



경기육괴 서남부 가로림만의 지곡리층 혼성편마암 저어콘에 대한 SHRIMP U-Pb 연대

김지인¹ · 최성희^{1,2,*} · 이기욱³ · 이신애⁴

¹충남대학교 대학원 우주·지질학과

²충남대학교 지질환경과학과

³한국기초과학지원연구원 성과확산부

⁴한국기초과학지원연구원 지구환경연구부

요 약

경기육괴 서남부 가로림만에 위치한 지곡리층 혼성편마암류 두 개 시료에 대하여 저어콘 SHRIMP U-Pb 연대 측정을 시도하였다. 분석치들은 저어콘의 내부 구조 및 Th/U 비에 의해 특징되는 네 개의 그룹(Group)으로 세부 분류된다. Group 1과 2는 저어콘의 상속핵으로, 누대구조가 잘 발달하고 화성기원을 지시하는 높은 Th/U 비(0.11-1.62)를 가진다. Tera-Wasserburg 도에서 Group 1 저어콘의 상부교차점 연대는 2502 ± 92 Ma와 2528 ± 100 Ma이며, Group 2 저어콘의 상부교차점 연대는 2051 ± 25 Ma로 모두 화성연대로 해석된다. Group 3으로 분류되는 분석치들은 누대구조가 없거나 희미하며 낮은 Th/U 비(0.01-0.16)를 보이므로 변성기원으로 유추되며, 1833 ± 10 Ma의 상부교차점 연대를 가진다. 마지막으로 Group 4 저어콘은 1695.5 ± 5.4 Ma의 상부교차점 연대를 가지며, 다른 저어콘 분석결과와 비교하였을 때 상대적으로 높은 Th/U 비(0.44-1.43)를 가지는 특징을 보여 모나자이트의 붕괴와 동반된 고온변성작용 연대를 지시하는 것으로 생각된다. 본 연구에서 얻어진 Group 1과 Group 3의 연대는 한반도에서 광역적인 화성 및 변성작용이 있었던 시기(약 2.5 Ga와 약 2.0-1.8 Ga)로 선캄브리아기 암체에서 흔히 보고되는 연대이다. 특히 Group 1의 연대는 가로림만과 인접한 경기육괴 서남부 대이작도에 분포하는 남한의 최고기 암체인 토날라이트질 혼성암의 생성 연대(약 2.5 Ga)와 오차범위에서 일치한다. 그러나 Group 2와 4의 약 2.1 Ga 및 1.7 Ga 연대는 경기육괴의 선행연구에서 거의 보고되지 않았던 연대이다. 이는 국소적으로 발생한 선캄브리아기 열적활동에 대한 연구가 부족한 실정을 단적으로 드러내는 결과라 할 수 있으며, 한반도에서의 선캄브리아기 지각진화사를 보다 정확히 이해하기 위해서는 향후 정밀 지질연대 및 암석학적 자료들이 추가적으로 수집되어야 함을 의미한다.

주요어: 경기육괴, 지곡리 혼성편마암, 저어콘, SHRIMP U-Pb 연대

Ji-In Kim, Sung Hi Choi, Keewook Yi and Shinae Lee, 2019, SHRIMP U-Pb zircon ages of Jigokri migmatitic gneisses at Garorim bay, Southwestern Gyeonggi massif. Journal of the Geological Society of Korea. v. 55, no. 2, p. 191-205

ABSTRACT: We report zircon SHRIMP U-Pb ages for Jigokri migmatitic gneisses at Garorim Bay, southwestern Gyeonggi massif. The age data can be subdivided into four groups based on the internal structures and Th/U ratios of the zircons. The Group 1 and Group 2 are inherited cores of the zircons. They have high Th/U ratios (0.11-1.62) with well-developed zoning (such as, oscillatory, concentric, and banded zoning), indicating its igneous origin. The upper intercept ages on the Tera-Wasserburg concordia diagrams for the Group 1 zircons are 2502 ± 92 Ma and 2528 ± 100 Ma, whereas that of the Group 2 zircons is 2051 ± 25 Ma. The Groups 1 and 2 ages are considered to represent the timing of magmatism in this area. The Group 3 zircons are characterized by unzoned or faintly zoned internal structure, and have relatively low Th/U ratios (0.01-0.16). The Group 3 zircons yield an upper intercept age of 1833 ± 10 Ma, which is interpreted as the age of metamorphic recrystallization. Lastly, the Group 4 zircons have a relatively high Th/U ratio (0.44-1.43), and yield an upper intercept age of 1695.5 ± 5.4 Ma, representing possibly the timing of high-temperature metamorphism accompanied by the breakdown of monazite. The Groups 1 and 3 ages are consistent with the timing of the regional igneous and metamorphic activities (ca. 2.5 and 2.0-1.8 Ga) in the Gyeonggi massif. Especially, the Group 1 age coincides with the oldest Neoproterozoic

* Corresponding author: +82-42-821-6428, E-mail: chois@cnu.ac.kr

formation age (ca. 2.5 Ga) of tonalitic migmatite at Daejak Island, western Gyeonggi massif. However, ca. 2.1 and 1.7 Ga ages of the Group 2 and Group 4 zircons have not been reported in previous studies. The newly reported ages indicate that studies on locally generated Precambrian thermal activity in the Gyeonggi massif are still lacking. To better understand Precambrian crustal evolution of the Korean Peninsula, it means that additional precise geochronological and petrological data must be collected in the future.

Key words: Gyeonggi massif, Jigokri migmatitic gneiss, zircon, SHRIMP U-Pb age

(*Ji-In Kim and Sung Hi Choi, Department of Astronomy, Space Science and Geology, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea; Sung Hi Choi, Department of Geology and Earth Environmental Sciences, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea; Keewook Yi, Division of R&D Transfer, Korea Basic Science Institute, Daejeon 34133, Republic of Korea; Shinae Lee, Division of Environmental and Material Sciences, Ochang Center, Korea Basic Science Institute, Ochang, Chungbuk 28119, Republic of Korea*)

1. 서론

저어콘은 자연에서 존재하는 부성분 광물(accessory mineral)로 닫힌계(closed system)를 유지할 수 있는 온도가 높고, 변성, 변질 그리고 물리·화학적 풍화에 강하며 타 광물에 비하여 우라늄의 함량이 높은 편이기 때문에 암석의 화성 또는 변성연대 측정을 위한 U-Pb 동위원소 분석에 주로 사용된다(e.g., Hanchar and Hoskin, 2003). 이에 더하여 저어콘은 반응성이 낮은 특징이 있어, 오랜 시간에 걸쳐 복잡한 지질학적 사건을 겪은 암체의 경우, 먼저 형성되었던 저어콘의 외연부에 이후 발생한 화성 또는 변성작용에 의한 성장구조가 중첩되어 생성될 수 있다. 이런 경우 단일 저어콘 분석을 통하여 다수의 지질학적 사건에 대한 정보를 얻을 수 있게 된다.

2000년대 이후 정밀도가 높은 분석기기들(예를 들면, 고분해능이차이온질량분석기(SHRIMP))을 이용한 저어콘의 U-Pb 연대측정이 가능해지면서 K-Ar, Ar-Ar 내지는 Rb-Sr 등 기존의 연대측정법을 사용하였을 때에 비해 보다 정확한 연대 자료가 지속적으로 생성되고 있다. 우리나라의 경우도 SHRIMP 장비 도입 이후, 선캄브리아기 암석들에 대한 정밀도 높은 연대 자료가 축적되기 시작했고, 이로 인해 기존에 시생대라고 알려져 있던 선캄브리아기 암체들이 실제로는 고원생대에 해당하며, 시생대 기반암은 매우 일부 지역에만 분포한다는 사실이 드러나기도 하였다(e.g., Lee and Cho, 2012). 그러나 선캄브리아기 암체들은 한반도의 약 40%를 차지하며 광범위하게 분포하고 있어 이에 대한 지질연대 및 암석학적 자료는 아직도 매우 부족한 실정이며 지속적인

로 추가 연구 수행될 필요가 있다.

한반도 지체구조를 구성하는 선캄브리아기 기반암체는 크게 낭림육괴, 경기육괴, 영남육괴로 세분된다(그림 1). 본 연구지역은 가로림만 일대 흑석리 지역으로 경기육괴 남서부에 위치한다(그림 1). 이 지역은 중원생대-신원생대의 변성퇴적암 및 화강암류가 분포하고 있어, 주로 고원생대 암석으로 이루어진 경기육괴의 중·북부와 상이한 지질연대적 특징을 가지고 있다(Lee *et al.*, 2003a; Oh *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2013, 2018). 이에 더해 경기육괴 서부 및 임진강대에는 변성퇴적층으로 이루어진 고생대 지층들이 다수 분포하는 등 지역적 특이점이 나타나 이 지역을 '홍성-임진강대'로 묶어 경기육괴 중·북부와 구분된 하나의 지체구조로 설정할 필요가 있다는 주장이 제기되기도 하였다(Kee *et al.*, 2018). 한편, 현재까지 보고된 우리나라에서 가장 오래된 암석은 가로림만과 인접한 경기육괴 서남부 대이작도에 분포하는 토날라이트질 혼성암으로 여기서 분리한 저어콘의 SHRIMP U-Pb 연대측정 결과에 의하면 이 암석은 약 2.58 Ga 화강암류가 2508 ± 18 Ma에 혼성암화(migmatitization) 작용을 받아 생성된 것으로 알려져 있다(Cho *et al.*, 2008). 그러므로 우리나라의 지각진화사를 보다 정확히 이해하기 위해서는 연구 지역 일대에 대한 정밀 지질연대측정 및 암석학적 연구가 추가 수행될 필요가 있다.

본 연구에서는 흑석리 지역의 혼성편마암에서 분리한 저어콘에 대하여 SHRIMP U-Pb 연대 분석을 실시하였고, 그 결과를 저어콘 내부 구조 및 Th/U 비 등과 비교검토 하여 연구지역에서 선캄브리아기 동안 발생한 화성 및 변성작용 과정을 이해하고자

하였다.

2. 지질개요

경기육괴 기반암의 대부분은 편암 및 편마암류로 구성되는 경기편마암복합체로 이루어져 있으며 주 구성암은 호상편마암, 화강암질편마암, 안구상편마암, 반상변정질편마암 등으로 대개 준편마암류와 화강암화된 편마암류이다(Geological Society of Korea, 1999). 경기편마암복합체의 대부분은 각섬암상에서 백립암상의 변성을 받았으며, 학자들에 따라 의견이 나뉘기는 하나 최소 3회 이상에 걸친 중첩적인 변성과 변형작용 및 화성활동의 영향을 받았다고 알려져 있다(Na, 1978; Kim, 1989; Geological Society of Korea, 1999; Cho *et al.*, 2017). 경기육괴 남서부 지역에는 태안반도 일대에서 당진 단층 서쪽에 서산층군으로 분류되는 변성 퇴적암류와 함철규암층, 편암 등이 분포하고 있으며 이중 다수는 경기편마암복합체에 협재되어 있다(Na, 1992; Geological Society of

Korea, 1999; Cho *et al.*, 2006). 연구지역의 기반암은 선캄브리아기 지곡리층과 서산층군 및 화강편마암으로 구성되어 있고, 이를 저변성 퇴적암류인 고생대 태안층이 부정합으로 피복하고 있으며 일부 지역에서 삼첩기와 쥐라기 화강암류가 관입하며 산재한다(Kim and Hwang, 1982; Cho *et al.*, 2006, 2010; Cho, 2007; Choi *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2016a; Kim *et al.*, 2019) (그림 1). 지곡리층은 본 지역에서 최고의 암군으로 주로 흑운모편암으로 이루어져 있으나 복운모편암, 녹니석편암, 호상편마암 및 소량의 석회암과 규암 등이 동반되며 곳에 따라 우백대가 잘 발달하여 대상편마암상을 띄기도 하고, 화강암질편마암상 내지는 혼성편마암상을 보이거나, 안구상의 반상변정이 다수 발달되어 안구상편마암상을 띄기도 한다(Kim and Hwang, 1982). 서산층군의 함철규암 내 쇄설성 저어콘에 대한 SHRIMP U-Pb 연대 측정 결과에 의하면, 서산층군의 퇴적시기는 약 1.78 Ga 이후인 것으로 알려져 있다(Cho *et al.*, 2006). 서산층군을 관입하고 있는 화강편마암에 대한 SHRIMP

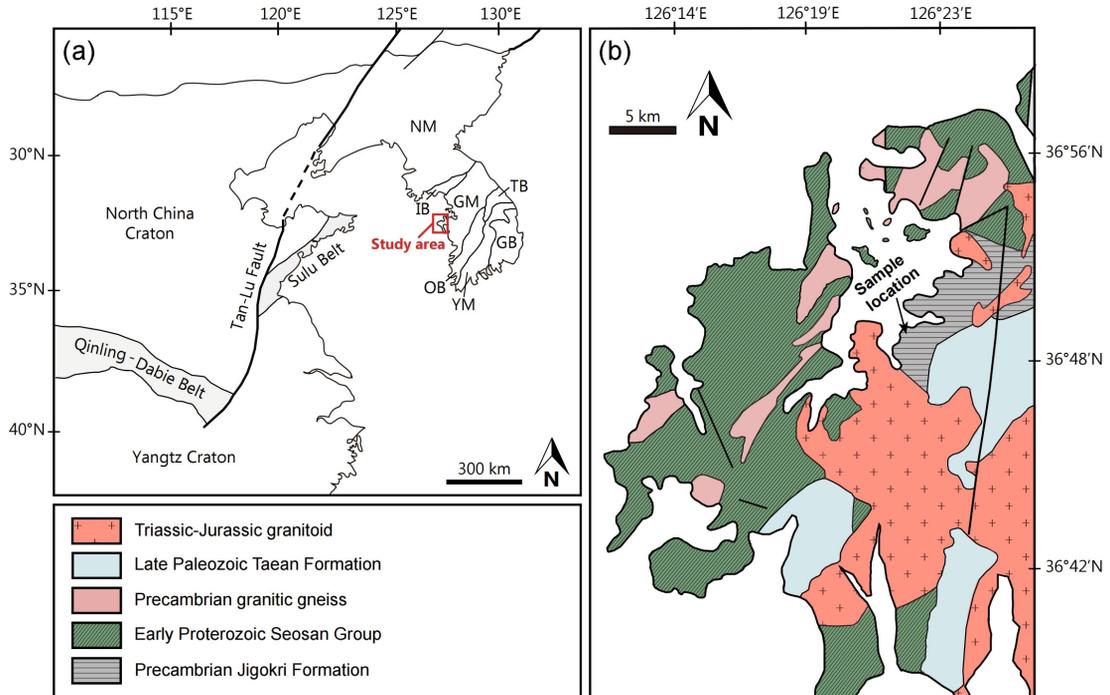


Fig. 1. (a) Tectonic province map of the Korean Peninsula and eastern China, and (b) simplified geological map of the study area with sample location (after Kim *et al.*, 2019). Abbreviations: NM, Nangrim Massif; IB, Imjingang Belt; GM, Gyeonggi Massif; OB, Okcheon Belt; YM, Yeongnam Massif; TB, Taebaeksan Basin; GB, Gyeongsang Basin.

U-Pb 저어콘 연대측정에 의하면 이 화강편마암의 관입시기는 약 1.70-1.65 Ga인 것으로 추정된다(Kim *et al.*, 2018).

Table 1. Modal analysis for Jigokri migmatitic gneisses.

Sample no.	HSR03	HSR04
Mode (vol%)		
Quartz	41.0	51.6
Orthoclase	47.7	39.9
Plagioclase	7.6	1.3
Biotite	2.8	4.3
Muscovite	1.0	2.9
Total	100.0	100.0

3. 분석시료

충청남도 서산시 팔봉면 흑석리 해안가(N36°85'74"/E126°36'82")에 위치하는 지곡리층 혼성편마암류 두 개 시료(HSR03, HSR04; 그림 2a, 2b)에 대하여 저어콘 SHRIMP U-Pb 연대측정을 실시하였다. 시료는 모두 혼성편마암의 우백대질(혼성 화강암질) 부분에서 채취하였다(그림 2a, 2b).

HSR03 시료는 중-조립질로, 미약한 엽리가 남아 있다. 주요 구성 광물은 석영, 정장석, 사장석 및 소량의 흑운모이다(표 1; 그림 3a). 일부 정장석은 견운모화 되어있다.

HSR04 시료는 중-조립질이며, 전반적으로 HSR03 시료보다 결정의 크기가 작은 것을 육안으로 확인할

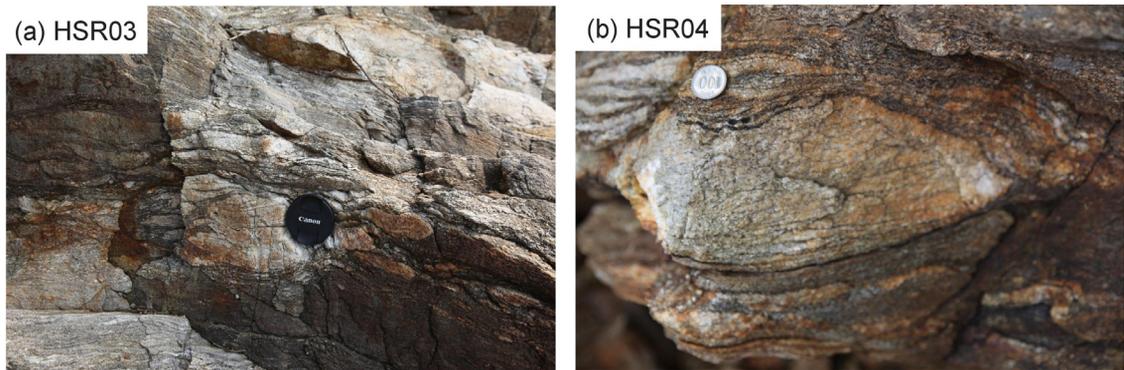


Fig. 2. Outcrop photographs showing Jigokri migmatitic gneisses at Heukseok-ri area of Garorim Bay, southwestern Gyeonggi Massif.

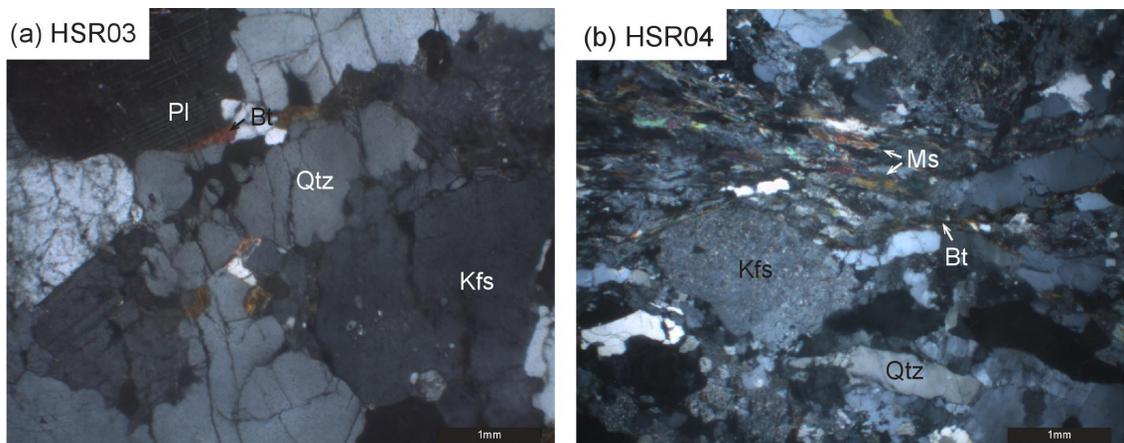


Fig. 3. Photomicrographs of (a) HSR03 and (b) HSR04 migmatitic gneisses. The photos were taken under cross-polarized light. Abbreviations: Bt = Biotite; Kfs = K-feldspar; Ms = Muscovite; Pl = Plagioclase; Qtz = Quartz.

수 있으나 일부 거정질(~7 mm) 석영이 관찰된다. 주요 구성 광물은 석영, 정장석, 사장석 및 운모류(흑운모 및 백운모)이며(표 1; 그림 3b), 정장석의 대부분은 변질작용으로 인하여 견운모화 되어있다. HSR03 시료와 비교하였을 때 HSR04 시료는 석영 및 백운모의 함량이 상대적으로 높은 것이 특징이며 균질을 이룬 세립질의 석영집합체들이 렌즈상 또는 층상으로 평행배열되어 흑운모 및 백운모와 함께 엽리를 발달시키고 있다.

4. 분석방법

고분해능이차이온질량분석기(SHRIMP)를 이용한 저어콘의 U-Pb 연대측정을 위해 두 개의 시료(HSR03, HSR04)에서 저어콘을 분리하였다. 각 7 kg 내외의 암석시료들을 유압파쇄기와 진동컵분쇄기를 사용하여 분쇄한 후, 표준 망체를 사용하여 230-250 μm 이하의 광물들을 분리하였다. 이후 물과 중액을 사용한 전통적인 비중분리법과 네오디뮴(neodymium) 자석을 이용한 자성분리법을 적용해 중광물을 분리하여 수작업으로 저어콘 결정을 선별하였다. 시료에서 분리한 저어콘들을 연대측정용 표준저어콘(SL13과 FC1)과 함께 에폭시에 마운트한 후, 저어콘 입자들의 중심부분이 드러날 때 까지 표면을 연마하였다.

연마된 저어콘에 대한 현미경 관찰과 SHRIMP U-Pb 연대측정은 한국기초과학지원연구원 오창센터에서 수행하였다. 먼저 JEOL JSM-6610LV 주사전자현미경(SEM, scanning electron microscope)을 이용하여 음극선발광(CL, cathodoluminescence) 및 후방산란전자(BSE, back-scattered electron) 영상을 촬영하여 저어콘 내부 구조를 확인하고, SHRIMP 점 분석을 위하여 심한 쪼개짐이나 포유물(inclusion) 및 변질된 부분이 나타나지 않는 부분을 분석위치로 선정하였다. 저어콘과 포유물의 확인은 Oxford INCA X-act 에너지분산형 분광분석법(EDS, energy dispersive spectrometer)으로 수행되었다. U-Pb 저어콘 연대측정은 SHRIMP-IIe/MC를 이용하여 수행되었으며 자세한 분석방법과 절차는 Williams (1998)를 따랐다. 동위원소분석을 위한 일차이온빔은 산소 음이온(O_2^-)을 이용하였으며, 약 4 nA 세기와 30 μm 직경을 갖도록 조절하였다. 분석시 U 농도를 측정하기

위하여 저어콘 표준시료인 SL13 ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = 0.0928$, $\text{U} = 238$ ppm; Claué-Long *et al.*, 1995)을 사용하였고, U-Pb 동위원소성분은 미국 미네소타주 둘루스 복합체(Duluth Complex)에서 산출하는 FC1 ($^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U} = 0.1859$, 1099 Ma; Paces and Miller, 1993) 저어콘 표준시료를 함께 분석하여 보정에 이용하였다. 초기자료의 보정과 연대계산 및 다이어그램 작성은 Squid 2.50와 Isoplot 3.71 프로그램(Ludwig, 2008, 2009)을 사용하여 처리하였다. U-Pb 동위원소 분석결과는 표 2에 1σ 의 분석오차로 보고하였다. SHRIMP U-Pb 분석이 이루어진 저어콘의 연대 중 1,200 Ma보다 오래된 경우는 ^{204}Pb 에 대해 보정한 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 연대를, 1,200 Ma보다 젊은 경우는 ^{207}Pb 에 대해 보정한 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연대를 선택하였다. 계산된 연대에 딸린 오차범위는 95% 신뢰수준이다.

5. 분석결과 및 해석

5.1 저어콘 특징 및 내부 구조

HSR04 시료에서 분리한 저어콘은 투명하며 열은 갈색에서 다갈색을 보이고 약 100-300 μm 범위의 장축을 가진다. 음극선발광영상에서 진동누대(oscillatory zoning) 또는 부분누대(sector zoning)가 발달한 상속핵(inherited core)들이 관찰되며, 외연부에 밝고 좁은 음극선발광영상영역 및 어두운 과성장(overgrowth) 영역이 나타난다(그림 4a).

HSR03 시료에서 분리한 저어콘은 투명하며 열은 갈색에서 다갈색을 보여 외형적인 특징이 HSR04 저어콘과 유사하고 약 90-220 μm 범위의 장축을 가지며, 자형 내지 반자형의 결정형을 띠고 있다. 음극선발광영상에서 관찰한 결과 대체로 저어콘들은 상속핵을 포함하고 있다. 상속핵에서는 진동누대 내지는 부분누대구조가 나타난다(그림 4b). 일부 입자들은 기존의 진동누대를 절단하며 발달하고 있다(그림 4b). 상속핵의 외연부에는 변성기원 저어콘에서 흔히 나타나는 밝고 좁은 음극선발광영상영역이 나타나며 기존의 누대구조와 부조화적으로 과성장한 어두운 조직을 관찰할 수 있다(그림 4b).

HSR03 저어콘과 비교했을 때 HSR04 저어콘 입자의 결정 크기가 상대적으로 덜 고르다는 특이점이 있으며, HSR04 저어콘의 일부가 음극선발광영상영역에서 보다 밝게 보인다는 특징이 있다(그림 4a, 4b).

5.2 SHRIMP U-Pb 연대측정결과

HSR03과 HSR04 시료에서 분리한 각 33개 저어콘 입자를 대상으로 각 40점과 42점에 대하여 SHRIMP U-Pb 연대측정을 수행하였다. 분석에 앞서 촬영한 음

극선발광영상을 참고하여 쪼개짐이나 포유물이 없는 부분에 점분석을 시도하였다. 그러나 연대측정이 후 재촬영한 고해상도 음극선발광영상에서 이전에는 확인할 수 없었던 작은 크기의 포유물들이 일부 분

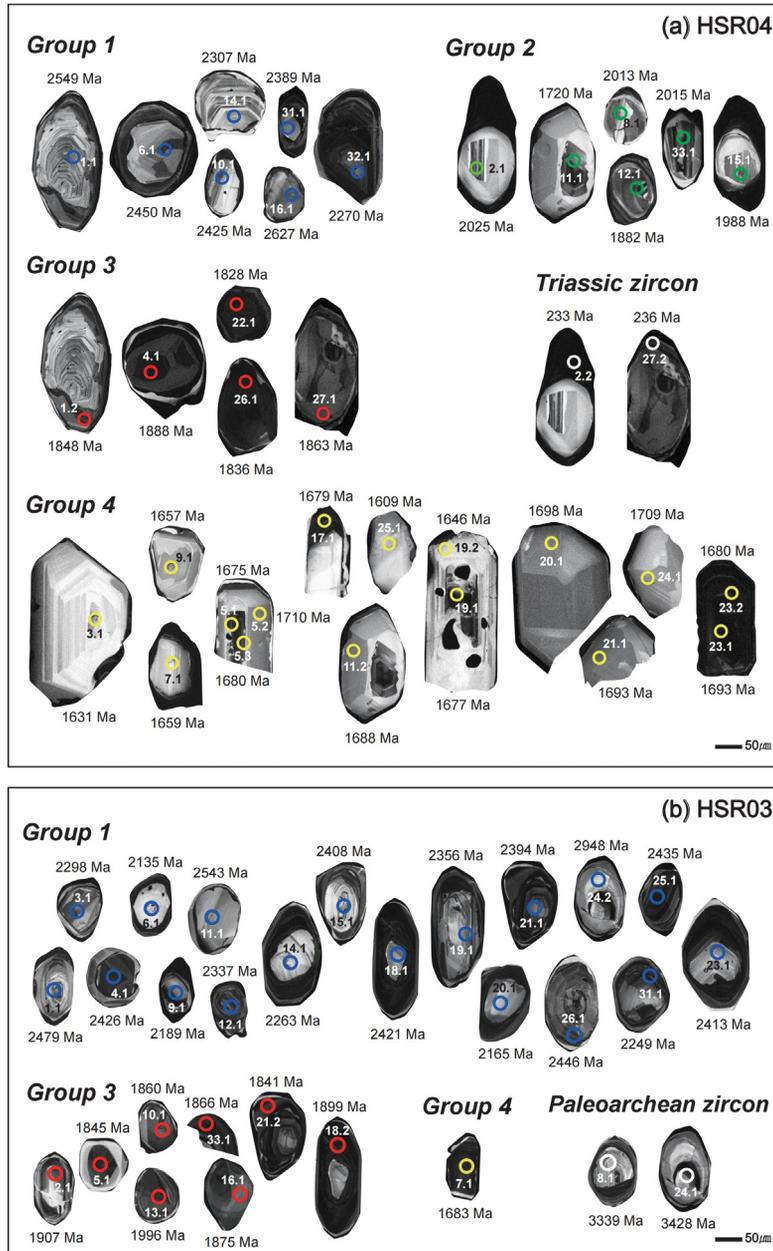


Fig. 4. Representative Cathodoluminescence images of zircons from Jigokri migmatitic gneiss (HSR03 and HSR04). Circles indicate the locations for SHRIMP U-Pb analyses and include the spot numbers. Numbers represent the apparent ^{204}Pb -corrected $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages, except Triassic zircons in (a) where the numbers represent ^{207}Pb -corrected $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages.

석점에서 함께 분석된 사실을 확인하였다. 이에 위 분석점들은 가중평균연대 및 상·하부 교차선 연대 계산에서 제외하였다. 이들은 일치곡선(concordia) 도에 점선으로 표시하였다(그림 5a, 5b). 연구시료 내 저어콘들에 대한 동위원소 분석치는 대개 일치곡선에서 다소 벗어나 도시된다(그림 5a, 5b). 이는 서두에 언급한 선행연구들에서 보고된 바와 같이 연구지역이 복합적인 지질학적 사건들을 겪었음을 암시하는 결과로, 단순히 전체 분석치의 상부 및 하부 교차선 연대나 가중평균연대를 계산하여 분석결과를 해석하기에는 어려움이 있음을 내포하고 있다. 따라서 이번 연구에서는 저어콘의 생성 환경에 대한 정보를 제공한다고 알려져 있는 저어콘 내부 구조 및 Th/U 비 등을 기준으로 하여 본 연구의 U-Pb 연대측정 분석치를 세부 분류하였고, 이를 통하여 선캄브리아기 동안 연구지역에서 발생했던 열적활동(화성 및 변성 활동)을 해석하고자 시도하였다. HSR04 저어콘의 경우, 연대 범위, 내부 구조(예, 진동누대구조의 유무) 및 Th/U 비(0.1 이상 또는 0.1 이하)에 의해 특징되는 네 개의 그룹(Group)이 나타나며, HSR03 저어콘의 경우는 HSR04에서 나타나는 Group 1과 Group 3에 대비되는 두 개의 그룹과 Group 4에 대비되는 한 점의 분석치로 구분된다.

5.2.1 HSR04 저어콘

HSR04 저어콘의 겉보기 연대는 일치곡선을 벗어나 분산되어 도시되는 특징을 보이며 삼첩기에 해당

하는 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연대(232 ± 2 Ma, 236 ± 1 Ma)를 가지는 두 분석치를 제외한 모든 분석치는 신시생대에서 고원생대(ca. 2.6-1.6 Ga)의 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 겉보기 연대를 가진다(그림 4a). Th/U 비와 내부 구조 등을 바탕으로 네 개의 그룹으로 분류된 각 그룹 저어콘의 특징과 해석된 U-Pb 연대는 다음과 같다.

Group 1: HSR04 저어콘은 대부분 상속핵을 가지고 있는데 Group 1로 분류된 저어콘은 상속핵에 해당하며, 마그마에서 성장한 저어콘의 특징적인 진동누대를 보이고, 산출형태에 따라 동심원형 누대(concentric zonation) 또는 줄무늬형 누대(banded zonation)로 구분된다(그림 4a) (Hoskin, 2000). 이들의 Th/U 비는 약 0.61-0.67 (중앙값 = 0.62)이다(그림 6a). $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 겉보기 연대는 2450-2270 Ma 범위를 가지며 Tera-Wasserburg 조화도에서 불일치선을 그린다(그림 5a). 불일치선의 상부교차점 연대는 2502 ± 92 Ma ($n = 5$, MSWD = 0.41)이다(그림 5a).

Group 2: 이들 역시 Group 1과 같이 누대구조가 잘 발달한 상속핵에 해당한다. U-Pb 동위원소 분석치는 불일치선을 그리며, 2025-1720 Ma 범위의 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 겉보기 연대를 가진다. 불일치선의 상부교차점 연대는 2051 ± 25 Ma ($n = 6$, MSWD = 0.39)이다(그림 5a). Th/U 비는 0.12-1.62이며, 중앙값은 0.38이다(그림 6a).

Group 3: 고원생대의 겉보기 연대를 가지는 저어콘 중 일부는 상대적으로 낮은 Th/U 비(0.01-0.16,

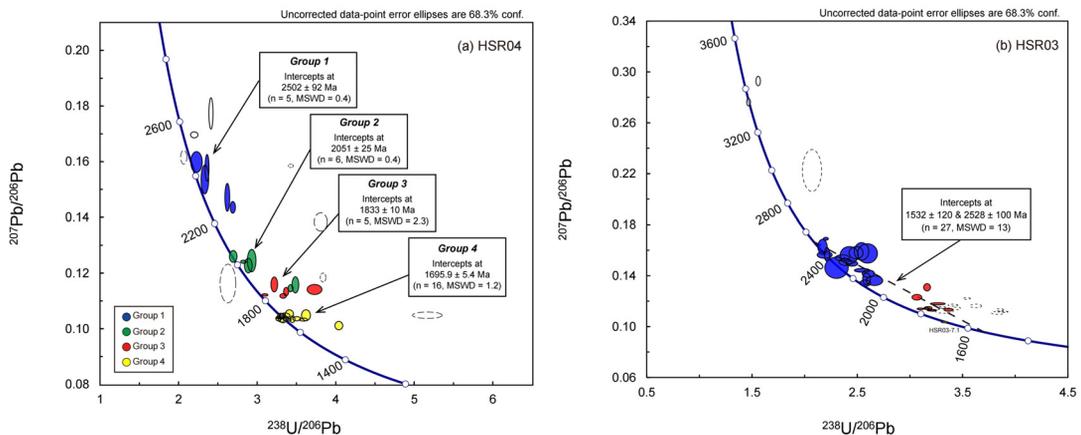


Fig. 5. Tera-Wasserburg concordia diagrams for SHRIMP zircon U-Pb analyses from Jigokri migmatitic gneisses (HSR03 and HSR04). The data-point error ellipses are plotted with 1σ errors. Symbol colors as in Fig. 4.

Table 2. SHRIMP zircon U-Pb isotopic data for Jigokri migmatitic gneisses (HSR03 and HSR04) in the southwestern part of the Gyeonggi Massif.

Spot number	$^{206}\text{Pb}_c$ (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	Apparent Ages (Ma)			
											$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age	\pm	\pm
HSR03														
HSR03-1.1	0.08	367	233	0.64	0.66	2.08	0.1622	2.4	0.4597	1.3	2438	± 27	2479	± 40
HSR03-2.1	0.16	310	34	0.11	0.11	3.66	0.1168	0.5	0.3054	1.4	1718	± 21	1907	± 10
HSR03-3.1	0.06	291	232	0.80	0.82	0.19	0.1459	3.8	0.4332	3.2	2320	± 62	2298	± 65
HSR03-4.1	0.06	733	78	0.11	0.11	0.27	0.1572	3.2	0.3842	2.4	2096	± 43	2426	± 54
HSR03-5.1	0.07	479	188	0.39	0.41	0.19	0.1128	0.7	0.2964	0.8	1674	± 12	1845	± 12
HSR03-6.1	0.18	102	95	0.92	0.95	0.75	0.1328	1.2	0.3870	1.3	2109	± 24	2135	± 22
HSR03-7.1	0.06	674	694	1.03	1.06	0.14	0.1032	0.3	0.2998	0.6	1690	± 9	1683	± 6
HSR03-8.1	0.08	149	88	0.59	0.61	0.32	0.2757	0.7	0.6795	0.8	3342	± 21	3339	± 11
HSR03-9.1	0.09	310	143	0.46	0.48	0.25	0.1370	2.2	0.3855	0.9	2102	± 17	2189	± 38
HSR03-10.	0.04	420	195	0.46	0.48	0.65	0.1137	0.4	0.3221	0.6	1800	± 10	1860	± 7
HSR03-11.1	0.08	221	125	0.57	0.59	0.26	0.1685	0.4	0.4531	0.7	2409	± 15	2543	± 7
HSR03-12.1	0.06	580	345	0.60	0.61	0.69	0.1492	0.9	0.4073	1.5	2202	± 28	2337	± 15
HSR03-13.1	0.06	544	196	0.36	0.37	0.21	0.1227	1.2	0.3254	1.0	1816	± 16	1996	± 21
HSR03-14.1	0.16	106	68	0.64	0.66	0.35	0.1430	0.7	0.3915	1.9	2130	± 34	2263	± 13
HSR03-14.2	0.00	722	25	0.03	0.04	0.91	0.1128	0.3	0.3109	0.6	1745	± 10	1845	± 5
HSR03-15.1	0.11	168	214	1.27	1.31	0.26	0.1556	1.2	0.4553	2.1	2419	± 43	2408	± 20
HSR03_16.1	0.01	140	39	0.28	0.28	0.41	0.1147	0.6	0.3146	0.8	1764	± 12	1875	± 11
HSR03_17.1	0.00	943	21	0.02	0.02	5.85	0.1171	0.4	0.2929	0.9	1656	± 13	1912	± 8
HSR03_17.2	0.03	608	23	0.04	0.04	0.50	0.1107	0.7	0.2601	1.1	1490	± 15	1811	± 13
HSR03_18.1	-0.05	145	66	0.45	0.47	0.34	0.1568	2.8	0.4121	2.3	2225	± 44	2421	± 48
HSR03_18.2	0.02	633	16	0.02	0.03	0.62	0.1162	0.8	0.2754	1.0	1568	± 14	1899	± 15
HSR03_19.1	0.01	173	115	0.66	0.68	1.63	0.1509	1.2	0.4180	1.7	2251	± 32	2356	± 20
HSR03-20.1	0.14	101	46	0.46	0.47	0.40	0.1351	1.9	0.3743	1.9	2050	± 34	2165	± 33
HSR03-20.2	0.02	444	9	0.02	0.02	0.80	0.1152	0.4	0.3019	0.7	1701	± 10	1882	± 7
HSR03-21.1	-0.01	184	158	0.86	0.89	0.70	0.1543	1.0	0.4235	1.9	2276	± 36	2394	± 17
HSR03-21.2	0.06	436	121	0.28	0.29	0.24	0.1125	0.4	0.3110	0.9	1745	± 14	1841	± 7
HSR03-22.1	0.11	513	208	0.40	0.42	0.20	0.1213	0.4	0.2818	0.7	1600	± 9	1976	± 7
HSR03-22.2	0.03	1223	120	0.10	0.10	0.49	0.1116	0.3	0.2569	0.8	1474	± 11	1825	± 5
HSR03-23.1	0.10	160	89	0.56	0.58	0.29	0.1560	2.3	0.4507	0.8	2398	± 15	2413	± 39
HSR03-23.2	0.01	1216	13	0.01	0.01	0.68	0.1144	0.2	0.2980	0.6	1681	± 9	1870	± 4
HSR03-24.1	0.13	406	259	0.64	0.66	0.19	0.2919	0.8	0.6392	0.9	3186	± 22	3428	± 13
HSR03-24.2	0.81	92	39	0.42	0.43	0.44	0.2156	5.1	0.4783	2.9	2520	± 60	2948	± 83
HSR03-25.1	0.02	907	315	0.35	0.36	0.16	0.1581	2.0	0.4011	1.8	2174	± 32	2435	± 34
HSR03-26.1	0.02	318	130	0.41	0.42	0.23	0.1591	2.9	0.3929	1.8	2136	± 32	2446	± 49
HSR03-28.1	0.02	1613	121	0.08	0.08	0.36	0.1132	0.6	0.2590	0.6	1485	± 8	1851	± 10
HSR03-29.1	0.03	693	52	0.08	0.08	0.60	0.1141	0.6	0.2901	0.8	1642	± 11	1866	± 10
HSR03-30.1	0.02	528	10	0.02	0.02	3.25	0.1122	1.1	0.3001	1.7	1692	± 25	1835	± 19
HSR03-31.1	0.00	531	321	0.60	0.62	0.16	0.1418	1.3	0.3832	1.5	2091	± 26	2249	± 23
HSR03-32.1	0.09	294	63	0.21	0.22	0.51	0.1303	1.5	0.3154	0.7	1767	± 10	2102	± 26
HSR03-33.1	0.02	551	200	0.36	0.38	0.19	0.1141	0.3	0.3165	0.6	1773	± 10	1866	± 6

중앙값 = 0.11; 그림 6a)를 가지며, 누대구조가 없거나 희미한 누대구조를 보이는 특징을 가져 변성기원의 저어콘($Th/U < 0.1$)으로 해석된다(Hoskin and Black, 2000; Rubatto, 2002; Hoskin and Schaltegger, 2003). 여기서 희미한 누대구조는 차후의 고상에서의 재결정작용 동안 완전히 지워지지 못한 초기의 화성구조로 사료된다. 우리는 이러한 저어콘을 Group 3으로 분류하였으며 U-Pb 연대측정 분석치는 1828-1888 Ma 범위의 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 겹보기 연대를 보인다. Group 3 저어콘의 분석치는 모두 일치곡선을 벗어나 도시되며, 불일치선에 대한 상부교차점 연대는 1833 ± 10 Ma ($n = 5$, MSWD = 2.3)이다(그림 5a).

Group 4: 이 그룹의 저어콘은 1720-1609 Ma 범위의 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 겹보기 연대를 가지며 상당수의 분석치가 일치곡선 상에 도시되나, 일부 분석치는 불일치선을 그리며 도시되어 Pb 손실을 겪었던 것으로 유추된다. Th/U 비가 0.44-1.43 (중앙값 = 1.07)의 범위로 다른 그룹($Th/U = 0.01-0.67$, 중앙값 = 0.37)에 비하여 상대적으로 높은 값을 가지는 것이 특징이다(그림 6a). 불일치선의 상부교차점 연대는 1695.5 ± 5.4 Ma ($n = 16$, MSWD = 1.2; 그림 5a)이다.

5.2.2 HSR03 저어콘

$^{207}Pb/^{206}Pb$ 겹보기 연대에 의하면 HSR03 저어콘은 2543-2102 Ma ($n = 18$)와 1996-1841 Ma ($n = 7$)의 두 그룹으로 분류된다. 이들은 Tera-Wasserburg 조화도에서 대부분 약간의 불일치 연대를 보이면서

불일치선을 이룬다(그림 5b). 이외에 Tera-Wasserburg 조화선상에 도시되는 1683 ± 6 Ma (HSR03-7.1)의 고원생대 저어콘과 3339 ± 11 Ma 및 3428 ± 13 Ma의 고시생대 저어콘이 발견된다(그림 5b). 2543-2102 Ma 범위의 겹보기 연대는 저어콘 내 상속핵에 대하여 얻어진 분석치로 대개 진동형 누대구조를 가지며 HSR04 저어콘의 Group 1에 대비된다(그림 4b). 이들의 Th/U 비는 0.11-1.27(중앙값 = 0.58) 범위이다(그림 6b). 1996-1841 Ma 범위의 겹보기 연대를 가지는 저어콘은 누대구조가 없거나 또는 희미한 누대구조를 보이며, Th/U 비는 0.11-0.46 (중앙값 = 0.36)으로 HSR04 저어콘의 Group 3에 대비된다(그림 4b and 6b). Group 3 저어콘의 Th/U 비는 Group 1 저어콘의 값보다 낮아, 변성작용을 받는 동안 저어콘 내부 격자에서 Th 손실이 발생한 결과인 것으로 추정된다(Hoskin and Schaltegger, 2003). HSR03 저어콘의 Group 1과 Group 3 분석치에 대한 상부교차점 연대는 2528 ± 100 Ma ($n = 27$, MSWD = 13)이다. 연대 오차가 크고, MSWD가 높은 값을 가지는 것은 중첩적인 변성 및 변질 작용을 받으면서 Pb 손실 등의 사건이 발생했기 때문인 것으로 유추되며, 따라서 위 불일치선의 하부교차점 연대(1532 ± 120 Ma)는 의미 있는 지질연대로 보기가 어려울 것으로 생각된다(그림 5b). 한편, 일치곡선 상에 도시되는 1683 ± 6 Ma의 분석치는 HSR04의 Group 4 저어콘에 대비되며, 오차범위 내에서 일치하는 Th/U 비(1.03)와 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 연대를 가진다. 고시생대의 연대를

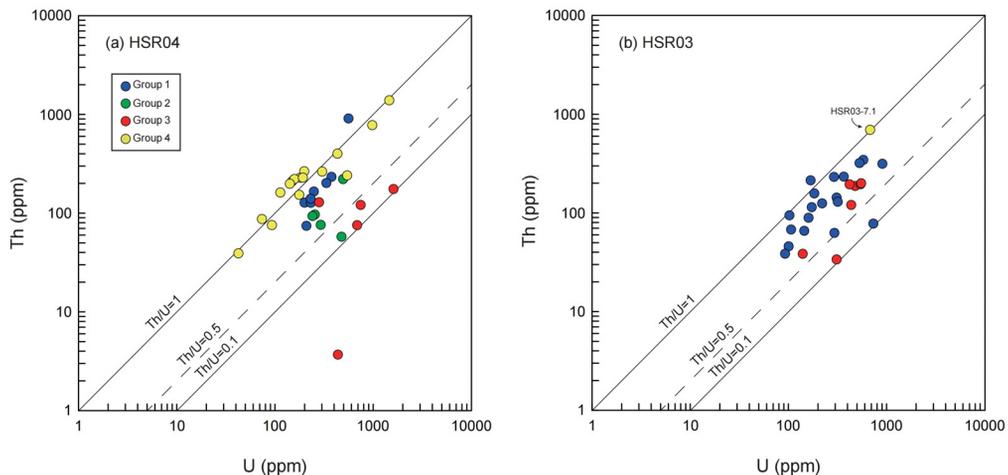


Fig. 6. U vs. Th contents of Jigokri migmatitic gneisses (HSR03 and HSR04). Symbol colors as in Fig. 4.

기록하는 저어콘은 진동형 누대구조를 가지는 상속 핵으로 발견된다(그림 4b).

6. 토 의

Lee and Cho (2012)는 한반도의 선캄브리아기 기반암체들에서 보고된 지질연대자료를 남립육괴, 경기육괴, 영남육괴로 나누어 비교하고 이를 바탕으로 각 지괴의 선캄브리아기 지각진화사를 정리하였다. 선캄브리아기 암석의 저어콘 상속핵에서 보고되는 가장 오래된 연대는 약 3.6 Ga로, 한반도에서 선캄브리아기 지각의 기원이 고시생대 시기에 이미 시작되었음을 시사한다(Lee and Cho, 2012). 경기육괴 저어콘의 상속핵 연대분포도에서도 약 3.4-3.2 Ga 시기에 뚜렷한 연대봉우리(age peak)가 발견된다(Lee and Cho, 2012). 이후 약 2.8-2.7 Ga에 다시 연대봉우리가 나타나는데(Lee and Cho, 2012), 선행연구의 Nd 모델연대에 따르면 이 시기는 맨틀에서 지각형성기원물질이 추출된 시기이다(Lan *et al.*, 1995; Cheong *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2003b; Cho *et al.*, 2017). 이후 경기육괴 저어콘 상속핵 연대분포도에서 약 2.5 Ga에 두드러진 연대봉우리가 나타나는데, 이는 맨틀에서 추출되었던 지각형성 기원물질이 약 200 Ma의 정치시기를 거친 후 재활성화 되어 이 시기동안 경기육괴 지각의 대부분이 형성되었음을 시사한다(Lee and Cho, 2012). 그러나 경기육괴 남서부 대이작도의 토날라이트질 혼성암에서 보고된 연대(약 2.5 Ga; Cho *et al.*, 2008) 이외에는 쇄설성 저어콘 상속핵이 아닌 결정질 암석에 대한 저어콘의 시생대 연대가 아직 보고되지 않고 있어, 당시에 형성된 지각이 안정한 지괴로 남아 있지는 못한 것으로 추정된다. 고원생대(약 2.0-1.8 Ga)의 화성과 변성활동은 한반도에 널리 분포하고 있는 것으로 알려져 있으며, 콜롬비아/누나(Columbia/Nuna) 초대륙의 생성 및 분열과 관련된 조산운동의 산물로 간주되고 있다(Lee *et al.*, 2000, 2014a, 2014b, 2016b, 2016c, 2017a, 2017b, 2018; Lee and Cho, 2003; Oh *et al.*, 2006a, 2006b, 2015, 2019; Kim *et al.*, 2008, 2014; Na *et al.*, 2012; Park *et al.*, 2014; Santosh *et al.*, 2018). 최근 경기육괴 서부에 약 1.70-1.65 Ga 시기의 확장 환경에서 생성된 화강암류(rift-related granites)들이 분포하는 것이 보고된 바 있으나(Kim *et al.*, 2018), 해당시기의 화성활동에 대한 정확한 연

대분석이나 암석학 및 지구화학적인 연구는 수행된 바 없다.

지곡리 혼성편마암 시료들의 저어콘 SHRIMP U-Pb 연대 측정결과는 경기육괴 남서부 지역에서도 선캄브리아기(신시생대-고원생대) 시기동안 중첩적인 열적활동이 존재하였음을 나타낸다. HSR03 저어콘의 상속핵에서 얻어진 약 3.4-3.3 Ga 연대는 경기육괴 지각의 기원이 고시생대 시기에 시작되었다는 선행연구 보고(Lee and Cho, 2012)와 일치하는 결과이다. HSR03 저어콘의 2528 ± 100 Ma Group 1 연대(그림 5b)와 HSR04 저어콘의 2502 ± 92 Ma Group 1 연대(그림 5a)는 경기육괴 기반암 저어콘의 상속핵에서 광역적으로 나타나는 변성 및 화성 활동 연대(약 2.5-2.4 Ga; Lee *et al.*, 2000; Oh *et al.*, 2006a, 2006b, 2019; Cho *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2011; Song *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2014; Santosh *et al.*, 2018)와 일치한다. 전술한 것처럼, Cho *et al.* (2008)은 경기육괴 남서부 대이작도에 분포하는 토날라이트질 혼성암에 대하여 저어콘 상속핵에 대한 2578 ± 30 Ma 연대와 과성장 외연부에 대한 2508 ± 18 Ma 연대를 보고한 바 있다. 상속핵은 진동누대구조가 잘 발달하였으며 Th/U 비가 0.46-0.52의 값을 가져 원암인 토날라이트 마그마의 생성 연대로 해석되었다. 반면 대이작도 저어콘의 외연부는 화성기원을 지시하는 0.1 이상의 Th/U 비(0.37-1.98)를 가지기는 하나, 누대구조가 발달하지 않거나 매우 미약한 특징을 보여 토날라이트질 혼성암의 혼성암화작용 연대로 해석되었다(Cho *et al.*, 2008). Lee and Cho (2013)는 대이작도의 혼성암화작용을 유수조건(fluid-present)의 호상환경(arc-related)에서 비평형용융의 산물로 해석한 바 있다. HSR03과 HSR04 시료의 Group 1 저어콘에서 얻어진 연대는 대이작도에서 보고된 화성활동의 시기와 오차범위 내에서 일치한다. 더불어 Group 1 저어콘에서 관찰되는 진동누대구조와 화성기원의 Th/U 비(0.11-1.27; 그림 6a, 6b)로 미루어 보아 HSR03과 HSR04 Group 1 저어콘에서 나타나는 약 2.5 Ga 연대는 대이작도의 토날라이트질 마그마 생성 시기에 대비될 가능성이 있는 것으로 판단된다.

HSR04의 Group 2 저어콘은 화성기원 저어콘의 특징인 진동누대구조가 잘 발달해 있으며 Th/U 비 또한 화성기원을 지시하는 0.1 이상의 값을 가져, 이 저어콘에서 얻은 2051 ± 25 Ma 연대는 화성연대로

해석된다. 그러나 HSR04 시료와 인접한 장소에서 채취한 HSR03 시료에서는 이 그룹과 같은 연대 분석점이 나타나지 않은 점으로 미루어 볼 때, 본 저어콘에 존재하는 상속핵들은 쇄설성 원암에서 기원하기 보다는 화성 기원의 암체에서 공급되었을 가능성이 있는 것으로 생각된다. 국소적인 규모의 화성활동(약 2051 Ma)에 의해 생긴 암체가 그 이전에 (약 2.5 Ga) 형성된 지각으로 관입하였고, 이후 광역변성 및 화성작용이 활발하게 이루어지던 시기(약 1.8 Ga)에 원암의 변성분화작용(metamorphic differentiation)으로 인해 지금과 같은 혼성편마암이 발달하게 되었을 가능성이 있다. 그러나 지곡리층에서는 호상편마암과 더불어 편암, 석회암 및 규암 등이 산출되기 때문에(Kim and Hwang, 1982), 연구 시료의 원암이 퇴적암일 가능성 또한 완전히 배제할 수는 없다. 이에 더하여 지곡리층에서 다수 관찰되는 안구상의 반상변정구조는 변성 이전 화강암류에 존재하던 정장석 반정이 변성작용을 받는 동안 변형되어 형성된다고 알려져 있으나(Mason, 1990; Winter, 2001), 변성퇴적암이 교대변성작용을 받거나 합수마그마의 침투 등을 경험하는 경우에도 안구상 구조가 형성될 수 있어(Mehnert, 1968; Pinarelli *et al.*, 2008), 지곡리층 혼성편마암이 퇴적암 기원일 가능성을 무시할 수는 없다. 보다 정확한 성인 파악을 위해서는 추가적인 정밀 지질조사, 암석학 및 지구화학적 연구가 수행되어야 할 것으로 보인다. 아울러 본 연구에서 분석된 저어콘 입자는 시료 당 각 33개로, 쇄설성(detrital) 저어콘의 유의미한 연대 분포를 얻기 위해 필요하다고 제안되는 60개 이상의 저어콘 입자에 대한 분석치(Link *et al.*, 2005) 기준 보다는 부족한 편이다. 그러므로 연구시료의 원암이 퇴적암이라면, 본 연구의 저어콘 연대측정 결과는 원암의 기원 내지는 퇴적시기 규명 등의 해석을 위한 대표성이 있다고 보기 어려우며, 다만 경기육괴 남서부에서 발생했던 화성 및 변성작용의 시기에 대한 정보만을 제공한다고 볼 수 있다.

1833 ± 10 Ma의 연대를 보이는 HSR04의 Group 3 저어콘은 모두 누대구조가 발달하지 않으며 낮은 Th/U 비(0.01-0.16, 중앙값 = 0.11)를 가져 변성기원으로 추정된다. 앞서 언급한 바와 같이 약 2.0-1.8 Ga는 한반도에서 광범위한 광역변성 및 화성활동이 있었던 시기로 한반도의 선캄브리아기 암석에서 흔히

보고되는 연대이다. 그러므로 Group 3의 연대는 과거 연구지역에서 있었던 콜롬비아 초대륙의 생성과 관련된 광역변성작용의 시기를 나타낸다고 할 수 있다. 본 연구의 혼성편마암이 화성암 기원이라면 Group 3 저어콘의 연대는 연구지역에서 발생했던 변성작용의 시기를 지시하는 반면, 혼성편마암의 원암이 퇴적암이었다면 Group 3 저어콘에서 얻은 연대는 지곡리층으로 유입된 기원지의 변성 연대를 의미하는 것으로 해석된다.

마지막으로 1695.5 ± 5.4 Ma 연대를 가지는 HSR04의 Group 4 저어콘은 진동누대 내지는 부분누대의 내부 구조를 가지며 다른 저어콘 분석점과 비교하였을 때 상대적으로 높은 Th/U 비를 가지는 특징이 있다(그림 4a, 6a). HSR03 저어콘의 분석치 중 일치곡선 상에 도시되는 한 연대(1683 ± 6 Ma; HSR03-7.1)는 HSR04의 Group 4 연대와 오차범위 내에서 일치하며, 분석점의 Th/U 비도 같은 범위의 값을 가져(그림 6b) 동일한 지질학적 사건의 연대를 나타내는 것으로 생각된다. 지곡리 혼성편마암의 Group 4 저어콘에서 얻어진 1695.5 ± 5.4 Ma 연대는 경기육괴 남서부 팔봉면 화강편마암의 약 1.7 Ga (Koh *et al.*, 2015)를 제외하고는 선행연구에서 보고되지 않던 연대이다. Kim *et al.* (2018)에서 제시된 바에 의하면 연구지역 인근 가로림만 일대에 약 1.70-1.65 Ga 시기에 확장 환경에서 생성된 화강암류들이 분포하고 있을 것으로 추정되나, 이 화강암류에 대한 정확한 연대측정 및 암석학적 연구는 아직 이루어지지 않은 상태이다. 지질층서상의 순서로 볼 때 이 시기에 생성된 암체들은 이전에 형성된 고원생대 서산층군을 교대하거나 관입하며 존재한다. 그러나 우리는 연구지역의 야외조사에서 관입형태의 화강암체를 발견하지는 못하였다. 더불어 지곡리층은 서산층군의 하위층임을 감안할 때, HSR04의 Group 4 저어콘에서 나타나는 약 1.7 Ga 연대는 화성활동이 있을 당시 마그마에서 정출되어 형성된 저어콘의 화성연대로 해석하기 보다는 확장환경에서의 화성활동으로 인해 발생한 편마암체의 고온변성작용 연대에 가까운 것으로 생각된다. Group 4 저어콘에서 나타나는 높은 Th/U 비(0.44-1.43; 그림 6a, 6b)는 주로 저어콘이 화성작용에 의해 형성되었음을 지시하는 것으로 해석하는 것이 정석이나, Yakymchuk *et al.* (2018)에 의하면 형성되는 환경(예, 시스템 내에 존재하는

Th과 U의 함량, 마그마의 냉각과 결정화작용 동안 광물이 성장하는 속도 등)에 따라 변성 저어콘의 Th/U 비도 높은 값을 가질 수 있다는 사실이 알려져 있다. 특히 초고상선(suprasolidus) 환경에서 형성되는 저어콘의 Th/U 비는 평형상태에서 저어콘과 공존하는 모나자이트에 의해 좌우된다. 모나자이트는 부성분 광물 중 Th의 자원(budget) 역할을 한다고 알려져 있으며 온도가 증가할수록 더 높은 Th 함량을 가지는 특성이 있다(Engi, 2017; Yakymchuk *et al.*, 2018). 모나자이트가 고온 및 초고온변성작용이나 아나텍시스(anatexis) 과정을 겪어 붕괴되면 용융체(melt) 내의 Th 함량이 증가하게 되고, Th의 함량이 증가한 용융체와 평형상태를 이루며 형성된 변성 저어콘은 상대적으로 높은 Th/U 비를 가지게 된다. 이와 같은 기작으로 지곡리 혼성편마암의 Group 4 저어콘의 Th/U 비가 높은 값을 가지게 되었을 가능성이 있으며, 1695.5 ± 5.4 Ma 연대는 연구지역에서 발생했던 고온 또는 초고온변성활동의 시기를 지시하는 것으로 간주할 수 있다. 고온 변성활동은 Kim *et al.* (2018)에서 제안된 확장 환경의 화성활동에 수반된 것으로 유추할 수 있으나, 보다 정확한 해석을 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

7. 결 론

경기육괴 서남부 가로림만의 지곡리 혼성편마암에서 분리한 저어콘에서 측정된 SHRIMP U-Pb 연대는 연구지역에서 선캄브리아기(신시생대-고원생대) 동안 중첩적인 화성 및 변성작용이 있었음을 지시하며, 경기육괴에서 광역적인 화성 및 변성작용이 있었다고 알려진 약 2.5 Ga와 2.0-1.8 Ga 시기 이외에도, 약 2.1 Ga 및 1.7 Ga 시기에 국소적인 화성 및 변성작용이 발생했을 가능성을 내포하고 있다. 최근 분석기술의 발달로 그동안 잘못 알려져 있던 지질연대에 대하여 정밀 연대가 새로이 보고되고 있으나, 한반도의 선캄브리아기 지각진화사를 보다 정확히 이해하기 위해서는 추가적인 지질연대와 암석학 및 지구화학 자료가 지속적으로 수집되어야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 2018년도 충남대학교 학술연구비에 의

해 지원되었습니다. 논문 심사과정에서 건설적인 비평을 해주신 익명의 두 분 심사위원께 감사드립니다.

REFERENCES

- Cheong, C.-S., Kwon, S.-T. and Park, K.-H., 2000, Pb and Nd isotopic constraints on Paleoproterozoic crustal evolution of the northeastern Yeongnam massif, South Korea. *Precambrian Research*, 102, 207-220.
- 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 (in Korean with English abstract).
- Cho, D.-L., Kim, Y.J. and Armstrong, R., 2006, SHRIMP U-Pb geochronology of detrital zircons from iron-bearing quartzite of the Seosan Group: Constraints on age and stratigraphy. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 15(3), 119-127 (in Korean with English abstract).
- Cho, M., Kim, H., Lee, Y., Horie, K. and Hidaka, H., 2008, The oldest (ca. 2.51 Ga) rock in South Korea: U-Pb zircon age of a tonalitic migmatite, Daejok Island, western Gyeonggi massif. *Geosciences Journal*, 12, 1-6.
- Cho, M., Lee, Y., Kim, T., Cheong, W., Kim, Y. and Lee, S.R., 2017, Tectonic evolution of Precambrian basement massifs and an adjoining fold-and-thrust belt (Gyeonggi Marginal Belt), Korea: an overview. *Geosciences Journal*, 21, 845-865.
- 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.
- 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.
- Claoué-Long, J.C., Compston, W., Roberts, J. and Fanning, C.M., 1995, Two Carboniferous ages: a comparison of SHRIMP zircon dating with conventional zircon ages and ⁴⁰Ar/³⁹Ar analysis. In *Geochronology, Time Scales and Stratigraphic Correlation*, SEPM Special Publication, 54, 1-22.
- Engi, M., 2017, Petrochronology based on REE-minerals: monazite, allanite, xenotime, apatite. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 83, 365-418.
- Geological Society of Korea, 1999, *Geology of Korea*. Sigma Press, Seoul, 801 p (in Korean).
- Hanchar, J.M. and Hoskin, P.W.O., 2003, Zircon. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 53, 1-500 p.

- Hoskin, P.W.O. and Black, L.P., 2000, Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 18, 423-439.
- Hoskin, P.W.O. and Schaltegger, U., 2003, The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53, 27-62.
- Hoskin, P.W.O., 2000, Pattern of chaos: Fractal statistics and the oscillatory chemistry of zircon. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(11), 1905-1923.
- Kee, W.-S., Kim, S.W. and Park, S.-I., 2018, Tectonic provinces of Korean Peninsula. 2018 Fall Joint Conference of the Geological Sciences (Abstracts), Gyeongju, October 24-27, 157 p (in Korean).
- Kim, D.H. and Hwang, J.H., 1982, Geological Report of the Daesan-Eigog Sheet (1:50,000). Korea Institute of Energy and Resources, Seoul, 27 p.
- Kim, J.I., Choi, S.H. and Yi, K., 2019, Petrogenesis of Mesozoic granites at Garorim Bay, South Korea: evidence for an exotic block within the southwestern Gyeonggi massif?. *Geosciences Journal*, 23, 1-20.
- Kim, J.Y., 1989, A study on metamorphism of the metamorphic rocks in the central part of Gyeonggi Massif. Ph.D. Thesis, Seoul National University, 278 p.
- Kim, N., Cheong, C.-S., Yi, K., Song, Y.-S., Park, K.-H., Geng, J.-Z. and Li, H.-K., 2014, Zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic constraints on the Precambrian crustal evolution of the north-eastern Yeongnam Massif, Korea. *Precambrian Research*, 242, 1-21.
- Kim, S.W., Cho, D.-L., Lee, S.-B., Kwon, S., Park, S.-I., Santosh, M. and Kee, W.-S., 2018, Mesoproterozoic magmatic suites from the central-western Korean Peninsula: Imprints of Columbia disruption in East Asia. *Precambrian Research*, 306, 155-173.
- Kim, S.W., Kee, W.-S., Lee, S.R., Santosh, M. and Kwon, S., 2013, Neoproterozoic plutonic rocks from the western Gyeonggi massif, South Korea: Implications for the amalgamation and break-up of the Rodinia supercontinent. *Precambrian Research*, 227, 349-367.
- Kim, S.W., Kwon, S., Santosh, M., Williams, I.S. and Yi, K., 2011, A Paleozoic subduction complex in Korea; SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications. *Gondwana Research*, 20, 890-903.
- 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.
- Koh, H.J., Ko, K., Kwon, C.W., Kee, W.S., Kim, B.C., Kim, S.W., Kim, Y.B., Khim, Y.H., Kim, H.C., Park, S.-I., Song, K.Y., Yeon, Y.K., Lee, S.R., Lee, S.S., Lee, S.-R., Lee, S.B., Lee, H.J., Cho, D.R., Chi, K.H., Choi, S.J., Choi, B.Y., Hwan, J.K., Hwang, J.H., Hyeon, H.J., Hong, B., Jeon, H.Y., Kim, Y.S., Roh, J.R. and Kang, K.H., 2015, Tectonostratigraphy of the Mid-west Korean Peninsula and construction of the integrated geoscience information system. Basic Research Report of the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 243 p (in Korean with English abstract).
- Lan, C.Y., Lee, T., Zhou, X.H. and Kwon, S.T., 1995, Nd isotopic study of Precambrian basement of South Korea: evidence for early Archean crust?. *Geology*, 23, 249-252.
- Lee, B.C., Oh, C.W. and Yi, K., 2016b, Geochemistry, zircon U-Pb ages, and Hf isotopic compositions of Precambrian gneisses in the Wonju-Jechon area of the southern Gyeonggi Massif: implications for the Precambrian tectonic evolution of Korea and northeast Asia. *Precambrian Research*, 283, 169-189.
- Lee, B.C., Oh, C.W., Kim, T.S. and Yi, K., 2016c, The metamorphic evolution from ultrahigh-temperature to amphibolite facies metamorphism in the Odesan area after the collision between the North and South China Cratons in the Korean Peninsula. *Lithos*, 256-257, 109-131.
- Lee, B.C., Oh, C.W., Yengkhom, K.S. and Yi, K., 2014a, Paleoproterozoic magmatic and metamorphic events in the Hongcheon area, southern margin of the Northern Gyeonggi Massif in the Korean Peninsula, and their link to the Paleoproterozoic orogeny in the North China Craton. *Precambrian Research*, 248, 17-38.
- Lee, B.C., Park, J.H., Oh, C.W. and Yi, K., 2017a, Metamorphic and magmatic evolution of the Paleoproterozoic gneisses in the Sanceong area, Yeongnam Massif, South Korea, and their implications to the tectonic in the Northeast Asia. *Precambrian Research*, 298, 439-461.
- Lee, S.R., Cho, D.-L. and Wu, F.-W., 2016a, Contrasting source domains for the Phanerozoic granitoids in South Korea revealed by zircon Hf isotopic signatures. *Geosciences Journal*, 20, 585-596.
- 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.

- M.T.D., 2003a, Age, geochemistry, and tectonic significance of Neoproterozoic alkaline granitoids in the northwestern margin of the Gyeonggi massif, South Korea. *Precambrian Research*, 122, 297-310.
- Lee, S.R., Cho, M., Hwang, J.H., Lee, B.J., Kim, Y.B. and Kim, J.C., 2003b, Crustal evolution of the Gyeonggi massif, South Korea: Nd isotopic evidence and implications for continental growths of East Asia. *Precambrian Research*, 121, 25-34.
- Lee, S.R., Cho, M., Yi, K. and Stern, R.A., 2000, Early Proterozoic granulites in central Korea: Tectonic correlation with Chinese cratons. *Journal of Geology*, 108, 729-738.
- Lee, Y. and Cho, M., 2013, Fluid-present disequilibrium melting in Neoproterozoic arc-related migmatites of Daeijak Island, western Gyeonggi Massif, Korea. *Lithos*, 179, 249-262.
- Lee, Y., Cho, M., Cheong, W. and Yi, K., 2014b, A massif-type (1.86 Ga) anorthosite complex in the Yeongnam Massif, Korea: late-orogenic emplacement associated with the mantle delamination in the North China Craton. *Terra Nova*, 26, 408-416.
- Lee, Y., Cho, M., Cheong, W. and Yi, K., 2018, Prolonged high-temperature, low-pressure metamorphism associated with ~1.86 Ga Sancheong-Hadong anorthosite in the Yeongnam Massif, Korea: Palaeoproterozoic hot orogenesis in the North China Craton. *Precambrian Research*, 307, 175-200.
- Lee, Y., Cho, M. and Yi, K., 2017b, In situ U-Pb and Lu-Hf isotopic studies of zircons from the Sancheong-Hadong AMCG suite, Yeongnam Massif, Korea: Implications for the petrogenesis of ~1.86 Ga massif-type anorthosite. *Journal of Asian Earth Sciences*, 138, 629-646.
- Link, P.K., Fanning, C.M. and Beranek, L.P., 2005, Reliability and longitudinal change of detrital-zircon age spectra in the Snake River system, Idaho and Wyoming: An example of reproducing the bumpy barcode. *Sedimentary Geology*, 182, 101-142.
- Ludwig, K.R., 2008, User's Manual for Isoplot 3.6: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel, Berkeley Geochronological Center Special Publication, 4, 77 p.
- Ludwig, K.R., 2009, User's Manual for SQUID 2. Berkeley Geochronological Center Special Publication, 5, 110 p.
- Mason, R., 1990, Petrology of the Metamorphic Rocks. Unwin Hyman, London, 230 p.
- Mehnert, W.D., 1968, Migmatites and Origin of Granitic Rocks. Elsevier, Amsterdam, 393 p.
- Na, J., Kim, Y., 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. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 21, 31-45 (in Korean with English abstract).
- Na, K.C., 1978, Regional metamorphism in the Gyeonggi Massif with comparative studies of the Yeoncheon and Ogcheon Metamorphic Belts (I). *Journal of the Geological Society of Korea*, 14, 195-211.
- Na, K.C., 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., 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, South Korea; implication for the tectonic evolution of Northeast Asia. *Gondwana Research*, 16, 272-284.
- Oh, C.W., Imayama, T., Lee, S.Y., Yi, S.B., Yi, K. and Lee, B.C., 2015, Permo-Triassic and Paleoproterozoic metamorphism related to continental collision in Yangpyeong, South Korea. *Lithos*, 216-217, 264-287.
- Oh, C.W., Kim, C.B., Park, Y.S. and Kim, S.W., 2006a, SHRIMP U-Pb zircon ages of Paleoproterozoic rocks from the Gyeonggi Massif and their implications. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42, 587-606 (in Korean with English abstract).
- Oh, C.W., Kim, S.W. and Williams, I.S., 2006b, 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., Lee, B.C., Yi, S.-B. and Ryu, H.I., 2019, Correlation of Paleoproterozoic igneous and metamorphic events of the Korean Peninsula and China: Its implication to the tectonics of Northeast Asia. *Precambrian Research* (in press).
- Paces, J.B. and Miller, J.D., 1993, Precise U-Pb ages of Duluth Complex and related mafic intrusions, Northeastern Minnesota: geochronological insights to physical, petrogenetic, paleomagnetic, and tectonomagmatic processes associated with the 1.1 Ga midcontinent rift system. *Journal of Geophysical Research*, 98, 13997-14013.
- Park, S.-I., Kwon, S., Kim, S.W., Yi, K. and Santosh, M., 2014, Continental origin of the Bibong eclogite, southwestern Gyeonggi massif, South Korea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 95, 192-202.
- Pinarelli, L., Bergomi, M.A., Boriani, A. and Giobbi, E., 2008, Pre-metamorphic melt infiltration in metasediments: geochemical, isotopic (Sr, Nd, and Pb), and field evidence from Serie dei Laghi (Southern Alps, Italy). *Mineralogy and Petrology*, 93, 213-242.
- Rubatto, D., 2002, Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*, 184, 123-138.
- Santosh, M., Hu, C.-N., Kim, S.W., Tang, L. and Kee, W.-S.,

- 2018, Late Paleoproterozoic ultrahigh-temperature metamorphism in the Korean Peninsula. *Precambrian Research*, 308, 111-125.
- Song, Y.-S., Park, K.-H., Seo, J., Jo, H.J. and Yi, K., 2011, SHRIMP zircon ages of the basement gneiss complex in the Pyeongchang-Wonju area, Gyeonggi Massif, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 20, 99-114 (in Korean with English abstract).
- Williams, I.S., 1998, U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. *Reviews in Economic Geology*, 7, 1-35.
- Winter, J.D., 2001, *An Introduction to igneous and metamorphic petrology*. Prentice Hall, United States, 697 p.
- Yakymchuk, C., Kirkland, C.L. and Clark, C., 2018, Th/U ratios in metamorphic zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 36, 715-737.
-

Received : January 15, 2019

Revised : February 1, 2019

Accepted : February 3, 2019