

## 탄자니아산 루비의 열처리에 의한 보석 · 광물학적 품질개선 연구

김선옥<sup>1</sup> · 왕수균<sup>1</sup> · 오설미<sup>2</sup> · 박희율<sup>3</sup> · 박맹언<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>부경대학교 에너지자원공학과, <sup>2</sup>부경대학교 공동실험실습관

<sup>3</sup>열린사이버대학교 보석감정덜러학과, <sup>4</sup>부경대학교 지구환경과학과

### A Mineralogical and Gemological Studies for the Enhancement of Tanzania Ruby by Heat Treatment

Seon-Ok Kim<sup>1</sup>, Sookyun Wang<sup>1</sup>, Sul-Mi Oh<sup>2</sup>, Hee Yul Park<sup>3</sup> and Maeng-Eon Park<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Energy Resources Engineering, Pukyong National University

<sup>2</sup>Center for Research Facilities, Pukyong National University

<sup>3</sup>Department of Gem Identification and Dealer, Open Cyber University

<sup>4</sup>Department of Earth Environmental Science, Pukyong National University

Ruby is one of the most favor colored gem, for beautiful red tone, be high in scarcity value. However, rubies with high quality are produced in restricted regions, such as in Thailand, Sri Lanka, Myanmar, and Tanzania etc., and they have been gradually exhausted by mining for a long period. Therefore, improving qualities of low level rubies with various treatments is arising an alternative way to obtain better rubies. Gemological and mineralogical properties of the natural ruby from Tanzanian were studied with heat treatments. Those characteristics were compared between only heat and adding flux materials under heating. Tanzanian raw rubies were applied a heat treatment (1,600°C for 6 hours). However, chromameter and UV-Vis analyses found that a simple heat treatment is inappropriate for the Tanzanian ruby. Although Cr<sup>3+</sup> containing for red color in the ruby increased with heat treatment, the ruby displays dark medium red because of Fe in the ruby as a form of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The low transparency after heat treatment is attributed to the recrystallization of SiO<sub>2</sub> which has a low melting point. Chromameter confirmed adding Pb-containing flux under heating greatly improves the clarity and color of Tanzanian rubies with micro-fractures and cavities on the surface. EMPA results show that Pb as an additive fills the cavities and cracks on raw Tanzanian rubies during the heat treatment. As a result of it, the quality of the Tanzanian ruby raw dramatically improved. These results indicate that the heat treatment with an additive (Pb in this study) is an effective way to obtain better quality of the Tanzanian ruby. Consequently, this study suggests a suitable method to improve the properties of the Tanzanina ruby. The result of this study would provide useful information to upgrade the qualities of similar gem stones such as corundum and sapphire.

**Key words** : Tanzanian ruby, heat treatment, flux material, color improvement, CIE color space

루비는 유색보석 중에서 가장 선호도가 높은 보석인 동시에 열처리에 의해 부가가치를 높일 수 있어 학문적인 연구 대상으로서도 그 관심이 높다. 세계적으로 많은 지역에서 루비가 산출되고 있음에도 불구하고, 고품질의 천연 루비는 미얀마, 스리랑카, 태국, 탄자니아 등 일부 제한된 국가에서만 산출되며, 오랜 기간 채광으로 인해 고품질의 원석이 고갈되어가고 있는 실정이다. 이 연구에서는 최근 새로운 산지가 확인되어 관심이 높은 탄자니아산 루비 원석을 사용하여 전통적인 단순 열처리방법과 화학적 열처리 방법에 의한 광물학적 및 보석학적 특성을 파악하고, 열처리에 의한 탄자니아산 루비의 품질개선 효과를 검토하였다. 미얀마의 Mogok산과 Mong Hsu산 루비에 효과적인 방법으로

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.

\*Corresponding author: [mepark@pknu.ac.kr](mailto:mepark@pknu.ac.kr)

알려진 전통적인 단순 열처리 실험은  $T=1,600^{\circ}\text{C}$ 에서 6시간 동안 실시하였다. 그 결과, 비교적 균일한 암적색을 지닌 탄자니아산 루비의 색상과 투명도는 색채 색차계와 자외선-가시광선 분광분석(UV-Vis Spectrometry) 결과, CIE 1931 color space 상의 적색과 청색의 좌표값(X, Y)이 원시료 (0.365, 0.321) 및 (0.346, 0.363)에서 (0.337, 0.322)로 감소함이 확인되어, 전통적인 단순 열처리 방법이 탄자니아산 루비의 품질개선에 적합하지 않은 것으로 판단되었다. 단순 열처리를 수행한 탄자니아산 루비의 X-선형광분석(XRF) 결과, 루비의 적색을 발현 시키는  $\text{Cr}^{3+}$  함량이 0.72~1.04 wt.%로 증가 되었으나, 갈색의 보조색상을 발현시키는 Fe의 함량이 함께 증가되어 순수한 적색이 아닌 어두운 적색을 띄는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 단순 열처리에 의해 루비에 함유되어 있는  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 의 응집현상으로 어두운 색으로 변한 것이라 판단된다. 또한 열처리에 의해  $\text{SiO}_2$ 의 함량이 특징적으로 높게 나타났는데, 이는 열처리 과정동안 용융되었다가 다시 재결정화 되면서 생기는 현상으로 투명도의 개선에 효과적이지 않음을 알 수 있었다. 탄자니아산 루비 중 표면에 균열이 있는 시료를 선별하여 납(Pb)을 주성분으로 하는 화학적 첨가제를 사용한 열처리 실험 결과, 색상 뿐 만아니라, 투명도가 현저하게 개선되었다. CIE 1931 color space 상의 적색과 청색의 좌표값이 원시료 (0.386, 0.304) 및 (0.395, 0.313)에서 (0.405, 0.308)로 적색영역에 도사되었다. 이는 첨가제가 열처리 과정동안 용융되어 루비의 균열부분을 채워준 것으로 확대경으로도 관찰이 가능하다. 또한 루비의 표면과 균열부분에 대한 전자현미분석(EPMA)의 선분석(line scanning)에 의해서도 확인되었다. 이 첨가제는 균열부분을 충전함으로써 내구성과 투명도가 개선되었다. 첨가제의 용융체는 루비와 굴절률이 매우 비슷하기 때문에 입사된 빛이 루비 내부로 더 쉽게 통과하여 전반적으로 색상이 향상된 것으로 판단된다. 이 연구에서 화학적 열처리가 탄자니아산 루비의 품질향상에 적합한 방법임을 확인할 수 있었으며, 사파이어 등 강옥군 광물의 유색보석에 대한 색과 투명도 개선에 매우 유용할 것으로 생각된다.

**주요어** : 탄자니아산 루비, 열처리, 화학적 첨가제, 색개선, CIE color space

## 1. 서 론

광물이란 천연에서 산출되며, 일정한 화학조성과 규칙적인 원자배열을 하는 무기적 과정에 의해 생성되는 균질한 결정질 고상을 말한다(Hurlbut and Klein, 1977). 약 3,500여 종의 광물 중에서 아름다움과 내구성, 희소성, 휴대성 등을 가지고 있는 광물은 70여종에 불과하며, 이러한 광물은 보석광물로서 분류된다(Hurlbut and Switzer, 1976).

강옥군 광물에 속하는 루비는 유색보석 중에서 가장 중요한 보석으로, 고유한 적색의 아름다움과 뛰어난 내구성, 그리고 희소성과 전통성 등으로 인하여 강옥 중에서도 선호도가 가장 높다. 고품질의 천연 루비의 높은 선호도로 인해 더욱 희소하며, 품질이 떨어지는 값이 싼 천연루비의 색을 개선한 처리석이 소비자들의 요구를 만족시키고 있다. 루비는 오늘날에도 거래량이 가장 많기 때문에 품질개선을 위한 효과적인 처리기술 개발에 많은 연구가 진행되고 있다(Park and Sung, 2004).

루비는 현재까지도 지속적으로 채광되는 주요 보석 광물이지만, 양질의 루비 원석은 미얀마, 태국, 스리랑카 등 일부 국가에서만 제한적으로 생산되고 있으며, 오랜 기간의 채광으로 고갈현상이 뒤따르고 있는 실정이다. 그러나 자원개발의 미답지인 아프리카, 특히 탄자니아에서 다이아몬드를 비롯하여 탄자나이트, 석류석 등 많은 종류의 유색보석과 더불어, 강옥이 대규모로 매장되어 있다는 것이 알려지면서 탄자니아 강옥에 대한 보석학적

연구가 필요하게 되었다(Park, 2004). 탄자니아에서는 1950년대 처음으로 불투명한 루비가 발견되었으며, 최근 북서부 지역에서 많은 강옥 광산이 발견되고 있다(Hanni and Schmetzer, 1991). 그러나 같은 강옥 산지에서 산출되는 루비의 경우에도 품질의 차이가 크고, 우수한 품질의 루비는 극소량에 불과하다(Dona et al, 1992). 이러한 현실로 인해 탄자니아산 루비의 품질개선을 위한 처리기술의 개발이 필요한 실정이다.

Kim(2006)는 Mong Hsu산 및 아프리카산 루비 원석을 열처리하여 열처리 전·후의 보석학적 특성을 비교 검토하였다. 열처리되지 않은 Mong Hsu산 루비 시료 및 열처리된 Mong Hsu산 시료의 레이저 토모그래피 영상을 분석한 결과, 열처리된 시료는 내포물에 의한 산란상이 모두 예리한 경계를 나타내었으며, 열처리되지 않은 시료는 전체적으로 상도 밝지 않고 뚜렷한 경계가 나타나지 않았기 때문에, 시중에 유통되는 루비의 대부분은 열처리된 것으로 판단된다고 보고 하였다(Kim, 2006).

대부분의 천연 루비는 표면까지 닿아있는 균열이나 표면의 미세한 공극이 있기 때문에 이런 부분을 제거하면 외관과 투명도를 향상시킬 수 있다. 그러나 표면 처리를 위한 연마 방식은 중량의 손실이 생겨 루비의 가격이 떨어지는 문제점이 생긴다. 미얀마, 태국, 스리랑카, 마다카스카르, 동아프리카 등 세계적으로 많은 곳에서 루비가 산출되고 있으나, 적색이 선명하고 투명도가 좋은 고품질의 천연 루비는 산지에 따라 차이는

있지만 전체 산출량의 약 3~10% 미만이다(Simonet *et al.*, 2008). 이러한 희소성은 천연 루비가 고가로 거래되고 있는 이유이다.

이 연구에서는 탄자니아산 루비를 대상으로 일반적으로 알려진 단순 열처리 방법과 연구과정에서 최적의 조건으로 확인된 첨가제를 이용한 열처리 결과를 보석·광물학적으로 비교하였다. 천연 루비의 색개선을 위하여 X-선 형광분석(XRF)에 의한 화학조성분석, 자외선-가시광선 분광분석(UV-Vis Spectrometer), 색차계를 이용한 색상분석(Chromaneter)과 전자현미분석(EPMA)을 이용한 조직관찰 및 2차생성물질의 화학조성 등 특성변화를 파악하였다.

## 2. 시료 및 연구방법

이 연구에서는 탄자니아에서 산출되는 원석 루비시료를 사용하였다(Fig. 1). 연구에 사용된 탄자니아산 루비시료는 담적색(light red) 내지 암적색(dark medium red)의 색상을 띠며(Fig. 2), 투명도=아투명~반투명, 굴절율(RI)=1.760~1.770, 비중(SG)=3.99~4.01이며, 형광성(FC)은 모든 시료가 단파장과 장파장에서 각각 약한 적색반응과 강한 적색반응을 나타냈다(Table 1).

전처리 과정은 원시료에 부착된 불순물을 완전히 제거하기 위해 불산(51%)에 72시간 동안 담근 후 낮은 강도의 진동조건에서 초음파 세척기를 이용하여 세척하였다. 그 후 균열이 루비의 내부에서 표면까지 닿아 있는 시료를 현미경 관찰을 통하여 선별하고, 고온에서의 단순 열처리(시료 T-01과 T-02)와 첨가물을 이용한 화학적 열처리(시료 T-03과 T-04) 과정으로 구분하였다. 단순 고온열처리는 탄자니아산 루비(T-01)를 T=1,600°C에서 6시간 동안 실시하였으며, 상대적으로 저온에서의 열처리 시료(T-02)는 T=1,200°C에서 4시



Fig. 1. A photograph of the Tanzanian raw natural rubies.



Fig. 2. A photograph of an untreated typical ruby sample.

간, 1,600°C에서 4시간 동안 온도를 유지하였다.

화학적 열처리를 위하여 사용된 첨가물의 성분은 83.72%의 Pb와 11.75%의 Si이며, 소량의 Al, Zn, Ra, Fe, K이 함유되어 있다(Table 2). 화학적 열처리방법은 루비시료 표면에 첨가물을 피복한 후, 전기로를 이용하여 가열하였다. 실험 조건은 T=800°C에서 30분, T=1,130°C에서 2시간, T=1,080°C에서 각각 30분 동안

Table 1. Gemological characteristics of the Tanzanian rubies using heating treatment

Sample	Color	Transparency	RI	SG	FC
T-01	medium red	semi-transparent ~ translucent	1.760 ~ 1.770	4.01	S.W* : weaker red L.W* : strong red
T-02	medium strong red	translucent	1.760 ~ 1.770	4.00	S.W : weaker red L.W : strong red
T-03	light red	translucent	1.770 ~ 1.780	3.99	S.W : weaker red L.W : strong red
T-04	dark medium red	semi-transparent ~ translucent	1.760 ~ 1.770	4.00	S.W : wseaker red L.W : strong red

RI ; refractive index, SG ; specific gravity, FC ; fluorescence color

\* S.W ; under short wavelength, L.W ; under long wavelength

**Table 2.** Chemical composition of the flux material for heating treatment

Elements	Concentration (%)
Pb	83.72
Si	11.75
Al	2.24
Zn	1.12
Ra	0.71
Fe	0.26
K	0.20
Total	100.00

유지하였으며, 회수된 루비시료를 실온에서 냉각하였다.

단순 열처리와 화학적 열처리가 끝난 루비시료에 대한 보석·광물학적 특성을 확인하기 위하여 X-선 형광분석기(XRF)에 의한 화학조성분석과, 자외선-가시광선 분광분석(UV-Vis Spectrometer) 및 색차계를 이용한 색상분석(Chromameter), 2차 광물의 화학조성을 파악하기 위한 전자현미분석(EPMA)을 실시하였다. X-선 형광분석은 부경대학교 공동실험실습관의 X-선 형광분석기(XRF-1700, SHIMADZU: 출력(40 kV, 30 mA))를 사용하였다. 단순 열처리와 화학적 열처리 전 후의 루비시료의 색상변화를 정량적으로 평가하기 위하여 색차계(Chromameter: CS-100, Minolta)를 사용하였으며, 정확성을 높이기 위하여 모든 시료에 대해서 10회 측정 후 평균값을 구하였다. 또한 자외선-가시광선 분광분석(UV-Vis Spectrometer)은 Jasco사의 분광분석기(V-670)를 사용하여 밴드 폭을 5 nm로 하여 분당 100 nm의 스캔속도로 300 nm부터 800 nm의 구간을 측정하였다.

열처리에 의한 표면의 변화특성에 대한 관찰과 성분변화를 파악하기 위하여 SHIMADZU사의 EPMA(EMPA-1600)를 이용하여 가속전압=15 kV, 빔전류=40 mA와 빔 사이즈=1 μm의 조건하에서 분석하였다.

### 3. 연구결과 및 토의

#### 3.1. X-선 형광분석(XRF)

X-선 형광분석기를 이용한 탄자니아산 루비의 주원소와 미량원소의 함량은 Table 3과 같다. 탄자니아산 루비의 원시료(T-01과 T-02)의 주성분인 알루미늄 함량은  $Al_2O_3=91.17$  wt.%,  $Al_2O_3=90.32$  wt.%이며, 규소는 각각  $SiO_2=4.66$  wt.%와  $SiO_2=7.10$  wt.% 함유하고 있다. 또한 루비의 적색 발색소인 크롬의 함량은  $Cr_2O_3=1.04$  wt.%와  $Cr_2O_3=0.72$  wt.%이며, 그 외 마그네슘, 칼슘, 철을 미량으로 함유하고 있다(Table 3).

**Table 3.** Chemical composition of the Tanzanian rubies (R-01 and R-02 ; raw rubies, T-01 ; heated ruby at 1,600°C for 6 hours, T-04 ; heated ruby with flux material)

Elements	R-01	R-02	T-01	T-04
$Al_2O_3$	91.17	90.32	88.32	85.09
$SiO_2$	4.66	7.10	9.33	9.95
$TiO_2$	n.d.*	n.d.	n.d.	n.d.
$Cr_2O_3$	1.04	0.72	0.78	0.80
$Fe_2O_3$	0.33	0.39	0.35	n.d.
MgO	0.64	n.d.	n.d.	n.d.
CaO	1.16	0.50	0.35	0.27
$Na_2O$	n.d.	0.37	0.33	0.53
$K_2O$	n.d.	0.60	0.53	0.73
PbO	n.d.	n.d.	n.d.	2.44
CuO	n.d.	n.d.	n.d.	0.19
$Co_2O_3$	0.15	n.d.	n.d.	n.d.
$WO_3$	0.85	n.d.	n.d.	n.d.
Total	100.00	100.00	99.99	100.00

\* n.d. : not detected

T=1,600°C에서 6시간동안 열처리한 루비시료(T-03)와 납을 주성분으로 하는 첨가제를 피복한 화학적 열처리를 한 루비시료(T-04)의 경우, 처리를 하지 않은 원시료(T-01과 T-02)와 비교했을 때, 알루미늄의 함량은  $Al_2O_3=88.32$  wt.%과  $Al_2O_3=85.09$  wt.%로 낮으며, 규소의 함량은  $SiO_2=9.33$  wt.%과  $SiO_2=9.95$  wt.%로 높았다. 또한 첨가제에 피복한 루비(T-03)에서는  $PbO=2.44$  wt.%과  $CuO=0.19$  wt.%를 함유하고 있다(Table 3).

#### 3.2. 자외선-가시광선 분광분석(UV-Vis Spectrometry)

열처리되지 않은 탄자니아산 루비시료의 주요 흡수 스펙트럼은 철성분(388 nm)에 의한 영향은 뚜렷하지 않으며, 주로 크롬에 의해서 발생된다. 크롬에 의해 405~410 nm와 543~565 nm에서 넓은 밴드로 나타나며, 693 nm 피크로 전체적인 루비 스펙트럼이 관찰된다(Fig. 3).

또한 단순 열처리를 거친 후의 T-01시료와 T-02시료의 흡수 스펙트럼은 전반적으로 낮아졌으며, 특히 T-01시료의 경우에는 693 nm에서 크롬의 흡수 피크가 소멸되었다(Fig. 3(a), (b)). 그러나, 화학적 열처리를 한 T-04시료는 처리 후 흡수 스펙트럼이 전반적으로 높아졌음을 알 수 있다(Fig. 3(d)). 이는 색상변화의 정량적 차이를 확인할 수 있는 색차계의 측정 결과와 잘 일치한다.

#### 3.3. 색차계를 이용한 색상분석(Chromameter)

단순 열처리와 첨가제를 이용한 열처리 전 후의 루

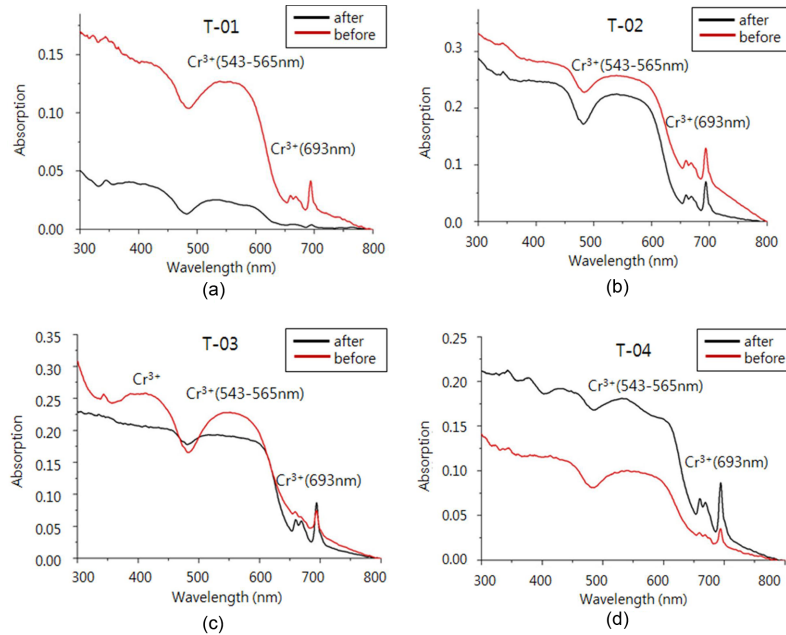


Fig. 3. UV-Vis absorption spectra of the various Tanzanian rubies before and after treatment for color improvement.

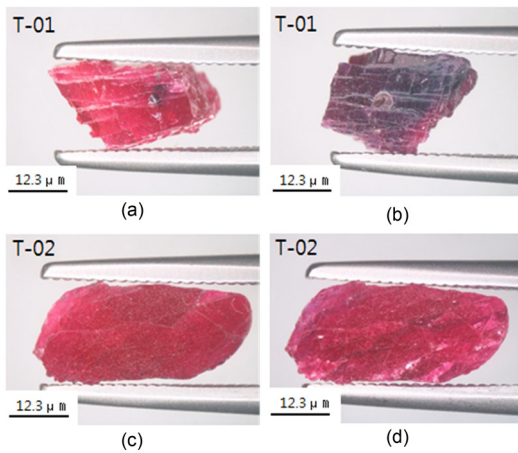


Fig. 4. A photograph showing the Tanzanian rubies. (a) and (d) ; raw rubies. (b) and (d) ; simple heated rubies at 1,600°C for 4 hours, and 1,200°C for 4 hours and at 1,600°C for 4 hours.

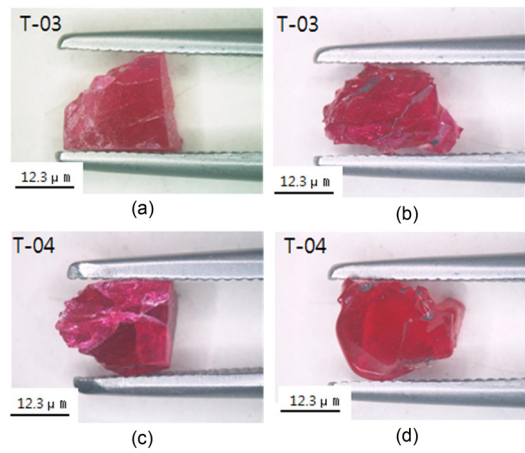


Fig. 5. A photograph showing the Tanzanian rubies. (a) and (c) ; raw rubies. (b) and (d) ; heated rubies with flux material.

비시료의 색상의 변화를 관찰하기 위하여, 디지털 카메라(니콘 DS-Fi1)를 장착한 현미경(Zeiss사의 Stemi 2000-C)을 이용하여 사진을 육안으로 비교하였다. 실험 결과 T=1,600°C에서 6시간동안 단순 열처리를 실시한 루비시료(T-01)는 열처리 후 어두운 자색(Fig. 4(a), (b))으로 변하였고, T=1,200°C에서 4시간과 T=1,600°C에서 4시간 동안 단순 열처리를 한 루비시료(T-02)는

열처리 후 육안으로는 뚜렷한 차이를 나타내지 않으나, 이전의 조건에 비하여 더 많은 균열이 발생되었다(Fig. 4(c), (d)). 첨가제를 이용하여 열처리를 한 루비시료(T-03과 T-04)는 단순 가열 처리한 루비시료(Fig. 4(b), (d))와는 달리 첨가제가 균열을 충진하여 색상과 투명도가 뚜렷하게 개선되었음을 확인할 수 있다.

단순 열처리와 화학적 열처리를 실시한 탄자니아산 루비시료의 색상변화를 색차계를 이용하여 측정할 결

과를 CIE 1931 color space에 도시하였다. 단순 열처리와 화학적 열처리 실시 이전 탄자니아산 루비시료(T-01, T-02, T-03, T-04)는 색차계의 X 좌표, Y좌표에서 각각 (0.365, 0.321), (0.346, 0.363), (0.386, 0.304), (0.395, 0.313)로 적색 영역에 도시된다(Fig. 6, 7).

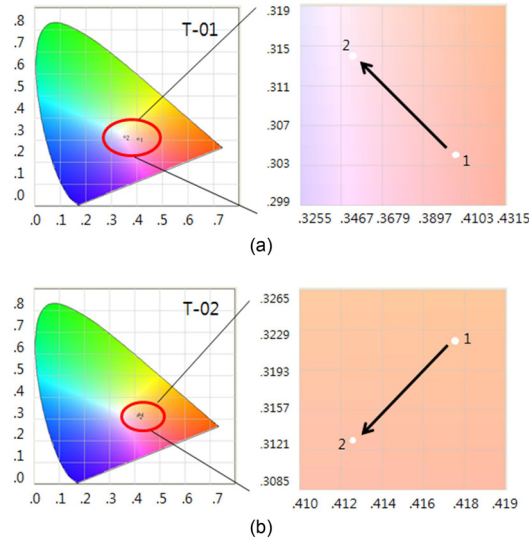


Fig. 6. A photograph showing schematized Tanzanian rubies at CIE 1931 Color Space. (a) raw (1) and heated Tanzanian rubies (2) at 1,600°C for 6 hours (T-01); (b) raw (1) and heated Tanzanian rubies (2) at 1,200°C for 4 hours and at 1,600°C for 4 hours (T-02).

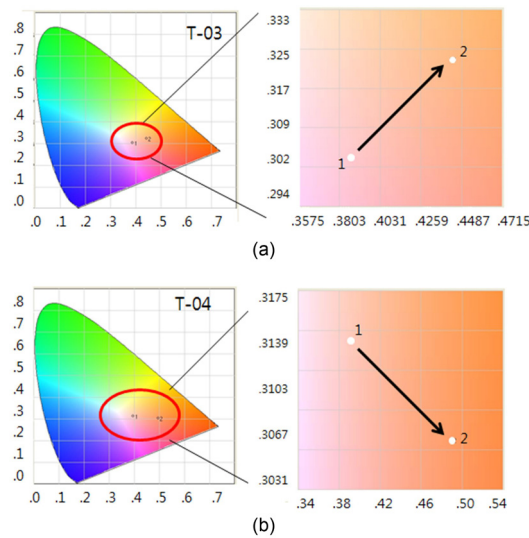


Fig. 7. A photograph schematized Tanzania ruby on the CIE 1931 Color Space. (a) and (b) raw rubies (1) and heated rubies with flux material (2) (T-03 and T-04).

T=1,600°C에서 6시간 동안 단순 열처리한 루비시료(T-01)는 (0.337, 0.322) 영역에 도시되며, T=1,200°C에서 4시간, T=1,600°C에서 4시간 동안 단순 열처리한 루비시료(T-02)는 (0.405, 0.308)에 도시되어 열처리에 의해 적색보다 청색을 지니는 적색을 나타냈다. 한편, 첨가제를 이용하여 열처리를 한 루비시료(T-03, T-04)는 (0.443, 0.295)와 (0.495, 0.304)에 도시되며, 선명한 적색을 띠어 현저한 색의 개선이 되었음을 알 수 있다(Fig. 7).

3.4. 주사전자현미경분석(EPMA)

자외선-가시광선 분광분석(UV-Vis)과 색차계를 이용한 색상분석(Chromaneter)의 결과에서 첨가제를 이용하여 열처리한 루비의 투명도와 색상이 개선됨이 확인되었다(Fig. 7). 이러한 결과는 첨가제를 이용하여 열처리한 루비시료 표면에 대한 전자현미분석(EPMA)결과에서도 확인된다. 전자현미분석의 후면산란상(EPMA-BED)에서 루비시료의 표면 균열의 충전과 2차 용융광물의 생성이 확인되며(Fig. 8(a)), 전자현미분석기를 이

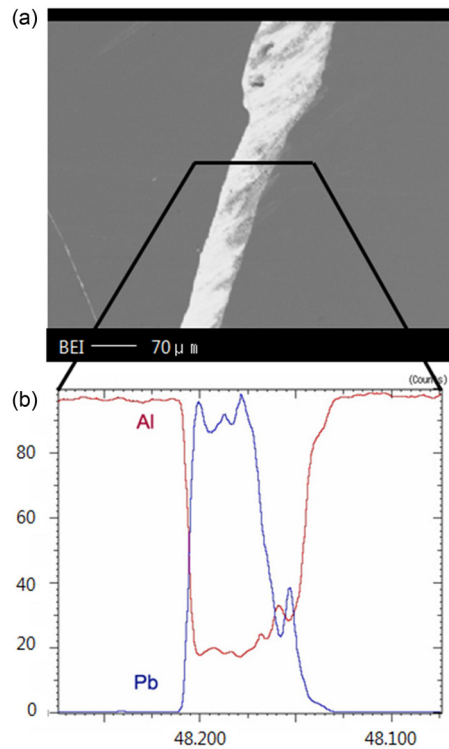


Fig. 8. (a) A photograph showing BEI image of heated ruby with flux material, which shows filled surface with flux (light color). (b) The Pb and Al contents in the corresponding position of above image.

용한 선분석(line scanning)결과, 표면의 균열을 따라 알루미늄의 함량은 감소하고, 첨가제의 주성분인 납의 함량이 증가하는 것을 알 수 있었다(Fig. 8(b)).

열처리 실험에 사용된 첨가제의 납성분의 용융체가 루비시료의 표면에 존재하는 미세한 균열이나 공극 부분에서 검출되는 것으로 볼 때, 이 첨가제에 의한 용융물질이 열처리 과정 동안 루비의 균열부를 채움으로써, 루비의 내구성과 투명도를 개선하였음을 알 수 있다. 또한 첨가물의 열 용융에 의한 2차생성물이 루비와 굴절률이 매우 비슷하여 빛이 루비 내부로 더 쉽게 통과할 수 있게 하여 전반적으로 색상이 개선된 것으로 나타났다. 따라서 첨가제를 사용한 화학적 열처리는 탄자니아산 루비의 색상과 투명도 개선에 적합한 방법으로 확인되었다.

#### 4. 결 론

미얀마의 Mogok과 Mong Hsu산 루비의 색처리에 효과적이라고 알려진 전통적인 단순 열처리 방법은 탄자니아산 루비시료의 색과 투명도 등 보석학적 특성의 개선에 효과적이지 못하다. 비교적 균일한 암적색을 갖는 탄자니아산 루비 시료는 단순 열처리에 의해 색상과 투명도가 색채 색차계와 자외선-가시광선분광분석 결과 CIE 1931 color space상의 적색과 청색의 좌표값(X, Y)이 원시료 (0.365, 0.321) 및 (0.346, 0.363)에서 (0.337, 0.322)로 모두 감소한 것이 확인되었으며, 탄자니아산 루비의 X선 형광분석 결과 루비의 적색을 발현 시키는  $Cr^{3+}$  함량이 0.72~1.04 wt.%로 높게 나타났다. 그러나, 갈색의 보조색상을 발현시키는 철의 함량 역시 높기 때문에 순수한 적색이 아닌 암적색을 띄는 것으로 판단되며, 열처리 과정 동안 다량 함유되어 있던  $Fe_2O_3$  성분의 응집현상으로 색상이 암색으로 변한 것으로 판단된다. 또한  $SiO_2$ 의 함량이 특징적으로 높게 나타났는데, 이는 낮은 용융점으로 인하여 열처리 과정동안 용융되었다가 다시 재결정화 될 때 투명도가 낮아지는 것으로 판단된다.

탄자니아산 루비시료 중 표면에 균열이 존재하는 시료를 선별하여 납이 주성분인 첨가제를 사용한 화학적 열처리를 병행한 결과, 색상 뿐 만아니라, 투명도가 매우 개선되었다. CIE 1931 color space 상의 적색과 청색의 좌표값이 원시료 (0.386, 0.304) 및 (0.395, 0.313)에서 (0.405, 0.308)로 적색영역에 도시되었다.

이는 첨가제가 열처리에 의해 용융되어 루비의 균열부분의 충전에 의한 효과로서, 표면과 균열부분에 대한 전자현미분석 결과에서도 확인되었다. 화학적 열처리에 의해 균열부분이 충전되어 내구성과 투명도를 개선하며 또한, 루비와 굴절률이 매우 비슷하기 때문에 빛이 루비 내부로 더 쉽게 통과할 수 있게 함으로서 전반적으로 색상을 개선시키는 효과를 나타내는 것으로 판단된다. 열처리 실험에 사용된 첨가제의 주성분은 전자현미분석의 선분석에서 열처리 후 루비시료 표면과 균열에서 확인된다.

이 연구결과 첨가제를 사용한 화학적 열처리가 탄자니아산 루비의 색상과 투명도 개선에 적합한 방법임이 밝혀졌으며, 강옥 및 사파이어 등 유사한 유색보석에도 효율적 처리 방법으로 활용될 수 있을 것이다.

#### 사 사

이 논문은 박맹언의 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년)에 의하여 연구되었다.

#### References

- Dona, M.D., Elise, B.M., Rosemary, T., Karen, B.S. and Allen, M.B. (1992) Gem Wealth of Tanzania. *Gems & Gemology*, v.28, p.80-102.
- Hanni, H.A. and Schmetzer, K. (1991) New rubies from Morogoro area, Tanzania. *Gem & Gemology*, v.27, p.156-167.
- Hurlbut, C.S. Jr. and Klein, C. (1977) Dana's Manual of Mineral (19th edition). John Wiley & Sons, U.S.A., p.261-268.
- Hurlbut, C.S. Jr. and Switzer, G.S. (1976) *Gemology*. John Wiley & Sons, U.S.A., p.107, 137-139.
- Kim, G.J. (2006) A Study on Gemmological Characteristics of Heat Treated Ruby. Ph. D. thesis, Pusan National University, p.82-85.
- Park, H.Y. (2004) The gemological study of ruby and sapphire from Tanzania. Msc Thesis, Pukyong National University, p.1-7.
- Park, H.Y. and Sung, K.Y. (2004) Gemological characteristics of rubies and sapphires from Tanzania. *Jour. Miner. Soc. Korea*, v.18, p.313-323.
- Simonet, C., Fritsch, E. and Lasnier, B. (2008) A classification of gem corundum deposits aimed towards gem exploration. *Ore Geology Reviews*, v.34, p.127-133.

2014년 10월 23일 원고접수, 2014년 12월 10일 1차수정, 2014년 12월 15일 게재승인