

탄자니아산 루비 및 사파이어의 보석광물학적 특성

Gemological Characteristics of Rubies and Sapphires from Tanzania

박 희 율 (Hee-Yul Park)¹ · 성 규 열 (Kyu-Youl Sung)^{2,*}

¹열린사이버대학교 보석감정덜리학과
(Department of Gem Identification and Dealer, Open Cyber University, Seoul, Korea)

²부경대학교 지질환경연구소
(Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University)

요약 : 탄자니아산 강옥의 보석광물학적 특성을 파악하기 위하여 XRD, XRF, EPMA, FT-IR과 SEM-CL 분석을 수행하였다. 탄자니아산 강옥은 장파장 자외선이나 단파장 자외선에서 거의 형광반응이 나타나지 않는다. 탄자니아산 강옥은 내포물의 종류에 따라 5가지 유형으로 분류될 수 있으며, 유형 I 은 액상 내포물 풍부한 형태, 유형 II 는 기상 내포물 풍부한 형태, 유형 III 은 액상 CO₂를 함유한 형태, 유형 IV 는 고상 내포물을 함유한 형태, 유형 V 는 유체 포유물과 고상 내포물 및 딸광물 (daughter mineral)이 공생하는 복합 내포물 형태이다. 탄자니아산 강옥의 SEM-CL 분석에서 성장구조가 수반된 쌍정조직, 스피넬 반정, 괴상조직과 누대조직 등이 관찰된다. 루비와 사파이어는 크롬과 철의 함량에 의해 뚜렷이 구분되며, Al₂O₃/100-Cr₂O₃-Fe₂O₃ 다이어그램에서 각각 고유한 영역에 도시된다. FT-IR 분석결과, 탄자니아산 강옥 시료들이 모두 유사한 양상을 보이고 있으며, 455.09~459.23 cm⁻¹, 603.15~611.71 cm⁻¹, 1509.00~1655.05 cm⁻¹와 3436.41~3468.87 cm⁻¹에서 흡수 피크가 관찰된다. 연구 결과는 탄자니아산 강옥의 감별 및 산지 추측에 유용한 정보로 활용될 수 있다.

주요어 : 강옥, 탄자니아, 내포물, SEM-CL, 산지 감별

ABSTRACT : XRD, XRF, EPMA, FT-IR, and SEM-CL studies were carried out in order to characterize gemological features of corundum from Tanzania. Fluorescence reaction of the Tanzanian corundum to short and long wave ultraviolet rays was weakly detected. Inclusions in Tanzanian corundum are divided into five types, Type I is fluid-rich inclusion, Type II is gas-rich inclusion, Type III is liquid CO₂ inclusion, Type IV is solid-rich inclusion, and Type V is a mixture of fluid and solid inclusion and daughter minerals. SEM-CL images show twin structure with growth texture, microphenocryst of spinel solid inclusions, massive and growth texture. Ruby and sapphire from Tanzania are distinctly distinguished by concentrations of Fe and Cr, and plotted in the particular field at Al₂O₃/100-Cr₂O₃-Fe₂O₃ diagram. According to FT-IR analysis, all corundum specimens from Tanzania showed the similar patterns, and absorption peaks of 455.09~459.23 cm⁻¹, 603.15~611.71 cm⁻¹, 1509.00~1655.05 cm⁻¹ and 3436.41~3468.87 cm⁻¹. These distinctive characteristics mentioned above can be used to identify the locality and source of corundum stones from Tanzania.

Key words : corundum, tanzania, inclusions, SEM-CL, locality identification

*교신저자: geochemsky@pknu.ac.kr

서 론

모스 경도가 다이아몬드 다음으로 높은 물질인 강옥은 경제성이 높은 보석으로 이용될 뿐만 아니라 학술적인 연구 대상으로 중요시되는 광물이다. 탄자니아를 비롯하여 버마, 태국, 스리랑카 등이 대표적 산지이며, 아프가니스탄, 호주, 브라질, 캄보디아, 말라가시, 파키스탄, 미국 및 스위스 등에도 소규모의 루비광산이 분포한다(김원사, 2004).

강옥은 현재까지도 계속 채광되는 주요 보석 광물로서, 일반적으로 석회암이 화강암의 관입에 의해 변성작용을 받아 형성된 백운암질 대리암을 모암으로 하여 산출된다. 또한, 운모편암, 편마암 및 결정질 석회암 등의 변성암에서 부성분 광물(accessory mineral)로 산출되며, 실리카 성분이 적은 섭장암 또는 네펠린 섭장암 등의 화성암과 페그마타이트에서 거정질 결정으로 발견되기도 한다. 오랜 기간 동안의 채광으로 양질의 강옥을 구하기가 매우 어려워졌으나, 자원개발의 미답지인 아프리카, 특히 탄자니아 등에 양질의 강옥이 대규모로 매장되어 있는 것이 알려지면서 이들 지역에서 채광된 강옥에 대한 보석학적 연구의 필요성이 대두되고 있다. 탄자니아에서 1950년대 처음으로 불투명한 루비가 발견되었으며, 최근에는 북서부지역에서도 많은 강옥 광산이 발견되고 있다. 그러나 아직도 탄자니아 강옥에 대한 광물학적 및 분광학적 특성에 대해서는 많이 알려져 있지 않다(Hanni and Schmetzer, 1991; Hanni, 1987).

이번 연구에서는 최근에 새롭게 발견된 탄자니아산 강옥의 원석을 대상으로 현미경 관찰, X-선 회절분석(XRD), X-선 형광분석(XRF), 전자현미분석(EPMA), 푸리에 변환 적외선 분광분석(FT-IR)과 SEM-CL (Scanning electron microscope-Cathodoluminescence) 분석, 보석학적 특성 분석, 화학조성 및 분광학적 특성 분석을 실시하여, 탄자니아산 루비 및 사파이어의 보석광물학적 특성을 규명하였다.

연구 결과는 탄자니아산 강옥의 감별 및 감정에 필요한 중요한 정보를 제공하고, 타 지역에서 산출되는 강옥과 비교·분석할 수 있는 자료로 활용될 수 있을 것이다. 특히 SEM-CL을 이용한 내부조직 연구는 강옥을 원석으로 하는 보석인 루비와 사파이어의 산지 추측에

유용한 정보를 제공할 것으로 생각된다. 또한, 탄자니아산 강옥에 대한 보석광물학적 특성 연구결과는 강옥의 처리를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

재료 및 연구방법

탄자니아의 수도이자 항구 도시인 다루에살렘(Dar es Salaam)에서 서쪽으로 약 200 km 지점에 모로고로(Morogoro)가 있으며, 연구지역은 이곳에서 약 30 km 남서쪽에 위치하고 있다. 연구지역의 주변 지질은 고변성작용을 받은 편마암으로 구성되어 있으며, 강옥광산은 이들 암석 내에 협재되어 분포한다(Hanni and Schmetzer, 1991).

실험에 사용된 시료는 탄자니아산 강옥 원석을 색도표를 이용하여 투명, 갈색을 띠는 투명, 갈색을 띠는 흰색, 연한 분홍색, 어두운 하늘색, 밝은 하늘색, 밝은 주황색, 연한 녹색, 분홍갈색, 어두운 갈색, 밝은 분홍색, 분홍색, 분홍적색, 밝은 적색등으로 분류하였다(그림 1). 선택된 15개의 시료를 대상으로 굴절률, 비중, 형광반응, 현미경 관찰 등을 실시하였다. 분광분석과 화학분석 실험은 이들 15개의 시료와는 별도로 루비로 분류되는 3개의 원석과 사파이어로 분류되는 3개의 원석을 대상으로 수행하였다.

탄자니아산 강옥의 화학조성 분석은 부경대학교 공동실험실습관의 X-선 형광분석기를 이용하였다(XRF-1700; Shimadzu). 분석 시 사용된 전류 및 전압 조건은 40 kV와 95 mA이었으며, 표준시료는 미국 지질조사소(USGS)에서 제작한 국제공인표준물질과 상용으로 시판되는 MBN 분석표준물질을 이용하였다. 현미경하에서 내포물의 특성을 달리하는 4개의 시료를 대상으로 고상 내포물의 광물 및 화학조성을 파악하기 위해서 전자현미분석을 실시하였다. 분석은 부경대학교 공동실험실습관의 전자현미분석기(EPMA-1600; Shimadzu)를 이용하였으며, 전압 15 kV에서 빔 전류 40 mA의 조건으로 수행하였으며, 빔의 크기 1 μm 로 조절하였다.

탄자니아산 강옥의 광물조성을 파악하기 위하여 X-선 회절분석을 실시하였다. 분석은 부경대학교 공동실험실습관의 X'PERT-MPD System (Philips)과 D/MAX-2000 (Rigaku)을 이용하였으며, 분석조건은 전압 40 kV와 전류 30 mA로

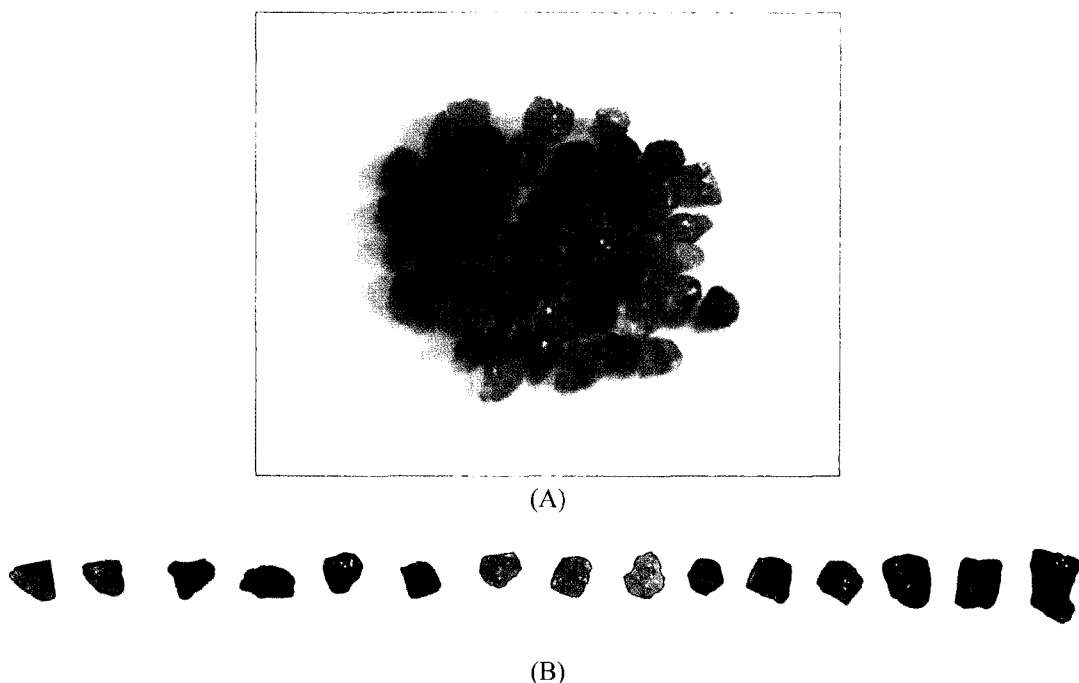


Fig. 1. (A) Rough stones of corundum from Tanzania (B) Classification of rough stones of Tanzanian corundum by color.

Cu 타겟을 이용하여 3°분의 주사속도로 분석하였다. 또한 탄자니아산 강옥의 분광학적 특성을 파악하기 위하여 FT-IR 분석을 실시하였다. 분석기기는 부경대학교 공동실험실습관의 IFS 88 FT-IR Spectrometer (Bruker)를 이용하였으며, KBr 빔 분할기를 이용하여 400~4000 cm^{-1} 범위에서 분해능을 4 cm^{-1} 로 유지하여 분석하였다.

광물에 음극선을 조사하면 광물에서 빛이 나는데 이러한 현상을 음극선발광(cathodoluminescence)이라 한다. 음극선 발광은 기존의 편광현미경이 감지하지 못하는 쌍정과 결정의 조직 등 미세한 특징을 파악하는데 매우 유용하며(Rusk and Reed, 2002), 퇴적암 내 기원물질의 감정 및 조직연구에 많이 이용된다(Seyedolali *et al.*, 1997; Owen and Carozzi, 1986). 또한 광물의 형광성을 이용한 발광 및 흡광 정도에 따른 광물 내 불순물의 분포, 표면 균일도 및 광물내의 변형특성(stress distribution) 등의 확인에 활용되고 있다. 주사전자현미경이나 투과전자현미경에 음극선발광 장치를 부착하여 많이 사용하고 있으며, 최근에는 전자현미분석기(EPMA)와도 연결하여 사용하기도 한다. 탄자니아산 루비

와 사파이어의 SEM-CL 이미지를 관찰하기 위하여, 미국 오레곤대학(University of Oregon)의 mirror-type CL detector (Oxford)와 Hamamatsu R374 Photomultiplier tube가 부착된 JSM 6300V SEM을 사용하였다. 시료는 탄소피복(carbon coating)을 하였으며, 분석조건은 300~800 nAmps 사이의 전류와 20 kV의 전압조건에서 수행하였다.

연구결과 및 토의

탄자니아산 강옥의 보석학적 특성

색

강옥의 색은 발색소의 유무와 함량, 산화정도 및 미세한 내포물들의 존재 등에 의해 달라진다. 많은 사람들이 루비와 사파이어는 색에 의해 어느 정도 감정이 가능하다고 하지만 불가능한 경우가 많다. 특히 탄자니아산 강옥은 다양한 색을 띠기 때문에 색에 의해서 산지를 감별하기가 매우 어렵다. 다양한 종류의 색이 산출되는 탄자니아산 강옥은 크게 투명, 핑크, 보라, 갈색, 오렌지색, 황색, 푸른색을 띠며, 색조

Table 1. General gemological characteristics of the rough stones of corundum from Tanzania

Sample No.	Color	RI ¹⁾	SG ²⁾	FC ³⁾
T-01	Colorless	1.770	4.00	none
T-02	Colorless with brown tint	1.765	3.99	none
T-03	White with brown tint	1.760	4.00	none
T-04	Pinkish white	1.765	3.99	none
T-05	Dark blue	1.760	3.99	none
T-06	Light blue	1.770	4.00	none
T-07	Light orange	1.760	3.99	inert
T-08	Pale green	1.760	4.00	none
T-09	Pale brown	1.765	4.00	none
T-10	Pinkish brown	1.770	3.99	none
T-11	Dark brown	1.770	4.01	none
T-12	Light pink	1.760	3.99	none
T-13	Pink	1.765	3.99	none
T-14	Pinkish red	1.760	4.00	none
T-15	Light red	1.770	3.99	none

¹⁾ refractive index; ²⁾ specific gravity; ³⁾ fluorescence color

(tint)에 의해 몇 단계로 구분된다(표 1). 탄자니아산 강옥이 고변성대가 수반된 열수환경에서 형성되었음을 감안할 때, 다양한 색을 띠는 탄자니아산 강옥이 상이한 열수조건(온도, 압력, 성분 등)에서 형성되었음을 간접적으로 지시해 준다.

비중과 굴절률

빛의 파장은 매질의 굴절률과 반비례하기 때문에 굴절률, 비중 및 색 사이에 상관성을 갖게 된다. 탄자니아산 강옥의 비중은 3.99~4.01의 범위를 보이며, 일반적인 강옥의 비중 4.0과 차이를 보이지 않는 근접한 값을 나타내었다(표 1). 약간의 계산 오차를 고려하더라도 비중 값은 다른 지역의 강옥과 차이를 나타내지 않는다. 탄자니아산 루비와 사파이어의 굴절률은 1.76~1.77의 범위를 나타내며, 색에 따른 굴절률의 차이는 나타나지 않는다(표 1). 따라서 탄자니아산 강옥의 색은 굴절률에 영향을 미치지 않는 것으로 여겨진다.

형광색

광물은 외부로부터 에너지를 받으면 그 에너지의 일부는 광 에너지로 방출하여 빛을 발산하는 형광성을 갖는다. 형광은 광물에 불순물로 들어있는 이온이 짧은 파장을 가지는 자외선을 흡수하여 이보다 긴 파장의 가시광선 에너지로

전환하여 방출하는 현상으로서, 원소의 종류에 따라 적색, 녹색, 황색, 청색 등의 다양한 색을 나타낸다. 강옥은 주로 크롬(Cr)에 의해 형광색을 나타내지만, Fe성분이 함유되면 형광효과를 감소시킨다(김원사, 2004). 또한 Fe성분은 다양한 색의 주요 발색소가 되기도 한다. GIA (Gemological Institute of America)의 형광반응기에서 관찰한 탄자니아산 강옥은 장파장 자외선이나 단파장 자외선에서 거의 형광반응이 나타나지 않는다(그림 2). 연녹색의 강옥이 장파 자외선에서 오렌지색 형광반응을 하였고, 단파 자외선에서는 황색의 강옥만이 부분적으로 적색 형광반응을 하였다. 강옥의 형광반응은 강옥이 함유하고 있는 크롬이온의 전자가 흥분할 때 빛을 발할 때 나타나는 반응이므로, 탄자니아산 강옥의 낮은 형광반응 특성은 낮은 크롬 함량 또는 높은 철 함량을 지시한다.

X-선 회절분석

탄자니아산 강옥에 대한 X-선 회절분석 결과, 모든 시료들이 강옥이 주구성 광물인 것으로 나타났다(그림 3). 일반적으로 강옥은 (012), (030), (104), (113), (116)면 등에서 높은 회절현상을 나타내며, 각각의 면에 대한 격자상수는 각각 3.48, 1.37, 2.56, 2.09, 1.60 등이다. 사파이어로 분류된 S-1에서는 (012), (104), (113),

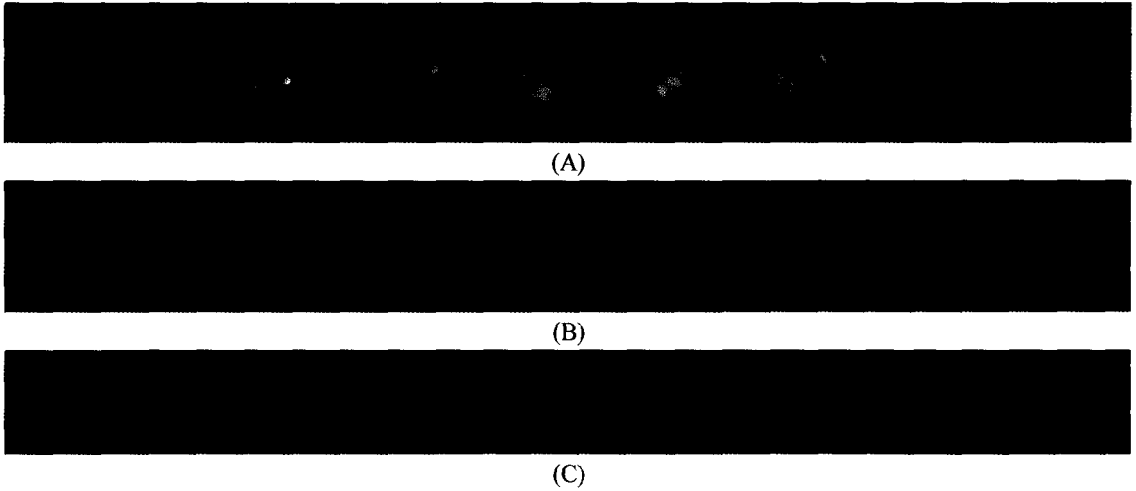


Fig. 2. Fluorescence effects of different corundum from Tanzanian. (A) Under daylight; (B) Reaction with long wave ultra violet (365 nm); (C) Reaction with short wave ultra violet (253 nm).

(116) 면에서 높은 회절현상을 나타내었다. 각 면에 대한 격자상수 값은 각각 3.48, 2.55, 2.08, 1.60 등이며, S-2와 S-3도 동일한 결과 값을 보였다. 반면 루비로 분류된 시료들은 다소 상이한 결과를 보인다. R-1은 (012), (104), (113), (116), (030)면에서 높은 회절현상을 나타내는 반면에 R-2는 (012), (104), (113)면에서 높은 회절현상을 나타내며, R-3은 (012), (104), (110), (113), (116), (030)면에서 높은 회절현상을 나타낸다. 이러한 결정면의 발달 정도의 차이는 루비로 분류된 탄자니아산 강옥이 다양한 열수환

경에서 생성되었음을 반영하고 있으며, 향후 루비와 탐사 및 처리에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

루비로 분류된 시료(R-1, 2, 3)와 S-3에서 스피넬 피크가 관찰되었으며, 특히 R-3에서는 19.00 Å, 31.24 Å, 36.84 Å, 44.80 Å, 59.33 Å, 65.19 Å에서 뚜렷한 스피넬 피크가 관찰된다. 이는 루비로 분류된 시료들에 다량의 스피넬이 내포물로서 함유되어 있음을 시사하며, 각 시료에 대한 강도의 차이는 스피넬의 함량의 차이에 기인한 것으로 여겨진다.

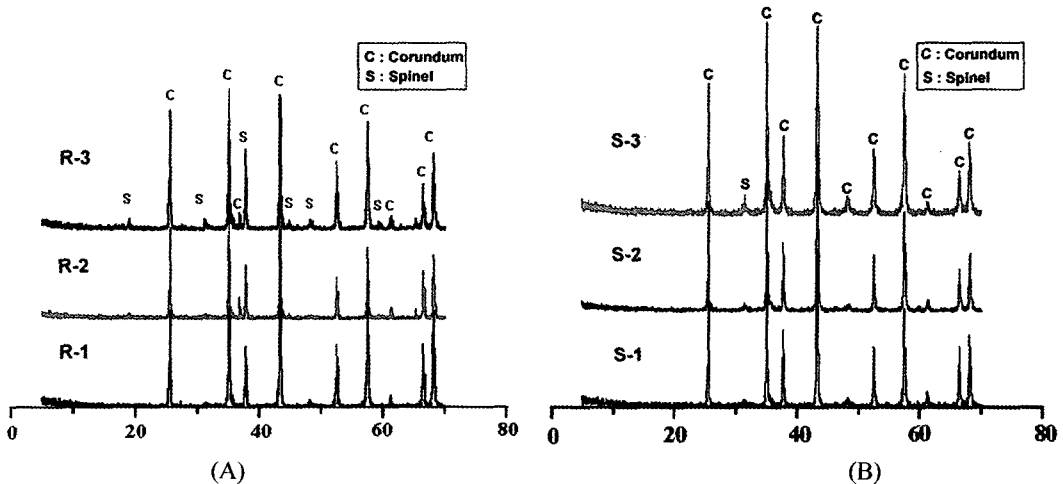


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of Tanzanian corundums. (A) Ruby; (B) Sapphire.

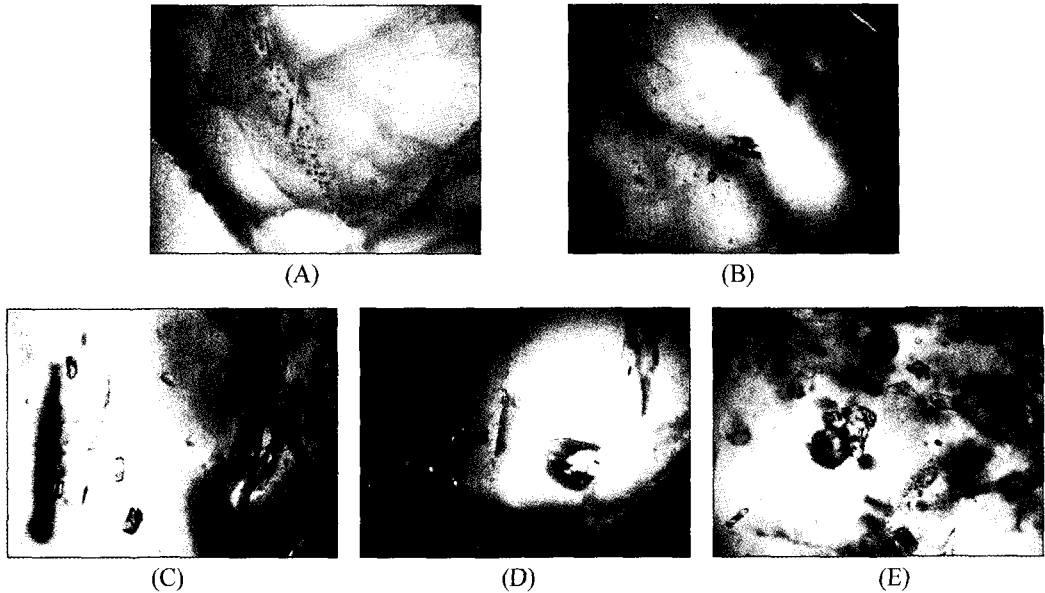


Fig. 4. Microphotographs of inclusions in corundum from Tanzania. (A) Type I; (B) Type II; (C) Type III; (D) Type IV; (E) Type V. All pictures are taken at $\times 100$.

내포물

내포물이란 광물 내에 포획되어 있는 액상, 기상, 고상의 포유물로서 광물이 생성될 때의

온도, 압력, 성분에 관한 유용한 정보를 제공한다. 보석광물에 있어서 내포물은 보석의 천연과 합성 판별에 대한 유용한 정보를 제공하며, 천연석일 경우 생성환경 및 산출지에 대한 정보

Table 2. Characteristics of corundum from different localities

Locality	Form & Habit	Inclusions	Remarks
Ruby			
Burma	Tabular prism	Calcite, dolomite, angular rutile, apatite, zircon, garnet, mica, sphene, pyrrhotite	Metamorphism of dolomitic limestone
Thailand	Tabular prism	Angular rutile, pyrrhotite, apatite, garnet, plagioclase, boehmite	Granite
Sri Lanka	Tabular prism	Zircon, biotite, pyrite, long angular rutile	Pegmatite insertion to gneiss
Sapphire			
Kashmir	Prism combined with dipyr amid	Zircon, tourmaline	Himalaya mountains
Burma	Prism combined with dipyr amid	Angular rutile, apatite, dolomite	Metamorphism of dolomitic limestone
Montana (USA)	Flat and prism combined with dipyr amid	Angular rutile, calcite, Analcime, pyrite, biotite	Plate tectonic motions
Sri Lanka	Prism combined with dipyr amid	Angular rutile, apatite, albite, feldspar, hematite, dolomite, phlogophite, pyrrhotite, pyrite	Pegmatite injection to gneiss

를(표 2), 합성석일 경우 제조법 등에 관한 정보를 제공한다(김원사, 1993). 1930년대 처음으로 스위스에서 내포물에 관한 연구가 실시되었으며(김원사, 1993), 그 후 보석 산업에서 막대한 영향력을 지닌 영국과 미국에서 많은 보석 내포물 연구가 지속적으로 수행되었다. 최근 인조 보석의 발달로 천연석과 인조석을 구별하기 위해 내포물 연구의 중요성이 더욱 높아지고 있다(Osipowicz *et al.*, 1995).

탄자니아산 강옥을 내포물의 종류에 따라 5 가지 유형으로 분류하였다. 유형 I 은 결정이 성장하는 과정에서 포획된 액상의 포유물이 결정의 성장 면이나 미세한 균열(fracture)을 따라 지문상(fingerprint)으로 발달한 형태이며, 균열의 기원과 형태에 따라 다양한 지문상을 보인다(그림 4a). 유형 II는 기상포유물이 단독으로 나타나는 형태로서 흔히 고립되어 산출된다(그림 4b). 유형 III은 액상 CO₂를 함유한 유형으로 흔히 유형 I과 함께 산출되며, 주로 타원형 형태로 결정의 균열을 따라 지문상을 보이기도 한다(그림 4c). 유형 IV는 고상 내포물(solid inclusion)을 함유한 유형으로, 고상 내포물로는 인회석, 저어콘, 황철석, 백운모, 스피넬, 흑운모 등이 수반된다(그림 4d). 한 종류의 고상 내포물이 단독으로 산출되는 경우도 있으나, 일반적으로 여러 종류의 고상 내포물이 같이 산출되며, 흔히 투명 및 반투명 고상 내포물과 불투명 고체 내포물들이 공생한다. 유형 V는 유체 포유물과 고상 내포물 및 딸광물(daughter mineral)이 공생하는 복합 내포물 유형이다(그림 4e). 탄자니아산 강옥에서는 가장 빈번히 관찰되는 유형으로, 일반적으로 기상 내포물의 비율이 높으며 딸광물은 산출 형태상 주로 칼리염으로 추정된다.

화학조성

탄자니아산 강옥의 알루미늄 함량은 89.81 ~ 96.95 wt.%의 범위를 보이며, 루비(S-1, 2, 3)에 비해 사파이어(S-1, 2, 3)에서 함량이 높게 나타난다(표 3). 사파이어의 미량원소 중 사파이어의 주 발색원소인 철의 함량이 가장 높으며, 0.99 ~ 1.52 wt.%의 범위를 보인다. 감청색을 띠는 S-3의 철 함량이 가장 높으며, 모든 시료에서 루비의 적색 발색소인 크롬은 검출되지 않

Table 3. Chemical composition of the rough stones of corundum from Tanzania

(unit: wt.%)						
Elements	S-1	S-2	S-3	R-1	R-2	R-3
Al ₂ O ₃	95.77	96.95	94.51	94.37	89.81	93.03
MgO	n.d.*	n.d.	n.d.	n.d.	1.97	2.78
TiO ₂	0.16	n.d.	n.d.	0.56	0.29	0.63
SiO ₂	0.63	n.d.	n.d.	1.11	2.58	0.60
Fe ₂ O ₃	1.10	0.99	1.52	0.54	0.43	0.42
Cr ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	0.79	0.63	0.41
Co ₂ O ₃	0.22	0.25	0.50	0.21	0.08	0.20
CaO	0.25	n.d.	n.d.	0.45	2.09	0.12
ZnO	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.07	0.07
P ₂ O ₅	0.25	n.d.	n.d.	0.34	1.07	n.d.
ZrO ₂	0.08	0.06	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
SO ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.12	n.d.
Total	98.46	98.25	95.01	97.81	99.14	98.26

* n.d.: not detected

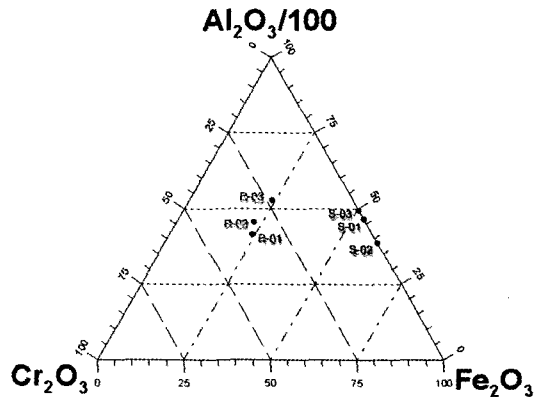


Fig. 5. Comparison of chemical composition between sapphire and ruby from Tanzania plotted in triangular diagram of Al₂O₃/100-Cr₂O₃-Fe₂O₃.

았다. 루비는 시료의 종류에 따라 미량원소의 함량이 다양하게 나타난다. 적색을 띠는 분홍색 루비(R-1)는 미량원소 중 규소의 함량이 1.11 wt.%로서 가장 높으며, 크롬의 함량(0.79 wt.%)이 루비 중에서 가장 높다. 연분홍색의 R-2는 알루미늄의 함량이 90 wt.% 이하로 강옥 시료 중 가장 낮으며, 다량의 규소(2.58 wt.%)와 칼슘(2.09 wt.%)을 함유하고 있다. 오렌지색의 S-3는 크롬의 함량(0.41 wt.%)이 가장 낮으며, 다량의 마그네슘(2.78 wt.%)을 함유하고 있다. 강옥의 발색원소(크롬과 철) 함량에 따른 탄

자니아산 강옥의 특성을 파악하기 위하여, 루비와 사파이어를 $Al_2O_3/100-Cr_2O_3-Fe_2O_3$ 다이어그램에 도시하였다(그림 5). 루비와 사파이어는 크롬과 철의 상대적인 함량에 의해 뚜렷이 구분되며, 각각 고유한 영역에 도시된다. 루비는 다이어그램의 중앙부에 위치하며, 철에 비해 크롬의 함량이 상대적으로 높다. 반면에 사파이어는 루비와 비슷한 높이에서 다이어그램의 오른쪽에 치우쳐서 분포하며, 철의 함량은 루비에 비해 상대적으로 높다. 그러나 알루미늄의 상대적인 함량은 루비와 사파이어에서 뚜렷한 차이를 보이지 않는다.

미량원소와 발색소의 관계에서 푸른색과 황색의 사파이어는 철과 코발트의 함량이 상대적으로 높으며(0.99~1.52 wt.%), 루비는 크롬, 마그네슘, 칼슘, 규소, 인 등의 함량이 사파이어보다 높다. 루비에서 다량의 마그네슘이 함유되어 있는 것은 루비 내 고상 내포물로 함유되어 있는 침정석의 영향으로 간주되며, X-선 회절분석 결과와 잘 일치한다.

SEM-CL 분석 및 전자현미분석

음극선 발광 장치를 이용한 광물연구는 주로 장석, 백운석, 인회석, 방해석, 베니토아이트(benitoite), 로렌제나이트(lorenzenite) 등을 대상으로 많은 연구가 수행되어 왔으며, 보석 광물로는 저어콘, 석영, 루비, 합성루비 등을 대상으

로 스위스의 귀베린 보석실험실(Guebeline gem lab)을 비롯하여 미국의 GIA, CIG (Canada of Institute Gemology)와 영국보석협회에서 음극선을 이용한 보석감정이 시도되어 왔다. 최근 합성 다이아몬드가 개발되면서 천연과 합성 다이아몬드를 감별하기 위한 최선의 방법으로 음극선을 이용한 실험이 주목받고 있으나, 보석의 산지 판별을 위한 도구로서 음극선 발광 장치를 장착한 전자현미경 연구는 극히 초보적인 단계이다.

탄자니아산 강옥의 SEM-CL 분석에서 성장대가 수반된 쌍정조직과 다량의 스피넬 반정이 관찰되었다(그림 6). 또한, 현미경과 주사전자현미경에서는 과상조직을 보이는 시료가 SEM-CL 분석에서 뚜렷한 성장대를 보이고 있다(그림 7). 현미경 관찰에 의해 특징적인 내포물을 지닌 것으로 판단되는 4개의 시료(T1, T3, T9, T14)를 대상으로 내포물의 광물 조성과 기질의 화학조성을 파악하기 위하여 전자현미분석(EPMA)을 실시하였다. 기질은 90 wt.% 이상의 Al_2O_3 로 구성되어 있으며, 고상 내포물은 저어콘과 모나자이트로 확인되었다(표 4).

FT-IR

적외선 분광분석법은 적외선의 흡수정도를 조사하여 광물 내의 흡수에너지 모드를 연구하는데 유용하며, 특히 분자결합 규모의 정보를

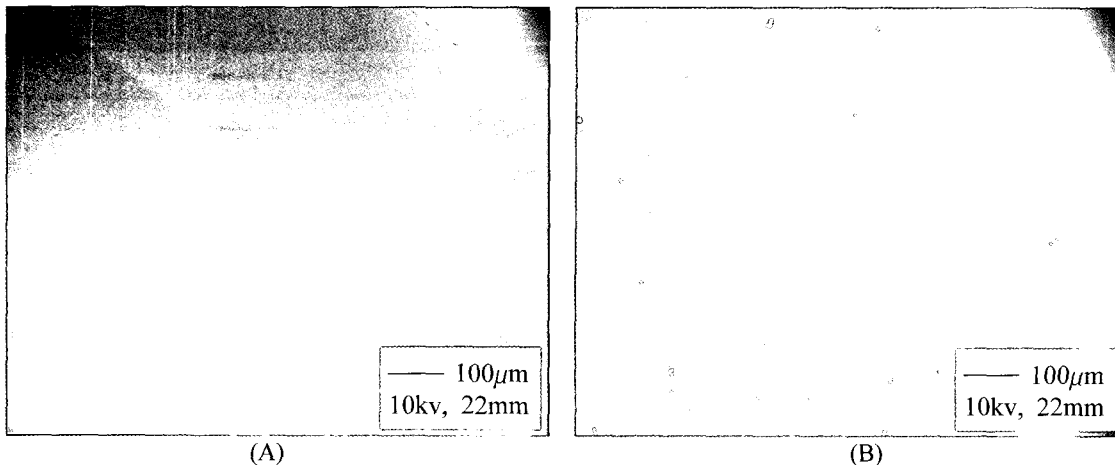


Fig. 6. SEM-CL images of the polished Tanzanian corundum. (A) Twin structure with growth texture; (B) Microphenocryst of solid inclusions of spinel.

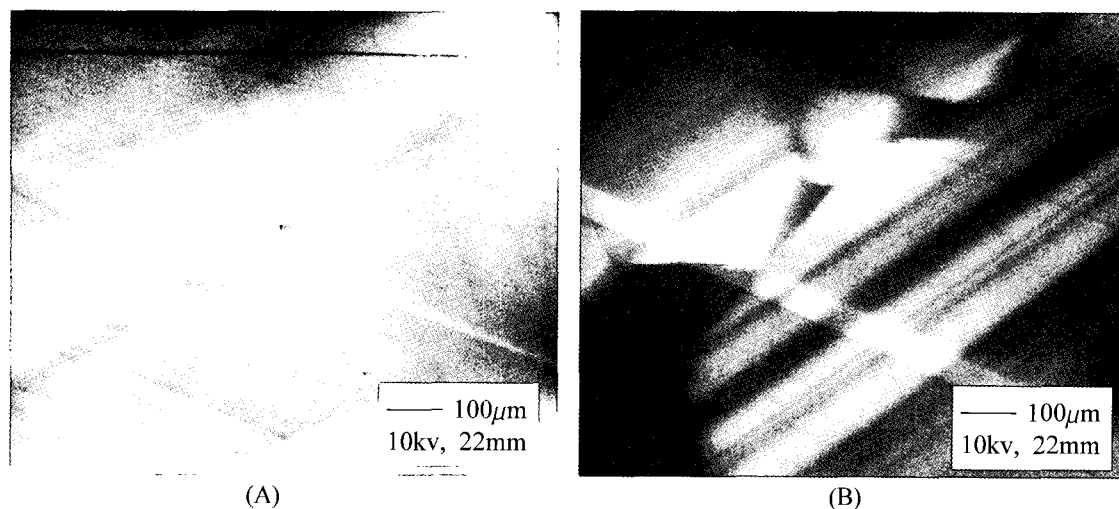


Fig. 7. SEM-CL images the polished Tanzanian corundum. (A) Texture of massive; (B) Growing texture.

제공하기 때문에 광물의 구조나 층간결합연구에 널리 이용되어져 왔다(Shoval *et al.*, 2001). 적외선의 중간영역은 파수(wave number)가 4000 cm^{-1} 에서부터 400 또는 200 cm^{-1} 범위를 일컫는데, 광물내의 분자 간 혹은 원자 간의 진동모드를 이용하여 결정내의 polaron 흡수를 연구함으로써, 수소이온이나 수산기의 결합, 사면체자리의 Si-O나 Al-O 결합, 팔면체자리의 양이온과 수산기의 결합을 해석하는데 유용하다(Blackburn

and Dennen, 1994).

FT-IR 분석결과, 사파이어와 루비 6개 시료들이 모두 매우 유사한 양상을 보이고 있으며, 455.09~459.23 cm^{-1} 와 603.15~611.71 cm^{-1} 에서 뚜렷한 흡수 피크가 관찰된다(그림 8). 1509.00~1655.05 cm^{-1} 에서 뚜렷하진 않지만 다수의 흡수 피크들이 관찰되며, 3436.41~3468.87 cm^{-1} 흡수 피크가 관찰되지만 피크의 모양은 뚜렷하지 않다. 시료번호 R-2 만이 1438.03 cm^{-1} 에서

Table 4. Result of quantitative analysis of corundum and inclusions of monazite and spinel in corundum from Tanzania (unit: wt.%)

Sample No.	Corundum			Monazite	Spinel
	T1-01	T3-01	T9-01	T14-01	T1-02
Al ₂ O ₃	98.60	93.14	99.03	7.91	35.77
SiO ₂	n.d.*	n.d.	n.d.	8.56	35.16
FeO	1.40	0.98	0.97	n.d.	4.80
K ₂ O	n.d.	2.49	n.d.	n.d.	n.d.
CaO	n.d.	0.34	n.d.	1.15	n.d.
Na ₂ O	n.d.	0.85	n.d.	n.d.	n.d.
MgO	n.d.	n.d.	n.d.	0.34	24.26
TiO ₂	n.d.	n.d.	n.d.	0.28	n.d.
Y ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	2.72	n.d.
Ce ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	22.13	n.d.
P ₂ O ₅	n.d.	n.d.	n.d.	28.51	n.d.
La ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	14.22	n.d.
Nd ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	8.05	n.d.
ThO ₂	n.d.	n.d.	n.d.	6.14	n.d.
Total	100.00	97.78	100.00	100.00	100.00

* n.d.: not detected

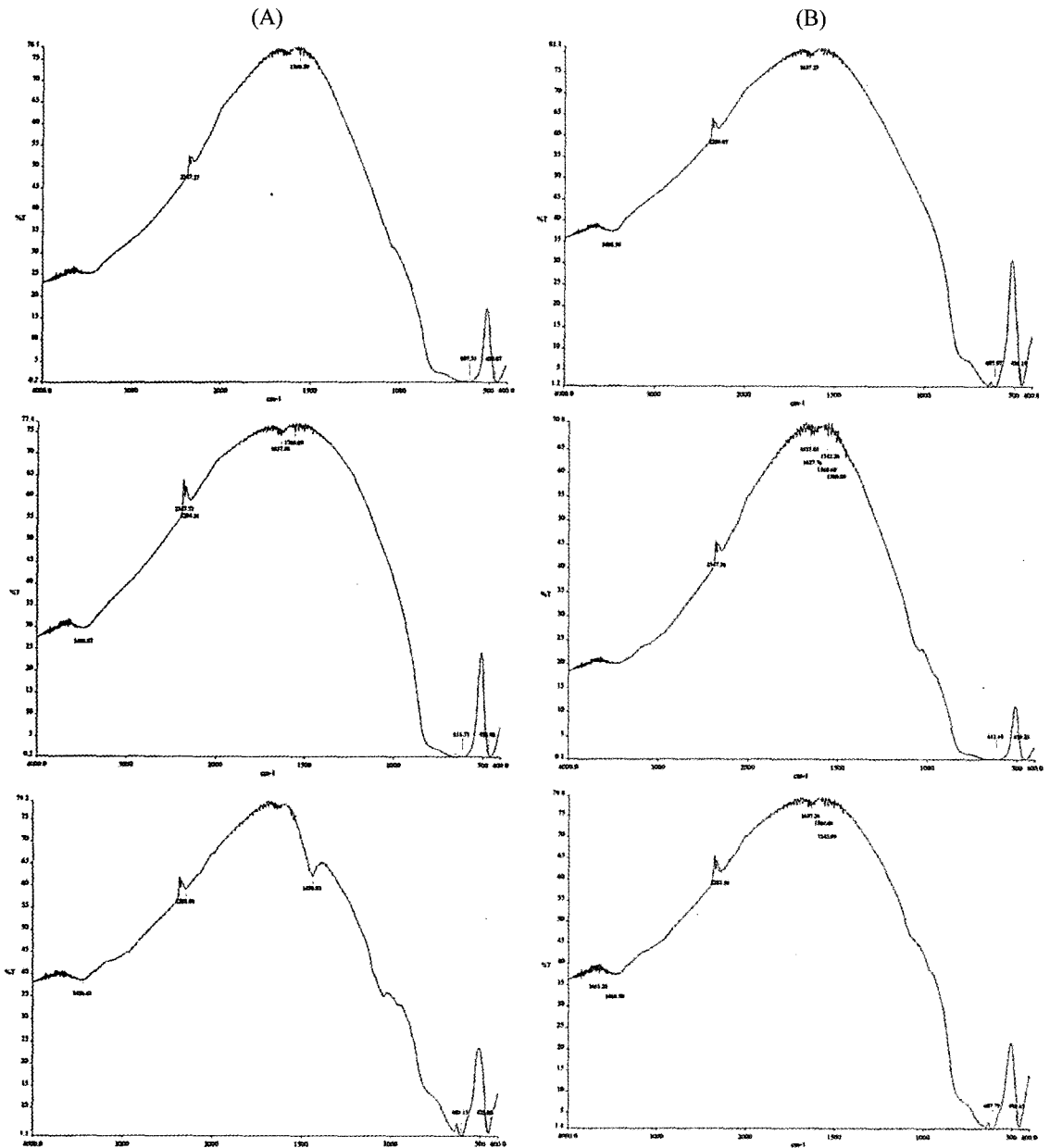


Fig. 8. FT-IR absorption spectra for Tanzanian corundum. (A) S-1; (B) S-2; (C) S-3; (D) R-1; (E) R-2; (F) R-3.

강한 흡수 피크가 관찰된다.

결론

탄자니아산 강옥은 장파장 자외선이나 단파장 자외선에서 거의 형광반응이 나타나지 않으

며, 연녹색의 강옥이 장파 자외선에서 오렌지색 형광반응을, 단파 자외선에서는 황색의 강옥만이 부분적으로 적색 형광반응을 하였다. 탄자니아산 강옥에 대한 X-선 회절분석 결과, 주구성 광물인 강옥 이외에 스피넬 피크가 관찰되었다. 내포물의 종류에 따라 5가지 유형으로 분류될

수 있으며, 내포물에 대한 전자현미분석 결과, 고상 내포물은 저어콘과 모나자이트로 확인되었다. 루비와 사파이어는 크롬과 철의 상대적인 함량에 의해 뚜렷이 구분되며, FT-IR 분석결과, 사파이어와 루비 6개 시료들이 모두 매우 유사한 양상을 보이고 있다. 탄자니아산 강옥의 SEM-CL 분석에서 성장 구조가 수반된 쌍정조직과 다량의 스피넬 반정이 관찰되었으며, 현미경과 주사전자현미경에서는 괴상조직을 보이는 시료가 SEM-CL 분석에서 뚜렷한 성장구조를 보이고 있다.

연구 결과는 탄자니아산 강옥의 감별 및 감정에 필요한 중요한 정보를 제공하고, 타 지역에서 산출되는 강옥과 비교·분석 할 수 있는 자료로 활용될 수 있다. 특히 SEM-CL을 이용한 내부조직 연구는 강옥을 원석으로 하는 보석인 루비와 사파이어의 산지 추측에 유용한 정보를 제공하고, 탄자니아산 강옥에 대한 보석광물학적 특성 연구결과는 강옥의 처리를 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

사 사

논문이 완성되기까지 많은 지도편달을 해주신 부경대학교 환경지질과학과 박맹언 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한, 본 논문의 심사과정에서 중요한 관점에 대하여 지적과 수정을 해주신 부산대학교 양경희 교수님과 충남대학교 김원사 교수님께 심심한 사의를 표합니다. 그리고 실험을 위해 많은 도움을 주신 부경대학교 공동실험실습관의 류호정 박사님, 강순배 선생님, 박성민 선생님께도 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김원사 (1993) 보석 내포물 (번역서). 춘광, 서울, 532p.
- 김원사 (2004) 보석학. 우성, 서울, 576p.
- Blackburn, W.H. and Dennen, W.H. (1994) Principles of mineralogy. Wm. C. Brown Publishers, Dubuque, 413p.
- Hanni, H.A. (1987) On corundum from Umba valley Tanzania. *Journal of gemology*, 20, 274-284.
- Hanni, H.A. and Schmetzer, K. (1991) New rubies from Morogoro area, Tanzania. *Gem & Gemology*, 27, 156-167.
- Osipowicz, T., Tay, T.S., Orlic, I., Tang, S.M. and Watt, F. (1995) Nuclear microscopy of rubies: trace elements and inclusions. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 104, 590-594.
- Owen, M.R. and Carozzi, A.V. (1986) Southern provenance of upper Jackfork Sandstone, southern Ouachita Mountains: Cathodoluminescence petrology. *Geological Society of American Bulletin*, 97, 110-115.
- Rusk, B. and Reed, M. (2002) Scanning electron microscope-cathodoluminescence analysis of quartz reveals complex growth histories in veins from the Butte porphyry copper deposit, Montana. *Geology*, 30, 727-730.
- Seyedolali, A., Krinsley, D.H., Boggs Jr., S. and Goles, G.G. (1997) Provenance interpretation of quartz by scanning electron microscope - cathodoluminescence fabric analysis. *Geology*, 25, 787-790.
- Shoval, S., Boudeulle, M., Yariv, S., Lapidés, I. and Panczer, G. (2001) Micro-Raman and FT-IR spectroscopy study of the thermal transformations of St. Claire dickite. *Optical Materials*, 16, 319-327.

2005년 12월 12일 원고접수, 2005년 12월 20일 게재승인.