



Article

경기육괴 북중부에 분포하는 춘천화강암체의 저어콘 U-Pb 연령 및 지구화학

문인혜, 박영록[‡], 권기덕

강원대학교 지질학과

Zircon U-Pb age and geochemistry of the Chuncheon granite in the north central Gyeonggi massif, Korea

In-Hye Moon, Young-Rok Park[‡], Kideok D. Kwon

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

Received: December 26, 2024 / Revised: March 28, 2025 / Accepted: May 7, 2025

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

요약: 경기육괴 북중부에 분포하는 춘천화강암은 백색의 알칼리장석 및 석영을 반정으로 함유하는 백색 반상흑운모화강암과 담홍색의 알칼리장석을 반정으로 갖는 담홍색 반상흑운모화강암으로 이루어져 있다. 백색 반상흑운모화강암은 183.8±0.8 Ma, 담홍색 반상흑운모화강암은 167.5±0.3 Ma의 저어콘 U-Pb 연대를 가지며, 전암 저어콘 포화 지온계를 이용하여 계산한 저어콘 포화온도 (T_Z)의 평균 값은 각각 788.9°C 와 810.7°C 이다. 두 암상은 서로 유사한 지화학적 특성을 보여주는데, 이는 두 암상이 모두 사장석을 잔류광물로 함유하는 잡사암 또는 S-형 화강암질암 근원 물질로부터 유사한 정도의 부분용융을 통해 형성된 고알루미나질 마그마로부터 생성된 것을 지시한다. 춘천화강암은 조구조 판별도에서 화산호 영역에 도시되며, 스파이더 다이어그램에서 친석원소인 Cs, Rb, Ba이 부화되고 고장력원소인 Ta, Nb, P, Ti가 결핍된 지화학적 특성을 보여주는 것으로 보아 섭입대 환경에서 생성되었음을 알 수 있다. 경기육괴 북중부 춘천-화천 일대에서는 185 Ma부터 167 Ma까지 연속적인 마그마 활동이 있었다.

주요어: 춘천화강암, 경기육괴, 저어콘 U-Pb 연대, 쥐라기 화성활동

ABSTRACT: The Chuncheon granite in the north central Gyeonggi massif consists of white porphyritic biotite granite containing white alkali feldspar and quartz phenocrysts, and pink porphyritic biotite granite with pink alkali feldspars phenocryst. White porphyritic biotite granite and pink porphyritic biotite granite have 183.8±0.8 Ma and 167.5±0.3 Ma zircon U-Pb age, respectively. Whole-rock zircon saturation thermometer indicates that white porphyritic biotite granite and pink porphyritic biotite granite of the Chuncheon granite formed at ca. 788.9°C (mean value) and 810.7°C (mean value), respectively. Two lithologies show similar geochemical characteristics, which indicates that both white porphyritic biotite granite and pink porphyritic biotite granite formed from peraluminous magma originated from graywacke or S-type granitoid protolith with residual plagioclase via similar degree of partial melting through distinct melting events. The enriched values of large ion lithophile elements of Cs, Rb, Ba, and negative trough of Ta, Nb, P, Ti on the spider diagram suggest that the Chuncheon granite formed in subduction tectonic environment. There were continuous magma activities from 185 Ma to 167 Ma in the Chuncheon-Hwacheon area in the north-central Gyeonggi massif, Korea.

Key words: Chuncheon granite, Gyeonggi massif, zircon U-Pb age, Jurassic igneous activity

1. 서론

한반도 지체구조상 경기육괴 북중부에 위치하는 화천, 양구, 홍천 일대에는 쥐라기 중기(174.7-161.6 Ma)에 생성된 화성암류가 다수 분포하고 있다. 이에 해당하는 암체로는 화천화강암 용화산암체(172±5 Ma의 모나자이트 CHIME 연대; Cho *et al.*, 1996), 사창리반상화강암(164.7±2.4 Ma의 TIMS 저어콘 U-Pb 연대; Kim *et al.*, 1998), 오타리반려암(166.2±1.2 Ma의 TIMS 저어콘 U-Pb 연대; Kim *et al.*, 1998), 양구화강암(172.8±1.0 Ma의 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대; Choi *et al.*, 2009), 홍천화강암(162.2±1.9 Ma의 TIMS 스핀 U-Pb 연대; Sagong *et al.*, 2005b) 등이 있으며, 이들은 모두 172 Ma부터 162 Ma까지 약 10 Myr 기간에 걸쳐 일어난 쥐라기 중기 화성활동에 수반되어 생성되었다. 한편 이들 쥐라기 중기 화성암체와는 달리 화천화강암 추곡령암체의 생성 연대는 185.3±0.6 Ma (LA-MC-ICP-MS 저어콘 U-Pb 연대; Moon *et al.*, 2024)로, 경기육괴 북중부 일대에서 쥐라기 전기 플린스바흐절(192.9-184.2 Ma) 기간에도 화성활동이 있었음을 알려준다.

화천화강암체 남쪽에 위치하는 춘천시 일대에는 높은 산지 지형을 이루는 선캄브리아 시대 편마암류에 둘러싸여 분지 지형을 이루는 춘천화강암체가 남북으로 약 16 km, 동서로 약 8 km인 타원형의 암주상 암체로 분포하고 있다. Jin *et al.* (1993)은 춘천화강암을 등립질 조직을 갖는 중립질 흑운모 화강암으로 분류하였으며, 이 암체의 동부에서 채취한 시추공에서 세립의 백운모가 산출되는 것이 화천화강암 용화산암체에서 백운모가 산출되는 것과 유사하다는 사실에 근거하여 춘천화강암이 화천화강암과 동원 화강암질 마그마로부터 분화되었을 가능성을 제시하였다.

Jin *et al.* (1993)은 또한 이 암체에 대한 Rb-Sr, K-Ar 및 희트트랙 연구를 통해 전암과 광물 연령을 측정하고, 이를 바탕으로 춘천화강암에 대해 196±9 Ma의 Rb-Sr 전암 연대와 열사를 보고하였다. 그러나 Jin *et al.* (1993)에 의해 보고된 196±9 Ma의 Rb-Sr 전암 연대는 Rb과 Sr 원소가 유체에 의해 비교적 영향을 잘 받는 원소이기 때문에 보다 정확한 연대를 규명하기 위해서는 저어콘을 활용한 연대가 제시되어야 할 것이다.

따라서 이 연구에서는 춘천화강암에 대한 정밀 야외조사를 통해 알아낸 정확한 산출 양상 및 주원소와 미량원소 분석을 통한 지화학적 특성과 저어콘 U-Pb 연대를 제시함으로써, 지금까지 경기육괴 북중부에서 경계가 잘 정의된 심성암체 중 아직까지 연대가 정확하게 밝혀져 있지 않은 춘천화강암의 생성연대 및 성인을 밝힐 뿐만 아니라 화천화강암 추곡령암체를 생성한 쥐라기 전기 화성활동이 춘천 일대에서도 있었는지를 정확히 규명하고자 한다.

2. 지질 개요 및 암석 기재

경기육괴 북중부에 위치한 춘천화강암은 선캄브리아 시대 호상흑운모편마암과 우백질편마암 및 석류석흑운모편암으로 구성된 용두리 편마암 복합체를 관입하였다(그림 1). 춘천화강암체의 북서쪽과 서쪽에는 주로 석류석흑운모편암과 우백질편마암이, 북동쪽과 남동쪽에는 호상흑운모편암이 우세하게 분포하고 있다. 춘천화강암 동쪽으로는 하부로부터 평촌리층, 신이리층, 감정리층으로 구성된 선캄브리아 시대의 구봉산층군과 이를 관입한 888 Ma의 춘천각섬암이 분포한다(Lee, D.S. *et al.*, 1974; Park *et al.*, 1974; Lee and Cho, 1995; Lee, B.Y. *et al.*, 2020). 춘천화강암체 남서쪽과 남동쪽에는 선캄브리아 시대 의암층군 규암이 분포한다(Park *et al.*, 1974). 용두리 편마암 복합체는 남정석이 안정한 바로비안 계열의 변성작용을 겪었으며, 변성시기는 1.93-1.88 Ga로 알려져 있다(Cho and Kim, 1993; Lee *et al.*, 2014).

춘천화강암은 춘천 일대에 전반적으로 분포하는 백색의 알칼리장석 및 석영 반정을 가지는 백색 반상흑운모화강암(이하 백색 반상화강암)과 담홍색의 알칼리장석을 반정으로 갖는 담홍색 반상흑운모화강암(이하 담홍색 반상화강암)이 혼재하여 나타나는 산출 양상을 보인다(그림 1, 2a). 백색 반상화강암은 부분적으로 반정을 함유하지 않는 등립질 조직을 보이며, 춘천화강암체 연변부에서는 세립 내지 중립질의 조직을 가지며 산출되기도 한다. 백색 반상화강암과 담홍색 반상화강암은 대부분 풍화 정도가 심하여 신선한 노두 관찰이 어렵기 때문에 지질도에 두 암상 간의 명확한 지질경계선을 나타내기가 어려워 지질도에서는 노두 관찰이 가능한 지점에 암상 별로 기호를 달리하여 표시하였다(그림 1). 일부 지역에서 백색 반상화강암을 관입하고 있는 담홍색 반상화강암이 발견되기 때문에 담홍색 반상화강암이 후기의 암석일 가능성이 높다(그림 2a, 2b). 춘천시 신사우동 우두산 인근(시료 CC7 채취 지역)에서는 섬록암이 백색 반상흑운모화강암 내에 포획되어 나타나는 것이 관찰된다(그림 2c). 춘천화강암체 서부에는 규장암과 석영반암이 암맥상으로 관입하며 산출된다.

백색 반상화강암은 주 구성광물로 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모를 가지며, 백운모, 녹니석, 각섬석을 소량 함유한다(그림 3a, 3b). 백색 반상화강암 내 반정은 주로 알칼리장석으로 구성되며 일부 석영, 사장석, 용리조직을 보이는 알칼리장석이 반정으로 산출되기도 한다(그림 3d). 흑운모는 자형 내지 반자형의 형태를 가지며(그림 3e), 일부 녹니석으로 변질되어 나타나는 특징을 보인다.

약 1-3 cm의 직경을 갖는 담홍색의 알칼리 장석을 반정으로 가지는 담홍색 반상화강암은 중-조립질의 석기를 가

지며 전반적으로 백색 반상화강암에 비해 풍화가 덜 진행되었다(그림 3c). 담홍색 반상화강암은 석영, 알칼리장석, 사장석, 미사장석, 흑운모를 주 구성광물로, 아주 소량의 각섬석을 부수광물로 가진다(그림 3f). 반자형 내지 타형의 흑운모는 녹니석으로 변질된 부분이 나타난다. 일부 시료에서는 백운모가 관찰되며, 이는 입자 크기가 작을 뿐만 아니라 타형으로 산출되는 점으로 보아 변질작용에 의해 형성된 2차 백운모로 추정된다.

모드(mode) 분석 결과 백색 반상화강암과 담홍색 반상화강암은 서로 비슷한 양의 석영, 사장석, 알칼리장석을 가지는 것으로 관찰되며, QAP 다이어그램(Streckeisen, 1974)에서 모두 화강암 영역에 도시된다(그림 4; 표 1).

백색 반상화강암의 포획암으로 산출되는 섬록암질암은 중-세립질의 입자 크기를 가지고, 주 구성광물로 흑운모, 사장석, 석영이 존재하며 각섬석이 소량 관찰된다(표 1).

섬록암 내 주요 유색광물인 흑운모는 대부분 변질이 진행되지 않았으며, 임의의 방향으로 배열되며 산출된다.

3. 연구방법

백색 반상화강암과 담홍색 반상화강암에서 저어콘을 분리하여 LA-MC-ICP-MS (laser ablation - multi collector - inductively coupled plasma - mass spectrometry)를 사용한 U-Pb 연대 측정을 수행하였다. 저어콘 분리는 Cheong *et al.* (2013)에 기술되어 있는 방식으로 수행하였다. 저어콘 분리 대상 시료는 가능한 풍화가 진행되지 않은 신선한 시료를 선택하였다. 저어콘은 에폭시 마운트에 고착시켜 입자의 단면이 나오도록 연마하였다. 분석 전 저어콘 입자의 내부 구조를 확인하기 위해 한국기초과학지원연구원 오창센터의 주사전자현미경(scanning electron microscope; SEM;

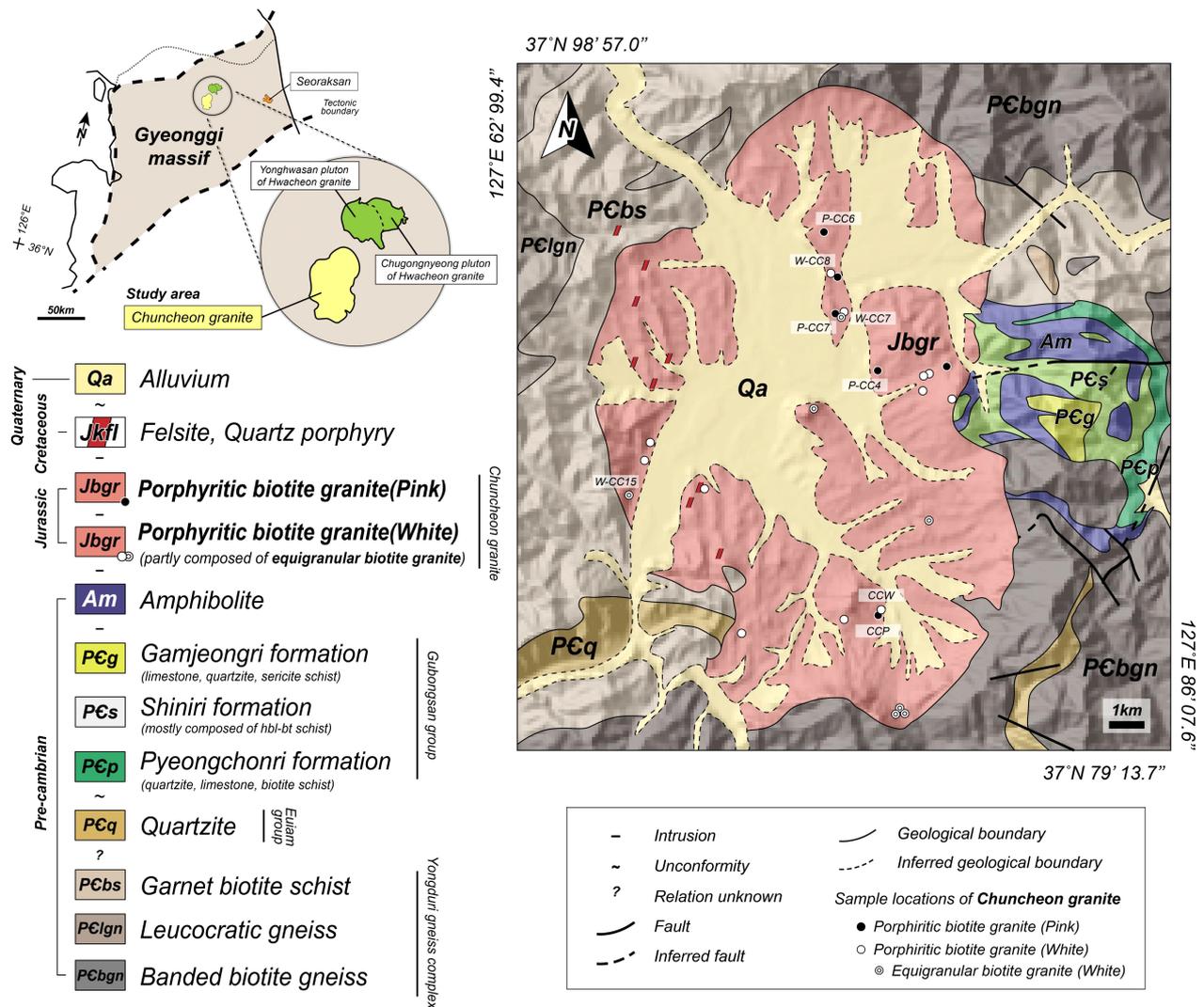


Fig. 1. Geological map of the Chuncheon granite in the north central Gyeonggi massif (GM) modified after Jin *et al.* (1993).

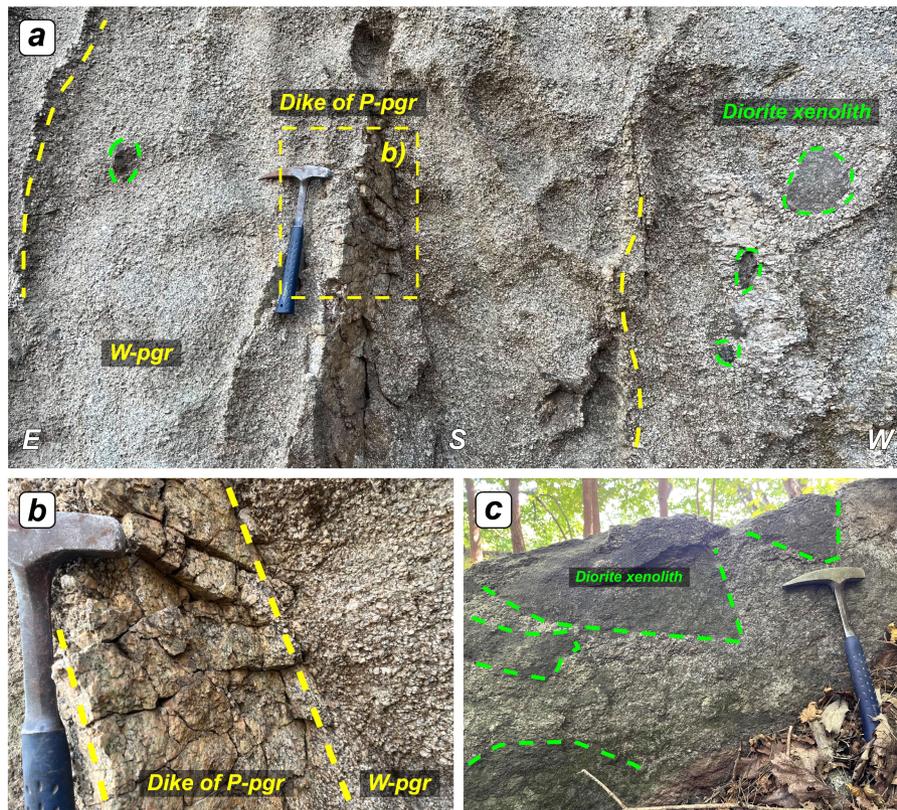


Fig. 2. (a) Photograph of outcrop of the Chuncheon granite. The pink porphyritic biotite granite (P-pgr) occurs as a dyke in the white porphyritic biotite granite (W-pgr) which includes diorite xenoliths. (b) Enlargement of the pink porphyritic biotite granite (P-pgr) dyke within the white porphyritic biotite granite (W-pgr) in Fig. 2a. (c) Photograph of diorite xenoliths in the white porphyritic biotite granite.

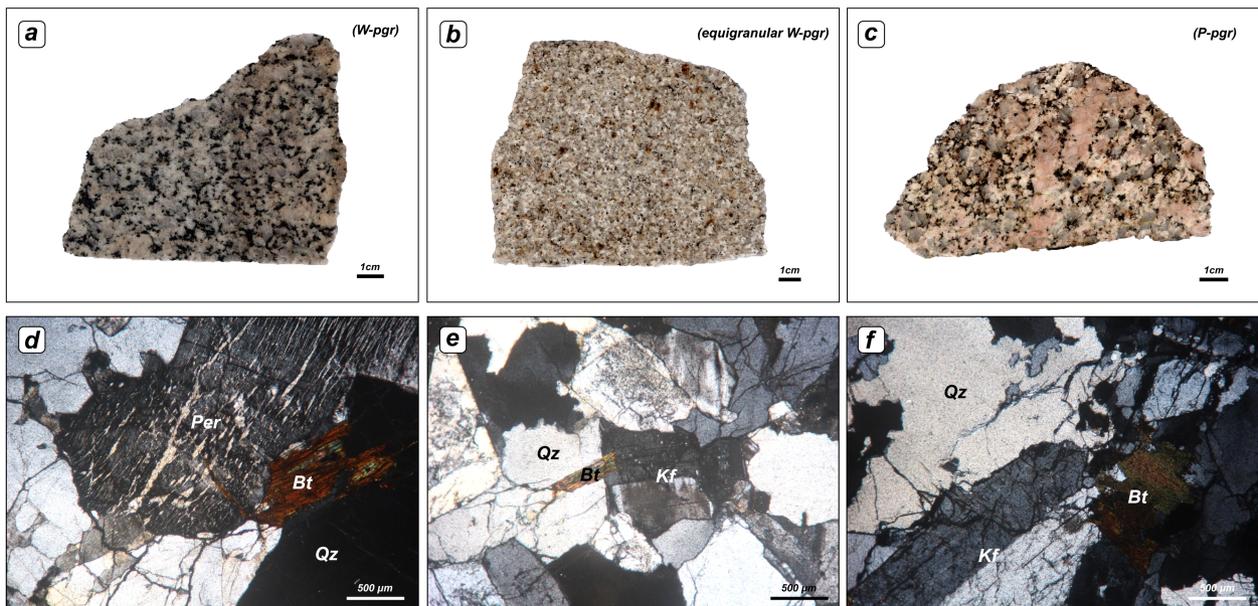


Fig. 3. Photographs of handspecimen of the white porphyritic biotite granite (W-pgr) (a), the white equigranular porphyritic biotite granite (b), and the pink porphyritic biotite granite (P-pgr) (c) of the Chuncheon granite. Photomicrographs of thin section of the W-pgr (d), equigranular W-pgr (e), and P-pgr (f) of the Chuncheon granite. All photomicrographs are XPL mode (x40). Abbreviations (Whitney and Evans, 2010): quartz (Qz), perthite (Per), biotite (Bt), K-feldspar (Kf).

JEOL JSM6610LV)을 이용하여 후방산란전자(back scattered electron; BSE) 및 음극선발광(cathodoluminescence; CL) 이미지를 촬영하였다(그림 5). 저어콘 U-Pb 연대 측정은 한국기초과학지원연구원 오창센터의 레이저 삭박 유도 결합플라즈마 질량분석기(LA-MC-ICP-MS; Nu PlasmaII, Nu instruments+ Excite PHAROS)를 이용하였으며, 직경 15 µm의 레이저를 이용하여 하나의 분석점 당 약 30 s 내외의 분석 시간을 가지며 측정하였다. 분석 시 총 5점의 저어콘 분석마다 표준 저어콘을 함께 측정하였으며, 분석에 사용한 표준 저어콘으로는 91500 (1065.4±0.3 Ma; Wiedenbeck *et al.*, 1995)과 Plešovice (337.13±0.37 Ma; Sláma *et al.*, 2008)를 이용하였다. 데이터는 Iolite 2.5 (Paton *et al.*, 2011)와 ISOPLOT (Ludwig, 2012) 프로그램을 사용하여 처리

하였다. 데이터 중 5% 이상의 불일치 연대를 보이는 분석점은 제외하였으며, 두 화강암의 정치연대는 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 가 중평균연대를 통해 계산되었다.

춘천화강암 내 두 화강암류에 대하여 전암 주원소와 미량원소의 조성을 살펴보고자 풍화가 심하지 않은 대표적인 시료들을 선택하여 암석 분말을 제작하였다. 풍화 등의 영향을 배제하기 위해서 각 시료의 외연부를 다이아몬드 절단기로 절단 제거하였다. 이를 유압 크리셔를 이용하여 약 1 cm 이하의 크기로 1차 분쇄를 진행하였다. 1차 분쇄한 암석 조각들을 증류수를 이용한 초음파 세척기를 통해 불순물을 제거한 후, 볼 밀(ball mill)을 사용하여 74 µm 이하의 크기가 될 때까지 2차 분쇄를 진행하였다. 전암 지화학 분석은 캐나다의 Act Lab (Activation Laboratories Ltd.)

Table 1. Mineral mode of the Chuncheon granite.

Rock type	Chuncheon granite														
	Porphyritic biotite granite (White)									Porphyritic biotite granite (Pink)					
No.	WCC1	WCC7	WCC7-1	WCC8	WCC8-1	WCC15	WCC18	WCC31	WCC31-1	PCC4	PCC6	PCC6-1	PCC7	PCC8	PCC8-1
Qtz	38.0	28.6	41.7	24.8	46.7	35.4	40.4	35.0	40.0	31.4	38.1	41.7	36.2	40.4	46.7
Pl	27.4	33.6	25.0	24.8	15.0	21.2	25.4	28.9	13.7	28.8	16.2	25.0	28.8	18.5	23.3
Kfs	15.4	29.8	18.3	29.5	23.3	30.4	27.3	25.8	33.0	27.4	29.2	28.3	27.9	32.3	26.3
Bt	7.8	8.0	15.0	17.7	15.0	11.9	6.9	10.4	13.3	10.0	11.1	5.0	7.2	8.9	3.7
Mus	-	-	-	tr	tr	1.2	tr	-	-	-	-	-	-	-	-
Chl	11.4	-	-	3.2	-	-	-	-	-	2.4	5.4	tr	-	-	-
Amp	-	tr	-	tr	tr	-	-	-	-	tr	tr	-	tr	tr	-
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

* Qtz (Quartz), Pl (Plagioclase), Kfs (Alkali feldspar), Bt (Biotite), Mus (Muscovite), Chl (Chlorite), Amp (Amphibole).

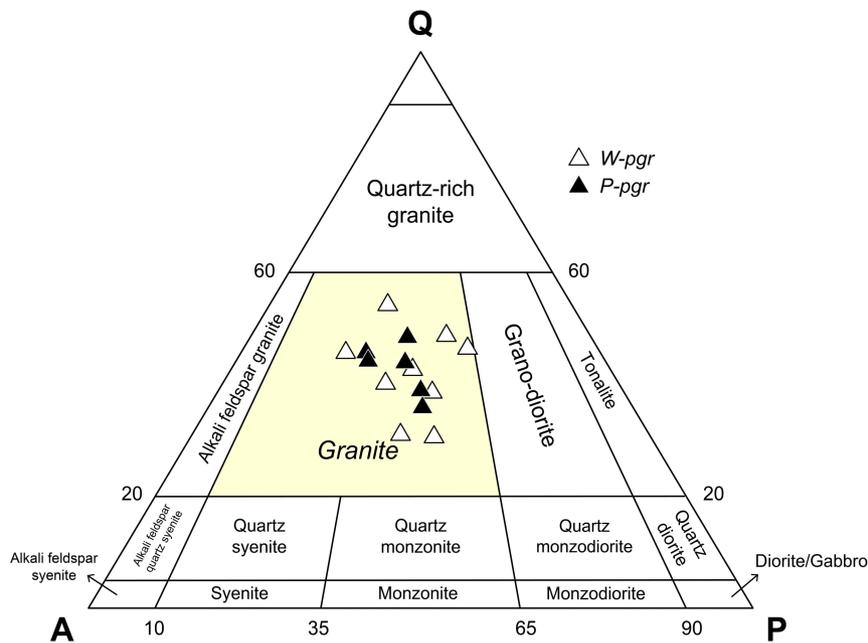


Fig. 4. QAP diagram (Streckeisen, 1974). Both white porphyritic biotite and pink porphyritic biotite granite of the Chuncheon granite are plotted in the granite field.

Table 2. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb isotopic data of the white porphyritic biotite granite of the Chuncheon granite. The effective analysis value of the 26 points and the error in the measurement result is 95% (2σ).

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
CCW1	0.2005	0.0020	0.02933	0.00020	34.09	0.23	0.04965	0.00043	185.5 \pm 1.7	1886	0.415
CCW2	0.1970	0.0025	0.02886	0.00021	34.65	0.25	0.04975	0.00049	182.8 \pm 2.1	2154	0.881
CCW3	0.1963	0.0019	0.02890	0.00022	34.60	0.26	0.04946	0.00038	181.9 \pm 1.6	2652	0.831
CCW4	0.1959	0.0032	0.02900	0.00030	34.48	0.36	0.04936	0.00067	181.6 \pm 2.7	1659	1.134
CCW5	0.1950	0.0021	0.02881	0.00021	34.71	0.25	0.04927	0.00037	180.8 \pm 1.8	4397	0.593
CCW6	0.1996	0.0037	0.02923	0.00038	34.21	0.44	0.04990	0.00100	184.7 \pm 3.1	1079	0.716
CCW7	0.2014	0.0040	0.02920	0.00026	34.25	0.30	0.05035	0.00093	186.2 \pm 3.4	600	0.590
CCW8	0.2010	0.0034	0.02899	0.00020	34.49	0.24	0.05019	0.00077	185.9 \pm 2.9	1074	1.026
CCW9	0.1997	0.0024	0.02898	0.00029	34.51	0.35	0.04938	0.00046	184.8 \pm 2.0	2220	0.774
CCW10	0.2015	0.0047	0.02900	0.00027	34.48	0.32	0.05007	0.00098	186.3 \pm 4.0	883	0.665
CCW11	0.1988	0.0041	0.02899	0.00025	34.49	0.30	0.04902	0.00086	184.1 \pm 3.5	2055	0.559
CCW12	0.2006	0.0041	0.02900	0.00034	34.48	0.40	0.04983	0.00079	185.5 \pm 3.5	990	1.163
CCW13	0.1970	0.0018	0.02874	0.00023	34.79	0.28	0.04955	0.00025	182.6 \pm 1.5	9440	1.101
CCW14	0.1965	0.0025	0.02886	0.00023	34.65	0.28	0.04906	0.00046	182.1 \pm 2.1	4860	0.350
CCW15	0.2018	0.0040	0.02919	0.00034	34.26	0.40	0.05043	0.00085	186.6 \pm 3.4	1345	0.912
CCW16	0.2002	0.0070	0.02904	0.00053	34.44	0.63	0.04990	0.00120	185.2 \pm 5.9	1125	0.584
CCW17	0.1982	0.0022	0.02882	0.00021	34.70	0.25	0.04970	0.00043	183.6 \pm 1.9	3588	0.520
CCW18	0.2006	0.0028	0.02925	0.00026	34.19	0.30	0.04944	0.00051	185.6 \pm 2.4	2284	0.697
CCW19	0.2014	0.0039	0.02901	0.00021	34.47	0.25	0.05014	0.00089	186.2 \pm 3.3	813	0.770
CCW20	0.2001	0.0027	0.02905	0.00031	34.42	0.37	0.05003	0.00062	185.2 \pm 2.3	2589	0.631
CCW21	0.2011	0.0024	0.02915	0.00022	34.31	0.26	0.04981	0.00042	186.0 \pm 2.1	2845	0.581
CCW22	0.1967	0.0032	0.02875	0.00023	34.78	0.28	0.04928	0.00064	182.3 \pm 2.7	1221	0.817
CCW23	0.2020	0.0034	0.02932	0.00029	34.11	0.34	0.04974	0.00066	186.7 \pm 2.9	1059	0.485
CCW24	0.2054	0.0049	0.02941	0.00046	34.00	0.53	0.05076	0.00064	189.6 \pm 4.2	3650	0.629
CCW25	0.1966	0.0023	0.02882	0.00026	34.70	0.31	0.04950	0.00046	182.2 \pm 1.9	2422	1.195
CCW26	0.1965	0.0025	0.02871	0.00021	34.83	0.25	0.04961	0.00050	182.3 \pm 2.1	2402	0.546

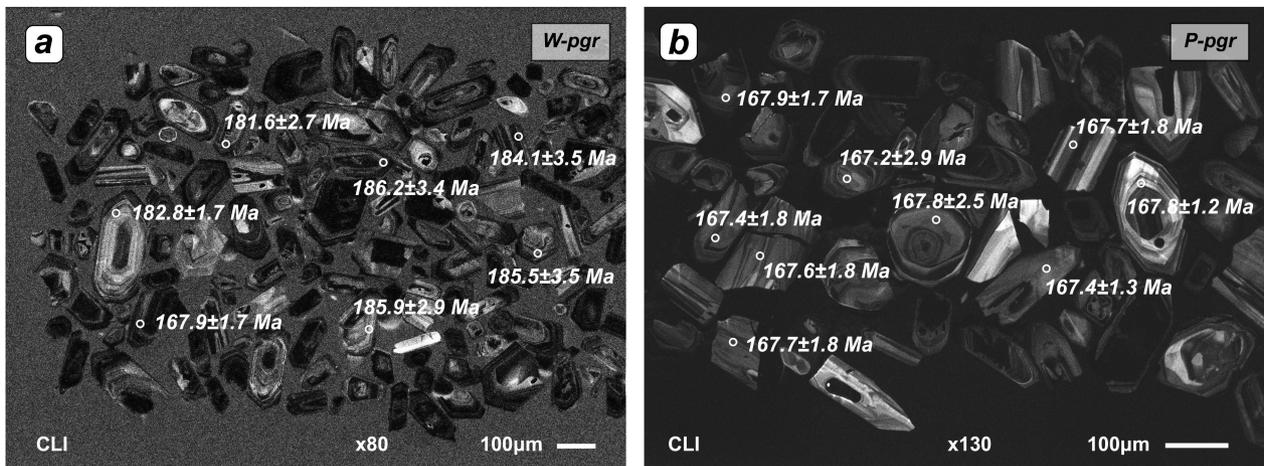


Fig. 5. Cathodoluminescence (CL) pictures of representative zircon crystals of (a) W-pgr and (b) P-pgr of the Chuncheon granite.

Table 3. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb isotopic data of the pink porphyritic biotite granite of the Chuncheon granite. The effective analysis value of the 30 points and the error in the measurement result is 95% (2σ).

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
CCP1	0.1696	0.0040	0.02619	0.00038	38.24	0.58	0.04680	0.00029	167.1±2.5	124	0.557
CCP2	0.1702	0.0032	0.02630	0.00022	37.97	0.33	0.04727	0.00035	167.7±1.3	446	0.878
CCP3	0.1679	0.0026	0.02628	0.00027	38.10	0.40	0.04636	0.00020	167.7±1.6	601	0.428
CCP4	0.1698	0.0029	0.02625	0.00025	38.14	0.36	0.04684	0.00030	167.6±1.5	661	0.466
CCP5	0.1721	0.0021	0.02634	0.00022	37.94	0.30	0.04761	0.00036	168.2±1.3	1149	0.547
CCP6	0.1707	0.0037	0.02636	0.00036	38.03	0.50	0.04722	0.00035	168.2±2.2	636	0.551
CCP7	0.1681	0.0033	0.02630	0.00030	38.07	0.44	0.04671	0.00035	167.9±1.7	294	0.534
CCP8	0.1694	0.0029	0.02617	0.00029	38.19	0.43	0.04692	0.00036	167.4±1.8	361	0.377
CCP9	0.1714	0.0032	0.02626	0.00029	37.97	0.43	0.04706	0.00030	167.4±1.7	352	0.838
CCP10	0.1711	0.0034	0.02623	0.00028	38.10	0.39	0.04692	0.00036	167.7±1.8	325	0.422
CCP11	0.1701	0.0027	0.02627	0.00028	38.04	0.41	0.04706	0.00030	167.6±1.8	324	0.309
CCP12	0.1692	0.0046	0.02614	0.00049	38.26	0.69	0.04677	0.00040	167.2±2.9	181	0.950
CCP13	0.1727	0.0038	0.02625	0.00040	38.21	0.58	0.04726	0.00039	167.8±2.5	159	1.568
CCP14	0.1718	0.0024	0.02636	0.00024	38.00	0.34	0.04712	0.00028	168.4±1.5	452	0.773
CCP15	0.1703	0.0019	0.02620	0.00021	38.13	0.32	0.04723	0.00032	167.4±1.3	1767	0.346
CCP16	0.1707	0.0026	0.02626	0.00029	38.00	0.41	0.04671	0.00023	167.7±1.8	248	0.436
CCP17	0.1735	0.0023	0.02634	0.00020	37.85	0.27	0.04774	0.00029	167.8±1.2	1121	1.630
CCP18	0.1721	0.0025	0.02623	0.00022	38.10	0.33	0.04738	0.00029	167.5±1.4	838	0.374
CCP19	0.1698	0.0030	0.02612	0.00026	38.11	0.39	0.04686	0.00027	167.5±1.7	348	0.300
CCP20	0.1699	0.0029	0.02628	0.00029	38.09	0.41	0.04668	0.00022	167.9±1.7	349	0.309
CCP21	0.1733	0.0024	0.02622	0.00025	38.14	0.36	0.04799	0.00036	167.4±1.5	1342	1.865
CCP22	0.1677	0.0032	0.02622	0.00041	38.26	0.62	0.04636	0.00016	167.8±2.5	174	0.460
CCP23	0.1772	0.0049	0.02656	0.00033	37.68	0.47	0.04793	0.00065	169.5±2.0	1197	0.761
CCP24	0.1719	0.0025	0.02634	0.00027	37.92	0.38	0.04727	0.00030	167.9±1.7	525	0.394
CCP25	0.1746	0.0044	0.02642	0.00041	37.94	0.60	0.04791	0.00046	167.8±2.6	380	1.148
CCP26	0.1682	0.0029	0.02592	0.00028	38.50	0.45	0.04700	0.00027	165.9±1.8	267	1.140
CCP27	0.1690	0.0025	0.02611	0.00026	38.34	0.37	0.04684	0.00025	166.9±1.5	522	0.359
CCP28	0.1695	0.0022	0.02606	0.00023	38.39	0.33	0.04712	0.00029	166.7±1.4	569	0.382
CCP29	0.1683	0.0028	0.02621	0.00030	38.20	0.45	0.04679	0.00023	167.5±1.8	567	0.521
CCP30	0.1682	0.0022	0.02584	0.00022	38.58	0.35	0.04713	0.00028	165.0±1.4	823	0.293

에 분석을 의뢰하였다. 각 암석에 대한 주원소 분석은 Fusion ICP (Inductively Coupled Plasma) 기기를, 미량원소와 희토류원소는 ICP-MS (Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometer)와 Fusion ICP (Inductively Coupled Plasma) 기기를 통해 수행되었다.

4. 분석 결과

4.1. 저어콘 U-Pb 연대

백색과 담홍색 반상화강암의 저어콘 입자의 크기는 장축을 기준으로 약 150-200 μm 이다(그림 5). CL 이미지에

서 두 화강암의 저어콘들은 대부분 진동 누대(oscillatory zoning)의 가장자리와 상속핵(inherited core)을 갖고 있다. 가장자리의 진동누대는 밝은색에서 가장자리로 갈수록 어두워지는 형태로 나타난다(그림 5).

두 화강암의 저어콘에서 진동누대가 나타나는 가장자리를 분석한 결과, 백색 반상화강암은 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 가중평균 연대가 183.8 ± 0.8 Ma ($n=26$; $\text{MSWD}=2.7$)이며, 담홍색 반상화강암은 167.5 ± 0.3 Ma ($n=30$; $\text{MSWD}=0.91$)의 연대가 산출되었다(그림 6). 따라서 담홍색 반상화강암이 대략 15 Myr 정도 후기에 관입한 것으로 나타나며 야외에서 관찰된 두 화강암의 관입 관계와 잘 일치한다(그림 2a, 2b).

4.2. 전암화학분석

백색 반상화강암과 담홍색 반상화강암에 대한 전암 화학분석 결과는 표 4와 같다. 두 화강암은 주원소 SiO_2 , Na_2O , K_2O 를 이용한 TAS (total alkali silica) 다이어그램(Middlemost, 1994)에서 화강암 영역에 도시된다(그림 7a). 두 화강암의 A/CNK (molar $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$) 값은 모두 1.06 이상이고 A/NK 대 A/CNK 도(Maniar and Piccoli, 1989)에서 모두 고알루미나질(peraluminous) 화강암에 속한다(그림 7b). 경기육괴 내 중생대 쥐라기 화강암질암에 대한 기존의 자료와 함께 도시한 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 대 SiO_2 도에서, 춘천 화강암은 전형적인 경기육괴 내 쥐라기 화강암질암과 유사한 성분을 가진다(그림 7c). $\text{FeO}^I/(\text{FeO}^I+\text{MgO})$ 대 SiO_2 다이어그램에서 일반적으로 경기육괴 쥐라기 고철질 내지 중성질 화성암들은 함마그네슘 영역에 도시되는 반면에, 규장질 조성을 가지는 화강암질암($\text{SiO}_2 > 70$ wt.%)은 대부분 함철 영역에 도시되는데(Cheong and Jo, 2020), 이에 비해 춘천화강암은 함마그네슘(magnesian) 영역 내지 함철(ferroan)과 함마그네슘 영역 경계를 따라 도시된다(그림 7d).

백색 반상화강암이 갖는 SiO_2 값의 범위는 69.35-71.68

wt.%, 담홍색 반상화강암은 69.21-74.26 wt.%로 두 암상은 유사한 범위의 SiO_2 값을 가진다(그림 7a, 8, 9). 두 화강암체의 SiO_2 함량 변화에 따른 주원소 함량의 변화는 체계적으로 변화하는 경향을 보이지 않으며(그림 8), 미량원소의 변화 역시 불규칙한 경향을 보여준다.

미량원소 값을 원시맨틀 값(Primitive Mantle; Sun and McDonough, 1989)으로 표준화하여 나타낸 스파이더 다이어그램에서, 두 암상은 매우 유사한 변화 패턴을 보이며 고장력원소인 Ta, Nb, P, Ti는 뚜렷한 부(negative)의 이상을 보인다(그림 10a). 백색 반상화강암과 담홍색 반상화강암이 갖는 평균 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 비는 각각 9.37와 9.79로, 콘드라이트(chondrite) 값(Boynnton, 1984)으로 표준화한 희토류 원소 패턴에서 비슷한 부(-)의 이상을 갖는 음의 기울기로 나타난다. 두 암상의 Eu/Eu^* 값은 각각 평균 0.59와 0.54로 유사한 값을 갖는다(그림 10b).

5. 토 의

5.1. 춘천화강암의 성인

백색 반상화강암과 담홍색 반상화강암의 생성 연대는

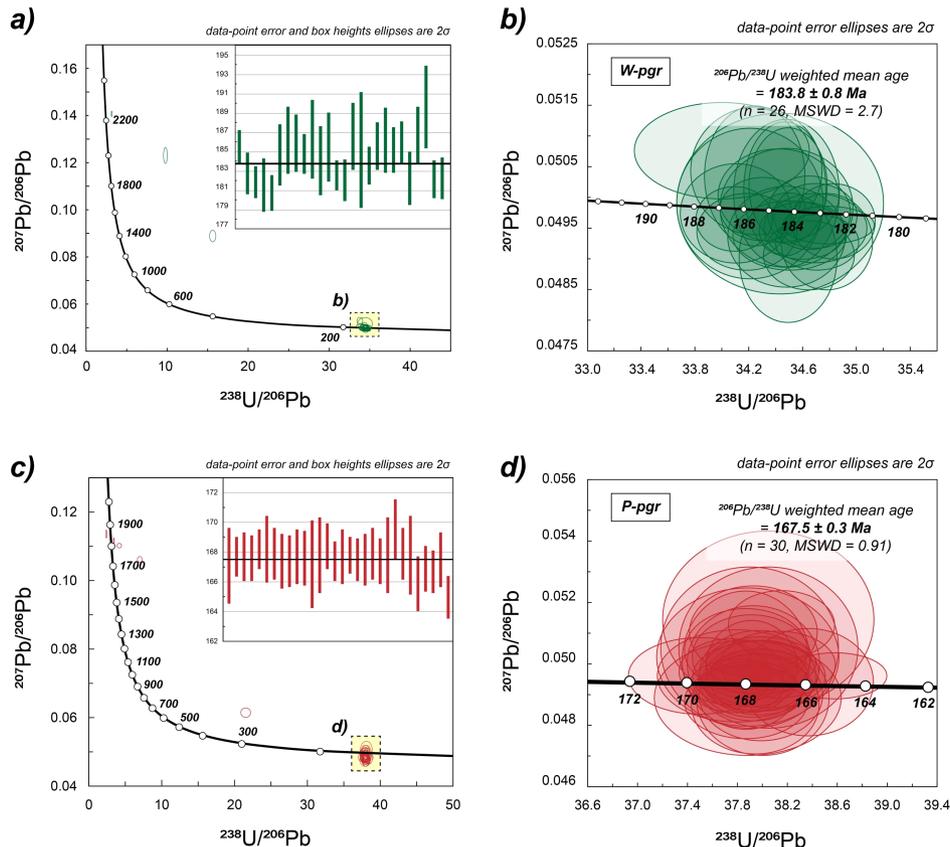


Fig. 6. Concordia diagrams for W-pgr (a, b) and P-pgr (c, d) of the Chuncheon granite. The red circles are $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted mean ages of clusters. The error in the measurement result is 95% (2σ).

Table 4. Concentrations of major, trace and rare earth elements of the Chuncheon granite.

Rock type	Chuncheon granite					
	Porphyritic biotite granite (White)			Porphyritic biotite granite (Pink)		
Sample No.	W-CC7	W-CC8	W-CC15	P-CC4	P-CC6	P-CC7
<i>Major elements (in wt.%)</i>						
SiO ₂	70.97	71.68	69.35	74.26	69.77	69.21
Al ₂ O ₃	13.93	14.74	16.43	13.50	15.18	15.21
Fe ₂ O ₃ (T)	2.32	2.71	2.20	1.53	3.46	3.00
MnO	0.08	0.08	0.09	0.05	0.10	0.08
MgO	0.54	0.66	0.37	0.27	0.95	0.76
CaO	2.43	2.29	1.62	0.72	1.30	1.76
Na ₂ O	3.65	3.68	4.23	3.21	4.41	4.31
K ₂ O	2.87	3.51	4.83	5.92	3.43	4.34
TiO ₂	0.29	0.34	0.22	0.17	0.50	0.36
P ₂ O ₅	0.16	0.17	0.12	0.07	0.19	0.12
LOI	0.81	0.78	1.16	1.04	1.14	1.01
Total	98.04	100.60	100.60	100.60	100.80	100.30
A/CNK	1.03	1.05	1.09	1.04	1.14	1.01
<i>Trace elements (in ppm)</i>						
Ba	610.00	791.00	1010.00	955.00	702.00	861.00
Rb	78.00	98.00	125.00	167.00	109.00	141.00
Sr	234.00	240.00	245.00	137.00	203.00	205.00
Cs	1.30	1.60	1.10	1.30	1.50	0.90
Pb	16.00	18.00	26.00	26.00	19.00	23.00
Y	21.40	23.60	35.10	23.60	30.40	27.10
Zr	182.00	195.00	256.00	115.00	217.00	169.00
Hf	4.50	5.10	7.00	3.30	5.70	4.60
Nb	6.60	9.00	11.60	6.20	11.70	12.00
Ta	0.52	0.58	0.86	0.57	1.03	1.11
Th	15.60	16.90	26.60	20.10	28.20	28.90
U	4.51	4.43	4.21	3.12	4.99	4.02
Ni	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
Co	88.00	82.00	68.00	125.00	69.00	84.00
Cr	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
Sc	4.00	7.00	5.00	4.00	7.00	5.00
Zn	30.00	30.00	30.00	< 30	50.00	40.00
Cu	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Rb/Sr	0.33	0.41	0.51	1.22	0.54	0.69
T _{Zr} (°C)	798.30	804.77	829.14	761.38	820.62	784.66
<i>Rare earth elements (in ppm)</i>						
La	32.00	30.10	58.10	31.10	57.80	46.20
Ce	56.00	53.60	107.00	61.10	106.00	84.60
Pr	5.85	5.92	10.60	5.84	10.80	8.61
Nd	21.10	21.50	36.70	20.30	37.30	30.10
Sm	4.25	4.60	7.21	4.05	7.28	5.98
Eu	0.87	0.92	1.07	0.75	1.10	0.91
Gd	3.95	4.33	6.21	3.73	5.89	4.90
Tb	0.63	0.71	0.97	0.60	0.90	0.77
Dy	3.80	4.43	6.04	4.01	5.40	4.82
Ho	0.75	0.89	1.27	0.81	1.11	0.97
Er	2.29	2.51	3.76	2.53	3.11	2.96
Tm	0.32	0.35	0.59	0.40	0.47	0.43
Yb	2.14	2.33	4.20	2.77	3.31	3.11
Lu	0.35	0.37	0.65	0.44	0.51	0.50
(La/Yb) _N	10.08	8.71	9.33	7.57	11.77	10.02
Eu/Eu*	0.65	0.63	0.49	0.59	0.51	0.52

각각 183.8 ± 0.8 Ma와 167.5 ± 0.3 Ma로, 쥐라기 전기에 백색 반상화강암이 관입한 이후 약 16 Myr이 지난 쥐라기 중기에 담홍색 반상화강암이 관입하며 전체적인 춘천화강암체가 형성되었음을 알 수 있다. 이러한 결과는 야외에서 담홍색 반상화강암이 백색 반상화강암을 암맥 상으로 관입하며 산출되는 양상과 잘 부합한다(그림 2b).

지화학 분석 결과에서 두 암체는 서로 뚜렷한 성분적인 차이와 체계적인 변화양상을 보여주지 않는다(그림 8, 9). 백색 반상화강암과 담홍색 반상화강암이 갖는 A/CNK 값의 범위는 각각 1.01-1.14(평균 1.06)와 1.03-1.09(평균 1.06)로 두 암상 모두 고알루미나질 화강암이며(그림 7b), 미량 원소 값을 원시맨틀 값(Sun and McDonough, 1989)으로 표준화한 스파이더 다이어그램과 콘드라이트 값(Boynton, 1984)으로 표준화한 희토류원소 패턴에서도 매우 유사한 변화 패턴과 기울기를 보인다(그림 10a, 10b). 또한 두 암상이 갖는 Eu/Eu^* 평균 값은 각각 0.59와 0.54로 희토류원

소 패턴에서 유사한 정도의 부(-)의 Eu 이상을 보여준다. 이러한 지화학적 유사성은 춘천화강암을 구성하는 두 암체가 서로 비슷한 성질을 갖는 근원 물질로부터 유사한 정도의 부분용융 및 정출과정을 통해 형성되었을 가능성이 있음을 시사한다.

5.1.1. 근원 물질의 성질

두 화강암류를 형성한 마그마 근원 물질의 성질을 파악하기 위하여 주원소 Al_2O_3 , FeO, MgO, TiO_2 를 이용한 근원 물질 다이어그램(Douce, 1999)에 도시한 결과, 두 암상은 잡사암(greywacke) 및 고철질 이질암(mafic pelite) 영역에 도시된다(그림 11a). 잡사암과 이질암을 구별하는 근원 물질 다이어그램인 Rb/Ba 대 Rb/Sr 다이어그램(그림 11b)에서 잡사암과 사질암 조성 사이에 도시되는 것으로 보아, 고철질 이질 조성보다는 잡사암 또는 이에 상응하는 화성암(예를 들어 화강섬록암; Zhao *et al.*, 2016)과 같은

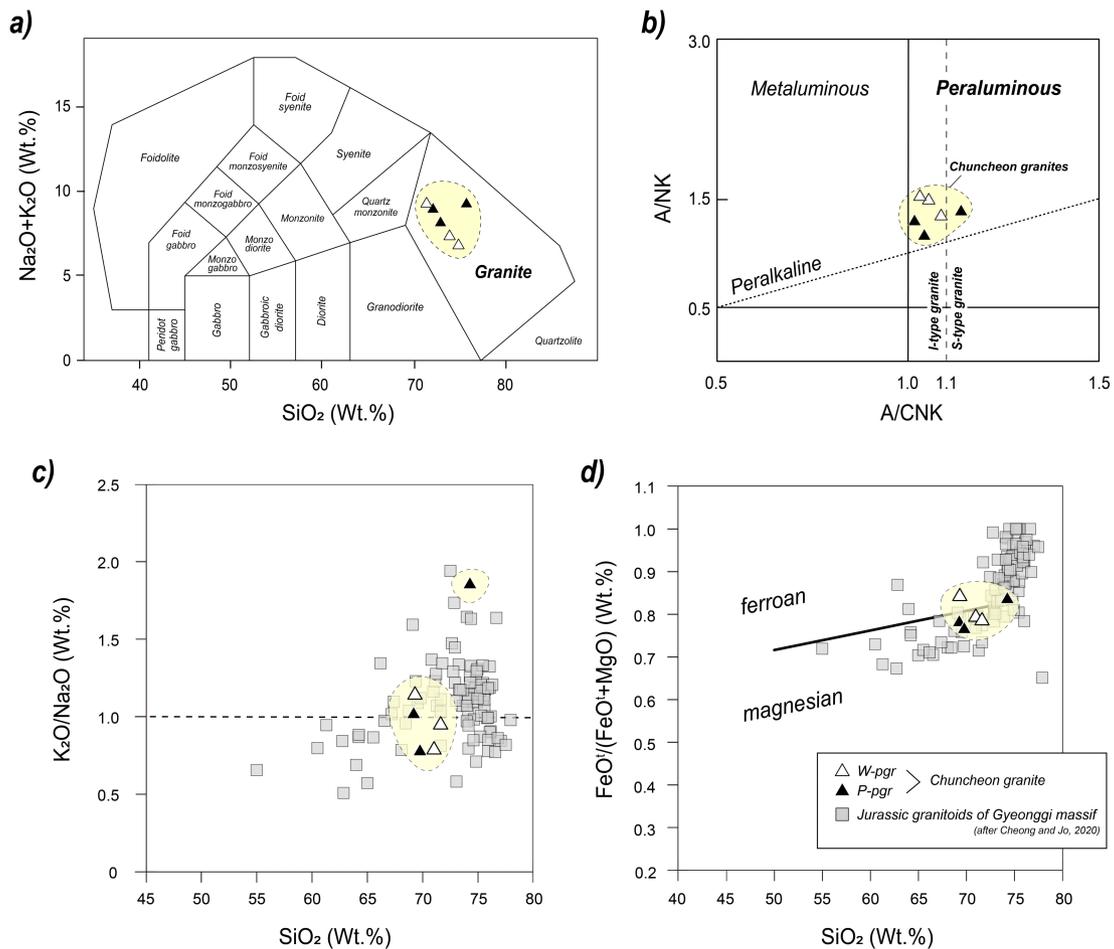


Fig. 7. (a) Total-alkali-silica (TAS) diagram of the Chuncheon granite (Middlemost, 1994). (b) $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ vs. $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$ diagram (after Maniar and Piccoli, 1989). The Chuncheon granite samples are all plotted in the peraluminous field. (c) K_2O/Na_2O vs. SiO_2 diagram (modified after Cheong and Jo, 2020). (d) $FeO^{total}/(FeO^{total}+MgO)$ vs. SiO_2 diagram (after Frost *et al.*, 2001; Cheong and Jo, 2020). Data sources of Gyeonggi massif are from Cheong and Jo (2020).

근원 물질로부터 유래하였을 것으로 생각된다.

Jin *et al.* (1993)은 전암에 대한 Rb와 Sr 자료를 이용하여 196±9 Ma의 Rb-Sr 전암 연대와 0.7159±0.0006의 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) 초기값을 보고하였다. 그러나 Rb-Sr 등시선의 자료가 다소 분산되어 나타날 뿐만 아니라, 춘천화강암 북쪽에 인접하여 분포하는 화천화강암 용화산암체 시료를 포함하여 Rb-Sr 전암 연대와 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) 초기치를 정의하였기 때문에, Jin *et al.* (1993)의 Rb와 Sr 자료 중 화천화강암 용화산암체로부터 얻은 시료와 Rb-Sr 등시선에서 비교적 많이 벗어나 도시되는 춘천화강암 시료 1개를 제외한 나머지 시료들을 이용하여 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) 초기값을 구해보았다. 그 값은 0.7146으로, Jin *et al.* (1993)이 보고한 값과 유사하게 부화된 값을 보여준다. 이는 춘천화강암을 형성한 마그마가 잡사암 조성 변성퇴적암류 또는 S-형 화강섬록암 조성을 갖는 근원 물질로부터 기원하였을 가능성이 높음을 시사한다. 춘천화강암을 형성한 마그마 근원 물질의 성질에 대해 좀 더 명확

히 규명하기 위해서는 열수에 의한 영향을 비교적 적게 받는 Sm-Nd와 같은 방사성 동위원소와 내구성이 강한 광물인 저어콘에 대한 산소 안정동위원소 연구를 추가적으로 수행하여야 할 것이다.

5.1.2. 부분 용융 정도 및 용융 조건

춘천화강암의 백색 반상화강암과 담홍색 반상화강암의 (La/Yb)_N 비의 평균 값은 각각 9.37와 9.79로 매우 유사하며, 그 결과 희토류원소 패턴에서 서로 유사한 기울기를 보인다. 이러한 사실은 이들 두 화강암류가 유사한 성질을 갖는 근원 물질로부터 비슷한 정도의 부분용융을 통해 형성된 마그마로부터 유래한 것임을 시사하며, Whalen *et al.* (1987)의 분별도(그림 12a)에서 분화되지 않은 화강암 영역에 도시되는 것으로 보아 마그마가 형성된 이후에 분화작용을 경험하지 않은 것으로 보인다. 또한 두 암상 모두 희토류원소 패턴에서 유사한 크기의 부(-)의 Eu 이상을 보이

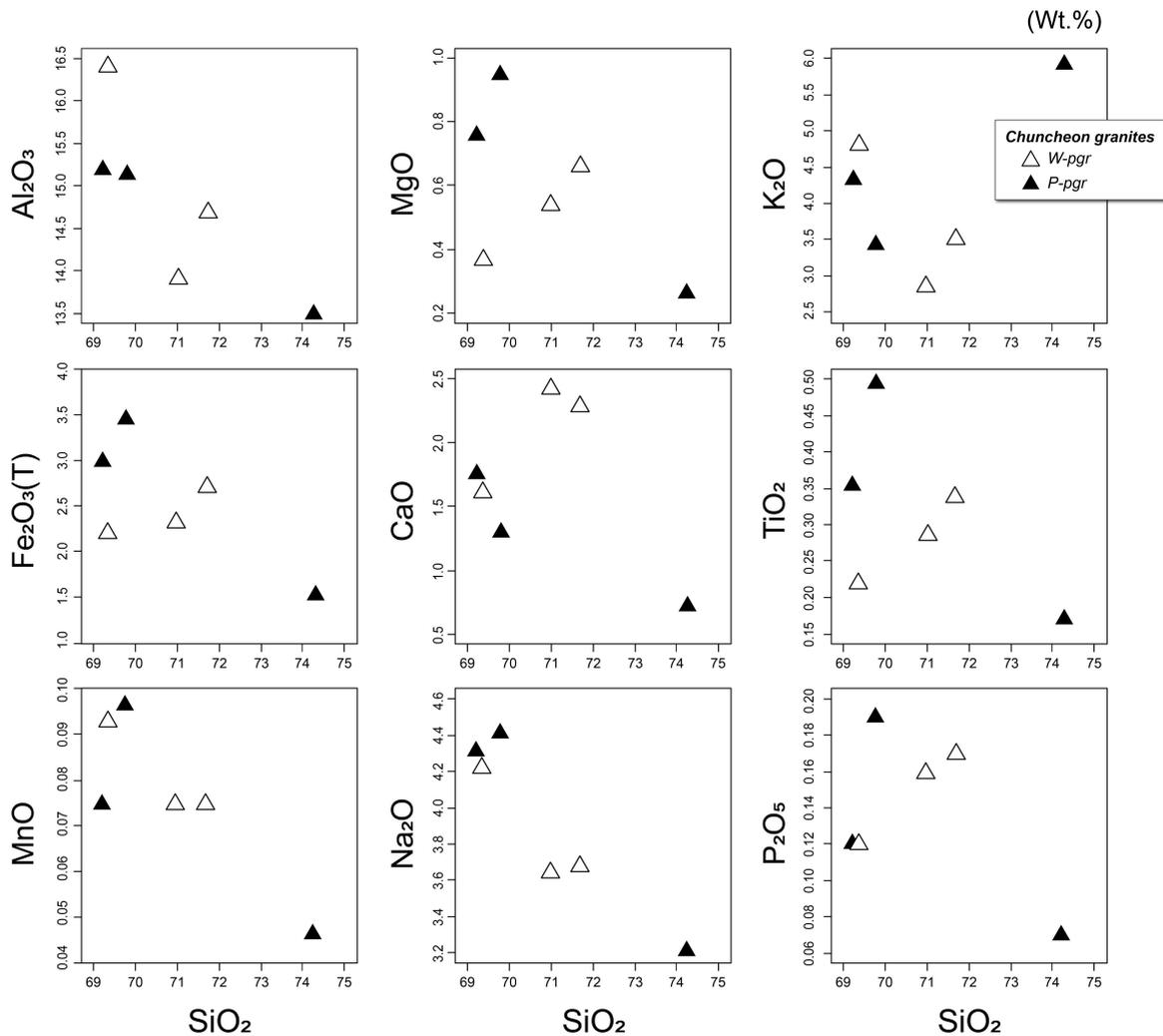


Fig. 8. Harker variation diagrams of major elements for the Chuncheon granite.

는데, 이는 잡사암 또는 화강섬록암 성분의 근원 물질이 부분용융이 일어날 때 사장석이 잔류 광물로 존재하며 용융이 일어나는 과정을 통해 마그마가 형성되었을 가능성이 있음을 지시한다.

저어콘 포화온도(zircon saturation temperature)는 마그마 내에서 저어콘이 정출되는 온도(T_{Zr})를 기반으로 화강암의 마그마 생성 온도를 추정할 수 있는 도구로 사용된다(Watson and Harrison, 1983; Hanchar and Watson, 2003; Miller *et al.*, 2003). 백색 반상화강암과 담홍색 반상화강암을 형성한 마그마 생성 온도를 알아보기 위하여 주원소와 Zr 함량을 저어콘 포화 지온계(zircon saturation thermometer)에

대입하여 저어콘 포화온도(T_{Zr})를 계산하였다(Watson and Harrison, 1983; Hanchar and Watson, 2003).

저어콘 결정 내 상속핵의 존재 유무는 저어콘 포화온도(T_{Zr})가 마그마 생성 온도의 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 생성 온도의 최고 한계를 지시하는 반면에, 상속핵이 존재하지 않을 경우 T_{Zr} 값은 마그마로부터 저어콘이 정출되기 시작하는 온도를 지시하는 것이므로 마그마 생성 온도의 최저한계를 나타낸다(Miller *et al.*, 2003; Sagong *et al.*,

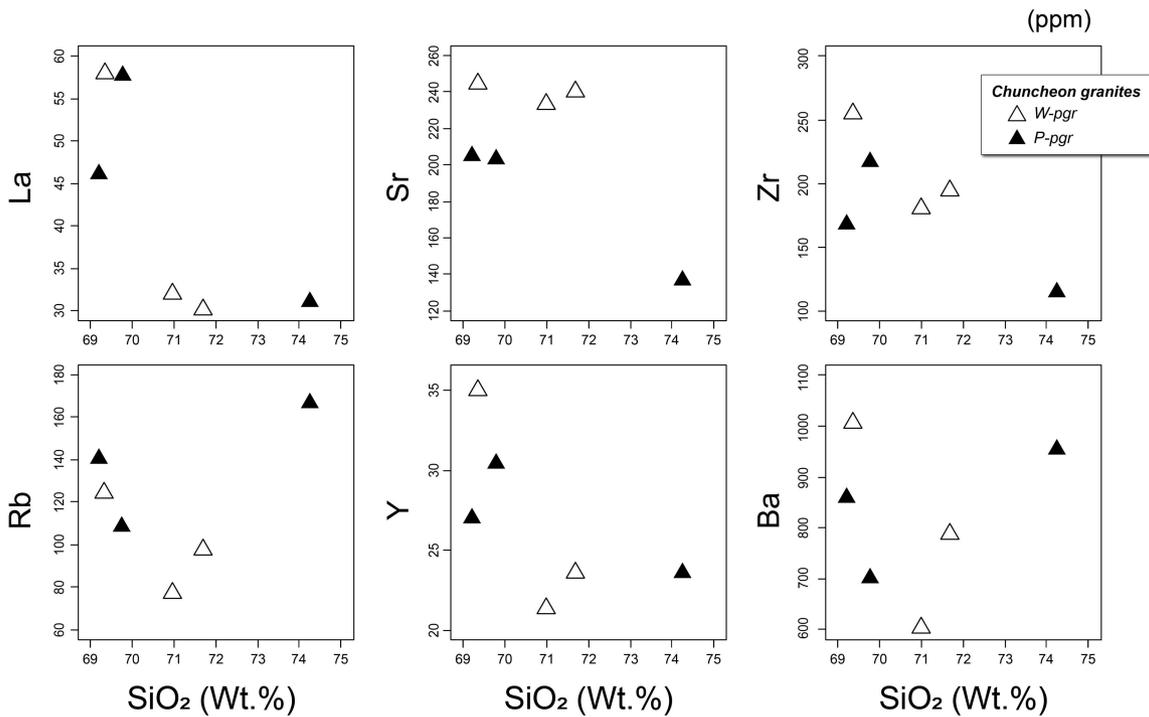


Fig. 9. Harker variation diagrams of minor elements for the Chuncheon granite.

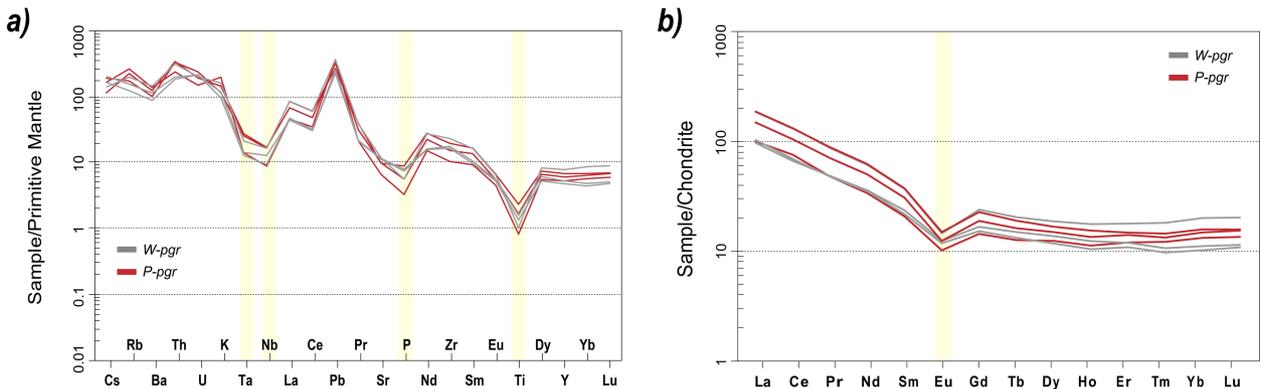


Fig. 10. (a) Primitive Mantle normalized spider diagram for the Chuncheon granite. Normalization values are used after Sun and McDonough (1989). (b) Chondrite normalized REE patterns for the Chuncheon granite. Chondrite values from Boynton (1984).

2005a). 춘천화강암 백색 반상화강암과 담홍색 반상화강암 내 저어콘에서는 음극선발광영상에서 대부분 상속핵을 가지고 있는 것이 관찰된다(그림 5). 따라서 이 연구에서 계

산을 통해 얻은 T_{Zr} 값은 마그마 생성 온도의 최고한계를 나타낸다고 볼 수 있다.

백색 반상화강암과 담홍색 반상화강암이 갖는 저어콘 포화온도(T_{Zr}) 평균 값은 각각 788.9°C와 810.7°C(표 4)로, 이 암체와 비슷한 시기에 생성된 것으로 북동쪽으로 약 10 km 떨어져 있는 화천화강암 추곡령암체를 구성하는 반상흑운모화강암(T_{Zr} 평균값: 755°C; Moon *et al.*, 2024)과 등립질흑운모화강암(T_{Zr} 평균값: 764°C; Moon *et al.*, 2024) 보다 다소 높은 온도에서 마그마가 생성되었음을 알 수 있다.

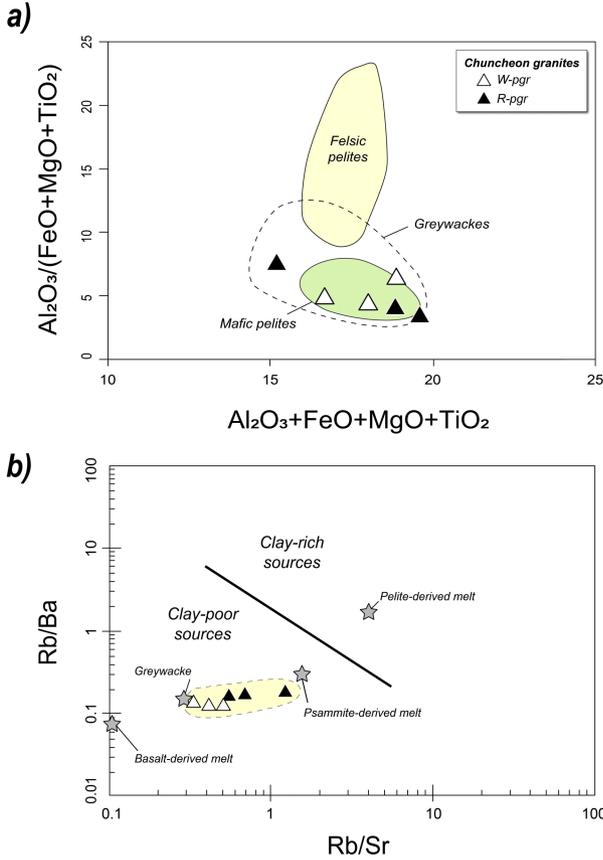


Fig. 11. (a) Source rock discrimination diagram for the Chuncheon granite (after Douce, 1999). (b) Rb/Ba vs. Rb/Sr diagram (after Sylvester, 1998; Zhao *et al.*, 2016).

5.2. 조구조환경

춘천화강암 내 두 화강암은 스파이더 다이어그램(그림 10a)에서 고장력원소인 Nb, P, Ti, Ta는 부의 이상을 가지며 친석원소인 Cs, Rb, Ba는 부화된 특징을 보여주는데, 이는 춘천화강암이 섭입대 환경에서 생성되었음을 지지한다(Condie, 1989; Wilson, 1989).

또한 춘천화강암은 $FeO'/(FeO'+MgO)$ 대 SiO_2 다이어그램에서 함마그네슘 영역에 도시되는데(그림 7d), 일반적으로 함마그네슘 화강암은 화산호에서 생성된 마그마가 비교적 산화 환경에서 분화작용을 겪을 때 생성되는 것으로 알려져 있다(Frost *et al.*, 2001). 이러한 결과는 춘천화강암이 섭입대 환경에서 생성되었음을 뒷받침한다. $(La/Yb)_N$ 대 Yb_N 다이어그램(Defant and Drummond, 1990)에서 춘천화강암을 구성하는 백색 반상화강암과 담홍색 반상화강암은 모두 일반적인 호 환경에서 형성된 화성암 영역에 도시된다(그림 12b).

춘천화강암이 섭입대 환경에서 생성된 것은 조구조 판별도(Pearce *et al.*, 1984; Harris *et al.*, 1986)에서 두 화강암류가 화산호 환경 영역에 도시되는 것으로도 알 수 있다

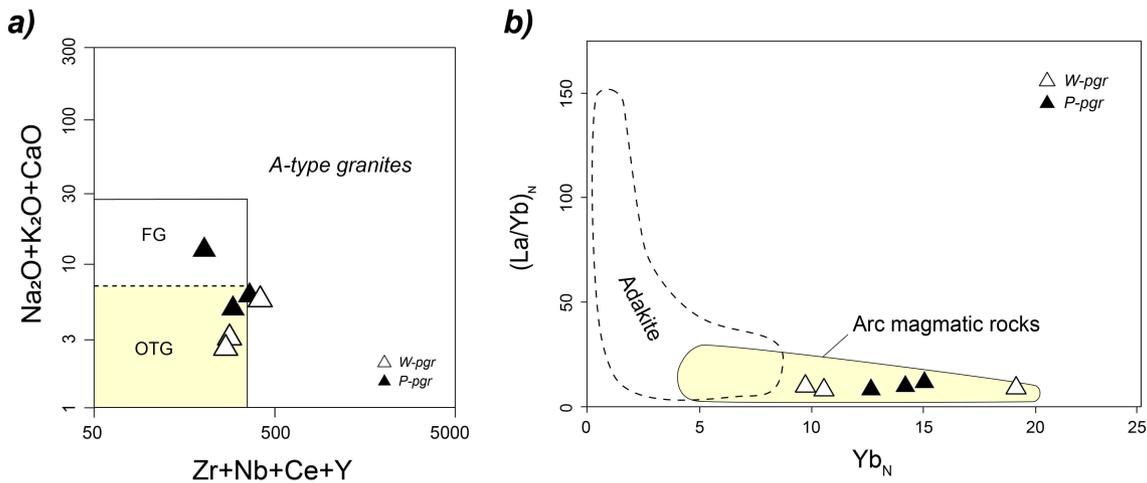


Fig. 12. (a) Zr+Nb+Ce+Y vs. $Fe_2O_3(t)/MgO$ classification diagram of Whalen *et al.* (1987) for the Chuncheon Granite (FG: fractionated S- and I-type granites; OTG: unfractionated S- and I-type granites). (b) Adakite vs. arc magmatic rocks discrimination diagram for the Chuncheon granite (after Defant and Drummond, 1990).

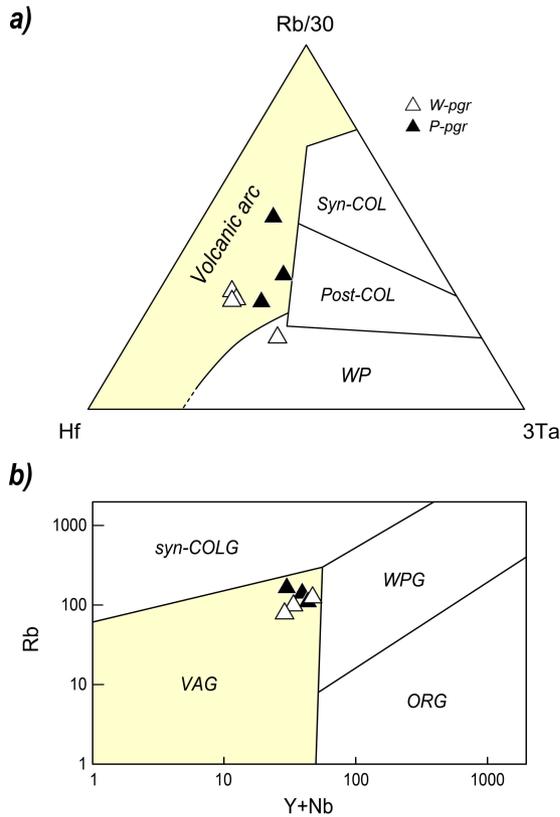


Fig. 13. (a) Hf-Rb/30-3Ta ternary discrimination diagram after Harris *et al.* (1986). The Chuncheon granite is plotted in the VAG field. (b) Rb vs. Y+Nb tectonic discrimination diagram (after Pearce *et al.*, 1984; Förster *et al.*, 1997) for the Chuncheon granite. Syn-COLG: Syn-collision granites, VAG: Volcanic arc granites, WPG: Within plate granites, ORG: Ocean ridge granites.

(그림 13). 결론적으로 춘천화강암체는 지화학 분석결과를 활용한 모든 지체구조적 증거가 화산호 환경을 지시한다. 즉 섭입하는 슬랩의 탈수작용으로 방출된 유체에 의해 영향을 받은 하부지각의 잡사암 조성 변성퇴적암류 또는 S-형 화강섬록암 조성을 갖는 근원 물질의 부분 용융에 의해 마그마가 생성되면서 춘천화강암체를 생성한 것으로 보인다. 이 결과는 연구 지역 인근 화천화강암 용화산암체 및 추곡령암체 또한 화산호 및 섭입대의 구조조 환경에서 생성되었다는 보고(Sagong *et al.*, 1997; Moon *et al.*, 2024)와도 잘 부합한다. 또한 최근 190-170 Ma 기간에 해양판이 한반도를 포함하는 대륙권 아래로 완만한 경사를 가지며 섭입하면서 한반도 중부와 남부에서 쥐라기 화강암류가 활발하게 생성되었다는 보고와도 잘 부합한다(Cheong and Jo, 2020; Kim *et al.*, 2024).

5.3. 경기육괴 북중부 춘천 일대의 쥐라기 화성활동

경기육괴 북중부에 위치하는 춘천시 일대에 분포하는 대표적인 중생대 쥐라기 화성암으로는 춘천화강암과 화천화강암이 존재한다(그림 14). 춘천시 북부에 해당하는 북산면 추곡리와 화천군 간동면 오음리 및 간척리 일대에 분포하는 화천화강암은 야외 산출양상에 따라 두 개의 서로 다른 암체인 북동부의 추곡령암체와 남서부의 용화산암체로 구분된다(Sagong *et al.*, 1997). 추곡령암체는 암체의 대부분을 차지하는 반상흑운모화강암과 상대적으로 소량 산출되는 등립질흑운모화강암으로 이루어져 있으며, 추곡령암체의 대부분을 차지하는 반상흑운모화강암은 185.3±0.6 Ma의 저어콘 U-Pb 연대를 가진다(Moon *et al.*, 2024).

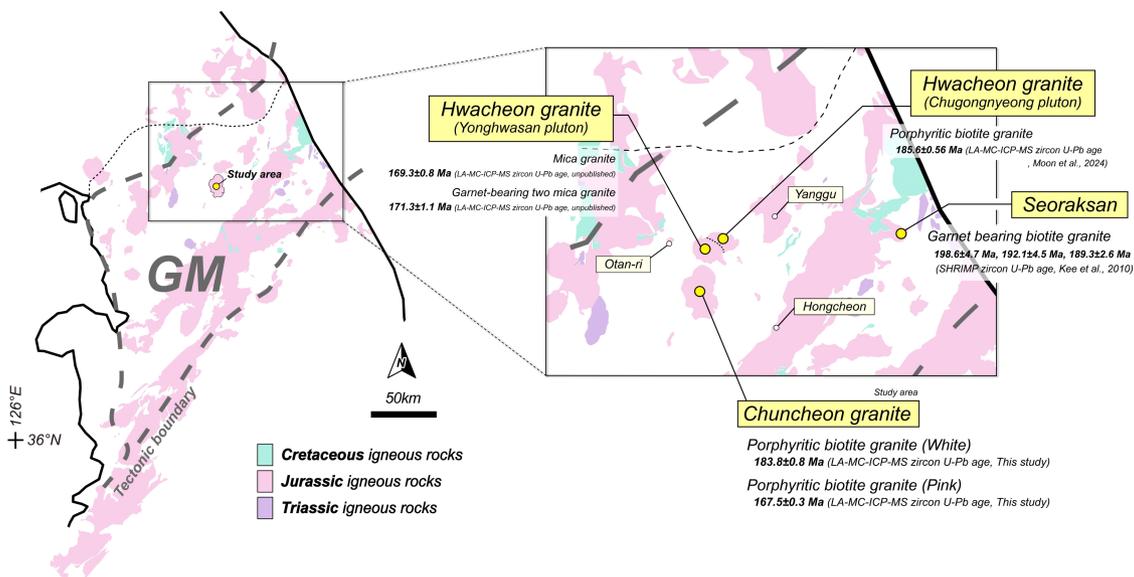


Fig. 14. Distribution map of Mesozoic igneous rocks in the Gyeonggi massif (GM) and early Jurassic igneous rocks in the Chuncheon area in the north central Gyeonggi massif (GM).

용화산암체는 석류석의 존재 유무에 따라 남쪽의 석류석복운모화강암과 북쪽의 운모화강암으로 구분된다(Sagong *et al.*, 1997; Kwon *et al.*, 2006). Cho *et al.* (1996)은 석류석복운모화강암에 대해 172 ± 5 Ma CHIME 모나자이트 연대를 보고한 바 있으며, Kwon *et al.* (2006)은 용화산암체에 대해 172.0 ± 6.8 Ma의 Rb-Sr 전암 연대를 보고하였다. 우리는 화천화강암 용화산암체의 정확한 생성 연대를 알아보기 위해 저어콘 U-Pb 연대를 측정하였으며, 그 결과 석류석복운모화강암은 171.3 ± 1.1 Ma (미발표자료), 운모화강암은 169.3 ± 0.8 Ma (미발표자료)의 생성연대를 갖는 것을 확인하였다.

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 경기육괴 동부(예: 설악산 오색화강암)에 국한되어 산출되는 것으로 알려져 있었으나, Moon *et al.* (2024)은 화천화강암 추곡령암체가 185.3 ± 0.6 Ma의 저어콘 U-Pb 연대를 가짐을 보고하고, 경기육괴 북중부 화천 일대에서도 쥐라기 전기 플린스바흐절 기간 동안 화성활동이 있었음을 보고하였다.

춘천화강암의 백색 반상화강암 생성 연대는 183.8 ± 0.8 Ma, 담홍색 반상화강암은 167.5 ± 0.3 Ma로, 이러한 결과는 춘천화강암 북동쪽에 인접하여 분포하는 화천화강암 추곡령암체와 더불어 춘천에서도 쥐라기 전기 기간에 화성활동이 있었음을 지시한다.

종합하면 경기육괴 북중부 춘천-화천 일대에서는 쥐라기 전기 플린스바흐절(192.9-184.2 Ma) 기간에 화천화강암 추곡령암체(185.3 ± 0.6 Ma)를 생성한 마그마 활동을 시작으로, 연이어 춘천화강암 백색 반상화강암(183.8 ± 0.8 Ma)을 생성한 쥐라기 전기 화성활동이 있었고, 뒤이어 화천화강암 용화산암체를 형성한 171-169 Ma 화성활동 및 춘천화강암 담홍색 반상화강암을 생성한 167 Ma 화성활동이 계속해서 일어난 것을 알 수 있다. 이처럼 경기육괴 북중부 춘천 및 화천 일대에서는 쥐라기 전기와 중기(174.7-161.5 Ma)에 걸쳐 연속적인 화성활동이 활발하게 있었음을 알 수 있다(그림 14).

6. 결론

경기육괴 북중부에 위치하는 춘천시 일대에 분포하는 춘천화강암은 백색의 알칼리장석 및 석영을 반정으로 갖는 백색 반상화강암과 담홍색 알칼리장석을 반정으로 갖는 담홍색 반상화강암이 혼재하여 나타나는 산출 양상을 보인다. 두 암상에 대해 저어콘 U-Pb 연대를 측정한 결과, 백색 반상흑운모화강암은 183.8 ± 0.8 Ma, 담홍색 반상흑운모화강암은 167.5 ± 0.3 Ma로, 쥐라기 전기에 백색 반상화강암

이 먼저 관입한 후 약 16 Myr이 지난 쥐라기 중기에 담홍색 반상화강암이 관입하며 전체적으로 춘천화강암체를 형성하였다.

춘천화강암을 구성하는 두 암상은 서로 매우 유사한 지화학적 성질을 가진다. 즉 백색 반상화강암과 담홍색 반상화강암은 모두 고알루미나질이며, 스파이더 다이어그램과 REE 그림에서도 매우 유사한 변화 패턴과 기울기를 보이며, 희토류원소 패턴에서 유사한 정도의 부의 Eu 이상을 보여준다. 이러한 지화학적 유사성은 춘천화강암을 구성하는 백색 반상화강암과 담홍색 반상화강암이 서로 비슷한 성질을 갖는 근원 물질로부터 유사한 정도의 부분용융 및 정출 과정을 통해 형성되었을 가능성이 있음을 시사한다. 춘천화강암은 조구조 판별도에서 화산호 영역에 도시되며, 스파이더 다이어그램에서 친석원소인 Cs, Rb, Ba이 부화되고 고장력원소인 Nb, P, Ti, Ta가 결핍된 지화학적 특성을 보여주는 것으로 보아 섭입대 환경에서 생성되었음을 알 수 있다. 춘천화강암과 인근에 분포하는 화천화강암에 대한 저어콘 U-Pb 연대자료는 경기육괴 북중부 춘천-화천 일대에서 약 185 Ma부터 167 Ma까지 쥐라기 전기와 중기 기간에 걸쳐 연속적인 화성활동이 있었음을 지시한다.

감사의 글

이 논문은 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이다(No. 2019R1A6A1A03033167). 이 논문을 읽고 많은 유익한 조언을 해주신 두 분의 심사위원과 편집위원께 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

- 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, W.S., Cho, M.S. and Kim, Y.S., 2013, An Efficient Method for Zircon Separation Using the Gold Pan. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 22, 63-70 (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*, Nagoya University, 43, 49-65.
- Cho, M.S. and Kim, J.W., 1993, Occurrence of kyanite in the Yongduri gneiss complex of the Chuncheon-Hongcheon area: its tectonometamorphic implication. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 2, 1-8 (in Korean with English abstract).
- 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).
- Condie, K.C., 1989, Origin of the Earth's crust. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 75, 57-81.
- Defant, M.J. and Drummond, M.S., 1990, Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *nature*, 347, 662-665.
- Douce, A.E.P., 1999, What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas?. Geological Society, London, Special Publications, 168, 55-75.
- Förster, H.J., Tischendorf, G. and Trumbull, R.B., 1997, An evaluation of the Rb vs. (Y + Nb) discrimination diagram to infer tectonic setting of silicic igneous rocks. *Lithos*, 40, 261-293.
- Frost, B.R., Barnes, C.G., Collins, W.J., Arculus, R.J., Ellis, D.J. and Frost, C.D., 2001, A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of petrology*, 42, 2033-2048.
- 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.
- Jin, M.S., Shin, S.-C., Kim, S.-J. and Choo, S.H., 1993, Geochronology and thermal history of the Chuncheon granite in the Gyeonggi massif South Korea. *The Journal of Petrological Society of Korea*, 2, 122-129 (in Korean with English abstract).
- Kim, C.B., Park, Y.S., Chang, H.W. and Turek, A., 1998, Geochronology, petrology and tectonics of triassic-jurassic plutonic rocks of the ryeongnam and gyeonggi massifs, Korea. *Chinese Science Bulletin*, 43, 65.
- 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.C., Oh, C.W., Yengkhom, K.S. and Yi, K., 2014, Paleoproterozoic magmatic and metamorphic events in the Hongcheon area, southern margin of the Northern Gyeonggi Massif in the Korean Peninsula, and their links to the Paleoproterozoic orogeny in the North China Craton. *Precambrian Research*, 248, 17-38.
- Lee, B.Y., Oh, C.W., Lee, S.H., Seo, J.E. and Yi, K.W., 2020, Ages and tectonic settings of the Neoproterozoic igneous rocks in the Gyeonggi Massif of the southern Korean Peninsula and the correlation with the Neoproterozoic igneous rocks in China. *Lithos*, 370-371, 105625.
- Lee, D.S., Lee, H.Y., Nam, K.S. and Yang, S.Y., 1974, Geological report of the Chuncheon sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 3 p (in Korean with English abstract).
- Lee, S.R. and Cho, M.S., 1995, Tectonometamorphic evolution of the Chuncheon amphibolite, central Gyeonggi massif, South Korea. *Journal of Metamorphic Geology*, 13, 315-328.
- Ludwig, K.R., 2012, User's manual for Isoplot 3.75: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 5, 75.
- 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., 2024, Zircon U-Pb age and geochemical studies on the petrogenesis of the Chugongnyeong pluton of the Hwacheon granite. *Journal of the Geological Society of Korea*, 60, 143-156 (in Korean with English abstract).
- Park, H.I., Chi, J.M., Chang, K.H. and Ko, I.S., 1974, Geological report of the Naepyeong sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 3 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.
- 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. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 14, 83-92.
- 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, <https://doi.org/10.1029/2004TC001720>.
- 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.
- Streckeisen, A., 1974, Classification and nomenclature of plutonic rocks recommendations of the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks. *Geologische Rundschau*, 63, 773-786.
- 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.
- Watson, E.B. and Harrison, T.M., 1983, Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of cr-

- tal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64, 295-304.
- Whalen, J.B., Currie, K.L. and Chappell, B.W., 1987, A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to mineralogy and petrology*, 95, 407-419.
- 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*. Dordrecht: Springer Netherlands, London, 465 p.
- 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 sub-duction of the Pacific-Izanagi ridge?. *Chemical Geology*, 437, 30-43.