

안면도에 분포하는 태안층의 변성연대 최초 측정: 233 Ma U-Pb 티타나이트 연대와 231-229 Ma $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 백운모 일치 연대

Koenraad de Jong^{1,‡} · 한석영¹ · Gilles Ruffet² · 이기욱³

¹서울대학교 지구환경과학부

²University of Rennes I

³한국기초과학지원연구원 환경과학연구부

요 약

이 연구에서는 서해 안면도 지역에 분포하는 고생대 중기 저탁암층인 태안층을 대상으로 변성작용의 시기를 밝히기 위해 동위원소 연대측정을 수행하였다. 탄산규질암으로부터 분리된 변성 기원 티타나이트에 대해 SHRIMP를 이용하여 232.5 ± 3.0 Ma $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 하부교점연대를 구하였으며, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 레이저 탐침 연대 측정을 통하여 백운모 입자를 분석하여 230.7 ± 1.0 Ma와 228.8 ± 1.0 Ma의 가평형 연대를 구하였다. 분석된 광물이 생성될 당시의 변성 온도 조건은 각 광물의 폐쇄온도보다 아래였던 것으로 추정된다. 그러므로 태안층에 산출하는 티타나이트의 U-Pb 연대와 백운모의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 냉각 연대가 아닌, 태안층의 변성 시기를 의미하며, 변성작용이 후기 트라이아스기에 일어났다는 것을 지시한다. 분석된 백운모는 변형되지 않은 입자로서 녹색편암상 변성작용을 받은 이질암의 주 변성-변형 구조를 가로지르거나, 잘 발달된 이차파랑벽개와 평행하게 존재한다. 이는 태안층이 백운모의 생성에 앞서 2번의 연성 변형작용을 거쳐왔음을 의미한다. 백운모 연대 스펙트럼들은 237 Ma의 기록을 보존하고 있으며, 이는 화성암 관입 이전에 발생한 태안층의 습곡작용과 관련된 것으로 보인다.

주요어: 안면도, 태안층, 티타나이트 SHRIMP, 백운모 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 레이저 탐침, 트라이아스기

Koenraad de Jong, Seok young Han, Gilles Ruffet and Keewook Yi, 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. v. 50, no. 5, p. 593-609

ABSTRACT: Isotopic dating has established that the Middle Paleozoic turbidites of the Taean Formation on Anmyeondo in the West Sea were affected by metamorphism during the Late Triassic. We obtained a $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ lower intercept age of 232.5 ± 3.0 Ma (95% confidence, $MSWD = 1.2$) of metamorphic titanite from a calc-silicate rock by Multi Collector Sensitive High-Resolution Secondary Ion Mass Spectrometry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ laser probe pseudo-plateau ages of 230.7 ± 1.0 Ma and 228.8 ± 1.0 Ma (1σ) for two single grains of metamorphic muscovite. We consider that the metamorphic temperature was below the closure temperatures of titanite and muscovite. Consequently, the concordant U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ mineral ages are not cooling ages but demonstrate that the metamorphism of the Taean Formation on the island occurred in the earliest Late Triassic (Carnian). The dated muscovite occurs as undeformed grains that cross-cut the main tectono-metamorphic fabric in greenschist facies metapelites, or form undeformed grains in rocks with a well-developed secondary crenulation cleavage. This suggests that the two phases of ductile deformation that affected these Paleozoic sediments occurred earlier. The muscovite age spectra show evidence of an earlier isotopic system of about 237 Ma, which could relate to the observed pre-magmatic folding of the Taean Formation.

Key words: Anmyeondo, Taean Formation, Titanite SHRIMP, Muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ laser probe, Triassic

(Koenraad de Jong and Seok young Han, 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; Keewook Yi, Division of Earth and Environmental Sciences, Korea Basic Science Institute, 162 Yeongudanji-ro, Ochang, Cheongwon, Chungbuk 363-883, Republic of Korea)

[‡] Corresponding author: +82-2-880-6632, E-mail: keuntie@snu.ac.kr

1. 서 언

한반도를 이루는 기반암의 많은 부분은 선캄브리아기 대륙 지각으로 이루어져 있으며, 이들은 북쪽에서부터 남립, 경기, 영남육괴로 분류된다(그림 1). 이들 지역은 주로 고변성작용을 받은 고원생대 편마암으로 이루어져 있으며, 소수의 중원생대-신원생대 암석, 그리고 고생대 지층을 포함하기도 한다(e.g., Lee and Cho, 2012; Oh, 2012; Chough, 2013; Choi, 2014). 이들 선캄브리아기 기반암들은 여러 차례 변성, 변형 과정을 거친 신원생대 후기- 고생대 중, 후기 퇴적암과 화산암으로 이루어진 임진강대와 옥천변성대에 의해 구분되어진다(Chough *et al.*, 2000; Lim *et al.*, 2005; Cho *et al.*, 2007, 2013; Choi *et al.*, 2012; Chough, 2013; Choi, 2014; 그림 1). 경기육괴의 서쪽 연안지역에 위치한 태안-서산-당진, 안면도-보령 지역, 그리고 영흥도-선재도-대부도 지역에서는, 태안층으로 분류되는 수차례 변형을 받은 변성퇴적암이 산출하며, 이들은 층서적으로 경기육괴의 상부에 위치한다

(그림 1). 현재 안면도에서는 최소 4번 이상의 관입 작용이 인지되며, 일부 관입암체는 변성작용을 받은 것으로 관찰된다. 고감도 고분해능 이온 마이크로프로브(SHRIMP)를 이용한 저어콘 연대측정을 통하여 이 관입 작용 중 일부는 쥐라기와 후기 트라이아스기에 일어났음이 밝혀졌다(Han, 2014). 최근까지 태안층은 화석이 산출되지 않아 선캄브리아기에 쌓인 퇴적층으로 추정되었으나(Na, 1992) 최근 SHRIMP를 이용한 쇄설성 저어콘 연대 측정을 통하여 태안층의 퇴적층이 후기 실루리아기 이후에 쌓였던 것으로 밝혀졌다(Cho, 2007; Cho *et al.*, 2010; Kee *et al.*, 2011; Na *et al.*, 2012; So *et al.*, 2013; Han, 2014). 태안층 사암 내 쇄설성 저어콘 연대의 분포는 임진강대에서 분석된 시료와 비슷한 양상을 보이며(Cho *et al.*, 2005; Han, 2014) 옥천변성대의 일부 지층에서도 비슷한 결과가 보고되었다(Cho *et al.*, 2013). 한편, 태안층에서 산출된 저어콘 입자들은 변성과정에서 생성된 외연부의 두께가 너무 얇아 SHRIMP 분석을 통해 변성 시기를 정확히 알기 어렵다. 이는 태안층에서 변성과정과 광물의 재결정화 작용이 충분히 높은 온도(상부 각섬암상이나 그 이상의 변성상)에서 일어나지 않았다는 것을 지시한다(Williams, 2001; Parrish and Noble, 2003). 현재까지 태안층 사암의 쇄설성 저어콘 외연부에서 측정된 연대는 ~280 Ma (Kee *et al.*, 2011)이다. 이 결과들을 바탕으로, 이 연구에서는 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 레이저 탐침 측정법과 U-Pb SHRIMP 측정법을 이용하여 백운모와 티타나이트를 분석하여 안면도에서 산출되는 태안층의 변성 시기를 측정하였다(그림 2). 운모류와 같이 암석을 구성하는 주요 광물을 이용하여 동위원소를 측정하는 것은 부성분광물을 이용하는 것에 비해 분석 결과를 좀 더 쉽게 지질 사건에 관련시킬 수 있다는 장점이 있다. Han (2014)에서 측정된 233 ± 3 Ma(티타나이트, U-Pb SHRIMP), 230.7 ± 1.0 Ma와 228.8 ± 1.0 Ma(백운모, ⁴⁰Ar/³⁹Ar) 연대와 이 연구에서 보고되는 연대는 첫번째로 정밀하게 측정된 태안층의 변성 연대이다. 또한, 측정된 연대에 대한 지구조적 의미에 대해서 글의 후반부에서 토의하려고 한다.

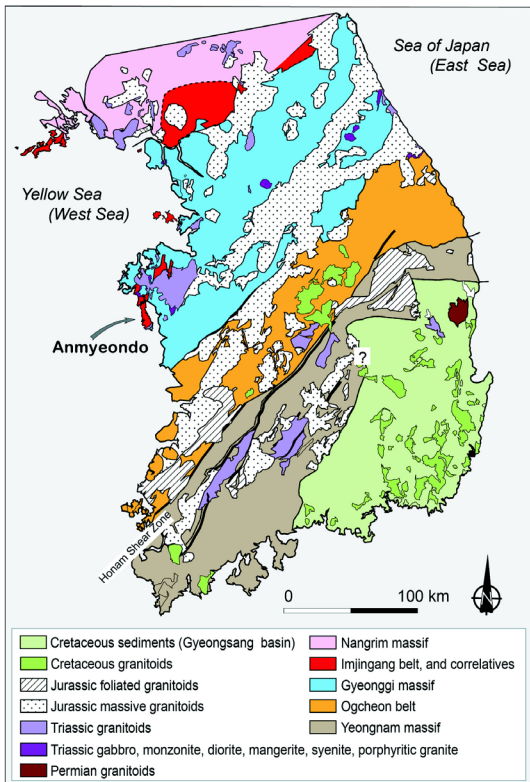


Fig. 1. Simplified tectonic map of Korea.

2. 지질학적 배경

경기육괴(그림 1)는 변성복합체로서 주로 고원생대

중기($\sim 1.93\text{-}1.83$ 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 구성되어 있다(Lee *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2008; Oh *et al.*, 2009). 또한, 경기육괴 서부에서는 고생대의 정편마암, 변성 퇴적암이 분포하며, 또한 변성염기성암(metabasite), 규장질암, 렌즈상으로 나타나는 사문암화된 초고철질 암석이 함께 산출된다(월현리 복합체; Kim and Kee, 2010; Kim *et al.*, 2011b, 2011c). 일부 사문암들에서는 종종 녹회석 잔류물을 석류석 반정에 포함된 형태로 지닌 고철질 백립암이 관찰되며, 강한 후퇴변성작용의 영향을 받았다. 이들은 트라이아스기에(Guo *et al.*, 2005; Kim, S.W. *et al.*, 2006) 775-850°C와 1.65-2.1 GPa (Oh *et al.*, 2005; Kim, S.W. *et al.*, 2006; Zhai *et al.*, 2007)의 조건하에서 변성작용을 받았음이 밝혀졌다. 이를 바탕으로, Kim *et al.* (2011b, c)은 홍성 지역을 경기육괴가 아닌, 대륙 충돌대의 일부로 주장하였다. 그러나 일부 연구에서는 이러한 고압 변성암들이 신원생대(770-742 Ma)의 관입암(덕정리 편마암; Oh *et al.*, 2005; Kim, S.W. *et al.*, 2006, 2008)과 관련이 있다고 해석하였으며, 홍성 지역을 경기육괴의 일부로 받아들였다. Park *et al.* (2013)은 신원생대 에클로자이트의 모암에 해당하는 암체가 당시 경기육괴의 대륙 주변부에 속하였던 고원생대 편마암을 관입한 것으로 설명하였다. 홍성 지역에서 고압 백립암이 산출되는 경기육괴는 3개의 선캠브리아 육괴 중에서 트라이아스기의 변성작용에 상당한 영향을 받은 지역으로 보인다. 이는 우라늄을 포함한 부성분 광물들이 250-215 Ma의 동위 원소 연대를, 특히 대부분 235-231 Ma 사이의 집중연대분포를 보이는 것에서 알 수 있다(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; Cho *et al.*, 2013b; Lee *et al.*, 2014; Yengkhom *et al.*, 2014)

임진강대는(그림 1) 263-250 Ma의 동위 원소 연대로부터 밝혀진 대로(Ree *et al.*, 1996; Cho *et al.*, 2005; Kee *et al.*, 2011) 트라이아스기에 중압, 중-고온의 바로비안형(Barrovian type) ($T = 500\text{-}800^\circ\text{C}$; $P: 1.2$ GPa 이하; Cho *et al.*, 2007) 조건에서 일어난 지구조운동에 의해 영향을 받았다. 옥천 변성대(그림

1)의 암석들 또한 여러 번의 중첩되는 변성과 변형작용의 영향을 받았지만 임진강대에 비해 상대적으로 낮은 온도와 압력 조건하에 있었던 것으로 생각된다($T = 500\text{-}650^\circ\text{C}$; $P = 0.4\text{-}0.8$ GPa; Cho and Kim, 2005). 광물의 동위 원소 연대는 ~ 290 에서 ~ 160 Ma (10-15%의 오차)로 변하며 이는 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). 앞에서 언급된 온도-압력 조건들은 태안층과 임진강대, 그리고 옥천 변성대의 변성, 변형 작용이 지하 20-35 km 깊이에서 일어났으며 충돌 환경의 가능성을 지시한다. 이 암석들의 모암은 아마도 선캠브리아기의 경기육괴 주변을 따라 분포하는 퇴적층과 고생대의 부가체 또는 경기육괴 주변으로 부가된(accreted) 외부의 퇴적층이었을 것으로 추정된다. 임진강대와 옥천대는 지구조적으로 복잡한 모델에서(Chough *et al.*, 2013) 봉합대(Chough *et al.*, 2000)로써 중국의 친링-다비-수루 초고압 변성대의 동쪽 연장선으로 알려져 있지만, 구체적인 지구조 모델은 아직 논의 중이다(Ree *et al.*, 1996; Lee and Cho, 2003; Oh *et al.*, 2005, 2006a; 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).

한반도의 대부분의 지역은 트라이아스기와 쥐라기의 큰 심성암체에 의해 관입되었다(그림 1; Sagong *et al.*, 2005; Park *et al.*, 2010; Kee *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2011a). 특히, 트라이아스기 후기(Carnian to early Norian)에도 화성활동이 활발히 일어나 모든 주요 지구조에 영향을 주었다(그림 1). 트라이아스기 후기 반려암-몬조나이트, 섬강암-화강암체는 237-219 Ma의 관입연대와, 켈크-알칼리에서 쇼쇼나이트 특징을 보여준다(Oh *et al.*, 2006b; Jeong *et al.*, 2008; Choi *et al.*, 2009; Williams *et al.*, 2009; Seo *et al.*, 2010; Kee *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2011a). 이러한 종류의 Mg와 K이 풍부한 마그마들은 주로 맨틀에서 생성되며 일반적으로 수렴대에서 확장 환경(extensional tectonic setting)이 조성되었을 시에 비교적 짧은 기간 동안 생성되었을 것으로 추정된다(Bonin, 1986; Liégeois and Black, 1987; Davies and von Blanckenburg, 1995; Turner *et al.*, 1996; Liégeois *et al.*, 1998; Gill *et al.*, 2004; Dilek and Altunkaynak, 2009; von Raumer

et al., 2014). 이는 비단 대륙 충돌 환경에 국한된 논의는 아니며, 한반도의 지구조 시스템이 명확하게 밝혀지지는 않았지만, 트라이아스기 후기 화성활동은 보통 판이 충돌한 이후 인장력이 작용하는 지구조적 환경으로의 변화(Williams *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011a)에 의한 생성으로 해석되며 암석권의 박리(delamination) (Choi *et al.*, 2009) 혹은 해양판의 단절(oceanic slab break-off)에 따른(Seo *et al.*, 2010; Oh, 2012; Choi, 2014) 연약권의 용기와 연결될 수 있다.

3. 태안층

안면도에서 태안층(그림 2)은 밝은 색의 사암과 어두운 회색의 이질암이 교호하며, 석회질 사암과 탄산염암, 그리고 드물게 검은 세립질의 응회암 층이 얇게(< 1~2 cm) 산출한다. 태안층의 암석들은 심해선상지에서 쌓인 저탁암으로 해석되고 있다(Lim *et al.*, 1999; Choi *et al.*, 2008; So *et al.*, 2013). 쇄설성 저어콘에 대한 SHRIMP U-Pb 분석 결과 가장 젊은

쇄설성 저어콘들의 집중연령은 고생대 중기인 431에서 420 Ma (~1%의 오차)이며(Cho, 2007; Cho *et al.*, 2010; Kee *et al.*, 2011; Na *et al.*, 2012; So *et al.*, 2013; Han, 2014), 이는 태안층이 실루리아기 후기 이후에 퇴적되었다는 것을 의미한다.

태안층 내 변성 이질암의 주요 변성광물은 흑운모와 백운모이며, 알루미늄 규산염 광물(남정석 또는 홍주석)은 없는 반면에 석류석은 매우 드물게 존재한다. FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O의 6성분계에서 알루미늄이 적은 변성 이질암 내 흑운모는 400°C 부근에서 생성되며, 석류석은 450°C 부근에서 생성되는 것으로 보고된다(Bucher and Grapes, 2011). 그러나 Bucher and Grapes (2011)는 변성 이질암 내 석류석이 망간과 칼슘의 선택적 결합에 의해서 상당히 더 낮은 온도에서 생성될 수 있음을 언급하였다. 이번 동위원소 연대측정에 사용된 시료와 같은 탄산규질암은 탄산염과 밝은 녹색의 녹섬석, 티타나이트(titanite), 클리노조이사이트-녹력석(clinozoisite-epidote)으로 구성되지만 칼슘함량이 높은 그로술라(grossular) 석류석등은 관찰되지 않는다. 이를 종합하면, 태안층의 변성작용은 450°C 이하의 중-하부 녹색편암상의 조건에서 일어났을 것으로 추정된다.

태안층에는 두 번의 변형 작용이 중첩되어 있다. 먼저 생성된 엽리인 S₁은 드물게 나타나는 횡와등사 습곡의 측면엽리로서 변성 이질암에서 국지적으로 발달해 있다. 이들 S₁은 석영과 운모의 분화로 잘 발달되어 있으며, 때때로 층리와 평행하다. 변성 사암에서 석영의 모양이 특정한 방향성을 갖고 발달하는 것은 잘 관찰되지 않는다. 대부분의 탄산규질암들은 명확한 구조변성조직을 보이지 않지만, 국지적으로 각섬석의 선구조를 갖는 엽리가 생성된다. F₂ 습곡은 눈에 보일 정도로 크고 습곡의 양 날개 사이가 10°에서 120° (tight to open) 벌어져 있고 습곡을 이루는 층들이 서로에 대해서 미끄러진 구조를 갖는 비조화 습곡이다. 이 습곡은 변성 이질암에 발달하여 있고 이 습곡의 측면엽리로서 파랑벽개 S₂가 변성 사암의 층들과 각을 이루며 발달하였다.

안면도의 태안층은 북동에서 동북동 방향의 주향을 갖는 수 미터에 달하는 두꺼운 엽기성 암맥을 많이 포함한다. 암맥의 조직은 임의의 방향으로 배열된 사장석 결정체를 포함한 조립 현무암질에서부터, 사장석 결정이 눈으로 보이지 않는 세립질까지 다양하다. 암

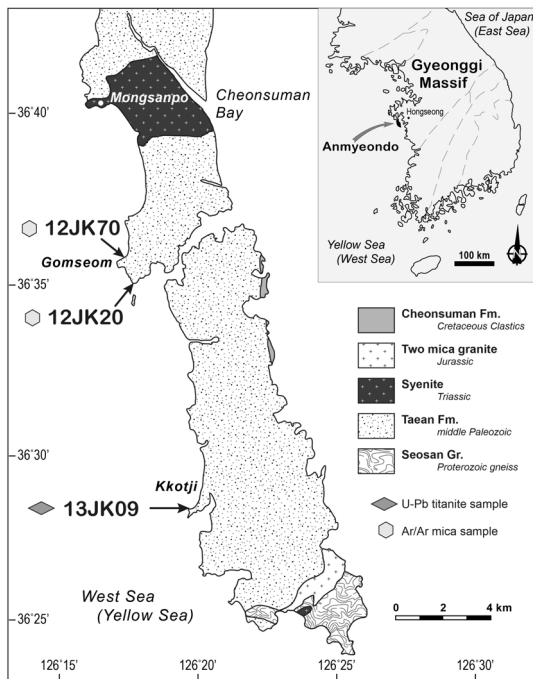


Fig. 2. Geologic sketch map of Anmyeon Island and adjacent areas with sample locations. Modified from So *et al.* (2013).

맥에 행인상 구조(amygdules)나 관입시 암맥 경계부에 생길 수 있는 특징적인 구조(ex, chilled margin)가 없는 것으로 보아 상대적으로 깊은 곳에서 관입했을 것이다. 이 암맥들은 국지적으로 잘 발달한 S₁ 엽리, F₂ 습곡, 그 측면벽개 S₂를 끊으며 지난다. 모든 암맥들은 흑운모가 풍부하며 그 크기는 수 밀리미터까지로 이는 암맥들이 변성을 받았을 수 있음을 의미한다.

몽산포(그림 2)에서는 비등립질, 분홍색 또는 주황색의 섬장암이 7미터 두께의 엽기성 암맥과 태안층의 경계를 자르며 관입하였다. 이것은 암맥이 섬장암보다 이전에 퇴적층에 관입하였음을 보여준다. 섬장암에서 얻은 저어콘의 연대를 측정된 결과, 229.6 ± 3.5 Ma ²⁰⁶Pb/²³⁸U 연대가 측정되었으며(Han, 2014), 이는 Cho (2007)에서 얻어진 ~229 Ma U-Pb 연대와 부합한다. 이 섬장암은 세립 고철질 암석을 포획함으로써 많이 포함하는데, 포획암의 크기는 수십 센티미터부터 수 미터 크기의 암체를 이루며 때로는 경계부에 냉각주변상(chilled margin)을 보여준다. 또한, 고철질 암체 내로 섬장암이 침투하여 전체적으로 맥이 형성되어있다. 두 암상 사이의 불규칙한 모양의 경계와, 고철질 암석 경계부에 평행하게 발달한 흐름 구조(flow banding)는 두 암석 모두 액체 상태로 존재하였으며 점성도의 차이로 인해 서로 섞이지 않았음을 보여준다. 섬장암은 수십 센티미터 두께의 선구조와 면구조가 잘 발달한 초암쇄암(ultra-mylonite) 구조를 가지고 있다. 이는 고체 상태에서의 지구조변형을 나타내며, 화성암체들이 변성 퇴적암의 변형이 끝난 이후에 관입하였지만, 그 후로도 지구조운동의 영향이 있었음을 보여준다.

4. 지질연대측정

4.1 시료 준비

4.1.1 13JK09 (탄산규질암)

시료 13JK09 (36°28'20.60"N; 126°19'38.84"E)는 담녹색의 탄산규질암에서 분리한 티타나이트이며, 흑운모가 풍부한 변성이질암과 교호하고 있다. 변성이질암층에서는 층리와 평행한 S₁ 구조가 발달되어 있다. 티타나이트는 100-250 μm 크기로 반자형에서 자형의 형태를 보이고, 마름모꼴이나 늘어난 형태가 일반적이며 다소 마모된 입자도 관찰된다. 일부 입자에서는 티탄철석으로 생각되는 포획물이 관찰된

다. 후방산란전자영상(Back-scattered electron images)에서 티타나이트 입자들은 부분적으로 줄무늬형 누대나 부채꼴 모양의 누대를 보이며, 누대의 경계는 곧은 편이다(그림 3). 패치형(patchy) 누대구조 역시 관찰되는데, 이는 변성과정 동안 변성 조건이 변하였고 이에 반응하여 재결정화 작용 또는 교대작용이 일어난 것으로 보인다(Ueda *et al.*, 2012).

4.1.2 12JK20, 12JK70 (흑운모 변성이질암)

시료 12JK20 (36°35'2.11"N; 126°17'32.01"E)은 변형을 받지 않은, 1-2 mm 직경의 변성 기원 백운모 입자이다. 이 입자는 암회색의 사암층 내에서 발달된, 운모가 풍부한 수 cm 간격의 파랑습곡 S₂에서 분리하였으며 S₂는 사암의 층리와 경사를 이룬다. 시료 12JK70 (36°35'50.72"N; 126°17'11.74"E)은 2.5-3.0 mm 직경의 백운모 입자이며, 이 입자들은 수십 cm 두께의 변성이질암에서 석영-흑운모-백운모로 이루어진 주 변형구조 S₁을 교차하여 가로지르는 배열을 보여준다. S₁은 주변 사암의 층리와 거의 평행하다.

4.2 U-Pb 연대측정

4.2.1 U-Pb 티타나이트 연대측정

티타나이트는 칼슘 티타늄 규산염(CaTiSiO₅)으로, 격자 내에 우라늄을 포함하며 저어콘, 모나자이트와 비슷한 성질을 가진다. 티타나이트는 Tilton and Grunefelder (1968)에 의해 처음으로 U-Pb 연대측정에 사용되었으며, 이후로 지구조 운동과 관련된 여러

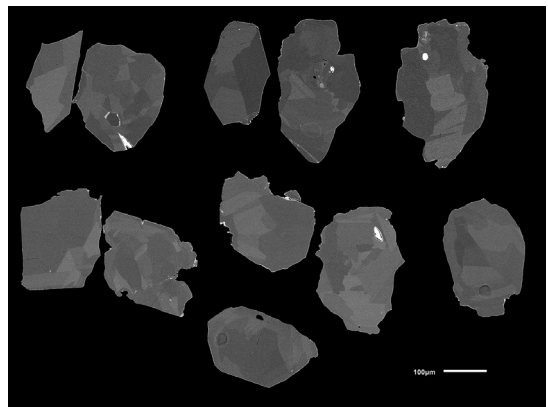


Fig. 3. Cathodoluminescence and backscattered electron images of representative zircon and titanite grains from calc-silicate rock 13JK09 at Kkotji Beach. Scale Bar 100 micron.

Table 1. U-Th-Pb isotopic results for metamorphic titanite (uncorrected) from calc-silicate 13JK09 at Kkotji Beach.

Spot	$^{206}\text{Pb}_{\text{common}}^a$ (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm\%$
JK09-1.1	15.52	52	29	0.58	23.78	1.8	0.1748	2.9
JK09-2.1	72.81	23	35	1.56	7.02	2.8	0.6341	1.1
JK09-3.1	14.50	50	17	0.36	23.44	1.9	0.1668	2.1
JK09-4.1	20.22	53	24	0.46	21.05	1.8	0.2128	1.8
JK09-5.1	11.29	91	37	0.42	23.53	1.4	0.1413	1.7
JK09-6.1	38.57	34	28	0.85	16.61	2.3	0.3595	1.6
JK09-7.1	24.72	31	24	0.80	20.21	2.4	0.2487	2.2
JK09-8.1	26.71	29	19	0.66	20.62	2.5	0.2643	2.2
JK09-8.2	16.78	65	43	0.69	22.94	2.0	0.1850	1.8
JK09-9.1	15.99	55	28	0.54	23.78	3.4	0.1785	2.0
JK09-10.1	39.04	35	15	0.43	16.68	2.4	0.3631	1.6
JK09-11.1	19.23	42	13	0.31	21.88	2.0	0.2047	2.0
JK09-11.2	10.11	90	32	0.36	24.02	1.4	0.1318	1.7
JK09-12.1	8.85	88	54	0.63	25.08	1.4	0.1216	1.8

^a The proportion of $^{206}\text{Pb}_c$ by ^{207}Pb correction.

화성, 변성작용 연구에 사용되었다(Corfu and Muir, 1989; Getty and Gromet, 1992; Cliff *et al.*, 1993; Scott and St. Onge, 1995; Resor *et al.*, 1996; Frost *et al.*, 2000; Tanner and Evans, 2003; Ueda *et al.*, 2012; Spencer *et al.*, 2013; Yi *et al.*, 2014). 티타나이트는 높은 폐쇄온도(closure temperature)(ca. 650-700°C)를 가지고 있으며 변성암에서 쉽게 관찰할 수 있어(고철질 암석, 탄산 규질암, 탄산염 등) 동위원소 분석에 적합하다(Scott and St. Onge, 1995; Frost *et al.*, 2000; Tanner and Evans, 2003). 티타나이트는 보통 변성 광물 조합에 포함되기 때문에, 티타나이트가 (재)결정화할 때 주변 광물들과 Ti, Ca를 교환 한다(Scott and St. Onge, 1995). 그러므로 각섬암상이나 더 낮은 변성 조건에서 새로 생성된 티타나이트는 폐쇄온도 이하로 냉각된 시기가 아닌, 변성작용에 의한 결정화의 시기를 기록하게 된다(Resor *et al.*, 1996; Frost *et al.*, 2000; Tanner and Evans, 2003).

4.2.2 분석절차

티타나이트 입자들은 보편적인 광물 분리법을 사용하여 분리되었다. 암석 시료들을 유압파쇄기에서 부순 후 링밀(ring mill)을 사용하여 분말을 만들었다. 이 분말을 체로 쳐서 63-245 μm 크기의 분말을 분리한 후 패닝(panning)을 통하여 중광물을 분리하였다. 자석으로 철광물을 제거하고 중액 분리를

마친 후 실체현미경에서 100-150개의 티타나이트를 수선별을 하였다. 이를 에폭시 마운트에 표준 광물 BLR-1 (Ontario metamorphic megacryst, 1047.1 \pm 0.4 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = 0.1764$, U = 261 ppm; Aleinikoff *et al.*, 2007)과 함께 마운팅 하였으며, 입자의 중간이 노출될 정도로 에폭시 마운트를 연마한 후 금으로 코팅하였다. 입자들의 내부 구조를 관찰하기 위해, 이차전자영상(second electron images, SEI)과 후방산란전자영상을 한국기초과학연구원에 설치된 JEOL JSM-6610LV 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)를 사용하여 촬영하였다. U-Pb 연대는 한국기초과학연구원에 설치된 SHRIMP IIe를 사용하였으며, 분석 절차는 Williams (1998), Ireland and Williams (2003), Yi *et al.* (2014)에 기록된 방법을 따랐다. 1차 이온빔의 강도와 크기는 2.9-3.4 nA, 25 μm 였으며, 각 분석은 Zr, Pb, U과 몇몇 원소를 5번씩 스캔하였다. 보통납의 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 비율은 Terra-Wasseburg 도표에서 분석점들의 회귀직선과 Y축 간의 교점으로써 간접적으로 계산되었다. 분석된 자료들은 SQUID 엑셀 매크로 프로그램(Ludwig, 2009)과 ISOPLOT/Ex 프로그램(ver. 3.75) (Ludwig, 2012)을 사용하여 처리하였다.

4.2.3 결과

12개의 티타나이트 입자에서 14개의 분석을 실시

하였다(표 1). Terra-Wasseburg 도표에서 분석점들은 잘 정의된 회귀직선을 따라 분포하며, 이 직선과 일치곡선의 교점으로부터 232.5 ± 3.0 Ma ($n=14$; $MSWD = 1.2$)의 하부교점연대가 계산된다(그림 4). 회귀직선과 Y축과의 교점은 0.8400 ± 0.013 이며, 이는 이 분석에서 간접적으로 계산된 보통납의 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 비율이다. 이 값은 Stacey and Kramers (1975)의 모델값인 0.851과 오차 안에서 일치한다.

4.3 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 연대측정

4.3.1 분석절차

암석 시료를 분쇄하여 초음파 세척기에서 증류수와

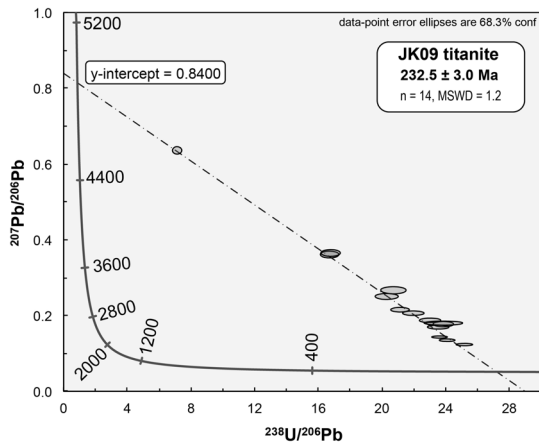


Fig. 4. Concordia diagrams showing the SHRIMP spot analyses of titanite from calc-silicate rock 13JK09 from the Taean Formation at Kkotji Beach.

함께 세척한 후에, 0.3 - 2.0 mm 크기의 백운모 입자들을 수선별하였다. 분리한 입자들을 알루미늄 호일(11 mm × 11 mm × 0.5 mm)에 감싼 후 조사 캔(irradiation can)에 담았다. 중성자 플럭스 모니터(neutron flux monitor)는 8~10개의 시료마다 삽입되었다. 시료와 표준광물(각점석 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. 중성자 플럭스 구배를 $\pm 0.2\%$ 의 정확도로 모니터링했다. 후에 시료 광물들은 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 단계 가열법(step-heating technique)을 이용하여 분석되었으며, 사용된 장비는 프랑스의 Geosciences Rennes에 설치된 Synrad[®] CO₂ continuous laser이다. 분석 절차는 Ruffet *et al.* (1991, 1995)를 따랐다. 처음 분석은 시료가 없이 분석을 시행하였으며, 이후에도 매 3번째 분석에서 반복하였고, 이 측정치를 시료와 함께 분석된 기체 성분을 수정하는데 사용하였다. 동위원소 분석은 MAP215[®] 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)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.

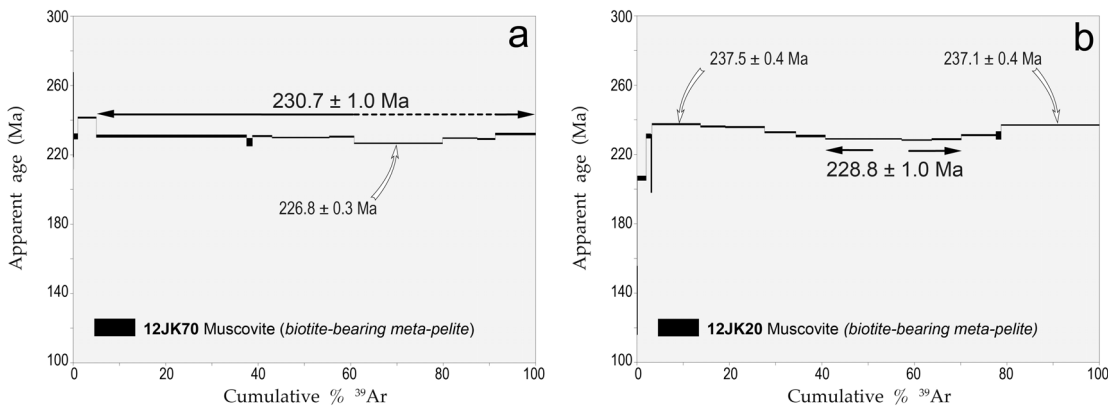


Fig. 5. Step-heating age spectra of an undeformed muscovite grain in (a) 12JK70 cross-cutting the penetrative S₁, and (b) 12JK20 with a well-developed crenulation cleavage S₂, both from biotite-bearing meta-pelites in the Taean Formation at Gomseom.

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 분석 결과는 표 2에 있으며, 연대 스펙트럼으로서 그림 5a, 5b에 도시하였다. 측정된 연대의 오차는 1σ 레벨로 도시되었고, $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_K$ 비율과 모니터의 연대, 붕괴상수에 대한 오류는 포함되지 않았다. 이 분석에서는 가평형(pseudo-plateau) 연대를 계산하였는데, 그 이유는 원래의 평형(plateau) 연대는 일반적으로 70% 이상의 ^{39}Ar 이 최소 3 단계 이상의 분석에서 추출되어 이들의 연대가 1σ 에서 일치하여야 성립되지만 이 분석에서는 평형 연대의 정의를 만족하는 연대를 얻지 못하였기 때문이며, 대신 각 분석의 가중평균을 측정하여 이를 가평형 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.

4.3.2 결과

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 레이저 탐침 측정법으로 백운모를 분석한 결과, 두개의 안장 모양(saddle type)의 연대 스펙트럼이 도시되었다(그림 5a, 5b). 시료 12JK70의 경우 분석의 저온, 고온 단계에서 일치하는 연대가 계산되었으며(95%의 ^{39}Ar 추출) 230.7 ± 1.0 Ma (1σ)의 가평형 연대와 중간 온도 단계에서 가장 젊은 연대인 226.8 ± 0.3 Ma가 측정되었다(그림 5a; 표 2) 시료 12JK20은 좀 더 강조된 안장 모양의 연대 스펙트럼이 도시되었으며, 가운데 부분에서 228.8 ± 1.0 Ma (1σ , 25% ^{39}Ar 추출)의 가평형 연대가 측정되었다. 반면 저온과 고온 단계에서의 분석은 각각 237.5 ± 0.4 Ma와 237.1 ± 0.4 Ma의 연대가 측정되었다.

5. 해석

티타나이트에서 얻어진 232.5 ± 3.0 Ma 하부교점 연대는 백운모에서 얻어진 230.7 ± 1.0 Ma, 228.8 ± 1.0 Ma $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 가평형 연대와 일치한다. 이들 백운모는 태안층의 이질암에서 주 변성 구조인 S_1 구조를 가로지르거나(12JK70), S_2 구조 내에서 재결정화된 형태(12JK20)로 존재한다. 일반적으로, 변성암에서의 동위원소 연대측정법은 해당 지질 시스템이 특정 온도 아래로 내려간 시점을 측정하며, 방사성 붕괴로 의해 생성된 동위원소가 광물 결정 내에 누적되는 이들 온도를 수학적으로 정의된 폐쇄온도(closure

temperature) (Dodson, 1973), 또는 경험적으로 정의된 동결온도(blocking temperature) (Purdy and Jäger, 1976)라고 부른다. 이 연구에서 분석된 광물에 대해 자주 인용되는 폐쇄온도는 중간의 냉각속도에서 티타나이트의 경우 $660\text{--}700^\circ\text{C}$ (Scott and St. Onge, 1995; Frost *et al.*, 2000)이고, 백운모는 $\sim 350^\circ\text{C}$ (Robbins, 1972)이다. 하지만, 시스템의 폐쇄는 온도 뿐만 아니라 광물의 화학조성(Fe/Mg 비율, 할로겐 함량 등), 확산 구조, 입자의 크기, 냉각 속도와 압력 조건에도 영향을 받는다(Lister and Baldwin, 1996; Harrison *et al.*, 2009; Villa *et al.*, 2014). 이 연구에서는 Harrison *et al.* (2009)에서 측정된 가장 최신의 확산 계수를 사용하였다(그림 6). 입자 크기가 0.5-1 mm인 백운모 입자의 경우 $1\text{--}100^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 의 냉각속도에서 폐쇄온도는 $\sim 420^\circ\text{C}$ 에서 $\sim 520^\circ\text{C}$ 까지 변화한다(그림 6). de Jong and Ruffet (2014)은 홍성 지역에서 산출하는 각섬암의 각섬석과 흑운모를 분석하여 230-228 Ma (1σ 오차: 1 Ma)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 일치(가)평형 연대를 얻었으며, 이를 고속 냉각작용에 의한 것으로 해석하였다($100\text{--}150^\circ\text{C}/\text{Ma}$). 현재까지 경기육괴와 홍성 지역에서 보고된 후기 트라이아스기 U-Pb 저어콘 연대 역시 비슷한 범위에 분포하며 (Guo *et al.*, 2005; Kim, S.W. *et al.*, 2006, 2008, 2011a, 2011b; Kee, 2011), 이 역시 고속 냉각작용에 대한 가능성을 제시한다. 태안층의 변성작용도 후기 트라이아스기 한반도에서 일어난 빠른 지구조진화

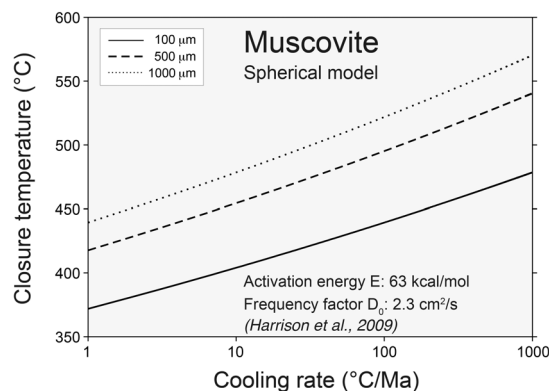


Fig. 6. Variation of closure temperature with cooling rate and diffusion dimensions between 0.1 and 1 mm appropriate to 0.5 GPa pressure for Arrhenius parameters (activation energy, E and diffusion coefficient, D_0) adopted from Harrison *et al.* (2009) and Pitra *et al.* (2010).

Table 2. ⁴⁰Ar/³⁹Ar analytical data of laser step heating of a muscovite single grains from a biotite-bearing metapelites Taean Formation (Sinon Unit) at Gonseom.

12JK20 Muscovite		16 steps							Apparent age (Ma)	Error (Ma)
Laser power (mW)	Atm. Cont. (%)	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K Error	% ³⁹ Ar _K	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar _K	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar _K Error				
350	48.71	0	0.21	0.04	6.89	1.85	205.1	52.0		
530	45.91	0.12	0.07	0.13	4.47	0.68	135.8	20.0		
560	12.35	0.15	0.01	1.78	6.93	0.05	206.3	1.7		
561	3.51	0.01	0.01	1.10	7.80	0.05	230.6	1.8		
570	7.29	0.03	0.06	0.16	7.24	0.60	214.9	16.8		
600	1.99	0	0	10.52	8.05	0.02	237.4	1.1		
610	0.85	0	0	5.35	8.01	0.02	236.3	1.1		
630	0.56	0	0	8.53	7.99	0.02	235.7	1.1		
650	0.87	0	0	6.83	7.88	0.02	232.8	1.1		
680	0.93	0	0	6.28	7.80	0.02	230.6	1.1		
700	0.34	0	0	16.54	7.74	0.01	228.9	1.0		
730	0.15	0	0	6.48	7.72	0.01	228.4	1.0		
780	0	0.01	0.01	6.46	7.74	0.02	228.9	1.1		
830	0	0.01	0.01	7.42	7.82	0.02	231.2	1.1		
900	0	0.01	0.01	1.15	7.82	0.09	231.0	2.6		
2222	0	0.01	0.01	21.25	8.04	0.01	237.1	1.1		

12JK70 Muscovite		13 steps							Apparent age (Ma)	Error (Ma)
Laser power (mW)	Atm. Cont. (%)	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K Error	% ³⁹ Ar _K	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar _K	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar _K Error				
400	68.12	0.13	0.01	0.08	8.26	0.89	243.2	24.4		
500	33.97	0	0	0.06	8.05	0.94	237.6	26.1		
570	13.52	0	0	0.86	7.80	0.06	230.6	1.9		
590	1.88	0	0	3.95	8.19	0.02	241.4	1.1		
591	1.81	0	0	32.55	7.81	0.03	230.8	1.3		
600	0	0	0	1.19	7.68	0.08	227.3	2.4		
640	0.34	0.01	0.01	4.32	7.81	0.02	230.8	1.17		
660	0.24	0.01	0.01	12.31	7.78	0.02	230.0	1.1		
690	0.38	0.01	0.01	5.37	7.80	0.02	230.5	1.1		
740	0	0	0	19.17	7.66	0.01	226.8	1.0		
800	0	0	0	7.52	7.77	0.01	229.7	1.0		
900	0	0	0	3.81	7.75	0.02	229.1	1.1		
2222	0	0	0	8.81	7.85	0.02	232.0	1.1		

J parameter	error J	Age monitor (Ma)	Age monitor (Ma) Error	Mass Discrimination Date (1+e)	Irradiation
1.74E-02	6.21E-05	1081	1.1891	1.008148	8/23/13

에 영향을 받은 것으로 추정된다. 이를 바탕으로, 이 연구에서는 백운모의 폐쇄온도로서 상대적으로 높은 추정치를 사용하며, 심지어 비교적 느린 냉각속도 (>10°C/Ma)를 가진 시스템에서도 450°C 이상의 폐쇄온도를 기대할 수 있다(그림 6). 이 값들은 0.5 GPa의 압력에서 계산되었으며, 1 GPa에서는 폐쇄온도가 20°C 상승한다(Harrison *et al.* 2009). 500-550°C의 높은 폐쇄온도 역시 냉각 후 재결정화 작용이나 변

형을 받지 않은 백운모 입자에서 관찰할 수 있으며 (Villa *et al.*, 2014), 본 연구에서 분석된 입자 역시 변형을 받지 않았다. 태안층의 퇴적층이 받은 변성작용의 온도는 400-450°C일 것으로 추정되며, 이는 티타나이트와 폐쇄온도, 그리고 현대적인 방법으로 계산된 백운모의 폐쇄온도보다 아래에 있다. 그러므로 이 연구에서 계산된 연대는 냉각 온도가 아닌, 변성작용에 의한 재결정화 작용이 일어난 시기라고 할

수 있다. 결과적으로, 태안층의 변성작용 시기는 최근의 국제 시간층서 연대표에서 카르니아(Carnian, 상부 트라이아스기 중 가장 하부 연대)에 해당된다 (Cohen *et al.*, 2013).

백운모의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 스펙트럼들은 다소 안장 모양의 분포를 보이며, 12JK20의 경우 저온, 고온 단계에서 각각 237.5 Ma와 237.1 Ma의 일치하는 연대가 계산되었다(그림 5b, 표 2). 태안층의 다른 시료에서 분석된 백운모 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 측정에서도 240-243 Ma의 연대가 각 스펙트럼에서 안장 모양으로써 분석 초기와 후기 단계에 나타난다(Han, 2014). 안장 모양의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 스펙트럼은 변성암, 화성암에 포함된 백운모에서 주로 나타나는 것으로 잘 알려져 있으며(Cheilletz *et al.*, 1999; Alexandrov *et al.*, 2002; Castonguay *et al.*, 2007; deJong *et al.*, 2009; Tartèse *et al.*, 2011), Cheilletz *et al.* (1999)와 Alexandrov *et al.* (2002)는 앞서의 현상을 부분적으로 재결정화 작용을 겪은 운모 입자 내에서 아르곤의 불균질한 분포에 의한 요인으로 해석하였다. 이 입자에서 각각 다른 비율의 아르곤 성분을 가지는 부분들은 분석 중 각기 다른 온도 구간에서 아르곤 기체를 방출한다. 재결정화 작용의 영향을 받지 않아 보존된 부분은 저온, 고온 단계에서 기체가 방출되며, 새로 생성되거나 재결정화 작용이 일어난 부분은 중간 온도 단계에서 기체가 방출되어 안장 모양의 아랫부분을 이룬다. 재결정화 작용으로 성장한 새로운 부분은 광물이 겪은 재결정화 과정의 마지막 단계를 기록할 수 있으며, 연성 변형과정이나 유체 순환이 이러한 과정에 영향을 미칠 수 있다(Tartèse *et al.*, 2011). 태안층 시료에서 얻어진 안장 모양의 연대 스펙트럼의 경우, 시료 12JK20 (그림 5b)의 분석 결과는 237 Ma에 일어난 지질학적 사건이 ~229 Ma에 일어난 재결정화 작용에 의해 부분적으로 중첩되어진 것으로 해석될 수 있다.

반면에, 시료 12JK70 (그림 5a)은 ~231 Ma에 일어난 강한 재결정화 작용에 의해 앞서 일어난 지질학적 사건의 기록이 지워진 것으로 보이며, 시료 12JK70의 연대 스펙트럼에서 관찰되는 가장 젊은 연대인 ~227 Ma는 재결정화 과정의 마지막 단계의 시기를 지시한다. 이는 야외 답사와 박편 관찰을 통해서도 알 수 있는데, 분석된 백운모는 녹색편암상 변성작용을 받은 이질암의 주요 변성-변형 구조를 가로지르

고 있거나(12JK70), 잘 발달된 S2구조와 평행하게, 변형되지 않은 입자로서 존재하여(12JK20), 태안층이 그 전에 2번의 연성 변형작용을 경험했음을 지시한다. 구체적인 내용은 좀 더 연구가 필요하지만, 연대 스펙트럼들이 의미하는 것은 태안층이 이미 240 ± 3 Ma에 변성작용을 받았으며, 백운모들이 다시 228-231 Ma에 재결정화 작용을 받은 것으로 보인다는 것이다.

6. 토 의

231, 229 Ma의 백운모 연대와 233 Ma 티타나이트 연대(그림 2)는 몽산포 지역에서 2차 습곡 형성 후에 태안층을 관입한 섬강암의 229.6 ± 3.5 Ma SHRIMP $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 저어콘 연대와도 부합한다(Han, 2014). 결과적으로, 안면도에서 태안층이 받은 변성작용과 섬강암의 관입은 거의 비슷한 시기에 일어난 것으로 생각된다. 분석된 운모와 티타나이트의 시료 위치는 섬강암체로부터 6.5 ~ 20 km 정도 거리를 두고 있으며, 섬강암체 주변에서는 접촉변성작용이 관찰되지 않았다. 그러므로 이 연구에서 분석된 연대들은 섬강암의 관입작용에 의해 직접적으로 영향을 받은 것이 아니며, 또한 이들 변성작용과 화성작용은 공통의 지구조적 요인에 의하여 발생한 것으로 볼 수 있다. 현재 한반도에 분포하는 트라이아스기 후기(237- 219 Ma) 반려암-몬조나이트, 섬강암-화강암체들은 비교적 소규모의 고립된 형태로 분포한다(그림 1). 이는 제한적인 지역에 짧은 기간 동안 관입 작용이 일어나, 하부 지각에서의 열 공급이 시간, 공간적으로 제한되었다는 것을 의미한다. 경기육괴 서부에 분포하는 혼성편마암에 대한 SHRIMP 저어콘 연대 측정 결과는 많은 수의 저어콘 입자 외연부에서 237-228 Ma (오차: 3-5 Ma) 연대가 집중되며, 이는 광역변성작용에 의한 것으로 해석된다(Kim *et al.*, 2006, 2008; Kee *et al.*, 2011). 이 변성 조건은 잘 알려지지 않았으나, 저어콘의 외연부가 새로 성장하기 위해서는 최소한 상부 각섬암상의 변성 조건이 필요하며(Williams, 2001; Parrish and Noble, 2003), 이러한 요인은 경기육괴 서부에서 산출되는 편마암에서 전반적으로 아나텍시스(anatexis) 구조가 관찰되는 것과도 일치한다. 경기육괴 동부 오대산 지역에서는 1-2 km의 자소휘석을

포함한 몬조나이트 관입암체 내에서 스피넬이 포함된 백립암이 산출되며, SHRIMP 저어콘 연대 측정 결과 228.7 ± 0.9 Ma (Jeong *et al.*, 2008)의 연대가 측정되었고, 암체의 생성 온도가 상당히 높았던 것으로($T: 900^\circ\text{C}$ 이상; $P = 0.75$ GPa, Oh *et al.*, 2006a) 밝혀졌다. 현재까지의 연구 결과들을 바탕으로 경기육괴, 덕정리 편마암체, 월현리 복합체, 그리고 상부 지각에 위치하였던 태안층까지 후기 트라이아스기에 초반에 일어난 광역변성작용과 화성작용에 영향을 받았음을 알 수 있으며, 이들이 모두 같은 지구조운동과 관련이 있음을 의미한다.

야의 답사를 통해 태안층을 관입하고 있는 섭입암과 염기성 암맥들은 태안층이 경험한 두 차례의 연성 변형작용이 일어난 후에 관입하였음이 밝혀졌다. 염기성 암맥들과 섭입암에 포획된 염기성 포획체(enclave)는 횡압력에 의해 생성된 두꺼운 지각 구조가 장력에 의해 다시 얇아지는 지구조 환경(extensional regime)으로 전환될 때 관입하였음을 지시하며, 이는 트라이아스기 후기에 일어난 화성작용과 변성작용이 장력이 가해지는 환경에서 지각이 얇아지면서 마그마의 하부점착(underplating)이 이루어져 열의 공급이 빠르게 이루어진 것과 관련되었을 가능성을 보여준다. 지구조적으로 장력이 가해지는 지역에서는 뜨거운 연약권 물질이 용승하여 단열-감압 용융이 일어나며, 이로 인해 염기성 마그마가 생성되어 하부점착이 이루어지는데, 이것이 앞서 섭입된 후 고대변성작용을 받은 암석권 맨틀의 부분 용융을 일으킨다. 이 부분 용융에 의하여 칼크-알칼라인(calc-alkaline) 마그마가 생성될 수 있으며, 이로 인하여 화강암류와 쇼쇼니틱(shoshonitic)한 암석들이 산출된다(von Blanckenburg and Davies, 1995; Turner *et al.*, 1996; Gill *et al.*, 2004; Dilek and Altunkaynak, 2009; von Raumer *et al.*, 2014). 결과적으로, 이 마그마들은 섭입된 판의 분리(slab detachment), 또는 두꺼워진 암석권의 박리(delamination)에 의해 생성된 공간으로 연약권 물질이 상승하여 만들어진 것이며, 이는 좀 더 차가운 암석권이 연약권의 뜨거운 온도에 노출되어 암석권의 용융을 야기하게 된다. 이러한 과정에서, 암석권의 영역으로 연약권 맨틀이 개입하면(연약권으로부터) 열의 전도, 또는 마그마의 이류(advection)에 의해 열이 공급된다(Bodorkos *et al.*, 2002). 결과적으로 암석권의 지온

구배(geotherm)가 상승하게 되며, 중부 지각에서의 규장질, 고철질 화성활동을 야기하게 된다. 이렇게 연약권이 암석권까지 상승한 지구조 환경에서는 하부 지각으로의 열 공급이 상승하여 변칙적인 열 분포를 보이게 되며, 이는 중부, 상부 지각으로 영향을 미치게 된다(Bakker *et al.*, 1989; Loosveld and Etheridge, 1990; vanWees *et al.*, 1992; Bodorkos *et al.*, 2002). 언급된 일련의 과정은 아마도 트라이아스기 후기 경기육괴와 상부 지각의 태안층에 일어난 광역변성작용을 일으킨 요인이 될 수 있을 것으로 판단된다.

현재, 경기육괴(Suzuki, 2009; Lee *et al.*, 2014; Yengkhom *et al.*, 2014)와 임진강대(Cho *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2014)에서 저어콘을 포함한 많은 부성분 광물들의 U-Pb 연대 결과는 245-260 Ma (오차: 3-16 Ma)의 연대분포를 가진 것으로 확인되었다. 이들 연대가 고압변성작용을 의미하는 직접적인 근거가 제시되지 않았으나, 많은 연구들은 대략 250 Ma에 대륙 충돌이 일어난 것으로 제시하고 있다(Ree *et al.*, 1996; Kwon *et al.*, 2009; Chough *et al.*, 2013; Choi, 2014; Yengkhom *et al.*, 2014). 하지만, 최근 홍성 지역에 잔존하는 에클로자이트(eclogite)와 고압형 백립암에 대한 U-Pb 저어콘 연대측정 결과는 231 ± 3 Ma로 상기 언급된 연대보다 더 젊다(Guo *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2006). 이 연대는 한반도에서 암석권 박리(Choi *et al.*, 2009) 혹은 해양판 단절(Seo *et al.*, 2010; Oh, 2012)로 인한 화성작용과 광역변성작용이 일어난 시기와 일치한다. Gerya (2010)에 의한 수치모델에 따르면, 지각이 섭입하여 제일 높은 압력 조건에 도달한 시점과 섭입한 지각의 단절이 시작되는 시점 사이에는 15 Ma의 간격이 존재한다. 이 간격은 암석권 박리 모델에서 밀도가 높은 하부 암석권 층이 불안정해지고, 대류에 의해 제거되는데 필요한 시간과도 비슷하다(England and Houseman, 1989; Bodorkos *et al.*, 2002). 상기 연구들을 바탕으로, 홍성 지역의 후퇴변성작용을 겪은 에클로자이트와 석류석 백립암의 ca. 231 Ma 연대는 상부 트라이아스기 화성활동과 관련된 변성작용에 의하여 영향을 받은 것으로 생각된다. 같은 지역에 분포하는 편마암체들은 부분적으로 후퇴변성작용을 겪었으며, 특히 237-231 Ma에 해당하는 시기에 화성작용과 광역변성작용을 경험한 것으로 보고되고 있다(Kim *et al.*, 2006, 2008; Kee *et al.*, 2011). 이러한 지질학적 사건들은 에클로자이트

지대에 존재하는 저어콘의 U-Pb 동위원소 체계를 초기화(reset)했던 것으로 보인다. de Jong *et al.* (2009)은 중국 텐산에서 산출되는 고압형 변성암에 포함된 저어콘이 유체의 영향에 의해 초기화된 경우를 다루고 있으며, 이 역시 충돌 후 화성활동(post-collisional magmatism)과 연관되어있다.

7. 결론

안면도에서 산출되는 고생대 중기 퇴적층인 태안층이 녹색편암상의 광역변성과정을 겪었으며, 변성 티타나이트(232.5 ± 3.0 Ma, SHRIMP U-Pb 하부교점연대), 백운모(230.7 ± 1.0 Ma와 228.8 ± 1.0 Ma $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 가평형 연대) 분석 결과가 산출되었다. 이 변성과정은 두 차례의 습곡작용 후에 관입한 섭장암과 염기성 암맥의 관입과 같은 시기에 일어났다. 상기 연대들은 경기육괴에서 측정된 변성 연대(228-237 Ma)와 반려암-몬조나이트, 섭장암-화강암이 생성된 연대(226-233 Ma)와도 일치한다. 트라이아스기 후기 변성 및 화성활동은 섭입판 단절 또는 암석권 박리에 의해 얇아진 지각과 마그마의 하부 점착으로 야기된 빠른 열 공급이 관련되었을 가능성이 제시된다. 이러한 지구조 환경에서는 하부 지각으로의 열 공급이 상승하여 변칙적인 열 분포를 보이게 되며, 이는 중부, 상부 지각으로 영향을 미치게 된다. 일련의 과정들은 경기육괴와 태안층에서 관찰되는 광역변성작용의 요인이 되었을 것으로 생각된다. 백운모의 연대 스펙트럼에서 ca. 233-229 Ma의 지질학적 사건이 237 Ma의 앞선 기록에 중첩되었으며, 237 Ma 연대는 아마도 태안층에 관입 작용이 일어나기 전의 습곡, 변형작용을 의미하는 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2011년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2011-0012900). 영어로 작성된 논문을 한국어로 번역하고 편집을 도와준 한석영, 김주환에게 감사를 표합니다. 논문을 심사하면서 아낌없이 조언해주신 김성원 박사님과 익명의 심사자님께 감사드립니다.

REFERENCES

- Aleinikoff, J.N., Wintsch, R.P., Tollo, R.P., Unruh, D.M., Fanning, C.M. and Schmitz, M.D., 2007, Ages and origins of rocks of the Killingworth Dome, south-central Connecticut: implications for the tectonic evolution of southern New England. *American Journal of Science*, 307, 63-118.
- 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.
- 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.
- 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.
- Bonin, B., 1986, Ring Complex Granites and Anorogenic Magmatism. *Studies in geology*: North Oxford Academic, London, 188 p.
- Bucher, K. and Grapes, R., 2011, *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. 8th ed. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 428 p.
- 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.
- 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.
- Cho, D.L., 2007, SHRIMP zircon dating of a low-grade meta-sandstone from the Taean Formation: Provenance and its tectonic implications. *KIGAM Bulletin*, 11, 3-14.
- 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., 2013, SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons in metasedimentary 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., Na, J. and Yi, K., 2010, SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons in metasandstones of the Taean Formation, Western Gyeonggi massif, Korea: Tectonic implications. *Geosciences Journal*, 14, 99-109.
- Cho, M., Yang, S.-Y., Kim, T. and Yi, K., 2013b, Dynamic recrystallization and metamorphic evolution of ca. 1.85 Ga quartzfeldspathic and cordierite-garnet gneisses, western Gyeonggi Massif, Korea. *Geophysical Research Abstracts*, 15, EGU2013-6631.
- Choi, D.K., 2014, *Geology and Tectonic Evolution of the Korean Peninsula*. Seoul National University Press, 277 pp (in Korean with English abstract).
- 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, P.Y., Rhee, C.W., Lim, S.B. and So, Y.S., 2008, Subdivision of the Upper Paleozoic Taean Formation in the Anmyeondo-Boryeong area, west Korea: a preliminary approach to the sedimentary organization and structural features. *Geosciences Journal*, 12, 373-384.
- 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. *Island Arc*, 18, 266-281.
- 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., 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.
- Cliff, R.A., Yardley, B.W.D. and Bussy, F., 1993, U-Pb isotopic dating of fluid infiltration and metasomatism during Dalradian regional metamorphism in Connemara, western Ireland. *Journal of metamorphic Geology*, 11, 185-191.
- Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. and Fan, J.-X., 2013, The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes*, 36, 199-204.
- Corfu, F. and Muir, T.L., 1989, The Hemlo-Heron Bay greenstone belt and Hemlo Au-Mo deposit, Superior Province, Ontario, Canada: 2. Timing of metamorphism, alteration and Au mineralization from titanite, rutile, and monazite U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 79, 201-223.
- Davies, J.H. and von Blanckenburg, F., 1995, Slab break-off: a model of lithospheric detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens. *Earth and Planetary Science Letters*, 129, 85-102.
- 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, 611-626.
- 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.
- Dilek, Y. and Altunkaynak, Ş., 2009, Geochemical and temporal evolution of Cenozoic magmatism in western Turkey: Mantle response to collision, slab breakoff, and lithospheric tearing in an orogenic belt. 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, 197-223.
- Dodson, M.H., 1973, Closure temperatures in cooling geochronological and petrological systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 40, 259-274.
- England, P.C. and Houseman, G.A., 1989, Extension during continental convergence with application to the

- Tibetan Plateau, *Journal of Geophysical Research*, 94, 17561-17579.
- Frost, B.R., Chamberlain, K.R. and Schumacher, J.C., 2000, Sphene (titanite): phase relations and role as a geochronometer. *Chemical Geology*, 172, 131-148.
- Gerya, T.V., 2010, Introduction to numerical geodynamic modelling. Cambridge University Press, 345 pp.
- Getty, S.R. and Gromet, L.P., 1992, Geochronological constraints on ductile deformation, crustal extension, and doming around a basement-cover boundary, New England Appalachians. *American Journal of Science*, 292, 359-397.
- Gill, R.C.O., Aparicio, A., El Azzouzi, M., Hernandez, J., Thirlwall, M.F., Bourgois, J. and Marriner, G.F., 2004, Depleted arc volcanism in the Alboran Sea and shoshonitic volcanism in Morocco: geochemical and isotopic constraints on Neogene tectonic processes. *Lithos*, 78, 363-388.
- 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. MSc. Thesis, Seoul National University, Seoul, 75 pp.
- Harrison, T.M., Célérier, J., Aikman, A.B., Hermann, J. and Heizler, M.T., 2009, Diffusion of ^{40}Ar in muscovite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, 1039-1051.
- 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.
- 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).
- 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, 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., 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., 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., 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, 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, A re-determination 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.
- Liégeois, J.-P., Navez, J., Hertogen, J. and Black, R., 1998, Contrasting origin of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids. The use of sliding normalization. *Lithos*, 45, 1-28.
- Lim, S.-B., Choi, H.I., Kim, B.C. and Kim, J.C., 1999, Depositional systems of the sedimentary basin (I): Depositional systems and their evolution of the Proterozoic Paegryeong Group and Taean Formation. MOST/KIGAM, 116 pp (in Korean with English abstract).
- 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.
- Ludwig, K.R., 2009, SQUID 2: a user's manual. Berkeley, CA, Berkeley Geochronology Center Special Publication, No. 2, 100 p.
- Ludwig, K.R., 2012, User's manual for Isoplot 3.6: a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley, CA, Berkeley Geochronology Center Special Publication, No. 5, 75 p.
- 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.
- Na, J.-S., Kim, Y.-S., Cho, M. and Yi, K., 2012, SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons from metasedimentary rocks in the Yeongheung-Seonjae-Daebu Islands, Northwestern Gyeonggi Massif. *The Journal of the Petrological Society of Korea* 21, 31-45 (in Korean with English abstract).
- Na, K.I., 1992, A study on the metamorphism in the southwestern part of Gyeonggi Massif. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 1, 25-33.
- 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 (in Korean with English abstract).
- 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., 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., 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., 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, K.-H., Kim, M.J., Yang, Y.S. and Cho, K.O., 2010, Age Distribution of the Jurassic Plutons in Korean Peninsula. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 19, 269-281 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Pitra, P., Ballèvre, M. and Ruffet, G., 2010, Inverted metamorphic field gradient towards a Variscan suture zone (Champocéaux Complex, Armorican Massif, France). *Journal of metamorphic Geology*, 28, 183-208.
- 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.
- 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}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 PRRenne *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}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. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 5349-5367.
- Resor, P.G., Chamberlain, K.R., Frost, C.D., Snoke, A.W. and Frost, B.R., 1996, Direct dating of deformation; U-Pb age of syndeformational sphene growth in the Proterozoic Laramie Peak shear zone. *Geology*, 24, 623-626.
- Robbins, G.A., 1972, Radiogenic argon diffusion in muscovite under hydrothermal conditions. Unpublished MSc thesis. Brown University, Providence.
- Ruffet, G., Féraud, G. and Amouric M., 1991, Comparison of ^{40}Ar - ^{39}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 Kiéna, J.R., 1995, Plateau ages and excess argon in phengites: an ^{40}Ar - ^{39}Ar conventional laser probe study of Alpine micas (Sesiazone, Western Alps, northern Italy). *Chemical Geology*, 121, 327-343.
- Sagong, H., Kwon, S.-T. and Ree, J.-H., 2005, Mesozoic episodic magmatism in South Korea and its tectonic implication. *Tectonics*, 24. doi:10.1029/2004TC001720.
- Scott, D.G. and St. Onge, M.R., 1995, Constraints on Pb closure temperature in titanite based on rocks from the Ungava orogen, Canada: implications for U-Pb geochronology and P-T-t path determination. *Geology*, 23, 1123-1126.
- 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.
- Spencer, K.J., Hacker, B.R., Kylander-Clark, A.R.C., Andersen, T.B., Cottle, J.M., Stearns, M.A., Poletti, J.E. and Seward, G.G.E., 2013, Campaign-style titanite U-Pb dating by laser-ablation ICP: Implications for crustal flow, phase transformations and titanite closure. *Chemical Geology*, 341, 84-101.
- Stacey, J.S. and Kramers, J.D., 1975, Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, 26, 207-221.
- 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.
- Tanner, P.W.G. and Evans, J.A., 2003, Late Precambrian U-Pb titanite age for peak regional metamorphism and deformation (Knoydartian orogeny) in the western Moine, Scotland. *Journal of the Geological Society, London*, 160, 555-564.
- Tilton, G.R. and Grunefelder, M.H., 1968, Sphene: uranium-lead ages. *Science*, 159, 1458-1461.
- Turner, S., Arnaud, N., Liu, J., Rogers, N., Hawkesworth, C., Harris, N., Kelley, S., van Calsteren, P. and Deng,

- W., 1996, Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau: implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts. *Journal of Petrology*, 37, 45-71.
- Ueda, K., Jacobs, J., Thomas, R.J., Kosler, J., Horstwood, M.S.A., Wartho, J.-A., Jourdan, F., Emmel, B. and Matola, R., 2012, Postcollisional high-grade metamorphism, orogenic collapse, and differential cooling of the East African Orogen of northeast Mozambique. *The Journal of Geology*, 120, 507-530.
- 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.
- Villa, I.M., Bucher, S., Bousquet, R., Kleinhanns, I.C. and Schmid, S.M., 2014, Dating polygenetic metamorphic assemblages along a transect across the Western Alps. *Journal of Petrology*, 55, 803-830.
- 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., 1998, U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: Mckibben, M.A., Shanks, W.C.III., Ridley, W.L. (eds.), *Application of Micro analytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*. Society of Economic Geologists, Socorro, Review in *Economic Geology*, 7, 1-35.
- 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 Sciences*, 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.
- Yi, K., Lee, S., Kwon, S. and Cheong, C.-S., 2014, Polyphase tectono-magmatic episodes as revealed by SHRIMP U-Pb geochronology and microanalysis of zircon and titanite from the central Okcheon belt, Korea. *Journal of Asian Earth Sciences*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.04.021>
- 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 9월 30일

심 사 일 : 2014년 10월 2일

심사완료일 : 2014년 10월 10일