm)	부산대학교 지구환경시스템학부
김	인 수(In-Soo Kim)	부산대학교 지구환경시스템학부
이	윤 희(Yung-Hee Lee)	부산대학교 지구환경시스템학부
정	훈(Hun Jeong)	부산대학교 지구환경시스템학부
류	춘 길(Choon-Kil Ryu)	부산대학교 지구환경시스템학부
송	원 경(Won-Kyong Song)	한국지질자원연구원

요약 / ABSTRACT

금정산 일원 지하수 유동 체계를 밝히기 위하여 지질 및 지질구조도 그리고 소규모 단열들의 분류와 각각의 밀도도 작성이 이루어졌다. 그 결과, 금정산 정상부 산성마을 일원은 집수 분지를 형성하고 있어 인근 지하수의 주요 함양지로 판단된다. 또한 산성마을 일원에는 남북방향의 단층 그리고 동북동방향의 단층들이 교차되고 있을 뿐만 아니라 남북방향 단열군과 동서방향 단열군이 높은 빈도 이상대를 보이고 있어 지표수가 쉽게 지하로 유입될 수 있는 지질구조가 형성되어 있다. 그리고 산성마을 일원에서 함양된 지하수는 주요 단열군의 밀집 지역을 따라 지하 3~4 km 깊이까지 순환한 후 온천1동 동래온천 지역으로 유입될 가능성이 높다.

주요어: 금정산, 지하수, 단열, 밀도도, 동래온천

Geological, structural, and fracture density maps were drawn up to clarify the groundwater flow system around the Geumjeong Mountain, Busan. The results show that the topographical basin formed in the Sanseong Town is considered as a major recharge area of groundwater around the Geumjeong Mt. Because NS-trending fault and ENE-trending fault are intersecting and NS-trending and EW-trending fracture sets are highly developed in the basin, it is believed that the geological structure was developed in the basin which facilitates ground recharge. Based on the density

distributions and characteristics of fractures, it is possible that the recharged groundwater in the basin would circulate to the depth of about 3~4 km and finally would reach the Dongnae Hot-spring region.

Key Words: Geumjeong Mt., groundwater, fracture, density map, Dongnae Hotspring

서 론

오늘날 산업 사회에서는 방사성 폐기물 저장소, 석유 저장탱크를 위한 대형 동굴건설 그리고 도로와 철도를 위한 터널공사 등의 대규모 지하 구조물 시설을 필요로 하고 있다. 이러한 지하 구조물의 굴착 과정에서 단층 및 절리대와 같은 단열대(fracture zone)를 통과할 경우에는 주변 지하수의 유로가 바뀌게 되며 지하 구조물 내로 유입된 지하수의 유출 때문에 굴착 지역의 인근 지하수 고갈, 지반 침하, 생태계 변화 등의 자연 환경 변화와 이로 인한 주민의 생활 환경에 심각한 악영향을 줄 수 있다. 따라서 대형 지하 구조물의 건설시에는 인근의 지하수 유동 체계를 이해하고 구조물 굴착 이후 발생할 변화를 정확히 예측하는 것이 피해를 최소화하는데 필수적이다. 특히, 굴착 지역의 지질이 화강암과 같은 결정질 암석으로 구성되어 있을 경우에는 지하수의 유로가 되는 각종 단열대의 특성과 공간적인 밀도 분포를 파악하는 작업이 반드시 선행되어야 한다.

부산시 금정산 일원에는 고속철도사업의 일환인 금정터널 그리고 금정구 구서동과 북구 화명동을 잇는 도로용 터널 공사 등이 예정되어 있다. 길이가 약 18km에 달하는 대형 터널인 금정터널은 조만간 착공될 예정인데, 이 터널이 통과하는 금정산 정상부 산성마을은 주민 대부분이 식수로 지하수를 사용하고 있으며, 산 측부에는 부산시 최대 온천인 동래온천 등의 시민 휴양 시설과 주거 시설이 밀집되어 분포한다(Figure 1).

이번 연구에서는 결정질 암반 지하수의 유동 체계를 이해하기 위한 기초가 되는 단열계의 특성을 파악하기 위하여 금정산 일원(경도: 129° 01' 53.88" ~ 129° 05' 19.71", 위도: 35° 11' 59.05" ~ 35° 15' 38.61")을 대상으로 야외 지표 지질 및 지질구조 조사를 실시하였다. 이를 통하여

먼저, 조사 지역의 암상 분포가 파악되었으며 둘째, 대소규모 단층들의 존재를 파악하여 이들의 연속성이 추적되었다. 셋째, 야외 노두에서 취성변형(brittle deformation) 산물인 소규모 절리(joint)와 전단단열(shear fracture)들의 방향성과 상호연결성 그리고 군집성을 파악하여 우세 단열의 공간적인 밀도도를 작성하였다. 이번 연구는 금정산 일원의 지하수 유동 체계를 파악하기 위하여, 이들 자료들을 종합적으로 해석함으로써 연구지역의 단열계를 분석하는데 목적이 있다.

단열자료 획득과 분석 방법

야외 조사는 실내에서 선구조가 분석된 위성사진과 음영기록도 그리고 1:25,000 지형도를 기본도면으로 사용하였으며 정확한 위치 파악을 위해서 휴대용 GPS를 그리고 단열면 자세 측정에는 지질조사용 컴파스를 사용하였다.

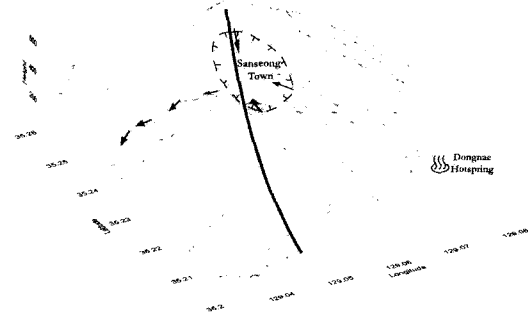
신뢰할 수 있는 공간 단열 밀도도를 얻기 위해서는 조사 대상 노두들이 조사 지역에 고르게 분포되어야 한다. 단열조사 방법으로 선조사법(Scanline Survey) 혹은 원형조사법(Circle-inventory Method)이 일반적으로 이용되나(Priest, 1993; Davis and Reynolds, 1996; 신희순외, 2000) 조사 지역은 산악지역과 주거 지역이 혼재되어 있어 노두의 노출 크기, 노출 단면의 방향 그리고 공간 분포 등이 균일하지 않기 때문에 이를 적용하여 단열의 공간 밀도 분포를 알아내기에는 현실적인 어려움이 있다. 따라서 이번 연구에서는 가능한 넓은 지역에서 고른 자료를 획득하고자 먼저, 조사 지역을 15" × 15" 면적으로 구획하고 각 구역마다 3차원으로 구조 관찰이 가능한 1개 이상의 노두를 찾고자 하였다. 각 노두에서 나타나는 규칙(systematic) 단열들을 대상으로 그 출현 빈도에 따라 단열군 등급(j1, j2 등)을 나누고

각 단열군 중 대표적인 단열면 5개를 선택하여 자세를 측정하였다. 또한 각 단열군의 출현 빈도를 정량화 하기 위하여 단열면의 주향과 수직인 1 m 측선 내에 나타나는 단열면의 개수를 기록하였다. 더불어 각 단열면의 연속성, 거칠기, 간극, 충전물질 등 기본적인 단열 특성을 기재하고 디지털 카메라를 사용하여 노두 전경을 촬영하였다.

조사 지역 전체를 지배하는 주요 단열군의 방향과 우세 정도를 파악하기 위하여 각 노두들에서 측정된 모든 단열면의 자세를 π -등적투영망과 장미도표에 도시하였으며 그 밀집도와 주향 방향에 따라 단열군 J1, J2, J3 그리고 J4를 구분하였다. 공간적인 단열 밀도도를 작성하기 위해서 연구지역의 경우, 30" × 30" 면적 단위별로 보통 3~5개의 노두가 관찰된 관제로 각 4개의 노두가 관찰되었다는 가정 하에 측선 4 m내 각 단열군의 출현 단열 개수가 파악되었다. 즉, 만약 어느 구역에서 3개의 노두만 관찰되어 측선 3 m내에 J1단열이 9개가 관찰되었다면 단열 밀도도를 작성시 이곳의 J1단열은 $9 \times (4/3)$ 로써 12개로, 5개의 노두에서 10개의 단열이 관찰되었다면 $10 \times (4/5)$ 로써 이 구역의 단열 개수는 8개로 계산된다. 이상과 같은 방법으로 단열군 J1, J2, J3 그리고 J4 각각의 구역별 출현 개수가 구해졌으며 이를 이용하여 공간 단열 밀도도(등고선도)가 작성되었다. 또한 주향방향을 근거로 구분된 각 단열군은 서로 반대 방향의 경사를 가진 것들로 다시 분류될 수 있으므로 각 단열군의 경사방향에 따라서도 같은 방법으로 밀도도가 작성되었다.

지형과 지질

조사 지역은 부산시에서 가장 험준한 지세를 보이는 곳 중 하나로 최대 801 m(금정봉) 고지의 남북방향 산악 지형을 형성하고 있다(Figure 1). 금정산의 중앙부이며 정상에 가까운 금성동 산성마을 일원은 북북동방향으로 길쭉한 지형적으로 뚜렷한 분지를 형성하는데 이곳은 자연 습지와 농지가 발달하며 소규모 자연 호수들이 분포한다. 때문에 금정산 정상부의 지표수는 대부분 이곳으로 이동, 수렴하는 경향이다. 금정산의 동과 서편에는 각각 동래단층과 양산단층이 위치하며 이곳



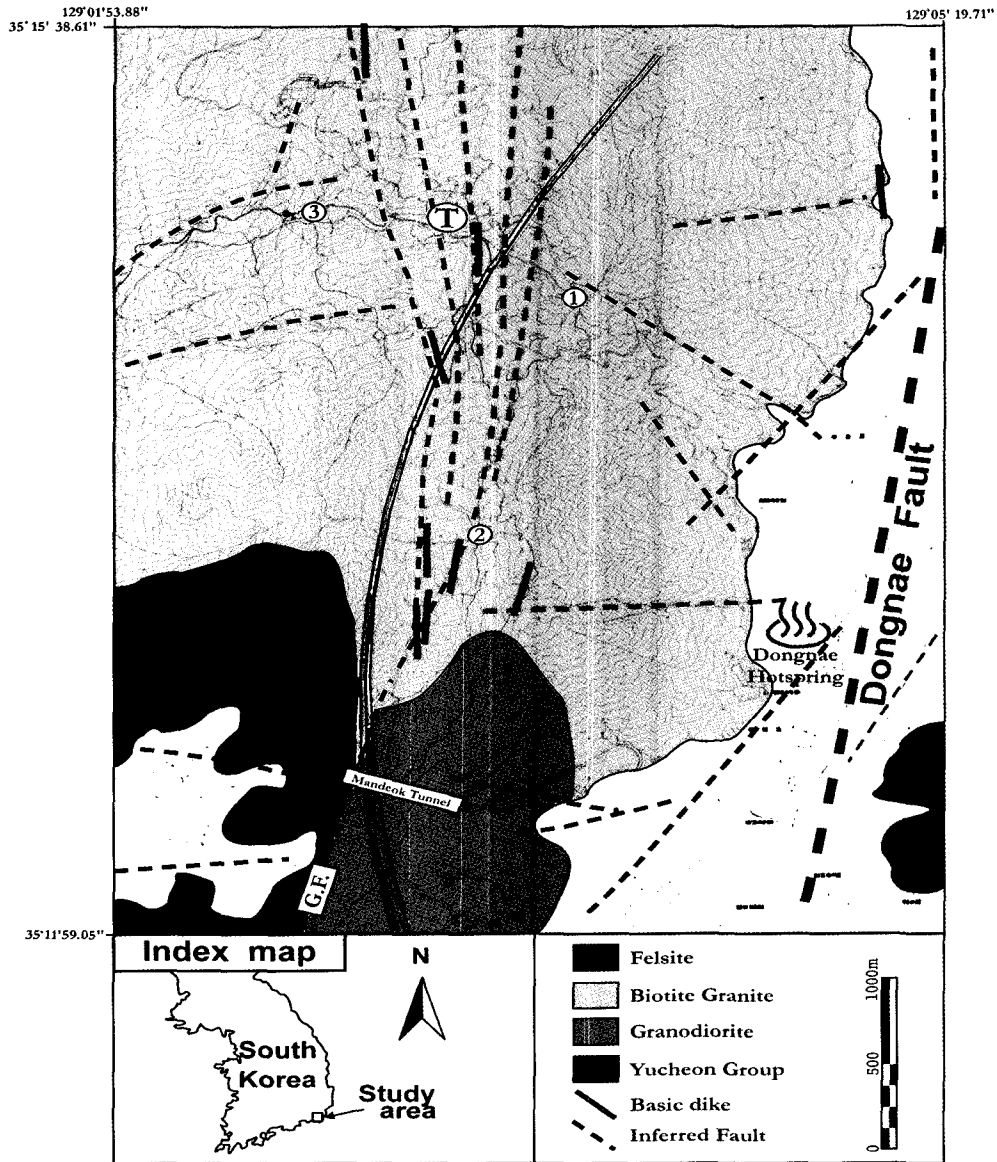


Fig 2. Geological map of the study area. ①: the Sanseong Town, G.F.: the Geumseongdong Fault, ①, ②, ③: the localities of eastern, southern, and western gates of the Geumjeong mountain fortress wall, respectively.

화강암은 그 북쪽 금정산의 대부분을 차지하고 있다. 한편, 염기성 암맥들은 백악기 말의 화강암류를 관입하고 있어 그 관입 시기는 신생대인 것

으로 판단되는데 주로 조사 지역의 중앙부에서 남북방향의 단층 파쇄대를 따라 암맥군(dike swarm)을 형성하고 있어 기존의 지각 균열을 따

라 수동적으로 주입(passive injection: Price and Cosgrove, 1990)된 특징을 보인다. 한반도 동남부의 남북방향 관입면을 가지는 염기성 암맥들은 대부분 신생대 전기 마이오세의 지각변형과 화산 활동의 산물인 것으로 알려져 있다(손문외, 2002a, 2002b). 층적층은 주로 동래단층과 양산단층을 따라 두껍게 발달한다.

연구 결과와 해석

주요 단층

조사 지역 동서 양편은 한반도 동남부의 주요 단층선인 동래단층과 양산단층이 존재한다. 이번 조사에서는 이들 단층들이 모두 두꺼운 층적층으로 피복되어 있어 단층의 기하학적 그리고 운동학적 특성을 야외에서 직접 확인할 수 없으나 조사 지역의 북쪽 울산시 연양면(양산단층) 그리고 양산시 웅상면(울산단층) 등에서 북북동방향의 주향과 수직에 가까운 경사를 가진 수십 m의 단층 파쇄대를 그 존재가 확인된 바 있다(최위찬외, 1998; 장천중, 2001). 이들 단층은 백악기 암석들을 절단하고 있어 그 주요 운동시기는 백악기 이후이며 초기에는 우수향 주향이동이 우세하였던 것으로 알려져 있으나, 신제3기에서 제4기에 이르러서는 한반도 일원의 지체구조환경 변화(문태현외, 2000)에 의하여 재활성되어 좌수향 주향이동과 역단층 운동을 하였던 것으로 알려져 있다(김인수, 1992; 류충렬과 김인수, 1997; 최위찬외, 1998; 장천중, 2001; 경재복과 장태우, 2001).

양산단층과 동래단층 사이의 금정산 일대에는 이들 단층과 거의 평행한 북북동 내지 남북방향의 단층(이하 편의상 금성동단층으로 칭하여 서술함)과 이와 사교하는 북동, 동서 그리고 북서방향의 단층들이 존재함이 이번 조사에서 확인되었다(Figure 2). 금성동단층은 조사 지역 남부의 만덕터널 인근에서 북북동방향으로 북쪽으로 연장되어 금정산성 남문으로 연장되며 남문에 이르러 남북방향으로 굴곡되면서 여러 개의 소단층들로 분기(spray)되는 양상이다. 이들 분기된 단층들은 금성동 분지 지역을 통과하면서 북북서방향으로 굴곡되는 기하를 보인다. 따라서 단층운동에 의해 만들어진 파쇄대의 폭은 북쪽으로 갈수록 넓어진다.

다. 한편, 남문 인근에서 관찰된 이 단층의 노두에서는 단층비지대(자세: N060E/70oSE)가 폭 수 cm로 인지되고 비지대의 양쪽으로 수 m 폭을 가지는 파쇄대(shattered zone)가 관찰된다(Figure 3a). 단층 파쇄대 내에는 수십 cm 폭을 가진 염기성 암맥들이 흔히 관찰되는데 암맥들은 전단변형(shearing)된 양상이며 대부분 적갈색을 띠는 점토로 변질되어 있다. 또한 암맥의 관입면을 따라 우수향 주향이동단층운동이 발생하였음을 지시하는 단층조선들이 뚜렷이 관찰된다(Figure 3b). 염기성 암맥은 이번 조사에서 9곳의 노두에서 관찰되었는데 대부분 금성동단층 파쇄대를 따라 발달한다. 이들 암맥은 야외 조사에서 확인된 것들 외에도 지하 균열을 따라 다수가 존재할 가능성이 높다.

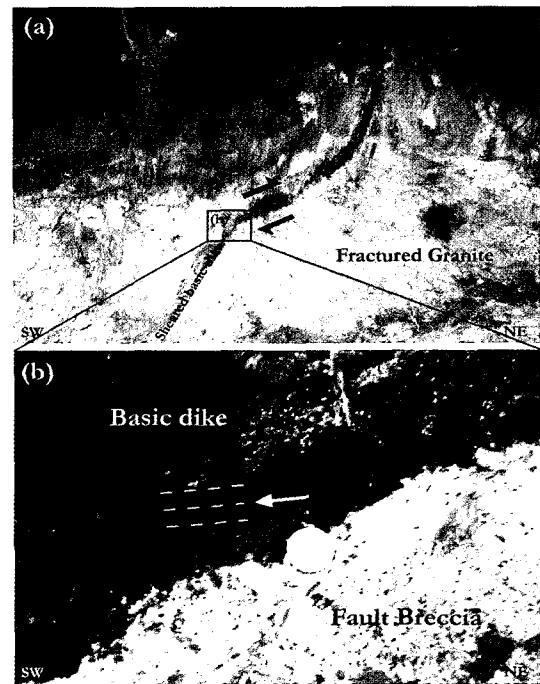


Fig 3. Outcrop photographs showing (a) the NS-trending Geumseongdong Fault and a basic dike observed along the fault, and (b) the striations (dotted lines) indicating the dextral strike-slip of the fault. A couple of black arrows and a white arrow indicate the sense of the fault and the moving direction of missing block, respectively.

단층들이 최소 6개 이상 존재하는데 특히, 동래



Fig 4. Rose and π -diagrams (equal-area and lower hemisphere) showing the attitudes of discontinuities (fractures) observed at each domain divided by 30 " \times 30 " area.

한편, 금정산성 서문 일대와 만덕동에는 동북동~동서방향의 단층이 최소 4개 이상 존재하며 이들 단층 중 서문 일대의 단층은 남북방향의 금성동 단층과 교차된다(Figure 2). 또한, 금성동단층과 동래단층 사이에도 동서, 북서, 그리고 북동방향의

은천장 서편에는 동서방향의 단층이 금성동 단층과 동래단층을 연결시키고 있다. 따라서 금성동 지형 분지에서 집수된 지표수는 단층 파쇄대를 통로로 지하로 유입되어 동래온천으로 유입될 가능성은 충분하다.

단열계(fracture system)

70여 개 노두에서 각각 30개 내외의 단열면들이 관찰되어 총 2,000여 개 단열면의 방향과 그 특성이 기재되었다. 이들의 자세를 30" × 30" 면적으로 분할된 각 구역별로 π -등고선도와 장미도표에 도시하면 Figure 4와 같다. 지형과 대체로 평행하며 저각도의 경사를 가지는 판상절리(sheeting

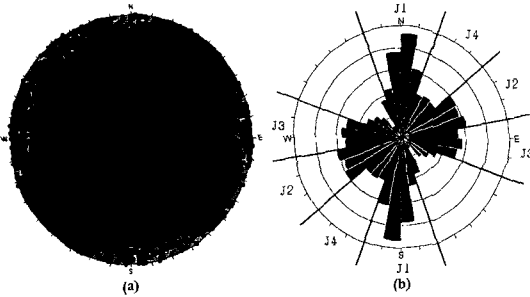


Fig 5. (a) π -contoured diagram and (b) rose diagram of all fractures observed in the study area. The fractures can be divided into four sets (J1, J2, J3, J4) based on the their strikes and frequency.

joint)를 제외한 단열면들은 전반적으로 북북서~북북동방향의 주향을 가지는 것들이 조사 지역에 가장 고르게 분포하며 각 구역별 최고 우세 단열의 주향방향은 대체로 인근 단층의 것(Figure 2)과 유사한 것이 특징이다.

조사 지역에서 측정된 단열 모두를 하나의 π -등고선도와 장미도표에 도시하였다(Figure 5). 판상절리를 제외하고는 대부분 단열면들의 경사는 60° 이상이며 많은 수가 수직에 가까운 경사각을 가진다. 이들 고각도의 단열면들은 그 주향 방향과 빈도수에 따라 남북방향의 단열군 J1(N20°W~N20°E), 동북동방향의 단열군 J2(N50°~80°E), 동서방향의 단열군 J3(N80°~110°E), 그리고 북동방향의 단열군 J4(N20°~50°E)로 구분될 수 있다(Figure 5b). 이번 조사 지역에서는 N20°~70°W 방향 단열면들의 발달이 매우 빈약함이 특징이다.

한편, 관찰된 대부분의 단열면들은 단열면에서 깃털 구조(plumose structure)보다는 수다자국(chatter mark)과 미끌림 조선(striation)이 우세하게 관찰되고 있어 순수한 신장 절리(Mode I:

extensional fracture)보다는 대부분 전단운동을 동반한 전단단열(Mode II 또는 III: shear fracture)의 특성을 보인다(Pollard and Aydin, 1988). 또한, J3와 J4는 야외에서 동북동-서남서방향 최대 주응력축(σ_1)을 지시하는 공액(conjugate) 전단단열의 형태로 흔히 관찰되었다. 이러한 점들은 단열군 J1은 조사 지역의 주요 단층인 양산단층, 동래단층 그리고 금성동단층의 우수향 주향이동단층운동에 수반된 Y-전단 혹은 P-전단, J2는 T-단열, J3은 R'-전단, 그리고 J4는 R-전단들일 가능성이 높음을 지시한다. 이들 단열면들의 방향성 또한 북북동방향의 우수향 단순 전단(simple shear) 실험(Wilcox et al., 1973; Woodcock and Schubert, 1994)에서 만들어진 이차적인 단열계의 방향성과도 잘 일치한다.

조사 지역 단열면들의 연속성은 노출된 노두의 크기가 제한되어 이를 정확히 측정하는데는 현실적인 어려움이 있으나 대체로 노두에서 5 m 이상의 높은 연장성을 보이는 것이 특징이다. 거칠기는 ISRM(1981)에 의해 제안된 등급과 거칠기의 정도를 근거하면 계단형 중에서 완만함이 우세하며 간극은 대부분 0.5 mm 이하로 부분적으로 벌어진 폐쇄형이 우세하다. 단열 불연속면을 따라 차별적인 풍화로 1 cm 이하의 두께로 주변 암석이 분해(decomposed)된 특징이 관찰되며 경우에 따라서는 단열면을 따라 전단운동이 발생하여 5 cm 폭 내의 실트~중사질 크기의 파쇄 충전물질이 관찰되기도 한다.

단열밀도(fracture density)

30" × 30" 구역 내에 4개의 노두가 존재한다는 가정하에서 계산된 조사 지역 각 단열군의 공간적인 밀도를 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 남북방향 J1의 경우에는 조사 지역의 중앙부에서 남북방향으로 금성동단층을 따라 높은 밀집도를 보인다(Figure 6). 이는 J1은 금성동단층의 생성과 밀접한 관련성을 가지며 단층 운동에 의해 이차적으로 만들어진 안행상(en echelon) 배열의 단열면일 가능성을 보여준다. 또한 금성동단층은 연장성이 좋은 하나의 불연속면으로 이루어진 단층이 아니라 전단 단열면들의 조합으로 이루어진 파쇄대를 형성하고 있음을 의미한다.

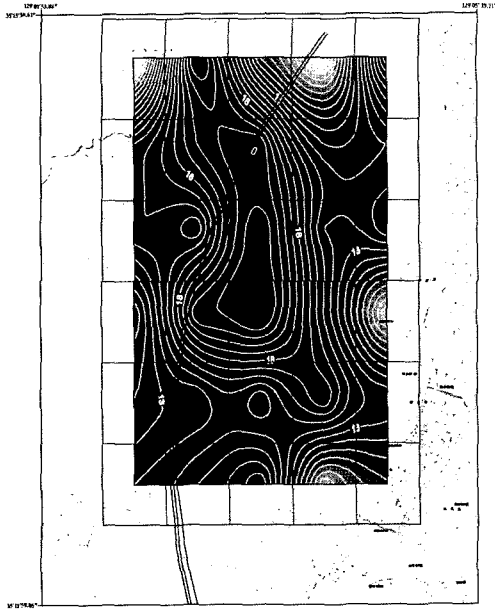


Fig 6. Density map of the NS-trending J1 fracture set. Contoured interval: 1.

J1 단열들 중 동쪽으로 경사진 단열들은 대부분 조사 지역의 중앙부 즉, 금성동 산성마을의 지형 분지에 밀집되어 분포하는 특징을 보여준다 (Figure 7a). 이곳 분지가 금정산 일원 지하수의 함양지(recharge area)로써의 조건을 갖추고 있음은 앞서 언급한 바 있다. 따라서 이곳에서 함양된 지하수는 동쪽으로 경사진 남북방향 단열면을 따라 보다 동쪽의 지하로 이동될 가능성이 높다. J1 단열들 중 서쪽으로 경사진 단열들은 조사 지역의 북쪽과 남쪽에서 미약한 밀집을 보여주나 대체로 분산되어 고르게 분포하는 특징을 보여주며 산성마을 분지 지역에는 그 밀도가 매우 빈약하다(Figure 7b).

동북동방향 J2 단열군의 주요 밀집 지역은 조사 지역의 동부와 서부에 양분된다(Figure 8). 이 두 곳의 단열 밀집 지역은 동쪽으로 경사진 J1의 밀집 지역(Figure 7a)을 중심으로 동서로 양분된 양상이다. 따라서 J2 단열들은 산성마을 분지 지역에서 함양된 지하수를 지하에서 동과 서로 나뉘어 이동시키는 통로의 역할을 할 것으로 판단된다.

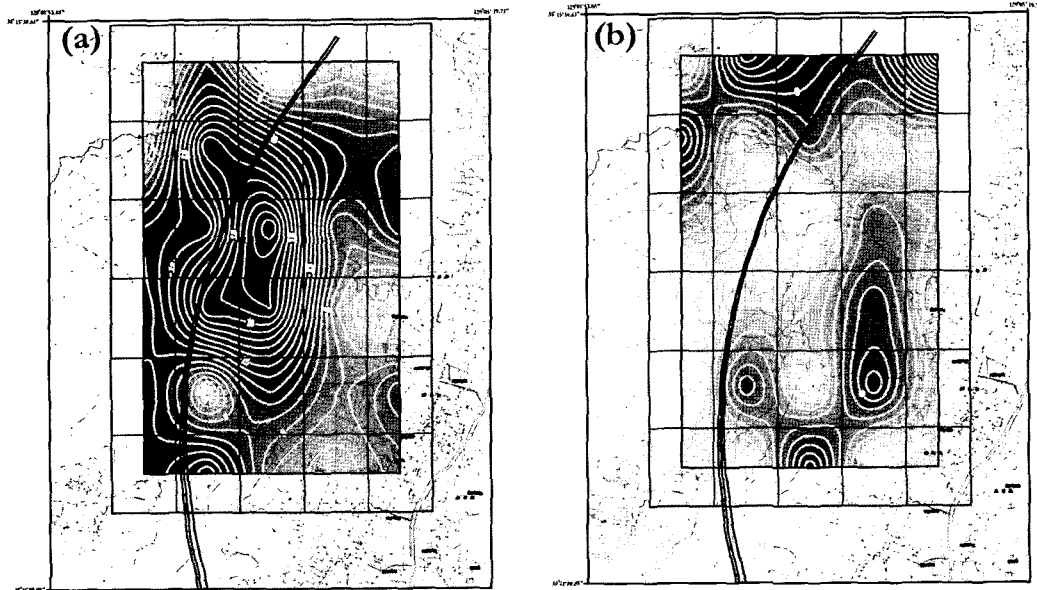


Fig 7. Density maps of (a) the E-dipping and (b) W-dipping J1 fracture set. Contoured interval: 1.

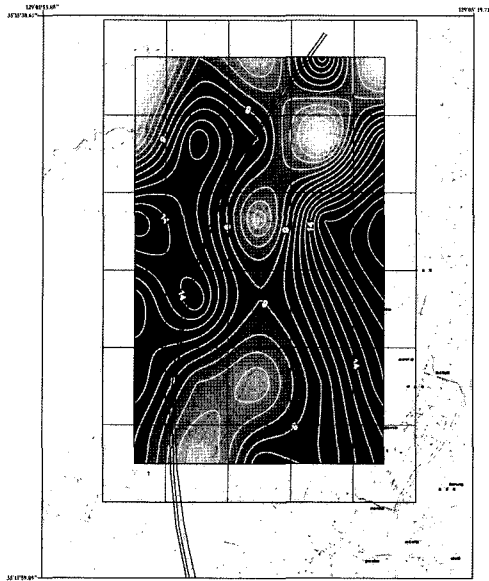


Fig 8. Density map of the ENE-trending J2 fracture set. Contoured interval: 1.

지역과 인접한 그 북쪽 금정구 장전동 일원에서 가장 높은 밀집도를 보여주는데, 이러한 특징은 성마을 분지 지역에서 함양된 지하수가 동과 서로 나뉘어 이동하나 많은 양의 지하수가 동쪽으로 이동하여 남동향으로 경사진 단열들에 의해 동래온천쪽의 지하로 유입될 수 있음을 보여주는 것이다. 북서쪽으로 경사진 J2 단열들은 산성마을 북서부와 동래온천 남쪽 온천 2동에 밀집된 양상이다(Figure 9b). 온천2동에 밀집된 단열들은 북서방향으로 경사져 있기 때문에 온천1동 동래온천쪽으로 지하에서 연장될 것으로 판단되는데, 이는 이들 단열들을 통로로 남쪽의 만덕터널 일원의 지하수가 그 북쪽의 동래온천 지역으로 유입될 가능성이 있음을 의미한다. 한편, 산성마을 북서부의 단열들이 통로가 되어 산성마을 분지 지역에서 함양된 지하수의 일부는 북서쪽으로 이동될 가능성도 있다.

동서방향의 J3 단열들은 금성동 단층과 거의 평

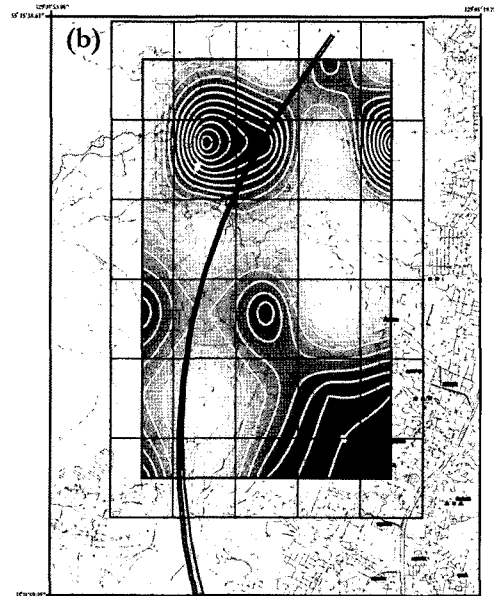
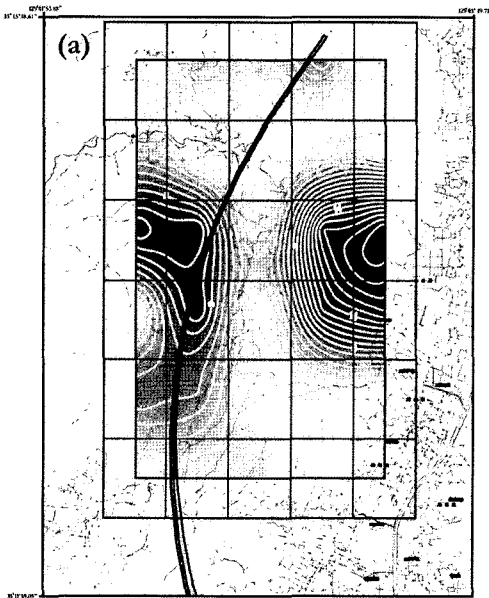


Fig 9. Density maps of (a) the SE-dipping and (b) NW-dipping J2 fracture set. Contoured interval: 1.

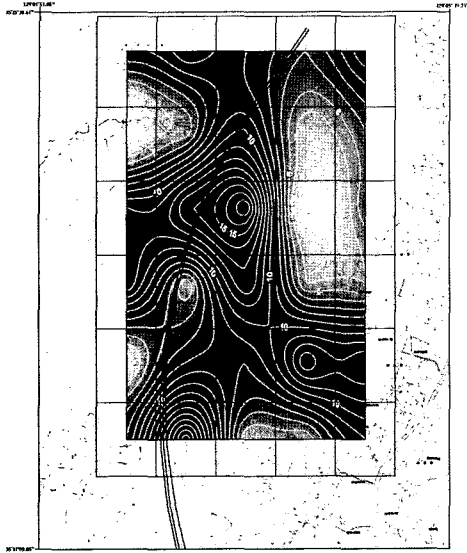


Fig 10. Density map of the EW-trending J3 fracture set. Contoured interval: 1.

행하게 남북~북북서방향으로 길쭉한 빈도 이상대를 형성하고 있으며 조사 지역의 남부에서 온천1동과 만덕동쪽으로 분기되는 양상이다(Figure 10). 이들의 밀도 분포는 동래온천의 지하수원을 해석함에 있어 매우 흥미롭다. 주 밀집 지역은 동쪽으로 경사진 J1의 밀집 지역(Figure 7a)과 잘 일치하며 남쪽으로 연장되다가 동쪽으로 휘어져 동래온천이 위치하는 온천1동으로 정확히 연결되는 양상이다. 이는 산성마을 분지 일원은 남북방향과 동서방향의 단열들이 동시에 우세하게 발달하고 있어 지표수가 지하로 용이하게 이동할 수 있는 조건을 갖추고 있음을 의미하며 이곳에서 지하로 유입된 다량의 지표수는 동서방향의 단열들을 통로로 동래온천 지역으로 쉽게 이동될 수 있음을 보여준다. 한편, 일부 동서방향의 단열들이 산성 서문 일대에도 밀집되어 연속됨이 관찰된다. 이는 산성마을 분지에서 함양된 지하수가 이들을 통로로 서쪽으로 이동됨을 지지한다. 따라서, 앞서 지적한 바와 같이 산성마을 함양지에서 유입

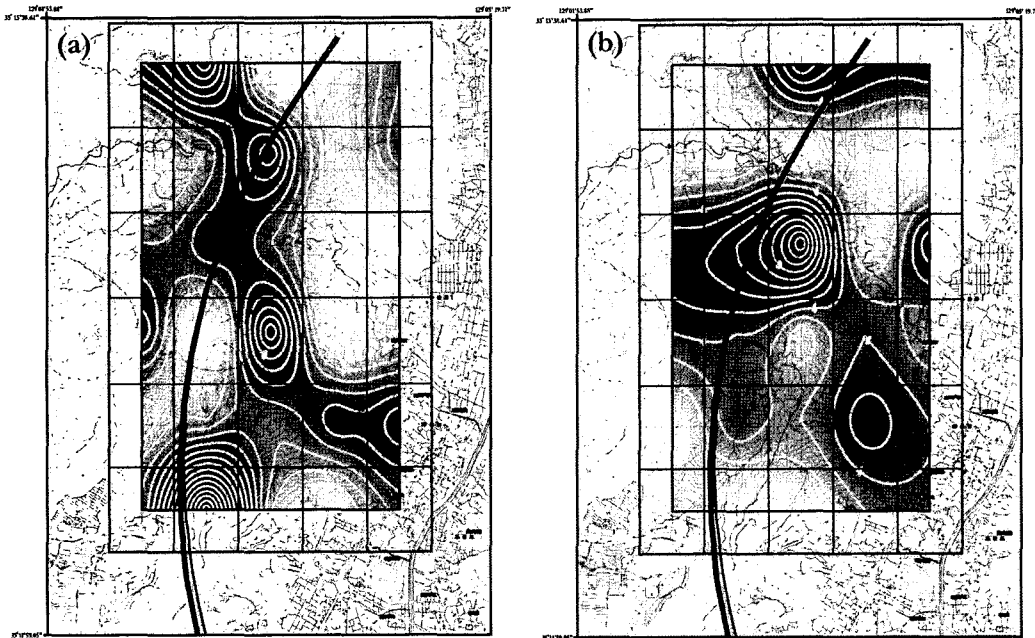


Fig 11. Density maps of (a) the S-dipping and (b) N-dipping J3 fracture set. Contoured interval: 1.

된 지하수는 동서로 이원화되면서 이동될 것으로 판단되며 이들 중 동쪽으로 이동하는 지하수는 남동쪽으로 경사진 J2 단열(Figure 9a)과 동서방향의 J3 단열들을 통로로 동래온천 지역을 향하여 수렴될 것이다.

한편, 북쪽으로 경사진 J3은 다소 밀집도가 떨어지나 J3 전체 밀도 분포와 유사한 양상이며(Figure 11a), 남쪽으로 경사진 J3은 주로 산성마을 일원에 밀집되어 있고 서쪽으로 연장되는 특징을 보인다(Figure 11b).

조사 지역 주요 단열군 중에서 가장 낮은 빈도를 보이는 북동방향의 J4 단열들은 산성마을 분지 지역에서 밀집도가 또한 가장 낮으며 그 주변에 분산되어 분포하는 양상이다(Figure 12). 따라서 산성마을 분지 지역에서 함양된 지하수의 일부는 이들 단열들을 통로로 하여 사방으로 분산될 가능성은 있으나 주향방향과 빈도를 고려할 때 그 정도는 미약할 것이다.

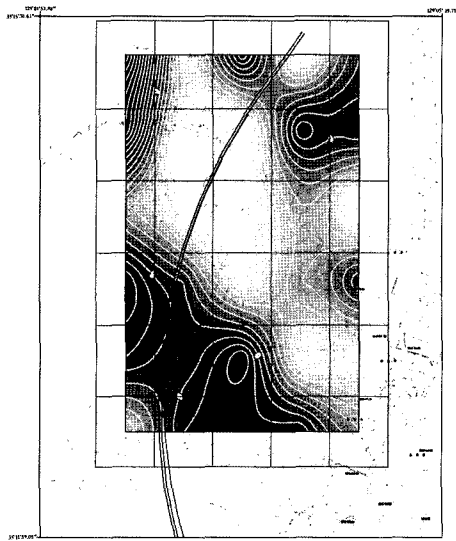


Fig 12. Density map of the NE-trending J4 fracture set. Contoured interval: 1.

토의 및 결론

부산시 금정산은 산악 지형을 형성하고 있어 포

토의 두께가 얇으며 대부분 결정질 암석인 화강암류로 구성된다(Figure 2). 따라서 이곳의 지하수 유동 체계는 암석 내에 발달한 단열계의 방향성 및 공간 분포 그리고 수리지질학적 특성과 밀접하게 관련될 것이다.

금정산 정상부는 지형적으로 분지를 형성하고 있으며 지표수의 수계는 이곳을 향하여 수렴한다(Figure 1). 이곳에는 현재 자연 습지와 농지가 발달하며 소규모 자연 호수들이 분포하고 있다. 또한 금성동단층과 동북동방향의 단층들이 교차되고 있을 뿐만 아니라(Figure 2) 남북방향의 J1 단열군과 동서방향의 J3 단열군이 높은 빈도 이상을 보이고 있어(Figure 6, 7a, 10, 11b), 분지에 집수된 지표수가 쉽게 지하로 유입될 수 있는 지질구조가 형성되어 있다. 따라서 산성마을 분지 지역은 금정산 일원 지하수의 주요 함양지가 될 수 있는 조건을 갖추고 있다.

한편, 동북동방향의 J2 단열군은 산성마을을 중심으로 동서로 양분되어 높은 빈도 이상대를 형성하고 있다(Figure 8). 따라서 산성마을 분지에서 함양된 지하수는 이들 단열들을 통로로 하여 동과 서쪽의 지하로 이동할 것으로 판단된다. 이때 분지의 중앙부에 주로 나타나는 점토화된 남북방향 염기성 암맥들은 지하로 유입된 지하수의 흐름을 동편과 서편의 것으로 단절시키는 자연 차수벽의 역할을 할 가능성이 높다. 산성마을 분지가 동서로 비대칭 지형을 형성하고 있음을 감안한다면 분지에 집수된 지표수는 분지의 서쪽으로는 대부분 계곡을 따라 발달한 하천에 의해 낙동강으로 유출되어 지하로 유입되는 양이 적을 것이나 동쪽으로는 계곡이 발달하지 않으므로 많은 양이 암반 내 단열들을 통로로 지하로 유입될 가능성이 높다.

동래온천은 서쪽으로 금정산에 의해 그리고 동쪽으로는 동래단층에 의해 규제되어 동래구 온천1동에 매우 제한적으로 발달한다(Figure 1과 2). 이는 동래단층을 따라 발달하는 단층비지대가 자연적인 지하 차수벽의 역할을 하여 지하수의 흐름을 규제하고 있으며 단층의 동쪽과 서쪽의 지하수 유동 체계는 서로 단절되어 있음을 의미한다. 따라서 온천1동 지하수의 대부분은 동쪽보다는 서쪽 지역에서 함양, 유입되었을 가능성이 매우

높다. 한편, 동래온천은 북쪽으로는 남동방향으로 경사진 J2 밀집 지역(Figure 9a)에 의해 남쪽으로 북서방향으로 경사진 J2 밀집 지역(Figure 9b)에 의해 구획되어 있다. 또한, 동서방향 J3의 밀집 지역은 산성마을 분지에서 남북으로 연장되다가 동쪽으로 휘어져 온천 지역인 온천1동으로 정확히 연결되는 양상이다(Figure 10). 따라서 이곳 지하수는 대부분 산성마을 분지 지역에서 함양되었으며 J2와 J3 단열들을 통로로 온천1동으로 이동된 것으로 해석된다.

단열의 발달은 지하 천치 지하 4 km 이내에 국한되는 것이 일반적이나 금성동단층 파쇄 단열면을 따라 염기성 암맥군이 수동적으로 관입하고 있는 것으로 보아 현재 지표에서 관찰되는 단열들은 적어도 지하 3~4 km 깊이까지는 연장될 것으로 보인다. 천열수 또는 관입암류의 형성 심도는 일반적으로 약 3 km 이상이며 취성변형이 발생할 수 있는 지각의 최대 깊이는 약 10 km이다 (Sibson, 1977).

Aquilina et al.(1997)은 지열탐사를 위하여 라인 지구대의 화강암 기반암내에 굴착된 3600m 깊이의 시추공 자료로부터 지열수의 순환이 적어도 3,500 m까지 일어남을 보고하였다. 동래온천의 지열수 용출온도는 50.6 ~ 66.4°C 이며, Han et al.(1999)은 지온계를 이용하여 동래온천의 심부 지열수를 약 130°C 정도로 산정하였다. 한편 한반도 동남부의 지하증온률 28°C/km를 감안하면 지열수의 온도 약 130°C에 해당하는 지열원의 깊이는 4.1km로 산정된다. 동래온천의 열원과 관련되는 금정산 화강암의 연대는 백악기말로서(이윤중 외, 1999) 지열개발의 측면에서는 비교적 화강암의 연대가 오래되므로 지열수가 130°C 정도의 고온에 도달하기 위해서는 그 순환 깊이가 깊어야 할 것이다. 따라서 구조지질, 수리지질 그리고 지화학적 증거들로 볼 때, 산성마을 분지에서 함양된 지하수는 최소한 지하 3~4 km의 깊이까지 순환한 후 동래온천으로 유입되는 것으로 해석된다. 그러나 동래온천의 형성 메카니즘을 명확히 설명하기에는 현재의 자료로는 부족한 것이 사실이다. 그러므로 현재 진행되고 있는 수리지질학적, 지열학적, 지구화학적 연구 결과가 보완된다면 동래온천의 지열계에 대해서 보다 명확한 해석이 이루어

어질 수 있을 것이다.

이상의 결과들을 미루어 볼 때, 주거 시설과 시민 휴양 시설들이 밀집되어 있는 금정산 산성마을 지형 분지는 주변 지하수의 주요 함양지이며 이곳에서 함양된 지하수는 주요 단열근의 밀집 지역을 따라 지하로 이동하여 온천1동 동래온천 지역으로 유입될 가능성이 매우 높은 것으로 결론지워진다. 따라서, 금정터널은 물론이거니와 기타 지하 구조물의 시공시 지하수 유동과 관련된 단열계의 분석을 철저히 하여 자연 환경 및 주민 생활에 피해를 최소화하는 방향으로 설계 및 굴착이 진행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 금정산 일원 지하수의 오염 방지를 위하여 주요 함양지인 산성마을 일대의 지표수와 지하수의 오염실태 파악과 그 대책이 수립되어야 할 것이다.

참고 문헌

- 경제북, 장태우, 2001, 양산단층대 북부 유계리 일대의 신기 단층운동, 지질학회지, 37권, 4호, 563-577.
- 김인수, 1992, 새로운 동해의 성인모델과 양산단층계의 주향이동운동. 지질학회지, 28권, 1호, 84-109.
- 류춘렬, 김인수, 1997, 양산 통도사 일원의 파쇄구조: 양산단층대 우향이동의 증거, 대한자원환경학회 제30차 학술발표회 발표논문 요약집, 18 p.
- 문태현, 손문, 장태우, 김인수, 2000, 한반도 동남부 제3기분지 지역에서의 신생대 고응력장 복원, 지구과학회지, 21권, 3호, 230-249.
- 손문, 김종선, 김진섭, 김인수, 2002a, 한반도 남동부 제3기 암맥군과 지각변형, 암석학회지 (심사중).
- 손문, 정혜윤, 김인수, 2002b, 한반도 남동부 연일 구조선 남부 일원의 지질과 지질구조, 지질학회지, 38권, 2호, 175-197.
- 손치무, 이상만, 김영기, 김상욱, 김형식, 1978, 한국지질도 (1:50,000) 동래·월래도폭 및 설명서, 자원개발연구소, 27 p.
- 신희순, 선우춘, 이두화, 2000, 토목기술자를 위한 지질조사 및 암반분류, 구미서관, 491 p.

- 이윤중, 윤성효, 김상욱, 고인석, 황상구, 정원우, 김중욱, 이철락, 하야시 마사오, 1999, 부산 금정산 지역 화강암류의 저어콘에 대한 형태학적 연구, 암석학회지, 8권, 2호, 71-80.
- 장천중, 2001, 양산단층의 구조적 특성과 진화, 이학박사 학위논문, 경북대학교, 259 p.
- 최위찬, 류충렬, 기원서, 이봉주, 이병주, 황재하, 박기화, 최영섭, 최성자, 최범영, 조동룡, 김복철, 송교영, 채병곤, 김원영, 김중렬, 이상규, 조성준, 황세호, 황학수, 김유성, 현혜자, 박인화, 이희일, 이동영, 이창범, 김주용, 양동윤, 박덕원, 신성천, 김유숙, 김인준, 류장한, 진명식, 전명순, 지헌철, 전정수, 신인철, 강익범, 신현모, 권무창, 오수정, 김상근, 임무수, 김순길, 정항영, 1998, 양산단층을 고려한 설계기준지진의 재평가 최종보고서, 한국자원연구소, 한국전력공사, 1694 p.
- Aquilina, L., Pauwels, H., Genter, A., and Fouilliac, C., Water-rock interaction processes in the Triassic sandstone and the granitic basement of the Rhine Graben: Geochemical investigation of a geothermal reservoir, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 61, n. 20, 4281-4295.
- Davis, G.H. and Reynolds, S.J., 1996, *Structural geology and regions*, 2nd edition, John Wiley & Sons, 776 p.
- Han, S.J., Hamm S.-Y., Sung, I.H., Lee, B.D., Cho, B.W., and Cho M.H., 1999, Geochemical characteristics of geothermal water and groundwater in the Dongrae hot-spring area, *The Jour. Eng. Geol.*, v. 9, n. 3, 207-225.
- ISRM, 1981, Commission on classification of rocks and rock masses: Geotechnical Description of Rock Masse (B.G.D.), *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, v. 22, n. 6, 443-451.
- Pollard, D.D. and Aydin, A., 1988, Progress in understanding jointing over the past century, *Geological Society of American Bulletin*, V. 100, 1181-1204.
- Price, N.J. and Cosgrove, J.W., 1990, *Analysis of Geological Structures*, Cambridge Univ. Press, 502 p.
- Priest, S.D., 1993, *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*, Chapman & Hall, 473 p.
- Sibson, R.H., 1977, Fault rocks and fault mechanisms, *Journal of Geological Society of London*, v. 133, 191-213.
- Wilcox, R.E., Harding, T. P. and Seely, D. R., 1973, Basic wrench tectonics, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 63, 2183-2191.
- Woodcock, N.J. and Schubert, C., 1994, Continental strike-slip tectonics, in Hancock, P. L. (ed.), *Continental deformation*, Pergamon Press, 251-263.

투 고 일	2002년 7월 3일
심 사 일	2002년 7월 4일
심사완료일	2002년 8월 17일

손 문

부산대학교 자연과학대학 기초과학연구소
609-735, 부산광역시 금정구 장전동 산 30
Tel: 051) 510-3572
E-mail: moonson@pusan.ac.kr

함세영, 김인수, 이용희, 정훈, 류준길
부산대학교 자연과학대학 지구환경시스템학부
Tel) 051) 510-2252
E-mail: hsy@pusan.ac.kr

송원경
한국지질자원연구원 암반공학팀
305-350, 대전광역시 유성구 가정동 30
Tel: 042) 868-3247
E-mail: songwk@kigam.re.kr