한반도 지각암류의 지구화학적 특성

이승구^{1*} · 김동연^{1,2}

¹한국지질자원연구원 국토지질연구본부, ²부경대학교 환경해양대학 지구환경과학과

Geochemical Composition of the Continental Crust in Korean Peninsula

Seung-Gu Lee^{1*} and Dong Yeon Kim^{1,2}

¹Geological Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

²Department of Earth and Environmental Sciences, College of Environmental and Marine Science and Technology, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

요 약: 대륙지각의 화학조성은 지각의 형성과 진화에 대한 이해 및 대륙지각내에서 발생한 여러 과정을 정량화하는데 있어서 중요한 역할을 한다. 이 논문에서는 1990년대 이후 보고된 한반도내 화성암류와 퇴적암류의 지구화학적 자료를 토대로 한반도를 구성하고 있는 대륙지각의 화학조성을 지질시대별로 살펴보았다. 평균상부지각조성을 기준으로 한반도에서의 생성시기별 상부지각의 지구화학적 특성을 비교해보았을 때, 트라이아스기의 화강암이 다른 시대와 비교해서 일부 원소에서 현저하게 부화되었거나 결핍된 특성을 보여주었다. 또한 선캄브리아기와 쥐라기 이후의 화강암은 매우 유사한 주성분, 미량성분, 희토류원소의 지구화학적 특성을 보여준다. 하부지각의 지구화학적 특성을 지시해주는 선캄브리아기 고변성도 편마암의 희토류원소 및 미량원소의 지구화학적 특징은 쥐라기 이후 상부지각을 형성한 화강암의 희토류원소 및 미량원소의 지구화학적 특징과 유사한 특징을 보여주는데, 이는 이들 변성암류가 중생대 쥐라기 이후 화강암질 마그마의 기원물질이 되었을 가능성을 지시해준다. 반면에 한반도내 중생대 트라이아스기의 상부지각의 기원물질은 선캄브리아기나 쥐라기 이후의 상부지각을 형성한 기원물질과는 다른 것으로 나타났다.

핵심어: 한반도, 지각, 트라이아스기 화강암, 화학조성, 희토류원소

Abstract: The chemical composition of the continental crust play an important role in understanding of crustal formation and evolution and quantifying other processes taking place within continental crust. We summarized geochemical data reported in the previous literature for the crustal rocks in the Korean Peninsula and divided their chemical composition into geologic time scale. In the variation diagram normalized by average composition of the upper crustal rocks, the geochemical characteristics of the upper crust during Triassic period is different from those of the upper crustal rocks after Jurassic period or before Precambrian. However, the geochemical characteristics of the Jurassic and Precambrian period are similar each other. Our summarized data indicate that the source material of Triassic upper crust may be different from that of Jurassic or Precambrian upper crust.

Key word: Korean Peninsula, crust, Triassic granite, chemical composition, rare earth element

서 론

지구는 지진파속도불연속면에 의해 지각, 맨틀, 핵으로 구분되며, 지각은 다시 현무암질의 해양지각과

안산암질(혹은 화강섬록암질)의 대륙지각으로 나뉜다. 핵은 주로 금속철, 맨틀은 마그네슘 규산염광물인 감람석과 휘석이 주성분인 감람암으로 구성되어 있는 반면에, 지각은 매우 복잡한 물질로 구성되어 있다. 그리고 대륙지각은 지구 전체의 물질수지 계산과 지구의 열구조를 평가함에 있어서 중요한 역할을 한다. 대륙지각은 규산염지구 전체의 0.6% 정도를 차지하

*Corresponding author
Tel: 042-868-3376
E-mail: sgl@kigam.re.kr

지만 열생성원소와 방사성기원 동위원소계(Rb-Sr, U-Pb, Sm-Nd, Lu-Hf)를 포함하는 불호정성 원소(액상 농집원소, incompatible element)를 다량(20-70%) 함유하고 있다(Rudnick and Gao, 2003). 이와 같은 불호정성 및 호정성원소들의 지각 구성암석내 분포도는 암석이 어떠한 초기기원물질로부터 분화되어 왔는지를 판단할 수 있는 근거가 된다(Gill, 2010). 그러므로 지각전체조성 분포와 시간의 경과에 따른 지각의 화학조성변화에 대한 이해는 지각의 생성, 변화과정 그리고 연속성에 대한 판단과 같은 지구시스템의 변동사를 해석할 때 중요한 인자가 된다. 예를 들면 평균적인 대륙지각은 60%정도의 SiO_2 를 함유하는 안산암질로서 $\text{FeO}^*_{\text{tot}}/\text{MgO}$ 비가 1.5정도로 이는 섭입대(Subduction zone)의 안산암의 $\text{FeO}^*_{\text{tot}}/\text{MgO}$ 비 평균치(2.0)에 비해 낮은 것으로 알려져 있다. 또한 미량원소에 대해서도 LILE/HFSE(large-ion-lithophile element/high-field-strength element)비가 높다. 이와 같은 화학적 특성을 토대로 하여 Taylor (1967)은 대륙지각이 섭입대의 화산활동에 의해 형성되었다고 간주하였다.

대륙지각은 지구의 다른 부분에 비해 비교적 접근이 용이하기 때문에, 화학조성을 간단하게 구할 수 있을 것이라고 생각할 수도 있다. 하지만 실제로는 대륙지각이 표면적인(즉 수평적인)면 뿐만 아니라 수직방향으로도 불균질하며, 심부대륙지각의 경우 시료를 직접 획득한다는 것은 불가능하다. 또한 생성시기, 지각의 형태 및 지역별 지각조성의 변화는 범지구적인 모델을 설정하는 데 발생하는 또 하나의 불확실성을 제공한다. 이와 같은 어려움에도 불구하고 여러 연구자들은 다음과 같은 몇 가지 방법을 통해 화학조성을 추정하였다(Clarke, 1989; Clarke and Washington, 1924; Goldschmidt, 1933; Bohlen and Mezger, 1989; Fountain et al., 1990; Hart et al., 1990; Miller and Christensen, 1994; Ketcham, 1996). 대륙지각의 평균적인 화학조성은 1) 지표에 노출된 상부지각물질의 평균적인 화학조성, 2) 하부지각 생성 후의 조구조운동에 의해 상승하였다고 여겨지는 백립암상암체의 평균화학조성, 3) 하부지각에 대해 얻어진 지진파속도 구조와 암석에 대한 지진파속도 실험자료와의 비교, 4) 관찰된 지각열류량에 적합한 암종의 해석 등의 자료를 토대로 추정할 수가 있다. 하지만 2)에서 4)의 방법으로는 하부지각에 대한 정확한 정보를 얻는 것이 어렵기 때문에 추정치의 오류폭이 매우 크다. 특

히 미량원소에 있어서는, 그 거동이 지각-맨틀의 진화를 고찰함에 있어서 하부지각내 미량원소의 함량에 대한 정보가 매우 중요함에도 불구하고 불확정적이다.

하부지각에 대해서는 하부지각기원의 포획암을 조사하여 화학조성을 추정한다. 하부지각의 평균화학조성은 1) 앰피블라이트 혹은 그레놀라이트상의 고변성도 암석(Bohlen and Mezger, 1989), 지표에 노출된 심부지각암체(Fountain et al., 1990; Hart et al., 1990; Miller and Christensen, 1994; Ketcham, 1996)나 2) 심부로부터 운반된 그레놀라이트상의 포획물(Rudnick, 1992)을 이용하거나 3) 지진파를 이용한 원격탐사법(Christensen and Mooney, 1995; Rudnick and Fountain, 1995)을 이용하여 추정한다. 하지만 상부지각에 대해서는 화학조성의 평균치를 구함에 있어서, 지표에서의 대표암석의 면적비율을 고려해 전체의 화학조성을 계산할 수가 있다. 이와 같은 상부지각의 화학조성은 일반적으로 두 가지 방법을 이용하여 구할 수가 있다. 하나는 지표에 노출된 암석의 화학조성의 평균치를 이용하여 구하는 것이고(Clarke, 1989; Clark and Washington, 1924), 다른 하나는 세립질 쇄설성퇴적암 혹은 빙하퇴적층에서의 불용성 원소(insoluble elements)의 조성평균치를 이용하여 구한다(Goldschmidt, 1933). 이상의 방법에 의해 추정된 현재의 대륙지각의 화학조성은 안산암 (Taylor, 1967, 1977)이나 화강섬록암류의 화학조성과 유사하다(Weaver and Tarney, 1984). 따라서 안산암의 화학조성은 대륙지각 전체의 평균화학조성을 설정하는데 사용될 수 있다(Taylor, 1967; Taylor and McLennan, 1985).

Table 1에는 대륙의 상부지각 및 하부지각의 평균 조성에 관해 보고된 대표적인 연구결과를 정리 · 기재하였다. Table 1의 자료를 토대로 하여 희토류원소와 미량원소를 각각 PAAS 및 원시맨틀(Primitive mantle; Sun and McDonough, 1989)로 규격화 한 도형은 Fig. 1과 같다. Fig. 1의 희토류원소 분포도를 보면 Taylor and McLennan (1985)와 Rudnick and Gao (2003)의 하부지각의 희토류원소 화학조성은 대체적으로 유사한 양상을 보여지만, 상부지각의 희토류원소 화학조성은 연구자에 따라 중희토류의 분포도가 불규칙하거나 경희토류가 결핍된 양상을 보여준다. 그리고 미량원소를 이용한 거미도(spider diagram)을 보면 상부지각의 경우 대체적으로 유사한 형태를 갖추고 있는 반면에 하부지각은 LILE(Rb, Se, Ba, Pb,

Table 1. Compositional estimates of upper and lower continental crust

Element	Taylor and McLennan (1985)		Wedepohl (1995)		Rudnick and Gao(2004)	
	upper crust	lower crust	upper crust	lower crust	upper crust	lower crust
SiO ₂ (wt%)	65.89	54.3	66.8	59	66.62	53.4
TiO ₂	0.5	0.97	0.54	0.85	0.64	0.82
Al ₂ O ₃	15.17	16.1	15.05	15.8	15.4	16.9
Fe ₂ O ₃	8.07	11.78	4.55	8.30	5.60	9.52
MnO	0.1	0.22	0.07	0.22	0.1	0.12
MgO	4.59	6.28	2.3	5.32	2.48	7.24
CaO	5.45	8.48	4.24	6.92	3.59	9.59
Na ₂ O	3.29	2.79	3.56	2.91	3.27	2.65
K ₂ O	2.99	0.64	3.19	1.61	2.8	0.61
P ₂ O ₅	0.23		0.15		0.15	0.1
Sc	13.6	35	7	25	14	31
Ga	17	83	14	79	17.5	13
Rb (ppm)	112	12	110	41	84	11
Sr	350	230	316	352	320	348
Zr	190	70	237	165	193	68
Ba	550	150	668	568	624	259
Nb	12	6.7	26	11	12	5
Hf	5.8	0.6	5.8	4	0.31	0.6
Ta	1	0.7	1.5	0.8	0.9	0.6
Pb	17	5	17	12.5	17	4
Th	10.7	2	10.3	6.6	10.5	1.2
U	2.8	0.53	2.5	0.93	2.7	0.2
Y	22	19	21	27	21	16
La	30	11	32.3	27	31	8
Ce	64	23	65.7	53	63	20
Pr	7.1	2.8	6.3	7.4	7.1	2.4
Nd	26	13		28	27	11
Sm	4.5	3.17	4.7	6	4.7	2.8
Eu	0.88	1.17	0.95	1.6	1	1.1
Gd	3.8	3.13	2.8	5.4	4	3.1
Tb	0.8	0.59	0.5	0.81	0.7	0.48
Dy	2.3	3.6	2.9	4.7	3.9	3.1
Ho	0.33	0.77	0.62	0.99	0.83	0.68
Er	2.2	2.2	1.5		2.3	1.9
Tm	0.32	0.32	0.27		0.3	0.24
Yb	5.8	2.2		2.5	2	1.5
Lu	1	0.29		0.43	0.31	0.25

Eu/Eu*¹⁾

U, Th)와 HFSE(Zr, Hf, Nb, Ta, Y)의 분포도의 형태가 다르다. 이와 같이, 연구자에 따라 희토류원소 및 미량원소의 분포도가 다르게 나타난다. 이는 선택된 대륙별 차이에 따른 영향이 큰 것으로 볼 수 있다.

한반도는 한중지괴(Sino-Korean craton)에 속하며, 현재까지의 연구 자료를 토대로 판단해 볼 때 한반도의 초기지각은 시생대(25억년전 이전)에 만들어졌고 (Lan et al., 1995; Lee et al., 2003a), 한반도의 현재 지각조성은 시생대 이후 여러 번의 변화과정을 거쳐

Fig. 1. PAAS(post-Archean Australian Shale; Taylor and McLennan, 1985)-normalized REE pattern and Primitive mantle(Sun and McDonough, 1989)-normalized REE patterns of average lower and upper crust.

형성된 결과라 할 수 있다. 그러므로 한반도 지각의 평균조성에 대한 이해는 아시아, 아메리카 혹은 호주 대륙과의 연관성 및 상호비교에 도움이 될 수 있음을 지시해준다. 이 논문에서는 현재까지 보고된 한반도 지각의 여러 구성 암석들에 대한 지구화학적 자료 특히 희토류원소와 미량원소자료를 토대로, 한반도 남부에서의 상부지각, 하부지각, 지각전체의 화학조성을 시대별 혹은 암상별로 정리·비교하여 한반도를 구성하고 있는 지각의 지구화학적 특징을 고찰하고자 한다.

지질개요

한반도의 초기지각 즉 기저암은 선캄브리아기 초기의 조산운동에 의해 형성되어진 것으로 간주되며, 선캄브리아기 이후 고생대 동안의 한반도에는 퇴적층의 대결층이 알려져 있기는 하지만 일부 심한 지각변동이나 조산운동이 없이 비교적 안정된 지괴였던 것으로 추정되며, 중생대에는 한반도 전역에 걸쳐 조산운

동이 3차례에 걸쳐 일어난 것으로 알려져 있다(대한 지질학회, 1998). 중국대륙과 한반도와의 연계성(특히 북중국지괴 및 남중국지괴와의 연관성)을 밝혀내기 위한 연구는 지난 20여년간 활발하게 이루어져 왔지만(Lee et al., 1987; Cluzel, 1991; Lan et al., 1995; Ree et al., 1996; Qiu et al., 2000; Oh et al., 2004; Oh, 2006; Kim et al., 2011), 중국의 지각형성사와 한반도의 지각형성사의 연계성 규명에는 아직 해결해야 할 과제가 많이 남아 있다.

한반도 남부의 지각은 선캄브리아기의 변성퇴적암류와 화성암류로 구성된 경기육괴와 영남육괴, 선캄브리아기 후기 내지 고생대의 염기성화성암류 혹은 퇴적암류로 구성된 옥천대 그리고 이를 관입한 중생대 화강암류와 이를 덮은 신생대의 화산암류로 구성된다(Fig. 2). 현재까지의 연구결과에 의하면, 한반도의 평균지각의 두께는 약 32-35 km인 것으로 알려져 있다(김상조와 김소구, 1983; 이기화, 1979, 2010; 김선균, 1995; 정태웅, 1995).

Fig. 2. Simplified geologic map of Korea. GM: Gyeonggi massif, TB: Taebaek basin, OB: Okcheon belt, YM: Yeongnam massif, GB: Gyeongsang basin.

연구방법

대륙지각은 약 40억년에 걸친 형성과 발달의 과정

을 겪은 집적체로서 표층부의 상부지각의 평균화학조성은 안산암질 또는 화강섬록암질이고, 불호정성 원소들이 부화되어 있으며 호정성 원소들은 결핍되어

있다. 이와 같은 불호정성 및 호정성원소들의 분포는 지각구성암석의 기원암의 지구화학적 특성을 밝혀내는데 유용한 정보를 제공해준다. 희토류원소의 분포도 또한 지각구성암석이 어떠한 기원물질로부터 분화되어 왔는지를 이해하는데 유용한 도구로 활용되어져 왔다. 현재의 퇴적물질의 희토류원소의 분포는 PAAS(post Archean Australian Shale; Taylor and McLennan, 1985), NASC(North American Shale Composite, Taylor and McLennan, 1985)과 같은 시생대 후기의 셰일(post-Archean shale)의 희토류원소 분포와 유사하다. 이는 희토류원소의 분포도가 상부대륙지각의 지구화학적 특성을 반영하는 것이라 볼 수 있다(Taylor and McLennan, 1985). 그러므로 한반도 대륙지각의 기원물질 및 발달사를 이해하기 위해서는 초기맨틀의 화학조성 및 대륙지각의 대표적인 희토류원소 조성치를 이용하는 것이 필요하다.

한반도 지각은 선캄브리아기부터 신생대에 이르기까지 다양한 시기에 생성된 다양한 종류의 암석들로 구성되어 있다(Fig. 2 참조). 이와 같은 암석분포를 토대로 한반도 지각의 화학조성상 특성을 살펴보기 위해, 이 논문에서는 한반도의 상부지각의 화학조성 특성을 밝혀내는 데는 SiO_2 의 함량(65% 기준) 및 암상분류에 따라 화강암, 섬록암(화강섬록암 포함)과 같은 심성암류와 셰일 혹은 이암과 같은 세립질 퇴적암류를 이용하였고, 하부지각의 화학조성 추정에는 앰피볼라이트 혹은 그레놀라이트상의 변성암류를 이용하였다. 또한 지각전체의 평균화학조성을 추적함에 있어서는 안산암을 이용하였다. 그리고 지각과 맨틀의 화학조성의 차이를 비교하기 위한 한반도내 맨틀의 화학조성 추적에는 현무암자료를 이용하였다. 분석자료의 신뢰도 및 국내의 분석기술을 고려하여 자료수집에는 1990년대 이후에 발표된 것만을 활용하였다. 자료해석에는 대륙지각의 평균화학조성을 비교한 Fig. 1과 같이 PAAS의 희토류원소 함량과 원시맨틀의 미량원소 함량을 기준으로 사용하였다.

한반도의 암상별 화학조성

Table 2에는 이 연구에서 종합한 한반도내 화성암류, 변성암류 그리고 퇴적암류의 화학조성의 평균치 및 편차가 기재되어 있다. 그리고 Table 2의 자료 중 희토류원소 및 미량원소에 대해 각각 PAAS와 초기 맨틀(Sun and McDonough, 1989)의 값으로 규격화

한 상부지각의 생성시대별 희토류원소 분포도 및 거미도(spider diagram)는 Figs. 3 및 4 하부지각 및 맨틀유래암석의 생성시대별 희토류원소 분포도 및 거미도는 Fig. 5에 도시하였다. 상부지각, 하부지각, 맨틀유래암석의 희토류원소 및 미량원소의 분포도 특성을 요약하면 다음과 같다.

상부지각

심성암류의 희토류원소 및 미량원소 분포도: PAAS의 희토류원소 함량으로 규격화한 Figs. 3a에서 3c의 상부지각의 희토류원소 분포도에서 화강암을 살펴보면, 중생대 백악기와 주라기의 화강암은 Eu 이상의 크기가 각각 0.89와 1.04로 주라기 화강암에서는 거의 존재하지 않고, $(\text{La/Yb})_N$ 의 값 또한 1.11에서 1.52로 비교적 편평한 분포도 양상을 보여준다. 반면에 중생대 트라이아스기와 고생대의 화강암은 중희토류(HREE)가 결핍된 양상을 보여준다 $((\text{La/Yb})_N$: 3~3.35). 선캄브리아기 화강암의 경우 비교적 편평한 희토류원소 분포도 양상과 더불어 Eu 이상이 거의 관찰되지 않는다.

섬록암 혹은 화강섬록암의 경우 희토류원소의 전반적인 분포도 양상은 화강암과 유사하지만, Eu 이상에 있어서 백악기 섬록암은 정(+)의 Eu 이상이 관찰되는 반면에 그 이전의 섬록암에서는 Eu 이상이 관찰되지 않는다. 이와 같은 희토류원소 분포도 차이는 기원물질의 조성이 서로 달랐을 가능성을 지시해준다고 볼 수 있다.

Figs. 3d에서 3f의 거미도에서도 희토류원소 분포도와 마찬가지로 중생대 백악기와 주라기의 화강암의 경우 Ba, Nb, Zr, P_2O_5 , TiO_2 등과 같은 원소에서 결핍된 양상을 보여주지만, 중생대 트라이아스기 및 고생대의 화강암류에서는 Zr의 결핍이 나타나지 않는다. Nb, P, Ti와 같은 친석원소의 결핍은 이 시기의 화강암류가 섭입대의 영향을 받은 기원물질로부터 유래되었음을 지시해주고 있다 (Condie, 1989; Wilson, 1989). 반면에 주라기 섬록암은 TiO_2 의 결핍이 거의 존재하지 않는다는 점에서 백악기의 섬록암류와 다른 분포도 특성을 보여준다. Zr 또한 현저한 결핍을 보여주지만, 시료분해시 산에 강한 Zr성분이 완전분해되지 않았을 가능성이 크므로 Zr에 대한 해석은 제외시키고자 한다. 그럼에도 불구하고 희토류원소 분포도와 거미도에서의 분포도 차이는 고생대 및 중생대 초기의 심성암류의 기원물질과 선캄브리아기 혹은 주

Table 2. Continued

Mantle			Lower Crust		Upper Crust						Total crust				
Cenozoic Miocene	Mesozoic Cretaceous	Paleozoic	Precambrian		Mesozoic Cretaceous			Mesozoic Jurassic			Mesozoic Triassic	Paleozoic	Precambrian	Cenozoic Miocene	Mesozoic Cretaceous
basalts	basalts	Meta- volcanics	Gneiss	Amphibolite	shale	Granitic rocks	Dioritic rocks	Shale	Granitic rocks	Dioritic rocks	Granitic rocks	Granite	Dioritic rock	Granite	andesite
n=57-145 ^(a)	n=8-11 ^(b)	n=16 ^(c)	n=3-78 ^(d)	n=2 ^(e)	n=33 ^(f)	n=111-333 ^(g)	n=7-23 ^(h)	n=20 ⁽ⁱ⁾	n=13-238 ^(j)	n=13 ^(k)	n=12-36 ^(l)	n=13-60 ^(m)	n=18 ⁽ⁿ⁾	n=43 ^(o)	n=8-30 ^(p)
Gd	5.61±1.75	4.88±1.18	9.92±4.15	6.82±4.71	2.13±0.06	4.41±2.54	4.52±1.35	1.24±0.72	4.36±3.70	2.81±1.13	0.38±0.27	2.06±1.19	0.82±0.07	2.55±1.41	4.77±0.74
Tb	0.82±0.22	0.76±0.18	1.69±0.79	0.98±0.94	0.48	0.71±0.11	0.65±0.23	1.24±0.72	0.65±0.65	0.38±0.27	0.38±0.27	2.06±1.19	0.82±0.07	0.36±0.15	0.71±0.12
Dy	4.89±1.09	4.31±0.85	9.78±4.72	6.37±7.09	3.72±0.11	3.87±2.39	3.63±1.19	2.94±4.15	2.94±4.15	2.94±1.55	0.34±0.12	2.06±1.19	0.82±0.07	1.81±0.63	4.36±0.74
Ho	0.97±0.22	0.83±0.13	1.93±0.93	1.13±1.43	0.79±0.02	0.81±0.55	0.69±0.25	0.64±0.84	0.64±0.84	0.64±0.84	0.34±0.12	2.06±1.19	0.82±0.07	0.29±0.10	0.87±0.16
Er	2.72±0.65	2.42±0.39	5.57±2.78	4.04±5.22	2.49±0.12	2.67±3.15	2.03±0.80	1.87±2.64	1.87±2.64	1.87±2.64	0.94±0.32	2.07±0.60	0.72±0.39	2.58±0.43	2.43±0.64
Tm	0.38±0.10	0.35±0.05	0.83±0.42	0.65±0.88	0.38±0.01	0.39±0.27	0.31±0.12	0.29±0.46	0.29±0.46	0.29±0.46	0.11±0.04	0.27±0.11	0.11±0.09	0.36±0.06	0.32±0.11
Yb	2.46±0.71	2.24±0.29	5.23±2.61	3.80±5.16	2.58±0.13	2.33±1.57	1.94±0.77	3.53±1.67	1.80±2.92	1.54±0.75	0.81±0.27	0.91±0.43	1.95±0.74	0.80±0.82	2.39±0.37
Lu	0.36±0.11	0.32±0.04	0.76±0.39	0.61±0.74	0.31	0.28±0.07	0.28±0.11	0.52±0.22	0.25±0.41	0.09±0.1	0.09±0.1	0.26±0.11	0.11±0.13	0.37±0.06	0.33±0.12
Eu/Eu ⁺	1.42	1.49	0.96	0.80	1.26	0.89	1.46	1.04	1.04	1.25	1.25	1.13	0.93	1.36	1.24
(La/Yb) _N	0.64	0.61	0.66	0.93	0.08	1.24	1.52	1.41	1.43	4.29	3.00	3.35	1.27	1.31	0.78
Zr/Y	6.91	6.92	7.18	4.74	0.21	3.74	7.37	9.29	3.37	0.95	5.39	5.66	9.48	6.49	5.20
La/Sc	0.68	0.69	1.99	1.97	0.07	4.32	3.42	10.82	10.82	6.88	14.84	8.06	500	2.61	0.92
Th/Sc	0.10	0.10	0.35	0.61	0.01	0.43	1.06	6.01	6.01	7.00	7.00	2.90	1.43	0.21	0.19

(a) Koh and Yun, 2005; Shim et al., 2011; Choi et al., 2005; Kuritani et al., 2009; Choi et al., 2006. (b) Yun et al., 1997; Yun et al., 2000. (c) Kim et al., 1998; Park et al., 2000; Park and Suh, 2008; Anh et al., 2001; Lee et al., 2007; Lee et al., 2005; Cheong et al., 2006; Cheong et al., 2004; Lee et al., 2003. (d) Lee et al., 1997b. (e) Koh et al., 1996; Kim, et al., 2005; Kim et al., 2009; Kim et al., 1995; Kim and Park, 1996; Kim et al., 1997; Min and Kim, 1996; Park et al., 1997; Wee et al., 2007; Wee and Kim, 2009; Wee et al., 2005; Wee et al., 2006; Youn and Park, 1995; Yun and Hong, 2004; Yun et al., 2006; Lee et al., 2008; Cheong et al., 1998; Iwa et al., 1998; Koh and Yun, 2003. (f) Min and Kim, 1996; Park, 2009; Park et al., 1997; Lee et al., 2008. (g) Lee et al., 1997a. (h) Kim et al., 1999; Kim et al., 2008; Nam and Cho, 1995; Park et al., 2001; Sagong et al., 1997; Shin et al., 1998; Shin et al., 2001; Yun, 1995; Yun et al., 1999; Yun et al., 2002; Park et al., 2009; Kwon et al., 1995. (k) Moon et al., 1998. (l) Kim et al., 1998; Na et al., 1997. (m) Kim et al., 1995; Moon, 1998. (n) Kim et al., 1998; Lee et al., 1998; Ryoo et al., 2008; Yun et al., 2000. (p) Kim, et al., 1999; Kim et al., 2009; Noh et al., 2009; Park et al., 2006; Yun et al., 1996; Yun et al., 1997; Cho et al., 2009; Jaw, 1998.

Fig. 3. PAAS-normalized REE patterns and Primitive mantle-normalized spider diagrams of granite and diorites that consist of upper crust in the Korean Peninsula.

라기 이후의 심성암류의 기원물질이 서로 달랐을 가능성을 시사해준다고 볼 수 있다.

퇴적암류의 희토류원소 분포도: 한반도내 퇴적암류에서의 화학조성과 관련되어 발표된 자료는 화성암류나 변성암류에 비해 현저하게 적은 편이다. Figs. 4a에는 중생대 백악기와 쥐라기 셰일에서의 희토류원소 분포도가 도시되어 있고, Fig. 4b에는 고생대의 이암에서의 희토류원소 분포도가 도시되어 있다. Figs. 4a와 4b에서 볼 수 있는 바와 같이 중생대 셰일 및 고생대 이암에서의 희토류원소 분포도는 $(La/Yb)_N$ 이 1.24에서 1.41정도로 비교적 편평한 양상을 보여주며, Eu 이상도 거의 존재하지 않는다. 이는 한반도내 퇴적암류의 화학조성 특히 희토류원소 조성이 평균적인 대륙지각과 유사하다는 것을 시사해주는 것이다.

하부지각 및 맨틀

변성암류: 한반도내의 선크브리아기의 변성암류는

대부분이 앰피볼라이트상 이상의 고변성도를 받은 편마암류로 되어있다. 따라서 한반도내에서는 고변성도의 편마암류가 하부지각물질을 대표하고 있다고 볼 수 있다. 이들 암석들의 평균치에 따른 희토류원소 분포도는 대체적으로 편평한 양상을 보여주며, Eu 이상의 경우 편마암류들은 미세한 부(-)의 이상($Eu/Eu^*=0.8$)을 갖고 있다. 거미도에 의한 미량원소 분포도의 경우 편마암류들은 Ba, Nb, Sr, K_2O , TiO_2 가 결핍되어 있다.

화산암류: 맨틀 상부에서의 온도 상승 혹은 압력 감소로 인하여 맨틀이 부분용융되어 생기는 현무암질 마그마로부터의 냉각에 의해 생성된 현무암의 화학조성은 맨틀의 화학적 특성을 살펴볼 수 있는 좋은 자료가 된다. 그리고 안산암의 화학조성은 전지각(total crust)의 화학적 특성을 유추하는데 유용하게 활용된다. Fig. 5b와 5c의 한반도내 신생대와 백악기의 화산암류의 희토류원소 분포도는 경희토류가 결핍되어

생대의 분포도가 서로 다른 양상을 보여주며, 안산암 또한 신생대와 중생대의 분포도가 서로 다르게 나타난다.

토 의

대륙지각의 화학조성이 시간의 경과에 따라 어떻게 변화되어 왔는지에 대한 이해는 지각과 맨틀의 진화

과정을 밝혀내는데 중요하다. 그러므로 한반도를 구성하는 지각구성암석의 화학조성 특성은 한반도의 지각진화과정을 이해하는데 있어서 중요한 도구가 될 수 있다. 다음 절부터는 이에 대한 토의를 전개하고자 한다.

상부지각의 지구화학적 특성

Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이, 한반도 남부에

Fig. 6. Major element, HFSE(high field strength element) and LILE(large ion lithophile element) variation diagram of the upper crust rocks in the Korean Peninsula normalized by the representative value of the average chemical composition of the upper crust (Rudnick and Gao, 2003): Symbols are the same as in Fig. 3.

서 산출되는 화강암류에서의 희토류원소 분포도는 시대별로 약간씩 차이를 보인다. 화강암류의 희토류원소 분포도 특성을 시대별로 비교해 볼 때 중생대의 백악기와 쥐라기의 화강암류들은 비교적 편평하고 Eu 이상이 거의 존재하지 않는다(Figs. 4a와 4b). 반면에 중생대의 트라이아스기와 고생대 화강암류의 희토류원소 분포도는 중희토류가 결핍된 양상을 띠면서 Eu의 정(+)의 이상이 존재한다(Figs. 4c와 4d). 그리고 선캄브리아기 화강암의 희토류원소 분포도는 전반적으로는 중생대 백악기와 쥐라기의 희토류원소 분포도와 유사하지만, Eu의 정(+)의 이상이 존재한다(Fig. 4f). 섬록암의 경우 중생대 백악기와 선캄브리아기의 희토류원소 분포도가 대체적으로 편평한 양상을 가지면서 유사하고, 중생대 쥐라기와 트라이아스기의 희토류원소 분포도 또한 각각 상호간 유사하다. 이는 적어도 중생대 트라이아스기와 고생대에 생성된 화강암류들은 선캄브리아기 혹은 중생대 백악기 이후에 생성된 화강암류와는 다른 기원물질 혹은 마그마의 분화과정을 거쳐 상부지각을 형성하였음을 지시해준다고 볼 수 있다. 이와 같은 상부지각의 화학적 특성은 Wedepohl(1995) 혹은 Rudnick and Gao(2003)가 제시한 상부지각의 희토류원소 및 미량원소의 분포도 양상과 유사하다(Fig. 1 참조).

트라이아스기의 상부지각암석과 그 외 지질시대 암석에서의 지구화학적 특성의 차이는 Rudnick and Gao(2003)가 보고한 상부지각의 화학조성치를 토대로 주성분, HFSE(high field strength element) 및 LILE(large-ion lithophile element)를 규격화하여 비교한 도면에서도 나타난다(Fig. 6). 즉, 트라이아스기의 화강암은 TiO_2 가 다른 시기의 암석들에 비해 현저하게 부화되어 있고, Fe_2O_3 도 다른 시기의 화강암에 비해 부화된 지구화학적 특성을 보여준다. 그리고 선캄브리아기의 화강섬록암-섬록암계열의 암석들은 트라이아스기의 K_2O 와 선캄브리아기의 Na_2O , K_2O 를 제외하고는 대부분의 원소들이 1보다 작은 결핍된 지구화학적 특성을 보여주고, 쥐라기와 백악기의 암석들은 SiO_2 , Na_2O , K_2O 를 제외하고는 대부분의 원소가 1보다 큰 부화된 특성을 갖는다.

이와 같이, 중생대 초기인 트라이아스기 화강암과 섬록암계열 암석의 주성분, 미량성분 및 희토류원소의 분포도 특성이 다른 시기의 암석들의 화학조성 특성과 현저한 차이를 보여주는 것은 적어도 이 시기에 형성된 대륙지각이 그 이전인 고생대 및 선캄브리아

기 그리고 그 후기인 쥐라기 및 백악기 이후와는 다른 지구화학적 특성을 가진 기원물질로부터 진화되면서 상부지각을 만들었음을 지시해준다고 볼 수 있다.

하부지각, 전체지각 및 상부맨틀의 희토류원소 지구화학적 특성

경희토류의 결핍 및 Eu의 정(+)의 이상을 보여주는 신생대 및 중생대 현무암으로부터의 희토류원소 분포도는 유사하지만(Figs. 5b 및 5c), 거미도에서는 백악기의 맨틀의 지구화학적 특성을 지시해주는 현무암에서의 Nb과 TiO_2 의 결핍이 현저하다. 그리고 고생대 변성화산암의 희토류 원소 분포도는, 중생대 현무암의 Eu의 정(+)의 이상과는 다르게, Eu의 이상이 존재하지 않는 것을 포함하여 중생대 화산암에 비해 편평한 분포도 양상을 보여준다. 이와 더불어 거미도에서의 고생대 변성현무암의 화학조성은 Ba, Nb, Sr, P_2O_5 , TiO_2 의 결핍이 중생대 및 신생대의 현무암에 비해 현저하게 나타난다. 이는 신생대, 중생대, 고생대의 맨틀의 지구화학적 특성이 서로 다를 지시해주는 것이다. 그리고 현무암과 안산암의 희토류원소 분포도와 거미도 자료를 토대로 판단해 볼 때, 신생대 및 중생대 백악기 당시 한반도 전체지각의 지구화학적 특성은 맨틀기원 암석의 지구화학적 특성과 매우 유사했던 것으로 판단된다(Fig. 5의 b, c, e, f 참조).

그리고 고변성도의 편마암으로부터 판단할 수 있는 하부지각의 지구화학적 특성을 볼 때, 비록 논문엔 인용된 자료의 정확성 및 신뢰도에 대한 검토는 충분히 이루어지는 않았지만, 고변성도의 편마암류가 보여주는 희토류원소와 거미도는 이들 암석들이 중생대 쥐라기 이후의 화강암류를 형성한 마그마의 기원물질이었을 가능성이 높음을 지시해준다고 볼 수 있다. 향후, 보다 신뢰도 및 정확도가 높은 미량성분 함량 자료와 Sr, Nd 동위원소와 같은 추가자료의 확보를 통한 보다 세밀하고 체계적인 연구가 필요하다고 본다.

결론

한반도 지각을 구성하고 있는 암석들에 대해 1990년대 이후에 발표된 화학조성자료를 토대로 한반도 중남부지각의 지구화학적 특성을 밝혀내고자 하였다.

한반도의 하부지각의 지구화학적 특성을 대표하는

고변성도 편마암의 자료를 토대로 정리한 희토류원소 분포도와 거미도는 중생대 화강암류로부터 정리된 희토류원소 분포도 및 거미도와 유사한 양상을 보여주었다. 이는 선캠브리아기의 암석들이 중생대 유라기 이후에 생성된 화강암류의 기원물질이었을 가능성이 높음을 지시해주고 있다고 판단된다. 그리고 현재까지 보고된 한반도내 화강암의 지구화학적 특성을 토대로 판단해 볼 때, 중생대 트라이아스기와 고생대의 한반도 상부지각을 형성한 지각기원물질은 중생대 이후에 형성된 상부지각 구성 암석의 기원물질과는 지구화학적으로 달랐을 가능성이 크다. 앞에서도 언급한 바와 같이, 이 논문에서는 1990년대 이후 발표된 비교적 신뢰성 있는 미량원소 분석자료를 이용하여 정리하였다. 논문 정리과정에서 드러난 한반도 상하부 지각을 형성한 기원물질의 차이 특히 한반도내 상부지각 중 중생대 트라이아스기 및 고생대의 상부지각과 중생대 유라기 이후의 상부지각의 화학조성상의 차이에 대해 명확히 밝혀내기 위한 추가 연구가 필요하다고 본다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘행성광물자원 지화학 탐사 기초기술개발(과제번호: 12-3612)’과제의 연구수행 일환으로 수행되었다. 지질도면 작성에 도움을 준 한국지질자원연구원 조경오 석사에게 감사드린다. 그리고 이 논문의 문제점들을 지적하고 유익한 조언을 해주신 부경대학교 지구환경과학과 박계현 교수님과 경성대학교 좌용주 교수님께 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

- 고정선, 윤성효, 2005, 강원도 고성군 일대의 후기 마이오세 현무암의 암석학적 연구. 한국지구과학회지, 26, 78-92.
- 고정선, 윤성효, 이상원, 1996, 경주 남산일대의 A-형 화강암의 암석학 및 지화학적 특성. 암석학회지, 5, 142-160.
- 김건기, 김중선, 좌용주, 2005, 경상분지 남서부 와룡산 일대에 분포하는 백악기 화강암류에 관한 암석학적 연구. 암석학회지, 14, 12-23.
- 김상조, 김소구, 1983, 지진파를 이용한 남한의 지각구조 연구. 광산지질, 16, 51-61.
- 김상중, 이현구, 이찬희, 板谷徹丸, 1999, 북동부 경상분지의 화강암류에 대한 지구화학 및 K-Ar 연대. 자원환경지질, 32, 141-150.
- 김선균, 1995, 한반도의 지각구조에 관한 연구. 지질학회지, 31, 393-403.
- 김선웅, 김항목, 황병훈, 양경희, 김진섭, 2009, 울산 이진리 미문상화강암의 암석학적 및 지형학적 특성 연구. 암석학회지, 18, 211-221.
- 김성원과 기원서, 2010, 경기육괴 남서부 홍성지역 월현리 지구조 복합체의 변성화강암류에 대한 지질연대 및 지구화학 특징. 지질학회지, 46, 453-471.
- 김성원, 이창윤, 유인창, 2008, 예천전단대 북동부 명호지역 염리상 화강암류와 압쇄 편마암류에 대한 지구화학 및 Nd-Sr 동위원소 연구. 자원환경지질, 41, 299-314.
- 김용준, 박영석, 박천영, 김진, 1995, 나주-영암-목포 지역에 분포하는 화성암류의 암석화학과 화성활동에 관한 연구. 한국지구과학회지, 16, 442-461.
- 김용준, 이창신, 김희남, 박재봉, 이훈교, 1998a, 전남 장성 동부지역에 분포하는 화성암류에 대한 암석화학. 한국지구과학회지, 19, 154-170.
- 김용준, 조동룡, 이창신, 1998b, 한반도 남서부 남원일대에 분포하는 A형 대강 화강암의 암석학, 지화학 및 지구조적 의미. 자원환경지질, 31, 399-413.
- 김정빈, 박영석, 1996, 별교지역에 분포하는 심성암류의 암석화학과 지질시대에 대한 연구. 한국지구과학회지, 17, 227-240.
- 김진섭, 박맹언, 김근수, 1998, 충주지역 계명산층 내에 산출하는 알칼리 화강암의 지구화학적 연구. 자원환경지질, 31, 349-360.
- 김진섭, 이준동, 정남일, 1999, 경남 남해군 일원의 백악기 화산암류에 대한 암석화학적 연구. 한국지구과학회지, 20, 640-651.
- 김혜숙, 김진섭, 문기훈, 2009, 부산 금정산의 계명봉과 장군봉일대 백악기 화산암류에 관한 암석학적 연구. 암석학회지, 18, 1-17.
- 김희남, 신인현, 안건상, 박운선, 이창신, 1997, 강진-장흥지역 화강암류의 암석화학 및 Sr-Nd동위원소 조성. 한국지구과학회지, 18, 433-442.
- 나춘기, 이인성, 정재일, 1997, 전주 및 순창지역에 분포하는 염리상화강암류의 성인에 대한 연구(I)-암석지화학적 특성. 한국지구과학회지, 18, 480-492.
- 남기상, 조규성, 1995, 임실-순창 일대에 분포하는 염리상 화강암에 대한 지구화학적 연구. 한국지구과학회지, 17, 1-7.
- 노병섭, 박재문, 김승범, 양우현, 2009, 백악기 계화리층 내 현무암질 안산암-실트암 페퍼라이트. 한국지구과학회지, 30, 33-39.
- 대한지질학회, 1998, 한국의 지질. 시그마프레스, 802p.
- 류삼형, 정윤기, 이상원, 성종규, 류충렬, 2008, 진해 천자봉-시루봉 일원에 분포하는 마이오세 화산암(I): 암석기재와 암석화학적 특징. 암석학회지, 17, 108-131.
- 문상호, 박희인, Edward M. Ripley, 허순도, 1998, 연양수정광상 주변에서 산출되는 화강암류의 암석화학과 안정동위원소. 지질학회지, 34, 211-227.
- 민경원, 김성범, 1996, 설악산 부근의 화강암류에 대한 지구화학 및 성인. 암석학회지, 5, 35-51.

- 박계현, 송용선, 박맹언, 이승구, 류호정, 2000, 동북아시아 지역 선캄브리아 지괴에 대한 암석학, 지구화학 및 지구 연대학적 연구: 1. 지리산 지역 변성암의 변성연대. 암석학회지, 9, 29-39.
- 박배영, 서구원, 2008, 광양-하동지역에 분포하는 편마암류의 지구화학 및 변성작용. 한국지구과학회지, 29, 221-245.
- 박성욱, 장윤득, 황상구, 김정진, 2006, 경산칼데라 동부지역에 분포하는 백악기 화산암류의 암석학적 특징. 암석학회지, 15, 90-105.
- 박영록, 2009, 정선 일대에 분포하는 백악기 물운화강암체의 아다키틱한 지화학적 특성: 분별정출작용-동화작용에 의한 칼크-알칼리 마그마로부터 아다키틱한 마그마로의 전이. 지질학회지, 45, 345-360.
- 박영석, 김정민, 윤정환, 안건상, 1997, 고흥지역에 분포하는 백악기 심성암류의 지질시대와 암석화학적 연구. 한국지구과학회지 18, 70-83.
- 박영석, 김종균, 김진, 2001, 영광-김제지역 화강암류의 암석화학적 연구. 자원환경지질, 34, 55-70.
- 박주희, 김춘식, 김진섭, 성종규, 김인수, 이준동, 백인성, 1999, 장기 지역에 분포하는 중성-염기성 용암에 관한 암석학적 연구(1): 일반 지질 및 암석화학적 특징. 암석학회지, 149-170.
- 사공희, 권성택, 전은영, S.A. Mertzman, 1997, 화천 화강암의 암석학 및 지구화학. 지질학회지, 33, 99-110.
- 신인현, 박영석, 박천영, 정연중, Shigeru Lizumi, 1998, 보은화강암의 암석화학 및 Sr-Nd 동위원소 조성. 한국지구과학회지, 19, 632-640.
- 신인현, 박천영, 정연중, 2001, 전주지역 염리상화강암의 암석화학 및 Sr-Nd 동위원소 조성. 한국지구과학회지, 22, 1-9.
- 심성호, 박병준, 김태형, 장윤득, 김정훈, 김정진, 2011, 한반도 동남부 제3기 연일, 어일분지에 나타나는 현무암질 암의 암석학적 연구. 암석학회지, 20, 1-21.
- 안건상, 오창환, 박배영, 2001, 승주-순천 지역에 분포하는 정편마암류의 지구화학적 특성. 한국지구과학회지, 22, 163-178.
- 위수민, 김윤지, 최선규, 박정우, 유인창, 2007, 진동화강암체의 아다카이틱한 특성. 자원환경지질, 40, 223-236.
- 위수민, 김은호, 2009, 여수지역에 분포하는 백악기 화강암류에 대한 지화학적 연구. 한국지구과학회지, 30, 267-281.
- 위수민, 박세미, 최선규, 유인창, 2005, 한반도 남서부지역에 분포하는 백악기 화강암류에 대한 지화학적 연구. 자원환경지질, 38, 113-127.
- 위수민, 최선규, 유인창, 신흥자, 2006, 경상분지 서남부에 분포하는 백악기 진동화강암의 지화학적 특성: 아다카이틱(adakitic)한 특성을 중심으로. 자원환경지질, 39, 555-566.
- 윤석태, 박희인, 1995, 용화-설천 지역에 분포하는 백악기 반상화강암의 암석화학 및 유체포유물에 관한 연구. 자원환경지질, 28, 445-454.
- 윤성효, 고정선, 김영라, 1996, 부산 남부일원의 백악기 안산암질 화산암류에 대한 암석학적 연구: 송도-다대포지역을 중심으로. 한국지구과학회지, 17, 472-488.
- 윤성효, 고정선, 박기호, 이영애, 2000a, 울산 동부 마이오세 당시리화산암류에 대한 암석학적 연구. 암석학회지, 9, 169-186.
- 윤성효, 이문원, 고정선, 김영라, 안지영, 2000b, 청송 주왕산지역 대전사 현무암의 암석화학적 연구. 암석학회지, 9, 84-98.
- 윤성효, 이준동, 이상원, 고정선, 서윤지, 1997, 거제도 화산암의 암석학적 연구. 암석학회지, 6, 1-18.
- 윤현수, 1995, 포천-의정부 일대에 분포하는 화강암류의 산상과 암석화학. 암석학회지, 4, 91-103.
- 윤현수, 김대업, 박석환, 1999, 옥천화강암의 지구화학적 특성. 암석학회지, 8, 81-91.
- 윤현수, 홍세선, 2004, 진안일대에 분포하는 백악기 홍색 화강암류의 암석화학 및 물성특성. 암석학회지, 13, 161-177.
- 윤현수, 홍세선, 김정민, 2006, 경기북부-갈말-영북일대 백악기 홍색 각섬석흑운모화강암의 암석화학. 암석학회지, 15, 167-179.
- 윤현수, 홍세선, 이윤수, 2002, 포천-기산리 일대에 분포하는 주라기 대보화강암류의 암석 및 암석화학. 암석학회지, 11, 1-16.
- 이기화, 1979, 한반도의 지각구조에 관한 연구. 지질학회지, 15, 253-258.
- 이기화, 2010, 한반도의 지진활동과 지각구조. 지구물리와 물리탐사, 13, 256-267.
- 이승구, 김건한, 송용선, 김남훈, 박계현, 2007, 강원도 임원지역 우백질 화강편마암에 나타난 회토류원소 테트라드 효과의 지구화학적 의미. 암석학회지, 16, 27-37.
- 이승구, 김용재, 김건한, 2005, 영남육괴 중부 무주지역에 위치하는 선캄브리아기 화강편마암 및 앰피볼라이트 시추코아의 Sm-Nd 연대 및 지구화학적 특성. 암석학회지, 14, 127-140.
- 이승구, 이태중, 신흥자, 2008, 포항지구 심부 화강암류 코아로부터의 Rb-Sr연대 및 지구화학적 의미. 지질학회지, 44, 409-423.
- 이찬희, 이현구, 김경웅, 1997a, 충남탄전, 대동누층군의 세일과 탄질암에 관한 암석화학 및 환경지구화학적 특성. 자원환경지질, 30, 417-431.
- 이현구, 이찬희, 김상준, 1997b, 의성분지에 분포하는 백악기 경상누층군의 세일에 관한 암석지구화학. 자원환경지질, 30, 1-14.
- 정원석, 정상원, 나기창, 2006, 삼척지역 이천화강편마암의 암석화학과 지질구조. 암석학회지, 15, 25-38.
- 정창식, 권성택, 김정민, 장병욱, 1998, 경상분지 북부에 분포하는 온정리 화강암에 대한 암석화학적, 동위원소 지구화학적 연구. 암석학회지, 7, 77-97.
- 정창식, 길영우, 김정민, 정연중, 임창복, 2004, 영남육괴 북동부 죽변 지역 선캄브리아기 기반암류의 지구화학적 특징. 지질학회지, 40, 481-499.
- 정태웅, 1995, 1991-94년의 지진자료를 이용한 한반도 지각구조의 정량적 연구. 한국지구과학회지, 16, 152-157.

- 조동현, 윤성효, 고정선, 2009, 함평지역 백악기 화산암류에 대한 암석학적 연구. 암석학회지, 18, 93-114.
- 좌용주, 1998, 경상분지 고성지역의 화성암류에 대한 암석학적 연구 II. 미량원소 지구화학과 Rb-Sr 방사성 연대. 자원환경지질, 31, 473-483.
- Bohlen, S.R. and Mezger, K., 1989, Origin of granulite terranes and the formation of the lowermost continental crust. *Science*, 244, 326-329.
- Choi, S. H., Kwon, S.-T., Mukasa, S. B. and Sagong, H., 2005, Sr-Nd-Pb isotope and trace element systematics of mantle xenoliths from Late Cenozoic alkaline lavas, South Korea. *Chemical Geology*, 221, 40-64.
- Choi, S. H., Mukasa, S. B., Kwon, S.-T. and Andronikov, A. V., 2006, Sr, Nd, Pb and Hf isotopic compositions of late Cenozoic alkali basalts in South Korea: Evidence for mixing between the two dominant asthenospheric mantle domains beneath East Asia. *Chemical Geology*, 232, 134-151.
- Christensen, N.I. and Mooney, W.D., 1995, Seismic velocity structure and composition of the continental crust: a global view. *J. Geophys. Res.*, 100, 9761-9788.
- Clarke, F.W., 1889, The relative abundance of the chemical elements. *Phil. Soc. Washington Bull.*, XI, 131-142.
- Clarke, F.W. and Washington, H.S., 1924, The composition of Earth's crust. *USGS Professional Paper* 127, 117p.
- Cluzel, D., Lee, B.-J. and Cadet, J.-P., 1991, Indosinian dextral ductile fault system and synkinematic plutonism in the southwest of the Ogcheon belt (south Korea). *Tectonophysics*, 194, 131-151.
- Condie, K.C., 1989, Plate tectonics and crustal evolution (3rd ed.). *pergamon Press*, New York, 476p.
- Fountain, D.M., Percival, J. and Salisbury, M.H., 1990, Exposed cross sections of the continental crust-synopsis. In *Exposed Cross-sections of the Continental Crust* (eds. M.H. Salisbury and D.M. Fountain). *Kluwer*, Amsterdam, 653-662.
- Gill, R., 2010, *Igneous Rocks and Processes: a practical guide*. Wiley-Blackwell, John Wiley & Sons, Ltd. 428p.
- Goldschmidt, V.M., 1933, Grundlagen der quantitativen Geochemie. *Fortschr. Mineral. Jirst. Petrogr.*, 17, 112.
- Hart, R.J., Andreoli, M.A.G., Tredoux, M. and Dewit, M.J., 1990, Geochemistry across an exposed section of Archean crust at Vredefort, South Africa with implications for midcrustal discontinuities. *Chem. Geol.*, 82, 21-50.
- Ketcham, R.A., 1996, Distribution of heat-producing elements in the upper and middle crust of southern and west central Arizona: evidence from core complexes. *J. Geophys. Res.*, (B)101, 13611-13632.
- Kim, S.W., Kwon, S.H., Koh, H.J., Yi, K., Jeong, Y.-J. and Santosh, M., 2011, Geotectonic framework of Permo-Triassic magmatism within Korean Peninsula. *Gondwana Research*, 20, 865-889.
- Koh, J.S. and Yun, S. H., 2003, The Geochemistry of Yuk-sipryeong Two-Mica Leucogranite, Yeongnam Massif, Korea. *Jou. Petrol. Soc. Korea*, 12, 119-134.
- Kuritani, T., Kimura, J.-I., Miyamoto, T., Wei, H., Shimano, T., Maeno, F., Jin, X. and Taniguchi, H., 2009, Intraplate magmatism related to deceleration of upwelling asthenospheric mantle: Implications from the Changbaishan shield basalts, northeast China. *Lithos*, 112, 247-258.
- Kwon, S.-T., Shin, K.B., Park, H.K. and Mertzman, S.A., 1995, Geochemistry of the Kwanaksan alkali feldspar granite: A-type granite?. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, 4, 31-48.
- Lan, C.Y., Lee, T., Zhou, X.H. and Kwon, S.-T., 1995, Nd isotopic study of Precambrian basement of South Korea: evidence for early Archean crust. *Geology*, 23, 249-252.
- Lee, D.S., 1987, *Geology of Korea*. Geological Society of Korea (Lee, D.S., ed.) *Kyohaksa Co.* Seoul, 514p.
- Lee, J.I., Jwa, Y.-J., Park, C.-H., Lee, M. J. and Jacques Moutte, 1998, Petrology and geochemistry of the Youngju and Andong granites in the northeastern Yeongnam massif, Korea. *Geoscience Journal*, 2, 1-14.
- Lee, S.R., Cho, M., Hwang, J.H., Lee, B.-J., Kim, Y.-B. and Kim, J.-C., 2003a, Crustal evolution of the Gyeonggi massif, South Korea: Nd isotopic evidence and implications for continental growths of East Asia. *Precambrian Research*, 121, 25-34.
- Lee, S.R., Cho, M., Cheong, C.-S., Kim, H. and Wingate M. T.D., 2003b, Age, geochemistry, and tectonic significance of Neoproterozoic alkaline granitoids in the northwestern margin of the Gyeonggi Massif, South Korea. *Precambrian Research*, 122, 297-310.
- Miller, J.D. and Christensen, N.I., 1994, Seismic signature and geochemistry of an island arc: a multidisciplinary study of the Kohistan accreted terrane, northern Pakistan. *J. Geophys. Res.*, (B)99, 11623-11642.
- Oh, C.W., 2006, A new concept on tectonic correlation between Korea, China and Japan: Histories from the late Proterozoic to Cretaceous. *Gondwana Research*, 9, 47-61.
- 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.
- Park, Y.S., Kim, S.W., Kee, W.-S., Jeong, Y.-J., Yi, K. and Kim, J.M., 2009, Middle Jurassic tectono-magmatic evolution in the southwestern margin of the Gyeonggi Massif, South Korea. *Geoscience Journal*, 13, 217-231.
- Qiu, Y.M., Gao, S., McNaughton, N., Groves, D. I. and Ling, W., 2000, First evidence of >3.2 Ga continental crust in the Yangtze craton of south China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics. *Geology*, 28, 11-14.
- Ree, J. H., Cho, M., Kwon, S. T. and Nakamura, E., 1996, Possible eastward extension of Chinese collision belt in

- South Korea: Imjingang belt. *Geology*, 24, 1071-1074.
- Rudnick, R.L., 1992, Xenoliths-samples of the lower continental crust. In *Continental Lower Crust*(eds. D.M. Fountain, R. Arculus and R.W. Kay), Elsevier, Amsterdam, 269-316.
- Rudnick, R.L. and Fountain, D.M., 1995, Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. *Rev. Geophys.*, 33, 267-309.
- Rudnick, R. L. and Gao, S., 2003, Composition of the continental crust. In *The Crust*(ed. R.L. Rudnick) Vol. 3 *Treatise on Geochemistry*(eds. H.D. Holland and K.K. Turekian), Elsevier-Pergamon, Oxford, 1-64.
- Sun, S.-S., McDonough, W.F., 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A.D. and Norry, M.J. (eds.) *Magmatism in the ocean basins: Geological Society of London Special Publications*, 42, 313-345.
- Taylor, S.R., 1967, The origin and growth of continents. *Tectonophysics*, 4, 17-34.
- Taylor, S.R., 1971, Island arc models and the composition of the continental crust. In *Island Arc, Deep Sea Trenches and Back-Arc Basins* ed. M. Talwani) American Geophysical Union, 325-336.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985, The continental crust: its composition and evolution. Blackwell Scientific Publications, 312p.
- Weaver, B.L., Tarney, J., 1984, Major and trace element composition of the continental lithosphere. *Phys. Chem. Earth*, 16, 39-68.
- Wedepohl, H., 1995, The composition of the continental crust. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, 1217-1239.
- Wilson, M., 1989, *Igneous petrogenesis*. Unwin Hyman, London, 466p.

2012년 4월 17일 접수

2012년 4월 18일 심사개시

2012년 5월 1일 채택