

비씨 제이드의 보석학적 연구

Gemological Characterization of B. C. Jade

김 원 사 (Won Sa Kim)^{1,*} · Willow Wight²

¹충남대학교 지질환경과학과

(Department of Geology and Environmental Sciences, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

²Canadian Museum of Nature

(240 MaLeod St. Ottawa, Ontario, Canada)

요약 : 캐나다 브리티시 컬럼비아주 카시아르광산에서 산출되는 B.C. jade에 대한 보석학적 특징을 알아보기 위하여 편광현미경 관찰, 경도, 굴절율 및 비중 측정, X-선회절분석, X-선형광분석, ICP-MS, 적외선흡수분광분석, 시차열분석/열중량분석 등을 실시하였다. B.C. jade는 짙은 녹색을 띠고 반투명하며, 지방광택을 나타내며, 주구성광물은 투각섬석-양기석 고용체이다. 미량의 석류석과 미확인된 불투명광물이 공생한다. 모스 경도는 5.5~6, 굴절율은 1.62, 비중 3.01이다. 인성이 강하며 침상단구를 나타낸다. Fe의 함량이 높으며(Fe_2O_3 4.14~4.66 wt%) 녹색을 띠게 하는 발색소 역할을 하는 것으로 해석된다. B.C. jade는 926.9°C에서 탈수현상이 일어나면서 파괴되기 시작하며, 1000.8°C에서 투각섬석-양기석이 투회석+엔스타타이트+석영+물(H_2O)로 분해되는 반응이 거의 완결되는 것으로 해석된다. 이러한 가능성은 926.9°C 이상에서 1.93 wt%의 중량손실이 일어나는 열중량분석결과와 잘 일치한다.

주요어 : B.C. jade, 카시아르, 브리티시 컬럼비아, 캐나다, 보석학적 특징

ABSTRACT: The Gemological characteristics of B.C. jade from Cassiar Mine, British Columbia, Canada, have been investigated, using polarizing microscopy, Mohs' hardness, refractive index and density measurements, X-ray powder diffraction, X-ray fluorescence spectrometry, ICP-MS, Infrared absorption spectrometry, and DTA/TGA. The B.C. jade is deeply green (spinach green or olive green) in color and is translucent. It shows a resinous or waxy luster. The principal mineral of the material is tremolite-actinolite solid solution and minor amount of Cr-garnet and unidentified opaque minerals are accompanied. Mohs' hardness value (5.5~6), refractive index (1.62), and specific gravity (3.01) are measured. It is very highly tough and shows hackly fracture. The high Fe content (Fe_2O_3 4.14~4.66 wt%) in B.C. jade is attributable to a deepening of green color of the material. The B.C. jade starts to dehydrate at 926.9°C and dehydration is completed at 1000.8°C, transforming tremolite-actinolite solid solution to enstatite, diopside, quartz, and water in its place. This possible reaction is supported by the weight loss of B.C. jade (1.93 wt%) at 1000.8°C indicated by TGA curve.

Key words : B.C. jade, Cassiar, British Columbia, Canada, gemological characteristics

*교신저자: kimw@cnu.ac.kr

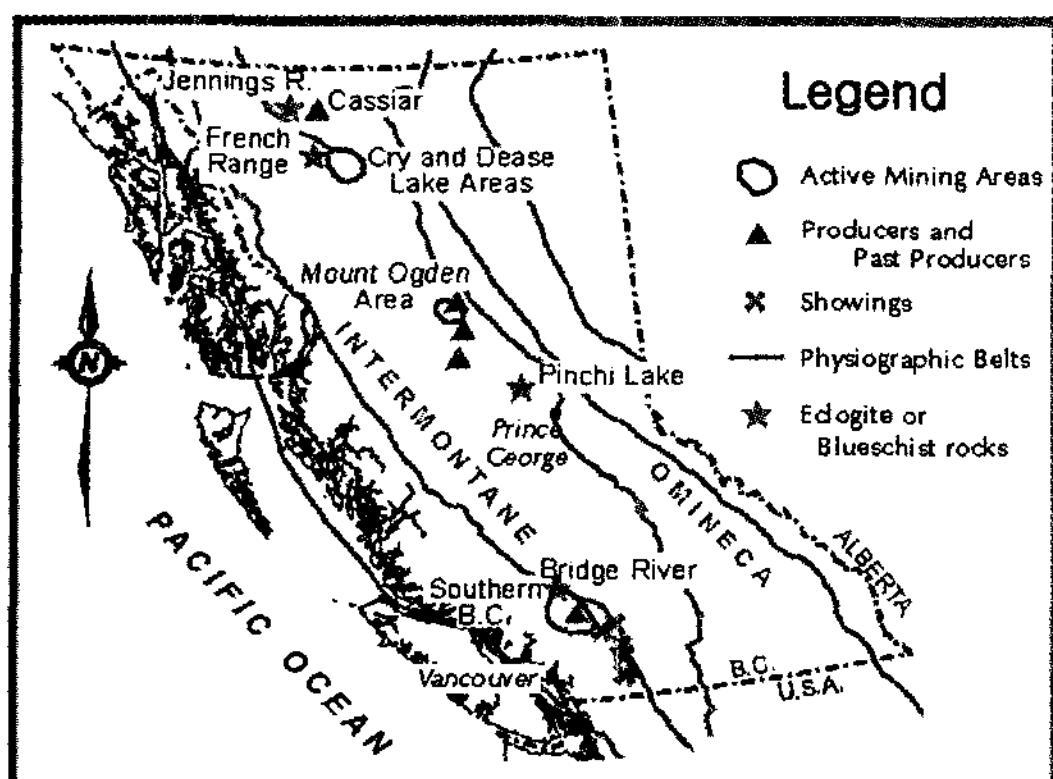


Fig. 1. Map showing B.C. jade and ultrabasic rock occurrences in British Columbia, Canada.



Fig. 2. Cassiar mine area where B.C. jade is actively being mined.

서론

옥(玉)을 의미하는 제이드(jade)란 영문 용어는 신장 혹은 요통을 치료하는데 특효가 있는 돌을 의미하던 'piedra de hijada'라는 스페인어에서 유래하였으며, nephrite는 'piedra de hijada'를 번역한 라틴어 'lapis nephriticus'에서 유래하였다. 동양에서는 두 광물 사이에 경도가 약간 차이를 나타내는 점을 내포하는 광물명인 경옥(硬玉, jadeite)과 연옥(軟玉, nephrite)을 사용하고 있다. 경옥과 연옥은 광물 특성이 전혀 다르며, 전자는 휘석군, 후자는 각섬석군에 속하는 광물이다. 이들의 광물학적, 보석학적 차이점과 산출지에 대해서는 잘 알려져 있다(Webster and Anderson, 1983).

캐나다의 경우 연옥은 브리티시 컬럼비아주 (Province of British Columbia)의 중부 및 북부에 걸쳐 산출된다. 처음에는 19C에 금을 캐는 광부들에 의해 Fraser강 하류에서 연옥 덩어리들이 많이 발견되었으나, 모암이 발견된 것은 1938년이다(Leaming, 1978). 현재 B.C. jade를 생산하고 있는 곳은 북서방향으로 발달하는 Intermontane 구조선과 Omineca 구조선 사이에 있는 협곡에서 사문암으로 변질된 에클로자이트나 감람암의 산출지와 일치한다. 이들 암석은 Pennsylvanian Period (300my)에 대륙판과 island arc system이 충돌할 때 생긴 봉합선을 따라 관입한 것으로 해석되고 있다(Leaming, 1978). 현재 B.C. jade가 생산되고 있는 지역은 Cassiar, Cry Lake, Dease Lake, Mount Ogden, Bridge River 지역 등이며 (그림 1) 이들은 모두 1960년대 중반에 발견된

것들이다. Cassiar mine의 경우, 연간 생산량은 65,000 kg이며, 석면을 생산하던 과정 중에 부산물로 회수되는 것들이다(그림 2). 현재 B.C. jade는 주로 중국으로 수출되며, 장신구와 공예품으로 가공되고 있다(Kiernan and Mulcahy, 1961).

우리나라의 경우 강원도 춘천지역에서 연옥이 산출되고 있으며, 이의 암석, 성인, 광물, 보석학적 특성에 대해서는 김수진 외(1986), 노진환 외(1993), 노진환과 최진범(2000), 박계현과 노진환(2000), Kim (1995) 등에 의해 연구된 바가 있다.

이번 실험에 사용한 연구대상 물질은 캐나다 브리티시 컬럼비아주의 Cassiar광산에서 산출된 연옥이며, 캐나다자연사박물관(Canadian Natural Science Museum)으로부터 제공받은 것이다.

연구시료 및 연구방법

이번 연구에 사용한 연구시료는 크기가 35 cm (L)×14 cm (W) × 12 cm (H)인 판상체 물질이다 (그림 3). 실체현미경을 사용해 시료 표면의 특징과 깨진 면의 특징을 관찰하였으며, 편광현미경을 이용하여 구성광물의 종류와 조직 등의 특징을 관찰하였다. 또한, 경도심, 굴절계, 경도계, 비중저울을 사용하여 기초적인 보석학적 특징을 측정하였다. X-선형광분석기를 이용해 주요 구성화합성분을 규명하였으며, 유도결합플라즈마질량분석기를 이용하여 미량원소를 측정하였다. X-선분말회절기를 사용하여 결정구조를 연구하였으며, 적외선분광분석기를 사용하여 흡수스펙트럼을 분석하였고, 시차열분석기/열중량분석기를 이용하여 열적반응을 연구하였다.



Fig. 3. B.C. jade specimen. Platy cleavages are visible at the edge (circle).

연구 결과

색, 투명도, 광택

Cassiar광산에서 생산되는 B.C. jade는 짙은 녹색 계통(olive green, spinach green)을 띠고 있으며(그림 2), 두꺼운 시편일 경우는 거의 불투명하게 보이지만 1 cm 이하의 두께일 경우에는 반투명한 특징이 뚜렷하게 관찰된다. 광물 표품에서는 물론 윤을 낸 표면에서도 지방광택이 뚜렷하다.

경도, 인성, 깨짐

B.C. jade는 경도가 5.5~6의 범위를 나타내며, 투각섬석-양기석 결정들이 사방으로 뒤엉켜 있는 조직(felted-nature)을 가지므로 인성이 매우 강하다. 이러한 광물조직 때문에 제이드는 오래전 원시시대부터 무기나 화살촉 등을 만드는데 사용된 것으로 보인다. 또한, B.C. jade는 판상의 편리구조를 나타내고 있는 점이 특징이며(그림 3), 깨진 면에는 침상단구(hackly fracture)를 나타내고 있다. 판상의 편리구조는 판상 또는 엽상구조의 투각섬석-양기석 결정의(001)면이 한 평면에 나란하게 방향성을 띤 채로(preferred orientation) 층상배열되어 있기 때문인 것으로 해석된다. 이러한 B.C. jade의 물성은 가공할 때 결을 따라 쪼개지는 불리한 현상을 초래하고 있다.

광물조성

B.C. jade을 구성하는 주 구성물질은 미립의 투각섬석 내지 양기석이며(그림 4), 다색성이 미약하나마 나타나는 것으로 보아 Fe를 상당량 함

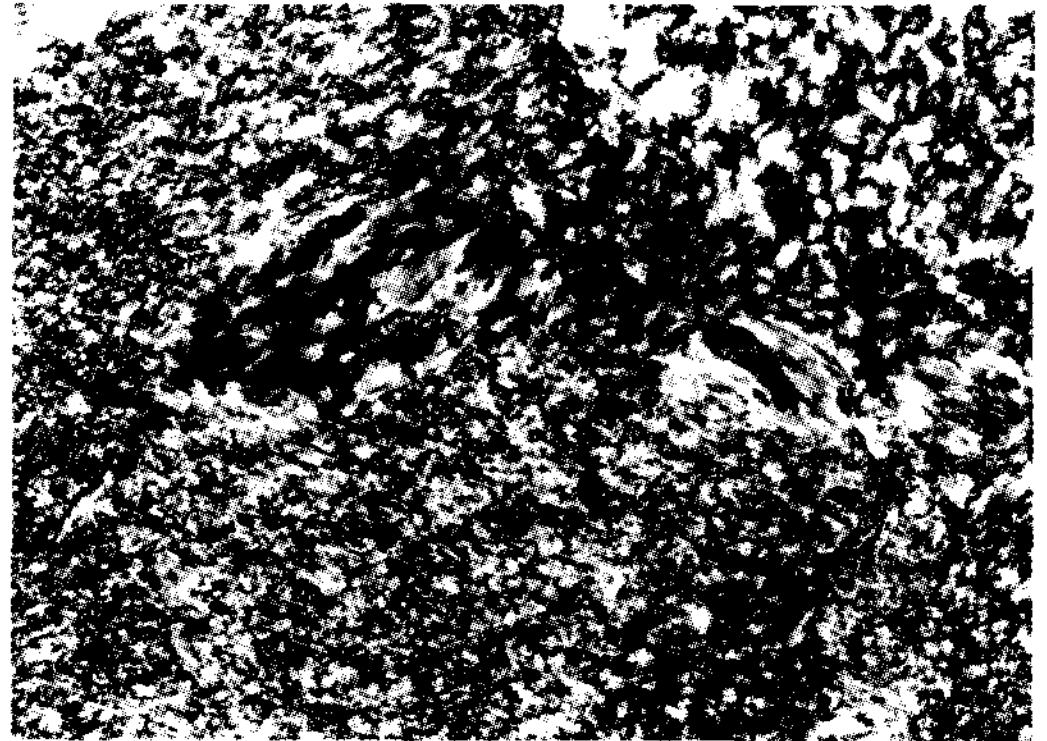


Fig. 4. Photomicrograph of B.C. jade from Cassiar mine, British Columbia, Canada. Fibrous or platy crystals of tremolite-actinolite solid solution composition are seen. Crossed polars.

유하고 있음을 알 수 있다. 등방성을 띠는 연녹색 석류석이 공존한다(그림 5). Grice and Gault (1985)는 SiO_2 38.27, TiO_2 0.47, Al_2O_3 16.95, Cr_2O_3 7.04, FeO 2.64, MnO 6.15, MgO 0.17, CaO 30.45 wt.% 성분의 크롬-망간 그로슬라 석류석이 B.C. jade에 존재하고 있음을 보고하였는데, 이와 동일한 광물로 추정된다. 크롬-석류석은 초염기성암이 사문암으로 변질되는 과정 중에도 잔류되어 있는 조암광물로 사료된다. 이와 함께 자철석 또는 크롬철석으로 추정되는 불투명한 광물도 간혹 발견된다.

굴절율, 비중

B.C. jade 작은 판상체의 양면을 1 micron-size 다이아몬드분말로 윤을 낸 후 Duplex II 굴절계를 사용하여 측정된 굴절율은 1.62였다. 투각섬석-양기석은 원래 단사정계에 속한 복굴절성 광물이므로 3개의 굴절율($\alpha=1.61$, $\beta=1.61$, $\gamma=1.64$)이 측정되어야 하지만, 이들 구성광물이 임의로 중첩되어 결합되어 있기 때문에, 측정된 굴절율은 이 세 굴절율 수치의 평균값에 해당하는 값을 알 수 있다. 아르키메데스원리를 이용한 비중저울(AND electronic chemical balance)로 측정된 비중은 3.01이다.

X-선분말회절분석

X-선분말회절양상을 파악하기 위해 Rigaku D/Max X-ray powder diffractometer를 사용하였으

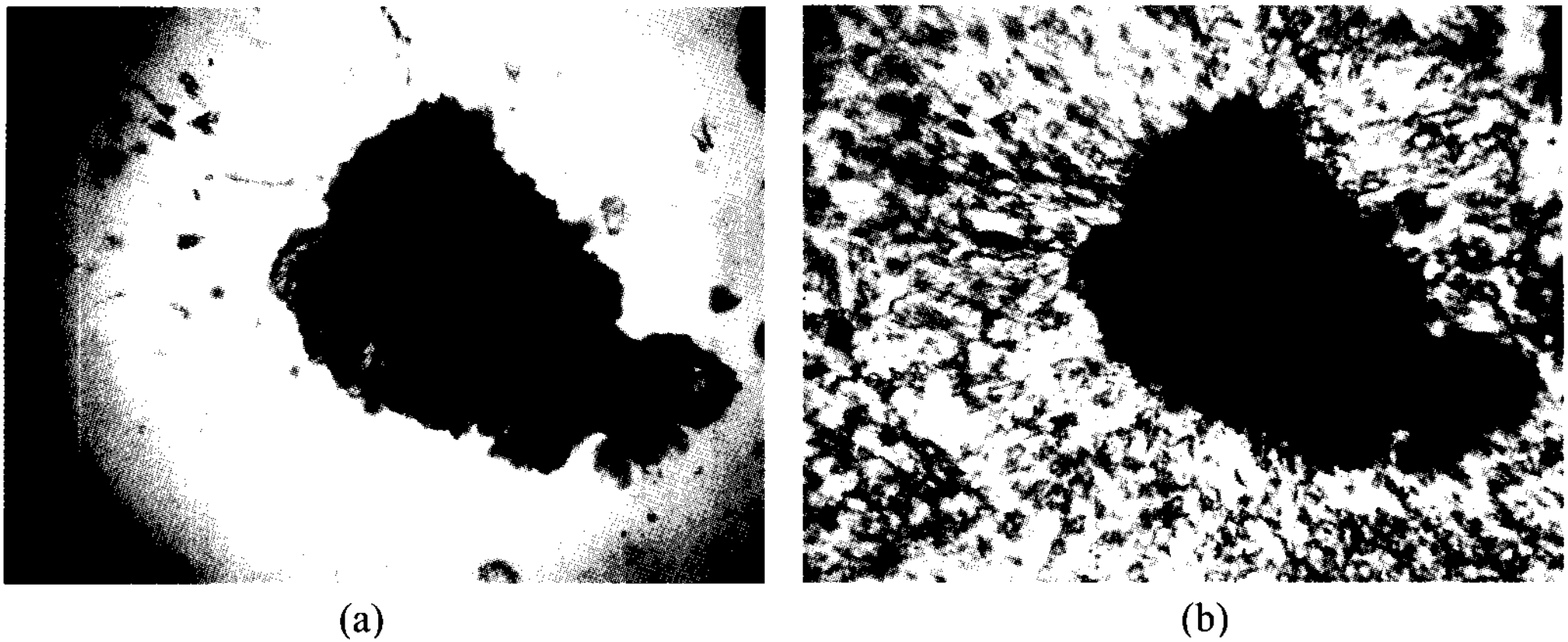


Fig. 5. Photomicrographs of B.C. jade from Cassiar mine, British Columbia, Canada. Isotropic mineral (presumably Cr-garnet) is seen. (a) plane polarized light, (b) crossed polars.

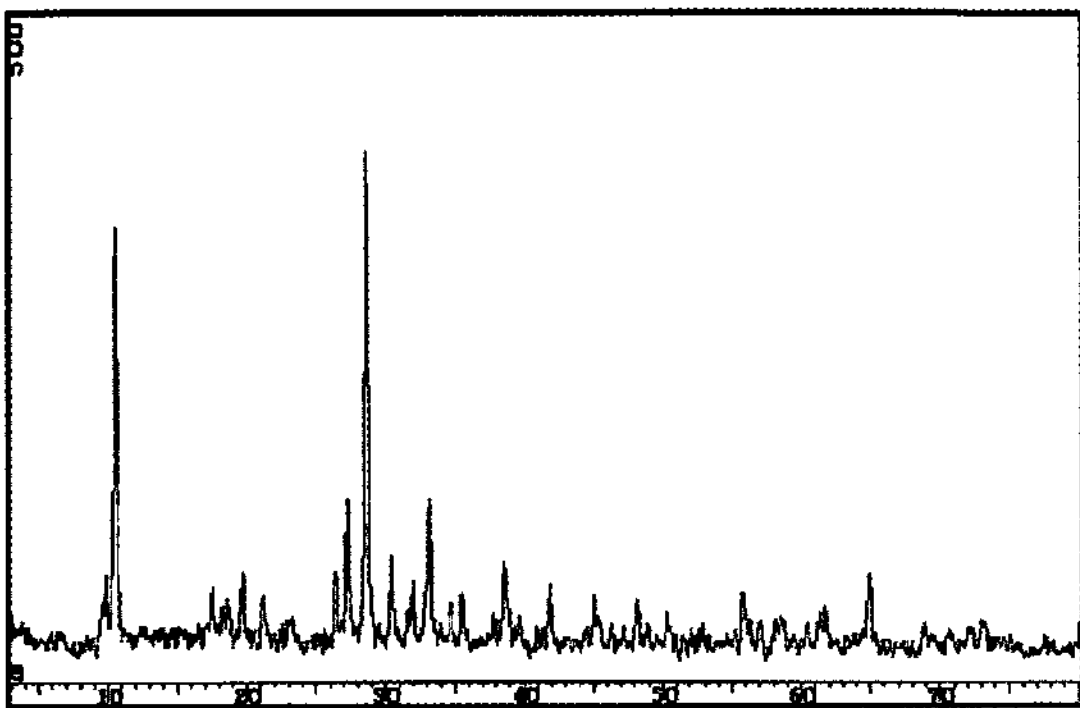


Fig. 6. X-ray powder diffractogram of B.C. jade (tremolite-actinolite solid solution) from Cassiar mine, British Columbia, Canada.

며, 이때 사용한 방사선은 Ni-filtered/CuK α ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$)이었다. 분석 결과(그림 6)에 따르면, 투각섬석-양기석 결정구조를 하고 있음을 알 수 있고, 방향에 따른 층간거리(d)가 투각섬석과 양기석의 중간에 해당하는 것으로 보아 두광물의 고용체임을 확인할 수 있다(표 1).

X-선형광분석

B.C. jade의 주요 구성성분을 규명하기 위해 분말화한 다음 KBr과 혼합시켜 원반 형태로 성형시킨 후 Rigaku RIX 2100 X-ray fluorescence unit을 사용하여 분석하였다. 분석결과는 표 2와 같으며, 이로부터 계산된 일반화학식은 $\text{Ca}_2(\text{Mg}_{4.5}\text{Fe}_{0.5})\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ 이다. 특이한 점은, Fe 성분이 상

Table 1. X-ray powder diffraction data of B.C. jade from Cassiar mine, British Columbia, Canada

Tremolite			B.C. jade		Actinolite	
hkl	d (Å)	I (%)	d (Å)	I (%)	d (Å)	I (%)
020	8.98	16	9.02	21	9.12	60
110	8.38	100	8.42	82	8.47	70
130	5.06	10	5.09	20	5.10	70
040	4.51	20	4.51	19	4.54	60
240	3.27	75	3.28	33	3.29	50
310	3.12	100	3.13	100	3.14	70
151	2.70	90	2.7	37	2.71	100

Tremolite: JCPDS card #13-437 (MPDF, 1980). Actinolite: JCPDS card #25-157 (MPDF, 1980).

당량 (Fe_2O_3 4.14~4.66 wt%) 함유되어 있음이 밝혀졌으며, 이 때문에 B.C. jade의 녹색이 짙음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 연옥의 녹색 발색소가 Fe이며, 그 함량이 증가함에 따라 색이 짙어진다는 일반적인 사실에 잘 부합됨을 알 수 있다.

ICP-MS 분광분석

B.C. jade의 미량 화학성분을 규명하기 위해 유도결합플라즈마질량분석기(Elan 600 ICP-MS)를 사용하였으며, 그 분석결과는 표 3과 같다. 특이한 점은 염기성 내지 초염기성암에 풍부한 원소인 Cr (1502, 1882 ppm), Ni (1253, 1147 ppm),

Table 2. Major element oxides (wt%) of B.C. jade from Cassiar mine, British Columbia, Canada

	1	2	3
SiO ₂	54.47	53.88	54.85
Al ₂ O ₃	0.46	0.65	0.54
Fe ₂ O ₃	4.40	4.14	4.66
TiO ₂	0.02	0.07	0.06
CaO	13.13	12.84	13.42
MnO	0.12	0.10	0.16
MgO	22.02	24.42	23.62
K ₂ O	0.04	0.05	0.02
Na ₂ O	0.12	0.10	0.11
L.O.I.	1.94	1.94	1.94
Total	99.72	98.19	99.38

Table 3. Trace elements abundance (ppm) in B.C. jade from Cassiar mine, British Columbia, Canada

Element	1	2
Cr	1882.32	1502.47
Ni	1253.45	1147.03
Pb	90.93	81.59
Zn	43.50	59.36
B	48.05	62.65
Co	68.12	57.76
V	23.56	39.74
Ti	25.87	29.01
Ba	18.90	28.97
Cu	26.93	11.04

Co (68, 57 ppm)이 상당량 함유되어 있음을 알 수 있다. 이는 B.C. jade가 초염기성암인 에클로 자이트나 감람암로부터 변질되는 과정에 의해 형성되었음을 제시하는 증거로 해석된다. B.C. jade의 Cr, Ni, Co 함유량이 춘천 연옥의 경우(Cr 219 ppm, Ni 127 ppm, Co 3 ppm)보다 훨씬 높은 것은 투각섬석-양기석 구조 내에 이들 원소가 자리잡고 있을 수도 있겠지만, 분석치는 전암분석 결과이므로 미량으로 공존하고 있는 Cr-석류석으로부터 기인되었을 가능성도 있다.

적외선흡수분광분석

JASCO IRA-1 spectrometer를 이용하여 적외선 분광스펙트럼을 측정하였다. B.C. jade는 3681, 2363, 2335, 1651, 1111, 1061, 995, 949, 914, 756, 686, 528 cm⁻¹에서 흡수선을 나타내었다(그림 7). 3680~3700 cm⁻¹ 영역에서 나타내는 흡수

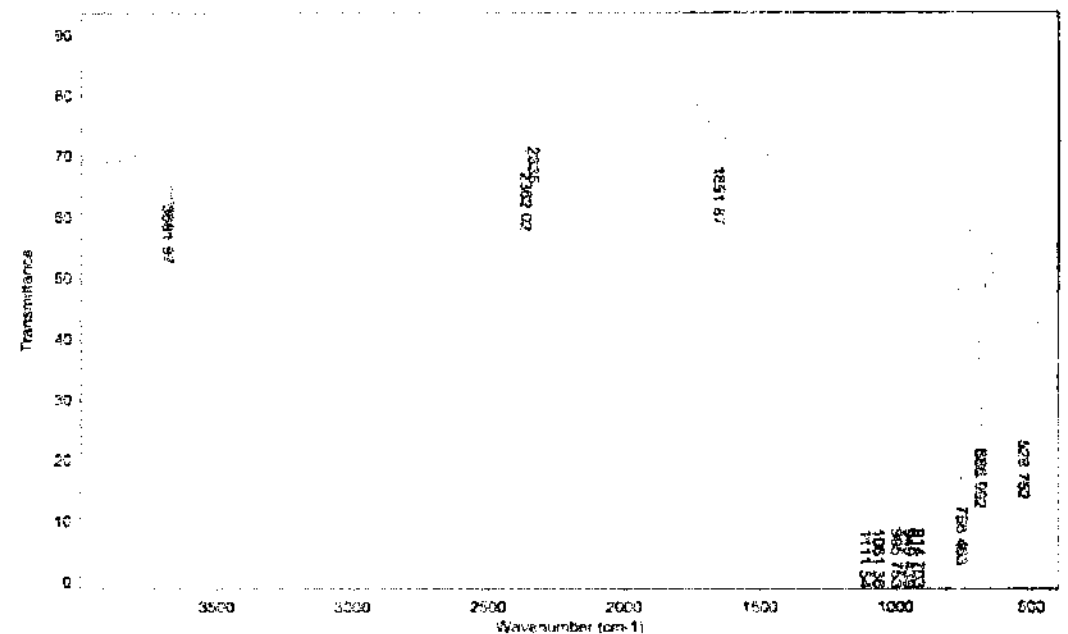


Fig. 7. Infra-red absorption spectrum for B.C. jade from Cassiar mine, British Columbia, Canada.

선들은 O-H stretching에 의해, 그리고 1110, 995 cm⁻¹ 흡수선은 Si-O stretching에 기인한 것으로 판단된다(Farmer, 1974). 하지만 2500~2000에서 나타나는 흡수선은 탄소 삼중결합에 의해 나타나는 현상으로 알려져 있으나, B.C. jade의 결정구조 내에는 탄소가 없으며, 또한 화학분석결과에서도 탄소가 검출되지 않기 때문에 이에 대한 규명이 추후에 필요한 것으로 사료된다.

시차열분석/열중량분석

함수광물인 B.C. jade의 온도상승에 따른 열적 반응 및 결정수의 거동을 알아보기 위해 Q-5000 IR Thermogravimetric Analyser를 사용하여 분석하였다. 분석결과에 따르면(그림 8) 397.9°C와 926.9°C에서 미약한 발열피크가 관찰되며, 1000.8°C와 600°C에서 흡열피크가 나타남을 알 수 있다. 일반적으로 온도가 상승하면 원자들이 느슨하게 재배열하는 것으로 알려져 있다. Ernst (1968)의 실험결과에 따르면 투각섬석은 900°C 이상에서 원자배열이 불안정해지면서 투휘석, 엔스터타이트, 석영, 물로 분해된다. 따라서 B.C. jade의 경우도, 투각섬석-양기석이 600°C에서 원자배열이 불안정해지기 시작하고, 926.9°C에서 탈수현상이 일어나면서 파괴되기 시작하며, 1000.8°C에서 투각섬석-양기석→투휘석+엔스터타이트+석영+물(H₂O)로 분해되는 반응이 완결되는 것으로 해석된다. 이러한 사실은 열중량분석 결과와도 잘 일치한다. 즉, 위 반응이 완료된 후 1.93 wt%의 중량손실이 일어남을 나타내고 있다. 이 중량 감소는 X-선형광분석으로 측정된 B.C. jade의 수분함량(1.94 wt%)과도 잘 일치한다.

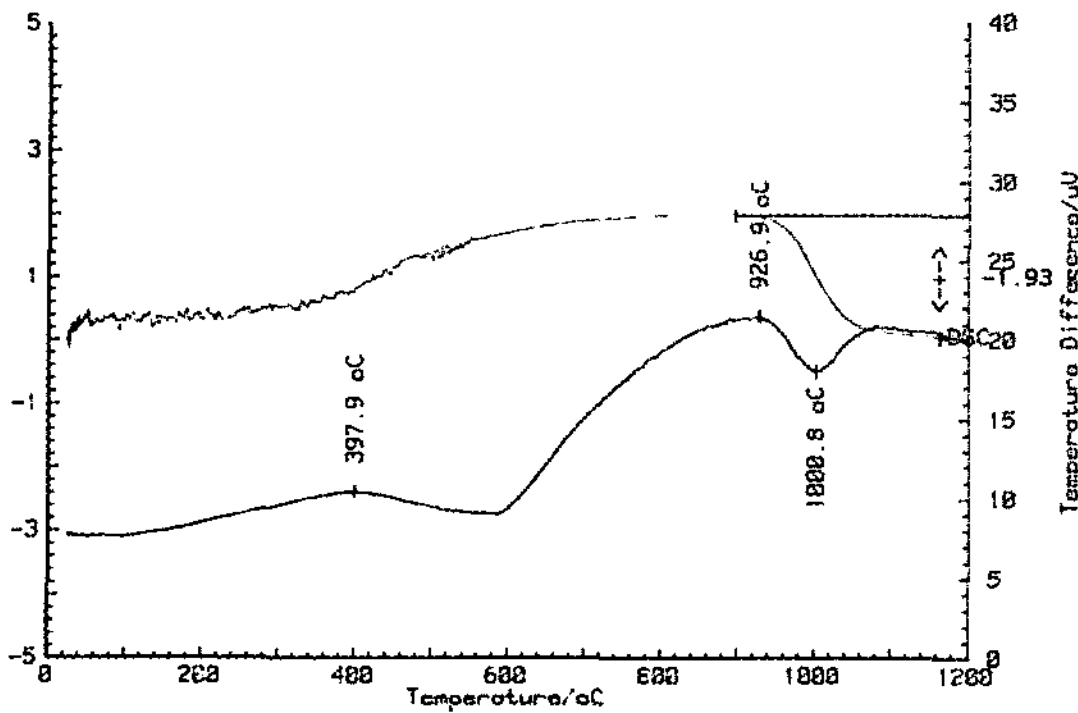


Fig. 8. DTA/TGA analysis results for B.C. jade from Cassiar mine, British Columbia, Canada.

결론

이번 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 캐나다 Cassiar광산에서 산출된 B.C. jade는 주 구성광물이 투각섬석-양기석 고용체 성분을 가지는 광물이며, 이와 함께 미량의 크롬-석류석과 자철석 또는 크롬철석으로 추정되는 불투명광물이 공존한다.

2) B.C. jade는 짙은 녹색을 띠며, 반투명하고, 지방광택을 나타낸다. 모스 경도는 5.5~6이고 비중은 3.01이다. 주 구성광물의(001) 결정면이 수평방향으로 층상배열되어 있고, 또한 그 수평면 내에서는 결정들이 방향성없이 중첩되게 쌓여 있다. 이 때문에 높은 인성과 판상 편리 그리고 하나의 굴절율(1.62)을 나타낸다.

3) B.C. jade에는 Fe 함량(Fe_2O_3 4.14~4.66 wt%)이 높은 것으로 밝혀졌으며, Fe는 녹색을 띠게 하는 주요 발색소 역할을 하는 것으로 해석된다.

4) B.C. jade는 926.9°C에서 탈수현상이 일어나면서 파괴되기 시작하며, 1000.8°C에서 투각섬석-양기석이 투회석+엔스터타이트+석영+물(H_2O)로 분해되는 반응이 완결되는 것으로 해석된다.

사사

이 논문을 준비하는 과정에 도움을 주신 David Mossman 박사님과 Mrs. Keren Fox, 그리고 이 논문

원고를 정독하시고 조언해 주신 한국지질자원연구원 장세원 박사님, 경북대학교 장윤득 교수님께 진심으로 감사드리며, 화학분석 등은 충남대학교 공동실험실습관과 기초과학지원연구원에서 실시하였음을 밝힙니다.

참고문헌

- 김수진, 이동진, 장세원 (1986) 춘천 연옥의 보석광물학적 특성 연구. 지질학회지, 22(3), 278-288.
- 노진환, 유재영, 최진범 (1993) 춘천 연옥 광물의 성인. 한국광물학회지, 29(3), 199-224.
- 노진환, 조현구 (1993) 춘천 연옥 광물의 광물학적 특징: 광물상, 광물화학 및 혼성 격자구조. 한국광물학회지, 6(2), 57-79.
- 노진환, 최진범 (2000) 춘천 연옥의 결정화학과 미시적 공생관계에 관한 연구. 한국광물학회지, 13(2), 96-114.
- 박계현, 노진환 (2000) 춘천 연옥의 기원에 관한 지구화학적 연구. 한국암석학회지, 9(2), 53-69.
- Ernst, W.C. (1968) Amphiboles, Springer-Verlag.
- Farmer, V.C. (1974) The layer silicates. In: The infrared spectra of minerals. Mineralogical Society, 331-364.
- Grice, J.D. and Gault, R.A. (1985) Jade, gold, and topaz from the Cassiar Mountains, British Columbia/Yukon Territory, Canada. Rocks and Minerals, 60(1), 9-13.
- Mineral Powder Diffraction File (1980) JCPDS card #13-437, #25-157. International Centre for Diffraction Data.
- Kiernan, W.K. and Mulcahy, P.J. (1961) Jade in British Columbia. Annual Report of the Minister of Mines and Petroleum Resources, 126.
- Kim, S.J., Lee, D.J., and Chang, S. (1986) A mineralogical and gemological characterization of the Korean jade from Chuncheon, Korea. The Journal of the Mineralogical Society of Korea, 22(3), 278-288.
- Kim, W.S. (1995) Nephrite from Korea. Journal of Gemmology, 24(8), 547-550.
- Leaming, S.F. (1978) Jade in Canada. Geological Survey of Canada Paper 78-19, 59.
- Webster, R. and Anderson, B.W. (1983) The Jades. In: 4th Ed., Butterworths, London.

접수일(2008년 4월 14일), 수정일(1차 : 2008년 5월 30일), 게재확정일(2008년 5월 30일)