

# 홍성 지역에서 산출된 230-228 Ma $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 레이저 탐침 각섬석, 흑운모 일치 연대: 고속 냉각 작용에 대한 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

본 연구에서는 홍성 지역에서 산출되는 코로나 구조를 갖는(corona-textured) 석류석 각섬암의 각섬석으로부터 230.1 ± 1.0 Ma와 229.8 ± 1.0 Ma (1s)로 일치하는  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  평형(plateau), 가평형(pseudo-plateau) 연대를 얻었다. 이 연대는 약간 더 오래된 각섬암에 있는 흑운모의 228.1 ± 1.0 Ma 평형 연대와 일치한다. 다른 폐쇄 온도를 갖는 각섬석과 흑운모에서 비슷한 연대가 산출된 것은 광물들이 100-150°C/Ma의 매우 빠른 속도로 냉각되었음을 의미한다. 이  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  연대가 다른 연구에서 측정된 경기육괴와 홍성 지역의 243-229 Ma(오차 2-4%, 평균: 234.5 Ma) 저어콘 U-Pb 연대와 비슷한 것도 냉각이 효과적으로 일어났음을 의미한다. 빠른 냉각 속도는 기본적으로 지구조의 변화를 필요로 한다. 그러므로 본 연구에서는 분석자료를 바탕으로 상부 트라이아스기에 한반도의 지각에 영향을 주었던 화성 및 변성 작용이 지구조 운동에 의해 발생되어 비교적 짧은 기간 동안 지속된 활동이라는 관점에서 논의를 진행한다. 또한 한반도에 널리 분포한 237-219 Ma 연대의 K와 Mg가 풍부한 맨틀 기원 화성암에서 알 수 있듯이, 충돌 후 암석권 하부의 박리, 혹은 섭입판이 단절되는 사건과 연관이 있을 것이다.

**주요어:** 지질연대학,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  레이저 탐침, 고속 냉각, 트라이아스기, 한반도

**Koenraad de Jong and Gilles Ruffet, 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. v. 50, no. 5, p. 611-626**

**ABSTRACT:** We obtained identical  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  (pseudo) plateau ages of 230.1 ± 1.0 and 229.8 ± 1.0 Ma (1s) on two hornblendes from garnet-bearing corona-textured amphibolites in the Hongseong area. These ages are concordant with the 228.1 ± 1.0 Ma plateau age of biotite in the slightly older amphibolite. The concordant ages of hornblende and biotite, minerals with very different closure temperatures, show that the samples cooled very rapidly, probably in the order of 100-150°C/Ma. The efficiency of cooling is further underlined by the near-coincidence of these  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages with 243-229 Ma (error 2-4%, average: 234.5 Ma) zircon U-Pb ages in the Gyeonggi Massif and the Hongseong belt, reported in the literature. Very fast cooling rates require a fundamental tectonic control. Consequently, we discuss our data in the context of a relatively short-lived, tectonically induced, magmatic and metamorphic pulse that affected the crust in Korea in the Late Triassic. This could have been post-collisional delamination of the lower crust and uppermost mantle, and/or oceanic slab break-off to which the 237-219 Ma mantle-sourced potassic Mg-rich magmatic rocks that are widespread in Korea, also points.

**Key words:** Geochronology,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  laser probe, very fast cooling, 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)

## 1. 서 언

고원생대 이후로 이루어진 지각 운동에 의해 형성되었으며, 그들 중 많은 지역은 지구조 진화 과정에서 세계적으로 널리 분포한 수많은 산지 지형들은 지각의 신장에 따른 K, Mg가 풍부한 맨틀 기원의

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

마그마의 관입이 일어났다(Liégeois and Black, 1987; von Blanckenburg and Davies, 1995; Brown and Dallmeyer, 1996; Platt *et al.*, 1998; Gîrbacea and Frisch, 1998; Turner *et al.*, 1999; Ledru *et al.*, 2001; Bodorkos *et al.*, 2002; Schulmann *et al.*, 2008; Dilek *et al.*, 2009; Molnar and Stock, 2009; von Raumer *et al.*, 2014). 이러한 화성활동은 대륙 충돌이 일어난 후 암석권의 박층화(thinning) (Platt *et al.*, 1998; Molnar and Stock, 2009) 및 암석권 하부 지각이나 상부 맨틀의 박리(delamination) (Gîrbacea and Frisch, 1998; Turner *et al.*, 1999), 섭입한 해양판의 단절(Liégeois and Black, 1987; von Blanckenburg and Davies, 1995; Brown and Dallmeyer, 1996; Ledru *et al.*, 2001; Schulmann *et al.*, 2008; Dilek *et al.*, 2009)로 인해 조산대의 두께가 얇아지는 후-충돌 환경(post-collisional setting)에서 단기간 동안 활성화하는 것으로 알려졌다. 한반도의 지구조 시스템이 명확하게 밝혀 지지지는 않았지만, 트라이아스기 후기의 화성작용은 일반적으로 판이 충돌한 이후 인장력이 작용하는 지구조 환경으로의 변화(Williams *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011a)에 의해 발생한 것으로 해석되며 이는 암석권이 박리(Choi *et al.*, 2009)되어 떨어져 내리거나 해양판이 단절(Seo *et al.*, 2010; Oh, 2012; Choi, 2014)됨에 따라 연약권이 융기하는 것과 관련하여 설명되기도 한다. 한반도에서의 지각 신장은 경기육괴 상부에서 드물게 관찰되는 연성 정단층이나(Kim *et al.*, 2000; Han *et al.*, 2013) 임진강대에서 변성도가 하부 방향으로의 증가하는 것과, 인접한 암상의 변성도 차이(Ree *et al.*, 1996)로서 추측할 수 있다.

앞에서 언급된 과정을 통해 고온의 연약권 맨틀이 암석권으로 개입하는 경우 결과적으로 암석권의 지온 구배(geotherm)가 상승하여 중부 지각에서의 규장질, 고철질 화성활동을 야기하게 된다. 또한 하부 지각으로 열 공급이 상승하여 변칙적인 열 분포를 보이며, 이 영향은 중부, 상부 지각까지 미치게 된다(Bakker *et al.*, 1989; Loosveld and Etheridge, 1990; van Wees *et al.*, 1992; Bodorkos *et al.*, 2002). 거대한 양의 마그마가 이류(advection)를 통해 열을 공급한다면 중부 지각은 단시간에 고온까지 상승할 수 있으며(Loosveld and Etheridge, 1990; Bodorkos *et al.*, 2002) 지하 20~30 km 깊이에서도 지온이 700-900°C까지 올라 고온/중저압 변성작용에 해당하는 환경이 생성될 수 있다.

이러한 일련의 과정에 의하여 지온이 높게 상승한 경우,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  시스템과 같은 대부분의 중-저온 지질 연대측정 시스템은 변성작용이나 이후 지각의 융기 시기를 측정하는 데에 한계가 있다. 그렇지만 예외적으로, 고변성작용을 수반하는 지구조 운동이 단기간에 이루어졌을 때, 서로 다른 폐쇄온도(closure temperature)를 가진 광물들에게서 비슷한 연대가 산출되는 경우가 존재한다(Dallmeyer *et al.*, 1986; Dokka *et al.*, 1986; Goodwin and Renne, 1991; Baldwin *et al.*, 1993, 2004; Brown and Dallmeyer, 1996; Platt *et al.*, 1998; Charles *et al.*, 2012; Cubley *et al.*, 2013a, 2013b; Daoudene *et al.*, 2013). 수치 모델링 계산 결과, 아주 빠른 냉각속도(>100°C/Ma)는 단순한 침식에 의한 지각 융기가 아닌, 지각 확장이나 중력 분산(gravity spreading)과 같은 지구조운동과 관련된 것으로 알려졌다(van Wees *et al.*, 1992; Rey *et al.*, 2009).

이를 바탕으로, 이 논문에서는 경기육괴 서부 홍성 지역에서 산출하는 각섬암을 대상으로  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  단입자 레이저 탐침 측정법을 수행하여 흑운모(228 Ma)와 각섬석(230 Ma)에서 얻어진 양질의 연대를 보고한다. 우리나라를 포함하는 부성분광물을 이용하여 최고변성작용의 시기를 측정하는 대신, 이 연구에서는 융기에 따른 후퇴변성작용에 수반하여 재결정화된 주 구성 광물에 대하여  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  단입자 레이저 탐침 단계 가열법(step-heating technique)을 적용하였다. 이러한 접근법은 한반도 지각의 지구조운동, 변성작용이 지속된 기간, 그리고 각 과정이 진행된 속도에 대한 단서를 제공할 수 있다. de Jong *et al.* (2014)은 홍성에서 약 50 km 떨어진 안면도에 분포하는 녹색편암상의 변성퇴적층을 대상으로 연대측정을 실시하여, 변성 백운모와 티타나이트에서 233-230 Ma의  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  연대와 U-Pb SHRIMP 연대를 보고하였다(그림 1). 이 퇴적층을 관입한 섬장암의 U-Pb 저어콘 연대 역시 229 Ma로 일치한다. 이 결과들은 상부 트라이아스기 화성, 변성작용으로 인해, 구조적으로 다른 위치에 놓인 암석들이 단시간에 강한 영향을 받았다는 것을 의미하며, 이는 지구조운동이 진행된 속도에 대한 정보의 중요성을 강조한다.

## 2. 지질 환경

한반도는 주로 ~2.7 Ga 부근에 맨틀에서 분리된

선캠브리아기 대륙 지각과 ~2.5 Ga에 추가된 암석들로 구성되어 있다(Lee and Cho, 2012). 북에서 남으로 남령, 경기, 영남 육괴의 3개의 육괴로 분류되며(그림 1), 주로 고원생대(2.3-1.8 Ga) 고변성 편마암과 이를 덮고 있는 암석으로 구성된다(Lee and Cho, 2012). 이 암석들은 ~1.9-1.8 Ga 이후로 적어도 고생대 초까지 안정한 대륙지괴를 형성한 것으로 추정되며, 경기육괴는 주로 고원생대 중기(~1.93-1.83 Ga) 고변성작용을 받은 편마암과 다양한 변성 퇴적암(e.g., Lee and Cho, 2012; Lee et al., 2014), 그리고 일부는 경기육괴 서부와 중부에서 산출되는 신원생대(0.9-0.75 Ga)의 화성암과 퇴적암으로 구성된다(Lee et al., 2003; Kim et al., 2008; Oh et al., 2009). 또한, 경기육괴 서부에서는 고생대의 정편마암, 변성 퇴적암이 분포하며, 또한 변성 영기성암(metabasite), 규장질암, 렌즈상으로 나타나는 사문암화된 초고철질 암석이 함께 산출된다(월현리 복합체; Kim and Kee et al., 2010; Kim et al., 2011b, 2011c).

이 세 육괴들은 임진강대와 옥천대에 의해서 나누

어져 있으며 두 지역은 후기 신원생대에서 중-후기 고생대까지 여러 차례의 변성과 변형을 받은 변성퇴적암과 변성화산암들로 구성되어 있다(그림 1; e.g., Kim, 2005; Lim et al., 2005; Cho et al., 2007, 2013a; Kee et al., 2011; Choi et al., 2012; Lee and Cho, 2012; Chough, 2013; Choi, 2014). 여러 차례 변형된 중기 고생대 녹색 편암상의 변성 저탁암(태안층; So et al., 2013 and references therein)이 경기육괴의 서부 경계를 따라 구조적으로 최상부에서 불연속적으로 산출되며(그림 1), 임진강대에 존재하는 층과 비슷한 모습을 보인다. 임진강대, 옥천대, 태안층은 트라이아스기 후기에 다시 다양한 변성작용을 받았다(Kee et al., 2011; Kim et al., 2011; Lee and Cho, 2012; Oh, 2012) 특히 홍성 지역의 심한 후퇴 변성작용을 받은 고압 백립암을 포함한 경기육괴의 암석과 중압/중-고온의 바로비안 타입(Barrovian type) 조건(T = 500-800 °C; P : 1.2 GPa 이상 : Cho et al., 2007)에서 지구조운동과 동시기에 재결정화된 임진강대의 암석은 트라이아스기의 변성작용에 상당한 영향을 받은 것으로 알려졌다. 변성 작용의 시기는 우라늄을 포함한 부성분광물들의 동위원소 연대 측정을 통해 253-215 Ma 로 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 et al., 2011; Lee et al., 2014; Yengkhom et al., 2014). 옥천 변성대(그림 1)의 암석들 또한 여러 번의 중첩되는 변성과 변형 작용의 영향을 받았지만 비교적 더 낮은 온도, 압력 조건하에 있었다(T = 500-650 °C; P = 0.4-0.8 GPa: Cho and Kim, 2005). 그 후에 암석들은 지표로 융기하는 동안 그보다 더 낮은 온도, 압력 하에서(T = 350-500 °C; P = 0.1-0.5 GPa: Cho and Kim, 2005) 지역적으로 후퇴변성작용과 수화 반응(hydration)을 겪었다. 광물의 동위 원소 연대는 ~290 에서 ~160 Ma (10-15%의 오차)로 변하며 이는 옥천대 하부에 놓이는 남부 경기육괴의 연령대 범위와 비슷하다(e.g. Cliff et al., 1985; Cheong et al., 2003; Oh et al., 2004; Kim, 2005; Kim et al., 2007). 더 오래된 연대는 페름기-트라이아스기 변성 작용의 첫 번째 단계 이후에 이루어진 냉각에 의한 것으로 해석되고(Oh et al., 2004; Kim et al., 2007), 다른 한편 200에서 160 Ma의 연대는 변성 작용의 두 번째 단계 중에 부분적으로 재결정 작용이 일어나거나 다

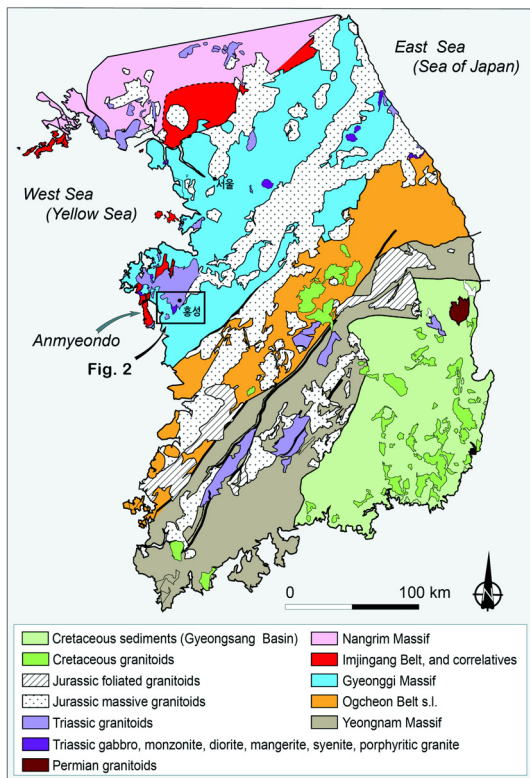


Fig. 1. Simplified tectonic map of Korea.

시 평형 상태에 도달한 것을 나타내는 것으로 판단된다(Cliff *et al.*, 1985; Kim *et al.*, 2007).

임진강대와 옥천대는 중요한 지구조 경계로, 혹은 충돌대로 여겨진다(Ree *et al.*, 1996; Chough *et al.*, 2000; Cho *et al.*, 2007, 2013a). 앞에서 언급된 사문암들은 경기육괴의 서부 경계를 따라 분포하며, 본 연구에서 시료를 채취한 지역인 홍성 지역의 사문암들이다(그림 2). 그 중 일부에서는 종종 녹회석 잔류물을 석류석 반정에 포함된 형태로 지닌 고철질 백립암이 관찰되며, 이들은 강한 후퇴변성작용의 영향을 받았다. 이들은 트라이아스기에(Guo *et al.*, 2005; Kim, S.W. *et al.*, 2006) 775-850°C와 1.65-2.1 GPa의(비봉, 백동 압체: Oh *et al.*, 2005; Kim, S.W. *et al.*, 2006; Zhai *et al.*, 2007) 조건 아래에서 변성작용을 받았음이 밝혀졌다. 이를 바탕으로, Kim *et al.* (2011b, c)은 이 암석들을 경기육괴의 일부가 아니라고 여기고, 이 지역을 홍성 충돌대로 정의하였다. 그리고 이 지역에서 고생대 후기에서 중생대 초기까지 판의 섭입, 그리고 충돌이 이루어졌을 것으로 제안하였다. 그러나 다른 연구에서는 홍성 고압 변성암들이 신원생대 관입암과 연관되어 있을 것으로 지적했으며, Oh *et al.* (2009)은 이를 배호분지를 관입한 MORB 특성의 현무암이나 반려암으로 해석하여, 결국 경기육괴의 일부일 것으로 추정했다. 더 나아

가 Park *et al.* (2013)은 고철질 비봉 에클로자이트(eclogite)의 모암이 저어콘 중심부의 연대가  $803 \pm 24$  Ma인 것으로부터(Kim, S.W. *et al.*, 2006b) 신원생대에 이 암석이 경기육괴의 대륙 경계부에 존재하던 고원생대 편마암에 관입했을 것으로 추정하였다. 월현리 복합체 동부와 유구 정편마암 복합체 사이의 경계는 구조 경계로 제시된다(그림 2; Kim *et al.*, 2011b, 2011c). 이를 바탕으로 이 지역들은 종종 중국의 친링다비-수루 초고압 변성대의 동쪽 연장선으로 여겨지지만, 구체적인 지구조 모델은 아직 논의 중이다(Ree *et al.*, 1996; Lee and Cho, 2003; Oh *et al.*, 2005, 2006a, 2009; Kim *et al.*, 2006b, 2008, 2011a-c; Zhai *et al.*, 2007; Kwon *et al.*, 2009; Oh, 2012; Chough *et al.*, 2013; Choi, 2014; Lee *et al.*, 2014; Yengkhom *et al.*, 2014).

경기육괴 및 홍성지역은 트라이아스기 말(Carnian to early Norian)의 활발한 화성활동이 인지되며, 237-219 Ma의 동위 원소 연대를 가지는 반려암-몬조나이트, 섬장암-화강암체가 주로 분포한다(그림 1과 2). 이들 심성암체는 중간에서 높은 K 함량을 가지고, 쇼쇼니틱한 특징을 보이는 칼크-알칼리 암체로 알려졌다(Oh *et al.*, 2006b; Jeong *et al.*, 2008; Peng *et al.*, 2008; Choi *et al.*, 2009; Williams *et al.*, 2009; Seo *et al.*, 2010; Kee *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2011a). 대동누

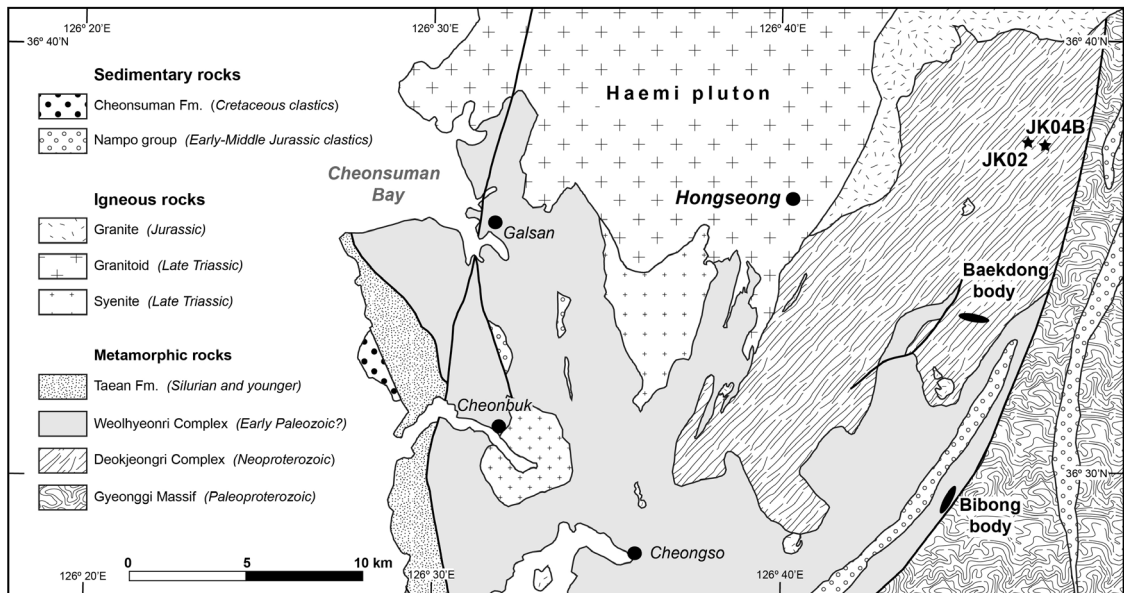


Fig. 2. Geologic sketch map of the Hongseong area with sample locations. Modified after Kee *et al.* (2011).

층군(반송층군, 남포층군)은 하부-중부 쥐라기(~187-172 Ma)에 퇴적된 것으로 제시된다(Han *et al.*, 2006; Jeon *et al.*, 2007). 쇄설성 저어콘의 연대 분포에서 가장 우세한 연대는 경기육괴에서 관찰되는 고원생대이며, 그 외에 전기 페름기, 상부 트라이아스기-하부 쥐라기, 그리고 적은 수의 시생대, 신원생대, 중기 고생대 연대가 관찰된다(Jeon *et al.*, 2007). 이 연대 분포는 쥐라기에 다양한 연대를 가진 암석들이 지표로 용기하여 침식되고 있었음을 의미한다.

### 3. 경기육괴의 지각 진화사

경기육괴(그림 1)는 복합 변성체이며, 주 구성암석인 고원생대의 암석들은 두 번의 지구조적 변성작용을 받았다. 첫 번째 사건인 M1은 고원생대(1.93-1.85 Ga) 하부-상부 백립암상의 변성작용이었고 두 번째 사건인 M2는 더 약한 변성 작용이었는데 아마 페름기-트라이아스기에 감압 중에 일어난 재가열에 의해 발생하였을 것으로 판단된다(Cho *et al.*, 1996, 2013b; Lee *et al.*, 2000, 2014; Lee and Cho, 2003; Oh *et al.*, 2006a; Yengkhom *et al.*, 2014). M2에서 감압이 일어났다는 것은 0.5-0.35 GPa 와 700-750°C (Cho *et al.*, 2013b; Lee *et al.*, 2014)의 온도 압력조건에서부터 알 수 있으며, 이 조건은 근청석(cordierite)이 일부 편마암에서 석류석 주변으로 심플렉타이트 코로나(symplectitic coronas) 구조를 보이며 외연부에 존재하거나, 석류석과 함께 기질 안에서 산출되는 것으로부터 알 수 있다. 이러한 조건은 M2 가 진행되는 중에 부분 용융과 흑운모의 탈수 용융이 큰 규모로 일어나지 않았다는 것과 일치한다. 흑운모의 탈수 반응은 흑운모 고용체에 포함된 Ti, Mg, F의 함량에 따라 반응 온도가 100°C 이상의 범위로 변하지만(Chen and Grapes, 2007; Sawyer, 2008 and references therein), 일반적으로 중간 정도의 압력에서는 850°C 보다 낮은 온도에서 반응이 일어난다. 그러나 경기육괴 동부 오대산 지역에서는 부분적으로 극단적인 변성 조건을 기록하고 있는 침정석(spinel) 백립암이 드물게 나타난다(T: 900°C 이상; P = 0.75 GPa) 이 암석은 자소회석을 포함하고 있는 몬조나이트(monzonite) 심성암체에서 2 km 내에 위치하고 있고(Oh *et al.*, 2006a) 동위원소 분석에 따르면 후기 트라이아스기의 연대를 갖는다(228.7 ± 0.9 Ma, U-Pb

on zircon; Jeong *et al.*, 2008)

Kee *et al.* (2011)에 따르면 경기육괴에서 산출된 저어콘(zircon)은 그 가장자리에서 SHRIMP U-Pb 연대를 측정된 결과 237-235 Ma (N = 3, errors ~2%)의 연대를 갖는 반면 Oh *et al.* (2006b)은 침정석 백립암에서 245 ± 10 Ma의 연대를 얻어, 트라이아스기에 변성 작용이 덧씌워진 것을 알 수 있다. 또한 아나텍시스(anatexis) 구조가 많은 곳에서 관찰되는 것으로 보아 M2 변성작용은 적어도 상부 각섬암상 조건에서 일어났을 것으로 보인다. 상부 각섬암상과 백립암상의 조건에서는 불안정해진 광물들이 지르코늄을 내보내기 때문에 변성 외연부가 오래된 저어콘 주위로 과성장되는 작용이 촉진된다(Williams, 2001; Parrish and Noble, 2003). 홍성 지역의 암석들은 에클로자이트(eclogite) 잔류물을 갖는 암석들을 포함해 전반적으로 243 ± 6 에서 229 ± 10 Ma로 평균 234.5 Ma의 트라이아스기 저어콘 연대를 보인다(Guo *et al.*, 2005; Kim, S.W. *et al.*, 2006, 2008, 2011a, 2011b; Kee *et al.*, 2011).

## 4. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정

### 4.1 홍성 지역

경기육괴 서쪽 연변부에 위치한 홍성 지역에서 산출되는 두 각섬암 시료로부터 흑운모와 각섬석을 분리하여 연대측정을 실시하였다(그림 2). 이 지역에서 산출되는 주요 암상은 다음과 같다: (1) 강한 변형과 혼성암화 작용을 받은 신원생대 관입암(덕정리 편마암; Oh *et al.*, 2005; Kim, S.W. *et al.*, 2006, 2008) 및 (2) 부분적으로 산출되는 고생대 정편마암, 변성 퇴적암, 변성 염기성암(metabasite), 규장질암, 사문암화된 초고철질 암석의 복합체(월현리 복합체; Kim, S.W. *et al.*, 2006, 2008, 2011b, 2011c; Kim and Kee *et al.*, 2010).

### 4.2 시료 기재

#### 4.2.1 JK02

시료 JK02(그림 2; 36°37'20.17"N; 126°46'26.68"E)는 엽리가 발달한 흑운모 각섬암이며, 토날라이트질 편마암체(덕정리 편마암; SHRIMP U-Pb 저어콘 관입 연대 815-850 Ma, 오차 1-1.5%; Kee *et al.*, 2011)의 주 엽리 구조에 의해 둘러싸인 형태로 산출된다. 분리한 광물은 주변 석기에 비해 큰 크기의 결정을

이루는 흑색 각섬석과 흑운모로, 암석 시료에서는 주로 집합체(aggregate)를 이루는 모습이 관찰된다. 시료를 채집한 노두에서는 각섬암과 편마암의 경계부에서 부분 용융의 흔적이 분명하게 관찰된다. 편마암체에서는 전단대가 발달하여 주 엽리 구조를 굴절시키고 이에 국한된 아나텍시스(anatexis) 구조가 관찰되며, 불규칙한 맥과 패치(patch) 역시 발견된다. 분홍빛을 띠는 세립질의 화강암질 맥이 전단대, 주 엽리 구조, 부분 용융 구조를 관통하고 있다. Kee *et al.* (2011)은 저어콘 외연부에서  $234 \pm 2$  Ma와  $235 \pm 8$  Ma의 변성연대를 얻었다.

#### 4.2.2 JK04B

이곳 노두에서 산출되는 층상 대리암은 부딘(boudin)구조를 가지는 각섬암과 수 m의 석류암(garnetite) 암편을 함께 포함하며, 여기서 채취한 시료 JK04B는 엽리 구조가 발달하고, 코로나 구조가 관찰되는 석류석 각섬암이다(그림 2;  $36^{\circ}37'17.11''N$ ;  $126^{\circ}46'57.70''E$ ). 이 암석은 지질도상에서 덕정리 편마암체에 해당하나, 암상과 산출양상을 보았을 때 월현리 복합체의 일부인 것으로 생각된다. 그러므로, 이 연구에서는 JK04B를 월현리 복합체의 시료로 간주한다. 이 각섬암 시료는 단사회석, 장석을 포함하며 2-3 mm의 석류석과 그 외연부를 감싸는 각섬석을 관찰할 수 있다. 수 cm ~ 수십 cm 두께의 장석 맥이 여러 번 암체를 관입했으며, 각섬암의 주 엽리 구조와 평행하게 관입한 1-2 cm의 불연속적인 장석질 맥 또한 국지적인 아나텍시스 구조를 보여준다.

#### 4.3 분석절차

암석 시료를 분쇄하여 초음파 세척기에서 증류수로 세척한 후에, 0.3-2.0 mm 크기의 백운모 입자들을 선별을 하였다. 분리한 입자들을 알루미늄 호일( $11 \text{ mm} \times 11 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ )에 감싼 후 조사 캔(irradiation can)에 담았다. 중성자 플럭스 모니터(neutron flux monitor)는 8~10개의 시료마다 삽입되었다. 시료와 표준광물(각섬석 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 298시간동안 조사를 받았으며, J/h는  $5.86 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ 이다. 중성자 플럭스 구배를  $\pm 0.2\%$ 의 정확도로 모니터링했다. 후에 시료 광물들은  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

단계 가열법(step-heating technique)을 이용하여 분석되었으며, 사용된 장비는 프랑스의 Geosciences Rennes에 설치된 Synrad<sup>®</sup> CO<sub>2</sub> continuous laser이다. 분석 절차는 Ruffet *et al.* (1991, 1995)를 따랐다. 처음 분석은 시료가 없이 분석을 시행하였으며, 이후에도 매 3번째 분석에서 이를 반복하였고, 이 측정치를 시료를 분석한 기체 성분을 수정하는데 사용하였다. 동위원소 분석은 MAP215<sup>®</sup> 비활성 기체 질량 분석기를 사용하였다. 5개의 Ar 동위원소와 배경 기준치가 함께 각 분석당 11번씩 측정되었으며, peak-jumping 모드를 사용하였다. 모든 측정치는 질량 분별 효과와 대기 아르곤 성분의 오염을 고려하여 Lee *et al.* (2006), 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. 측정된 연대의 오차는 1s 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 1s에서 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.

#### 4.4 분석결과

##### 4.4.1 JK02

시료 JK02에서 분리한 각섬석을 대상으로  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  단계 가열 측정법을 수행한 결과, 안장 모양의 연대 스펙트럼이 계산되었다. 연대 스펙트럼의 하부에서  $230.1 \pm 1.0$  Ma (81.6%  $^{39}\text{Ar}$  추출됨)의 평형 연대가 정의되었다. 이는 흑운모로부터 측정된  $228.1 \pm 1.0$  Ma (79.0%  $^{39}\text{Ar}$  추출됨) 평형 연대와 일치한다(그림 3; 표 1).

##### 4.4.2 JK04B

시료 JK04B로부터 암갈색-녹색을 띠는 각섬석 결정체를 분리하였다. 이 결정체는 암석 시료에서 선 구조를 이루고 있으며, 약 5 mm 크기를 가지고 포유물을 거의 가지고 있지 않았다.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  단계 가열 측

**Table 1.**  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  analytical data of laserstep heating of hornblende and biotite single grains from amphibolites, Hongseong area.

<b>JK02 Biotite</b> 13 steps									
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	Apparent age (Ma)	Error (Ma)	
300	95.67	0	0	0.11	5.76	3.60	179.4	106.5	
350	94.05	0	0	0.71	2.45	0.51	78.5	15.9	
390	61.08	0.02	0.01	2.05	6.02	0.23	186.8	6.7	
430	39.63	0	0	2.52	6.76	0.11	208.8	3.3	
470	15.00	0	0	12.65	7.30	0.03	224.4	0.9	
500	6.33	0.02	0.03	2.99	7.22	0.07	222.0	1.9	
550	3.98	0.01	0.01	11.73	7.44	0.03	228.5	0.8	
600	2.32	0.01	0.01	11.26	7.44	0.03	228.4	0.9	
650	2.81	0.01	0.01	9.58	7.44	0.03	228.3	0.9	
700	2.25	0.01	0.01	13.93	7.44	0.02	228.3	0.6	
760	2.19	0	0	4.71	7.38	0.07	226.5	2.2	
850	2.33	0	0	4.9	7.33	0.08	225.2	2.4	
1111	1.24	0	0	22.87	7.41	0.02	227.5	0.6	
<b>JK02 Hornblende</b> 10 steps									
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	Apparent age (Ma)	Error (Ma)	
500	36.74	2.05	0.46	0.15	65.01	1.93	1406.0	29.0	
700	37.35	1.09	0.10	0.59	7.44	0.30	228.3	8.7	
850	13.88	2.74	0.07	0.76	6.29	0.23	194.9	6.8	
950	5.37	4.30	0.07	2.37	7.87	0.14	240.6	3.9	
1000	1.05	4.13	0.03	8.13	7.67	0.04	235.0	1.2	
1040	0.77	4.04	0.01	52.50	7.51	0.02	230.4	0.5	
1070	0.55	4.01	0.01	19.29	7.48	0.02	229.4	0.6	
1130	0.97	4.14	0.01	9.80	7.51	0.03	230.2	0.9	
1250	8.05	4.43	0.10	1.31	7.53	0.18	231.0	5.1	
2222	5.72	4.86	0.03	5.10	8.06	0.04	246.2	1.2	
<b>JK04B Hornblende</b> 13 steps									
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	Apparent age (Ma)	Error (Ma)	
500	35.56	12.85	0.25	0.12	167.91	1.94	2525.3	15.8	
650	45.83	19.36	0.18	0.20	51.80	0.88	1196.7	15.0	
750	36.95	70.73	0.44	0.24	14.34	0.51	417.6	13.3	
830	18.70	11.35	0.15	0.40	8.88	0.25	269.8	7.0	
900	10.07	5.94	0.06	0.85	9.10	0.11	275.7	3.0	
1000	2.02	4.07	0.01	5.47	7.90	0.02	241.8	0.5	
1100	0.93	4.27	0.01	28.35	7.78	0.01	238.3	0.4	
1150	0.37	4.26	0.01	21.14	7.50	0.02	230.5	0.5	
1200	0.46	4.29	0.01	14.74	7.50	0.02	230.3	0.5	
1250	0.51	4.64	0.02	7.89	7.45	0.02	229.0	0.5	
1320	2.43	5.70	0.02	3.56	7.47	0.03	229.1	0.9	
1400	3.02	6.83	0.03	2.87	7.71	0.05	236.3	1.4	
2222	9.92	6.95	0.01	14.18	7.74	0.03	237.2	0.7	
J parameter	error J	Age monitor (Ma)	Age monitor (Ma)	Mass Discrimination Error	Discrimination (1+e)	Date Irradiation			
1.81E-02	6.44E-05	1081		1.1891	1.007015	4/16/12			



정법을 수행한 결과 안장 모양의 연대 스펙트럼이 계산되었다. 연대 스펙트럼의 하부에서  $229.8 \pm 1.0$  Ma ( $47.3\%$   $^{39}\text{Ar}$  추출됨; 그림 3; 표 1)의 가평형 연대가 정의되었다. 이 연대는 각섬암 시료 JK02의 흑운모와 각섬석에서 각각 측정된  $228.1 \pm 1.0$  Ma와  $230.1 \pm 1.0$  Ma 연대와 일치한다.

5. 해석

이 연구에서는  $230.1$  Ma,  $229.8$  Ma(각섬석), 그리고  $228.1$  Ma(흑운모)의  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  (가)평형 연대가 계산되었다. 일반적으로, 같은 노두에서 온 시료를 분석하는 경우 각섬석에서 오래된  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  연대가 산출되며, 백운모와 흑운모에서 이보다 좀 더 젊은 연대가 계산된다. 그러므로 폐쇄온도가 다른 광물들에게서 거의 일치하는 연대가 산출된 경우는 빠른 속도의 냉각을 의미한다(Baldwin *et al.*, 1993; Brown and Dallmeyer, 1996). 이 결과에 따르면, 홍성 지역은 최근의 국제 시간층서 연대표(Cohen *et al.*, 2013)에서 카르니아(Carnian, 트라이아스기 후기 중 가장 하부 연대)에 해당하는 시기 동안 아주 빠른 냉각 작용을 거친 것으로 해석된다. 본 연구에서는 측정된 연대를 사용하여 홍성 지역이 겪은 냉각 속도에 대하여 추정해보고자 한다.

이 연구에서 분석된 광물에 대해 자주 인용되는 폐쇄온도는 중간 정도의 냉각속도에서 각섬석의 경우  $\sim 500^\circ\text{C}$  (Harrison, 1981; Baldwin *et al.*, 1990), 흑운모의 경우  $\sim 300^\circ\text{C}$  (Purdy and Jäger, 1976; Harrison *et al.*, 1985)이다. 하지만, 시스템의 폐쇄는 온도뿐만 아니라 광물의 화학조성(Fe/Mg 비율, 할로겐 함량 등), 확산 구조, 입자의 크기, 냉각속도와 압력에도 영향을 받는다(Harrison *et al.*, 1985; Baldwin *et al.*, 1993; Lister and Baldwin, 1996; Villa, 1998). 빠른 냉각을 거친 지질 시스템의 경우 일반적으로 폐쇄온도는 상당히 상승한다(Harrison, 1981; Baldwin *et al.*, 1993; Lister and Baldwin, 1996). 이 연구에서 분석된 흑운모의 크기는 직경  $0.5\text{-}1$  mm였으며, Grove and Harrison (1996)의  $D_0/a^2$  변수와 활성화 에너지를 이용하여 계산된  $360^\circ\text{C}$ 를 빠른 냉각속도에서 흑운모의 폐쇄온도로 적용하였다. 각섬석의 경우 폐쇄온도를 추정하는 것이 더 어렵다. Harrison (1981)은 등온 열수(isothermal-hydrothermal)  $^{40}\text{Ar}^*$  손실(loss) 실험을 통하여 얻어진 확산 변수와  $80\ \mu\text{m}$ 의 유효확산반경(effective diffusion radius)을 사용하여, 각섬석의 폐쇄온도는  $10\text{-}500^\circ\text{C}/\text{Ma}$  범위의 냉각속도에서  $500^\circ\text{C}$ 에서  $580^\circ\text{C}$  사이일 것으로 예측하였다. Dahl (1996)은 광물 결정의 단위 격자 내에 존재하는 공극의 비율(이온 공극률, ionic porosity)이 부피 확산(volume diffusion)과 관련된다는 개념에 착안하여,  $80\ \mu\text{m}$ 의 유효확산반경,  $\sim 200^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 의 냉각속도에서 일반적인 성분을 가진 각섬석의 폐쇄온도를  $520\text{-}600^\circ\text{C}$  사이로 추정하였다. Villa (1998)는 실험 결과를 바탕으로 Dahl (1996)의 폐쇄온도 범위를  $550\text{-}650^\circ\text{C}$ 로 수정하였다. 본 연구에서는 분석한 각섬석 입자의 크기가 직경  $0.5\text{-}1$  mm에 해당하므로, 각섬석의 폐쇄온도를 해당 범위에서 높은 값인  $650^\circ\text{C}$ 로 적용하였다.

이 연구에서 얻어진  $230.1 \pm 1.0$  Ma,  $229.8 \pm 1.0$  Ma (각섬석), 그리고  $228.1 \pm 1.0$  Ma(흑운모)의  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  가평형 연대는 덕정리 편마암의 저어콘 외연부에서 얻어진 변성 연대인  $234\text{-}235$  Ma U-Pb 연대(오차  $\sim 1\text{-}3\%$ )와 거의 일치한다(Kee *et al.*, 2011). 또한 덕정리 편마암의 저어콘 연대는 홍성 지역에서 산출되는 다양한 암석들의 U-Pb 저어콘 연대(평균  $234.5$  Ma, 범위:  $243 \pm 6 - 229 \pm 10$  Ma; Guo *et al.* 2005; Kim, S.W. *et al.*, 2006, 2008, 2011a, 2011b; Kee *et al.*, 2011) 및 경기육괴에서 산출되는 U-Pb 연대

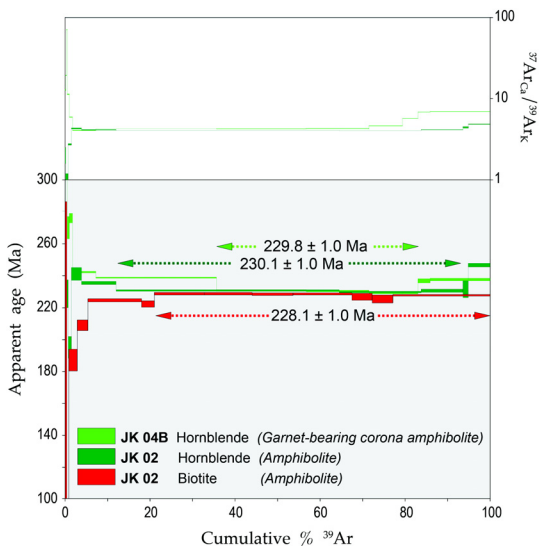


Fig. 3. Laser step-heating age spectra of hornblende and biotite single grains JK02 and JK04B.



(237-235 Ma; Kee *et al.*, 2011)와도 비슷하다. Oh *et al.* (2006a)은 오대산 지역에서 산출되는 침정석 백립암에 대하여 245 Ma(오차: ~4%)의 저어콘 연대를 측정하였다. 이 지역에서 측정된 M2 변성작용의 온도는 700-750°C였으며, 국지적으로 침정석 백립암은 900-950°C까지 높은 온도 조건에 놓였던 것으로 추정된다. 변질되지 않은 저어콘의 U-Th-Pb 시스템에 대한 폐쇄온도가 900°C를 넘으므로(Cherniak and Watson, 2001; Ireland and Williams, 2003; Reiners, 2009), Oh *et al.* (2006a)에서 얻어진 연대는 저어콘의 생성 연대로 고려되어야 할 것이다. 이 연구 결과들을 바탕으로, M2 변성작용의 평균 연대를 약 235 Ma로 두고 변성 온도를 750°C로 가정하였을 시, M2 변성작용의 온도에서 각섬석의  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  폐쇄 온도까지 냉각되는데 걸린 기간은 약 5 Ma가 된다. 이 연구에서 분석된  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  각섬석 연대와 오대산 백립암으로부터 측정된 조건(245 Ma, 950°C)을 이용하여 계산하면 냉각에 걸린 기간은 15 Ma이다. 앞에서 논의한 각섬석의 폐쇄온도인 650°C를 적용하면, 대략적인 냉각속도의 범위는 20-60°C/Ma로 추정된다. 이를 이어서, 흑운모와 각섬석의 K-Ar 동위원소 시스템이 거의 같은 시기(~228-230 Ma)에 폐쇄되었으므로 650°C 이후 매우 빠른 속도의 냉각이 뒤를 이은 것을 알 수 있다. 흑운모, 각섬석 연대들의 평균값의 차이인 ~2 Ma와, 상기 논의한 폐쇄 온도를 이용하여 계산하면 150°C/Ma의 냉각 속도가 산출된다. 각섬석의 가장 낮은 폐쇄온도(500°C)를 적용하여도 100°C/Ma에 해당하는 냉각 속도가 계산된다.

변성작용이 일어난 후 지질 시스템이 냉각되는 속도는 주로 용기 과정에 의해 조절된다. 침식작용에 의해 용기가 일어날 경우 비교적 느리게 냉각되며, 반면 지구조운동이 관여된 많은 경우에는 빠른 냉각 속도가 관찰된다(Dallmeyer *et al.*, 1986; Dokka *et al.*, 1986; Baldwin *et al.*, 1993, 2004; Brown and Dallmeyer, 1996; Platt *et al.*, 1998; Charles *et al.*, 2012; Cubley *et al.*, 2013a, 2013b; Daoudene *et al.*, 2013). 빠른 냉각속도를 보이는 경우 중 상당수는 변성심부복합체(metamorphic core complex)와 연관이 있다. 변성심부복합체는 지각 규모의 지구조로서, 중-고도의 변성작용과 강한 연성 변형작용을 겪은 중-하부지각이 저각도의 정단층들(단절단층, de-

tachments)을 따라 얇게 신장된 상부지각으로 용기하면서 생성된다(Vanderhaeghe *et al.*, 2003; Rey *et al.*, 2009). 변성심부복합체는 두꺼워진 지각이 중력 붕괴(gravitational collapse)에 의해 지각 신장이 일어난 지역에서 주로 발견되었으며, 북미 코르디예라(Cordillera) (Norlander *et al.*, 2002; Vanderhaeghe *et al.*, 2003; Kruckenberg *et al.*, 2008; Rey *et al.*, 2009; Cubley *et al.*, 2013a, 2013b), 지중해 동부(키클라데스 제도, 서부 터키-에게 해) (Dilek *et al.*, 2009; Thomson *et al.*, 2009), 유럽의 바리스칸 조산대(Brown and Dallmeyer, 1996; Ledru *et al.*, 2001) 및 동아시아 중부(Charles *et al.*, 2012; Daoudene *et al.*, 2013)에서 보고되었다. 변성심부복합체의 지구조 진화에 대한 수치 모델링의 결과(Rey *et al.*, 2009), 고온 조건에서 등온 감압작용에 따른 아주 빠른 냉각(>100°C/Ma)이 이루어진다는 것이 알려졌다. 이러한 과정은 맨틀의 움직임과 관련이 있으며, 이후에 더 자세히 논하려고 한다.

## 6. 토 의

Oh *et al.* (2006a)은 경기육괴 동부 오대산 지역에서 관찰되는 트라이아스기 후기 백립암상 변성작용( $T > 900^\circ\text{C}$ ;  $P = 0.75 \text{ GPa}$ )의 온도 조건은 자소휘석 몬조 나이트 암체의 관입만으로는 이루어지기 어렵다고 지적하였다. 이에 더하여, Oh *et al.* (2006a)은 더 깊은 곳에서 고철질-초고철질 암체가 관입하여 광역적으로 열을 공급하였을 것으로 추정하였다. 한반도의 트라이아스기 후기 광역변성작용은 오직 화강암류의 관입으로만 설명하기에는 규모가 크다. 이러한 사실은 암석권의 박층화에 의해 야기된 변칙적인 열 공급이 한반도의 변성, 화성작용에 관련이 있을 가능성을 제시한다. Brown (2007)은 등압 냉각 곡선을 따르는 저압/고온 변성대에서 일부 백립암들이 화산호나 열곡대 환경에서 중부 지각에 마그마가 부가(accretion)되어 생성되었을 것으로 추정하였다. 오대산 지역(Oh *et al.* 2006a)의 아연 함량이 적은 허시니틱(hercynitic) 침정석( $\text{ZnO} = 1.6\text{-}2.6$ )과 석영이 함께 산출되는 양상은 초고온 변성작용을 의미하는 증거 중 하나이다 (Brown, 2007; Harley, 2008; Kelsey, 2008). 이 연구들은 이러한 극단적인 변성 온도가 성립하기 위한 조건으로서 현무암질 마그마로부터, 또는 다이아필(diapir)

형태로 연약권에서 공급되는(advection, 이류) 열의 필요성을 강조하였다. 이는 암석권 하부의 박리(delamination)나 섭입판의 단절로 인한 결과일 수 있으며, 이러한 과정에 의해 암석권의 박층화가 진행된다면 지온구배(geothermal gradient)와 열의 공급량이 크게 증가한다(Bodorkos *et al.*, 2002). 상기 언급된 M2 변성작용은 지온구배가 30-40°C/km에 해당하며, 이는 유럽의 초고온(hyperthermal) 분지(티레니아 해, 서부 터키-에게 해, 및 알프스-카르파티아 충돌대의 파노니아 분지)에서 발견되는 온도 조건(Cermak, 1993)과 일치한다. 이들은 섭입판의 후퇴(roll back), 단절에 의한 생성과 관련된다(Edwards and Grasemann, 2009). 지중해 주변 지역에서 발견되는 신선생기-제4기 화산활동(Keller 1983; Peccerillo, 2005; Bianchini *et al.*, 2008) 중 많은 경우들 역시 섭입판의 단절이 일어난 곳에서 발견되었다(Spakman, 1990; Wortel and Spakman, 1992). 이러한 화성활동들은 일반적으로 높은 칼륨값을 가진 켈크-알칼리 계열의 특징과 함께 쇼쇼니틱한 성분을 가지고, 섭입된(교대작용을 받은) 지각이나 암석권-연약권 맨틀로부터 기원하며, 한반도의 트라이아스기 후기 화성암체의 특성 과도 일치한다. 흥미로운 점은 경기육괴의 트라이아스기 후기 M2 변성작용이 현재 구조적으로 경기육괴의 상부에 위치한 고생대 중기 태안층에도 영향을 미쳤다는 것이다. Han (2014)과 de Jong *et al.* (2014)은 홍성 지역에서 서쪽으로 50 km 정도 떨어진 안면도에서 산출되는 녹색편암상( $T < 450^{\circ}\text{C}$ )의 변성퇴적층으로부터 ~233 Ma U-Pb 티타나이트 연대와 ~230 Ma  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  백운모 연대를 구하였다. 태안층을 관입하는 섬강암 역시 같은 연대가 산출되었다(Han, 2014). 233-230 Ma의 화성 및 변성작용 그리고 염기성 암맥의 관입은 태안층의 변형작용 후에 발생을 지시하며, 이들이 발생한 요인으로 암석권의 박리(delamination)나 섭입판의 단절로 인해 연약권으로부터 열 공급이 증가했을 가능성을 제시한다. 본 연구에서 제시된 연대들과 함께, 기존 연구 결과들은 한반도의 트라이아스기 후기 화성 및 변성작용이 지구구조의 수축 변형이 일어난 후에 비교적 단기간 동안 발생하였고, 이 과정이 상-하부 지각 모두에 영향을 주었다는 것을 의미한다.

유럽의 베타-리프 조산대(Betic-Rif, 지중해 서부)와 바리스크안(Variscan) 조산대에서도 짧은 기간 동안

일어난 화성 및 변성작용이 알려져 있다. 두 조산대는 판의 충돌로 인한 고압(에클로자이트상) 변성작용이 일어난 후, 섭입판 단절, 암석권 박리에 이어진 고온의 맨틀 물질의 유입으로 인해 백립암상과 같은 고온 변성작용, K-Mg가 풍부한 마그마의 관입 등이 일어난 지역이다. Platt *et al.* (1998)은 베타-리프 조산대에서 심부지각의 온도가 100°C 이상 상승한 후에 백립암이 형성되는 시간이 2 Ma가 채 걸리지 않았으며, 이를 따르는 등온 감압 과정까지 포함하여 모든 과정이 진행되는 데 15 Ma가 걸렸던 것으로 추정하였다. 바리스크안 조산대의 보헤미안(Bohemian) 육괴에서 산출되는 고압 백립암체의 감압, 냉각 과정도 변성 과정의 정점에서 10 Ma 안에 일어났던 것으로 제시된다(Schulmann *et al.*, 2008). 바리스크안 조산대의 다른 지역도 마찬가지로 빠른 냉각을 겪었으며, 일부 경우는 변성심부복합체에서 보고되었다(Brown and Dallmeyer, 1996; Ledru *et al.*, 2001).

한반도에서는 연성 정단층(ductile normal faulting)이 흔하지 않으며, 경기육괴 북부(Kim *et al.*, 2000), 그리고 남쪽 경계부(Han *et al.*, 2013) 일부지역에서 보고된다. 경기육괴 북부 적성 지역의 경기전단대에서는  $226 \pm 1.0$  Ma Rb-Sr 백운모-전암 등시선 연대가 산출되었다. 이에 반해, Han *et al.* (2013)은 남쪽 경계부에서 압쇄암으로부터  $187.8 \pm 5.6$  Ma  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  백운모 연대를 측정하였으며, 이를 바탕으로 경기육괴의 용기 과정이 226-188 Ma에 이루어진 것으로 해석하였다. 이는 본 논문에서 제시된 것보다 더 긴 기간이며, 용기 과정의 진행이 느렸음을 지시한다. Kim *et al.* (2000)은 적성 지역의 트라이아스기 후기-쥬라기 초기 대동누층군(남포층군)이 퇴적된 시기에 지각의 연성 신장 변형이 동시에 일어났을 것으로 제안했으며, 이는 현재의 해석, 즉 대동누층군이 대보조산운동 초기에 횡압력이 가해지던 단계에서 호의 내부(intra-arc) 환경에서 퇴적된 것으로 해석되는 것과 다른 관점이다(Han *et al.*, 2006; Jeon *et al.*, 2007). 실제로 연대 측정 시료를 얻기 위해 적성 지역의 답사를 수행하는 동안, 저변성작용을 받은 역암층의 하부에서 K-장석으로 이루어진 역들을 관찰하였다. 이 역은 퇴적층 아래에 놓이는 경기육괴에서 쉽게 관찰할 수 있는 암상이었으며, 퇴적층은 경기전단대 압쇄암의 바로 위에 위치한다. 또한 이 변성퇴적층에서 취성-연성 변형이 관찰되며, 전단

갑각이 압쇄암과 일치함을 확인하였다. 이 결과는 Kim *et al.* (2000)이 제안했던 대로 남포층군의 퇴적물이 확장 분지(extensional basin)에 퇴적되었을 가능성을 보여주며, 하반을 이루는 편마암이 상당히 신장되었고, 용기 속도 역시 빨라서 퇴적층 또한 지구조운동에 따른 변성과정을 겪은 것으로 보인다. 이러한 양상은 많은 변성심부복합체에서 보고된 사항과 일치한다. 현재 압쇄암과 저변성작용을 받은 퇴적층에 대해  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  연대측정을 실시하고 있으며, Kim *et al.* (2000)에서 얻어진 226 Ma 연대가 정확하다면, 적성 지역에서 관찰되는 사항들은 경기육괴 연변부인 홍성 지역에서 측정된 빠른 용기속도와 함께 설명이 가능하다. 또한 서해 덕적도에서 산출되는 저변성작용을 받은 역암층이  $225 \pm 3$  Ma의 연대를 가지는 화강암맥에 의하여 관입을 받은 것이 밝혀졌으며, 이들 역시 트라이아스기에 조산운동 후의 퇴적물로서 확장 분지에 쌓였을 가능성이 제시되었다(Kim *et al.*, 2014). 이러한 결과들은 Han *et al.*, (2013)에 의하여 얻어진 경기육괴 남쪽 경계부 압쇄암의 ~188 Ma  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  연대가 같은 변형작용의 시기를 지시하지 않는다는 것을 의미한다. 이 지역과 옥천변성대에서 산출되는 연대들은 상당히 넓은 범위에 퍼져 있으며, 이는 길고 복잡한 지구조운동이 영향을 미쳤음을 의미하며, 또한 본 연구에서 관찰된 과정과 구분되는 것으로 보인다. 이에 대한 참고로, Han (2014)은 안면도에 분포한 태안층의 같은 노두에서 채취한 다른 기원의 두 백운모 입자로부터  $231 \pm 1.0$  Ma와  $180 \pm 1.0$  Ma (1s)  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  단입자 연대를 구하였다.

종합하면, 비록 대륙 충돌대의 직접적인 증거인 초고압 변성암이 드물고 지구조운동이 일어난 정확한 시기에 대한 논란이 남아있지만, 많은 연구지역으로부터 야외증거 및 측정된 자료를 바탕으로 드러난 한반도의 트라이아스기 후기 화성, 변성활동과 열적 진화는 전세계적으로 많은 대륙 충돌대에서 관찰되는 후-충돌 과정(post-collisional process)의 특징과 매우 유사하다.

## 7. 결론

본 연구에서는 홍성 지역의 각섬암으로부터  $230.1 \pm 1.0$ ,  $229.8 \pm 1.0$  Ma (각섬석) 와  $228.1 \pm 1.0$  Ma (흑운모)의 (가)평형  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  연대를 구하였다. 이

는 다른 연구에서 보고된 경기육괴 저어콘 외연부의 U-Pb 연대와 거의 일치하는 결과이다. 종합하면, 트라이아스기 후기 ~235 Ma(평균 저어콘 연령)에 전반적으로 변성 조건의 최고점인  $750^\circ\text{C}$ 에서부터(국지적으로  $950^\circ\text{C}$ ) ~230 Ma에는 ~ $650^\circ\text{C}$ 까지(각섬석의 K-Ar 폐쇄온도) 냉각되었음을 보여준다. 이로부터 냉각 속도가  $20\text{-}60^\circ\text{C}/\text{Ma}$  이었음을 알 수 있다. 그 후에는 아주 빠르게 온도가 떨어졌는데 ( $100\text{-}150^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ), 이는 각섬석과 흑운모의 K-Ar 동위원소 시스템의 폐쇄가 거의 같은 시기에 이루어졌다는 점에서 알 수 있다(~228-230 Ma). 이러한 급냉각은 지구조 운동에 의해 지하 깊은 곳의 암석이 지표로 용기하는 과정을 지시하는데, 특히 고온에서 각섬암상의 감압 환경은 충돌대에서 지구조 운동으로 인해 지각이 두꺼워진 후에 이어서 생성되는 변성심부복합체에서 이루어진다. 트라이아스기 후기 변성작용과 그 후의 빠른 냉각은 지구조 운동에 의해 발생되어 비교적 짧은 기간 동안 지속된 화성, 변성 활동의 일부이다. 이러한 활동은 수축 변형이 일어난 이후에 나타나 한반도 상-하부 지각 모두에 영향을 미친 것으로 판단된다. 궁극적으로 한반도의 트라이아스기 후기 화성 및 변성 활동은 충돌이 일어난 후 하부 지각과 상부 맨틀의 박리 혹은 섭입한 해양판의 단절에 의해 연약권으로부터 열이 공급된 것과 관계가 있을 것이다.

## 사 사

이 논문은 2011년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업(NRF-2011-0012900)과 서울대학교 기초과학연구원 신인교수 정착금의 지원을 받아 수행되었습니다. 홍성 지역에서 야외 답사를 하는데 많은 도움을 주신 오창환 교수님, 영어로 작성된 논문을 한국어로 번역, 편집을 도와준 한석영, 김주환에게 감사를 표합니다. 논문을 심사하면서 아낌없이 조언해주신 김성원 박사님과 이승렬 박사님께 감사드립니다.

## REFERENCES

- Bakker, H.E., de Jong, K., Helmers, H. and Biermann, C., 1989, The geodynamic evolution of the Internal Zone of the Betic Cordilleras (SE Spain): a model based on structural analysis and geothermobarometry. *Journal of metamorphic Geology*, 7, 359-381.

- Baldwin, S.L., Harrison, T.M. and Fitz Gerald, J.D., 1990, Diffusion of  $^{40}\text{Ar}$  in metamorphic hornblende. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 105, 691-703.
- Baldwin, S.L., Lister, G.S., Hill, E.J., Foster, D.A. and McDougall, I., 1993, Thermochronologic constraints on the tectonic evolution of active metamorphic core complexes, D'Entrecasteaux Islands, Papua New Guinea. *Tectonics*, 12, 611-628.
- Baldwin, S.L., Monteleone, B.D., Webb, L.E., Fitzgerald, P.G., Grove, M. and Hill, E.J., 2004, Pliocene eclogite exhumation at plate tectonic rates in eastern Papua New Guinea. *Nature*, 431, 263-267.
- Bianchini, G., Beccaluva, L. and Siena, F., 2008, Post-collisional and intraplate Cenozoic volcanism in the rifted Apennines/ Adriatic domain. *Lithos*, 101, 125-140.
- Bodorkos, S., Sandiford, M., Oliver, N.H.S. and Cawood, P.A., 2002, High-T, low-P metamorphism in the Paleoproterozoic Halls Creek Orogen, northern Australia: the middle crustal response to a mantle-related transient thermal pulse. *Journal of metamorphic Geology*, 20, 217-237.
- Brown, M., 2007, Metamorphic conditions in orogenic belts: a record of secular change. *International Geological Review*, 49, 193-234.
- Brown, M. and Dallmeyer, R.D., 1996, Rapid Variscan exhumation and role of magma in core complex formation: Southern Brittany metamorphic belt, France. *Journal of metamorphic Geology*, 14, 361-379.
- Cermak, V., 1993, Lithospheric thermal regimes in Europe. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 79, 179-193.
- Charles, N., Gumiaux, C., Augier, R., Chen, Y., Faure, M., Lin, W. and Zhu, R., 2012, Metamorphic Core Complex dynamics and structural development: Field evidences from the Liaodong Peninsula (China, East Asia). *Tectonophysics*, 560-561, 22-50.
- Chen, G.-N. and Grapes, R., 2007, *Granite Genesis: In Situ Melting and Crustal Evolution*. Springer, Dordrecht, The Netherlands. 278 pp.
- Cheong, C.-S., Jeong, G.Y., Kim, H., Choi, M.S., Lee, S.-H. 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. *Chemical Geology*, 193, 81-92.
- Cherniak, D.J. and Watson, E.B., 2001, Pb diffusion in zircon. *Chemical Geology*, 172, 1999-2017.
- 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. and Kim, H., 2005, Metamorphic evolution of the Ogcheon belt, Korea: a review and new age constraints. *International Geology Review*, 47, 41-57.
- 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 Permo-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., Kwon, S.-T., Ree, J.-H. and Choi, D.K., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula: a review and new view. *Earth-Science Review*, 52, 175-225.
- 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.

- Cubley, J.F., Pattison, D.R.M., Archibald, D.A. and Jolivet, M., 2013a, Thermochronological constraints on the Eocene exhumation of the Grand Forks complex, British Columbia, based on  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  and apatite fission track geochronology. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 50, 576-598.
- Cubley, J.F., Pattison, D.R.M., Tinkham, D.K. and Fanning, C.M., 2013b, U-Pb geochronological constraints on the timing of episodic regional metamorphism and rapid high-T exhumation of the Grand Forks complex, British Columbia. *Lithos*, 156-159, 241-267.
- Dahl, P.S., 1996, The crystal-chemical basis for Ar retention in micas: inferences from interlayer partitioning and implications for geochronology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123, 22-39.
- Dallmeyer, R.D., Snoke, A.W. and McKee, E.H., 1986, The Mesozoic-Cenozoic tectono-thermal evolution of the Ruby Mountains, East Humboldt Range, Nevada: A Cordilleran metamorphic core complex. *Tectonics*, 5, 931-954.
- Daoudene, Y., Ruffet, G., Cocherie, A., Ledru, P. and Gapais, D., 2013, Timing of exhumation of the Erendavaa metamorphic core complex (north-eastern Mongolia) - U-Pb and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  constraints, *Journal of Asian Earth Sciences*, 62, 98-116.
- de Jong, K., Han, S., Yi, K. and Ruffet, G., 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, 593-609.
- Dilek, Y., Altunkaynak, Ş. and Öner, Z., 2009, Syn-extensional granitoids in the Menderes core complex and the late Cenozoic extensional tectonics of the Aegean province. In: Ring, U., and Wernicke, B. (eds.), *Extending a Continent: Architecture, Rheology and Heat Budget*. Geological Society, London, Special Publications, 321, 213-233.
- Dokka, R.K., Mahaffie, M.J. and Snoke, A.W., 1986, Thermochronologic evidence of major tectonic denudation associated with detachment faulting, northern Ruby Mountains-east Humboldt range, Nevada. *Tectonics*, 5, 995-1006.
- Edwards, M.A. and Grasemann, B., 2009, Mediterranean snapshots of accelerated slab retreat: subduction instability in stalled continental collision. In: van Hinsbergen, D.J.J., Edwards, M.A., and Govers, R. (eds.), *Collision and Collapse at the Africa-Arabia-Eurasia Subduction Zone*. Geological Society, London, Special Publications, 311, 155-192.
- Girbacea, R. and Frisch, W., 1998, Slab in the wrong place: Lower lithospheric mantle delamination in the last stage of the Eastern Carpathian subduction retreat. *Geology*, 26, 611-614.
- Goodwin, L.B. and Renne, P.R., 1991, Effects of progressive mylonitization on Ar retention in biotites from the Santa Rosa mylonite zone, California, and thermochronologic implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 108, 283-297.
- 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, R., Ree, J.-H., Cho, D.-L., Kwon, S.-T. and Armstrong, R., 2006, SHRIMP U-Pb zircon ages of pyroclastic rocks in the Bansong Group, Taebaeksan Basin, South Korea and their implication for the Mesozoic tectonics. *Gondwana Research*, 9, 106-117.
- Han, R., Min, K., Ree, J.-H. and Foster, D.A., 2013, Extensional deformation along the southern boundary of the Gyeonggi Massif, South Korea: structural characteristics, age constraints, and tectonic implications. *International Journal of Earth Sciences*, 102, 1437-3254.
- 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. MSc. Thesis, Seoul National University, Seoul, 75 pp.
- Harley, S.L., 2008, Refining the P-T records of UHT crustal metamorphism. *Journal of metamorphic Geology*, 26, 125-154.
- Harrison, T.M., 1981, Diffusion of  $^{40}\text{Ar}$  in hornblende. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 78, 324-331.
- Harrison, T.M., Duncan, I. and McDougall, I., 1985, Diffusion of  $^{40}\text{Ar}$  in biotite: Temperature, pressure and compositional effects. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49, 2461-2468.
- Ireland, T.R. and Williams, I.S., 2003, Considerations in zircon geochronology by SIMS. In: Hanchar, J.M., and Hoskin, P.W.O. (eds.), *Zircon: Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, Mineralogical Society of America, 53, 215-241.
- Jeon, H., Cho, M., Kim, H., Horie, K. and Hidaka, H., 2007, Early Archean to Middle Jurassic evolution of the Korean Peninsula and its correlation with Chinese cratons: SHRIMP U-Pb Zircon age constraints. *Journal of Geology*, 115, 525-539.
- Jeong, Y.-J., Yi, K., Kamo, S.L. and Cheong, C.-S., 2008, ID-TIMS single zircon age determination of mangerite in the eastern Gyeonggi massif, Korea. *Journal of the*

- Geological Society of Korea, 44, 425-433 (in Korean with English abstract).
- Kee, W.S., Go, H.J., Kim, S.W., Kim, Y.B., Kim, Y.H., Kim, H.C., Park, S.I., Song, K.Y., Lee, S.R., Lee, Y.S., Lee, H.J., Cho, D.L., Choi, B.Y., Choi, S.J., and Hwang, J.H., 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).
- Keller, J., 1983, Potassic lavas in the orogenic volcanism of the Mediterranean area. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 18, 321-335.
- Kelsey, D.E., 2008, On ultrahigh-temperature crustal metamorphism. *Gondwana Research*, 13, 1-29.
- 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 inprint 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. and Kee, W.S., 2010, Geochronology and geochemical characteristics of metavolcanics from Weolhyeonri tectonic complex in the Hongseong area, SW Gyeonggi Massif. *Journal of the Geological Society of Korea* 46, 453-471 (in Korean with English abstract).
- 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 south-western 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, Daejjak Island, central Korea. *Geosciences Journal*, 13, 305-315.
- Kruckenberger, S.C., Whitney, D.L., Teyssier, C., Fanning, C.M. and Dunlap, W.J., 2008, Paleocene-Eocene migmatite crystallization, extension, and exhumation in the hinterland of the northern Cordillera: Okanogan dome, Washington USA. *Geological Society of America Bulletin*, 120, 912-929.
- 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.
- Ledru, P., Courrioux, G., Dallain, C., Lardeaux, J.M., Montel, J.M., Vanderhaeghe, O. and Vitel, G., 2001, The Velay dome (French Massif Central): melt generation and granite emplacement during orogenic evolution. *Tectonophysics*, 342, 207-237.
- 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, A redetermination 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.
- Liégeois, J.-P. and Black, R., 1987, Alkaline magmatism subsequent to collision in the Pan-African belt of the Adrar des Iforas. In: Fitton, J.G., and Upton, B.G.J. (eds.), *Alkaline Igneous Rocks*. The Geological Society, Blackwell, Oxford, 30, 381-401.
- 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).
- Lister, G.S. and Baldwin, S.L., 1996, Modeling the effect of arbitrary P-T-t histories on argon diffusion in minerals using the MacArgon program for the Apple Macintosh. *Tectonophysics*, 253, 83-109.
- Loosveld, R.J.H. and Etheridge, M.A., 1990, A model for low pressure facies metamorphism during crustal thickening. *Journal of metamorphic Geology*, 8, 257-267.
- 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.
- Molnar, P. and Stock, J.M., 2009, Slowing of Indian convergence with Asia since 20 Ma and its implications for Tibetan mantle dynamics. *Tectonics*, 28, TC 300 I, doi: 10.1029/2008TC2271.
- Norlander, B.H., Whitney, D.L., Teyssier, C. and Vanderhaeghe, O., 2002, Partial melting and decompression of the Thor-Odin dome, Shuswap metamorphic core complex, Canadian Cordillera. *Lithos*, 61, 103-125.
- 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 10th 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.
- Peccerillo, A., 2005, *Plio-Quaternary Volcanism in Italy - Petrology, Geochemistry, Geodynamics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 365 pp.
- Peng, P., Zhai, M., Guo, J., Zhang, H. and Zhang, Y., 2008, Petrogenesis of Triassic post-collisional syenite plutons in the Sino-Korean craton: an example from North Korea. *Geological Magazine*, 145, 637-647.
- Platt, J.P., Soto, J.-L., Whitehouse, M.J., Hurford, A.J. and Kelley, S.P., 1998, Thermal evolution, rate of exhumation, and tectonic significance of metamorphic rocks from the floor of the Alboran extensional basin, western Mediterranean. *Tectonics*, 17, 671-689.
- Purdy, J.W. and Jäger, E., 1976, K-Ar ages on rock-forming minerals from the Central Alps. *Memorie degli Istituti di Geologia e Mineralogia dell'Università di Padova*, 30, 1-31.
- 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.
- Reiners, P.W., 2009, Nonmonotonic thermal histories and contrasting kinetics of multiple thermochronometers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, 3612-3629.
- 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 improve accuracy for  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology" by PR Renne *et al.* (2010). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 5097-5100.
- Renne, P.R., Mundil, R., Balco, G., Min, K. and Ludwi, 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 improve daccuracy for  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 5349-5367.
- Rey, P.F., Teyssier, C. and Whitney, D.L., 2009, Extension rates, crustal melting, and core complex dynamics. *Geology*, 37, 391-394.
- 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.
- Sawyer, E.W., 2008, Atlas of Migmatites. The Canadian Mineralogist Special Publication, 9. Canadian Science Publishing (NRC Research Press), Quebec, Canada, 371 pp.
- Schulmann, K., Lexa, O., Štípská, P., Racek, M., Tajčmanová, L., Konopásek, J., Edel, J.-B., Peschler, A. and Lehmann, J., 2008, Vertical extrusion and horizontal channel flow of orogenic lower crust: key exhumation mechanisms in large hot orogens? *Journal of metamorphic Geology*, 26, 273-297.
- 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.
- So, Y., Rhee, C.W., Choi, P.Y., Kee, W.S., Seo, J.Y. and Lee, E.J., 2013, Distal turbidite fan/lobe succession of the Late Paleozoic Taean Formation, western Korea. *Geoscience Journal*, 17, 9-25.
- Spakman, W., 1990, Tomographic images of the upper mantle below central Europe and the Mediterranean. *Terra Nova*, 2, 542-553.
- 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.
- Thomson, S.N., Ring, U., Brichau, S., Glodny, J. and Will, T.M., 2009, Timing and nature of formation of the Ios metamorphic core complex, southern Cyclades, Greece. In: Ring U., and Wernicke, B. (eds.), *Extending a Continent: Architecture, Rheology and Heat Budget*. Geological Society, London, Special Publications, 321, 139-167.
- Turner, S.P., Platt, J.P., George, R.M.M., Kelley, S.P., Pearson, D.G. and Nowell, G.M., 1999, Magmatism associated with orogenic collapse of the Betic-Alborandomain, SE Spain. *Journal of Petrology*, 40, 1011-1036.
- van Wees, J.D., de Jong, K. and Cloetingh, S., 1992, Two dimensional P-T-t modelling and the dynamics of extension and inversion in the Betic Zone (SE Spain). *Tectonophysics*, 203, 305-324.
- Vanderhaeghe, O., Medvedev, S., Fulsack, P., Beaumont, C. and Jamieson, R.A., 2003, Evolution of orogenic wedges and continental plateaux: insights from crustal thermalmechanical models overlying subducting mantle lithosphere. *Geophysical Journal International*, 153, 27-51.
- Villa, I.M., 1998, Isotopic closure. *Terra Nova*, 10, 42-47.
- von Blanckenburg, F. and Davies, J.H., 1995, Slab break-off: a model for syncollisional magmatism and tectonics in the Alps. *Tectonics*, 14, 120-131.
- von Raumer, J.F., Finger, F., Veselá, P. and Stampfli, G.M., 2014, Durbachites-Vaugnerites - a geodynamic marker in the central European Variscan orogen. *Terra Nova*, 26, 85-95
- 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.
- Wortel, M.J.R. and Spakman, W., 1992, Structure and dynamics of subducted lithosphere in the Mediterranean region. *Proceedings Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen*, 95, 325-347.
- 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 10월 6일

심 사 일 : 2014년 10월 6일

심사완료일 : 2014년 10월 10일