

미얀마와 타산지 녹색 투어말린의 특성비교 분석

김경진^{1*}, 정재민¹, 안용길²

¹공주대학교 예술대학 조형디자인학부, ²한양대학교 공과대학 신소재공학부

Characteristic comparison analysis of the green tourmalines from Myanmar and other deposits

Kyung-Jin Kim^{1*}, Chae-Min Chung¹ and Yong-Kil Ahn²

¹Division of Crafts Design, Kongju National University

²Department of Materials Science and Engineering, Hanyang University

요약 미얀마 Kayah산 녹색 투어말린의 특성을 X-선 형광분석, 자외선-가시광선 그리고 중적외선 분광분석을 통하여 타산지의 녹색 투어말린과 비교하였다. 화학성분 분류에 의해 미얀마 투어말린이 속한 그룹을 조사 하였다. 미얀마 투어말린은 V 원소를 많이 함유하고 있었고 X 사이트에 Ca 원소를 반 이상 함유한 Calcic 그룹에 속했고 우바이트 (Uvite)로 명명되었다. 자외선-가시광선 분석결과 V^{3+} 이온에 의한 415와 611 nm에 강한 흡수밴드가 나타나 녹색 투어말린의 원인이 되었다. Fe^{2+} 이나 Cu^{2+} 이온에 의해 녹색이 나타나는 타산지의 녹색 투어말린과 차이가 있었다. 중적외선 분석에서는 수산기와 금속들 간의 진동에 의한 흡수가 일어났는데 1100 cm^{-1} 근처에서 스트레칭 모드, 3500 cm^{-1} 주변에서 벤딩 모드 그리고 4600 과 4200 cm^{-1} 사이에서 스트레칭과 벤딩 모드의 혼합 밴드가 나타났다.

Abstract The green tourmalines from Kayah state, Myanmar were investigated by WD X-ray fluorescence, UV-vis, and mid-infrared spectroscopy for comparison to tourmalines of other deposits. The group of tourmaline was calculated and classified by chemical analysis. The samples belonged to the Calcic group and Uvite. The green tourmalines showed a strong absorption band at 415 and 611 nm. The presence of V^{3+} ions is responsible for these absorption bands. Combination of the stretching and bending mode by the vibration between cationic and hydroxyl units (metal-OH) are observed in the $4600 \sim 4200\text{ cm}^{-1}$.

Key Words : Classification, Mid-infrared spectroscopy, Tourmaline, UV-vis spectroscopy, WD X-ray fluorescence spectrometer

1. 서론

투어말린(전기석, Tourmaline)은 붕 규산염 광물로 다양한 색상을 가진 보석이다. 무색은 아크로아이트(Achroite), 밝은 황색은 카나리 투어말린(Canary Tourmaline), 갈색은 드라바이트(Dravite), 남청색은 인디콜라이트(Indicolite), 형광청색은 파라이바 투어말린(Paraiba Tourmaline), 분홍색에서 적색은 루벨라이트(Rubellite), 흑색은 솔(Schorl), 적자색은 사이버라이트

(Siberite) 그리고 녹색 투어말린(Green Tourmaline) 등으로 다양하게 불리고 있다.

투어말린은 $R3m(C^5_y)$ 공간군의 삼방정계구조로 화학 조성 $XY_3Z_6(Si_6O_{18})(BO_3)_3V(OH,O)_3W(OH,F)$ 로 복잡한 화학방정식을 가지고 있다. X 사이트는 Na^{+} , K^{+} , Ca^{2+} 또는 공공(Vacancy) 이온들로 구성되고 Y 사이트는 일반적으로 Al^{3+} 이온으로 채워지나 Li^{+} 와 Mg^{2+} 이온뿐만 아니라 전이금속 이온들(Ti, V, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn)에 의해 치환될 수 있고 Z 사이트는 주로 Al^{3+} 이온으로 채워

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2008-531-G0001).

*Corresponding Author : Kyung-Jin Kim(Kongju National Univ.)

Tel: +82-41-850-0382 email: kkj007@hanmail.net

Received December 6, 2013

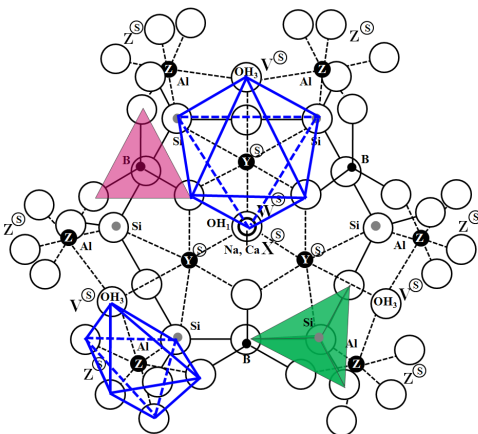
Revised (1st December 26, 2013, 2nd December 30, 2013)

Accepted January 9, 2014

져 있다. V 사이트는 OH⁺ 나 O²⁻ 이온으로 구성되고 W 사이트에는 OH⁺, F⁻ 이온으로 채워져 있다[1,2].

기본 구조 단위는 [0001]선을 따른 평면조직에 찌그러진 BO₃ 그룹들과 Na, Li 그리고 AlO₆ 팔면체와 연결되어 있고 바젤면을 형성하는 Si₆O₁₈의 육각형링들로 되어있다 [Fig. 1].

투어말린은 X 사이트의 구성이온에 따라 alkali, calcic, 그리고 vacant 투어말린으로 분류된다. X 사이트에 Na⁺가 있으면 alkali, Ca²⁺가 있으면 calcic 그리고 비어있으면 vacant 투어말린으로 불린다.



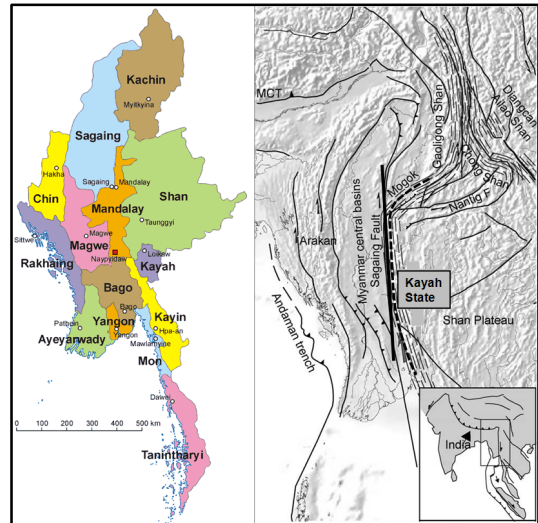
[Fig. 1] Tourmaline structure showing the relative positions of X, Y, Z, W, and V sites containing Si₆O₁₈ and BO₃ structures. Source: Modified from Y.K. Ahn et al. [3].

본 연구에 사용된 투어말린은 미얀마 Kayah 주에서 수집되었다. Kayah 주는 지형적으로 남동부 미얀마에 위치해 있으며 북쪽으로는 Shan 주에 접해있고 동쪽으로는 태국의 매홍손 지방과 경계를 이루며 남서쪽에는 Kayin 주와 접해있다. 지질학적으로는 미얀마의 남북을 관통하는 사가잉 단층(Sagaing Fault)과 보석이 많이 생산되는 모곡화성벨트 (Mogok Metamorphic Belt, MMB)의 우측에 위치해있다.

MMB에서는 투어말린(tourmaline)+바이오타이트(Biotite)+가넷(garnet)+무스코바이트(Muscovite)들이 최소 두 개 이상 함께 들어있는 다양한 편마암과 혼성암 들이 산출된다. 특히 MMB에서는 스피넬, 다이옵사이드 그리고 루비 등의 보석들도 암석에 노출되어 채광된다[4,5].

본 연구에서는 미얀마산 녹색 투어말린의 물리적 특성과 성분분석 그리고 분광분석을 통하여 타산지의 녹색 투어말린과 어떠한 차이가 나는지를 비교하고자 한다. 더 나아가 녹색의 발색이 타산지와 어떠한 미량성분 등이

차이가 있는지를 비교분석하였다.

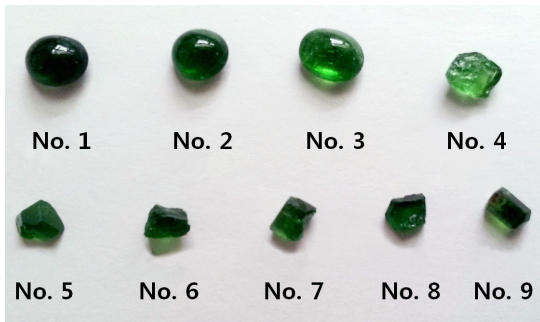


[Fig. 2] Kayah state in the southeast region of Myanmar

2. 시료 및 실험방법

미얀마 Kayah 주의 광산으로부터 수집된 아홉 개의 천연 녹색 투어말린은 표면을 연마한 후에 분석되었다. 물리적 특성을 확인하기 위하여 굴절율은 GIA Duplex II의 굴절계를 사용하였고 비중은 Sartorius YDK01 비중계를 이용하여 측정되었다. 자외선 형광기로 장파(365 nm)와 단파(253.7 nm)에 대한 형광 반응을 확인하였다. 또한 가시광선 영역의 분광학적 특성을 연구하기 위하여 Jasco사의 V-650 자외선-가시광선 분광분석기(UV-vis spectroscopy)로 5 nm 밴드 폭과 분당 100 nm의 스캔 속도로 300-800 nm 사이의 스펙트럼을 측정하였고 적외선 분광분석은 DRGS detector가 장착된 Jasco사의 FT-IR 4100을 사용해서 해상도 4cm⁻¹로 6000-400 cm⁻¹의 범위를 측정하였다.

투어말린은 각 사이트에 함유된 원소 성분들에 따라 다양하게 분류 될 수 있다. 시료들의 정량 정성분석을 위하여 Shimadzu사의 XRF-1700 X-ray로 측정조건 X-ray Rh 튜브 타깃으로 전압 40KV, 전류 90 mA로 X-선 형광 분석(WD-XRF; Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence spectrometer)을 하였다. 분석된 시료의 성분들은 Julie Selway와 Jian Xiong [6]에 의해서 개발된 투어말린 분류 계산식을 사용하여 미얀마 Kayah주의 녹색 투어말린이 어느 그룹에 들어가는지 확인하였다.



[Fig. 3] 9 pcs samples of green color tourmaline from Myanmar

3. 결과 및 고찰

3.1 물리적 특성

Table 1에 미얀마산 9개의 녹색과 다른 산지의 투어말린들의 물리적 특성의 차이를 비교하였다.

미얀마 산투어말린의 굴절률(1.620-1.645)은 타산지와 크게 다르지 않았으나 No. 2, 7, 그리고 8의 시료는 복굴절율이 타산지보다 적게 나왔다. 비중에서도 No. 4, 7, 그리고 8은 다른 시료들과 타산지들에 비해 3 이하로 작게 측정되었다. 반면에 자외선 형광 검사에서는 모든 시료에서 반응을 보이지 않았다.

3.2 화학 조성 및 Classification

3.2.1 화학 조성

투어말린은 결정속의 화학조성과 미량 원소들에 따라 다양한 색상이 나타난다. 불순물 원소로 Mn을 많이 함유하면 황색 또는 핑크에서 적색의 투어말린이 되고 Fe 성분이 많으면 녹색이 된다. 그러나 녹색계열 색상은 조금씩 다른 색상이 나타날 수 있는데 Cu가 많이 들어있으면 형광을 띤 녹색색의 파라이바투어말린이 되며 V를 많이 함유하여도 녹색을 띠게 된다. 본 실험에 사용된 미얀마 Kayah주에서 채굴된 투어말린의 성분을 확인하기 위하여 X-선 형광분석 하였다. 분석결과 다른 녹색계열의 투어말린에 비하여 V이 상대적으로 많고 Fe과 Cu는 미량만 검출되었다. 미얀마산과 타산지의 녹색계열 투어말린의 발색 원소들을 Table 2에 비교하였다. 미얀마산지의 투어말린은 V의 함량이 많아짐에 따라서 녹색이 짙어지는 경향이 있다. 마다가스카르산 녹색 투어말린은 미얀마산에 비하여 V의 양이 적어 옅은 녹색을 띠었다. 파라이바 투어말린이라고 불리는 형광색을 띠는 녹색색 투어말린은 모잠비크, 브라질, 나이지리아산에서 Cu를 함유

하고 V는 전혀 포함하지 않았다. 이들의 색상은 특정지역에서 주로 채굴되며 다른 녹색계열보다 높은 가치를 나타낸다. 반면에 일반적인 녹색 투어말린들은 Fe 발색 원소로 함유한다. 이들의 색상의 차이는 자외선 가시광선 스펙트럼 분석에 의하여 구별될 수 있다.

[Table 1] Gemological properties of green tourmaline from Kayah state, Myanmar.

Color	Locality	R.I.	DR	SG	Ref.
Green	Myanmar	1.621-1.644	0.023	3.05	No.1
Green	Myanmar	1.629-1.641	0.012	3.05	No.2
Green	Myanmar	1.621-1.641	0.020	3.04	No.3
Green	Myanmar	1.621-1.639	0.018	2.99	No.4
Green	Myanmar	1.621-1.639	0.018	3.05	No.5
Green	Myanmar	1.621-1.639	0.018	3.08	No.6
Green	Myanmar	1.621-1.631	0.010	2.95	No.7
Green	Myanmar	1.621-1.632	0.011	2.97	No.8
Green	Myanmar	1.621-1.641	0.020	3.08	No.9
Yellowish green to orangy yellow	Zambia Elbaite	1.623-1.645	0.022	3.11-3.17	[7]
Greenish yellow to brownish yellow	Kenya Dravite-uvite	1.619-1.642	0.023	3.04-3.05	[8-10]
Green to light greenish blue	Mozambique	1.619-1.638	0.018	3.01-3.06	[11]
yellowish green to dark green	Madagascar	1.623-1.649	0.026	3.07-3.18	[12]

R.I.: Refractive Index, DR : Double refraction, SG : Specific gravity.

[Table 2] The trace elements of green tourmaline from other deposits.

Color	Locality	FeO	CuO	V ₂ O ₃	Ref.
Dark green	Myanmar	0.02	0.01	0.66	
Green	Myanmar	0.02	0.01	0.48	
Light green	Myanmar	0.03	0.01	0.26	
Green	Madagascar	0.01	nd	0.17	[13]
Greenish blue	Mozambique	nd	0.30	nd	[14]
Bluish green	Mozambique	nd	0.54	nd	[14]
Greenish blue	Brazil	0.03	1.86	nd	[15]
greenish blue	Nigeria	nd	0.29	nd	[15]
Greenish blue	Afghanistan	0.13	nd	nd	[15]
Greenish blue	Namibia	2.97	nd	nd	[15]

[Table 3] WD-XRF analyses of tourmaline from Myanmar.

Sample no.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9
Color	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Species	Fluor-Uvite	Fluor-Uvite	Fluor-Uvite	Fluor-Uvite	Fluor-Uvite	Fluor-Uvite	Fluor-Uvite	Fluor-Uvite	Fluor-Dravite
Oxides									
(wt.%)									
Al ₂ O ₃	34.96	35.02	34.99	35.10	37.05	36.58	35.60	33.94	35.98
SiO ₂	33.91	33.63	33.92	33.90	32.08	32.35	33.49	33.12	33.27
B ₂ O ₃ calc	10.71	10.68	10.65	10.65	10.65	10.62	10.70	10.56	10.64
FeO	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04	0.06	0.09
MnO	nd	nd	nd	0.01	nd	nd	nd	nd	0.02
V ₂ O ₃	0.66	0.48	0.30	0.26	0.47	0.47	0.39	0.92	0.20
MgO	10.01	10.01	10.02	10.01	9.69	10.02	10.21	10.84	9.97
TiO ₂	0.19	0.19	0.15	nd	0.17	0.16	0.13	0.12	0.15
Cr ₂ O ₃	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.18	nd	0.12
CuO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	nd	0.06
Ga ₂ O ₃	0.01	nd	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	nd
ZnO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	nd	nd	0.01
CaO	3.48	3.63	3.31	2.95	3.39	2.95	2.64	3.20	1.95
Na ₂ O	0.74	0.84	0.67	1.05	0.95	0.99	1.44	1.18	1.78
K ₂ O	0.02	0.03	0.03	0.03	0.05	0.03	0.03	0.04	0.05
Li ₂ O calc	0.42	0.46	0.37	0.35	0.30	0.17	0.27	0.24	0.20
H ₂ O calc	2.76	2.72	2.71	2.71	2.71	2.70	2.67	2.42	2.70
F	1.97	2.05	2.03	2.03	2.05	2.03	2.16	2.58	2.05
Subtotal	99.88	99.76	99.18	99.10	99.64	99.14	99.96	99.22	99.21
O=F	0.83	0.86	0.86	0.85	0.86	0.85	0.91	1.09	0.86
Total	99.05	98.90	98.32	98.25	98.78	98.28	99.05	98.13	98.35
Ions per 31 (O, OH, F)									
Si	5.50	5.47	5.53	5.54	5.23	5.30	5.44	5.45	5.44
Al	0.50	0.53	0.47	0.46	0.77	0.70	0.56	0.55	0.56
Sum T site	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
B	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Al (Z site)	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
Al	0.19	0.18	0.26	0.29	0.36	0.36	0.25	0.04	0.36
Ti	0.02	0.02	0.02	nd	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
V	0.09	0.06	0.04	0.03	0.06	0.06	0.05	0.12	0.03
Cr	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.02	nd	0.02
Mg	2.42	2.43	2.44	2.44	2.36	2.45	2.47	2.66	2.43
Mn	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Fe ²⁺	nd	nd	nd	nd	0.01	nd	0.01	0.01	0.01
Zn	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Li	0.27	0.30	0.24	0.23	0.19	0.11	0.18	0.16	0.13
Sum Y site	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Ca	0.61	0.63	0.58	0.52	0.59	0.52	0.46	0.56	0.34
Na	0.23	0.26	0.21	0.33	0.30	0.31	0.45	0.38	0.56
K	nd	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Vacancy	0.16	0.10	0.20	0.15	0.10	0.16	0.08	0.05	0.08
Sum X site	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
OH	2.99	2.95	2.95	2.95	2.94	2.95	2.89	2.66	2.94
F	1.01	1.05	1.05	1.05	1.06	1.05	1.11	1.34	1.06
Sum OH+F	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00

3.2.2 분류

투어말린은 결정구조 내에 여러 사이트가 존재하는 복잡한 화학방정식을 가지고 있다. 따라서 각 사이트의 구성 원소에 따라 다양한 방법으로 분류 할 수 있다. 특히 주 분류 방법으로 X 사이트의 구성 원소 성분에 따라 alkali, calcic, 그리고 vacant 투어말린으로 분류될 수 있다. Table 3은 XRF로 분석된 원소들을 각 사이트별로 분류한 것이다. 측정하기 힘든 B₂O₃, Li₂O, 그리고 H₂O의 양은 화학정량계산법에 의해 측정되었다. 본 실험에 사용된 미얀마산 녹색 투어말린의 성분 분석 결과 X 사이트에 No. 9를 제외하고 나머지 시료들은 Ca 원소가 반 이상 X 사이트를 차지하고 있었다. 따라서 이들은 Calcic 그룹에 속했다. 반면 No. 9는 Alkali 그룹에 속했다.

V₂O₃를 0.20에서 0.92 wt.% 함유한 미얀마 투어말린은 동시에 MgO도 9.97에서 10.84 wt.%로 많이 함유하고 있다. X 사이트에 들어있는 원소 성분들의 양에 따라 다른 Y와 Z 사이트의 원소들의 분포와도 연관성을 가지고 있다. 결정 전체가 중성이 되기 위해서 각 사이트에 이온들은 연계되어 있다. Alkali 그룹의 X 사이트에 주 이온인 Na⁺ 이온과 Y와 Z 사이트의 Al³⁺ 이온은 Calcic 그룹의 Ca²⁺ 이온과 Y와 Z 사이트의 Mg²⁺ 이온과 연계되어 설명할 수 있다. 그 식은 다음과 같이 표현 할 수 있다 [13].



즉, 결정전체가 중성을 이루기 위해서는 X 사이트에 Na⁺이온이 풍부한 결정은 Y와 Z 사이트에 다른 양이온 가인 Al³⁺이온을 더 선호하고 등가이온인 Ca²⁺이온은 같은 등가 양이온인 Mg²⁺이온을 더 선호한다. 따라서 Table 3의 분류에 따라 Na⁺ 이온이 풍부한 것은 드라바이트 (Dravite) 그리고 Ca²⁺이 풍부한 것은 우바이트 (Uvite)로 명명되었다.

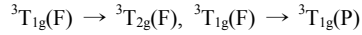
3.3 분광분석

3.3.1 자외선-가시광선 분광분석

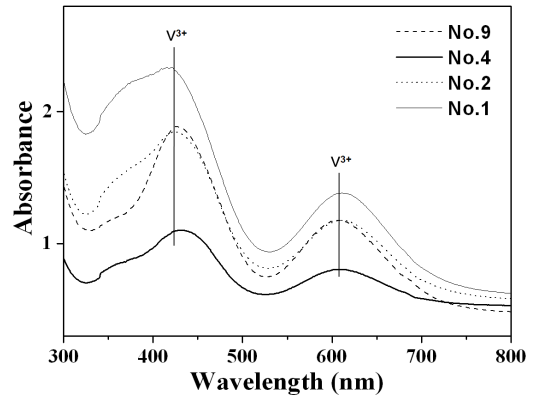
V를 함유한 미얀마산 녹색 투어말린의 자외선-가시광선 분광분석을 하였다. 녹색의 발색 원소들은 V, Fe, 그리고 Cu 등이 있다. 미얀마 투어말린은 V³⁺에 의해 발색되었다. V³⁺은 투어말린의 Y 사이트에 Al³⁺을 치환하여 채워져 있다. 치환된 V³⁺이온은 주위의 산소 음이온과 연결되어 있으며 팔면체를 형성하고 있는 산소 이온들의 내부에 자리하고 있다. 따라서 V³⁺ 이온의 최외각에 있는 전자들은 산소내의 전자들과 결정장을 형성하며 서로 정전기적 반발력이 일어난다. 이때 외부에서 빛에너지가 주어지면 V³⁺ 이온은 이들 산소 이온의 전자들과 d-d

전이이 일어나 V³⁺이온에서 전자가 여기상태로 전이하게 된다. 결과적으로 기저상태와 여기상태의 에너지차이 만큼 빛을 흡수하게 된다.

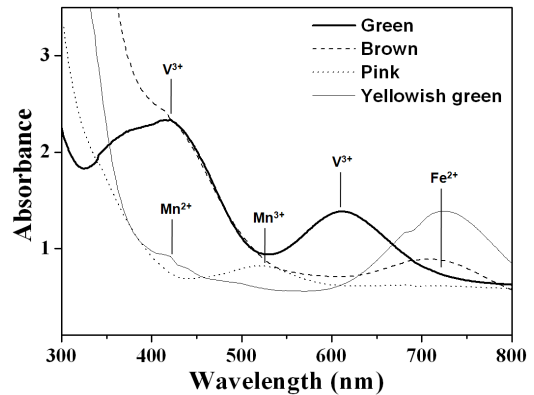
이는 다음과 같이 표현할 수 있다[16].



³T_{2g}(F)로 여기된 전자는 611 nm에서 흡수 밴드를 그리고 ³T_{1g}(P)는 415 nm에서 흡수밴드를 가지며 이것은 Fig. 4에 잘 나타나 있다.



[Fig. 4] UV-VIS absorption spectra of green tourmaline from Myanmar. The spectra were caused by V³⁺ at 415 and 611 nm.



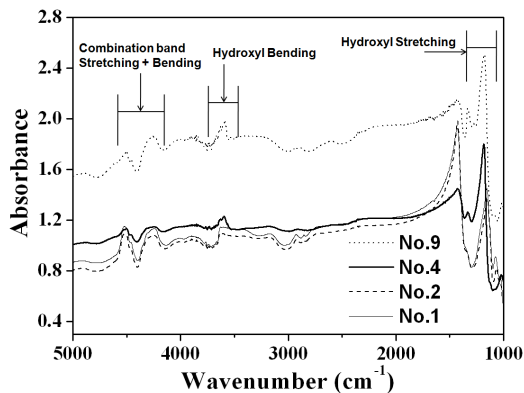
[Fig. 5] UV-VIS absorption spectra of various color tourmaline from other deposits.

Fig. 5에서는 투어말린의 색상별 발색 이온들과 이들에 의한 흡수 스펙트럼을 비교하였다. V³⁺ 이온에 의한 흡수는 415와 611 nm에서 흡수 스펙트럼을 보여 선명한 녹색 투어말린을 나타내었다. Fe²⁺ 이온에 의한 녹색 투어말린은 725 nm에서 흡수를 보였으며 413 nm에서 Mn²⁺ 이온에 의한 약한 흡수가 나타났다. 이는 황색끼가

있는 녹색의 투어말린을 나타내었다. 분홍색의 투어말린은 Mn^{3+} 이온에 의한 흡수 밴드가 522 nm에서 나타났다. 이 영역에서 강한 흡수가 나타나려면 많은 양의 Mn을 함유하고 있어야 한다. 또한 갈색의 투어말린은 Fe^{2+} 이온에 의한 720 nm주위에서 흡수가 일어났으며 황색을 띠게 하는 400 nm 이하의 자외선 영역으로 강한 흡수가 나타나 이 둘의 흡수에 의한 복합된 갈색이 나타났다. Cu^{2+} 이온에 의해서도 형광을 띠는 청록색 투어말린이 나타나는데 이들의 흡수는 Cu^{2+} 이온 흡수밴드인 700 nm 근처와 900 nm 근처에서 추가적인 밴드가 나타나며 이들을 특별히 파라이바 투어말린이라고 부른다.

3.3.2 중적외선 분광분석

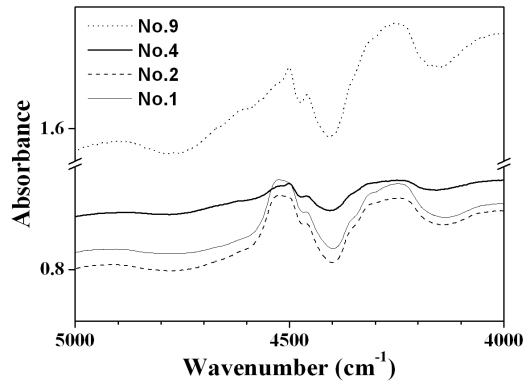
투어말린은 복잡한 구조에 여러 사이트들이 존재하는데 특히 Y와 Z 사이트들은 산소 음이온들에 의해 팔면체를 형성하며 이들의 사이에 금속 양이온들이 존재한다. 이들의 금속이온들은 주위의 OH기와 진동하게 되는데 이들에 의한 흡수피크들이 중적외선 영역에서 나타난다.



[Fig. 6] Mid-infrared spectra of green tourmaline from Kayah state, Myanmar in the range of 5000 to 1000 cm^{-1} .

Fig. 6은 5000에서 1000 cm^{-1} 의 중적외선 영역에서 투어말린의 흡수 스펙트럼이다. 1100 cm^{-1} 근처의 강한 흡수 피크들은 수산기와 금속들 사이의 스트레칭 모드에 의한 흡수 스펙트럼이다.

투어말린의 결정구조 속에는 OH가 일정량 포함되어 있어 이들에 의해 나타난 것이다. 또한 3500 cm^{-1} 주변의 흡수 피크들은 수산기와 금속들과의 벤딩모드에 의해 발생되었다. 이들 스트레칭과 벤딩 모드의 혼합 밴드가 4600과 4200 cm^{-1} 사이에 나타났다.



[Fig. 7] Mid-infrared spectra of green tourmaline from Kayah state, Myanmar in the region of 5000 to 4000 cm^{-1} .

Fig. 7은 4600과 4200 cm^{-1} 사이에 나타난 여러 개의 금속들과 수산기의 혼합밴드들을 보여준다. 금속이온들은 Al, Mg, Fe, 그리고 V이다. 이들 금속들과 OH와의 스트레칭과 벤딩 모드에 의한 혼합밴드들이다.

4. 결론

미얀마산 녹색 투어말린은 V와 Mg을 많이 함유하고 있었다. 타산지의 녹색 투어말린의 발색 원소인 Fe와 Cu에 의한 녹색과 비교하여 보다 선명한 녹색을 띠었다. 사이트들의 분류에 의하여 X 사이트에 Ca 원소가 반 이상을 차지하는 Calcic 그룹에 속했다. Na 원소가 많은 드라이브이트(Drivite)인 No. 9를 제외하고는 우바이트(Uvite)로 판명되었다.

자외선-가시광선 분광분석에서는 V^{3+} 이온에 의한 팔면체장에서 d^2 $d-d$ 결정장 전이가 일어나 415와 611 nm에서 강한 흡수밴드가 나타났다. 녹색은 이들의 흡수에 의해서 발색이 되었다.

중적외선 분광분석에서는 4600과 4200 cm^{-1} 사이에서 Y와 Z 사이트에 있는 금속들과 수산기의 혼합밴드들이 나타났다.

References

[1] C. Castaneda, E. F. Oliveira, N. Gomes, A. C. P. Soares, "Infrared study of OH sites in tourmaline from the elbaite-schorl series", *Am. Mineral.*, 85, pp. 1503-1507, 2000.

- [2] K. Krambrock, M.V.B. Pinheiro, S.M. Medeiros, K.J. Guedes, S. Schweizer, J.M. Spaeth, "Investigation of radiation-induced yellow color in tourmaline by magnetic resonance", Nucl. Instrum. Methods B 191, pp. 241-245, 2002.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-583X\(02\)00568-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-583X(02)00568-2)
- [3] Y.K. Ahn, J.G. Seo, J.W. Park, "Electronic and vibrational spectra of tourmaline - The impact of electron beam irradiation and heat treatment" Vib. Spectrosc., 65, pp. 165-175, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.vibspec.2013.01.002>
- [4] A. Socquet, M. Pubellier, "Cenozoic deformation in western Yunnan (China-Myanmar border)", J. of Asian Earth Science, 24, pp. 495-515, 2005.
- [5] M. P. Searle, S. R. Noble, J. M. Cottle, D. J. Waters, A. H. G. Mitchell, T. Hlaing, M. S. A. Horstwood, "Tectonic evolution of the Mogok metamorphic belt, Burma(myanmar) constrained by U-Th-Pb dating of metamorphic and magmatic rocks", Tectonics, 26, pp. 1-24, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2006TC002083>
- [6] Andy Tindle-Free Software, Mineral Recalculation Software <http://www.open.ac.uk/earth-research/tindle/AGTWebPages/AGTSoft.html>
- [7] E. Boehm, Gem News International: Canary tourmaline from Malawi, Gems & Gemology, 27, 2, pp. 151-152, 2001.
- [8] H.A. Hanni, E. Frank, G. Bosshart, "Goldem yellow tourmaline of gem quality from Kenya", J. of Gemmology, 17, 7, pp. 437-442, 1981.
- [9] M.L. Johnson, J.I. Koivula, "Gem News: Golden tourmaline from Kenya" Gems & Gemology", 32, 2, pp. 135-136, 1996.
- [10] C. Simonet, "Geology of the yellow mine (Taita-Taveta District, Kenya) and other yellow tourmaline deposits in East Africa", J. of Gemmology, 27, 1, pp. 11-29, 2000.
- [11] B.M. Laurs, J.C. Zwaan, C.M. Breeding, W.B. Simmons, D. Beaton, K.F. Rijdsdijk, R. Befe, A.U. Falster, "Copper-bearing (Paraiba-type) tourmaline from Mozambique" Gems & Gemology, 44, 1, pp. 4-30, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.44.1.4>
- [12] S. Lee, Y.K. Ahn, J.G. Seo, J.W. Park, "Spectroscopic characteristics of tourmalines from Antandrokomby, Madagascar", J. Miner. Soc. Korea, 22, 4, pp. 385-393, 2009.
- [13] K. Schemetzer, H. J. Bernhardt, C. Dunaigre, M. S. Krzemnicki, "Vanadium-bearing gem-quality tourmalines from Madagascar", The Gemmological Association of Great Britain, 30, 7/8, pp. 413-433, 2007.
- [14] M L. Brendan, J. C. Zwaan, M. B. Christopher, B. S. William, B. Donna, F. R. Kenneth, B. Riccardo, U. F. Alexander, Copper-bearing (Paraiba-type) tourmaline from Mozambique, Gems & Gemology, 44, 1, pp.4-30, 2008.
- [15] B. M. Paul, M. B. Christopher, Spectral differentiation between copper and iron colorants in gem tourmalines, Gems & Gemology, 45, 2, pp.112-119, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.45.2.112>
- [16] B.N. Figgis, M.A. Hitchiman, " Ligand field theory and its applications", p.206-207, Wiley-VCH, 2000.

김 경 진(Kyung-Jin Kim)

[정회원]



- 1997년 2월 : 공주대학교 일반대학원 지질학과 (이학석사)
- 2004년 2월 : Russian State Pedagogical University, Department of Geography, major of Gemology & Geoecology (이학박사)
- 2006년 9월 ~ 현재 : 공주대학교 예술대학 조형디자인학부 주얼리디자인 전공 부교수

<관심분야>

보석학, 주얼리 디자인, 귀금속재료학, 문화콘텐츠, 문화상품디자인

정 재 민(Chae-Min Chung)

[준회원]



- 1978년 2월 : 이화여자대학교 불어불문과 (문학사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 예술대학 조형디자인학부 주얼리디자인 전공 (석사과정)
- 2011년 10월 ~ 현재 : 사비나 Gem 대표, GIA Korea 주얼리디자인협회 고문

<관심분야>

보석학, 주얼리 디자인

안 용 길(Yong-Kil Ahn)

[정회원]



- 1984년 2월 : 한양대학교 공과대학 무기재료공학과 (공학석사)
- 2013년 2월 : 한양대학교 일반학원 신소재공학부 (공학박사)

<관심분야>

보석학, 재료과학