

옥천 변성대 변성퇴적암의 K-Ar 및 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대와 그 의의

김성원^{1,*} · 오창환² · 이덕수² · 이정후²

¹전북대학교 기초과학연구소, ²전북대학교 지구환경과학과

K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ages from Metasediments in the Okcheon Metamorphic Belt and their Tectonic Implication

Sung Won Kim^{1,*}, Chang Whan Oh², Deok Su Lee² and Jeong Hu Lee²

¹Basic Science Research Institute, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

²Department of Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

요약: 옥천 변성대 서남부 화산지역과 중부 미원-증평지역 52개의 변성이질-사질암과 5개의 화강암류에 있는 흑운모와 백운모로부터 K-Ar과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대를 구하였다. 서남부 화산지역 보은과 피반령의 2개의 지구조 단위에서 채취한 변성이질-사질암류로부터 구한 흑운모와 백운모 K-Ar과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 149-180 Ma이다. 미원-증평지역의 보은과 피반령의 2개의 지구조 단위에서 채취한 변성이질-사질암류로부터 구한 흑운모와 백운모 K-Ar 연대는 서남부 화산지역에 비해 복잡한 연대분포를 보이는데 백악기 화강암체 주위의 102-105 Ma를 제외하고 142-194 Ma(쥬라기), 216-234 Ma(삼첩기후기-중기) 및 241-277 Ma(삼첩기초기-페름기 중기)의 범위이다. 하지만 삼첩기부터 페름기까지 연대범위는 보은 단위 북부와 피반령 단위 남부, 즉 증평지역의 옥천변성대 중앙부에서만 구해지며 다른 지역의 연대들은 쥬라기중기에 집중된다. 서남부 화산지역 및 중부 미원-증평지역의 화강암류의 K-Ar과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 흑운모와 백운모 연대들은 쥬라기중기로 이들은 변성퇴적암으로부터 얻어진 쥬라기중기의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 과 K-Ar 흑운모와 백운모의 연대와 거의 일치하며 이는 두 암체가 동시에 냉각된 사실을 지시한다. 서남부 화산지역과 중부 미원-증평지역의 보은 단위 및 피반령 단위에서 분리된 탄질물의 d_{002} 값은 모두 각섬암상 범위의 흑연화를 지시하는 3.353-3.359 Å의 매우 좁은 범위에 집중된다. 변성광물군으로 볼 때 녹색편암상의 변성작용을 받은 화산지역의 보은 단위 남부에서도 각섬암상 이상의 고온을 지시하는 탄질물의 d_{002} 값이 나타남은 이들 지역에서 흑운모와 백운모 K-Ar과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대가 쥬라기중기에 집중되는 사실, 이들 지역들 내 광역적으로 관입한 화강암의 관입정지연대와 냉각연대가 쥬라기중기인 사실, 그리고 쥬라기 화강암 주변에 500°C 이상의 저압형 변성대가 형성된 것은 광역적으로 변성광물을 형성한 주변성작용 이후 쥬라기초기(?)-중기에 일어난 저압형의 광역적 열변성작용을 강하게 뒷받침한다. 하지만 광역적 열변성작용에 의한 변성광물변화는 화강암접촉부 1-2 km 내에서만 인지되며 이는 화강암의 빠른 냉각에 의해 1-2 km 밖의 광물군이 변화될 만큼 충분한 기간동안 열이 공급되지 못하였음을 지시한다. 한편, 옥천변성대 증평지역 중앙부의 변성이질-사질암으로부터 측정된 흑운모와 백운모 K-Ar과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 최근 이들 지역에서 보고된 중압형의 주 광역변성작용시기인 석탄기후기-페름기초기 이후의 냉각역사들을 잘 대변한다. 특히, 옥천변성대 중부 증평지역의 중앙부에서 5개 시료에 대해 구한 흑운모와 백운모 K-Ar 연대인 241-249 Ma와 263-277 Ma는 석탄기후기-페름기초기 (ca. 280-300 Ma) 옥천변성대의 주변성시기 이후 280-300 Ma부터 263-277 Ma 사이에서 약 350°C까지의 빠른 냉각과 263-277 Ma부터 241-249 Ma 사이에서 약 300°C까지의 느린 냉각을 지시한다. 하지만 왜 삼첩기-페름기의 연대가 증평지역의 중앙부에만 국한되어 나타나는지에 대한 좀 더 자세한 연구가 필요하다.

핵심어: 옥천변성대, K-Ar과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대, 탄질물의 d_{002} 값, 냉각

Abstract: Muscovite and biotite from 52 metasediments and 5 granites in the Hwasan area, the southwest of the Okcheon metamorphic belt and the Miwon-Jeungpyeong area, central Okcheon metamorphic belt were dated by the K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ methods. Muscovite and biotite ages from metapelitic and psammitic rocks (metasediments) of the Boeun and Pibanryeong units in the Hwasan area are concentrated in the

*Corresponding author: Tel. 82-63-270-3397, E-mail. sungwon@moak.chonbuk.ac.kr

mid-Jurassic (149-180 Ma). K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages for metapelitic and psammitic rocks of the Boeun and Pibanryeong units in the Miwon-Jeungpyeong area show complicated age distribution. Muscovite and biotite ages are classified by three groups, 142-194 Ma, 216-234 Ma, and 241-277 Ma. Younger (Cretaceous) ages occur only in metasediments close to Cretaceous granitic rocks in the southeastern region and the older ages of 216-277 Ma are restricted to the middle part of the Jeungpyeong area. Most ages in the other area of the central Okcheon metamorphic belt fall between 142-194 Ma (Jurassic). K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages for granite from the northern part in the both the southwest and central Okcheon metamorphic belt also gave middle Jurassic ages (156-168 Ma). The similar ages from both metasediments and granites in the study areas indicate simultaneous cooling of both rocks to 300-350°C during the middle Jurassic. The state of graphitization of carbonaceous material of all metasediments in the study areas indicates fully ordered graphite falling within a small range, from 3.353 to 3.359 Å, which indicate amphibolite facies regional metamorphism. In the southern sector of the Boeun unit from the Hwasan area, metamorphic grade indicated by mineral paragenesis during regional intermediate-P/T metamorphism is greenschist facies. Whereas, the d_{002} values for carbonaceous materials in the same sector show fully ordered graphite (ca. 500°C) indicating amphibolite facies. This result with the concentration of mica ages of metasediments into the middle Jurassic, the presence of low-P/T thermal metamorphic zone (>500°C) in the metasediments close to the Jurassic granite and the regional intrusion of Jurassic granites and their middle Jurassic intrusion and cooling ages may indicate the low-P/T regional thermal event during the early(?) - middle Jurassic after main intermediate-P/T metamorphism which formed main mineral assemblage regionally in the study area. The regional thermal event failed, however, to reset the mineral assemblage of regional intermediate-P/T metamorphism except for narrow aureole (1-2 km) around Jurassic granite because the duration of thermal effect was relatively short by rapid cooling of the Jurassic granite. In the middle part of the Jeungpyeong area, central Okcheon metamorphic belt, muscovite and biotite K-Ar ages from 5 samples are 263-277 Ma and 241-249 Ma, respectively. An intermediate-P/T metamorphism is currently accepted to have occurred between 280 and 300 Ma. Therefore, the muscovite and biotite ages can be interpreted as cooling ages after M1 metamorphism indicating rapid cooling to ca. 350°C between 280-300 Ma and 263-277 Ma, and biotite ages indicate slower cooling to ca. 300°C between 263-277 Ma and 241-249 Ma. However, more detail study is needed to confirm why the Permian to Triassic ages occur only in the middle part of the Jeungpyeong area.

Key words: Okcheon metamorphic belt, K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages, d_{002} values for carbonaceous material, cooling

서 언

옥천변성대는 제천-괴산-대전-전주를 잇는 지구조대로 선캄브리아권 경기육괴와 영남육괴 사이를 북동에서 남서방향으로 가로질러 발달하고 있다(Fig. 1). 옥천변성대에 대한 변성암석학적 연구는 1990년대 중반이후부터 활발히 진행되어 왔다(김현철 외, 1995; Oh *et al.*, 1995; 오창환 외, 1995, 1998, 1999; Min and Cho, 1998; Kim and Cho, 1999; 조문섭과 김현철, 2002; Kim *et al.*, 2002). 하지만, 변성 및 냉각시기 측정 등에 자료 부족, 일부 기존 연대 측정 자료의 부정확성 그리고 옥천변성대의 남서-북동방향으로 대규모로 저반상의 중생대 화강암체의 관입에 따른 열적 영향으로 인한 동위원소계의 교란에 의해 변성진화과정을 정확히 규명하지 못한 실정이다.

중부 옥천변성대에서 산출되는 변성이질 사질암에서는 백악기부터 석탄기(89-319 Ma)에 걸친 넓은 범위의

K-Ar 흑운모와 백운모 연대가 보고되고 있다(Kim, 1990; 조문섭 외, 1995). 석탄기의 흑운모 연대(Kim, 1990)는 일반적인 주라기 혹은 삼첩기말기의 연대와 비교할 때 과잉 아르곤(excess argon)의 영향을 지시한다고 해석되고 있으며(Chough *et al.*, 2000), 백악기부터 주라기까지의 연대는 옥천변성대 주변에 분포되는 중생대 화강암의 열변성작용에 의해 부분적으로 또는 완전히 K-Ar 동위원소계가 재평형된 연대로 인식되어 왔다(민경원 외, 1995; 조문섭 외, 1995). 하지만, 삼첩기말기 연대의 의미는 정확히 해석되고 있지 못하며 중생대 화강암의 열변성작용의 영향이 어느 정도였는지 불확실한 실정이다. 또한 지금까지 보고된 많은 옥천변성대의 Rb-Sr 과 K-Ar 연대는 주로 중부와 북서부지역에 편중되어 옥천변성대 전체에 대한 냉각발달사를 규명하는데 지역적 편중성을 가진다(Cliff *et al.*, 1985; Kim, 1990; 조문섭 외, 1995; 민경원 외, 1995). 그리고 지금까지 보고된 K-Ar 연대는 같은 시료에 대

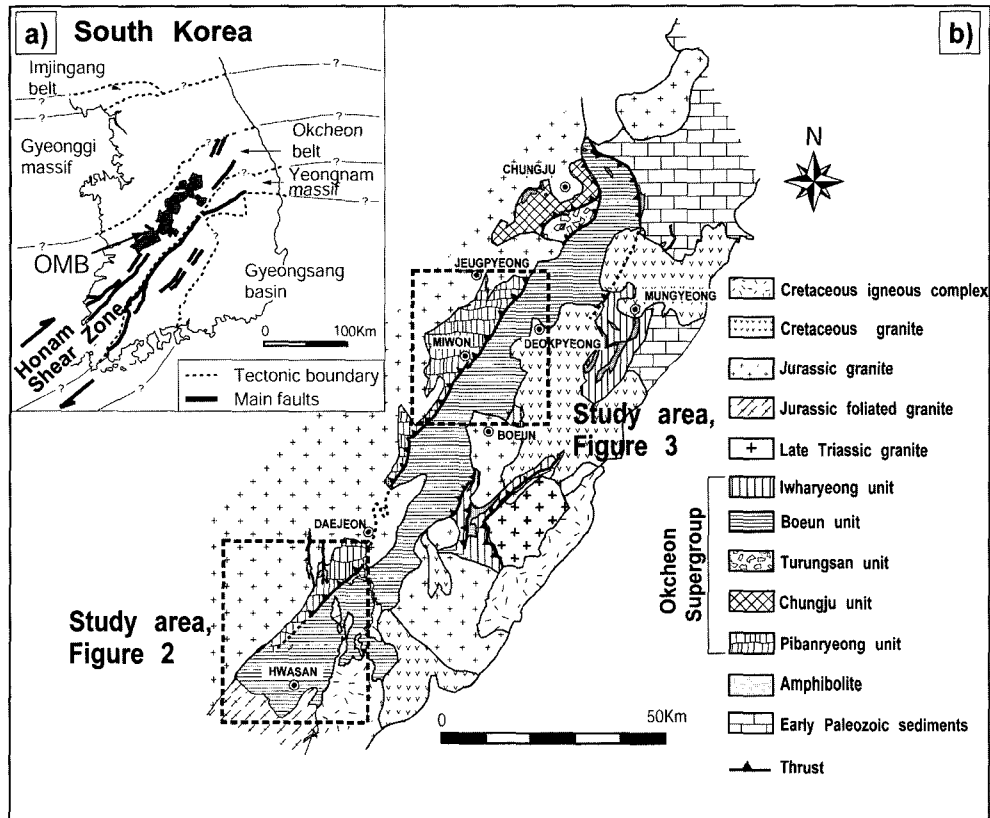


Fig. 1. (a) Simplified tectonic map of South Korea (adapted from Chough *et al.* (2000)). A series of large-scale dextral strike-slip fault movements defines the Honam shear zone. (b) Litho-tectonic map of the Okcheon metamorphic belt (OMB) adapted from Cluzel *et al.* (1990).

한 다른 연대측정 방법들을 이용한 연대적 신뢰성 검토가 수행되지 않았다. 이와 같이 신뢰도가 검증되지 않은 K-Ar 흑운모와 백운모 연대만으로는 옥천변성대의 변성진화과정 해석이 어렵다.

이번 연구에서는 옥천변성대 내의 흑운모와 백운모의 넓은 K-Ar 연대분포의 의미를 재검토하며 주변성시기 이후의 냉각 역사를 정확히 규명하기 위하여 옥천변성대 서남부 화산지역과 중부 미원-증평 변성퇴적암에 대해서 저변성지역부터 고변성지역에 걸쳐서 횡단선을 설정하여 체계적으로 암석을 채취하고 암석내의 흑운모와 백운모에 대한 K-Ar과 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 연대측정을 수행하였다. 또한, 변성암류에 광역적으로 관입한 주라기 화강암의 열적 영향을 정량적으로 추정하기 위하여 서남부 화산지역과 중부 미원-증평 지역의 보은과 피반령 지구조 단위(lithotectonic unit)에서 채취한 변성이질-사질암으로부터 X-ray 회절분석을 통한 탄질물의 흑연화도 d_{002} 값을 구하였으며 그 결과에 대하여 논의하였다.

일반지질

옥천변성대 서남부 화산지역과 중부 미원-증평 지역은 Cluzel *et al.*(1990)에 의해 제시된 남동부의 보은과 북서부의 피반령의 2개의 지구조 단위로 나누어진다 (Fig. 1). 두 지구조 단위는 주로 변성퇴적암인 이질암, 사질암, 규암과 석회암, 석회질 규산염암으로 구성된다. Cluzel *et al.*(1990)은 반지구대(half graben) 열개환경에서 남동부의 보은 단위는 천해성 환경에 속하며 북서쪽의 피반령 단위는 대륙사면을 거쳐 분지중심의 환경으로 추정하였다. 최근, 오창환 외(2002)는 서남부 화산지역 보은 단위와 피반령 단위 내에서 정밀 기재된 단면들에 대한 퇴적환경을 종합하면 대체적으로 남동부에서는 천해성 환경이 인지되나 북서쪽으로 갈수록 대륙사면을 거쳐 분지 중심의 환경으로 전이되는 경향을 보인다고 해석하였다. 이러한 퇴적상의 공간적 분포는 분지의 남동쪽보다 북서쪽의 침강이 우세하였던 것으로 해석될 수 있으며, 이는 곧 분지가 형성될

때 반지구대(half graben) 형태로 분지가 열개(rifting) 되었다는 Cluzel *et al.*(1990)의 주장과 잘 일치한다. 또한 이러한 개념을 근거해서 유인창 외(준비층)는 서남부 화산지역과 중부 미원-증평 지역의 두 지구조 단위에 분포하는 시료에 대해 체계적으로 전암분석을 실시하였으며 이들 두 단위의 퇴적상에 따라 전암성분의 경향이 뚜렷한 차이를 보여준다는 것을 확인하였다.

두 단위의 변성퇴적암류들의 충상광물들은 대체적으로 북동-남서방향의 주엽리면을 보이며, 남동부 보은 단위에서는 북서쪽으로는 경사가 우세한 반면 북서쪽 피반령 단위에서는 남동쪽으로는 경사가 우세하다. 두 지구조 단위의 경계는 충상단층(thrust)으로 알려져 있으나(Cluzel *et al.*, 1990) 아직까지 명확히 확인된 바는 없다. 그리고 경계의 주향은 옥천변성대 내 변성퇴적암류의 주향과 유사하다. 옥천변성대의 서남부 화산지역 주변부에는 북측과 서측에는 주라기 화강체들이 변성암류를 관입하거나 변성암류와 단층 접촉을 하고 있으며, 동부에는 백악기 화성복합체에 의해 덮여있으며 일부분은 관입되어 있다. 옥천변성대의 중부 미원-증평지역 주변부에는 북측과 남측에는 주라기 화강암체들이 변성암류를 관입하고 있으며, 남동측에는 백악기 화강암체가 관입하고 있다.

옥천변성대 서남부와 중부지역은 중압형의 광역변성작용을 받았으며 광역변성작용시 연구지역은 변성이질암의 광물조합을 바탕으로 남동부부터 북서방향으로 2개 혹은 3개의 분대로(서남부: 흑운모대, 석류석대와 십자석대; 중부: 흑운모대와 석류석대) 나누어진다(오창환 외, 1995, 1999). 대체적으로 흑운모대는 보은 단위, 그리고 십자석대는 피반령 단위에 속하며 석류석대는 보은과 피반령단위에 걸쳐서 나타난다. 광물군 및 광물의 재결정도의 변화에 의해 지시되는 광역적인 변성도는 보은 단위에서 피반령 단위로 즉, 남동에서 북서방향으로 갈수록 증가한다(오창환 외, 1995). 석류석대의 특징적인 광물조합은 석류석+흑운모+백운모±녹니석+사장석 및 흑운모+백운모±녹니석+사장석이며 흑운모대에서는 특징적인 광물조합은 흑운모+백운모±녹니석+사장석이며 드물게 좁은 지역에 걸쳐서 연장성을 가지고 흑운모+백운모+K-장석+사장석이 산출된다(Kim *et al.*, 2002). 석류석대에서 화산지역 보은 단위의 남부(흑운모대)에서는 변성이질-사질암류 내에 기질의 세립질의 흑운모 외에 야외에서 육안으로 식별이 가능한 흑운모 반상변정이 산출된다. 피반령 단위의 특징적인 광물조합은 석류석+흑운모+백운모±녹니석+사장석이며 좁은 지역에 걸쳐 십자석+석류석+흑운모+백운모±녹니석+사장석이 산출된다. 주라기 화강암 접촉

부의 변성암류에서 화강암의 접촉변성작용 영향으로 형성된 홍주석, 규선석, 근청석 등이 관찰된다(오창환 외, 1998; Kim and Cho, 1999). 연구지역들에서 중압형 광역변성작용에 의해 제시되는 변성 압력-온도조건은 4.2-9.4 kb, 490-630°C이며(김현철 외, 1995; 오창환 외, 1997, 1998, 1999; Kim and Cho, 1999) 저압변성작용에 의해 제시되는 변성 압력-온도조건은 2.1-5.0 kb, 540-698°C이다(오창환 외, 1997, 1998, 1999).

연대측정 및 탄질물 회절 분석방법

K-Ar과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 분석은 서남부 화산지역과 중부 미원-증평 지역의 보은 단위와 피반령 단위에서 채취한 52개 변성이질-사질암 시료와 두 연구지역 북부에 관입한 주라기 화강암 5개의 시료로부터 흑운모와 백운모를 분리하여 행해졌다(Fig. 2, 3).

K-Ar 분석을 위하여 백운모와 흑운모는 현미경 내에서 관찰되는 대상 암석표본 기질내의 광물의 결정크기 및 실체현미경상에서 대상광물의 크기 및 불순물정도에 따라 각각 2-8 μm , 61-74 μm 또는 104-147 μm 크기로 분리하였다. 분리된 시료들은 탈이온수 및 아세톤으로 5-7회 세척하였으며 비중액(STP), 수압에 의한 운모분리방법, 자력선별기 및 수작업 방법들을 이용하여 각 광물의 순도를 증가시켰다. 보은 단위 남부에서 산출되는 기질의 일반적인 세립질의 백운모(50 μm 이하)를 분리하기 위하여 중력침강법과 원심분리기를 사용하였다. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 분석을 위하여 일반적으로 기질내의 광물의 결정크기가 조립질인 암석을 선별하였으며 백운모와 흑운모는 250-840 μm 크기 내의 입자를 핀셋을 이용하여 분리하였으며 2차 증류수 및 아세톤으로 3-5회 세척한 후 수작업을 통하여 가장 순수한 광물을 분리하였다.

K-Ar과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대분석은 일본 오카야마 이과대학 부설 자연과학연구소에서 수행하였다. 또한, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정 시료에 대한 중성자 조사(irradiation)는 일본교토대학 5-MW 원자로를 이용하여 행해졌다. K-Ar 연대분석방법과 연대오차(2 σ)는 Nagao *et al.*(1984)와 Itaya *et al.*(1991), 그리고 단계적 가열법을 이용한 단결정 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대분석방법은 Hyodo *et al.*(1995, 1999)의 방식을 따랐다.

탄질물의 회절분석은 서남부 화산지역과 중부 미원-증평지역에서 채취한 81개 변성이질-사질암으로부터 분리한 탄질물 시료(Figs. 2, 3)에 대해 전북대학교 지구환경과학과의 X-선 회절분석기(MAC Science Co., Ltd. M03XHF)를 사용해 분석하였다. 분석시 Cu K α X-선을 가속전압 45 kV, 전류 30 mA로 발생시켰으며,

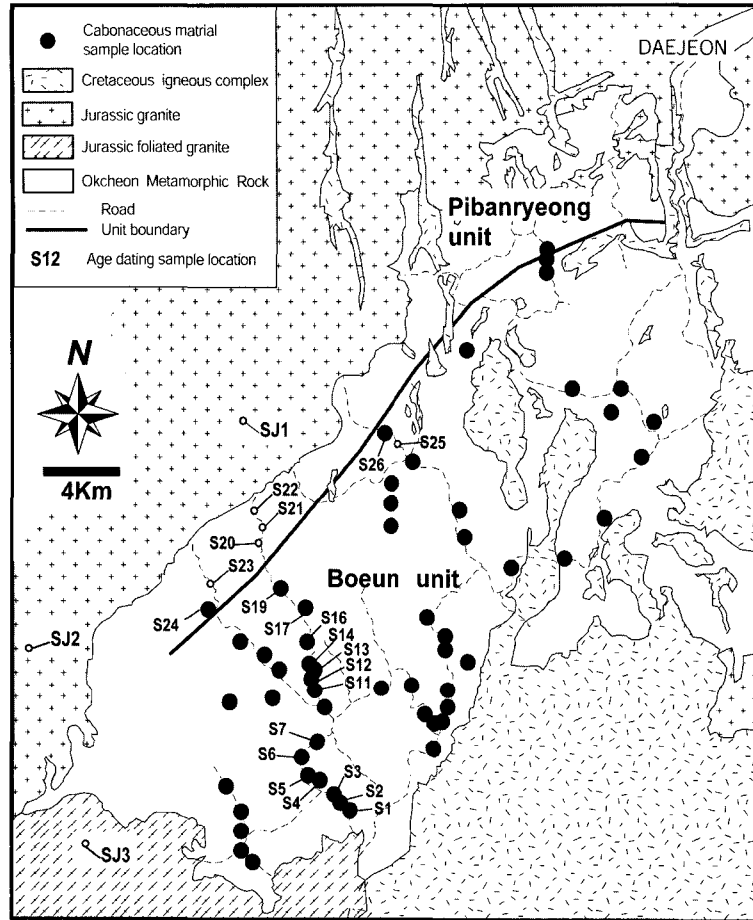


Fig. 2. Geological and litho-tectonic map of the southwestern part of the OMB, showing age dating and carbonaceous material sample localities. The Boeun unit in the southeast and the Pibanryeong unit in the northwest of the study area are interpreted as being a transitional domain between the outer shelf and deep basin, and a deeper part of the basin, respectively. SJ1, SJ2 and SJ3 are granite sample localities.

0.5° 2θ/min의 속도로 15°-35° 2θ 범위에서의 회절 피크로부터 d_{002} 값을 측정하였다. 일반적으로 변성이질-사질암의 탄질물은 변성온도가 증가하면서 탄질물의 결정구조 및 화학성분이 체계적으로 완전한 질서도를 갖춘 흑연(fully ordered graphite)으로 변하는 경향을 가지며, 특히, 반응속도가 온도에 강하게 의존한다는 것은 널리 알려져 있어 변성대의 저온부에서 고온부까지 온도구조선을 추정하는데 이용된다(Landis, 1971; Itaya, 1981; Nishimura *et al.*, 2000). 탄질물의 분리는 Itaya (1981)의 실험방식을 따랐으며 각각의 탄질물 시료에 대해 실리콘 스파이크를 이용하여 d_{002} 값을 보정하였다.

결과 및 해석

서남부 화산지역

서남부 화산지역 보은과 피반령의 2개의 지구조 단위에서 채취한 변성이질-사질암류로부터 26개의 흑운모와 백운모를 분리하여 측정된 K-Ar 연대는 보은 단위에서 178-180 Ma를 보여주는 2개의 백운모를 제외하면 149-164 Ma의 흑운모 연대와 156-164 Ma의 백운모 연대, 그리고 피반령 단위에서 157-164 Ma의 흑운모 연대와 157-168 Ma의 백운모 연대범위가 인지된다 (Table 1). 또한 12개의 흑운모와 백운모 단결정으로부터

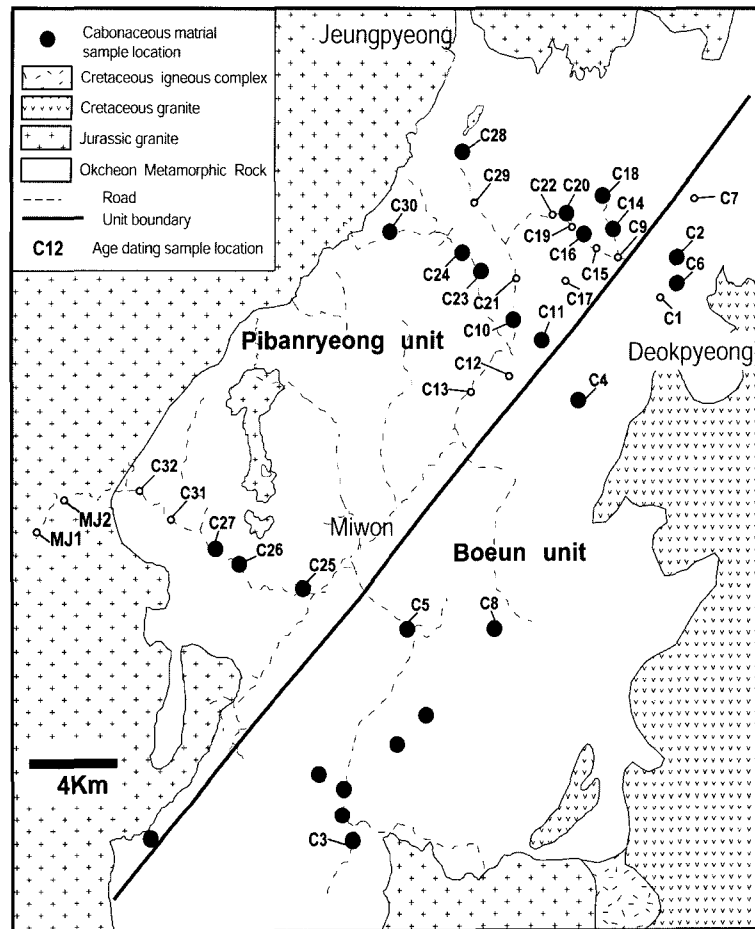


Fig. 3. Geological and litho-tectonic map of the central part of the OMB, showing age dating and carbonaceous material sample localities. Same abbreviations in Figure 2 are used. MJ1 and MJ2 are granite samples localities.

터 측정된 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 평형연대를 지시하며 보은 단위에서는 175 Ma를 보여주는 1개의 백운모를 제외 하면 154-164 Ma의 흑운모 연대와 161-166 Ma의 백운모 연대가, 피반령 단위에서는 159-161 Ma의 흑운모 연대와 158 Ma의 백운모 연대가 인지된다(Table 2, Fig. 4). 두 단위의 변성이질-사질암류에 대한 K-Ar과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 흑운모와 백운모 연대들은 쥐라기중기에 집중된다. 그리고 각 변성분대에서 동일 시료에 대한 K-Ar과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대들(S3, S20, S24)은 동일시기를 지시 함으로 연대측정의 신뢰도가 높다고 할 수 있다.

변성이질-사질암류에 대한 쥐라기 화강암체의 영향을 조사하기 위해 화산지역 육천변성대의 주변부에 산출되는 흑운모 화강암체와 백운모-흑운모 화강암체에서 K-Ar 백운모와 흑운모 연대들을 구하였다. 최근 이

승렬 외(2003)는 연구지역의 서남부 금산사의 전주전 단대 화강암류로부터 168-173 Ma(SHRIMP 저어콘)를, 그리고 최근 본 연구진 연구(Oh et al., 2003: in submission)는 금마 및 논산 화강암에서는 각각 167과 169 Ma(U-Pb 저어콘)를 얻었으며 이는 이 지역의 화강암의 관입정치시기가 167-173 Ma 정도임을 지시한다. 분 석된 백운모와 흑운모들의 K-Ar 연대는 모두 156 Ma 이며 화산지역의 변성이질-사질암류 내 백운모와 흑운모 연대와 유사하다(Table 1).

중부 미원-증평지역

미원-증평지역의 보은과 피반령의 2개의 지구조 단위에서 채취한 변성이질-사질암류로부터 33개의 흑운모와 백운모를 분리하여 측정된 K-Ar 연대는 서남부

Table 1. K-Ar age data of muscovite and biotite from metasediments and granites in the southwst of the Okcheon meta-morphic belt.

Lithotectonic unit	Sample no	Mineral	Fraction	Potassium (Wt.%)	Rad. ⁴⁰ Ar (10 ⁻⁸ ccSTP/g)	Age (Ma)	Non-Rad. ⁴⁰ Ar (%)
Boeun unit	S1	Biotite	61-74 μm	5.29 ± 0.11	3188 ± 32	148.9 ± 3.2	2.9
	S2	Biotite	61-74 μm	6.65 ± 0.13	4203 ± 39	155.8 ± 3.3	1.4
	S3	Muscovite	2-4 μm	5.87 ± 0.12	3714 ± 35	156.1 ± 3.2	3.3
	S3	Muscovite	4-8 μm	6.03 ± 0.12	3854 ± 40	157.5 ± 3.4	1.9
	S4	Biotite	61-74 μm	6.73 ± 0.14	4207 ± 41	150.9 ± 3.2	3.6
	S4	Muscovite	61-74 μm	5.60 ± 0.11	3725 ± 39	164.3 ± 3.5	3.6
	S5	Biotite	61-74 μm	6.54 ± 0.13	4124 ± 41	155.6 ± 3.3	0.9
	S5	Muscovite	2-4 μm	3.01 ± 0.06	1934 ± 21	158.4 ± 3.4	6.1
	S5	Muscovite	4-8 μm	4.14 ± 0.08	2606 ± 27	155.5 ± 3.2	3.4
	S6	Biotite	61-74 μm	7.22 ± 0.14	4550 ± 45	155.6 ± 3.3	1.8
	S6	Muscovite	61-74 μm	6.38 ± 0.13	4043 ± 48	156.3 ± 3.4	2.1
	S7	Muscovite	61-74 μm	6.41 ± 0.13	4108 ± 38	158.1 ± 3.4	2.0
	S14	Biotite	61-74 μm	7.16 ± 0.14	4724 ± 46	162.6 ± 3.5	0.9
	S14	Muscovite	61-74 μm	5.78 ± 0.12	3853 ± 38	164.2 ± 3.5	1.9
	S17	Muscovite	61-74 μm	8.29 ± 0.17	6075 ± 60	179.6 ± 3.8	1.3
	S19	Biotite	104-147 μm	6.54 ± 0.13	4370 ± 44	164.4 ± 3.5	1.3
	S19	Muscovite	104-147 μm	4.42 ± 0.09	3212 ± 32	178.0 ± 3.8	2.1
	Pibanryeong unit	S20	Muscovite	104-147 μm	6.82 ± 0.14	4656 ± 47	167.9 ± 3.6
S20		Biotite	104-147 μm	6.96 ± 0.14	4641 ± 32	164.1 ± 3.5	1.1
S21		Biotite	61-74 μm	7.31 ± 0.15	4852 ± 47	163.4 ± 3.5	0.6
S22		Biotite	61-74 μm	7.43 ± 0.15	4908 ± 48	162.7 ± 3.5	1.4
S23		Muscovite	61-74 μm	7.94 ± 0.16	5134 ± 52	159.4 ± 3.4	2.3
S24		Muscovite	104-147 μm	6.19 ± 0.12	4043 ± 41	156.7 ± 3.4	2.2
S25		Muscovite	61-74 μm	5.91 ± 0.12	3826 ± 37	159.7 ± 3.4	1.1
S26		Biotite	61-74 μm	5.35 ± 0.11	3402 ± 34	156.8 ± 3.4	3.1
S26		Muscovite	61-74 μm	5.97 ± 0.12	3852 ± 39	159.8 ± 3.4	3.5
Granite	SJ1	Biotite	104-147 μm	6.25 ± 0.13	3953 ± 39	155.9 ± 3.3	1.7
	SJ2	Biotite	104-147 μm	7.33 ± 0.15	4626 ± 45	155.7 ± 3.3	0.7
	SJ3	Muscovite	104-147 μm	8.43 ± 0.17	5396 ± 53	155.7 ± 3.4	0.8

화산지역과 비교할 때 다소 복잡한 연대분포를 보여준다(Table 3). 보은 단위에서 흑운모 연대는 105 Ma(백악기), 157-176 Ma(쥬라기), 234 Ma(삼첩기중기와 후기 경계부근)의 범위를 보여주며 백운모는 102 Ma와 170 Ma를 보여준다. 백악기의 흑운모와 백운모 연대(C1, C2)는 남동측 백악기 화강암체 주변부에 국한된다. 하지만 같은 지역에서 백악기 연대 이외에도 쥬라기 흑운모와 백운모 연대가 산출되는 것으로 보아(C4, C6), 이들 백악기 화강암체의 열적 영향이 부분적으로 강하지 않았던 것으로 추정된다. 피반령 단위에서 흑운모 연대는 각각 142-194 Ma(쥬라기), 216-224 Ma(삼첩기후기), 241-249 Ma(삼첩기초기)의 범위를 보여주며 백운모는 164-190 Ma(쥬라기), 263-277 Ma(페름기초기와 중

기 경계부근)의 범위를 보여준다(Table 2). 미원-증평의 서부지역은 대부분 쥬라기중기 연대를 보여주는데 비해 동부지역에서는 백악기에서 페름기까지의 연대를 보여주며 특히, 페름기에서 삼첩기에 걸친 오래된 연대는 동부지역 중앙부에 집중되어 나타난다.

⁴⁰Ar/³⁹Ar 흑운모와 백운모 단결정 연대들은 서부지역 피반령 단위에서 측정되었으며 159-169 Ma의 범위를 보여준다(Table 4, Fig. 5). ⁴⁰Ar/³⁹Ar 연대들 스펙트라의 배열이 평형으로 부분적인 열역사의 증거(아르곤 손실, Ar loss)를 보여주지 않는다. 이들 지역에서도 동일 시료에 대한 K-Ar과 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 연대들은 동일시기를 지지함으로 측정연대의 신뢰도를 확인할 수 있었다.

변성이질-사질암류에 대한 화강암의 영향을 조사하

Table 2. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analytical data of muscovite and biotite from metasediments in the southwst of the Okcheon meta-morphic belt.

T (°C)	^{39}Ar Frac*1	Non-Rad. ^{40}Ar (%)	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$	error (±)	$^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$	error (±)	Age (Ma)	error (±)
S3 biotite								
500	0.003	90.4	4.652	2.789	2.975	0.115	41.15	24.39
600	0.011	66.3	8.201	1.268	0.750	0.028	71.92	10.90
700	0.056	5.8	18.908	0.173	0.120	0.006	161.71	1.45
800	0.247	2.2	18.498	0.103	0.035	0.001	158.35	0.90
900	0.379	1.7	18.716	0.089	0.095	0.002	160.14	0.80
950	0.495	2.3	18.278	0.170	0.744	0.006	156.55	1.43
1000	0.639	1.3	18.743	0.087	0.294	0.002	160.36	0.78
1050	0.745	0.4	18.567	0.118	0.042	0.003	158.91	1.02
1100	0.875	3.5	18.114	0.134	0.081	0.002	155.20	1.14
1200	0.962	1.4	18.241	0.140	0.231	0.011	156.25	1.19
1500	1	5.4	18.268	0.214	0.410	0.016	156.46	1.78
							Intergrated age=157.2 ± 0.5	
S11 biotite								
500	0.003	100.7	-5.944	6.937	0.000	0.000	-53.98	63.95
600	0.014	41.2	21.322	0.926	0.619	0.016	181.35	7.50
700	0.089	19.1	19.846	0.138	0.000	0.000	169.36	1.17
800	0.363	11.9	18.250	0.104	0.029	0.001	156.32	0.91
900	0.581	0.0	18.915	0.062	0.005	0.001	161.77	0.60
950	0.801	0.6	18.877	0.071	0.037	0.001	161.45	0.67
1000	0.892	0.3	19.421	0.127	0.009	0.003	165.90	1.09
1050	0.958	0.0	19.282	0.103	0.162	0.003	164.77	0.90
1100	1	0.0	19.375	0.201	0.122	0.005	165.52	1.67
							Intergrated age=161.1 ± 0.5	
S11 muscovite								
500	0.000	39.0	514.770	3244.000	144.574	904.686	2287.21	8169.23
600	0.037	154.5	-4.497	9.399	4.334	0.665	-40.70	86.02
700	0.123	32.4	9.553	2.282	1.857	0.062	83.51	19.50
800	0.468	43.9	10.414	0.916	3.703	0.336	90.85	7.80
900	0.662	11.0	17.975	0.709	0.847	0.018	154.06	5.84
950	0.711	0.0	18.812	5.169	0.928	0.218	160.92	42.30
1000	0.806	0.0	18.601	0.892	0.400	0.025	159.15	7.69
1050	0.878	0.0	18.422	0.930	0.597	0.034	157.39	7.70
1200	1	1.2	19.401	0.968	0.354	0.015	165.74	7.91
							Intergrated age=149.3 ± 5.3	
S11 muscovite								
500	0.010	84.0	1.994	5.029	3.399	0.146	17.75	44.56
600	0.031	34.9	12.030	2.305	1.731	0.044	104.55	19.47
700	0.075	21.1	14.854	0.601	0.782	0.015	128.24	5.02
800	0.228	13.7	17.175	0.565	0.778	0.022	147.48	4.67
900	0.551	8.9	17.676	0.280	0.200	0.002	151.60	2.32
950	0.683	3.9	18.398	0.162	0.298	0.006	157.53	1.37
1000	0.775	0.0	19.194	0.211	0.411	0.010	164.04	1.75
1050	0.902	0.7	18.493	0.240	0.070	0.010	158.31	1.99
1100	1	1.0	19.661	0.245	0.124	0.006	167.86	2.02
							Intergrated age=152.1 ± 1.3	

Table 2. continued.

T (°C)	³⁹ Ar Frac*1	Non-Rad. ⁴⁰ Ar (%)	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar	error (±)	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K	error (±)	Age (Ma)	error (±)
S12 biotite								
600	0.020	0.0	33.193	0.897	0.306	0.393	244.95	6.34
700	0.102	0.0	23.609	0.460	0.187	0.063	177.57	3.45
800	0.278	0.0	23.585	0.257	0.105	0.028	177.41	2.11
850	0.579	7.3	21.297	0.259	0.022	0.024	160.94	2.09
900	0.827	5.1	21.757	0.899	0.100	0.020	164.94	6.56
950	0.898	4.8	22.482	1.036	0.428	0.075	168.16	7.82
1000	1	0.0	22.692	2.480	0.293	0.047	170.99	2.04
							Intergrated age=168.4±2.5	
S12 muscovite								
600	0.013	1.3	22.429	2.863	0.739	0.142	169.11	20.63
700	0.041	0.3	22.942	1.357	0.116	0.061	172.80	9.80
800	0.138	3.5	24.036	0.450	0.070	0.017	180.63	3.38
900	0.496	0.9	22.883	0.244	0.035	0.007	172.37	2.01
950	0.640	0.0	22.923	0.213	0.082	0.013	172.65	1.83
1000	0.796	1.9	23.008	0.292	0.000	0.000	173.27	2.32
1050	0.885	0.1	23.395	0.422	0.172	0.019	176.04	3.19
1100	1	1.4	23.825	0.384	0.185	0.018	179.12	2.94
							Intergrated age=174.4±1.8	
S13 biotite								
500	0.007	31.0	4.319	0.819	0.787	0.009	38.24	7.17
600	0.018	1.2	11.657	0.405	0.410	0.007	101.40	3.43
700	0.034	2.7	16.837	0.141	0.337	0.004	144.68	1.20
800	0.073	0.8	17.954	0.165	0.138	0.002	153.89	1.39
900	0.435	2.3	18.738	0.127	0.192	0.004	160.31	1.09
950	0.571	1.0	18.600	0.157	0.108	0.006	159.18	1.32
1000	0.660	1.7	18.541	0.116	0.114	0.001	158.70	1.00
1050	0.838	0.5	18.685	0.089	0.066	0.000	159.88	0.80
1100	1	0.4	18.845	0.087	0.108	0.001	161.19	0.78
							Intergrated age=158.1±0.6	
S13 muscovite								
500	0.006	21.0	72.562	10.893	4.722	0.720	554.56	71.68
600	0.086	0.0	21.635	0.280	0.740	0.026	183.88	2.29
700	0.289	0.0	20.049	0.247	0.212	0.011	171.02	2.04
800	0.465	0.6	19.782	0.257	0.154	0.013	168.40	2.13
900	0.604	0.0	19.601	0.177	0.239	0.028	167.36	1.48
950	0.807	0.0	19.871	0.195	0.088	0.018	169.57	1.62
1000	0.911	0.0	19.298	0.246	0.257	0.019	164.90	2.03
1100	1	0.0	19.582	0.299	0.508	0.026	167.21	2.46
							Intergrated age=170.6±1.2	

기 위해 미원지역 옥천변성대의 북부에 산출되는 2개의 화강암체에서 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 흑운모 연대들을 구하였다 (Fig. 5). 백운모와 흑운모들의 연대는 160-168 Ma이며 미원지역의 변성이질-사질암의 연대와 유사하다. 한편, 정창식 외(2003)은 이 지역의 화강암체에서 U-Pb 티타

나이트의 연대를 구하여 관입정치시기를 175 Ma로 해석하였다.

탄질물 연구결과 및 그 의미

서남부 화산지역과 중부 미원-증평지역의 보은 단위

Table 2. continued.

T (°C)	³⁹ Ar Frac* ¹	Non-Rad. ⁴⁰ Ar (%)	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar	error (±)	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K	error (±)	Age (Ma)	error (±)
S16 biotite								
500	0.005	98.8	0.870	1.474	2.924	0.153	7.76	13.13
600	0.017	90.8	2.212	1.342	1.112	0.208	19.69	11.88
700	0.068	22.3	18.937	0.288	0.221	0.032	161.94	2.38
800	0.222	21.0	17.502	0.326	0.103	0.003	150.17	2.70
900	0.377	6.2	18.299	0.182	0.000	0.000	156.72	1.53
950	0.617	1.4	19.476	0.095	0.052	0.002	166.35	0.84
1000	0.835	2.0	19.047	0.104	0.036	0.026	162.85	0.91
1050	0.963	3.5	18.434	0.142	0.045	0.002	157.83	1.20
1100	1	0.0	19.441	0.310	0.158	0.006	166.06	2.55
							Intergrated age=157.8±0.7	
S16 muscovite								
500	0.005	0.0	13.862	1.073	3.350	0.177	119.95	8.99
600	0.020	0.0	14.443	0.348	0.768	0.031	124.81	2.91
700	0.042	3.1	19.099	0.401	0.153	0.024	163.27	3.30
800	0.208	1.9	19.531	0.199	0.099	0.008	166.80	1.66
900	0.577	0.0	19.597	0.082	0.073	0.001	167.34	0.75
950	0.652	1.9	19.130	0.195	0.098	0.006	163.53	1.62
1000	0.757	0.0	19.539	0.091	0.173	0.007	166.86	0.81
1050	0.915	1.2	19.106	0.152	0.070	0.004	163.33	1.28
1100	1	0.0	20.619	0.127	0.112	0.005	175.65	1.08
							Intergrated age=166.1±0.6	
S20 muscovite								
500	0.01	48.1	14.428	1.191	1.326	0.046	124.69	9.95
600	0.037	18.2	16.786	0.238	0.609	0.017	144.26	1.98
700	0.149	3.2	18.783	0.258	0.154	0.004	160.68	2.14
800	0.341	1.3	19.773	0.354	0.091	0.003	168.77	2.90
900	0.603	1.4	18.738	0.158	0.048	0.002	160.31	1.33
950	0.834	4.2	18.304	0.188	0.089	0.002	156.76	1.57
1000	0.935	6.5	19.505	0.150	0.069	0.006	166.58	1.27
1050	0.974	11.2	17.708	0.221	0.314	0.015	151.87	1.84
1100	1	38.4	11.891	0.804	0.638	0.019	103.38	6.79
							Intergrated age=159.2±0.9	
S24 biotite								
500	0.006	107.4	-2.061	2.399	1.343	0.053	-18.53	21.68
600	0.014	52.1	7.797	0.888	1.406	0.034	68.44	7.65
700	0.096	10.0	17.482	0.150	0.067	0.003	150.01	1.27
800	0.512	2.5	18.331	0.183	0.063	0.001	156.98	1.54
900	0.750	1.2	18.541	0.148	0.032	0.001	158.70	1.26
950	0.842	3.2	18.913	0.103	0.062	0.002	161.75	0.90
1000	0.891	2.5	18.879	0.185	0.379	0.005	161.47	1.55
1050	0.924	0.0	19.081	0.138	0.378	0.008	163.12	1.17
1100	1	1.6	18.248	0.155	0.968	0.010	156.30	1.31
							Intergrated age=155.9±0.8	

Table 2. continued

T (°C)	³⁹ Ar Frac*1	Non-Rad. ⁴⁰ Ar (%)	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar	error (±)	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K	error (±)	Age (Ma)	error (±)
S24 muscovite								
500	0.009	0.0	13.216	0.831	0.000	0.000	114.53	6.98
600	0.038	14.4	5.974	3.790	0.000	0.000	52.68	32.93
700	0.132	0.0	17.840	1.579	0.000	0.000	152.95	12.98
800	0.755	0.3	18.585	0.252	0.020	0.001	159.06	1.87
850	0.816	0.0	15.080	3.128	0.000	0.000	130.12	26.04
900	0.825	0.0	17.455	0.516	0.000	0.000	149.78	4.26
950	0.848	0.0	3.499	4.403	0.000	0.000	31.04	38.73
1000	1	2.9	14.124	2.824	0.183	0.025	122.14	23.61
							Intergrated age=144.7 ± 5.0	

⁴⁰Ar*=radiogenic ⁴⁰Ar; *1=Normalized ³⁹Ar cumulate.

및 피반령 단위에서 분리된 탄질물의 d_{002} 값은 모두 각섬암상의 범위를 지시하는 3.353-3.359 Å의 매우 좁은 범위에 집중된다(Fig. 6). 두 지역의 변성광물군을 살펴볼 때 두 지역이 중압형의 광역변성작용을 받아 변성도가 보은 단위에서 피반령 단위로, 즉 북서방향으로 갈수록 녹색편암상(흑운모대)에서 각섬암상(석류석대, 십자석대)으로 증가한다는 기존의 연구 결과와 일치하지 않는다.

일본의 산바가와대(Sanbagwa belt)에서는 저변성대에서 고변성대로 변성도가 증가하면서 탄질물의 d_{002} 값은 3.853-3.403 Å(녹니석대), 3.403-3.357 Å(석류석대) 그리고 3.357-3.356 Å(흑운모대)로 감소하는 경향을 보여 주며(Fig. 7 in Nishimura *et al.*, 2000), 3.357-3.356 Å의 탄질물의 d_{002} 값을 나타내는 산바가와대 고변성지역 암석에서 추정된 변성온도는 약 550°C 정도이다(Itaya, 1981). 뉴질랜드의 와카티푸대(Wakatipu belt)에서도 저변성대(녹색편암상)에서 고변성대(각섬암상)로 갈수록 탄질물의 d_{002} 값이 3.413-3.383에서 3.360 이하 값으로 감소한다(Fig. 7 in Nishimura *et al.*, 2000). 또한 이들 지역에서는 저변성지역에서 고변성지역쪽으로 변성도를 지시하는 재결정도 증가, 탄질물의 d_{002} 값의 감소와 함께 펜자이트의 K-Ar 연대가 점진적으로 감소한다.

변성광물군으로 볼 때 녹색편암상의 변성작용을 받은 화산지역의 보은 단위 남부에서도 녹색편암상을 지시하는 탄질물의 d_{002} 값이 아닌 각섬암상 이상의 고온을 지시하는 탄질물의 d_{002} 값이 나타나며 이들 지역에서 흑운모와 백운모 K-Ar과 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 연대가 쥬라기중기에 집중된다. 이는 첫 번째 변성작용이 녹색편암상 지역에 녹색편암상의 광물군을 형성시켰고 두 번째 변성작용은 새로운 광물군을 형성시킬 만큼 충분히 강하

지 않았지만 탄질물의 흑연화도 정도를 변화시킬 정도의 변성작용임을 지시한다.

서남부 및 중부지역에 대한 쥬라기 화강암체 관입체의 광역적인 열적 영향 유추

옥천변성대 주변에는 중생대 화강암체가 널리 분포하고 있으며 마치 옥천변성대는 중생대 화강암류 내의 섬 같은 모습을 보여주고 있다. 따라서 이들 중생대 화강암류에 관입에 의한 광범위한 지열상승과 이에 따른 광역적 열적 영향이 예상된다. 최근 보고된 대부분의 옥천변성대 주변의 중생대 화강암체의 U-Pb 연대들은 삼첩기후기부터 쥬라기중기까지의 연대범위를 보여준다(Cho *et al.*, 2001; Ree *et al.*, 2001; 이승렬 외, 2003; 정창식 외, 2003). 하지만, 삼첩기후기의 관입연대(Cho *et al.*, 2001; Ree *et al.*, 2001)는 옥천변성대 중남부의 백록 화강섬록암 및 청산 화강암체들에 국한되고, 이들 암체는 옥천변성대 내의 주변암체와 층상 단층으로 분리 되어 있으며 직접적인 접촉변성작용을 지시하지 않고 있다. 이에 반해, 미원-증평지역의 보은 화강암 및 청주 화강암, 서남부 화산 지역의 대전 화강암 및 논산 화강암에 대한 저어콘과 티타나이트 U-Pb 연대들은 쥬라기중기(166-178 Ma)에 집중되며(Cho *et al.*, 2001; Ree *et al.*, 2001; 이승렬 외, 2003; 정창식 외, 2003; Oh *et al.*, 2003; in submission), 이는 옥천변성대를 관입한 중생대 화강암은 주로 쥬라기중기 화강암이며, 이는 삼첩기후기보다 쥬라기중기동안 옥천변성대 전체지역에 걸쳐 광범위한 지열상승과 주변암체들의 광역적인 열변성작용을 일으켰을 가능성이 높음을 지시한다.

쥬라기 화강암인 논산, 대전, 청주, 보은, 옥천 및 충주 화강암의 접경부 1-2 km 내에서 저압형의 열변성작

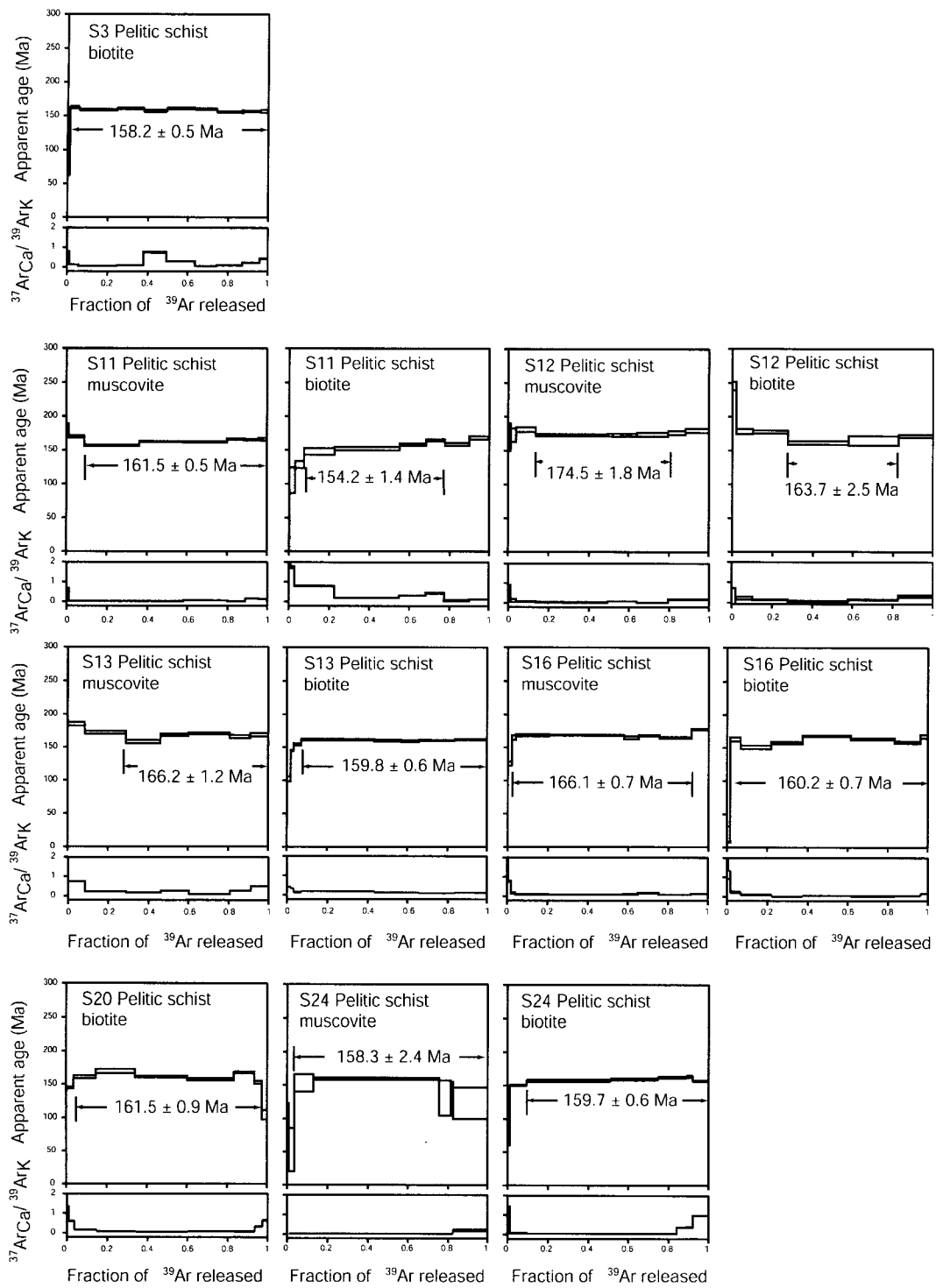


Fig. 4. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra and Ca/K ratios of single biotite and muscovite grains from pelitic and psammitic rocks in the southwest OMB.

Table 3. K-Ar age data from metasediments in the study area of the central Okcheon metamorphic belt.

Lithotectonic unit	Sample no	Mineral	Fraction	Potassium (Wt.%)	Rad. ⁴⁰ Ar (10 ⁻⁸ cc STP/g)	Age (Ma)	Non Rad. ⁴⁰ Ar (%)
Boeun unit	C1	Biotite	61-74 μm	6.764 ± 0.135	2843 ± 28	105.2 ± 2.3	1.1
	C2	Muscovite	61-74 μm	5.420 ± 0.108	2225 ± 22	102.8 ± 2.2	1.8
	C3	Biotite	61-74 μm	6.802 ± 0.136	4526 ± 45	163.8 ± 3.5	1.5
	C4	Biotite	61-74 μm	6.970 ± 0.139	4516 ± 45	159.7 ± 3.4	1.4
	C5	Biotite	61-74 μm	5.251 ± 0.105	3345 ± 33	157.1 ± 3.4	2.5
	C6	Muscovite	61-74 μm	4.585 ± 0.092	3175 ± 32	170.2 ± 3.6	1.8
	C7	Biotite	61-74 μm	6.996 ± 0.139	4965 ± 50	175.9 ± 3.7	2.5
	C8	Biotite	61-74 μm	7.055 ± 0.141	6843 ± 67	234.1 ± 4.9	1.2
Pibanryeong unit	C9	Biotite	61-74 μm	5.643 ± 0.113	5221 ± 52	224.0 ± 4.7	1.6
	C10	Biotite	61-74 μm	6.033 ± 0.121	4802 ± 48	194.3 ± 4.1	1.5
	C11	Biotite	61-74 μm	7.058 ± 0.141	5475 ± 54	189.6 ± 4.0	1.2
	C11	Muscovite	61-74 μm	4.688 ± 0.094	3644 ± 36	189.9 ± 4.0	1.5
	C12	Biotite	61-74 μm	6.812 ± 0.136	6882 ± 68	243.2 ± 5.1	1.2
	C12	Muscovite	61-74 μm	4.385 ± 0.088	5087 ± 50	276.6 ± 5.7	1.4
	C13	Biotite	61-74 μm	6.788 ± 0.136	7018 ± 70	248.5 ± 5.2	1.0
	C13	Muscovite	61-74 μm	6.201 ± 0.139	6905 ± 54	267.8 ± 4.0	1.3
	C14	Biotite	61-74 μm	6.036 ± 0.121	5381 ± 54	216.3 ± 4.6	1.8
	C15	Biotite	61-74 μm	5.503 ± 0.110	5538 ± 55	242.3 ± 5.1	1.3
	C15	Muscovite	61-74 μm	4.369 ± 0.087	4790 ± 47	262.5 ± 5.5	1.1
	C16	Biotite	61-74 μm	7.044 ± 0.141	7060 ± 69	241.4 ± 5.0	0.8
	C16	Muscovite	61-74 μm	6.014 ± 0.132	6843 ± 50	273.5 ± 4.6	1.2
	C17	Biotite	61-74 μm	6.698 ± 0.134	6165 ± 61	222.9 ± 4.7	1.1
	C18	Muscovite	61-74 μm	6.288 ± 0.137	7072 ± 60	270.4 ± 4.7	1.5
	C19	Biotite	61-74 μm	6.832 ± 0.137	6189 ± 61	219.5 ± 4.6	1.5
	C20	Biotite	61-74 μm	7.047 ± 0.141	6530 ± 65	224.3 ± 4.7	1.2
	C21	Biotite	61-74 μm	5.356 ± 0.107	4862 ± 48	220.0 ± 4.6	1.3
	C22	Biotite	61-74 μm	5.790 ± 0.116	5292 ± 52	221.4 ± 4.6	0.9
	C23	Biotite	61-74 μm	6.204 ± 0.124	4775 ± 47	188.2 ± 4.0	2.4
	C24	Biotite	61-74 μm	6.810 ± 0.140	4358 ± 43	157.9 ± 3.4	1.8
	C25	Muscovite	61-74 μm	5.640 ± 0.110	3768 ± 38	164.3 ± 3.5	2.1
C26	Biotite	61-74 μm	4.823 ± 0.096	3265 ± 32	166.6 ± 3.6	1.5	
C27	Biotite	61-74 μm	6.326 ± 0.127	4155 ± 43	161.8 ± 3.5	2.9	
C28	Biotite	61-74 μm	7.488 ± 0.150	5723 ± 57	186.9 ± 4.0	1.4	
C29	Biotite	61-74 μm	7.450 ± 0.149	5054 ± 50	166.9 ± 3.6	0.9	
C30	Biotite	61-74 μm	7.000 ± 0.140	4020 ± 39	142.3 ± 3.1	0.7	

용을 지시하는 홍주석과 규선석을 포함하는 광물군이 나타나며(오창환 외, 1997, 1998, 1999; Min and Cho, 1998) 이들 저압변성작용에 의해 제시되는 변성 압력-온도조건은 2.1-5.0 kb, 540-698°C이다(오창환 외, 1997, 1998, 1999). 오창환 외(1997)의 연구에 따르면 화강암 마그마 관입 후 0.5 m.y. 이내에 쥬라기 화강암인 보은 화강암 주변부 1 km 이내에는 600°C 이상의 열변성작용이 4 km 이내에는 480°C 이상의 열변성작용이 일어났다. 그리고 보은 화강암보다 규모가 크거나 열 공급

기간이 길어지면 480°C 이상의 열변성작용을 일으킬 수 있는 영역이 넓어질 것이다. 게다가 쥬라기 화강암이 옥천변성대 주변에 큰 저반으로 나타나며 일부는 옥천변성대 내에도 분포하는 것으로 보아 옥천변성대 지하에 화강암의 저반이 존재할 가능성이 높다. 이에 따라 480°C 이상의 열변성작용이 옥천변성대에 광역적으로 일어났을 것으로 생각된다. 이는 옥천변성대의 흑운모와 백운모의 K-Ar과 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 연대 대부분이 쥬라기 화강암의 관입정지시기 이후이며 쥬라기 화강암체

Table 4. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analytical data of muscovite and biotite from metasediments in the central of the Okcheon metamorphic belt.

T (°C)	^{39}Ar Frac*1	Non-Rad. ^{40}Ar (%)	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$	error (±)	$^{37}\text{Ar}_{\text{Cd}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$	error (±)	Age (Ma)	error (±)
C32 biotite (pelitic schist)								
500	0.001	113.7	-21.707	7.314	69.088	8.358	-207.28	74.01
600	0.011	11.2	20.419	2.212	10.032	1.549	175.39	18.12
700	0.083	9.1	19.160	0.426	1.764	0.215	165.06	3.55
800	0.530	3.4	19.150	0.204	0.667	0.084	164.97	1.77
900	0.688	6.7	19.068	0.358	0.986	0.099	164.21	3.01
950	0.750	3.8	19.076	0.284	3.051	0.157	164.36	2.41
1000	0.836	2.2	19.034	0.271	1.674	0.090	164.02	2.30
1150	0.909	2.9	18.822	0.294	2.766	0.132	162.27	2.49
1200	0.952	2.9	19.323	0.303	3.837	0.409	166.40	2.56
1430	1	3.3	20.523	0.517	3.052	0.176	176.24	4.27
								Intergrated age=163.6±1.4
C31 muscovite (pelitic schist)								
500	0.015	0.0	5.782	2.675	5.673	1.035	51.42	23.46
600	0.060	0.0	13.565	0.550	4.124	0.987	118.40	4.66
700	0.232	7.6	18.633	0.347	0.917	0.263	161.74	2.82
800	0.568	7.4	18.721	0.441	0.661	0.132	162.50	3.71
900	0.619	1.1	18.584	0.509	1.042	0.298	161.32	4.26
1000	0.824	1.0	18.987	0.176	0.679	0.065	163.63	1.56
1100	0.912	0.8	18.287	0.647	0.293	0.014	157.86	5.38
1311	1	1.7	18.968	0.241	0.286	0.016	163.48	2.06
								Intergrated age=160.6±2.4
C27 muscovite (pelitic schist)								
500	0.009	0.0	0.000	15.155	17.850	21.264	0.00	135.39
600	0.026	149.5	-1.589	5.094	14.367	4.342	-14.25	45.87
700	0.071	12.3	13.633	1.789	7.910	1.292	117.26	14.99
800	0.112	14.2	15.081	1.952	5.061	0.747	129.94	16.24
900	0.185	3.6	21.543	1.541	0.190	0.227	182.87	12.49
950	0.328	3.8	18.496	0.673	0.619	0.082	158.11	5.59
1000	0.520	4.3	18.459	0.519	0.425	0.086	157.81	4.36
1050	0.624	0.0	18.989	0.980	0.430	0.125	162.29	8.03
1100	0.718	2.0	18.874	1.046	0.217	0.123	161.20	8.60
1150	0.829	2.5	19.466	0.894	0.144	0.133	166.03	7.35
1300	1	1.2	19.229	0.594	0.392	0.114	164.10	4.95
								Intergrated age=155.9±1.6

의 흑운모와 백운모의 K-Ar과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대가 유사한 사실과 잘 부합된다. 하지만 피반령 단위는 많은 변성 암석학연구(김현철 외, 1995; Oh *et al.*, 1995; 오창환 외, 1995, 1998, 1999; Min and Cho, 1998; Kim and Cho, 1999; 조문섭과 김현철, 2002) 에서 보고되었듯이 이미 전 지역이 500°C 이상의 광역변성작용을 경험하였기 때문에 화강암 접촉부 근방 1-2 km를 제외하고는 열변성작용시 새로운 광물군을 형성시키지 못하였다. 또한 본 연구에서 쥬라기 화강암으로부터 구

한 흑운모와 백운모의 K-Ar과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대가 유사하고 이들 연대가 저어콘 및 티타나이트 U-Pb 연대와 큰 차이를 보여주지 않는 것은 쥬라기 화강암이 빠르게 냉각되었음을 지시한다. 이는 쥬라기 화강암에서 2 km 이상 멀리 떨어진 지역에서 열변성작용으로 인한 변성 광물군을 재형성할 시간이 충분하지 못했음을 지시한다. 하지만 모든 지역의 탄질물이 각섬암상 이상으로 변성받은 사실은 쥬라기 화강암의 광역적인 열적작용이 중압형의 광역변성시 형성된 탄질물의 흑연화도를

Table 4. continued

T (°C)	³⁹ Ar Frac*1	Non-Rad. ⁴⁰ Ar (%)	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar	error (±)	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K	error (±)	Age (Ma)	error (±)
C26 biotite (pelitic schist)								
500	0.006	0.0	0.000	30.745	68.687	66.589	0.00	274.68
600	0.016	218.4	-5.623	5.310	18.387	9.441	-50.94	48.80
700	0.045	43.9	7.181	1.975	5.152	1.113	63.04	17.04
800	0.098	15.8	16.826	1.808	5.861	0.812	144.39	14.94
900	0.545	3.5	18.878	0.533	1.041	0.368	159.52	4.48
1000	0.657	6.2	18.046	0.995	2.209	0.124	154.42	8.21
1050	0.706	4.1	20.264	2.173	1.791	0.226	172.52	17.68
1100	0.790	1.9	18.907	1.179	1.611	0.225	161.47	9.68
1150	0.904	0.9	19.522	0.927	1.183	0.240	166.49	7.62
1200	0.966	0.9	19.701	1.679	1.733	0.333	167.95	13.71
1300	1	0.4	19.070	2.938	1.162	0.294	162.80	24.00
							Intergrated age=149.8±2.4	
C26 muscovite (pelitic schist)								
500	0.002	13.0	29.950	24.444	164.890	24.235	249.50	190.18
600	0.008	23.7	9.863	5.619	4.432	2.449	86.03	47.87
700	0.026	7.4	12.652	1.975	7.098	0.732	109.64	16.62
800	0.065	15.7	14.930	0.975	2.379	0.299	128.68	8.15
850	0.112	5.9	18.662	0.264	0.847	0.273	159.46	2.37
900	0.226	2.4	18.034	0.373	0.999	0.073	154.32	3.20
970	0.359	2.5	19.528	0.242	1.893	0.106	166.53	2.22
1020	0.497	2.6	19.873	0.326	1.251	0.113	169.34	2.85
1100	0.705	1.3	20.035	0.159	0.588	0.031	170.24	1.67
1150	0.835	1.5	20.129	0.168	0.339	0.120	171.43	1.71
1200	0.947	1.8	19.739	0.144	0.443	0.114	168.25	1.56
1300	1	2.0	19.544	0.284	1.348	0.155	166.67	2.53
							Intergrated age=165.0±1.4	
C25 biotite (pelitic schist)								
500	0.013	21.1	22.699	8.838	3.723	1.053	179.83	66.65
600	0.058	10.3	17.697	1.211	2.112	0.238	141.72	9.35
700	0.177	4.5	20.671	0.201	1.616	0.175	164.47	1.67
800	0.360	4.7	20.754	0.127	0.705	0.121	165.11	1.09
850	0.517	5.6	20.561	0.138	0.721	0.122	164.05	1.17
900	0.689	1.1	20.978	0.183	0.435	0.118	167.25	1.53
950	0.785	0.9	19.856	0.139	0.946	0.205	158.47	1.20
1000	0.863	3.4	19.030	0.155	1.340	0.244	151.92	1.66
1200	0.973	3.3	19.553	0.121	3.241	0.725	156.07	1.07
1300	1	1.4	19.270	0.369	3.859	1.231	153.79	2.96
							Intergrated age=157.8±0.7	

변화시키기에는 충분히 길었을 가능성을 제시한다.

증평지역 중앙부의 트라이아스기-페름기 K-Ar 연대의 의미

증평지역에서 쥐라기 연대를 제외한 삼첩기부터 페름기까지 연대범위는 보은 단위 북부와 괴반령 단위

남부 즉 증평지역의 육천변성대 중앙부에 나타난다. 이들 지역에서 K-Ar과 병행한 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 연대측정을 수행하지 못하였다. 이러한 이유는 거의 대부분의 흑운모와 백운모시료가 세립질로 단계적 가열방법의 단결정 분석에서 입자크기의 제약을 받기 때문이다. 하지만 일부 시료에 대해서는 현재 단결정의 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 연대측정

Table 4. continued

T (°C)	³⁹ Ar Frac*1	Non-Rad. ⁴⁰ Ar (%)	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar	error (±)	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K	error (±)	Age (Ma)	error (±)
C25 muscovite (pelitic schist)								
500	0.007	40.6	16.388	2.800	0.000	0.000	131.03	27.59
600	0.033	12.8	20.772	1.251	2.924	0.792	165.72	8.73
700	0.081	8.2	21.070	0.729	0.653	0.157	169.26	5.3
800	0.232	5.7	19.613	0.984	1.065	0.113	157.63	6.87
900	0.466	4.8	20.065	0.673	0.657	0.182	161.24	4.92
950	0.781	4.6	19.982	0.510	0.275	0.091	160.58	3.79
1000	0.898	4.2	19.873	0.482	0.400	0.128	159.71	3.59
1200	0.944	3.9	18.673	0.827	0.692	0.328	150.13	6.03
1300	1	4.1	19.502	0.121	0.573	0.107	156.75	6.34
							Intergrated age=159.8±1.6	
MJ1 biotite (granite)								
500	0.005	83.0	18.677	5.594	2.153	4.278	161.08	46.16
600	0.034	13.7	15.714	0.789	2.210	0.520	136.46	6.62
700	0.123	0.2	18.674	0.290	1.043	0.123	161.05	2.45
800	0.244	1.3	18.524	0.339	1.200	0.211	159.81	2.85
900	0.450	0.9	18.891	0.180	0.416	0.087	162.84	1.59
1000	0.693	1.1	18.492	0.302	0.901	0.116	159.55	2.56
1050	0.755	4.9	17.703	0.377	1.309	0.256	153.02	3.17
1100	0.826	2.6	18.696	0.395	1.499	0.156	161.23	3.31
1150	0.881	3.6	17.852	0.553	1.936	0.212	154.26	4.61
1200	0.933	2.8	18.194	0.575	1.427	0.208	157.09	4.78
1250	0.955	7.2	16.687	0.915	1.391	0.674	144.58	7.64
1335	1	5.1	16.761	0.926	1.656	0.245	145.20	7.72
							Intergrated age=158.36±1.4	
MJ1 biotite (granite)								
500	0.004	66.4	15.055	1.339	0.000	0.000	130.95	11.24
600	0.040	8.1	18.797	0.408	0.000	0.000	162.06	3.41
700	0.104	1.6	19.318	0.350	0.000	0.000	166.35	2.94
800	0.201	0.9	19.165	0.245	0.876	0.044	165.10	2.10
900	0.306	2.5	19.406	0.258	0.568	0.256	167.08	2.20
950	0.480	0.4	19.443	0.218	0.475	0.033	167.39	1.88
1000	0.639	1.0	19.112	0.287	0.218	0.043	164.66	2.43
1050	0.774	0.5	18.603	0.163	0.283	0.244	160.47	1.46
1100	0.863	1.6	18.668	0.171	3.289	0.211	161.00	1.52
1150	0.905	1.1	19.993	0.444	3.128	0.255	171.90	3.69
1200	0.932	2.2	17.388	0.652	2.881	0.207	150.41	5.44
1423	1	1.5	20.577	0.531	1.276	0.063	176.68	4.38
							Intergrated age=165.2±1.3	

을 준비중에 있다. 그리고 조문섭 외(1995)의 연구에서와 마찬가지로 Kim(1990)이 보고한 286 Ma와 319 Ma의 흑운모 연대는 이번 연구에서 얻을 수 없었다. 이 지역에서 조문섭 외(1995)는 93330-1-2, 93924-4-2, 93924-8 시료로부터 쥐라기초기에서 삼첩기말기(174-213 Ma)에 해당하는 흑운모 연대를 얻었다. 하지만

93924-8 시료로부터 얻은 174 Ma와 93924-4-2 시료로부터 얻은 196 Ma는 각각 흑운모 내의 1.65와 3.66 wt (%)의 낮은 K 함량으로 미루어 보아 연대측정결과의 신뢰도가 떨어진다. 동일 지역에 대해 본 연구에서 연대측정이 수행된 흑운모의 K 함량(5.64-7.05)을 고려하면 본 연구에서 얻어진 삼첩기(216-242 Ma)의 흑운모

Table 4. continued

T (°C)	³⁹ Ar Frac* ¹	Non-Rad. ⁴⁰ Ar (%)	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar	error (±)	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K	error (±)	Age (Ma)	error (±)
MJ2 biotite (granite)								
500	0.001	93.8	5.118	4.551	26.293	8.091	45.59	40.03
600	0.027	9.3	19.835	0.629	0.321	1.009	170.60	5.19
700	0.111	3.1	19.371	0.513	0.428	0.047	166.79	4.26
800	0.274	1.2	19.673	0.350	0.290	0.028	169.27	2.94
900	0.453	0.8	19.688	0.177	0.743	0.041	169.39	1.57
950	0.600	1.2	19.366	0.413	0.404	0.025	166.75	3.45
1000	0.719	0.6	19.756	0.455	0.514	0.040	169.95	3.78
1050	0.839	1.1	19.261	0.238	0.841	0.126	165.89	2.04
1100	0.898	3.7	19.510	0.275	1.083	0.086	167.94	2.34
1150	0.945	0.0	19.383	0.278	1.546	0.100	166.89	2.36
1200	0.966	0.0	19.347	0.423	2.619	0.158	166.60	3.53
1301	1	0.0	18.305	0.651	1.089	0.186	158.00	5.41
							Intergrated age=167.7±1.5	
MJ2 biotite (granite)								
500	0.001	121.8	-0.380	14.184	22.518	7.649	-390.27	158.87
600	0.017	10.5	19.393	0.437	0.707	0.202	158.73	3.65
700	0.097	4.2	19.597	0.299	0.778	0.093	168.65	2.52
800	0.130	0.0	18.972	0.350	1.569	0.121	163.51	2.94
900	0.180	0.1	19.011	0.445	0.826	0.064	163.83	3.71
950	0.245	0.0	19.184	0.398	0.294	0.084	165.25	3.33
1000	0.311	0.0	20.402	0.312	0.692	0.255	175.25	2.63
1050	0.403	2.0	19.594	0.237	0.149	0.037	168.63	2.03
1100	0.548	0.6	19.515	0.226	0.447	0.022	167.97	1.92
1150	0.732	1.4	19.217	0.143	0.411	0.018	165.53	1.31
1200	0.805	0.0	19.810	0.256	0.853	0.084	170.40	2.18
1353	1	1.4	18.864	0.140	1.570	0.040	162.62	1.29
							Intergrated ag =166.3±1.2	

연대가 정확하다고 판단된다. 한편, 백운모와 흑운모의 연대가 함께 분석된 이 지역의 5개 시료는 동일 시료에서 241-249 Ma(흑운모)와 263-277 Ma(백운모)의 범위를 보여준다. 최근 Cheong *et al.*(2003)과 Kim *et al.*(2001)이 이들 지역 일대에서 폐쇄온도가 백운모의 K-Ar 보다 높은 Pb-Pb 전암과 CHIME 우라니나이트, 그리고 석류석 U-Pb 연대측정법을 이용하여 옥천변성대의 주변성시기가 281-300 Ma임을 밝혔다. 따라서 각 연대측정방법의 폐쇄온도를 고려할 때 페름기의 K-Ar 백운모 연대와 삼첩기초기의 K-Ar 흑운모 연대는 주변성시기의 냉각연대로 추정된다. 하지만, 옥천변성대에서 일반적으로 보고되고 있는 쥐라기-삼첩기후기의 연대보다 늙은 연대가 이들 지역에서만 얻어지는가는 앞으로 많은 연대측정과 구조연구에 의해 해결해야 할 문제이다.

토 의

현재까지 옥천변성대의 변성사를 논의하는데 있어 시기적으로 논란을 가져오지만 적어도 두 번의 광역적인 변성작용을 경험한 것으로 보고 되고 있다(오창환 외, 1998, 1999, 2002; Min and Cho, 1998; Kim and Cho, 1999; 조문섭과 김현철, 2002; Cheong *et al.*, 2003). 최근 옥천변성대 중부지역에서 Cheong *et al.*(2003)는 흑색점판암 시료들로부터 Pb-Pb 전암과 CHIME 우라니나이트(uraninite) 연대측정법을 이용하여 281-291 Ma를 구하였고, 또한, Kim *et al.*(2001)은 석류석-각섬석 편암으로부터 단계적 용해법을 사용한 석류석 U-Pb 연대측정법에서 281-300 Ma을 구하였다. 조문섭과 김현철(2002)는 이들 연대를 근거로 옥천분지(옥천변성대)가 어떤 힘에 의해 닫히게 되었는지 밝

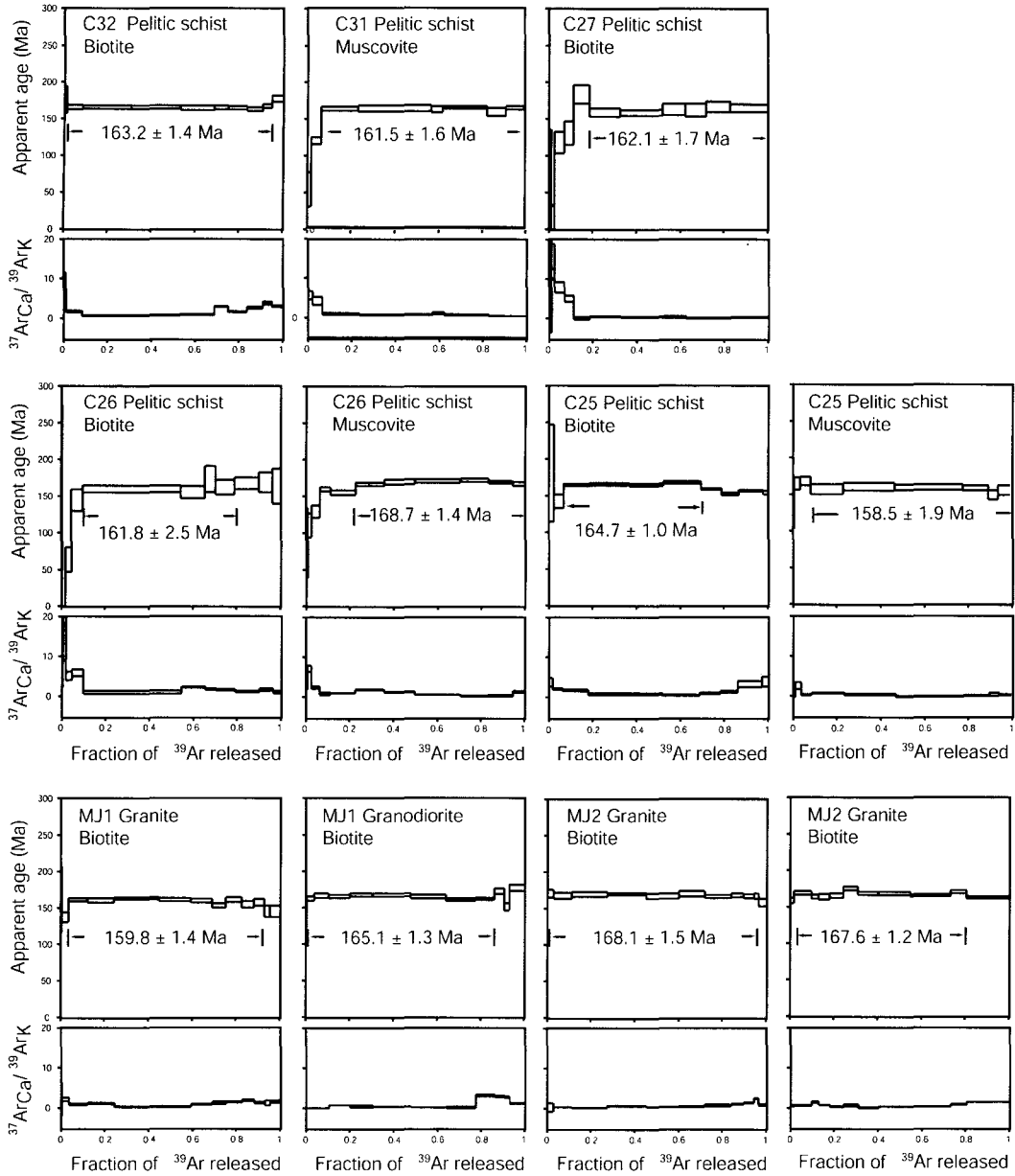


Fig. 5. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra and Ca/K ratios of single biotite and muscovite grains from pelitic and psammitic rocks and granites from the western part of the Pibanryeong area, central OMB.

하지 않았지만 최고 변성작용기간을 석탄기후기부터 페름기초기까지 옥천변성대의 주변성시기로 해석하였으며, 임진강대에서 보고된 약 250 Ma(Ree *et al.*, 1996) 및 옥천변성대(?)와 평안누층군을 관입한 청산-백록 화강암체의 관입정치시기(약 220 Ma: Cho *et al.*, 2001; Ree *et al.*, 2001)를 근거로 옥천변성대와 태백산

분지의 융합시기를 청산-백록 화강암체의 관입정치시기 이전과 임진강대의 보고된 북-남중국대륙의 충돌시기 사이로 추정하였고 이를 바탕으로 삼첩기초기-후기(220-250 Ma)에 옥천변성대 내에 두 번째 광역변성작용이 일어났을 것으로 추정하였다. 하지만 보고된 두 번째 중생대초기(220-250 Ma) 광역변성작용에 대한 증

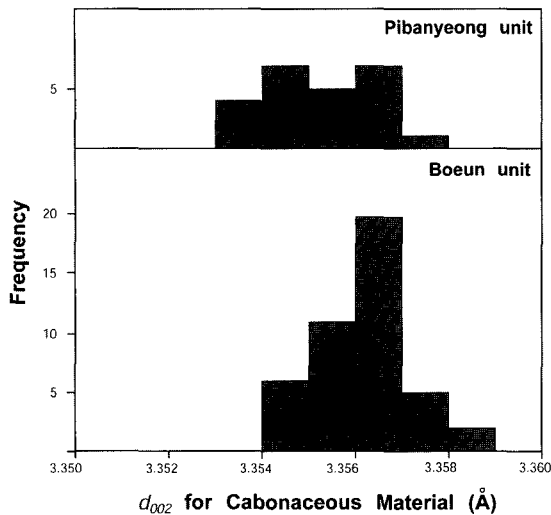


Fig. 6. Frequency distribution of d_{002} values for carbonaceous materials from pelitic and psammitic rocks in both the Boeun and Pibanryeong units in the study areas.

거로써 석영맥 내 유체포유물로부터의 온도-압력조건 외에 두 번째 변성작용에 의해 형성된 변성광물군 등을 포함한 다른 증거를 제시하지 못하였기 때문에 중생대초기 광역변성작용의 존재가 매우 불확실하다.

미원 지역의 연대는 C8 시료(234 Ma)를 제외하면 흑운모 및 백운모 K-Ar(157-167 Ma)과 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 연대(155-169 Ma)가 쥬라기중기 연대에 분포한다. 또한 증평지역에서도 중앙부 연대와 백악기 화강암 접촉부의 연대를 제외하고는 모두 쥬라기중기 연대를 보여준다. 이러한 흑운모 및 백운모 K-Ar과 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 연대자료들은 앞에서 언급된 탄질물에 대한 연구결과, 화강암의 관입정치 및 냉각연대 그리고 쥬라기 화강암 주변의 저압형 변성광물대와 함께 쥬라기 화강암저반의 광역적인 관입에 의한 저압형의 광역적인 열변성작용이 일어났음을 지시한다.

앞서의 토론에서 제시되었던 옥천변성대 중부 증평지역 중앙부에서 5개 시료에 대해 구한 흑운모와 백운모 K-Ar 연대는 241-249 Ma와 263-277 Ma의 범위를 보여주며 이들 연대들은 최근 연구들에 의해 옥천변성대의 주변성시기로 밝혀진 석탄기후기부터 페름기초기의 기간(280-300 Ma)을 고려할 때 중압형의 주변성작용 이후 페름기후기까지 약 350°C까지의 빠른 냉각과 삼척기초기까지의 약 300°C까지 느린 냉각의 가능성을 지시한다. 이들 연대 외에 이 지역에서 얻은 216-224 Ma의 흑운모연대들은 중생대중기에 일어난 두 번째의

광역열변성작용에 의해 부분적으로 재형된 연대로 생각된다. 이러한 해석들은 미원-증평지역이 석탄기후기부터 페름기초기 사이에 중압형의 광역변성작용을 받은 후 삼척기에 흑운모 폐쇄온도인 ca. 300°C까지 냉각된 후 광역적인 쥬라기 화강암의 관입에 의해 쥬라기중기에 저압형의 광역변성작용을 받았음을 지시한다.

한편, 옥천변성대 서남부지역에서 얻어진 변성이질-사질암과 화강암류내 흑운모와 백운모의 K-Ar과 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 연대들은 화강암체 접촉부로 갈수록 연대가 감소하는 경향을 보여주지 않고 쥬라기중기(약 160-170 Ma)의 짧은 시기에 집중된다. 또한 이 시기는 연구지역의 화강암체의 관입정치 및 냉각시기와 동일하다. 이들 백운모와 흑운모 연대해석에는 두 가지 가능성이 있다. 첫 번째 가능성은 쥬라기 화강암체가 옥천변성대에 단지 열적영향을 주었을 경우이다. 즉, 서남부지역이 중부지역과 같이 석탄기후기와 페름기사이에 중압변성작용을 받은 후 300°C 이하까지 식은 후 쥬라기중기 화강암체가 광역적으로 관입하여 전체지역에 480°C 이상의 지온상승의 열적조건을 준 후 다시 빨리 식어 화강암과 옥천변성대 내 흑운모와 백운모가 동일한 냉각연대를 보여주는 것이다. 이는 이미 옥천변성대가 쥬라기중기 이전까지 지표면 가까이(2.1-5.0 kb, 약 7-17 km) 상승한 후 화강암체가 광역적으로 관입하였음을 전제한다. 두 번째 가능성은 변성퇴적암이 중압형의 변성환경조건에 쥬라기초기까지 계속 머물다가 쥬라기중기에 지표근처로 상승하면서 광역적인 화강암체의 관입이 수반되어 변성퇴적암과 화강암체가 거의 같은 시기에 냉각사를 경험했을 가능성이 있다. 화산지역에서 얻은 연대결과는 화산지역 서부 금산사지역의 전주전단대에서 170-173 Ma 일어난 호남전단대의 우수향 연성전단운동(이승렬 외, 2003) 시기와 유사하며 이는 비록 호남전단대의 우수향 연성전단운동이 옥천변성대에 구조적으로 사소한 영향을 주었을지라도 쥬라기중기에 대규모 화강암체의 관입으로 인한 광역적 열 변성작용 외에 이들 화강암체의 관입과 함께 일어난 구조운동들이 옥천변성대 서남부에 영향을 준 것은 배제할 수 없음을 지시한다.

결 론

(1) 서남부 화산지역 보은과 피반령의 2개의 지구조 단위에서 채취한 변성이질-사질암류로부터 26개의 흑운모와 백운모를 분리하여 측정된 K-Ar 연대는 보은 단위에서 178-180 Ma를 보여주는 2개의 백운모를 제외하면 149-164 Ma의 흑운모 연대와 156-164 Ma의 백

운모 연대, 그리고 피반령 단위에서 157-164 Ma의 흑운모 연대와 157-168 Ma의 백운모 연대범위가 인지된다. 또한 12개의 흑운모와 백운모 단결정으로부터 측정된 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 평형연대를 지시하며 보은 단위에서 175 Ma를 보여주는 1개의 백운모를 제외하면 154-164 Ma의 흑운모 연대와 161-166 Ma의 백운모 연대, 피반령 단위에서 159-161 Ma의 흑운모 연대와 158 Ma의 백운모 연대범위가 인지된다. 두 단위의 변성이질-사질암류에 대한 K-Ar과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 흑운모와 백운모연대들은 쥬라기중기에 집중된다.

(2) 미원-증평지역의 보은과 피반령의 2개의 지구조 단위에서 채취한 변성이질-사질암류로부터 구한 33개의 흑운모와 백운모 K-Ar 연대는 서남부 화산지역에 비해 복잡한 연대분포를 보여준다. 보은 단위에서 흑운모 연대는 105 Ma(백악기), 157-176 Ma(쥬라기), 234 Ma(삼첩기중기와 후기 경계부근)의 범위를 보여주며 백운모는 102 Ma와 170 Ma를 보여준다. 백악기의 연대는 남동측 백악기 화강암체 주변부에 국한된다. 피반령 단위에서 흑운모 연대는 각각 142-194 Ma(쥬라기), 216-224 Ma(삼첩기후기), 241-249 Ma(삼첩기초기)의 범위를 보여주며 백운모는 164-190 Ma(쥬라기), 263-277 Ma(페름기초기와 중기 경계부근)의 범위를 보여준다. 하지만 증평지역에서 쥬라기 연대를 제외한 삼첩기부터 페름기까지 연대범위는 보은 단위 북부와 피반령 단위 남부 즉 증평지역의 옥천변성대 중앙부에서만 구해지며 이들 연대를 제외하면 미원-증평지역의 연대들은 쥬라기중기에 집중된다.

(3) 서남부 화산지역 및 중부 미원-증평의 화강암류의 K-Ar과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 흑운모와 백운모연대들은 쥬라기중기(156-168 Ma)로 최근에 U-Pb 연대로 보고된 관입 정치 및 냉각시기와 큰 연대차이를 보여주지 않으며 연구지역 변성퇴적암의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 과 K-Ar 흑운모와 백운모의 연대와 거의 일치한다.

(4) 서남부 화산지역과 중부 미원-증평 지역의 보은 단위 및 피반령 단위에서 분리된 탄질물의 d_{002} 값은 모두 각섬암상 범위의 흑연화를 지시하는 3.353-3.359 Å의 매우 좁은 범위에 집중된다. 변성광물군으로 볼 때 녹색편암상에 해당하는 보은 단위 남부에서 각섬암상을 지시하는 탄질물의 흑연화도(d_{002} 값) 값이 인지되는 것은 두 번의 광역변성작용을 지시한다. 이들 지역에서 쥬라기중기의 흑운모와 백운모 K-Ar과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대가 집중적으로 확인되는 사실과 쥬라기 화강암들의 관입정치시기가 대부분 쥬라기중기인 사실 그리고 쥬라기 화강암 주변에서 저압변성대가 관찰되는 것은 쥬라기중기의 강력한 지질사건(쥬라기의 광역적

인 저반형 화강암의 관입에 의한 광역열변성작용)을 강하게 뒷받침한다. 또한 화강암 접촉부 근방 1-2 km를 제외하고는 열변성작용시 새로운 광물군을 형성시키지 못한 것과 보은 단위 남부의 탄질물 흑연화가 각섬암상 이상으로 변성받은 사실은 쥬라기 화강암의 광역적인 열변성작용 기간이 화강암 접촉부 1-2 km 내를 제외하고는 중압형 광물군을 변화시키기에 충분히 길지 않았으나 전체지역의 탄질물의 흑연화도를 변화시키기에 충분히 길었을 가능성을 제시한다.

(5) 옥천 변성대 중부 증평지역의 중앙부에서 5개 시료에 대해 구한 흑운모와 백운모 K-Ar연대는 241-249 Ma와 263-277 Ma의 범위를 보여준다. 백운모 연대들은 석탄기후기-페름기초기(ca. 280-300 Ma) 옥천변성대의 주변성시기 이후 280-300 Ma부터 263-277 Ma사이에서 약 350°C까지의 빠른 냉각을 지시하고 흑운모 연대들은 263-277 Ma부터 241-249 Ma사이에서 약 300°C까지의 느린 냉각을 지시한다. 하지만 삼첩기-페름기의 연대가 증평지역의 중앙부에만 국한되어 나타나는 이유에 대해서는 좀 더 자세한 연구가 필요하다.

사 사

이 연구는 한국과학재단의 특정기초연구비(RO1-2000-00062)와 2002년 전북대학교 박사 후 과정 프로그램에 의해 지원되었다. 이 논문을 심사하신 부경대학교 박계현 교수님과 한국기초과학지원연구원 정창식 박사님께 깊은 감사를 표한다.

참고문헌

- 김현철, 조문섭, 고희재, 1995, 증평-덕평지역에 분포하는 중부 옥천 변성대의 변성 지구조적 진화. 지질학회지, 31, 299-314.
- 민경원, 조문섭, 권성택, 김인준, K. Nagao, E. Nakamura, 1995, 충주 지역에 분포하는 변성 암류의 K-Ar연대: 원생대 말기 (675 Ma)의 옥천대 변성작용. 지질학회지, 31, 315-327.
- 이승렬, 이병주, 조동룡, 기원서, 고희재, 김복철, 송교영, 황재하, 최범영, 2003, 전주전단대 화강암류의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연령측정: 호남전단대의 운동시기에 대한 고찰, 한국암석학회·한국광물학회 공동학술발표회 요약집, 53.
- 오창환, 김선태, 이정후, 1995, 옥천변성대 서남부지역에서의 변성진화과정, 지질학회지, 31, 21-31.
- 오창환, 김창숙, 박영도, 1997, 옥천화강암과 보은화강암 관입에 의한 접촉변성작용, 암석학회지, 6, 133-149.
- 오창환, 김성원, 이정후, 1998, 옥천변성대 남서부지역의 광역변성작용과 접촉변성작용에 관한 연구, 지질학회지, 34,

- 311-332.
- 오창환, 권용완, 김성원, 1999, 청주-미원지역 중부옥천대의 변성진화과정, *암석학회지*, 8, 106-124.
- 오창환, 김성원, 유인창, 이덕수, 2002, 옥천변성대 서남부 지역 변성퇴적암. 2002년도 한국암석학회 학술답사 안내서, 38p.
- 정창식, 정연중, 길영우, 정기영, 2003, 청주화강암의 U-Pb 스펙연대. *한국암석학회 · 한국광물학회 공동학술발표회 요약집*, 53.
- 조문섭, 김인준, 김현철, 민경원, 안중호, K. Nagao, 1995, 중평-덕평 지역 중부 옥천변성대에 분포하는 이질 편암의 K-Ar 혹은모연대. *암석학회지*, 4, 178-185.
- 조문섭, 김현철, 2002, 중부 옥천변성대의 변성진화: 최근의 연구결과 논평 및 문제점. *암석학회지*, 11, 121-137.
- Cheong, C. S., Cheong, K. Y., Kim, H., Choi, M. S., Lee, S. and Cho, M., 2003, Early Permian peak metamorphism recorded in U-Pb system of black slates from the Ogcheon metamorphic belt, South Korea, and its tectonic implication. *Chem. Geol.*, 193, 81-92.
- Cho, D. L., Kwon, S. T., Sagong, H., Cheong, C. S. and Armstrong, R., 2001, Precise cooling histories of three neighboring pluton in the central Okcheon belt: Implication for magma movement rate and tectonics (abstract). *Annu. Geol. Soc. Korea*, 90.
- 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. *Eath-Sci. Rev.* 52, 175-235
- Cliff, R. A., Jones, G., Choi, W. C. and Lee, T. J., 1985, Strontium isotopic equilibrium during metamorphism of tillites from the Ogcheon Belt, South Korea. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 96, 212-224.
- Cluzel, D., Cadet, J. P. and Lapierre, H., 1990, Geodynamics of the Ogcheon belt (South Korea). *Tectonophysics*, 183, 41-56.
- Hyodo, H., Itaya, T. and Matsuda, T., 1995, Temperature Measurement of Small Minerals and Its Precision Using Laser Heating. *Bull. Res. Int. Nat. Sci. Okayama Univ. Sci.*, 21, 3-6.
- Hyodo, H., Kim, S. W., Itaya, T. and Matsuda, T., 1999, Homogeneity of neutron flux during irradiation for ⁴⁰Ar/³⁹Ar age dating in the research at Kyoto University. *J. Min. Pet. Econ. Geol.*, 94, 329-337.
- Itaya, T., 1981, Carbonaceous material in pelitic schists of the Sanbagawa metamorphic belt in central Shikoku, Japan. *Lithos*, 14, 215-224
- Itaya, T., Nagao, K., Inoue, K., Honjou, Y., Okada, T. and Ogata, A., 1991, Argon isotopic analysis by a newly developed mass spectrometric system for K-Ar dating. *Mineralogical J.*, 15, 203-221
- Kim, H., Cheong, C. S., Cho, M., Jeong, G. Y. and Choi, M. S., 2001, Geochronological evidence for late Paleozoic orogeny in the Ogcheon metamorphic belt, South Korea (abstract). *Annu. Meet. Geol. Soc. Am.*, Abstr. with Program, 33.
- Kim, H. and Cho, M., 1999, Polymetamorphism of Ogcheon Supergroup in the Miwon area, central Ogcheon metamorphic belt, South Korea. *Geosci. Jour.*, 3, 151-162.
- Kim, J. H., 1990, Middle Paleozoic isotopic ages of the Ogcheon Group in Korea and their significance. In: Aubouin, J. and Bourgois, J. (eds.) *Tectonics of Circumpacific Continental Margins*, VSP, Utrecht, 181-191.
- Kim, S. W., Itaya, T., Hyodo, H. and Matsuda, T., 2002, Metamorphic K-feldspar in low-grade meta-sediment from the Ogcheon metamorphic belt in South Korea. *Gondwana Res.*, 5, 849-855
- Landis, C. A., 1971, Graphitization of dispersed carbonaceous material in metamorphic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 30, 34-45
- Min. K. and Cho, M., 1998, Metamorphic evolution of the northwestern Ogcheon metamorphic belt, South Korea. *Lithos* 43, 31-51.
- Nagao, K., Nishido, H., Itaya, T. and Ogata, K., 1984, K-Ar age determination method. *Bull. Res. Int. Nat. Sci. Okayama Univ. Sci.*, 9, 19-38
- Nishimura, Y., Coombs, D. S., Landis, C. A. and Itaya, T., 2000, Continuous metamorphic gradient documented by graphitization and K-Ar age, southeast Otago, New Zealand. *Am. Minst.* 85, 1625-1636.
- Oh, C.W., Kim S.T. and Lee, J.H., 1995, The P-T Condition and Timing of the Main Metamorphism in the Southwestern Part of the Okchon Metamorphic Belt. *J. Geol. Soc. Korea*, 31, 343-361.
- Ree, J. H., Cho, M., Kwon, S. T. and Nakamura, E., 1996, Possible eastward extension of Chinese collision belt in South-Korea: the Imjingang belt. *Geology*, 24, 1071-1074
- Ree, J. H., Kwon, S. H., Park, Y., Kwon, S. T. and Park, S. H., 2001, Pre- and post-tectonic emplacements of the granitoids in the central-southern Okchon belt, South Korea: implications for the timing of the strike-slip shearing and thrusting. *Tectonics*, 20, 850-867.

(2003년 2월 24일 접수; 2003년 5월 26일 채택)