

경기육괴 북서 연변부 감악산 알칼리 변성화강질암의 CHIME 저어콘 연대와 지체구조적 의의

조동룡^{1,*} · 이승렬¹ · Kazuhiro Suzuki²

¹한국지질자원연구원 지질기반정보연구부, ²Center for Chronological Research, Nagoya University

CHIME Zircon Age of the Gamaksan Alkaline Meta-Granitoid in the Northwestern Margin of the Gyeonggi Massif, Korea, and its Tectonic Implications

Deung-Lyong Cho^{1,*}, Seung Ryeol Lee¹ and Kazuhiro Suzuki²

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

²Center for Chronological Research, Nagoya University, Furo-cho, Chikusaku, Nagoya 464-8602, Japan

요약: 경기육괴 북서 연변부에 분포하는 감악산 알칼리 변성화강암질암(GAM)에 대한 CHIME 저어콘 연대 측정을 실시하여 247 ± 14 Ma ($n=103$, MSWD=0.92)의 광역변성작용 연대를 구하였다. 이 연대는 임진강대에서 보고된 광역변성작용의 시기와 일치하며, 또한 중국의 페름기-트라이아스기 대륙충돌관련 고압 내지 초고압 광역변성작용 시기에도 일치한다. GAM을 변형시킨 경기전단대의 연성전단작용이 226 Ma에 500°C의 조건에 형성되었고(Kim *et al.*, 2000) 이를 부정함으로 피복하는 대동충군의 퇴적시기가 트라이아스기 후기 내지 유라기 초기인 점을 감안하면 이 기간 동안 GMA의 냉각속도는 18~10°C/Ma이다. 또한 저어콘이 상부 각섬암상의 온도조건인 700°C 이상에서 재성장하기 시작하는 것을 고려하면 GAM의 최고 변성시기인 247 Ma부터 유라기 초기까지 GAM의 냉각속도는 최소 10°C/Ma가 된다. 이러한 빠른 냉각속도는 중국 다비-술루 대륙충돌대에서 관찰되는 섭입지각의 용기에 따른 냉각속도와 유사하다. 따라서 적어도 경기육괴 북서부 지역은 중국 대륙충돌대와 유사한 동시기 변성조산대에 대비될 수 있음을 지시한다.

핵심어: 감악산 알칼리 변성화강암질암, 페름기-트라이아스기 조산대, 경기육괴, 냉각속도, 화학적등시선법

Abstract: We carried on CHIME zircon age dating for the Gamaksan alkaline meta-granitoid (GAM) from the northwestern margin of the Gyeonggi massif, and obtained a timing of regional metamorphism at 247 ± 14 Ma ($n=103$, MSWD=0.92). The age is compatible with Permo-Triassic regional metamorphic ages from the Imjingang Belt which has been regarded as possible eastward extension of Triassic collisional belt in China. Considering an extensional ductile shearing of the Gyeonggi (Kyonggi) Shear Zone which deformed GAM occurred at 226 Ma with temperature condition about 500°C (Kim *et al.*, 2000), and the Late Triassic to Early Jurassic Daedong Group unconformably overlies on top of the ductile shear zone, cooling rate of GAM over the period can be estimated as 18~10°C /Ma. Since new zircon begin to grow at temperature higher than upper-amphibolite facies condition (~700°C), cooling rate of GAM from peak metamorphism (247 Ma) to deposition of the Daedong Group (~Early Jurassic) would be higher than 10°C/Ma. Such rapid cooling rate is compatible with that reported from exhumation stage of the Dabie-Sulu Belt, and supports an idea that the Gyeonggi massif is a part of Permo-Triassic orogenic belt in East Asia.

Key words: Gamaksan alkaline meta-granitoid, Permo-Triassic orogenic belt, Gyeonggi massif, cooling rate, CHIME

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

서 언

임진강대와 경기육괴의 열역사 규명은 중국의 북중국지괴와 남중국지괴 사이의 킨링-다비-술루(Qinling-Dabie-Sulu) 충돌대가 한반도 중앙부로 연장될 가능성(Liu, 1993; Yin and Nie 1993; Ernst and Liou 1995; Ree *et al.*, 1996) 때문에 동아시아의 지체구조에 매우 중요한 의미를 갖는다. 지금까지 알려진 주요 열적사건은 임진강대의 연천층군이 중국의 충돌시기에 해당하는 약 250 Ma의 광역변성작용을 경험하였고(Ree *et al.*, 1996; Cho *et al.*, 1996; Cho *et al.*, 2005), 임진강대와 경기육괴 북부에 신원생대의 알칼리 화성활동이 존재한다는 것이다(Lee *et al.*, 2003; Cho *et al.*, 2005). 특히 경기육괴의 갑악산 알칼리 변성화강암질암(GAM: Gamaksan alkaline meta-granitoid, Lee *et al.*, 2003)은 남중국지괴의 로디니아 초대륙의 쪼개짐과 관련된 화성활동에 대비되고(Lee *et al.*, 2003), 경기육괴와의 사이에 지각 규모로 발달할 수 km 폭의 경기전단대를 포함하는(Kim *et al.*, 2000) 등 지체구조적으로 매우 중요한 암체이다. GAM의 관입시기는 SHRIMP(sensitive high-resolution ion microprobe) 저어콘 U-Pb 연대측정에 의해 742 Ma로(Lee *et al.*, 2003), 연성전단대의 형성시기는 압쇄암의 동구조성 백운모의 Rb-Sr 연대측정에 의해 226 Ma로(Kim *et al.*, 2000) 각각 밝혀졌으나 광역변성시기에 대해서는 아직 알려진 바 없다.

EPMA를 이용한 화학적등시선법(Chemical Th-U-total Pb Isochron Methode: CHIME) 연대측정은 원소농도 수 십 ppm의 검출한계와 U-Pb 연대측정이 제공하는 연대의 일치성(concordancy)에 대한 정보를 얻을 수 없는 단점에도 불구하고 분석이 용이하고 수 μm 단위의 아입자에 대한 연대측정이 가능하다는 장점에 의해 잠재적으로 큰 효율성을 갖는다(Suzuki and Adachi, 1991a). 특히 CHIME 연대측정의 가장 큰 장점은 수 μm 단위의 고분해능 분석이 가능하다는 것으로 SHRIMP와 같은 고분해능이온검침질량분석(high-resolution SIMS)와 병행할 경우 저어콘과 같이 동일 입자에 복합적인 연대진화사를 포함하는 광물에 대한 연대측정의 강력한 수단이 될 수 있다.

우리는 이 연구에서 CHIME 저어콘 연대측정법을 적용해 GAM이 경험한 광역변성시기를 성공적으로 구하였음을 보이고, 이 연대자료와 최근에 보고된 임진강대 및 경기육괴의 자료를 결부하여 경기육괴 북부가 중국의 다비-술루 충돌대와 유사한 특징을 보인다는 점에 대해 토의한다.

지질개요와 시료

경기육괴는 북서부 지역에서 임진강대와 지각 규모로 발달하는 폭 약 5 km의 동서 내지 동북동 방향의 인장형 연성 경기전단대를 경계로 접하며(Kim *et al.*, 2000), GAM의 주암체는 경기전단대를 포함하며 경기육괴 북부 연변부 및 임진강대에 모두 분포한다(Fig. 1). 이 지역은 고원생대의 경기편마암복합체를 기저로 하여 신원생대의 GAM, 고생대 중기 내지 후기로 추정되는 연천층군(Cho *et al.*, 2005), 트라이아스기-전기 쥬라기의 대동층군, 전기-중기 쥬라기의 대보화강암류, 백악기의 퇴적암-화산암 복합체와 제4기 현무암 및 충적층으로 구성된다(최성자 외, 1998; 이병주 외, 1999; 기원서 외, 2005).

경기편마암복합체는 흑운모 편마암이 주이며, 소규모로 협재하는 규암 및 대리암과 화강암질의 정편마암류 등이 존재한다(최성자 외, 1998; 기원서 외, 2005). 연천층군은 주로 사질, 이질, 석회규산염 성분의 편암류와 각섬암으로 구성된다(Ree *et al.*, 1996; 최성자 외, 1998). 대동층군은 경기전단대를 따라 평행하게 분포하며, 경기편마암복합체와 GAM을 모두 부정합으로 피복한다(Kim *et al.*, 2000). 이 층군은 석탄층을 협재하는 육성 규산질쇄설성 지층으로 후기 트라이아스기-전기 쥬라기의 열대 내지 아열대 기후의 호소환경을 지시하는 식물화석을 포함한다(전희영 외, 1988; 유강민 외, 1992). 대보화강암류는 중립질 흑운모 화강암이 대부분이며, 각섬석 흑운모 화강록암, 함석류석 섬류석 화강암, 섬록암 등이 소규모로 수반한다.

GAM은 담청색 혹은 담회색으로 연성전단작용에 의한 뚜렷한 압쇄엽리를 보이며(Kim *et al.*, 2000) 섬장암 내지 알칼리화강암의 광물조성을 갖는다(Lee *et al.*, 2003). 주로 정장석, 흑운모, 각섬석, 석영, 사장석, 단사회석, 불투명광물로 구성되고, 대체로 중립질이며, 노두에 따라 수 cm에 달하는 정장석의 쇄정을 포함한다. 변성광물은 석류석, 녹염석, 흑운모, 백운모, 녹니석, 각섬석을 교대하는 스펀(티탄나이트), 알칼리장석과 사장석 등이 관찰된다(Lee *et al.*, 2003). CHIME 저어콘 연대측정을 위해 경기전단대 남쪽의 압쇄작용을 미약하게 받은 GAM 4개 시료를 채취하였으며 이들의 위치는 Fig. 1에 제시되었다.

연구방법

야외에서 채취한 암석 시료를 분말로 만들어 입자 크기 60메쉬(250 μm) 이하의 부분에서 중광물을 분리

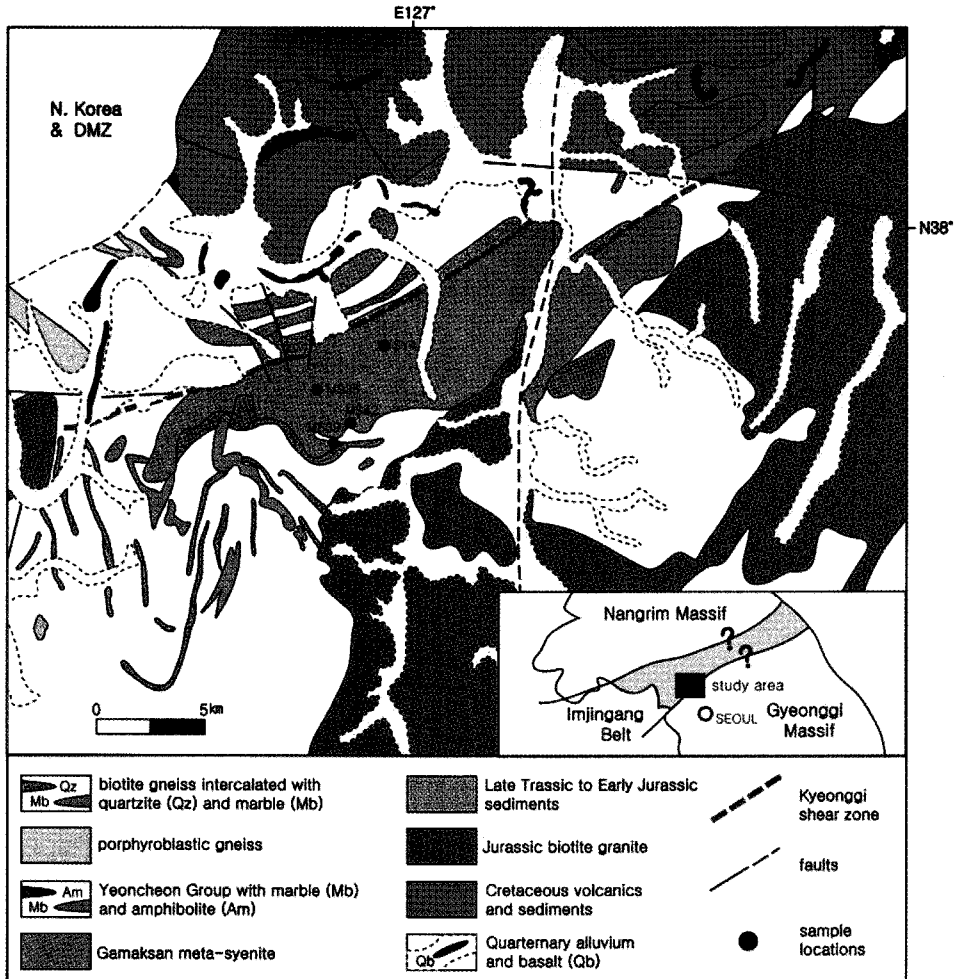


Fig. 1. A geologic map of the northwestern margin of the Gyeonggi massif, showing sample locality. Modified from Lee *et al.* (1999) and Lee *et al.* (2003).

한 후, 실체현미경하에서 수선택(hand-picking)으로 저어콘을 선별하였다. 암석박편용 슬라이드글라스에 에폭시 수지로 저어콘을 고정하고, 입자의 중심 단면이 노출되도록 1000메쉬와 3000메쉬의 SiC 연마제 분말을 사용해 갈아낸 다음, 최종적으로 1 μm 다이아몬드 페이스트로 표면을 연마하였다. 이들 과정에 대한 자세한 사항은 조동룡(2004)와 같다.

저어콘의 내부구조를 파악하기 위해 연세대학교에 설치된 Oxford Instrument MonoCL2 음극발광측정기가 부착된 JEOL JSM-5410 주사전자현미경으로 음극발광영상을 촬영하였다. CHIME 연대측정을 위한 EPMA분석은 일본 나고야대학교 연대측정연구센터에서 JEOL JXA-733 기기를 사용하여 실시되었다. 분석조건, 절차

와 연대계산 등의 제반 사항은 선행연구에 제시된 것과 같다(Suzuki and Adachi, 1991a,b, 1994, 1998; Asami *et al.*, 2002; Kusiak *et al.*, 2006). 이를 간략하게 언급하면 가속전압 15 kV, 전류 200~400 nA, 빔 직경 약 3 μm 내외의 조건에서 PET 분석결정으로 Th α , UM β , PbM α 와 YL α 선을 동시에 측정하였고, 측정시간은 원소의 함량에 따라 피크값은 200~400초, 배경값은 +와 - 위치에서 각각 100~200초이며, 2회 내지 3회 반복하여 평균값을 택하였다. 이러한 조건에서 ThO $_2$, UO $_2$ 와 PbO의 측정하한은 2 σ 수준에서 각각 0.009, 0.012, 0.006 wt.%이었다. 표준물질은 Th과 U에서 Smellie *et al.*(1978)의 육세나이트(euxenite), Pb에서 10.18 wt.% PbO 함량의 합성유리(Suzuki and Adachi,

1998), Y에서는 Pb를 전혀 포함하지 않은 합성유리였다.

Pb α 선에 대한 YL γ 선과 ThM ζ 선의 간섭 및 UM β 선에 대한 ThMy선의 간섭의 보정은 Ámli and Griffin (1975)의 방법으로 구한 계수를 사용해 이루어졌고, 이들 자료는 Bence and Albee(1968) 보정법으로 함량으로 환산되었다. 분석치의 외견연령(apparent age)과 등시선 연령은 Suzuki and Adachi(1991a, 1994, 1998)의 방법 및 EPMA 분석치의 오차를 적용하여 York(1966)의 절차에 따라 구하였으며, Kato *et al.*(1999)의 컴퓨터 프로그램을 사용하였다. 이 때 부여한 EPMA 분석치의 오차는 0.1 wt.% 이하에서 10%, 0.1~1 wt.%에서 5%, 1~5 wt.%에서 5%, 5 wt.% 이상에서는 1%였다. 분석 결과는 Table 1과 Fig. 2의 PbO- UO_2^* 관계도에 제시되었으며, 등시선연령과 절편에 수반된 오차는 2 σ 수준이다.

분석 결과

저어콘은 장축의 길이가 최대 450 μ m에 달하며, 대부분 연회색의 자형 또는 반자형의 주상 결정이다. 음극발광영상에서 저어콘의 내부는 잘 발달된 자형의 파동형 누대구조를 나타내고(Fig. 2), 조사된 95입자 중 6개는 저어콘 상속핵(inherited core)을 포함한다. 드물게 일부 입자는 변성작용에 의한 구조를 보이는데, 자형의 파동형 누대구조를 나타내는 저어콘의 연변부를 따라 음극발광이 낮은(어두운 색) 과성장(overgrowth) 저어콘을 갖거나 입자의 경계를 따라 음극발광이 매우 높은(밝은 색) 띠를 형성한다.

CHIME 분석은 주로 변성기원으로 추정되는 저어콘의 연변부에서 집중적으로 이루어졌으며, MS35와 MS39 시료에서는 저어콘의 내부와 상속핵의 분석도 일부 포함하였다. 먼저 연변부 저어콘의 분석결과를 살펴보면 SY4 시료의 8입자에서 구한 31점 분석치는 UO_2^* 및 PbO의 함량과 외견연령의 범위가 각각 0.158~0.524

wt%, 0.005~0.019 wt%와 206~311 Ma이며, 244 ± 27 Ma($n = 30$, MSWD = 0.79, 절편 = 0.00026 ± 0.00103)의 등시선이 정의된다(Fig. 3a). MS42 시료의 7입자에서 얻은 48점 분석치도 유사한 결과인데, UO_2^* 및 PbO의 함량과 외견연령의 범위가 각각 0.107~0.638 wt%, 0.004~0.021 wt%, 186~298 Ma이고, 등시선 연령은 249 ± 24 Ma($n = 47$, MSWD = 1.17, 절편 = -0.00014 ± 0.00070)이다(Fig. 3b). MS39 시료 3입자에서 얻은 13점 분석치는 외견연령의 범위가 220~287 Ma로 전술한 시료와 유사하지만, UO_2^* 와 PbO의 함량범위는 각각 0.131~0.293 wt%와 0.005~0.010 wt%로 현저하게 좁아(Fig. 3c), 결과적으로 오차가 큰 208 ± 44 Ma의 등시선이 형성된다($n = 13$, MSWD = 0.59, 절편 = 0.00096 ± 0.00107). MS35 시료 4입자의 연변부에서 얻은 15점 분석치도 UO_2^* 혹은 외견연령에서 이상치를 보이는 2점을 제외하면 유사한 범위의 외견연령(203~299 Ma)과 좁은 범위의 UO_2^* 와 PbO 함량을 나타내며(0.104~0.312 wt%와 0.003~0.011 wt%)(Fig. 3e), 결과적으로 오차가 큰 260 ± 44 Ma 등시선이 정의된다($n = 13$, MSWD = 0.74, 절편 = -0.00031 ± 0.00103).

CHIME 연대측정에서는 저어콘 등의 대상광물에 초기 Pb이 존재하지 않았다고 가정한다(Suzuki and Adachi, 1991a). 한 암석에서 동일기원으로 저어콘이 형성된 후 폐쇄계를 유지하였을 경우 각 영역 분석치는 초기 Pb의 양은 0으로 같고 다른 Th과 U의 함량에 의해 PbO- UO_2^* 관계도에서 직선상으로 배열되는 등시선을 형성하며, 등시선의 절편은 0이 된다. 그러나 이 연구의 MS39와 MS35 시료처럼 저어콘의 PbO 및 UO_2^* 함량 범위가 작을 경우는 통계학적으로 오차가 적은 등시선이 정의되기 어렵고 절편도 0에서 벗어나는 경우가 생긴다. 따라서 절편을 0으로 가정한 등시선 연령을 구하는 것도 의미가 있다. 이 방법을 적용하면 MS39와 MS35 시료에서 각각 242 ± 12 Ma(MSWD =

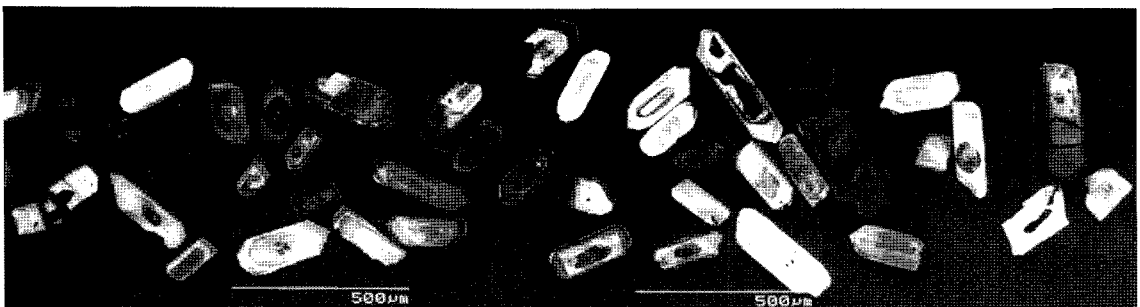


Fig. 2. Cathodoluminescence image of bisected and polished zircons from the Gamaksan alkaline meta-granitoid.

Table 1. Analytical data of zircons for CHIME age dating

Grain No.	ThO ₂ (wt%)	UO ₂ (wt%)	PbO (wt%)	Age (Ma)	UO ₂ * (wt%)	Grain No.	ThO ₂ (wt%)	UO ₂ (wt%)	PbO (wt%)	Age (Ma)	UO ₂ * (wt%)
Sample SY4						Z03-01	0.10	0.298	0.012	263	0.329
Z01-01	0.06	0.236	0.010	296	0.254	Z03-02	0.06	0.277	0.009	220	0.295
Z01-01	0.05	0.262	0.009	239	0.277	Z03-03	0.03	0.228	0.008	238	0.238
Z01-03	0.09	0.343	0.013	250	0.371	Z03-04	0.06	0.262	0.009	245	0.280
Z01-04	0.20	0.273	0.012	269	0.333	Z03-05	0.10	0.272	0.011	254	0.303
Z02-01	0.12	0.242	0.009	231	0.280	Z03-06	0.08	0.199	0.006	207	0.224
Z02-01	0.14	0.248	0.010	258	0.291	Z03-07	0.00	0.217	0.008	269	0.219
Z02-03	0.12	0.281	0.012	270	0.318	Z03-08	0.10	0.274	0.011	253	0.305
Z02-04	0.08	0.278	0.010	238	0.303	Z03-09	0.09	0.273	0.009	226	0.300
Z02-05	0.09	0.357	0.013	246	0.386	Z03-10	0.06	0.241	0.008	237	0.258
Z03-01r	0.15	1.444	0.008	290	0.189	Z03-11	0.06	0.274	0.011	267	0.292
Z03-02	0.12	0.204	0.010	293	0.240	Z03-12	0.88	0.341	0.021	251	0.613
Z03-03	0.06	0.140	0.005	233	0.158	Z03-13	0.07	0.302	0.011	248	0.323
Z03-04	0.09	0.165	0.006	230	0.192	Z03-14	0.12	0.405	0.015	249	0.441
Z04-01	0.10	0.317	0.013	271	0.347	Z03-15	0.05	0.247	0.009	243	0.263
Z04-02	0.06	0.166	0.007	285	0.185	Z03-16	0.05	0.236	0.009	249	0.251
Z04-03	0.11	0.246	0.008	206	0.280	Z03-17	0.05	0.251	0.008	227	0.267
Z04-04	0.08	0.181	0.008	284	0.204	Z03-18	0.06	0.279	0.011	272	0.297
Z04-05	0.07	0.144	0.007	311	0.165	Z04-01	0.08	0.123	0.006	298	0.147
Z05-01	0.09	0.242	0.009	245	0.270	Z04-02	0.04	0.096	0.004	260	0.107
Z05-02	0.09	0.244	0.010	264	0.270	Z04-03	0.06	0.110	0.005	258	0.128
Z05-03	0.08	0.455	0.015	237	0.479	Z04-04	0.04	0.249	0.009	239	0.262
Z06-01	0.07	0.348	0.012	246	0.370	Z04-05	0.12	0.248	0.009	239	0.284
Z06-02	0.09	0.475	0.016	240	0.503	Z04-06	0.08	0.613	0.020	233	0.638
Z06-03	0.07	0.264	0.009	221	0.286	Z05-01	0.07	0.128	0.006	291	0.151
Z06-04	0.12	0.398	0.014	237	0.436	Z05-02	0.11	0.130	0.006	264	0.164
Z06-05	0.03	0.337	0.011	239	0.348	Z05-03	0.15	0.202	0.008	243	0.248
Z07-01	0.14	0.464	0.017	247	0.507	Z05-04	0.05	0.163	0.005	215	0.178
Z07-02	0.12	0.461	0.017	251	0.499	Z05-05	0.18	0.281	0.012	253	0.337
Z07-03	0.12	0.488	0.019	266	0.524	Z06-01	0.05	0.155	0.005	211	0.171
Z08-01	0.10	0.221	0.009	266	0.251	Z06-02	0.06	0.182	0.006	230	0.201
Z08-02	0.07	0.181	0.006	220	0.201	Z06-03	0.03	0.160	0.004	191	0.170
Sample MS42						Z06-04	0.08	0.083	0.004	275	0.107
Z01-01	0.13	0.197	0.009	264	0.236	Z07-01	0.05	0.201	0.007	234	0.217
Z01-02	0.12	0.199	0.010	295	0.235	Z07-02	0.06	0.095	0.004	279	0.113
Z01-03	0.06	0.147	0.006	273	0.164	Z07-03	0.12	0.264	0.011	264	0.300
Z01-04	0.07	0.155	0.005	199	0.178	Z07-04	0.22	0.367	0.016	266	0.435
Z01-05	0.03	0.174	0.007	293	0.185	Z07-05r	1.09	0.866	0.299	1623	1.160
Z01-06	0.07	0.185	0.008	294	0.206	Sample MS39					
Z01-07	0.41	0.213	0.013	280	0.338	Z01-01	0.06	0.273	0.010	249	0.293
Z02-01	0.06	0.141	0.004	186	0.159	Z01-02	0.10	0.263	0.009	236	0.293
Z02-02	0.08	0.258	0.009	235	0.282	Z01-03	0.02	0.173	0.006	251	0.179
Z02-03	0.10	0.231	0.007	208	0.262	Z01-04	0.03	0.263	0.009	235	0.273

0.67)와 249 ± 15 Ma(MSWD = 1.09)로 오차가 상대적으로 적고 오차범위 내에서 SY4 및 MS42 시료와 거의

같은 시기의 등시선 연령이 계산되어 진다. 한편 4시료의 분석치를 종합하면 247 ± 14 Ma(n = 103, MSWD =

Table 1. Continued

Grain No.	ThO ₂ (wt%)	UO ₂ (wt%)	PbO (wt%)	Age (Ma)	UO ₂ * (wt%)	Grain No.	ThO ₂ (wt%)	UO ₂ (wt%)	PbO (wt%)	Age (Ma)	UO ₂ * (wt%)
Z01-05	0.05	0.114	0.005	264	0.131	Z01-05r	1.80	1.680	0.868	2325	2.130
Z02-01	0.08	0.139	0.015	639	0.163	Z02-01r	0.03	0.063	0.006	549	0.072
Z02-02r	0.07	0.164	0.013	487	0.186	Z02-02r	0.03	0.062	0.007	653	0.071
Z02-03	0.08	0.168	0.017	640	0.192	Z02-03r	0.67	0.064	0.007	180	0.271
Z02-04	0.05	0.096	0.008	524	0.112	Z02-04r	0.17	0.195	0.015	446	0.247
Z02-05r	0.16	0.239	0.018	444	0.288	Z02-05r	0.08	0.124	0.008	395	0.147
Z02-06	0.09	0.187	0.020	661	0.215	Z02-06r	0.13	0.191	0.014	448	0.229
Z03-01	0.08	0.209	0.007	222	0.232	Z02-07r	0.62	0.278	0.032	489	0.467
Z03-02	0.03	0.141	0.005	224	0.151	Z03-01r	0.21	0.225	0.018	440	0.289
Z03-03	0.04	0.152	0.005	231	0.163	Z03-02r	0.21	0.223	0.021	528	0.285
Z03-04	0.03	0.147	0.006	287	0.155	Z03-03r	0.09	0.118	0.008	418	0.146
Z03-05	0.05	0.158	0.006	262	0.174	Z03-04	0.18	0.129	0.007	263	0.184
Z03-06	0.06	0.122	0.005	270	0.141	Z04-01	0.14	0.093	0.004	233	0.136
Z03-07	0.10	0.165	0.006	220	0.195	Z04-02	0.12	0.140	0.008	336	0.178
Z04-01	0.06	0.061	0.005	480	0.078	Z04-03	0.22	0.240	0.011	254	0.306
Z04-02r	0.09	0.136	0.010	425	0.163	Z04-04	0.01	0.103	0.003	240	0.104
Z04-03	0.06	0.109	0.010	575	0.125	Z05-01	0.82	0.394	0.023	259	0.648
Z04-04r	0.08	0.173	0.016	576	0.198	Z05-02	0.19	0.087	0.004	203	0.146
Z04-05r	0.11	0.224	0.020	551	0.255	Z05-03	0.05	0.116	0.005	299	0.132
Z04-06r	0.70	0.245	0.032	499	0.456	Z05-04	0.10	0.161	0.006	226	0.192
Z04-07	0.07	0.101	0.009	532	0.121	Z05-05	0.05	0.188	0.008	271	0.203
Z04-08r	0.02	0.126	0.005	279	0.132	Z05-06	0.02	0.158	0.006	263	0.165
Sample MS35						Z06-01	0.11	0.226	0.009	249	0.260
Z01-01r	2.44	1.730	0.965	2347	2.340	Z06-02	0.04	0.154	0.006	254	0.165
Z01-02r	1.43	1.610	0.856	2438	1.970	Z06-03	0.11	0.152	0.006	237	0.187
Z01-03r	1.62	1.450	0.858	2558	1.840	Z06-04	0.20	0.250	0.011	247	0.312
Z01-04r	2.22	1.560	0.860	2323	2.120						

r: data rejected from age determinations

0.92, 절편 = -0.00003 ± 0.00041)의 양호한 등시선 연령이 정의되는데(Fig. 3f), 이를 GAM의 변성작용의 시기를 가장 잘 나타내는 연령치로 생각할 수 있다.

MS39 시료 저어콘의 중심에서 구한 분석치는 연변부에 비해 현저하게 높은 외견연령을 가지며(Fig. 3c) 가장 고기의 그룹은 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정에 의한 GAM의 관입시기 742 ± 13 Ma(Lee *et al.*, 2003)와 유사한 761 ± 59 Ma 등시선을 형성한다($n = 7$, MSWD = 0.13, 절편 = -0.00357 ± 0.00114). 한편 MS35의 저어콘 핵으로부터의 5개 분석치는 외견연령이 약 2.32~2.56 Ga의 범위이다(Fig. 3d).

토 의

Kim *et al.*(2000)은 경기전단대의 연성전단작용에 의해 형성된 백운모를 포함하는 GAM을 대상으로 Rb-Sr

연대측정법을 적용해 전암-백운모 등시선 연령 226.0 ± 1.2 Ma를 얻었다. 그들은 압쇄암의 미구조에 의해 추정된 연성전단작용의 온도조건 약 500°C 와 Rb-Sr계 백운모의 폐쇄온도가 유사한 것을 근거로 226 Ma가 연성전단운동의 시기에 해당한다고 하였다. 이 연구의 대상인 저어콘의 경우 부분용융에 의해 멜트가 형성되기 시작하는 상부 각섬암상 이상의 조건에서부터 재성장하기 시작하는 것으로 알려져 있어(Vavra *et al.*, 1999) 과성장한 저어콘 연변부에서 구한 CHIME 연령인 247 ± 14 Ma는 GAM의 연성전단작용의 시기가 아닌 그 이전에 경험한 광역변성작용의 시기로 해석된다.

지금까지 임진강대의 연천층군에서 보고된 광역변성작용의 시기는 남정석-십자석-석류석 편암의 CHIME 모나자이트 연령 255 ± 8 Ma(Cho *et al.*, 1996), 각섬암의 Sm-Nd 광물연령 249 ± 31 Ma(Ree *et al.*, 1996), 석류석-흑운모 편암의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연령

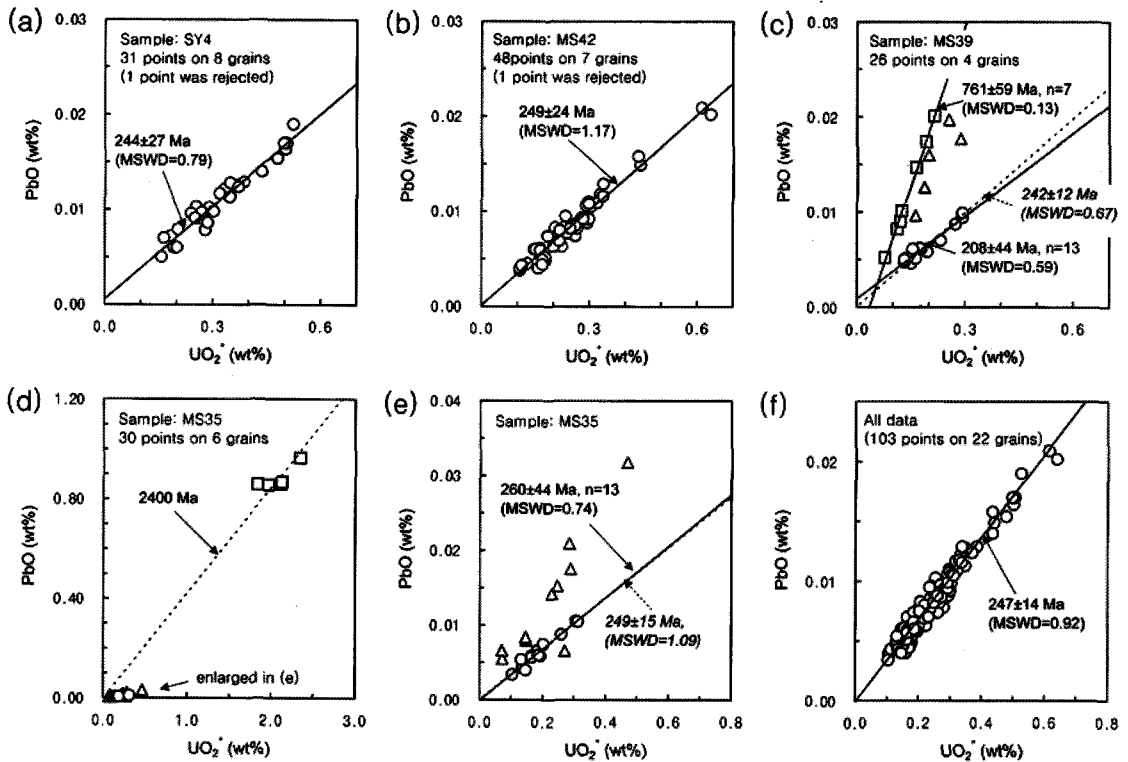


Fig. 3. Plots of PbO vs. UO_2^* of zircons from the Gamaksan alkaline meta-granitoid. The errors given to the age are of 2σ . Ages given in italics in (c) and (f) are calculated from isochrons assuming zero-intercept.

253±2 Ma(Cho *et al.*, 2005) 등이 있다. 이 연구의 CHIME 저어콘 연령 247±14 Ma는 오차 범위 내에서 기존에 보고된 임진강대의 변성시기와 일치하는 것으로 임진강대 뿐만 아니라 적어도 경기육괴 북서부까지 페름기-트라이아스기의 광역변성작용이 영향을 미쳤음을 지지한다. 또한 이 연대자료는 경기육괴 중앙부 북쪽인 화천지역의 기반암 변성작용(CHIME 모나자이트 연령 245±3 Ma: Cho *et al.*, 1996), 경기육괴 남서부 비봉지역의 에클로자이트에 해당하는 고압의 변성작용(Sm-Nd 전암-석류석 연령 258±11 Ma와 225±6.6 Ma: Oh *et al.*, 2005), 경기육괴 동부 오대산 지역의 대륙충돌과 관련된 화성활동(TIMES U-Pb 저어콘 연령 257±3 Ma: Oh *et al.*, 2006b) 및 초고온 변성작용(SHRIMP U-Pb 저어콘 연령 245±10 Ma와 248±18 Ma: Oh *et al.*, 2006a) 등의 기존 자료와 더불어 경기육괴가 중국의 충돌대의 연장부에 해당한다는 주장(Liu, 1993; Ernst and Liou, 1995; Oh and Kusky, 2007)을 지지한다.

Cho *et al.* (2007)은 연천층군의 온도-압력 조건 및 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 연대자료와 기존에 보고된 자료를 종합하여

임진강대가 트라이아스기에 중국의 다비-술루 충돌대의 경우(Hacker *et al.*, 2000; Faure *et al.*, 2003)와 같이 빠르게 융기되어 약 15°C/Ma 혹은 그 이상의 비율로 급격히 냉각되었다고 하였다. 전술한 바와 같이 경기전단대가 발달하는 GAM은 트라이아스기 후기-쥬라기 초기에 퇴적된 육성층인 대동층군에 부정합 관계로 피복되므로(Kim *et al.*, 2000) 이 시기에 이미 지표 근처에 노출되었을 것이다. 따라서 연성전단작용이 226 Ma에 500°C 온도에서 이루어졌고(Kim *et al.*, 2000), 대동층군의 퇴적이 트라이아스기와 쥬라기의 경계 내지 쥬라기 초기에 시작하였다면 GAM의 냉각속도를 18~10°C/Ma로 추정할 수 있다. 한편 저어콘이 채정장하기 시작하는 온도를 근거로 하면 GAM이 247 Ma에 경험한 광역변성작용은 약 700°C 정도에 도달했을 것이며 여기에 대동계의 퇴적시기를 대입하면 트라이아스기 내지 쥬라기 초기까지의 GAM 냉각속도는 최소 10°C/Ma가 된다. 이와 같이 빠른 지각의 냉각속도는 중국의 다비-술루대와 같은 대륙충돌대에서 관찰되는 것으로서 조산운동과 관련하여 두꺼워진 지각이 빠르게 융기 및 삭박되었음을 의미하며, 경기육괴가 임진

강대와 더불어 페름기-트라이아스기의 조산대의 일부에 해당한다는 주장을 뒷받침하는 자료가 된다.

결 론

감악산 알칼리 변성화강암질암(GAM)의 광역변성시기를 구하기 위해 CHIME 저어콘 연대측정을 하였다. 두 개의 시료에서는 244 ± 27 Ma(MSWD = 0.79)와 249 ± 24 Ma(MSWD = 1.17)의 동시선 연령이 주어지고, 나머지 두 시료는 UO_2^* 및 PbO의 함량범위가 작아 오차가 큰 208 ± 44 Ma(MSWD = 0.59)와 260 ± 44 Ma(MSWD = 0.74)의 동시선 연령을 보인다. 그러나 이들 시료도 절편을 0으로 가정할 경우 242 ± 12 Ma(MSWD = 0.67)와 249 ± 15 Ma(MSWD = 1.09)로 오차가 상대적으로 작고 오차범위 내에서 다른 시료와 일치하는 동시선 연령이 계산된다. 4시료의 모든 분석치를 대상으로 하면 247 ± 14 Ma ($n = 103$, MSWD = 0.92)의 양호한 동시선 연령이 정의되는데, 이를 GAM의 변성작용의 시기를 가장 잘 나타내는 연령치로 생각할 수 있다.

광역변성작용에서 저어콘은 부분용융에 의해 멜트가 형성되기 시작하는 상부 각섬암상 이상의 조건에서부터 재성장하기 시작하므로(Vavra *et al.*, 1999) 이 연구의 CHIME 저어콘 연령 247 ± 14 Ma는 GAM의 광역변성작용의 시기로 해석된다. 이 연령은 기존에 보고된 임진강대의 변성시기와 오차 범위 내에서 일치하는 것으로 임진강대의 페름기-트라이아스기의 광역변성작용이 경기육괴 북서부까지 영향을 미쳤음을 지시한다. 또한 경기육괴에서 최근 보고되는 연대자료, 온도-압력 조건, 지화학자료와 더불어 경기육괴가 중국의 충돌대의 연장부에 해당된다는 주장을 지지한다.

GAM에 발달하는 경기전단대의 연성전단작용이 226 Ma에 500°C 온도에서 이루어졌고(Kim *et al.*, 2000) 대동충균이 트라이아스기와 쥬라기의 경계 내지 쥬라기 초기에 GAM의 침식면 위에 쌓이기 시작했다면 GAM의 냉각속도는 18~10°C/Ma가 된다. 또한 GAM이 247 Ma에 경험한 광역변성작용이 저어콘이 재성장하기 시작하는 700°C 정도에서 일어났고, 여기에 다시 대동충균의 퇴적시기를 대입하면 트라이아스기 내지 쥬라기 초기까지 GAM의 냉각속도는 최소 10°C/Ma가 된다. 따라서 임진강대 뿐만 아니라(Cho *et al.*, 2007) 경기육괴 북서부도 트라이아스기의 중국 다비-술루 대륙충돌대의 경우와 비교될 수 있을 정도로 빠르게 지각이 상승하였고, 이는 이들이 페름기-트라이아스기 중국 충돌대의 연장부일 것이라는 주장을 뒷받침하는 자료이다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 기본연구사업 중 하나인 '동북아 지각의 지체구조적 대비 및 지질정보 구축'에서 지원되었다. CL 영상 획득에 도움을 준 신재봉 박사, CHIME 연대측정에 대해 조언을 아끼지 않은 Kato Takenori 박사와 이 논문을 심사하여 미비점을 지적해준 장윤득 교수 및 익명의 심사자에게 사의를 표한다.

참고문헌

- 기원서, 조동룡, 김복철, 진광민, 2005, 포천도폭 지질조사 보고서 1:50,000. 한국지질자원연구소, 66p.
- 유강민, 권영인, 전희영, 1992, 연천지역에 분포하는 대동충균의 층서와 사암의 광물조성. 지질학회지, 28, 152-166.
- 이병주, 김유봉, 이승렬, 김정찬, 강필중, 최현일, 진명식, 1999, 1:250,000 서울-남천점 지질도폭 설명서. 한국자원연구소, 64p.
- 전희영, 봉필운, 이호영, 최성자, 김복철, 권영인, 1988, 경기탄전지역 함탄퇴적분지의 층서 연구. 한국동력자원연구소, KR-88-1A, 41p.
- 조동룡, 2004, 저어콘 아입자 분석을 위한 효율적인 광물 분리 및 시료준비 방법. 암석학회지, 13, 126-132.
- 최성자, 이승렬, 김규봉, 김준락, 김복철, 1998, 문산도폭 지질조사보고서 1:50,000. 한국자원연구소, 79p.
- 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.
- 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., Kim, Y. and Ahn, J., 2007, Metamorphic evolu-

- tion of the Imjingang Belt, Korea: Implications for Permo-Triassic collisional orogeny. *International Geology Review*, 49, 30-51.
- Ernst, W.G. and Liou, J.G., 1995, Contrasting plate-tectonic styles of the Qinling-Dabie-Sulu and Franciscan metamorphic belts: *Geology*, 23, 353-356.
- Faure, M., Lin, W., Monie, P., Le Breton, N., Poussineau, S., Panis, D. and Deloule, E., 2003, Exhumation tectonics of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Qinling orogen in east China: New petrological-structural-radiometric insights from the Shandong Peninsula: *Tectonics*, 22, 1019[doi:10.1029/2002TC001450].
- Hacker, B.R., Ratschbacher, L., Webb, L., McWilliams, M.O., Ireland, T., Calvert, A., Dong, S., Wenk, H.-R. and Chateigner, D., 2000, Exhumation of the ultra high-pressure continental crust in east central China: Late Triassic-Early Jurassic tectonic unroofing: *Journal of Geophysical Research*, 105, 13339-13364.
- 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.-N., Ree, J.-H., Kwon, S.-T., Park, Y., Choi, S.-J. and Cheong, C.-S., 2000, The Kyonggi Shear Zone of the Central Korean Peninsula: Late Orogenic Imprint of the North and South China Collision. *Journal of Geology*, 108, 469-478.
- Kusiak, M.A., Kędzior, A., Paszkowski, M., Suzuki, K., González-Álvarez, I., Wąjsprych, 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, 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 northwestern margin of the Gyeonggi massif, South Korea. *Precambrian Research*, 2294, 1-14.
- 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 Krishnan, 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., 2006a, Spinel granulite in Odesan area, South Korea: Tectonic implications for the collision between the North and South China blocks. *Lithos*, 92, 557-575.
- Oh, C.W., Sajeev, K., Kim, S.W. and Kwon, Y.W., 2006b, Mangerite magmatism associated with a probable late Permian to Triassic Hongseong-Odesan collisional belt in South Korea. *Gondwana Research*, 9, 95-105.
- Oh, C.W. and Kusky, T., 2007, The late Permian to Triassic Hongseong-Odesan collision belt in South Korea, and its tectonic correlation with China and Japan. *International Geology Review*, 49, 636-657.
- 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.
- 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.
- 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.

(2007년 7월 27일 접수; 2007년 8월 27일 채택)