



Article

화천화강암 추곡령암체의 저어콘 U-Pb 연대 및 성인에 대한 지화학적 연구

문인혜, 박영록*, 권기덕

강원대학교 지질학과

Zircon U-Pb Age and Geochemical Studies on the Petrogenesis of the Chugongnyeong pluton of the Hwacheon granite

In-Hye Moon, Young-Rok Park*, Kideok D. Kwon

Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

Received: February 8, 2024 / Revised: March 18, 2024 / Accepted: March 22, 2024

*Corresponding author: +82-33-250-8552 / E-mail: yrpark@kangwon.ac.kr

요약: 경기육괴 중부 화천군과 춘천시 일대에 분포하는 쥐라기 화천화강암은 암체 남서부의 용화산암체와 북동부의 추곡령암체로 구성된다. 이중 추곡령암체는 암체의 대부분을 차지하는 반상흑운모화강암과 상대적으로 소량 산출되는 등립질흑운모화강암으로 이루어져 있다. 반상흑운모화강암 내 저어콘에 대한 U-Pb 연대 측정 결과 185.3±0.6 Ma로 전기 쥐라기 플린스바흐절 연대를 가지며, 이는 전기 쥐라기 기간 경기육괴 중부 화천군과 춘천시 일대에서도 화성활동이 있었음을 지시한다. 추곡령암체는 모두 고알루미나질 화강암에 해당하며, 점토가 결핍된 잡사암과 같은 사질 조성의 성질을 갖는 변성퇴적암류 또는 이에 상응하는 화성암 근원암으로부터 유래하였다. 추곡령암체를 구성하는 두 암상에서 보이는 조직 및 희토류원소 패턴에서의 차이는 이 두 암상이 유사한 성분을 가지는 근원암으로부터 별개의 용융 작용을 통해 생성되었음을 지시한다. 스파이더 다이어그램에서 친석원소인 Cs, Rb, Ba의 값이 부화되어 나타나며, 고장력원소인 Nb, Ti, P의 값이 부(-)의 이상을 보이는 것으로 보아 추곡령암체를 구성하는 고알루미나질 화강암은 섭입대 환경에서 형성되었으며, 전암 저어콘 포화 지온계로부터 반상흑운모화강암은 696-813°C (평균 755°C), 등립질흑운모화강암은 710-840°C (평균 764°C) 온도 조건에서 용융되었음을 알 수 있다.

주요어: 경기육괴, 화천화강암, 추곡령암체, 쥐라기 전기 플린스바흐절 화성활동

ABSTRACT: The Jurassic Hwacheon granite located in the area of Hwacheon and Chuncheon in central Gyeonggi massif consists of Yonghwasan pluton and Chugongnyeong pluton. The Chugongnyeong pluton is composed of a major porphyritic biotite granite and a minor equigranular biotite granite. 185.3±0.6 Ma of zircon U-Pb age dating result of the porphyritic biotite granite indicates that an early Jurassic Pliensbachian igneous activity occurred in the Hwacheon and Chuncheon area of the central Gyeonggi massif. The Chugongnyeong pluton is peraluminous and it is inferred that the pluton was derived from partial melting of meta-psammite protolith such as clay-poor meta-graywackes or their igneous counterparts. The difference in lithology and rare earth element pattern between the porphyritic biotite granite and the equigranular biotite granite suggests that two different rocks were generated through distinct melting event from similar protoliths. The enriched values of lithophile element of Cs, Rb, Ba, and negative trough of Nb, Ti, P on the spider diagram suggest that the Chugongnyeong pluton formed in subduction tectonic environment. Whole-rock zircon saturation thermometer indicates that porphyritic biotite granite and equigranular biotite granite of the Chugongnyeong pluton were melted over 696-813°C (mean value: 755°C) and 710-840°C (mean value: 764°C), respectively.

Key words: Gyeonggi massif, Hwacheon granite, Chugongnyeong pluton, early Jurassic Pliensbachian igneous activity

1. 서론

경기육괴 중부에 위치하는 춘천시, 화천군, 철원군, 양구군, 가평군 일대에는 트라이아스기의 관입 연대를 가지는 화강암(237±1 Ma; Lee *et al.*, 2006)과 전기 백악기에 생성된 명성산화강암(112±1 Ma; Hwang and Kihm, 2007) 및 인근 철원분지 내에 분포하는 지장봉응회암(113 Ma; Hwang *et al.*, 2011)과 유문암(115.0±1.1 Ma; Hwang *et al.*, 2011)과 같은 일부 화성암류를 제외하면 모두 쥐라기 중기(174.7-

161.5 Ma)의 관입 연대를 가지는 화강암류가 선캄브리아 시대 변성암류를 관입하며 분포하고 있다(그림 1). 이처럼 경기육괴 중부에 분포하는 쥐라기 중기 화강암류 중 춘천시 북부에 위치하는 북산면 추곡리와 화천군 간동면 오음리와 간척리 일대에는 화천화강암으로 알려진 화강암류가 분포하고 있다(Sagong *et al.*, 1997). Sagong *et al.* (1997)은 화천화강암을 야외산상에 따라 두 개의 서로 다른 암체인 남서부의 용화산암체와 북동부의 추곡령암체로 구분하고, 용화산암체를 다시 석류석의 존재 유무에 따라 남쪽의

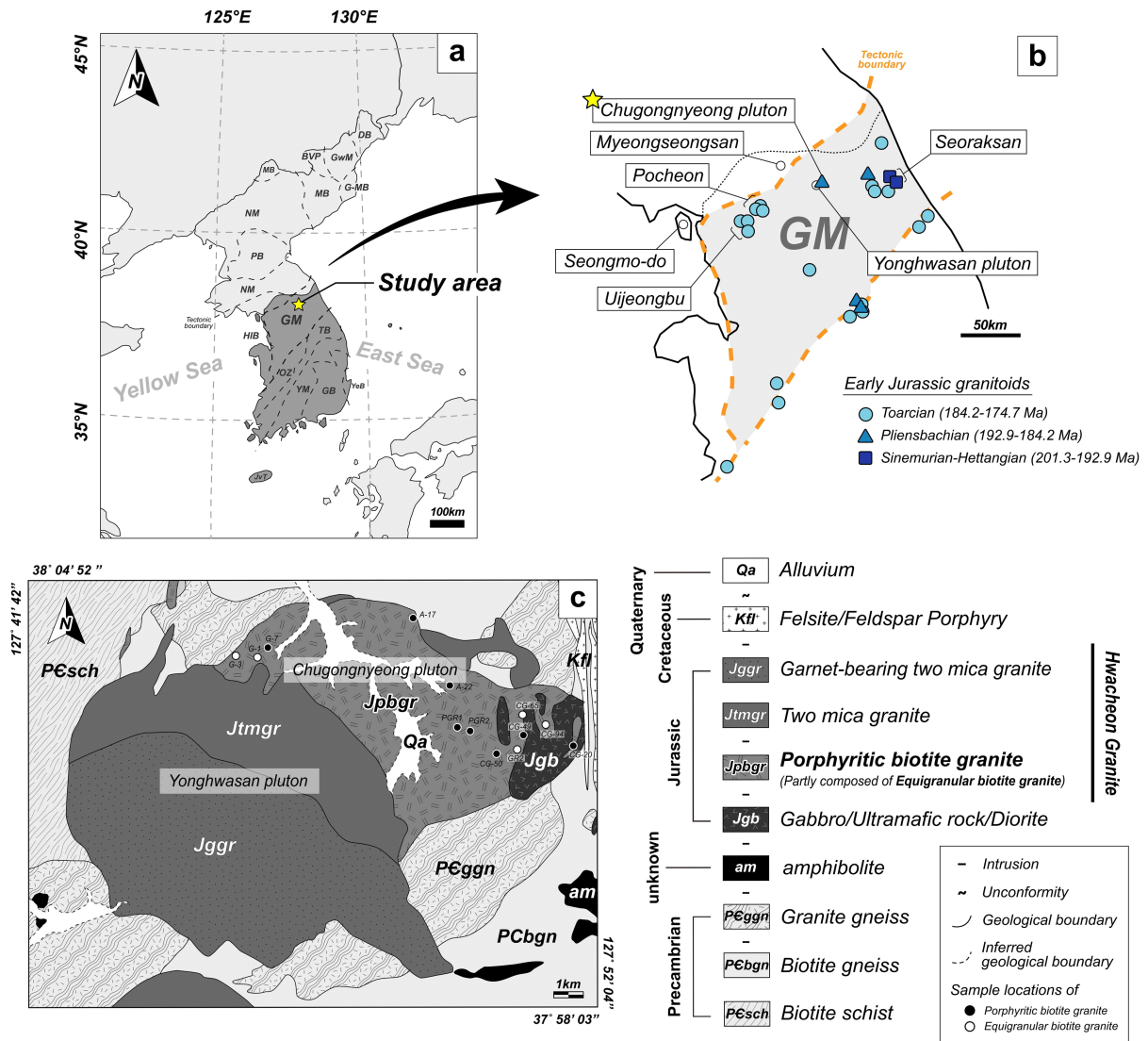


Fig. 1. (a) Tectonic map of Korean Peninsula (modified after a 1:1,000,000 tectonic map of Korea; Kee *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2024). HIB: Hongseong-Imjingang Belt, GM: Gyeonggi Massif, OZ: Okcheon Zone, TB: Taebaeksan Basin, YM: Yeongnam Massif, GB: Gyeongsang Basin, YeB: Yeonil Basin, JVT: Jeju Volcanic Terrain, NM: Nangnim Massif, PB: Pyeongnam Basin, MB: Macholyong Belt, GwM: Gwanmo Massif, G-MB: Gilju-Myeongcheon Basin, BVP: Baekdusan Volcanic Plateau, DB: Dumangang Belt. (b) Map showing the emplacement ages of early Jurassic granitoids in Gyeonggi massif. (c) Geological map of the Hwacheon granite modified after Sagong *et al.* (1997) and Choi *et al.* (2007).

석류석운모화강암과 북쪽의 운모화강암으로 구분하여 이 암체에 대한 암석학적, 지화학적 연구를 수행하였다. Sagong *et al.* (1997)은 추곡령암체에 대해서는 암석기재화적인 보고와 2개의 시료에 대한 주원소와 미량원소 자료만을 제시하였으며, 주로 용화산암체를 구성하는 석류석운모화강암과 운모화강암의 성인적인 관계를 밝히는 연구를 수행하였다. 화천화강암 용화산암체의 관입 시기에 대해서는 172.0 ± 6.8 Ma Rb-Sr 전암 연대(Kwon *et al.*, 2006)와 172 ± 5 Ma CHIME (chemical U-Th total Pb isochron method) 모나자이트 연대(Cho *et al.*, 1996)가 보고되면서 쥐라기 중기에 생성된 것으로 알려져 있다. 하지만 추곡령암체의 관입 시기에 대해서는 용화산암체와의 경계부에서 추곡령암체가 포획암으로 발견되고 용화산암체의 입자 크기가 작아지는 점에 근거하여 용화산암체가 추곡령암체를 관입한 것으로 추정된 보고는 있지만(Sagong *et al.*, 1997), 이 암체의 생성 연대에 대한 연구는 아직 이루어지지 않았다.

이 연구에서는 경기육괴 중부에 위치하는 화천화강암 추곡령암체에 대한 LA-MC-ICP-MS (laser ablation - multi collector - inductively coupled plasma - mass spectrometry) 저어콘 U-Pb 연대측정 결과를 제시하고, 이 생성 연대가 가지는 의미에 대해 살펴보았다. 또한 추곡령암체를 구성하는 서로 다른 두 암상인 반상흑운모화강암과 등립질흑운모화강암에 대한 지화화적인 연구를 통해 두 암상 사이의 성인적인 관계를 밝히고, 추곡령암체를 형성한 마그마 근원암의 성질을 규명하며, 근원암의 용융이 일어난 온도에 대해 계산해봄으로써 경기육괴 중부 지역의 시간에 따른 지온 구배 및 조구조 환경에 대해 고찰해 보았다.

2. 지질 개요 및 암석 기재

한반도 지체 구조상 경기육괴 중부에 속하는 강원도 춘천시 북산면 추곡리 일대에는 다양한 종류의 변성암과 화성암이 분포하며, 용두리편마암복합체에 해당하는 고원생대 편암류, 흑운모편마암, 화강편마암이 기저를 이루고 있다(그림 1c). 흑운모편마암은 호상편마암과 안구상편마암을 포함하고 석류석 반상변정을 함유하는 반상변정질편마암으로도 산출되며, 북쪽으로는 미그마타이트질 백립암과 부분적으로 고철질 백립암 및 석류석 각섬암으로 구성된 백립암 복합체가 분포한다(Lee and Cho, 2003). 연구 지역 인근 강원도 화천의 호상편마암은 $2,164 \pm 18$ Ma의 U-Pb 저어콘 연대(Kim *et al.*, 1999b), 내평 도폭의 호상편마암은 $2,167 \pm 25$ Ma의 U-Pb 저어콘 연대(Song *et al.*, 2001)를 가지며, 이를 관입한 우백질의 화강편마암은 석류석을 포함하고 있으며 인근에는 각섬암이 소규모 암주상으로 관입하며 발달한다.

고원생대 변성암류를 관입한 중생대 쥐라기 화성암류로는 초고철질암/고철질암, 섬록암 및 화천화강암이 분포하며, 이후에 관입한 백악기 규장암과 장석반암이 남북 방향으로 길게 저지대를 형성하며 분포한다(그림 1c). 특히 주 구성광물로 각섬석을 갖는 초고철질암인 각섬석암(hornblendite)은 고철질암체(각섬석반려암) 내에 국부적으로 분포하며, 고철질암은 야외에서 소규모로 산출되는 섬록암 및 반상흑운모화강암과 함께 산출된다(Moon *et al.*, 2022). 연구 지역에 분포하는 반상흑운모화강암은 Sagong *et al.* (1997)이 보고한 화천화강암 추곡령암체에 해당한다. 화천화강암은 암상에 따라 암체의 남서부에 분포하는 용화산암체와 북동부에 분포하는 추곡령암체로 구분된다(Sagong *et al.*, 1997). 운모화강암과 석류석운모화강암으로 구성된 용화산암체는 추곡령암체를 관입하고 있으며, 172.0 ± 6.8 Ma의 Rb-Sr 전암 연대(Kwon *et al.*, 2006)와 172 ± 5 Ma CHIME 모나자이트 연대(Cho *et al.*, 1996)를 가진다. 이후 관입한 백악기 규장암과 장석반암이 남북 방향으로 길게 산출된다.

화천화강암 추곡령암체는 알칼리장석과 퍼사이트(perthite)를 반정으로 가지는 반상흑운모화강암(porphyritic biotite granite; CG-Pgr)이 대부분을 차지하며 국부적으로 등립질흑운모화강암(equigranular biotite granite; CG-Egr)이 혼재되어 나타나는 산출양상을 보인다. 반상흑운모화강암(CG-Pgr)은 중립질의 입자 크기를 가지며 약 1.5-2 cm 크기의 분홍색 및 하얀색 반정을 포함하며 4 cm 이상의 거정도 산출된다(그림 2a). 주 구성광물로는 반정을 구성하는

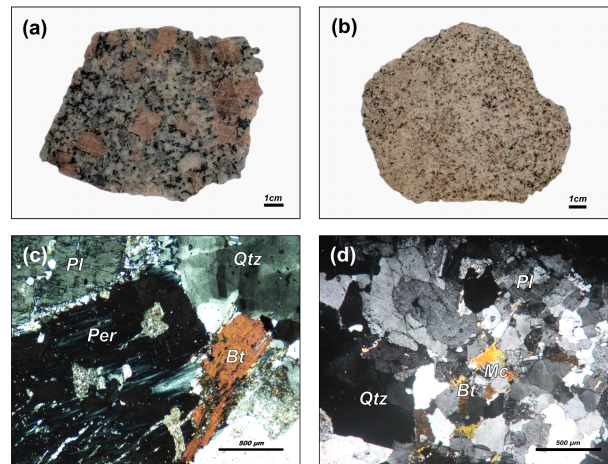


Fig. 2. Photographs of the handspecimen of (a) porphyritic biotite granite and (b) equigranular biotite granite of the Chugongnyeong pluton. Photomicrographs of thin section of (c) porphyritic biotite granite and (d) equigranular biotite granite. All photomicrographs are XPL mode (x40). Abbreviations (Whitney and Evans, 2010) : quartz (Qz), perthite (Per), plagioclase (Pl), biotite (Bt), muscovite (Mc).

알칼리장석, 피사이트, 미사장석과 석기 부분의 사장석, 석영, 흑운모가 존재하며 소량의 저어콘이 이들과 함께 산출된다. 피사이트 반정 내에 사장석이 포함되어 있기도 하며, 직교니콜 하에서 평행소광하는 흑운모는 자형 내지 반자형의 입자 형태를 가지지만, 이차적인 변질로 인한 녹니석이 입자 주변부에서 관찰된다(그림 2c). 사장석은 대부분 변질로 인해 견운모화 되었으며, 석영 입자 내에는 흔히 약 50 μm 이하의 작은 흑운모와 사장석 입자들이 관찰되기도 한다.

등립질흑운모화강암(CG-Egr)은 반상흑운모화강암과 유사한 구성광물을 가지지만, 반정이 부재하며 중립질의 입자들로 이루어져 있는 반상흑운모화강암과는 달리 세립질 내지 중립질의 더 작은 입자들로 이루어진 차이를 보인다. 전체적으로 담회색 내지 유백색을 띠며 약 0.3 cm 이하의 입자들로 구성된다(그림 2b). 주 구성광물로 석영, 사장석, 알칼리장석, 흑운모를 가지며, 변질작용에 의해 생성된 타형의 백운모가 소량 관찰되기도 한다(그림 2d). 타형의 사장석은 알바이트 쌍정을 가지며 일부 입자 내 변질로 인한 견운모가 관찰된다. 알칼리장석의 경우 알바이트 쌍정과 칼스바드 쌍정이 함께 관찰되기도 하며, 석영과 혼재되어 나타난다(그림 2d). 흔히 흑운모 내에는 사장석과 석영이 포함되어 관찰되기도 하며, 반상흑운모화강암 내 흑운모에 비해 직교니콜 하에서 탁한 갈색의 간섭색을 보이고 타형의 입자 형태를 가지며 산출된다.

3. 연구방법

추곡령암체의 정확한 생성 연대를 알아보기로 반상흑운

모화강암을 대상으로 풍화되지 않은 시료를 선택하여 LA-MC-ICP-MS 저어콘 U-Pb 연대 측정을 실시하였다. 시료에서 저어콘 광물을 분리해 에폭시를 사용하여 마운트를 제작하였다. 분석 전 저어콘 입자의 내부 구조를 파악하기 위해 주사전자현미경(scanning electron microscope; SEM)을 이용하여 후방산란전자(back scattered electron; BSE)와 음극선발광(cathodoluminescence; CL) 이미지를 촬영하였으며, 이미지를 기반으로 상속핵의 여부를 확인하고 저어콘 입자 내 크랙과 포유물을 피해 분석할 위치를 선정하였다(그림 3). U-Pb 저어콘 연대 측정은 한국기초과학지원연구원(KBSI) 오창센터의 LA-MC-ICP-MS 기기(Nu PlasmaII, Nu instruments+Excite PHAROS)를 사용하였으며, 직경 15 μm 의 레이저를 이용하여 하나의 분석점 당 약 30 s 내외의 분석 시간을 가지며 측정하였다. 분석 시 총 5점의 저어콘 분석마다 표준 저어콘을 함께 측정하였으며, 이때 사용한 표준 저어콘으로는 91500콘($1065.4 \pm 0.3 \text{ Ma}$; Wiedenbeck *et al.*, 1995)과 Plešovice ($337.13 \pm 0.37 \text{ Ma}$; Sláma *et al.*, 2008)를 이용하였다. 데이터 전처리로는 Iolite 2.5 (Paton *et al.*, 2011)와 ISOPLOT (Ludwig, 2008) 프로그램을 사용하여 진행하였다. 데이터 중 5% 이상의 불일치 연대를 보이는 분석점들은 제외하였으며, 화강암의 정치연대는 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 가중평균연대를 통해 계산되었다.

화천화강암 추곡령암체의 주원소, 미량원소 및 희토류원소의 조성을 알아보기 위해 풍화가 심하지 않은 반상흑운모화강암과 등립질흑운모화강암의 대표적인 시료들을 선택하여 캐나다의 Activation Laboratories Ltd에 의뢰하

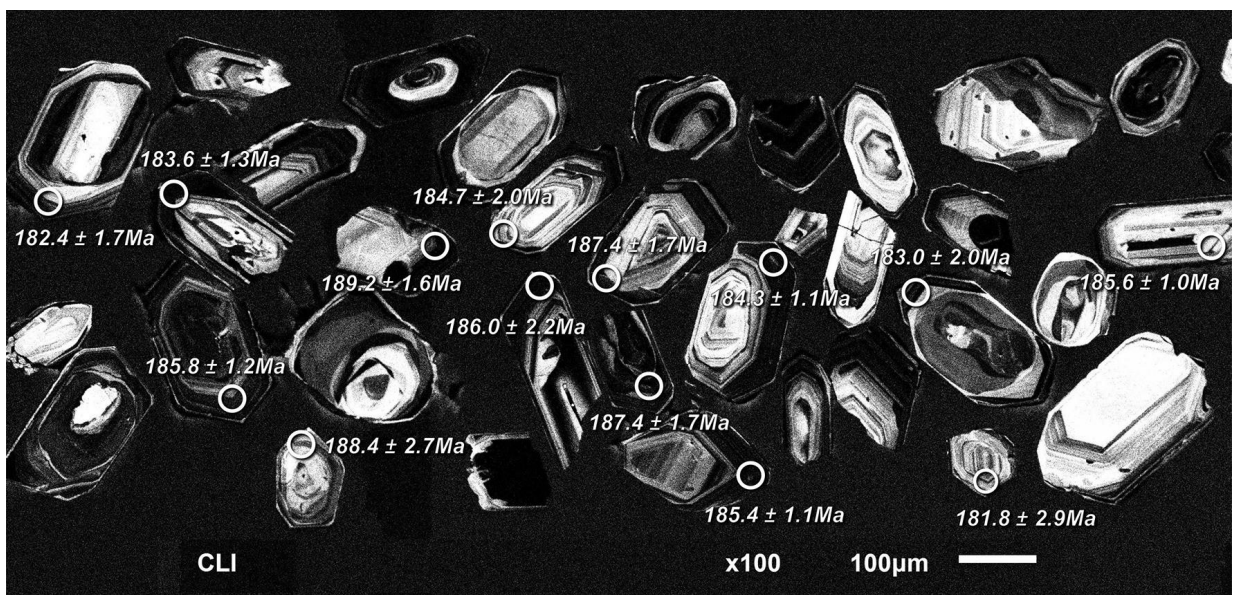


Fig. 3. Cathodoluminescence (CL) pictures of representative zircon crystals of porphyritic biotite granite of the Chugongnyeong pluton.

여 전암 화학분석을 진행하였다. 각 암석에 대한 주원소 분석은 Fusion ICP (Inductively Coupled Plasma)를 사용하였고, 미량원소 및 희토류원소는 ICP-MS (Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometer)와 Fusion ICP (Inductively Coupled Plasma)를 이용하여 분석하였다.

4. 결과

4.1. 저어콘 U-Pb 연대

화천화강암 용화산암체의 생성 연대에 대해서는 172.0±6.8 Ma의 Rb-Sr 전암 연대(Kwon *et al.*, 2006)와 172±5 Ma CHIME 모나자이트 연대(Cho *et al.*, 1996)가 보고된 바 있지만, 추곡령암체의 정확한 생성 연대는 아직 보고된 바 없다. 추곡령암체의 생성 연대를 알아보기 위해 주를 이루는 반상흑운모화강암을 대상으로 암석 내 저어콘을 분리하여 저어콘 U-Pb 연대 측정을 실시하였다. 음극선발광 영상에서 미약한 누대를 보여주는 일부 저어콘을 제외하고 대부분의 저어콘 입자들은 진동누대(oscillatory zoning)를 잘 보여준다(그림 3). 저어콘은 약 150-200 μm의 입자 크기를 가지며, 일부 저어콘은 상속핵(inherited core)을 가진다. 상속핵과 외연부 부분을 제외한 후 분석한 저어콘 총 40점 중 33점의 유효분석 값을 얻었으며, 측정결과의 오차는 95%(2σ) 수준이다. 화천화강암 추곡령암체의 저어콘 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 가중평균연대는 185.3±0.6 Ma로 쥐라기 전기 플린스바흐절(192.9-184.2 Ma) 기간에 관입하였으며, 용화산암체 이전에 생성되었음을 알 수 있다(표 1; 그림 4).

이러한 결과는 추곡령암체와 용화산암체의 경계부에서 용화산암체가 추곡령암체(반상흑운모화강암) 암편을 포획하고 있고, 불규칙한 경계부에서 용화산암체의 입자 크기가 작아지는 점에 근거하여 용화산암체가 추곡령암체를 관입한 것(Sagong *et al.*, 1997)으로 보고한 점과 잘 일치한다.

4.2. 주원소 및 미량원소

추곡령암체 반상흑운모화강암, 등립질흑운모화강암에 대한 주원소, 미량원소 및 희토류원소 분석 결과는 표 2와 같다. 이 암석에 대한 주원소 결과를 가지고 TAS (total alkali silica) 다이어그램(Middlemost, 1994)에 나타내면 반상흑운모화강암은 모두 화강암 영역에, 등립질흑운모화강암은 화강암, 화강섬록암, 석영몬조니암 영역에 도시됨을 알 수 있다(그림 5a). 또한 A/NK 대 A/CNK 도(Maniar and Piccoli, 1989)에서 추곡령암체는 모두 고알루미나질 화강암 영역에 도시된다(그림 5b).

추곡령암체의 대부분을 차지하는 반상흑운모화강암은 비교적 좁은 범위의 SiO₂ 값(67.57-73.79 wt.%)을 갖는 반면에, 국부적으로 나타나는 등립질흑운모화강암은 넓은 범위의 SiO₂ 값(59.58-73.99 wt.%)을 갖는다. SiO₂ 함량 변화에 따른 주원소 함량의 변화를 나타내는 하커변화도에서, 추곡령암체를 구성하는 반상흑운모화강암과 등립질흑운모화강암의 Al₂O₃, Fe₂O₃(T), MnO, MgO, CaO, TiO₂, P₂O₅는 SiO₂ 함량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이는 반면에, Na₂O, K₂O는 불규칙하게 도시된다(그림 6). SiO₂ 함

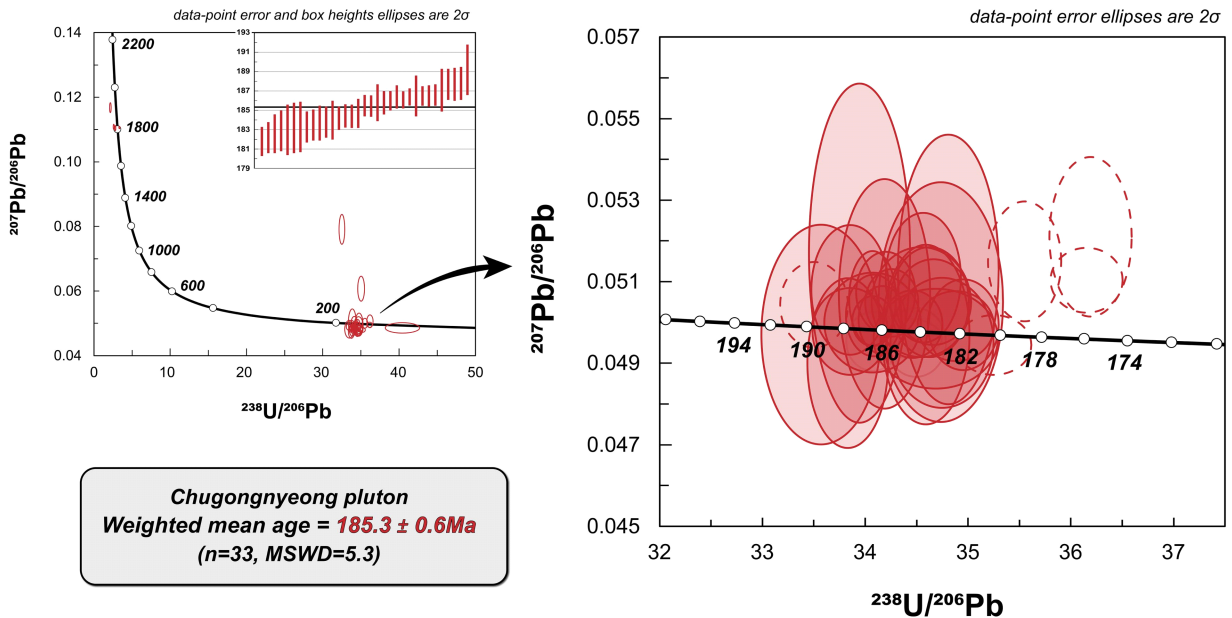


Fig. 4. Concordia diagram for the porphyritic biotite granite of the Chugongnyeong pluton. The red circles are ²⁰⁶Pb/²³⁸U weighted mean ages of clusters. The error in the measurement result is 95%(2σ).

Table 1. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb isotopic data of the Chugongnyeong pluton of the Hwacheon granite. The effective analysis value of the 33 points was obtained out of 40 points in total, and the error in the measurement result is 95%(2 σ).

No.	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm(2\sigma)$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm(2\sigma)$	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	$\pm(2\sigma)$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm(2\sigma)$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age (Ma)	U (ppm)	Th/U
CG01-2	0.1771	0.0016	0.02794	0.00023	35.82	0.30	0.04610	0.00006	177.6 \pm 1.5	728	4.368
CG01-4	0.1761	0.0020	0.02754	0.00022	36.34	0.29	0.04629	0.00022	175.1 \pm 1.4	834	1.036
CG01-5	0.1723	0.0019	0.02740	0.00026	36.55	0.35	0.04627	0.00014	174.3 \pm 1.6	308	1.013
CG01-6	0.1899	0.0023	0.02900	0.00024	34.51	0.28	0.04776	0.00042	184.3 \pm 1.5	2312	0.429
CG01-7	0.1844	0.0022	0.02829	0.00024	35.33	0.28	0.04756	0.00039	179.8 \pm 1.5	1285	0.817
CG01-8	0.1837	0.0021	0.02870	0.00025	34.88	0.31	0.04646	0.00027	182.4 \pm 1.6	982	0.843
CG01-9	0.1855	0.0038	0.02881	0.00025	34.73	0.31	0.04733	0.00054	183.1 \pm 1.6	655	0.884
CG01-10	0.1867	0.0033	0.02858	0.00026	34.97	0.31	0.04758	0.00043	181.7 \pm 1.6	1297	1.027
CG01-11	0.1850	0.0025	0.02854	0.00024	35.02	0.29	0.04724	0.00042	181.4 \pm 1.5	950	1.125
CG01-12	0.1843	0.0033	0.02854	0.00035	34.91	0.48	0.04679	0.00038	181.4 \pm 2.2	209.3	2.360
CG01-13	0.1887	0.0029	0.02871	0.00032	34.86	0.39	0.04756	0.00052	182.4 \pm 2.0	1255	0.895
CG01-14	0.1868	0.0036	0.02882	0.00043	34.75	0.51	0.04722	0.00051	183.1 \pm 2.7	1052	0.858
CG01-16	0.1831	0.0029	0.02875	0.00027	34.72	0.32	0.04680	0.00032	182.7 \pm 1.7	336	1.209
CG01-17	0.1806	0.0024	0.02870	0.00027	34.82	0.34	0.04632	0.00018	182.4 \pm 1.7	262	1.036
CG01-18	0.1885	0.0026	0.02888	0.00021	34.61	0.24	0.04762	0.00038	183.6 \pm 1.3	1134	0.577
CG01-19	0.1883	0.0021	0.02924	0.00019	34.23	0.22	0.04704	0.00034	185.8 \pm 1.2	634	0.793
CG01-20	0.1896	0.0042	0.02966	0.00043	33.71	0.48	0.04661	0.00030	188.4 \pm 2.7	207	0.502
CG01-22	0.1952	0.0036	0.02979	0.00026	33.60	0.29	0.04745	0.00044	189.2 \pm 1.6	1029	0.898
CG01-23	0.1859	0.0031	0.02907	0.00032	34.46	0.37	0.04625	0.00014	184.7 \pm 2.0	204	2.299
CG01-24	0.1920	0.0048	0.02928	0.00035	34.17	0.42	0.04793	0.00085	186.0 \pm 2.2	1161	1.180
CG01-25	0.1900	0.0029	0.02951	0.00028	33.94	0.32	0.04655	0.00021	187.4 \pm 1.7	221.5	1.400
CG01-26	0.1920	0.0036	0.02949	0.00027	33.94	0.31	0.04742	0.00044	187.4 \pm 1.7	855	0.858
CG01-27	0.1909	0.0029	0.02918	0.00017	34.28	0.20	0.04755	0.00038	185.4 \pm 1.1	1011	0.817
CG01-28	0.1871	0.0021	0.02900	0.00017	34.44	0.22	0.04726	0.00033	184.3 \pm 1.1	862	0.862
CG01-29	0.1850	0.0024	0.02880	0.00031	34.75	0.37	0.04704	0.00054	183.0 \pm 2.0	1370	0.623
CG01-30	0.1826	0.0034	0.02861	0.00046	35.01	0.57	0.04679	0.00052	181.8 \pm 2.9	316.8	2.390
CG01-32	0.1880	0.0023	0.02921	0.00016	34.23	0.19	0.04694	0.00028	185.6 \pm 1.0	478.7	1.143
CG01-33	0.1918	0.0026	0.02931	0.00017	34.09	0.20	0.04781	0.00033	186.3 \pm 1.1	991	0.804
CG01-34	0.1891	0.0022	0.02925	0.00014	34.18	0.17	0.04724	0.00031	185.8 \pm 0.9	1357	0.912
CG01-35	0.1867	0.0020	0.02906	0.00021	34.32	0.23	0.04655	0.00021	184.7 \pm 1.3	798	0.858
CG01-36	0.1906	0.0028	0.02894	0.00020	34.58	0.24	0.04750	0.00034	183.9 \pm 1.2	849	0.721
CG01-37	0.1885	0.0033	0.02921	0.00040	34.16	0.46	0.04631	0.00015	185.6 \pm 2.5	113.3	1.712
CG01-38	0.1941	0.0035	0.02951	0.00030	33.88	0.33	0.04758	0.00041	187.5 \pm 1.9	421	1.371

량 변화에 따른 미량원소 함량 변화를 나타낸 하커변화도에서 추곡령암체 내 두 암상은 모두 매우 불규칙하게 도시되는 특징을 보여준다(그림 7).

미량원소 값을 원시맨틀 값(Primitive Mantle; Sun and McDonough, 1989)으로 표준화하여 나타낸 스파이더 다이어그램에서, 반상흑운모화강암과 등립질흑운모화강암은 비교적 유사한 변화 양상을 보이며, 미량원소 Nb, P 및 Ti가 부(-)의 이상을 보인다(그림 8a). 희토류원소(rare earth element; REE)는 주원소 및 미량원소에 비해 변질 및 풍화

작용의 영향을 적게 받는다. 더불어 이동성이 작고 규칙성을 가지며 거동하는 특징을 보이기에 암석의 성인 및 근원암을 추적하는 도구로 널리 이용된다(Taylor and McLennan, 1995). 반상흑운모화강암과 등립질흑운모화강암의 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 비는 각각 6.84-23.98과 19.21-61.48로 등립질흑운모화강암이 더 큰 값을 가진다(표 2). 이러한 차이로 인해 콘드라이트(chondrite) 값(Boynton, 1984)으로 표준화한 REE 패턴에서 반상흑운모화강암과 등립질흑운모화강암은 서로 다른 기울기를 보이며 등립질흑운모화강암이 반상흑운모화강

Table 2. Concentrations of major, trace and rare earth elements of the Chugongnyeong pluton.

Rock type	Chugongnyeong pluton												
	Porphyritic biotite granite								Equigranular biotite granite				
Sample No.	CG-20	CG-49	CG-50	A-17	A-22	G-7	PGR1	PGR2	CG-65	CG-94	G-1	G-3	GR2
<i>Major elements (in wt.%)</i>													
SiO ₂	70.52	72.85	73.11	67.57	73.79	68.90	70.26	71.64	72.82	69.48	63.14	59.58	73.99
Al ₂ O ₃	14.77	13.91	13.27	14.50	14.09	16.06	15.30	14.62	13.95	15.47	17.49	19.32	13.54
Fe ₂ O ₃ (T)	2.83	2.11	2.53	2.76	2.04	2.18	2.67	1.77	1.54	2.81	5.30	6.50	0.79
MnO	0.04	0.06	0.06	0.08	0.05	0.07	0.04	0.05	0.03	0.04	0.09	0.07	0.02
MgO	0.72	0.52	0.55	0.85	0.46	0.60	0.70	0.42	0.37	0.71	1.69	1.10	0.19
CaO	2.70	1.80	2.41	2.68	1.76	2.24	3.26	1.55	2.21	3.14	4.39	4.87	1.05
Na ₂ O	4.16	3.20	3.43	3.01	3.49	3.91	4.25	3.34	3.40	3.75	3.75	4.21	3.49
K ₂ O	2.15	4.34	2.74	3.78	4.19	4.38	1.98	4.82	3.12	2.00	2.25	2.60	4.05
TiO ₂	0.28	0.25	0.26	0.32	0.20	0.23	0.28	0.19	0.18	0.35	0.89	0.63	0.11
P ₂ O ₅	0.14	0.10	0.09	0.12	0.07	0.08	0.13	0.07	0.07	0.22	0.17	0.21	0.02
LOI	1.20	0.73	0.52	4.29	0.23	0.37	1.39	2.26	0.65	1.96	0.70	0.53	1.35
Total	99.51	99.87	98.97	99.96	100.37	99.02	100.26	100.73	98.34	99.93	99.86	99.62	98.61
A/CNK	1.05	1.05	1.02	1.04	1.05	1.05	1.02	1.08	1.07	1.10	1.05	1.04	1.13
<i>Trace elements (in ppm)</i>													
Ba	784.00	1201.00	466.00	890.11	650.68	1227.55	635.00	1450.00	1326.00	1309.00	893.92	1363.01	1538.00
Rb	44.00	113.00	70.00	115.21	104.02	115.70	54.00	104.00	95.00	57.00	99.06	109.78	110.00
Sr	417.00	248.00	257.00	159.45	92.01	299.35	348.00	326.00	436.00	642.00	448.08	561.24	335.00
Cs	1.00	1.80	0.90	2.50	1.01	1.21	1.80	0.80	1.20	3.80	1.27	1.35	1.30
Pb	11.00	18.00	13.00	13.55	16.71	16.15	10.00	14.00	24.00	11.00	8.92	12.09	19.00
Y	15.90	19.00	17.70	15.35	22.17	18.89	14.70	17.30	12.20	12.40	12.04	12.30	10.80
Zr	216.00	149.00	201.00	52.74	62.56	56.14	133.00	106.00	134.00	275.00	93.15	153.73	54.00
Hf	5.80	3.90	5.10	1.84	2.54	1.99	3.80	2.80	3.50	6.20	2.66	3.74	1.80
Nb	8.70	9.60	7.70	11.06	21.91	12.08	7.10	4.30	6.70	6.60	22.19	14.33	5.10
Ta	0.54	0.52	0.39	-	-	-	0.56	0.52	0.54	0.35	-	-	0.58
Th	17.70	11.70	18.70	14.75	21.33	11.24	6.75	9.69	17.30	18.00	10.10	20.68	11.40
U	1.52	1.53	1.93	1.00	4.48	1.74	1.74	1.24	1.64	1.23	1.26	2.29	0.96
Co	57.00	103.00	95.00	3.67	2.89	3.20	155.00	127.00	89.00	65.00	12.00	7.37	246.00
Sc	4.00	4.00	4.00	2.23	0.91	3.30	5.00	3.00	3.00	3.00	5.09	3.33	3.00
Zn	30.00	40.00	40.00	39.16	18.89	26.28	40.00	<30	<30	<30	77.10	78.46	<30
Cu	10.00	10.00	10.00	7.64	8.15	5.44	<10	10.00	<10	30.00	12.29	9.95	20.00
Rb/Sr	0.11	0.46	0.27	0.72	1.13	0.39	0.16	0.32	0.22	0.09	0.22	0.20	0.33
M**	1.39	1.35	1.37	1.42	1.35	1.43	1.45	1.33	1.30	1.33	1.56	1.68	1.22
T _{Zr} (°C)	813.80	783.39	808.61	696.23	713.06	700.17	766.67	756.02	777.85	840.53	730.17	762.17	710.67
<i>Rare earth elements (in ppm)</i>													
La	58.40	21.80	41.60	50.55	28.29	21.74	34.00	21.80	65.20	91.30	33.36	70.20	41.40
Ce	99.90	43.90	74.50	86.79	64.24	37.83	60.20	39.00	112.00	155.00	62.88	129.77	71.80
Pr	9.73	4.20	7.61	8.74	5.55	4.26	6.12	4.23	10.90	15.60	6.75	13.23	7.47
Nd	31.90	15.20	25.70	28.09	18.42	14.62	21.10	15.20	37.30	53.30	23.37	43.20	25.20
Sm	5.02	3.04	4.46	4.42	3.76	3.08	3.74	3.24	5.25	7.31	3.81	5.86	4.01
Eu	1.10	0.87	0.79	0.96	0.55	0.86	1.10	0.81	1.32	2.18	1.47	1.99	1.24
Gd	3.55	2.91	3.41	3.95	3.75	3.25	2.72	2.83	3.30	4.01	3.25	4.27	2.39
Tb	0.54	0.50	0.54	0.54	0.63	0.51	0.45	0.50	0.43	0.49	0.44	0.49	0.33
Dy	3.04	3.32	3.41	2.98	3.96	3.21	2.49	2.93	2.40	2.61	2.28	2.36	1.74
Ho	0.57	0.67	0.63	0.58	0.82	0.64	0.51	0.60	0.43	0.44	0.43	0.44	0.33
Er	1.56	1.93	1.86	1.69	2.63	1.96	1.40	1.68	1.15	1.15	1.31	1.47	0.89
Tm	0.24	0.30	0.27	0.22	0.40	0.29	0.20	0.27	0.17	0.16	0.18	0.19	0.14
Yb	1.63	2.02	1.81	1.41	2.76	1.89	1.45	1.77	1.20	0.99	1.16	1.37	0.86
Lu	0.26	0.33	0.30	0.21	0.43	0.28	0.24	0.26	0.17	0.16	0.18	0.23	0.13
(La/Yb) _N	23.89	7.19	15.32	23.98	6.84	7.68	15.63	8.21	36.22	61.48	19.21	34.24	32.09
Eu/Eu*	0.80	0.90	0.62	0.71	0.45	0.84	1.06	0.82	0.97	1.24	1.28	1.23	1.23

** M=(Na+K+2Ca)/(Al*Si)

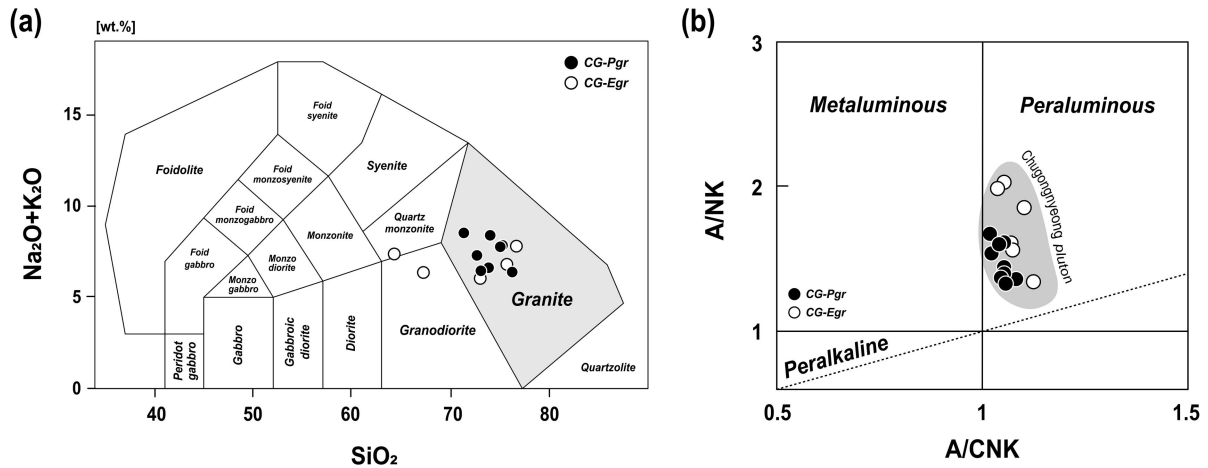


Fig. 5. (a) Total-alkali-silica (TAS) diagram for the Chugongnyeong pluton (Middlemost, 1994). CG-Pgr and CG-Egr represent porphyritic biotite granite and equigranular biotite granite of the Chugongnyeong pluton, respectively. (b) Alumina saturation diagram ($A/NK = \text{molar Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ vs. $A/CNK = \text{molar Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$) of the Chugongnyeong pluton (after Maniar and Piccoli, 1989). The Chugongnyeong pluton is plotted in the peraluminous field.

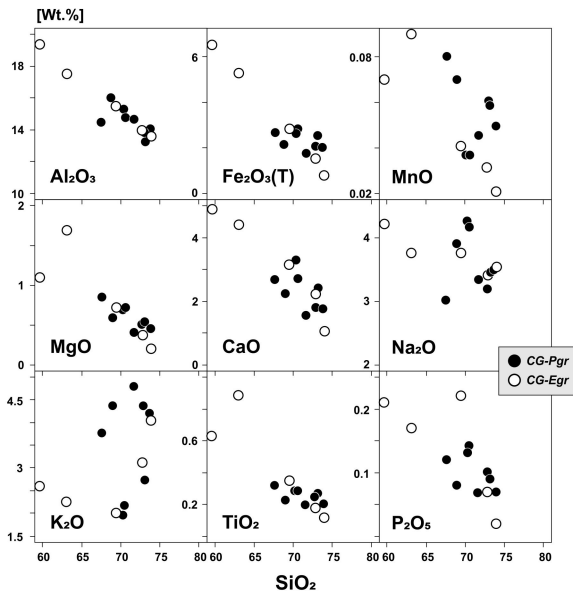


Fig. 6. Harker variation diagrams of major elements for the Chugongnyeong pluton.

암보다 더 급한 기울기를 가진다(그림 8b). 한편 반상혹운모 화강암과 등립질혹운모화강암의 Eu/Eu^* 값($\text{Eu}_N \div \sqrt{\text{Sm}_N \times \text{Gd}_N}$)은 각각 0.45-1.06과 0.97-1.28로 반상혹운모화강암은 부(-)의 Eu 이상을 보이는 반면에, 등립질혹운모화강암은 정(+)의 Eu 이상을 보인다(표 2; 그림 8b).

5. 토 의

5.1. 경기육괴 중부 지역 전기 및 중기 쥐라기 화성활동

남한 지역에 분포하는 현생 화강암류에 대한 연대 측정

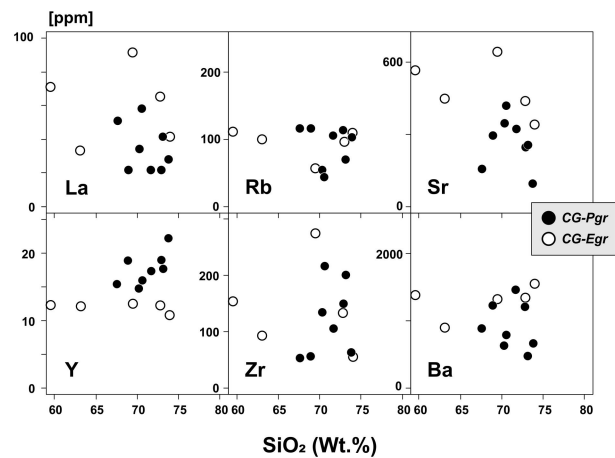


Fig. 7. Harker variation diagrams of trace elements for the Chugongnyeong pluton.

결과를 정리해 놓은 자료(e.g., Kee *et al.*, 2010; Cheong and Kim, 2012; Cheong and Jo, 2020; Kim *et al.*, 2024)에서 볼 수 있는 것처럼, 180 Ma 보다 더 오래된 쥐라기 전기(201.3-174.7 Ma) 연대를 가지는 화강암류는 주로 영남육괴에 분포하며, 경기육괴에서는 경기육괴 동부 설악산 일대와 북서부 의정부와 포천 일대에 주로 분포한다(그림 1b). 연구 지역이 위치하는 경기육괴 중부 화천과 춘천 일대에 분포하는 화강암류는 대부분이 쥐라기 중기(174.7-161.6 Ma)의 연대를 가지며, 트라이아스기 연대를 가지는 화성암(김화, 청평, 양평 지역)과 백악기 전기의 연대를 가지는 화성암(명성산 일대 및 인근 철원분지 내)이 연구 지역 인근 일부 지역에 분포하고 있다. 연구 지역 인근에 분포하는 화성암류, 즉 화천화강암 용화산암체(172 ± 5 Ma)의 모나자이트

CHIME 연대; Cho *et al.*, 1996), 사창리반상화강암(164.7±2.4 Ma의 TIMS 저어콘 U-Pb 연대; Kim *et al.*, 1999a), 오탄리반려암(166.2±1.2 Ma의 TIMS 저어콘 U-Pb 연대; Kim *et al.*, 1999a), 양구화강암(172.8±1.0 Ma의 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대; Choi *et al.*, 2009), 홍천화강암(162.2±1.9 Ma의 스핀 TIMS U-Pb 연대; Sagong *et al.*, 2005b), 해안화강암(167±2 Ma의 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대; Song and Cho, 2009)은 모두 쥐라기 중기 중 약 10 Ma (172-162 Ma) 기간 동안 일어난 화성활동에 수반되어 생성되었다.

화천화강암 추곡령암체의 대부분을 차지하는 반상흑운모화강암에 대해 이번에 측정한 저어콘 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 가중평균연대는 185.3±0.6 Ma로 쥐라기 전기 플린스바흐절(192.9-184.2 Ma)의 연대를 나타낸다. 이러한 연대는 경기육괴 중부 춘천, 화천, 홍천, 양구 일대에 분포하는 대다수의 현생 화강암류가 쥐라기 중기(174.7-161.5 Ma) 생성 연대를 가지는 것과 달리 그 이전 시기인 전기 쥐라기 플린스바흐절 기간에도 이 일대에서 화성활동이 있었음을 지시한다. 경기육괴에서 쥐라기 전기 플린스바흐절(192.9-184.2 Ma) 또는 이보다 더 오래된 쥐라기 전기 시네무름절-에탕주절(201.4-192.9 Ma) 연대를 가지는 화성암류는 설악산도폭(Kee *et al.*, 2010)에서 오색화강암으로 명명된 함석류석흑운모화강암으로 3개 지점에서 198.6±4.7 Ma, 192.1±4.5 Ma, 189.3±2.6 Ma의 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대를 갖는 화강암처럼 지금까지 경기육괴 동부에 국한되어 산출되는 것으로 알려져 있었으나 이 연구를 통해 경기육괴 중부 화천과 춘천 일대에서도 쥐라기 전기 플린스바흐절 기간 동안 화성활동이 있었음을 알 수 있다(그림 1b).

전술한 바와 같이, 화천화강암은 암상에 따라 암체의 남서부에 분포하는 용화산암체와 북동부에 분포하는 추곡령

암체로 분류되는데, 용화산암체는 171.8±2.8 Ma의 Rb-Sr 전암 연대(Kwon *et al.*, 2006)와 172±5 Ma의 CHIME 모나자이트 연대(Cho *et al.*, 1996)의 쥐라기 중기 연대를 가지는 반면에, 추곡령암체는 185.3±0.6 Ma의 쥐라기 전기 플린스바흐절의 연대를 가진다. 따라서 연구 지역에서는 추곡령암체를 생성한 화성활동이 일어난 후 약 14 Ma 기간이 지난 후 용화산암체를 생성한 화성활동이 일어났음을 알 수 있다. 이러한 연대 자료를 종합하면 연구 지역이 위치하는 경기육괴 중부 춘천, 화천, 홍천, 양구 일대에서는 쥐라기 동안 185.3 Ma부터 162 Ma까지 약 23 Ma 기간에 걸쳐 화성활동이 있었음을 알 수 있다.

5.2. 마그마 생성 근원암의 성질

화강암질 마그마를 형성한 근원암의 성질을 알기 위하여 가장 일반적으로 사용하는 기준 중의 하나가 바로 전암 알루미나 포화지수(A/CNK)이다. 화천화강암 추곡령암체를 구성하는 반상흑운모화강암과 등립질흑운모화강암이 갖는 A/CNK 비(=Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O)의 몰비)의 범위는 각각 1.02-1.08와 1.04-1.13로 모두 1보다 큰 값을 가지며(표 2), 이 값을 A/NK 대 A/CNK 다이어그램에 나타내면 모두 고알루미나 영역에 도시된다(그림 5b). 두 암상이 모두 고알루미질 화강암으로 분류되지만, 그림 5b에서 보여지는 바와 같이 등립질흑운모화강암이 반상흑운모화강암보다 좀 더 넓은 범위의 A/NK와 A/CNK 값을 갖는 차이를 보인다.

이처럼 고알루미나질의 조성을 갖는 마그마의 근원암 성질을 더 자세히 알아보기 위하여 CaO/Na₂O 대 Al₂O₃/TiO₂ 다이어그램(Sylvester, 1998; Jung and Pfänder, 2007; Zhao *et al.*, 2016) 및 Rb/Ba 대 Rb/Sr 다이어그램(Sylvester, 1998;

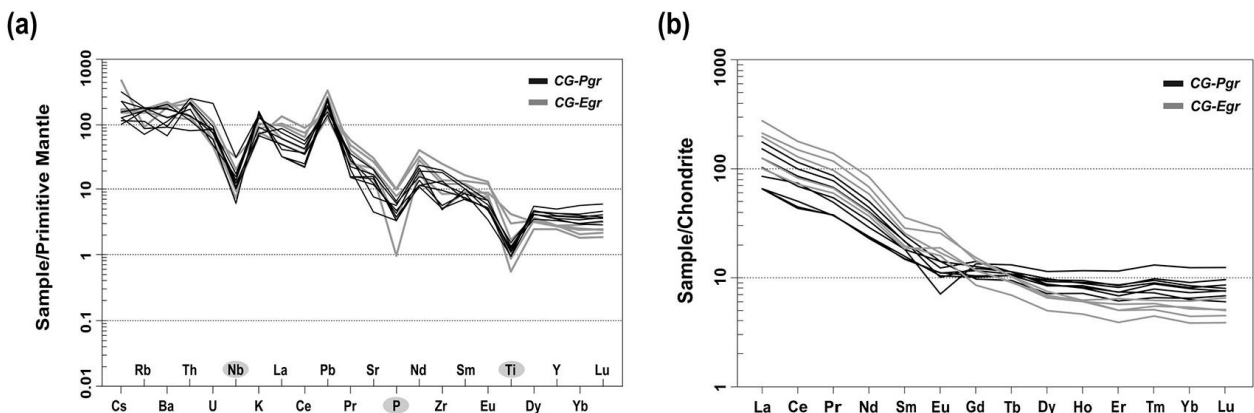


Fig. 8. (a) Primitive Mantle normalized spider diagram for the Chugongnyeong pluton. Normalization values are used after Sun and McDonough (1989). (b) Chondrite normalized REE patterns for the Chugongnyeong pluton. Chondrite values from Boynton (1984). The equigranular biotite granite (CG-Egr) displays a steeper slope and a different trend compared to porphyritic biotite granite (CG-Pgr).

Zhao *et al.*, 2016)에 도시해보았다(그림 9a, 9b). 일반적으로 0.3 이하의 낮은 CaO/Na₂O 비를 가지는 고알루미나질 화강암은 점토가 풍부하고 사장석 함량이 낮은(<5 wt.%) 이질암 기원의 마그마로부터 유래한 것인 반면에, 0.3 이상의 CaO/Na₂O 비를 갖는 고알루미나질 화강암은 점토가 결핍된 사질암 기원의 마그마로부터 생성된 것을 의미한다(Sylvester, 1998). 연구 지역 화강암은 0.3 이상의 CaO/Na₂O 비를 가지며 CaO/Na₂O 대 Al₂O₃/TiO₂ 다이어그램(그림 9a)에서 모두 사질 조성 근원암 영역에 도시된다. 또한 추곡령 암체를 이루는 두 암상은 근원암 분류도인 Rb/Ba 대 Rb/Sr 다이어그램에서 모두 점토가 결핍된 암석인 잡사암(graywacke) 영역에 도시된다(그림 9b). 이러한 지화학적 특성을 종합해 볼 때, 추곡령암체를 형성한 마그마는 점토가 결핍된 잡사암과 같은 사질 조성을 갖는 변성퇴적암류 또는 이에 상응하는 화성암(예를 들어 화강섬록암)으로부터 유래한 것을 알 수 있다(Zhao *et al.*, 2016). 추곡령암체를 형성한 마그마의 근원암이 잡사암 조성을 갖는 변성퇴적암류로부터 기원하였는지 아니면 이에 상응하는 화성암(예를 들어 화강섬록암)으로부터 유래하였는지를 정확히 규명하기 위해서는 이 암석들에 대한 Sr, Nd와 같은 방사성 동위원소와 더불어 변질작용에 대한 내구성이 강한 광물로 알려진 저어콘 등에 대한 산소 안정동위원소 연구가 수행되어야 할 것이다.

5.3. 별개의 용융 사건을 통한 추곡령암체 생성

추곡령암체는 암체의 대부분을 차지하는 반상흑운모화강암과 국부적으로 나타나는 등립질 흑운모화강암이 혼재되어 나타나는 산출양상을 보인다. 두 암상 모두 사장석, 알칼리장석, 석영, 흑운모를 주 구성광물로 갖는 유사한 광물 조합을 가지나, 암상 별 입자 크기의 차이 및 약 1.5-2 cm

정도의 크기를 갖는 알칼리장석과 사장석 반정의 유무에 의해 야외에서 구분된다. 이러한 차이를 보이며 혼재되어 나타나는 두 암상의 성인적인 관계를 알아보기 위하여 지화학적인 자료를 고찰해보았다. 반상흑운모화강암과 등립질 흑운모화강암은 미량원소를 원시맨틀 값(Sun and McDonough, 1989)으로 표준화하여 도시한 스파이더 다이어그램(그림 8a)에서 유사한 변화 양상을 보이나, 희토류원소를 콘드라이트 값(Boynton, 1984)으로 표준화한 REE 패턴(그림 8b)에서는 뚜렷한 차이를 보인다. 즉 반상흑운모화강암이 등립질흑운모화강암에 비해 경희토류원소는 더 낮은 값을 갖는 반면에, 중희토류원소는 더 높은 값을 가지며, 그 결과 REE 패턴에서 반상흑운모화강암이 등립질흑운모화강암보다 더 완만한 기울기를 보일 뿐만 아니라, 반상흑운모화강암은 부(-)의 Eu 이상을 보이는 것과 반대로, 등립질흑운모화강암은 정(+)의 Eu 이상을 보인다(그림 8b).

REE 패턴에서 보여지는 두 암상 사이의 기울기 차이는 다음의 두 가지 가능성에 의해 나타날 수 있다. 첫째, 두 암상이 동일한 마그마로부터 분별정출작용을 통해 형성되었을 경우, 반상흑운모화강암에서 중희토류 원소 값이 더 높게 나타나는 것은 이 암석에 중희토류 원소에 대한 분배계수가 높아 호정적인 성질을 갖는 석류석, 각섬석, 저어콘(Arth, 1976; Pearce and Norry, 1979)과 같은 광물이 정출될 때 가능하다. 그러나 반상흑운모화강암은 구성광물로 석류석이나 각섬석을 함유하지 않는다. 또한 전암의 Zr 함량을 비교했을 때, 등립질흑운모화강암과 반상흑운모화강암에 들어 있는 Zr의 평균 값은 각각 122 ppm과 142 ppm으로 유사하다. 따라서 저어콘의 함량 차이로 인해 반상흑운모화강암이 등립질흑운모화강암보다 더 높은 중희토류원소 값을 갖게 된 것으로 볼 수 없다. 또한 주원소 하커변화도(그림 6)에서 볼 수 있는 것처럼, 마그마의 정출작용 정

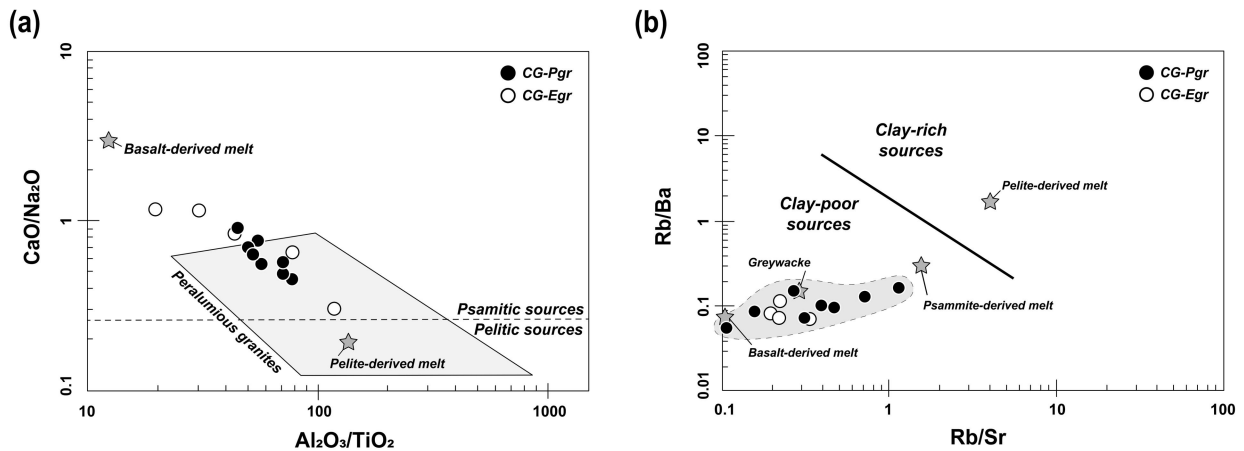


Fig. 9. (a) CaO/Na₂O vs. Al₂O₃/TiO₂ diagram (after Sylvester, 1998; Jung and Pfander, 2007; Zhao *et al.*, 2016) for the Chugongnyeong pluton. and (b) Rb/Ba vs. Rb/Sr diagram (after Sylvester, 1998; Zhao *et al.*, 2016).

도를 나타내는 SiO₂ 함량의 범위를 보면 한 암상이 다른 암상보다 더 많은 SiO₂ 함량을 갖는 것이 아니라 서로 중첩되는 범위의 값을 가질 뿐만 아니라 미량원소 하거변화도(그림 7)에서 SiO₂ 함량 변화에 따라 미량원소 값이 체계적인 변화를 보이지 않는 것으로 보아 두 암상이 동일한 하나의 마그마로부터 분별정출작용을 통해 형성되었을 가능성이 낮음을 알 수 있다.

두 번째로, 유사한 성질을 갖는 근원암으로부터 부분용융 정도를 달리하며 생성된 별개의 마그마로부터 서로 다른 암상이 생성될 때, REE 패턴에서 기울기 차이가 나타날 수 있다. 일반적으로 (La/Yb)_N 비는 부분용융 정도를 반영하는 값으로 부분용융 정도가 낮을수록 그 값은 커진다. 즉, 등립질흑운모화강암을 형성한 마그마가 반상흑운모화강암을 형성한 마그마보다 더 낮은 정도의 부분용융이 일어나면서 생성되었을 수 있다. 따라서 추곡령암체의 반상흑운모화강암과 등립질흑운모화강암에서 나타나는 지화학적 및 암석기재학적 특성의 차이는 이 두 암상이 하나의 동일한 마그마로부터 분별정출작용을 통해 생성된 것이 아니라, 별개의 용융 사건을 통해 생성된 서로 다른 마그마로부터 기원하였을 가능성이 높음을 지시한다. 두 암상에서 나타나는 Eu 이상의 차이(그림 8b)도 이들이 별개의 마그마로부터 서로 다른 사장석 분별정출작용 과정을 경험하였거나 유사한 근원암으로부터 서로 다른 부분용융 사건을 경험하였을 가능성이 있음을 시사한다. 이들이 서로 유사한 광물 조합을 갖는 것과 스파이더 다이어그램(그림 8a)에서 유사한 변화 양상을 보이는 것은 두 암상이 서로 유사한 근원암으로부터 부분용융의 정도를 달리하며 생성되었기 때문으로 생각된다.

5.4. 용융조건 및 조구조환경

저어콘 포화온도(zircon saturation temperature)는 마그마 내에서 저어콘이 정출되는 온도(T_{Zr})를 기반으로 화강암의 부분용융이 발생한 온도를 추정할 수 있는 단순하면서도 강력한 도구로 사용되고 있다(Watson and Harrison, 1983; Hanchar and Watson, 2003; Miller et al., 2003).

화천화강암 추곡령암체를 형성한 마그마 근원암의 부분용융이 일어난 온도를 알아보기 위하여 화학분석 결과 얻은 주원소 함량과 Zr 함량을 다음과 같은 저어콘 포화 지온계(zircon saturation thermometer)에 대입하여 저어콘 포화 온도(T_{Zr})를 계산하였다(Watson and Harrison, 1983; Hanchar and Watson, 2003).

$$T_{Zr} (^{\circ}C) = 12,900 / [2.95 + 0.85M + \ln(Zr_{zircon} / Zr_{melt}) - 273.15]$$

여기에서 M은 (Na+K+2Ca)/(Al*Si)로서, 전암 내에 들어 있는 각각의 원소의 양이온 프랙션(fraction)을 더해 계산한 값이며, Zr_{zircon} 값은 일반적인 저어콘의 Zr 함량인 496,000 ppm (Miller et al., 2003)을 대입하여 계산하였다. 저어콘 결정 내 상속핵의 존재 유무는 위 식을 이용하여 계산한 저어콘 포화온도(T_{Zr})가 마그마 생성온도의 최저한계를 나타내는지 아니면 최고한계를 나타내는지에 영향을 미친다. 상속핵이 존재하면 전체 Zr 함량 중 일부는 상속핵에 존재하던 것이므로 마그마의 Zr 함량이 더 높게 평가되기 때문에 T_{Zr} 값은 마그마 생성온도의 최고 한계를 지시하는 반면에, 상속핵이 존재하지 않을 경우 T_{Zr} 값은 마그마로부터 저어콘이 정출되기 시작하는 온도를 지시하는 것이므로 마그마 생성온도의 최저한계를 나타낸다(Miller et al., 2003; Sagong et al., 2005a). 추곡령암체 반상흑운모화강암 내 저어콘에서는 음극선발광영상에서 대부분 상속핵을 가지고 있는 것이 관찰된다(그림 3). 따라서 위의 식을 통해 얻은 T_{Zr} 값은 마그마 생성온도의 최고한계를 나타낸다고 볼 수 있다. 화천화강암 추곡령암체에 대해 계산한 T_{Zr} 값(표 3)은 반상흑운모화강암이 696-813°C (평균 755°C), 등립질흑운모화강암이 710-840°C (평균 764°C)로, Zr 함량과 M을 통해 도시한 다이어그램에서 두 암상은 700-800°C 온도 범위의 저어콘 포화 온도선에 잘 부합한다(그림 10).

이러한 온도 조건은 연구 지역으로부터 서쪽으로 약 40 km 떨어진 경기육괴 중부 광덕산 일대에 분포하는 중기 쥐라기 고알루미나질 화강암질암류(172-164 Ma; Park et al., 1997; Kim et al., 1999a; Song and Cho, 2009), 연구 지역으로부터 북서쪽으로 약 50 km 정도 떨어진 전기 백악기 압트절-알바절 시기에 생성된 명성산화강암(112 Ma; Hwang and Kihm, 2007) 및 인근 철원분지 내에 분포하는 지장봉

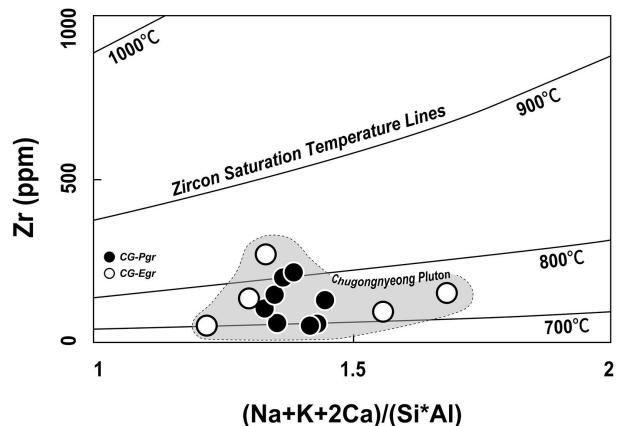


Fig. 10. Binary plot of M=(Na+K+2Ca)/(Si*Al) vs. Zr in ppm for the Chugongnyeong pluton (after Watson and Harrison, 1983). The isotherms are zircon saturation levels that were calculated.

응회암(113 Ma; Hwang *et al.*, 2011)에 대해 계산한 T_x 평균값인 762°C(광덕산 일대 화강암류; Han *et al.*, 2020), 769°C(명성산화강암; Yi *et al.*, 2017) 및 753°C(지장봉응회암; Yi *et al.*, 2017)와 비슷하다. 뿐만 아니라 연구 지역으로부터 서쪽으로 약 140 km 정도 떨어진 인천 강화군에 분포하는 전기 백악기 석모도화강암(111 Ma; Kim *et al.*, 2012)의 T_x 값(평균 739°C; Yi *et al.*, 2017)과도 유사하다. 한편 철원 분지 내에 분포하는 트라이아스기 후기 보장산조면암(230.5 ± 1.5 Ma; Hwang *et al.*, 2017)은 이들보다 훨씬 더 높은 T_x 값(평균 976°C)을 갖는 것으로 보고되었다(Yi *et al.*, 2017). Hwang and Ahn (2017)은 A1-형 화성암의 특성을 갖는 보장산조면암이 페름-트라이아스기 송림조산운동 기간에 일어난 충돌작용 이후 확장성 환경에서 발달한 대륙 열곡에서 생성된 것으로 해석하였다. Yi *et al.* (2017)은 철원분지 일대의 조구조 환경이 보장산조면암이 생성된 230 Ma 경에 충돌 환경에서 확장성 환경으로 바뀌면서 지각의 두께가 얇아지고 맨틀 하부로부터 열이 상승하면서 지온 구배를 높인 반면에, 지장봉응회암이나 명성산화강암이 생성된 백악기 전기 압트절-알비절 시기에는 섭입대 환경하에 놓이면서 지온 구배가 트라이아스기보다 감소한 것으로 보고하였다.

이러한 사실은 연구 지역인 경기육괴 중부 지역과 그 일대의 지온 구배가 쥐라기 전기부터 쥐라기 중기까지, 그리고 백악기 전기 동안에 서로 유사했음을 의미한다. 경기육괴 중부에 위치하는 연구 지역의 쥐라기 전기 화강암인 추곡령암체의 T_x 값이 광덕산, 명성산, 철원 분지 및 석모도 일대에 분포하는 쥐라기 중기 및 백악기 전기 화성암류와 유사한 T_x 값을 갖는 것은 경기육괴 중부 일대가 쥐라기 전기에도 쥐라기 중기와 유사한 조구조 환경인 섭입대였을 가능성을 지시한다. 최근 190-170 Ma 기간에 한반도를 포함하는 대륙권 아래로 해양판이 완만한 경사를 가지며 섭입하면서 한반도 중부와 남부에서 쥐라기 화강암류가 활발하게 생성되었음이 보고되었다(Cheong *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2024). 추곡령암체는 암체의 동쪽 경계를 따라 추곡령암체와 동시기에 관입한 것으로 함수광물인 각섬석을 다량 함유하는 고철질암인 각섬석반려암(184.3 Ma, 미발표 자료)이 접하며 산출되며(그림 1c), Moon *et al.* (2022)은 고철질암(각섬석반려암)이 섭입대 환경에서 생성되었을 가능성에 대해 보고하였다. 즉 추곡령암체는 섭입대 환경에서 섭입하는 해양판 상부에 놓여있던 대륙암석권 맨틀이 부분용융 되어 생성된 고철질 마그마가 하부지각으로 상승함에 따라 열을 공급받은 하부지각 물질이 용융되면서 생성된 것으로 보인다. 추곡령암체가 섭입대 환경에서 생성되었을 가능성은 원시맨틀 값(Sun and McDonough, 1989)으로 표준화한 스파이더 다이어그램(그림 8a)에서 친석원

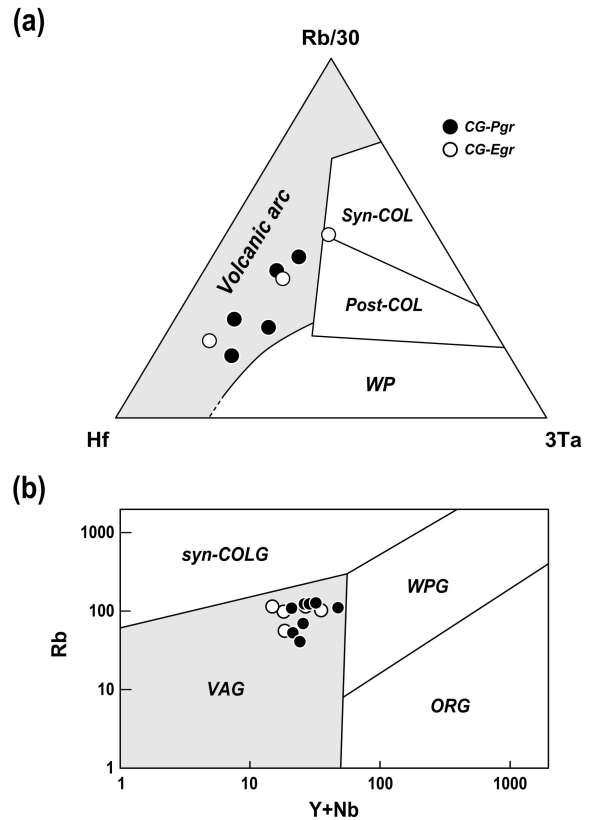


Fig. 11. (a) Hf-Rb/30-3Ta ternary discrimination diagram after Harris *et al.* (1986). The Chugongnyeong pluton is plotted in the VAG field. (b) Rb vs. Y+Nb tectonic discrimination diagram (after Pearce *et al.*, 1984; Förster *et al.*, 1997) of the granites in Chugongnyeong pluton. Syn-COLG: Syn-collision granites, VAG: Volcanic arc granites, WPG: Within plate granites, ORG: Ocean ridge granites.

소인 Cs, Rb, Ba가 부화되고, 고장력원소인 Nb, P, Ti가 부(-)의 이상 형태를 보이는 사실과도 잘 일치한다(Condie, 1989; Wilson, 1989). 뿐만아니라 연구 지역 화강암류를 조구조 판별도(Pearce *et al.*, 1984; Harris *et al.*, 1986)에 도시했을 때 화산호 환경에 도시되는 것도 섭입대 환경과 잘 부합한다(그림 11).

6. 결론

경기육괴 중부에 분포하는 화천화강암은 암체의 남서부를 차지하는 용화산암체와 북동부를 차지하는 추곡령암체로 구성되며, 추곡령암체는 암체의 대부분을 차지하는 반상흑운모화강암과 상대적으로 소량 산출되는 등립질흑운모화강암으로 이루어져 있다. 추곡령암체 반상흑운모화강암에 대해 수행한 LA-MC-ICP-MS 저어콘 U-Pb 연대는 185.3 ± 0.6 Ma을 나타낸다. 이러한 결과는 쥐라기 중기의 관입 연대를 가지는 용화산암체(172 ± 5 Ma)와 달리 추곡령암체는

쥐라기 전기 플린스바흐절(192.9-184.2 Ma) 기간에 관입하였으며 용화산암체 이전에 생성되었음을 지시한다. 이는 경기육괴 동부 설악산 일대에서 제한적으로 보고된 쥐라기 전기 플린스바흐절 기간의 화성활동이 연구 지역인 경기육괴 중부 화천과 춘천 일대에서도 있었으며 쥐라기 동안 185.3 Ma부터 162 Ma까지 약 23 Ma 기간에 걸쳐 화성활동이 있었음을 알려준다. 추곡령암체를 구성하는 반상흑운모화강암과 등립질흑운모화강암은 모두 고알루미나질 화강암에 속하며, 모두 점토가 결핍된 잡사암과 같은 사질 조성의 변성퇴적암류 또는 이에 상응하는 화성암으로부터 유래하였다. 반정의 존재 유무 및 입자 크기와 같은 조직적인 차이를 보이는 반상흑운모화강암과 등립질흑운모화강암은 REE 패턴에서도 차이를 보이는데, 이것은 두 암상이 서로 다른 별개의 용융 사건을 통해 생성되었음을 시사한다. 추곡령암체는 조구조 판별도에서 화산호 영역에 도시되며, 스파이더 다이어그램에서 친석원소인 Cs, Rb, Ba가 부화되고 고장력원소인 Nb, Ti, P가 결핍된 지화화학적 특성을 보여주는 것으로 보아 섭입대 환경에서 생성되었음을 알 수 있다. 전암 저어콘 포화 지온계를 이용하여 계산한 용융 온도는 반상흑운모화강암이 696-813°C (평균 755°C), 등립질흑운모화강암이 710-840°C (평균 764°C)로 경기육괴 중부 연구 지역 일대에서 쥐라기 중기와 백악기 전기 동안 형성된 화강암류가 형성된 근원암의 용융 온도와 유사한 값을 갖는다.

감사의 글

이 논문은 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업이다(No.2019R1A6A1A03033167). 본 논문에 많은 도움을 주신 익명의 심사위원 두 분과 편집위원회 감사드리며, 연대측정에 도움을 주신 신승원 교수님께 감사드립니다.

REFERENCES

Arth, J.G., 1976, Behavior of trace elements during magmatic processes - A summary of theoretical models and their applications. *Journal of Research of the U.S. Geological Survey*, 4, 41-47.

Boynton, W.V., 1984, Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. *Developments in geochemistry*, 2, 63-114.

Cheong, A.C.S. and Jo, H.J., 2020, Tectonomagmatic evolution of a Jurassic Cordilleran flare-up along the Korean Peninsula: Geochronological and geochemical constraints from granitoid rocks. *Gondwana Research*, 88, 21-44.

Cheong, C.-S. and Kim, N.-H., 2012, Review of Radiometric Ages for Phanerozoic Granitoids in Southern Korean Peninsula. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 21, 173-192 (in Korean with English abstract).

Cho, D.L., Suzuki, K., Adachi, M. and Chwae, U., 1996, A preliminary CHIME age determination of monazite from metamorphic and granitic rocks in the Gyeonggi massif, Korea. *Journal of Earth and Planetary Sciences*, 43, 49-65.

Choi, P.Y., Kim, H.C., Lee, S.R. and Gwon, S.H., 2009, Geological report of the Inje sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 52 p (in Korean with English abstract).

Choi, P.Y., Lee, S.R. and Lim, S.B., 2007, Geological report of the Yanggu sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 38 p (in Korean with English abstract).

Condie, K.C., 1989, Origin of the Earth's crust. *Global and Planetary Change*, 75, 57-81.

Han, C.H., Jeon, H.S. and Park, Y.-R., 2020, Geochemical Studies on the Petrogenesis of Jurassic Peraluminous Granitic Rocks in the area of Gwangdeoksan in the Northern Gyeonggi Massif. *Korean Journal of Mineralogy and Petrology*, 33, 325-337 (in Korean with English abstract).

Hanchar, J.M. and Watson, E.B., 2003, Zircon Saturation Thermometry. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53, 89-112.

Harris, N.B.W., Pearce, J.A. and Tindle, A.G., 1986, Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. Geological Society, London, Special Publications, 19, 67-81.

Hwang, J.H. and Kihm, Y.H., 2007, Geological Report of the Jipori Sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 54 p (in Korean with English abstract).

Hwang, S.K. and Ahn, U.S., 2017, Geochemistry and Tectonic Implications of Triassic Bojongsan Trachyte in the Southern Margin of the Imjingang Belt, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 26, 113-125 (in Korean with English abstract).

Hwang, S.K., An, Y.-M. and Yi, K.-W., 2011, SHRIMP Age Datings and Volcanism Times of the Igneous Rocks in the Cheolwon Basin, Korea. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 20, 231-241 (in Korean with English abstract).

Hwang, S.K., Kee, W.-S. and Yi, K., 2017, SHRIMP U-Pb Zircon dating and stratigraphic implications of the Bojongsan Trachyte in the Imjingang belt, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 423-432 (in Korean with English abstract).

Jung, S. and Pfänder, J.A., 2007, Source composition and melting temperatures of orogenic granitoids: constraints from CaO/Na₂O, Al₂O₃/TiO₂ and accessory mineral saturation thermometry. *European Journal of Mineralogy*, 19, 859-870.

Kee, W.S., Kim, H.C., Kim, B.C., Choi, S.J., Park, S.I. and Hwang, S.K., 2010, Geological report of the Seoraksan sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 94 p (in Korean with English abstract).

Kee, W.S., Kim, S.W., Hong, P.S., Lee, B.C., Cho, D.R., Byun, U.H., Ko, K., Kwon, C.W., Kim, H.C., Jang, Y., Song, K.Y., Koh, H.J. and Lee, H.J., 2019, 1:1,000,000 Geological Map of Korea. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.

Kim, C.B., Park, Y.S., Chang, H.W. and Turek, A., 1999a, Geochronology, Petrology and Tectonics of Triassic-Jurassic plutonic rocks of the Ryeongnam and Gyeonggi Massifs, Korea. *ICOG-9(The Ninth International Conference on Geochronology, Cosmochronology and Isotope Geology)*, 65 p.

Kim, C.-B., Turek, A., Chang, H.-W., Park, Y.-S. and Ahn, K.-S.,

- 1999b, U-Pb zircon ages for Precambrian and Mesozoic plutonic rocks in the Seoul-Cheongju-Chooncheon area, Gyeonggi massif, Korea. *Geochemical Journal*, 33, 379-397.
- Kim, S.W., Kwon, S., Ryu, I.C., Jeong, Y.J., Choi, S.J., Kee, W.S., Yi, K., Lee, Y.S., Kim, B. and Park, D., 2012, Characteristics of the Early Cretaceous Igneous Activity in the Korean Peninsula and Tectonic Implications. *Journal of Geology*, 120, 625-646.
- Kim, S.W., Lee, B.Y., Lee, S.H., Kee, W.S., Santosh, M. and Ko, K., 2024, Early to middle jurassic (ca. 182-164 Ma) fractionated granitoids in the Korean Peninsula: Implication for the tectono-magmatic history of East Asia. *Gondwana Research*, 125, 229-252.
- Kwon, S.-T., Cheong, C.S. and Sagong, H., 2006, Rb-Sr isotopic study of the Hwacheon granite in northern Gyeonggi massif, Korea: A case of spurious Rb-Sr whole rock age. *Geosciences Journal*, 10, 137-143.
- Lee, B.J., Kim, Y.B. and Kee, W.S., 2006, Geological Report of the Gisan Sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 39 p (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, 197-226.
- Ludwig, K.R., 2008, User's manual for ISOPLOT 3.6: a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley, CA, Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4, 78.
- Maniar, P.D. and Piccoli, P.M., 1989, Tectonic discrimination of granitoids. *GSA Bulletin*, 101, 635-643.
- Middlemost, E.A., 1994, Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-science reviews*, 37, 215-224.
- Miller, C.F., McDowell, S.M. and Mapes, R.W., 2003, Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. *Geology*, 31, 529-532.
- Moon, I.-H., Park, Y.-R. and Kwon, K.D., 2022, Geochemical characteristics and Petrography of Ultramafic/Mafic rocks and Biotite Granite in Chugokri, Buksanmyeon, Chuncheon. Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts), Changwon, October 25-27, 350 p (in Korean).
- Park, K.H., Lee, B.J., Cho, D.L. and Kim, C.B., 1997, Geological report of the Hwacheon sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 33 p (in Korean with English abstract).
- Paton, C., Hellstrom, J., Paul, B., Woodhead, J. and Hergt, J., 2011, Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26, 2508-2518.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G., 1984, Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25, 956-983.
- Pearce, J.A. and Norry, M.J., 1979, Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69, 33-47.
- Sagong, H., Kwon, S.-T., Cho, D.-R. and Jwa, Y.-J., 2005a, Relative Magma Formation Temperatures of the Phanerozoic Granitoids in South Korea Estimated by Zircon Saturated Temperature. *Journal of the Geological Society of Korea*, 14, 83-92 (in Korean with English abstract).
- Sagong, H., Kwon, S.-T., Jeon, E.-Y. and Mertzman, S.A., 1997, Petrology and geochemistry of the Hwacheon granite. *Journal of the Geological Society of Korea*, 33, 99-110 (in Korean with English abstract).
- Sagong, H., Kwon, S.-T. and Ree, J.-H., 2005b, Mesozoic episodic magmatism in South Korea and its tectonic implication. *Tectonics*, 24.
- Sláma, J., Košler, J., Condon, D.J., Crowley, J.L., Gerdes, A., Hanchar, J.M., Horstwood, M.S.A., Morris, G.A., Nasdala, L., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B., Tubrett, M.N. and Whitehouse, M.J., 2008, Plešovice zircon - A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249, 1-35.
- Song, K.Y. and Cho, D.L., 2009, Geological report of the Mandaeri sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 72 p (in Korean with English abstract).
- Song, Y.S., Park, K.H., Park, M.E., Cao, L., Jin, W., Zhang, X. and Ryu, H.J., 2001, Petrological, Geochemical and Geochronological Studies of Precambrian Basement in Northeast Asia Region: 2. Zircon Ages of Some Metamorphic Rocks from Gyeonggi Massif. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 10, 95-105 (in Korean with English abstract).
- Sun, S.-S. and McDonough, W.F., 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications, 42, 313-345.
- Sylvester, P.J., 1998, Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45, 29-44.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1995, The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics*, 33, 241-265.
- Watson, E.B. and Harrison, T.M., 1983, Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64, 295-304.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010, Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. *American Mineralogist*, 95, 185-187.
- Wiedenbeck, M.A.P.C., Alle, P., Corfu, F.Y., Griffin, W.L., Meier, M., Oberli, F.V. and Spiegel, W., 1995, Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards newsletter*, 19, 1-23.
- Wilson, M., 1989, *Igneous Petrogenesis*. Springer, London, 465 p.
- Yi, E.J., Park, H.E. and Park, Y.-R., 2017, Geochemical Studies on Petrogenesis of the Cretaceous Myeongseongsan Granite in the Northwestern Gyeonggi Massif. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 26, 327-339 (in Korean with English abstract).
- Zhao, L., Guo, F., Fan, W., Zhang, Q., Wu, Y., Li, J. and Yan, W., 2016, Early Cretaceous potassic volcanic rocks in the Jiangnan Orogenic Belt, East China: Crustal melting in response to subduction of the Pacific-Izanagi ridge?. *Chemical Geology*, 437, 30-43.