지질학회지 제62권 제1호, p. 207-218 (2026년 3월)
J. Geol. Soc. Korea, v. 62, no. 1, p. 207-218 (March 2026)
DOI http://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2026.002

Check for updates

ISSN 0435-4036 (Print)
ISSN 2288-7377 (Online)

Short Note

한반도 중서부 덕적도-소야도-이작도에 분포하는 후기 트라이아스기 화강암질암의 저어콘 U-Pb 연령과 전암 지화학 특성

박정영[1,2], 이승환[1,‡], 박승익[2], 조등룡[3]

[1]*한국지질자원연구원 지질조사연구본부*
[2]*경북대학교 지질학과*
[3]*지오에이드*

Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of Late Triassic granitoids in the Deokjeok-Soya-Ijak islands, Central-western Korean Peninsula

Jeong-Yeong Park[1,2], Seung Hwan Lee[1,‡], Seung-Ik Park[2], Deung-Lyong Cho[3]

[1]*Geological Survey Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea*
[2]*Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu 41566, Republic of Korea*
[3]*GeoAid, Daejeon 34187, Republic of Korea*

Received: December 1, 2025 / **Revised:** December 29, 2025 / **Accepted:** January 15, 2026
‡**Corresponding author:** +82-42-868-3220 / **E-mail:** lsh07@kigam.re.kr

요약: 한반도 서해안의 덕적도-소야도-이작도 지역에는 후기 트라이아스기 화강암질암이 넓게 분포한다. 본 연구에서는 이 지역의 화강암과 석영몬조니암을 대상으로 저어콘 U-Pb 연령 및 전암 지화학 특성을 분석하였다. 기존 문헌 자료와의 비교를 종합하면, 본 암체들은 약 223-217 Ma에 관입한 후기 트라이아스기 심성암으로 해석된다. 지화학적으로는 K 함량이 높은 칼크알칼리 내지 쇼쇼나이트 계열의 조성을 보이며, 한반도 중부 다른 지역의 후기 트라이아스기 화강암질암과 유사한 특징을 나타낸다. 이러한 결과는 연구 지역의 화강암질암이 대륙 충돌 이후 지각이 확장되는 과정에서 형성된 충돌 이후 화성활동의 산물임을 지시한다. 본 연구는 한반도 후기 트라이아스기 충돌 후 화성활동의 시기를 약 217 Ma까지 확장하며, 당시의 지각 진화 과정에 대한 새로운 관점을 제시한다.

주요어: 충돌 후 화강암, 저어콘 U-Pb, 전암 지화학, 후기 트라이아스기

ABSTRACT: Late Triassic granitoids are widely distributed in the Deokjeok-Soya-Ijak islands along the western coast of the Korean Peninsula. This study presents zircon U-Pb ages and whole-rock geochemical characteristics of granites and quartz monzonite from the area. Together with previously published data, our results indicate that these plutons were emplaced during approximately 223-217 Ma. Geochemically, the rocks show high-K calc-alkaline to shoshonitic affinities, and their rare earth and trace element patterns closely resemble those of other Late Triassic granitoids in the central Korean Peninsula. These results suggest that the granitoids formed as products of post-collisional magmatism associated with crustal extension following continental collision. Our findings extend the duration of Late Triassic post-collisional magmatism in the central Korean Peninsula to around 217 Ma and provides new insights into the tectonic evolution of the continental crust during this period.

Key words: post-collisional granite, zircon U-Pb, whole-rock geochemistry, Late Triassic

Copyright © The Geological Society of Korea 2026

1. 서 론

한반도 중부 지역의 후기 트라이아스기 관입암은 대륙 충돌 이후 지각이 얇아지는 과정에서의 열적 완화(thermal relaxation)를 지시하는 중요한 지표로 간주된다. 이러한 관입암은 서해안을 따라 넓게 분포하며(그림 1), 남양, 양평, 오대산 등 한반도 중부에서도 보고되었다. 기존의 저어콘 U-Pb 연령, 전암 지화학, 동위원소 분석에 의하면 한반도 중부에서는 약 235-220 Ma 동안 광범위하게 지속된 충돌 후 화성활동이 제시되어 왔다(Choi *et al*., 2009; Williams *et al*., 2009; Seo *et al*., 2010; Kim *et al*., 2011; Cheong *et al*., 2019; Jeong and Oh, 2021; Kawaguchi *et al*., 2023).

서해안의 덕적도-소야도-이작도에는 다양한 종류의 후기 트라이아스기 관입암이 분포한다. 저어콘 U-Pb 연대 측정 결과에 따르면 이들의 관입 시기는 약 223-217 Ma로, 한반도에 보고된 후기 트라이아스기 충돌 후 관입암과 시기가 유사하다(Cho and Lee, 2016; Park *et al*., 2020). Park *et al*. (2020)은 구조지질학 및 지구연대학적인 근거를 토대로 이 암체들이 충돌 후 과정에서 만들어졌다고 해석하였으나, 이를 직접 뒷받침하는 전암 지화학 자료는 아직 충분히 제시되지 않았다.

본 연구는 한반도 중서부의 덕적도-소야도-이작도에 분포하는 후기 트라이아스기 흑운모화강암 및 반상 화강암과 석영몬조니암을 대상으로 SHRIMP (Sensitive High-Resolution Ion Microprobe) 저어콘 U-Pb 연대 측정과 전암 지화학 분석 결과를 보고한다. 이를 통해 한반도 중부에서의 충돌 후 화성활동의 시공간적 분포를 재평가하고, 중생대 한반도 지각 진화사에 대한 이해에 기여하고자 한다.

2. 지질 개요 및 암석 기재

한반도 서해안 중부의 덕적도-소야도-이작도는 신시생대 혼성암질 편마암을 기저로, 고원생대 변성 심성암류, 고원생대 알칼리 화강암, 신원생대 운모편암, 고생대 변성퇴

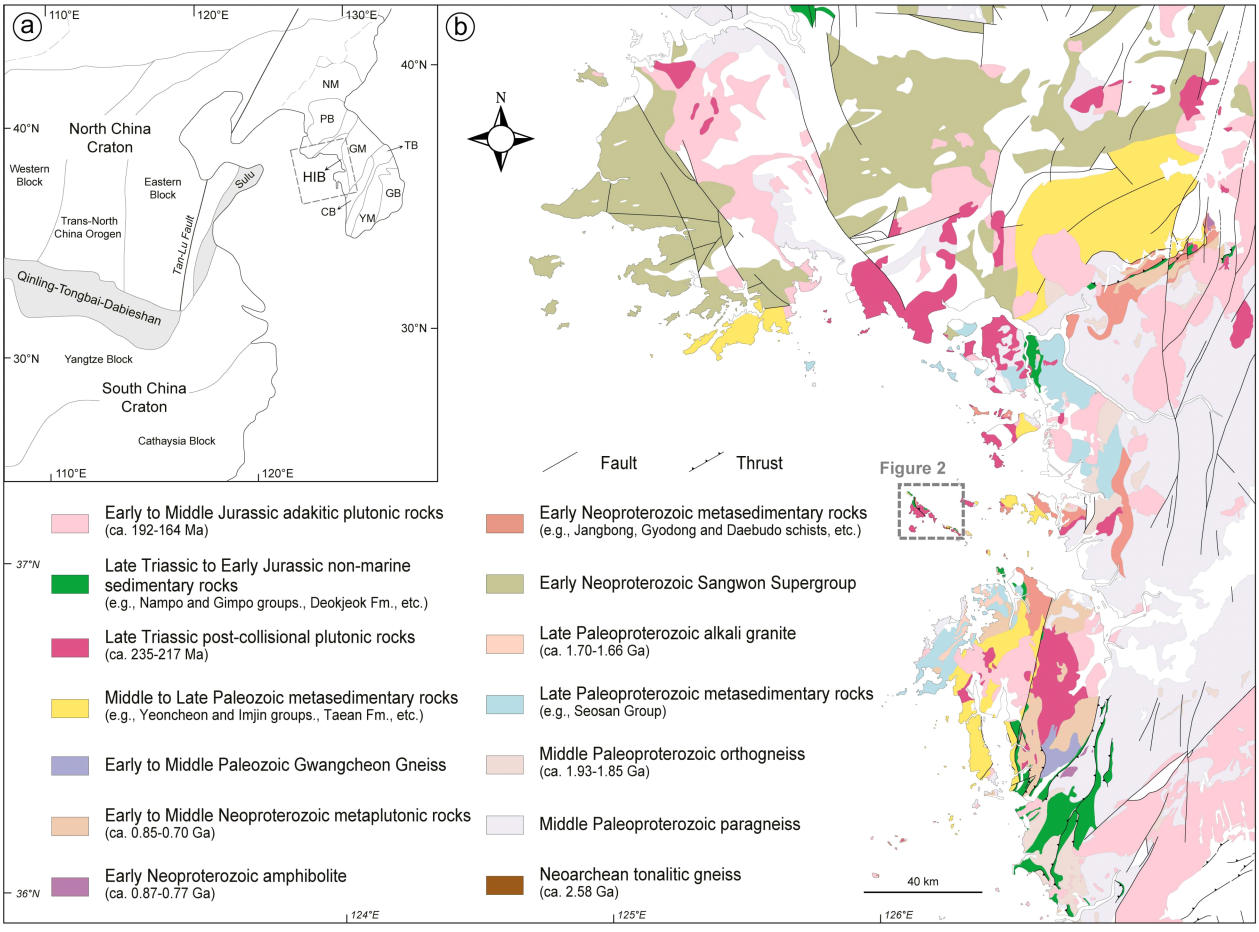

Fig. 1. (a) Simplified tectonic map of the Korean Peninsula and adjacent areas (modified from Cluzel, 1992; Zheng *et al*., 2013). (b) Geologic map of the central-western Korean Peninsula (modified from Kee *et al*., 2019). The gray rectangle indicates location of the study area. Abbreviations: NM-Nangnim Massif; PB-Pyeongnam Basin; HIB-Hongseong-Imjingang Belt; GM-Gyeonggi Massif; CB-ChungCheong Basin; TB-Taebaek Basin; YM-Yeongnam Massif; GB-Gyeongsang Basin.

적암, 후기 트라이아스기 화강암질암 및 진리층, 전기 쥐라기 덕적층으로 구성된다(그림 2). 암체의 분포는 북서-남동 방향의 연성 전단대와 북서-남동 내지 남-북 방향의 압축성 단층에 의해 제어된다.

후기 트라이아스기 화강암질암은 흑운모화강암, 반상 화강암, 석영몬조니암 등으로 구성된다(Park *et al*., 2020; Park and Park, 2020). 흑운모화강암은 덕적도의 대부분과 대이작도 서남부에 분포한다. 덕적도 화강암은 회색~담회색의 세립~중립질이며, 드물게 알칼리장석 반정을 포함한다(그림 3a). 주구성 광물은 주로 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모이며 일부 흑운모는 녹니석화 되었다(그림 4a). 부수 광물로 각섬석, 저어콘, 녹렴석, 갈렴석, 인회석, 불투명 광물 등이 산출한다(Cho and Lee, 2016). Cho and Lee (2016)는 저어콘 SHRIMP U-Pb 가중평균연령을 223.0±1.1 Ma (MSWD=1.12)로 보고하였다. 대이작도 흑운모화강암은 덕적도와 비교했을 때 조성은 유사하지만 더 어두운 회색을 띠며 입자가 더 작고 흑운모의 함량이 더 적은 것이 특징이다(그림 3b와 4b).

반상 화강암은 덕적도 동부와 소야도에 분포하며, 조성은 흑운모화강암과 유사하나 알칼리장석 및 미사장석 반정의 발달이 특징이다(그림 3c와 4c). 반정은 장축 길이가 최대 4-5 cm에 달하며, 이들의 배열을 통해 정의되는 화성 엽리가 국부적으로 발달한다. Cho and Lee (2016)와 Park *et al*. (2020)은 반상 화강암에서 각기 217.8±1.5 Ma (MSWD =1.6)의 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연령과 218.8±0.43 Ma (MSWD=1.17)의 LA-MC-ICP-MS 저어콘 U-Pb 연령을 보고하였다.

마지막으로 석영몬조니암은 소이작도 서북부에 분포한다. 앞선 두 암체와 구성 광물은 유사하나 석영의 함량이 상대적으로 낮고 사장석의 비율이 더 높다(그림 3d와 4d). 흑운모는 수십 ㎛ 정도 크기의 타형으로 산출하며 이들이 집합체를 이룬다. 집합체의 크기는 다른 광물의 결정 크기와 비슷하게 1-2 mm 내외의 것들이 대부분이다.

3. SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정

3.1. 분석 방법

대이작도 흑운모화강암(IJ9)과 소이작도 석영몬조니암(DJ122)의 관입 시기를 규명하기 위하여 한국기초과학지원연구원 오창센터의 SHRIMP IIe/MC 기기를 이용하여 저어콘 U-Pb

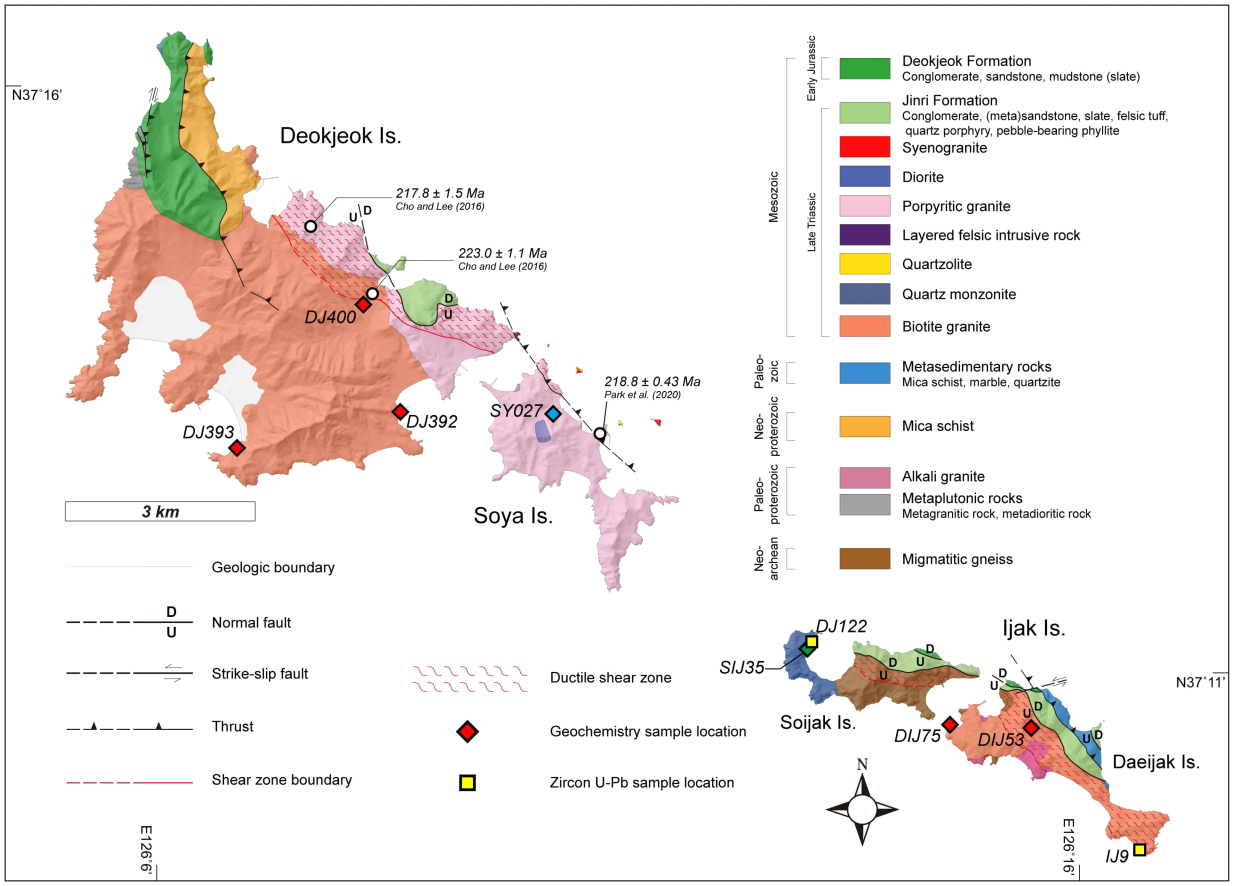

Fig. 2. Geologic map of the Deokjeok, Soya, Ijak islands. Sample locations are shown on the map.

Fig. 3. Outcrop photographs of the Late Triassic granitoids. (a) Biotite granite in Deokjeok Island. (b) Biotite granite in Daeijak Island. (c) Porphyritic granite in Deokjeok Island. (d) Quartz monzonite in Soijak Island.

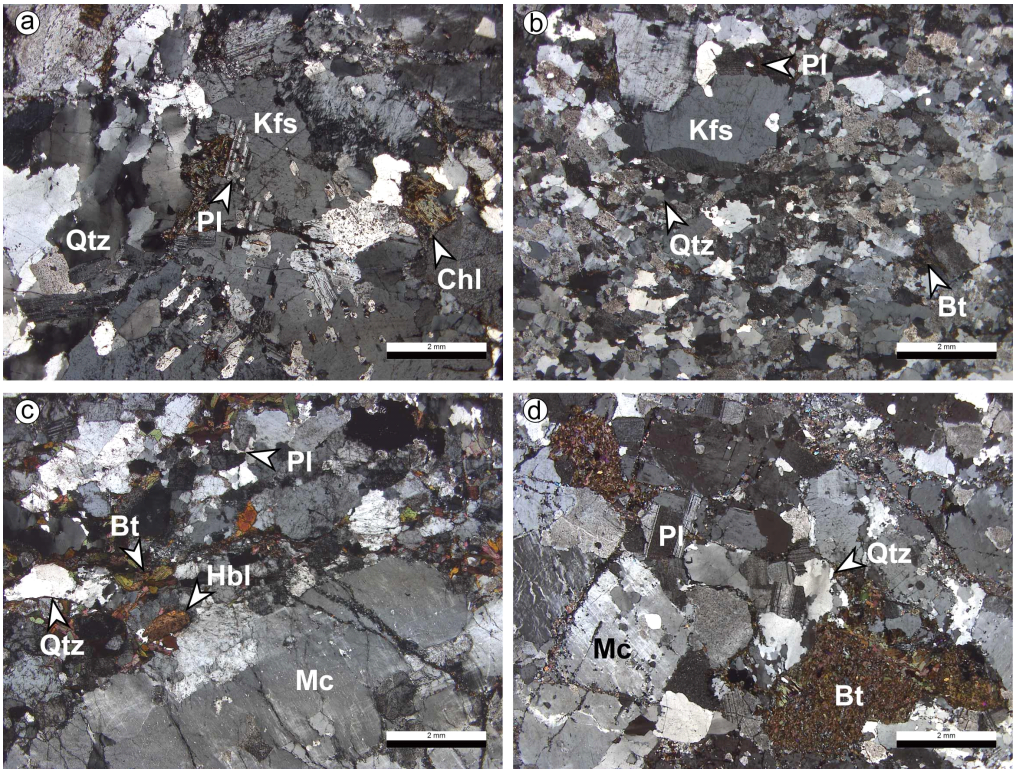

Fig. 4. Photomicrographs (cross-polarized light) of the Late Triassic granitoids. (a) Biotite granite in Deokjeok Island. (b) Biotite granite in Daeijak Island. (c) Porphyritic granite in Soya Island. (d) Quartz monzonite in Soijak Island. Abbreviations : Qtz-Quartz, Pl-Plagioclase, Kfs-Alkali feldspar, Mc-Microcline, Bt-Biotite, Hbl-Hornblende.

연대측정을 실시하였다. 분석을 위하여 야외에서 채취한 암석 시료를 분쇄하여 중광물 분리를 통해 저어콘을 추출하였다. 추출된 저어콘은 SL-13 (U=238 ppm) 및 FC-1 ($^{206}Pb/^{238}U$=0.1859, Claué-Long *et al*., 1995) 표준 저어콘과 함께 에폭시에 마운트하였다. 제작된 마운트는 전자현미경의 음극선발광(cathodoluminescence; CL) 및 후방산란전자(backscattered electron; BSE) 영상 촬영을 거쳤고 이를 통해 획득한 저어콘의 내부 구조를 기반으로 분석점을 선택하였다. 빔의 분석 직경과 세기는 각각 25 ㎛, 4-6 nA 이며 획득한 자료는 SQUID 2.50과 Isoplot 3.71(Ludwig, 2008, 2009) 소프트웨어를 이용해 처리하였고, 모든 분석값의 오차는 2σ (95% 신뢰수준) 기준으로 산정되었다. 자세한 분석 방법과 절차는 Williams *et al*. (2009)을 따랐다.

3.2. 분석 결과

석영몬조니암의 저어콘은 대체로 자형 내지 반자형의 주

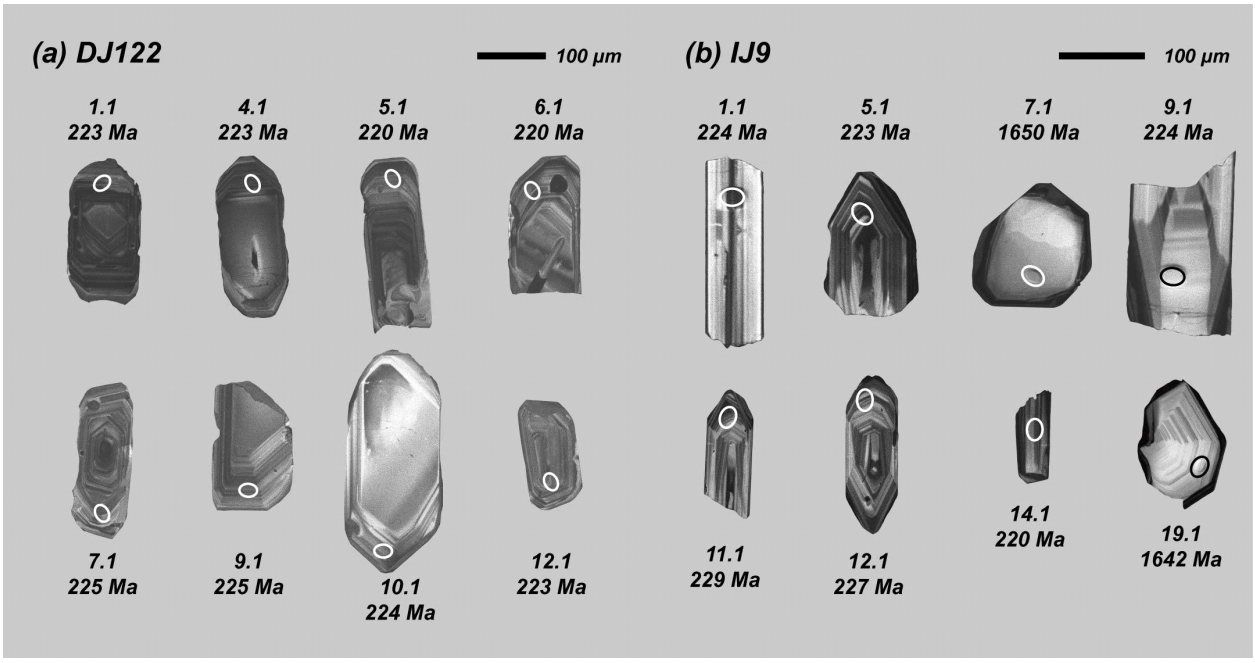

Fig. 5. Scanning electron microscope cathodoluminescence (CL) images of sectioned zircon grains from (a) quartz monzonite and (b) biotite granite.

Table 1. SHRIMP zircon U-Pb isotopic data of quartz monzonite (DJ122) in the study area.

Spot	Pb (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)	Th /U	$^{207}Pb^*/^{206}Pb$	±% (2σ)	$^{207}Pb^*/^{235}U$	±% (2σ)	$^{206}Pb^*/^{238}U$	±% (2σ)	err. corr.	Apparent ages (Ma) $^{206}Pb/^{238}U$	±%	$^{207}Pb/^{206}Pb$	±%
DJ122 (Quartz monzonite in Soijak Island) (WGS 84; N37.186381° E126.218360°)															
DJ122_1.1	8.9	214	293	0.75	0.03985	23.9	0.19052	24.0	0.03468	1.9	0.1	223	4	-361	619
DJ122_2.1	4.6	134	150	0.93	0.04890	26.8	0.24071	27.3	0.03570	4.7	0.2	227	10	143	630
DJ122_3.1	12.0	369	383	0.99	0.04335	15.8	0.21592	16.0	0.03613	2.6	0.2	231	6	-148	391
DJ122_4.1	17.0	514	562	0.95	0.05251	7.9	0.25553	8.1	0.03530	1.9	0.2	223	4	308	180
DJ122_5.1	8.0	235	270	0.90	0.05809	12.4	0.28067	12.7	0.03504	2.6	0.2	220	5	533	273
DJ122_6.1	8.7	275	293	0.97	0.05055	16.2	0.24169	16.3	0.03468	1.9	0.1	220	4	220	374
DJ122_7.1	9.8	286	320	0.92	0.05418	12.1	0.26692	12.2	0.03573	1.8	0.1	225	4	379	272
DJ122_8.1	10.4	219	340	0.67	0.05113	13.1	0.25172	13.3	0.03571	2.5	0.2	226	5	247	301
DJ122_9.1	8.9	225	292	0.80	0.04603	18.8	0.22448	18.9	0.03537	2.0	0.1	225	4	-1	454
DJ122_10.1	6.5	230	213	1.11	0.05523	17.2	0.27098	17.4	0.03558	2.7	0.2	224	6	422	385
DJ122_11.1	11.0	414	366	1.17	0.04856	12.9	0.23417	13.0	0.03497	1.7	0.1	222	3	127	304
DJ122_12.1	8.2	291	272	1.10	0.04979	15.3	0.24137	15.5	0.03516	2.5	0.2	223	5	185	356
DJ122_13.1	7.7	279	262	1.10	0.05422	14.6	0.25596	14.7	0.03424	2.0	0.1	216	4	380	328

상으로 산출한다(그림 5a). 입자의 장축 길이는 100-250 ㎛ 범위를 가지며 1:2-1:3.5의 종횡비를 보인다. CL 영상에서 진동 누대구조(oscillatory zoning) 또는 부분 누대구조(sector zoning)가 뚜렷하며 일부는 상속핵을 가진다. 총 13개의 입자를 분석하였고, 이들의 Th 함량은 134-514 ppm, U 함량은 150-562 ppm, Th/U 비율은 0.67-1.17의 범위를 보인다(표 1). 석영몬조니암의 $^{206}Pb/^{238}U$ 겉보기 연령은 약 230-220 Ma의 범위를 보이고, Tera-Wasserburg 일치곡선 위에 도시되는 13개의 분석점에 대한 일치곡선연령은 222.8 ±1.8 Ma (n=13, MSWD=1.5)이다(그림 6a).

흑운모화강암의 저어콘은 자형, 반자형, 타형이 혼재하며 일부 입자들은 아원형의 마모된 형태를 보인다(그림 5b). 입자 크기는 50-500 ㎛ 까지 다양하게 나타나며 종횡비 또한 1:1에서 1:3.5까지 폭넓게 나타나는 편이다. CL 영상에서 진동 누대구조 또는 부분 누대구조를 잘 보여주고 일부는 상속핵을 가지고 있다. 총 19개의 입자를 분석하였고, 이들

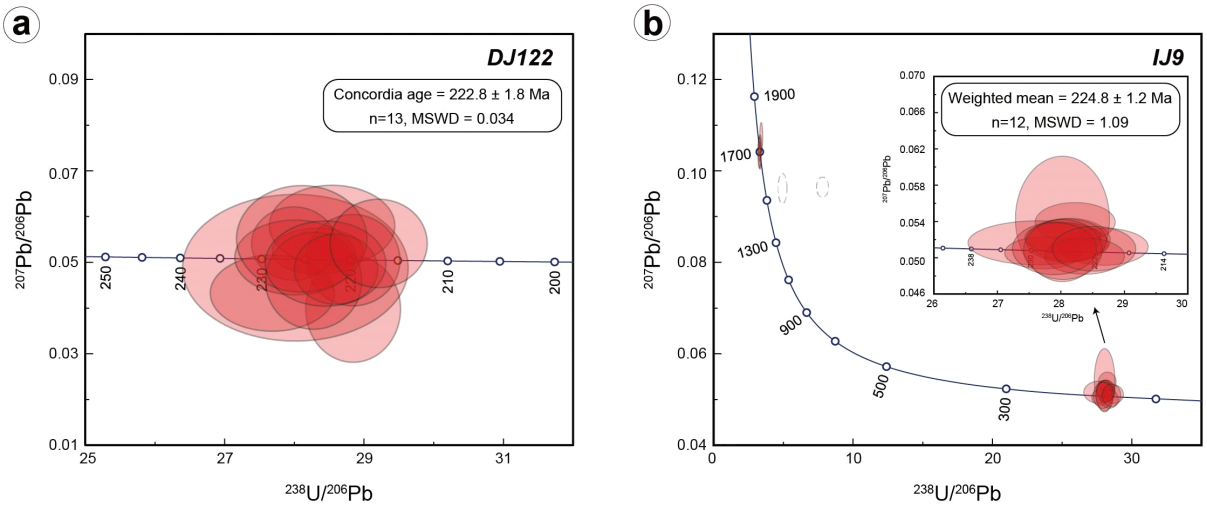

Fig. 6. Tera-Wasserburg concordia diagrams for (a) quartz monzonite (DJ122) and (b) biotite granite (IJ9).

Table 2. SHRIMP zircon U-Pb isotopic data of biotite granite (IJ9) in the study area.

Spot	Pb (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)	Th /U	$^{207}Pb^*/^{206}Pb$	±% (2σ)	$^{207}Pb^*/^{235}U$	±% (2σ)	$^{206}Pb^*/^{238}U$	±% (2σ)	err. corr.	Apparent ages (Ma) $^{206}Pb/^{238}U$	±%	$^{207}Pb/^{206}Pb$	±%
IJ9 (Biotite granite in Daeijak Island) (WGS 84; N37.158079° E126.278529°)															
IJ9_1.1	10.3	294	338	0.90	0.04789	3.5	0.23342	7.3	0.03535	1.9	0.3	225	4	93.6	166
IJ9_2.1	26.4	117	249	0.49	0.09600	1.0	1.69880	5.0	0.12834	4.6	0.9	750	34	1548	37
IJ9_3.1	12.4	158	411	0.40	0.04805	3.6	0.23297	7.4	0.03516	1.9	0.3	223	4	102	170
IJ9_4.1	14.0	189	466	0.42	0.04983	2.2	0.23915	4.8	0.03481	2.0	0.4	221	4	187	101
IJ9_5.1	13.4	170	442	0.40	0.04611	3.1	0.22290	6.5	0.03506	1.8	0.3	223	4	3.5	150
IJ9_6.1	13.7	47	54	0.90	0.10050	2.1	4.06102	5.0	0.29306	2.8	0.6	1659	41	1633	77
IJ9_7.1	36.7	97	141	0.71	0.10138	0.9	4.23534	2.7	0.30299	2.1	0.8	1712	32	1650	32
IJ9_8.1	29.3	96	111	0.89	0.10392	0.9	4.38126	2.8	0.30577	2.2	0.8	1723	34	1695	32
IJ9_9.1	4.2	47	139	0.35	0.03863	13.7	0.18637	27.5	0.03499	2.4	0.1	225	5	-442	719
IJ9_10.1	15.7	257	513	0.52	0.04651	3.9	0.22747	7.9	0.03547	1.8	0.2	226	4	24.1	185
IJ9_11.1	9.6	115	310	0.38	0.04972	2.8	0.24739	6.4	0.03609	3.3	0.5	229	7	182	129
IJ9_12.1	7.3	81	238	0.35	0.04563	4.9	0.22399	10.0	0.03560	2.0	0.2	227	4	-22	238
IJ9_13.1	18.1	312	585	0.55	0.04949	1.8	0.24582	4.0	0.03602	1.8	0.4	228	4	171	84
IJ9_14.1	9.6	163	320	0.53	0.04548	4.3	0.21833	8.8	0.03481	1.9	0.2	222	4	-30	208
IJ9_15.1	22.0	619	719	0.89	0.05018	1.9	0.24617	4.2	0.03558	1.8	0.4	226	4	203	89
IJ9_16.1	10.9	39	63	0.64	0.09059	2.2	2.52742	7.0	0.20234	5.4	0.8	1173	58	1438	86
IJ9_17.1	26.2	140	101	1.43	0.10379	1.1	4.31856	3.2	0.30178	2.3	0.7	1701	35	1693	40
IJ9_18.1	10.6	133	346	0.40	0.04922	3.0	0.24079	6.2	0.03548	1.9	0.3	225	4	158	139
IJ9_19.1	11.8	37	45	0.87	0.10095	1.8	4.26138	4.6	0.30615	3.0	0.6	1730	45	1642	66

Table 3. Major and trace element analyses of the Late Triassic granitoids in the study area.

Rock type	Biotite granite					Porphyritic granite	Quartz monzonite
Sample	DJ392	DJ393	DJ400	DIJ53	DIJ75	SY027	SIJ35
Major elements (wt %)							
SiO_2	71.77	70.96	72.92	73.27	69.84	71.46	62.35
Al_2O_3	14.38	14.22	14.1	13.44	14.65	13.51	16.78
$Fe_2O_3^T$	3.28	3.04	2.74	1.69	2.87	3.6	4.89
MnO	0.043	0.043	0.046	0.014	0.028	0.049	0.076
MgO	0.35	0.25	0.29	0.28	0.63	0.44	0.82
CaO	0.36	0.93	0.93	0.54	1.92	0.93	1.45
Na_2O	3.02	3.43	3.48	3.13	3.4	3.28	4.12
K_2O	5.35	5.73	4.83	5.73	4.56	4.25	5.83
TiO_2	0.261	0.197	0.23	0.195	0.302	0.275	0.637
P_2O_5	0.1	0.06	0.08	0.07	0.14	0.11	0.2
L.O.I	1.31	0.71	0.88	0.7	1.24	0.75	1.49
Total	100.2	99.58	100.5	99.04	99.56	98.65	98.63
Trace elements (ppm)							
Ba	1687	1492	1276	1097	1613	1138	1622
Be	3	4	5	3	4	4	2
Bi	0.2	0.2	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Cs	1.4	1.5	1.8	1.4	1.8	1.8	1.7
Ga	18	18	19	19	22	19	23
Ge	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.1	1.3
Hf	4.2	3.3	5.0	4.0	5.1	4.2	14.5
Nb	13.6	13.1	22.1	11.4	8.8	13.8	32.8
Rb	170	195	183	164	148	143	128
Sn	2	3	3	1	2	2	1
Sr	318	317	290	234	456	397	408
Ta	1.21	1.13	2.14	1.18	0.65	0.85	0.93
Th	30.0	23.1	30.5	38.7	18.3	31.2	32.9
U	2.12	2.48	4.11	5.54	1.61	2.9	2.25
V	20	16	10	8	22	21	26
Y	14	15	26	16	10	14	30
Zr	205	160	210	163	208	198	636
La	54.3	54.4	86.4	91.7	86.9	82.0	271.0
Ce	141	102	123	155	150	142	385
Pr	9.99	9.94	14.00	16.00	15.80	14.60	40.10
Nd	31.8	33.5	45.5	50.6	51.7	48.9	125
Sm	4.88	5.38	7.2	7.89	7.49	7.62	16.00
Eu	0.69	0.86	1.06	0.98	1.26	0.95	2.43
Gd	3.09	3.63	5.15	5.14	4.53	4.61	9.51
Tb	0.46	0.57	0.79	0.7	0.52	0.58	1.25
Dy	2.49	3.08	4.43	3.35	2.41	2.97	6.62
Ho	0.46	0.52	0.83	0.61	0.42	0.52	1.23
Er	1.31	1.46	2.32	1.62	1.06	1.37	3.24
Tl	0.9	1.2	1.0	0.7	0.7	0.9	0.6
Tm	0.20	0.21	0.33	0.23	0.14	0.19	0.41
Yb	1.26	1.36	2.1	1.73	0.88	1.25	2.91
Lu	0.22	0.22	0.35	0.27	0.14	0.20	0.45
$(La/Yb)_N$	30.91	28.69	29.51	38.02	70.83	47.05	66.80

Total iron as $Fe_2O_3^T$. (La/Yb)N is normalized to chondrite after McDonough and Sun (1995). L.O.I = Loss of ignition.

의 Th 함량은 37-619 ppm, U 함량은 45-719 ppm, Th/U 비율은 0.35-1.43의 범위를 보인다(표 2). 흑운모화강암의 $^{206}Pb/^{238}U$ 겉보기 연령은 229-221 Ma의 후기 트라이아스기가 우세하고, 일부 핵에서 1548-1438 Ma와 1695-1633 Ma의 연령이 산출된다. Tera-Wasserburg 일치곡선 위에 도시되는 분석점 중에서 가장 젊은 저어콘의 가중평균연령은 224.8±1.2 Ma (n=12, MSWD=1.09)이다(그림 6b).

4. 전암 지화학 분석

4.1. 분석 방법

연구지역 후기 트라이아스기 화강암질암의 지화학적 특징을 규명하기 위해서 흑운모화강암 5개(DJ392, DJ393, DJ400, DIJ53, DIJ75), 반상 화강암 1개(SY027), 석영몬조니암 1개(SIJ35)의 시료에 대해 전암 지화학 분석을 수행하였다. 분석은 캐나다의 Activation Laboratories Ltd.에 의뢰하여 실시하였으며, 주원소 및 미량원소, 희토류원소의 분석은 퓨전 유도결합 플라즈마 원자방출 분광기(FUS-ICP-AES; Thermo Jarrel-Ash ENVIRO Ⅱ)와 퓨전 유도결합 플라즈마 질량분석기(FUS-ICP-MS; Perkin-Elmer Optima 3000)를 이용하였다. 분석 결과의 정확도 및 신뢰도를 확보하기 위해 NIST 694, W-2a, SY-4, REE-1 등 다양한 표준물질의 분석을 병행하였으며 이에 대한 상대오차 범위를 확인하였다. 주원소는 NIST 694, DNC-1, W-2a, SY-4, BIR-1a 등 표준물질의 분석을 통해 검증되었으며 표준물질의 공인값 대비 상대오차 ±2% 이내의 일치도가 확인되었다. 미량원소는 TDB-1, SY-4, OREAS 101b, USZ 42-2006, REE-1 등 표준물질을 사용하여 검증하였으며 공인 표준값 대비 ±5% 이내의 오차범위 내에서 일치하였고, 특히 희토류원소는 ±3% 수준의 낮은 오차율을 보였다.

Table 4. Results of the calculation of CIPW norm.

Rock type	Biotite granite					Porphyritic granite	Quartz monzonite
Sample	DJ392	DJ393	DJ400	DIJ53	DIJ75	SY027	SIJ35
CIPW normative minerals							
Quartz	34.214	28.054	33.017	35.818	13.342	32.85	29.284
Orthoclase	33.058	35.34	29.454	26.635	37.343	35.026	28.224
Albite	26.722	30.293	30.386	29.43	37.781	27.399	30.132
Anorthite	1.179	4.406	4.22	4.127	6.381	2.303	9.016
Ilmenite	0.096	0.096	0.101	0.111	0.175	0.03	0.062
Rutile	0.222	0.155	0.184	0.233	0.598	0.186	0.283
Apatite	0.243	0.146	0.192	0.271	0.503	0.167	0.341

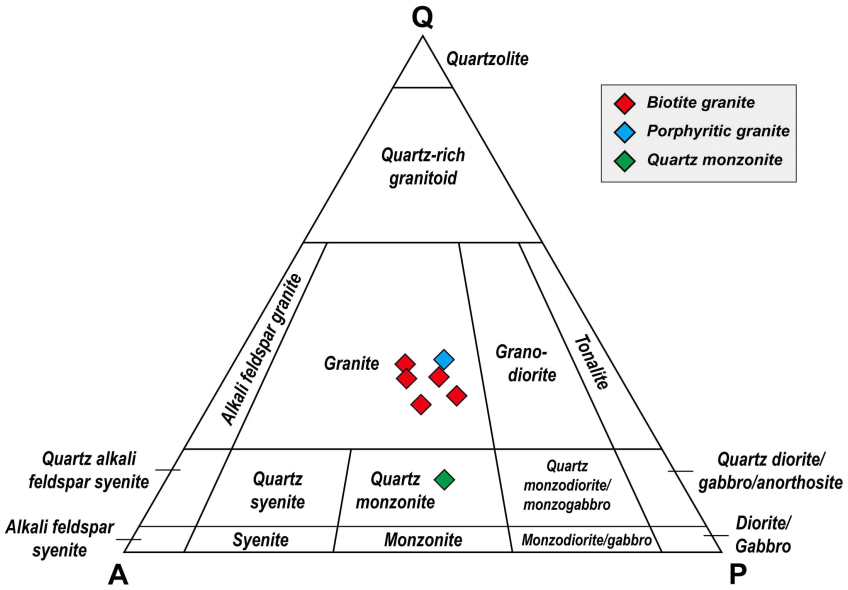

Fig. 7. Quartz-Alkali feldspar-Plagioclase (QAP) diagram (Streckeisen, 1974) for granites and quartz monzonite.

4.2. 분석 결과

연구지역 화강암질암의 전암 지화학 분석 결과는 표 3에 정리하였다. 각 시료의 조성적 특성을 규명하고 QAP 다이어그램상 분류를 확인하기 위해 CIPW norm 계산(표 4)을 수행하였으며 산화도(oxidation state)는 Le Maitre (1976)의 SiO_2 및 ($Na_2O + K_2O$) 함량 기반 산화비 추정식을 적용하여 계산하였다. CIPW norm 계산값을 QAP 다이어그램에 도시한 결과, 소이작도 시료는 석영몬조니암 영역에, 나머지 덕적도, 소야도, 대이작도의 흑운모화강암 및 반상화강암 시료는 모두 화강암 영역에 해당한다(그림 7). 석영몬조니암은 SiO_2 함량(62.35 wt.%)이 화강암(69.84-75.63 wt.%)에 비해 낮고, Al_2O_3, $Fe_2O_3^T$, MgO, K_2O, P_2O_5, TiO_2 등의

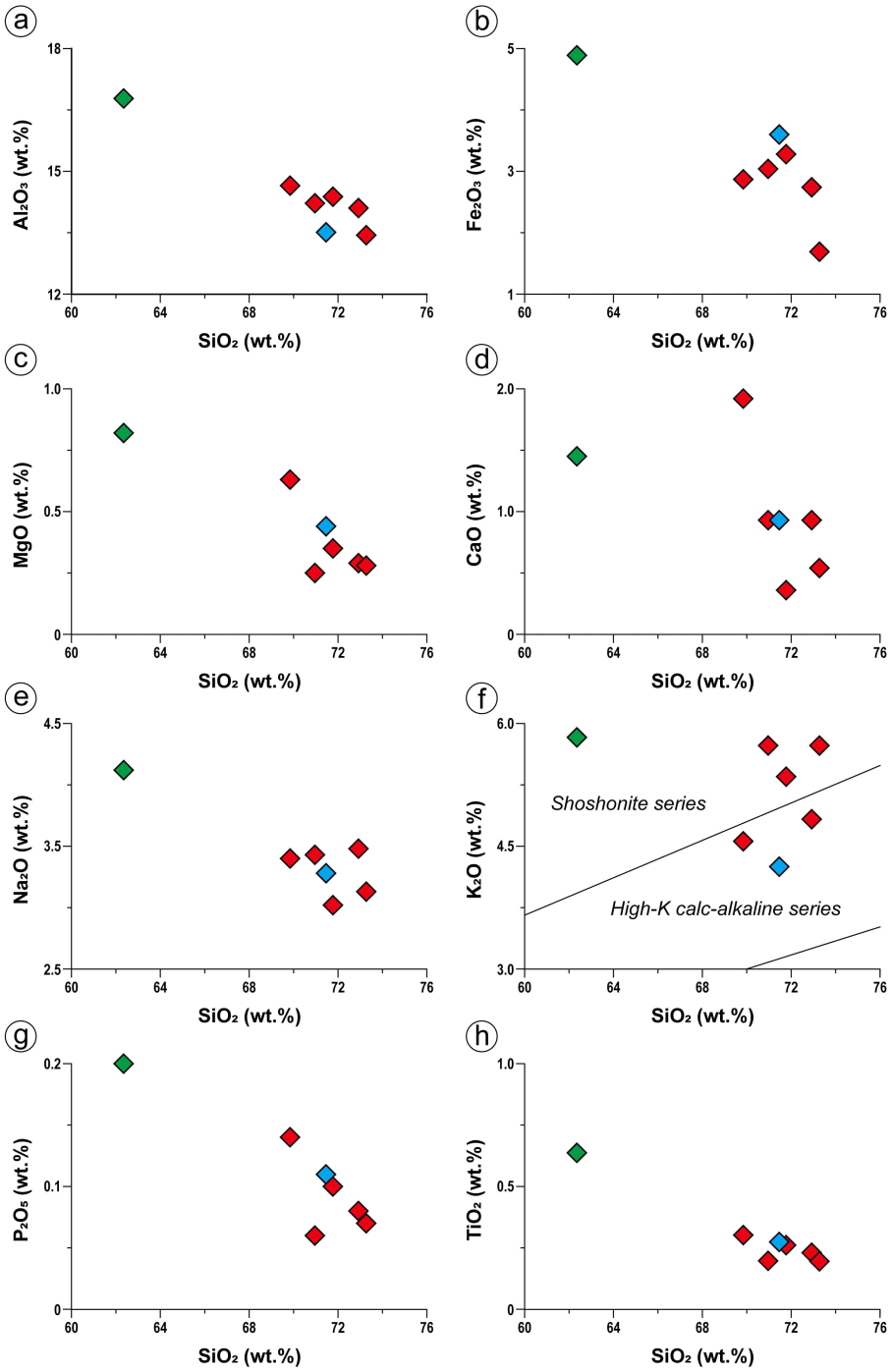

Fig. 8. Major elements vs. SiO_2 variation diagrams for the Late Triassic granitoids in the study area. Boundaries for the K_2O vs. SiO_2 (f) classification are drawn after Peccerillo and Taylor (1976). Symbols are same as those in Fig. 7.

성분은 석영몬조니암에서 더 높은 경향을 보인다(그림 8). 또한, 화강암의 경우, SiO_2의 함량 증가에 따라 Al_2O_3, MgO, Na_2O, P_2O_5, TiO_2가 감소하는 경향을 보인다(그림 8).

모든 시료는 대체로 알칼리 성분(Na_2O : 3.02-4.12 wt.%, K_2O : 4.25-5.83 wt.%)에 비해 MgO(0.08-0.82 wt.%), TiO_2 (0.07-0.64 wt.%), P_2O_5(0.01-0.2 wt.%) 함량이 상대적으로 낮은 것으로 확인된다. 또한 전반적으로 K 함량이 높은 칼크알칼리(high-K calc-alkaline) 내지 쇼쇼나이트(shoshonite) 계열의 조성을 보인다(그림 8f). 콘드라이트 값으로 표준화한 희토류(REE)원소 다이어그램에서 석영몬조니암은 화강암에 비해 전반적으로 부화된 경향을 보인다(그림 9a). 모든 시료가 상대적으로 경희토류 원소가 부화되고 중희토류 원소가 결핍되어 있으며($(La/Yb)_N$=28.69-70.83), Eu에서 부(-)의 이상이 인지된다(그림 9a). 원시 맨틀 값으로 표준화한 거미 도표에서는 친석원소가 고장력원소보다 대체로 부화된 특성을 보이고, Ba와 Nb-Ta, Sr, Eu에서 부(-)의 이상이 인지된다(그림 9b). 암석이 형성된 환경을 유추하기 위해 지구조 분별도에 도시해본 결과, (Y+Nb) vs. Rb 분류 다이어그램에서는 하나의 흑운모화강암 시료만 화산호 화강암 영역에 도시되었고 다른 6개의 시료는 모두 충돌 후 화강암 영역에 도시된다(그림 10a). SiO_2 vs. Rb/Zr 분류 다이어그램에서는 모든 시료가 충돌 후 화강암 영역에

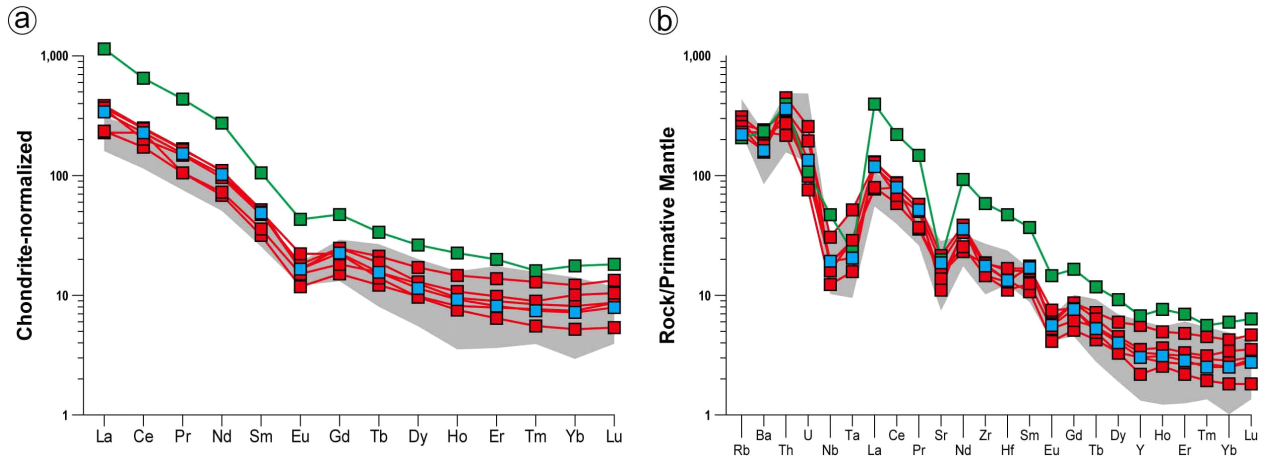

Fig. 9. (a) Chondrite-normalized rare earth element (REE) patterns (Sun and McDonough, 1989). (b) Primitive mantle-normalized trace element distribution diagram (Sun and McDonough, 1989). The gray-shaded polygons imply the compositional range compiled from reference data (Choi *et al*., 2009; Williams *et al*., 2009; Seo *et al*., 2010; Kim *et al*., 2011) of previously reported Late Triassic post-collisional granitoids in the Korean Peninsula. Symbols are same as those in Fig. 7.

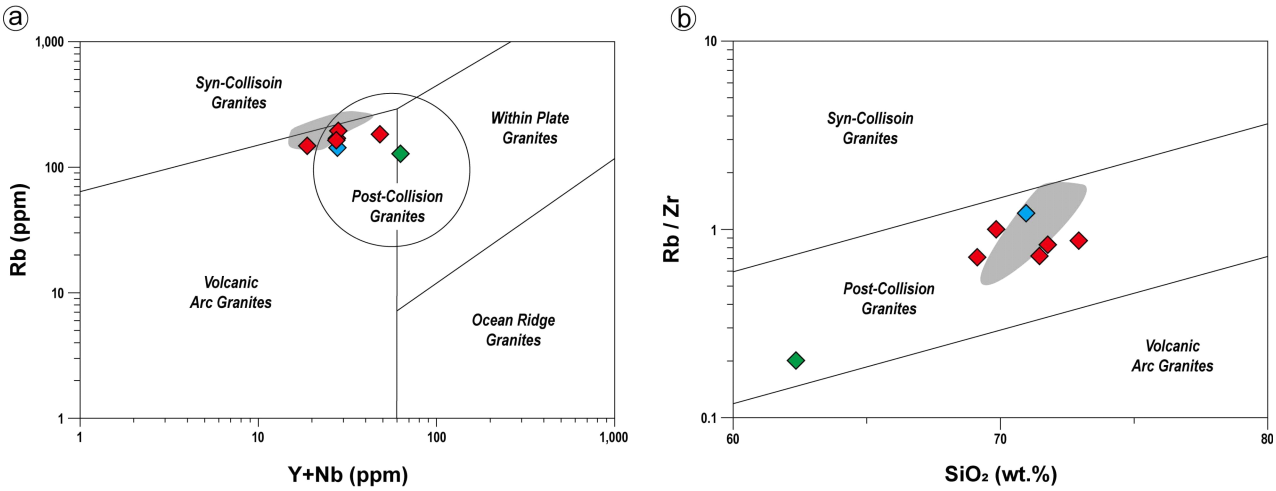

Fig. 10. (a) Rb vs. (Y+Nb) tectonic discrimination diagram (Pearce *et al*., 1984; Pearce, 1996), (b) Rb/Zr vs. SiO_2 tectonic discrimination diagram (Harris *et al*., 1986). The gray field denotes the range of reference data (Choi *et al*., 2009; Williams *et al*., 2009; Seo *et al*., 2010; Kim *et al*., 2011) for previously reported Late Triassic post-collisional granitoids in the Korean Peninsula. Symbols are same as those in Fig. 7.

도시된다(그림 10b).

5. 토의 및 결론

한반도 중부에 분포하는 충돌 후 환경 기원으로 보고된 화강암질암은 K 함량이 높은 칼크알칼리 내지 쇼쇼나이트 계열을 보이며, 경희토류 원소 및 고장력 원소의 부화, Eu, Ba, Sr, Nb, Ta에서 부의 이상을 공통적으로 보여준다(Choi *et al*., 2009; Williams *et al*., 2009; Seo *et al*., 2010; Kim *et al*., 2011; Cheong *et al*., 2019; Jeong and Oh, 2021; Kawaguchi *et al*., 2023). 이들은 대륙판 충돌 이후 두꺼워진 지각이 붕괴되면서 암석권 맨틀의 박리 또는 슬랩 분리 작용에 의한 화성활동으로 해석된다. Kim *et al*. (2011)은 전암 Sr-Nd 동위원소 분석을 통해 한반도 중부의 트라이아스기 충돌 후 화성암의 근원 물질은 맨틀 기원의 마그마이며, 이들이 상승하는 과정에서 지각 물질의 혼합이 수반되었을 것으로 보고하였다. Cheong *et al*. (2019)은 O-Hf 동위원소 분석을 통해 한반도 중부의 후기 트라이아스기 관입암은 암석권 맨틀 뿐만 아니라 하부 지각에서도 기원했을 것으로 해석하였다. Kawaguchi *et al*. (2023)은 한반도 중동부 후기 트라이아스기 관입암에 대해 저어콘 Lu-Hf 동위원소 분석 결과를 근거로, 이들이 섭입 관련 교대작용(metasomatism)을 경험한 암석권 맨틀과 지각의 부분 용융으로 생성된 것으로 해석하였다. 따라서 한반도 중부 트라이아스기 충돌 후 화성암의 근원 물질은 맨틀과 지각 성분이 상호작용한 결과로 이해할 수 있다.

연구지역의 후기 트라이아스기 화강암과 석영몬조니암은 경희토류 및 이온반경이 큰 친석원소가 부화된 특성을 보이며, 이는 한반도 중부에서 보고되었던 충돌 후 화강암질암과 매우 유사한 지화학적 특성이다(그림 9). 이러한 유사성과 함께 연구지역 암체들 대부분이 지구조 분별도에서 전형적인 충돌 후 화강암 영역에 도시되는 특성(그림 10)을 근거로 하여 덕적도, 소야도, 이작도의 후기 트라이아스기 암체는 기존에 보고된 한반도 중부 트라이아스기 암체와 같이 충돌 후 환경에서 만들어진 것으로 해석된다.

연구지역에 분포하는 후기 트라이아스기 암체들은 약 223-217 Ma의 저어콘 U-Pb 연령을 가진다(Cho and Lee, 2016; Park *et al*., 2020). 이번 연구에서는 덕적도-소야도-이작도에 분포하는 화강암질암의 지화학적 특성을 바탕으로 기존에 보고된 217 Ma 화강암이 충돌 후 환경에서 형성되었음을 새롭게 확인하였다. 따라서 지금까지 한반도 중부에 분포하는 후기 트라이아스기 충돌 후 암체들은 약 235-220 Ma (Choi *et al*., 2009; Williams *et al*., 2009; Seo *et al*., 2010; Kim *et al*., 2011; Cheong *et al*., 2019; Kawaguchi *et al*., 2023)의 범위를 보였지만 본 연구를 통해 충돌 후 화성활동의 시기를 약 217 Ma까지 확장시킬 수 있다. 분포상 서해안 도서 지역이 상대적으로 젊은 연령을 기록하는 경향이 있으나, 이들 암체가 도서 지역에 단속적으로 분포하고 이후의 지구조 사건으로 재배치되었을 가능성을 고려하면, 단지 공간적 분포만으로 당시의 환경을 단정하기는 어렵다.

본 연구에서 해석한 바와 같이 Park *et al*. (2020)은 연구지역의 후기 트라이아스기 화강암질암이 충돌 후 화성활동의 산물로 만들어졌다고 해석한 바 있다. 그들에 따르면 덕적도-소야도 지역의 후기 트라이아스기 진리층은 화산쇄설성 퇴적물로 구성되며, 그 퇴적 시기가 구조적 하부에 병치되어 있는 화강암의 관입 시기와 거의 유사하다. 또한, 화강암 내에 발달하는 북서-남동 방향의 연성 전단대는 지각 확장과 관련된 변형 구조이며, 화강암과 퇴적암의 경계를 이루는 정단층은 퇴적 분지가 확장될 때 화강암이 지표로 상승했음을 보여주는 증거로 해석될 수 있다. 비록 Park *et al*. (2020)은 구조지질학 및 지구연대학적 측면에서 제한적으로 해석하였지만, 본 연구에서 전암 지화학 자료를 토대로 이 암체들이 충돌 후 화성활동에 의해 만들어졌다고 해석한 것과 일치한다.

덕적도-소야도-이작도의 후기 트라이아스기 화강암질암은 기존 충돌 후 화강암과 동일한 지화학적 특성을 보이며, 지각이 확장되는 환경에서 퇴적 및 지각 변형과 동시기에 화성활동이 있었음을 보여준다. 또한, 기존 지구연대학 자료와 더불어 본 연구에서 제시한 전암 지화학 자료는 한반도의 후기 트라이아스기 충돌 후 화성활동의 시기를 약 217 Ma까지 확장시킬 수 있다. 이러한 연구 결과는 한반도의 후기 트라이아스기 충돌 후 과정에 대한 이해에 새로운 시각을 제공할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 2026년도 한국지질자원연구원의 기본사업인 ‘국가지질도·지질주제도 디지털전환(DX)과 기반암 내 유망·유해원소 연구(1)(GP2025-020)’의 결과물이다. 본 논문에 대해 건설적인 조언을 해주신 심사위원님들과 편집위원님께 감사드린다. 전암 지화학 결과 해석에 도움을 주신 전남대학교 이병춘 교수님께 감사드린다.

REFERENCES

Cheong, A.C.-s., Jo, H.J., Jeong, Y.-J. and Li, X.-H., 2019, Magmatic response to the interplay of collisional and accretionary orogenies in the Korean Peninsula: Geochronological, geochemical, and O-Hf isotopic perspectives from Triassic plutons. Geological Society of America Bulletin, 131, 609-634.

Cho, D.-L. and Lee, S.-b., 2016, Geological Report of the Gureopdo·

Deokjeokdo·Baegado·Seongapdo Sheets (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 54 p (in Korean with English abstract).

Choi, S.-G., Rajesh, V.J., Seo, J., Park, J.-W., Oh, C.-W., Pak, S.-J. and Kim, S.-W., 2009, Petrology, geochronology and tectonic implications of Mesozoic high Ba-Sr granites in the Haemi area, Hongseong Belt, South Korea. Island Arc, 18, 266-281.

Claué-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 $^{40}Ar/^{39}Ar$ analysis. Geochronology time scales and global correlation. Society for Sedimentary Geology, 54, 1-21.

Cluzel, D., 1992, Formation and tectonic evolution of early Mesozoic intramontane basins in the Ogcheon belt (South Korea): a reappraisal of the Jurassic "Daebo orogeny". Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 7, 223-235.

Harris, N.B.W., Pearce, J.A. and Tindle, A.G., 1986, Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward, M.P. and Ries, A.C. (eds.), Collision tectonics. Geological Society of London, Special Publication, 19, 67-81.

Jeong, J.W. and Oh, C.W., 2021, A comprehensive review of previous studies on Permo-Triassic metamorphic and igneous activities and tectonic evolution in the Korean Peninsula. Journal of the Geological Society of Korea, 57, 545-564 (in Korean with English abstract).

Kawaguchi, K., Oh, C.W. and Jeong, J.W., 2023, Geochemistry, zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotopes of Triassic plutons in the eastern Gyeonggi Massif, Korean Peninsula: Magma series and geodynamic implications for East Asia. Lithos, 436-437, 106955.

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

Kim, S.W., Kwon, S., Koh, H.J., Yi, K., Jeong, Y.-J. and Santosh, M., 2011, Geotectonic framework of Permo-Triassic magmatism within the Korean Peninsula. Gondwana Research, 20, 865-889.

Le Maitre, R.W., 1976, The chemical variability of some common igneous rocks. Journal of petrology, 17, 589-598.

Ludwig, K.R., 2008, User's Manual for Isoplot 3.6: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley.

Ludwig, K.R., 2009, User's Manual for SQUID 2. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley.

Park, J.-Y. and Park, S.-I., 2020, Revised Geology of the Deokjeok and Soya Islands in the Central-western Korean Peninsula. Economic and Environmental Geology, 53, 631-643.

Park, J.-Y., Park, S.-I. and Choi, T., 2020, Microstructural and Geochronological Analyses of Mesozoic Ductile Shear Zones in the Western Gyeonggi Massif, Korea: Implications for an Orogenic Cycle in the East Asian Continental Margin. Minerals, 10, 362.

Pearce, J., 1996, Sources and settings of granitic rocks. Episodes, 19, 120-125.

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.

Peccerillo, A. and Taylor, S.R., 1976, Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks of the Kastamonu area northern Turkey. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58, 63-81.

Seo, J., Choi, S.-G. and Oh, C.W., 2010, Petrology, geochemistry, and geochronology of the post-collisional Triassic mangerite and syenite in the Gwangcheon area, Hongseong Belt, South Korea. Gondwana Research, 18, 479-496.

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 basalt: implications for mantle composition and process. In: Saunders, A.D. and Norry, M.J. (eds.), Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publication, 42, 313-345.

Williams, I.S., Cho, D.-L. and Kim, S.W., 2009, Geochronology, and geochemical and Nd-Sr isotopic characteristics, of Triassic plutonic rocks in the Gyeonggi Massif, South Korea: Constraints on Triassic post-collisional magmatism. Lithos, 107, 239-256.

Zheng, Y.-F., Xiao, W.-J. and Zhao, G., 2013, Introduction to tectonics of China. Gondwana Research, 23, 1189-1206.