

각섬석 지압계를 이용한 영남육괴 내 화강암의 정치심도와 그 의미

홍 세 선

한국지질자원연구원 지질연구부

Implication for the emplacement depth of the granites in the Yeongnam Massif, using the aluminum-in-hornblende barometry

Sei Sun Hong

*Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Gajeong-dong 30, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea

요약: 각섬석지압계를 이용하여 영남육괴 내에 분포한 영주, 안동과 김천일대의 쥐라기 화강암체를 대상으로 정치심도를 측정하여 이의 지구조적 의미를 해석하였다. 영주화강암에서 22개, 안동화강암에서 10개, 김천 화강암에서 12개의 시료를 선택하여 각섬석의 연변부 성분을 측정하였다. IMA(Leake *et al.*, 1997)에 의한 각섬석 분류에서 이들은 에데나이트, 파가사이트와 페로파가사이트 성분영역에 속한다. Schmidt(1992)의 식에 의해 계산된 정치압력은 영주화강암이 5.6~7.9 kb, 안동화강암이 5.5~7.5 kb, 김천화강암은 4.1~5.3 kb의 범위를 나타낸다. 특징적으로 영주화강암은 예천전단대 부근의 남동 경계부에서 북서 경계부로 가면서 정치심도가 7.5 kb에서 6 kb로 감소하는 경향을 보이며 5 km의 정치심도 차이에 해당한다. 이를 경사각도로 적용하면 영주화강암은 대체로 북서방향으로 약 10° 정도 기울어져 있음을 보여준다. 즉, 정치이후 단층운동이나 전단운동 등과 같은 지구조적 환경에 의해 남쪽 부분이 더 상승한 이후 현재 지표면에 노출되었음을 의미한다. 또한 영주화강암은 북동-남서 방향으로 신장되어 있음에도 불구하고 장축방향으로의 압력 차이는 거의 보이지 않는다. 이러한 현상은 같은 영남육괴내에 관입한 김천지역 화강암에서도 동일한 양상을 보인다. 이러한 정치 심도의 분포 결과를 볼 때 적어도 영남육괴 내 일부 화강암은 비록 화강암체가 전단대와 접하더라도 북동-남서방향의 장축 방향으로 기울어짐(tilting)이 전면 일어나지 않았음을, 즉, 조구조운동에 의한 암체의 고결 후 동적 변화가 없었음을 지시한다.

핵심어: 각섬석, 지압계, 영주화강암, 김천화강암, tilting

Abstract: Hornblende geobarometry has been applied to estimate the emplacement depth of the Jurassic Yeongju, Andong, and Gimcheon granites in the Yeongnam Massif. Geobarometry was determined from the twenty two samples of the Yeongju granite, ten samples of the Andong granite and twelve samples of the Gimcheon granite, using the composition of hornblende rims coexisting with the mineral assemblage required for pressure determination. Amphibole compositions in the three granites vary from edenite to ferropargasite with the increase of pressure. According to the equation of Schmidt(1992), the pressures of emplacement of the Yeongju, Andong, and Gimcheon granites are 5.6 to 7.9 kb, 5.5 to 7.5 kb, and 4.1 kb to 5.3 kb, respectively. The emplacement depth in the Yeongju granites increase systematically from about 6 kb in the northwest to about 7.5 kb in the southeast. Andong granite shows no systematic change of the pressure estimates. The Gimcheon granite shows almost consistent pressure distribution. The pressure difference of about 1.5 kb across the Yeongju granite may be explained by a model combining late postemplacement upsurge of a deeper part of the pluton in the south with tilting of the batholith by Yecheon shear zone.

Key words: hornblende, geobarometry, tilting, Yeongju granite, Gimcheon granite

서 론

현재 지표면에 노출된 화강암질 마그마의 정치심도

는 조산대에서의 지구조적인 운동을 파악하는데 아주 중요하다. 1980년대 초반까지 화강암의 정치압력은 주로 화강암의 관입과 수반한 주변의 광역 변성암에서의

공존 광물들을 이용하여 추정되었다. 그러나 화강암이 광역 변성암 지역을 수반하지 않는 경우가 많고, 또한 상승하는 마그마와 주변암의 상대적인 운동에 의해 관입당한 주변암이 화강암과 다른 압력을 보일 수도 있어 한계점이 있다(Zen, 1989). 이러한 단점을 해결하는 가장 좋은 방법은 화강암 자체에서 형성된 광물조합을 이용하여 고결압력을 측정하는 것이다.

Hammarstrom and Zen(1986)이 화강암에서 산출되는 각섬석의 Al⁺양이 압력에 비례하여 지압계로서 이용가능하다는 것을 제안한 이래 Hollister *et al.*(1987), Johnson and Rutherford(1989), Schmidt(1992)등에 의해 실험적으로 입증되었다. 이러한 각섬석지압계를 이용하여 Vynal and McSween(1990, 1991), Ghent *et al.*(1991), Ague and Brandon(1992, 1996), Ague(1997)들은 화강암의 지구조 운동을 정량적으로 해석하고 있다. 지금까지 국내에서 화강암의 연구는 연대 측정, 주원소, 미량원소, 동위원소 등을 이용한 지화학 적 특성연구, 성인연구 등에서는 많은 발전을 이루어 지화학적 특징, 관입시기, 분화과정에 대한 규명, 한반

도 지체구조 내에서의 화강암의 지구조적 특성 등에 대해서 많은 성과를 이루었다(Hong, 1987; Jwa, 1988, Lee, 1971; Jin, 1980; Iiyama and Fonteilles, 1981; Kwon and Hong, 1993; Tsusue *et al.*, 1981).

그러나 화강암의 정치과정에서의 고결압력 및 평형 온도와 같은 암체의 고물리학적 조건을 파악하는 연구는 조동룡과 권성택(1994)의 국내의 중생대 화강암인 대보화강암과 불국사화강암의 대표적인 암체들에 대해 각섬석 지압계를 이용한 정치압력을 측정하여 대보화강암이 불국사화강암보다 심부에서 정치되었다는 기존의 정성적인 생각을 정량적으로 밝힌 것 이외에는 거의 수행된 바 없다.

한반도 이남의 화강암 (특히, 주라기 화강암)은 대체로 북동-남서 방향의 30-50 km의 폭을 갖는 신장된 형태의 저반이 대부분이다. 이러한 화강암이 고결 정치 이후 외부의 조구조 영향을 전혀 받지 않았다면 지표면에 노출된 거대한 저반에서의 정치심도는 어느 부분이나 거의 균질할 것이다. 그러나 외부의 영향을 받아 화강암 저반이 고결 이후 동적 변화를 겪었다면(예: 기울어짐,

Table 1. Sample localities (Sheet name, longitude/latitude and locality name).

Sample	Sheet name (1 : 50,000)	Longitude	Latitude	Locality
Gimcheon granite				
KC6	Gimcheon	128°00'48"	36°00'13"	Kyeongsangbuk-do Gimcheon-si Guseong-myeon Impyeong-ri
KC6-1	Gimcheon	128°00'48"	36°00'13"	Kyeongsangbuk-do Gimcheon-si Guseong-myeon Impyeong-ri
KC9	Gaya	128°02'30"	35°59'19"	Kyeongsangbuk-do Gimcheon-si Jirye-myeon Sangbu-ri
KC11	Gaya	128°04'52"	35°57'18"	Kyeongsangbuk-do Gimcheon-si Jirye-myeon Wolgok-ri
KC13	Gimcheon	128°04'10"	36°58'45"	Kyeongsangbuk-do Gimcheon-si Joma-myeon Singok-ri
KC19	Gimcheon	128°13'56"	36°10'57"	Kyeongsangbuk-do Gimcheon-si Apo-eup Eu-ri
KC26	Gimcheon	128°10'36"	36°09'02"	Kyeongsangbuk-do Gimcheon-si Gaeryeong-myeon Seobu-ri
KC27	Gimcheon	128°09'00"	36°07'29"	Kyeongsangbuk-do Gimcheon-si Deokgok-dong
KC50	Gimcheon	128°04'16"	36°04'13"	Kyeongsangbuk-do Gimcheon-si Guseong-myeon Hagang-ri
KC59	Gimcheon	128°08'50"	36°01'06"	Kyeongsangbuk-do Gimcheon-si Joma-myeon Singwang-ri
KC61	Gimcheon	128°09'32"	36°01'42"	Kyeongsangbuk-do Gimcheon-si Joma-myeon Singwang-ri
KC64	Gimcheon	128°06'25"	36°05'41"	Kyeongsangbuk-do Gimcheon-si Yangcheon-dong
Andong granite				
YA4	Andong	128°39'17"	36°35'00"	Kyeongsangbuk-do Andong-si Hwaseong-dong
YA7	Andong	128°42'10"	36°38'39"	Kyeongsangbuk-do Andong-si Seohu-myeon Gwangpyeong-ri
YA37	Yean	128°46'12"	36°35'02"	Kyeongsangbuk-do Andong-si Sanga-dong
YA38	Yean	128°46'28"	36°34'42"	Kyeongsangbuk-do Andong-si Seonggok-dong
YA39	Yean	128°49'59"	36°32'11"	Kyeongsangbuk-do Andong-si Imha-myeon Imha-ri
YA45	Yean	128°51'12"	36°39'31"	Kyeongsangbuk-do Andong-si Yean-myeon Danjin-ri
YA46	Yean	128°52'31"	36°39'49"	Kyeongsangbuk-do Andong-si Yean-myeon Jeongsan-ri
YA47	Yean	128°49'31"	36°38'57"	Kyeongsangbuk-do Andong-si Waryong-myeon Naso-ri
YA48	Yean	128°46'10"	36°37'15"	Kyeongsangbuk-do Andong-si Waryong-myeon Gagu-ri
YA71	Yean	128°54'22"	36°34'54"	Kyeongsangbuk-do Andong-si Imdong-myeon Jungpyeong-ri

Table 1. (continued).

Sample	Sheet name (1 : 50,000)	Longitude	Latitude	Locality
Yeongju granite				
YA12	Yeongju	128°41'04"	36°46'03"	Kyeongsangbuk-do Yeongju-si Isan-myeon Sincheon-ri
YA13	Yeongju	128°39'17"	36°46'31"	Kyeongsangbuk-do Yeongju-si Isan-myeon Unmun-ri
YA17	Yeongju	128°38'43"	36°55'34"	Kyeongsangbuk-do Yeongju-si Buseok-myeon Bogye-ri
YA20	Yeongju	128°41'23"	36°59'03"	Kyeongsangbuk-do Yeongju-si Buseok-myeon Yongam-ri
YA21	Yeongju	128°43'33"	36°59'23"	Kyeongsangbuk-do Bonghwa-gun Mulya-myeon Ojeon-ri
YA32	Chunyang	128°52'49"	36°54'36"	Kyeongsangbuk-do Bonghwa-gun Beopjeon-myeon Soya-ri
YA33	Yeongju	128°44'31"	36°52'45"	Kyeongsangbuk-do Bonghwa-gun Bonghwa-eup Pojeo-ri
YA34	Yeongju	128°44'31"	36°52'45"	Kyeongsangbuk-do Bonghwa-gun Bonghwa-eup Pojeo-ri
YA35	Chunyang	128°45'10"	36°51'52"	Kyeongsangbuk-do Bonghwa-gun Bonghwa-eup Geochon-ri
YA36	Chunyang	128°45'04"	36°48'42"	Kyeongsangbuk-do Bonghwa-gun Sangun-myeon Gucheon-ri
YA54	Chunyang	128°54'51"	36°52'28"	Kyeongsangbuk-do Bonghwa-gun Myeongho-myeon Samdong-ri
YA55	Chunyang	128°56'56"	36°53'37"	Kyeongsangbuk-do Bonghwa-gun Beopjeon-myeon Napsan-ri
YA56	Chunyang	128°50'18"	36°52'24"	Kyeongsangbuk-do Bonghwa-gun Myeongho-myeon Yanggok-ri
YA59	Yecheon	128°28'11"	36°38'12"	Kyeongsangbuk-do Yecheon-gun Yecheon-eup Cheongbok-ri
YA60	Yecheon	128°22'23"	36°36'58"	Kyeongsangbuk-do Yecheon-gun Gaepo-myeon Ugap-ri
YA62	Yecheon	128°28'52"	36°40'49"	Kyeongsangbuk-do Yecheon-gun Yecheon-eup Galgu-ri
YA63	Andong	128°31'08"	36°42'18"	Kyeongsangbuk-do Yecheon-gun Gamcheon-myeon Po-ri
YA65	Yeongju	128°35'58"	36°47'39"	Kyeongsangbuk-do Yeongju-si Munjeong-dong
YA68	Yeongju	128°33'21"	36°53'37"	Kyeongsangbuk-do Yeongju-si Sunheung-myeon Taejang-ri
YA68-1	Yeongju	128°33'21"	36°53'37"	Kyeongsangbuk-do Yeongju-si Sunheung-myeon Taejang-ri
YA100	Yeongju	128°31'00"	36°49'44"	Kyeongsangbuk-do Yeongju-si Bonghyeon-myeon Hanchang-ri
YA102	Andong	128°30'08"	36°44'50"	Kyeongsangbuk-do Yecheon-gun Gamcheon-myeon Po-ri

회전 등) 단일의 화강암체라도 고결압력의 분포는 암체 내에서 불균질하게 될 것이다. 이러한 압력의 불균질한 분포는 그 당시 조구조 운동을 추론하고 고지자기 자료를 해석하는데 중요한 정보로 활용될 수 있다.

그러므로 이번 연구에서는 영남육괴 내 북동-남서 방향으로 배열된 영주, 안동, 김천 지역의 화강암체를 대상으로 각섬석을 이용한 고결압력을 측정하여 이에 대한 지구조적 의미를 이해하며, 각섬석을 지압계로 이용할 때 온도에 의한 영향을 검토하고자 한다.

지질배경

영주지역은 한반도의 지체구조상 영남육괴 북동부에 위치하고 있으며 순창전단대의 최북단에 해당하는 지역이다. 이 지역은 선캠브리아기의 편마암과 화강암으로 이루어져 있다.

선캠브리아기의 편마암은 영남육괴 소백산 편마암 복합체에 속하며 영주화강암의 북쪽과 동쪽에 위치한다. 이 편마암복합체는 변성퇴적기원으로 알려진 호상편마암, 반상 변정편마암, 미그마타이트질 편마암, 안

구상편마암으로 주로 구성되며 운모편암, 결정질 석회암 등이 소량 협재하고 있다(김봉균 외, 1988).

영주화강암 북서부는 미그마타이트질 편마암, 혹은 모편마암, 반상변정질 편마암이 우세하게 분포하며 북동부에는 고생대 변성퇴적암으로 구성된 울리층군과 원남층군이 분포하고 있다. 이 변성퇴적암은 고생대 이후 저압형 광역변성작용, 화강암 관입에 의한 접촉변성작용, 스러스트에 의한 중압형 변성작용 등 세 차례의 변성작용을 받은 것으로 보고된 바 있다(양판석과 조문섭, 1995; 김기영 외, 1996). 장군봉 주변의 원남층군의 연구를 통하여 변성퇴적암류의 변성압력은 3.5~4.8 kb로 보고되었으며(양판석과 조문섭, 1995) 이는 안건상 외 (1993)의 결과와도 대체로 일치한다.

영주 지역 화강암은 영남육괴 북동부 선캠브리아기의 소백산 편마암 복합체를 관입한 장경 약 90 km, 단경 약 60 km의 총면적 약 2,000 km²에 달하는 저반형 화강암체이다. 이 화강암체는 선캠브리아기의 호상편마암, 반상 변정 편마암 등의 변성퇴적암에서 연장된 예천전단대(Chang, 1991)를 경계로 북부 암체를 영주화강암, 남부 암체를 안동화강암으로 부르고 있다. 이들

암체는 중립질 내지 조립질의 토날라이트-화강섬록암-화강암군에 속하며 특히, 화강섬록암 조성이 매우 우세하다(Lee *et al.*, 1998). 안동화강암 남부 지역은 의성소분지에 퇴적된 일직층, 후평동층이, 동부 지역은 영양소분지에 퇴적된 동화치층, 가송동층이 분포한다.

김천지역은 선캄브리아기의 편마암류, 주라기의 흑운모 화강암-화강섬록암, 각섬석 흑운모 화강섬록암으로 구성된다. 편마암 복합체는 호상편마암, 반상변질편마암, 안구상 편마암, 화강암질 편마암, 운모 편암 등으로 구성된다(김상욱 외, 1989). 주라기의 김천화강암은 편마암 복합체를 관입하여 북동방향의 대상으로 길게 발달하며, 양쪽 주변부의 각섬석-흑운모 화강섬록암과 중심부의 흑운모 화강암-화강섬록암으로 구분된다.

분석방법

각섬석이 산출되고 지압계로의 적용에 적합하며, 또한 지리적인 분포 및 고도차를 고려하여 영주, 안동 화강암에서는 103개의 시료 중 31개 시료, 김천 지역 화강암에서는 약 50여 개의 시료 중 12개의 시료에 대해(표 1) 각섬석 지압계를 사용하여 화강암의 결정자

용시의 압력을 측정하였다. 또한 압력이 측정된 시료 중 18개 시료에 대해 각섬석-사장석 지온계(Blundy and Holland, 1990; Holland and Blundy, 1994)를 이용하여 평형온도를 측정하였다.

광물의 화학조성은 고려대학교 전략광물자원연구센터의 JEOL JXA 8600 전자현미 분석기기를 이용하여 얻어졌으며, 이 때 적용된 가속전압은 15 kV, 빔전류는 30 nA이다. 천연 또는 합성 광물을 표준 물질로 사용하였으며 background 보정, ZAF 보정을 거쳤다. 사장석은 광물 내 함유된 알칼리 원소가 쉽게 휘발되는 특성을 감안하여 빔직경을 5 μm로 하였으며 각섬석은 1~2 μm의 빔직경으로 분석하였다. 각섬석의 화학조성은 한 시료에서 2~4개의 입자를 선택하여 연변부에서 8~12점, 중심부에서 6~9점씩 측정하여 얻은 분석치들을 평균하여 구하였다. 또한 분석의 정확도와 정밀도를 확보하기 위해 성분이 잘 알려진 캐어수타이트(kaersutite)를 정기적으로 분석하였으며 이에 의해 확인된 상대오차는 함량이 많은 Si, Al, Fe, Mg, Ca와 같은 원소는 5% 이내, Ti, Na, K, Mn과 같이 함량이 적은 원소는 10% 내지 20%이다.

각섬석에는 Fe³⁺성분이 상당량 존재하므로 구조식 계

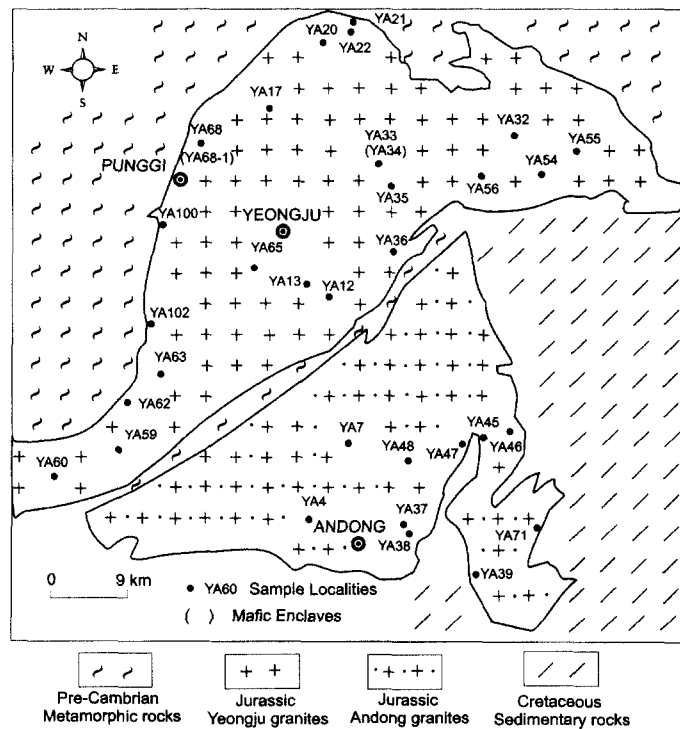


Fig. 1. The simplified geologic map and sample localities of the Yeongju-Andong area.

산에서 Fe²⁺와 Fe³⁺를 구분하는 것이 중요하다. 이 연구에서는 IMA(Leake *et al.*, 1997)에서 제안된 방식에 따라 23개의 산소에 대해 Si+Ti+Al+Fe+Mn+Mg = 13이 되도록 양이온의 재계산을 하였다. Fe²⁺와 Fe³⁺를 분리하여 재계산된 각섬석의 구조식을 적용하였을 때 각섬석지압계에서의 압력의 차이는 0.1 kb 내외로 매우 적다.

화강암의 암석기재

영주, 안동화강암

영주화강암은 155 Ma(K-Ar, 흑운모, 김옥준, 1971), 224±10 Ma(Rb-Sr, 전암, 주승환, 1988)의 연대로서, 중립질 내지 조립질이며 미약한 변형작용에 의한 압쇄엽리를 보이고, 부분적으로 반상의 조직도 관찰된다(그림 1). 이 화강암은 예천전단대 부근에서는 토날라이트질이나 북쪽으로 가면서 각섬석-흑운모 화강섬록암으로 변한다. 이 화강암은 전체적으로 각섬석을 함유하며 서측 경계부분에는 세립질의 복운모화강암이 소규모 암주상으로 관입한다. Lee and Lee(1991)의 연구에 따르면 영주화강암은 칼크 알카리암 계열의 I-형 화강암의 지화학적 특성을 보인다.

영주화강암의 구성광물은 사장석, 석영, 알칼리장석, 흑운모, 각섬석, 녹염석, 인회석, 갈염석, 스펀, 저어콘, 그리고 티탄철석 등이다. 사장석은 2~5 mm의 반자형으로 흑운모와 석영을 포획하기도 한다. 석영은 변형작용의 영향으로 부분적으로 재결정된 봉합선을 가지는 집합체를 이룬다. 흑운모는 연한 황갈색 내지 녹갈색의 다색성을 보이는 반자형으로 주로 산출된다. 각섬석은 주로 흑운모와 수반되며, 갈황색 내지 진한 녹갈색의 다색성을 보이고 용식에 의한 외형을 나타내는 경우도 있다. 녹염석은 흑운모와 자형의 경계면을 보이거나 갈염석의 핵을 포함하는 등 마그마 기원의 입자가 발견된다. 스펀은 자형 내지 반자형으로 최대 5 mm의 크기이다.

안동화강암은 중립질 내지 조립질이며 암체의 동측 부에는 섬록암이 관입한다. 안동화강암의 중심부인 도품리, 죽전리, 상리 일대에는 함석류석 우백질화강암이 북동-남서 방향으로 대상분포한다.

안동화강암의 주구성광물은 사장석, 석영, 알칼리장석, 흑운모, 각섬석 등이며 부구성광물로 녹염석, 갈염석, 저어콘, 인회석, 불투명광물이 관찰된다. 각섬석은 영주화강암보다 적게 산출된다.

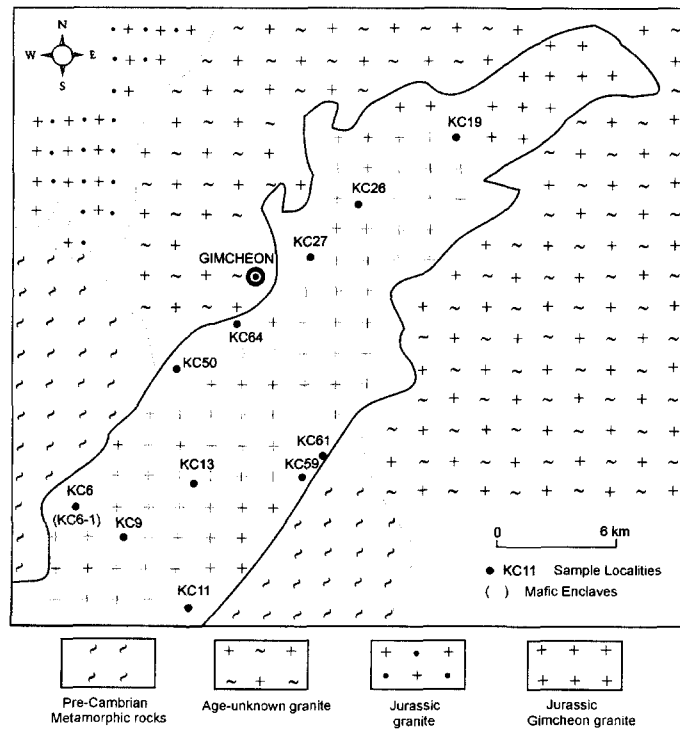


Fig. 2. The simplified geologic map and sample localities of the Gimcheon area.

김천화강암

김천화강암은 장경 약 40 km, 단경 약 10 km의 총 노출면적 약 300 km²에 달하는 장방형의 화강암체이다. 이 화강암은 중립질 내지 세립질의 흑운모화강암이 중심부에 분포하며 중립질 내지 조립질의 각섬석-흑운모 화강섬록암이 암체의 연변부에 분포하나 이들의 관계는 점이적이다(그림 2).

각섬석-흑운모 화강섬록암은 연구지역의 남동부인 고당산-신왕리에서는 작은 규모로, 서부인 양천동-임평리 일대에서 비교적 큰 규모로 남동향의 대상분포를 이루며 주변의 편마암 복합체를 관입한다. 이들은 극히 부분적으로 담홍색을 이루기도 하나 거의 회색을 띤다. 입도는 조립질이 우세하나 남동부와 북서측 주변부에서는 중립질이 발달한다. 각섬석과 스펀이 비교

Table 2. The average rim and core compositions of amphiboles from the Gimcheon Granite.

	KC6		KC6-1		KC9		KC11		KC13		KC19	
	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core
SiO ₂	43.22	44.55	43.85	45.32	44.03	44.96	43.81	44.82	43.72	44.36	42.18	41.88
TiO ₂	0.99	1.69	0.95	1.10	0.66	1.27	0.91	1.28	0.84	0.98	1.45	1.24
Al ₂ O ₃	9.89	8.71	9.82	8.17	9.63	8.36	9.49	8.63	10.04	8.87	9.01	9.10
FeO*	17.59	15.82	16.84	16.25	18.33	17.09	17.72	17.09	19.33	18.74	25.45	25.84
MgO	10.56	11.87	10.87	11.68	10.42	11.23	10.83	11.60	9.69	10.23	5.31	5.01
MnO	0.33	0.31	0.48	0.20	0.48	0.53	0.35	0.40	0.09	0.24	0.57	0.73
CaO	11.79	11.67	11.75	11.71	11.74	11.57	11.68	11.66	11.78	11.74	10.59	10.59
Na ₂ O	1.31	1.29	1.33	1.19	1.38	1.31	1.28	1.26	1.31	1.24	1.59	1.57
K ₂ O	1.22	1.18	1.16	0.96	1.12	0.98	1.19	1.11	1.19	0.99	1.19	1.34
total	96.89	97.09	97.03	96.57	97.78	97.30	97.25	97.85	97.98	97.37	97.33	97.29
Si	6.508	6.636	6.565	6.776	6.569	6.698	6.551	6.630	6.542	6.653	6.561	6.541
Al(IV)	1.492	1.364	1.435	1.224	1.431	1.302	1.449	1.370	1.458	1.347	1.439	1.459
Al(VI)	0.264	0.166	0.301	0.218	0.264	0.168	0.225	0.136	0.315	0.223	0.215	0.218
Ti	0.112	0.189	0.107	0.123	0.074	0.142	0.102	0.142	0.094	0.110	0.170	0.146
Fe ⁺³	0.585	0.499	0.546	0.482	0.654	0.592	0.683	0.681	0.572	0.581	0.641	0.664
Fe ⁺²	1.629	1.471	1.562	1.550	1.633	1.537	1.531	1.432	1.847	1.770	2.669	2.710
Mg	2.368	2.635	2.424	2.602	2.316	2.494	2.414	2.558	2.161	2.286	1.230	1.166
Mn	0.042	0.039	0.060	0.025	0.060	0.067	0.045	0.050	0.011	0.030	0.075	0.096
XM1-3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	1.902	1.862	1.884	1.875	1.877	1.846	1.870	1.848	1.888	1.887	1.764	1.772
Na	0.098	0.138	0.116	0.125	0.123	0.154	0.130	0.152	0.112	0.113	0.236	0.228
Na	0.284	0.236	0.268	0.220	0.277	0.225	0.241	0.211	0.267	0.246	0.243	0.247
K	0.235	0.223	0.221	0.183	0.212	0.186	0.227	0.209	0.227	0.190	0.236	0.266
Sum A	0.519	0.459	0.490	0.403	0.489	0.411	0.468	0.420	0.494	0.436	0.479	0.513
Mg/(Mg+Fe ⁺²)	0.592	0.642	0.608	0.627	0.587	0.619	0.612	0.641	0.539	0.564	0.315	0.301
Al ^T	1.756	1.530	1.735	1.442	1.695	1.470	1.674	1.506	1.773	1.570	1.654	1.677
Pressure(kb)	5.3		5.3		5.1		5.0		5.4		4.9	
Depth(km)	18.7		18.4		17.7		17.4		19.0		17.0	

Structural formula were calculated after Leake *et al.* (1997). Pressure is calculated after Schmidt (1992). Depths were calculated from pressure of Schmidt (1992) and average density (2.8 gr/cm³) of continental crust. FeO* as total FeO.

Table 2. (continued).

	KC26		KC27		KC50		KC59		KC61		KC64	
	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core
SiO ₂	43.31	43.08	44.52	45.24	43.99	45.34	44.16	44.78	43.86	45.52	43.89	44.55
TiO ₂	1.37	1.71	1.44	1.73	1.00	1.57	0.71	0.92	1.00	1.58	1.04	1.45
Al ₂ O ₃	8.72	8.40	8.61	8.40	9.10	8.04	9.16	8.23	9.19	7.80	9.19	8.30
FeO ⁺	23.88	24.72	16.93	15.26	17.28	16.23	18.30	18.26	17.68	16.35	17.46	16.50
MgO	5.54	5.43	11.32	12.43	11.08	11.98	10.28	10.59	10.58	11.57	10.85	11.60
MnO	0.42	0.49	0.68	0.30	0.47	0.49	0.64	0.67	0.39	0.42	0.47	0.48
CaO	11.16	10.86	11.64	11.61	11.66	11.62	11.51	11.78	11.71	11.60	11.73	11.57
Na ₂ O	1.28	1.58	1.46	1.58	1.36	1.41	1.38	1.26	1.14	1.20	1.31	1.38
K ₂ O	1.08	1.10	0.98	0.94	1.16	0.91	1.04	1.02	1.13	0.91	1.16	1.05
total	96.76	97.37	97.59	97.49	97.10	97.60	97.16	97.52	96.68	96.94	97.11	96.88
Si	6.766	6.711	6.625	6.684	6.586	6.710	6.625	6.706	6.604	6.788	6.582	6.663
Al(IV)	1.234	1.289	1.375	1.316	1.414	1.290	1.375	1.294	1.396	1.212	1.418	1.337
Al(VI)	0.374	0.255	0.137	0.149	0.194	0.114	0.246	0.160	0.238	0.160	0.207	0.128
Ti	0.161	0.201	0.161	0.192	0.113	0.175	0.080	0.104	0.114	0.177	0.117	0.163
Fe ⁺³	0.201	0.313	0.594	0.478	0.639	0.565	0.670	0.583	0.604	0.471	0.606	0.576
Fe ⁺²	2.919	2.908	1.513	1.407	1.524	1.443	1.625	1.704	1.621	1.568	1.584	1.488
Mg	1.289	1.260	2.509	2.737	2.471	2.641	2.297	2.364	2.373	2.571	2.426	2.585
Mn	0.056	0.064	0.085	0.037	0.060	0.062	0.082	0.085	0.050	0.053	0.060	0.060
XM1-3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	1.868	1.813	1.856	1.838	1.870	1.842	1.850	1.890	1.888	1.853	1.884	1.854
Na	0.132	0.187	0.144	0.162	0.130	0.158	0.150	0.110	0.112	0.147	0.116	0.146
Na	0.255	0.288	0.278	0.290	0.263	0.247	0.250	0.257	0.220	0.201	0.264	0.253
K	0.215	0.218	0.187	0.177	0.222	0.172	0.199	0.195	0.218	0.173	0.222	0.201
Sum A	0.469	0.507	0.465	0.467	0.485	0.419	0.449	0.452	0.438	0.373	0.487	0.454
Mg/ (Mg+Fe ⁺²)	0.306	0.302	0.624	0.660	0.619	0.647	0.586	0.581	0.594	0.621	0.605	0.635
Al ^T	1.608	1.544	1.512	1.465	1.608	1.404	1.622	1.454	1.634	1.372	1.625	1.465
Pressure(kb)	4.6		4.2		4.6		4.7		4.8		4.7	
Depth(km)	16.3		14.7		16.3		16.5		16.7		16.5	

적 큰 결정으로 산출되며, 전자의 경우 약 1.5 cm 정도까지 관찰된다. 암체의 연변부에는 부분적으로 엽리가 관찰되는데 이는 암체의 유동관입시 주변의 변성암의 접촉영향으로 인한 일차 엽리로 해석된다.

흑운모화강암은 부분적으로 반정질, 세립질 또는 조립질을 이루나 전반적으로 중립질이 우세한 회색 화강암이다. 유색광물 밀집부가 대상이나 렌즈상으로 자주 발달하나 각섬석-흑운모 화강섬록암보다 산출빈도와

크기가 감소한다. 이 화강암 내에도 스펀과 각섬석이 국부적으로 소량 산출되기도 한다.

임평리에서 채취된 각섬석-흑운모 화강섬록암과 하강리에서 채취된 흑운모화강암의 K-Ar 흑운모 절대연대는 각각 197±3 Ma와 200±3 Ma로서 오차범위 내에서 일치한다(윤현수, 1998). 한편, Lee *et al.*(1997)은 김천지역 화강섬록암의 K-Ar 각섬석과 흑운모 연대를 각각 194 Ma와 177 Ma로 보고하였다.

김천화강암의 구성광물은 석영, 사장석, 알칼리 장석, 흑운모, ±각섬석, 녹니석, 인회석, 스펀, 저어콘, 갈엽석, 녹엽석과 불투명 광물 등이다. 석영은 대체로 파상소광을 보이며 일부는 모자이크 조직을 보인다. 최대 5 mm 정도의 입도를 나타낸다. 사장석은 누대구조가 동심원상으로 발달되며 변질부가 중앙부에 밀집 또는 산점상으로 수반된다. 알칼리 장석은 페다이트, 마이크로 페다이트, 미사장석이며, 서부지역인 하강리에서는 부분적으로 최대 1.1 cm 크기이다. 간혹 사장석

이나 흑운모 등을 포유한다. 흑운모는 부분적으로 쪼개짐면, 주변부 또는 입자전체가 녹니석화 되어 있으며 일부 만곡된 쪼개짐이 발달한다. 각섬석은 대부분 타형-반자형으로서 녹색 내지 갈색의 다색성을 보이며, 부분적으로 녹니석화되어 있다. 인회석은 타형-반자형을 이루며 흑운모나 각섬석 내 미립으로 함유된다. 스펀은 타형-자형으로서 간혹 3 mm의 크기를 이루나 대부분 1 mm이하의 미립이며 불규칙한 쪼개짐이 발달되기도 한다. 저어콘은 대부분 각섬석이나 흑운모

Table 3. The average rim and core compositions of amphiboles from the Andong Granite.

	YA04		YA07		YA37		YA38		YA39	
	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core
SiO ₂	41.55	41.67	41.59	42.76	40.96	41.69	41.70	41.55	41.26	43.34
TiO ₂	0.82	0.86	0.69	1.00	0.80	0.96	0.69	0.89	1.10	1.65
Al ₂ O ₃	11.54	11.03	11.71	10.21	12.10	11.43	11.64	10.62	11.69	9.20
FeO*	19.49	18.94	18.91	18.80	19.82	19.76	19.30	19.42	22.22	20.97
MgO	8.84	8.95	9.12	9.69	8.19	8.72	9.07	9.10	6.86	8.50
MnO	0.50	0.45	0.43	0.44	0.52	0.49	0.57	0.58	0.53	0.65
CaO	11.35	11.42	11.47	11.46	11.51	11.41	11.31	11.34	11.15	11.11
Na ₂ O	1.52	1.51	1.48	1.57	1.55	1.57	1.50	1.56	1.48	1.39
K ₂ O	1.53	1.49	1.58	1.39	1.61	1.65	1.59	1.53	1.41	1.19
total	97.14	96.32	96.98	97.33	97.05	97.67	97.38	96.59	97.69	98.01
Si	6.305	6.382	6.309	6.457	6.261	6.315	6.297	6.352	6.301	6.537
Al(IV)	1.695	1.618	1.691	1.543	1.739	1.685	1.703	1.648	1.699	1.463
Al(VI)	0.370	0.374	0.405	0.276	0.444	0.357	0.370	0.268	0.408	0.175
Ti	0.094	0.099	0.079	0.113	0.091	0.109	0.079	0.103	0.126	0.187
Fe ⁺³	0.703	0.560	0.658	0.603	0.569	0.627	0.772	0.701	0.679	0.686
Fe ⁺²	1.770	1.865	1.741	1.771	1.964	1.875	1.665	1.781	2.159	1.960
Mg	1.999	2.043	2.062	2.181	1.865	1.969	2.041	2.072	1.561	1.910
Mn	0.064	0.058	0.055	0.056	0.067	0.063	0.073	0.075	0.068	0.083
XM1-3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	1.846	1.873	1.864	1.855	1.885	1.852	1.829	1.856	1.824	1.796
Na	0.154	0.127	0.136	0.145	0.115	0.148	0.171	0.144	0.176	0.204
Na	0.293	0.321	0.299	0.316	0.344	0.312	0.267	0.318	0.261	0.203
K	0.296	0.292	0.305	0.268	0.315	0.319	0.307	0.299	0.275	0.229
Sum A	0.589	0.613	0.605	0.583	0.658	0.631	0.574	0.617	0.537	0.432
Mg/(Mg+Fe ⁺²)	0.530	0.523	0.542	0.552	0.487	0.512	0.551	0.538	0.420	0.494
Al ^T	2.065	1.993	2.096	1.819	2.183	2.043	2.074	1.916	2.107	1.637
Pressure(kb)	6.8		7.0		7.4		6.9		7.0	
Depth(km)	23.9		24.4		25.8		24.0		24.6	

Table 3. (continued).

	YA45		YA46		YA47		YA48		YA71	
	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core
SiO ₂	44.08	44.20	44.56	44.90	42.30	43.76	41.94	42.67	44.81	45.30
TiO ₂	0.61	0.79	0.74	1.20	0.58	0.79	0.94	1.03	1.37	1.40
Al ₂ O ₃	10.08	9.34	11.86	11.12	10.54	9.69	10.60	9.75	8.11	7.92
FeO ⁺	17.02	16.81	15.02	14.80	19.75	18.76	19.63	19.35	18.30	17.50
MgO	10.57	10.90	11.54	11.99	9.16	9.98	8.42	8.85	10.11	10.88
MnO	0.13	0.31	0.18	0.19	0.67	0.77	1.03	1.02	1.18	1.27
CaO	11.72	11.62	11.19	11.13	11.55	11.58	11.15	11.09	11.18	11.25
Na ₂ O	1.21	1.15	1.49	1.45	1.61	1.42	1.53	1.50	1.41	1.48
K ₂ O	0.88	0.91	0.36	0.37	1.34	1.30	1.49	1.42	0.99	1.01
total	96.30	96.03	96.93	97.15	97.51	98.04	96.72	96.66	97.46	98.00
Si	6.623	6.652	6.508	6.535	6.402	6.539	6.415	6.512	6.714	6.722
Al(IV)	1.377	1.348	1.492	1.465	1.598	1.461	1.585	1.488	1.286	1.278
Al(VI)	0.409	0.312	0.552	0.444	0.284	0.247	0.328	0.268	0.147	0.109
Ti	0.069	0.089	0.081	0.131	0.066	0.089	0.108	0.119	0.154	0.156
Fe ⁺³	0.538	0.599	0.786	0.809	0.705	0.670	0.642	0.637	0.643	0.667
Fe ⁺²	1.600	1.516	1.048	0.991	1.794	1.673	1.869	1.832	1.648	1.504
Mg	2.367	2.445	2.511	2.600	2.065	2.223	1.919	2.013	2.257	2.405
Mn	0.017	0.039	0.022	0.024	0.085	0.097	0.133	0.131	0.150	0.160
XM1-3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	1.886	1.874	1.751	1.735	1.873	1.854	1.828	1.814	1.794	1.788
Na	0.114	0.126	0.249	0.265	0.127	0.146	0.172	0.186	0.206	0.212
Na	0.238	0.210	0.174	0.146	0.344	0.264	0.280	0.256	0.205	0.212
K	0.169	0.175	0.067	0.069	0.259	0.248	0.291	0.275	0.189	0.190
Sum A	0.406	0.385	0.241	0.214	0.604	0.512	0.570	0.532	0.393	0.403
Mg/ (Mg+Fe ⁺²)	0.597	0.617	0.706	0.724	0.535	0.571	0.507	0.523	0.578	0.615
Al ^T	1.786	1.659	2.044	1.910	1.883	1.709	1.913	1.756	1.433	1.387
Pressure(kb)	5.5		6.7		6.0		6.1		3.8	
Depth(km)	19.2		23.5		20.8		21.3		13.3	

에 미립으로 함유되며 다색성운(halo)을 이룬다. 녹염석은 타형을 이룬 미립으로서 국부적으로 산출되며, 갈염석은 갈색을 띠는 미립의 타형·자형으로서 누대구조나 흑색 크랙이 발달되기도 한다.

각섬석의 화학조성 및 지압계로의 적용

각섬석의 화학조성은 표 2, 표 3과 표 4에 요약되어 있다. 각섬석은 Ca이온이 세 암체 모두 1.5 이상인 회

각섬석(calcic amphibole)군에 속한다. 안동화강암의 각섬석은 Ca값이 1.5이상이며 (Na+K)_A값이 대부분 0.5 이상을 보이지만 일부는 그 이하이다. 영주화강암의 각섬석은 거의 모두 (Na+K)_A값이 0.5 이상의 값을 나타내나, 김천화강암의 경우 (Na+K)_A가 모두 0.5 이하이다. 그러므로 재개정된 IMA(Leake *et al.*, 1997)의 각섬석 분류를 따르면 안동화강암의 각섬석은 파가사이트, 페로파가사이트, 마그네슘 각섬석영역에 속하며, 영

주화강암의 각섬석은 대부분 페로파가사이트에 속하며 일부는 이데나이트, 페로이데나이트에 속한다. 김천화강암의 각섬석은 모두 마그네슘 각섬석에 해당한다(그림 3).

각섬석의 Al값이 압력의존성을 보이는 것은 처마카이트(tschermakite)방식의 치환에 의한 것이다(Ague and Brandon, 1996). 그렇다면 Al^{VI}와 Al^{IV}는 Al^T이 증가함에 따라 동일한 양이 증가하여야 할 것이다. 온도가 증가하면 이데나이트 방식의 치환이 잘 일어난다. 즉, 각

섬석에 Al^{VI}보다는 Al^{IV}가 더 잘 치환된다(Holland and Blundy, 1994; Anderson and Smith, 1995). 그러므로 광물들이 지압계로 응용가능한 온도보다 높은 환경 하에서 평형을 이룬다면 압력에 오차가 생기게 된다(Anderson and Smith, 1995).

각섬석 지압계를 적용하기 위해서는 몇 가지 주의할 점이 있다.

첫째, 각섬석 조성변화가 지압계로 적용되기 위해서는 적절한 광물 조합이 존재해야 한다. 즉, 정치압력은

Table 4. The average rim and core compositions of amphiboles from the Yeongju Granite.

	YA12		YA13		YA17		YA20		YA21	
	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core
SiO ₂	41.06	41.30	41.26	41.77	42.36	42.92	42.38	43.02	43.04	43.73
TiO ₂	1.16	1.25	1.13	1.43	1.10	1.13	0.84	1.18	0.97	1.04
Al ₂ O ₃	12.06	11.88	11.48	10.75	10.70	10.21	10.62	9.72	10.26	9.47
FeO ⁺	19.33	19.07	20.20	19.66	20.43	20.08	21.67	20.86	19.41	18.67
MgO	8.08	8.48	7.82	8.15	8.40	8.86	7.62	8.24	9.03	9.60
MnO	0.41	0.41	0.47	0.37	0.48	0.61	0.52	0.47	0.60	0.66
CaO	11.41	11.37	11.17	11.44	11.61	11.57	11.54	11.33	11.58	11.51
Na ₂ O	1.48	1.53	1.38	1.57	1.63	1.57	1.46	1.46	1.45	1.37
K ₂ O	1.76	1.74	1.77	1.57	1.42	1.40	1.30	1.23	1.31	1.17
total	96.76	97.03	96.66	96.69	98.13	98.33	97.96	97.51	97.63	97.22
Si	6.300	6.302	6.341	6.433	6.417	6.464	6.447	6.542	6.502	6.598
Al(IV)	1.700	1.698	1.659	1.567	1.583	1.536	1.553	1.458	1.498	1.402
Al(VI)	0.484	0.442	0.423	0.386	0.329	0.278	0.353	0.285	0.330	0.283
Ti	0.134	0.143	0.131	0.165	0.125	0.127	0.097	0.135	0.110	0.118
Fe ⁺³	0.409	0.461	0.541	0.300	0.484	0.543	0.562	0.542	0.523	0.535
Fe ⁺²	2.071	1.972	2.055	2.232	2.104	1.987	2.194	2.110	1.928	1.821
Mg	1.849	1.929	1.790	1.869	1.897	1.988	1.728	1.866	2.032	2.159
Mn	0.053	0.053	0.061	0.048	0.062	0.077	0.067	0.061	0.076	0.084
XM1-3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	1.876	1.859	1.838	1.888	1.884	1.866	1.880	1.845	1.874	1.861
Na	0.124	0.141	0.162	0.112	0.116	0.134	0.120	0.155	0.126	0.139
Na	0.317	0.310	0.250	0.356	0.362	0.325	0.311	0.276	0.299	0.262
K	0.345	0.339	0.346	0.307	0.274	0.268	0.253	0.239	0.252	0.224
Sum A	0.662	0.649	0.596	0.664	0.636	0.593	0.564	0.515	0.551	0.486
Mg/(Mg+Fe ⁺²)	0.472	0.494	0.466	0.456	0.474	0.500	0.441	0.469	0.513	0.542
Al ^T	2.184	2.140	2.082	1.953	1.912	1.814	1.906	1.743	1.829	1.685
Pressure(kb)	7.4		6.9		6.1		6.1		5.7	
Depth(km)	25.8		24.2		21.3		21.2		19.9	

Table 4. (continued).

	YA32		YA33		YA34		YA35		YA36	
	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core
SiO ₂	40.75	41.67	41.36	41.84	41.05	41.69	41.06	41.80	40.90	41.02
TiO ₂	0.88	1.16	0.79	0.90	0.83	1.04	0.91	1.33	0.78	0.99
Al ₂ O ₃	11.88	10.96	11.48	10.89	12.00	11.38	12.39	11.15	12.70	12.32
FeO*	21.11	21.18	20.85	21.01	20.44	20.48	20.40	20.00	19.35	19.49
MgO	7.53	8.05	7.55	7.76	7.63	7.85	7.78	8.40	8.09	8.10
MnO	0.31	0.49	0.46	0.51	0.51	0.48	0.35	0.51	0.42	0.51
CaO	11.48	11.42	11.23	11.22	11.46	11.53	11.40	11.56	11.49	11.56
Na ₂ O	1.48	1.35	1.44	1.56	1.53	1.45	1.44	1.38	1.51	1.49
K ₂ O	1.71	1.58	1.59	1.63	1.69	1.67	1.77	1.73	1.82	1.86
total	97.13	97.86	96.74	97.33	97.14	97.58	97.49	97.85	97.06	97.35
Si	6.264	6.329	6.358	6.404	6.299	6.367	6.257	6.346	6.250	6.266
Al(IV)	1.736	1.671	1.642	1.596	1.701	1.633	1.743	1.654	1.750	1.734
Al(VI)	0.418	0.293	0.440	0.371	0.472	0.417	0.485	0.344	0.540	0.486
Ti	0.102	0.132	0.091	0.104	0.096	0.120	0.105	0.151	0.090	0.113
Fe ⁺³	0.559	0.693	0.580	0.556	0.484	0.449	0.559	0.505	0.464	0.433
Fe ⁺²	2.155	1.996	2.101	2.134	2.138	2.165	2.040	2.033	2.009	2.056
Mg	1.725	1.822	1.730	1.769	1.744	1.787	1.767	1.900	1.843	1.845
Mn	0.041	0.063	0.059	0.066	0.067	0.062	0.045	0.066	0.054	0.066
XM1-3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	1.890	1.858	1.850	1.840	1.884	1.886	1.861	1.881	1.882	1.892
Na	0.110	0.142	0.150	0.160	0.116	0.114	0.139	0.119	0.118	0.108
Na	0.330	0.255	0.279	0.303	0.339	0.316	0.286	0.287	0.329	0.334
K	0.335	0.307	0.312	0.319	0.331	0.326	0.343	0.334	0.355	0.362
Sum A	0.665	0.562	0.591	0.621	0.670	0.642	0.629	0.621	0.684	0.696
Mg/ (Mg+Fe ⁺²)	0.445	0.477	0.452	0.453	0.449	0.452	0.464	0.483	0.478	0.473
Al ^I	2.155	1.964	2.082	1.967	2.173	2.051	2.228	1.997	2.289	2.220
Pressure(kb)	7.2		6.9		7.3		7.6		7.9	
Depth(km)	25.4		24.2		25.7		26.6		27.6	

흑운모, K-장석, 석영, 사장석, 스펀, Fe-Ti 산화광물과 평형하에서 공존한 각섬석 성분으로 계산되어야 한다. K-장석이 없을 경우, 있을 때 보다 압력이 매우 높게 측정될 수 있다(Ague, 1987). 연구지역의 화강암에서 지압계 측정을 위하여 선택된 시료들은 만족할 만한 광물조합을 갖고 있다.

둘째, 산소분압이 매우 낮은 조건에서 정출된 Fe가 많은 각섬석은 M2 자리를 점유하는데 있어 Al^{IV}와 치

환될 Mg가 적기 때문에 압력이 매우 높게 계산된다. 그러므로 Anderson and Smith(1995)는 각섬석 지압계로의 적용에 적합한 각섬석은 Fe/(Fe+Mg) 비가 0.65 이하이어야 한다고 제시한 바 있다. 이 연구의 각섬석은 Al^{IV}와 Fe/(Fe+Mg) 비가 대체로 정비례 관계이다(그림 4). Fe/(Fe+Mg) 값은 약 0.4에서 0.6까지의 변화를 보여 연구지역의 각섬석은 이 조건을 만족하고 있다. 김천화강암의 시료 중에서 KC19와 KC26시료의

Table 4. (continued).

	YA54		YA55		YA56		YA59		YA60	
	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core
SiO ₂	41.31	42.27	40.67	41.40	41.35	41.72	40.96	41.33	40.94	41.23
TiO ₂	0.79	1.24	0.85	1.10	0.89	1.19	1.05	1.25	0.70	0.96
Al ₂ O ₃	11.65	10.40	12.69	11.76	12.17	11.77	12.40	11.88	12.64	11.95
FeO*	20.41	19.93	20.82	20.73	19.29	19.16	19.31	19.26	21.20	20.85
MgO	8.07	8.60	7.39	7.78	8.20	8.35	7.89	8.10	7.45	7.89
MnO	0.51	0.57	0.39	0.42	0.40	0.32	0.34	0.53	0.48	0.48
CaO	11.54	11.48	11.35	11.50	11.51	11.46	11.53	11.52	11.54	11.34
Na ₂ O	1.40	1.48	1.51	1.57	1.45	1.53	1.47	1.42	1.46	1.66
K ₂ O	1.63	1.55	1.79	1.76	1.75	1.73	1.77	1.77	1.68	1.68
total	97.31	97.50	97.45	98.01	97.00	97.22	96.73	97.07	98.07	98.04
Si	6.305	6.433	6.218	6.304	6.320	6.363	6.296	6.328	6.217	6.258
Al(IV)	1.695	1.567	1.782	1.696	1.680	1.637	1.704	1.672	1.783	1.742
Al(VI)	0.404	0.300	0.507	0.416	0.515	0.481	0.545	0.475	0.482	0.398
Ti	0.091	0.142	0.098	0.125	0.102	0.136	0.122	0.144	0.080	0.110
Fe ⁺³	0.603	0.503	0.566	0.473	0.423	0.352	0.333	0.361	0.632	0.623
Fe ⁺²	2.001	2.033	2.096	2.166	2.042	2.092	2.149	2.105	2.059	2.023
Mg	1.836	1.950	1.683	1.765	1.866	1.897	1.807	1.847	1.685	1.783
Mn	0.066	0.073	0.050	0.054	0.052	0.042	0.045	0.068	0.062	0.062
XM1-3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	1.888	1.871	1.860	1.875	1.884	1.872	1.899	1.890	1.878	1.844
Na	0.112	0.129	0.140	0.125	0.116	0.128	0.101	0.110	0.122	0.156
Na	0.301	0.309	0.306	0.338	0.314	0.324	0.336	0.312	0.306	0.332
K	0.318	0.301	0.348	0.342	0.341	0.336	0.347	0.346	0.326	0.325
Sum A	0.619	0.610	0.654	0.681	0.655	0.660	0.683	0.658	0.632	0.656
Mg/ (Mg+Fe ⁺²)	0.478	0.490	0.445	0.449	0.478	0.476	0.457	0.467	0.450	0.469
Al ^{IV}	2.098	1.867	2.288	2.113	2.195	2.118	2.249	2.147	2.265	2.140
Pressure(kb)	7.0		7.9		7.4		7.7		7.8	
Depth(km)	24.4		27.6		26.0		26.9		27.2	

Fe/(Fe+Mg)값은 거의 0.7에 근접한 값을 보여준다. 그러나 측정된 정치압력은 각기 4.9 kb, 4.2 kb로 다른 김천화강암의 정치압력과 잘 일치한다. Anderson and Smith(1995)는 각섬석의 Fe/(Fe+Mg)비와 Al^{IV} 값으로 화강암을 산소분압이 낮은 화강암(low f_{O2}), 산소분압이 중간정도인 화강암(intermediate f_{O2}), 산소분압이 높은 화강암(high f_{O2})으로 구분하고 이 때의 Fe/(Fe+Mg) 값을 각각 0.8~0.99, 0.6~0.8, 0.6 이하로 정하였다. 이

들의 분류에 따르면 연구지역 화강암체의 각섬석의 Fe/(Fe+Mg) 값은 모두 0.6 이하의 값으로 산소분압이 높은 화강암군에 속한다(그림 4). 예외적으로 김천화강암의 각섬석에서 Fe/(Fe+Mg) 값이 0.7에 근접하는 두 시료도 산소분압이 중간정도인 화강암에 속하기 때문에 이 연구의 화강암체에 대한 지압계 계산에서 산소분압의 영향은 배제할 수 있다.

셋째, 각섬석이 고상선 이하에서의 변질작용을 받으

Table 4. (continued).

	YA62		YA63		YA65		YA68		YA68-1	
	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core
SiO ₂	42.03	42.35	41.52	41.56	40.87	40.93	42.64	42.99	41.70	41.97
TiO ₂	1.15	1.30	0.90	1.29	0.76	0.97	0.96	1.12	0.70	1.08
Al ₂ O ₃	11.85	11.20	11.88	11.50	12.28	11.58	10.01	9.32	11.02	10.24
FeO ⁺	19.82	19.74	20.04	19.87	21.54	21.19	20.07	20.00	21.23	20.91
MgO	8.00	8.30	7.77	8.07	7.29	7.47	8.23	8.59	7.60	8.19
MnO	0.41	0.49	0.40	0.44	0.35	0.46	0.57	0.54	0.55	0.58
CaO	11.55	11.61	11.52	11.52	11.42	11.51	11.41	11.42	11.48	11.40
Na ₂ O	1.29	1.22	1.43	1.52	1.41	1.50	1.36	1.45	1.37	1.38
K ₂ O	1.60	1.58	1.65	1.74	1.79	1.83	1.34	1.27	1.44	1.50
total	97.70	97.78	97.11	97.50	97.71	97.44	96.58	96.70	97.08	97.26
Si	6.374	6.414	6.359	6.347	6.243	6.292	6.544	6.590	6.395	6.416
Al(IV)	1.626	1.586	1.641	1.653	1.757	1.708	1.456	1.410	1.605	1.584
Al(VI)	0.495	0.416	0.506	0.420	0.456	0.392	0.357	0.275	0.389	0.262
Ti	0.131	0.148	0.104	0.148	0.088	0.112	0.111	0.129	0.080	0.124
Fe ⁺³	0.429	0.444	0.399	0.379	0.621	0.495	0.459	0.447	0.594	0.640
Fe ⁺²	2.085	2.055	2.167	2.159	2.129	2.230	2.117	2.117	2.128	2.033
Mg	1.807	1.874	1.773	1.837	1.660	1.711	1.882	1.961	1.738	1.866
Mn	0.053	0.062	0.052	0.057	0.045	0.060	0.075	0.070	0.071	0.075
XM1-3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	1.876	1.883	1.891	1.884	1.868	1.895	1.877	1.875	1.887	1.867
Na	0.124	0.117	0.109	0.116	0.132	0.105	0.123	0.125	0.113	0.133
Na	0.255	0.240	0.316	0.334	0.287	0.343	0.281	0.306	0.292	0.274
K	0.309	0.305	0.322	0.338	0.349	0.359	0.262	0.248	0.283	0.293
Sum A	0.564	0.546	0.637	0.673	0.636	0.702	0.542	0.554	0.575	0.568
Mg/ (Mg+Fe ⁺²)	0.464	0.477	0.450	0.460	0.438	0.434	0.471	0.481	0.450	0.479
Al ^T	2.121	2.002	2.146	2.072	2.213	2.100	1.813	1.685	1.994	1.846
Pressure(kb)	7.1		7.2		7.5		5.6		6.5	
Depth(km)	24.8		25.2		26.3		19.7		22.7	

면 압력 계산이 무의미하다. 일반적으로 저온에서 변질 작용이 일어나면 각섬석의 연변부는 양기석으로 변한다. 변질된 각섬석은 전자현미 분석시 반사전자상으로 쉽게 관찰할 수 있다. 또한 이러한 저온의 변질작용이 있었다면 각섬석 내에 포유된 흑운모 역시 녹니석으로 변질된다. 이 연구의 각섬석은 현미경과 반사전자상의 관찰 결과 거의 모두 저온의 변질작용은 받지 않았다. 그림 5에서 각섬석 분석값들은 화강암의 고상선보다 높

은 온도 압력조건에서 형성되었음을 알 수 있다.

넷째, 각섬석의 지압계로의 적용에 있어 가장 큰 논란이 되는 것은 Al^T의 온도의존성이다. 온도가 증가하면 각섬석은 이데나이트 방식의 치환이 우세해진다. 즉, 각섬석 내 Al^{VI}보다는 Al^{IV}가 더 많아지게 된다. 그러므로 광물들이 지압계의 조건과 크게 다른 온도에서 평형을 이룬다면 압력에 오차가 발생하게 된다. 그래서 Anderson and Smith(1995)는 Blundy and Holland

Table 4. (continued).

	YA100		YA102	
	rim	core	rim	core
SiO ₂	41.75	43.01	43.54	44.82
TiO ₂	0.69	1.19	0.98	1.15
Al ₂ O ₃	10.76	9.71	10.87	9.34
FeO*	21.82	20.83	18.13	17.40
MgO	7.77	8.60	9.59	10.63
MnO	0.53	0.68	0.35	0.31
CaO	11.59	11.52	11.78	11.70
Na ₂ O	1.25	1.29	1.24	1.16
K ₂ O	1.45	1.25	0.99	0.88
total	97.61	98.08	97.48	97.38
Si	6.367	6.489	6.518	6.671
Al(IV)	1.633	1.511	1.482	1.329
Al(VI)	0.303	0.216	0.437	0.311
Ti	0.080	0.135	0.110	0.129
Fe ⁺³	0.734	0.681	0.498	0.529
Fe ⁺²	2.048	1.946	1.771	1.636
Mg	1.766	1.934	2.139	2.356
Mn	0.068	0.086	0.045	0.039
XM1-3	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	1.893	1.862	1.888	1.866
Na	0.107	0.138	0.112	0.134
Na	0.262	0.240	0.249	0.200
K	0.282	0.240	0.190	0.166
Sum A	0.544	0.481	0.439	0.367
Mg/(Mg+Fe ⁺²)	0.463	0.498	0.547	0.590
Al ^T	1.936	1.728	1.919	1.640
Pressure(kb)	6.2		6.1	
Depth(km)	21.7		21.4	

(1990)의 각섬석-사장석 지온계를 이용하여 온도를 구하여 온도와 압력사이의 정비례 관계가 있음을 제시하고 온도의 영향으로 압력이 달라질 수 있음을 언급하였다. 그러나 각섬석-사장석 지온계에서 보면 각섬석의 Al이 적을수록 온도가 낮게 나타나는 경우가 있으므로 엄격한 적용이 힘들다. 그림 6에서 Al^{IV}, Al^{VI}값은 Al^T값이나 압력이 증가함에 따라 커지는 정비례 관계를 잘 보인다. 이는 처마카이트 방식의 치환이 매우 우

세하였음을 지시하며, 온도의 영향은 거의 없었다는 것을 의미한다.

화강암의 고결압력

각섬석의 연변부의 평균 Al^T함량과 계산된 압력을 표 2, 3, 4에 제시하였으며 이에 대한 지리적인 압력분포를 그림 7과 8에 나타내었다. 앞에서 설명한 것처럼 가장 적절한 관계식을 나타낸다고 생각되는 Schmidt(1992)의 식을 이용하여 압력을 계산하였다. 또한 지각의 평균밀도를 2.8 g/cm³으로 가정하고 정치압력을 깊이로 환산하였다. 전체적으로 볼 때 영주화강암은 5.6 kb내지 7.9 kb의 압력을 보이며 안동화강암은 5.4 kb내지 7.5 kb의 압력을, 그리고 김천화강암은 4.2 kb내지 5.4 kb의 비교적 고른 압력 분포를 나타낸다. 이러한 정치 깊이는 기존의 연구와도 잘 일치한다(조동룡과 권성택, 1994). 기존의 연구에서 국내 남한의 화강암체 중 가장 압력이 높은 암체는 영주화강암이며 예천전단대를 경계로 이 암체 남부에 분포하는 안동화강암 역시 영주화강암과 비슷한 압력분포를 보이고 있다. 특징적으로 영주화강암은 예천전단대 인근의 남동쪽 경계부에서 북서쪽 방향으로 진행하면서 정치압력이 점차 적어지며, 장축방향으로는 거의 일정하다. 김천화강암의 정치압력 역시 거의 일정하다. 안동화강암은 각섬석이 대체로 암체의 남동부에서만 관찰되어 전체적인 분포 양상을 알기는 어렵지만 대체로 7 kb 내외의 정치압력을 보이고 있다.

토 의

영주화강암은 매우 흥미로운 압력의 분포를 보여준다(그림 7). 영주화강암의 남쪽 연변부에서 측정된 정치 심도는 7.4 kb±0.5 kb이나 점차 북서 방향으로 올라가면서 압력이 낮아져 북서 연변부에서의 정치 심도는 6 kb±0.5 kb의 압력을 보여 대략 1~1.5 kb의 압력차이를 나타내고 있다. 영주지역의 해발고도는 대체로 100~600 m이므로 고도 변화에 따른 압력의 보정은 0.2 kb를 넘지 못한다. 그러므로 고도차에 의한 영향은 배제할 수 있다.

예천전단대와 접하는 영주화강암의 남동쪽 경계에서 북동쪽 경계까지의 직선거리는 약 25 km이다. 양쪽 경계에서의 압력차가 1.5 kb 정도 나타나므로 이를 깊이로 환산하면 약 5 km의 정치심도 차이를 보이게 된다. 이는 남동쪽 경계부가 북서쪽 경계부 보다 5 km 정도 더 심부에서 정치되었음을 의미하며 정치이후 단층운동이나 조산운동 등과 같은 지구조적 환경에 의해

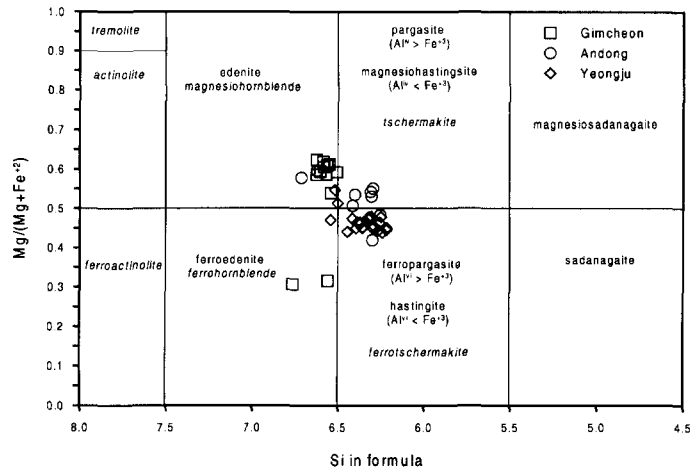


Fig. 3. Classification of the IMA recommended plot for the calcic amphiboles. Diagram parameters 1: $Ca_B \geq 1.50$, $(Na+K)_A \geq 0.50$, $Ti < 0.50$; edenite, pargasite ($Al^{VI} \geq Fe^{+3}$), magnesiohastingsite ($Al^{VI} < Fe^{+3}$), ferropargasite ($Al^{VI} \geq Fe^{+3}$), hastingsite ($Al^{VI} < Fe^{+3}$), magnesiosadanagaite, sadanagaite. Diagram parameters 2: $Ca_B \geq 1.50$, $(Na+K)_A < 0.50$, $Ca_A < 0.50$; tremolite, actinolite, ferroactinolite, magnesiohornblende, ferrohornblende, tschermakite, ferrotschermakite

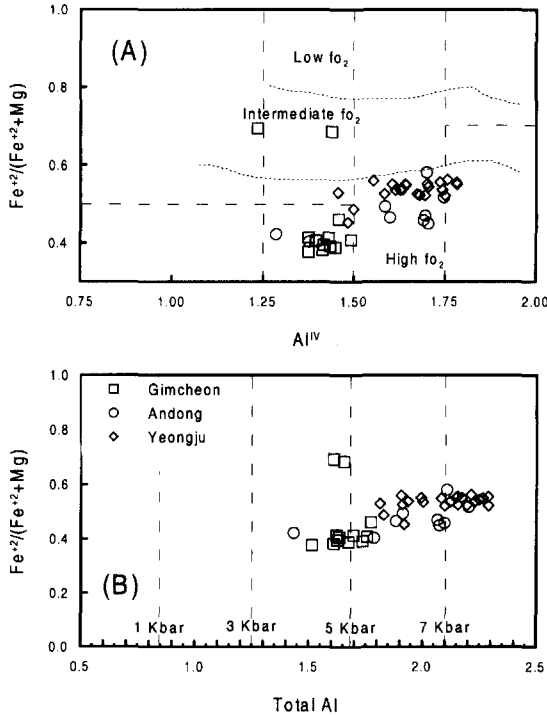


Fig. 4. Composition of amphibole from Yeongju-Andong-Gimcheon granite of Yeongnam Massif in terms of (A) $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$ vs. Al^{IV} , and (B) $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$ vs. Total Al. Dashed lines in (A) are classification division after IMA (Leake *et al.*, 1997). Isobars in (B) are based on the calibration of Schmidt (1992).

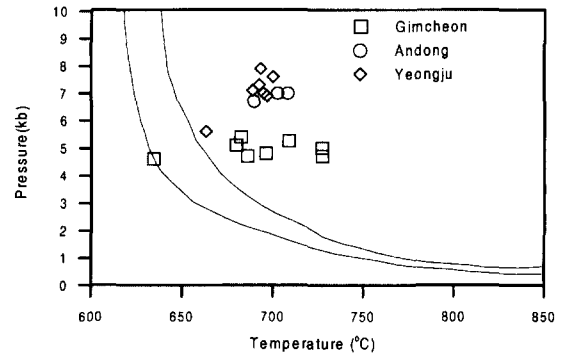


Fig. 5. Estimates of pressure (Schmidt, 1992) and temperature (Holland and Blundy, 1994) for Gimcheon, Andong, and Yeongju granite.

남쪽 부분이 더 상승하여 현재 지표면에 노출되었을 것이다. 단순 계산으로 기울어진 경사각도를 계산하면 영주화강암은 대체로 북동방향으로 약 10° 정도 기울어져 있음을 의미한다.

영주 지역은 한반도 남서부에서 북동방향으로 발달한 호남전단대와 예천전단대가 지나가고 있다. Yanai *et al.*(1985)에 의해 처음 정의된 호남전단대는 목포에서 영주에 이르는 길이 약 400 km에 달하는 연성전단대이다. Cluzel *et al.*(1991)은 호남전단대의 전단운동으로 북중국 대륙에 속하는 영남육괴와 남중국 대륙에 속하는 육천 습곡대가 트라이아스기에 병치(juxtaposed)

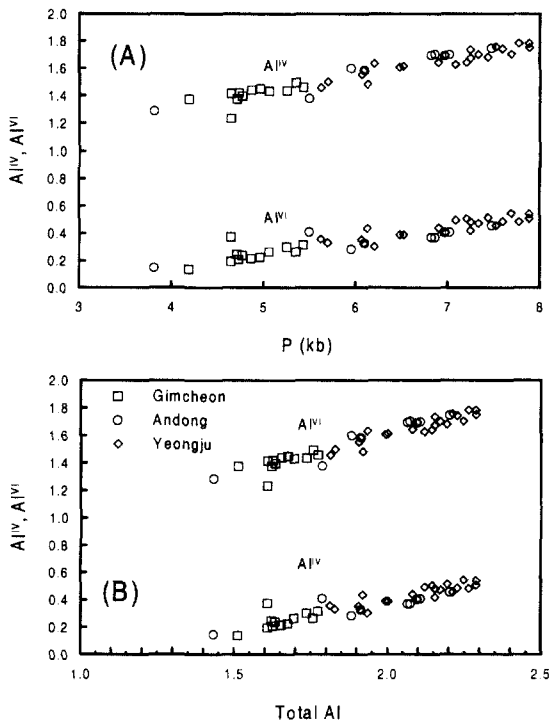


Fig. 6. Composition of amphibole from Gimcheon, Andong, and Yeongju granite of Yeongnam Massif in terms of (A) Al^{IV} and Al^{VI} vs. pressure and (B) Al^{IV} and Al^{VI} vs. Total Al.

되었음을 제시하였다. 또한 권성택과 이진한(1997)은 호남전단대내의 엽리상, 비엽리상 화강암체에 대한 절대 연령 자료들을 종합하여 호남전단대의 우수향 연성 전단운동시기는 183±8 Ma 이후이며 최종 운동시기는 남원 북서부 화강암의 고화시기(적어도 187 Ma 이후, 혹은 176 Ma)와 일치할 것이라고 제안하였다.

예천전단대는 예천 남동부에서 춘양을 가로지르는 북북동 방향의 길이 약 100 km, 너비 약 3.5 km의 연성전단대이다(Chang, 1991). 이 전단운동에 의해 생긴 압쇄암의 엽리는 대체로 N52°E 방향이며 경사는 70°NW로 밝힌 바 있다. 또한 이 전단대의 시기는 쥘라기 구조운동과 동시에 화강암이 정치된 후 비교적 고온 상태에서 생성된 것으로 보았다. 또한 진명식과 장보안(1999)은 영주화강암의 Rb-Sr 전암연대인 218±10 Ma를 정치 시기로 보았고, 측정된 K-Ar 연대는 대부분 160 Ma를 보이는데 이들은 이를 전단작용이 일어난 시기로 보았다.

이러한 사실들을 종합해보면 영주화강암은 트라이아스기말 내지 쥘라기초에 7 kb의 심부에 관입정치되었

으며 진명식과 장보안(1999)이 제안한 160 Ma의 쥘라기 중기에 예천전단대를 형성시킨 우수향 연성운동에 의해 영주화강암체는 북서방향으로 약 10° 정도 기울어진 것으로 생각된다. 그러나 영주화강암체는 북동-남서의 장축방향으로는 춘양근처에서 예천에 이르는 약 90 km의 직선거리를 보임에도 불구하고 암체의 남쪽 경계부를 따라서는 약 7.5 kb, 암체의 북쪽 경계부를 따라서는 약 6 kb로 거의 압력의 변화를 보이지 않는다. 이러한 사실은 앞서 기술한 김천화강암의 압력 분포(장축방향)에서도 확인된다. 영남육괴 내에 관입한 대부분의 화강암체들은 북동 방향으로 길게 대상분포하고 있다. 정치 심도의 분포 결과를 볼 때 적어도 영남육괴내 화강암은 북동-남서방향으로는 비록 화강암체가 전단대와 접하더라도 기울어짐(tilting)이 전연 일어나지 않았음을, 즉, 조구조운동에 의한 암체의 고결 후 동적 변화가 전혀 없었음을 지시한다. 그러나 전단대의 영향을 받은 영주화강암체에서 보듯이 전단력이 작용하여 전단대(예천)를 형성시키면서 그 전단력은 북서방향으로 작용한 것으로 보인다. 이러한 전단력에 의해 영주화강암의 기울어짐이 일어났으며 남동부의 암체인 안동화강암에는 암체에 영향을 줄 정도의 전단력이 미치지 못한 것으로 생각된다. 안동화강암의 고결 압력은 약간의 오차는 있지만 7 kb 이내이다. 이러한 사실은 정치 깊이의 차이는 있지만 대체로 5 kb 내외의 압력을 보이는 남원화강암 역시 우수향 전단대(호남)의 남동부에 위치하며 압력의 분포변화가 거의 없다는 것과 잘 일치한다.

김광호 외(1990)의 고지자기 연구에 의하면 영주화강암은 북동쪽의 편각에 아래로 향하는 방향을 보여준다고 하였다. 지금까지 화강암의 고지자기 측정에 있어서는 화강암체의 경사를 결정할 수 없어 지층의 보정을 할 수 없었지만(황재하 외, 1999) 각섬석 지압계가 적용될 수 있는 화강암체의 고지자기 연구에 각섬석지압계를 이용하여 화강암의 경사도 여부가 결정된다면 좀더 정량화된 고지자기 데이터를 얻을 수 있을 것이다.

지압계에서 온도에 의한 영향을 완전히 배제할 수 없다. Blundy and Holland(1990), Holland and Blundy(1994)는 각섬석과 사장석의 평형관계를 이용하여 각섬석과 사장석에 의한 평형온도의 식을 유도하였다. 처음의 연구에서 이들은 edenite+quartz = tremolite + albite의 반응식을 기초로 각섬석-사장석의 지온식을 유도하였다. 이 때 각섬석은 이상적인 거동을 하며 사장석은 비이상적인 거동을 한다고 가정하였다. 그러나 그 후 이들은 위의 식 이외에 Spear(1981)의 각섬석-사

Table 5. Composition of coexisting plagioclase and hornblende and thermobarometry from the Yeongju-Andong-Gimcheon granites.

Pluton	Sample no.	X _{ab}	Al ^T	P(Kb)	TA (°C)	TB (°C)
Gimcheon	KC6-1	0.609	1.74	5.3	745	709
	KC9	0.727	1.69	5.1	729	680
	KC11	0.628	1.67	5.0	758	727
	KC13	0.677	1.77	5.4	727	682
	KC26	0.717	1.61	4.6	671	634
	KC59	0.728	1.62	4.7	725	686
	KC61	0.655	1.63	4.8	737	696
	KC64	0.613	1.63	4.7	769	727
Andong	YA7	0.695	2.10	7.0	733	703
	YA39	0.714	2.11	7.0	724	708
	YA46	0.450	2.04	6.7	794	689
Yeongju	YA33	0.686	2.08	6.9	716	697
	YA34	0.674	2.17	7.3	734	692
	YA35	0.681	2.23	7.6	723	700
	YA36	0.658	2.29	7.9	731	693
	YA54	0.687	2.10	7.0	736	695
	YA62	0.631	2.12	7.1	709	689
	YA68	0.724	1.81	5.6	703	663

X_{ab}: Mole fraction of albite in plagioclase.

Al^T: Total Al in hornblende.

P (kb): Pressure estimated using the Schmidt (1992) calibration.

TA (°C), TB (°C): Temperature computed using plagioclase-hornblende thermometers A and B of Holland and Blundy (1994).

장석 지온계에서 이용한 tschermakite+albite = glaucophane+anorthite의 반응식을 변형시킨 edenite+albite = richterite+anorthite의 반응식도 고려하였다. 이 때의 두 식의 각섬석과 사장석은 모두 비이상적으로 거동한다고 가정하였다. Holland and Blundy(1994)의 첫번째 식은 석영을 포함한 식이며 두번째 식은 석영을 포함하지 않은 반응이다. 그러므로 실리카 불포화인 암석에도 적용될 수 있다. 이들 식에 의해 계산된 각섬석과 사장석의 평형온도를 표 5에 제시하였다.

현재까지 연구된 각섬석 지압계 계산식과 이를 이용한 정치압력은 온도의 보정없이 보고된 결과가 대부분이다. 그래서 Anderson and Smith(1995)는 Johnson and Rutherford(1989), Schmidt(1992)의 관계식을 온도가 포함된 식으로 재유도하기도 하였다. 이 식을 이용하면 100°C 증가시 1.3 kb~2 kb의 압력이 더 높아지게 된다. 각섬석 지압계는 마그마의 고화시기 또는 바로 그 근처시기의 압력을 나타낸다. 지압계에 필요한 완충역할을 하는 광물들은 고상선 근처에서 대부분 안정하므로 압력 평형을 위한 온도상한선은 고상선 근처이다. 복체상 규산염광물에서 Al의 확산현상은 느리게 진행된다므로 650°C 이하에서는 지압계 완충광물들의 평

형이 이루어지지 않으므로 온도하한선은 이 정도의 온도값일 것이다. 그림 9는 Schmidt(1992)에 의한 압력값과 Anderson and Smith(1995)의 온도의 효과를 고려하여 재계산된 압력값을 서로 비교한 그림이다. 양자간은 거의 1:1의 정비례관계를 특히, 5 kb 이상의 값에서 잘 보이고 있다. 그러므로 압력이 높을수록 온도에 의한 효과는 미약할 것으로 생각된다. 또한 그림 5에서 보는 바와 같이 연구대상 화강암들의 압력과 온도 사이에 뚜렷한 관계를 보여주지 않는다. 영주, 안동화강암은 663°C~708°C의 대체로 좁은 범위의 온도변화를 나타내며 김천화강암은 이보다는 넓은 634°C~727°C로 약 100°C 정도의 온도 범위를 보이고 있다.

결 론

이 연구에서 분석된 김천, 영주, 안동화강암의 각섬석 화학성분의 특징과 각섬석 지압계를 이용한 화강암의 정치심도 및 그 지구조적 의미는 다음과 같다.

1) 재개정된 IMA(Leake *et al.*, 1997)의 각섬석 분류를 따르면 안동화강암은 파가사이트, 페로파가사이트, 마그네슘 각섬석 영역에 해당하며, 영주화강암의 각섬

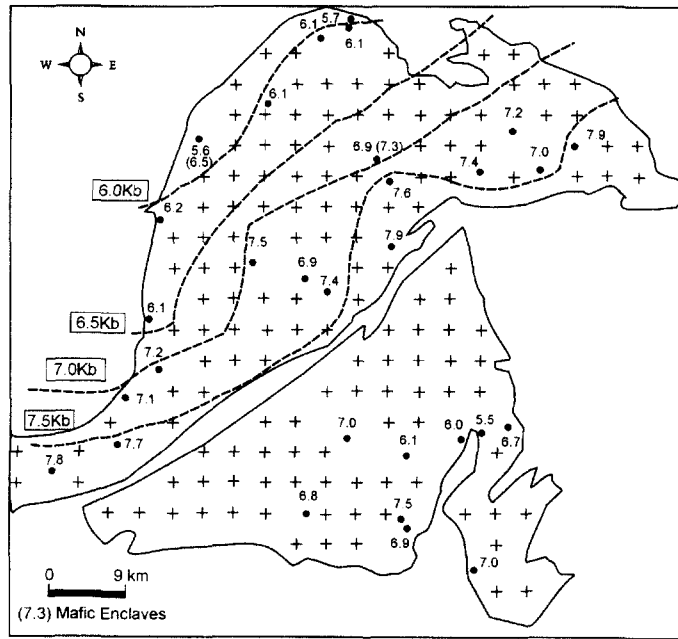


Fig. 7. The distribution of emplacement pressure (kb) in the Yeongju-Andong granite batholith based on the calibration of Schmidt (1992).

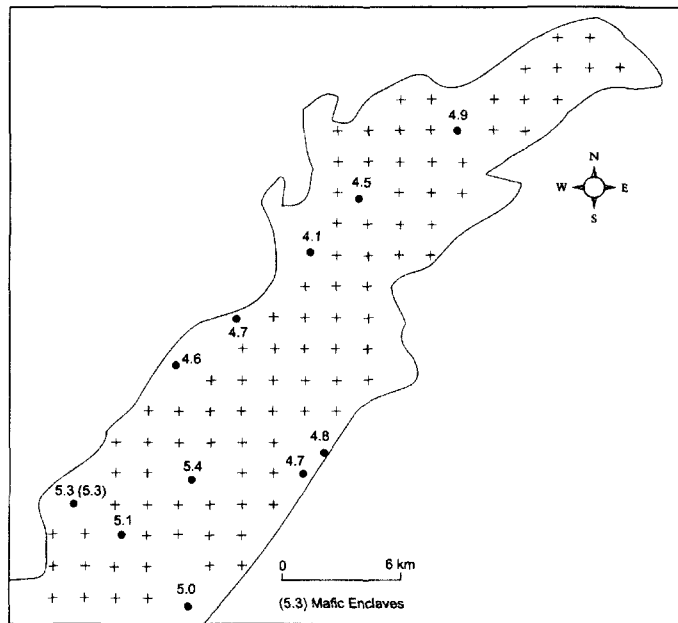


Fig. 8. The distribution of emplacement pressure (kb) of Gimcheon granite based on the calibration of Schmidt (1992).

석의 대부분은 페로파가사이트에, 그리고 일부는 이데 나이트, 페로이데나이트에 속한다. 김천화강암의 각섬

석은 모두 마그네슘 각섬석에 해당한다. 영주, 안동, 김 천화강암의 각섬석에서의 Al^{IV} , Al^{VI} 값은 Al^{IV} 값과 정비

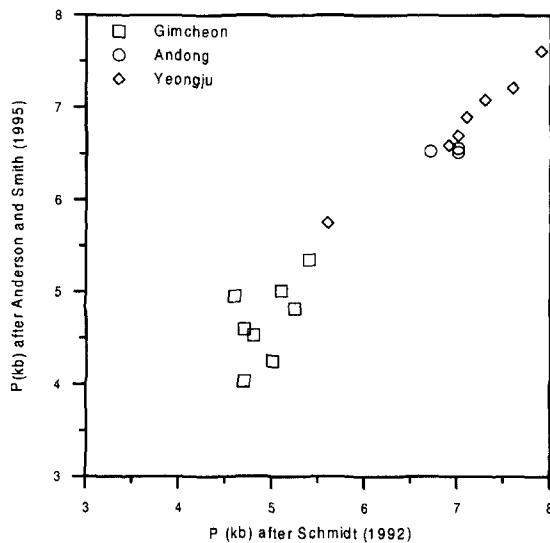


Fig. 9. Aluminum-in-hornblende barometer pressure (P) estimates computed using calibrations of Schmidt (1992) and Anderson and Smith (1995).

레 관계를 잘 나타내기 때문에 처마카이트 방식의 치환이 매우 우수하였다.

2) Schmidt(1992)의 식을 이용하여 각섬석 연변부의 Al^{IV}을 정치 깊이로 환산하면 영주화강암은 5.6 kb 내지 7.9 kb의 압력 (평균 7 kb: 25 km) 분포를 보이며 안동화강암은 5.5 kb 내지 7.4 kb의 압력(평균 6.5 kb: 23 km)을, 그리고 김천화강암은 4.2 kb 내지 5.4 kb(평균 5 kb: 18 km)의 비교적 고른 압력 분포를 나타낸다.

3) 영주화강암의 북서쪽 경계와 남서쪽 경계에서의 압력차이는 1.5 kb 정도 보이며 깊이로 환산하면 약 5 km의 정치심도 차이를 보이게 된다. 이는 남쪽 경계부가 북쪽 경계부 보다 5 km 정도 더 심부에서 정치되었음을 의미하며 단순 계산으로 기울어진 경사각도를 계산하면 현재 지표면에 노출되어 있는 영주화강암은 대체로 북서방향으로 약 10° 정도 기울어져 있음을 보여준다. 이는 정치이후 단층운동이나 전단운동 등과 같은 지구조적 환경에 의해 남쪽 부분이 더 상승하여 현재 지표면에 노출되었음을 의미한다.

4) 김천화강암과 영주화강암은 북동-남서 방향으로 신장되어 있음에도 불구하고 장축방향으로 압력의 차이는 거의 보이지 않는다. 이러한 정치 심도의 분포 결과를 볼 때 적어도 영남육괴내 화강암은 북동-남서방향으로는 비록 화강암체가 전단대와 접하더라도 기울어짐이 전면 일어나지 않았음을, 즉, 조구조운동에 의한 암체의 고결 후 동적 변화가 전혀 없었음을 지시한다.

사 사

이 논문의 심사를 맡아 세심하게 읽고 조언하여 주시고 논문 내용의 수정과 보완에 도움을 주신 한국지질자원연구원의 조동룡 박사와 한국해양연구원의 이종익 박사에게 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

- 권성택, 이진한, 1997, 호남전단대의 운동시기에 관한 소고. 지질학회지, 33, 183-188.
- 김기영, 김형식, 오창환, 박찬수, 강지훈, 류영복, 1996, 장군봉 일대 선캠브리아대-고생대 변성퇴적암류의 다변성 작용-북부 소백산육괴의 중앙부 지역의 지각진화와 환경 지질. 암석학회지, 5, 168-187.
- 김광호, 남기상, 이정후, 1990, 한국 쥘라기의 고지자기. 지질학회지, 26, 513-526.
- 김봉균, 이하영, 김수진, 정지곤, 1988, 안동도폭 지질보고서. 한국동력자원연구소, 20p.
- 김상욱, 양승녕, 이윤종, 1989, 김천 도폭 (1/5만). 한국동력자원연구소, 22p.
- 김옥준, 1971, 한국의 신기 화강암류의 편입시기와 지각변동. 광산지질, 4, 1-9.
- 안건상, 정현희, 이현구, 1993, 장군광산 주변의 변성이질 암에서의 누진변성반응 계열. 광산지질, 26, 473-487.
- 양관석, 조문섭, 1995, 춘양 화강암체 주변 두음리층에 산출하는 십자석-흑운모-홍주석-석류석 광물조합. 암석학회지, 4, 49-60.
- 윤현수, 1998, 김천남부에 분포하는 화강섬록암류의 지구화학적 특성. 1998년도 공동학술발표회 발표논문 요약집, 45.
- 조동룡, 권성택, 1994, 남한의 중생대 화강암에 대한 각섬석 지압계와 지각 두께의 변화. 지질학회지, 30, 41-61.
- 주승환, 1988, 영남육괴 Rb/Sr 연대 측정 연구 (IV). 동위 원소지질연구 연구보고서 KR 87-27, 한국동력자원연구소, 49p.
- 진명식, 장보안, 1999, 소백산육괴 동북부 영주-춘양지역의 트라이아스기말-쥘라기초 화강암체의 열사 및 그 지구조적 의의. 지질학회지, 35, 189-200.
- 황재하, 최위찬, 이병주, 박기화, 최영섭, 조동룡, 송교영, 진명식, 이봉주, 조진동, 이상규, 황세호, 황학수, 박인화, 이호영, 1999, 한반도 지각변형 연구. 98기관고유 연차 보고서, 142p.
- Ague, J.J. and Brandon, M.T., 1992, Tilt and northward offset of Cordilleran batholiths resolved using igneous barometry. Nature, 360, 146-149.
- Ague, J.J., 1997, Thermodynamic calculation of emplacement pressures for batholithic rocks, California: Implications for the aluminum-in-hornblende barometer. Geology, 25, 563-566.
- Ague, J.J., and Brandon, M.T., 1996, Regional tilt of the

- Mount Stuart batholith, Washington, determined using aluminum-in-hornblende barometry: Implications for northward translation of Baja British Columbia. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 108, 471-488.
- Anderson, J.L. and Smith, D.R., 1995. The effects of temperature and oxygen fugacity on the Al-in-hornblende barometer: *Am. Min.*, 80, 549-559.
- Anderson, J.L., 1996. Status of thermobarometry in granitic batholiths. *Royal Soc. Edin. Trans.*, 87, 125-138.
- Blundy, J.D. and Holland, T.Jr., 1990. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 104, 208-224.
- Chang, T.W., 1990. Relative timing of shear zone formation and pluton emplacement in the Yechon shear zone, Korea. *Korean Inst. Mining Geol.*, 453-463.
- Chang, T.W., 1991. On the microstructures of mylonitic rocks - with special reference to Yechon shear zone, Korea -. *Jour. Geol. Soc. Korea*, 27, 177-190.
- Cluzel, D., Lee, B.J. and Cadet, J.P., 1991. Indosinian dextral ductile fault system and synkinematic plutonism in the southwest of the Ogcheon belt (South Korea). *Tectonophysics*, 194, 131-151.
- Ghent, E.D., Nicholls, J., Simony, P.S., Sevigny, J.H., and Stout, M.Z., 1991. Hornblende geobarometry of the Nelson batholith, southeastern British Columbia: tectonic implications. *Can. Jour. Earth Sci.*, 28, 1982-1991.
- Hammarstrom, J.M. and Zen, E-an, 1986. Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer. *Am. Min.*, 71, 1297-1313.
- Holland, T. and Blundy, J., 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 116, 433-447.
- Hollister, L.S., Grissom, G.C., Peters, E.K., Stowell, H.H. and Sisson, V.B., 1987. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *Am. Min.*, 72, 231-239.
- Iiyama, J.T. and Fontelle, M., 1981. Mesozoic granitic rocks of southern Korea reviewed from major constituents and petrography. *Mining Geol.*, 31, 281-295.
- Jin, M.S., 1980. Petrology and geochemistry of the Cretaceous granitic rocks in southern Korea. Ph.D. dissertation, Seoul National University, 144p.
- Johnson, M.C. and Rutherford, M.J., 1989. Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application at Long Valley caldera (California) volcanic rocks. *Geology*, 17, 837-841.
- Jwa, Y.J., 1988. Petrology, Geochemistry and geochronology of the granitic rocks in the Inje-Hongcheon district, South Korea. Ph.D. dissertation, University of Tokyo, 142p.
- Kwon, S.T. and Hong, S.S., 1993. Contrasting TiO₂/MgO ratios in the Namwon granitic complex. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, 2, 41-51.
- Leake, B.E., Woolley, A.R., Arps, C.E.S., Birch, W.D., Gilbert, M.C., Grice, J.D., Hawthorne, F.C., Kato, A., Kisch, H.J., Krivovichev, V.G., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J.A., Maresch, W.V., Nickel, E.H., Rock, N.M.S., Schumacher, J.C., Smith, D.C., Stephenson, N.C.N., Ungaretti, L., Whittaker, E.J.W. and Youzhi, G., 1997. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, commission on new minerals and mineral names. *Can. Min.*, 35, 219-246.
- Lee, D.S., 1971. Study of the igneous activity in the middle Ogcheon geosynclinal zone, Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, 7, 153-216.
- Lee, J.I., and Lee, M.S., 1991. Mineralogy and petrology on the granitic rocks in the Youngju area, Kyongsang buk-do, Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, 27, 626-641.
- Lee, J.I., Jwa, Y.J., Kagami, H. and Uchiumi, S., 1997. New radiometric ages of the granitic rocks in the Yeongnam Massif (abstract). *Econ. Environ. Geol. Abstract with programs*, 30, 61-62.
- Lee, J.I., Jwa, Y.J., Park, C.H., Lee, M.J. and Moutte, J., 1998. Petrology and geochemistry of the Youngju and Andong granites in the northeastern Yeongnam Massif, Korea. *Geosci. Jour.* 2, 1-14.
- Schmidt, M.W., 1992. Amphibole composition in tonalites as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 110, 304-310.
- Spear, F.S., 1981. An experimental study of hornblende stability and compositional variability in amphibolite. *Am. Jour. Sci.*, 281, 697-734.
- Tsuzue, A., Mizuta, T., Watanabe, M. and Min, K.W., 1981. Jurassic and Cretaceous rocks in South Korea. *Mining Geol.*, 31, 261-280.
- Vyhnal, C.R. and McSween, Jr. H.Y., 1990. Constraints on Alleghanian vertical displacements in the southern Appalachian Piedmont, based aluminum-in-hornblende barometry. *Geology*, 18, 938-941.
- Vyhnal, C.R. and McSween, Jr. H.Y., 1991. Hornblende chemistry in southern Appalachian granitoids: implications for aluminum hornblende thermobarometry and magma epidote stability. *Am. Min.*, 76, 176-188.
- Yanai, S., Park, B.S. and Otoh, S., 1985. The Honam shear zone (South Korea): deformation and tectonic implication in the Far East. *Scient. Pap. College Arts Sci., Univ. Tokyo*, 35, 181-122.
- Zen, E-an, 1989. Plumbing the depths of batholiths: *Am. Jour. Sci.*, 289, 1137-1157.

(2001년 2월 15일 접수, 2001년 3월 10일 게재승인)