

다이아스포아-듀모티어라이트 광물의 열수생성 과정

상기남* · 정원우** · 이윤종***

Hydrothermal System of Diaspore-Dumortierite Minerals from Korea

Ki-Nam Sang*, Won-Woo Chung** and Yoon-Jong Lee***

ABSTRACT : Clay minerals are locally abundant in two hydrothermal areas at Tongnae-Yangsan and Miryang, Gyongsang-namdo, Korea. This study is done to access the clay forming processes, particularly hydrothermal alteration. Pyrophyllite-kaolin in the Zone is accompanied by sericite, diaspore mixed-layer mica/smectite, alunite, dumortierite and silica minerals. Small nodular diaspore and disseminated fine radiac dumortierite are present in the pyrophyllite-kaoline deposits, the northerly trending belt of rhyolite flows and pyroclastic rock near the intruded by granite rock of Bulkusa Series. Hydrothermal action has formed many clay deposits with a zone containing over 80~90% pyrophyllite, kaolinite, muscovite with a little amount of dumortierite, boehmite, andalusite. Most of the clay deposits occur as irregular, lenticular, massive and associated dumortierite was found to coexist with clay deposits. Dumortierite data are as follows: lattice constant $a=11.783$, $b=20.209$, $c=4.7001$, axial ratio $a : b : c=0.5835 : 1 : 0.2327$, XRD $d\text{\AA}$ 2.549, 5.89, 5.09.

서 언

동래, 양산 및 밀양지역에는 소규모의 많은 납석-고령토광상이 부존되며 이들의 대부분은 열수광상으로 생성된 것이 보고되어 왔다. 최근에는 이들 광상중에 다이아스포아-듀모티어라이트, 쇼오렐 (Shorl, 전기석의 변종), 휘수연석등이 소량 수반되는 것이 보고되었다 (상기남, 1986, 1992; 홍성우 등, 1988).

본 광물의 일반적 산상은 중-고압 변성대 내의 화강편마암, 거정화강암 지역대에 주로 단결정으로 생성된 것으로 국내외에서 발표된 바 있다.

국내에서는 열수광상기원으로 생성된 납석-고령토광상

에서 미립의 침상-섬유상, 방사상 및 광염상으로 배태되는 것이 특징이며 동래와 양산지역에서는 광염상, 밀양지역에서 광염 및 방사상으로 수반된다.

다이아스포아 (Diaspore)와 보오마이트 (Boehmite)는 광상 최하반부에 30 cm 정도의 박층내에 타원체로 된 다이아스포아 중 미립의 연납석과 고령토의 벽개면에 충전되어 산출된다. 생성환경은 $P_{H_2O}=4.2-50$ (Kbs), $T=300-500^{\circ}\text{C}$ 이며, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 반응 생성물로서 납석-고령토는 점차 저온에 이르고 다이아스포아-보오마이트로 최후에 생성되고, 보오마이트-다이아스포아는 300°C 에서 500°C 내외에서 형성된다. 광물 생성과정은 고온에서 듀모티어라이트, 납석, 고령토 순으로 온도의 강하에 따라 다이아스포아, 보오마이트 순으로 형성된 것으로 사료된다 (Black, 1973; Alexander, 1986; Frank, 1987).

본 광물의 생성과정을 규명하기 위하여 현지 광상조사의 결과에서 현미경 관찰, 시차열분석, 주사현미경 관찰, X-선 회절, 전자현미경 등 실험을 실시하였다. 일부 단결정 및 전자현미분석 (EPMA)은 도쿄대학 광물학 교실에서 협조를 얻었다. 본 연구는 1992년도 문교부 자유공모과제 연구비 및 1995년도 한국학술진흥재단 대학부설연구소 (경북대학

* 부경대학교 지구환경과학부 (Department of Earth Environmental Science, Pukyong University, Pusan 608-737, Korea)

** 경북대학교 사범대학 과학교육연구소 (Science Education Research Institute, Kyungpook National University, Taegu 702-701, Korea)

*** 경북대학교 사범대학 지구과학교육과 (Department of Earth Science, Kyungpook National University, Taegu 702-701, Korea)

교 과학교육연구소) 연구과제 연구비의 일부지원에 의하여 연구되었다. 본 연구에 대하여 지원을 아끼지 않은 관계 당국과 도쿄대학 광물학 교실에 대하여 사의를 표한다.

지질광상

본 연구 지역인 납석-고령토광상 부근의 지질은 중생대

백악기 유천층군의 화산암류, 불국사 화강암류 및 제4기 충적층으로 구성된다.

화산암류인 안산암질암류는 본 지역에서 광범위하게 분포되어 본 지역에 부존된 납석-고령토광상이 동래, 양산, 밀양지역의 최하부에 놓여 있다. 안산암류는 암청색-암회색 색깔을 띤 치밀, 견고한 조직을 가지고 반상 안산암 및 미현정질 안산암으로 구성된다.

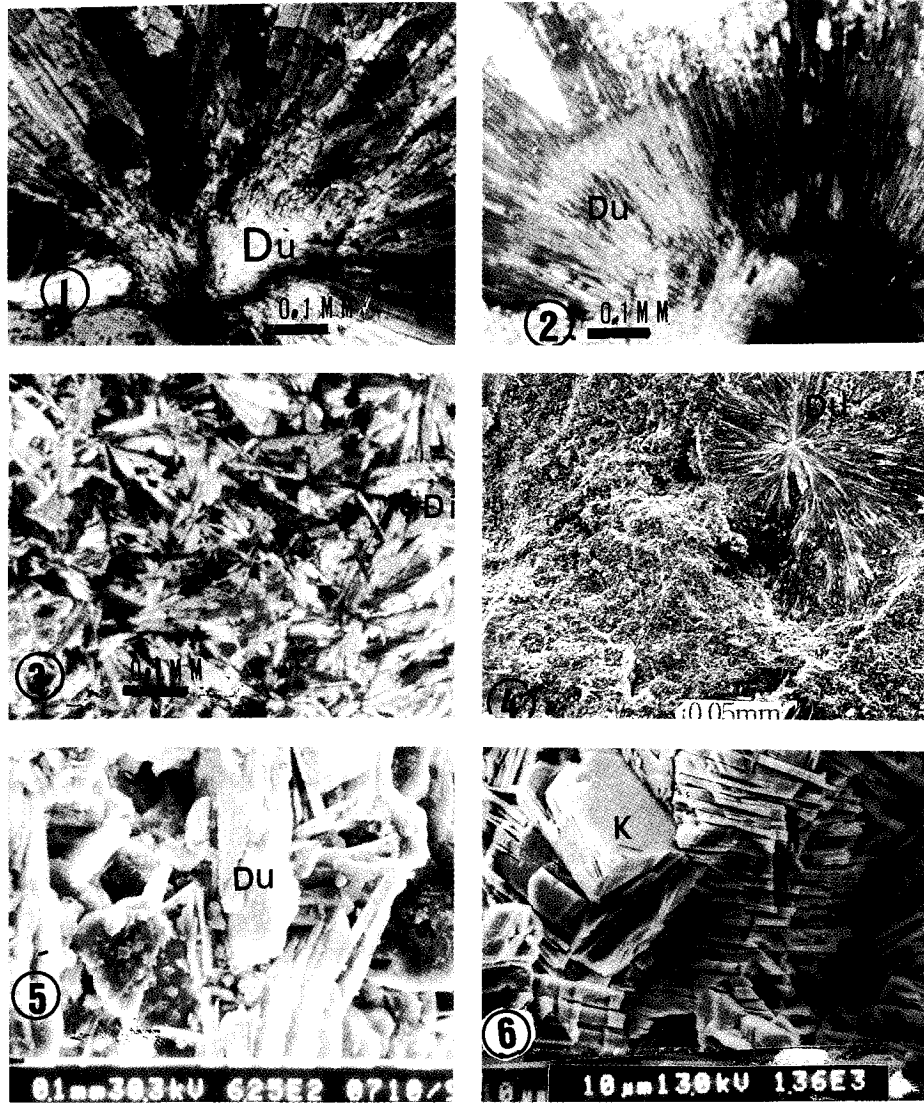


Fig. 1. Photomicrograph of dumortierite (Du) radiac form (Sample No. 109).
 Fig. 2. Radiac form (Sample No. 205).
 Fig. 3. Photograph of diaspore (Di) (Sample No. 205).
 Fig. 4. Scanning electron microscope image radiac dumortierite (Sample No. 305).
 Fig. 5. Scanning electron microscope image of fibrous dumortierite (Sample No. 306).
 Fig. 6. Scanning electron microscope image of tubular kaolinite (K) (Sample No. 201).

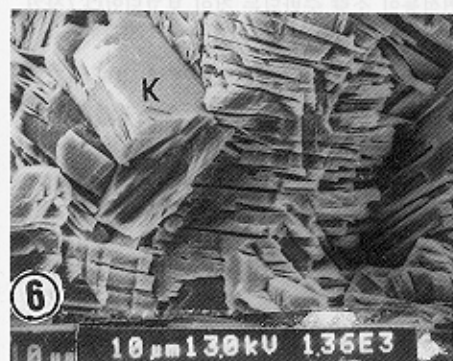
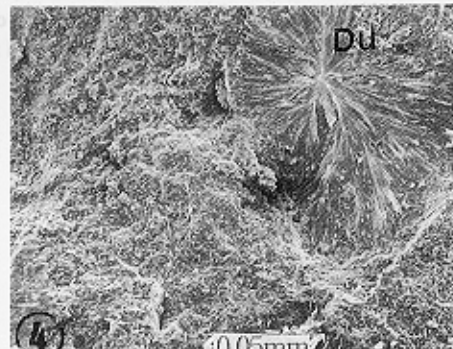
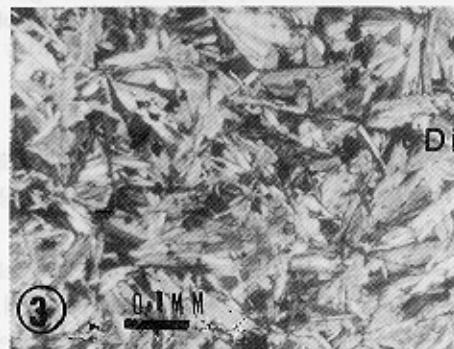
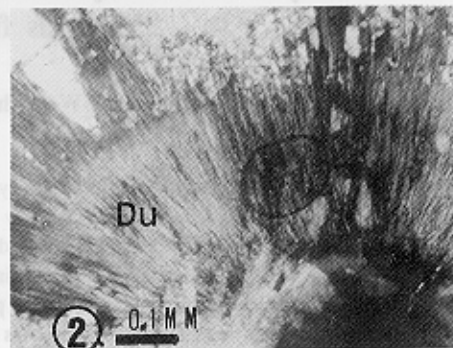
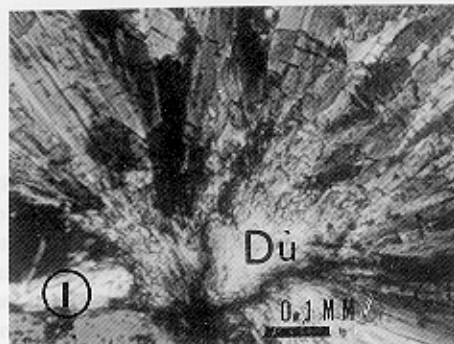


Fig. 1. Photomicrograph of dumortierite (Du) radiac form (Sample No. 109).

Fig. 2. Radiac form (Sample No. 205).

Fig. 3. Photograph of diaspre (Di) (Sample No. 205).

Fig. 4. Scanning electron microscope image radiac dumortierite (Sample No. 305).

Fig. 5. Scanning electron microscope image of fibrous dumortierite (Sample No. 306).

Fig. 6. Scanning electron microscope image of tubular kaolinite (K) (Sample No. 201).

유문암질 응회암은 안산암질 암류의 상위층에 관입 또는 피복되어 본 지역에서 유문암, 유문암질 응회암, 응회각력암으로 구성된다.

유문암질 응회암은 담홍색을 띠고 미변질된 곳에서는 회색을 띠며, 유문암질 응회암 중에는 암회색의 안산암편(0.5~3 cm)이 협재되어 있다.

석기는 유리질 혹은 미정질의 석영, 장석으로 구성되어 유리구조로 나타나며 구성조직으로 발달된다.

본 역에 발달되는 유문암질 응회암은 동래에서 북쪽으로 북북동-북서방향으로 양산지역으로 발달되고 동래 단층과 인접한 밀양 단층도 N10°~30°E 남동에서 북서방향으로 발달된다.

본 암의 최상부에 해당되는 세립질 응회암층이 발달된 광상 상부에는 흑갈색의 진주암 (외경 10~20 cm)이 밀양 광상에서 협재되어 있다.

불국사 화강암류는 하위부에서 화강반암, 각섬석 운모 화강암, 화강섬록암, 흑운모 화강암 순으로 관입된다 (홍성우 등, 1988; 황상구 등, 1990).

본 암은 경하에서 석영, 정장석, 미사장석, 사장석, 흑운모, 일부 변질된 녹니석, 견운모와 미립의 석석, 저어콘, 인회석, 황철석등으로 구성된다. 본 지역의 화강암 생성시기를 밀양지역에서는 66.5±1.8 Ma, 61.9±2.0 Ma (진명식 등, 1991), 양산-연양 62 Ma (Lee, 1976), 69.3±4.3 Ma (진명식 등, 1991)로 보고된 바 69.3±61.9 Ma로 K-Ar법으로 일본, 중국지방을 화강암 관입시기를 76~77 Ma, 납석광상 생성시기를 77.5±5.6 Ma (Kitagawa, 1988), 69~61 Ma사이 생성된 것으로 발표된 바 있다. 금정산 부근의 석영몬조나이트의 K-Ar법으로 측정 결과 79.75±1.959 Ma (상기남, 미발표)로 일본, 중국지방의 납석광상 생성시기가 유사하다.

광물학적 특성

동래-양산지역 (임기광산, 천불산광산, 응용광산), 밀양 지역 (밀양광산)의 납석-고령토파광상에는 주광석 광물은

연납석, 고령토, 운모류 (견운모)로서 이들 광석중에는 일부 다이아스포아, 명반석, 소량의 듀모티어라이트, 보오마이트와 극소량의 강옥, 쇼오렐, 휘수연석등이 공생한다.

듀모티어라이트 광물은 전기석의 변종인 쇼오렐과 유사한 특성을 지니고 있다. 반자형 혹은 타형의 듀모티어라이트는 미립의 방사상 내지 광염상으로서 납석-고령토파광채 내지 절리 부근에서 미립질로 일부 수반된다. 본 광물은 청색 내지 분홍색을 나타내고 다색성을 띤다.

현미경하 또는 주사현미경하에서의 관찰에 의하면 침상, 섬유상의 결정이 방사상으로 C축 방향으로 배태되어 있다. 단주상 결정의 길이가 대부분 0.5 mm이하로 신장되어 있다 (Figs. 1, 2, 3).

광학적으로 이축성 (-)α=1.659~1.678, β=1.684~1.690, γ=1.685~1.690, α-β=0.011~0.027로 강한 다색성을 나타내고, 2V=20~43°이다.

전자현미분석 결과 마그네슘 성분이 많은 것은 진한 하늘색, 철분이 많은 것은 하늘색으로 확인되었다. X-선 3차원 회절강도 및 화학조성은 Table 2와 3과 같다.

각 시료의 O, Si의 부족분을 일부 Al로 보충한 결과 양이온 총수는 이론치 7보다 약간 낮은 6.615~6.669값을 나타내고 있다.

듀모티어라이트 생성과정에 관하여 Golovastikov (1965)와 Kenneth, *et al.* (1987)에 의하여 발표되었으며, 일반적으로 이에 관련되는 생성순서는 지표에서 명반석, 석영, 황철석 상부에서 하부로 고령석, 다이아스포아, 보오마이트, 납석 순으로 생성되며, 고온광물에 속하는 함봉소 광물인 듀모티어라이트, 전기석에서 납석-고령석등이 수반된다.

다형 (poly type)인 보오마이트-다이아스포아계의 합성실험에 의하면 Al₂O₃-H₂O, Al₂O₃-SiO₂-H₂O, MgO-SiO₂-Al₂O₃-H₂O의 반응생성물은 Al₂O₃-SiO₂-H₂O의 열수분해로 인한 것으로 보고되고 온도의 감소에 따라 연납석, 고령석, 다이아스포아-보오마이트 순으로 형성된다고 하였다 (Kennedy, 1959).

본 역의 다이아스포아와 듀모티어라이트의 생성과정

Table 1. Occurrence of kaoline- pyrophyllite deposits (Sang, 1992).

Area	Tongnae & Yangsan	Miryang
Country rock	rhyolitic welded tuff	rhyolitic welded tuff
Mineralization	fissure zone	fissure zone
Occurrence	irregular massive, klense type, and funnel type	irregular massive and layer type
Ore Body	N40°~55°E 100×50×50 cm	N30°~55°E 200×100×10 m
Alteration zone	pyrophyllite-kaoline sericite	pyrophyllite-kaoline
Mineral Assemblage	pyrophyllite-kaolinite sericite	pyrophyllite-kaolinite sericite
Associated Minerals	diaspore, alunite and dumortierite	diaspore, alunite and dumortierite

Table 2. EPMA data of dumortierites.

Sample No.	109-T-Blue	205-M-Blue	306-Y-Pale Blue
Si	2.767	2.878	2.955
Al	0.223	0.122	0.045
Al	6.549	6.546	6.402
Ti	0.001	0.001	0.011
Fe	0.026	0.030	0.007
Mg	0.091	0.092	0.195

Table 3. Atomic coordinate and Temperature factor (R=0.79 WR=0.56)

Atom	Rate	X	Y	Z	B	
B	1/2	1/4	.9158(2)	.7728(11)	.27(5)	
Si(1)	1/2	1/4	.09497(6)	.08764(31)	.31(1)	
Si(2)	1		.47346(8)	.17181(4)	.58731(21)	.32(1)
Al(1)	1/2	1/4	.25017(13)	.39556(51)	1.96(3)	
Al(2)	1		.38955(8)	.02760(5)	.55801(23)	.25(1)
Al(3)	2		.50883(8)	.06897(5)	.05936(23)	.26(1)
Al(4)	2		.64143(9)	.21101(5)	.05788(23)	.34(1)
O(1)	1/2	1/4	.1733(2)	.1511(8)	.76(5)	
O(2)	1		.3616(2)	.2129(1)	.6503(5)	.75(3)
O(3)	2		.3607(2)	.0753(1)	.8946(5)	.34(2)
O(4)	2		.4504(2)	.1067(1)	.3957(5)	.35(2)
O(5)	2		.5635(2)	.2170(1)	.4005(5)	.38(2)
O(6)	1/2	1/4	.0464(1)	.3752(5)	.41(2)	
O(7)	1		.5453(2)	.1497(1)	.8798(5)	.41(4)
O(8)	1/2	1/4	.7723(2)	.2402(7)	.42(4)	
O(9)	1/2	1/4	.8505(2)	.8360(7)	.37(2)	
O(10)	1		.6491(2)	.0520(1)	.2552(5)	.25(2)
O(11)	1		.5336(2)	.0120(1)	.7508(5)	

에 대하여 상기남 (1986, 1992)에 의해서 일부 보고된 바 있다. 납석-고령토광석의 광물 조성은 부광대, 강변질대, 약변질대로 다음과 같이 구분하였다 (Table 1).

부광대의 주성분은 납석, 고령석, 견운모이며 부성분 광물은 듀모티어라이트, 다이아스포아, 황철석, 갈철석, 석영등으로 구성된다. 강변질대는 반자형 석영, 납석, 고령석, 장석과 황철석이 자형 내지 반자형으로 구성된다. 약변질대는 모암의 일부가 원형을 지니고 소량의 석영, 장석, 황철석, 고령석으로 구성되어 있다.

듀모티어라이트의 광물학적 특성

듀모티어라이트는 광염상 또는 침상, 미립상(0.1~0.5 mm)으로 수반되어 청색 내지 분홍색을 나타내며, 분석 결과 마그네슘 성분이 많은 것은 진한 하늘색 철분이 많은 것은 하늘색으로 확인되었다 (Table 2)

각 시료의 산소-18, 규소의 부족분을 일부 알루미늄을

Table 4. Mineral composition of each mine.

Sample No.	Mine	Py	K	Di	Du	B	M
201M	Miryang	◎	●	●	△	△	●
205M	Miryang	◎	●	●	△	△	●
107T	Limki	◎	●	●	△	△	◎
109T	Tongnae	◎	●	●	△	△	◎
305Y	Chunbulsan	◎	●	●	△	△	△
306Y	Chunbulsan	◎	●	●	△	△	△

Py; Pyrophyllite, K; Kaolinite, Di; Diaspore, Du; Dumortierite, B; Boehmite, M; Muscovite

로 보충한 결과 양이온 총수는 이상치 7보다 약간 낮은 6.615~6.669값을 나타내고 있다 (Tables 2, 3).

결정구조

X-선 단결정 자동 회절기로 MoK α 선에 의한 격자정수와 3차원 X-선 회절강도를 측정하였다 (Table 3).

듀모티어라이트 광물의 결정구조는 저변부는 2/3가 육방충진이 이루어져 C축에 평행하며 나머지 1/3부분인 3변체는 입방충진의 구조를 이루고 $\infty^1[Al(4)_4O_{12}]$ 는 2중 쇄상으로 $\infty[Al(1)O_3][001]$ 의 구조를 이룬다 (Moore *et al.*, 1978).

각 광석의 납석-고령석의 중요 회절선은 dÅ 9.20, 7.18, 4.71, 4.61, 4.43, 4.17, 3.07, 2.53, 다이아스포아는 dÅ 4.71, 4.00, 3.22, 2.53, 2.31, 2.14, 2.07로, 시료 107T의 dÅ는 6.14, 3.14, 2.34, 2.30이며, 듀모티어라이트 시료 201 M, 205 M dÅ는 5.89, 5.04, 3.40, 2.95, 2.65, 2.53의 값을 나타내고 있다 (Tables 4, 5, 6).

보모마이트는 고령석의 혼합으로 그 해석은 6.14, 3.16에서 쉽게 다른 광물과 구분되고 합성보모마이트 (Reyeschertz, Yost, 1946)과 회절선이 일치되고 있다. 시료 107T를 450°C에서 가열 후 면간격에는 상온과 유사하나 600~1000°C 가열후에는 회절선이 소멸된다. 이것은 탈수에 의한 구조의 파괴에 기인한 것이며 한편 300°C부근에서 탈수현상이 발생하지 않으며 400°C에서 점차 탈수작용이 시작되어 고령석은 450°C부근에서 상

Table 5. X-ray diffraction patterns (untreated).

hkl					107T		109T		201M		205M		206		305		Boehmite			
P	K	Di	B	Du	dÅ	I/I	dÅ	I/I	dÅ	I/I	dÅ	I/I	dÅ	I/I	dÅ	I/I	dÅ	I/I	DÅ	I/I
002	-	-	-	-	9.20	50							9.26	40	9.30	60	9.20	50	9.10	45
-	001	-	-	-	7.18	50			7.18	30			7.18	35	7.22	10	7.18	50	76.11	40
-	-	-	020	-	6.14	30											6.14	20	6.11	18
-	-	Di	-	Du			5.88	60			5.89	50								
							5.03	50			5.04	45								
020																				
004					4.61	25			4.71	60			4.60	30	4.62	30	4.61	61	4.42	20
021	020				4.45	30			4.43	5					4.44	40	4.45	30		
112	111				4.37	20							4.34	40			4.37	30		
111	-	-	-	-	4.26	22							4.26	20	4.26	30	4.26	15		
	111																			
022	111				4.17	20			4.12	10			4.19	20	4.17	25	4.17	20		
-	-	Di	-	-					4.00	100										
-	021	-	-	-					3.79	5										
-	002	-	-	-	3.57	40			3.58	25			3.58	30	3.59	5	3.57	5	3.58	10
-	-	Di	-	Du			3.39	45			3.40	50								
-	-	-	021	-	3.16	20			3.22								3.16	15		
006	-	-	-	-	3.07	60							3.07	50	3.08	80			3.16	20
-	-	-	-	Du			2.94	50			2.95	50					3.05	10	3.07	60
130	-	-	-	-	2.56	20	2.65	30	2.56	40	2.67	35	2.56	23	2.57	20	2.56	15		
200	201	-	-	Du	2.51	20	2.52	30			2.53	40	2.54	22	2.54	25	2.51	10	2.56	18
132	130																2.42	20	2.42	
204	200	-	-	-	2.42	18							2.42	20	2.42	30			2.34	5
-	-	Di	-	-	2.34	20							2.34		2.35	84				
					2.30	8							2.33		2.36	8				
134	-	-			2.15	5			2.51	5			2.317	60			2.16	10	2.15	10
-	-	-Di							2.143	40			2.15		2.08	10				
-	-	-Di													2.06	10				
222	132								2.078	100			2.08	5	1.84	10	2.15	20		
204	203	-			2.065	5							2.06	5	1.689	7	2.08	5	2.08	10
															1.66	10	2.06	5	2.06	12
136	221	-			2.065	5													1.98	
0010	-	002			1.85	10											1.85	10	1.85	
-	-	Di							1.815	10									1.85	8
									1.732	5			1.843	5	1.845	10			1.77	
									1.714	10									1.663	
		Di							1.632	8										

* P; Pyrophyllite, K; Kaolinite, Di; Diaspore, B; Boehmite, Du; Dumortierite

온과 유사하나 600°C 이상에서는 (001), (002)의 면간격이 탈수한다 (Table 6).

토 의

중전까지 열수형 납석-고령토광상은 천연수광상형으로 분류되어, 일부 납석-고령토광상에는 (밀양광산, 임기광상, 완도지역), 다이아스포아, 듀모티어라이트가 공생하며 고령석보다는 납석이 고온에서 생성된다 (Rey, 1990) 듀모티어라이트는 알루미늄 함불소 규산염 광물로 Al₇BSi₃O₁₈의 화학조성으로 구성된다. 열수광상 중에 수반되

는 듀모티어라이트는 한국의 남부지역의 납석광상에서 공생된다.

실험 광물학적으로 Al₂O₃-B₂O₃-SiO₂-H₂O (이하ABSH)에서 교질상태로 실험결과에 의하면 3~5 Kbar (저온), 15~20 Kbar (고온), 650~880°C에서 형성되며 Al/Si 비가 2.77~2.94 고압하에서는 2.33~2.55, 15~20 Kbar 조건하에서 석영과 강옥이 공존하는 것을 규명하였다 (Werdning *et al.*, 1983a, b, 1984, 1986, 1990).

Colorimetric entropy의 실험에 의하면 듀모티어라이트 330.2±0.6 J/(Mol.K)로 298.15 K, 1 Bar에서 열역학적 실험에 의하면

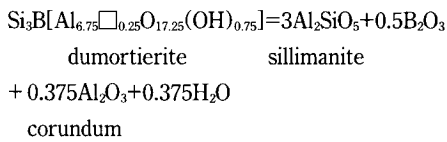
Table 6. XRD patterns of Boehmite treted (Sample No. 197T)

hk1			20°C		450°C		600°C		1000°C		Behmite		
P	K	B	dÅ	I/I	dÅ	I/I	dÅ	I/I	dÅ	I/I	dÅ	I/I	hkl
002	-	-	9.20	50	9.30	30	9.40	12	9.46	11	6.119	100	020
-	001	-	7.18	55	7.22	33					3.160	48	021
-	-	020	6.14	35	6.16	30					2.341	42	130
020													
004	-	-	4.61	25	4.63	30	4.69	20	4.68	20	1.977	41	131
021	020	-	4.45	35	4.43	45	4.43	70	4.43	70	1.845	52	002
112	110	-	4.37	22							1.767	41	022
111	-	-	4.26	22	4.25	33					1.661	11	151
	111												
022	111	-	4.17	21							1.530		080
-	002	-	3.57	40	3.58	30					1.449	21	132
											1.429		200
-	-	021	3.16	20	3.16	20					1.392	90	220
											1.383		171
006	-	-	3.07	62	3.07	60	3.11	75	3.12	70	1.310	18	152
130	-	-	2.56	21	2.57	23	2.58	10	2.61	5			
200	130												
132	201	-	2.50	7	2.56	24	2.54	10	2.58	9			
					2.54	25			2.55	11			
204	200	-	2.42	19	2.42	25	2.47	12	2.47	14			
							2.44	12	2.44	13			
008	131	130	2.34	20	2.34	20							
	202		2.30	8	2.30	5							

Remarks : B; Boehmite, K; Kaolinite, P; Pyrophyllite

Table 7. Chemical analysis data of Tongnae-Miryang area.

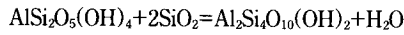
Zone	Quartz Kaoline		Pyrophyllite		Pyrophyllite Kaoline	Diaspore Kaoline			Diaspore iron oxide zone	Boehmite
	107T	205M	202T	201M	109T	303	305	306	501	307
SiO ₂	56.0	48.5	62.7	60.5	45.2	41.5	43.7	43.0	40.3	2.95
TiO ₂	00.4	00.4	-	00.2	00.2	00.5	00.2	00.2	00.3	00.04
Al ₂ O ₃	30.7	37.0	29.7	30.9	37.9	41.7	40.1	38.6	37.5	80.60
Fe ₂ O ₃	00.6	00.6	01.0	01.1	03.0	00.8	01.5	03.7	07.3	00.72
CaO	-	-	-	00.4	00.4	00.1	-	00.1	-	00.14
MgO	-	-	-	00.1	00.1	trace	trace	trace	-	0.02
Na ₂ O	00.2	00.2	00.2	00.1	00.1	00.3	00.1	00.1	00.3	-
K ₂ O	00.1	00.1	-	00.1	00.1	00.2	00.1	00.1	-	-
H ₂ O(+)	01.4	13.0	05.8	13.5	13.5	14.6	13.5	13.6	-	-
H ₂ O(-)	00.7	00.3	00.6	-	-	00.3	00.6	01.0	-	15.67



로 1030°C 13.5 Kbar 조건하에 높은 휘발성 광물인 듀모오티어라이트가 최후단계에서 형성되어 합성과 성분 자료는 -9109±20, -8568±20 KJ/mol로서 298.15 K과 1 bar Al₂O₃-SiO₂-H₂O계의 합성 실험결과에 의하면 열

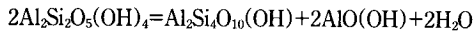
수중 규소의 농도에 의한 것과 200°C이상의 고온이 상승 되면 고령석은 납석, 다이아스포아-듀모오티어라이트로 전이된다.

납석은 단사정계과 삼사정계의 합성 실험결과에 의하면 삼사정계에 해당되는 납석이 안정하다고 보고되었다 (Eber, 1979). 납석과 다이아스포아는 서로 공생하고 덕카이드가 함유되는 것은 비교적 흔치 않다. 고령석은 일정한 고온에 도달하면 납석 또는 다이아스포아로 변환다.



고령석 석영 납석 물

(1 Kbar H₂O 하에서 273°C±10°C)



고령석 납석 다이아스포아 물

(1 Kbar H₂O 하 300°C±10°C)

결 론

1. 동래, 양산, 밀양지역에는 소규모의 납석-고령토-견운모광상이 부존되며, 광물은 보오마이트, 다이아스포아, 듀모티어라이트, 쇼오렐, 휘수연석 등이 수반된다. 그 중 듀모티어라이트, 쇼오렐, 휘수연석이 단결정으로 0.1~1.0 mm 내외로 공생한다.

2. 듀모티어라이트, 쇼오렐 (전기석) 광물은 일반적으로 기성광상에서 부존되어 본 역의 열수광상중에 수반되는 것이 특징이다. 고령토와 납석의 전이온도는 대략 350~370°C, 1 Kbar 내외에서 납석으로 전이되는 것으로 밝혀지며, 듀모티어라이트는 472±5°C, 2 Kbar로 합성 실험 결과가 발표되었다 (Philip *et al.*, 1980). 종전까지는 국내의 납석-고령토광상은 천연수광상으로 알려져 있었으나, 본 연구결과로 함봉소 규산염 광물인 듀모티어라이트, 쇼오렐은 500°C 내외에서 형성된 것으로 사료된다.

3. 3차원 X-선 회절 및 전자미세현미경의 분석결과에 따르면 듀모티어라이트 (Al₇BSi₃O₁₈)가 양이온의 총수인 7보다 부족 (6.615~6.669)할 경우 진한 하늘색 을 띠는 것은 철성분으로 인한 것으로 사료된다.

참고문헌

상기남 (1986) 한반도 남부지역의 고령토-납석광상 생성기 구. 광산지질 특별호, 19권, p. 430-452.
 상기남 (1992) 영남지역, 고령토-납석 광상의 성인연구 광산지질, 25권, p. 101-114.
 진명식, 김성재, 신성철 (1991) 한국 동남부지역 화강암류의 희석트랙 및 K-Ar연령. 한국 동력자원연구소, KR-90-1B, 2, p. 57-98.
 황상구, 김상욱 (1990) 밀양 양산간의 칼데라를 동반한 규질 화류 응회암. 대한지질학회지, 26권, p. 329-340.
 홍성우, 최민영 (1988) 유천도폭. 한국 동력자원연구소, p. 1-15.
 Alexander, V.D., Griffin D.T. and Martin, T.J (1986) Crystal chemistry of some Fe and Ti-poor dumortierite. Amer. Miner., v. 71, p. 786-894.
 Black, P.M. (1973) Dumortierite from Karikari peninsula: A first record in New Zealand. Mineralogical magazine, v. 39, p. 245.
 Bruce, S.H., Lawrence, M. Anovitz, Richard, A.R. and James, J.M. (1990) The thermodynamic properties of

dumortierite Si₃B[Al_{6.75}□_{0.25}(OH)_{0.75}]. Amer., Miner., v. 75, p. 1370-1375.
 Claringbull, G.F. and Hey M.H. (1952) New data for dumortierite. Mineralogical magazine, v. 31, p. 901-907.
 Eber, D. (1979) Synthesis of pyrophyllite polytypes and mixed layer. Amer. Miner., v. 64, p. 1091-1096.
 Frank, D. (1983) Origin, distribution and rapid removal of hydrothermally formed day at Mont. Baker, Washington. USGS, p. 1022E. 1-13.
 Golovastikov, N.I. (1965) The crystal structure of dumortierite. Sov. Phys. Dok., v. 10, p. 493-495.
 Gunter, W. and Schreyer, W. (1983a) High pressure synthesis of dumortierite. Terra cognita 3:165 (EUG Abstract).
 Gunter, W. and Schreyer, W. (1983b) Synthesis crystal chemistry and preliminary stability of dumortierite in the system SiO₂-Al₂O₃-H₂O. Fortschr Min., 61 Beih 1 219-220.
 Gunter, W. and Schreyer, W. (1984) Alkali-free tourmaline in the system MgO-Al₂O₃-B₂O₃-SiO₂-H₂O. Geochim. Cosmochim., v. 48, p. 1331-1344.
 Gunter, W. and Schreyer, W. (1986) Dumortierite: compositional variations as a function of fluid pressure and temperature (abstract). International Symposium of Experimental Mineralogy Geochemistry. Nancy, p. 143-144.
 Gunter, W. and Schreyer, W. (1990) Synthetic dumortierites: Its PTX-dependent compositional variations in the system Al₂O₃-SiO₂-B₂O₃-H₂O. Contrib. mineral petrol., v. 105, p. 11-24.
 Kennedy, G.C. (1959) System Al₂O₃-SiO₂-H₂O V.P. reaction. Amer. Sci., p. 257-570.
 Kenneth, R., Applin and Brian D. Hicks (1987) Fibers of dumortierite in Quartz. Amer. Miner., v. 72, p. 170-172.
 Kitagawa, T (1988) K-Ar Ages of the sericite and kaoline deposits in Chugoku district Southwest Japan. Mining Geology, v. 88-8, p. 279-290.
 Moore, P.B. and Araki T. (1978) Dumortierite, Si₃B[Al_{6.75}□_{0.25}O_{17.25}(OH)_{0.75}] a detailed structure analysis. N. Jb. Miner Abh., v. 132, p. 231-241.
 Philip, E.R. and Graham. Cliff (1980) The formation of pyrophyllite solid solutions. Amer. Miner., v. 65, p. 1217-1219.
 Reyeschertz, P.P. and Yost, W.J. (1946) J.Chem Phys. v. 14, p. 499.
 Rey, A.G. (1990) Petrology of philippine geothermal system and the application of alteration mineralogy to their assesment. Jour. Volcanal Geotherm. Res., v. 43, p. 279-309.
 Werding, G. and Scjreyer W. (1983a). High pressure synthesis of dumortierite. Terra cognita, v. 3, p. 156 (EUG Abstract).
 Werding, G. and Scjreyer, W. (1983b) Synthesis crystal chemistry and preliminary stability of dumortierite in the system SiO₂-Al₂O₃-H₂O. Fortschr Min. 61 Beih 1, p. 219-220.
 Werding, G. and Scjreyer, W. (1984) Alkali-free tourmaline in the system MgO-Al₂O₃-B₂O₃-SiO₂-H₂O. Geochim. Cosmochim, v. 48, p. 1331-1344.
 Werding, G. and Scjreyer, W. (1986) Dumortierite compositional variations as a function of fluid pressure and temperature (abstract). International Symposium

of Experimental Mineralogy Geochemistry, Nancy, P.
143-144.
Werding, G. and Scjreyer, W. (1990) Synthetic du-
mortierites: its PTX-dependent compositional vari-

ations in the system $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$. Contrib.
mineral petrol., v. 105, p. 11-24.

1995년 11월 22일 원고접수