

각섬암상 변성작용 중 갈렘석과 저어콘의 평형 성장

김윤섭*

충북대학교 지구환경과학과

Equilibrium Growth of Allanite and Zircon during Amphibolite-facies Metamorphism

Yoonsup Kim*

Department of Earth & Environmental Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

요약: 한반도 중서부 서해 연안 대이작도에 산출하는 토날라이트질 편마암 시료(DE43)의 저어콘 결정에서 U-Pb 동위원소 및 희토류 원소 성분을 이차이온질량분석기를 이용하여 측정하였다. 최대 ~300 μm 크기의 저어콘 결정들은 드물게 과성장 띠를 가진다. 고원생대 연령을 가지는 중심부와 달리 저어콘의 과성장 띠로부터 분석한 두 개의 점 분석에서 256±23 Ma (1σ), and 221±7 Ma (1σ)의 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 연령을 구하였다. 이 과성장 띠들은 낮은 Th/U 비(<0.01)와 경희토류 원소가 강하게 결핍된 지화학적 특징을 보인다. 이 저어콘의 페름기-트라이아스기 겹보기 연령은 동일한 시료에서 분석한 갈렘석 ²⁰⁸Pb/²³²Th 연령(227±7 Ma (tσ))과 오차범위 내에서 일치하며, 갈렘석과 저어콘이 ~227 Ma 때 평형 성장하였음을 지시한다. 한편, 동일한 시료에서 측정된 보다 더 젊은 갈렘석 ²⁰⁸Pb/²³²Th 연령과 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 연령(각각 213±4 Ma (tσ)와 186±9 Ma (tσ))은 주변에 산출하는 후기 트라이아스기 및 쥐라기 화강암의 관입에 수반된 알칼리성 유체 유입에 의한 Pb 손실에 기인한 것으로 보인다.

핵심어: 갈렘석, 저어콘, 평형 성장, U-Th-Pb 연령, 희토류원소 패턴, 토날라이트질 편마암

Abstract: The U-Pb isotopic and rare earth element compositions of zircon were measured using a SHRIMP from a tonalitic gneiss sample DE43 in Daeijak Island, central Korea. Zircon crystals, up to ~300 μm in diameter, rarely contain thin overgrowth rims. In contrast to Paleoproterozoic cores, the ²⁰⁶Pb/²³⁸U ages of 256±23 Ma (1σ), and 221±7 Ma (1σ) were yielded from two spot analyses on the overgrowth rims of zircon. The rims are geochemically characterized by low Th/U ratios (<0.01) and strongly depleted light rare earth elements. The Permian-Triassic apparent ages of zircon are consistent with the ²⁰⁸Pb/²³²Th ages dated from allanite (227±7 Ma (tσ)) in the same sample within uncertainties, indicating an equilibrium growth of allanite and zircon at ~227 Ma. On the other hand, the younger ²⁰⁸Pb/²³²Th and ²⁰⁶Pb/²³⁸U ages (213±4 Ma (tσ) and 186±9 Ma (tσ), respectively) of allanite may result from Pb loss due to the infiltration of alkali fluids from Late Triassic and Jurassic granitoids nearby.

Keywords: allanite, zircon, equilibrium growth, U-Th-Pb age, REE pattern, tonalitic gneiss

서론

갈렘석(allanite, CaREEAl₂Fe²⁺Si₃O₁₂(OH))은 녹염석의 일종으로 높은 희토류원소(rare earth element)

함량과 함께 소량의 Sr, Th(1,000-16,000 ppm), U(Th 함량의 약 10%)을 함유하고 있어 연령지시광물로 잠재력이 높은 부수광물이다(Giere and Sorensen, 2004; Engi, 2017). 갈렘석의 높은 보통 Pb(common Pb) 함량은 그 유용성을 제약해왔지만(Gabudianu Radulescu *et al.*, 2009; Gregory *et al.*, 2012), 새로운 분석법 및 보정법의 발달에 따라 갈렘석의 지구

*Corresponding author
 Tel: +82-43-261-2731
 E-mail: yoonsup@cgnu.ac.kr

연대학적 활용이 점차 확대되고 있다(Oberli *et al.*, 2004; Gregory *et al.*, 2007, 2012; Smye *et al.*, 2014; Janots and Rubatto, 2014; Korh, 2014; McFarlane, 2016). 갈륨석의 산출은 Ca 함량이 높은 화성암, 고철질 모암의 변성암 및 변성이질암에서 흔히 보고된다(Giere and Sorensen, 2004; Engi, 2017). 특히, Ca 함량이 높은 마그마와 고철질 모암의 변성암에서 산출하는 갈륨석은 전암 경회토류원소 함량의 90 wt.% 이상을 차지하기 때문에 이들 암석 내에서 희토류원소의 주요 저장소 역할을 한다(Hermann, 2002; Oberli *et al.*, 2004). 또한 예클로자이트에서 산출하는 갈륨석은 사장석이 녹회석으로 치환되는 과정에서 방출하는 Sr을 흡수하여 상대적으로 높은 Sr 농도를 가진다(Rubatto *et al.*, 2008; Cenko Tok *et al.*, 2011). 변성이질암에서 갈륨석의 성장은 쇄설성 모나자이트를 치환하며 상대적으로 저변성대에서 이루어진다(e.g., Wing *et al.*, 2003; Janots *et al.*, 2008, Kim *et al.*, 2009a). 이러한 갈륨석의 광물공생적 특성과 함께 갈륨석 내 U-Th-Pb 동위원소계의 상대적으로 높은 폐쇄온도(~750°C로 추정; Oberli *et al.*, 2004)는 다른 연령지시광물들의 성장이 제한되는 저변성 영역의 전진변성작용의 시기를 밝히는데 유용하다. 또한, 동일한 시료에서 저어콘, 모나자이트, 티타나이트 등의 연령이 함께 가용한 경우 이들 연령과의 비교 활용을 통해 마그마 진화 및 조산 운동의 속도 등의 계산이 가능해, 지질학적 현상을 보다 정량적으로 이해할 수 있다(e.g., Janots *et al.*, 2008, 2009; Rubatto *et al.*, 2009; Gregory *et al.*, 2012; Steck *et al.*, 2013).

갈륨석이 갖는 광물공생적 장점에도 불구하고 갈륨석의 결정학적 및 U-Th-Pb 동위원소계의 근원적 문제로 인해 갈륨석 Th-Pb와 U-Pb 연령 사이에 불일치도가 높아 연령 해석에 주의가 필요하다(Engi, 2017). 높은 보통 Pb의 함량과 함께 α -입자 방사(radiation)의 결과인 결합붕괴(recoiling)로 인한 갈륨석의 비정질화는 연령지시광물로서 가장 큰 결정학적 문제점이다(Meldrum *et al.*, 1998; Smye *et al.*, 2014). 이러한 결정학적 단점과 반대로 비정질 갈륨석의 재결정화(annealing)는 다른 광물들에 비해 상대적으로 천천히 일어나는데(Gieré and Sorensen 2004), 이로 인해 결정질 갈륨석의 경우에도 다른 연령지시광물에 비해 젊은 연령을 나타낼 수 있다(e.g., Catlos *et al.*, 2000). 그 외에도 모나자이트 등 기존

연령지시광물을 치환하는 과정에서 이들의 Pb 동위원소 비가 부분적으로 갈륨석에 전이될 수 있으며(e.g., Romer and Siegesmund, 2003; Romer and Xiao, 2005; Romer and Rötzler, 2011), 이러한 경우 보통 Pb의 비가 Pb 진화 곡선 상의 비와 현격한 차이를 나타낸다(e.g., Gabudianu Radulescu *et al.*, 2009). 따라서, 갈륨석 연령을 정확히 해석하기 위해서는 이러한 갈륨석 연령의 복잡성을 우선적으로 이해해야 한다.

한반도에서 갈륨석 연령은 옥천변성대 충주 지역 변성퇴적암, 경기육괴 서해안 연안 대이작도 토날라이트질 편마암, 경기육괴 북동부 화천 백립암에서 보고되었다(Suzuki *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2009b; Yi and Cho, 2009; Cheong *et al.*, 2015). 갈륨석 화학연령(chemical age)을 보고한 연구를 제외하면(Suzuki *et al.*, 2006), Th-Pb과 U-Pb 동위원소 연령을 보고한 나머지 연구에서 모두 Th-Pb 연령의 분산이나 두 동위원소계 사이의 불일치성이 나타난다. 이번 연구에서는 대이작도 토날라이트질 편마암에서 갈륨석과 함께 산출하는 저어콘의 과성장 띠의 연령과 희토류 원소 농도를 측정하여, 이들로부터 갈륨석의 성장과 관련한 지질학적 의미를 살펴본다.

연구 지역의 지질 및 갈륨석 연령

대이작도는 한반도 중부 서해안 연안에 자리잡고 있는 도서로 지질학적으로 임진강대와 경기육괴와 인접해 있다. 대이작도와 인접한 소이작도에는 후기 시생대(~2.58 Ga)에 관입한 토날라이트가 산출하며, 이 암석은 시생대(~2.51 Ga)와 트리아스기(~230 Ma)에 변성작용을 경험하였다(Cho *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2009b). 중립-조립질 토날라이트질 편마암은 각섬석 등 유색광물의 정향 배열에 의해 대략적으로 남-북 방향의 엽리가 발달해 있다(Cho and Lee, 2016). 이들 선캠브리아기 기반암 이외에도 연구지역에는 토날라이트질 편마암에 전위된 블록으로 산출하는 고원생대 각섬암, 트리아스기 화강암체 및 이를 피복하고 있는 쥐라기 대동층군 퇴적암과 쥐라기 흑운모 화강암이 분포한다(Cho and Lee, 2016). 트리아스기 화강암체는 반상흑운모화강암, 흑운모화강암 및 반화강암으로 세분되며 인근 도서 지역에서 산출하는 시료의 저어콘 U-Pb 연령으로부터 이들 암체의 관입 시기는 각각 ~218 Ma, ~223-224 Ma, ~223 Ma로 추

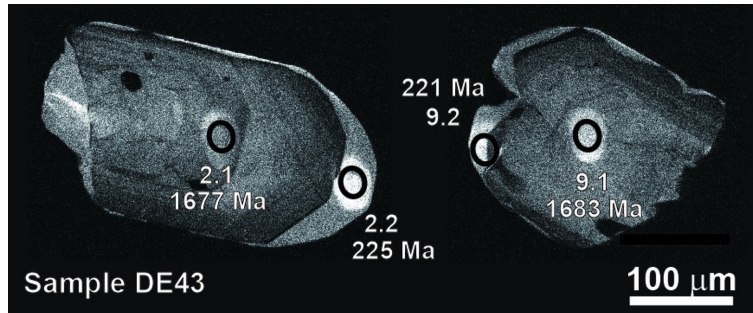


Fig. 1. Cathodoluminescence images of two zircon crystals from a tonalitic gneiss sample (DE43) with thin overgrowth rim. Black ellipses represent analytical spots.

정하였다(Cho and Lee, 2016).

대이작도에서 보고된 갈륨석 U-Th-Pb 연령은 2개의 토날라이트질 편마암 시료로부터 측정하였다(Kim *et al.*, 2009b). Kim *et al.* (2009b)가 보고한 첫 번째 시료(DE28)의 갈륨석 U-Th-Pb 성분은 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 연령과 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연령 사이에 비교적 일치도가 높으며, 두 그룹의 갈륨석 Th-Pb 평균연령(~ 229 Ma와 ~ 215 Ma)을 정의한다. 이와 달리 두 번째 시료(DE43)에서는 갈륨석 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 연령과 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연령 사이의 일치도가 현저히 떨어지며, 이 시료의 갈륨석 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 연령이 첫 번째 시료(DE28)과 유사한 평균연령(~ 227 Ma와 ~ 213 Ma)을 나타내는 반면 갈륨석 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 가중평균연령은 185.6 ± 9.0 Ma (σ , MSWD=2.7)로 쥐라기 연령을 보여준다. Kim *et al.* (2009b)는 트라이아스기를 나타내는 두 연령의 지질학적 의미를 명확히 구분하지는 못했지만, 엽리에서 흔히 발견되는 갈륨석의 산출 양상과 한반도에 광범위한 트라이아스기 변성작용을 근거로 이 갈륨석 Th-Pb 연령을 변성작용의 시기로 해석하였고, 쥐라기를 나타내는 U-Pb 연령을 변성작용 후 냉각의 마지막 단계로 해석하였다.

시료 기재 및 저어콘 내부 구조

토날라이트질 편마암 시료(DE43)에서 저어콘 결정체를 분리하였다. 이 시료는 갈륨석의 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 와 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 동위원소 연령이 높은 불일치도를 보이는 시료이며, 갈륨석 연령을 측정한 동일한 시료로부터 저어콘 결정을 분리하였다(Kim *et al.*, 2009b). 각섬석과 흑운모로 구성된 이 시료의 엽리에는 킹크 밴드와 미흡곡이 이들 광물의 벽개면에 수직인 습곡 축을

가지며 발달하고, 기질을 구성하는 주요 광물조합은 올리고클레이스 성분의 사정석과 석영이다. 갈륨석 결정의 외연부는 클리노조이사이트에 의해 피복되어 있으며, 인회석, 티탄철석, 자철석 및 저어콘과 함께 산출한다(Kim *et al.*, 2009b). 갈륨석 내부에는 매우 작은 토라이트(ThSiO_4)와 모나자이트 포유물과 함께 작은 맥 형태를 띠는 Ce 산화물들이 존재한다(Kim *et al.*, 2009b).

이 시료에서 채취한 저어콘 결정의 장축 길이는 $\sim 100\text{-}300$ μm 이며, 대부분 자형-반자형의 결정형을 나타낸다(Fig. 1). 저어콘 결정의 내부는 동심원 형태의 약한 진동누대 구조를 나타내며, 일부 저어콘 결정은 밝은 음극선발광영상으로 구분되는 과성장 띠가 관찰된다(Fig. 1). 대부분의 과성장 띠는 ~ 5 μm 정도의 폭을 가지며 성장하지만, 두 개의 결정에서 점 분석이 가능한 폭의 과성장 띠가 관찰되었다.

분석 방법 및 결과

분석 시료를 우선 유압과쇄기와 진동컵분쇄기를 이용하여 분말로 만든 후 ~ 230 μm 이하의 광물입자에 대해 물과 중액, 자성분리 및 수작업을 거쳐 저어콘 결정들을 추출하였다(e.g., Cheong *et al.*, 2013). 분리된 저어콘 입자들을 표준시료와 함께 에폭시마운트에 시료별로 고정시킨 후, 저어콘 입자가 절반 정도 드러날 때까지 연마하였다. U 농도를 측정하기 위하여 SL13 저어콘 표준시료를 사용하였고(238 ppm U; Claoué-Long *et al.*, 1995), U-Pb 동위원소 조성은 미국 미네소타주에 산출하는 둘루스 복합체(Duluth Complex)의 FC1 저어콘 표준시료를 사용하여 검정선을 수립하였다($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}=0.1859$; Paces and Miller,

1993). 희토류 원소 농도 측정을 위한 표준시료로는 미국 국가표준물질연구소 SRM611 유리질 비드를 이용하였다. 연마된 저어콘 입자들의 내부 조직 관찰을 위한 후방산란전자영상 및 음극선발광영상은 한국기초과학지원연구원 오창 캠퍼스에 설치된 주사전자현미경(SEM; JEOL-6610LV)을 이용하여 촬영하였다. 저어콘 U-Pb 동위원소 조성과 희토류원소 농도는 한국기초과학지원연구원 오창 캠퍼스에 설치되어 있는 고분해능 이차이온질량분석기(SHRIMP-IIe) 장비를 이용하여 분석하였다.

저어콘의 U-Th-Pb 동위원소 및 희토류 원소 분석을 위하여 O_2^- 일차이온 빔을 사용하였고, 빔의 크기와 전류는 각각 $\sim 20 \mu m$ 및 $\sim 3 nA$ 였다. 이차이온들의 세기는 전자 증배관을 이용하여 측정하였고, 산화체 혹은 수화체 형태의 분자 이온들에 의한 질량 간섭(mass interference)을 제거하기 위해 $\sim 5,000$ 의 질량 분해능(mass resolution)을 이용하였다. 연령측정을 위한 검정선 수립은 Williams (1998)에 제시된 방법에 따라 수행하였고, 분석한 저어콘의 U-Th-Pb 동위원소비는 PRAWN/LEAD 6.5.5 프로그램(T. R. Ireland, written communication, 1996)을 사용하여 계산하였다. 보통 Pb의 보정은 보통 Pb 모델 성분을 이용하여 실시하였으며(Cumming and Richard, 1975), 1200 Ma 보다 오래된 저어콘에 대해서는 ^{204}Pb 보정법을, 이보다 젊은 저어콘은 ^{207}Pb 보정법을 적용하였다(Williams, 1998). 불확실도(uncertainty) 계산에는 계측통계학적(counting statistics) 오차, 배경값에 기인한 오차와 함께 표준시료의 검정선 수립에서 발생한 오차($\pm 0.5\%$)를 반영하였다(Table 1). 저어콘의 희토류 원소 농도는 U-Pb 연령 측정을 실시한 이후 동일한 점 분석 위치에 재실시하였다. 저어콘과 SRM611 유리질 비드로부터 Zr^+ 이온의 세기를 측정하여 분배 계수를 계산하였고 이를 이용하여 두 물질 간 기질효과를 보정하여 희토류 원소의 농도를 측정하였다(Table 2). 저어콘 희토류 원소의 측정법 및 보정법은 Hoskin (1998)의 방법을 따랐다.

고분해능 이차이온질량분석기를 이용하여 측정할 수 있는 폭의 과성장 띠를 가지고 있는 2개의 저어콘 결정의 중심부에서 측정된 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 연령은 1.68 Ga로 고원생대의 연령을 보여주고 있다(Table 1; Fig. 2a). 저어콘 결정의 중심부에서 측정된 Th/U 비는 ~ 0.3 이고(Table 1), 콘드라이트 값으로 표준화한 희토류 원소 패턴은 결핍된 경희토류 원소와 부화된

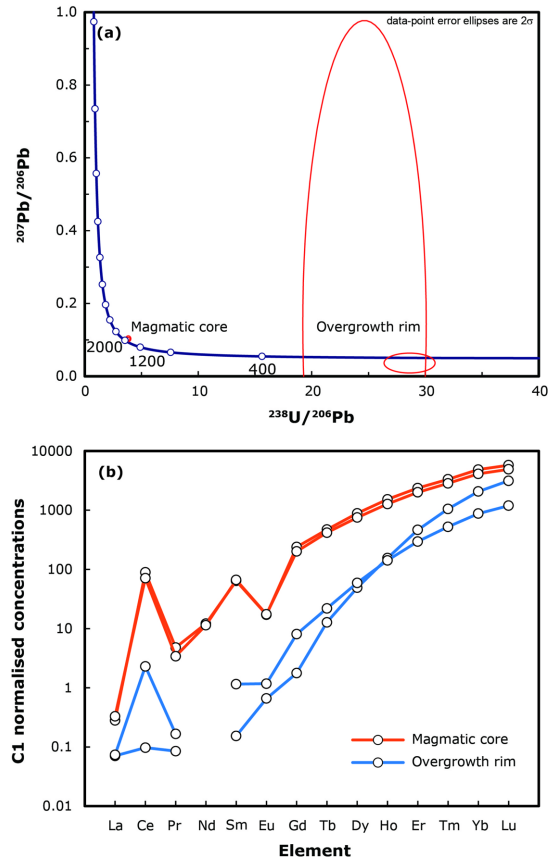


Fig. 2. The U-Pb and REE compositions of zircon from sample DE43. (a) Tera-Wasserburg concordia diagram showing four SHRIMP spot dates of zircon. (b) Chondrite-normalized REE patterns of four spot data of zircon.

중희토류 원소와 함께 Ce의 양의 이상치와 Eu 음의 이상치를 보여준다(Fig. 2b). 이와 달리 2개의 저어콘 결정의 과성장 띠로부터 측정된 $^{206}Pb/^{238}U$ 겉보기 연령은 $256 \pm 23 Ma (1\sigma)$ 와 $221 \pm 7 Ma (1\sigma)$ 으로 다소간의 연령 차이를 보인다(Table 1; Fig. 2a). 첫 번째 겉보기 연령은 상대적으로 보통 Pb이 결핍되어 있고 (-8.40%) $^{207}Pb/^{206}Pb$ 연령과 $^{206}Pb/^{238}U$ 연령 간 불일치도가 높다(88.7%). 두 번째 겉보기 연령은 상대적으로 보통 ^{206}Pb 의 함량이 낮지만(0.32%) $^{207}Pb/^{206}Pb$ 연령이 등시선 아래에 위치해 있어 $^{206}Pb/^{238}U$ 연령과의 일치도를 계산할 수 없다. 저어콘의 과성장 띠에서 분석한 2개의 점 분석은 모두 매우 낮은 Th/U 비와 함께 매우 낮은 경희토류 원소 농도를 보인다(Tables 1 and 2). 콘드라이트로 표준화한 희토류 원소

Table 1. U-Th-Pb isotope compositions of zircon

Label	U	Th	Th/U	²⁰⁶ Pb (%)	Common				Apparent age (Ma)				Concordance (%)
					²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb*	²⁰⁸ Pb*/ ²⁰⁶ Pb*	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U	²⁰⁹ Pb*/ ²³² Th	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		
Sample DE43													
2.1	126	136	0.34	0.02	0.10288±152	0.3267±93	0.26232±532	0.07909±286	1677±28	1502±27	1538±54	89.6	
2.2	12	0	0.00	-8.40	0.14370±34053	0.2668±343	0.04058±366	4.09436±1.16258	2272±2272	256±23	32908±5234	11.3	
9.1	75	24	0.32	-0.23	0.10322±318	0.3289±35	0.26031±613	0.08289±284	1683±58	1491±31	1610±53	88.6	
9.2	102	0	0.00	0.32	0.03647±1114	0.0035±80	0.03494±112	0.00852±1948	-	221±7	172±387	-	

All the isotopic compositions were calculated on the basis of the combination of ²⁰⁴Pb (>1,200Ma) and ²⁰⁷Pb (<1,200Ma) correction methods except for the ²⁰⁷Pb*/²⁰⁶Pb ratios corrected by ²⁰⁴Pb.

Table 2. Rare earth elements concentrations (ppm) of zircon

Label	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Sample DE43														
2.1	0.07	54	0.44	5.5	9.3	0.97	47	17	217	83	376	82	773	141
2.2	0.02	0.06	0.01	-	0.02	0.04	0.35	0.46	12	8.5	74	26	330	77
9.1	0.08	44	0.32	5.2	9.7	0.98	40	15	184	69	319	70	655	120
9.2	0.02	1	0.02	-	0	0.1	2	1	15	8	47	13	140	29

- : below the detection limit.

패턴은 중심부에 비해 Ce를 포함한 경희토류 원소가 매우 결핍된 형태를 보이며 중희토류 원소에서 상대적으로 높은 기율을 나타낸다(Fig. 2b).

토의 및 결론

대이자도 토날라이트질 편마암 시료(DE43)에서 산출하는 저어콘의 중심부에서 측정된 두 개의 점 분석 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 겉보기 연령은 ~ 1.68 Ga로 고원생대 모마그마의 정치시기로 해석할 수 있다. 이와 달리 과성장 띠로부터 측정된 2개의 점 분석 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 겉보기 연령 (256 ± 23 Ma (1σ), 221 ± 7 Ma (1σ))은 후기 페름기-후기 트라이아스기의 연령을 나타낸다. 이 중 첫 번째 점 분석의 보통 ^{206}Pb 함량이 음수로, 즉 방사성 기원의 Pb의 결핍을 의미하지만, 이는 저어콘 과성장 띠에서 방사성 기원의 Pb 손실에 기인하기 보다는 낮은 U (12 ppm)과 Th (<1 ppm) 함량에 따른 매우 낮은 방사성 기원의 ^{206}Pb 농도에 따른 분석 분해능에 의한 것으로 해석된다. 두 번째 겉보기 연령은 상대적으로 높은 U 함량(~ 100 ppm)으로 인해 보통 ^{206}Pb 의 함량이 낮고, 약간의 보통 Pb 과보정으로 인해 연령이 등시선 아래에 위치한 것으로 판단된다. 따라서, 이들 과성장 띠의 결정화가 대략적으로 후기 페름기-후기 트라이아스기 사이에 일어난 것으로 해석할 수 있고, 이 연령은 동일한 시료에서 측정된 갈렘석의 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 연령 (227.1 ± 7.2 Ma (1σ)와 213.2 ± 4.1 Ma (1σ)) 중 후기 트라이아스기의 초반에 해당하는 첫 번째 연령과 오차범위에서 일치한다(Table 1; Kim *et al.*, 2009b).

저어콘 중심부에서 분석한 점 분석의 콘드라이트로 표준화한 희토류 원소 패턴은 Eu 음의 이상치, 중희토류 원소의 부화로 대표되는 화강암질 마그마로부터 정출된 저어콘의 특징을 잘 보여준다(Fig. 2b; Hoskin and Schaltegger, 2003; Rubatto, 2017). 이와 달리 과성장 띠에서 나타나는 콘드라이트로 표준화한 희토류 원소 패턴은 경희토류 원소가 심하게 결핍되어 있고, 중희토류 원소의 함량이 증가하는 형태를 보여준다(Fig. 2b). 이러한 형태는 각섬암상에 해당하는 변성작용 중 성장하는 저어콘의 특징에 해당하며, 저어콘 과성장 띠에서 관찰되는 상대적으로 낮은 Th/U 비와 함께 저어콘이 성장하는 과정에서 경희토류 원소 분배계수가 높은 광물, 즉 갈렘석과 평형을 이루었음을 혹은 공존했음을 뒷받침한다(e.g., Rubatto *et*

al., 2009). 이와 함께 주엽리에 따라 분포하는 갈렘석의 산출상태로부터 대이자도 토날라이트질 편마암 갈렘석에서 측정된 ~ 227 Ma는 각섬암상의 광역변성 작용 시기를 대표할 수 있다.

대이자도 토날라이트질 편마암 시료(DE43)에서 측정된 두 번째 갈렘석 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 연령 (213.2 ± 4.1 Ma (1σ))과 최후 냉각 시기로 해석된 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 가중평균 연령 (185.6 ± 9.0 Ma (1σ), MSWD=2.7)을 뒷받침하는 연령을 저어콘 과성장 띠로부터 측정할 수 없었다. 이들 갈렘석 결정의 내부에는 매우 작은 토라이트와 모나자이트 포유물과 함께 Ce 산화물로 이루어진 맥이 관찰된다(Kim *et al.*, 2009b). 유체성분과 갈렘석의 용해도에 대한 구체적인 연구 결과는 없지만, 이러한 내부 조직은 모나자이트, 제노타임(xenotime), 인회석 등 인산염 광물에서 흔히 나타나는 유체에 의한 용해와 재침전(dissolution-reprecipitation) 과정과 매우 흡사하다(e.g., Hetherington *et al.*, 2010; Budzyń *et al.*, 2011; Harlov *et al.*, 2011; Seydoux-Guillaume *et al.*, 2012). 따라서, 갈렘석 내부의 조직은 유체에 의해 갈렘석이 일부 용해되고, 이 때 추출된 희토류 원소와 Th이 모나자이트, 토라이트 미결정과 Ce 산화물의 형태로 재침전된 것으로 해석된다. 대이자도와 주변 도서에서 최근 트라이아스기와 쥐라기 화강암들의 관입이 계속해서 보고되고 있다(Cho and Lee, 2016). 따라서, 앞에서 언급된 갈렘석의 ~ 213 Ma 트라이아스 연령과 및 ~ 186 Ma 쥐라기 연령은 이들 화강암의 관입과 이에 따른 알칼리성 유체의 의해 용해와 재침전 작용 중 방사성 기원 Pb의 일부 혹은 전체 손실에 의한 것으로 해석된다.

사 사

심사를 맡아주신 이승구 박사님과 익명의 심사자에게 감사드립니다. 이 논문은 2017년도 충북대학교 연구년제 연구역량 지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

- Budzyń, B., Harlov, D.E., Williams, M.L. and Jercinovic, M.J., 2011, Experimental determination of stability relations between monazite, fluoapatite, allanite, and REE-epidote as a function of pressure, temperature, and fluid compositions. *American Mineralogist*, 96, 1547-1567.

- Catlos, E.J., Sorensen, S.S. and Harrison, T.M., 2000, Th-Pb ion microprobe dating of allanite. *American Mineralogist*, 85, 633-648.
- Cenki Tok, B., Oliot, E., Rubatto, D., Berger, A., Engi, M., Janots, E., Thomsen, T.B., Manzotti, P., Regis, D., Spandler, C. and Robyr, M., 2011, Preservation of Permian allanite within an Alpine eclogite facies shear zone at Mt Mucrone, Italy: mechanical and chemical behaviour of allanite during mylonitization. *Lithos*, 125, 40-50.
- Cheong, C.-S., Kim, N., Yi, K., Jo, H.J., Jeong, Y.-J., Kim, Y., Koh, S.M. and Iizuka, T., 2015, Recurrent rare earth element mineralization in the northwestern Okchon Metamorphic Belt, Korea: SHRIMP U-Th-Pb geochronology, Nd isotope geochemistry, and tectonic implications. *Ore Geology Reviews*, 71, 99-115.
- Cheong, W., Cho, M. and Kim, Y., 2013, An efficient method for zircon separation using the gold pan. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 22, 63-70 (in Korean with English abstract).
- 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 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analysis. In: Berggren, W.A., Kent, D.B., Aubrey, M.P. and Hardenbol, J. (eds.), *Geochronology, Time Scales, and Global Stratigraphic Correlation*. SEPM (Society for Sedimentary Geology) Special Publication, 4, 3-21.
- Cho, D.-L. and Lee, S.-b., 2016, Geological report of the Gureopdo, Deokjeokdo, Baegado, Seongapdo Sheets, scale 1:50,000. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 54p.
- 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, Daeijak Island, western Gyeonggi massif. *Geosciences Journal*, 12, 1-6.
- Cumming, G. and Richards, J., 1975, Ore lead isotope ratios in a continuously changing Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 28, 155-171.
- Engi, M., 2017, Petrochronology based on REE-minerals: Monazite, allanite, xenotime, apatite. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 83, 365-418.
- Gabudianu Radulescu, I., Rubatto, D., Gregory, C., and Compagnoni, R., 2009, The age of HP metamorphism in the Gran Paradiso Massif, Western Alps: A petrological and geochronological study of "silvery micaschists". *Lithos*, 110, 95-108.
- Gieré, R. and Sorensen S.S., 2004, Allanite and other REE-rich epidote-group minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 56, 431-493.
- Gregory, C., Rubatto, D., Allen, C.M., Williams, I.S., Hermann, J. and Ireland, T., 2007, Allanite micro-geochronology: A LA-ICP-MS and SHRIMP U-Th-Pb study. *Chemical Geology*, 245, 162-182.
- Gregory, C., Rubatto, D., Hermann, J., Berger, A. and Engi, M., 2012, Allanite behaviour during incipient melting in the southern Central Alps. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 84, 433-458.
- Harlov, D.E., Wirth, R. and Hetherington, C.J., 2011, Fluid-mediated partial alteration in monazite: the role of coupled dissolution-precipitation in element distribution and mass transfer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 162, 329-348.
- Hermann, J., 2002, Allanite: thorium and light rare earth element carrier in subducted crust. *Chemical Geology*, 192, 289-306.
- Hetherington, C.J., Harlov, D.E. and Budzyń, B., 2010, Experimental metasomatism of monazite and xenotime: mineral stability, REE mobility and fluid composition. *Mineralogy and Petrology*, 99, 165-184.
- Hoskin, P.W.O., 1998, Minor and trace element analysis of natural zircon (ZrSiO_4) by SIMS and laser ablation ICP-MS: a consideration and comparison of two broadly competitive techniques. *Journal of Trace and Microprobe Techniques*, 16, 301-326.
- Hoskin, P.W.O. and Schaltegger, 2003, The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53, 27-62.
- Janots, E., Engi, M., Berger, A., Allaz, J., Schwarz, J.-O. and Spandler, C., 2008, Prograde metamorphic sequences of REE-minerals in pelitic rocks of the Central Alps; implications for allanite-monazite-xenotime phase relations. *Journal of Metamorphic Geology*, 26, 509-526.
- Janots, E., Engi, M., Rubatto, D. and Gregory, C., 2009, Metamorphic rates of collisional orogeny from in situ allanite and monazite dating. *Geology*, 37, 11-14.
- Janots, E. and Rubatto, D., 2014, U-Th-Pb dating of collision in the external Alpine domains (Urseren zone, Switzerland) using low temperature allanite and monazite. *Lithos*, 184, 155-166.
- Kim, Y., Cho, M. and Yi, K., 2009a, Parageneses and Th-U distributions among allanite, monazite, and xenotime in Barrovian-type metapelites, Imjingang belt, central Korea. *American Mineralogist*, 94, 430-438.
- Kim, Y., Cheong, C.-S., Lee, Y. and Williams, I. S., 2009b, SHRIMP allanite U-Th-Pb dating of bimodal Triassic metamorphism of Neoproterozoic tonalitic gneisses, Daeijak Island, central Korea. *Geosciences Journal*, 13, 305-315.
- Korh, A., 2014, Ablation behaviour of allanites during U-Th-Pb dating using a quadrupole ICP-MS coupled to a 193 nm excimer laser. *Chemical Geology*, 371, 46-59.
- McFarlane, C.R., 2016, Allanite U-Pb geochronology by 193 nm LA ICP-MS using NIST610 glass for external calibration. *Chemical Geology*, 438, 91-102.
- Meldrum, A., Boatner, L.A., Weber, W.J. and Ewing, R.C., 1998, Radiation damage in zircon and monazite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62, 2509-2520.

- Oberli, F., Meier, M., Berger, A., Rosenberg, C.L. and Gieré, R., 2004, U-Th-Pb and $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ disequilibrium isotope systematics: Precise accessory mineral chronology and melt evolution tracing in the Alpine Bergell intrusion. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68, 2543-2560.
- 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.
- Romer, R.L. and Siegesmund, S., 2003, Why allanite may swindle about its true age. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 146, 297-307.
- Romer, R.L. and Xiao, Y., 2005, Initial Pb-Sr(-Nd) isotopic heterogeneity in a single allanite-epidote crystal: implications of reaction history for the dating of minerals with low parent-to-daughter ratios. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148, 662-674.
- Romer, R.L. and Rötzler, J., 2011, The role of element distribution for the isotopic dating of metamorphic minerals. *European Journal of Mineralogy*, 23, 17-33.
- Rubatto, D., Müntener, O., Barnhoorn, A. and Engi, M., 2008, Dissolution-reprecipitation of zircon at low-temperature, high-pressure conditions (Lanzo Massif, Italy). *American Mineralogist*, 93, 1519-1529.
- Rubatto, D., Hermann, J., Berger, A. and Engi, M., 2009, Protracted fluid-present melting during Barrovian metamorphism in the Central Alps. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158, 703-722.
- Rubatto, D., 2017, Zircon: the metamorphic mineral. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 83, 261-295.
- Seydoux-Guillaume, A.-M., Montel, J.-M., Bingen, B., Bosse, V., de Parseval, P., Paquette, J.-L., Janots, E. and Wirth, R., 2012, Low-temperature alteration of monazite: fluid mediated coupled dissolution-reprecipitation, irradiation damage, and disturbance of the U-Pb and Th-Pb chronometers. *Chemical Geology*, 330-331, 140-158.
- Smye, A.J., Roberts, N.M.W., Condon, D.J., Horstwood, M.S.A. and Parrish, R.R., 2014, Characterising the U-Th-Pb systematics of allanite by ID and LA-ICP-MS: Implications for geochronology. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 135, 1-28.
- Steck, A., Della Torre, F., Keller, F., Pfeifer, H.-R., Hunziker, J. and Masson, H., 2013, Tectonics of the Lepontine Alps: ductile thrusting and folding in the deepest tectonic levels of the Central Alps. *Swiss Journal of Geosciences*, 106, 427-450.
- Suzuki, K., Dunkley, D., Adachi, M. and Chwae, U., 2006, Discovery of a c. 370 Ma granite gneiss clast from the Hwanggangri pebble-bearing phyllite in the Okcheon metamorphic belt, Korea. *Gondwana Research*, 9, 85-94.
- Williams, I.S., 1998, U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: Mickibben, M.A., Shanks III, W.C. and Ridley, W.I. (eds.), *Applications of Micro Analytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*. *Reviews of Economic Geology*, 7, 1-35.
- Wing, B.A., Ferry, J.M. and Harrison, T.M., 2003, Prograde destruction and formation of monazite and allanite during contact and regional metamorphism of pelites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145, 228-250.
- 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.

Received May 19, 2018

Review started May 24, 2018

Accepted June 6, 2018