

# 옥천습곡대 서남부지역에 분포하는 쥐라기 화강암류의 석영내 아문 미세균열 및 유체포유물을 이용한 고응력장

강성승<sup>1</sup> · 유봉철<sup>2</sup> · 장보안<sup>3</sup> · 김정빈<sup>4,\*</sup>

<sup>1</sup>조선대학교 자원공학과, 501-759, 광주광역시 서석동 375

<sup>2</sup>충남대학교 지구환경과학과, 305-764, 대전광역시 대학로 79

<sup>3</sup>강원대학교 지구물리학과, 200-701, 강원도 춘천시 효자2동 192-1

<sup>4</sup>순천대학교 과학·환경교육학부, 540-742, 전라남도 순천시 매곡동 315

## Paleostress from Healed Microcracks and Fluid Inclusions in Quartz of the Jurassic Granites in the Southwestern Ogcheon Folded Belt

Seong-Seung Kang<sup>1</sup>, Bong Chul Yoo<sup>2</sup>, Bo-An Jang<sup>3</sup>, and Cheong-Bin Kim<sup>4,\*</sup>

<sup>1</sup>Resources Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

<sup>2</sup>Department of geology and environmental sciences, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

<sup>3</sup>Department of geophysics, Kangwon National University, Gangwon 200-701, Korea

<sup>4</sup>Division of Science and Environmental Education, Suncheon National University, Jeonnam 540-742, Korea

**Abstract:** Paleostress was interpreted by analyzing the healed microcracks and the secondary fluid inclusions in quartz of the Jurassic granites distributed in the southwestern Ogcheon Folded Belt, South Korea. The most dominant direction of healed microcracks in the study area was oriented N30°W, and N70°W direction was also recognized. The formation temperatures of fluid inclusions were ranged 380-550°C and the age of healed microcrack formations might have been approximately 166-200 Ma. Comparing the paleostress orientation obtained from the direction of healed microcracks to the formation age of healed microcracks estimated from the secondary fluid inclusions, it is considered that granitic rock body in study area was subject to a maximum horizontal principal stress along the NNW-SSE and WNW-ESE directions in the early Jurassic to middle Jurassic.

**Keywords:** Ogcheon Folded Belt, healed microcrack, fluid inclusion, paleostress, maximum horizontal principal stress

**요약:** 옥천습곡대의 서남부지역에서 분포하는 쥐라기 화강암류의 석영내에 존재하는 아문 미세균열과 유체포유물을 분석하여 이 지역에 작용한 고응력장을 해석하였다. 연구지역에서 나타나는 아문 미세균열의 방향성은 전체적으로 N30°W의 방향이 가장 우세하며 N70°W의 방향도 나타난다. 연구지역의 아문 미세균열 생성온도는 380-550°C 범위를 보이며, 이들 아문 미세균열은 약 166-200 Ma의 기간 동안 형성되었을 것으로 추정된다. 아문 미세균열의 방향성을 통한 고응력장의 작용 방향과 유체포유물에 의한 아문 미세균열의 형성시기를 비교하여 볼 때, 연구지역 내에서 발달하는 화강암질암체는 NNW-SSE와 WNW-ESE 방향의 최대수평주응력인 고응력장이 쥐라기 초기에서 쥐라기 중기 기간 동안 작용하였을 것으로 사료된다.

**주요어:** 옥천습곡대, 아문 미세균열, 유체포유물, 고응력, 최대수평주응력

\*Corresponding author: cbkim@suncheon.ac.kr

Tel: 82-61-750-3393

Fax: 82-61-750-3308

## 서 론

화강암내 석영은 다른 규산염 광물에 비하여 온도 저하에 따른 체적변화가 커서 미세균열에 의한 공극률이 높게 나타나는데 이것은 화강암의 물리적·역학적 특성에 많은 영향을 미친다. 미세균열은 일반적으로 한 입자 내에서만 존재하는 입자내 균열(intragranular crack), 둘 이상의 입자를 관통하는 입자관통 균열(intergranular crack), 그리고 입자 경계를 따라 발달하는 입자경계 균열(grain boundary crack)로 나눌 수 있다(Nur and Simmons, 1970; Simmons and Richter, 1976; Kranz, 1983). 또한 균열내 유체포유물의 존재유무에 따라 열린 미세균열(open microcrack)과 아문 미세균열(healed microcrack)로 구분할 수 있다. 아문 미세균열(healed microcrack)은 화성암이나 변성암의 석영입자에서 관찰되는 Mode I 형태의 입자내 균열로서 하나 또는 두개의 방향성을 가지고 있다(Kowallis et al., 1987; Jang et al., 1989; Ren et al., 1989). 아문 미세균열은 수압파쇄(Knapp and Knight, 1977), 열수화산(Shelton and Orville, 1980; Smith and Evans, 1984; Brantley et al., 1990), 열응력(Norton, 1982; Kranz, 1983; Plumb et al., 1984; Fredrich and Wong, 1986; Homand-Etienne and Houper, 1989), 지진(Mawer and Williams, 1985) 등 다양한 요인들에 의해 생성됨이 보고되었다.

아문 미세균열이 가지고 있는 특정한 방향성은 아문 미세균열이 형성될 당시 암체에 작용한 최대주응력의 방향과 일치한다고 알려져 있으며, 이 방향성은 고응력장을 해석하는데 유용하게 이용된다(Tuttle, 1949; Pêcher et al., 1985; Lespinasse and Pêcher, 1986; Kowallis et al., 1987; Jang et al., 1989; Laubach, 1989; Ren et al., 1989; Jang and Wang, 1991; 장보안과 김정애, 1996; 정해식과 장보안, 2004). 또한 아문 미세균열 내의 유체포유물 온도측정 결과는 서로 다른 아문 미세균열군이 시기가 다른 여러 번의 변형작용을 통해 형성되었음을 밝힐 수 있으므로 고응력장의 방향 및 시기를 규명하는데 유용하게 이용될 수 있다(Pêcher et al., 1985; Lespinasse and Pêcher, 1986; Jang et al., 1989; Ren et al., 1989; Jang and Wang, 1991; 장보안과 김정애, 1996; 정해식과 장보안, 2004).

옥천습곡대는 한반도뿐만 아니라 동아시아의 지구조를 이해하는데 매우 중요한 위치에 놓여있는 곳이

다. 특히 이 지역은 수차례의 화성활동과 지구조운동으로 복잡한 지질양상을 보이기 때문에 현재까지도 지구조적으로 해석하는데 많은 논란이 되고 있다. 옥천습곡대의 서남부지역의 화성암은 중생대 트리아스기 말기에서 유라기 초기에 관입·정지한 대보화강암과 백악기 말기에서 신생대 제3기 초기의 화산암과 불국사화강암으로 구분된다(김정빈, 1990; Jin, 1995). 이 연구는 옥천습곡대 서남부지역에 분포하는 중생대 유라기 화강암을 대상으로 화강암의 석영내 아문 미세균열의 방향성과 유체포유물의 온도를 측정하고 화강암의 냉각사를 추정하여 이 지역에 작용한 고응력장의 방향과 작용시기를 규명하는데 있다.

## 지질개요

연구지역은 옥천습곡대의 서남부지역에 해당하며 선캄브리아기 변성암복합체를 기저로 이를 관입하는 수차례의 화성활동과 지구조운동으로 복잡한 지질양상을 보인다. 본 지역의 지질은 선캄브리아기의 변성암복합체, 트리아스기에서 유라기의 화성활동을 시사하는 엽리상화강암과 대보화강암, 경상누층군에 대비되는 진안층군과 능주층군 그리고 불국사화강암에 대비되는 화성암류와 맥암류로 구성된다(Fig. 1). 한반도는 세 개의 주요한 선캄브리아 육괴인 낭림육괴, 경기육괴 그리고 영남육괴로 이루어져 있는데, 낭림과 경기육괴는 임진강대에 의해 그리고 경기과 영남육괴는 옥천습곡대에 의해 구별되며, 남동부의 경상분지는 동쪽을 향해 완만하게 경사져 발달해 있다(Chough et al., 2000). 연구지역에는 지구조적으로 한반도의 영남육괴와 옥천습곡대의 경계를 이루는 호남전단대가 폭 0.2-4 km, 약 400 km의 연장성을 보이며 북북동-남남서방향으로 관통한다(Yanai et al., 1985). 호남전단대는 연성전단작용을 수반한 우수향 주향이동단층 운동으로 형성되었으며, 우리나라뿐만 아니라 동아시아의 지구조사를 해석하는데 중요한 구조선 중의 하나이다. 더욱이 본 지역에는 평안분지와 경상분지의 일부가 보존되어 있을 뿐만 아니라 지질시대를 달리하는 각종 화성암류가 골고루 분포하여 각 지질시대별로 화성활동과 지구조운동이 활발했음을 시사한다.

연구지역에 분포하는 엽리상화강암은 특징적으로 전단작용에 의한 엽리구조를 함유하고 야외증거, 구성광물 및 절대연대 등에 의해 대강엽리상화강암, 순

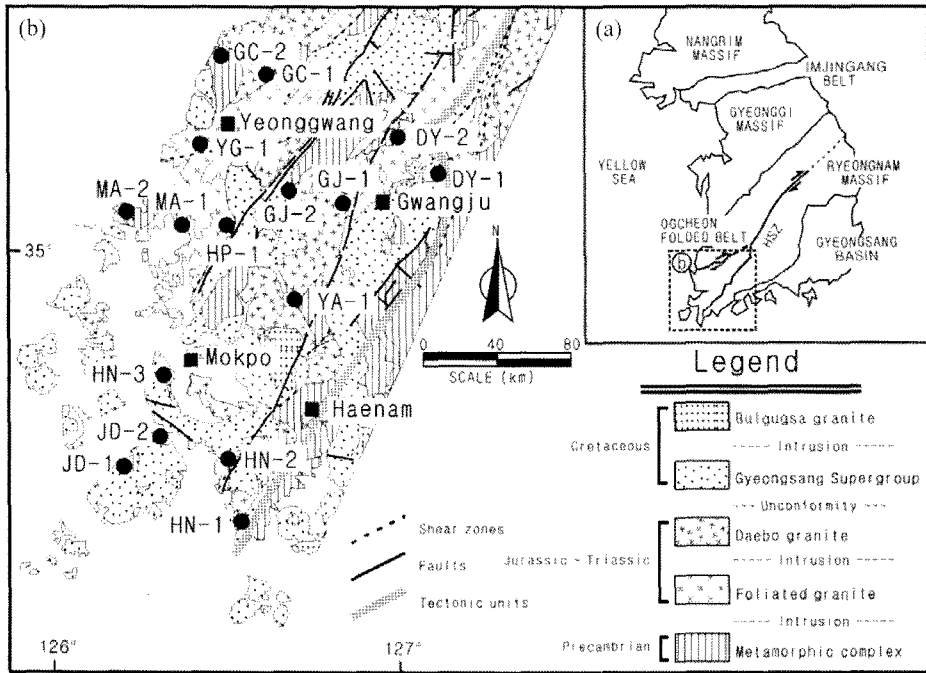


Fig. 1. Geological map of study area and sampling locations (Modified after the map (1:1,000,000) by Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (2001). HSZ: Honam Shear Zone.

창엽리상화강암, 고창엽리상화강암, 영광엽리상화강암으로 구분된다(Turek and Kim, 1995). 광물조성에 의하면 이 암체들은 화강암에서 화강섬록암 및 석영섬록암에 이르는 다양한 암상을 보이고, 전단작용에 의하여 신장되거나 재결정된 유색광물로 인한 뚜렷한 선구조를 보인다. 그 관입시기는 212-183 Ma로 트라이아스기 말에서 주리기 초기에 해당한다(Turek and Kim, 1995). 이 암체들은 선캠브리아기 변성암복합체를 관입하고 후기 경상누층군에 의해 부정합으로 덮인다(김정빈, 1990).

연구지역의 주리기 대보화강암은 저반형 관입암체로 그 성분은 토날라이트에서 화강암에 해당하며, 산상, 구성광물 및 조직에 의해 광주화강암, 가학산화강암, 산이화강암, 나주화강암 등으로 구분된다(김용준 외, 1993). 이 암체들은 선캠브리아기 편마암을 관입하고 후기의 불국사화강암에 의해 관입된다. 본 암체들의 관입시기는 180-176 Ma(Turek and Kim, 1995)로 주리기 중엽이며 이는 호남전단대에서 전단작용의 상환을 지시하는 지질학적인 의미를 갖는다. 불국사화강암은 광물조성과 산상 그리고 절대연대를 근거로 미문상화강암, 흑운모화강암 및 화강반암으로 구분되며 월출산, 대홍사, 완도, 유달산 및 낙안지역

에 소규모 암주상으로 분포하며 상기의 모든 암석을 관입한다(최범영 외, 2002).

### 연구방법

대상 시료는 풍화되지 않은 신선한 화강암체 노두를 선택하여 평행하지 않은 두 개의 면에서 주향과 경사를 측정하는 정향시료채취법(oriented sampling method)을 이용하여 채취하였으며(Fig. 2), 채취한 시료는 실험실에서 박편을 제작할 때 야외에서의 자세를 그대로 복원할 수 있도록 하였다. 일반적으로 아문 미세균열은 거의 수직인 경사를 보이므로(Tuttle, 1949; Kowallis et al., 1987) 북쪽을 기준으로 한 수평박편만을 제작하였다. 따라서 박편상에 나타나는 아문 미세균열의 주향은 최대수평주응력의 방향과 일치하게 된다. 아문 미세균열의 방향을 측정하기 위한 박편은 0.1-0.2 mm 정도의 두께로 제작하였으며, 아문 미세균열을 용이하게 관찰하기 위하여 1 μm의 다이아몬드 연마제를 사용하여 박편의 표면을 깨끗하게 마무리하였다. 석영내에 발달해 있는 아문 미세균열의 방향은 편광현미경에 장착된 4축 만능채물대(4-axis universal stage)에 박편을 올려놓고 100배의 배율로 관찰하면서

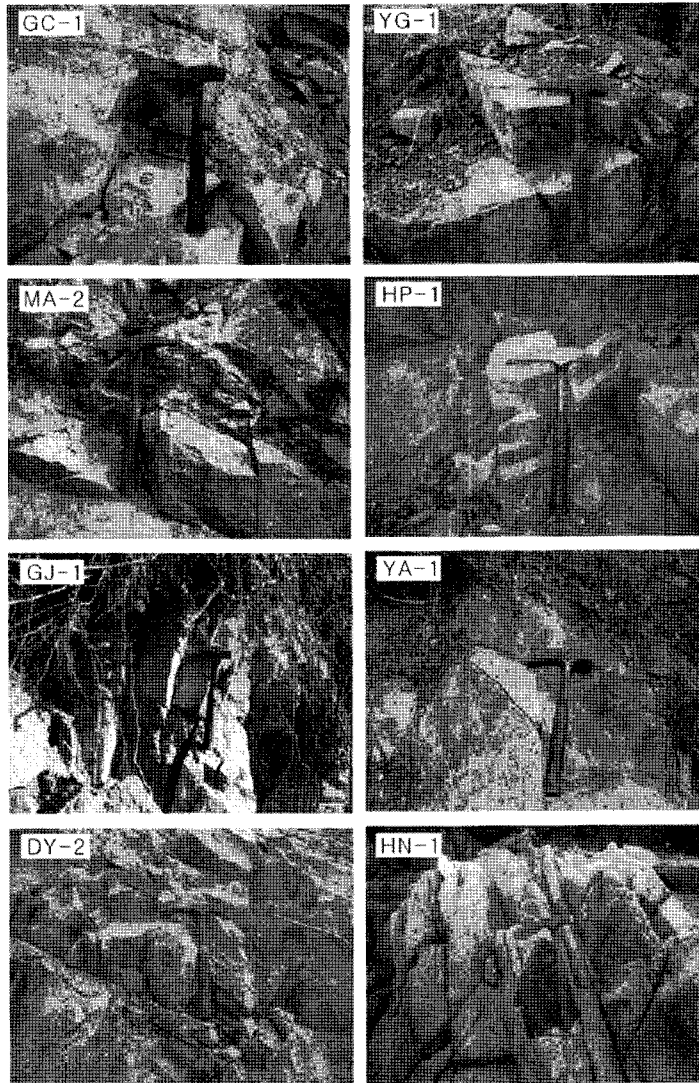
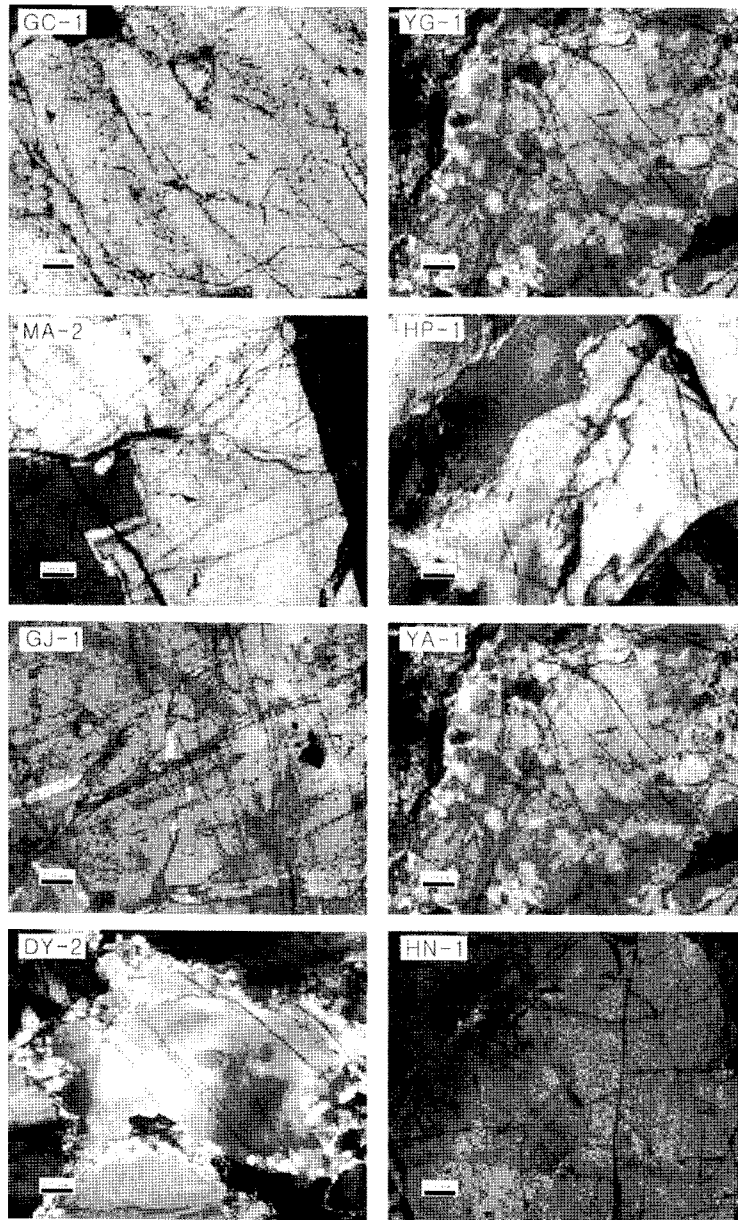


Fig. 2. Rock samples corrected by the oriented sampling method on an outcrop. Daebo granite: GC-1, GJ-1, YA-1 and HN-1, Foliated granite: DY-2, YG-1, HP-1 and MA-2.

주향과 경사를 측정하고 그 특징을 기재하였다. 한 박편당 100개 이상의 아문 미세균열을 측정하였고, 측정된 방향은 10° 간격의 백분율로 나타내어 로즈다이어그램으로 표현하였다. 유체포유물 온도를 측정하기 위한 박편은 아문 미세균열이 잘 발달하고 유체포유물이 뚜렷하게 관찰되는 시료를 선택하여 제작되었다. 유체포유물 온도측정용 박편 제작은 1µm의 다이아몬드 연마제를 사용하여 박편의 양쪽 표면을 깨끗하게 연마하였다. 유체포유물의 성분과 포획 온도특성을 파악하기 위하여 박편의 크기를 직경 약 15mm 정도로 만들어 유체포유물 측정용 재물대 속에 장치시킨 후,

아문 미세균열 내 유체포유물의 냉각-가열 시험을 통하여 녹는 온도(melting temperature,  $T_m$ )와 균질화 온도(homogenization temperature,  $T_h$ )를 측정하였다. 유체포유물의 녹는 온도는 액체질소와 질소가스를 사용하여 완전히 열린 후 온도를 서서히 상승시키면서 포유물 내의 얼음이 녹는 온도를 측정하였으며, 균질화 온도는 유체포유물을 천천히 가열하여 유체포유물 내의 기포가 완전히 사라질 때의 온도를 측정하였다. 유체포유물의 녹는 온도는 유체의 염도를 지시하고, 균질화 온도는 유체포유물이 형성된 포획 온도를 결정하는데 이용된다.

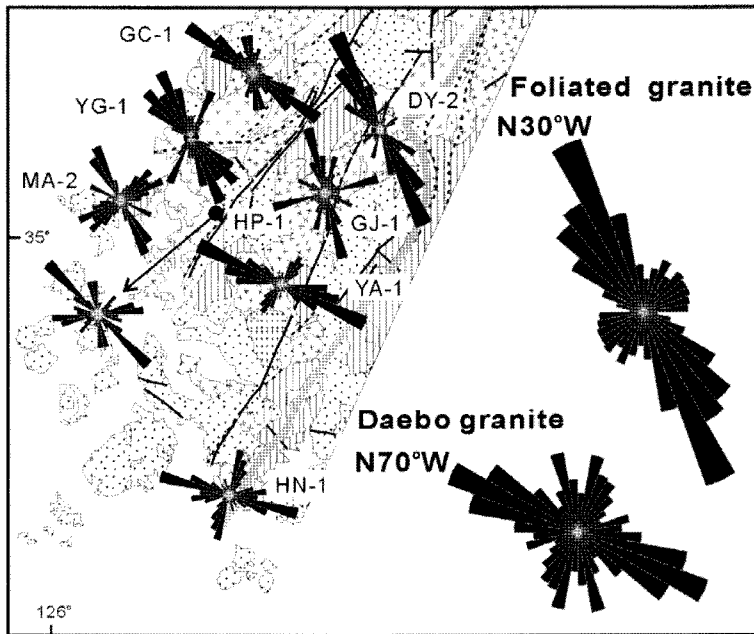


**Fig. 3.** Direction of healed microcracks developed in quartz of the Jurassic granite. Daebo granite: GC-1, GJ-1, YA-1 and HN-1, Foliated granite: DY-2, YG-1, HP-1 and MA-2.

### 아문 미세균열의 방향성

옥천습곡대 서남부 지역에 분포하는 대보화강암 및 엽리상화강암 시료를 16개 지역에서 채취한 후 박편을 제작하여 석영내 아문 미세균열의 발달 상황을 관찰한 결과 8개의 시료(GC-1, GJ-1, YA-1 및 HN-1은 대보화강암, DY-2, YG-1, HP-1 및 MA-2는 엽리상화강암)에서 아문 미세균열의 방향이 뚜렷하게 관

찰되었으며, 이들 시료를 대상으로 아문 미세균열의 방향성을 측정하였다. 아문 미세균열의 방향과 그 특성을 관찰한 결과, 아문 미세균열은 대부분 하나의 입자 내에서 형성된 입자내 균열에 해당되었으며, 또한 거의 수직인 경사를 보이는 Mode I 인장균열이었다(Fig. 3). 쥐라기 화강암의 각 노두에서 측정된 아문 미세균열의 주방향을 종합하여 로즈다이아그램으로 나타낸 후 지질도 상에 도시하였다(Fig. 4). GC-1



**Fig. 4.** Composite rose diagram of healed microcrack orientation in the rock samples GC-1 (N: 103), YG-1 (N: 105), MA-2 (N: 104), HP-1 (N: 100), DY-2 (N: 106), GJ-1 (N: 100), YA-1 (N:100), HN-1 (N:102). Daebo granite: GC-1, GJ-1, YA-1 and HN-1 (N70°W), Foliated granite: DY-2, YG-1, HP-1 and MA-2 (N30°W). N: a number of measured healed microcracks.

시료의 경우 N50°W의 방향이 가장 뚜렷하게 관찰된다. GJ-1의 시료에서는 N10°W와 N70°E의 두 방향이 혼재되어 나타나며, YA-1과 HN-1 시료에서는 각각 N60°W와 N70°W의 방향이 가장 뚜렷하게 나타난다. DY-2 시료의 경우 N20°W의 방향이 가장 뚜렷하며, YG-1 시료의 경우 N20°-40°W의 방향이 우세하게 나타난다. HP-1 시료에서는 N40°W의 방향이 우세하게 나타나며, MA-2의 시료에서는 N20°W의 방향이 가장 뚜렷하게 나타난다. 이상의 결과를 종합해 보면, 모든 시료에서 NW-SE 방향이 우세하게 나타나고 있으나 대보화강암과 엽리상화강암에서의 방향 차이가 두드러진다. 각 시료에서 측정된 아문 미세균열의 방향성을 종합적으로 표현해 보면 대보화강암은 N70°W, 엽리상화강암은 N30°W의 방향이 우세하게 나타남을 알 수 있다.

### 유체포유물의 측정

#### 온도 측정

아문 미세균열내의 유체포유물의 녹는 온도와 균질화 온도는 모든 시료 중 유체포유물이 비교적 뚜렷하게 관찰되는 5개 시료(GC-1, YA-1은 대보화강암,

YG-1, HP-1, DY-2는 엽리상화강암)를 선택하여 측정되었다. 유체포유물의 녹는 온도는 유체의 염도에 대한 정보를 제공하고, 균질화 온도는 미세균열이 닫히게 된 최소의 온도를 지시하므로 유체포유물의 측정은 아문 미세균열의 생성시기 및 방향에 따른 생성시기의 선후관계를 지시해 준다. 따라서 이 연구에서는 아문 미세균열내에 분포하는 2차 유체포유물(secondary fluid inclusion)만을 대상으로 측정하였다. 유체포유물의 산출상태, 가열 및 냉각실험은 니콘현미경에 장착된 Linkam THMSG 600을 이용하여 측정하였다. 유체포유물 측정 이전에 Linkam THMSG 600은 U.S.G.S.에서 제작된 표준시료(H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O+CO<sub>2</sub>)를 이용하여 보정하였다. 측정오차는 냉각실험시 ±0.1°C, 가열실험시 ±0.5°C 이내를 보인다. 측정은 편광현미경하에서 우세한 방향성을 보이는 아문 미세균열내에 존재하는 2차 유체포유물을 관찰하고 그 형태를 기록한 후, 관측된 유체포유물을 질소가스와 액체질소를 사용하여 얼린 후 온도를 서서히 상승시키면서 유체포유물이 액체나 기체로 균질화되는 온도를 측정하였다. 아문 미세균열의 방향에 따라 측정된 녹는 온도와 균질화 온도를 기재하였으며, 가능한 하나의 유체포유물에 대해 녹는 온도와 균질화 온도 모

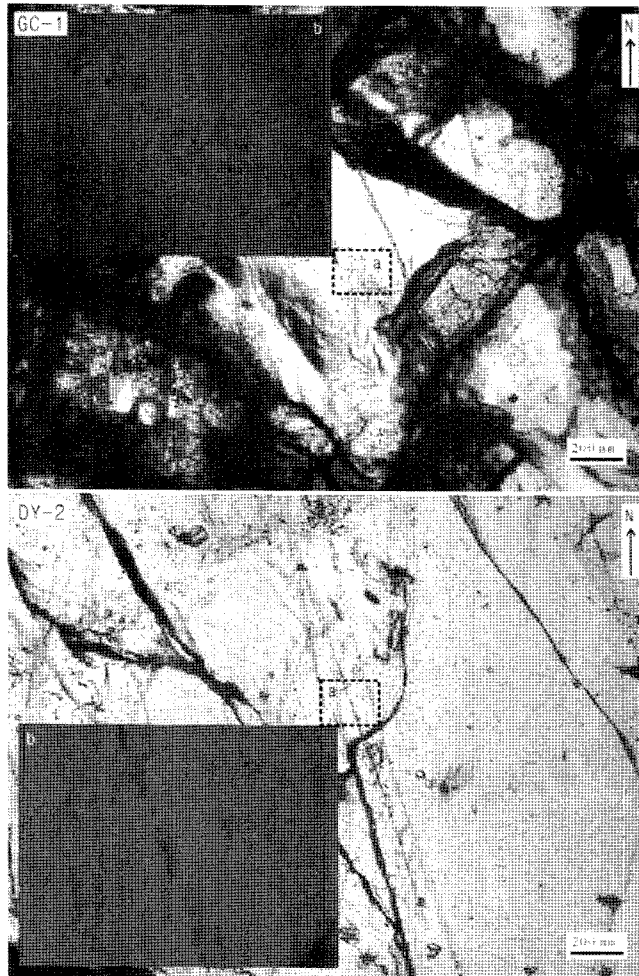


Fig. 5. Healed microcracks of the NW-direction and fluid inclusion of NaCl-H<sub>2</sub>O type in healed microcrack.

두를 측정하려고 하였지만, 유체포유물의 크기가 작은 경우(5 μm 이하)는 녹는 온도나 균질화 온도만이 측정되었다.

옥천습곡대 서남부지역의 주라기 화강암의 석영내에 발달해 있는 아문 미세균열은 대체적으로 NW-SE 방향이 우세하게 나타나며, 그 방향의 유체포유물들이 비교적 뚜렷하게 관찰되었다. 측정된 아문 미세균열내 유체포유물들의 사진을 Fig. 5에 나타냈으며 b는 a를 25배 확대한 것이다. 각 시료에 대한 유체포유물의 녹는 온도와 균질화 온도의 측정결과는 Fig. 6에서 보여준다. GC-1 시료에서는 녹는 온도가 -5-<sup>-2</sup>°C의 범위를 보이고 -2°C 부근에서 최고치를 가지며, 균질화 온도는 180-320°C의 범위를 보이고 310°C 부근에서 최고치를 가진다. YA-1 시료에서는 녹는 온도가 -2-<sup>-1</sup>°C의 범위를 보이고 -2°C 부근에서

최고치를 가지며, 균질화 온도는 150-210°C의 범위를 보이고 180-190°C 부근에서 최고치를 가진다. 또한 YA-1 시료는 측정된 시료 중에서 가장 높은 녹는 온도와 가장 낮은 균질화 온도를 나타냄과 함께 가장 좁은 온도 분포를 보인다. YG-1 시료에서는 녹는 온도가 -4-<sup>-1</sup>°C의 범위에 분포하고 -2°C 부근에서 최고치를 가지며, 균질화 온도는 170-300°C의 범위에 분포하고 270-280°C의 부근에서 최고치를 가진다. HP-1 시료에서는 녹는 온도가 -3-<sup>-1</sup>°C의 범위를 보이고 -2°C 부근에서 최고치를 가지며, 균질화 온도는 150-310°C의 범위를 보이고 170°C 부근에서 최고치를 가진다. DY-2 시료에서는 녹는 온도가 -15-<sup>-5</sup>°C의 범위를 보여 가장 낮은 녹는 온도를 나타내며 -6°과 -11°C의 두 부근에서 최고치를 가진다. 균질화 온도는 190-300°C의 범위에 분포하고 250°C의 부근에

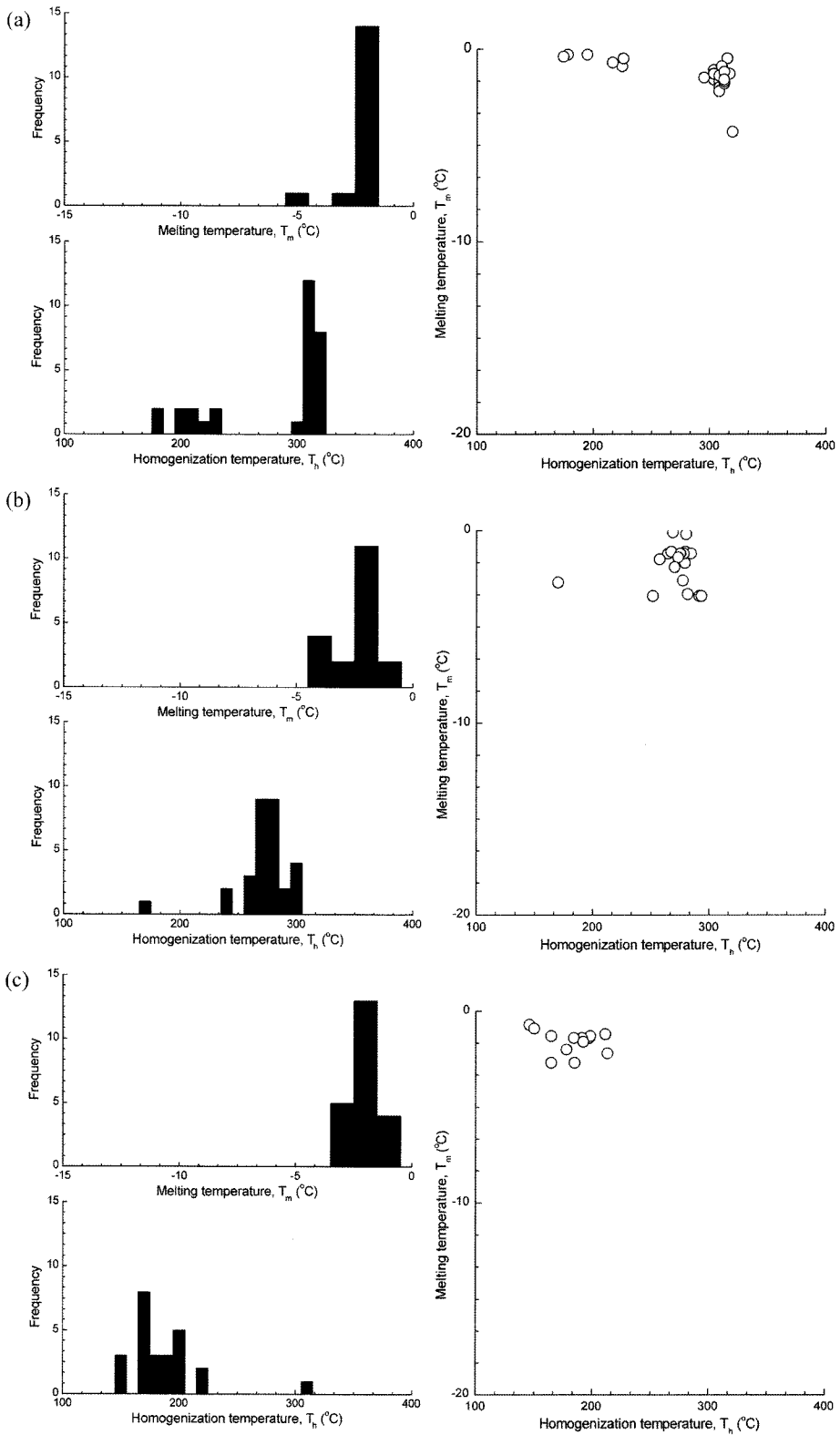


Fig. 6. Histograms of melting and homogenization temperatures and plots of fluid inclusion in (a) GC-1, (b) YG-1, (c) HP-1, (d) DY-2 and (e) YA-1. Daebo granite: GC-1 and YA-1, Foliated granite: DY-2, YG-1, HP-1.



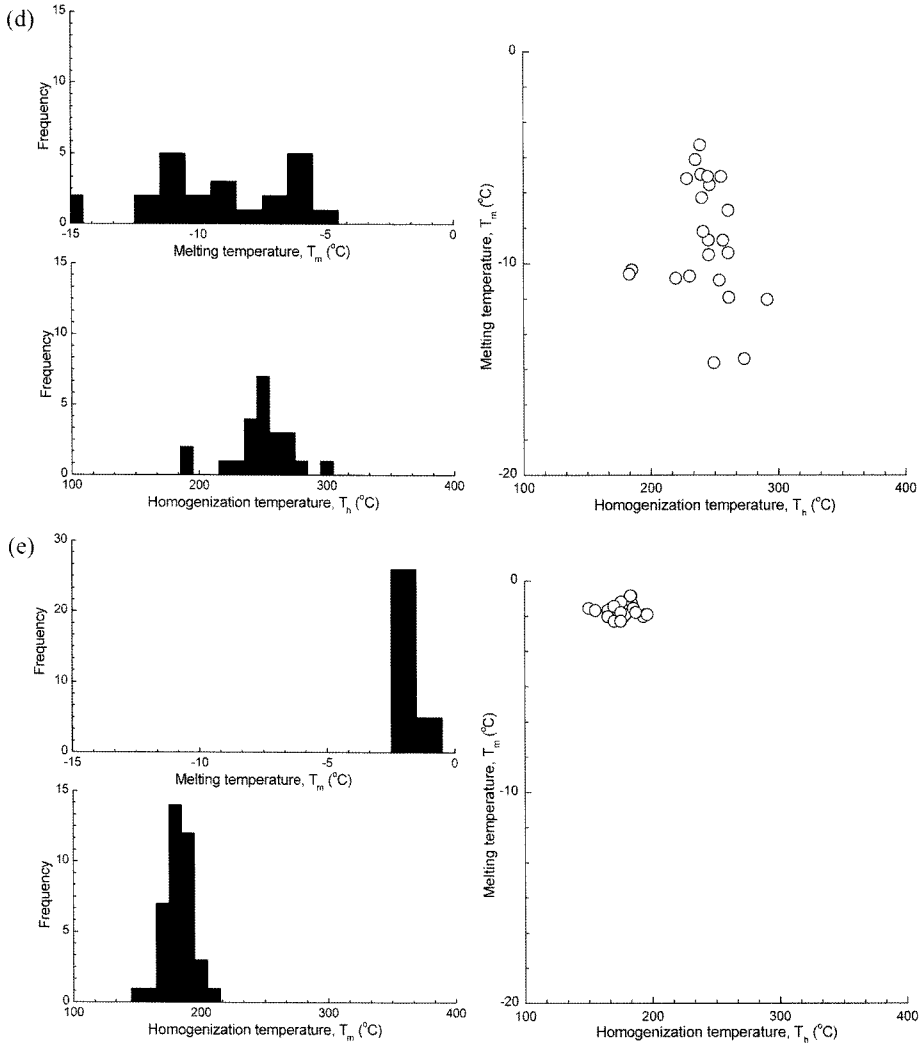


Fig. 6. Continued.

서 최고치를 가진다. 최고치 녹는 온도의 경우 DY-2 시료를 제외한 나머지 시료에서는 같은 결과를 보인 반면, 균질화 온도의 경우 YA-1 시료를 제외한 나머지 시료에서 거의 비슷한 균질화 온도 범위를 보였다.  $\text{H}_2\text{O}$ -NaCl 유체포유물의 녹는 온도는 유체의 NaCl 농도에 따라 달라지므로 이들 관계로부터 유체포유물을 형성시킨 유체의 염농도를 계산할 수 있다 (Potter, 1977). 유체포유물의 NaCl 중량 백분율 농도는 GC-1 시료의 경우 0.50-6.81 wt.%, YA-1 시료의 경우 1.16-3.12 wt.%, YG-1 시료의 경우 0.17-5.47 wt.%, HP-1 시료의 경우 1.16-4.40 wt.%, DY-2 시료의 경우 7.96-18.37 wt.% 범위를 보이며, DY-2 시료가 가장 높은 값을 나타낸다(Table 1).

### 온도보정 및 유체포유물의 포획 온도

아문 미세균열의 생성온도는 유체포유물의 균질화 온도에서 추정할 수 있다. 아문 미세균열 내의 유체포유물은 처음에 넓고 긴 판상의 유체포유물면을 형성하지만, 시간이 증가함에 따라 표면에너지가 감소하면서 그 형태가 판상에서 원통형이나 구형으로 변하는 분절현상(necking down)이 발생하므로 아문 미세균열 내에는 다양한 유체:기포 비를 갖는 유체포유물이 존재하게 된다(Roedder, 1984; Smith and Evans, 1984). 따라서 동일 아문 미세균열내 존재하는 유체포유물의 균질화 온도는 실제 균질화 온도보다 넓은 온도분포를 가질 수 있으므로 실제의 포획 온도를 구하기 위해서는 적절한 온도보정이 이루어져

**Table 1.** Results of melting ( $T_m$ ), homogenization ( $T_h$ ) and correction ( $T_t$ ), and trapping ( $T_t$ ) temperatures of fluid inclusions in Daebo granite and foliated granite

Sample	$T_m$ (°C)	NaCl (wt, %)	$T_h$ (°C)	$T_{hc}$ (°C)	$T_t$ (°C)
GC-1	-5 -2	0.50-6.81	180-320	210-310	380-440
YG-1	-4 -1	0.17-5.47	170-300	270-300	380-430
HP-1	-3 -1	1.16-4.40	150-310	150-210	390-420
DY-2	-15 -5	7.96-18.37	190-300	190-300	440-550
YA-1	-2 -1	1.16-3.12	150-210	180-190	390-410

\*Daebo granite: GC-1 and YA-1, Foliated granite: YG-1, HP-1 and DY-2

야 한다. 이를 위하여 이 연구에서는 동일한 아문 미세균열내에 존재하는 유체포유물은 하나의 유체포유물의 분절현상에 의한 것으로 가정하여 동일한 아문 미세균열내에서 측정된 유체포유물의 균질화 온도 평균값을 그 유체포유물의 균질화 온도로 취하여 온도 보정을 실시하였다. 또한 유체포유물은 지하의 높은 압력 하에서 생성된 후 상승하여 대기압인 지표면에 노출된 상태로 존재하기 때문에 측정된 균질화 온도는 유체포유물의 포획 온도와 차이를 보이게 된다. 이러한 온도 차이를 수정하기 위하여 적절한 압력보정을 해야 하는데(Ingerson, 1947; Potter, 1977), 이 연구에서는 Brown and Lamb(1989)의 H<sub>2</sub>O-NaCl 대한 유체포유물 자료를 근거로 하는 FLINCOR 컴퓨터 프로그램을 이용하여 정량적인 압력보정을 실시하였다. 보정된 온도결과를 정리하면 Table 1과 같다.

GC-1 화강암내 유체포유물의 균질화 온도는 180-320°C의 범위를 보이나 온도보정( $T_{hc}$ ) 후 210-310°C의 균질화 온도를 가지며, 압력보정 후 포획 온도( $T_t$ )는 380-440°C 범위로 추정된다. YA-1 시료의 균질화 온도는 150-210°C의 범위를 보이나 온도보정 후 180-190°C의 균질화 온도를 가지며, 압력보정 후 포획 온도는 390-410°C 범위를 가진다. YG-1 시료의 균질화 온도는 170-330°C의 범위를 보이나 온도 보정 후 270-300°C의 균질화 온도를 가지며, 압력보정 후 포획 온도는 380-430°C 범위를 갖는 것으로 나타났다. HP-1 시료의 균질화 온도는 150-310°C의 범위를 보이나 온도보정 후 150-210°C의 균질화 온도를 가지며, 압력보정 후 포획 온도는 390-420°C 범위를 보인다. DY-2 시료의 균질화 온도는 190-300°C의 범위를 보이나 온도보정 후 190-260°C의 균질화 온도를 가지며, 압력보정 후 포획 온도는 440-550°C 범위를 가진다. 이상의 결과로부터 보정된 균질화 온도는 실제로 측정된 균질화 온도보다 좁은 신뢰할만한 적절한 범위를 갖는 것으로 나타났다. 또한 GC-1, YA-

1, YG-1, HP-1 시료에서는 압력보정 후 포획 온도가 거의 비슷한 범위를 보여 아문 미세균열이 비슷한 온도에서 생성되었음을 지시한다. 반면, DY-2 시료의 압력보정 후 포획 온도를 살펴볼 때, 이들 시료 중 아문 미세균열이 가장 높은 온도에서 생성되었을 것으로 추정된다.

#### 화강암의 냉각사 및 아문 미세균열의 형성시기

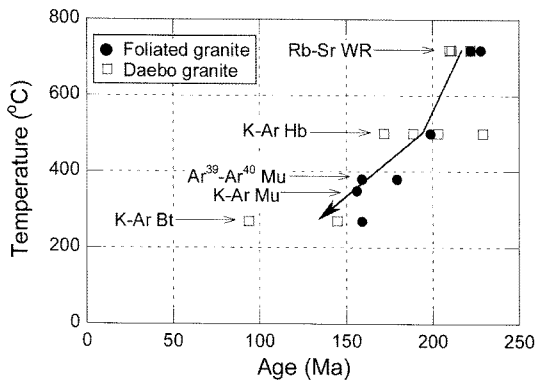
화강암의 관입시기와 냉각사(cooling history)는 아문 미세균열의 방향성 측정에 의해 규명된 고응력장이 작용한 시기를 결정하는데 매우 중요한 요소 중의 하나다. 화강암의 냉각사는 마그마가 관입, 정지한 이후 현재까지 냉각된 경로로서 폐쇄온도(closure temperature)가 각각 다른 암석이나 광물의 방사능 동위원소에 의한 연대를 측정함으로써 가능하다. 폐쇄 온도는 모광물로부터 방사능 붕괴에 의한 부산물이 축적되기 시작하는 걸보기 연령(Apparent age)에서의 온도로 정의되며, 광물의 종류에 따라 다르다(Dodson, 1973). 광물의 방사능 동위원소에 의한 연대 측정은 일반적으로 Rb-Sr법, K-Ar법 및 Fission-track법 등을 이용하여 얻을 수 있다.

이 연구에서는 연구지역에 분포하고 있는 엽리상화강암과 대보화강암에 대한 방사능 동위원소 연대를 측정하여 보고된 연구결과를 인용하여 화강암의 냉각사를 결정하였다. 연구지역 인근의 엽리상화강암과 대보화강암에 대하여 기 보고된 연령 연구결과를 정리하면 Table 2와 같다. 연령측정 결과와 전암(whole rock) 및 광물의 폐쇄온도와 관계를 통해 추정된 연구지역 화강암의 냉각사는 Fig. 7과 같다. 김정빈과 김용준(1990)에 의하면 옥천대에 분포하는 엽리상화강암은 대보화강암과 백악기 불국사화강암의 관입을 받은 증거들이 나타나고 있어 두 화강암보다 시기적으로 앞선 것으로 보고하고 있다. 그러나, 방사능 동위원소에 의한 대보화강암과 엽리상화강암의 절

**Table 2.** Isotopic age of igneous rocks in the southwestern part of Ogcheon Folded Belt (Kim and Kim, 1990; Kim et al., 1995)

Rock name	Area	Isotopic age (Ma)	Material analysed	Reference
Namwon gr.	Osu	211±3(Rb-Sr)	WR	Choo (1986)
	Unbong	203.3±10.2(K-Ar)	Hornblende	Kim and Lee (1988)
Kwangju gr.	Kwangju	222±5(Rb-Sr)	WR	Choo and Chi (1990)
	Sungjeon	229.3±3.6(K-Ar)	Hornblende	Kim et al. (1993)
	Sanni	93.77±1.43(K-Ar)	Biotite	Kim et al. (1993)
	Moonjang	172±5(K-Ar)	Hornblende	Kim et al. (1994)
	Kwangju	210±3(Rb-Sr)	WR	Choo and Chi (1990)
Daegang foliated gr.	Namwon	228±5(Rb-Sr)	WR	Choo (1986)
Hb-bt foliated gr.	Jangsoo	198.7±9.9(K-Ar)	Hornblende	Kim and Lee (1988)
Sunchang foliated grd.	Sunchang	222±5(Rb-Sr)	WR	Choo (1986)
	Hamyang	179.2±0.5(Ar <sup>39</sup> -Ar <sup>40</sup> )	Muscovite	Kim (1986)
Samori foliated gr.	Osu	159(K-Ar)	Biotite	Kim (1971)
	Ogkwa	159(Ar <sup>39</sup> -Ar <sup>40</sup> )	Muscovite	Kim (1986)
		156(K-Ar)	Muscovite	Kim (1990)

\*Hb-bt: Hornblende biotite, gr: granite, grd: granodiorite, WR: Whole rock.



**Fig. 7.** Cooling history of Daebo and foliated granites (Kim and Kim, 1990; Kim et al., 1995).

대연령은 큰 차이가 나타나지 않으며 절대연령 측정에 따른 오차의 범위를 감안한다면 두 암종은 동일한 냉각사를 가진다고 보아도 무방할 것으로 보인다. 트라이아스기 초기에 관입 정지한 화강암체는 쥐라기 초기까지 평균 9.0°C/Ma의 속도로 냉각하였으며, 이후 평균 3.1°C/Ma의 더 느린 냉각속도로 현재에 이른 것으로 판단된다.

유체포유물의 온도측정을 통해 결정된 아문 미세균열의 생성온도를 열리상화강암과 대보화강암의 냉각사와 대비시켜 아문 미세균열의 형성시기를 결정하였다. GC-1과 YA-1 시료에서 측정된 대보화강암 내의 아문 미세균열은 380-440°C에서 형성되었으며, 이를 화강암의 냉각사와 비교해 보면 166-183 Ma의 시기에 형성된 것으로 판단된다. YG-1, HP-1 및 DY-2에

서 측정된 열리상화강암의 아문 미세균열은 대보화강암보다 다소 높은 380-550°C에서 형성되었으며, 형성 시기는 166-200 Ma인 것으로 판단된다.

이상의 결과는 연구지역에 발달해 있는 아문 미세균열이 쥐라기 초기-쥐라기 중기에 걸쳐 형성되었음을 지시하며, 이 기간은 한반도에서 화성활동이 가장 격렬하게 일어났으며 NW-SE 방향의 압축응력장을 갖는 대보조산운동의 시기와 부합한다(Kim et al., 2008).

### 고응력장

이상에서 살펴본 아문 미세균열의 주 방향성, 화강암의 냉각사, 그리고 유체포유물 측정에 의한 아문 미세균열의 생성온도와 비교한 아문 미세균열의 형성 시기 등을 종합하면 연구지역에 작용한 고응력장을 추정할 수 있다. 즉, 열리상화강암 내의 아문 미세균열 관찰을 통해 결정된 166-200 Ma(쥐라기 초기-쥐라기 중기)의 기간 동안 N30°W 방향으로 최대주응력인 고응력장이 작용하였을 것으로 판단된다. 또한 대보화강암 내의 아문 미세균열 관찰을 통해 결정된 N70°W 방향의 고응력장은 166-183 Ma(쥐라기 중기)의 기간 동안 작용하였을 것으로 사료된다.

이 연구결과를 바탕으로 쥐라기 초기에서 쥐라기 중기에 이르는 기간 동안 한반도 남서부에 작용한 고응력장은 다음과 같이 정리할 수 있다. 쥐라기 초기에서 쥐라기 중기 기간 동안 고응력장은 NNW-

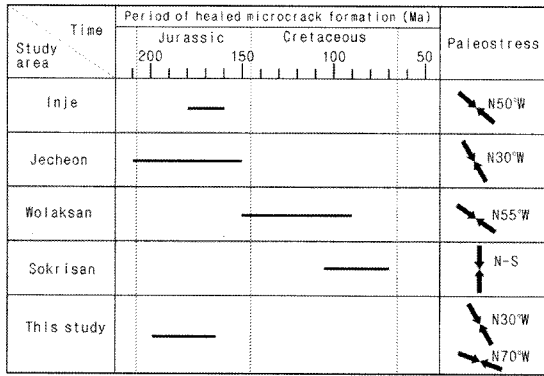


Fig. 8. Period of healed microcrack formation and paleostress direction in Inje, Jecheon, Wolaksan, Sokrisan and study area.

SSE 방향의 최대주응력이 작용하였다. 연구지역의 엽리상화강암에서 나타나는 엽리의 방향을 관찰해 보면 N20-30°E 방향이 강하게 나타나며 이는 옥천대의 전체적인 방향과 일치한다. 따라서 엽리상화강암에서 관찰되는 N70°W 방향의 아문 미세균열은 옥천대를 형성한 고응력장의 방향을 강하게 시사함을 알 수 있다. 하지만 쥐라기 중기에 이르러 연구지역의 고응력장은 N70°W 방향과 N30°W 방향이 중첩되어 나타난다. 이는 옥천대를 따라 대보화강암이 관입하면서 국부적으로 WNW-ESE 방향의 주응력도 함께 작용하였을 것으로 사료된다.

옥천습곡대 지질구조를 이용한 국지적인 응력과 선구조를 이용한 고응력장 연구는 여러 연구자들에 의해 발표되었다(강필중, 1979; Koh, 1995; 장보안, 1995). 강필중(1979)은 인공위성 사진에 나타난 선구조와 옥천습곡대에 발달해 있는 습곡과 트러스트 및 쥐라기 화강암의 관입 방향을 근거로 중생대 쥐라기의 최대주응력의 방향은 NW-SE이고, 백악기에는 NE-SW가 최대주응력의 방향임을 주장하였다. Koh (1995)는 괴산지역 옥천습곡대 지질구조를 이용한 고응력장 연구에서 트라이아스기 말에 WNW-ESE 방향의 최대주응력이 쥐라기 초기-중기에는 NW-SE 방향에서 백악기 말에 N-S 방향으로 전환됐다고 주장하였다. 장보안(1995)은 옥천습곡대 동북부 지역인 인제, 제천, 월악산, 속리산 일대에 분포하는 중생대 화강암을 대상으로 아문 미세균열과 유체포유물을 측정하여 중생대 고응력장을 규명하였다. 그에 의하면 제천지역에는 N30-40°W 및 E-W 방향의 최대주응력인 고응력장이 약 210-150 Ma 기간 동안 작용하였고,

인제지역에는 N40-50°W 및 N80°E 방향의 고응력장이 약 180-160 Ma 기간 동안 작용하였고, 월악산지역에는 N40-50°W 및 N-S 방향의 고응력장이 약 150-90 Ma 기간 동안 작용하였으며, 속리산지역에는 N-S 방향의 최대주응력인 고응력장이 약 105-70 Ma 기간 동안 작용하였음을 주장하였다. 이들과 본 연구에 있어서 아문 미세균열의 형성시기와 고응력장의 방향을 비교하여 나타내면 Fig. 8과 같다.

이상의 기준에 보고된 연구결과와 본 연구의 아문 미세균열의 방향성, 유체포유물의 측정 및 방사능 동위원소 연대 측정에 의한 화강암의 냉각사를 통하여 결정된 고응력장의 방향성을 살펴보면, 연구지역은 NNW-SSE와 WNW-ESE 방향의 최대주응력인 고응력장이 쥐라기 초기에서 쥐라기 중기 기간 동안 작용하였을 것으로 판단되며, 이것은 대보조산운동의 작용시기와 부합한다. 하지만 기존 문헌에서 참고한 방사능 동위원소를 이용한 엽리상화강암과 대보화강암의 절대연령이 유사하게 나타난다. 김정빈과 김용준(1990)에서 지척한 바와 같이 연구지역의 화강암질 암류가 강도 높은 지각변동과 그에 수반된 교대작용과 재결정작용을 받았음을 감안할 때 엽리상화강암과 대보화강암의 정확한 생성연대를 측정하기 위한 연구를 통해 이 연구에서 분석된 고응력장의 선후관계를 명확히 규명할 필요가 있다.

## 결론

옥천습곡대 서남부지역에 분포하고 있는 중생대 쥐라기 화강암내 아문 미세균열의 방향성, 그리고 유체포유물의 온도 측정 결과를 화강암의 냉각사와 비교하여 이 지역에 작용한 고응력장의 방향과 작용시기를 규명하였다.

아문 미세균열의 방향성은 GC-1에서는 N50°W 방향이 가장 우세하고, GJ-1에서는 N10°W와 N70°E의 두 방향, 그리고 YA-1과 HN-1에서는 N60°W와 N70°W 방향이 가장 우세하게 나타난다. YG-1에서는 N20-40°W의 방향, MA-2에서는 N20°W 방향, HP-1에서는 N40°W 방향, DY-2에서는 N20°W 방향이 우세하다. 유체포유물의 녹는 온도/균질화 온도는 GC-1의 경우 -5 - -2°C/180-320°C, YA-1의 경우 -2 - -1°C/150-210°C, YG-1의 경우 -4 - -1°C/170-300°C, HP-1의 경우 -3 - -1°C/150-310°C 그리고 DY-2의 경우 -15 - -5°C/190-300°C의 범위를 보인다. 균질화 온도

의 온도보정과 압력보정을 통하여 구한 아문 미세균열의 생성온도는 GC-1의 경우 380-440°C, YA-1의 경우 390-410°C, YG-1의 경우 380-430°C, HP-1의 경우 390-420°C 그리고 DY-2의 경우 440-550°C의 범위를 가진다. 방사능 동위원소를 이용한 절대연령 측정을 통해 결정된 화강암의 냉각사와 대비하여 연구지역의 아문 미세균열 형성시기와 고응력장의 방향을 추정하면, 연구지역은 NNW-SSE와 WNW-ESE 방향의 최대주응력인 고응력장이 166-200 Ma(주라기 초기-주라기 중기) 동안 작용하였을 것으로 판단되며, 이것은 대보조산운동의 작용시기와 부합한다.

## 사 사

이 연구는 2005년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었으며(KRF-2005-050-C00012) 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

김필중, 1979, 남한 인공위성 영상의 지질학적 분석. 지질학회지, 15, 181-191.  
 김옥준, 1971, 남한의 신기화강암류의 관입시기와 지각변동. 광산지질, 4, 1-10.  
 김용준, 1986, 영남육괴에 분포하는 고기 화강암질류의 지질연대와 성인에 대한 연구. 광산지질, 19, 151-161.  
 김용준, 박영석, 강상원, 1994, 호남전단대내에 분포하는 열리상화강암류의 지질시대와 생성과정에 관한 연구. 자원환경지질, 27, 247-261.  
 김용준, 박영석, 박천영, 김진, 1995, 나주-영암-목포 지역에 분포하는 화성암류의 암석화학과 화성활동에 관한 연구. 한국지구과학회지, 16, 442-461.  
 김용준, 오민수, 박재봉, 1993, 나주-해남 지역에 분포하는 화성암류의 암석화학. 한국지구과학회지, 14, 300-515.  
 김용준, 이창신, 1988, 장수-윤봉지역에 분포하는 화성암류와 화성활동에 관한 연구. 지질학회지, 24, 111-131.  
 김정빈, 1990, 담양-진안 사이에 분포하는 심성 화성암류에 대한 암석화학과 성인. 전남대학교 이학박사 학위논문, 182 p.  
 김정빈, 김용준, 1990, 담양-진안 사이에 분포하는 열리상 화강암류에 대한 지질시대와 성인에 관한 연구. 광산지질, 23, 233-244.  
 김종환, 고상모, 이동진, 박준권, 홍세선, 채수천, 이형재, 안기오, 서효준, 전효택, 문희수, 1993, 화산원 천열수성 광상탐사 및 모델정립(3). 과학기술처, KR-92(T)-25, 209 p.  
 장보안, 1995, 옥천습곡대 동북부 지역의 화강암체내에 분

포하는 아문 미세균열에 의한 중생대 고응력장. 한국과학재단, 22-54.  
 장보안, 김정애, 1996, 월악산, 속리산 일대의 화강암체내에 분포하는 아문 미세균열 및 유체포유물에 의한 중생대 백악기 고응력장. 지질학회지, 32, 291-301.  
 정해식, 장보안, 2004, 소백산 육괴 동북부 영주 화강암 내의 아문 미세균열 및 유체포유물을 이용한 중생대 고응력장. 지질학회지, 40, 179-190.  
 주승환, 1986, 영남육괴 Rb-Sr 연대측정연구(III). 한국동력자원연구소 연구보고서, KB-86-2-17, 28 p.  
 주승환, 지세정, 1990, 광주 화강암의 Rb-Sr 연대측정연구(IV). 한국동력자원연구소 연구보고서, KB-90-1B-2, 52 p.  
 최범영, 황재하, 고희재, 이병주, 김정찬, 최현일, 기원서, 김유봉, 송교영, 최영섭, 2002, 1:250,000 목포·여수 도폭 지질보고서, 한국지질자원연구원, 45 p.  
 Brantley, S.L., Evans, B., Hickman, S.H., and Crerar, D.A., 1990, Healing in microcracks in quartz: Implications for fluid flow. Geology, 18, 136-139.  
 Brown, P.E. and Lamb, W.M., 1989, P-V-T properties of fluids in the implications of fluid inclusion studies. Geochimica et Cosmochimica Acta., 53, 1209-1221.  
 Chough, S.K., Kwon, S.-T., Ree, J.-H., and Choi, D.K., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula: A review and new view. Earth-Science Reviews, 52, 175-235.  
 Dodson, M.H., 1973, Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. Contribution Mineralogy and Petrology, 40, 259-274.  
 Fredrich, J.T. and Wong, T.F., 1986, Micromechanics of Thermally induced cracking in three crustal rocks. Journal of Geophysical Research, 91, 12743-12764.  
 Homand-Etienne, F. and Houpert, R., 1989, Thermally induced microcracking in granites: Characterization and analysis. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 26, 125-134.  
 Ingerson, E., 1947, Liquid inclusions in geologic thermometry. American Mineralogist, 32, 375-388.  
 Jang, B.A. and Wang, H.F., 1991, Micromechanical modeling of healed microcrack orientations as a paleostress indicator: Application to Precambrian granite from Illinois and Wisconsin. Journal of Geophysical Research, 96, 19655-19664.  
 Jang, B.A., Wang, H.F., Ren, X., and Kowallis, B.J., 1989, Precambrian paleostress from microcracks and fluid inclusions in the Wolf River batholith of central Wisconsin. Geological Society of America Bulletin, 101, 1457-1464.  
 Jin, M.S., 1995, Geochronology and cooling history of the Mesozoic granite plutons in the central part of the Ogcheon Fold Belt, South Korea. Journal of Petrological Society of Korea, 4, 153-167.  
 Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2001, Tectonic map of Korea. Korea Institute of Geo-

- science and Mineral Resources.
- Kim, J.M., Jang, B.A., Obara, Y., and Kang, S.S., 2008, Paleostress reconstructions based on calcite twins in the Joseon Supergroup, northeastern Ogcheon Belt (South Korea). *The Island Arc*, 17, 57-69.
- Knapp, R.B. and Knight, J., 1977, Differential thermal expansion of pore fluids: Fracture propagation and microearthquake production in hot pluton environments. *Journal of Geophysical Research*, 82, 2515-2522.
- Koh, H.J., 1995, Structural analysis and tectonic evolution of the Ogcheon supergroup, Goesan, central part of the Ogcheon belt, Korea. Ph.D. thesis, Seoul National University, 282 p.
- Kowallis, B.J., Wang, H.F., and Jang, B.A., 1987, Healed microcrack orientations in granite from Illinois borehole UPH-3 and their relationship to the rock's stress history. *Tectonophysics*, 135, 297-306.
- Kranz, R.L., 1983, Microcracks in rocks: A review. *Tectonophysics*, 100, 449-480.
- Laubach, S.E., 1989, Paleostress directions from the preferred orientation of fluid-inclusion planes (healed microfractures) in sandstone, East Texas basin, U.S.A. *Journal of Structural Geology*, 11, 603-611.
- Lespinasse, M. and Pêcher, A., 1986, Microfracturing and regional stress field: A study of the preferred orientations of fluid-inclusion planes in a granite from the Massif Central, France. *Journal of Structural Geology*, 8, 169-180.
- Mawer, C.K. and Williams, P.F., 1985, Crystalline rocks as possible paleoseismicity indicators. *Geology*, 13, 100-102.
- Norton, D.L., 1982, Fluid and heat transport phenomena typical of copper-bearing pluton environments. In Titley, S.R., ed., *Advances in geology of the Porphyry Copper Deposit: Tucson*, University of Arizona Press, 59-72.
- Nur, A. and Simmons, G., 1970, The origin of small cracks in igneous rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 7, 307-314.
- Pêcher, A., Lespinasse, M., and Leroy, J., 1985, Relations between fluid inclusion trails and regional stress field: A tool for fluid chronology-an example of an intragranitic uranium ore deposit (northwest Massif Central, France). *Lithos*, 18, 229-237.
- Plumb, R., Engelder, T., and Yale, D., 1984, Near-surface in situ stress: 3. Correlation with microcrack fabric within the New Hampshire granite. *Journal of Geophysical Research*, 89, 9350-9364.
- Potter II, R.W., 1977, Pressure corrections for fluid-inclusion homogenization temperature based on the volumetric properties of the system NaCl-H<sub>2</sub>O. *Journal of Research of the U.S. Geological Survey*, 5, 603-607.
- Ren, X., Kowallis, B.J., and Best, M.G., 1989, Paleostress history of the Basin and Range province in western Utah and eastern Nevada from healed microfracture orientations in granites. *Geology*, 17, 487-490.
- Roedder, E., 1984, Fluid inclusions: Reviews in mineralogy. Mineralogical Society of America, Washington, D.C., USA, 644 p.
- Shelton, K.L. and Orville, P.M., 1980, Formation of synthetic fluid inclusions in natural quartz. *American Mineralogist*, 65, 1233-1236.
- Simmons, G. and Richter, D., 1976, Microcracks in rocks. In Sterns, R.J.G. (ed.), *The physics and chemistry of minerals and rocks*. Wiley-Interscience, NY, USA, 105-137.
- Smith, D.L. and Evans, B., 1984, Diffusional crack healing in quartz. *Journal of Geophysical Research*, 89, 4125-4135.
- Turek, A. and Kim, C.B., 1995, U-Pb zircon ages of Mesozoic plutons in the Damyang-Geochang area, Ryeongnam massif, Korea. *Geochemical Journal*, 29, 243-258.
- Tuttle, O.F., 1949, Structural petrology of planes of liquid inclusions. *Journal of Geology*, 57, 331-356.
- Yanai, S., Park, B.S., and Otoh, S., 1985, The Honam Shear Zone (South Korea): Deformation and tectonic implication in the Far East. *Sci. Pap. College of Arts and Science, University of Tokyo*, 35, 181-210.

2008년 12월 5일 접수  
2009년 1월 4일 수정원고 접수  
2009년 1월 14일 채택