

## 경기육괴 북동부 고성-간성 지역 선캄브리아 암석의 CHIME 연대와 그 지체구조적 의의

조등룡<sup>1,\*</sup> · Kazuhiro Suzuki<sup>2</sup> · 최위찬<sup>1</sup> · Mamoru Adachi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지질기반정보연구부, <sup>2</sup>Center for Chronological Research, Nagoya University

<sup>3</sup>Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

## CHIME Ages of Precambrian Rocks from the Goseong-Ganseong Area, Northeastern Part of the Gyeonggi Massif, and Their Tectonic Implications

Deung-Lyong Cho<sup>1,\*</sup>, Kazuhiro Suzuki<sup>2</sup>, Ueechan Chwae<sup>1</sup> and Mamoru Adachi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Division of Geology and Geoinformation, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,  
30 Gajeong-dong Yuseong-gu Daejeon, 305-50, Korea

<sup>2</sup>Center for Chronological Research, Nagoya University, Furo-cho, Chikusaku, Nagoya, 464-8602, Japan

<sup>3</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University,  
Furo-cho, Chikusaku, Nagoya, 464-8602, Japan

**요약:** 경기육괴 북동부 고성-간성 지역에 분포하는 선캄브리아 암석의 CHIME 연대를 측정하였다. 정편마암류의 모나자이트 및 저어콘은  $1672 \pm 69$  Ma 내지  $1414 \pm 36$  Ma이고, 준편마암류의 모나자이트는  $1703 \pm 70$  Ma 내지  $1395 \pm 97$  Ma로서 약 1.7~1.4 Ga 사이의 화성활동과 수반한 변성작용을 나타낸다. 이를 전 지구적인 지체구조운동에 대비하면 경기육괴에서 광범위하게 보고되는 1.9~1.8 Ga의 열적사건은 콜롬비아 초대륙의 형성과 관련된 조산운동으로, 이 연구의 1.7~1.4 Ga 심성암의 관입과 변성작용은 콜롬비아 초대륙 형성 후의 대륙연변부의 성장과 관련된 결과로 해석할 수 있다. 그러나 이는 주로 연대측정 자료에 의존한 것으로서 추후 자세한 암석학 및 지화학적 연구를 통한 검증이 필요하다.

**핵심어:** 경기육괴, CHIME 연대, 고원생대, 중원생대, 콜롬비아 초대륙

**Abstract:** CHIME (chemical Th-U-total Pb isochron) geochronology were made for Precambrian rocks from Goseong-Ganseong area, northeastern part of the Gyeonggi massif. Zircon and/or monazite grains from orthogneisses give  $1672 \pm 69$  to  $1414 \pm 36$  Ma ages, and monazite grains from paragneisses yield similar ages ranging from  $1703 \pm 70$  to  $1395 \pm 97$  Ma suggesting that 1.7~1.4 Ga igneous intrusions and coeval metamorphisms were occurred over the area. Together with reported prevailing 1.9~1.8 Ga igneous activities and regional metamorphism from the Gyeonggi massif, our age data from Goseong-Ganseong area would be potentially correlated with long-lived (1.8~1.3 Ga) global tectonothermal events in marginal outgrowth of supercontinent Columbia which was finally assembled by collisional orogenies at ~1.8 Ga. Petrological and geochemical studies, however, should be followed to confirm this tectonic interpretation.

**Key words:** Gyeonggi Massif, CHIME age, Paleoproterozoic, Mesoproterozoic, Supercontinent Columbia

### 서 언

한반도의 선캄브리아 기반암은 남립육괴, 경기육괴와 영남육괴에 걸쳐 넓게 분포하며, 이의 지질과 열역사의

규명은 한반도는 물론 동북아시아 전체의 지체구조적 해석을 위한 근본적인 요소이다. 특히 경기육괴의 선캄브리아 기반암과 남립육괴 및 영남육괴, 중국의 북중국 지괴 및 남중국지괴와의 대비는 다비-술루 충돌대의 한

\*Corresponding author: Tel. 82-42-868-3040, E-mail. dlcho@kigam.re.kr

반도 중앙부인 임진강대로의 연장 여부(Liu, 1993; Chang, 1996; Ree *et al.*, 1996), 경기육괴가 옥천대와 임진강대를 경계로 만입되었다는 지체구조적 모델(Yin and Nie, 1993) 등의 검증에 중요한 단서가 된다.

지난 10년 이래 정확한 연대측정을 기반으로 한 경기육괴의 화성활동, 변성작용과 변형작용에 대한 연구가 있어왔다. 이를 통해 경기편마암복합체에 1.9~1.8 Ga 고원생대의 광역변성작용과 화강암질암의 관입이 광범하게 일어났고(Kim *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 2000; Sagong *et al.*, 2003; 조동룡과 김용준, 2003; Oh *et al.*, 2006, 오창환 외, 2006), 임진강대와 서산층군 인접 지역에 로디니아 초대륙의 분리와 관련된 것으로 여겨지는 0.9~0.7 Ga 신원생대 후기의 화성활동(Cho, 2001; Lee *et al.*, 2003; Cho *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2006)과 북중국지괴와 남중국지괴의 충돌시기에 해당하는 고압의 페름기-트라이아스기(258~225 Ma) 변성작용이 있었다는(Ree *et al.*, 1996; Cho *et al.*, 1996, 2005; Oh *et al.*, 2005) 지체구조적으로 중요한 지질사건들이 보고되었다. 그러나 경기육괴의 전반적인 진화과정이 충분히 알려졌다고 아직 단언하기 어렵다. 예를 들어 북중국지괴에서 보고되는(Zhai *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2001, 2004, 2005) 시생대 암석과 1.8 Ga보다 젊은 고원생대-중원생대의 지층이 경기육괴에 존재하는지 여부는 아직 확실하지 않다. 지역적으로도 경기육괴 선클브리아 기반암의 상당 부분에 대한 자세한 연구가 아직 수행되지 않았으며, 특히 경기육괴 북동부 지역은 임진강대의 서측 연장 등 지체구조적으로 매우 중요함에도 불구하고 아직 지질과 연대측정 연구 결과가 알려진 바 없다.

우리는 이와 같은 경기육괴 선클브리아 기반암 연구의 부족한 부분을 보완하기 위해 1:50,000 고성-간성 지질도폭 구역의 지질조사를 수행하고, 대표적인 암체에 대한 CHIME 연대측정(Suzuki and Adachi, 1991a,b, 1994, 1998)을 실시하였으며, 이를 바탕으로 경기육괴에 1.8 Ga보다 젊은 고원생대~중원생대의 지질학적 사건이 존재할 가능성과 그 지체구조적 의미에 대해 토의한다.

## 지질배경과 시료

연구지역은 경기육괴 북동부에 위치하고, 선클브리아 경기편마암복합체의 준편마암류와 정편마암류를 기저로 하여 이를 관입하는 쥬라기의 대보화강암, 백악기-제3기의 반심성암, 맥암류와 현무암으로 구성된다(Fig. 1).

준편마암류의 대부분은 석류석-흑운모 편마암, 화강암질 편마암과 준편마암 복합체로 구분된다. 석류석-흑운모 편마암은 함석류석 변성사질암을 소규모 협재하고, 각섬석암과 휘석암의 초염기성 암맥에 의해 관입당한다. 준편마암 복합체는 두께 수 십 cm 내지 수 m의 흑운모 편마암, 호상 흑운모 편마암, 각섬석-흑운모 편마암, 석영장석질 편마암 등의 혼층으로 이루어지며, 소규모의 규암과 각섬암이 이에 협재한다. 연구 지역의 중앙부 동측 일대에는 퇴적암 기원의 근저석-규선석 편마암과 변성사질암이 분포한다. 이들은 대보 화강암의 관입에 의해 다른 선클브리아 암석과 분리되어 있어 관계를 확인할 수 없지만 후술할 CHIME 연대측정 결과에 의하면 정편마암류보다 후기의 암체로 인정된다.

정편마암류는 준편마암류 일부를 관입하며, 반상변정질 화강편마암, 반려암질 편마암, 화강편마암과 함석류석 화강편마암으로 분류된다. 반상변정질 화강편마암은 화강편마암에 의해 관입당하지만 나머지 암상은 서로 직접 접촉하는 곳이 없어 관계를 알 수 없다.

쥬라기의 대보화강암은 부분적으로 반상조질을 보이는 각섬석-흑운모 화강암, 섬록암과 이들을 관입하는 복운모 화강암으로 구성된다. 작은 규모의 암주 혹은 절리를 충진하는 맥상으로 규장암과 유문암의 관입 화산암이 대보화강암 내에서 발견된다. 이들의 K-Ar 전암 연령은 각각  $83 \pm 3$  Ma와  $69 \pm 2$  Ma이다(조동룡 외, 미발표). 마산 등지의 불국사 화강암에서 전형적인 미분상 화강암과 반화강암이 작은 암주 혹은 맥상으로 연구지역에 산재하며, 이의 K-Ar 전암 연령은  $48 \pm 1$  Ma이다(조동룡 외, 미발표). 또한 연구지역의 남부에서 소규모의 플러그 돔상으로 K-Ar 전암연령 6~3 Ma(조동룡 외, 미발표)의 제3기 말 현무암이 대보화강암을 관입한다.

Chwae (1998)는 연구지역의 전반적인 지질구조에 대해 보고한 바 있다. 그에 의하면 쥬라기 이전 암체는 동서 방향의 축을 갖는 개방형 습곡 형태를 이루며, 엽리와 광물신장 방향의 주향이 북부에서는 북서 방향, 중앙부에서는 북북서, 남서쪽 지역에서는 북동 방향으로 휘어진다. 또한 광물신장 배열 방향의 기울기는 지역에 따라서 북쪽 또는 남쪽으로 경사한다. 폭 약 10 km의 대규모 연성전단대가 선클브리아의 지층에 발달하는데, 이는 우수향 운동 감각을 보이며 대보화강암류에 의해 단절된다.

연구지역의 선클브리아 암체가 경험한 전반적인 열역사를 규명하기 위해 화강암질 편마암, 준편마암복합체의 규암, 반상변정질 화강편마암, 반려암질 편마암,

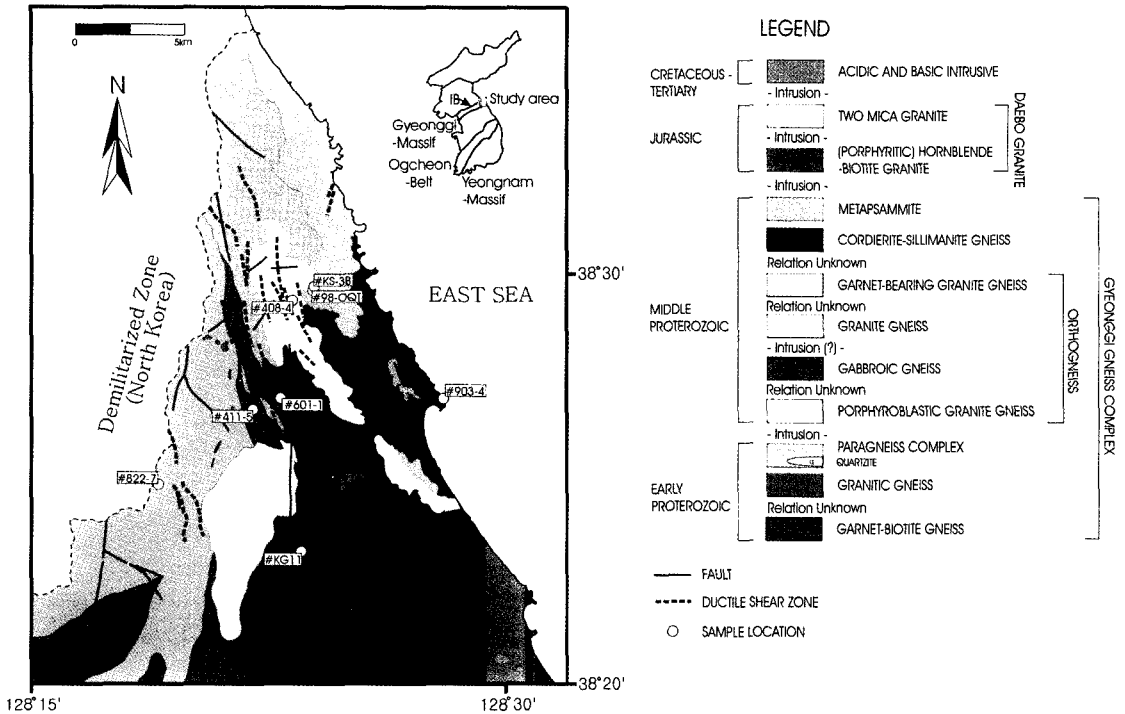


Fig. 1. Geologic map of Goseong-Ganseong area, northeastern part of the Gyeonggi massif, showing sample localities.

화강편마암, 함석류석 화강편마암, 근청석-규선석 편마암을 대상으로 CHIME 연대측정을 실시하였다. 또한 대보화강암류의 관입에 의해 선캠브리아 암체가 받은 열적 영향을 살펴보기 위해 반상조직의 각섬석-흑운모 화강암의 한 시료도 CHIME 연대측정을 하였다. 이들 시료의 위치, 암상과 유용한 K-Ar 연대측정치(조동룡, 미발표)는 Fig. 1과 Table 1에 제시되었다.

### 연구방법

야외에서 채취한 시료를 EPMA용 연마박편으로 제작하거나, 분말에서 필요한 광물을 분리한 후 박편용 슬라이드글라스에 에폭시 수지로 장착하여 CHIME 연대측정에 사용하였다. 아입자 분석을 위한 중광물 분리와 시료준비 방법은 이미 다른 연구에 자세히 소개되어 있으므로(조동룡, 2004) 여기서는 생략한다.

CHIME 분석은 일본 나고야대학교 연대측정연구센터에서 JEOL JXA-733 기기를 사용하여 이루어졌다. 기기조건, 분석절차, 연대계산 등의 제반 사항은 Asami *et al.*(2002)과 Kusiak *et al.*(2006)에 기재된 바와 같다. 이를 요약하면 기기 조건은 가속전압 15 kV, 전류 200-400 nA, 빔 직경 약 3 μm 내외이고, PET 분석절

정의 WDS 4개 채널로 ThMα, UMβ, PbMα와 YLα 선을 동시에 측정하였다. 측정시간은 원소의 함량에 따라 피크값은 200초 혹은 400초이고, 배경값은 +와 - 위치에서 각각 100초 혹은 200초이며, 2회 내지 3회 반복하여 평균값을 취하였다. 표준물질로 Th와 U은 Smellie *et al.*(1978)의 육세나이트(euxenite), Pb는 10.18 wt.% PbO 함량의 합성유리(Suzuki and Adachi, 1998), Y는 Pb를 전혀 포함하지 않은 합성유리를 각각 사용하였다. YLγ선과 ThMζ선의 PbMα선 간섭 및 ThMγ선의 UMβ선 간섭에 대한 보정은 Åmli and Griffin (1975)의 방법으로 이루어졌다.

ThMα, UMβ, PbMα과 YLα선 측정자료는 임의의 자연산 모나자이트 성분을 매트릭스로 하여 Bence and Albee(1968) 보정법을 통해 함량으로 환산되었다. 이 성분값은 0.905 wt.% SiO<sub>2</sub>, 11.2 wt.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 27.4 wt.% Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2.68 wt.% Pr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 12.0 wt.% Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2.12 wt.% Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.705 wt.% Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.16 wt.% Tb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.21 wt.% Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1.29 wt.% CaO, 28.6 wt.% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>이며, 실제 성분과의 차이에 의해 보정에서 발생하는 ThO<sub>2</sub>, UO<sub>2</sub>, PbO와 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량의 오차는 0.5% 이하로 미미하다. 2σ 수준에서 ThO<sub>2</sub>, UO<sub>2</sub>와 PbO의 측정하한은 각각 0.009, 0.012, 0.006 wt.%이다. 상대오차는 0.03 wt.% PbO에서

Table 1. Description of samples for CHIME dating

Rock Unit (sample No.)	Longitude/ Latitude	Rock type/Mineralogy	K-Ar Age (Ma)/Material
Granitic gneiss (#411-5)	N38°26'42" E128°22'02"	banded medium-grained quartzofeldspathic gneiss/ Bt, Qz, Kfd, Pl, Ms, Sl, Zr, Mo, Tm, Opq	169±4/Bt
Paragneiss complex (#98-OQT)	N38°29'36" E128°23'23"	weakly foliated quartzite/ Qz, Ms, Opq, Zr, Mo	not available
Cordierite-sillimanite gneiss (#903-4)	N38°26'55" E128°28'03"	foliated medium-grained pelitic gneiss/ Bt, Sl, Cd, Ms, Pl, Opq, Zr, Mo	357±16/Bt
Porphyroblastic granite gneiss (#408-4)	N38°29'24" E128°23'16"	wealy foliated porphyroblastic medium-grained gneiss (granite~alkali granite)/Kfd, Pl, Qz, Ms, Bt, Zr, Al, Ap, Opq	157±6/Ms
Gabbroic gneiss (#601-1)	N38°27'04" E128°22'51"	wealy foliated medium-grained gneiss (quartz gabbro~gabbro)/ Pl, Bt, Qz, Kfd, Zr, Mo, Opq	167±4/Bt
Granite gneiss (#KS-3B)	N38°29'41" E128°23'56"	foliated medium-grained gneiss (granodiorite)/ Qz, Pl, Kfd, Bt, Ms, Zr, Mo, Opq	not available
Garnet-bearing granite gneiss (#822-7)	N38°24'46" E128°18'59"	granoblastic medium-grained gneiss (granite)/ Bt, Qz, Pl, Kfd, Ms, Zr, Mo, Tm, Mt, Py	not available
Porphyritic hornblende- biotite granite (#KG11)	N38°23'22" E128°23'28"	porphyritic medium-grained granite (granite)/ Bt, Qz, Pl, Kfd, Ms, Zr, Mo, Tm, Mt, Py	167±4/Bt

Abbreviations: Ap (apatite), Bt (biotite), Cd (cordierite), Kfd (K-feldspar), Mo (monazite), Ms (muscovite), Opq (opaque oxide minerals), Pl (plagioclase), Py (pyrite), Qz (quartz), Sl (sillimanite), Tm (tourmaline), Zr (zircon).

10%, 0.1 wt.%  $UO_2$ 에서 5.0%, 7.0 wt.%의  $ThO_2$ 에서 0.5%이다. 각 분석치의 외견연령(apparent age)과 이들을 이용한 등시선 연령은 Suzuki와 Adachi (1991a, 1994, 1998)의 방법 및 EPMA 분석치의 오차를 적용하여 York(1966)의 절차에 따라 구하였으며, 인터넷에서 내려받을 수 있는(<http://ganko.eps.nagoya-u.ac.jp/gsd/CHIME/>) Kato *et al.*(1999)의 컴퓨터 프로그램을 사용하였다. 분석 결과는 Fig. 2, 3, 4의  $PbO-ThO_2^*$  혹은  $PbO-UO_2^*$  관계도에 제시되었으며, CHIME EPMA 분석치는 양이 너무 많아 이 연구에서 제시하지 않았으나 필요시 요청하면 교신저자에게 받을 수 있다.

## 결 과

### 대노화강암

**각섬석-흑운모 화강섬록암(#KG11):** 3입자의 갈염석에서 30점의 분석치를 얻었다.  $ThO_2^*$ 와  $PbO$ 는 각각 1.32~3.26%와 0.011~0.025%의 범위이며, 외견연령의 범위는 155~200 Ma이다.  $PbO-ThO_2^*$  관계도(Fig. 2a)에서 정의되는 등시선의 연령은  $174.2 \pm 16.6$  Ma이다 (MSDW = 0.41, 절편 =  $0.00026 \pm 0.00143$ ).

### 정편마암류

**반상변정질 화강편마암(#408-4):** 2입자의 모나자이트

로부터 27점의 분석치를 구하였으며, 이들의  $ThO_2^*$ 는 9.33~23.12%,  $PbO$ 는 0.032~1.611%로 각각 변화하고, 외견연령은 81~1666 Ma로 범위가 넓다.  $PbO-ThO_2^*$  관계도(Fig. 2b)에서 1600 Ma 이상의 가장 고기인 외견연령군 11 분석치는  $1672 \pm 69$  Ma 등시선 연령을 나타낸다(MSDW = 0.07, 절편 =  $-0.02109 \pm 0.05593$ ). 모나자이트와 공존하는 저어콘 한 입자로부터 구한 5점의 분석치는  $UO_2^*$ ,  $PbO$ 와 외견연령이 각각 0.18~0.39%, 0.046~0.103%와 1610~1739 Ma의 범위이며, 외견연령이 현저히 높은 한 분석치를 제외한 나머지 분석치는  $PbO-UO_2^*$  관계도(Fig. 3b)에서  $1642 \pm 7$  Ma의 양호한 등시선 연령을 정의한다(MSDW = 0.03, 절편 =  $-0.00037 \pm 0.00372$ ).

**반려암질 편마암(#601-1):** 5입자의 모나자이트에서 90점을 분석하였다. 분석치의  $ThO_2^*$ 는 1.51~14.01%,  $PbO$ 는 0.057~0.847%로 각각 변화하고, 외견연령은 197~1543 Ma로 범위가 넓다.  $PbO-ThO_2^*$  관계도(Fig. 2c)에서 분석치는 산발적으로 점시되나 외견연령이 가장 고기인 분석치군 37점으로부터  $1514 \pm 75$  Ma 등시선 연령을 정의할 수 있다(MSDW = 0.04, 절편 =  $0.00006 \pm 0.03167$ ).

**화강편마암(#KS-3B):** 저어콘 3 입자로부터 19점의

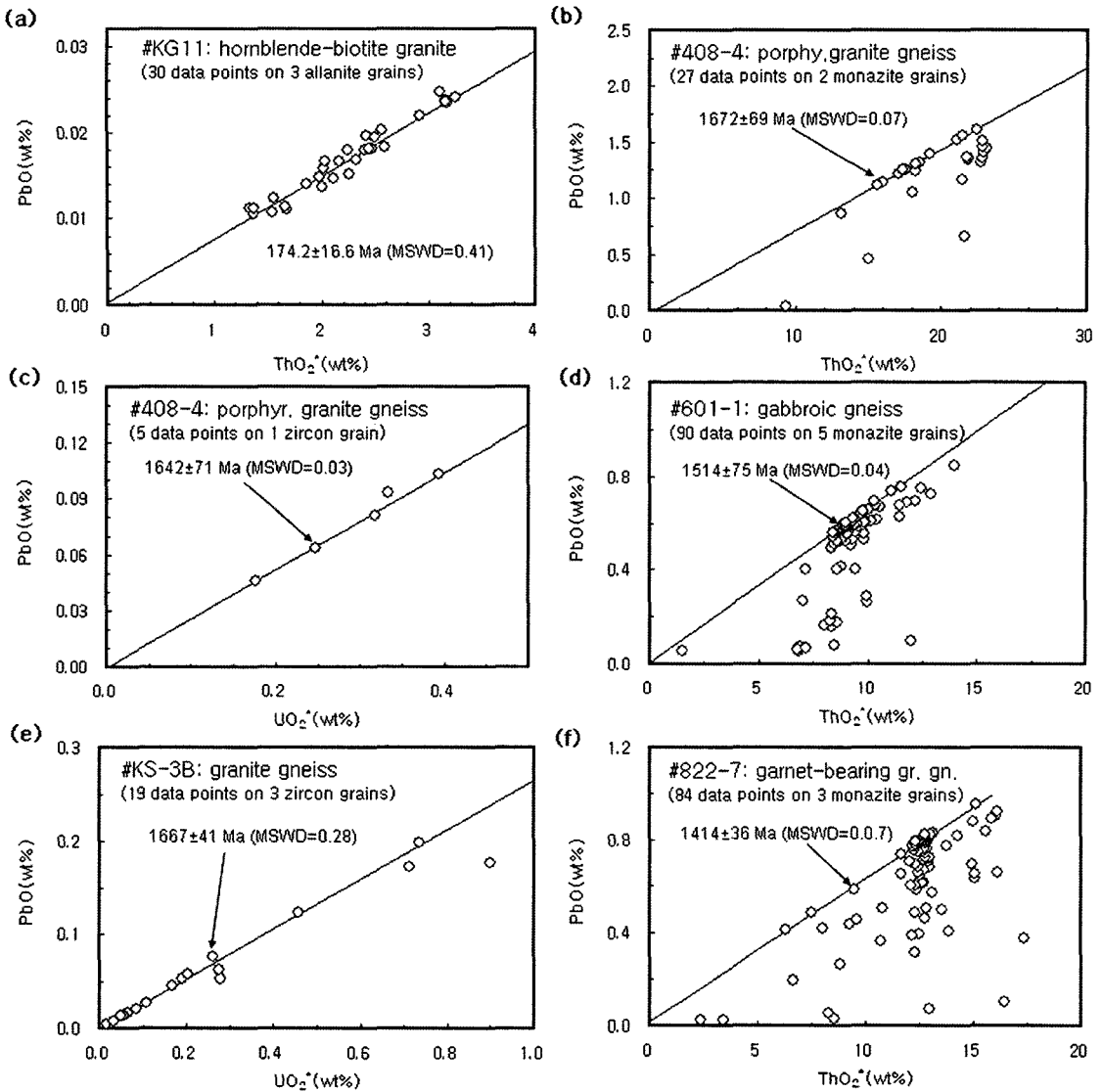


Fig. 2. Plots of PbO vs.  $ThO_2^*$  of allanites and monazites, and PbO vs.  $UO_2^*$  of zircons from hornblende-biotite granite (a) and orthogneisses (b-f). The errors given to the age are of  $2\sigma$ .

분석치를 구했는데, 이들의  $UO_2^*$ , PbO와 외견연령은 각각 0.02~1.04%, 0.004~0.258%와 1265~1793 Ma의 범위이다. PbO- $UO_2^*$  관계도(Fig. 2d)에서 변화경향에 벗어나는 4점을 제외한 나머지 분석치는  $1667 \pm 41$  Ma (MSDW = 0.28, 절편 =  $-0.00030 \pm 0.00054$ )의 양호한 등시선 연령을 제공한다.

**합석류석 화강편마암(#822-7):** 3입자의 모나자이트에서 84점의 분석치를 얻었다. 이들의  $ThO_2^*$ 는 2.35~

21.74%, PbO는 0.025~0.953%, 외견연령은 132~1498 Ma의 범위로 변한다. PbO- $ThO_2^*$  관계도(Fig. 2f)에서 외견연령이 가장 고기인 분석치군 26점은  $1414 \pm 36$  Ma 등시선 연령을 나타낸다(MSDW = 0.07, 절편 =  $0.02050 \pm 0.01876$ ).

**준편마암류**

**화강암질 편마암(#411-5):** 2입자의 모나자이트로부터 97점의 분석치를 구하였다. 이들의  $ThO_2^*$ 는 0.83~44.13

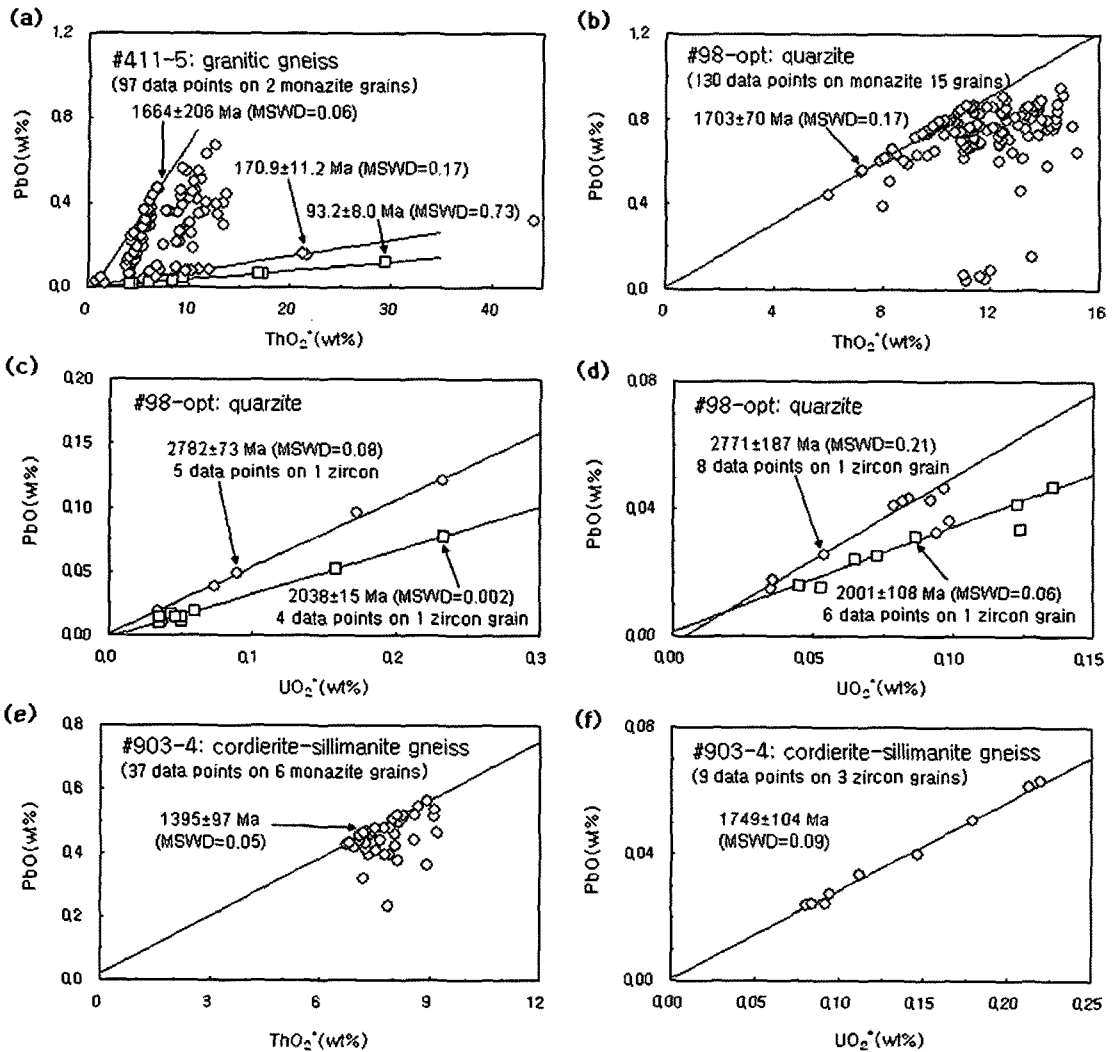


Fig. 3. Plots of PbO vs.  $\text{ThO}_2^*$  of monazites and PbO vs.  $\text{UO}_2^*$  of zircons from the paragneisses. The errors given to the age are of  $2\sigma$ .

%, PbO는 0.016~0.672%의 범위이며, 외견연령은 83~1559 Ma의 넓은 범위에 걸쳐있다. PbO- $\text{ThO}_2^*$  관계도 (Fig. 3a)에서 분석치는 산발적으로 점사되지만 몇 그룹의 자료로 등시선을 정의할 수 있는데, 1,500 Ma 이상의 가장 고기인 외견연령군 5 분석치는 오차가 큰  $1664 \pm 206$  Ma의 등시선 연령(MSDW = 0.06, 절편 =  $-0.04242 \pm 0.05993$ ), 젊은 외견연령군은 비교적 양호한 두 개의 중생대 등시선 연령을 각각 형성한다( $170.9 \pm 11.2$  Ma,  $n=8$ , MSDW = 0.17, 절편 =  $0.00317 \pm 0.00560$ ;  $93.1 \pm 8.0$  Ma, MSDW = 0.73,  $n=9$ , 절편 =  $-0.00057 \pm 0.00276$ ).

**규암(#98-OQT):** 15입자의 모나자이트로부터 130점의 분석치 얻었으며, 이들의  $\text{ThO}_2^*$ 와 PbO의 변화 범위는 각각 6.02~15.20%와 0.045~0.950%이고, 외견연령은 92~1788 Ma이다. PbO- $\text{ThO}_2^*$  관계도(Fig. 3b)에서 외견연령 1650 Ma 이상의 자료는  $1703 \pm 70$  Ma의 등시선 연령을 제시한다( $n=39$ , MSDW = 0.17, 절편 =  $0.01544 \pm 0.03079$ ). 같은 시료에서 저어콘 입자를 선별하여 분석하였으며, 이들 중 일부는 PbO- $\text{UO}_2^*$  관계도 (Fig. 3c, d)에서 시생대말기와 고원생대에 해당하는 등시선 연령  $2782 \pm 73$  Ma( $n=5$ , MSDW = 0.08, 절편 =  $0.00077 \pm 0.00176$ ),  $2771 \pm 187$  Ma( $n=8$ , MSDW = 0.21,

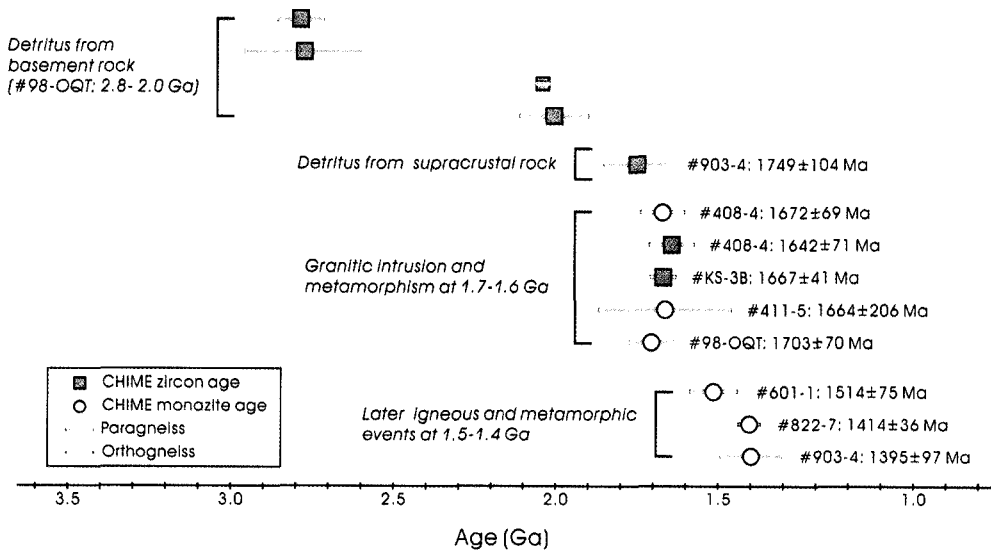


Fig. 4. Summary of CHIME ages and their interpretation. See Table 1 for sample information.

절편 =  $-0.00233 \pm 0.00300$ ),  $2038 \pm 15$  Ma ( $n = 4$ , MSDW = 0.002, 절편 =  $-0.00180 \pm 0.00025$ ),  $2001 \pm 108$  Ma ( $n = 6$ , MSDW = 0.06, 절편 =  $0.00134 \pm 0.00174$ )을 나타낸다.

**근청석-규선석 편마암(#903-4):** 6입자의 모나자이트에서 37점을 분석을 하였고, 이들의  $\text{ThO}_2^*$ 와  $\text{PbO}$ 는 각각 6.74~9.21%과 0.231~0.561%의 비교적 제한적인 범위이고, 외견연령의 범위는 686~1473 Ma이다. 외견연령이 가장 고기인 분석치 그룹은  $\text{PbO-ThO}_2^*$  관계도 (Fig. 3e)에서  $1395 \pm 97$  Ma의 등시선 연령을 제시한다 ( $n = 14$ , MSDW = 0.05, 절편 =  $0.01914 \pm 0.03297$ ). 같은 시료에서 저어콘 3입자로부터 구한 9점의 분석치는  $\text{UO}_2^*$ 와  $\text{PbO}$ 이 각각 0.08~0.22%와 0.024~0.063%의 범위를 보이나 외견연령은 1668~1825 Ma로 제한적이며 이들은  $\text{PbO-UO}_2^*$  관계도 (Fig. 3f)에서  $1749 \pm 104$  Ma의 비교적 양호한 등시선 연령을 형성한다 (MSDW = 0.09, 절편 =  $0.00038 \pm 0.00245$ ).

토 의

CHIME 연대의 해석

CHIME 연대측정을 위한 EPMA 분석은 초기 Pb과 방사성기원의 Pb을 구분하지 못하므로 대상광물에 초기 Pb이 존재하지 않았다고 가정한다. 또한 CHIME 연대가 신빙성을 가지기 위해서는 대상광물이 형성 후 이차적인 성분 교란이 없는 폐쇄계를 유지해야 한다. 한

암석에서 같은 기원으로 형성된 후 폐쇄계를 유지하였을 경우 대상광물의 각 영역 분석치는 초기 Pb의 양은 같고 Th과 U의 함량이 다르므로  $\text{PbO-ThO}_2^*$  혹은  $\text{PbO-UO}_2^*$  관계도에서 직선상으로 배열되는 등시선을 형성한다. 이때 대상광물에 초기 Pb이 존재하지 않았다면 등시선의 절편은 0에 가깝다. 즉 CHIME 연대의 신빙성은 일차적으로 절편이 0에 가까운 등시선이 얼마나 잘 정의되는 가로 판단할 수 있다 (Suzuki and Adachi, 1991a).

앞의 CHIME 분석 결과에서 제시한 바와 같이 각 시료에서 정의되는 등시선은 대부분 오차가 적고 절편이 0에 가까워 상당한 신빙성을 갖는다 (Fig. 2, 3). U-Pb계의 모나자이트와 저어콘의 폐쇄온도는 각각  $>700^\circ\text{C}$  (Smith and Gilotti, 1997)와  $>900^\circ\text{C}$  (Lee et al., 1997; Cherniak and Watson, 1998)로 높고, 갈염석의 폐쇄온도는 모나자이트와 유사하므로 (Davis et al., 1994) 이들의 CHIME 등시선 연령은 모암에 따라 관입시기 혹은 변성작용의 최고시기에 해당한다. 따라서 각섬석-흑운모 화강암의 갈염석 등시선 연령 (Fig. 2a)  $174.2 \pm 16.6$  Ma는 관입시기로 해석되며, 냉각시기에 해당한다고 할 수 있는 같은 시료의 K-Ar 흑운모 연령이  $167 \pm 4$  Ma로 수 Ma 젊은 점이 이러한 해석을 지지한다. 선캠브리아 정편마암류에 속하는 반상변정질 화강편마암의 모나자이트와 저어콘 등시선 연령  $1672 \pm 69$  Ma와  $1642 \pm 71$  Ma는 오차범위 내에서 잘 일치하여 (Fig. 2b, 2c) CHIME 연대자료가 상당한 신빙성이 있음을

시사하고, 이는 화강편마암의 저어콘 등시선 연령(Fig. 2e)  $1667 \pm 41$  Ma와 같아 이 시기에 화강암질암의 관입이 활발하였음을 나타낸다. 한편 반려암질 편마암과 함석류석 화강편마암의 모나자이트 등시선은 보다 젊은 관입시기인  $1514 \pm 75$  Ma와  $1414 \pm 36$  Ma를 각각 제시한다(Fig. 2d, 2f).

선캠브리아 준편마암류에 대한 모나자이트 분석의 경우 화강암질 편마암에서는  $1664 \pm 206$  Ma로 오차가 등시선이 정의되나 규암에서는 보다 양호한  $1703 \pm 70$  Ma가 제시된다(Fig. 3a, 3b). 이들은 반상변정질 화강편마암 및 화강편마암의 관입시기와 거의 같아 약 1.6~1.7 Ga에 화강암질암의 관입과 수반한 변성작용이 있었음을 알 수 있다. 한편 화강암질 편마암의 젊은 외견연령 자료로  $170.9 \pm 11.2$  Ma 및  $93.2 \pm 8.0$  Ma의 등시선을 정의할 수 있어(Fig. 4a) 대보화강암 및 백악기 화성활동에 의해 모나자이트가 부분적으로 변질되었음을 나타낸다.

규암의 저어콘 분석치는 대부분 화성기원에 해당하(Vavra *et al.*, 1999) 0.18~1.87의 높은 Th/U 비를 보여 쇄설성기원으로 해석되며, 이들은 등시선 연령 2.8~2.0 Ga를 갖는다(Fig. 3c, 3d). 이는 규암이 시생대 말기에서 고원생대의 물질을 포함하며, 퇴적시기는 가장 젊은 쇄설성 연령인 2.0 Ga와 변성시기인 약 1.7 Ga 사이로 제한되는 것을 의미한다. 연구지역의 중앙부 동측에 변성사질암과 더불어 소규모로 분포하는 근청석-규선석 편마암의 모나자이트 등시선 연령은  $1395 \pm 97$  Ma로서(Fig. 3e) 가장 젊은 정편마암인 함석류석 화강편마암의 모나자이트 등시선 연령과 유사하여 후기의 화강암의 관입과 관련한 변성작용이 부분적으로 영향을 미쳤음을 알 수 있다. 근청석-규선석 편마암의 저어콘 분석치는 대부분 U/Th 비가 0.11~0.42로 높아 화성기원의 쇄설성 입자이며, 이의 연령은  $1749 \pm 104$  Ma이다(Fig. 4f). 따라서 약 1.6~1.7 Ga의 화강암질암에 의해 관입당하는 다른 준편마암류와는 달리 근청석-규선석 편마암은 선캠브리아 기반암 위에 부정합으로 놓이는 기저상부암석(supracrustal rock)에 해당한다.

### CHIME 연대의 지체구조적 의의

이 연구의 CHIME 연대측정 결과를 종합하면(Fig. 4) 경기육괴 북동부 고성-간성 지역 선캠브리아 지층의 기저는 2.0 Ga 이전의 암석을 근원암으로 하여 2.0 Ga와 1.7 Ga 사이에 퇴적되었으며, 1.7~1.6 Ga에 화강암류의 관입과 이에 수반한 변성작용을 겪고, 이후 근청석-규선석 편마암의 모암이 퇴적되었으며, 이들은 다시 1.5~1.4 Ga에 화성암의 관입과 이에 관련된 부분적

인 변성작용을 경험하였다.

최근 경기육괴 선캠브리아 기반암을 대상으로 한 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정이 활발해지면서 화천(Lee *et al.*, 2000), 포천(조동룡과 김용준, 2003), 오대산 지역(Oh *et al.*, 2006), 비봉-공주-인제(오창환 외, 2006)에서 고원생대와 시생대 연령의 저어콘 상속핵이 보고되었다. 이는 경기육괴에 시생대에 퇴적된 암석이 존재할 가능성이 희박함을 지시하는 것으로서 이 연구의 규암에서 인지되는 약 2.8~2.0 Ga 쇄설성 저어콘을 이를 지지한다.

최근의 경기육괴의 기반암에 대한 연대자료는 약 1.9~1.8 Ga의 광역변성작용과 화성활동이 광범위하게 일어났었고(Kim *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 2000; Sagong *et al.* 2003; 조동룡과 김용준, 2003; Oh *et al.*, 2006, 오창환 외, 2006), 이는 북중국지괴에서의 대륙충돌시기(Zhao *et al.*, 2000)와 일치하는 경기육괴에 강력한 선캠브리아 지질사건으로 여겨진다. 그러나 이 연구의 CHIME 연대는 고성-간성 지역에서 젊은 약 1.7~1.4 Ga의 화성활동과 변성작용이 주요 지질사건이었음을 보여준다. 이를 경기육괴에서 가장 강력했던 1.9~1.8 Ga의 지질사건의 냉각시기에 해당한다고 추정할 수 있으나 U-Pb계 저어콘과 모나자이트의 높은 폐쇄온도는(Smith and Gilotti, 1997; Lee *et al.*, 1997; Cherniak and Watson, 1998) 이러한 가능성을 배제한다. 동일한 시료를 대상으로 한 검정에서 CHIME 저어콘 및 모나자이트 연령은 기존의 방사선동위원소 연대측정 결과와 잘 일치하는 결과를 보여(예: Suzuki and Adachi, 1991a) 연대측정법이 서로 달라 생기는 차이로 여길 수 없다. 따라서 고성-간성 지역에서 인지되는 1.7~1.4 Ga의 연령은 경기육괴의 주된 1.9~1.8 Ga 광역변성작용 및 화성활동과는 별개의 지질사건에 의한 것이다.

전 지구적으로 2.1~1.8 Ga의 충돌에 의한 조산운동이 인지되어 약 1.0 Ga의 그랜빌리안(Grenvillian) 조산운동에 의한 로디니아(Rodinia) 초대륙 형성 이전에 지구의 거의 모든 대륙지각을 포함하는 초대륙인 콜롬비아(Columbia)가 존재했다고 믿어진다(Rogers and Santosh, 2002; Zhao *et al.*, 2004). 이 콜롬비아 초대륙은 1.8 Ga에 이르러 결집이 완성된 후 1.8~1.3 Ga의 장기간에 걸쳐 대륙 연변부의 섭입과 관련된 부가작용(accretion)으로 대륙이 성장하였으며, 이와 관련된 마그마 벨트는 북미, 그린랜드, 발틱, 남미, 호주, 중국 등에서 광범위하게 발견된다(Zhao *et al.*, 2004와 이에 포함된 참고문헌). 이러한 전 지구적인 고원생대-중원생대의 지체구조운동에 경기육괴의 경우를 대비하면 가



장 강력하고 넓게 인지되는 1.9~1.8 Ga 광역변성작용 및 화성활동은 콜롬비아 초대륙의 형성과 관련된 것으로, 그리고 북동부 고성-간성에서의 1.7~1.4 Ga 반려암질-화강암질 암석의 관입과 이에 수반한 변성작용은 콜롬비아 초대륙 형성 후의 대륙연변부의 성장과 관련된 지체구조운동의 산물로 잠정적으로 해석할 수 있다. 다른 한편 콜롬비아 초대륙의 쪼개짐은 회장암-맨저라이트-차노카이트-화강암(AMGC)의 비조산운동성(anorogenic) 마그마 활동과 수반한 1.6 Ga 대륙열극의 형성으로 시작되어 1.3~1.2 Ma에 열극을 따라 염기성 맥의 균집이 관입한 것으로 완결되었다고 알려져 있다 (Zhao *et al.*, 2004와 이에 포함된 참고문헌). 지금까지의 유용한 자료로는 고성-간성 지역의 화성암은 비조산운동성 마그마 활동의 산물과는 다른 것으로 보여 콜롬비아 초대륙의 쪼개짐과는 무관한 것으로 생각된다.

이상의 경기육괴 전체와 결부한 고성-간성 지역의 지체구조적 해석은 주로 연대측정 자료에 의존한 잠정적인 것으로서 이를 확실히 하기 위해서는 여러 지질학 분야의 심도 있는 연구가 필요하며, 특히 고성-간성 지역의 정편마암류와 준편마암류의 지체구조적 환경이 섭입과 관련된 활동성 대륙연변부(active continental margin) 혹은 호상열도(Island arc)에 해당하는지에 대한 암석학 및 지구화학적 고찰과 고분해능이차이온질량분석과 같은 보다 정밀한 연대측정이 따라야 할 것이다.

## 요약 및 결론

경기육괴 북동부 고성-간성 지역의 선캠브리아 암석은 석류석-흑운모 편마암, 화강암질 편마암, 준편마암 복합체의 준편마암류와 이를 관입하는 반상변정질 화강편마암, 반려암질 편마암, 화강편마암과 합석류석 화강편마암의 정편마암류로 이루어진다. 또한 중앙부 동측 일대에는 관계미상으로 근청석-규선석 편마암이 변성사질암과 함께 소규모로 분포한다. 선캠브리아 암체가 경험한 전반적인 열역사를 규명하기 위해 대표적인 암체의 저어콘 및 모나자이트에 대한 CHIME 연대측정을 실시하였으며, 참고적으로 수행한 각섬석-흑운모 화강암의 CHIME 갈염석 분석은 174.2±16.6 Ma의 관입시기를 나타낸다.

정편마암류에서 반상변정질 화강편마암과 화강편마암의 저어콘 분석치들은 1642±71 Ma 및 1667±41 Ma의 관입시기를 보이고, 반상변정질 화강편마암의 모나자이트는 저어콘 연령과 거의 같은 1672±69 Ma이다. 반려암질 편마암과 합석류석 화강편마암의 모나자

이트 분석치는 보다 젊은 관입시기인 1514±75 Ma와 1414±36 Ma를 각각 나타낸다. 한편 준편마암류의 모나자이트 분석은 화강암질 편마암에서는 1664±206 Ma로 오차가 크나, 규암에서는 보다 양호한 1703±70 Ma가 제시된다. 이들 연령은 약 1.6~1.7 Ga에 화성활동과 수반한 변성작용이 있었음을 지시한다. 규암의 저어콘은 Th/U 비가 대부분 0.18~1.87의 높은 화성기원으로서 이들의 연령은 약 2.8~2.0 Ga이다. 따라서 규암의 퇴적시기는 가장 젊은 쇄설성 연령인 2.0 Ga과 변성시기인 약 1.7 Ga 사이로 제한된다. 근청석-규선석 편마암의 모나자이트 연령은 1395±97 Ma로서 가장 젊은 정편마암인 합석류석 화강편마암과 유사하다. 저어콘은 U/Th 비가 대부분 0.11~0.42로 높은 1749±104 Ma의 화성기원 입자로서 근청석-규선석 편마암이 연구지역의 서측에 분포하는 다른 준편마암류와는 달리 약 1.7 Ga 이후에 퇴적된 기저상부암석임을 나타낸다.

CHIME 연대측정 자료를 요약하면 고성-간성 지역 선캠브리아 지층의 기저는 2.0 Ga 이전의 암석을 근원암으로 하여 2.0 Ga와 1.7 Ga 사이에 퇴적되었으며, 1.7~1.6 Ga에 화강암류의 관입과 이에 수반한 변성작용을 겪었고, 이후 근청석-규선석 편마암의 모암이 퇴적되었으며, 이들은 다시 1.5~1.4 Ga에 단속적인 화성암의 관입과 부분적인 변성작용을 경험하였다. 이 연구의 연구결과는 기존의 연구와 더불어 경기육괴에 시생대에 퇴적된 암석이 존재할 가능성이 희박함을 지시한다. 그러나 경기육괴의 기반암에 약 1.9~1.8 Ga의 광역 변성작용과 화성활동이 광범위하게 일어났음을 나타내는 기존의 연구 결과와는 달리 약 1.7~1.4 Ga의 화성활동과 변성작용이 고성-간성 지역의 주요 지질사건이었음을 보여준다. 전 지구적인 고원생대-중원생대의 지체구조운동에 경기육괴의 경우를 대비하면 가장 넓고 강력하게 인지되는 1.9~1.8 Ga 광역변성작용 및 화성활동은 콜롬비아 초대륙의 형성과 관련된 조산운동으로, 그리고 고성-간성 지역에서의 1.7~1.4 Ga 반려암질-화강암질 암석의 관입과 이에 수반한 변성작용은 콜롬비아 초대륙 형성 후의 대륙연변부의 성장과 관련된 지체구조운동의 산물로 잠정적으로 해석할 수 있다. 이러한 해석은 주로 연대측정 자료에 의존한 것으로서 이를 확실히 하기 위해서는 앞으로 여러 지질학 분야의 심도 있는 연구가 필요하며, 특히 고성-간성 지역의 정편마암류와 준편마암류의 지체구조적 환경 규명을 위한 암석학 및 지구화학적 연구와 고분해능이차이온질량분석과 같은 보다 정밀한 연대측정이 따라야 할 것이다.

## 사 사

이 논문의 지질조사와 시료채취는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 산업자원부 출연사업인 “국토기본도폭발간사업”에서 지원되었으며, CHIME 연대측정은 1998년부터 2년간 수행된 한국자원연구소와 일본 나고야대학교의 한국과학재단 국제공동연구과제에 의해 지원되었다(과제번호 986-0400-001-2, 한국측 책임자 조동룡). 국토기본도폭발간사업에 동참하였던 한국지질자원연구원의 홍승호, 이병주, 최범영, 이승렬 박사과 연구생으로 참여했던 연세대학교 대학원생 고 김경록 군에게 감사하며, 이 논문의 미비점을 지적하여준 심사자들에게 사의를 표한다.

## 참고문헌

- 오창환, 김정빈, 박영석, 김성원, 2006, 경기육괴의 고원생대 암류들에 대한 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대와 그 의의. 지질학회지, 42, 587-606.
- 조동룡, 2004, 저어콘 아입자 분석을 위한 효율적인 광물 분리 및 시료준비 방법. 암석학회지, 13, 126-132.
- 조동룡, 김용준, 2003, 경기육괴 포천 지역의 흑운모 편마암과 우백질 화강암맥에 대한 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대 측정: 광역변성작용 연령 및 퇴적시기의 제한. 대한지질학회 2003년 추계학술발표회 초록집, p.76.
- Åmli, R. and Griffin, W.L., 1975, Microprobe analyses of REE minerals using empirical correction factors. American Mineralogist, 60, 599-606.
- Asami, M., Suzuki, K. and Grew, E.S., 2002, Chemical Th-U-total Pb dating by electron microprobe analysis of monazite, xenotime and zircon from the Archean Napier Complex, East Antarctica: evidence for ultra-high-temperature metamorphism at 2400 Ma. Precambrian Research, 114, 249-275.
- Bence, A.E. and Albee, A.L., 1968. Empirical correction factors for the electron microanalysis of silicates and oxides. Journal of Geology, 76, 382-403.
- Chang, E.Z., 1996. Collision orogene between north and south China and its eastern extension in the Korean Peninsula. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 13, 267-277.
- Cherniak, D.J. and Watson, E.B. 1998. Pb diffusion in zircon. Geological Society of America Abstracts with Programs 30, A213.
- Cho, D.-L., Kwon S.-T., Jeon, E.-Y. and Armstrong R., 2005, SHRIMP U-Pb zircon ages of metamorphic rocks from the Samgot Unit, Yeoncheon Complex in the Imjingang Belt, Korea: Implications for the Phanerozoic tectonics of East Asia. Geological Society of America Abstracts with Programs, 37, p.388.
- 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., 2001, A continuation of Chinese ultra-pressure belt in Korea: evidence from ion microprobe U-Pb zircon ages. Gondwana Research, 4, p. 708.
- Chwae U, 1998, Does the Imjingang Fold Belt cross the mid-Korean Peninsula along the demilitarized zone (DMZ) as an extension of the Sulu Belt, China? Journal of Earth and Planetary Sciences, Nagoya University, 45, 41-73.
- Davis, D.W., Schandl, E.S. and H.A. Wasteneys, 1994, U-Pb dating of minerals in alteration halos of Superior Province massive sulfide deposits: syngensis versus metamorphism. Contribution to Mineralogy and Petrology, 115, 427-437.
- Kato T., Suzuki K. and Adachi M, 1999, Computer program for the CHIME age calculation. Journal of Earth and Planetary Sciences, Nagoya University, 46, 49-56.
- Kim, J.-B., Turek A., Chang H.-W., Park Y.-S. and Ahn K.-S., 1999, U-Pb zircon ages for Precambrian and Mesozoic plutonic rocks in the Seoul-Cheongju-Chooncheon area, Gyeonggi massif, Korea. Geochemical Journal, 33, 379-397.
- Kim, S.W., Oh C.W., Williams, I.S., Rubatto D., Rhu, I.-C., Rajesh, V.J., Kim, C.-B., Guo, J. and Zhai, M., 2006, Phanerozoic high-pressure eclogite and intermediate-pressure granulite facies metamorphism in the Gyeonggi Massif, South Korea: Implications for the eastward extension of the Dabie-Sulu continental collision zone. Lithos, 92, 357-377.
- Kusiak, M.A., Kedzior, A., Paszkowski, M., Suzuki, K., González-Álvarez, I., Wajsprych, B. and Doktor M., 2006, Provenance implications of Th-U-Pb electron microprobe ages from detrital monazite in the Carboniferous Upper Silesia Coal Basin, Poland. Lithos, 88, 56-71.
- Lee, J.K.W., Williams, I.S. and ELLIS, D.J., 1997, Pb, U and Th diffusion in natural zircon. Nature 390, 159-162.
- Lee, S.R., Cho, M., Cheong, C.-S., Kim, H. and Wingate, M.T.D., 2003, Age, geochemistry, and tectonic significance of Neoproterozoic alkaline granitoids in the north-western margin of the Gyeonggi massif, South Korea. Precambrian Research, 2294, 1-14.
- Lee S.R., Cho, M., Yi, K. and Stern R.A., 2000, Early Proterozoic Granulites in Central Korea: Tectonic Correlation with Chinese Cratons. Journal of Geology, 108, 729-738.
- Liu, X., 1993. High-P metamorphic belt in central China and its possible eastward extension to Korea. Journal of the Petrological Society of Korea 2, 9-18.
- Oh C.W., Kim S.W., Choi, S.G., Zhai M., Guo J. and Krish-

- nan, S., 2005, First Finding of Eclogite Facies Metamorphic Event in South Korea and Its Correlation with the Dabie-Sulu Collision Belt in China. *The Journal of Geology*, 113, 226-232.
- Oh C.W., Kim, S.W. and Williams, I.S. 2006, Spinel granulite in Odesan area, South Korea: Tectonic implications for the collision between the North and South China blocks. *Lithos*, 92, 557-575.
- 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.
- Rogers, J.J.W. and Santosh, M., 2002, Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic Supercontinent. *Gondwana Research*, 5, 5-22.
- Sagong H., Cheong C.S. and Kwon, S.T., 2003, Paleoproterozoic orogeny in South Korea: evidence from Sm-Nd and Pb step-leaching garnet ages of Precambrian basement rocks. *Precambrian Research*, 122, 275-295.
- Smellie, J.A.T., Cogger, N. and Herrington, J., 1978, Standards for quantitative microprobe determination of uranium and thorium with additional information on the chemical formulae of davidite and euxenite-polycrase. *Chemical Geology*, 22, 1-10.
- Smith, H.A. and Giletti, B.J., 1997, Lead diffusion in monazite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61, 1047-1055.
- Suzuki, K. and Adachi, M., 1991a, Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsubonosawa paragneiss in the South Kitakami terrane, revealed by the chemical Th-U-total Pb isochron ages of monazite, zircon and xenotime. *Geochemical Journal*, 25, 357-376.
- Suzuki, K. and Adachi, M., 1991b, The chemical Th-U-total Pb isochron ages of zircon and monazite from the Gray Granite of the Hida terrane, Japan. *Journal of Earth and Planetary Sciences, Nagoya University*, 38, 11-37.
- Suzuki, K. and Adachi, M., 1994, Middle Precambrian detrital monazite and zircon from the Hida gneiss on Oki-Dogo Island, Japan: their origin and implication for the correlation of basement gneiss of Southwest Japan and Korea. *Tectonophysics*, 235, 277-292.
- Suzuki, K. and Adachi, M., 1998, Denudation history of the high T/P Ryoke metamorphic belt, southwest Japan: constraints from CHIME monazite ages of gneisses and granitoids. *Journal of Metamorphic Geology*, 16, 23-37.
- Vavra, G., Schmid, R. and Gebauer, D., 1999, Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibolite-to-granulite facies zircon: geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps). *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 134, 380-404.
- Yin, A. and Nie, S., 1993, An indentation model for the north and south china collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, Eastern Asia. *Tectonics*, 12, 801-813.
- York, D., 1966. Least-squares fitting of a straight line. *Canadian Journal of Physics*, 44, 1079-1086.
- Zhai M., Guo, J. and Liu W., 2005, Neoproterozoic to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: a review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24, 547-561.
- Zhao, G.C., Cawood, P.A., Wilde, S.A., Sun, M. and Lu, L.Z., 2000. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China Craton: implications for Paleoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Research*, 103, 55-88.
- Zhao, G.C., Sun, M., Wilde, S.A. and Li S., 2004, A Paleoproterozoic supercontinent: assembly, growth and breakup. *Earth-Sciences Reviews*, 67, 91-123.
- Zhao, G.C., Sun, M., Wilde, S.A. and Li S., 2005, Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited. *Precambrian Research*, 136, 177-202.
- Zhao, G.C., Wilde, S.A., Cawood, P.A. and Sun, M., 2001, Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107, 45-73.

---

(2007년 1월 11일 접수; 2007년 1월 31일 채택)