

백령도와 대청도의 쇄설성 저어콘 U-Pb 연령과 Hf 동위원소 조성: 북한 및 북중국과의 대비

김명정¹ · 하영지¹ · 박정웅² · 박계현^{1,*}

¹부경대학교 지구환경과학시스템과학부

²승문고등학교

요 약

대청도에 분포하는 백령층군의 규질 사암에서 분리한 쇄설성 저어콘의 U-Pb 연령과 대청도와 백령도 사암의 쇄설성 저어콘에 대한 Hf 동위원소 조성을 LA-MC-ICPMS를 이용하여 분석하였다. 저어콘의 U-Pb 연령은 주로 고원생대 후기로부터 중원생대말의 구간(1,800-1,100 Ma)에 집중되는 특징을 나타낸다. 그러나 하부고생대 조선누층군이나 상부고생대 평안누층군에서 특징적인 연령 피크로 나타나는 약 1,870 Ma와 2,500 Ma의 연령들은 거의 나타나지 않는다. 이는 백령도와 대청도의 백령층군이 동일한 특징을 갖는 북한의 신원생대 상원누층군의 남서쪽 연장부임을 확인해준다. 가장 젊은 저어콘 연령이 약 1,026 Ma의 중원생대 최후기임을 감안하면 백령층군은 신원생대의 퇴적층일 가능성이 높다. 백령층군의 쇄설성 저어콘의 연령범위와 연령분포 특성은 북한의 상원누층군처럼 북중국 지괴의 신원생대 퇴적층들과 잘 대비된다. 백령층군의 쇄설성 저어콘들의 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 값은 지질시대에 따라 +11부터 -11까지 상당한 범위의 변화를 보이며 고원생대 후기부터 중원생대에 일어난 초대륙 컬럼비아의 분열과 관련된 지구조환경 및 화성활동의 기록으로 해석할 수 있다.

주요어: 상원누층군, 북중국 지괴, U-Pb 연령, 중원생대, Hf 동위원소 조성

Myoung Jung Kim, Youngji Ha, Jeong-Woong Park and Kye-Hun Park, 2021, U-Pb ages and Hf isotopic compositions of the detrital Zircons from Baengnyeongdo and Daecheongdo: Correlation with North Korea and the North China Craton. Journal of the Geological Society of Korea. v. 57, no. 1, p. 17-33

ABSTRACT: The U-Pb ages of detrital zircon separated from quartzose sandstones of the Baengnyeong Group distributed in Daecheongdo as well as the Hf isotope compositions of those in Daecheongdo and Baengnyeongdo were analyzed using LA-MC-ICPMS. The U-Pb ages are mainly concentrated between the late Paleoproterozoic and the late Mesoproterozoic (1,800-1,100 Ma). However, the 1,870 Ma and 2,500 Ma age peaks, which are characteristic in the Early Paleozoic Joseon Supergroup and the Late Paleozoic Pyeongan Supergroup, rarely appear. This suggests that the Baengnyeong Group in Baengnyeongdo and Daecheongdo, is a southwest extension of the Neoproterozoic Sangwon Supergroup in North Korea with the same characteristics. Given that the youngest zircon age is about 1,026 Ma in the latest Mesoproterozoic, the Baengnyeong Group is likely a Neoproterozoic sedimentary layer. The age range and age distribution characteristics of detrital zircon in the Baengnyeong Group are well correlated with those of Neoproterozoic sedimentary strata in the North China Craton, like the Sangwon Supergroup in North Korea. The $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of detrital zircons in the Baengnyeong Group range from +11 to -11, and vary significantly as a function of age, reflecting a series of tectonic and magmatic records in association with the breakup of supercontinent Columbia from the late Paleoproterozoic to Mesoproterozoic.

Key words: Sangwon Supergroup, North China Craton, U-Pb age, Mesoproterozoic, Hf isotopic composition

(Myoung Jung Kim, Youngji Ha and Kye-Hun Park, Division of Earth and Environmental Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea; Jeong-Woong Park, Soong-Moon High School, Seoul 04126, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-51-629-6629, E-mail: khpark@pknu.ac.kr

1. 서 언

지난 30년 가까이 한반도의 지각진화에 대한 연구에서 가장 중요한 이슈의 하나는 트라이아스기초에 있었던 중국의 대륙충돌대가 한반도로 연장되는지 여부와(Liu, 1993; Ree *et al.*, 1996), 이에 따라 한반도의 지체구조 단위들이 북중국 지괴와 남중국 지괴 중 어디에 대비되는지에 대한 것이었다. 태백산 분지의 고생대층들은 북한의 평남분지와 더불어 북중국 지괴에 대비되며 이들의 하부가 영남육괴 위에 부정합으로 얹혀있다고 보기 때문에 영남육괴 역시 북중국 지괴에 대비될 것으로 보는 견해가 일반적이었다(예, Chough *et al.*, 2000). 임진강대가 중국 대륙충돌대의 연장일 경우(Ree *et al.*, 1996) 이보다 남쪽에 위치한 경기육괴는 남중국에 대비된다고 볼 수 있다. 경기육괴의 남서부와 옥천변성대의 퇴적암들로부터 신원생대의 연령을 갖는 쇠설성 저어콘들이 발견됨에 따라(Cho, 2007; Cho *et al.*, 2010; Park *et al.*, 2011) 경기육괴와 옥천변성대는 신원생대의 연령이 특징적으로 나타나는 남중국 지괴에 대비되는 것이 더욱 설득력을 얻었다. 남중국에 대비되는 것으로 제안된 옥천변성대와 북중국에 대비되는 것으로 제안된 영남육괴의 사이에는 소위 남한지구조선(South Korean Tectonic Line, SKTL)이라는 지괴 경계선이 제안되기도 하였다(Chough *et al.*, 2000). 충돌대의 위치는 홍성-오대산을 잇는 선(Oh *et al.*, 2006) 등 임진강대와 다른 위치가 제안되기도 하였지만 경기육괴의 대부분이 남중국에 대비될 것이라는 견해는 상당한 지지를 받아왔다고 할 수 있다.

하지만 최근 들어 이러한 견해가 여러 연구들을 통해 상당한 도전을 받고 있다. 홍성과 임진강대의 사이에 위치한 경기육괴 서부지역의 여러 퇴적암 혹은 변성퇴적암들로부터 분석된 쇠설성 저어콘의 U-Pb 연령분포가 북한의 상원누층군 및 북중국 지괴(North China Craton)과 대비된다는 연구결과가 보고되었으며(Kim *et al.*, 2019) 또한 옥천변성대 지역에서도 이와 비슷한 쇠설성 저어콘 연대자료들이 보고되었다(Kim *et al.*, 2020). 이러한 쇠설성 저어콘의 U-Pb 연령분포에 의한 북중국 지괴와의 비교는 Hu *et al.* (2012)이 북한의 상원누층군과 중국 산둥반도에 의지하는 북중국 지괴의 남쪽 연변의 투먼(Tumen) 층군 사이에서 유사성을 보고한 것에서 출

발했다고 볼 수 있다. 따라서 북한의 황해남도 지역부터 남한의 경기도 북부지역 사이에 분포하는 지역을 조사하고 연구하는 것이 필요하지만 현재는 대한민국 학자들이 북한을 직접 방문하여 원하는 지역을 조사하고 그에 대한 연구를 수행하는 것이 현실적으로 거의 불가능하다. 따라서 차선책으로 북한의 황해남도에도 근접한 지역인 서해 5도 지역 특히 백령도, 대청도, 소청도 지역의 지질에 대한 중요성이 증대하였다. Hu *et al.* (2012)는 쇠설성 저어콘의 U-Pb 연령뿐만 아니라 Hf 동위원소 조성도 분석하여 보고하였다. 하지만 Hf 동위원소 조성은 중국의 투먼 층군의 암석만 분석하였고 북한의 상원누층군 암석은 분석하지 않았다. 황해남도의 장산곶에서 불과 15 km 떨어진 곳에 위치한 백령도와 그 남쪽의 대청도는 북한의 상원누층군의 연장부일 가능성이 높으며, 이에 대한 조사와 연구는 인접한 북한의 상원누층군을 직접 조사하는 것과 마찬가지로의 효과를 낼 가능성이 높다.

앞서의 연구들로 백령층군의 쇠설성 저어콘들이 북한의 상원누층군과 유사한 U-Pb 연령분포 특징을 갖는 것으로 확인되었다(Kim, M.J. *et al.*, 2016; Kim, S.W. *et al.*, 2019). 이 연구에서는 백령도의 남쪽에 위치한 대청도의 암석들로부터 쇠설성 저어콘을 분리하여 U-Pb 연령분포를 알아봄으로써 상원누층군의 특징을 갖는 암석들이 백령도의 남쪽에 위치한 대청도까지 확장되어 분포하는지를 확인하고자 한다. 또한 백령도와 대청도의 쇠설성 저어콘에 대한 Hf 동위원소 조성을 분석함으로써 Hu *et al.* (2012)가 상원누층군의 암석에서 보고하지 않은 Hf 동위원소 조성의 특성이 북중국 지괴와 유사한지 여부를 확인하고자 한다. 이는 경기육괴를 남중국에 대비시켰던 기존 의견들(예, Chough *et al.*, 2000)과는 달리 해석될 수도 있음을 주장하는 최근 연구들(Cho *et al.*, 2017a, 2017b; Kim *et al.*, 2019, 2020)과 더불어 한반도의 지각 진화에 대한 새로운 시각으로 볼 필요가 있음에 대해 토의하고자 한다.

2. 지질개요

백령도에는 북동쪽의 진촌리 일대에 맨틀 포획암을 갖는 신생대 현무암(Lee, 1995; Park *et al.*, 2005)이 좁은 면적으로 노출되어 있으며, 나머지 지역은

주로 원생대의 백령층군(Lim *et al.*, 1999)이 분포한다(그림 1). 백령층군은 하부로부터 중화동층, 장춘층 및 두무진층으로 구분된다(Lim *et al.*, 1999). 1:25만 지질도(BigData OpenPlatform, 2021)에 의하면 대청도의 지질은 대부분이 백령층군의 규암, 여기에 협재하는 백령층군 편암 및 석회암으로 구성된다. 이러한 암상은 백령도에 분포하는 두무진층과 비슷하기 때문에 여기서는 두무진층의 일부로 간주하였다(그림 1). 백령도와 대청도에 분포하는 백령층군의 암석구성, 그리고 인접한 소청도에서의 스트로마톨라이트 산출(Kim and Han, 2010) 등은 북한의 황해남도에 분포하는 상원누층군의 하부인 직현층군의 오봉리층과 장수산층에 대비되는 것으로 판단한

다. 북한학자들에 의한 최근 논문(Kim, M.C. *et al.*, 2016; Park *et al.*, 2016)에서 과거에 사용하던 상원계나 직현통과 같은 명칭을 더 이상 사용하지 않고 대신에 상원누층군, 직현층군으로 표기하고 있어서 이 논문에서도 이를 따랐다.

북한의 황해남도 지역에 넓게 분포하는 상원누층군의 하부에 놓인 낭림육괴의 기저암체에서 측정된 저어콘 U-Pb 연령은 1854 ± 12 Ma (Zhao *et al.*, 2006)로 남한의 경기육괴와 영남육괴에서 흔히 보고되는 고원생대 암석들의 연령과 비슷하다. 상원누층군은 하부로부터 직현층군, 사당우층군, 묵천층군 및 멸악산층군으로 구성된다(IGSASDPRK, 1996). 상원누층군의 퇴적시기는 퇴적암내 쇄설성 저어콘중 가

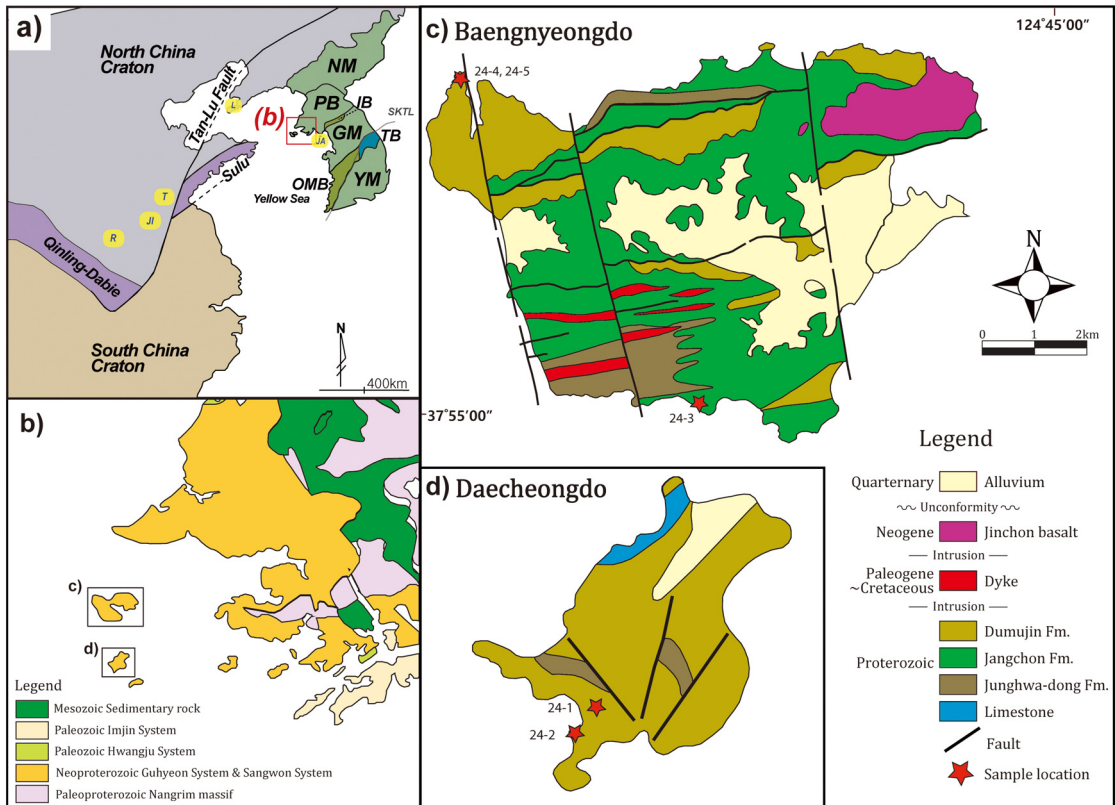


Fig. 1. Simplified geological map with sample locations of Baengnyeongdo and Daecheongdo located off the coast of North Korea, modified after IGSASDPRK (1996), Lim *et al.* (1999), and BigData OpenPlatform (2021). From the north, NM: Nangnim massif, PB: Pyeongnam basin, IB: Imjingang belt, GM: Gyeonggi massif, TB: Taebaeksan basin, OMB: Okcheon metamorphic belt, and YB: Yeongnam massif. The approximate locations of the sedimentary formations discussed in this paper are indicated in yellow. JA: Jangbong Formation of the western Gyeonggi massif, L: Diaoyutai and Xingmincun formations in the southern Liaoning Peninsula, JI: Xinxing and Jinshanzhai formations in the northern Jiangsu Province, R: Ruyang Group in southeastern margin of the North China Craton, and T: Tumen Group in Shandong Peninsula. SKTL is the so-called South Korean Tectonic Line (Chough *et al.*, 2000).

장 젊은 저어콘의 연령(약 990 Ma; Hu *et al.*, 2012) 보다는 젊고, 상원누층군을 관입한 화성암의 연령(약 900 Ma; Peng *et al.*, 2011) 보다는 오래된 신원생대 초로 한정할 수 있다.

3. 분석법

대청도에 분포하는 백령층군의 사암에 대한 쇠설성 저어콘 U-Pb 연령측정과 Hf 동위원소 분석을 위하여 모래울 해변(24-1, 37°48'39"N, 124°41'09"E)과 서풍반이(24-2, 37°48'05"N, 124°40'51"E)에서 표품을 채취하였다. Kim, M.J. *et al.* (2016)이 U-Pb 연령들을 보고한 백령도의 백령층군 쇠설성 저어콘들에 대해서도 Hf 동위원소 분석을 수행하였다. 이 표품들은 백령도의 남쪽 장촌 습곡 입구(24-3)와 북서쪽 모서리의 두무진 선대암 일대의 표품(24-5, 24-5)이다.

저어콘을 분리하기 위하여 암석의 파쇄 후 비이커 패닝법을 사용해 일차적 중광물 분리를 한 후 실제 현미경을 보고 저어콘 입자들을 골라내는 방법을 사용하였다. 저어콘 입자들을 심은 에폭시 마운트를 제작한 뒤에 한국기초과학지원연구원의 주사전자현미경을 이용하여 음극선발광 영상(cathodoluminescence, CL) 및 후방산란전자 영상을 획득하였다. 이 영상들을 참고하여 U-Pb 연령측정 및 Hf 동위원소 분석을 위한 분석점의 위치를 선정하였다. U-Pb 연령측정은 한국기초과학지원연구원의 레이저 삭마(Laser Ablation, LA) 장치(New Wave Research 193 nm wavelength ArF excimer laser ablation system)가 부착된 Nu

Plasma-II 모델의 다검출기 유도결합플라즈마 질량분석기(Multi-collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, MC-ICPMS)를 이용하였다. 분석에 사용된 기기적 조건들은 Kim *et al.* (2016)과 같다. U 농도와 연령의 보정에는 91500 (80 ppm, 1,065 Ma; Wiedenbeck *et al.*, 1995) 저어콘 표준물질을 사용하였고 보통납 보정은 Andersen (2002)의 방법을 이용하였다. Iolite 2.5 프로그램(Paton *et al.*, 2010, 2011)과 Isoplot 3.71 (Ludwig, 2008)을 이용하여 분석된 데이터의 배경값 보정, 동위원소 분별 보정 그리고 다운홀(downhole) 분별 보정을 한 후 연령계산을 하였다.

Hf 동위원소 분석 역시 U-Pb 분석과 동일한 LA-MC-ICPMS 장비를 사용하였다. Hf 동위원소 분석의 조건과 자료획득 방법은 이전의 연구들과 동일하다(예, Lee *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2019). Hf 동위원소 분석의 분석점 직경은 50 μm이다. 분석정밀도와 정확도를 평가하기 위해서 91500과 Plešovice 두 종류의 표준물질을 사용하였다. 자료의 처리에는 Iolite 2.5 소프트웨어(Paton *et al.*, 2011)를 사용하였다. 분석된 비율은 2σ 오차로 보고하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 쇠설성 저어콘 U-Pb 연령의 범위와 퇴적시기

대청도에 분포하는 백령층군 규질 사암의 쇠설성 저어콘들은 잘 발달된 원마도를 보인다(그림 2). 저어콘의 내부에는 진동누대구조를 보이는 CL 영상을

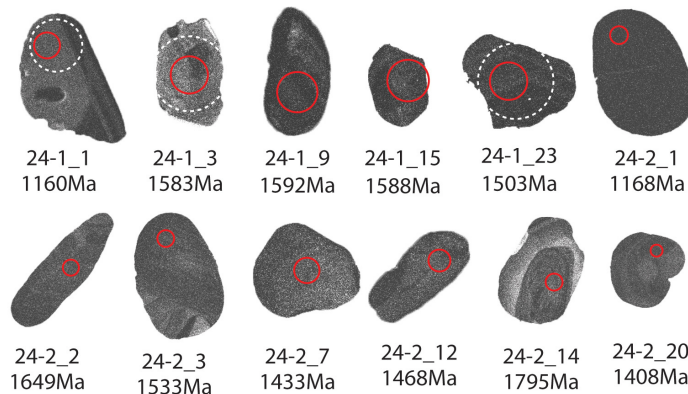


Fig. 2. Cathodoluminescence images of selected detrital zircons of this study. All the zircons show well-rounded shapes. Small circles (ca. 25 μm diameter) and large circles (ca. 50 μm diameter) indicate spots for the U-Pb and Hf analyses, respectively.

관찰할 수 있으며 U-Pb 연령에 따른 조직적 차이는 관찰되지 않는다(그림 2). 대청도의 규질 사암들 중에서 표본 24-1에서는 22개의 분석점, 24-2로부터는 28개의 분석점에서 U-Pb 분석을 수행하였다. 표 1에 U-Pb 연령분석자료가 수록되어 있으며, 그림 3

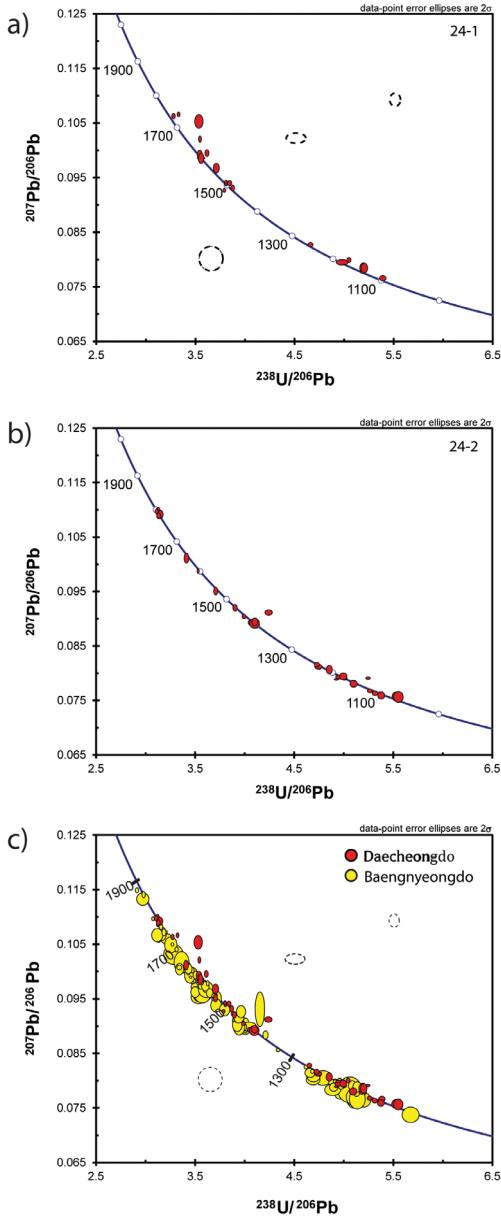


Fig. 3. Terra-Wasserburg diagrams for the analyzed detrital zircons of the Baengnyeong Group. (a) 24-1 (Daecheongdo), (b) 24-2 (Daecheongdo), and (c) all of the Baengnyeong Group samples including data of Kim, M.J. *et al.* (2016).

의 일치곡선(Concordia) 도형에 결과를 도시하였다. 분석된 대청도 암석들의 쇄설성 저어콘들은 1026±28 Ma로부터 1799±4 Ma까지의 분석점 U-Pb 연령을 보인다. 이는 이전에 보고된 백령도에 분포하는 백령층군의 쇄설성 저어콘 U-Pb 연령분포의 범위와 비슷하다. Kim, M.J. *et al.* (2016)의 결과는 1,050 Ma부터 2,800 Ma의 범위이지만 1,800 Ma를 넘는 것은 불과 몇 개 입자뿐이고 대부분의 저어콘은 고원생대말부터 중원생대 스테니안(Stenian) 중기에 해당하는 약 1,800-1,100 Ma의 범위에 놓인다. Kim *et al.* (2019)의 결과도 이와 비슷하게 1,078 Ma부터 2,784 Ma의 범위이며, 1,800 Ma 보다 오래된 저어콘 입자들은 몇 개의 입자뿐으로 대부분 고원생대말부터 중원생대말까지의 기간에 집중된다(그림 4). 백령층군의 쇄

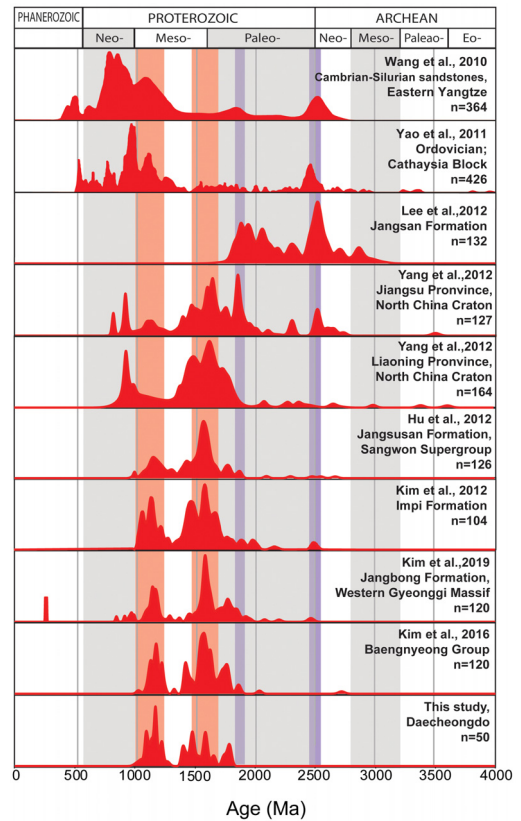


Fig. 4. Relative probability plots for detrital zircon $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages of this study compared with other sedimentary formation. Two purple vertical lines indicate ages of 1,870 Ma and 2,500 Ma dominantly present within the Cambrian Jangsan Formation. Two bimodal peaks dominant in most of the illustrated sedimentary formations are indicated by orange bands.

Table 1. U-Th-Pb results for zircon samples.

Spot number	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Discordancy ^a (%)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	error	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	error	Date (Ma)
<i>24-1 (37°48'39"N, 124°41'09"E)</i>									
24-1_1	126	138	1.09	+3	5.1894	0.0296	0.0785	0.0008	1160.0 ±23.0
24-1_2	226	274	1.22	+1	5.3850	0.0261	0.0766	0.0004	1091.5 ±9.7
24-1_3	100	110	1.10	+0	3.5361	0.0213	0.0993	0.0006	1583.0 ±11.0
24-1_4	229	157	0.69	+1	3.2733	0.0139	0.1063	0.0004	1736.0 ±10.0
24-1_5	162	176	1.05	+2	3.6114	0.0143	0.0995	0.0005	1600.0 ±16.0
24-1_6	466	305	0.63	+1	4.6564	0.0199	0.0828	0.0003	1271.0 ±21.0
24-1_7	296	220	0.75	+1	3.8402	0.0147	0.0940	0.0004	1488.7 ±8.9
24-1_9	883	898	1.01	-0	3.5537	0.0290	0.0986	0.0002	1592.1 ±3.7
24-1_10	1700	190	0.11	+0	4.9613	0.0148	0.0795	0.0002	1173.0 ±16.0
24-1_11	92	132	1.45	-0	3.5511	0.0227	0.0985	0.0008	1579.0 ±10.0
24-1_12	77	49	0.63	+1	3.7064	0.0247	0.0968	0.0007	1558.0 ±31.0
24-1_13	317	388	1.23	+3	3.3257	0.0107	0.1066	0.0004	1752.4 ±7.2
24-1_14	214	163	0.76	+2	5.0429	0.0165	0.0800	0.0004	1175.0 ±14.0
24-1_15	342	42	0.10	+6	3.5298	0.0361	0.1053	0.0010	1588.0 ±22.0
24-1_16	411	250	0.62	-2	3.7862	0.0109	0.0927	0.0003	1479.1 ±4.1
24-1_17	843	908	1.09	+1	5.1827	0.0156	0.0778	0.0002	1137.5 ±5.2
24-1_18	391	378	0.80	-1	4.9751	0.0470	0.0796	0.0004	1112.0 ±30.0
24-1_20	176	181	1.02	+4	3.5423	0.0125	0.1021	0.0005	1667.0 ±13.0
24-1_22	144	94	0.65	+1	3.8715	0.0150	0.0931	0.0005	1470.0 ±18.0
24-1_23	287	161	0.56	+0	3.8023	0.0113	0.0942	0.0003	1503.0 ±10.0
24-1_24	99	78	0.79	+2	5.1994	0.0262	0.0785	0.0007	1122.0 ±23.0
24-1_25	994	469	0.47	-0	3.8034	0.0111	0.0937	0.0002	1484.0 ±11.0
<i>24-2 (37°48'05"N, 124°40'51"E)</i>									
24-2_1	2746	100	27.90	-2	4.9247	0.0158	0.0789	0.0001	1168.1 ±2.0
24-2_2	206	144	1.42	-0	3.4083	0.0186	0.1011	0.0007	1649.0 ±7.3
24-2_3	239	126	1.90	-1	3.7037	0.0178	0.0951	0.0006	1533.3 ±7.1
24-2_4	1025	142	7.26	-1	5.3175	0.0235	0.0763	0.0003	1103.4 ±5.1
24-2_6	590	504	1.17	-1	4.7524	0.0158	0.0811	0.0003	1222.5 ±4.7
24-2_7	200	95	2.10	-0	3.9888	0.0159	0.0904	0.0003	1433.8 ±4.4
24-2_8	307	189	1.62	-1	5.2612	0.0177	0.0767	0.0003	1112.8 ±5.4
24-2_9	245	100	2.45	-0	3.5249	0.0094	0.0988	0.0004	1601.8 ±4.3
24-2_10	86	55	1.61	+2	5.5340	0.0368	0.0757	0.0007	1063.0 ±22.0
24-2_11	149	40	3.73	-1	5.0968	0.0286	0.0780	0.0005	1144.3 ±9.7
24-2_12	165	32	5.29	-0	3.8986	0.0182	0.0920	0.0005	1468.8 ±5.8
24-2_13	196	115	1.69	-0	5.3763	0.0289	0.0759	0.0005	1093.0 ±11.0
24-2_14	207	118	1.73	+0	3.1221	0.0146	0.1100	0.0004	1795.5 ±3.9
24-2_16	314	131	2.39	-0	4.7416	0.0292	0.0812	0.0003	1227.0 ±5.4
24-2_17	244	158	1.57	+6	4.2373	0.0323	0.0912	0.0004	1461.0 ±31.0

Table 1. continued.

Spot number	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Discordancy ^a (%)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	error	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	error	Date (Ma)
24-2_18	440	303	1.45	-1	4.9529	0.0294	0.0793	0.0003	1179.1 ±3.8
24-2_19	183	119	1.54	-0	3.1075	0.0135	0.1097	0.0004	1798.6 ±3.9
24-2_20	299	115	2.59	-1	4.0532	0.0163	0.0893	0.0003	1408.7 ±5.1
24-2_21	87	30	2.91	+0	3.1447	0.0208	0.1092	0.0006	1784.3 ±8.9
24-2_22	783	35	22.59	-0	5.0020	0.0210	0.0790	0.0002	1169.7 ±4.0
24-2_23	129	37	3.47	-0	3.1279	0.0166	0.1089	0.0004	1781.8 ±5.2
24-2_24	677	134	5.05	-0	4.7270	0.0208	0.0816	0.0003	1234.5 ±4.7
24-2_25	66	33	2.00	-0	4.0950	0.0386	0.0891	0.0007	1393.0 ±13.0
24-2_26	165	81	2.12	+1	4.9950	0.0274	0.0794	0.0005	1179.0 ±10.0
24-2_27	1395	4490	0.31	+4	5.2466	0.0187	0.0791	0.0002	1174.5 ±4.8
24-2_28	101	86	1.16	+0	4.0984	0.0269	0.0894	0.0006	1408.3 ±7.8
24-2_29	131	127	1.03	+2	5.5494	0.0400	0.0756	0.0008	1026.0 ±28.0
24-2_30	101	171	0.58	+0	4.8520	0.0259	0.0806	0.0006	1204.0 ±11.0

설성 저어콘들 중에서 가장 젊은 U-Pb 연령은 이 연구에서 구한 1026±28 Ma이다. 중원생대 최후기인 이 연령은 백령층군의 최고 퇴적시기를 한정한다. 하지만 퇴적분지의 위치나 당시 지구조환경 등으로 인하여 백령층군이 퇴적될 때 퇴적동시성 또는 퇴적 직전 시기의 화성 저어콘들이 퇴적물에 들어가지 못했을 가능성도 있기 때문에 아마도 백령층군의 퇴적시기는 이보다 훨씬 이후일 가능성도 배제할 수는 없다. 인접한 북한의 상원누층군에서는 가장 젊은 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 연령이 992±6 Ma (²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 연령은 968±25 Ma)로 보고(Hu *et al.*, 2012)되었기 때문에 아마도 퇴적시기는 신원생대초일 것으로 추정된다.

4.2 쇄설성 저어콘의 U-Pb 연령분포 특징과 퇴적물 근원지

이 연구에서 분석된 대청도에 분포하는 백령층군 규질 사암에서 분리한 쇄설성 저어콘의 연령분포 범위, 쌍모식의 분포특징, 최저연령등의 특징들은 모두 백령도에 분포하는 백령층군에서 보고된 것(Kim, M.J. *et al.*, 2016; Kim, S.W. *et al.*, 2019)과 동일하다(그림 4). 따라서 이 규질 사암들의 퇴적물 근원지는 백령도에 분포하는 백령층군과 동일할 것으로 생각된다. 백령도와 대청도의 지리적 위치를 보면 북한의 황해남도 장산곶과의 거리가 15 km에 불과하며, Lim *et al.* (1999)은 백령층군의 암석구성과 층서적 특징,

그리고 대청도와 소청도의 고회암의 발달상태, 스트로마톨라이트의 산출 등으로 미루어, 근접한 황해도 용진 일대에 분포된 하부 상원누층군의 하부인 직현층군에 대비될 수 있을 것으로 판단하였다. 다르게 표현하면 백령도와 대청도에 분포하는 백령층군은 사실상 북한 상원누층군의 연장부에 해당한다고 판단된다. 백령층군의 쇄설성 저어콘들이 보이는 U-Pb 연령분포에서 특징적인 것은 이들이 고원생대후기로부터 중원생대말까지의 기간 동안에 쌍모식의 연령분포를 보인다는 것이다(그림 3, 4). 이러한 연령분포는 한반도에서 지금까지 여러 지질시대의 퇴적암 또는 퇴적물에서 알려졌던 것과 상당히 다르다. 대부분의 경우는 약 1,870 Ma의 연령과 그 보다 조금 더 오래된 고원생대 시기의 연령이 우세하거나, 약 2,500 Ma의 연령이 주로 나타나는 경우, 또는 이 두 연령군이 함께 나타나는 경우가 많다. 대표적인 예가 그림 4에 보인 것처럼 하부고생대 조선누층군 최하부의 장산층이다(Lee *et al.*, 2012; Cho *et al.*, 2020). 장산층과 이에 대비되는 것으로 알려진 금수산층(Cho *et al.*, 2019), 평안누층군의 사동층(Lee *et al.*, 2010) 모두에서 약 1,870 Ma의 연령피크가 매우 강하게 나타난다. 이와 함께 약 2,500 Ma의 피크는 표품에 따라 다소 그 세기가 변화한다. 예를 들어 장산층과 대비되는 것으로 알려진 면산층에서는 1,870 Ma의 피크와 더불어 약 2,500 Ma의 피크가 뚜렷하

다(Kim *et al.*, 2013). 한반도 남서부에 분포하는 규암층들에서도 이와 비슷한 연령분포가 보고되었다(Ha *et al.*, 2014; Choi *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2015). 북한의 경우도 비슷하다. 북한 주요강의 퇴적물에서 분리한 쇄설성 저어콘들의 U-Pb 연령분포를 보면(Wu *et al.*, 2007) 가장 우세한 연령피크는 약 1,800-1,900 Ma 사이에 위치하며, 중생대 화강암들의 연령, 그리고 약 2,500 Ma 부근에 작은 피크가 존재한다. 이는 하부고생대, 상부고생대, 그리고 최근의 퇴적물들이 쌓일 때 퇴적물의 근원지 즉 한반도에 이 두 연령을 갖는 암석들이 넓게 노출되었을 것임을 시사한다. 실제로 남한의 경기육괴(Song *et al.*, 2011; Oh *et al.*, 2019)와 영남육괴(Kim *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2017, 2019), 북한의 낭림육괴(Zhao *et al.*, 2006; Song *et al.*, 2009)가 모두 고원생대의 암석이 주를 이루고 있기 때문에 이들이 약 1,870 Ma와 그보다 약간 더 오래된 고원생대 연령의 쇄설성 저어콘들의 근원이었을 것으로 생각된다. 하지만 약 2,500 Ma의 연령을 갖는 암체들이 한반도에 넓게 분포하지는 않는다. 다만 북동 영남육괴의 울리층군은 약 2,500 Ma에 주된 피크를 갖는 쇄설성 저어콘 U-Pb 연령분포를 보인다(Lee *et al.*, 2011). 울리층군의 쇄설성 저어콘들의 근원이 어디인지는 아직 잘 모르지만 울리층군 및 이와 유사한 다른 선캠브리아 변성퇴적암들이 재동되어 약 2,500 Ma 연령의 쇄설성 저어콘들의 근원이 되었을 수도 있다.

백령층군과 북한의 상원누층군에는 앞에서 언급한 퇴적층들과는 달리 약 1,870 Ma와 2,500 Ma의 연령을 갖는 쇄설성 저어콘들의 수가 아주 적다. 이는 이 퇴적층들이 쌓일 당시에 퇴적물의 근원지가 하부고생대, 상부고생대, 그리고 요즘과는 매우 달랐음을 나타낸다. 또한 중요한 것은 고원생대 후기로부터 중원생대말까지의 시기는 전세계적으로도 화성활동의 빈도가 상대적으로 활발하지 못했던 시기이다. 42,470개의 저어콘 U-Pb 연령 - Hf 동위원소 분석자료를 갖는 전세계 데이터베이스(Roberts and Spencer, 2014)를 보면 컬럼비아(Columbia)나 로디니아(Rodinia)와 같은 초대륙의 구축이 활발했던 약 2,000-1,800 Ma의 시기나 1,200-900 Ma의 시기들에 비해서 컬럼비아 초대륙이 분열되는 시기로 볼 수 있는 약 1,600-1,300 Ma의 시기 동안에는 저어콘의 U-Pb 연대와 Hf 분석자료의 수가 현저하게 적다. 이

는 약 2,000-1,800 Ma처럼 전지구적으로 많은 장소에서 나타나는 연령보다는 이처럼 상대적으로 드문 고원생대 후기부터 중원생대 기간의 연령을 갖는 암체나 그런 연령의 쇄설성 저어콘을 갖는 퇴적암의 출현이 서로 다른 지괴의 대비나 고지리 재구축에 더 유용할 수 있음을 말해준다. 한반도 내에서는 이러한 연령을 갖는 화성암체들이 알려진 것이 없다. 따라서 이러한 연령의 쇄설성 저어콘들이 어디서 왔는지를 정확하게 추적하기가 어렵다. 하지만 북중국 지괴에서는 고원생대 후기로부터 신원생대에 이르기까지 여러 차례의 열곡작용 및 이에 수반된 화성활동이 있었음이 알려져 있다(Zhai *et al.*, 2015). 또한 북중국 지괴의 여러 곳의 신원생대층(Hu *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012)에서 백령층군 및 상원누층군과 비슷한 고원생대 후기부터 중원생대말의 연령분포를 갖는 쇄설성 저어콘들이 발견되기 때문에 이들과 공통의 근원지를 가졌을 가능성이 있다.

4.3 경기육괴 서부지역, 북한 상원누층군 및 북중국 지괴 신원생대층들과의 대비

그림 4는 백령층군과 상원누층군 사이의 쇄설성 저어콘 U-Pb 연령분포의 유사성뿐만 아니라 북중국 지괴와 경기육괴의 다른 퇴적층들과의 비교도 함께 보여주고 있다. 이 연구의 대청도 자료와 백령도(Kim, M.J. *et al.*, 2016) 자료는 물론 경기육괴 북서부의 장봉층(Kim *et al.*, 2019), 경기육괴 남서부의 임피층(Kim *et al.*, 2012)이 북한의 상원누층군 장수산층(Hu *et al.*, 2012)과 비슷한 형태의 연령분포를 보인다. 주된 연령분포 기간은 고원생대 후기로부터 중원생대 말까지이며 약 1,600 Ma와 약 1,200 Ma 부근에 집중되는 쌍모식의 분포를 보인다. 이는 북중국 지괴의 여러 지역에 분포하는 신원생대층들에서도 나타난다. 예를 들면 Hu *et al.* (2012)가 북한의 상원누층군과 대비한 산둥반도의 투먼(Tumen)층군, 그리고 Yang *et al.* (2012)가 보고한 지양수(Jiangsu) 북부와 리아오닝(Liaoning) 남부에 분포하는 신원생대층의 사암들(Yang *et al.*, 2012)도 이러한 특징을 공유한다. 하지만 남중국의 양쯔(Yangtze) 지괴(Wang *et al.*, 2010)나 카타이시아(Cathaysia) 지괴(Yao *et al.*, 2011)의 퇴적물에서 보여주는 선캠브리아 쇄설성 저어콘들의 연령분포와는 상당한 차이를 보인다.

비교대상 퇴적층들이 비슷한 연령범위를 가지며

Table 2. Zircon Lu-Yb-Hf isotopic compositions.

Spot number	Age (Ma)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2 σ SE	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2 σ SE	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2 σ SE	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	T _{DM} (Ma)	T _{2DM} (Ma)
<u>Daecheongdo (24-1)</u>										
24-1_1	1160.0	0.282061	0.000033	0.001129	0.000036	0.030660	0.000590	-0.3	1684	1889
24-1_3	1583.0	0.281996	0.000049	0.001169	0.000020	0.030260	0.000550	6.5	1776	1852
24-1_21	1614.0	0.281968	0.000031	0.000877	0.000020	0.025640	0.000620	6.5	1801	1876
24-1_23	1503.0	0.282136	0.000044	0.001631	0.000057	0.048500	0.001000	9.3	1600	1637
<u>Baengnyeongdo (24-3)</u>										
24-3_1	1568.0	0.281971	0.000029	0.001044	0.000020	0.030700	0.001100	5.4	1805	1899
24-3_2	1244.0	0.282186	0.000070	0.000994	0.000017	0.034910	0.000360	6.0	1504	1607
24-3_4	1670.3	0.281901	0.000033	0.000989	0.000005	0.027240	0.000360	5.3	1899	1990
24-3_7	1581.5	0.281976	0.000040	0.001351	0.000031	0.034920	0.000610	5.6	1813	1901
24-3_8	1725.9	0.281683	0.000031	0.001291	0.000024	0.036660	0.000570	-1.6	2218	2407
24-3_9	1181.6	0.282012	0.000021	0.000459	0.000013	0.011950	0.000320	-1.1	1722	1947
24-3_10	1158.0	0.282069	0.000018	0.000278	0.000004	0.006940	0.000140	0.6	1636	1838
24-3_12	1454.0	0.281945	0.000024	0.000653	0.000005	0.020140	0.000230	2.4	1822	1973
24-3_14	1646.0	0.281671	0.000033	0.001031	0.000022	0.029300	0.001200	-3.5	2219	2446
24-3_16	1523.0	0.282016	0.000030	0.000677	0.000008	0.014900	0.000180	6.4	1726	1809
24-3_17	1187.0	0.282122	0.000025	0.000563	0.000010	0.015810	0.000290	2.9	1575	1735
24-3_18	1226.0	0.282206	0.000031	0.000946	0.000007	0.026440	0.000510	6.4	1474	1573
24-3_19	1631.7	0.281900	0.000028	0.001076	0.000003	0.028430	0.000340	4.3	1905	2013
24-3_20	1617.0	0.281741	0.000028	0.000762	0.000011	0.021650	0.000410	-1.3	2108	2307
24-3_23	1877.9	0.281557	0.000019	0.000970	0.000015	0.028440	0.000610	-2.4	2372	2568
24-3_24	1558.0	0.281966	0.000024	0.000708	0.000005	0.018790	0.000180	5.4	1796	1893
24-3_25	1526.0	0.281985	0.000029	0.000762	0.000006	0.021890	0.000220	5.3	1773	1872
24-3_26	1792.8	0.281501	0.000020	0.000791	0.000016	0.020700	0.000300	-6.0	2437	2698
24-3_27	1407.5	0.282235	0.000036	0.002321	0.000011	0.065400	0.001000	10.1	1488	1515
24-3_28	1128.0	0.281775	0.000030	0.000768	0.000023	0.019000	0.001400	-10.9	2061	2440
<u>Baengnyeongdo (24-4)</u>										
24-4_1	1734.1	0.281758	0.000017	0.000806	0.000011	0.021580	0.000500	1.8	2087	2230
24-4_2	1527.9	0.282032	0.000027	0.001100	0.000009	0.030230	0.000310	6.7	1723	1800
24-4_3	1126.9	0.282043	0.000028	0.000952	0.000032	0.026800	0.001200	-1.6	1701	1930
24-4_4	1851.5	0.281710	0.000017	0.001007	0.000017	0.026290	0.000430	2.4	2164	2288
24-4_5	1542.7	0.281975	0.000023	0.000781	0.000011	0.020360	0.000390	5.3	1788	1887
24-4_6	1594.7	0.281937	0.000018	0.000901	0.000013	0.022020	0.000300	5.0	1846	1946
24-4_7	1653.6	0.281759	0.000019	0.000419	0.000006	0.009980	0.000160	0.5	2065	2237
24-4_8	1457.0	0.282165	0.000017	0.001291	0.000018	0.036040	0.000340	9.6	1546	1580
24-4_9	1530.6	0.282014	0.000027	0.001293	0.000027	0.034700	0.000440	5.9	1757	1845
24-4_10	1566.3	0.281957	0.000018	0.001029	0.000008	0.026360	0.000110	4.9	1824	1926
24-4_11	1544.0	0.282129	0.000019	0.000436	0.000004	0.012031	0.000089	11.1	1561	1568
24-4_12	1609.1	0.281896	0.000048	0.002630	0.000055	0.075220	0.000540	2.0	1993	2121
24-4_14	1040.0	0.282205	0.000023	0.000593	0.000003	0.017060	0.000190	2.5	1462	1636
24-4_15	1129.7	0.281960	0.000025	0.001528	0.000079	0.039600	0.002100	-4.9	1844	2113
24-4_16	1193.0	0.282199	0.000030	0.001570	0.000064	0.049700	0.002300	4.9	1509	1628
24-4_17	1161.5	0.282118	0.000017	0.000514	0.000001	0.013956	0.000084	2.2	1579	1752

Table 2. continued.

Spot number	Age (Ma)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ SE	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ SE	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ SE	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM} (Ma)	$T_{2\text{DM}}$ (Ma)
24-4_18	1550.6	0.282036	0.000018	0.000975	0.000011	0.026850	0.000400	7.4	1712	1776
24-4_19	1101.5	0.282134	0.000016	0.000555	0.000003	0.014470	0.000150	1.4	1559	1748
24-4_20	1566.0	0.281941	0.000026	0.000571	0.000003	0.016090	0.000240	4.8	1824	1931
24-4_21	1418.0	0.282016	0.000020	0.000753	0.000003	0.020090	0.000230	4.0	1730	1856
24-4_22	1116.3	0.282347	0.000056	0.002083	0.000015	0.070400	0.002300	8.1	1317	1389
24-4_23	1128.4	0.282182	0.000017	0.000247	0.000013	0.006140	0.000290	3.9	1481	1630
24-4_24	1607.0	0.281832	0.000018	0.000588	0.000001	0.016350	0.000120	1.8	1974	2126
24-4_25	1717.7	0.281773	0.000027	0.000581	0.000006	0.015470	0.000120	2.2	2055	2193
24-4_26	1150.6	0.282120	0.000018	0.000530	0.000003	0.014690	0.000100	2.0	1577	1753
24-4_27	1499.3	0.282068	0.000019	0.000954	0.000002	0.024820	0.000140	7.5	1667	1733
24-4_28	1757.0	0.281628	0.000028	0.000775	0.000016	0.022130	0.000150	-2.3	2263	2468
24-4_29	1210.5	0.282031	0.000020	0.000328	0.000003	0.008900	0.000130	0.3	1690	1893
24-4_31	1426.6	0.282194	0.000033	0.001204	0.000047	0.038600	0.002200	10.1	1501	1531
24-4_32	1422.4	0.281947	0.000018	0.000541	0.000004	0.014170	0.000150	1.9	1815	1977
24-4_33	1107.0	0.281960	0.000020	0.001186	0.000060	0.029900	0.001300	-5.1	1828	2108
24-4_34	1737.1	0.281641	0.000023	0.000568	0.000013	0.016200	0.000300	-2.0	2234	2438
<u>Baengnyeongdo (24-5)</u>										
24-5_1	1637.9	0.281815	0.000020	0.000620	0.000005	0.016780	0.000200	1.9	1999	2147
24-5_2	1588.9	0.281895	0.000021	0.000975	0.000015	0.022980	0.000300	3.3	1907	2033
24-5_3	2038.4	0.281301	0.000018	0.000475	0.000001	0.013180	0.000120	-7.2	2687	2957
24-5_4	1537.0	0.281980	0.000021	0.000846	0.000010	0.022560	0.000430	5.3	1783	1882
24-5_5	1608.0	0.281863	0.000020	0.000714	0.000007	0.018540	0.000300	2.8	1938	2072
24-5_6	1548.0	0.281957	0.000019	0.000693	0.000012	0.018400	0.000200	4.9	1808	1914
24-5_7	1533.0	0.282213	0.000034	0.002850	0.000064	0.078000	0.001900	11.4	1542	1545
24-5_8	1321.0	0.282264	0.000026	0.001730	0.000005	0.039730	0.000370	9.8	1423	1460
24-5_9	1754.0	0.281565	0.000029	0.001038	0.000054	0.033400	0.002100	-4.9	2365	2607
24-5_10	1753.5	0.281675	0.000021	0.000559	0.000007	0.015670	0.000340	-0.4	2187	2365
24-5_11	1753.0	0.281687	0.000026	0.000560	0.000002	0.016190	0.000200	0.0	2170	2342
24-5_12	1791.2	0.281919	0.000024	0.000774	0.000016	0.020200	0.000670	8.8	1864	1893
24-5_13	1179.0	0.282089	0.000019	0.000756	0.000007	0.022440	0.000300	1.4	1629	1811
24-5_14	1695.0	0.281632	0.000018	0.000289	0.000004	0.008130	0.000110	-2.9	2229	2455
24-5_15	1167.0	0.282116	0.000018	0.000405	0.000008	0.010710	0.000200	2.3	1577	1748
24-5_16	1599.0	0.281989	0.000017	0.000654	0.000013	0.017080	0.000270	7.2	1762	1829
24-5_17	1134.0	0.282127	0.000019	0.000767	0.000004	0.020440	0.000240	1.7	1577	1756
24-5_18	1237.0	0.282074	0.000021	0.000769	0.000005	0.021910	0.000200	2.1	1650	1817
24-5_19	1635.0	0.281704	0.000017	0.000542	0.000004	0.014940	0.000180	-2.0	2146	2357
24-5_20	1586.6	0.281998	0.000020	0.000709	0.000002	0.019090	0.000120	7.2	1752	1820
24-5_21	1638.9	0.281700	0.000015	0.000468	0.000001	0.012700	0.000130	-2.0	2147	2359
24-5_22	2715.5	0.280901	0.000019	0.000438	0.000002	0.012420	0.000110	-6.0	3219	3429
24-5_23	1562.0	0.281953	0.000029	0.000914	0.000006	0.026080	0.000250	4.8	1824	1928
24-5_24	1131.0	0.282114	0.000019	0.000650	0.000005	0.017870	0.000260	1.3	1590	1778
24-5_25	1692.0	0.281552	0.000023	0.000918	0.000016	0.026190	0.000360	-6.6	2376	2649

그 안에서 쌍모식 연령분포를 하는 특징이 비슷함과 더불어 함께 주목할 사항이 하나 더 있다. 그것은 이 층들 모두가 그림 4의 최상단에 도시한 장산층(Lee *et al.*, 2012)과 달리 약 1,870 Ma와 약 2,500 Ma의 연령피크들이 없거나 아주 약하다는 것이다. 앞서 언급한 대로 한반도의 경기육괴, 영남육괴 그리고 낭림육괴에서 이러한 연령이 특징적으로 나타날 뿐만 아니라 북중국 지괴의 여러 퇴적층들에서도 약 1,870 Ma의 고원생대 연령 부근 또는 약 2,500 Ma의 연령이 두드러진 연령성분으로 나타나는 것들이 자주 발견된다. 예를 들면 북중국 지괴의 남쪽 연변에 위치한 원생대 루양층군의 쇄설성 저어콘들은 약 1,860 Ma의 연령을 중심으로 두드러진 연령피크가 나타난다(Hu *et al.*, 2014). 한편 북경 부근의 창청(Changcheng), 지시안(Jixian) 그리고 칭바이커우(Qingbaikou) 층군들의 중원생대-신원생대 퇴적층들에서는 약 2,520 Ma에 주된 연령피크가 나타나며 약 1,850 Ma에도 이보다 작지만 뚜렷한 연령피크를 보여준다(Wan *et al.*, 2011). 그림 4에서 비교한 남북한과 북중국의 여러 층들에서는 이러한 약 1,870 Ma와 2,500 Ma 부근의 연령들이 잘 나타나지 않는다. 이처럼 남한과 북한의 중원생대-신원생대 층들에서 공통적으로 선별적인 퇴적물 근원지를 나타내는 현상은 이 층들이 퇴적될 당시 공통적인 지구조 환경의 지배를 받는 퇴적환경이었음을 나타내는 것으로 보인다.

앞에서 살펴본 퇴적층내 쇄설성 저어콘들의 U-Pb 연령이 나타내는 공통적인 퇴적물 근원지, 연령분포에서 가장 젊은 저어콘이 한정하는 가능한 퇴적시기의 최고한계와 같은 특징이 비슷함과 더불어 지리적인 근접성은 이 층들이 서로 대비관계에 있을 가능성을 시사한다. 북한의 상원누층군 분포지의 서쪽 연장부에 백령도와 대청도가 위치한다. 경기육괴 북서부의 장봉층이 분포하는 장봉도는 강화도와 영종도 사이에 위치하며 가장 가까운 북한의 황해남도 연안군 남쪽 끝부분부터 불과 25 km 정도의 거리에 위치한다. 북중국 지괴에서 비슷한 쇄설성 저어콘 연령특성을 나타내는 신원생대 퇴적층들은 산둥성, 리아오닝성, 지장성 등 한반도와 비교적 가까운 지역에 주로 분포한다. 북중국 지괴의 남쪽 또는 남동쪽 연변부에 분포하는 이 신원생대층들이 북한과 남한의 신원생대 퇴적층들과 상당한 유사성을 나타내

는 것은 이 층들이 분포하는 한반도의 서부지역 그리고 임피층이 분포하는 경기육괴 남서부지역까지도 북중국 지괴와 대비될 가능성을 시사한다.

4.4 경기육괴 서부와 북중국 지괴와의 대비의 의미

상원누층군의 연장부라고 생각되는 백령도와 대청도에 분포하는 백령층군뿐만 아니라 경기육괴 북서부에 분포하는 장봉층 그리고 경기육괴 남서부의 임피층이 공통적인 특징을 보이며 북중국 그레이톤에 대비될 수 있음은 중요한 지구조적 의미를 갖는다. 중국의 트라이아스기 대륙충돌대가 한반도의 임진강대로 연장된다는 주장(Ree *et al.*, 1996; Chough *et al.*, 2000)에 의하면 경기육괴는 남중국에 대비되어야 하며, 임진강대의 북쪽에 위치한 낭림육괴는 북중국에 대비되는 한중지괴의 일부로 볼 수 있다. 임진강대의 북쪽에 위치한 백령도와 대청도를 포함하는 지역의 상원누층군과 임진강대 남쪽에 위치한 경기육괴 북서부의 장봉층의 관계는 임진강대가 서로 다른 지괴 사이에 일어난 대륙충돌의 경계인지를 검증해볼 수 있는 수단이 된다. 장봉층이 분포하는 장봉도에서 가장 가까운 북한의 황해남도 연안군과 그 서쪽의 청단군과 강령군의 남부를 따라서 임진강대가 동서로 분포한다(IGSASDP, 1996). 따라서 더 북쪽에 분포하는 상원누층군과 더 남쪽의 장봉층이 쇄설성 저어콘의 연령 범위와 연령분포 특징이 같은 서로 대비될 수 있는 층이라는 것은 임진강대가 대륙충돌대일 가능성을 재고해봐야함을 의미한다. 또한 훨씬 더 멀리 떨어진 경기육괴 남서부의 임피층도 북중국 지괴에 대비될 수 있음은 경기육괴가 남중국에 대비된다는 가설과는 배치되는 발견이다. 이러한 추론이 성립한다면 경기육괴와 남중국의 대비에 따라 주장된 소위 남한지구조선(South Korean Tectonic Line, SKTL; Chough *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2017)은 지괴 경계로서의 의미가 없게 된다.

4.5 태백산분지 퇴적층의 중원생대 쇄설성 저어콘의 근원

한반도 여러 지역에서 고원생대 후기로부터 중원생대말까지의 연령분포가 특징인 쇄설성 저어콘을 갖는 퇴적층들이 발견된 것은 이러한 연령의 쇄설성 저어콘의 근원으로서의 의미도 갖는다. 즉 이전에는 중원생대의 저어콘들이 특징적으로 나타나는 퇴적

물 근원지가 한반도 안에서는 알려지지 않았기 때문에 이러한 연령의 쇄설성 저어콘들을 발견하면 인접 지역이 아닌 현재는 멀리 떨어진 다른 지괴로부터의 유입가능성을 고려하였다. 세송층(McKenzie *et al.*, 2011), 삼방산층(Kim *et al.*, 2013), 그리고 묘봉층(Lee *et al.*, 2016)에 들어있는 중원생대 쇄설성 저어콘들의 근원을 설명하는데 이처럼 상당히 먼 근원지로부터의 유입가능성이 논의되었다. 하지만 이 연구에서 논의한 것처럼 한반도 내의 여러 지역에 중원생대 연령의 저어콘들이 있음이 확인되었기 때문에 이러한 지역들을 우선적으로 고려하여 퇴적물 근원지로서의 가능성을 평가해야 할 것으로 생각한다.

4.6 Hf 동위원소 조성 and 지각진화

상원누층군의 암석들과 북중국 지괴의 대비관계

를 주장한 연구(Hu *et al.*, 2012)에서 쇄설성 저어콘의 U-Pb 연령분포 특성은 두 지역이 매우 비슷함을 보여주었다. 하지만 쇄설성 저어콘의 Hf 동위원소 조성은 북중국의 투먼(Tumen) 층군에 대해서만 보고되었다. 이 연구의 Hf 동위원소 분석자료는 상원누층군의 쇄설성 저어콘 Hf 동위원소 조성 역시 U-Pb 연령처럼 북중국의 것과 동일한 양상을 갖는지를 실질적으로 확인해볼 수 있는 기회를 제공한다. 이 연구에서 U-Pb 연령분석결과를 보고한 대청도의 백령층군 뿐만 아니라 이전에 U-Pb 결과가 보고된 백령도의 백령층군 표본들(Kim, M.J. *et al.*, 2016)에 대해서도 함께 총 81개의 Hf 동위원소 조성을 분석하였다. 백령도와 대청도의 쇄설성 저어콘들이 보이는 연대에 따른 Hf 동위원소 값의 변화를 보면(그림 5a) 약 1,800-1,700 Ma의 후기고원생대 시기에는 약 -10

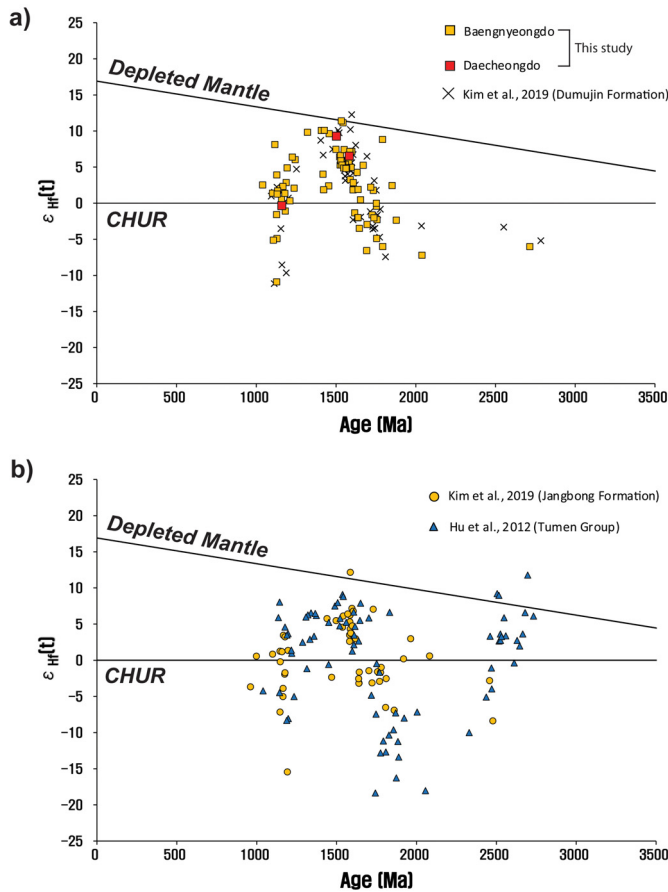


Fig. 5. ε_{Hf}(t) versus age diagrams. (a) Baengnyeongdo and Daecheongdo of this study. (b) The Jangbong Formation of the Gyeonggi massif (Kim *et al.*, 2019) and the Tumen Group of the North China Craton (Hu *et al.*, 2012). These plots show that the age ranges and the signs of ε_{Hf}(t) are similar. See the discussion in the text.

정도로 낮은 음의 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 값부터 +10 부근으로 높은 양의 값까지 넓은 변화를 보인다. 하지만 그 이후부터 중원생대 거의 끝 무렵까지는 지속적으로 양의 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 값을 보이다가, 약 1,100 Ma로부터 1,000 Ma 사이의 최후기 중원생대에는 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 값이 일부 약 -11 부근의 음의 값까지 떨어짐을 볼 수 있다. 이러한 양상은 북중국 지괴에서도 비슷하게 나타난다. 북중국의 신원생대 퇴적층인 산둥반도에 분포하는 투먼(Tumen) 층군의 경우 백령도 및 대청도의 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 값 변화와 매우 비슷하며(그림 5a) 두 지역들 사이의 대비관계를 시사한다.

$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 값이 양의 값인지 아니면 음의 값인지 여부는 마그마 생성시의 근원물질과 지구조환경과 밀접한 관련이 있다. 양의 경우는 컬럼비아로부터의 초생물질의 유입을 나타내며, 반대로 음의 값은 오래된 지각물질의 재순환을 나타낼 수 있다. 백령도와 대청도의 쇄설성 저어콘들의 U-Pb 연령범위인 주로 후기고원생대로부터 중원생대말까지의 시기는 고원생대의 초대륙 컬럼비아가 분열되고 다시 신원생대의 초대륙 로디니아가 만들어지는 시기이다(Zhao *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2008). 이러한 대륙의 분열과 집합은 상당히 다른 지구조 환경에서의 화성활동을 수반한다(Roberts and Spencer, 2014). 특히 컬럼비아 초대륙의 분열은 여러 단계의 열곡작용을 수반하였다(Zhai *et al.*, 2015). 예를 들어 북중국 지괴의 여러 곳으로부터 고원생대 후기(1,800-1,600 Ma)의 대규모 고철질 암맥군(dyke swarm)이 보고된바 있으며 여기에는 1,780 Ma, 1,730 Ma, 1,680 Ma와 1,620 Ma의 암맥군들이 포함된다(Li *et al.*, 2015). 이들의 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 값은 +7부터 -6의 범위를 보인다. 전지구적인 Nd 동위원소와 Hf 동위원소의 정비례 관계(van de Fliert *et al.*, 2007)를 고려하면 대략 +10부터 -10 범위의 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 값에 해당한다.

약 1,330-1,305 Ma (1,323 Ma의 정점연령)의 열곡 작용 관련 고철질 암석들이 북중국 지괴 북부의 안리아오(Yanliao) 열곡대에 분포하며 컬럼비아의 분열과 관련된 것으로 추정된다(Zhang *et al.*, 2017). 북중국 지괴의 남서쪽 연변부에 약 1530 Ma에 인장 환경에서 만들어져 정지한 A-형 화강암 벨트의 한 부분을 차지하는 장지아핑(Zhangjiaping) 화강암의 경우 -12.5부터 -4.0 범위의 음의 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 값을 갖는 것으로 보아 지각물질중의 화강암류가 용융되어 생성된

것으로 해석되었다(Deng *et al.*, 2016). 북중국 지괴의 북쪽 연변에도 인장환경을 지시하는 1,350-1,310 Ma의 고철질 암맥군과 쌍모식 조성의 화성암들이 나타나며, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 값의 범위가 +8~+2로 양의 값 그리고 -1~-12의 음의 값들을 다 보여준다(Zhang *et al.*, 2012). 이처럼 전지구적으로 나타나는 중원생대 시기의 열곡관련 비조산성 마그마작용과 합치하는 인장관련 화성활동이 북중국 지괴의 여러 곳에서 발견되는 것은 초대륙 컬럼비아의 분열과 관련한 활동을 나타낸다고 볼 수 있다. 이러한 활동기의 마그마들은 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 값이 양과 음의 값들을 다 보여주고 있다. 중국의 투먼 층군과 북한의 상원누층군, 백령층군, 그리고 경기서부 지역등의 신원생대층들의 쇄설성 저어콘들은 이처럼 초대륙 컬럼비아의 분열과 관련한 마그마작용으로 만들어진 저어콘들을 공통적으로 보여주는 것으로 해석된다.

5. 결론

대청도에 분포하는 백령층군의 규질 사암에서 분리한 쇄설성 저어콘들의 U-Pb 연령은 주로 고원생대 후기로부터 중원생대말의 구간에 집중되는 특징을 나타낸다. 하지만 남한의 경기육괴와 영남육괴 뿐만 아니라 북한의 낭림육괴 및 북중국 지괴에서 특징적인 연령 피크로 나타나는 약 1,870 Ma와 2,500 Ma의 연령들은 거의 나타나지 않는다. 이러한 연령 분포 특징은 대청도와 백령도에 분포하는 백령층군이 북한의 상원누층군의 서쪽 연장부임을 시사한다. 대청도의 사암의 최고 퇴적시기는 가장 젊은 저어콘의 연령인 약 1,026 Ma의 중원생대말 이후로, 북한 상원누층군에서 보고된 약 990 Ma의 최소연령 쇄설성 저어콘 연령을 참고할 때 신원생대의 퇴적층일 것으로 판단된다.

백령층군의 쇄설성 저어콘 U-Pb 연령분포 특성은 경기육괴 북서부 장봉층의 것과 비슷하며 함께 북중국 지괴의 신원생대층들과 대비되는 것으로 판단된다. 임진강대를 사이에 두고 북쪽과 남쪽에 나뉘어져 분포하는 백령층군과 장봉층이 모두 북중국 지괴와 대비된다는 것은 임진강대를 대륙충돌대로 보기 어려움을 시사한다.

백령층군과 함께 이와 대비되는 북한과 북중국 지괴의 여러 지역에서 산출되는 고원생대 후기로부터

중원생대말까지의 쇄설성 저어콘들의 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 값은 이 시기 동안에 일어난 초대륙 컬럼비아의 분열과 관련된 지구조환경 및 화성활동의 기록으로 해석할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)에 의하여 연구되었다. 여러 세심하고 건설적인 의견을 제시해준 심사위원들께 감사드린다.

REFERENCES

- Andersen, T., 2002, Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192, 59-79.
- BigData OpenPlatform, 2021, https://mgeo.kigam.re.kr/map/main.do?process=geology_250k (January 29, 2021).
- 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, 9-14 (in Korean with English abstract).
- Cho, K., Park, K.-H., Song, Y.-S. and Choi, J.E., 2019, Comparison of U-Pb age distribution characteristics of detrital zircons in the age-unknown Geumsusan Formation and Jangsan Formation of the Joseon Supergroup. *Economic and Environmental Geology*, 52, 49-64.
- Cho, M., Cheong, W., Ernst, W.G., Kim, Y. and Yi, K., 2020, U-Pb detrital zircon ages of Cambrian-Ordovician sandstones from the Taebaeksan Basin, Korea: Provenance variability in platform shelf sequences and paleogeographic implications. *Geological Society of America Bulletin*, doi.org/10.1130/B35521.1
- Cho, M., Kim, T., Yang, S.-Y. and Yi, K., 2017a, Paleoproterozoic to Triassic crustal evolution of the Gyeonggi Massif, Korea: Tectonic correlation with the North China craton, in Law, R.D., Thigpen, J.R., Mersch, A.J., and Stowell, H., eds., *Linkages and Feedbacks in Orogenic Systems: Geological Society of America Memoir*, 213, 165-197.
- Cho, M., Lee, Y., Kim, T., Cheong, W., Kim, Y. and Lee, S.R., 2017b, 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.-J., Kim, D.-Y., Cho, D.-L. and Kim, Y.B., 2015, Detrital zircon U-Pb ages of the metapelite on the southwestern part of the Ogcheon Belt and its stratigraphic implication. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 24, 55-63 (in Korean with English abstract).
- 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 Reviews*, 52, 175-235.
- Deng, X., Zhao, T. and Peng, T., 2016, Age and geochemistry of the early Mesoproterozoic A-type granites in the southern margin of the North China Craton: Constraints on their petrogenesis and tectonic implications. *Precambrian Research*, 283, 68-88.
- Ha, Y., Song, Y.-S. and Kim, J.-M., 2014, Gwangju Shear Zone: Is it the tectonic boundary between the Yeongnam massif and Okcheon metamorphic belt?. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 23, 17-30 (in Korean with English abstract).
- Hu, B., Zhai, M., Li, T., Li, Z., Peng, P., Guo, J. and Kusky, T.M., 2012, Mesoproterozoic magmatic events in the eastern North China Craton and their tectonic implications: Geochronological evidence from detrital zircons in the Shandong Peninsula and North Korea. *Gondwana Research*, 22, 828-842.
- Hu, G., Zhao, T. and Zhao, Y., 2014, Depositional age, provenance and tectonic setting of the Proterozoic Ruyang Group, southern margin of the North China Craton. *Precambrian Research*, 246, 296-318.
- IGSASDPRK (Institute of Geology State Academy of Sciences, DPR of Korea), 1996, *Geology of Korea*. Foreign Languages Books Publishing House, Pyongyang, 631 p.
- Kim, D.-Y., Choi, S.-J. and Yi, K., 2015, SHRIMP U-Pb zircon ages of the metapsammite in the Yeongam-Gangjin area. *Economic and Environmental Geology*, 48, 287-299 (in Korean with English abstract).
- Kim, H., Kihm, Y.H. and Kee, W.-S., 2012, Geological report of the Iri Sheet (Scale 1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 51 p.
- Kim, H.S., Hwang, M.-K., Ree, J.-H. and Yi, K., 2013, Tectonic linkage between the Korean Peninsula and mainland Asia in the Cambrian: insights from U-Pb dating of detrital zircon. *Earth and Planetary Science Letters*, 368, 204-218.
- Kim, H.S., Ree, J.-H. and Yi, K., 2017, The tectonic boundary between the Okcheon and Taebaeksan basins, South Korea: A restraining bend of a continental transform fault between the South and North China Cratons. *Island Arc*, 27, <https://doi.org/10.1111/iar.12237>.
- Kim, J.Y. and Han, S.H., 2010, Geology and stromatolite

- fossil localities of Socheon Island, Korea: and introductory review. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 31, 8-17 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.C., Yang, J.H., Peng, P., Zhai, M.G., Park, H.U., Feng, I.J., Ri, C.I. and Ju, S.H., 2016, Characteristics of carbon isotope of the Ediacaran and Lower Cambrian strata in the Pyongnam basin, DPR Korea. *Acta Petrologica Sinica*, 32, 3180-3186.
- Kim, M.J., Park, J.-W., Lee, T.-H., Song, Y.-S. and Park, K.-H., 2016, LA-MC-ICPMS U-Pb Ages of the Detrital Zircons from the Baengnyeong Group: Implications of the Dominance of the Mesoproterozoic Zircons. *Economic and Environmental Geology*, 49, 433-444 (in Korean with English abstract).
- Kim, N., Cheong, C.-S., Park, K.-H., Kim, J. and Song, Y.-S., 2012, Crustal evolution of northeastern Yeongnam Massif, Korea, revealed by SHRIMP U-Pb zircon geochronology and geochemistry. *Gondwana Research*, 21, 865-875.
- Kim, S.W., Kee, W.S., Santosh, M., Cho, D.-L., Hong, P.S., Ko, K., Lee, B.C., Byun, U.H. and Jang, Y., 2020, Tracing the Precambrian tectonic history of East Asia from Neoproterozoic sedimentation and magmatism in the Korean Peninsula. *Earth-Science Reviews*, 209, 103311.
- Kim, S.W., Kwon, S., Santosh, M., Cho, D.-L., Kee, W.-S., Lee, S.-B., Jeong, Y.-J., 2019, Detrital zircon U-Pb and Hf isotope characteristics of the Early Neoproterozoic successions in the central-western Korean Peninsula: Implication for the Precambrian tectonic history of East Asia. *Precambrian Research*, 322, 24-41.
- Lee, B.C., Oh, C.W., Cho, D.-L. and Yi, K., 2019, Paleoproterozoic (2.0-1.97 Ga) subduction-related magmatism on the north-central margin of the Yeongnam Massif, Korean Peninsula, and its tectonic implications for reconstruction of the Columbia supercontinent. *Gondwana Research*, 72, 34-53.
- Lee, H.Y., 1995, Petrochemical study on the mantle xenoliths in alkali basalts from S. Korea: P-T regime of upper mantle. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 4, 104-123.
- Lee, T.-H., Park, K.-H. and Yi, K., 2018, Nature and evolution of the Cretaceous basins in the eastern margin of Eurasia: A case study of the Gyeongsang Basin, SE Korea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 166, 19-31.
- Lee, Y., Cho, M. and Yi, K., 2017, *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.
- Lee, Y.I., Choi, T. and Orihashi, Y., 2011, LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the Precambrian Yuli Group. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 81-87 (in Korean).
- Lee, Y.I., Choi, T., Lim, H.S. and Orihashi, Y., 2012, Detrital zircon U-Pb ages of the Jangsan Formation in the northeastern Okcheon belt, Korea and its implications for material source, provenance, and tectonic setting. *Sedimentary Geology*, 282, 256-267.
- Lee, Y.I., Choi, T., Lim, H.S. and Orihashi, Y., 2016, Detrital zircon geochronology and Nd isotope geochemistry of the basal succession of the Taebaeksan Basin, South Korea: implications for the Gondwana linkage of the Sino-Korean (North China) block during the Neoproterozoic - early Cambrian. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 441, 770-786.
- Lee, Y.I., Lim, H.S., Choi, T. and Orihashi, Y., 2010, Detrital zircon U-Pb ages of the late Paleozoic Sadong Formation in the Pyeongchang coalfield, Gangweon-do Province, Korea: implications for depositional age and provenance. *Journal of the Geological Society of Korea*, 46, 73-81 (in Korean).
- Li, Y., Peng, P., Wang, X. and Wang, H., 2015, Nature of 1800-1600 Ma mafic dyke swarms in the North China Craton: Implications for the rejuvenation of the sub-continental lithospheric mantle. *Precambrian Research*, 257, 114-123.
- Li, Z.X., Bogdanova, S.V., Collins, A.S., Davidson, A., De Waele, B., Ernst, R.E., Fitzsimons, I.C.W., Fuck, R.A., Gladkochub, D.P., Jacobs, J., Karlstrom, K.E., Lu, S., Natapov, L.M., Pease, V., Pisarevsky, S.A., Thrane, K. and Vernikovsky, V., 2008, Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis. *Precambrian Research*, 160, 179-210.
- Lim, S.-B., Choi, H.I., Kim, B.C. and Kim, J.C., 1999, Depositional systems of the sedimentary basins (I): depositional systems and their evolution of the Proterozoic Paegryeong Group and Tae'an Formation. KIGAM Report, MOST, 116 p (in Korean with English abstract).
- Liu, X., 1993, High-P metamorphic belt in central China and its possible eastward extension to Korea. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 2, 9-18.
- Ludwig, K.R., 2008, User's manual for Isoplot 3.6: a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4, 71.
- McKenzie, N.R., Hughes, N.C., Myrow, P.M., Choi, D.K. and Park, T.-Y., 2011, Trilobites and zircons link north China with the eastern Himalaya during the Cambrian. *Geology*, 39, 591-594.
- Oh, C.W., Krishnan, S., Kim, S.W. and Kwon, Y.W., 2006, Mangerite magmatism associated with a probable Late-Permian to Triassic Hongseong-Odesan collision belt in South Korea. *Gondwana Research*, 9, 95-105.

- 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*, 326, 344-362.
- Park, H.U., Zhai, M.G., Yang, J.H., Peng, P., Kim, J.N., Zhang, J.B., Kim, M.C., Park, U. and Feng, L.J., 2016, Deposition age of the Sangwon Supergroup in the Pyeongnam basin (Korea) and the Early Tonian negative carbon isotope interval *Acta Petrologica Sinica*, 32, 2181-2195.
- Park, K.-H., Lee, T.-H. and Yi, K., 2011, SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons in the Daehyangsan Quartzite of the Okcheon Metamorphic Belt, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 423-431 (in Korean with English abstract).
- Park, K.-H., Park, J.-B., Cheong, C.-S. and Oh, C.W., 2005, Sr, Nd and Pb Isotopic Systematics of the Cenozoic Basalts of the Korean Peninsula and Their Implications for the Permo-Triassic Continental Collision Boundary, *Gondwana Research*, 8, 528-538.
- Paton, C., Hellstrom, J., Paul, B., Woodhead, J. and Hergt, J., 2011, Iolite: freeware for the visualization and processing of mass spectrometric data. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26, 2508-2518.
- Paton, C., Woodhead, J.D., Hellstrom, J.C., Hergt, J.M., Greig, A. and Maas, R., 2010, Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 11, Q0AA06.
- Peng, P., Zhai, M., Li, Q., Wu, F., Hou, Q., Li, Z., Li, T. and Zhang, Y., 2011, Neoproterozoic (~900 Ma) Sariwon sills in North Korea: geochronology, geochemistry and implications for the evolution of the south-eastern margin of the North China Craton. *Gondwana Research*, 20, 243-254.
- Ree, J.-H., Cho, M., Kwon, S.-Ta. and Nakamura, E., 1996, *Geology*, 24, 1071-1074, Possible eastward extension of Chinese collision belt in South Korea: the Imjingang belt. *Geology*, 24, 1071-1074.
- Roberts, N.M.W. and Spencer, C.J., 2014, The zircon archive of continent formation through time. *Geological Society, London, Special Publications*, 389, 197-225.
- Song, Y.-S., Park, K.-H., Lee, H.-S., Cao, L. and Orihashi, Y., 2009, LA-ICP-MS U-Pb zircon age of the granite gneiss from Jeungsan-Pyeongwon area of North Korea. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 18, 171-179 (in Korean with English abstract).
- Song, Y.-S., Park, K.-H., Seo, J.-H., Jo, H.J., 2011, SHRIMP Zircon Ages of the Basement Gneiss Complex in the Pyeongchang-Wonju Area, Gyeonggi Massif, Korea. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 20, 99-114 (in Korean with English abstract).
- van de Fliedert, T., Goldstein, S.L., Hemming, S.R., Roy, M., Frank, M. and Halliday, A.N., 2007, Global neodymium-hafnium isotope systematics - revisited. *Earth and Planetary Science Letters*, 259, 432-441.
- Wan, Y., Liu, D., Wang, W., Song, T., Kröner, A., Dong, C., Zhou, H. and Yin, X., 2011, Provenance of Mesoproterozoic cover sediments at the Ming Tombs, Beijing, North China Craton: An integrated study of U-Pb dating and Hf isotopic measurement of detrital zircons and whole-rock geochemistry. *Gondwana Research*, 20, 219-242.
- Wang, Y., Zhang, F., Fan, W., Zhang, G., Chen, S., Cawood, P.A. and Zhang, A., 2010, Tectonic setting of the South China Block in the early Paleozoic: Resolving intracontinental and ocean closure models from detrital zircon U-Pb geochronology. *Tectonics*, 29, TC6020, <https://doi.org/10.1029/2010TC002750>.
- Wiedenbeck, M., Allé, P., Corfu, F., Griffin, W.L., Meier, M., Oberli, F., von Quadt, A., Roddick, J.C. and Spiegel, W., 1995, Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter* 19, 1-23.
- Wu, F.-Y., Yang, J.-H., Wilde, S.A., Liu, X.-M., Guo, J.-H. and Zhai, M.-G., 2007, Detrital ircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the crustal evolution of North Korea. *Precambrian Research*, 159, 155-177.
- Yang, D.-B., Xu, W.-L., Xu, Y.-G., Wang, Q.-H., Pei, F.-P. and Wang, F., 2012, U-Pb ages and Hf isotope data from detrital zircons in the Neoproterozoic sandstones of northern Jiangsu and southern Liaoning Provinces, China: Implications for the Late Precambrian evolution of the southeastern North China Craton. *Precambrian Research*, 216-219, 162-176.
- Yao, J., Shu, L., Santosh, M., 2011, Detrital zircon U-Pb geochronology, Hf-isotopes and geochemistry-New clues for the Precambrian crustal evolution of Cathaysia Block, South China. *Gondwana Research*, 20, 553-567.
- Zhai, M., Hu, B., Zhao, T., Peng, P. and Meng, Q., 2015, Late Paleoproterozoic-Neoproterozoic multi-rifting events in the North China Craton and their geological significance: A study advance and review. *Tectonophysics*, 662, 153-166.
- Zhang, S.-H., Zhao, Y., Li, X.-H., Ernast, R.E. and Yang, Z.-Y., 2017, The 1.33-1.30 Ga Yanliao large igneous province in the North China Craton: Implications for reconstruction of the Nuna (Columbia) supercontinent, and specifically with the North Australian Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 465, 112-125.
- Zhang, S.-H., Zhao, Y. and Santosh, M., 2012, Mid-

- Mesoproterozoic bimodal magmatic rocks in the northern North China Craton: Implications for magmatism related to breakup of the Columbia supercontinent. *Precambrian Research*, 222-223, 339-367.
- Zhao, G., Cao, L., Wilde, S.A., Sun, M., Choe, W.J. and Li, S., 2006, Implications based on the first SHRIMP U-Pb zircon dating on Precambrian granitoid rocks in North Korea. *Earth and Planetary Science Letters*, 251, 365-379.
- Zhao, G., Sun, M., Wilde, S.A. and Li, S., 2003, Assembly, accretion and breakup of Paleo-Mesoproterozoic Columbia Supercontinent: records in the North China Craton. *Gondwana Research*, 6, 417-434.
-
- Received : February 1, 2021
Revised : February 22, 2021
Accepted : February 23, 2021