

한반도 중부 원주-안흥-평창 지역에 분포하는 편마암체의 지질연대학 연구

김성원^{1,‡} · 고희재¹ · 김정민²

¹한국지질자원연구원 국토지질연구본부

²한국기초과학지원연구원 환경과학연구부

요 약

한반도 중부 원주-안흥-평창 지역은 고원생대 편마암류와 이들을 관입하고 있는 고원생대 변성화강암류가 주로 분포하며, 연구지역 중앙부에서는 북서 혹은 북동방향의 단층대가 발달한다. 원주-안흥-평창 편마암류의 야외 산출관계, 지질구조, 그리고 저어콘 SHRIMP U-Pb 및 백운모와 흑운모의 K-Ar 연대자료 결과를 바탕으로 편마암류의 전반적 지구조 진화과정을 조사하였다. 편마암의 저어콘 SHRIMP U-Pb 연령은 약 2.07 Ga와 1.96 Ga 사이에 퇴적 이후 약 1.91 Ga까지 화강암화 작용 그리고 1.87~1.86 Ga 시기에 변성작용을 나타낸다. 일정한 하나의 (-) 기울기 선상에서 납손실에 의한 일부 고원생대 편마암류들의 하부교절 겹보기 저어콘 SHRIMP U-Pb 연대는 석탄기 후기인 307 Ma, 페름기 후기인 252 Ma와 168 Ma의 연대들을 나타낸다. 편마암류의 흑운모 K-Ar 연대들은 193-171 Ma이지만 녹니석화에 의한 연대교란의 영향을 배제할 수 없다. 반면, 백운모 K-Ar 연대들은 트라이아스기 후기(215-196 Ma)로 우리나라에서 일반적으로 보고되는 트라이아스기 초기 대륙충돌대와 관련된 광역변성작용 이후에 경험한 트라이아스기 후기의 350°C까지의 냉각사를 지시한다. 이들 연대는 중국의 대륙충돌대인 중앙조산대의 냉각연대와 유사하다. 한편, 원주-안흥-평창지역 중앙부의 북서 혹은 북동 방향의 단층파쇄대 내의 편마암류로부터 흑운모와 백운모의 K-Ar 연대결과는 백악기 초기에서 백악기 말기(122~88 Ma)로 우리나라의 불국사변동과 밀접한 단층작용 혹은 열적영향의 시기를 지시한다.

주요어: 원주-안흥-평창 편마암류, SHRIMP U-Pb와 K-Ar 연대, 대륙충돌대, 트라이아스기, 백악기 불국사변동

Sung Won Kim, Hee Jae Koh and Jeongmin Kim, 2014, Geochronological study for the gneiss complex in the Wonju-Anheung-Pyeongchang area, central part of the Korean Peninsula. Journal of the Geological Society of Korea. v. 50, no. 3, p. 327-342

ABSTRACT: The Wonju-Anheung-Pyeongchang area in the central part of the Korean Peninsula consists mainly of Paleoproterozoic gneisses and Paleoproterozoic metaplutonic rocks. The NW- or NE-directed faults developed in the central part of the study area. The outlined geological evolution was examined by the field occurrence, geological structure, zircon SHRIMP U-Pb ages and muscovite and biotite K-Ar ages for the gneisses. The zircon SHRIMP U-Pb ages indicate that the gneisses had arranged from 1.96~1.91 Ga intrusion to 1.87~1.86 Ga metamorphism after sedimentation between ca. 2.07 Ga and ca. 1.96 Ga. The subsequent metamorphic and deformation events at ~307 Ma, ~252 Ma and ~168 Ma were well recognized by the lower intercept ages of radiogenic Pb loss mixing lines. Biotite K-Ar ages from gneisses are 193-171 Ma but cannot exclude age disturbance by chlolitization. Muscovite K-Ar ages from gneisses are 215-196 Ma, recording cooling to about 350°C after the Early Triassic metamorphism associated with Early Triassic continent-continent collision in the Korean Peninsula. Muscovite ages are similar to the cooling ages of tectonic episodes in the Central Orogenic Belt of China. On the other hand, muscovite and biotite K-Ar ages of gneisses from the NW- or NE-striking brittle fault zone in central part of the Wonju-Anheung-Pyeongchang area are 122-88 Ma, providing compelling evidence for Cretaceous fault movement or thermal effect related to the Bulkuksa Orogeny.

Key words: Wonju-Anheung-Pyeongchang gneisses, SHRIMP U-Pb and K-Ar age, continent-continent collision, Triassic, Cretaceous Bulkuksa Orogeny

[‡] Corresponding author: +82-42-868-3501, E-mail: sungwon@kigam.re.kr

(Sung Won Kim and Hee Jae Koh, Geological Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Republic of Korea; Jeongmin Kim, Earth and Environmental Science, Korea Basic Science Institute (KBSI), Ochang campus, Chungbuk 363-883, Republic of Korea)

1. 서 언

한반도의 중부에 해당하는 원주-안흥-평창 지역은 주로 북동-남서 방향으로 고립되어 분포하고 있는 고원생대 변성기반암복합체를 포함하며, 북측으로는 경기육괴 남측 경계부를 따라 관입한 주라기 중기 대보화강암 저반, 남측으로는 고생대 초-중기 옥천대, 그리고 서측으로는 고생대 초-중기 태백산 분지의 평창형 조산계와 영월형 조산계 일부가 경계를 이룬다(그림 1). 원주-안흥-평창지역 변성기반암 복합체는 제천도폭(Kim *et al.*, 1967)에서 박달령편마암류로 명명되었으며, 유사한 Pb-Pb 연대와 Pb 동위원소 특성을 가지는 부산편마암과 함께 옥천대 변성퇴적암류의 기반암에 해당하는 경기육괴 암석의 일부로 간주되고 있지만(Sagong and Kwon, 1998; Horie *et al.*, 2009), 영남육괴의 암석일 가능성도 배제 할 수 없다. 이 기반암복합체의 동측 경계부를 따라 소위 방림층군과 평창형 조산계가 분포하고 있다. 과거 방림층군은 기반암층의 하부 지층으로

생각되었으나(Son and Cheong, 1971), 기반암의 상위에 방림층군이 부정합으로 분포하고 있다. 방림층군과 평창형 조산계의 경계는 소위 남한지구조선(South Korean Tectonic Line, SKTL)에 해당하며, 우리나라에서 남중국판과 북중국판의 경계에 해당하는 것으로 제안되었다(Chough *et al.*, 2000). 그러나 방림층군과 평창형 조산계의 층서 경계가 정합적이기 때문에 두 육괴가 적어도 고생대 시기에 동일한 지괴에 속했다는 주장도 있다(Kihm *et al.*, 2010).

최근 남한지구조선의 경계부를 따라 분포하고 있는 변성퇴적암류에 대한 쇄설성 혹은 내핵 저어콘과 과성장 저어콘 외연부의 SHRIMP U-Pb 연대측정을 실시하여 기원지, 퇴적시기 및 변성시기 등의 지구조 진화과정 연구가 수행되고 있다(Horie *et al.*, 2009; Cho *et al.*, 2013). 따라서 남한지구조선의 경계부 부근에 해당하는 원주-안흥-평창 지역의 기반암체와 주변암석의 자세한 지질연대 연구는 경기육괴, 영남육괴와의 지체구조적 관련성과 우리나라 지체구조발달사를 이해하는데 매우 중요한 정보를 제

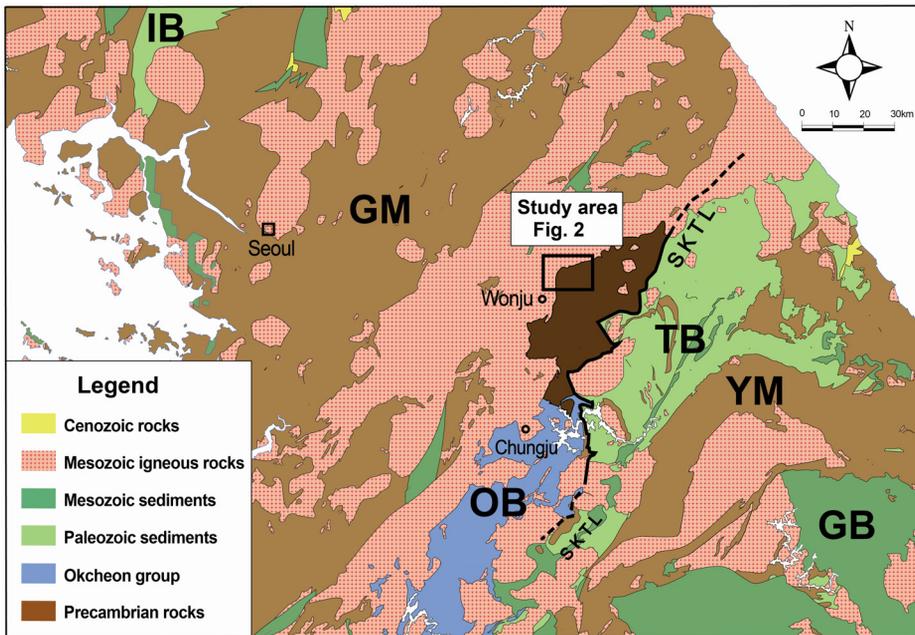


Fig. 1. Tectonic map of the central part of the Korean Peninsula including the Wonju-Anheung-Pyeongchang area.

공할 수 있다.

본 연구에서는 원주-안흥-평창 지역에 산출되는 편마암 복합체의 암석기재, 지질구조 및 지질연대 연구를 실시하여 기반암의 형성 진화과정과 남중국판과 북중국판의 충돌이 일어난 현생대(Phanerozoic) 이후의 지구조 진화과정을 해석하였다. 또한 연구결과들을 지금까지 보고된 우리나라의 대륙충돌대와 남한지구조선 주변부의 지구조 해석(Ree *et al.*, 1996; Chough *et al.*, 2000; Oh *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2006b, 2011; Cho *et al.*, 2007, 2013; Horie *et al.*, 2009; Kwon *et al.*, 2009)과 비교하였다.

2. 지질배경 및 층서

원주-안흥-평창 지역은 북동-남서 방향으로 관입한 류라기 중기 화강섬록암으로 주로 이루어진 대보 화강암 저반이 북측과 동측에 분포하며 남측은 광역적인 미그마타이트화 작용과 화강암화 작용을 받은 고원생대 편마암 복합체와 이들을 관입하고 있는 고

원생대 화강암류가 분포하고 있다(그림 2). 편마암 복합체는 대체로 호상구조가 뚜렷한 흑운모편마암과 미그마타이트질 호상편마암이 우세하나(그림 3a, 3b, 3c), 유입된 화강암질 물질의 종류와 상대적 양에 따라 석영장석질 편마암, 거정질 편마암, 반상질 편마암, 우백질 편마암 등의 다양한 암상으로 산출한다(그림 3d, 3e, 3f). 이질 성분이 우세한 경우 엽리에 평행하게 단속적으로 발달하는 화강암질 물질을 포함하는 편암의 조직을 보이기도 하며, 괴상의 변성사암, 각섬암, 대리암이 부분적으로 산출한다. 이 편마암복합체는 특히 치악산 지역에 넓게 분포하고 있으며, 지역별로 다양한 암상의 변화를 보이며, 동일 노두상에서도 암상의 변화가 심하기 때문에 뚜렷한 관입경계를 보이며 분포하는 고원생대 화강암류를 제외한 모든 편마암류를 통칭하여 치악산편마암으로 명명하였다(Koh *et al.*, 2011). 치악산편마암의 변성작용 시기는 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대측정 결과 약 1,860 Ma로 추정되며, 저어콘 상속핵에서 얻어진 최소 연대인 2,080~2,070 Ma와 이들을 관

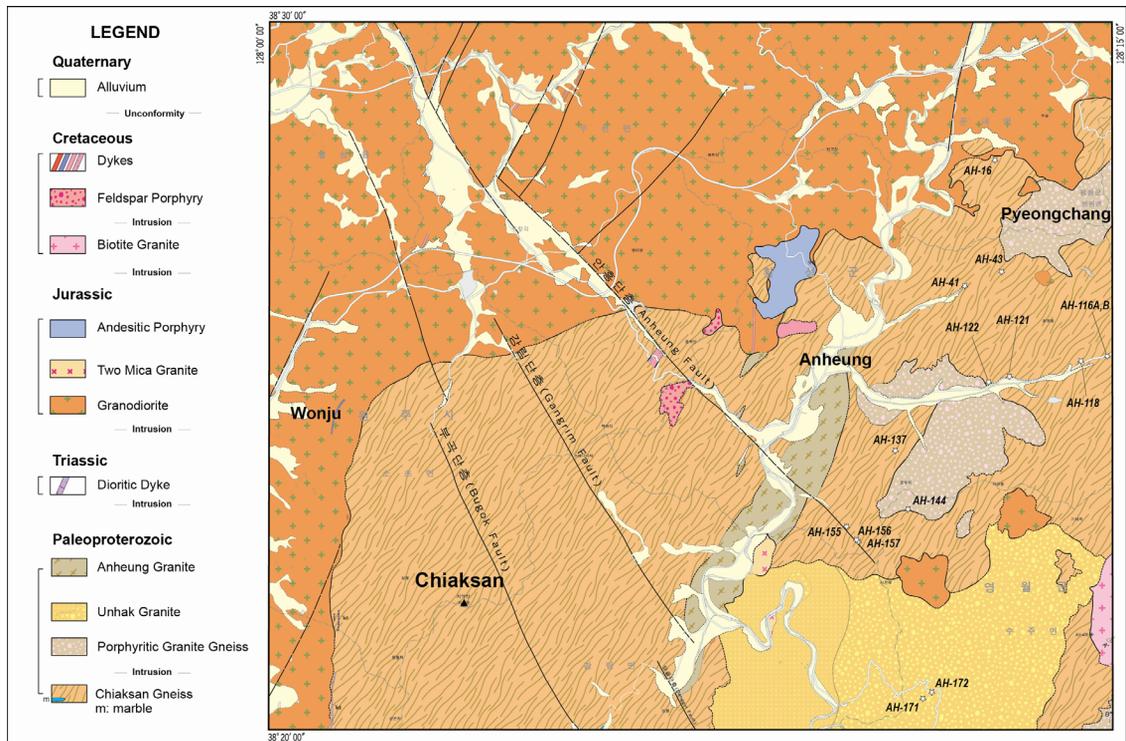


Fig. 2. Sketch geologic map of the Wonju-Anheung-Pyeongchang area, Korea, showing the locations of samples analyzed in the present study.

입한 고원생대 화강암류에서 얻어진 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대인 1,960 Ma를 고려하여 치악산편마암의 퇴적시기는 약 2,070~1,960 Ma 시기 사이에 해당할 것으로 보고되고 있다(Song *et al.*, 2011).

고원생대 화강암류들은 주로 원주-안흥-평창지역 중동부에 분포하고 있으며, 반상화강편마암, 운학화강암, 안흥화강암으로 구성된다(그림 2). 반상화강편마암은 1~2 cm 크기의 반자형 내지 타원형의 알

칼리장석 반정과 중립 내지 조립질의 화강암질 기질로 구성된다(그림 3d). 이들 암류는 지역에 따라 연성전단변형작용에 의하여 장석 반정이 심하게 압쇄되어 있으며, 압쇄의 강도는 치악산편마암과의 경계부를 따라서 강하게 형성되어 있다. 운학화강암은 반정의 크기에 따라 거반정질(megacryst)과 반정질 흑운모화강암(그림 3f)으로 분류되며, 두 암체의 지질경계는 야외에서 뚜렷하지 않고 점이적이다. 거반

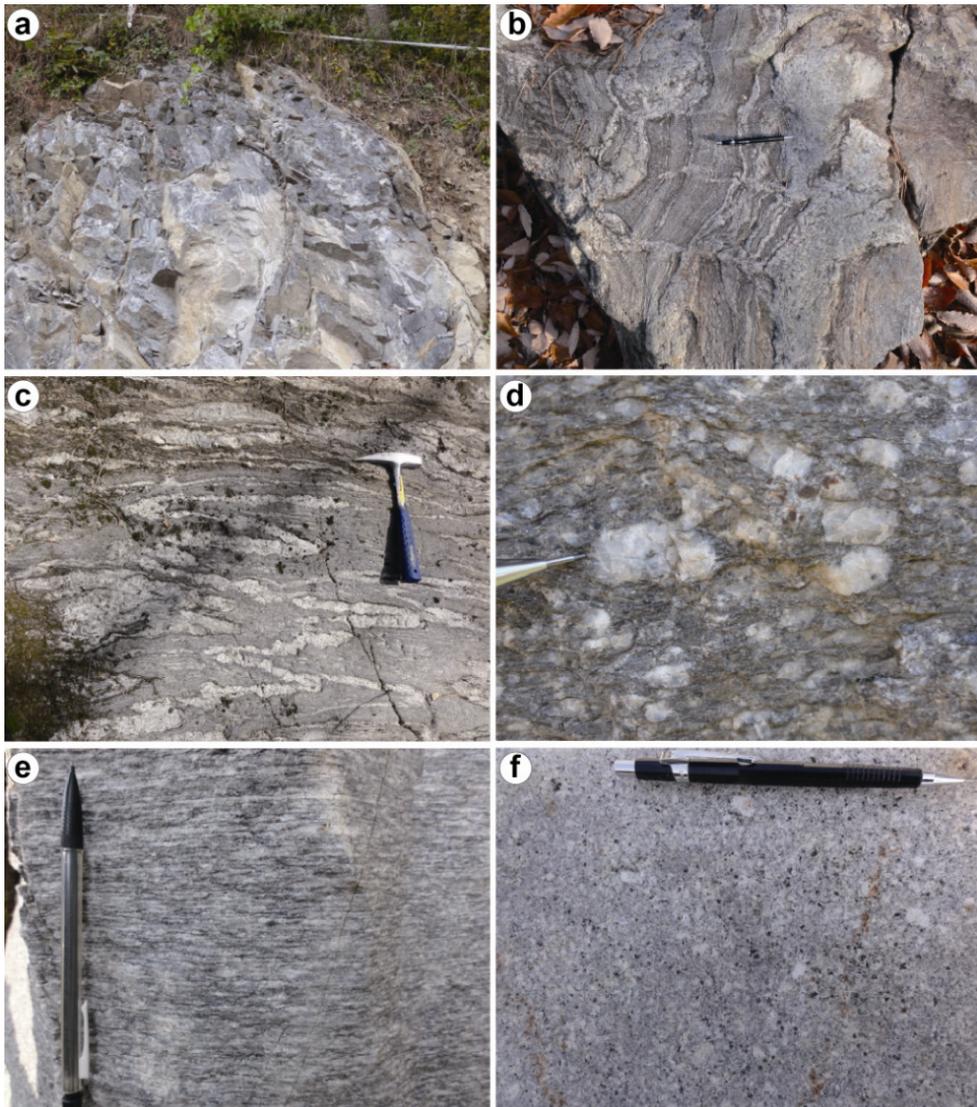


Fig. 3. Outcrop photographs showing (a) Paleoproterozoic banded gneiss, (b) and (c) Paleoproterozoic migmatitic gneiss showing folded, stromatic, boudinage and pygmatic structures, (d) Paleoproterozoic K-feldspar porphyritic granite gneiss, (e) foliated leucocratic granite gneiss, and (f) Paleoproterozoic Unhak granite in the Wonju-Anheung-Pyeongchang area.

정질 운화화강암은 최대 5 cm 크기의 자형 내지 반자형 알칼리장석 반정을 가지고 있으며, 다양한 크기의 편암, 편마암, 고철질 포획체를 포함하고 있다. Song *et al.* (2011)는 운화화강암에서 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대 측정을 통하여 $1,988 \pm 12$ Ma의 관입 연대를 보고하였다. 안흥화강암은 치악산편마암과 운화화강암을 관입하고 있으며, 압쇄엽리가 강하게 발달되어 있다. 엽리의 경사는 구조적 위치에 따라서 $10^\circ \sim 90^\circ$ 까지 다양하며, 경사가 급할수록 엽리의 강도가 강해지는 양상을 나타낸다.

원주-안흥-평창 지역에 분포하는 중생대 화성암류는 트라이아스기로 추정되는 소규모 섬록암맥, 쥐라기 중기 대보화강암 및 안산암질 반암, 그리고 백악기 불국사화강암 및 반암, 암맥 등이 있다. 쥐라기 대보화강암의 대부분은 화강섬록암으로 괴상의 중립질 내지 조립질의 알칼리장석 반정을 포함하는 반상질 화강암이다. 대부분 흑운모에 비해 각섬석의 함량이 높으나, 지역적으로 흑운모가 우세하고 반정이 전혀 관찰되지 않는 것들도 존재한다. 이 암석은 흔히 고철질 염기성 포획체(mafic microgranular enclave)를 포함하고 있으며, 부분적으로 마그마 유동에 의하여 형성된 유동엽리가 관찰된다. SHRIMP U-Pb 저어콘 연대측정에 의해 177~174 Ma 시기에 관입한 것으로 밝혀졌다(Koh *et al.*, 2011).

3. 지질구조

원주-안흥-평창 지역의 고원생대 준편마암에는 광역엽리를 형성시킨 습곡구조와 다중 변형작용에 중첩습곡구조가 잘 나타난다. 특히, 노두 규모에서 흑운모편마암과 미그마타이트질 편마암은 파장이 짧고 파고의 크기를 측정할 수 없는 동형습곡과 전단작용에 의하여 형성된 엽리와 습곡, 중첩습곡 구조 등 높은 온도에서 형성된 변형구조가 빈번하게 관찰되어 암층의 분포를 규제하는 전단작용을 수반하는 대규모 동형습곡구조의 존재를 지시한다. 그러나 반상화강편마암, 운화화강암 및 안흥화강암 등의 정편마암체에서는 전단작용에 의한 압쇄 엽리가 판상으로 광역엽리를 형성하고 있다.

치악산편마암이 변성작용을 받을 당시에 형성된 단층구조는 습곡구조와 동일하게 지층의 연장성을 확인 할 수 있는 건층이 부재하여 확인되지 않는다. 연구지역에서 확인되는 단층은 쥐라기 화강섬록암의 관입 이후에 형성된 주향이동단층이 대표적이다. 주요 단층으로는 $N30^\circ E$ 방향의 단층군과 $N30^\circ \sim 40^\circ W$ 방향의 단층군이 인지된다(그림 4). $N30^\circ \sim 40^\circ W$ 방향의 단층군은 연구지역에서 부곡, 강림, 안흥 단층으로 분류 명명된다(Koh *et al.*, 2011). 특히, 안흥 단층의 단층대 노두가 안흥면 가천리 골새재 신설 도로

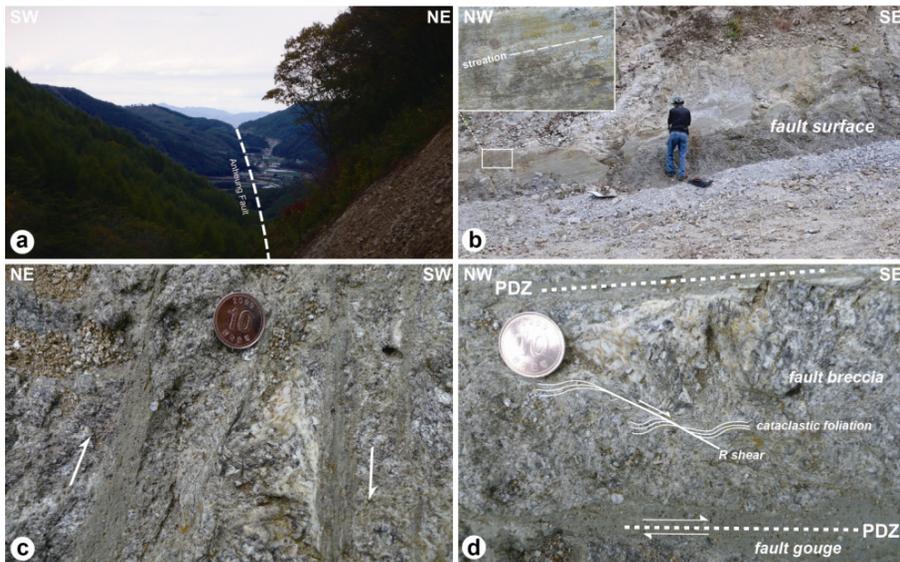


Fig. 4. Outcrop photographs showing (a) Anheung fault, (b) fault surface and striation for Anheung fault, (c) main displacement zone showing R-shearing, and (d) R-shear and cataclastic foliation in the Anheung fault.

변에서 잘 관찰되며(그림 4a), 단층대는 3 m 이상의 폭으로 단층비지를 포함하는 단층각력암으로 구성된다(그림 4b). 단층활면의 태위는 N56°W/79°SW이며, 단층조선은 311°/11° 방향으로 침강한다. 단층활면과 단층조선에 수직인 면(수평면)에서 주변위대는 2 cm 두께의 암회색에서 암녹색을 띠는 단층비지로 구성되며, 부분적으로 단층비지는 각력으로 구성된 손상대로 주입되었다(그림 4c). 단층각력은 수 십 cm에서 수 cm 까지 다양한 크기이며, 파쇄작용을 강하게 받은 손상대는 5 cm 이하 크기의 각력이 대부분이다. 주변위대의 단층운동과 동시에 형성된 R-shear가 잘 관찰되며, R-shear는 mm 두께의 단층비지로 구성되어 있다. R-shear를 따라서 우수향 전단작용을 명확하게 지시하는 S-형의 파쇄엽리(cataclastic foliation)가 잘 발달되어 있다(그림 4c, 4d). 이들 지질구조는 N30°~40°W 방향의 단층이 우수향 주향이동단층임을 지시한다. 그러나 단층 경계로 암상의 차이가 인지되지 않아 단층의 운동에 의한 암체의 변위량은 그리 크지 않았음을 알 수 있다(그림 2).

4. 연대측정 분석방법

연구지역의 고원생대 변성암류의 형성 및 변성시기를 밝히기 위해서 6 개 시료에 대해 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대측정을 실시하였다(그림 2). SHRIMP U-Pb 연대측정을 위한 저어콘 내부구조 및 분석 위치선정과 U-Th-Pb 분석은 한국기초과학지원연구원 오창캠퍼스에 설치되어 있는 주사전자현미경(Jeol JSM-6610LV)과 SHRIMP IIe를 사용하였다. 저어콘 분리, 디스크에 마운팅, SHRIMP 분석방법과 절차는 Williams (1998), Williams *et al.* (2009)에 의해 기재되어 있다. U과 Th의 붕괴상수는 Steiger and Jäger (1977)의 값을 사용하였다. 표 1과 그림 5와 6에 실린 각 분석점 자료와 일치연령에 표시된 오차범위는 1σ를 나타내고 평균 연령치에 딸린 오차범위는 2σ (약 95% 신뢰도)를 정의한다. 분석점 직경은 25~35 μm이며 한 점의 U-Pb 분석마다 필요한 모든 질량의 동위원소를 5번 반복 정량하였다. 저어콘 내 동위원소 자료들은 SQUID 2.50 (Ludwig, 2008)과 Isoplot 3.71 (Ludwig, 2009) 프로그램을 사용해 처리하였다.

K-Ar 분석은 편마암 복합체에서 채취한 13 개 변성암류 시료로부터 흑운모 혹은 흑운모와 백운모를

분리하여 행해졌다(그림 2). K-Ar 과 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 연대분석은 한국기초과학지원연구원 오창캠퍼스에서 수행하였다. K-Ar 연대분석방법과 연대오차는 Kim (2001)의 방식을 따랐다. K-Ar 분석을 위하여 백운모와 흑운모는 현미경 내에서 관찰되는 대상 암석표본 기질내의 광물의 결정크기 및 실체현미경상에서 대상광물의 크기 및 불순물정도에 따라 분리하였다. 분리된 시료들은 탈이온수 및 아세톤으로 5-7회 세척하였으며 비중액(STP), 수압에 의한 운모분리방법, 자력선별기 및 수작업 방법들을 이용하여 각 광물의 순도를 증가시켰다. K 분석은 Unicam 989 원자흡광분석기를 사용하였다. K의 양이 잘 알려진 일본지질조사소 화강암 표준물질 JG-1a (3.29 wt%, K: Imai *et al.*, 1995)을 같이 용해시킨 후 K의 양을 측정

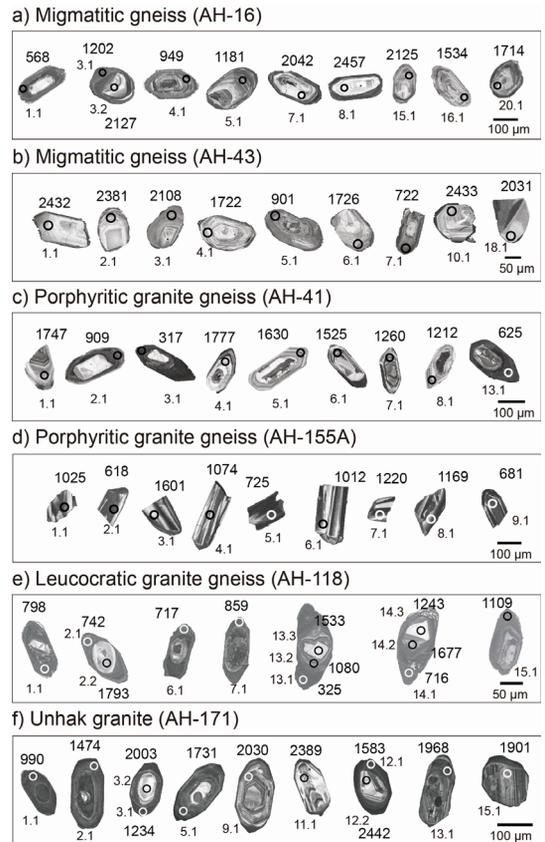


Fig. 5. Scanning electron microscope cathodoluminescence (CL) images of sectioned zircon grains from the Paleoproterozoic gneisses in the Wonju-Anheung-Pyeongchang area. The numbered spots show locations of representative SHRIMP analysis with the measured age in Ma.

Table 1. SHRIMP U-Pb data of zircons from Paleoproterozoic gneisses of the Wonju-Anheung-Pyeongchang area.

Grain spot	Pb* (ppm)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	$^{206}\text{Pb}^*/_{238}\text{U}$	\pm (%)	$^{207}\text{Pb}^*/_{206}\text{Pb}$	\pm (%)	Apparent ages (Ma)			
									$^{206}\text{Pb}/_{238}\text{U}$	\pm	$^{207}\text{Pb}/_{206}\text{Pb}$	\pm
AH-16 Migmatitic gneiss												
1.1	55	726	4	0.01	0.092079	1.2	0.098441	2.8	567.8	6.5	1594.8	52.0
2.1	60	316	43	0.14	0.234412	2.1	0.126863	1.0	1357.6	25.8	2055.0	17.1
3.1	81	478	22	0.05	0.205000	1.2	0.110360	0.8	1202.1	13.5	1805.3	15.3
3.2	62	190	103	0.56	0.390924	1.5	0.155131	0.9	2127.1	26.3	2403.3	14.8
4.1	73	569	137	0.25	0.158689	1.2	0.116349	1.6	949.5	10.6	1900.9	28.9
5.1	76	474	245	0.53	0.201081	1.2	0.135366	0.8	1181.1	13.4	2168.7	14.1
6.1	85	335	18	0.05	0.298177	1.3	0.114121	1.3	1682.3	19.4	1866.0	23.5
7.1	55	184	86	0.48	0.372649	1.5	0.175206	1.6	2041.9	25.9	2608.0	26.0
8.1	30	74	31	0.43	0.463896	1.9	0.159268	2.3	2456.7	39.4	2447.9	38.3
9.1	61	652	8	0.01	0.115066	1.2	0.100071	1.5	702.1	8.0	1625.4	28.3
10.1	85	423	64	0.16	0.242053	1.3	0.112497	1.0	1397.4	15.8	1840.1	18.9
11.1	38	131	104	0.82	0.339752	1.6	0.124374	1.2	1885.5	26.2	2019.9	21.0
12.1	111	362	250	0.71	0.367496	1.2	0.148327	1.5	2017.6	21.4	2326.7	25.6
13.1	75	438	196	0.46	0.214527	1.2	0.140844	1.3	1252.9	13.8	2237.6	21.7
14.1	61	647	8	0.01	0.115868	1.2	0.104039	1.4	706.7	7.9	1697.4	25.6
15.1	81	252	154	0.63	0.390475	1.4	0.161616	0.7	2125.0	24.5	2472.6	11.8
16.1	61	281	130	0.48	0.268655	1.3	0.145906	0.8	1534.0	17.8	2298.5	14.2
17.1	94	396	14	0.04	0.285837	1.2	0.127411	1.9	1620.7	17.9	2062.6	33.9
18.1	80	398	304	0.79	0.250760	1.3	0.145431	0.7	1442.4	16.2	2292.9	12.8
19.1	71	739	60	0.08	0.118843	1.1	0.107857	1.9	723.9	7.7	1763.5	34.6
20.1	46	185	91	0.51	0.304632	1.4	0.135391	0.9	1714.2	21.3	2169.1	15.8
AH-43 Migmatitic gneiss												
1.1	66	170	143	0.87	0.458188	1.5	0.165033	0.7	2431.6	29.9	2507.9	12.4
2.1	117	371	173	0.48	0.446752	1.3	0.282403	0.4	2380.8	25.0	3376.3	6.9
3.1	109	335	197	0.61	0.386710	1.3	0.144998	0.6	2107.6	23.1	2287.8	10.7
4.1	71	284	112	0.41	0.306104	1.3	0.142321	0.7	1721.5	20.0	2255.6	12.7
5.1	69	577	40	0.07	0.149929	1.2	0.121821	1.3	900.6	10.2	1983.1	22.5
6.1	86	340	162	0.49	0.306951	1.3	0.138955	0.7	1725.7	19.6	2214.2	12.8
7.1	67	700	248	0.37	0.118543	1.2	0.114863	1.2	722.2	8.1	1877.7	22.2
8.1	119	435	78	0.18	0.340843	1.2	0.165815	0.9	1890.7	20.4	2515.8	15.9
9.1	68	689	321	0.48	0.124184	1.2	0.120946	1.2	754.6	8.4	1970.2	20.7
10.1	74	190	131	0.71	0.460718	1.5	0.165771	0.7	2442.7	29.7	2515.4	12.1
11.1	69	180	78	0.45	0.449859	1.5	0.163480	0.7	2394.6	29.2	2492.0	12.3
12.1	45	264	60	0.24	0.216165	1.4	0.144575	1.1	1261.6	15.7	2282.7	18.4
13.1	41	94	40	0.44	0.505464	1.8	0.183516	1.5	2637.2	38.0	2684.9	24.5
14.1	86	257	186	0.75	0.403334	1.3	0.158082	0.6	2184.4	24.8	2435.3	10.5
15.1	60	148	61	0.42	0.482282	1.5	0.181111	0.7	2537.2	32.1	2663.1	12.1
16.1	100	307	111	0.37	0.389980	1.3	0.155753	0.6	2122.7	23.1	2410.1	10.1
17.1	65	177	92	0.54	0.434952	1.4	0.158420	0.7	2328.0	28.2	2438.9	12.4
18.1	40	128	41	0.33	0.370360	1.6	0.131904	1.1	2031.1	27.2	2123.5	19.0
19.1	51	147	87	0.61	0.417929	1.5	0.157841	0.8	2251.1	28.5	2432.7	13.9
20.1	92	559	35	0.07	0.206631	1.2	0.135845	0.8	1210.8	13.0	2174.9	13.5
21.1	80	360	137	0.39	0.272948	1.2	0.142330	0.7	1555.8	17.0	2255.8	12.9
22.1	108	414	202	0.50	0.313186	1.2	0.134570	0.6	1756.4	18.5	2158.5	10.9
23.1	62	557	413	0.77	0.139479	1.2	0.127179	1.9	841.7	9.2	2059.3	33.6
24.1	97	601	110	0.19	0.202650	1.1	0.141163	0.8	1189.5	12.5	2241.5	13.2
25.1	93	1032	148	0.15	0.112154	1.1	0.113971	1.3	685.2	7.2	1863.7	23.2

Table 1. continued.

Grain spot	Pb* (ppm)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U ± (%)	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb ± (%)	Apparent ages (Ma)					
							²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ±	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb ±	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ±	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb ±	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ±	
AH-41 Porphyritic granite gneiss												
1.1	71	271	42	0.16	0.311325	1.2	0.117742	0.7	1747.2	17.8	1922.2	12.0
2.1	62	498	72	0.15	0.151465	1.1	0.104613	1.3	909.2	9.1	1707.5	23.2
3.1	57	1355	19	0.01	0.050328	1.2	0.068888	5.8	316.5	3.6	895.4	118.7
4.1	65	240	66	0.28	0.317486	1.2	0.116203	0.8	1777.4	18.8	1898.6	13.6
5.1	73	303	44	0.15	0.287711	1.2	0.120865	0.8	1630.1	17.0	1969.0	13.8
6.1	66	297	79	0.27	0.266832	1.2	0.113925	0.8	1524.7	16.3	1862.9	14.4
7.1	68	380	112	0.30	0.215920	1.1	0.112998	1.0	1260.3	13.1	1848.2	17.3
8.1	71	416	86	0.21	0.206779	1.3	0.110442	1.0	1211.6	14.2	1806.7	19.0
9.1	69	264	91	0.35	0.309750	1.2	0.116387	0.8	1739.5	19.0	1901.5	13.8
10.1	58	552	195	0.36	0.128624	1.1	0.105260	1.5	780.0	8.4	1718.9	26.8
11.1	61	512	77	0.16	0.146188	1.1	0.108692	1.2	879.6	9.4	1777.6	21.6
12.1	64	670	46	0.07	0.116176	1.1	0.100349	1.6	708.5	7.5	1630.6	29.7
13.1	89	1060	8	0.01	0.101826	1.7	0.093189	4.0	625.1	10.3	1491.7	75.5
14.1	89	1118	6	0.01	0.094425	1.3	0.074513	8.4	581.7	7.3	1055.4	169.6
15.1	44	144	46	0.33	0.352605	1.5	0.117097	1.1	1947.0	25.8	1912.4	19.4
AH-155A Porphyritic granite gneiss												
1.1	100	675	205	0.31	0.172431	1.5	0.107621	0.9	1025.5	14.6	1759.5	15.9
2.1	84	977	15	0.02	0.100592	1.1	0.096969	0.8	617.9	6.4	1566.6	15.0
3.1	72	296	60	0.21	0.281934	1.2	0.113459	0.5	1601.1	16.6	1855.5	9.0
4.1	97	622	197	0.33	0.181374	1.1	0.107419	0.5	1074.5	10.9	1756.1	8.7
5.1	106	1033	278	0.28	0.119001	1.6	0.096893	0.5	724.8	11.0	1565.2	9.5
6.1	113	772	192	0.26	0.169983	1.1	0.106036	0.5	1012.0	10.3	1732.3	9.6
7.1	95	533	111	0.22	0.208272	1.1	0.109630	0.5	1219.6	12.4	1793.3	9.0
8.1	116	680	73	0.11	0.198791	1.4	0.107086	0.5	1168.8	14.8	1750.4	8.5
9.1	109	1136	27	0.02	0.111384	1.1	0.093067	1.1	680.8	7.0	1489.2	21.7
10.1	116	1095	349	0.33	0.123050	1.1	0.094667	1.2	748.1	7.6	1521.5	22.5
11.1	102	434	95	0.23	0.274842	1.1	0.113496	0.4	1565.3	15.8	1856.1	8.1
12.1	71	286	27	0.10	0.287841	1.2	0.114162	0.6	1630.7	17.2	1866.7	10.0
13.1	108	459	116	0.26	0.273439	1.1	0.112488	0.4	1558.2	15.7	1840.0	7.8
14.1	94	580	178	0.32	0.188521	1.4	0.107598	0.6	1113.4	14.6	1759.1	10.6
15.1	82	359	86	0.25	0.266924	1.2	0.113583	0.5	1525.2	15.8	1857.5	9.2
16.1	134	1255	541	0.45	0.124596	1.2	0.093903	0.5	757.0	8.8	1506.2	9.9
17.1	102	951	262	0.28	0.124559	1.4	0.098882	0.7	756.8	9.9	1603.1	13.4
18.1	89	920	45	0.05	0.112388	1.1	0.099653	0.6	686.6	7.0	1617.6	10.4
19.1	94	512	114	0.23	0.214269	1.1	0.110444	0.4	1251.5	12.6	1806.7	8.0
20.1	111	1180	61	0.05	0.109523	1.5	0.086825	0.6	670.0	9.5	1356.6	12.1
21.1	116	1089	460	0.44	0.124163	1.5	0.100083	1.0	754.5	10.7	1625.6	19.1
22.1	88	370	91	0.25	0.277032	1.1	0.115408	0.5	1576.4	15.7	1886.3	8.3
23.1	101	888	224	0.26	0.131833	1.4	0.099640	0.5	798.3	10.2	1617.4	8.4
24.1	72	295	64	0.22	0.284835	1.1	0.113509	0.5	1615.7	16.4	1856.3	8.2
25.1	100	980	266	0.28	0.119300	2.1	0.095187	0.5	726.5	14.6	1531.8	10.0
26.1	84	718	202	0.29	0.135847	1.1	0.104774	0.5	821.1	8.4	1710.3	9.7
27.1	134	894	295	0.34	0.174185	1.1	0.107325	0.4	1035.1	10.3	1754.5	7.6
28.1	106	1044	31	0.03	0.118433	1.1	0.098164	0.5	721.5	7.3	1589.5	8.7
29.1	90	871	224	0.27	0.119674	1.3	0.099440	0.5	728.7	8.8	1613.6	9.3
30.1	86	631	66	0.11	0.159193	1.1	0.105720	0.5	952.3	9.6	1726.9	9.7
31.1	69	206	95	0.48	0.390751	1.2	0.153437	0.4	2126.3	21.5	2384.6	6.4
32.1	98	997	23	0.02	0.114473	1.2	0.096470	0.6	698.7	8.2	1556.9	10.5
33.1	84	208	118	0.58	0.467167	1.2	0.164325	0.4	2471.1	24.6	2500.7	6.0
34.1	48	125	63	0.52	0.448034	1.3	0.164116	0.8	2386.5	25.6	2498.5	14.2

Table 1. continued.

Grain spot	Pb* (ppm)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb		Apparent ages (Ma)			
					± (%)	± (%)	²⁰⁶ Pb / ²³⁸ U	±	²⁰⁷ Pb / ²⁰⁶ Pb	±		
AH-118 Leucocratic granite gneiss												
1.1	102	901	16	0.02	0.131721	1.3	0.097001	0.9	797.7	9.9	1567.2	17.3
2.1	87	831	50	0.06	0.121971	0.6	0.102506	0.9	741.9	4.3	1670.0	16.1
2.2	87	316	36	0.12	0.320588	1.5	0.165010	1.2	1792.6	23.0	2507.7	20.7
3.1	99	1026	17	0.02	0.112263	0.6	0.087943	1.1	685.9	4.1	1381.2	20.7
4.1	141	893	19	0.02	0.183916	0.6	0.112026	0.4	1088.3	6.1	1832.5	7.0
5.1	105	1022	13	0.01	0.119818	0.6	0.093913	0.7	729.5	4.1	1506.4	12.9
6.1	93	922	10	0.01	0.117662	0.6	0.094820	0.9	717.1	4.1	1524.5	17.8
7.1	116	949	51	0.06	0.142471	0.6	0.102124	1.0	858.6	4.9	1663.1	18.7
8.1	151	1155	63	0.06	0.152074	0.9	0.107045	0.4	912.6	7.9	1749.7	8.2
9.1	94	1103	23	0.02	0.099412	0.6	0.093920	0.9	611.0	3.4	1506.5	17.7
9.2	88	296	271	0.95	0.345263	1.2	0.156914	0.4	1911.9	19.2	2422.7	7.6
10.1	108	476	146	0.32	0.264113	0.7	0.165207	0.4	1510.9	9.1	2509.7	6.5
11.1	69	684	39	0.06	0.118278	0.6	0.105383	1.5	720.6	4.4	1721.0	27.0
12.1	99	1160	25	0.02	0.099400	0.7	0.091510	0.9	610.9	4.2	1457.2	17.9
13.1	132	2972	45	0.02	0.051692	0.7	0.068032	2.3	324.9	2.1	869.5	47.1
13.2	132	840	90	0.11	0.182363	0.8	0.119192	0.5	1079.9	7.6	1944.2	8.6
13.3	55	239	89	0.38	0.268533	0.8	0.141974	1.0	1533.4	10.9	2251.4	17.0
14.1	101	1004	13	0.01	0.117397	0.6	0.093919	0.6	715.6	4.0	1506.5	12.2
14.2	81	317	29	0.10	0.297170	0.8	0.116684	0.5	1677.3	11.3	1906.0	9.1
14.3	27	148	44	0.30	0.212624	0.9	0.138380	1.4	1242.8	10.4	2207.0	24.4
15.1	141	872	11	0.01	0.187686	0.6	0.112876	0.5	1108.8	6.1	1846.2	9.7
16.1	107	356	185	0.54	0.349521	0.7	0.154185	1.0	1932.3	12.0	2392.9	16.4
AH-171 Unhak granite												
1.1	160	1120	16	0.01	0.166067	1.1	0.108344	1.1	990.4	9.9	1771.8	20.4
2.1	174	786	9	0.01	0.256954	1.1	0.112809	1.1	1474.2	14.6	1845.1	19.8
3.1	150	827	17	0.02	0.211023	1.2	0.111503	0.5	1234.3	13.6	1824.1	8.9
3.2	49	156	105	0.69	0.364412	1.3	0.147384	0.7	2003.1	22.7	2315.8	11.9
4.1	181	896	13	0.01	0.234917	1.2	0.112457	0.5	1360.2	14.9	1839.5	8.4
5.1	164	618	23	0.04	0.307942	1.1	0.114260	0.7	1730.6	17.0	1868.2	13.4
6.1	145	476	266	0.58	0.355139	1.1	0.153444	0.7	1959.1	19.2	2384.7	11.4
7.1	148	738	194	0.27	0.232981	1.1	0.123647	0.7	1350.1	13.5	2009.5	12.6
8.1	195	795	17	0.02	0.285462	1.1	0.113723	0.8	1618.8	15.8	1859.7	14.1
9.1	171	538	380	0.73	0.370110	1.3	0.152680	0.3	2029.9	22.3	2376.2	5.0
10.1	120	341	180	0.55	0.410779	1.5	0.158236	1.1	2218.5	27.4	2436.9	18.7
11.1	91	237	132	0.57	0.448687	1.2	0.166991	0.4	2389.4	24.7	2527.7	6.9
12.1	181	759	11	0.02	0.278255	1.2	0.113766	0.7	1582.6	17.5	1860.4	12.3
12.2	89	225	158	0.73	0.460604	1.2	0.161155	0.4	2442.2	24.4	2467.8	6.3
13.1	174	567	178	0.32	0.357002	1.2	0.143816	0.6	1967.9	20.5	2273.7	10.0
14.1	180	1090	9	0.01	0.191759	1.6	0.111048	0.6	1130.9	16.4	1816.6	11.4
14.2	92	302	268	0.92	0.356313	1.5	0.138736	0.4	1964.7	25.4	2211.5	6.2
15.1	122	412	155	0.39	0.343077	1.1	0.126815	0.3	1901.5	18.5	2054.3	6.0

하여 실험의 정확성 및 분석의 재현성을 확인하였다. K 농도의 분석 오차범위는 2% 내에서 신뢰도를 가진다. Ar 분석은 VG5400 불활성기체 질량분석기 (static vacuum mass spectrometer)를 이용하여

분석을 수행하였다. Ar 의 분석 오차범위는 1% 내에서 신뢰도를 가진다. K-Ar 연대와 오차를 계산하는데 이용된 붕괴상수는 Steiger and Jäger (1977)에 의해 제시된 값을 따랐다.

5. 연대측정 결과

5.1 저어콘 SHRIMP U-Pb 연대

암석의 형성 및 변성시기를 추정하기 위하여 저어콘 SHRIMP U-Pb 연대를 구하였다. 치악산편마암의 미그마타이트질 편마암 2개 시료(AH-16, AH-43) 내 저어콘은 대부분 아원상 내지 아각상의 마모된 형태이며, 진동형 성장누대구조를 갖는 쇄설성 상속핵과 변성작용에 의한 2개의 외연부가 구분되어 나타난다(그림 5). 쇄설성 상속핵과 1차 변성 외연부의 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 혹은 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 연대는 시생대 후기에서 고원생대 전기까지 부채살 모양의 분산된 형태의 불일치(discordia) 연령 분포를 보여주어 의미있는

연령값을 얻는데 실패하였다(그림 6a, 6b). 이는 다소 복잡한 교란에 의한 납손실(Pb loss)의 영향으로 추정된다.

반상화강편마암은 독립적인 암체로 분포할 뿐만 아니라 치악산편마암의 편마구조에 평행하게 대상으로 관입하며 분포한다. 치악산편마암과 연대측정 자료를 비교하기 위해 치악산편마암의 열리를 따라 대상으로 관입한 2개 시료(AH-41과 AH-155A) 내 저어콘은 자형 및 반자형의 주상 결정으로 전형적인 마그마 기원 입자의 진동형 누대구조 형상이 관찰되며(그림 5), 일정한 범위의 U (144~578 ppm) 과 Th (42~195 ppm) 함량 및 Th/U (0.15~0.36) 비를 가진다(표 1). 그러나 저어콘의 70% 이상이 후

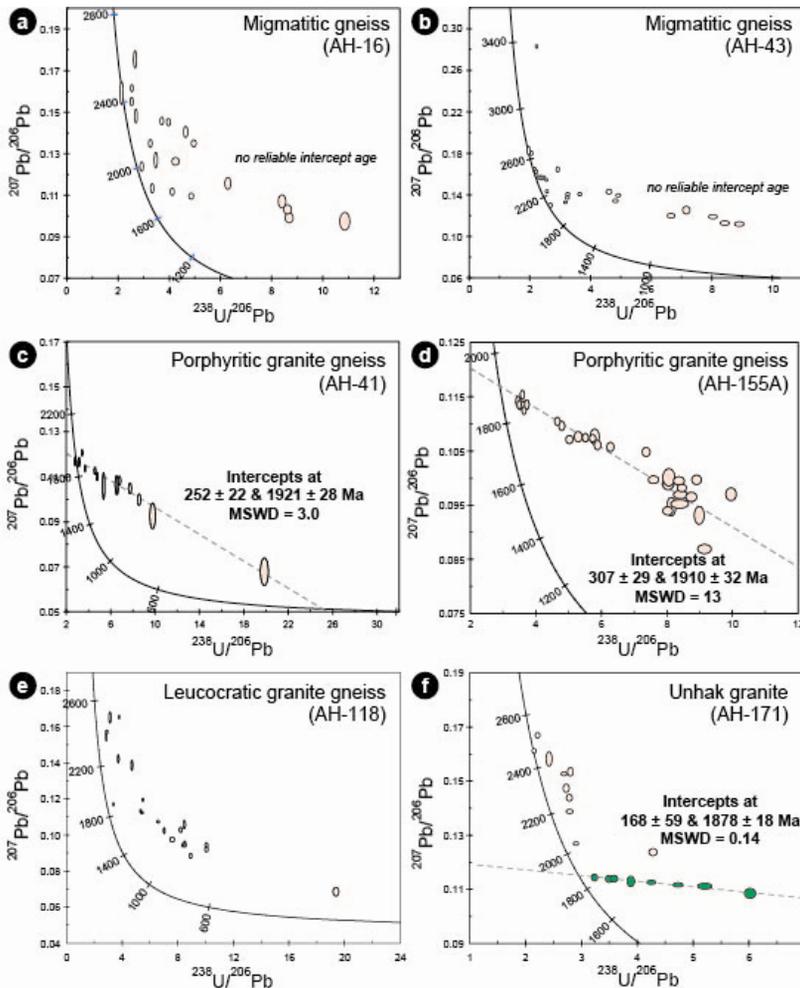


Fig. 6. Concordia plots of SHRIMP U-Pb isotopic analyses of zircon from the Paleoproterozoic gneisses in the Wonju-Anheung-Pyeongchang area.

기 변성 혹은 변형작용의 영향에 의하여 진동형 누대구조의 외연부 혹은 입자 내부의 일정 부분까지 어두운 밝기의 음극선발광영상으로 재평형된 형상이 관찰되며, 정상적인 음극선발광영상의 진동형 누대구조보다 높은 U 함량(144~578 ppm)과 낮은 Th 함량(6~46 ppm)을 가지며, Th/U비는 모든 값이 0.01 정도로 일정하게 낮게 나타난다(표 1). 매우 적은 양으로 존재하는 상속핵, 포유물 그리고 균열이 포함된 분석점들을 제외하면, 모든 분석점들의 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 연대들은 대부분 일정한 하나의 (-) 기울기 선상에서 연속적인 불일치 연령분포를 보여준다. AH-41에서 불일치선의 상부와 하부 교점에서 각각 1,921±28 Ma 및 252±22 Ma (MSWD = 3.0)와 AH-155A 시료에서 불일치선의 상부와 하부 교점(혼합선)에서 각각 1,910±32 Ma 및 307±29 Ma (MSWD = 13)의 연령 값들을 나타낸다(그림 6c, 6d).

치악산편마암 내 소규모로 관입하고 있는 우백질 화강편마암에 대해서도 연대측정을 실시하였으나, 역시 미그마타이트질 편마암과 유사하게 분산된 연대분포를 보여 의미 있는 연대를 얻는 데는 실패하였다(그림 6e).

연구지역 동남부에 폭넓게 관입 분포하는 운학화강암 내 저어콘은 자형 및 반자형의 주상형이며, 아형과 아원상의 진동형과 영역형 누대구조로 나타난다(그림 5). 진동형 성장누대구조를 보이는 쇄설성 기원의 상속핵들을 변성 기원으로 추정되는 약 70-20 μm 폭의 외연부가 중첩되어 발달하는 양상이 나타나기도 한다. 화성 기원 상속핵에서 분석점들의 U와 Th 함량값은 각각 156~567 ppm과 89~380 ppm이며, Th/U비는 0.27~0.92이다(표 1). 이들의 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 연대는 2,010 Ma에서 2,523 Ma까지의 범위를 보여주지만(그림 6f), 운학화강암의 관입시기를 추정 할 수 있는 집중연대를 구하는데 실패하였다. 반면, 변성 기원의 낮은 Th/U (0.01~0.04)비를 가지는 어두운 밝기의 외연부에서 측정된 분석점들(n=8)에서 구한 혼합선의 교점은 각각 1,878±18 Ma, 168±59 Ma (MSWD = 0.14)의 연대를 나타낸다(그림 6f). 기존 치악산편마암에서 보고되는 약 1,860 Ma의 변성연대를 고려할 때(Song *et al.*, 2011), 이번 연구에서 얻어진 약 1,878 Ma의 연령은 치악산편마암의 변성작용에 영향을 받은 운학화강암의 납손실에 의한 불일치 연령으로 해석된다.

5.2 백운모 및 흑운모 K-Ar 연대

연구지역에 분포하는 편마암류의 후기 냉각 혹은 구조(변형 혹은 단층)운동 시기를 추정하기 위하여 단층군 존재유무에 따른 두 지역군으로 나누어 백운모 및 흑운모 K-Ar 연대를 구하였다(표 2). 백운모와 흑운모 K-Ar 연대는 각각 310±50°C (Purdy and Jäger, 1976)와 280±40°C (Harrison and McDougall, 1980)까지의 냉각사를 지시한다. 일부 시료들은 SHRIMP U-Pb 측정과 중복하여 측정을 실시하였다.

연구지역 중동부 단층군이 잘 인지되지 않는 안흥리와 평창군을 연결하는 42번국도 주변부에서 채취한 미그마타이트질 호상편마암(AH-116B: 백운모-196 Ma, 흑운모-171 Ma; AH-116A: 백운모-215 Ma; AH-121: 백운모-200 Ma, 흑운모-193 Ma; AH-122: 백운모-205 Ma, 흑운모-183 Ma; AH-137: 백운모-196 Ma)과 우백질 화강편마암(AH-118: 흑운모-186 Ma)로부터 10 개의 흑운모와 백운모를 분리하여 측정된 K-Ar 연대는 동림사 인근의 백악기 전기 122 Ma를 보여주는 흑운모(AH-116A)를 제외하면 193-171 Ma의 흑운모 연대와 215-196 Ma의 백운모 연대범위가 인지된다(표 2). 한편, 각 시료 내에 흑운모 연대들의 큰 편차는 흑운모의 녹니석화의 영향으로 판단된다.

N30°~40°W 방향의 단층대 노두가 인지되는 연구지역 중앙부의 안흥면 골새재에서 단층비지와 접하는 단층파쇄대 내의 미그마타이트질 호상편마암(AH156A: 흑운모-92 Ma), 반상화강편마암(AH-155A: 흑운모-88 Ma; AH-157B: 백운모-102 Ma, 흑운모-89 Ma)과 안흥화강암(AH155B: 백운모-122 Ma, 흑운모-88 Ma)로부터 7 개의 흑운모와 백운모를 분리하여 측정된 K-Ar 연대는 92-88 Ma의 흑운모 연대와 122-102 Ma의 백운모 연대범위가 인지된다(표 2). 이번 연구에서는 단층시기를 직접적으로 지시하는 단층비지에 대한 K-Ar 연대측정을 수행하지 않았지만 단층비지를 접하는 파쇄 편마암들의 백악기 K-Ar 연대들은 단층시기를 간접적으로 지시하는 것으로 추정된다. 그리고 파쇄 편마암의 백악기 백운모와 흑운모 K-Ar 연대는 단층비지가 만들어지는 천부변형작용보다는 단층파쇄대 내의 흑운모와 백운모 K-Ar의 동위원소계를 재평형 할 수 있는 280°C까지의 열수작용의 영향일 가능성이 높다.

한편, 단층인근 주변에 분포하는 반상화강편마암(AH-144: 백운모-208 Ma, 흑운모-131 Ma)과 운학화

Table 2. Muscovite and biotite K-Ar age data of Paleoproterozoic gneisses from the Wonju-Anheung-Pyeongchang area.

Rock type	Sample No.	Mineral	Mesh size	K (wt. %)	rad. ⁴⁰ Ar (10 ⁻⁸ ccSTP/g)	K-Ar age (Ma)	non-rad. ⁴⁰ Ar (%)
Migmatitic gneiss	AH-122	muscovite (#100-200)		8.390	7060 ± 6	205 ± 4	10.6
		biotite (#100-200)		5.802	4324 ± 5	183 ± 4	17.2
Migmatitic gneiss	AH-121	muscovite (#100-200)		8.948	7349 ± 6	200 ± 4	11.9
		biotite (#100-200)		6.891	5435 ± 6	193 ± 4	12.4
Migmatitic gneiss	AH-137	muscovite (#100-200)		8.329	6680 ± 8	196 ± 4	15.9
Leucocratic granite gneiss	AH-118	biotite (#100-200)		7.059	5377 ± 5	186 ± 4	6.6
Migmatitic gneiss	AH-116A	muscovite (#100-200)		8.047	7465 ± 8	215 ± 4	12.1
		biotite (#100-200)		9.173	4499 ± 4	122 ± 2	10.2
Migmatitic gneiss	AH-116B	muscovite (#100-200)		8.736	7023 ± 9	196 ± 4	19.0
		biotite (#100-200)		7.059	5615 ± 11	171 ± 3	15.7
Porphyritic granite gneiss	AH-144	muscovite (#100-200)		8.429	7222 ± 7	208 ± 4	17.2
		biotite (#100-200)		7.117	3745 ± 3	131 ± 3	7.2
Unhak granite	AH-171	muscovite (#100-200)		8.544	7019 ± 6	200 ± 4	8.4
		biotite (#100-200)		7.791	2603 ± 3	84 ± 2	15.8
<i>Fault Zone</i>							
Anheung granite	AH-155B	muscovite (#100-200)		8.545	4199 ± 4	122 ± 3	6.9
		biotite (#100-200)		8.262	2878 ± 3	88 ± 2	11.2
Porphyritic granite gneiss	AH-157B	muscovite (#100-200)		8.412	3422 ± 3	102 ± 2	22.3
		biotite (#100-200)		7.466	2658 ± 5	89 ± 2	28.3
Porphyritic granite gneiss	AH-155A	biotite (#100-200)		7.124	2495 ± 5	88 ± 2	26.7
Migmatitic gneiss	AH-156A	biotite (#100-200)		7.410	2702 ± 4	92 ± 2	27.0
Granitic gneiss	AH-156B	muscovite (#100-200)		8.315	3710 ± 3	111 ± 2	10.4
		biotite (#100-200)		7.052	2657 ± 4	95 ± 2	26.1

강암(AH-171: 백운모-200 Ma, 흑운모-84 Ma)로부터 4 개의 흑운모와 백운모를 분리하여 측정된 K-Ar 연대는 131-84 Ma의 흑운모 연대와 208-200 Ma의 백운모 연대가 인지된다(표 2). 단층인근 주변에 분포하는 각 시료 내 트라이아스기의 K-Ar 백운모 연대들에 비해 상대적으로 매우 젊은 백악기 흑운모 연대들도 흑운모 동위원소계를 교란할 수 있는 약 300°C까지의 열적작용의 영향으로 해석된다.

6. 지질연대와 지구조적 의미

연구지역 편마암류의 상호 접촉관계, 지질구조, 그리고 저어콘 SHRIMP U-Pb 및 백운모와 흑운모의 K-Ar 연대자료와 같은 지질자료는 연구지역에 분포하는 편마암류의 지구조 진화과정을 대변한다.

원주-안흥-평창 지역 고원생대 편마암류는 많은

시료들에서 고원생대 이후의 변성 혹은 변형작용에 기인한 복잡한 불일치 연령 분포를 보여주어 의미를 가지는 연령값을 획득하는데 있어 어려움을 준다 (Koh *et al.*, 2011; Song *et al.*, 2011). 일부 편마암 시료들에서 성공적으로 얻어진 연대자료를 통하여 편마암류의 형성시기를 알아보면, 이들 암류에서 분리한 쇄설성 저어콘 SHRIMP U-Pb의 최소 연대들인 약 2.08~2.07 Ga (Song *et al.*, 2011), 이들 관입한 고원생대 화강암류들의 정치시기인 약 1.96~1.91 Ga, 그리고 저어콘 과성장 외연부의 약 1.87~1.86 Ga의 변성작용시기 자료들을 근거로 2.08~2.07 Ga와 1.96~1.91 Ga사이의 퇴적작용, 1.96~1.91 Ga의 화강암화 작용 그리고 연구지역 및 경기육괴 전역에서 인지되는 1.87~1.86 Ga 시기의 변성작용등의 순차 형성진화과정을 추정할 수 있다(그림 7; Song *et al.*, 2011; this study). 그러나, Horie *et al.* (2009)

가 인근 부산지역의 미그마타이트질 편마암의 저어콘 과성장 외연부 SHRIMP U-Pb 동위원소연령과 모나자이트 화학연령으로부터 구한 약 1.94 Ga 변성 시기는 안흥지역에서 분포하는 고원생대 화강암류의 관입 시기(ca. 1.92~1.91 Ga)와 거의 차이가 없다. 따라서 Horie *et al.* (2009)에 의해 보고된 부산지역 편마암의 고기 미그마타이트화 작용시기(약 1.94 Ga)는 원주-안흥-평창 지역의 반상화강편마암, 운학화강암 등의 고원생대 화강암류의 광역적 관입과 연관된 열변성작용과 관련될 수도 있다.

한편, 원주-안흥-평창 지역 편마암류들은 대부분 Pb 손실에 의한 하부교점 겹보기 저어콘 SHRIMP U-Pb 연대 경향을 보여주며, 일부 시료들에서 고생대 후기인 307±29 Ma, 페름기 후기인 252±22 Ma와 쥐라기 중기인 168±59 Ma의 연대들이 인지되기도 한다(그림 6, 7). 고생대 후기와 페름기 후기의 하부교점 연대들은 부산편마암 복합체에서 구해진 293±31 Ma의 하부교점 연대(Horie *et al.*, 2010), 모나자이트 전자현미기 Th-total Pb로부터 구한 약 289 Ma(Horie *et al.*, 2010) 및 옥천변성대에서 보고된 흑색 점판암의 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb, 우라나이트의 CHIME 알라나이트 U-Pb step-leaching (Kim *et al.*, 2007) 및 저어콘 과성장 외연부 SHRIMP U-Pb (Kim *et al.*, 2006a)으로부터 구한 변성작용의 연대인 291~283 Ma, 283~281 Ma, 293±31 Ma, 276±29 Ma 및 약 256 Ma와 유사하여 원주-안흥-평창 지역은 고생대 후기부터 페름기 후기사이의 지질사건을 겪은 것으로 추정된다. 현재까지 연구결과들은 고생대 후기의

변성작용을 일으킨 지구조 작용을 정확히 규명하지 못한 실정이지만(Cluzel *et al.*, 1990; Cheong *et al.*, 2003; Oh *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2007; Cho *et al.*, 2013), 고생대 후기의 지구조 작용이 중국의 대륙충돌대와 연관될 가능성을 제기하고 있으며, 트라이아스기 초기의 변성작용은 중국의 대륙충돌대인 친링-다비-수루대의 연장인 한국의 임진강대와 경기육괴 서부는 물론 원주-안흥-평창-부산 지역 동남측의 방림층군과 평창형 조선계의 경계와 옥천변성대 남부 등을 연결하는 남한지구조선에서 일어난 광역적인 변성작용임을 지시하는 것으로 추정된다. 결과적으로, 석탄기 후기부터 페름기 후기의 지질사건은 중국의 페모-트라이아스기 대륙충돌작용시기들과 유사한것으로 추정된다(Kee *et al.*, 2011; Choi *et al.*, 2012; Cho *et al.*, 2013). 하지만 저어콘 SHRIMP U-Pb 연대 경향에서 고원생대와 쥐라기 중기의 단순한 납손실 혼합선을 가지는 운학화강암(그림 6f)은 낮은 값의 MSWD(0.14)과 함께 쥐라기 중기의 지질사건의 의미를 가지는데 비해 복잡한 납손실에 의한 혼합선들을 가지는 반상화강편마암들(AH-41과 AH-155A 시료)의 석탄기 후기(307 Ma)와 페름기 후기(252 Ma)의 하부교점 연대들은 다소 높은 불확실성을 갖는다. 추후 이들 연대들의 해석에 자세한 연구가 요구된다.

연구지역에 분포하는 편마암류의 백운모의 K-Ar 연대는 대략 215-196 Ma의 연대범위로 페모-트라이아스기 초기 광역변성작용 이후에 경험한 트라이아스기 후기의 약 350°C까지의 냉각역사를 대변한다

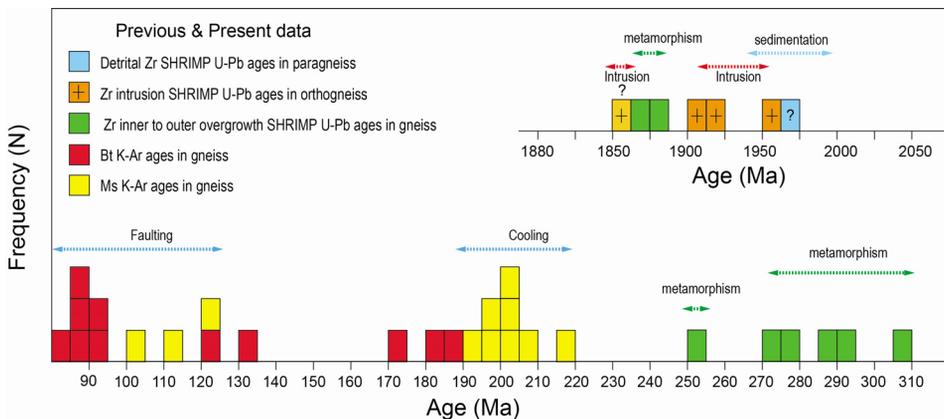


Fig. 7. Frequency distribution diagrams for zircon SHRIMP U-Pb and muscovite and biotite K-Ar ages from the Paleoproterozoic gneisses in the Wonju-Anheung-Pyeongchang area.

(그림 7, 표 2). 하지만 흑운모 K-Ar 연대들은 지역에 따라 녹니석화 혹은 열적 영향으로 주라기 초기부터 백악기 전기까지의 넓은 연대편차를 보여준다.

한편, N30°~40°W 방향의 단층대 노두가 인지되는 연구지역 중앙부의 안흥면 골새재와 주변부에서 얻어진 편마암류의 흑운모와 백운모의 K-Ar 연대들은 트라이아스기 후기 냉각 연대들을 보여주지 않고 102~122 Ma의 K-Ar 백운모 연대와 84~95 Ma의 K-Ar 흑운모 연대를 보여준다. 이들 단층지역에서의 연대 결과는 백악기 단층작용 혹은 열적작용 시기를 나타내며, 백악기 초기에서 백악기 말기에 발생한 우리나라의 불국사변동과 밀접함을 지시한다(그림 7; 표 2).

7. 결론

본 연구에서는 경기육괴 원주-안흥-평창 지역 편마암류의 상호 접촉관계, 지질구조, 그리고 저어콘 SHRIMP U-Pb 및 백운모와 흑운모의 K-Ar 연대자료에 대한 결과를 통해 편마암류의 지구조 진화과정을 해석하였다

- 1) 원주-안흥-평창 지역 편마암은 약 2.07 Ga와 1.96 Ga 사이에 퇴적되었으며, 이후 약 1.91 Ga까지 화강암화 작용 및 미그마타이트화 작용을 경험한 후 재차 1.87~1.86 Ga 시기에 변성작용을 경험한 것으로 추정된다.
- 2) 일부 편마암류들의 하부교점 겹보기 저어콘 SHRIMP U-Pb 연대에서 석탄기 후기인 307 Ma, 페름기 후기인 252 Ma와 주라기 중기인 168 Ma의 연대들이 인지된다.
- 3) 편마암류의 K-Ar 백운모연대들은 트라이아스기 후기(215-196 Ma)로 우리나라에서 일반적으로 보고되는 페르모-트라이아스기 초기 광역 변성작용 이후에 경험한 트라이아스기 후기의 약 350°C까지의 냉각사를 지시한다. 반면, 193-171 Ma의 K-Ar 흑운모 연대는 녹니석화 작용에 의해 다소 넓은 냉각연대편차를 보여주어 냉각사를 지시하는데 어려움을 준다.
- 4) 원주-안흥-평창 지역 단층대 내의 파쇄 편마암류들의 흑운모와 백운모의 K-Ar 연대결과는 백악기 초기에서 백악기 말기(122~84 Ma)로 우리나라의 불국사변동과 밀접한 단층작용 혹은 열적작용 시기를 간접적으로 지시한다.

사 사

이 논문은 한국지질자원연구원의 기본사업인 '지질도폭 조사연구(14-1111)'에 의해 지원되었다. 논문을 검토하고 유익한 조언을 해주신 익명의 심사자분들과 충북대학교 김윤섭 교수님께 심심한 사의를 표한다.

REFERENCES

- Cheong, C.-S., Jeong, G.Y., Kim, H., Choi, M.S., Lee, S.-H. and Cho, M., 2003, Early Permian peak metamorphism recorded in U-Pb system of black slates from the Ogcheon metamorphic belt, South Korea, and its tectonic implication. *Chemical Geology*, 193, 81-92.
- Cho, M., Kim, Y. and Ahn, J., 2007, Metamorphic evolution of the Imjingang Belt, Korea: implications for Permo-Triassic collisional orogeny. *International Geology Review*, 49, 30-51.
- Cho, M., Cheong, W., Earst, W.G., Yi, K. and Kim, J., 2013, SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons in metasedimentary rocks of the central Ogcheon fold-thrust belt, Korea: Evidence for tectonic assembly of Paleozoic sedimentary protoliths. *Journal of Asian Earth Sciences* 63, 234-249.
- Choi, S.J., Kee, W.S., Koh, H.J., Kwon, C.W., Kim, B.C., Kim, S.W., Kim, Y.B., Khim, Y.H., Kim, H.C., Park, S.-I., Song, K.Y., Yeon, Y.K., Lee, S.S., Lee, S.R., Lee, Y.S., Lee, H.J., Cho, D.R., Choi, B.Y., Hwan, J.K., Hyeon, H.J., Hwang, J.H. and Lee, J.A., 2012, Tectonic evolution of the western Gyeonggi Block and construction of geologic DB system. *Basic Research Report of the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources*. 420 pp (in Korean with English abstract).
- Chough, S.K., Kwon, S.-T., Ree, J.-H. and Choi, D.K., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula: a review and new view. *Earth-Science Review*, 52, 175-235.
- Cluzel, D., Cadet, J.-P. and Lapierre, H., 1990, Geodynamics Geodynamics of the Ogcheon belt (South Korea). *Tectonophysics*, 183, 41-56.
- Harrison, T.M. and McDougall, I., 1980, Investigations of an intrusive contact, northwest Nelson, New Zealand - I. Thermal, chronological and isotopic constraints. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44, 1985-2003.
- Horie, K., Tsutsumi, Y., Kim, H., Cho, M., Hidaka, H. and Terada, K., 2009, A U-Pb geochronological study of migmatitic gneiss in the Busan gneiss complex, Gyeonggi massif, Korea. *Geosciences Journal*, 13,

- 205-215.
- Imai, N., Terashima, S., Itoh, S. and Ando, A., 1995, 1994 compilation of analytical data for minor and trace elements in seventeen GSJ geochemical reference samples, "Igneous rock series". *Geostandards Newsletter*, 19, 135-213.
- Kee, W.S., Koh, H.J., Kim, S.W., Kim, Y.B., Khim, Y.H., Kim, H.C., Park, S.-I., Song, K.Y., Lee, S.R., Lee, Y.S., Lee, H.J., Cho, D.R., Choi, B.Y., Choi, S.J. and Hwang, J.H., 2011, Tectonic evolution of the upper crustal units in the mid-western part of the Korean peninsula. Basic Research Report of the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources. 242 pp (in Korean with English summary).
- Kihm, Y.H., Kee, W.S. and Jin, G.M., 2010, Geological structures of Jucheon area, contact area between Ogcheon Belt and Gyeonggi Massif. *Economic and Environmental Geology*, 43, 647-648 (in Korean with English abstract).
- Kim, H., Cheong, C.-S. and Cho, M., 2007, The effect of allanite inclusions on U-Pb step-leaching ages and Sm-Nd isotope systematics of garnet from the Ogcheon metamorphic belt, South Korea. *Chemical Geology*, 236, 27-41.
- Kim, J., 2001, New K-Ar dating system in Korea Basic Science Institute: summary and performance. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 10, 172-178 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.W., Park, B.S. and Lee, H.K., 1967, Explanatory text of the geological map of Jecheon Sheet (1:50,000). Geological Survey of Korea, 46 p (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W., Kwon, S., Koh, H.J., Yi, K., Jeong, Y. and Santosh, M., 2011, Geotectonic framework of Permo-Triassic magmatism within the Korean Peninsula. *Gondwana Research*, 20, 865-889.
- Kim, S.W., Oh, C.W., Ryu, I.-C., Williams, I.S., Sajeev, K., Santosh, M. and Rajesh, V.J., 2006a, Geochemical and geochronological characteristics of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks of the Okcheon Belt, South Korea and their implications for rifting in Rodinia. *Journal of Geology*, 114, 717-733.
- Kim, S.W., Oh, C.W., Williams, I.S., Rubbato, D., Ryu, I.-C., Rajesh, V.J., Kim, C.-B., Guo, J. and Zhai, M., 2006b, Phanerozoic high-pressure eclogite and intermediate-pressure granulite facies metamorphism in the Gyeonggi block, South Korea: implications for the eastward extension of the Dabie-Sulu continental collision zone. *Lithos*, 92, 357-377.
- Koh, H.J., Kim, S.W. and Lee, S.R., 2011, Geological report of the Anheungri Sheet (1:50,000). Korean Institute of Geoscience and Mineral Resources, 54 p (in Korean with English abstract).
- Kwon, S., Sajeev, K., Mitra, G., Park, Y., Kim, S.W. and Ryu, I.-C., 2009, Evidence for Permo-Triassic collision in Far East Asia: The Korean collisional orogen. *Earth and Planetary Science Letters*, 279, 340-349.
- 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 Spec. Publ., Berkeley.
- Pearce, J.A., 1996, Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19, 120-125.
- Oh, C.W., Kim, S.W., Choi, S.G., Zhai, M., Guo, J. and Sajeev, K., 2005, First finding of eclogite facies metamorphic event in South Korea and its correlation with the Dabie-Sulu Collision Belt in China. *Journal of Geology*, 113, 226-232.
- Oh, C.W., Kim, S.W., Ryu, I.-C., Okada, T., Hyodo, H. and Itaya, T., 2004, Tectono-metamorphic evolution of the Okcheon metamorphic belt, South Korea: Tectonic implications in East Asia. *The Island Arc*, 13, 387-402.
- Purdy, J.W. and Jäger, E., 1976, K/Ar ages on rock-forming minerals from the Central Alps. *Memorie degli Istituti di Geologia e Mineralogia dell'Universita di Padova*, 30 p.
- Ree, J.-H., Cho, M., Kwon, S.-T. and Nakamura, E., 1996, Possible eastward extension of Chinese collision belt in South-Korea: the Imjingang belt. *Geology*, 24, 1071-1074.
- Sagong, H. and Kwon, S.T., 1998, Pb-Pb age and uplift history of the Busan gneiss complex in the Okchon Belt, Korea: a comparison with the Bagdalryeong gneiss complex in the Kyongki Massif. *Geosciences Journal*, 2, 99-106.
- Son, C.M. and Cheong, J.G., 1971, Geology of the north-western part of Pyeongchang district, Gwangwon-do, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 7, 143-152 (in Korean with English abstract).
- Song, Y.-S., Park, K.-H., Seo, J., Jo, H.J. and Yi, K., 2011, SHRIMP Zircon Ages of the Basement Gneiss Complex in the Pyeongchang-Wonju Area, Gyeonggi Massif, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 20, 99-114 (in Korean with English abstract).
- Steiger, R. and Jäger, E., 1977, Subcommission of geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmo-chronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 36, 359-362.
- Williams, I.S., 1998, U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben, M.A., Shanks, W.C.I.I.I.,

- Ridley, W.L. (Eds.), Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. Society of Economic Geologists, Socorro, Reviews in Economic Geology, 7, pp. 1-35.
- 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.
-
- 투 고 일 : 2014년 3월 27일
심 사 일 : 2014년 3월 28일
심사완료일 : 2014년 5월 8일