

춘천산 연옥의 조직 및 인성에 관한 연구

Texture and Toughness of Chuncheon Nephrite, Korea

박맹언(Maeng Eon Park) · 강정미(Jeong Mee Kang)

부산수산대학교 응용지질학과

(Department of Applied Geology, National Fisheries University of Pusan, Pusan 608-737, Korea)

요약 : 연옥은 구성광물의 조직, 결합양상 및 화학조성 등에 의해 일반적인 투각섬석과 구분되며, 색, 경도 및 인성 등에 의해 등급과 가치가 달라진다. 본 연구에서는 춘천산 연옥을 대상으로 연옥의 물리적 특성(조직, 경도 및 인성) 등의 연구가 수행되었다.

춘천산 연옥은 구성광물인 투각섬석의 조직, 입도 및 공생광물(불순물)의 특성에 따라 세 가지 유형(유형 I, 유형 II, 유형 III)으로 구분된다. 유형 I은 치밀한 극미립의 초미정질(<5 μ m) 투각섬석의 치밀한 집합체로서 구성되며, 유형 II와 유형 III은 미정질(10~30 μ m) 및 세립(>50 μ m)의 투각섬석 집합체로서 투회석, 활석, 녹니석 및 사문석 등이 미량으로 함유된다.

연옥을 구성하는 세 유형의 투각섬석의 화학조성은 Fe, Al 성분이 유형 III에서 가장 높은 함량(1.07~1.88wt.% FeO, 1.13~2.59wt.% Al₂O₃)을 나타내며, 유형 II(0.22~0.37wt.% FeO, 0.66~0.77wt.% Al₂O₃), 유형 I(0.20~0.24wt.% FeO, 0.05~0.12wt.% Al₂O₃)의 순으로 감소함을 보이고, SiO₂ 성분은 유형 I(59.13~59.67wt.%), 유형 II(58.02~59.40wt.%), 유형 III(57.34~58.63wt.%)순으로 함량이 낮아짐을 알 수 있다.

연옥의 미경도(VHN=311~659)와 파괴인성치($2.38 \times 10^5 \sim 5.62 \times 10^5$ dyne · cm^{-3/2})는 유형 I, 유형 II, 유형 III의 순으로 낮아진다. 이러한 결과는 조직 및 집합구조의 특성과 밀접한 관계를 갖고 있음을 반영한다.

ABSTRACT : Chuncheon nephrite has been studied for gemological characterization. The nephrite classified into three types based on texture, grain size and associated impurities (Type I, Type II, Type III). It consists of cryptocrystalline to fine-grained tremolites crystals. Type I is composed of cryptocrystalline (<5 μ m) tremolites which shows compact interlocking texture. Type II consists of rounded or lath-shaped microcrystalline (10~30 μ m) tremolites with unidentified brown impurities. Type III consists of fine-grained (>50 μ m) platy or fibrous tremolites together with chlorite, talc, and diopside as impurity.

Chemical analyses show Fe and Al increase and Si decrease in the order of type I, type II and type III. The Vicker's microhardness numbers (VHN) for nephrite range from 311 to 659 under 300g load.

The fracture toughness of nephrites ranges from 2.38×10^5 to 5.62×10^5 (dyne · cm^{-3/2}). The microhardness values and fracture toughness tend to decrease in the order of type I, type II and type III.

서 언

옥은 석기시대부터 무기, 화폐, 부적, 장신구 또는 공예품으로 세계 각지에서 사용되어 왔고, 특

히 우리 나라를 포함한 동북아지역에서 전통적으로 선호되어온 보석이다. 옥에는 상대적으로 경도와 비중이 낮고 각섬석군의 양기석이나 투각섬석으로 구성된 연옥(경도 6~6.5, 비중 2.9~3.1)과

휘석군 광물로서 보다 높은 경도와 비중(경도 6.5~7.0, 비중 3.2~3.4)을 갖는 경옥으로 구분된다.

연옥은 경옥에 비해 경도는 낮으나 인성(toughness)이 크고 (Bradt, 1973), 침상의 미립질 광물이 치밀하게 얽혀 있는 집합체로 산출되며, 반투명 유백색에서 짙은 녹색까지 여러 종류의 색을 띤다. 연옥은 구성광물의 조직, 결합양상 및 화학조성에 의해 보석광물학적 특성이 좌우되며 색상(color), 경도(hardness) 및 인성(toughness)에 의해 등급과 가치가 결정된다.

일반적으로 연옥은 백운암질 대리암과 사문석화된 초염기성 암석을 원암으로 하는 변성암체 내에서 주로 산출되며 (Tan et al., 1978), 국내에서는 경기도 및 강원도 일대 백운암질 석회암을 모암으로 하여 산출되며, 강원도 춘천시 동면에 위치한 대일 광산은 현재 가행 중인 국내 유일의 연옥광상이다.

국내의 주 연옥산지인 춘천지역의 연옥광상에 대해서는 한국산 옥에 대한 보고서(Frey, 1983)에서 언급되고 있고, 광물학적 및 성인에 대한 연구(Kim et al., 1986; 노진환외, 1993), 연옥과 성인적으로 밀접하게 관계되어 수반되는 투휘석, 녹염석, 석류석, 백운모 및 각섬석의 화학조성 및 광물학적 연구(Kim et al., 1986), 연옥에 대한 성인과 생성조건에 대한 연구(노진환외, 1993)가 수행된 바 있다. 춘천산 연옥 광상의 성인이나 생성과정에 대한 광상학적 연구와 광물학적 연구는 단편적으로 수행되어 왔으나, 춘천산 연옥의 구성광물의 조직적 특성에 따른 인성에 대한 연구는 진행되어 있지 않은 실정이다.

본 연구는 춘천산 연옥의 화학조성과 침상 내지 섬유상의 극미립 집합체로 이루어진 조직상의 차이에 따라 인성치를 측정하고, 이러한 결과를 물리적 특성(경도, 인성 등)과의 상관성을 비교 검토하였다. 본 연구결과는 한국산 연옥에 대한 보석광물학적 활용성 재고 및 부가가치 증대에 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

물리적 특성

춘천산 연옥은 주로 연한 녹색을 띠며, 부분적

으로 암록색, 암회색, 연녹회색을 띠기도 한다. 구성광물은 주로 투각섬석으로 구성(>98%)되며, 미량의 투휘석, 활석, 녹니석 및 사문석이 수반된다. 춘천산 연옥은 색과 주구성광물인 투각섬석의 입자크기, 조직 및 공생광물(불순물)에 따라 유형 I (Type I), 유형 II (Type II), 유형 III (Type III)로 세분된다. 각 유형의 경계부는 접이적이며 부분적으로 교호하기도 한다.

조직

유형 I의 연옥은 양질의 광석으로 연녹색을 띠며, 치밀한 초미정질(cryptocrystalline, 5 μ m 이하의 입자의 크기)의 투각섬석 집합체로 구성되고, 보다 균질한 조성 및 조직을 나타낸다. 조립질의 산점상 투각섬석이 원형, 타원형 또는 막대상으로 초미정질 투각섬석 집합체 내에 나타나기도 한다 (Fig. 1-A). 유형 II의 연옥은 암회색 또는 암연녹색을 띠며, 유형 I의 투각섬석 입자보다 크며(10~30 μ m), 각섬석 특유의 침상 내지 섬유상 결정이 치밀하게 발달한다 (Fig. 1-B). 유형 III의 연옥은 결정 형태가 잘 발달된 세립질(>50 μ m)로서 연회색을 띠며, 침상의 세립질 집합체로서 투휘석, 활석, 녹니석 및 사문석이 미량으로 함유된다 (Fig. 1-C).

각 유형의 특징을 요약하면, 입자의 크기와 불순물(미량의 공생광물)의 함량이 유형 I, 유형 II, 유형 III의 순으로 증가된다.

주사전자현미경(SEM) 관찰

유형별 연옥의 결정크기 및 집합 특성을 파악하기 위하여 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope : SEM)을 이용하여 관찰하였다.

유형 I은 폭 5 μ m 이하의 극미립 초미정질 투각섬석의 치밀한 집합체로 뭉쳐져 나타나며, 유형 II는 10~30 μ m 정도의 은미정질 투각섬석 결정들이 과도모양의 규칙적인 집합체를 형성하며, 유형 III는 50 μ m 이상의 침상결정들이 일정한 방향성을 가지며 배열된 조직을 보여준다 (Fig. 2).

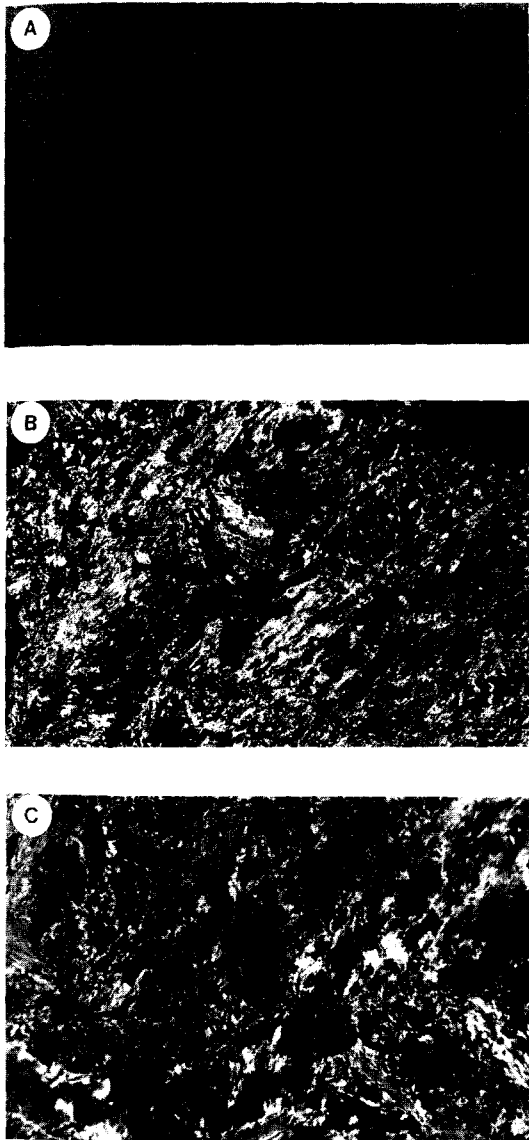


Fig. 1. Microphotographs of the Chuncheon nephrites which show different textures. A: Type I, B: Type II, C: Type III

미경도

연옥의 유형별 미경도 측정을 위하여 $0.25\mu\text{m}$ 의 다이아몬드 연마제를 이용하여 표면 연마를 실시한 후 100g, 300g 및 500g 하중의 조건에서 빅커 다이아몬드 인덴터(Vicker's micro-hardness test-

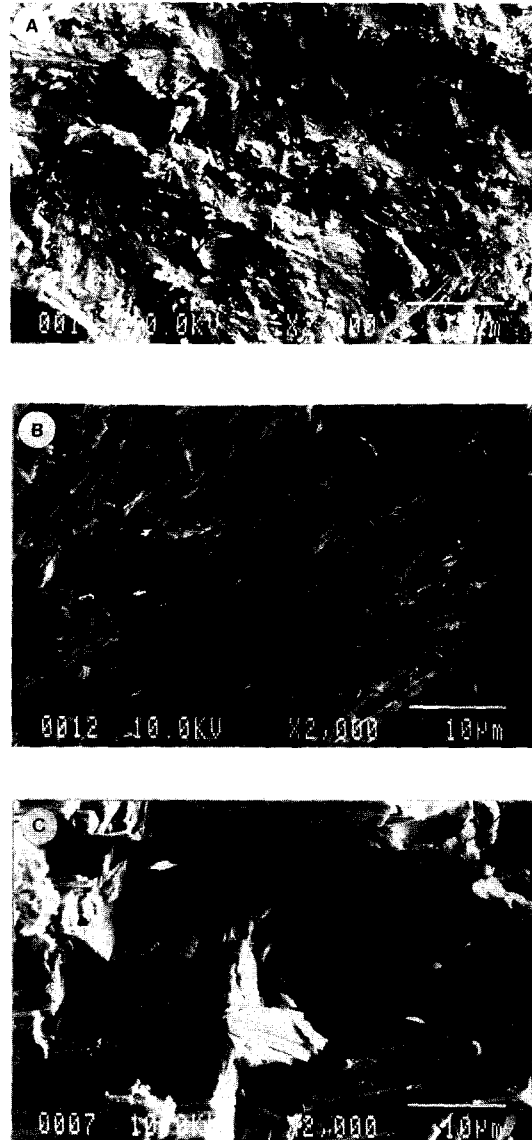


Fig. 2. SEM photographs of the different types of Chuncheon nephrite. A: Type I, B: Type II, C: Type III

er ; HMB 2000)를 사용하여 측정하였다.

하중 추의 속도는 $1\text{mm}/5\text{초}$ 이며, 자국(indentation)의 대각선 길이(d)는 25배의 대물렌즈를 이용하여 측정하였다. 미경도 값은 kg/mm^2 의 단위로 표시하였다. 빅커스 인덴터(Vicker's indenter)의 사각 다이아몬드 추면의 각도는 136° 로서 자국은 정사각형으로 형성되며, 이때의 면적은 $\frac{1}{2}d^2\text{cosec}68^\circ$

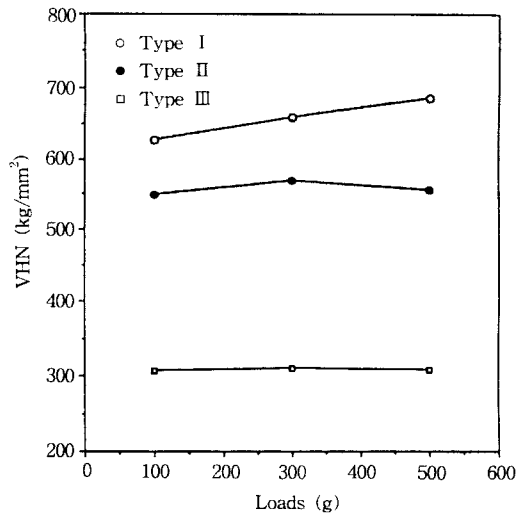


Fig. 3. Variation in Vicker's microhardness values measured on different types of Chuncheon nephrite.

Table 1. Vicker's microhardness (VHN) of different types of nephrite from Chuncheon.

Type*	Weights applied in grams			Indentation**
	500	300	100	
I	686.30	659.30	626.70	657.43 a(1), b(1)
II	555.30	568.70	547.70	557.23 a(1), b(2)
III	309.25	310.75	307.00	309.00 a(2), b(3)

* ; I =cryptocrystalline, II =microcrystalline, III =fine grained tremolite aggregates with dark brown impurities.

** ; a=Indentation shape characteristics : (1) concave (2) sigmoidal, b=Indentation fracture characteristics : (1) star radial (2) simple shell (3) concentric shell (Based on Young and Millman, 1964).

이다. 따라서 경도=하중(Load)/자국의 면적으로 표현(Crag and Vaughan, 1981)되고, 이때의 빅커 미경도 값(VHN)은 다음과 같다.

$$VHN = 2\sin 68^\circ L/d^2 (g/\mu m^{-2}) = 1854L/d^2 (Kg/mm^2)$$

본 실험에서는 측정의 오차를 줄이기 위하여 각각 5회씩 측정하여 최대 및 최소값을 갖는 것을 제외하고 3개의 측정값을 평균하여 이용하였다.

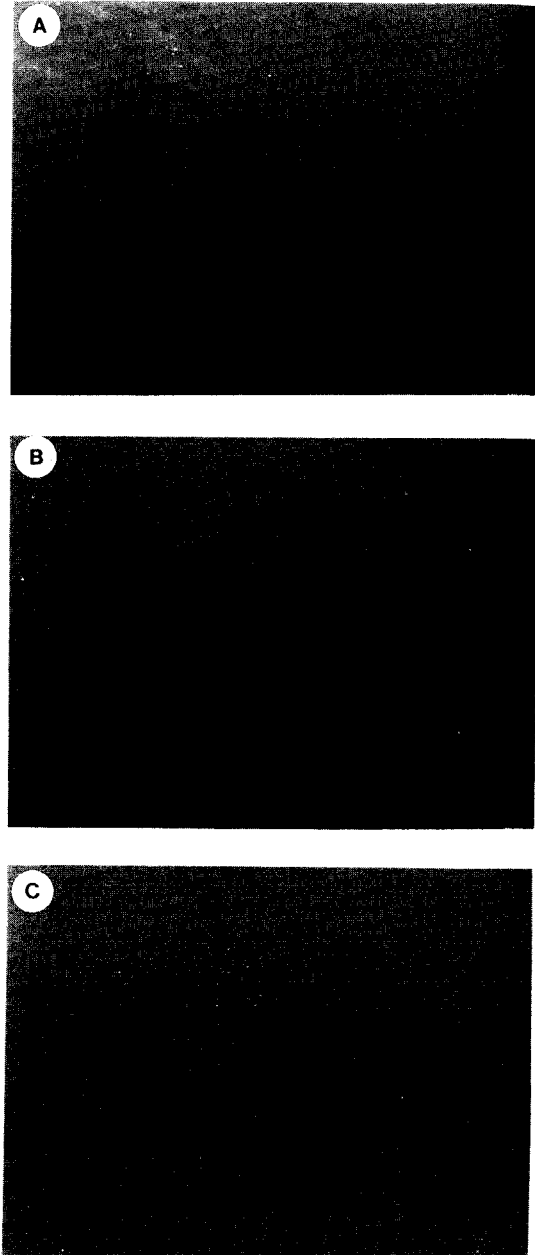


Fig. 4. Indentation shape and fractures observed on the surface of different types of Chuncheon nephrite.

A : Type I, B : Type II, C : Type III

본 연구에서 측정된 유형별 연옥의 하중별 VHN값은 Table 1과 같다. 미경도값(VHN)에서 유형 I은 무거운 하중으로 갈수록 증가하는 값을

보이며, 유형 II와 III은 중간하중(300g)에서 가장 높은 값을 보인다 (Fig. 3). 또한 흠집모양은 초미정질의 투각섬석 결정의 집합체인 유형 I에서는 분명한 concave와 star radial을 형성하고, 유형 II에서는 concave와 shell 형태의 외곽부가 분명하지 않으며, 유형 III에서는 자국(indentation)의 모양을 거의 알 수 없는 불규칙한 원형을 나타낸다 (Fig. 4). 이러한 결과로 미루어 연옥의 미경도값과 자국의 모양(indentation shape)은 결정의 입자 크기 및 결정의 집합특성과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

화학조성

연옥의 화학조성(Table 2)을 Leake(1978)가 제안한 Ca 각섬석 분류표에 적용하면 세 유형 모두 투각섬석 영역에 포함된다. 연옥을 구성하는 투각섬석의 화학조성은 주성분인 Si, Mg, Ca와 미량성분인 Al 및 Fe의 함량에서 유형별 차이를 나타낸다 (Fig. 5). Fe와 Al 성분은 유형 III가 가장 높고 유형 II, 유형 I 순으로 감소하며, 유형 I의 연옥에서는 Fe와 Al 함량이 정(+)의 상관성을 나타내지만 유형 II와 유형 III에서는 뚜렷한 상관성을 나타내지 않음을 알 수 있다 (Fig. 6). Al에 대한 Si의 값은 전체적으로 뚜렷한 반비례 관계를 나타내며, 이는 Al 성분에 의한 Si 성분의 치환관

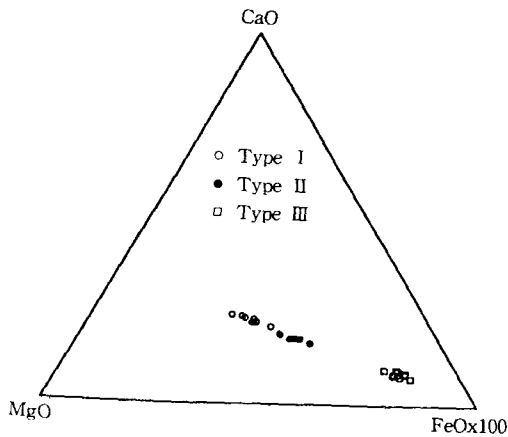


Fig. 5. Ternary plot of the different types of Chuncheon nephrite on the CaO-MgO-FeO×100 diagram (Leake, 1978).

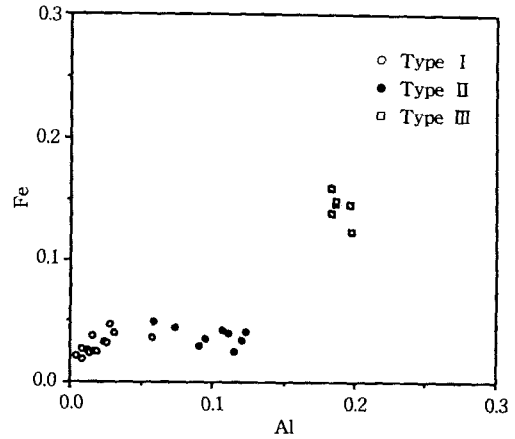


Fig. 6. A plot of Fe and Al contents (O=23) of the Chuncheon nephrite.

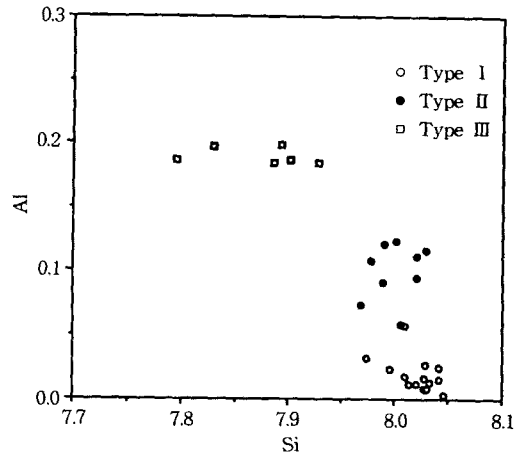


Fig. 7. A plot of Al and Si contents (O=23) of the Chuncheon nephrite.

계를 잘 반영한다 (Fig. 7). 이와 같이 연옥의 유형별 차이에 따른 구성광물의 화학성분 변화는 투각섬석 형성시 조성된 상이한 양이온의 활동도 차이와 물리적 조건의 변화를 반영한다.

인 성

측정방법

연옥의 유형별 인성(toughness)의 측정은 가로 4cm, 세로 0.4cm, 폭 0.3cm인 시험편을 제작, 폭

Table 2. Electron microprobe analyses of three types of nephrite from Chuncheon.

	Type I					Type II					Type III				
SiO ₂	59.31	59.60	59.03	59.13	59.67	58.02	59.40	58.55	58.64	58.63	57.77	57.34	57.46	57.62	58.63
Al ₂ O ₃	0.08	0.10	0.08	0.12	0.05	0.66	0.70	0.75	0.77	0.71	1.15	1.13	2.59	1.22	1.15
TiO ₂	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.07	0.04	0.02
Cr ₂ O ₃	0.06	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.06	0.07	0.00	0.02
FeO	0.23	0.23	0.20	0.21	0.24	0.37	0.35	0.30	0.36	0.22	1.30	1.38	1.88	1.07	1.23
NiO	0.00	0.06	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.00	0.00	0.01
MnO	0.01	0.04	0.09	0.11	0.06	0.14	0.20	0.14	0.20	0.13	0.12	0.21	0.16	0.11	0.08
MgO	24.38	24.53	24.16	24.35	24.56	23.86	24.14	23.85	23.84	23.80	23.01	23.01	22.73	23.31	23.49
CaO	13.78	13.49	13.55	13.71	13.62	13.07	12.81	13.19	12.92	12.60	13.93	13.78	12.96	13.65	13.54
Na ₂ O	0.02	0.00	0.01	0.04	0.00	0.03	0.05	0.04	0.04	0.06	0.14	0.07	0.23	0.08	0.12
K ₂ O	0.02	0.04	0.00	0.02	0.02	0.05	0.05	0.04	0.06	0.05	0.03	0.01	0.17	0.05	0.05
Total	97.92	98.01	97.14	97.71	98.25	96.22	97.75	96.85	96.83	96.26	97.47	97.02	98.32	97.16	98.34
O=23															
Si	8.03	8.02	8.05	8.02	8.02	7.96	7.99	7.98	7.98	7.99	7.94	7.90	7.76	7.90	7.94
Al	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.19	0.18	0.41	0.20	0.18
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Cr	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
Fe	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.15	0.16	0.21	0.12	0.14
Ni	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01
Mg	4.92	4.92	4.91	4.93	4.93	4.87	4.84	4.85	4.84	4.84	4.71	4.73	4.58	4.77	4.73
Ca	2.00	1.95	1.98	1.99	1.96	1.93	1.85	1.93	1.89	1.85	2.04	2.03	1.88	2.00	1.96
Na	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.02	0.06	0.02	0.03
K	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01
Total	15.01	14.96	14.98	15.00	14.96	14.95	14.88	14.95	14.91	14.88	15.08	15.05	14.97	15.03	15.00
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0.99	0.99	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.97	0.97	0.96	0.98	0.97

0.4cm면에 대하여 1 μ m의 다이아몬드 연마제를 사용하여 연마시편을 제작하였다. 연마면의 중간지점(2cm)에 톱날의 두께가 0.02cm인 다이아몬드 톱을 이용하여 깊이 0.1cm, 곡률반경 0.01cm되는 U자 홈을 만든 뒤 측정하였다 (Instron사의 Model 4204를 이용). 측정 절차는 먼저 시험편의 U자 홈이 있는 부분을 아래로 향하게 두고 하중 속력 0.5mm/min, 하중(load) 250kg, span 길이 3cm로 측정조건을 주어 최대하중(250kg)을 가하여 그때의 파괴하중(fracture load)을 측정하였다.

본 실험에서는 절대인성측정법인 파괴인성(fracture toughness)을 다음 식(Miyoshi et al., 1985)을 이용하여 구하였다.

$$KIC = \sigma_c \sqrt{\pi a} Y(a/b)$$

$$\sigma_c = 3PL/2bh^2$$

$$Y(a/b) = 1.96 - 2.75(a/b) + 13.66(a/b)^2 - 23.98(a/b)^3 + 25.22(a/b)^4$$

(KIC: 파괴인성치, P: 파괴하중, L: span 길이, b: 시험편 폭, h: 시험편 두께, a: 균열길이)

결과

일반적으로 연옥(nephrite)은 투각섬석의 치밀한 초미정질의 집합체가 서로 섬유(fibrous) 또는 섬유상 뭉치(fiber bundle)를 갖는 구조적인 특성을 보여줌으로 인해 경옥(jadeite)보다 더 큰 인성치를 나타내며, 이로 인해 보석으로서의 요건을 지닌다 (Bradt, 1973).

Table 3. Fracture toughness data for different types of nephrite.

	Fracture strength (dynes/cm ²)	Fracture toughness (dyne · cm ^{-3/2})
Type I	5.03 × 10 ⁵	5.62 × 10 ⁵
Type II	3.79 × 10 ⁵	4.36 × 10 ⁵
Type III	1.42 × 10 ⁵	2.38 × 10 ⁵
Richard(1973)	2.26 × 10 ⁵	

춘천연옥의 파괴인성치(fracture toughness)는 각 유형별 시료를 대상으로 2회씩 측정하여 평균 값을 나타내었으며, 측정된 유형별 결과는 Table 3과 같다. 인성치(toughness)는 유형 III, 유형 II, 유형 I의 순서로 값이 높아짐을 보이며 이는 동일 광물의 집합체로 구성된 시편일지라도 결정 입자의 크기와 조직특성에 의해 상이한 결과를 보여줌을 알 수 있다. 춘천산 연옥은 Richard (1973)에 의해 산지 미상인 연옥에 대해 수행된 파괴강도(fracture strength)와 비교할 때 유형 I은 2.23배, 유형 II는 1.68배 높으나, 유형 III는 0.63배로 낮다. 한편 경옥의 파괴강도(1.21 × 10⁵; Richard, 1973)에 비해서는 세 유형 모두 1.17배(유형 I), 3.06배(유형 II), 4.16배(유형 III)로서 매우 높음을 알 수 있다.

결 론

춘천산 연옥의 지화학적 및 보석광물학적 특성 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 춘천산 연옥은 구성광물인 투각섬석의 조직, 입도 및 공생광물에 따라 세 가지 유형(유형 I, 유형 II, 유형 III)으로 구분된다. 유형 I은 치밀한 극미립의 초미정질(<5 μ m) 투각섬석의 치밀한 집합체로서 구성되며 유형 II는 미정질의 투각섬석 집합체(10~30 μ m)를 이루며, 유형 III은 세립(>50 μ m)의 투각섬석 집합체로서 투회석, 활석, 녹니석 및 사문석이 미량으로 함유된다.

2. 춘천산 연옥을 구성하는 세 유형의 투각섬석은 화학조성상 상이한 특징을 나타낸다. Fe, Al은 유형 III에서 가장 높은 함량(1.07~1.88wt.% FeO, 1.13~2.59wt.% Al₂O₃)을 나타내며, 유형 II

(0.22~0.37wt.% FeO, 0.66~0.77wt.% Al₂O₃), 유형 I(0.20~0.24wt.% FeO, 0.05~0.12wt.% Al₂O₃)의 순으로 감소함을 보이고, SiO₂는 유형 I(59.13~59.67wt.%), 유형 II(58.02~59.40wt.%), 유형 III(57.34~58.63wt.%)순으로 함량이 낮아짐을 알 수 있다.

3. 주사현미경 관찰결과 유형 I, II, III의 순으로 결정의 크기가 증가함을 보이며, 연옥의 미경도와 파괴인성치 역시 유형 III, 유형 II, 유형 I의 순으로 증가한다. 이러한 결과는 경도와 인성이 조직 및 집합구조의 특성과 밀접한 관계를 갖고 있음을 반영한다.

사 사

본 연구는 전략광물자원연구센터의 지원으로 수행되었다. 파괴인성실험에 조언을 주신 부산수산대학교 재료공학과 김부안 교수님과 EPMA 분석 및 자료처리에 도움을 준 전략광물자원 연구센터 김근수 박사, 최인식 연구원 및 부산수산대학교 백승균 군에게 감사를 드린다. 또한 논문의 심사과정에서 적합한 논문제목의 제안과 춘천산 연옥의 분류기준 및 용어의 사용 등에 대한 적절한 지적과 수정을 해주신 충남대학교 김원사 교수님께도 감사의 뜻을 전한다.

참고문헌

- 노진환, 유재영, 최진범 (1993) 춘천연옥광상의 성인. 지질학회지 제29권, 199~224.
- Bradt, R. C. (1973) The Toughness of Jade. American Mineralogist, 58, 727-732.
- Craig, J. R. and Vaughan, D. J. (1981) Ore Microscopy and Ore Petrography, 141p.
- Frey, R. (1983) Jade in Korea. Bulletin of the Friends of Jade, 66-69.
- Kim, S. J., Lee, D. J. and Chang, S. W. (1986) A Mineralogical and Gemological Characterization of the Korean Jade from Chuncheon, Korea. The Journal of the Geological Society of Korea, 3, 278-288.

Leake, B. E. (1978) Nomenclature of Amphibole, *America Mineralogist*, 63, 1023-1052.
Tan, L. P., Lee, C. W., Chen, C. C., Tien, P. L., Tsui, P. C. and Yui, T. F. (1978) A mineralogical study of the fengtien nephrite deposits of

Hualien, Taiwan. National science Council, Republic of Chian, NSC special publication 1, 81p.
Young, B. B. and Millmoll, A. P. (1964) Microhardness and deformation characteristics of ore minerals. *Trans. Inst. Min. Metall.*, 73, 437-66.