

남미 콜롬비아의 태평양沿岸 골고나 섬產 코마티아이트의 岩石學的 및 地化學的 특징

진명식* · 신흥자
한국지질자원연구원

Petrographic and Geochemical Characteristics of the Komatiite from the Gorgona Islands in the Pacific Ocean of the Colombia, South America

Myung-Shik Jin* and Hong-Ja Shin

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요약: 남미 콜롬비아의 골고나섬에서 산출된 스피네켄스 조직을 갖는 제3기 코마티아이트를 암석학적 및 지화학적 연구하여, 이전의 연구결과 (남아프리카, 서부 호주 그리고 캐나다 온타리오 지역의 선캠브리아기 코마티아이트와 골고나섬의 제3기 코마티아이트 등의 연구)와 비교하였다. 이 시료는 암석의 비중(2.98), 밀도(3.2), 그리고 조암광물, 스피네켄스 조직, 주성분원소와 미량원소, 희토류원소 등의 함량 및 분포경향 등, 코마티아이트의 암석학적, 지화학적 특징을 잘 나타낸다. 특히 희토류원소의 분포경향은 이 골고나섬의 코마티아이트가 depleted mantle에서 만들어진 마그마로부터 결정된 것임을 암시하며, 이는 캐나다 온타리오 일대의 Munro Township지역의 선캠브리아기 코마티아이트와 아주 유사한 특성을 보여주는 Group I의 휘석 코마티아이트 또는 현무암질 코마티아이트임이 확실시된다.

주요어: 코마티아이트, 제3기, 골고나섬, 콜롬비아

Abstract: A spinifex textured komatiite sample of Early Tertiary age, from the Gorgona Islands of Colombia in South America, was petrographically and geochemically studied, and compared with the previous researches of the komatiites including other Precambrian komatiites in South Africa, Western Australia and Canada. The sample shows the komatiitic characteristics in its petrography and geochemistry very well, i.e. in high specific gravity (2.98) and density (3.2), rock forming minerals, spinifex texture, major and trace element abundances and REE pattern. In particular the REE pattern for it strongly suggests that the Gorgona komatiite must have been crystallized from a magma generated from a depleted mantle as that of Munro Township area in Ontario, Canada which is pyroxenite komatiite or basaltic komatiite of Group I of the Archean.

Key words: komatiite, Early Tertiary, Gorgona, Colombia

서론

코마티아이트(komatiite)는 지구의 맨틀이 자체 내(수십 km-약 300 km)에서 부분용융을 받아 만들어진 마그마가 지각변동이 일어날 때, 맨틀로부터 지표까지 급상승 및 분출하여, 그대로 굳어진 암석으로서 대부분

유리질로 되어 있는 것이 특징이다. 전 세계적으로 분포되어 있는 코마티아이트는 대개 3.6 Ga의 편마암류인 기반암을 약 27억 년 전에 부정합으로 덮은 초염기성 또는 염기성 화산암류로서, 그 후의 변성작용에 의해 Greenstone belt를 이루고 있고, 시생대 전후의 암석 판별에도 많은 도움을 주고 있으나, 지금 여기서 우리

*Corresponding author: Tel. 82-42-868-3373, E-mail. msjin@kigam.re.kr

가 기술하고 있는 이 코마티아이트는 顯生이언(백악기 말-제삼기초의 것으로 추정)의 것으로는 세계적으로 유일한 것이라는데 의미가 있다고 생각한다.

저자 중의 진명식은 1994년 9월 1일부터 9월 30일 까지 한 달간, KOICA의 해외전문가 파견 계획의 일환으로 남미 콜롬비아의 수도 보고타(Bogota)에 있는 지질광물연구소(INGEOMINAS; Instituto Nacional de Investigacion Geologico-Mineras)에 지하학탐사 자문차 일한 바 있다. 그때 콜롬비아의 3대 도시 중의 하나인 칼리(Cali)에 있는 INGEOMINAS의 지소에서 세계적으로 희귀한 顯生이언의 코마티아이트를 보관하고 있던 연구원 Mr. Carlos한테서 그가 직접 Gorgona섬에서 채취해 온 이 코마티아이트(길이 9 cm, 폭 6 cm, 두께 3 cm의 크기)를 내게 주면, 이것에 관한 논문을 발표할 뿐만 아니라, 그의 이름으로 우리 연구소 박물관에 기증하겠노라는 약속을 하고 이것을 얻어온 바 있다.

이 논문은 코마티아이트가 우리나라에서는 아직 발견된 바가 없고, 국내 지질학자들에게는 다소 생소한 것으로 여겨져, 이 콜롬비아 코마티아이트에 관한 이전 연구자료(Gansser, 1950; Gansser *et al.*, 1979; Echeverria, 1980)와 필자들이 연구한 것을 간단히 비교하고 소개하려는데 그 목적이 있다.

이번 연구에서는 이 암석을 대상으로 현미경적 연구, X선 회절분석(XRD), 전자현미분석(EPMA) 등을 통해서 암석의 산출상태, 광물의 공생관계와 물리화학적 특성을 규명하였다. 또한 각각의 원소들은 우리 연구원(KIGAM)의 분석부에서 실시하였다. 즉 주성분원소는 X선 형광분석기(XRF)와 양성자 유발 X선 방출분석기(PIXE, Proton Induced X-ray Emission Spectrography)로, 몇 종의 미량원소는 플라즈마 유도발광분석기(ICP-AES)로, 그리고 희토류원소는 플라즈마 유도 질량분석기(ICP-MS)로 분석하였다.

地形과 一般地質

골고나섬의 지형과 지질을 Gansser(1950), Gansser *et al.*(1979), Echeverria(1980) 등의 연구에 따르면, 이 섬은 남미 콜롬비아의 태평양 연안, 즉 서경 78° 12', 북위 2° 58'에 위치하고 있으며, N45°E 방향으로 연장 8 km, 폭 2.5 km의 섬이다(Fig. 1).

이 섬은 조밀한 열대림으로 덮혀 있고, 섬의 장축 방향으로 주릉선(主稜線)이 발달되어 있으며, 이 능선 양쪽의 경사는 매우 급하다. 특히 서쪽은 경사가 거의 90°에 가까운 절벽을 이루고 있으며, 이 섬의 서남쪽에는 좁은 해협으로 분리되어 있는(간조시에는 땅으로 서로

연결되는) 작은 섬, 즉 골고닐라(Gorgonilla)가 있다.

이 골고나섬은 지각의 상승(上昇, uplifted)과 경동(傾動, tilted)에 따른 일련의 단층괴(斷層塊, fault block)로 이루어져 있고, 섬의 장축에 NE방향으로 주단층(主斷層)인 타잔단층(Tarzan Fault)이 발달되어 있음으로써, 서쪽에서는 부분적으로 층서가 반복되기도 한다. 이 섬의 지질계통은 대개 다음과 같다(Table 1).

이 골고나섬에 분포하는 암석을 아래로부터 기술하면 다음과 같다(Gansser, 1950; Gansser *et al.*, 1979; Echeverria, 1980). 코마티아이트를 함유하는 복합체의 기저는 감람암(dunite and wehrlite)으로 구성되어 있으며, 이 감람암을 조립질의 취반상(poikilitic) 반려암과 트록톨라이트(troctolite)가 덮고 있으며, 이를 다시 미정질 반려암(microgabbro)이 덮고 있고, 그 위에 코마티아이트와 배개상 현무암(pillow basalt)이 호층을 이룬 층이 덮고 있다. 다시 그 위에 초염기성 응회질 각력암이 덮개암으로 있다.

그리고 이들 복합체 위에 전혀 변형받지 않은(undeformed) 에오세-마이오세의 세립질 사암층, 셰일층 그리고 화석이 많은 석회암층이 퇴적되어 있다. 이 섬의 서남쪽에 있는 작은 섬, 즉 골고닐라(Gorgonilla)의 지질은 골고나섬과 비슷하나, 취반상 반려암, 트록톨라이트(troctolite), 미정질 반려암, 그리고 배개상 현무암이 관찰되며, 여기서는 기저 감람암은 볼 수 없다.

岩石 · 鑛物의 기재

岩石기재

이 콜롬비아산 코마티아이트는 지금까지 알려진 많은 선캠브리아기의 코마티아이트와는 달리, 변형받지 않은 제3기 퇴적암층에 의해 정합적으로 덮혀있으므로 세계적으로 유일하게 중생대 백악기말 또는 제3기초(지금부터 약 6천만년전?)에 분출된 것으로 추정하고 있다.

이 코마티아이트는 우선 전체적으로 새까맣고(黑色) 치밀하며, 매우 높은 밀도(3.204)와 비중(2.98)을 갖는다. 그리고 잘 관찰해 보면 바탕보다도 더 칠흑(漆黑)같이 검은 여러 개의 긴 직선과 같은 띠구조가 발달되어 있는 것이 특징인데 이와 같은 구조를 스피니펙스(spinifex)라고 한다(Fig. 2). 그리고 Fig. 2의 좌상부에는 분출암에서 볼 수 있는 5 mm×3 mm정도의 기공(氣孔, vesicle)을 볼 수가 있다.

스피니펙스는 마그마가 맨틀내에서 약 1650±20°C (Echeverria, 1980) 이상의 고온과 고압 하에 있다가 지표로 분출할 때, 갑자기 常溫과 常壓에서 냉각되므로

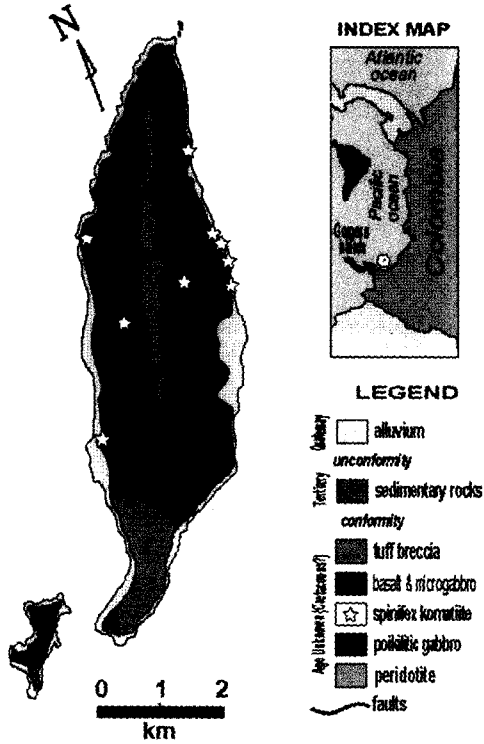


Fig. 1. Generalized locality and geological map of the Gorgona Island.

Table 1. Simplified geology of the Gorgona Island, Colombia, South America (Echeverria, 1980).

Quaternary	Beach Deposit Landslide Terrace ~Unconformity~	
Tertiary		Sedimentary Rocks
		~ Conformity~
Cretaceous (?)	Basic Tuff Breccia Basalt and Micro Gabbro Spinifex Komatiite Poikilitic Gabbro and Troctolite Peridotite(Dunite and Wehrlite)	

써, 충분한 결정을 이루지 못하고, 상승중인 마그마 내에서 가장 먼저 결정된 일부 감람석 또는 휘석 등이 침상 또는 띠모양으로 결정되어 이와 같은 특별한 스피니펙스 조직을 갖는 것으로 알려져 있다.

이 코마티아이트의 微細구조가 어떤 모양을 하고 있는지 현미경으로 40-200배 확대하여 본 결과 아래 사진과 같다(Fig. 3). 치밀한 바탕부분과 스피니펙스가 있는 부분이 서로 각각 다른 것을 알 수 있다. 즉 치밀



Fig. 2. A komatiite sample from the Gorgona Island shows a spinifex texture in dark grey compact groundmass. A vesicle seen in the circle suggests that it contained volatile components during solidified.

한 부분은 스피니펙스가 있는 부분보다 결정 정도가 낮은 隱微晶質 또는 微晶質로 되어 있으며, 스피니펙스가 있는 부분은 일종의 고리 모양의 감람석 결정으로 되어있다. 스피니펙스의 일부는 본래 감람석이었다가 지표에서 후에 다시 변질작용을 받아서 사문석(serpentine)으로 변한 것도 있다.

이 코마티아이트는 주로 감람석(forsterite), 사장석(plagioclase), 휘석(pyroxene) 등 은미정질의 광물과 유리질로 구성되며, 부성분광물로는 스피넬群 중의 크롬철석 계열인 Mg크롬철석(magnesiochromite), 안티고라이트(antigorite), 크롬자철석(Cr-magnetite), 황철석(pyrite), 녹니석(chlorite), 불투명광물(opaque minerals), 활석(talc), 흑운모(biotite), 방해석(calcite) 등이 관찰된다.

鑛物의 産出상태와 共生관계

이 코마티아이트에 함유되어 있는 광물을 확인하기 위해, 우리 연구원에 있는 High Resolution Multi-Purpose X-Ray Diffraction System(Philips Model X'PERT-MPD)으로 회절분석을 하였으며, 그 분석조건은 Cu target와 Ni-filter를 사용하였고, 가속전압 및 전류는 40 Kv/30 mA 아래에서, receiving slit 0.3 mm로 5~80° 2θ구간으로 분석하였다(Fig. 4).

감람석: 감람석은 모두 육안으로는 볼 수 없는 은미정질이며 현미경하에서 신장된 반정(elongate phenocrysts)상태의 자형, 반자형과 타형을 이루며 스피니펙스 조직을 보여준다(Fig. 3). 감람석의 외형은 매우 다양하여 골격상(skeletal) 또는 수지상(dendritic) 결정 등을 보여준다(Fig. 5 and 6). 감람석은 대개 침상의 단사휘

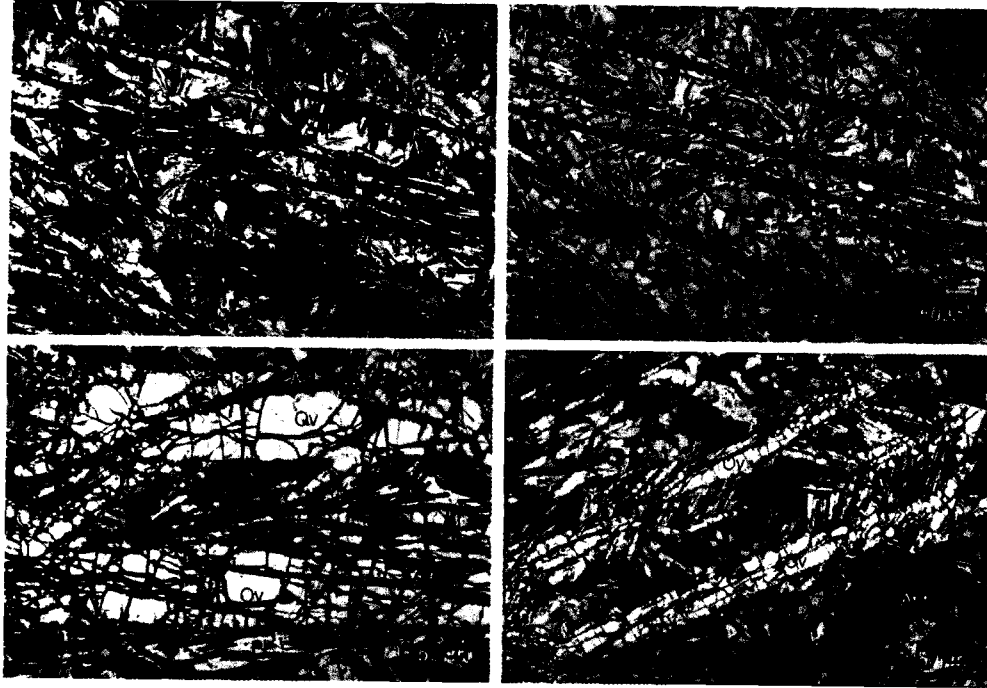


Fig. 3. Photomicrographs of plate microspinfex texture (1, 2) and cumulus texture (3, 4). Abbreviations: Spi; spinifex tex., Cum; cumulus tex., Ov; olivine, Py; pyroxene, Ant; antigorite, Op; opaque minerals.

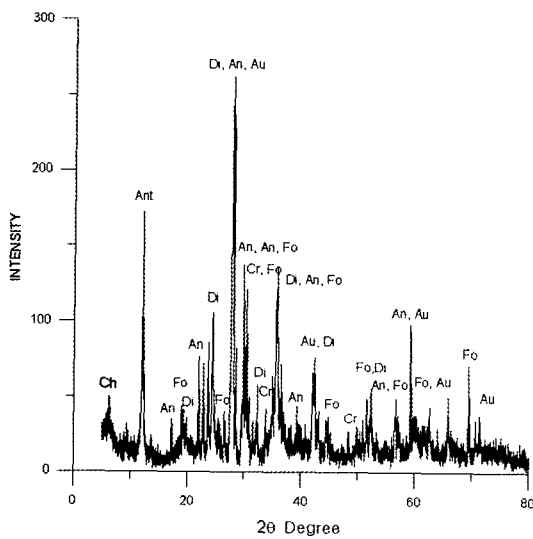


Fig. 4. XRD pattern for komatiite samples. Abbreviations: Fo: fosterite, An: anorthite, Ant: antigorite, Di: diopside, Au: augite, Ch: chlorite, Cr: chromite.

석(clinopyroxene)과 사장석(plagioclase)에 둘러싸여 있고, 일부 포이킬리틱(poikilitic) 조직을 보이는 감람석은 지표에서 굳어진 후에 열수변질작용을 받아 대부분

사문석화(antigoritized)되어 있다(Fig. 6).

휘석: 휘석도 육안으로는 볼 수 없는 은미정질이며, 대개 침상의 반자형 또는 타형이며, 주로 감람석과 연정(intergrowth)되어 있거나 응집되어 나타난다. 일부 휘석은 감람석에서 볼 수 있는 골격상 조직을 보여준다(Fig. 7-1, 2). 이러한 골격상 또는 침상은 過冷(supercooled)된 액체 또는 유리질로부터의 불평형 정출작용을 암시해 준다. 일부 휘석은 칼날(blade)상, 주상(prismatic) 또는 가지모양(branching)의 형태를 띠며, 사장석과 교호하면서 사문석화된 감람석에 포획되어 있는 것도 있다(Fig. 7-3, 4). 이는 감람석보다 후기에 결정되었음을 시사해 준다. 또한 부분적으로 사문석(antigorite) 및 활석(talc)으로 변질되어 산출된다.

사장석: 사장석은 X선 회절분석 결과 주로 회장석(anorthite, ordered)으로 확인되었으며, 대개 은미정질의 침상 또는 래스(lath)상으로 산출되며, 휘석과 유리질 물질 그리고 스피넬과 밀접한 관계를 가지며 산출된다. 흔히 휘석에 의해 둘러 쌓여있고(Fig. 8-1, 2), 사장석이 기타 다른 광물과 평행하게 배열되어 입간(interganular)조직을 나타내는 것으로 보아 이 암석의 마지

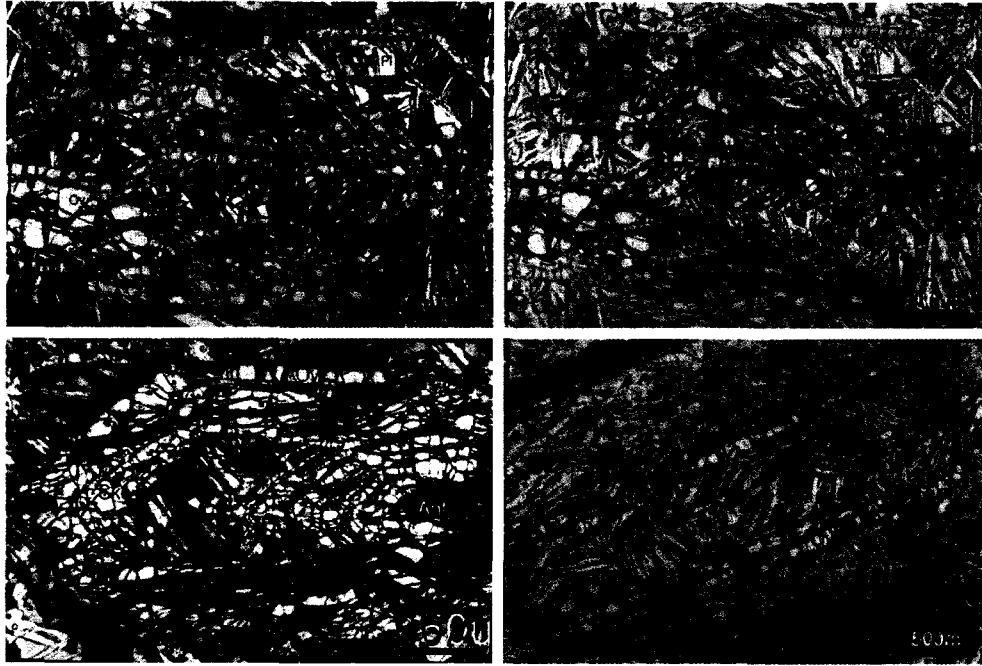


Fig. 5. Photomicrographs of skeletal olivine and pyroxene crystal. Abbreviations: Ske; Skeletal crystal, Ov; olivine, Py; pyroxene, Ant; antigorite, Op; opaque iron oxide, pl; plagioclase.

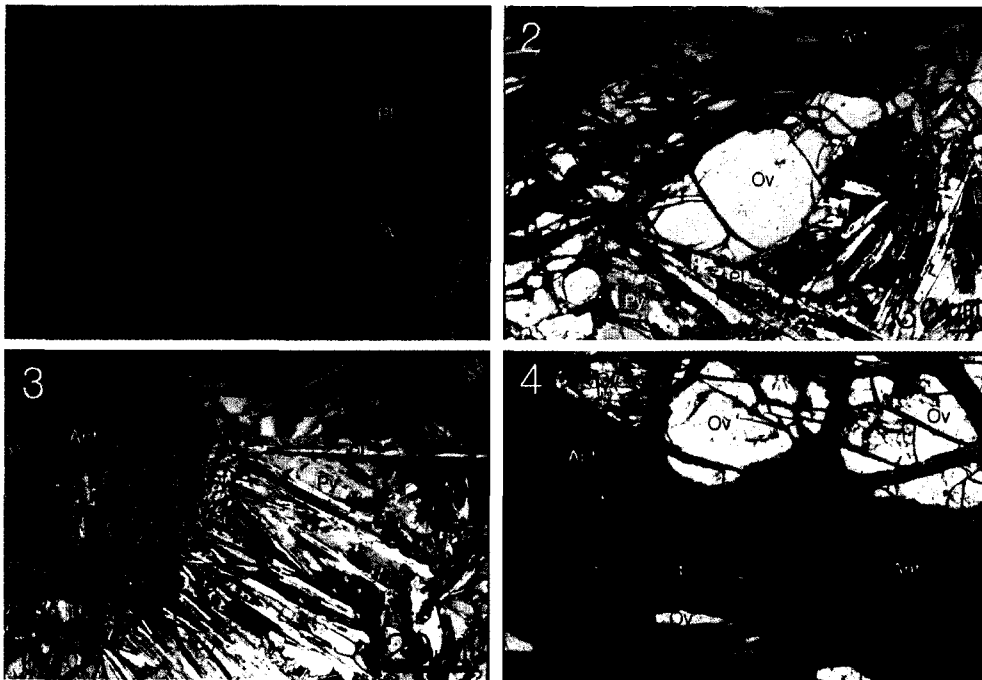


Fig. 6. Photomicrographs showing the minerals of olivine. 1) Composed of dendritic crystal of olivine, 2 and 3) Phenocrysts of olivine are embedded in a matrix of clinopyroxene and plagioclase. 4) Partly serpentinized phenocrysts of olivine. Abbreviations: Ov; olivine, Py; pyroxene, Pl; plagioclase, Ant; antigorite, Op; opaque iron oxide.

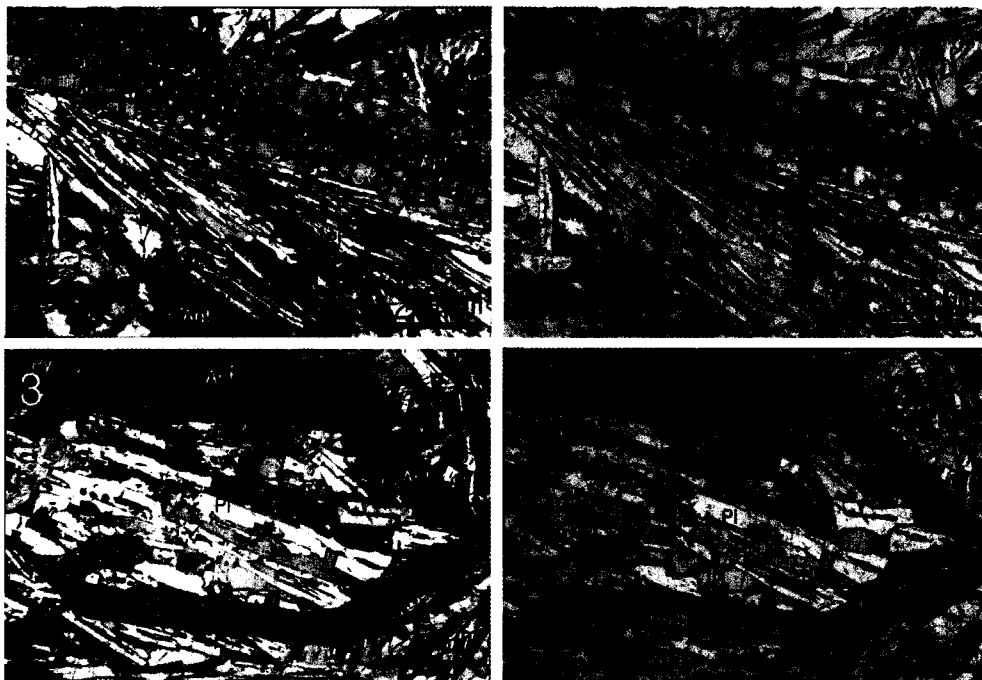


Fig. 7. Photomicrographs showing the minerals of pyroxene. 1, 2) Skeletal interplate clinopyroxene from olivine of spinifex texture. 3, 4) Pyroxene enclosed by serpentinized granules of olivine. Abbreviations: Py; pyroxene, Ov; olivine, Pl; plagioclase, Ant; antigorite, Op; opaque iron oxide.

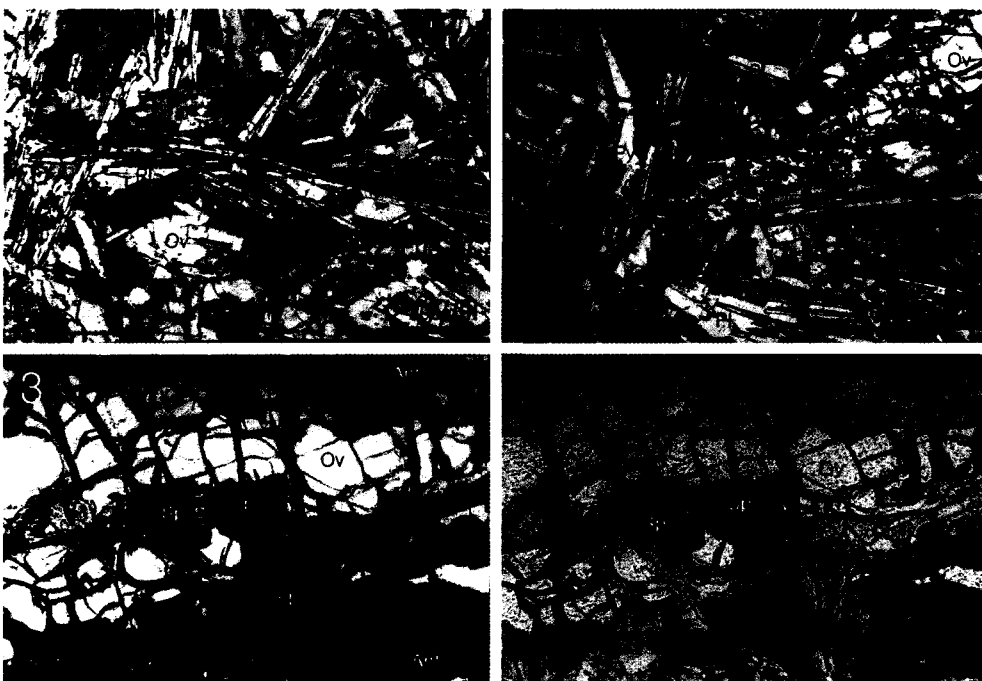


Fig. 8. Photomicrographs showing the minerals of plagioclase and spinel. 1, 2) Consists of plagioclase, pyroxene, spinel and talc. 3, 4) Spinel(chromite) are embedded in a matrix of serpentinized olivine. Abbreviations: Pl; plagioclase, Sp; spinel(chromite), Py; pyroxene, Ov; olivine, Ant; antigorite, Op; opaque iron oxide.

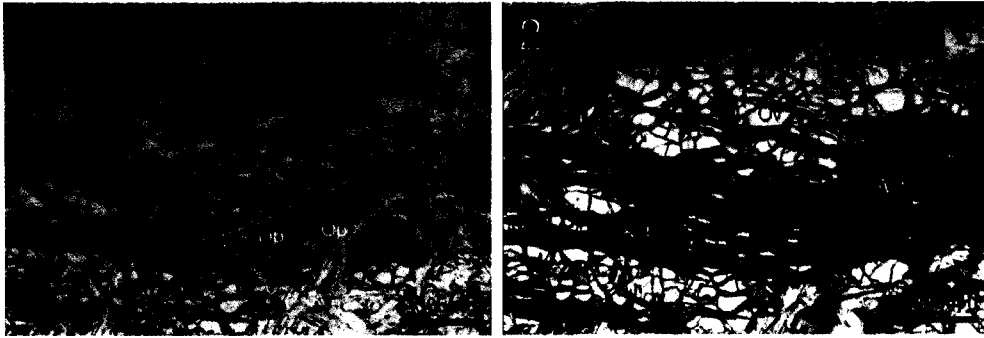


Fig. 9. Photomicrographs showing the occurrences of antigorite. 1, 2) Antigorite showing mesh structure derived from olivine and inclusions of spinel and opaque iron oxide. Abbreviations: Op; opaque iron oxide, Py; pyroxene, Ov; olivine, Ant; antigorite.

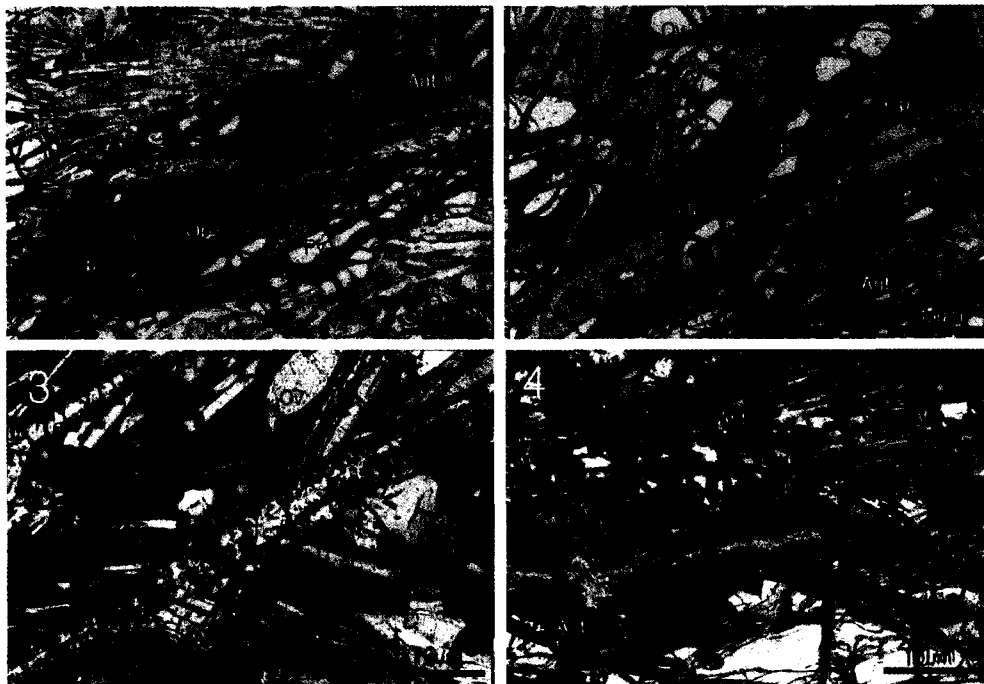


Fig. 10. Photomicrographs showing the occurrences of accessory minerals. 1, 2) Opaque iron oxides and pyrite in serpentinized olivine. 3) Veinlet of talc which is intergrown with the plagioclase and biotite. 4) Plagioclase is replaced by calcite. Abbreviations: Op; opaque iron oxide, Ant; antigorite, Tc; talc, Pl; plagioclase, Bt; biotite, Cc; calcite, Py; pyroxene, Ov; olivine, Pyr; pyrite.

막 결정시기에 생성된 것으로 사료된다. 이들 사장석은 후에 열수변질작용을 받아 일부는 세맥의 방해석으로 산출되기도 한다.

스피넬: 스피넬은 은미정질이며, 대개는 자형으로 산출되는 것이 특징이며, 암갈색 또는 갈색을 띤다. 주로 감람석 또는 휘석과 접하며, 사문석화된 반정의 감람

석내에 군집을 이루며 포획되거나 산재되어 나타난다. 이러한 광물의 생성으로 보아 스피넬은 일부 감람석의 결정 전 stage에 결정되었음을 시사한다(Fig. 8-3, 4).

사문석(serpentine): 이 코마티아이트에 함유된 사문석은 X-선 회절분석 결과, 주로 엔티고라이트(antigorite)와 리자다이트(lizardite)로 구성되어 있음이 확인되었

Table 2. Major oxides (%) and trace element (ppm) abundance for the komatiites of the Cretaceous in the Gorgona Island, and the other the Archean in the Western Australia, South Africa and Ontario, Canada.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
SiO ₂	40.25	41.86	45.81	49.20	41.61	44.72	52.73	52.22	47.37	52.13	44.90	46.00	42.23	51.60	48.85	50.40	43.37	46.12	49.76
TiO ₂	0.16	0.24	0.37	1.12	0.31	0.52	0.85	0.56	0.46	1.09	0.19	0.32	0.34	0.65	1.14	1.39	0.67	0.63	1.27
Al ₂ O ₃	3.58	5.44	7.53	15.75	2.70	3.25	9.83	5.42	6.79	13.33	5.30	7.40	7.59	13.30	7.55	12.60	10.97	12.17	13.8
Fe ₂ O ₃	4.64	3.40	1.49	*12.40	5.63	6.02	1.23	0.98	1.18	2.24	*10.40	*11.50	*12.17	*11.70	2.02	*13.90	*12.55	*12.37	*13.49
FeO	4.43	5.09	10.13		4.36	5.52	9.70	8.88	8.08	9.94				11.09					
MnO	0.18	0.18	0.14	0.32	0.17	0.19	0.22	0.22	0.19	0.21	0.18	0.22	0.21	0.19	0.02	0.24	0.18	0.20	0.23
MgO	34.78	29.63	21.75	5.80	30.58	25.35	10.10	15.25	20.39	6.35	33.60	26.50	24.27	10.00	16.73	5.11	16.56	17.79	8.12
CaO	2.63	4.93	8.78	11.79	4.29	6.97	9.99	12.83	8.31	8.98	0.02	0.01	7.35	10.40	11.43	11.90	9.30	10.38	10.56
Na ₂ O	0.14	0.23	1.48	2.08	0.15	0.49	2.65	1.21	0.39	2.97	5.00	7.40	0.32	2.16	0.81	1.21	1.23	1.15	2.82
K ₂ O	0.04	0.02	0.27	0.24	0.03	0.05	0.46	0.09	0.06	0.26	0.35	0.45	0.05	0.11	0.07	0.77	0.09	0.03	0.13
P ₂ O ₅					0.02		0.06	0.05	0.05	0.07	0.08	0.10			0.30		0.04		
H ₂ O+	9.29	8.37	2.08	1.57	8.81	5.58	1.87	2.05	5.26	1.97			5.57		5.51	2.30	4.52		
H ₂ O-					0.22	0.21	0.16	0.09	0.25	0.11									
CO ₂					0.26	0.14	0.17	0.17	0.33	0.07									
Total	100.12	99.39	99.65	100.27	98.87	99.13	99.93	100.02	99.11	99.72	100.02	99.90	100.10	100.11	105.52	99.82	99.52	88.47	88.69

*Indicate as total Fe₂O₃

- 1; Olivine komatiite, mean value of 2 samples, Yilgarn Block, Western Australia (Nesbitt, 1971).
- 2; Spinifex komatiite, mean value of 4 samples, Yilgarn Block, Western Australia (Nesbitt, 1971).
- 3; Basaltic komatiite(high Mg-basalt), mean value of 2 samples, Yilgarn Block, South Africa (Nesbitt, 1971).
- 4; Tholeiitic basalt, Yilgarn Block, Western Australia (Nesbitt, 1971).
- 5; Peridotitic komatiite, mean value of 8 samples, Komati Formation, Baberton Mountain Land, South Africa (Vijjoen and Vijjoen, 1969).
- 6; Peridotite komatiite, mean value of 3 samples, Sandspuit Formation, Baberton Mountain Land, South Africa (Vijjoen and Vijjoen, 1969).
- 7; Basaltic komatiite, mean value of 3 samples of Badplatt type, South Africa (Vijjoen and Vijjoen, 1969).
- 8; Basaltic komatiite, mean value of 5 samples of Badplatt type, South Africa (Vijjoen and Vijjoen, 1969).
- 9; Basaltic komatiite, mean value of 4 samples, Geluk type, South Africa (Vijjoen and Vijjoen, 1969).
- 10; Tholeiitic basalt, mean value of 4 samples, Onverwacht Group, South Africa (Vijjoen and Vijjoen, 1969).
- 11; Peridotite komatiite, mean value of 3 samples(30%?MgO), Munro Township, Canada (Arndt et al., 1977).
- 12; Peridotite komatiite, mean value of 6 samples(30%?MgO), Munro Township, Canada (Arndt et al., 1977).
- 13; Spinifex peridotitic komatiite, mean value of 3 samples, Munro Township, Canada (Arndt et al., 1977).
- 14; Basaltic komatiite, mean value of 2 samples, Munro Township, Canada (Arndt et al., 1977).
- 15; Basaltic komatiite, Michipicoten, Canada (Brook and Hart, 1972).
- 16; Tholeiitic basalt, mean value of 2 samples, Munro Township, Canada (Arndt et al., 1977).
- 17; Spinifex komatiite for this study
- 18; Spinifex komatiite, mean value of 11 samples, Gorgona, Colombia (Echeverria, 1980).
- 19; Tholeiitic basalt, mean value of 5 samples, Gorgona, Colombia (Echeverria, 1980).

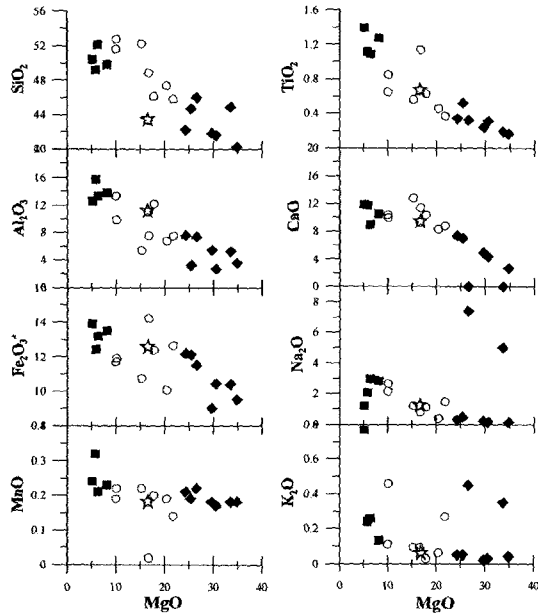


Fig. 11. MgO versus other major elements diagram for the komatiite from the Gorgona islands and other Archean terranes. Filled diamond; peridotite komatiite, open circle; pyroxene komatiite or basaltic komatiite, and filled square; tholeiitic basalt. The asterisks denote the major oxide abundances of the Gorgona komatiite sample.

다. 대개 망상구조를 보이며, 감람석이나 휘석의 변질 작용에 의해 생성되었음을 시사한다. 그리고 이들 사문석은 스피델과 불투명한 철산화물을 포획하는데(Fig. 9). 이는 감람석 또는 휘석이 변질작용을 받으면서 이들 광물의 파괴(breakdown)에 의한 이차 생성물(alteration product)로 생각되며, 이들은 단속적이나 길게 신장되어 산출되며, 결정 모양으로는 어떤 광물인지 감정이 불가능하다. 그밖에 활석 및 녹니석과 밀접한 관계를 가지며 일부 방해석으로 교대 되어 있다. 그리고 황철석은 감람석(스피니헬스)이 사문석으로 변질된 주위에 자형으로 산출되는 경우가 있다(Fig. 10-2).

기타 부성분 광물: 불투명한 철 산화물 및 황철석이 주를 이루며, 주로 사문석화된 감람석내에 은미정질입자로 일정한 방향성을 가지며 산재한다(Fig. 10-1, 2). 활석은 세맥상으로 흑운모, 사장석과 함께 산출된다(Fig. 10-3). 녹니석은 X-선 회절분석 결과 사녹니석(clinochlore, 1M11b-2)으로 사문석과 함께 산출되고, 방해석은 사장석의 변질물로 세맥(veinlet)으로 관찰된다(Fig. 10-4).

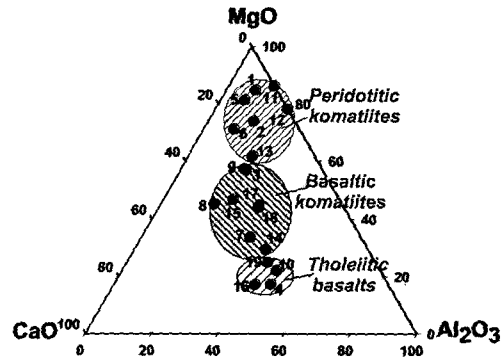


Fig. 12. MgO-Al₂O₃-CaO ternary diagram for the ultramafic rocks associated with komatiites from the Gorgona islands and other Archean terranes.

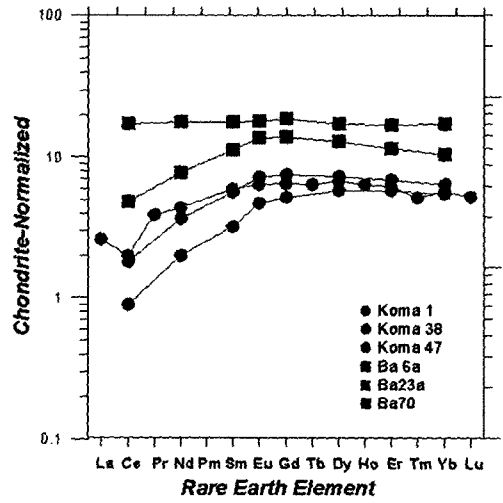


Fig. 13. REE patterns for the komatiites and basaltic rocks in the Gorgona Island Colombia, South America. (1*); Cretaceous Basaltic komatiite from the Gorgona Island analysed by ICP/MS in KIGAM, and others (38, 47, 6A, 23A, 70) from the Gorgona Island (Echeverria, 1980)

이상과 같이, 각 광물은 광물의 공생과 관계없이 성분의 변화가 거의 없는 것으로 확인되었다. 이는 각 광물이 분출된 마그마에서 거의 동시에 급히 정출되었음을 의미한다.

地化學的 연구

岩石化學

주성분원소: 이 코마티아이트의 주성분원소의 함량은 Table 2에서 볼 수 있듯이, 남아프리카, 호주의 서

Table 3. Rare earth elements abundance for the komatiites and basaltic rocks in the Gorgona island, Colombia, South America (in ppm).

	Komatiites				Basalts	
	1*	38	47	6A	23A	70
La	0.996					
Ce	1.96	1.77	0.88	4.72	17.05	16.99
Pr	0.535					
Nd	3.15	2.60	1.44	5.60	10.77	12.71
Sm	1.38	1.30	0.74	2.58	3.01	4.12
Eu	0.559	0.63	0.41	1.19	1.14	1.56
Gd	2.03	2.35	1.61	4.37	4.18	5.84
Tb	0.419					
Dy	2.67	2.87	2.27	5.07	4.13	6.76
Ho	0.573					
Er	1.59	1.77	1.48	2.94	2.31	4.35
Tm	0.220					
Yb	1.43	1.61	1.38	2.63	2.08	4.29
Lu	0.203					
ΣREE	17.715	14.90	10.21	29.10	44.67	56.62
(La/Lu) _{CN}	0.52					
(Eu/Sm) _{CN}	1.072	1.286	1.471	1.224	1.005	1.005
(Ce/Sm) _{CN}	0.343	0.328	0.287	0.442	1.367	0.996
(Sm/Nd) _{CN}	1.348	1.538	1.581	1.417	0.279	0.997

(1*); Cretaceous Basaltic Komatiite from the Gorgona Island analyzed by ICP/MS in KIGAM, and others (38, 47, 6A, 23A, 70) from the Gorgona Island (Echeverria, 1980).

부 그리고 캐나다의 온타리오 지역의 코마티아이트 그리고 그것과 같이 수반되는 암석들의 주성분원소의 함량을 같이 나타냈다.

이 골고나 코마티아이트의 주성분원소(wt %) 중, SiO₂는 43.37%, TiO₂는 0.67%, Al₂O₃는 10.97%, total Fe₂O₃는 12.55%, MnO는 0.18%, MgO는 16.56%, CaO는 9.30%, Na₂O는 1.23%, K₂O는 0.09% 그리고 P₂O₅가 0.04%인 것으로 확인되었다.

이 골고나의 코마티아이트와 그 외 지역의 코마티아이트와 같이 수반되는 암석들의 주성분 원소를, x축에는 MgO를, 그 외 다른 원소를 y축에 점시하면 Fig. 11과 같다.

이 그림에서 볼 수 있듯이, MgO의 함량에 따라서 솔레아이트질 현무암 (tholeiitic basalt; MgO: 5%-10%), 현무암질 코마티아이트(komatiitic basalt 또는 basaltic komatiite; MgO: 10-22%) 그리고 페리도타이트질 코마티아이트(peridotitic komatiite; MgO: 22-34%) 등 세 개의 암석으로 구분됨을 알 수 있다. 그리고 이들 원소 중에서도 특히 TiO₂, Al₂O₃, CaO 등은 MgO의 함량이 감소함에 따라서 거의 직선적으로 증가하는 선상에 점시되며, TiO₂, Na₂O 그리고 K₂O 함량이 매

우 낮음으로써 코마티아이트인 것을 잘 나타내고 있다.

이 골고나 코마티아이트의 주성분 원소 중, CaO/Al₂O₃=0.85이며, Al₂O₃/TiO₂=16.37, CaO/TiO₂=13.88, MgO가 16.56 %인 것을 고려하면, 이 코마티아이트는 그룹I의 코마티아이트에 해당되는 암석으로 생각된다 (Smith and Erlank, 1982). 이 코마티아이트의 주성분 중, 세 가지 성분인 Al₂O₃, CaO, MgO를 삼각도에 점시해 보면, 캐나다 북부 온타리오의 Munro Township의 휘석질 코마티아이트(Pyroxenite komatiite; Arndt *et al.*, 1977) 또는 남아프리카의 현무암질 코마티아이트(Barberton type; Viljoen and Viljoen, 1969)의 범주에 속하나, 전자와 더 유사함을 볼 수 있다(Fig. 12).

미량원소: 이 골고나 코마티아이트 내의 미량성분의 함량은 다음과 같다. Ba; 7 ppm, Sr; 44 ppm, Y; 12 ppm, Sc; 31 ppm, Zr; 25 ppm, Hf; 0.78 ppm, Ta; 1.15 ppm, Be; <1 ppm, Cr; 730 ppm, Ni; 580 ppm, V; 220 ppm, Co; 88 ppm, Cu; 86 ppm, Pb; 12 ppm, Zn; 60 ppm, Mo; 3.4 ppm 등인 것으로 나타났다.

이 골고나 코마티아이트 내의 Ni, Cr, 그리고 V함량이 알카리계열의 현무암질 암석의 각 성분의 평균값

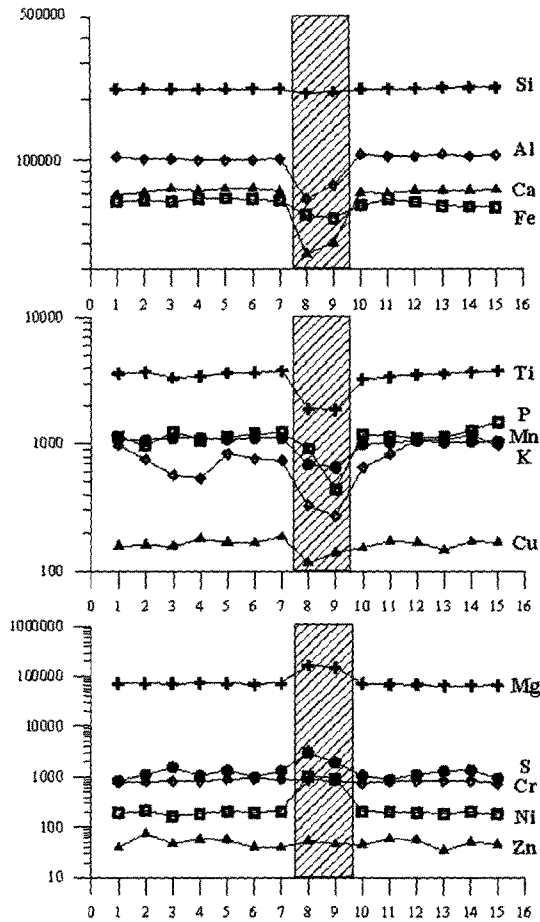


Fig. 14. A variation diagram for the major and trace elements across the spinifex textured mineral and groundmass in the komatiite from the Gorgona islands. The hatched boxes denote the spinifex textured zone.

(Turekian and Wedepohl, 1961; Cr = 170 ppm, Ni = 130 ppm, V = 250 ppm)보다도 훨씬 더 높아서, 미량원소의 함량으로도 코마티아이트 계열의 암석이라는 것을 알 수 있다.

희토류원소: 이 코마티아이트 내의 희토류원소의 함량을 당 연구소의 ICP/MS를 이용하여 측정된 결과, 희토류원소의 함량은 다음과 같다 (Table 3).

이들 희토류원소의 값을 콘드라이트(chondrite: C1) 값으로 표준화하여 희토류원소 패턴을 그리면 다음과 같이 전형적인 코마티아이트의 패턴과 같다(Fig. 13). 즉, LREE가 HREE보다 더 결핍되어 있는 REE 양상을 나타내고 있으며, 총 희토류원소의 함량(Σ REE

= 17.715 ppm)이 매우 낮고, 경희토류원소(LREE)/중희토류원소(HREE)의 비, 즉 $(La/Lu)CN = 0.52$ 도 매우 낮고, LREE가 depleted 되어 있는 것을 고려하면, 그룹I의 코마티아이트(카나다 Munro Township 일대에 분포하는 코마티아이트류; Arndt and Nesbitt, 1982)와 매우 유사한 특징을 보여준다.

礦物化學

이 코마티아이트를 현미경하에서 관찰할 수 있는 박편으로 만들어, 약 40-200배로 확대해서 그 조직을 관찰하였으며, 또 이 박편을 사용하여 당 연구소의 분석 연구실에 있는 PIXE(Proton Induced X-ray Emission Spectrography)분석기로 띠 구조(스피니펙스)를 가운데 두고 좌우로 7 mm 씩을 1 mm 간격으로 그리고 beam 폭을 1.5 mm로 scanning하여, 주성분원소와 몇 가지 미량성분을 분석하였다(김낙배 외, 1990, 1992)(Table 4).

그 결과, 스피니펙스(spinnifex)를 구성하고 있는 부분에서는 마그네슘(Mg), 유황(S), 니켈(Ni) 및 크롬(Cr) 등의 성분이 스피니펙스가 없는 다른 치밀한 부분보다 훨씬 많으며, 반면에 알루미늄(Al), 칼륨(K), 칼슘(Ca), 티타늄(Ti), 망간(Mn), 철(Fe), 인(P), 구리(Cu) 등은 적은 것으로 나타났고, 규소(Si)는 함량 변화가 거의 없는 것으로 확인되어, 스피니펙스를 구성하고 있는 광물이 Ni, Cr과 S를 많이 함유하는 감람석 등이라는 것을 짐작할 수 있다(Fig. 14). 그리고 스피니펙스 이외의 부분에서 분석된 모든 원소들의 함량이 거의 일정하다는 것은 지표에서 급팽하여 결정분화가 덜 진행된, 비교적 성분이 균질한 은미정질로 된 石基質이라는 것을 의미한다.

각 광물의 화학조성을 얻기 위해서, 전자현미분석기(EPMA)를 이용하여 분석을 실시하였다. 분석기기는 Cameca SX-51이고, 적용 전력은 가속전압 15 KeV, 조사전류 20 mA, 주사선 반경 1 μ m 조건 하에서 실시하였다.

감람석: EPMA분석 결과, 이 코마티아이트의 주성분 광물인 감람석은 마그네슘 감람석(forsterite)인 것으로 확인되었다(Table 5). 주성분 원소의 함량(wt.%)은 $SiO_2 = 39.92\sim 40.80\%$, $TiO_2 = 0.01\sim 0.04\%$, $Al_2O_3 = 0.07\sim 0.13\%$, $MnO = 0.13\sim 0.22\%$, $FeO = 8.70\sim 13.33\%$, $MgO = 45.90\sim 49.59\%$, $CaO = 0.27\sim 0.36\%$, $K_2O = 0.01\sim 0.03\%$, $Cr_2O_3 = 0.09\sim 0.19\%$ 의 범위이며, 광물공생에 따른 주성분의 함량변화는 뚜렷하지 않으나 마그네슘이 비교적 많은 Mg-감람석(forsterite)이다.

Table 4. Major and trace element abundance for the spinifex and groundmass of the komatiite from the Gorgona Islands in Colombia, South America (in ppm).

No	Si	Ti	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	K	P	S	Cr	Ni	Cu	Zn
1	223000	3620	104000	64100	1090	74200	68900	978	1150	840	781	193	156	39
2	224000	3720	102000	64900	1070	73700	70800	762	975	1120	804	217	160	73
3	223000	3330	102000	64100	1110	72700	73600	570	1260	1590	844	167	156	46
4	223000	3450	100000	66200	1130	76000	71900	539	1070	1050	816	183	179	57
5	223000	3660	100000	66300	1090	73200	73500	840	1140	1340	897	205	167	56
6	224000	3680	101000	65600	1120	70400	73900	765	1210	1000	916	196	165	40
7	224000	3800	102000	64500	1110	73300	71300	738	1230	1330	888	212	184	38.9
8	213000	1900	65600	55200	695	167000	35400	327	930	3070	881	1020	116	52.4
9	215000	1880	76500	52800	656	152000	40300	269	442	1930	861	914	139	45.8
10	223000	3250	107000	61100	992	72600	70600	656	1200	1060	750	203	153	44.4
11	224000	3420	105000	65400	1030	70700	69900	824	1150	872	833	199	171	57.1
12	224000	3540	105000	63200	1050	69700	72400	1080	1130	1120	834	195	166	55.9
13	226000	3600	104700	60700	1030	67000	72300	1070	1140	1300	835	183	146	34.3
14	227000	3750	105000	60300	1040	67600	72400	1170	1280	1360	809	200	170	49.7
15	227000	3780	106000	60000	1050	67700	72700	967	1490	933	745	177	168	45.1

Table 5. Chemical compositions of olivines from the komatiite (wt.%).

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Mineral assemblage	olivine+pyroxene						serpentinized olivine					olivine+spinel	
SiO ₂	40.6	40.6	40.4	40.1	40.4	40.8	40.0	40.2	39.9	40.6	40.3	40.5	40.8
TiO ₂	0.01	-	-	-	-	0.04	-	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	0.10	0.13	0.11	0.09	0.08	0.10	0.08	0.10	0.09	0.13	0.07	0.10	0.10
FeO	9.67	9.02	11.65	11.78	9.30	9.15	12.91	10.76	13.33	9.17	10.84	9.92	8.70
MgO	48.9	49.2	47.2	47.1	49.1	49.2	46.2	47.8	45.9	49.3	47.9	48.6	49.6
CaO	0.34	0.31	0.34	0.32	0.34	0.33	0.34	0.33	0.33	0.36	0.33	0.33	0.27
Na ₂ O	-	-	-	-	-	0.01	-	0.01	-	-	-	0.01	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	0.03	0.01	-	-	-	-	-
Cr ₂ O ₃	0.14	0.13	0.09	0.13	0.16	0.15	0.17	0.18	0.10	0.11	0.11	0.19	0.14
MnO	0.17	0.16	0.17	0.22	0.13	0.14	0.21	0.13	0.20	0.17	0.16	0.13	0.17
Total	99.93	99.55	99.96	99.74	100.04	99.92	99.94	99.52	99.85	99.84	99.71	99.78	99.78

1 to 6 skeletal forsterite grains from komatiite.

휘석: X-회절분석 및 EPMA 분석 결과(Table 6), 휘석은 대부분 Al이 풍부한 투휘석(diopside)과 보통 휘석(augite)으로 확인되었다. 휘석의 주성분 원소의 함량(wt.%)은 SiO₂ = 48.74~50.08%, TiO₂ = 0.70~1.23%, Al₂O₃ = 4.04~6.12%, FeO = 8.04~12.91%, MnO = 0.17~0.33%, MgO = 12.95~14.21%, CaO = 19.93~21.99%, K₂O = 0.01~0.02%, Cr₂O₃ = 0.03~0.59% 범위이다. 여기에서 Cr₂O₃의 함량이 월등히 적음은 크롬철석이 초기 단계에 결정될 때 이미 Cr 성분이 빠져나갔기 때문이다.

스피넬: 코마티아이트 내의 스피넬을 EPMA로 분석

한 결과, 주성분의 함량은 Table 7과 같다. 감람석 및 휘석보다 훨씬 후기에 생성된 것으로 생각되는 스피넬은 크롬을 함유한 크롬철석이며, 일반적으로 매우 균질하여 Cr₂O₃ = 42.1~46.5%, Al₂O₃ = 20.7~23.5%, MgO = 13.3~14.9%, 및 FeO = 15.5~18.3%이다. Cr₂O₃ 및 MgO 함량이 많은 것으로 보아 감람석의 결정화작용이 일어난 후에 생성되었음을 알 수 있다. 결과적으로 크롬철석은 호스트 마그마(host magma)의 불평형 상태에서 결정화되었다.

Table 6. Chemical compositions of clinopyroxenes from the komatiite (wt.%).

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Mineral assemblage	pyroxene+plagioclase				pyroxene+olivine						
SiO ₂	48.8	49.6	49.3	49.1	49.0	49.4	50.1	49.9	49.0	49.5	48.7
TiO ₂	0.85	0.69	1.06	0.95	0.82	0.74	0.73	0.70	1.02	0.74	1.23
Al ₂ O ₃	5.41	5.33	5.04	5.08	4.96	4.67	4.04	4.48	4.05	4.59	6.12
FeO	9.18	8.67	9.03	8.84	9.84	11.4	9.38	8.14	12.5	9.38	8.04
MgO	13.7	13.7	13.7	13.9	13.3	13.0	14.2	14.0	12.4	13.6	13.6
CaO	20.8	21.7	20.9	20.6	20.9	19.9	20.2	22.0	20.4	21.2	21.7
Na ₂ O	0.27	0.26	0.30	0.29	0.30	0.29	0.25	0.24	0.34	0.31	0.24
K ₂ O	-	-	-	0.01	-	0.02	-	-	-	0.01	-
Cr ₂ O ₃	0.26	0.21	0.24	0.59	0.23	0.07	0.34	0.32	0.04	0.27	0.18
MnO	0.26	0.18	0.18	0.22	0.25	0.33	0.23	0.18	0.23	0.19	0.17
Total	99.53	100.34	99.75	99.58	99.60	99.82	99.47	99.96	99.98	99.79	99.98

Table 7. Chemical compositions of spinel (1-5), antigorite (6-8) from the komatiite (wt.%).

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	8
Mineral assemblage	spinel+olivine+antigorite					antigorite		
SiO ₂	0.15	0.16	0.14	0.13	0.14	41.4	41.4	41.6
TiO ₂	0.41	0.28	0.31	0.32	0.34	0.02	0.05	-
Al ₂ O ₃	23.5	21.2	21.2	20.7	20.8	1.76	0.47	0.79
FeO	18.3	16.9	17.3	15.7	15.5	2.77	2.12	1.84
MgO	14.5	14.9	14.8	13.9	13.3	39.2	40.5	40.3
CaO	0.05	0.03	-	0.02	0.02	0.09	-	0.02
Na ₂ O	-	-	-	0.01	-	0.02	-	0.01
K ₂ O	-	-	-	0.03	-	0.01	-	0.01
Cr ₂ O ₃	42.1	45.3	45.1	46.5	46.5	0.10	0.12	0.14
MnO	-	-	-	-	-	0.07	-	0.02
Total	99.01	99.77	98.9	99.09	99.12	85.44	84.67	84.70

討議 및 結論

사실, 우리나라의 지질학자들에게는 코마티아이트라는 암석은 좀 생소한 암석임에는 틀림없다. 1969년 남아프리카의 Komati 강가의 시생대 Greenstone belt의 Barberton Mountainland에서 Viljoen and Viljoen에 의해 처음으로 코마티아이트라는 암석이 확인된 이래 그 외 여러 대륙의 시생대 (약 2.7 Ga) 암석에서 확인되었으며, 그 코마티아이트의 지화학적 특징도 다소 차이가 있음이 보고된 바 있다 (Hess, 1989). 그는 우선 암석 중에 MgO의 함량이 18%-20% 정도인 것을 코마티아이트라고 부르고, MgO의 함량이 12%-18%인 것은 코마티아이트질 현무암으로 분류했다.

그리고 Smith와 Erlank(1982)는 코마티아이트를

Group I, Group II로 분류했다. Group I은 세계 여러 대륙(Western Australia와 그 외 대부분의 지역)의 시생대 지역에 분포하는 코마티아이트로서 Al₂O₃/TiO₂= 20, CaO/Al₂O₃=1.0 정도이고, Group II는 특징적으로 남아프리카의 Barberton Mountainland 일대에 산출되는 코마티아이트로서 Al₂O₃/TiO₂= 10, CaO/Al₂O₃>1.0(약 2.0에 가깝다) 정도이다. 그리고 이 두 Group의 코마티아이트의 주성분 원소 중, Harker의 그림처럼 MgO를 x축에 TiO₂, Al₂O₃, CaO를 y축에 점시켰을 때, 각각의 원소들이 분화가 되면서 일직선 위에 점사되며, Group I은 TiO₂와 CaO의 연장선이 MgO 48%에서 만나고 Al₂O₃는 MgO 52%에서 만나지만, Group II는 TiO₂와 Al₂O₃는 MgO가 50%, CaO는 MgO가 40%일 때에 만난다. 따라서 TiO₂-MgO의 경향은 Group I과 Group II

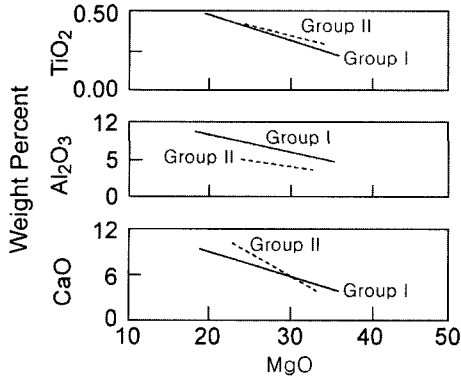


Fig. 15. Comparison of the major composition (TiO_2 , Al_2O_3 , CaO and MgO) of Group I (solid line) and Group II komatiite (dotted line) (Hess, 1989).

가 거의 비슷하나, Group II는 Group I보다도 Al_2O_3 가 결핍되어 있으며, CaO 의 함량은 MgO 의 함량(25%-35%)이 증가함에 따라서 Group II가 Group I보다도 급격히 감소하는 특징이 있다(Fig. 15). 또 Group I과 Group II는 REE 분포경향에서 크게 차이를 보인다. 즉 Group I은 LREE가 Group II보다도 결핍되어 있고, HREE는 평탄(flat)한 것이 큰 특징이며, Group II는 LREE가 부화되어 있음이 특징이다(Fig. 16).

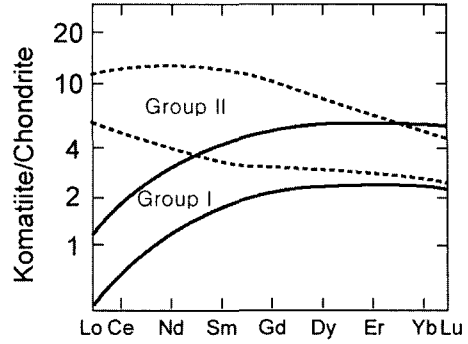


Fig. 16. Comparison of the REE patterns of Group I (solid line) and Group II komatiite (dotted line) (Hess, 1989).

앞서 우리는 콜롬비아 골고나섬의 코마티아이트를 암석의 구성광물, 조직, 주성분원소와 희토류원소를 포함하는 미량원소의 함량 등, 암석학적 그리고 지화학 적 특징을 지금까지 잘 알려진 시생대의 코마티아이트, 즉 서부 오스트레일리아 그리고 캐나다의 온타리오주의 Munro Township 지방의 코마티아이트(Group I)와 남아프리카의 Barberton Mountain지방의 코마티아이트(Group II)를 비교하여 설명하였다.

특히 이 코마티아이트의 주성분원소, 희토류원소 등

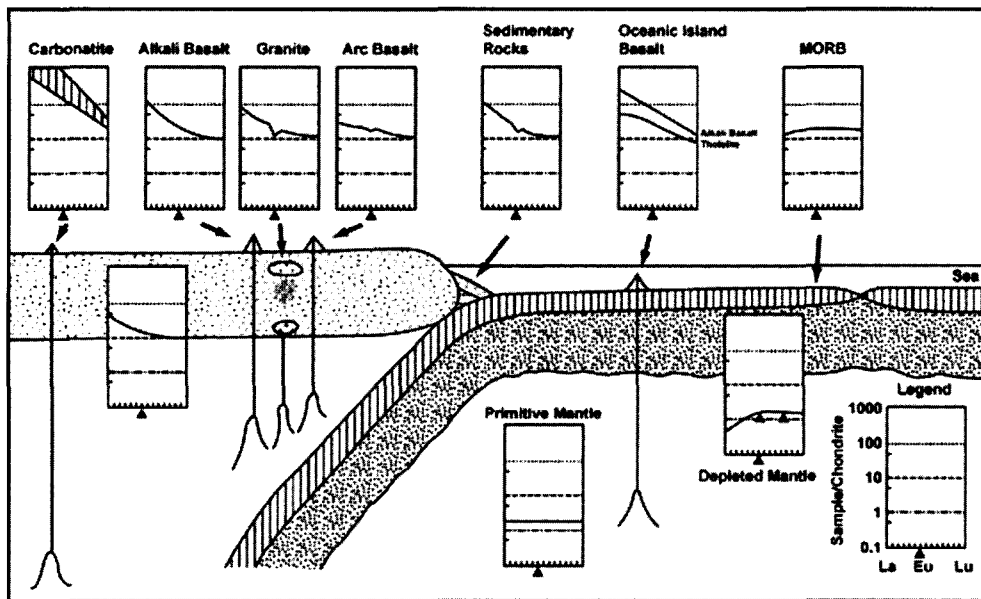


Fig. 17. Various REE patterns normalized by chondrite for the rocks comprising the earth (Ogasawara, 1989). The REE pattern for carbonatite is from Cullers and Medaris's (1977), for alkali basalt and arc basalt from Ando *et al.*, (1987), oceanic island basalt from Henderson's (1984), and for Sedimentary rocks from U.S.G.S. standard sample SCo-1.

의 분포 경향은 캐나다 온타리오 Munro Township 일대에 분포하는 코마티아이트 Group I에 속하는 것과 아주 유사한 것으로 생각된다. 그리고 이 코마티아이트의 희토류원소의 함량을 운석(C1)값으로 표준화한 분포경향을 지구조 각 단위에 분포하는 각 암석의 REE 분포경향(Ogasawara, 1989)과 비교하면 depleted mantle에서 만들어진 초염기성 또는 염기성 암석의 분포 경향과 아주 잘 일치한다(Fig. 17).

따라서 이 콜롬비아 골고나섬의 코마티아이트는 지구구조적으로는 depleted mantle이 부분용융 받아 만들어진 마그마가 분출하여 굳어진 komatiite로서, 이는 캐나다 온타리오지방의 Munro Township지역 등에 분포하는 komatiite Group I 암석 중, basaltic komatiite 또는 pyroxenite komatiite와 매우 유사한 암석학적 그리고 지화학적 특징을 갖는 것으로 확인되었다.

感謝의 글

이 연구의 시료는 저자 중의 한 사람인 진명식이 1994년 9월 1일부터 일개월간 KOICA사업의 일환으로 콜롬비아의 INGEOMINAS에 지화학탐사 전문가로 파견되어 일하던 중, Mr. Carlos로부터 얻은 시료로 연구되었으며, 위의 연구결과를 발간토록 허락해 주신 우리 연구원의 원장님과 KOICA 당국에 감사드린다. 특히 이 논문에 사용된 분석자료는 우리 연구소의 양명권 씨(XRF), 심상권 씨(ICP/AES), 정강섭 박사(ICP/MS), 김덕경 씨(PIXE) 등의 도움으로 얻었으며, 지질도 및 분석자료의 컴퓨터 작업 및 처리에 수고해 준 이승렬, 이승구, 고경석 박사 등 여러 분께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 끝으로 이 논문을 잘 읽어주시고 여러 가지로 지적해 주셔서 보다 좋은 논문이 되도록 심사를 맡아주신 부산대학교 윤성효 교수님과 기초과학지원연구원의 정창식 박사님에게 감사를 드립니다.

參考文獻

김낙배, 우형주, 김덕경, 최한우, 김준곤, 박공식, 1990, 양성자 유발 X선 방출 분석장치 및 표준시료 시험분석. 분석과학회지, 3, 301-311.
 김낙배, 박공식, 우형주, 최한우, 김덕경, 김준곤, 홍완, 조수영, 1992, PIXE 분석법연구. 한국자원연구소 연구보고서, KR-92-2E-1. 53p.
 Ando, A., Mita, N. and Terashima, S., 1987, 1986 values for fifteen GSI rock reference samples, "Igneous Rocks

Series". Geostandards Newsletter, 11, 159-166.
 Arndt, N.T., Naldrett, A.J. and Pyke, D.R., 1977, Komatiite and Iron-rich Tholeiitic Lavas of Muro Township, North-east Ontario. Journal of Petrology, 18, 319-369.
 Arndt, N.T. and Nesbitt, R.W., 1982, Geochemistry of Munro Township basalts. In Komatiites, ed. Arndt, N.T. and Nisbet, E.G., 309-330. London; Allen and Unwin.
 Brooks, C. and Hart, S., 1972, An Extrusive Basaltic Komatiite from a Canadian Archean Metavolcanic Belt. Canadian Jour. Earth Sci., 9, 1250-1253.
 Cullers, W.J. and Medaris, Jr., G. 1977, Rare earths elements in carbonatite and cogenetic alkaline rocks: examples from Seabrook Lake Callander Bay Ontario. Contrib. Mineral. Petrol., 65, 143- 153.
 Echeverria, L.M., 1980, Tertiary or Mesozoic Komatiites From Gorgona Island, Colombia: Field Relations and Geochemistry. Contrib. Mineral. Petrol. 73, 253-266.
 Henderson, P., 1984, Rare Earth Element Geochemistry. Elsevier Amsterdam, 510p.
 Hess, P.C., 1989, Komatiites; In "Origin of Igneous Rocks" Harvard University Press, 276-285.
 Gansser A., Dietrich V.J. and Cameron W.E., 1979, Paleogene komatiites from Gorgona Island. Nature 278, 545-546.
 Nesbitt, R.W., 1971, Skeletal Crystal Forms in the Ultramafic Rocks of the Ylgam Block, Western Australia: Evidence for an Archean Ultramafic Liquid. Special Publs Geol. Soc. Australia, 3, 331-350.
 Ogasawara, M., 1989, Geochemistry of Rare-Earth Elements. Mining Geol., 39, 166-176.
 Smith, H.S. and Erlank, A.J., 1982, Geochemistry and Petrogenesis of Komatiite from the Barberton greenstone belt, South Africa. In Komatiites, ed. Arndt, N.T. and Nisbet, E.G., 347-398. London; Allen and Unwin.
 Turekian, K.K. and Wedepohl, K.H., 1961, Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust. Bull. Geol. Soc. America, 72, 175-195.
 Viljoen, M.J. and Viljoen, R.P., 1969, The Geology and Geochemistry of the Lower Ultramafic Unit of the Onverwacht Group and a Proposed New Class of Igneous Rocks. Geol. Soc. South Africa., Special Pub. No.2, 55-92.
 Viljoen, R.P. and Viljoen, M.J., 1969, The Geology and Geochemistry of the Lower Ultramafic Unit of the Onverwacht Group and a Proposed New Class of Igneous Rocks. Geol. Soc. South Africa., Special Pub. No.2, 221-244.

(2003년 1월 13일 접수; 2003년 5월 6일 채택)