

## 경기육괴 북부 적성 지역에서 산출된 243-220 Ma $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 레이저 탐침 백운모 단입자 연대의 지구조적 의미

Koenraad de Jong<sup>1,\*</sup> · Gilles Ruffet<sup>2</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 지구환경과학부

<sup>2</sup>University of Rennes I

### 요 약

경기육괴 북부 적성 지역에서 강한 후퇴변성작용과 연성 변형작용을 받은 암석을 대상으로 백운모 입자에 레이저 단계가열법을 적용하여 연대를 측정하였다. 분석 결과 운모 편암으로부터  $242.8 \pm 1.0$  Ma와  $240.3 \pm 1.0$  Ma (1 $\sigma$ ), 압쇄암질 규암으로부터  $219.7 \pm 0.9$  Ma (1 $\sigma$ )의  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  연대가 산출되었다. 흑운모 단입자 분석은 ~245-250 Ma의 연대와 함께 흑 모양의 연대 스펙트럼이 산출되었으며, 이는 중성자 조사 과정 중  $^{39}\text{Ar}$  반동에 의한 것으로 해석된다. ~243-240 Ma 백운모 연대는 충돌 중이나 충돌 후 용기의 초기 과정이 기록된 것일 가능성이 있으며, 압쇄암질 규암에서 산출된 젊은 연대는 이전의 재결정화 과정이 연장되었거나, 재개된 것으로 해석될 수 있다. 이 연구에서 분석된 연대들은 홍성 지역에 분포하는 각섬암의  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  연대, 그리고 안면도의 저변성작용을 받은 변성퇴적암의 변성연대와  $\pm \sim 10$  Ma 정도 차이가 있다. 홍성 지역과 안면도에서 산출된 연대들은 충돌 후 지구조운동, 화성활동과 관련이 있으며, 이를 바탕으로 본 연구에서 산출된 연대는 트라이아스기의 냉각, 용기, 재결정화 작용이 모두 같은 지구조운동의 과정에서 이루어진 것은 아니라는 것을 지시한다. 이 결과는 변성대에서 산출되는 비교적 젊은 연대들이 단순히 지구조운동 후의 수동적인 냉각 연대로 해석될 수 없으며, 이들이 또 다른 지구조운동의 과정을 반영할 수 있음을 강조한다.

**주요어:** 경기육괴, 적성지역, 백운모  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  레이저 탐침, 트라이아스기, 한반도

**Koenraad de Jong and Gilles Ruffet, 2014, 243-220 Ma  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  laser probe muscovite single grain ages in the northernmost Gyeonggi Massif (Juksung area) and their tectonic implication. Journal of the Geological Society of Korea. v. 50, no. 6, p. 771-782**

**ABSTRACT:** Laser step-heating of muscovites from strongly retrogressed and ductilely deformed rocks in the top of the northern Gyeonggi massif (Juksung area) yielded 1s  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  (pseudo)plateau ages of:  $242.8 \pm 1.0$  Ma and  $240.3 \pm 1.0$  Ma (mica schists) and  $219.7 \pm 0.9$  Ma (mylonitic quartzite). A biotite single grain yielded a hump-shaped age spectrum with ~245-250 Ma step ages pointing to  $^{39}\text{Ar}$  recoil, an irradiation artifact. It is possible that the ~243-240 Ma muscovite ages record an early phase of exhumation following or during collision, and that the much younger muscovite age from the mylonitic quartzite implies extended or renewed recrystallization. These ages are ~10 million years older and younger, respectively, than  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages from amphibolites in anatectic gneisses (Hongseong area) and low-grade metasediments on Anmyeondo, linked to post-collisional tectonic and magmatic processes. Our study thus shows that cooling, exhumation and recrystallization in the Triassic occurred in distinct phases that were not coeval in all areas. This underscores that the younger age sets in metamorphic terranes cannot always be simply interpreted as due to passive post-tectonic cooling, but rather reflects distinct tectonic phases.

**Key words:** Gyeonggi Massif, Juksung, Muscovite  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  laser probe, Triassic, Korean peninsula

(Koenraad de Jong, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-747, Republic of Korea; Gilles Ruffet, CNRS (CNRS/INSU) UMR 6118, Géosciences Rennes, 35042 Rennes Cedex, France and Université de Rennes I, Géosciences Rennes, 35042 Rennes Cedex, France)

\* Corresponding author: +82-2-880-6632, E-mail: [keuntie@snu.ac.kr](mailto:keuntie@snu.ac.kr)

## 1. 서 언

한반도를 이루는 기반암의 많은 부분은 신시생대에 맨틀에서 분리된 물질로 이루어진 선캠브리아기 대륙 지각으로 이루어져 있으며, 이들은 북쪽에서부터 낭림, 경기, 영남육괴로 분류된다(그림 1; Lee and Cho, 2012). 이 기반암들은 여러 차례 변성, 변형과정을 거친 신원생대 후기-고생대 중, 후기 퇴적암과 화산암으로 이루어진 임진강대와 옥천변성대에 의해 구분된다(그림 1; e.g., Kim, 2005; Lim *et al.*, 2005; Cho *et al.*, 2007, 2013a; Kee, 2011; Choi *et al.*, 2012; Lee and Cho, 2012; Chough, 2013; Choi, 2014). 여러 차례 변형된 중기 고생대 녹색편암상의 변성 저탁암(태안층)이 경기육괴의 서부 경계를 따라 구조적으로 최상부에서 불연속적으로 산출되며(그림 1), 이 퇴적층은 임진강대와 옥천대의 일부 지층과 유사한 모습을 보인다. 상기 언급된 암층들은 모두 다양한 정도의 변형, 변성작용에 의하여 영향을 받았으며(Kim, 2005; Kee, 2011; Kim *et al.*,

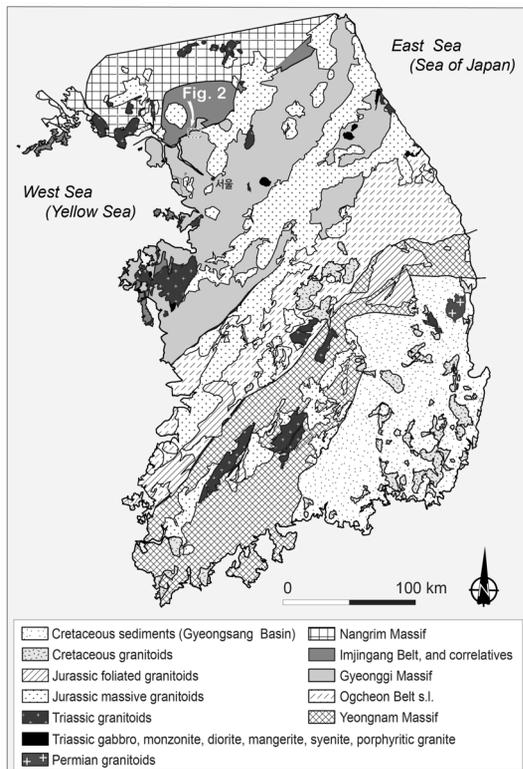


Fig. 1. Simplified tectonic map of Korea.

2006, 2011b; Lee and Cho, 2012; Oh, 2012; de Jong and Ruffet, 2014; de Jong *et al.*, 2014) 후기 트라이아스기 반려암-몬조나이트, 섬강암-화강암체가 넓게 분포하고 있다(그림 1). de Jong and Ruffet (2014)와 de Jong *et al.* (2014)은 ca. 233-230 Ma의 변성, 화성작용과 염기성 암맥의 관입이 해당 지역의 암체가 변형된 후에 발생하였으며, 구조적으로 다양한 깊이의 암체에 강한 영향을 주었음을 지적하였다. 홍성 지역의 강한 후퇴변성작용을 받은 고압 백립암체를 포함하여, 경기육괴와 임진강대는 트라이아스기에 변성작용을 받았으며 변성 시기는 함우라늄 부성분광물을 대상으로 한 동위원소 연대 측정을 통해 253-215 Ma으로 알려져 있다(e.g., Cho *et al.*, 2005; Kim, S.W. *et al.*, 2006, 2008; Oh *et al.*, 2006b; Kim, J.M. *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2009; Suzuki, 2009; Yi and Cho, 2009; Kee, 2011; Lee *et al.*, 2014; Yengkhom *et al.*, 2014). 옥천변성대의 일부 암체 역시 페름-트라이아스기 변성작용에 영향을 받았으며, 쥬라기의 변성작용이 이를 덧씌운 것으로 알려졌다(그림 1; Cliff *et al.*, 1985; Oh *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2007). 임진강대와 옥천대는 한반도의 주요 지구구조적 경계선으로, 때로는 충돌대로 해석된다(Cliff *et al.*, 1985; Oh *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2007). 최근, Kim *et al.* (2011b, 2011c)은 전술한 임진강대와 옥천대의 지구구조적 경계선 대신 경기육괴 서부의 월현리 복합체를 지나는 홍성 봉합대를 설정하였으며, 이 지역의 암석을 경기육괴에서 제외하였다. 홍성 지역에서 산출하는 암상은 대리암, 변성염기성암, 규장질암, 렌즈상으로 나타나는 사문암화된 초고철질 암석이며, 일부에서는 강한 후퇴변성작용을 받은 고철질 백립암이 석류석 내부에 녹회석을 지닌 양상을 보인다. 이 백립암으로부터 1.65-2.10 GPa, 775-850°C의 변성조건이 계산되었으며, 이는 해당 암체가 약 60-75 km 깊이에 있었음을 지시한다. 현재, 임진강대와 옥천대, 홍성 봉합대는 중국의 친링-다비수루 초고압 변성대의 연장선으로 여겨지지만, 구체적인 지구구조 모델은 아직 논의 중이다(e.g., Ree *et al.*, 1996; Lee and Cho, 2003; Oh *et al.*, 2005, 2006a, 2009; Kim, S.W. *et al.*, 2006, 2008, 2011b; Zhai *et al.*, 2007; Kwon *et al.*, 2009; Oh, 2012; Chough *et al.*, 2013; Choi, 2014; Lee *et al.*, 2014; Yengkhom *et al.*, 2014).

한반도의 충돌 연대는 정확히 알려져 있지 않다. Guo *et al.* (2005)와 Kim *et al.* (2006)은 홍성지역의 고압 백립암상의 변성암에서  $231 \pm 3$  Ma의 저어콘 SHRIMP U-Pb 연대를 얻었으며, 이를 바탕으로 후기 트라이아스기의 고압 변성작용을 제안하였다. 하지만, 후퇴변성작용을 받은 고압 백립암을 둘러싸고 있는 편마암들은 237-231 Ma에 화성활동과 광역변성활동에 의해 영향을 받았음이 밝혀졌으며(Kim, S.W. *et al.*, 2006, 2008; Kee, 2011) 이는 아마도 저어콘의 동위원소계에 영향을 주었을 것으로 생각된다. de Jong and Ruffet (2014)와 de Jong *et al.* (2014)은 한반도에서 ca. 233-229 Ma에 있었던 변성작용과, 높은 K 함량을 가지고 쇼쇼니틱한 특징을 보이는 캘크-알칼리 화성활동은 충돌 후 환경에서 연약권으로부터 이류(advection), 전도(conduction)를 통해 공급된 열에 의한 것으로 해석하였다. 한반도의 후기 트라이아스기 화성활동은 보통 판의 충돌 후 지구조 환경이 압축력에서 인장력이 가해지는 환경으로 변화하면서 작용한 것으로 해석된다(Williams *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011a). 이는 종종 암석권 박리(delamination)로 인한 연약권의 상승(Choi *et al.*, 2009), 또는 섭입한 해양판의 단절(Seo *et al.*, 2010; Oh, 2012; Choi, 2014)과 연결되어 설명된다. de Jong and Ruffet (2014)에서 지적된 것에 따르면, 문제는 지금까지 발표된 고압 변성작용의 연대 자료들이 암석권 박리/해양판 단절과 연관된 화성활동과 이에 따른 광역변성작용의 연대와 같은 범위에 있다는 것이다. Park *et al.* (2013)에서 산출된 저어콘 SHRIMP U-Pb 연대에 따르면, 홍성 지역의 비봉 에클로자이트의 연대는  $246 \pm 5$  Ma로 알려졌다. 245-260 Ma에 해당하는 함우라늄 부성분광물의 U-Pb 연대는 경기육괴(Suzuki, 2009; Lee *et al.*, 2014; Yengkhom *et al.*, 2014)와 임진강대(Cho *et al.*, 1996, 2005; Kim *et al.*, 2014)에서 잘 알려져 있으며, 이들이 아직 고압 변성작용을 지시하는지는 불명확하다.

이를 바탕으로, 본 연구에서는 경기육괴 북부, 임진강대 아래에 놓이는 적성 지역의 운모 편암에서 산출된 양질의 첫 번째  $\sim 240$ -243 Ma  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  단입자 레이저 탐침 백운모 연대를 보고한다. 이 연대들은 충돌이나 용기가 일어나는 동안의 후퇴변성작용을 지시하며, 고압변성작용의 연대가 이보다 좀 더 오래되었을 가능성을 암시한다. 또한 이 결과는

$\sim 230$ -235 Ma에 일어난 강한 변성작용과 재결정화 작용은 경기육괴의 모든 지역에 영향을 미치지 않았거나, 또는 경기육괴 내부에 중요한 지구조적 경계가 존재할 가능성을 내포한다. 적성 지역의 압쇄 암질 규암에서 측정된  $\sim 220$  Ma 백운모 연대는 용기와 재결정화작용이 연장되거나 또는 재개되었을 수 있음을 지시한다.

## 2. 경기육괴와 서부 지역의 암상

경기육괴(그림 1)는 복합 변성체로서 주로 고원생대 중기( $\sim 1.93$ -1.83 Ga) 고변성작용을 받은 편마암과 다양한 변성 퇴적암, 그리고 일부는 경기육괴 서부와 중부에서 산출되는 신원생대(0.9-0.75 Ga)의 변성암과 퇴적암으로 구성되어 있다(e.g., Lee *et al.*, 2003, 2014; Kim, S.W. *et al.*, 2008; Oh *et al.*, 2009; Lee and Cho, 2012). 고원생대의 암석은 두 번의 지구조적 변성작용을 받았다: 첫 번째 사건인 M1은 고원생대 중기의 하부-상부 백립암상의 변성작용이었고 두 번째 사건인 M2는 더 약한 변성작용이었는데, 감압 중에 일어난 재가열에 의해 발생하였을 것으로 판단된다(e.g., Cho *et al.*, 1996, 2013b; Lee and Cho, 2003; Oh *et al.*, 2006a; Lee *et al.*, 2014; Yengkhom *et al.*, 2014). M2에서 이루어진 변성작용(0.5-0.35 GPa, 700-750°C; Cho *et al.*, 2013b; Lee *et al.*, 2014)은 중간 정도이지만 광범위하게 아나텍시스(anatexis) 구조가 나타나므로 적어도 상부 각섬암상의 조건에서 일어났으며, 국지적으로는 침정석 백립암이 보고된다(Oh *et al.*, 2006a). 상부 각섬암상과 백립암상의 환경에서는 오래된 저어콘 결정의 둘레에 변성 외연부가 자주 형성된다(Williams, 2001; Parrish and Noble, 2003). 그러므로 경기육괴와 홍성지역에서 산출된 저어콘의 외연부에서 SHRIMP U-Pb 연대를 측정하면 M2가 발생한 시기를 추정할 수 있다. 그 결과 경기육괴에서는 237-235 Ma (N = 3, 오차  $\sim 2\%$ )의 연대를, 홍성지역에서는  $\sim 243$ -229 Ma사이의 234.5 Ma의 평균 연대를 얻었다. 따라서 M2는 트라이아스기의 변성작용으로 추정된다.

한편, 홍성에서 서쪽으로 50 km 정도 떨어진 곳에 위치한 안면도에서는 고생대 중기의 녹색편암상 변성퇴적암인 태안층이 층서적으로 경기육괴 위에 놓여있는데 이 암석의 티타나이트에서 얻은  $\sim 233$

Ma의 U-Pb 연대와 백운모의 ~231-229 Ma의  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  연대가 서로 일치하며(de Jong *et al.*, 2014), 이 암석 또한 트라이아스기 후기의 변성작용을 기록하고 있음을 알 수 있다. 안면도의 섬장암질 마그마 활동도 같은 연대를 보여 준다(Kee, 2011; Han, 2014). 안면도의 태안층과 그 아래에 위치한 서산층군의 원생대 편암암에 관입한 트라이아스기 후기의 많은 관입암들은 국지적이지만 강한 압쇄암화작용을 받았다. 이로부터 관입 시기인 ~230 Ma 이후에도 연성 변형작용이 계속되었음을 알 수 있다(de Jong *et al.*, 2014).

## 2.1 적성 지역

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  연대 측정 시료를 채취한 지역인 적성 지역은 강한 후퇴변성작용과 연성 변형작용을 받은 경기육괴 북부의 상부에 해당한다(그림 2). 이 지역의 암석들은 주로 석영-흑운모-백운모-녹니석 편암으로 구성되며, 운모에 의해 편리가 잘 나타나는 30-50 m 두께의 함석류석 규암, 세립질의 층을 갖는 함석류석 각섬암도 함께 나타난다. 또한 흑운모를 많이 포함한 조립질 편암암도 나타난다. 적성 지역은 북쪽으로는 임진강대, 남쪽으로는 ~4-5 km 두께의 경기전단대에 속하는 다양한 변형작용과 강한 후퇴변성작용을 받아 (초)압쇄암화된 신원생대의 편

암(lee *et al.*, 2003)을 두고 그 사이에 위치하고 있다(Kim *et al.*, 2000). Kim *et al.* (2000)은 이 연성 전단대의 압쇄암에 있는 변성작용에 의해 생성된 백운모로부터  $226 \pm 1$  Ma의 백운모-전암 등시선 Rb-Sr 연대를 얻었다. 대동층군 역시 전단대 북부에서 관찰된다. 압회색, 검은색을 띠는 세일과 렌즈상으로 교호하는 중립질-조립질의 사암이 산출되며, 기질 지지의 역암층 역시 중력암(pebble)을 포함하는 양상으로 관찰된다. 국지적으로 층리와 평행하지 않은 벽개가 관찰되며, 이는 남쪽 방향을 향하여 역전된 큰 규모의 습곡의 측면 벽개이다.

## 3. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 지질연대학

### 3.1 분석절차

시료 JK20은 엽리구조가 발달하나 선구조는 미미한 녹니석-백운모 편암이며 시료 JK23은 녹니석-흑운모-백운모 편암, 시료 JK36은 엽리구조, 선구조가 명확한 압쇄암질 함석류석 규암이다. 각 시료에서 0.5-1.0 mm에 해당하는 크기의 운모를 분리하였다. 시료 광물들은 Synrad<sup>®</sup> CO<sub>2</sub> continuous laser 장비를 이용해  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  단계 가열법(step-heating technique)을 시행하였으며, 동위원소 분석은 MAP215<sup>®</sup> 비활성 기체

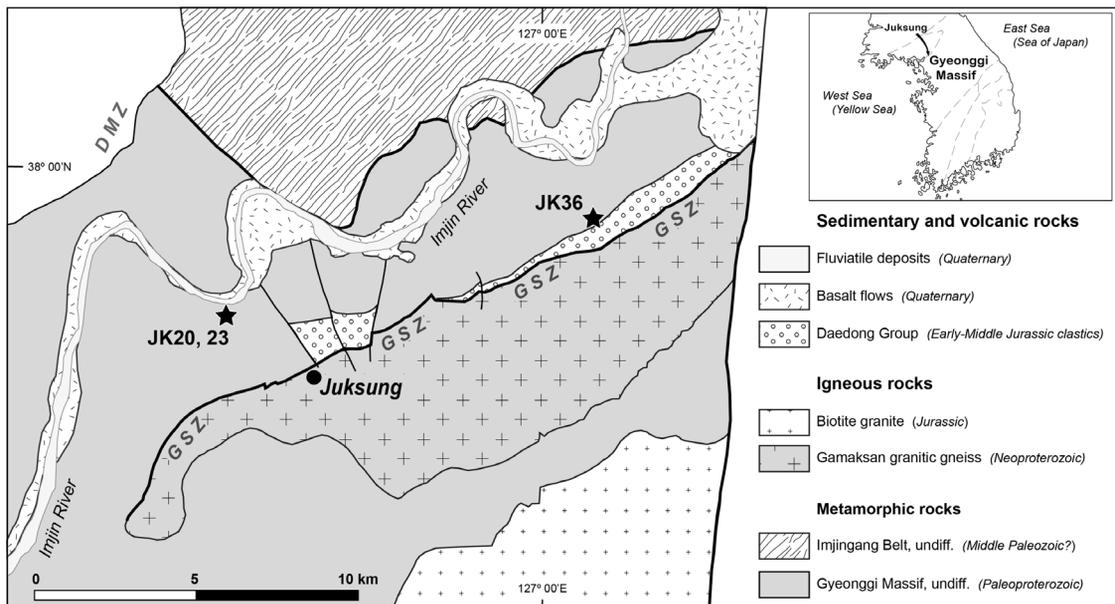


Fig. 2. Geologic sketch map of the Juksung area with sample locations. Modified after Kee (2011).

질량 분석기를 사용하였다. 사용된 장비는 프랑스의 Geosciences Rennes에 설치되어있다. 모든 측정치는 질량 분별 효과와 대기 아르곤 성분의 오염을 고려하여 Lee *et al.* (2006)과 Mark *et al.* (2011)의 과정을 거쳐 수정되었으며, K, Ca, Cl에 의한 효과도 고려하여 마찬가지로 수정을 하였다. 붕괴 상수는 Renne *et al.* (2011)의 것을 사용하였다. 시료와 표준광물(각석석 Hb3gr 연대:  $1081.0 \pm 0.11\%$  Ma; Renne *et al.*, 2010, 2011)이 함께 McMaster 반응로(Hamilton, Canada, location 8E)에서 카드뮴으로 싸여진 상태로 298 시간동안 조사를 받았으며, J/h는  $5.86 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ 이다. 세부사항은 Ruffet *et al.* (1991, 1995) 와 de Jong and Ruffet (2014) 에 기술된 바를 따랐다. 측정된 연대의 오차는  $1\sigma$  레벨로 도시되었고,  $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_K$  비율과 모니터의 연대, 붕괴상수에 대한 오류는 포함되지 않았다. 평형 연대(plateau ages)는 70% 이상의  $^{39}\text{Ar}_K$ 이 최소 3 단계 이상의 분석에서 추출되어 이들의 연대가  $1\sigma$ 에서 일치하였을 때 정의되었으며, 이 조건을 만족하지 못하는 경우 대신 각 분석의 가중평균을 측정하여 이를 가평형(pseudo-plateau) 연대로 정의하였다.  $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_K$  비율과 모니터의 연대, 붕괴상수에 대한 오류는 마지막 가평형 연대 계산과 이후에 인용된 각각의 연대들에 대해서 포함되어 계산되었다.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  분석 결과는 표 1에 있으며, 연대 스펙트럼으로서 그림 3에 도시되었다.

### 3.2 결과

시료 JK20 ( $37^\circ 57' 47.24''\text{N}$ ;  $126^\circ 53' 10.51''\text{E}$ )의 백운모는 암석 내에서 수 밀리미터의 크기로 나타나며, 어두운 색깔의 포유물을 가지고 있다. 그래서 비교적 작고, 깨끗한 백운모 입자를 분리하여 분석한 결과,  $242.8 \pm 1.0 \text{ Ma}$  (50.8%  $^{39}\text{Ar}$  추출됨, 그림 3a)의 가평형 연대가 산출되었다. 시료 JK23 ( $37^\circ 57' 47.24''\text{N}$ ;  $126^\circ 53' 10.51''\text{E}$ )의 백운모는 갈색의 흑운모와 함께 성장하거나, 또는 세립질의 흑운모 집합체를 둘러싸는 형태로 산출된다. 분석된 백운모는 포유물이 없고 깨끗하였으며, 분석 결과  $240.3 \pm 1.0 \text{ Ma}$  (70.6%  $^{39}\text{Ar}$  추출됨, 그림 3b)의 평형 연대가 얻어졌다. 이는 JK20의 백운모 가평형 연대와 거의 일치하는 결과이다. 시료 JK23의 두 번째 백운모는 상당한 크기의 흑운모 핵을 내부에 가지고 있다. 분석 결과, 중간 단계의 주요  $^{39}\text{Ar}$  추출 구간에서 약간 젊은 연대, 그리고 저온-고

온 단계는 거의 일치하는 연대를 보여준다(그림 3b). 시료 JK23으로부터 흑운모를 분리하여 분석한 결과 흑운모의 연대 스펙트럼이 산출되었으며, 주요 연대가 백운모보다 오래되었으나 초반 5-10%의  $^{39}\text{Ar}$  추출 구간에서는 비교적 젊은 연대가 산출되었다(그림 3b). 시료 JK36 ( $37^\circ 59' 18.29''\text{N}$ ;  $127^\circ 0' 46.96''\text{E}$ )의 백운모는 수 밀리미터 크기로 포유물이 잘 보이지 않는다. 그 중에서 깨끗한 입자를 골라 분석한 결과,  $219.7 \pm 0.9 \text{ Ma}$  (65.2%  $^{39}\text{Ar}$  추출됨, 그림 3c)의 가평형 연대가 산출되었다.

### 4. 해석 및 토의

시료 JK20과 JK23에서 산출된 ca. 243 Ma와 240 Ma의 (가)평형연대는(그림 3a, 3b) 경기육괴의 상부가 Cohen *et al.* (2013)의 지질연대표에서 중기 트라이아스기에 해당하는 시기에 냉각되었음을 지시한다. 아마도 주요 연성 변형작용 중 일부와 후퇴변성작용이 이 시기에, 또는 바로 후에 일어났을 것으로 추정된다. 시료 JK23에서 얻어진 흑운모의 연대 스펙트럼은 미시적인 규모에서  $^{39}\text{Ar}$ 이 운모에서 녹니석으로 이동한 것을 나타낸다(Ruffet *et al.*, 1991). 그러므로 이 경우 두 광물의 폐쇄온도의 차( $100\text{-}135^\circ\text{C}$ )를 이용하여 Grove and Harrison (1996)와 Harrison *et al.* (2009)의 확산 계수를 바탕으로 냉각속도를 계산하려는 시도는 어려울 것이다. 하지만 시료 JK23에서 분리한, 흑운모 핵을 가진 백운모 입자의 경우 같은 시료의 백운모와 비교했을 때 주요  $^{39}\text{Ar}$  추출 구간에서의 연대가 아주 미미한 정도의 차이만 보였으며, 이는 냉각이 비교적 빠르게 이루어졌을 가능성을 암시한다(그림 3b).

시료 JK20의  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  연대 스펙트럼을 자세히 살펴보면 약간의 말안장 모양을 가지고 있으며, 저온-고온 단계의 연대가 각각  $245.3 \pm 1.1 \text{ Ma}$ 와  $246.4 \pm 1.1 \text{ Ma}$ 로 일치함을 알 수 있다(그림 3a). 말안장 모양의  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  연대 스펙트럼은 많은 화성암과 변성암의 백운모 입자 분석 결과에서 관찰이 되고 있다(e.g., Cheilletz *et al.*, 1999; Alexandrov *et al.*, 2002; Castonguay *et al.*, 2007; de Jong *et al.*, 2009, 2014; Tartèse *et al.*, 2011). 이러한 결과는 주로 입자 내에 존재하는 화학적 불균질성에 의한 것으로 알려졌다며, 부분적인 재결정화와 동시에 일어나는 화학

**Table 1.**  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  analytical data of laser step heating of muscovite and biotite single grains from metasediments, Juksung area.

<b>JK20</b>									
<b>Muscovite</b>									
Laser power (mW)	14 steps		$^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$	$^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ Error	$\%^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ Error	Apparent age (Ma)	Error (Ma)
	Atm. Cont.	%							
350	44.63		0.01	0.01	0.60	6.13	0.12	191.3	3.5
400	9.37		0.01	0.02	0.75	7.56	0.08	233.1	2.2
430	3.18		0.01	0	2.82	7.86	0.02	241.8	0.6
435	1.38		0	0.01	0.61	7.77	0.07	239.3	2.0
460	1.37		0	0.01	1.15	7.82	0.06	240.7	1.3
480	1.13		0.01	0	3.88	7.95	0.02	244.4	0.5
510	0		0	0	17.22	7.98	0.01	245.3	0.3
550	0		0	0	19.34	7.91	0.01	243.3	0.3
590	0		0.01	0	5.05	7.90	0.02	243.0	0.6
650	0		0	0	9.63	7.89	0.01	242.6	0.4
700	0		0	0.01	11.23	7.89	0.01	242.7	0.4
770	0		0.01	0.01	2.89	7.87	0.02	242.1	0.6
900	0		0.01	0.01	2.61	7.88	0.03	242.3	0.9
1111	0		0	0	22.20	8.02	0.01	246.4	0.3
<b>JK23</b>									
<b>Muscovite</b>									
Laser power (mW)	20 steps		$^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$	$^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ Error	$\%^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ Error	Apparent age (Ma)	Error (Ma)
	Atm. Cont.	%							
350	65.89		0	0.04	0.22	5.84	0.26	183.0	7.6
410	21.39		0	0.05	0.25	7.97	0.24	245.3	6.8
430	21.91		0	0.01	0.90	7.68	0.07	236.8	2.2
450	5.27		0	0.04	0.27	7.64	0.18	235.8	5.2
460	10.63		0.05	0.02	0.58	7.63	0.11	235.4	3.2
470	13.99		0.03	0.02	0.77	7.76	0.08	239.0	2.6
480	5.23		0.01	0.02	3.70	7.82	0.03	240.8	0.8
480	2.36		0.01	0.01	3.61	7.79	0.02	240.1	0.7
500	1.12		0	0.01	1.01	7.70	0.05	237.4	1.4
520	2.79		0	0	6.14	7.80	0.01	240.2	0.4
540	0.82		0	0	7.06	7.76	0.01	239.2	0.4
550	0.34		0	0	4.94	7.74	0.01	238.5	0.4
570	0		0	0	5.09	7.76	0.02	239.2	0.5
600	0		0	0	6.76	7.78	0.02	239.8	0.5
650	0.18		0	0	11.08	7.80	0.01	240.4	0.4
700	0.08		0	0	13.60	7.80	0.01	240.3	0.4
740	0		0	0	5.73	7.80	0.02	240.3	0.5
840	0		0	0	4.04	7.80	0.02	240.3	0.5
1000	0		0	0	3.55	7.80	0.03	240.2	0.9
1111	0		0	0	20.71	7.80	0.01	240.4	0.3
<b>JK23 Biotite</b>									
Laser power (mW)	14 steps		$^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$	$^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ Error	$\%^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ Error	Apparent age (Ma)	Error (Ma)
	Atm. Cont.	%							
350	97.36		0	0.16	0.17	4.05	1.60	128.7	49.2
370	43.16		0	0.03	1.13	6.65	0.10	206.7	3.1
420	6.26		0.01	0.01	2.85	7.33	0.04	226.7	1.0
460	0.80		0.01	0	8.45	7.79	0.02	239.9	0.5
490	0		0	0	8.67	7.92	0.01	243.9	0.4
520	0		0	0	18.18	7.97	0.01	245.1	0.4
540	0		0	0	5.06	7.99	0.02	245.8	0.5
580	0		0	0	12.05	8.02	0.01	246.6	0.4
620	0		0	0	9.38	8.02	0.01	246.7	0.4
670	0.02		0	0	4.96	7.96	0.02	245.6	0.5
730	0		0.01	0.01	5.08	8.01	0.02	246.5	0.6
800	0		0.01	0.01	6.74	7.92	0.02	243.6	0.6
900	0		0	0.01	5.92	7.90	0.02	243.2	0.6
1111	0		0	0	11.37	7.94	0.01	244.3	0.4

Table 1. continued.

JK23								
Muscovite	Biotite	cored		14 steps			Apparent age (Ma)	Error (Ma)
Laser power (mW)	Atm. Cont. %	$^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$	$^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ Error	$\%^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ Error		
350	80.37	0.03	0.15	0.15	5.28	0.19	166.1	5.9
380	35.34	0	0.26	0.09	5.22	0.14	164.2	4.3
430	10.59	0.01	0.02	1.12	7.53	0.02	232.4	0.7
450	4.14	0.07	0.04	0.39	7.57	0.04	233.7	1.1
470	8.99	0	0.03	0.74	7.56	0.03	233.4	0.9
500	2.59	0	0.02	0.89	7.62	0.02	235.2	0.6
510	5.58	0	0.02	0.85	7.64	0.03	235.7	0.8
525	2.96	0	0.02	1.34	7.65	0.02	236.0	0.6
540	3.31	0	0.01	1.73	7.74	0.02	238.7	0.5
542	1.25	0.01	0.01	9.49	7.78	0.01	239.6	0.4
547	0.23	0.03	0.01	1.85	7.74	0.02	238.4	0.5
560	0.29	0.04	0.02	1.36	7.72	0.02	237.9	0.5
590	0.53	0.01	0.01	5.00	7.79	0.01	239.9	0.4
620	0.03	0.01	0	5.66	7.77	0.01	239.3	0.3
650	0.05	0.02	0	5.22	7.76	0.01	239.1	0.4
680	0.03	0.02	0	5.03	7.74	0.01	238.5	0.4
710	0	0.01	0	9.22	7.74	0.01	238.5	0.3
740	0	0.01	0	9.59	7.73	0.01	238.3	0.3
760	0	0.01	0	4.34	7.73	0.01	238.4	0.4
790	0	0.02	0	4.39	7.75	0.01	238.8	0.3
830	0	0.01	0.01	3.92	7.75	0.01	238.8	0.4
880	0	0.02	0.01	2.87	7.73	0.01	238.4	0.4
1000	0	0.02	0	4.31	7.74	0.01	238.5	0.3
1111	0	0.01	0	20.39	7.79	0.01	240.0	0.3
JK36								
Muscovite	15 steps					Apparent age (Ma)	Error (Ma)	
Laser power (mW)	Atm. Cont. %	$^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$	$^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ Error	$\%^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$			$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ Error
330	64.50	0.02	0.27	0.12	4.47	0.15	141.6	4.6
380	19.26	0	0.13	0.13	5.69	0.10	178.3	3.0
430	4.75	0.01	0.02	1.16	6.42	0.02	199.9	0.7
450	1.75	0	0.05	0.56	6.58	0.03	204.7	1.0
480	0.64	0.01	0.01	4.26	7.02	0.01	217.5	0.3
490	0	0	0.02	1.26	7.03	0.02	218.0	0.6
510	0	0.01	0	43.38	7.10	0.01	220.0	0.3
515	0	0.01	0	10.23	7.08	0.01	219.3	0.3
520	0.13	0.02	0.01	3.54	7.08	0.01	219.3	0.4
535	0	0.02	0.01	4.30	7.08	0.01	219.5	0.4
560	0.04	0.01	0.01	2.51	7.10	0.01	219.9	0.4
600	0	0.01	0.01	6.37	7.14	0.01	221.2	0.3
650	0	0.02	0.01	4.02	7.14	0.01	221.2	0.4
730	0	0.01	0.02	1.68	7.14	0.02	221.1	0.5
1111	0	0.01	0	16.47	7.17	0.01	222.1	0.3
J parameter	error	J Age monitor (Ma)	Age monitor (Ma) Error	Mass Discrimination (1+e)	Date Irradiation			
1.81E-02	6.44E-05	1081	1.1891	1.007015	4/16/12			

적 변화, 또는 후퇴변성작용 중에 일어난 연성 변형 작용에서 새로운 운모가 성장하는 경우에 발생하는 것으로 해석된다. 이 경우 유체 순환이 중요한 역할

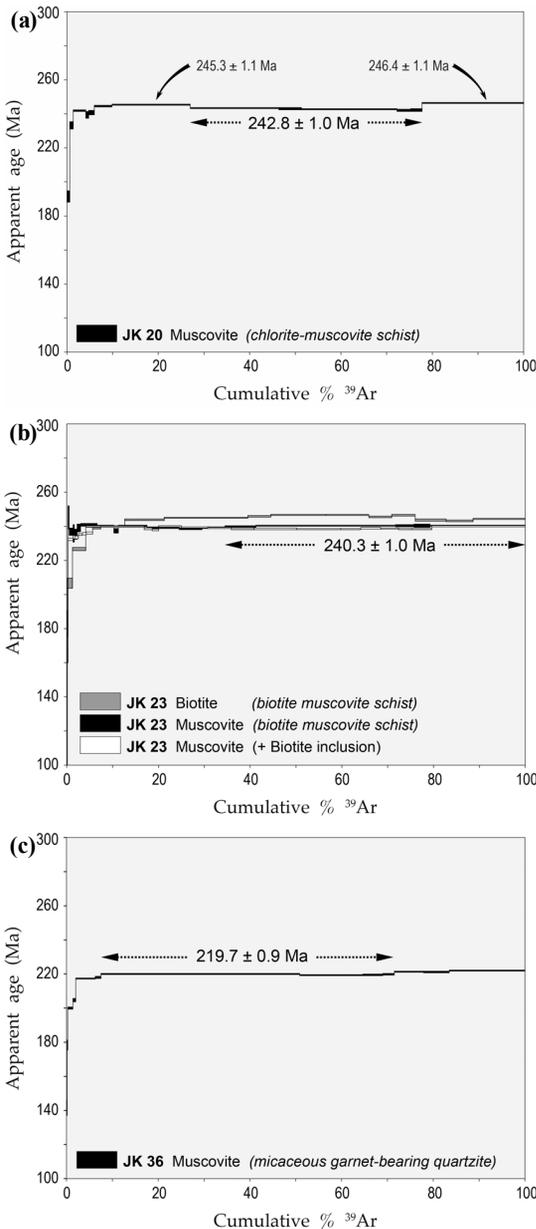
을 한다. 백운모 내에서 부분적인 재결정화에 의해 각각 다른 화학 성분을 가지는 부분들은 아르곤 성분 역시 다르며, 레이저 단계가열법으로 분석하는

동안 이들은 각기 다른 온도구간에서 방출된다. 상 속핵이나 재결정화작용을 받지 않은 부분은 저온-고 온 단계에서 기체가 방출되며, 새로 생성되거나 재결정화된 부분은 중간 단계에서 말안장의 밀 부분을 형성한다. 만일 안장 모양의 연대 스펙트럼에서 젊은 부분이 장기적인 재결정화작용의 마지막 과정을

나타낸다면, 해당 스펙트럼에서 가장 오래된 연대와 젊은 연대의 간격은 변성작용의 지속기간을 의미할 수 있다. 시료 JK20의 말안장 모양 연대 스펙트럼의 경우 백운모 입자가 변성과정 초기,  $246 \pm 1$  Ma에 변성작용을 받았으며, 243 Ma에 재결정화된 것으로 보인다. 이에 따르면 냉각되는 동안 일어난 재결정화작용은 약 3 Ma 정도 걸린 것으로 생각된다.

240에서 260 Ma에 해당하는 동위원소 연대는 한 반도를 이루는 암석에서 흔히 산출된다. de Jong *et al.* (2014)와 Han (2014)은 안면도의 저변성작용을 받은 변성이질암에서 분리한 백운모 단입자를 분석하여 말안장 모양의  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  연대 스펙트럼을 얻었다. 3개의 백운모 연대 스펙트럼으로부터 237, 240, 243 Ma의 일치하는 저온-고온 단계 연대를 얻었으며 이들은 228-231 Ma(말안장 밀 부분, 또는 가평형 연대)에 재결정화된 것으로 해석되었다. 이를 바탕으로 de Jong *et al.* (2014)와 Han (2014)은 태안층이  $240 \pm 3$  Ma의 변형-변성작용에 영향을 받았던 것으로 논의하였다. 북부 경기육괴의 상부에서 산출된 ca. 243 Ma와 240 Ma의 거의 일치하는 백운모 (가)평형 연대들은 중기 트라이아스기에 해당하는 이 사건이 광역적이었을 가능성을 암시한다. 함우라늪 부성분 광물의 245-260 Ma의 연대들은 경기육괴(Suzuki, 2009; Lee *et al.*, 2014; Yengkhom *et al.*, 2014), 임진강대(Cho *et al.*, 1996, 2005; Kim *et al.*, 2014), 그리고 비봉 에클로자이트(Park *et al.*, 2013)에서 발견된다. 이는 아마도 산출된  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  백운모 연대가 충돌 당시의, 또는 고압 변성작용을 받은 암석의 용기 시기와 관련이 있음을 지시하는 것으로 보인다.

경기육괴 최상부의 압쇄암질 규암(JK36)에서 산출된 ca. 220 Ma 백운모 연대는 적성 지역에서 선행하여 일어난 재결정화작용이 지속되었거나, 또는 재개되었음을 지시한다. 이 지역에서 경기육괴의 최상부에 존재하는 경기전단층은  $226 \pm 1$  Ma의 Rb-Sr 백운모-전암 등시선 연대가 산출되었으며(Kim *et al.*, 2000), 연성 정단층이 일어난 시기로 해석된다. 한반도에는 후기 트라이아스기 관입암체들의 지화학 성분이나(e.g., Williams *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011a), 주요 변형작용 후에 관입한 사실(de Jong *et al.*, 2014; Han, 2014)을 바탕으로, 충돌 후에 관입된 것으로 해석되는데 이들이 받은 압쇄암화작용을 통해서 연성 변형작용이 한반도의 다른 곳에서도 진행되었음



**Fig. 3.** Laser step-heating age spectra of mineral single grains (a) JK20, (b) JK23, and (c) JK36.

을 확인할 수 있다. 안면도를 관입한 섬장암 역시 초압쇄암 구조를 보여주며,  $229.6 \pm 3.5$  Ma의 관입연대(de Jong *et al.*, 2014; Han, 2014)는 이 연성 변형 작용의 상한을 제시한다.

## 5. 결론

북부 경기육괴의 상부에서 산출되는 후퇴변성작용과 압쇄암화작용을 받은 암석에서 분리한 백운모 단입자를 대상으로 레이저 단계가열법을 실시하였다. 그 결과, 운모 편암으로부터  $242.8 \pm 1.0$  Ma와  $240.3 \pm 1.0$  Ma (1 $\sigma$ )의  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  연대를 얻었으며, 또한 강한 선구조를 가진 판상의 함석류석 암쇄암질 규암으로부터  $219.7 \pm 0.9$  Ma (1 $\sigma$ )의 연대가 산출되었다. 백운모 연대 스펙트럼 중에 약간의 말안장 모양을 가지는 경우가 있으며, 입자 내에 존재하는 화학적 불균질성에 의한 것으로 알려져 있다. 이는 부분적인 재결정화와 동시에 일어나는 화학적 변화, 또는 변형 중에 새로운 운모가 성장하는 경우인 것으로 해석된다. ~243-240 Ma의 백운모 연대는 충돌 중이거나 후에 일어난 용기의 초기 단계가 기록된 것으로 보이며, 압쇄암질 규암에서 얻어진 ~220 Ma 백운모 연대는 지속된, 혹은 재개된 재결정화작용으로 해석된다. 압쇄암질 규암의 백운모 연대는 근접한 경기전단대에서 얻어진 결과와 유사하며, 안면도의 ~230 Ma에 관입한 충돌 후 섬장암에서 보이는 압쇄암화작용의 시기와도 비교될 수 있을 것으로 보인다. 본 연구에서 제시된  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  연대는 경기육괴 서부 흥성 지역의 아나텍시스 편마암과 안면도 태안층에 영향을 주었던 ~230 Ma의 열 공급이 경기육괴 북부에 영향을 미치지 않았다는 것을 보여준다. 또한 한반도에서의 충돌 사건은 ~243 Ma부터 ~220 Ma에 달하는 장기적인 재결정화 작용을 수반하였으나 한반도 전역에서 발생한 지질학적 사건들이 시기적으로 전부 일치하지는 않는 것으로 판단된다.

## 사 사

이 논문은 2011년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업(NRF-2011-0012900)과 서울대학교 기초과학연구원 신인교수 정착금의 지원을 받아 수행되었습니다. 적성 지역에서 야외답사를 하

는 동안 많은 도움을 준 김대영, 영어로 작성된 논문을 한국어로 번역하고 편집을 도와준 한석영, 김주환에게 감사를 포함합니다. 논문을 심사하면서 아낌없이 조언해주신 두 분의 심사자님께 감사드립니다.

## REFERENCES

- Alexandrov, P., Ruffet, G. and Cheilletz, A., 2002, Muscovite recrystallization and saddle-shaped  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age spectra: example from the Blond granite (Massif Central, France). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66, 1793-1807.
- Castonguay, S., Ruffet, G. and Tremblay, A., 2007, Dating polyphase deformation across low-grade metamorphic belts: An example based on  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  muscovite age constraints from the southern Quebec Appalachians, Canada. *Geological Society of America Bulletin*, 119, 978-992.
- Cheilletz, A., Ruffet, G., Marignac, C., Kolli, O., Gasquet, D., Féraud, G. and Bouillin, J.P., 1999,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of shear zones in the Variscan basement of Greater Kabylia (Algeria). Evidence of an Eo-Alpine event at 128 Ma (Hauterivian-Barremian boundary): geodynamic consequences. *Tectonophysics*, 306, 97-116.
- Cho, D.L., Kwon, S., Jeon, E.Y. and Armstrong, R., 2005, SHRIMP U-Pb zircon ages of metamorphic rocks from the Samgot unit, Yeoncheon complex in the Imjingang belt, Korea: Implications for the Phanerozoic tectonics of East Asia [abs.], 2005 Annual Meeting of the Geological Society of America, Salt Lake City (USA), October 16-19, 2005, paper no. 171-6
- Cho, M., Cheong, W.-S., Ernst, W.G., Yi, K. and Kim, J.-M., 2013a, SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons in meta-sedimentary rocks of the central Ogcheon fold-thrust belt, Korea: Evidence for tectonic assembly of Paleozoic sedimentary protoliths. *Journal of Asian Earth Sciences*, 63, 234-249.
- Cho, M., Kim, Y. and Ahn, J., 2007, Metamorphic Evolution of the Imjingang Belt, Korea: Implications for Permian-Triassic Collisional Orogeny. *International Geology Review*, 49, 30-51.
- Cho, M., Yang, S.-Y., Kim, T. and Yi, K., 2013b, Dynamic recrystallization and metamorphic evolution of ca. 1.85 Ga quartzofeldspathic and cordierite-garnet gneisses, western Gyeonggi Massif, Korea. *Geophysical Research Abstracts*, 15, EGU2013-6631.
- Cho, Y., Cho, M. and Lee, S.R., 1996, Granulite-facies metamorphism and P-T evolutionary path of cordierite gneiss in the Cheongpyeong-Yangpyeong area. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 5, 52-65 (in Korean)

- with English abstract).
- Choi, D.K., 2014, *Geology and Tectonic Evolution of the Korean Peninsula*. Seoul National University Press, 277 pp.
- Choi, D.K., Woo, J. and Park, T.-Y., 2012, The Okcheon Supergroup in the Lake Chungju area, Korea: Neoproterozoic volcanic and glaciogenic sedimentary successions in a rift basin. *Geosciences Journal*, 16, 229-252.
- Choi, S.G., Rajesh, V.J., Seo, J., Park, J.W., Oh, C.W., Park, S.J. and Kim, S.W., 2009, Petrology, geochronology and tectonic implications of Mesozoic high Ba-Sr granites in the Haemi area, Hongseong Belt, South Korea. *The Island Arc*, 18, 266-281.
- Chough, S.K., 2013, *Geology and Sedimentology of the Korean Peninsula*. Elsevier, 363 pp.
- Chough, S.K., Lee, D.-J. and Ree, J.-H., 2013, Whereabouts of the collision belt between the Sino-Korean and South China blocks in the northeast Asian margin. *Geosciences Journal*, 17, 397-401.
- Cliff, R.A., Jones, G., Choi, W.C. and Lee, T.J., 1985, Strontium isotopic equilibration during metamorphism of tillites from the Ogcheon Belt, South Korea. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 90, 346-352.
- Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. and Fan, J.-X., 2013, The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes*, 36, 199-204.
- de Jong, K. and Ruffet, G., 2014, Tectonic implications of the very fast cooling shown by concordant 230-228 Ma  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  laser probe hornblende and biotite single grain ages in the Hongseong area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 50(5), 611-626, DOI 10.14770/jgsk.2014.50.5.611.
- de Jong, K., Han, S., Ruffet, G. and Yi, K., 2014, First age constraints on the timing of metamorphism of the Taean Formation, Anmyeondo: concordant 233 Ma U-Pb titanite and 231-229 Ma  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  muscovite ages. *Journal of the Geological Society of Korea*, 50(5), 593-609, DOI 10.14770/jgsk.2014.50.5.593.
- de Jong, K., Wang, B., Faure, M., Shu, L.S., Cluzel, D., Charvet, J., Ruffet, G. and Chen, Y., 2009, New  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age constraints on the Late Palaeozoic tectonic evolution of the western Tianshan (Xinjiang, northwestern China), with emphasis on late Permian fluid ingress. *International Journal of Earth Sciences*, 98, 1239-1258.
- Grove, M. and Harrison, T.M., 1996,  $^{40}\text{Ar}$ -diffusion in Fe-rich biotite. *American Mineralogist*, 81, 940-951.
- Guo, J., Zhai, M.G., Oh, C.W. and Kim, S.W., 2005, 230 Ma Eclogite from Bibong, Hongseong area, Gyeonggi Massif, South Korea: HP metamorphism, zircon SHRIMP U-Pb ages and tectonic implication. *Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft*, 150, 47.
- Han, S.Y., 2014, Age constraints on sedimentation and metamorphism of the Taean Formation obtained by SHRIMP U-Pb and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  laser probe geochronology. Unpubl. MSc. Thesis, Seoul National University, 75 pp.
- Harrison, T.M., Célérier, J., Aikman, A.B., Hermann, J. and Heizler, M.T., 2009, Diffusion of  $^{40}\text{Ar}$  in muscovite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, 1039-1051.
- Kee, W.S., (editor), 2011, Tectonic evolution of the upper crustal units in the mid-western part of the Korean peninsula. Report GP2009-012-01-2009(3), Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 254 p (in Korean with English abstract).
- Kim, H., Cheong, C.-S. and Cho, M., 2007, The effect of allanite inclusions on U-Pb step-leaching ages and Sm-Nd isotope systematics of garnet from the Ogcheon metamorphic belt, South Korea. *Chemical Geology*, 236, 27-41.
- Kim, J.-M., Cheong, C.-S., Lee, S.-R., Cho, M. and Yi, K., 2008, In-situ U-Pb titanite age of the Chuncheon amphibolite: Evidence for Triassic regional metamorphism in central Gyeonggi massif, South Korea, and its tectonic implication. *Geosciences Journal*, 12, 309-316.
- Kim, J.-N., Ree, J.-H., Kwon, S.-T., Park, Y., Choi, S.-J., and Cheong, C.-S., 2000, The Kyonggi shear zone of the central Korean Peninsula: late orogenic imprint of the North and South China collision. *Journal of Geology*, 108, 469-478.
- Kim, S.W., 2005, Amphibole  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Geochronology from the Okcheon Metamorphic Belt, South Korea and its Tectonic Implications. *Gondwana Research*, 8, 385-402.
- Kim, S.W., Kwon, S.-T., Koh, H.J., Yi, K., Jeong, Y. and Santosh, M., 2011a, Geotectonic framework of Permo-Triassic magmatism within the Korean Peninsula. *Gondwana Research*, 20, 865-889.
- Kim, S.W., Kwon, S., Santosh, M., Williams, I.S. and Yi, K., 2011b, A Paleozoic subduction complex in Korea: SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications. *Gondwana Research*, 20, 890-903.
- Kim, S.W., Oh, C.W., Williams, I.S., Rubbato, D., Ryu, I.-C., Rajesh, V.J., Kim, C.-B., Guo, J. and Zhai, M., 2006, Phanerozoic high-pressure eclogite and intermediate-pressure granulite facies metamorphism in the Gyeonggi Block, South Korea: implications for the eastward extension of the Dabie-Sulu continental collision zone. *Lithos*, 92, 357-377.

- Kim, S.W., Santosh, M., Park, N. and Kwon, S., 2011c, Forearc serpentinite mélange from the Hongseong suture, South Korea. *Gondwana Research*, 20, 852-864.
- Kim, S.W., Williams, I.S., Kwon, S. and Oh, C.W., 2008, SHRIMP zircon geochronology and geochemical characteristics of metaplutonic rocks from the southwestern Gyeonggi Block, Korea: implications for Paleoproterozoic to Mesozoic tectonic links between the Korean Peninsula and eastern China. *Precambrian Research*, 162, 475-497.
- Kim, Y., Aum, H.W., Cheong, W., Kim, T. and Yi, K., 2014, An occurrence of the post-orogenic Triassic strata on Deokjeok Island, western Gyeonggi massif, Korea. *Geosciences Journal*, 18, 137-147.
- Kim, Y., Cheong, C.-S., Lee, Y. and Williams, I.S., 2009, SHRIMP allanite U-Th-Pb dating of bimodal Triassic metamorphism of Neoproterozoic tonalitic gneisses, Daeijak Island, central Korea. *Geosciences Journal*, 13, 305-315.
- Kwon, S., Sajeev, K., Mitra, G., Park, Y., Kim, S.W. and Ryu, I.-C., 2009, Evidence for Permo-Triassic collision in Far East Asia: The Korean collisional orogeny. *Earth and Planetary Science Letters*, 279, 340-349.
- Lee, B.C., Oh, C.W., Yengkhom, K.S. and Yi, K., 2014, Paleoproterozoic magmatic and metamorphic events in the Hongcheon area, southern margin of the Northern Gyeonggi Massif in the Korean Peninsula, and their links to the Paleoproterozoic orogeny in the North China Craton. *Precambrian Research*, 248, 17-38.
- Lee, J.Y., Marti, K., Severinghaus, J.P., Kawamura, K., Yoo, H.S., Lee, J.B. and Kim, J.S., 2006, Aredetermination of the isotopic abundances of atmospheric Ar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 4507-4512.
- Lee, S.R. and Cho, K., 2012, Precambrian Crustal Evolution of the Korean Peninsula. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 21, 89-112 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.R. and Cho, M., 2003, Metamorphic and tectonic evolution of the Hwacheon granulite complex, central Korea: composite P-T path resulting from two distinct crustal thickening events. *Journal of Petrology*, 44, 197-225.
- Lee, S.R., Cho, M., Cheong, C.-S., Kim, H. and Wingate, M.T.D., 2003, Age, geochemistry, and tectonic significance of Neoproterozoic alkaline granitoids in the northwestern margin of the Gyeonggi massif, South Korea. *Precambrian Research*, 122, 297-310.
- Lim, S.-B., Chun, H.Y., Kim, Y.B., Kim, B.C. and Cho, D.-L., 2005, Geologic ages, stratigraphy and geological structures of the metasedimentary strata in Bibong-Yeonmu area, NW Okcheon belt, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 41, 335-368 (in Korean with English abstract).
- Mark, D.F., Stuart, F.M. and De Podesta, M., 2011, New high-precision measurements of the isotopic composition of atmospheric argon. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 7494-7501.
- Oh, C.W., 2012, The tectonic evolution of South Korea and Northeast Asia from Paleoproterozoic to Triassic. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 21, 59-87.
- Oh, C.W., Choi, S.-G., Seo, J., Rajesh, V.J., Lee, J.H., Zhai, M. and Peng, P., 2009, Neoproterozoic tectonic evolution of the Hongseong area, southwestern Gyeonggi Massif, Korea; implication for the tectonic evolution of Northeast Asia. *Gondwana Research*, 16, 272-284.
- Oh, C.W., Kim, S.W. and Williams, I.S., 2006a, Spinel granulite in Odesan area, South Korea: Tectonic implications for the collision between the North and South China blocks. *Lithos*, 92, 557-575.
- Oh, C.W., Kim, S.W., Choi, S.G., Zhai, M., Guo, J. and Sajeev, K., 2005, First finding of eclogite facies metamorphic event in South Korea and its correlation with the Dabie-Sulu collision belt in China. *Journal of Geology*, 113, 226-232.
- Oh, C.W., Kim, S.W., Ryu, I.-C., Okada, T., Hyodo, H. and Itaya, T., 2004, Tectono-metamorphic evolution of the Okcheon Metamorphic Belt, South Korea: Tectonic implications in East Asia. *The Island Arc*, 13, 387-402.
- Oh, C.W., Sajeev, K., Kim, S.-W. and Kwon, Y.W., 2006b, Mangerite magmatism associated with a probable Late-Permian to Triassic Hongseong-Odesan collision belt in South Korea. *Gondwana Research*, 9, 95-105.
- Park, S.-I., Kim, S.W., Khim, Y.H., Yi, K. and Kwon, S., 2013, Origin of the Bibong eclogite, Hongseong Korea. 2013 International Association for Gondwana Research Annual Convention and 10<sup>th</sup> International Symposium on Gondwana to Asia. Daejeon (Korea), 30 September-2 October, 2013. IAGS Conference Series 14, Abst. Vol., 99-100.
- Parrish, R.R. and Noble, S.R., 2003, Zircon U-Th-Pb Geochronology by Isotope Dilution - Thermal Ionization Mass Spectrometry (ID-TIMS). *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53, 182-213.
- 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.
- Renne, P.R., Balco, G., Ludwig, R.L., Mundil, R. and Min, K., 2011, Response to the comment by W.H. Schwarz *et al.* on "Joint determination of  $^{40}\text{K}$  decay constants and  $^{40}\text{Ar}^*/^{40}\text{K}$  for the Fish Canyon sanidine standard, and improved accuracy for  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology" by

- P.R. Renne *et al.* (2010). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 5097-5100.
- Renne, P.R., Mundil, R., Balco, G., Min, K. and Ludwig, R.L., 2010, Joint determination of  $^{40}\text{K}$  decay constants and  $^{40}\text{Ar}^*/^{40}\text{K}$  for the Fish Canyon sanidine standard, and improved accuracy for  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 5349-5367.
- Ruffet, G., Féraud, G. and Amouric, M., 1991, Comparison of  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  conventional and laser dating of biotites from the North Trégor Batholith. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, 1675-1688.
- Ruffet, G., Féraud, G., Ballèvre, M. and Kiénast, J.R., 1995, Plateau ages and excess argon in phengites: an  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  conventional laser probe study of Alpine micas (Sesia zone, Western Alps, northern Italy). *Chemical Geology* 121, 327-343.
- Seo, J., Choi, S.-G. and Oh, C.W., 2010, Petrology, geochemistry, and geochronology of the post-collisional Triassic mangerite and syenite in the Gwangcheon area, Hongseong Belt, South Korea. *Gondwana Research*, 18, 479-496.
- Suzuki, K., 2009, CHIME dating and age mapping of monazite in granulites and paragneisses from the Hwacheon area, Korea: implication to correlations to Chinese cratons. *Geosciences Journal*, 13, 275-292.
- Tartèse, R., Ruffet, G., Poujol, M., Boulvais, P. and Ireland, T.R., 2011, Simultaneous resetting of the muscovite K-Ar and monazite U-Pb geochronometers: a story of fluids. *Terra Nova*, 23, 390-398.
- Williams, I.S., 2001, Response of detrital zircon and monazite, and their U-Pb isotopic systems, to regional metamorphism and host-rock partial melting, Cooma Complex, southeastern Australia. *Australian Journal of Earth Science*, 48, 557-580.
- Williams, I.S., Cho, D.L. and Kim, S.W., 2009, Geochronology, and geochemical and Nd-Sr isotopic characteristics of Triassic plutonic rocks in the Gyeonggi Massif, South Korea: Constraints on Triassic post-collisional magmatism. *Lithos*, 107, 239-256.
- Yengkhom, K.S., Lee, B.C., Oh, C.W., Yi, K. and Kang, J.H., 2014, Tectonic and deformation history of the Gyeonggi Massif in and around the Hongcheon area, and its implications in the tectonic evolution of the North China Craton. *Precambrian Research*, 240, 37-59.
- Yi, K. and Cho, M., 2009, SHRIMP Geochronology and Reaction Texture of Monazite from a Retrogressive Transitional layer, Hwacheon Granulite Complex, Korea. *Geosciences Journal*, 13, 293-304.
- Zhai, M., Guo, J., Li, Z., Chen, D., Peng, P., Li, T., Hou, Q. and Fan, Q., 2007, Linking the Sulu UHP belt to the Korean Peninsula: Evidence from eclogite, Precambrian basement, and Paleozoic sedimentary basins. *Gondwana Research*, 12, 388-403.

---

투 고 일 : 2014년 11월 10일

심 사 일 : 2014년 11월 10일

심사완료일 : 2014년 11월 27일