



국내산 납석의 부존현황 및 광물특성

노진환¹⁾ · 고상모²⁾

¹⁾강원대학교 지질학과

²⁾한국지질자원연구원 지질기반정보연구부 광물자원연구실

요약

국내의 납석 광상은 대부분 백악기의 화산암류들이 열수변질되어 형성된 광상으로서, 주로 전남 및 경남 지역에 밀집되어 분포한다. 납석은 지질 여건상 주로 경상분지 내에 국제적인 규모의 풍부한 부존자원이 있지만, 그 동안의 개발에 의해서 고품위 광석들은 상당히 채진된 상황이다. 현재 개발되고 있는 광체들은 몇 곳의 광산을 제외하고는 대부분 저품위 광상을 이루고 있기 때문에, 새로운 광체의 탐광이 이루어지지 않는다면 앞으로 고품위 광석에 관한 한 국내의 수요를 충당하기 어려운 상황에 이를 것으로 예상된다. 현재 국내에서 납석으로 개발되고 있는 광석의 상당수(대략 40% 정도)가 엄밀한 의미에서는 사실상 납석이 아닌 고령토나 견운모 광석인 것으로 밝혀졌다. 엽납석을 함유하는 정상적인 형태의 납석들은 그 수반 점토광물상에 의거하여 (1) 엽납석질, (2) 디카이트질, (3) 일라이트질 및 (4) 디카이트-일라이트질 유형으로 구분될 수 있다. 고령토 광물로는 대부분 디카이트가 수반되고 외국에서는 흔히 수반되는 것으로 알려져 있는 고령석은 거의 함유되지 않는 것이 특징이다. 석영은 납석에서 점토광물 못지않게 그 용도를 가름하는 주요 성분으로서 대부분의 광석 유형에서 수반되지만, 특히 일라이트질 납석에서 흔히 그리고 보다 많이 수반되는 양상을 보인다.

X-선회절 정량분석법은 납석의 품위를 산정하는데 유력한 수단이 될 수 있다. 특히 납석 이외의 점토광물들의 조성, 특히 일라이트의 함유 정도는 납석의 용도별 품위와 품질을 가름하는 주요 사항이다. 화학분석에 의한 납석의 평가 방식은 특히 납석의 백색 도기류와 같은 각종 세라믹스 제조 용도에서의 품질 평가에 결정적인 단서를 제공하는 유력한 평가 수단이다. 특히 착색유발 성분인 철분의 존재와 그 함량을 정하고 요업용도에서 중요한 Al_2O_3 와 알칼리 성분 함량을 검증하는데 필수적인 평가 방법이다. 이외에 주사전자현미경 관찰을 통해서 납석의 주요 품질 기준이 되는 극미립상 엽납석의 결정형, 조직 및 미세적 산출상태를 보다 정밀하게 평가할 수 있는 방안을 제공한다.

현행 광업법상의 납석을 비롯한 관련 광종들의 광물분류 체계가 모호하게 설정되어 있고 관련 인허가 부서에서의 전문성 및 지도력 부족으로 관련 산업계에 심각한 비효율성과 오류가 야기되고 있는 실정이다. 이를 개선하기 위해서는 납석의 광석평가 방식이 그 품위와 품질 개념 하에서 응용광물학적으로 적용되어야 할 것이다.

서 언

납석(蠟石, pyrophyllite)은 산업광물들 중에서 우리들과 가장 밀접한 관계를 갖는 광물질이다. 납석은 우리의 일상생활에 편의를 가져다주는 주거 시설이나 각종 도기류 등의 원자재로서 중요할 뿐만 아니라, 우리나라가 이 광물자원에 관한 한 세계적으로 유명한 자원보유국이라는 점에서도 특별하다. 일본과 더불어 도기 문화가

발달한 우리나라는 전 세계적으로 이 광물자원의 주요 생산국이자 동시에 소비국이다. 따라서 납석의 개발 및 용도에 관한 대부분의 정보와 통계 자료가 우리나라를 비롯한 극동 아시아 지역 국가들(일본, 중국 등)로부터 유래되고 있는 실정이다. 그렇지만 학술적 및 기술적 사안에 관한 한, 국제 문헌상으로는 대부분의 정보와 자료들이 일본 측에 편중되어 있다. 국내의 경우에는 광상 성인에 관한 연구 결과를 제외하고

는 대부분 외국인에 의해서 조사된 내용들 위주로 소개되어 있는 실정이다. 이는 국내에서의 납석에 대한 연구개발의 취약성을 단적으로 시사하는 안타까운 현실로 여겨진다.

우리나라 납석의 추정 매장량은 약 53,087천톤, 가채광량이 39,148천 톤으로 집계된다(산업자원부와 대한광업진흥공사, 2003). 이는 2003년 생산량(약 95만 톤)을 기준으로 한다면 약 50년 이상 사용할 수 있는 부존 규모이다. 시멘트 제조용 부원료 용도 등과 같은 저품위 납석의 수요는 앞으로 계속 증가될 것으로 예측되지만, 국내의 풍부한 자원잠재성을 고려하면 그 수급 면에서 별다른 어려움은 없을 것으로 여겨진다. 그렇지만 유리섬유용 등에서 요구되는 고품위 광석의 생산은 계속 감소 추세에 있어, 현재 고품위 납석 광체의 개발이 시급한 상황이다. 이는 그 동안 규모가 큰 납석광산이 오랫동안 개발되어 품위 저하를 초래한 측면도 있지만, 보다 근본적인 요인은 계속적인 탐사를 통한 고품위 광체의 확보가 이루어지지 않았기 때문이다.

납석은 국내에서 오래 전부터 내화물, 위생도기, 유리섬유, 타일 등과 같은 요업제품들의 제조용으로 주로 활용되어 왔고, 최근에는 유리섬유와 시멘트 부원료로도 활용되고 있다. 납석은 저가의 요업용 광산물로서 그 광물상이 복잡하고 상대적으로 고가인 고령토에 비해 그 자원 잠재성과 효용성이 저평가되었던 관계로 아직 그 용도와 수급관계에 따른 품위 및 품질 규격의 체

계가 제대로 갖추어져 있지 않은 실정이다. 또한 이 광물의 특성상 특정한 하나의 유용광물로 이 광물질의 존재가 정의될 수 없고 일부 업계에서는 사용 목적의 부합성에 따라 동정되기도 한다. 게다가 이와 유사한 용도로 사용되는 일라이트-운모류와 광산물의 개념상 혼동이 유발되어 납석의 물질적 특성과 광산물로서의 가치기준 등에 있어서 상당한 혼란과 오류가 야기되었다.

이에 따라 납석 자원에 대한 부존 규모 및 잠재성 평가에 있어서도 마찬가지로 다소간의 혼선이 빚어지고 있는 실정이다. 따라서 현재 납석에 대한 법정광물 상의 정의, 자원평가, 광물 특성, 품위 및 품질 개념 등에 대한 올바른 지식 체계의 확립이 시급히 요구되고 있는 상황이다.

이 같은 배경과 취지에서 국내산 납석의 부존현황, 산출상태, 광석 유형, 광물상, 광물 조성 및 특성을 밝히고 그 자원 잠재성과 광물 특성을 논의하고자 한다. 또한 이 광물질의 용도와 관련하여 고려되어야 할 품위(grade) 및 품질(quality)의 기준과 그 평가 방안을 논의하고자 한다.

납석의 정의 및 광물상

납석은 원래 엽납석(pyrophyllite, $Al_2(Si_4O_{10})(OH)_2$)을 주된 광물 성분으로 가지는 광석을 지칭한다(표 1). 그렇지만 실제로 산업 현장에서는 여기에 부수적으로 수반되는 고령토 광물

Table 1. Mineralogical characteristics of pyrophyllite

Pyrophyllite					
Mineral Name	Chemical Formula & Composition	Color/Luster	SG	H	Crystal system/habit
Pyrophyllite Greek for 'pyro': fire, 'phyllo': leaf, & 'lithos': stone	$Al_2(Si_4O_{10})(OH)_2$ 28.3% Al_2O_3 66.7% SiO_2	white, grayish white, yellowish, pale blue, greenish, grayish or brownish green; transparent to translucent; pearly to dull and glistening	2.8 - 2.9	1-2	monoclinic, triclinic; tabular and subhedral; radiated lamellar

Source: Roberts et al., 1990.

들(kaolinite와 dickite, $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$)이나 일라이트(illite, $KAl_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot H_2O$)같은 다른 점토광물들이 엽납석 보다 많이 함유된 형태인 소위 '고령토질 납석' 및 '일라이트질(또는 견운모질) 납석' 등도 납석으로 취급된다. 호주에서는 심지어 철분 때문에 일반적으로 산업 용도로 활용되지 않는 녹니석(chlorite)을 수반하는 것도 내화물 제조 부문에서는 납석의 유형으로 간주하고 있는 실정이다. 결국 요업적으로는 1200℃ 정도로 가열처리하면 고온상인 물라이트(mullite, $Al_6Si_2O_{13}$)와 크리스토팔라이트(cristobalite, SiO_2)로 이루어진 소성체가 형성될 수 있는 엽납석을 함유하는 점토질 광석을 모두 납석의 범주로 취급될 수 있

는 것으로 알려져 있다(Harben and Kuzvart, 1996). 납석은 이들 점토광물들 외에 옥수질 석영(chalcedonic quartz), 명반석(alunite), 다이아스포아(diaspore), 황철석 등과 같은 부성분 광물들을 흔히 수반한다.

납석은 취약하지만 조각하기에 적당한 내마모성의 특징을 갖는 물성적으로 안정한 광물질이다. 물에 산포되면 중성의 pH를 띠고 살균제와 살충제의 재질로 이용될 정도로 흡착력과 매개체로서의 효능이 우수하다. 또한 대개 평활도가 좋은 엽상의 결정형을 이루기 때문에 각종 충전재(filler)로 사용될 수 있다. 매우 높은 내열성과 낮은 가열·응축(heating shrinkage) 효과도 이 광물이 지니는 특별한 성질이다.

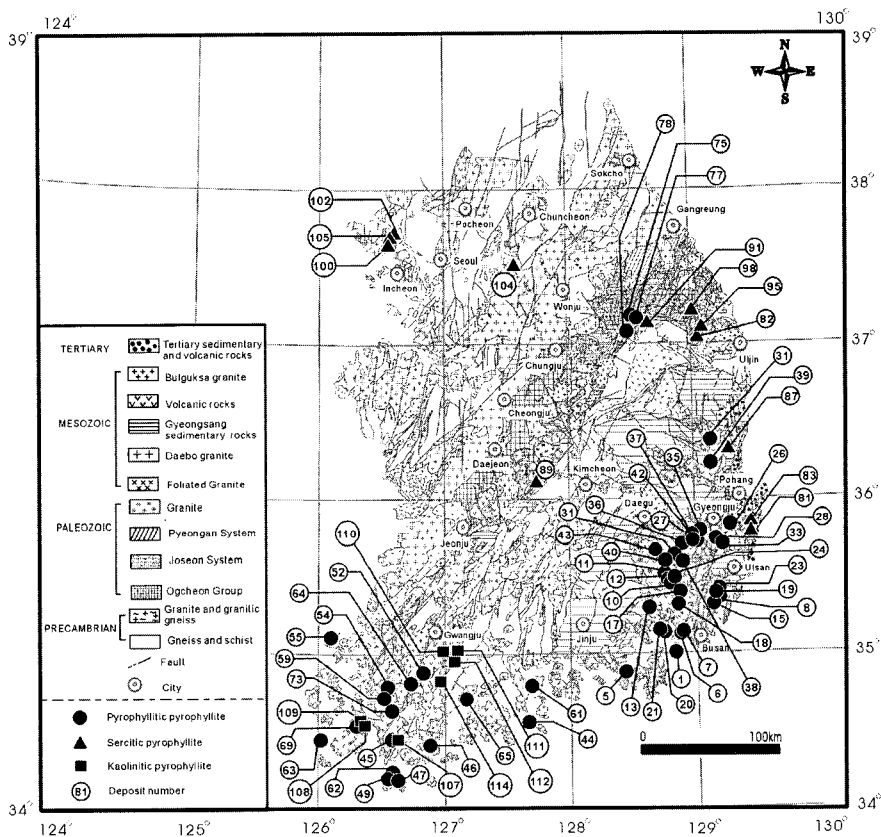


Figure 1. An illustration map showing the geology and distribution of pyrophyllite deposits in South Korea. Symbolic marks of mines are the same as in the Table 2.

Table 2. Domestic pyrophyllite deposits and their locations.

Pyrophyllite type								
No	Mine Name	Location	No	Mine Name	Location	No	Mine Name	Location
1	가덕	부산강서천가	28	내남	경북경주내남	55	목포-지도	전남신안지도
2	녹산	부산강서녹산	29	대림-봉화	경북봉화석포	56	봉황	전남나주봉황
3	녹산제1광산	부산강서생곡	30	대풍	경북울진북면	57	수도	전남신안임자
4	강남-김해	경남김해한림	31	동곡	경북청도금천	58	신안	전남신안임자
5	광도	경남통영광도	32	부남	경북청송부남	59	신옥	전남영암서호
6	김해	경남김해녹산	33	불국사	경북경주내남	60	약산	전남완도약산
7	김해덕봉	경남김해한림	34	사방	경북월성안강	61	여수	전남여천삼일
8	동래-정관	경남양산웅상	35	산내	경북경주산내	62	완도	전남완도노화
9	무연	경남밀양부북	36	삼성	경북청도금천	63	옥출	전남진도조도
10	원동	경남양산원동	37	삼원	경북경주산내	64	월평	전남영암신북
11	밀양	경남밀양교동	38	서도	경북청도매전	65	이화	전남보성회천
12	밀양승진	경남밀양삼랑진	39	죽장	경북포항죽장	66	일평	전남해남현산
13	북면	경남창원북면	40	중앙	경북청도매전	67	장산	전남신안장산
14	삼창	경남양산원동	41	청송	경북경주산내	68	죽전	전남진도군내
15	용천산	경남양산정관	42	태용	경북경주산내	69	진도	전남진도군내
16	우용	경남양산원동	43	풍산	경북청도매전	70	충도	전남완도노화
17	유림	경남양산원동	44	개도	전남여천화정	71	평일	전남완도금일
18	웅용	경남양산원동	45	구시	전남해남현산	72	한송	전남진도조도
19	정관	경남양산웅상	46	국보-약산	전남완도약산	73	해남	전남해남계곡
20	죽곡	경남진해웅천	47	광명	전남완도노화	74	국일	충북단양영춘
21	진해	경남마산중앙	48	남곡	전남해남계곡	75	광성	충북단양영춘
22	창원북면	경남창원북면	49	노화	전남완도노화	76	대영	충북서산운산
23	천불산	경남양산웅상	50	녹진	전남진도군내	77	대현	충북단양영춘
24	문화태룡	경남밀양단장	51	도암	전남진도군내	78	영춘	충북단양영춘
25	한국	경남통영용남	52	다도	전남나주다도	79	영춘공예	충북단양가곡
26	경북	경북경주강동	53	대덕	전남장흥대덕			
27	경주	경북경주산내	54	독천	전남영암서호			

Illite type								
No	Mine Name	Location	No	Mine Name	Location	No	Mine Name	Location
80	광평	경북봉화석포	89	동창	충북영동영동	98	연화	강원태백
81	대장	경북경주양남	90	태광세라믹	충북단양영춘	99	황성	강원황성공근
82	대현	경북봉화석포	91	새로나(옥동)	강원영월하동	100	대명	경기김포월곶
83	맥스텍	경북경주양남	92	영춘	강원정선사북	101	세종기업	경기김포월곶
84	성황	경북봉화석포	93	증산	강원정선남면	102	신흥	경기김포월곶
85	오성	경북포항죽장	94	동해	강원정선사북	103	안성	경기안성양성
86	오진	경북봉화석포	95	백병	강원태백	104	용문	경기양평용문
87	유천	경북포항청하	96	삼아	강원삼척노곡	105	한흥	경기김포월곶
88	선우영천	충남단양영춘	97	삼진	강원영월서면	106	한흥세라믹	경기김포통진

Dickite type								
No	Mine Name	Location	No	Mine Name	Location	No	Mine Name	Location
107	백암	전남해남황산	108	부곡	전남해남황산	109	옥매	전남해남황산

Kaolinite type								
No	Mine Name	Location	No	Mine Name	Location	No	Mine Name	Location
110	동북	전남화순남면	112	천운	전남화순남면	114	송석	전남화순이양
111	벽송	전남화순남면	113	북내	전남화순이양			

납석의 분포 및 지질배경

국내산뿐만 아니라 납석은 전 세계적으로 대개 칼크-알칼리(calc-alkaline) 계열의 산성 내지 중성의 화산암류, 특히 응회암류의 열수변질 물로서 산출된다. 드물지만 화산암류의 변성작용이나 변성·교대작용에 의해서도 형성되는 것으로 알려져 있다. 또한 노출상황에 따라 풍화작용에 의해서 부분적으로 재차 변질되기도 한다. 대부분 열수변질의 양상에 따라 불규칙한 괴상 광체를 이루지만, 원암이 암층을 이룰 경우에는 원암의 분포와 경계에 다소 규제되어 층상으로 부존되는 양상을 보이기도 한다.

국내 납석 광상은 형성 시기 및 환경에 따라 (1) 백악기 또는 제3기의 화산암원 열수변질 광상, (2) 고생대 부정합형 열수변질 광상 및 (3) 변성 광상으로 구분된다. 이 중에서 백악기의 열수변질형 광상이 가장 우세하고, 지질여건상 전남지역과 경상도 지역에 밀집되어 분포한다(Fig. 1). 이 유형의 광상은 경상분지 내에서는 주로 경

상계 백악기 유천층군 분포 지역에 부존하고, 전남 지역에서는 유천층군에 대비되는 지층에 한정되어 분포한다(Koh and Chang, 1997).

주요 납석 광상의 부존상태 및 지질배경

노화 광상

노화 광상이 위치하는 전남 완도군 노화읍 노화도는 안산암류와 유문암류가 주로 분포하는 지질 양상을 이룬다(Fig. 2). 안산암류는 노화도 서부 지역에 주로 분포하고 반상질 안산암과 치밀질 안산암으로 구분된다. 유문암류는 담녹회색~담갈색의 유동구조가 뚜렷하게 발달된 유문암질 용암류가 대부분을 차지한다. 용결구조를 보이는 유문암질 용결응회암과 협재된 응회질 사암으로 주로 구성되는 지층이 동부에서 북부에 걸쳐 분포하고 있다. 노화도 남부에서는

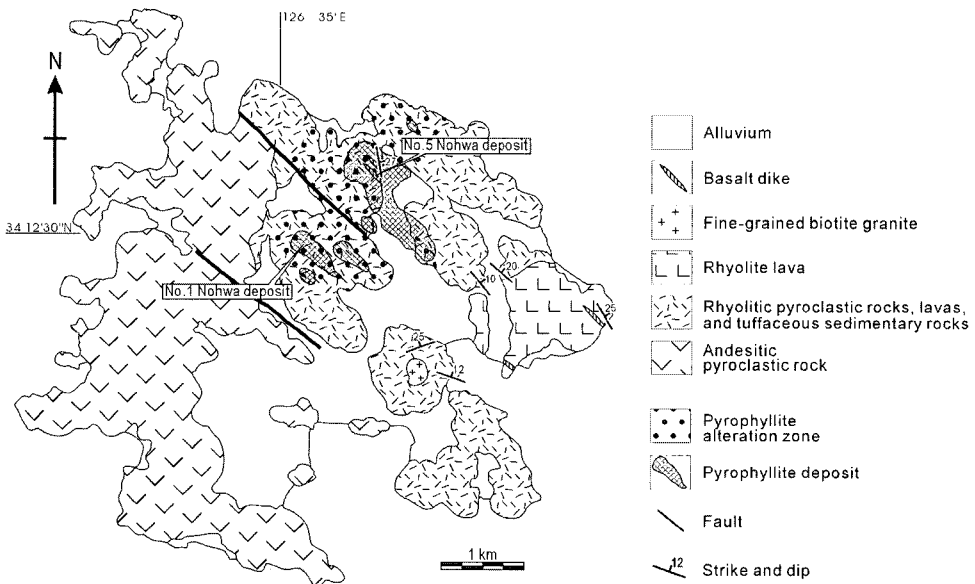


Fig. 2. A geologic map illustrating the location and geologic background of the Nohwa pyrophyllite deposits (Koh et al., 2000).

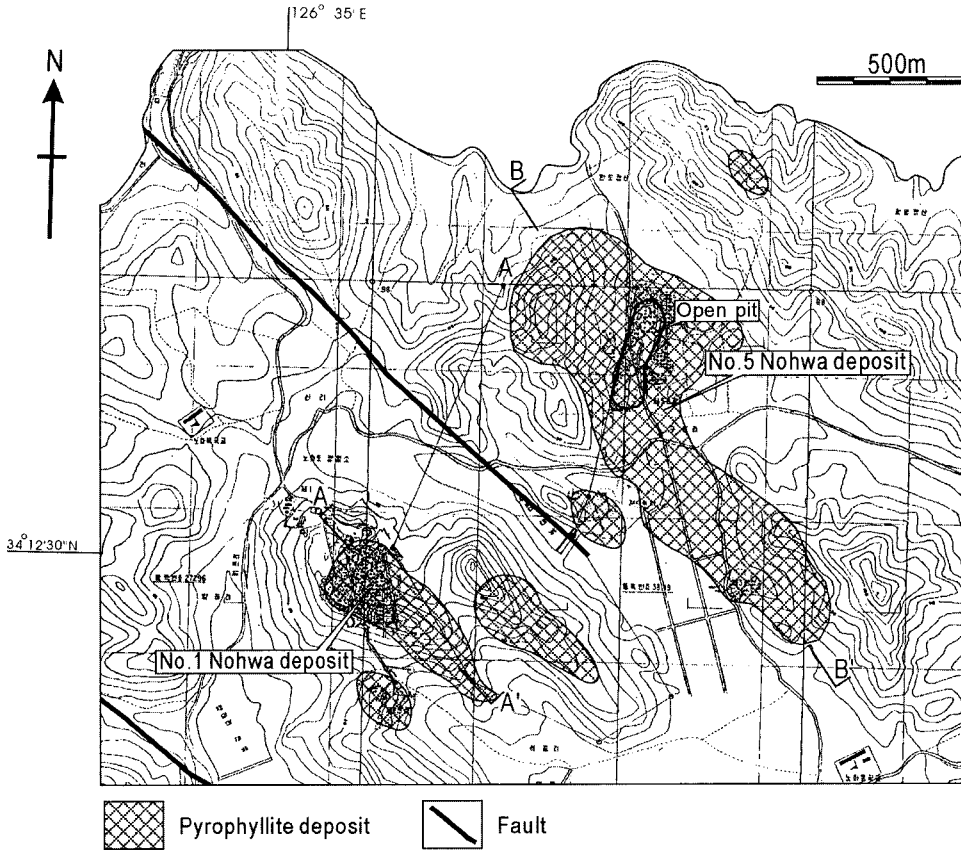


Fig. 3. A location map showing the distribution and occurrence of pyrophyllite ore body at the Nohwa Mine (Koh et al., 2000).

유문암질 응회암을 관입하는 흑운모 화강암체가 분포한다. 안산암류와 유문암류를 절단하는 NW-SE계의 정단층이 이 광상의 북부 지역에서 관찰된다.

노화도 북부일대 유문암류 분포지에서는 동서 2km, 남부 2.5km에 걸쳐 대규모의 납석변질대가 형성되어 있다(Fig. 3). 노화 제1광상 지역은 해발고도 131m의 언덕의 북서 사면에서 남동 방향 지하 심부로 이어지는 광상이며, 노화 제5광상 지역은 그 북동부에 위치하며 제1광상 보다 지표상에서 넓은 분포를 나타낸다(Fig. 3). 제1광상 광체는 모암의 구조에 조화적으로 층상 내지 렌즈상으로 배태하며 장경 700m, 단

경 250m, 최대 층후 65m에 달하는 규모를 이룬다. 또한 제5광상의 광체는 장경 1,500m, 단경 600m, 최대 층후 45m를 이루는 층상 광체로서 모암의 구조와 조화적 관계를 이루며 분포한다. 이 광상의 모암은 응회질 사암 및 세일의 호층, 유문암질 응회암과 유문암이다. 노화 광상은 규화대, 납석대, 다이아스포아(diaspore)대, 강옥대 및 약변질대(illite 변질대)로 분대된다. 각 변질대는 광상의 외측에서 내측으로 갈수록 약변질대, 납석대, 다이아스포아대의 순서로 배열되는 누대구조를 나타내며, 제5광상의 중심부에는 강옥대가 분포하는 것이 특징이다. 제1광상의 채굴부에서는 납석대가 가장 넓은 분

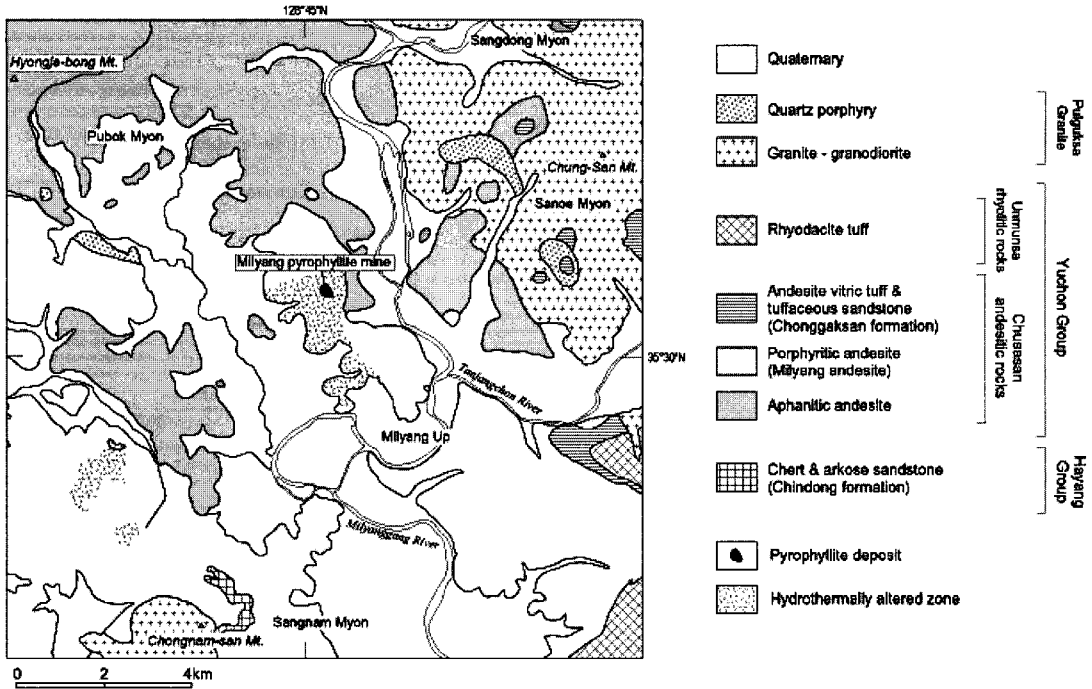


Fig. 4. A geologic map of the Milryang pyrophyllite deposit (Koh et al., 2000).

포를 보이고 외곽부에는 약변질대가 발달한다. 다이아스포아는 광체 중심부에 NW-SE 방향으로 맥상으로 부존된다. 제5광상의 채굴장에 있어서도 광체 외각부에 약변질대가 나타나며 납석대가 넓게 분포되고 있으나, 광체 중앙부에서의 다이아스포아대의 분포는 제1광상 보다 넓고 그 중심부에 강옥대가 NW-SE 방향으로 맥상으로 분포된다. 제1광상 및 제5광상에서 단괴상으로 흔히 산출되는 다이아스포아는 납석대 중에서 고온의 열수용액의 영향으로 다이아스포아가 재차 형성된 것으로 해석된다(고상모 외, 2000).

밀양 광상

경상남도 밀양 시내에 위치하는 이 광상은 대체로 북광체와 남광체로 구분되고, 주로 북광체를 대상으로 현재 개발 중에 있다. 경상계 유천층군 내에 위치하는 이 광상은 경상 열수변질대

에 속하는 중규모 광상중의 하나이다(Koh et al., 1997, 2000). 노천채굴 방식으로 개발되고 있는 관계로 광체 및 변질대의 관찰이 용이하여 많은 연구자들이 연구를 수행한 바 있으며(오대균 외, 1992; 오대균 및 전효택, 1993; 이강원 외, 1993), 다이아스포아 단괴에 대한 광물학적 기재(문희수의, 1993) 뿐만 아니라 지질 및 광상에 대한 상세한 연구가 수행된 바 있다(고상모 외, 2000; Takagi et al., 2000).

이 광상 부근의 지질은 주로 유천층군과 이를 관입한 불국사 화강암으로 이루어지며, 유천층군은 주사산 안산암류와 운문사 유문암류로 구성된다. 주사산 안산암류가 이 지역 지층의 대부분을 차지하며, 하부에서 상부층 순서로 잠정질 안산암, 반상질 안산암(밀양 안산암), 안산암질 응회암과 응회질 사암(정각산층)이 순차적으로 놓인다(Fig. 4). 그 위에 또한 상부의 운문사 유문암류가 부정합적인 관계를 보이며 피복하는

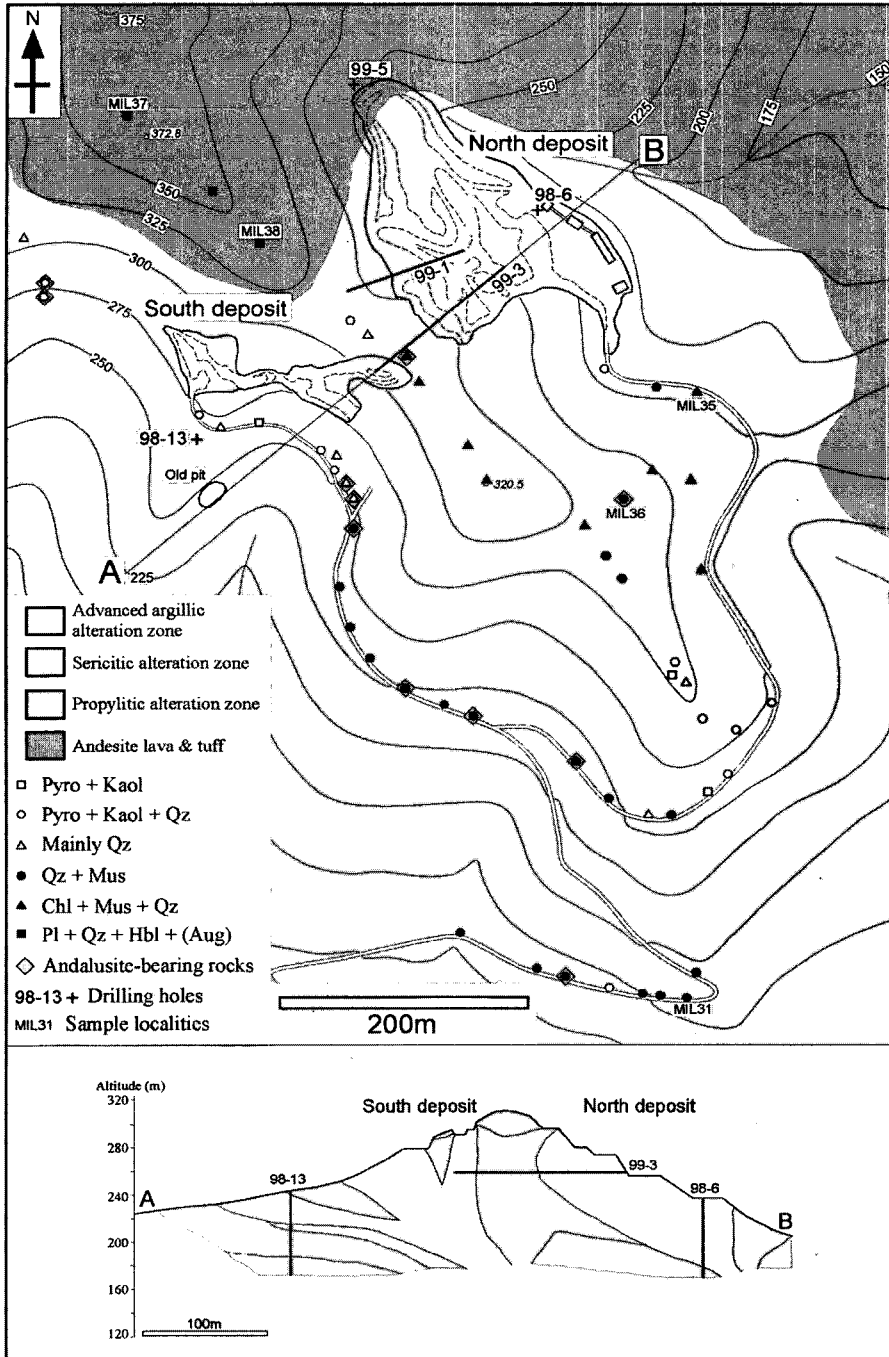


Fig. 5. Geologic map and schematic cross-section illustrating occurrence of pyrophyllite deposits and the mode of wall-rock alteration at the Milryang Mine: Pyro=pyrophyllite, Kaol=kaoline, Qz=quartz, Chl=chlorite, Mus=muscovite, Pl=plagioclase, Hbl=hornblende, Aug=augite.

층서적 양상을 보인다(Chang, 1987). 화산암류들의 K-Ar 전암 연대가 57~79 Ma로서 백악기말에서 제3기 화산활동의 산물로 알려져 있다(Won, 1987).

이 납석광상은 경상열수변질대의 중앙부에 위치한다. 광상 지역은 능선을 기준하여 두 개의 큰 광체로 구분된다(Fig. 5). 북쪽에 분포하는 광체의 규모는 300m(길이)x140m(넓이)x60m(높이)이며 소위 'advanced argillic alteration zone'이 넓게 발달한다. 이에 비해서 남쪽 광체의 크기는 210m(길이)x60m(넓이)x40m(높이)이며 이 이질 변질대가 대단히 좁게 발달한다. 남부 및 북부광상은 서로 명백히 분리된 광체로서 모양의 구조와 부조화적이며, 각 광체는 상부로 갈수록 팽창되면서 가지처럼 분리되는 일종의 풍선(balloon) 형의 광체 형태를 이룬다(Fig. 5).

이 광상 지역의 전체 변질대의 분포 면적은 대략 6km²로서 변질 정도에 따라 분대를 이룬다(Fig. 5). 일라이트의 K-Ar 연대 측정으로 구해진 이 광상의 변질 시기는 69.7 Ma로서 백악기 말에 해당된다(Takagi et al., 2000).

납석의 광석 유형과 품위 및 품질

부드럽고 미끌미끌한 질감과 누르스름한 색상을 보이는 납석은 육안상 흔히 활석(talc)과 혼동되기 쉽다. 그렇지만 그 명칭에서 알 수 있듯이 높은 내열성과 쉽게 마모되지 않는 특성 등에 있어서 활석과는 확연한 차이를 보인다. 광석으로서의 전술한 바와 같은 다양한 점토광물 조성에 의거하여 대개 (1) 엽납석질 납석, (2) 고령토질 납석 및 (3) 일라이트질 납석 등으로 구분된다. 그렇지만 일본에서는 조각용 재료와 내화벽돌 원료로 유용한 혼성 점토광물상(pyrophyllite+kaolinite+illite)의 납석 유형을 'roseki'라고 부르고 있다. 호주에서는 '록니석질 납석'이나 '옥수질 납석(chalcedonic pyrophyllite)'도 납석의 광석 유형으로 구분해 사용하고 있다. 브라질에서는 백운모(muscovite), 다이아스포(diaspore) 및 납정석(kyanite) 등을 수반하는 특징적인 엽납석 혼성집합체를 'agalmatolite'라는 명칭으로 취급하고 있다. 또한 약간의 변성광물들(chloritoid, rutile, epidote)을 포함하지만 90% 이상의 엽납석 순

Consumption of pyrophyllite in Korea
(tonnes)

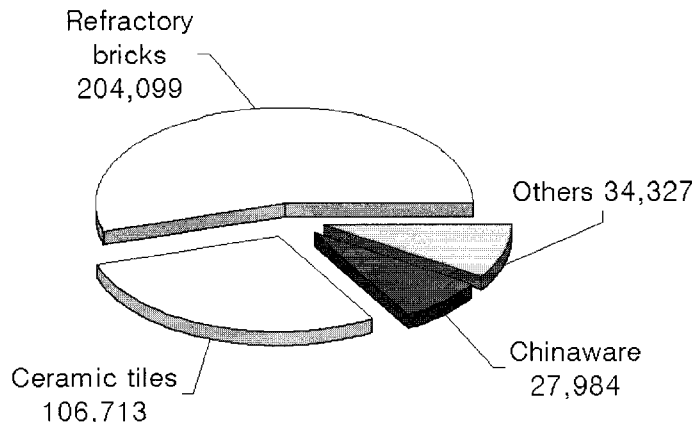


Fig. 6. A diagram illustrating the consumption pattern of domestic pyrophyllite in 1995 (Industrial Minerals, 2001).

도 갖는 남아공 특산의 괴상의 납석 광석 유형을 'wonderstone' 이라고 부르는 등 국가별로 다소 다르게 납석의 광석 유형들이 분류되고 있는 실정이다. 이 같은 다소 혼란스러운 광석분류 체계는 이 광물자원의 복잡한 광물상 및 광물조성과 용도의 차이에 기인한 것으로 여겨진다.

일반적으로 산업광물의 품위(grade)는 특정한 유용 광물성분의 절대적 함량 또는 광석의 경제적 기준 함량에 대비된 유용 성분의 상대적 함유 수준이나 등급을 의미한다. 그렇지만 내화물이나 위생도기 제조용 등 주로 요업적 용도로 이용되는 납석의 경우(Fig. 6)에서는 유용 광물성분의 한정이 다소 애매한 상황이다. 물론 납석의 주된 유용 광물성분은 엽납석이지만, 광석 유형에 따라 수반되는 다른 점토광물들(고령토 광물과 일라이트 등)과 석영 등이 용도에 따라 다소 차이가 있긴 하지만 합철광물들처럼 단순한 불순물이 아니라 부분적으로는 유용 성분의 역할을 하기 때문이다.

국내에서 개발되고 있는 일라이트질 납석들은 대부분 위생도기류, 타일류 등과 같은 요업제품 용도로 사용되고 있다. 이 같은 용도로 사용되는 일라이트질 납석은 엽납석이나 일라이트의 함량(20-25%) 보다 석영을 2배 정도(50-60%)로 더 많이 함유해야 된다는 품위 요건이 요구되는 것으로 알려져 있다(Chang, 2001). 따라서 일라이트질 납석의 품위는 일라이트의 절대적 함량에 기준되는 것이 아니고 석영과 기타 점토광물들(pyrophyllite나 kaolinite)의 조화적 조성비에 의해서 결정되는 다소 복잡한 광물조성의 개념으로 인식되어야 할 것이다. 그래서 통상적으로 산업계에서는 주로 화학성분, 특히 SiO₂와 Al₂O₃의 함유정도에 의해서 품위를 평가하려는 경향이 있다. 그렇지만 규산염계 산업광물에 대해서 화학성분으로만 품위를 평가하는 것은 다른 규산염계 불순광물들(예를 들어 원암에서 유래된 장석 성분 등)의 함량을 고

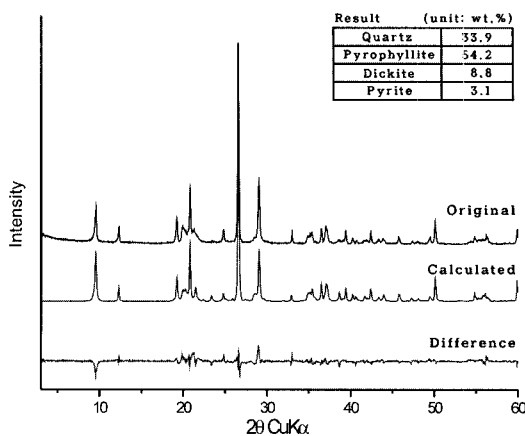


Fig. 7. Quantitative XRD analyses for some domestic pyrophyllite ore.

려하지 않는 한 원천적으로 광석 평가상의 오류가 있을 수밖에 없기 때문이다. 따라서 납석의 품위 산정은 다소 복잡하지만 광물조성과 화학조성이 상호보완적으로 고려되어 평가되어야 할 것이다(Table 3).

이 같은 상황에서 우선 엽납석을 포함한 점토 광물들의 함유 정도가 화학조성과 더불어 납석의 품위 산정에 중요한 기준이 된다. 통상 옥수질 석영과 함께 극미립질을 이루는 납석 광물들을 현미경 하에서 정량하는 것은 원천적으로 불가능하다. 그렇지만 최근에 개발된 X-선회절 정량분석법(quantitative phase analysis: QPA)을 적용하면 구성광물들의 정량이 가능한 것으로 알려져 있다(Taylor, 1991; Taylor and Matulis, 1994; Taylor and Hinczak, 2001). 실제로 이 분석법을 국내산 납석의 품위 산정에 적용하여 비교적 재현성 있고 신뢰할만한 결과를 구할 수 있었다 (Fig. 7).

납석의 품질(grade)은 용도별로 달리 적용되는 광석의 성분적 및 물성적 특징을 의미한다. 납석뿐만 아니라 대부분의 산업광물의 품질평가에서 중요한 기준은 품질규제 성분, 즉 특정한 불순 광물 및 화학 성분의 함유 정도이다. 알칼리 함량(특히 K)이나 이를 함유하는 견운모

Table 4. Grade and quality of pyrophyllite (Sources: Harben, 1995; Chang, 2001).

Refractory grade (low sericite)					Ceramic grade (high sericite)						
Minerals(%)	Chemistry(%)	Screen Analysis Cum% retained			Minerals(%)	Chemistry(%)	Particle size (μm)				
		(US sieve)									
Pyrophyllite	40-50	SiO ₂	75.0	4	17.0	Pyrophyllite	20-30	SiO ₂	80.9	40	90
Quartz	30-45	Al ₂ O ₃	19.3	8	40.0	Quartz	50-60	Al ₂ O ₃	13.8	30	78
Sericite	5-15	Fe ₂ O ₃	0.8	16	57.8	Sericite	20-25	Fe ₂ O ₃	0.2	20	58
Kaolin	1-3	Na ₂ O	0.1	30	72.5	Kaolin	5-10	TiO ₂	0.1	10	28
		K ₂ O	0.1	50	80.8			Na ₂ O	0.4	5	10.6
		CaO	0.1	100	84.4			K ₂ O	2.3	2	1.6
		LOI	3.9	200	88.6			LOI	2.3	1	nd
				325	92.0						

Table 5. A specification of quality for pyrophyllite in accordance with major application fields (Sources: Harben, 1995; Industrial Minerals, 2001).

	Major Application Fields							
	General Uses		Korea				Japan	
	Refractory	Whiteware Ceramics	Clay filler	Fiberglass & Refractory	Whiteware Ceramics	White Cement	Roseki Glassfiber	Refractory
Chemical Controls	low alkali content	high alkali content						low alkalis
	Fe ₂ O ₃ +FeO+TiO ₂ : < 1%	low iron	21-27% Al ₂ O ₃	18-21% Al ₂ O ₃	15-19% Al ₂ O ₃	9-12% Al ₂ O ₃	19-20% Al ₂ O ₃	5-18% Al ₂ O ₃
Mineralogical Controls	low sericite, massive spherulitic or radiating needle-like aggregates	high sericite, fine-grained foliated laminae						

나 K-장석의 함유도는 착색 성분(coloring oxides: Fe₂O₃+FeO+TiO₂)의 함유도와 함께 납석에서 중요한 품질규제 사항이다(Table 5, Harben, 1995). 또한 Al₂O₃의 함유도는 용도 별로 그 적정 함유수준이 다르게 제시되어 있기 때문에 중요한 품질규격 사항으로 간주된다(Table 4). 그 외에 엽납석의 결정도 및 결정형도 납석의 용도를 가름하는 주요 품질 기준이 된다. 주사전자현미경 하에서 관찰이 용이한 엽납석의 결정형은 대개 (1) 판상의 벽개가 발달

하는 미립의 엽상 형태가 주된 유형이지만, 경우에 따라 (2) 괴상의 구형 미립체나 (3) 방사상의 침상 결정체를 이루기도 한다.

엽상의 미립질 정벽을 갖는 엽납석은 백색 도기류(whiteware ceramics)와 충전재(filler) 용도로 적합한 반면에, 구형 미립체의 엽납석을 함유하는 납석은 내화물 용도에, 그리고 침상 결정체는 충전재, 백색 도기류 및 내화물 용도로 폭넓게 응용될 수 있는 것으로 알려져 있다(Industrial Minerals, 2001).

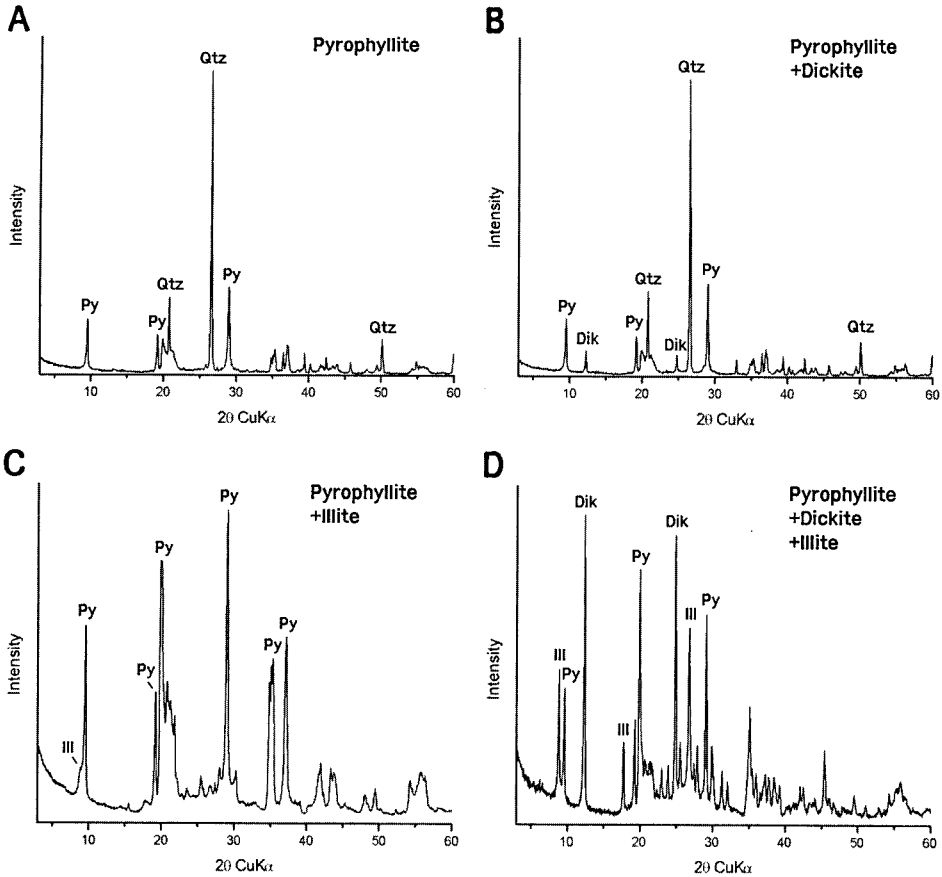


Fig. 8. XRD patterns showing the mineral composition of some domestic pyrophyllite ores: Py. pyrophyllite, Qtz. quartz, Dik. dickite, Ill. illite.

국내산 납석의 응용광물학적 특성 평가

국내에서 납석은 대부분 중생대 화산암류의 열수변질 작용의 산물이라는 점에서도 공통적인 성인 및 산출양상을 보인다. 지역적으로는 대개 3개 지구(전남 화순-해남, 경남 밀양-부산 및 강원 태백 지역)별로 그 산출상태와 부존상황이 구분될 수 있고, 대체로 그 광물상 및 광석 유형도 여기에 규제되는 경향을 보인다. 그렇지만 원암의 조건과 변질 양상에 따라 같은 지구, 특히 전남 지역에서는 서로 사뭇 다른 광석 유형들이 함께 산출되기도 한다. 산업광물은행에 수장

중인 총 63개의 납석 시료들을 우선 X-선회절 분석하여 그 광물상과 광물조성을 검토하였다. 이를 토대로 납석의 대표적인 광석 유형을 구분하고, 23개의 대표적인 시료들을 편광현미경 및 주사전자현미경 관찰, 화학분석, 그리고 X-선회절 정량분석을 시행하였다.

분석 결과, 광업등록법상 납석으로 분류되어 개발되고 있는 국내산 납석의 상당수(대략 40% 정도)가 엄밀한 의미에서는 사실상 납석이 아닌 고령토나 건운모 광석인 것으로 밝혀졌다. 학술적으로나 국제 산업광물 분류체계상 특징적인 납석광물인 엽납석을 함유하지 않는 광석들은

납석으로 간주될 수 없을 것임에도 불구하고, 국내에서는 위생도기나 타일의 원료로 사용될 수 있으면 편의상 납석으로 취급하고 있는 실정이다. 즉, 고령토나 견운모 광석으로 분류되어야 할 광체들이 납석으로 등록되어 개발되는 곳이 많다는 것이다.

이는 납석에 대한 법정광물로서의 인허가 요건과 광석평가 기준이 주로 화학조성에 의거한 용도 적합성에만 국한되어 있기 때문인 것으로 여겨진다. 또한 유사한 요업용 광석인 고령토 및 견운모와의 법정 분류체계 및 구분기준령이 다소 모호하게 설정되어 있고 그나마 이에 대한 검증이 제대로 이루어지고 있지 못하기 때문에 야기되는 오류로 판단된다. 이외에도 명반석(alunite)이나 수활석(diaspore)에 해당되는 광석들도 일부 납석으로 등록되어 개발되는 곳도 있는 상황이다.

엽납석을 함유하는 정상적인 형태의 납석들은 그 수반 점토광물상에 의거하여 (1) 엽납석질,

(2) 디카이트질, (3) 일라이트질 및 (4) 디카이트-일라이트질 유형으로 구분될 수 있다(Fig. 8, Table 6). 고령토 광물로는 대부분 디카이트(dickite)가 수반되고 외국에서는 흔히 수반되는 것으로 알려져 있는 고령석(kaolinite)은 거의 함유되지 않는 것이 특징이다. 석영은 납석에서 점토광물 못지않게 그 용도를 가름하는 주요 성분으로서 대부분의 광석 유형에서 수반되지만, 특히 일라이트질 납석에서 흔히 그리고 보다 많이 수반되는 양상을 보인다. 화학조성상으로는 SiO₂의 함량이 유난히 높게 분석되는 광석에서 석영이 많이 검출된다(Table 6). 대개 옥수질 석영(chalcedonic quartz)으로 함유되고, 특히 태백 지역의 납석 광석들에서 특징적인 광물상을 이룬다.

착색을 유발하는 주요 불순물인 함철광물들은 주로 황철석의 형태로 수반되지만, 경우에 따라서는 철의 산화물이나 수산화물의 형태로 수반되기도 한다(Fig. 9).

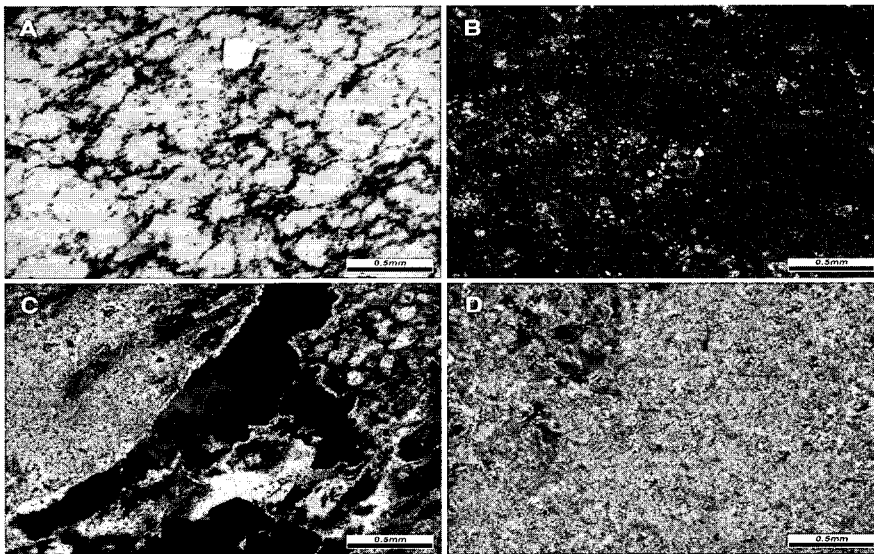


Fig. 9. Polarizing micrographs showing the characteristic impurities included in some domestic pyrophyllite ores: A. Goethite precipitates and residual quartz phenocrysts (Ockmaesan Mine), B. Residual feldspathoid crystals (Sungsan Mine), C. Dumortierite crystals (Milryang Mine), D. Alunite crystals (Sungsan Mine)

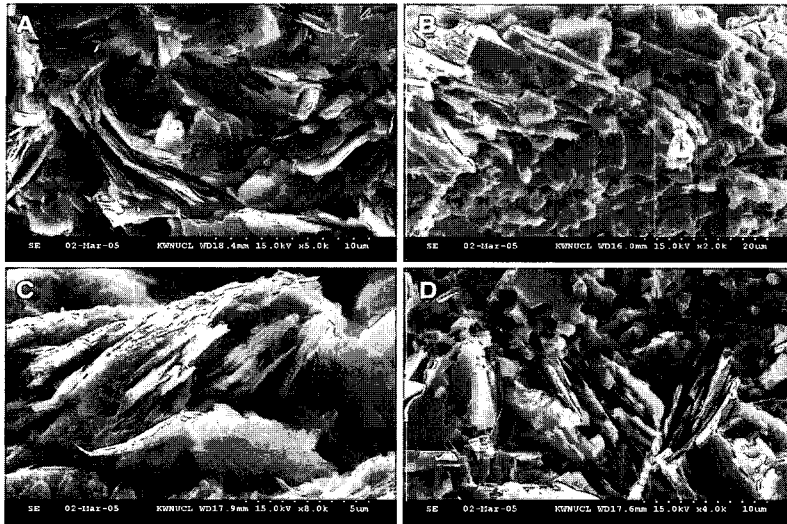


Fig. 10. SEM micrographs showing the pyrophyllite and associated alteration minerals: A. Lamellar-type aggregates of pyrophyllite (Nohwa Mine), B. An interlocking association of pyrophyllite and dickite crystals (Dockjum Mine), C. An interlocking association of pyrophyllite and illite crystals (Cheonun Mine), D. An association of pyrophyllite and chalcedonic quartz (Maejeon Mine).

Table 6. Chemical analyses for some domestic pyrophyllite ores determined by XRF method.

Ore Type	Sample No	Chemical composition											
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total
Pyrophyllite	Py-17	67.16	23.12	0.64	0.64	0.00	0.00	0.46	0.60	0.03	0.11	4.63	97.39
	Py-58	58.18	26.82	0.66	3.29	0.00	0.00	0.48	0.16	0.09	0.22	6.70	96.61
	Py-18	60.31	28.75	0.70	0.45	0.00	0.00	0.49	1.29	0.11	0.21	5.65	97.95
	Py-31	65.67	24.28	0.36	0.43	0.00	0.00	0.54	1.00	0.04	0.27	5.08	97.68
Pyrophyllite + Dickite	Py-22	49.18	31.04	0.27	3.37	0.00	0.00	0.43	0.03	0.02	0.20	10.53	95.06
	Py-28	56.50	27.96	0.81	2.31	0.00	0.00	0.46	0.61	0.03	0.23	6.37	95.26
	Py-34	52.58	30.47	1.39	2.06	0.00	0.00	0.44	1.80	0.12	0.28	7.36	96.50
	Py-43	72.59	16.53	0.36	3.22	0.00	0.00	0.43	0.28	0.02	0.09	5.59	99.12
Pyrophyllite + Illite	Py-61	45.06	23.33	0.35	3.06	0.00	0.00	0.38	0.57	1.44	0.13	21.46	95.78
Pyrophyllite + Dickite + Illite	Py-3	41.87	32.67	0.67	1.31	0.01	0.04	0.44	0.81	2.41	0.16	14.13	94.50
Illite	Py-1	43.14	35.83	0.25	0.45	0.00	0.07	0.60	1.57	8.98	0.10	6.39	97.38
	Py-26	46.46	33.19	0.74	1.43	0.00	0.06	0.64	1.20	7.31	0.12	4.74	95.90
	Py-36	77.04	12.90	0.07	0.93	0.00	0.00	0.51	0.48	3.26	0.08	2.54	97.83
	Py-21	82.26	11.37	0.13	0.69	0.00	0.00	0.47	0.04	2.81	0.09	1.48	99.70
	Py-25	81.52	12.11	0.17	1.96	0.00	0.00	0.45	0.42	0.47	0.08	3.06	100.26
Dickite	Py-20	37.63	35.30	0.59	4.92	0.01	0.00	0.39	0.18	0.02	0.09	17.28	96.40
	Py-19	49.65	31.66	0.15	0.37	0.00	0.00	0.43	0.35	0.04	0.16	12.13	94.95
	Py-49	47.97	31.09	0.19	2.13	0.00	0.00	0.43	0.70	0.06	0.19	12.23	94.99
	Py-10	68.97	19.62	0.07	0.59	0.00	0.00	0.44	0.24	0.04	0.13	7.55	97.64
Miscellaneous	Py-60	73.83	16.13	0.07	0.83	0.00	0.00	0.44	0.00	0.97	0.09	5.74	98.10
	Py-38	82.60	10.46	0.05	1.33	0.00	0.00	0.50	0.62	0.67	0.08	3.94	100.26
	Py-12	2.43	35.30	0.11	0.24	0.00	0.00	0.28	1.41	9.82	0.12	39.88	89.58
	Py-2	34.21	39.40	2.15	2.51	0.01	0.05	0.42	0.96	0.54	0.19	14.08	94.52

함철광물의 함량은 X-선회절 정량분석 이외에도 화학분석식에서도 간접적으로 인지된다. 국내산 납석들은 전반적으로 1% 이상의 철분을 함유하는 것으로 분석되는 관계로, 백색 도기(whiteware ceramics) 제조용으로는 적절한 정제 공정을 거치지 않는 한 품질 면에서 불리한 위치에 있는 것으로 판단된다.

엽납석의 결정형과 결정도 면에서는 대부분 극미립질 엽상집합체를 이루기 때문에 내화물 제조 용도보다는 도기 및 타일 제조용이나 충전재 용도로 적합한 양상을 보인다(Fig. 10).

광석 유형별로는 엽납석질 납석은 대체로 타일이나 충전재 용도로 적합한 것으로 평가된다. Al₂O₃ 함량이 높은 디카이트질 납석들은 내화물 제조에 적당한 품위 및 품질을 보이는 것으로 사료된다. 그렇지만 이 중에서 석영을 많이 함유하고 철분이 적은 일부 광석들은 도기류나 타일용으로도 사용될 수 있을 것으로 여겨진다. 이에 비해서 일라이트가 함유되는 광석 유형들은 높은 K 함유 수준과 석영 함량 등으로 인해서 내화물 제조용보다는 백색 도기류 제조용이나 유리섬유 제조용 등으로 개발되는 것이 합당할 것으로 평가된다.

품위 및 품질 평가 방안

납석의 품위 및 품질 면에서 가장 기본적인 평가방식은 (1) 현미경 관찰(편광 및 주사전자 현미경), (2) X-선회절 분석 및 (3) 화학분석인 것으로 여겨진다. 특히 엽납석 외의 점토광물상의 파악과 석영의 함유 정도를 면밀히 조사하는 것이 개발 단계는 물론 가공 과정에서도 그 품위와 품질을 평가하는데 중요하다.

납석의 점토광물 조성을 석영의 함량을 효과적으로 감정하고 정량할 수 있는 방법은 X-선회절 분석법이 유일한 수단이다. 리트벨트법을 응

용한 X-선회절 정량분석법은 납석의 품위를 산정하는데 유력한 수단이 될 수 있을 것으로 여겨진다.

화학분석에 의한 납석의 평가 방식은 특히 납석의 백색 도기류와 같은 각종 세라믹스 제조용도에서의 품질 평가에 결정적인 단서를 제공하는 유력한 평가수단이다. 특히 착색유발 성분인 철분의 존재와 그 함량을 정하고 요업용도에서 중요한 Al₂O₃와 알칼리 성분 함량을 검증하는데 필수적인 평가방법이다.

이외에 주사전자현미경 관찰도 납석의 품질 평가에 유용한 수단이 된다. 주사전자현미경 관찰을 통해서 극미립상 엽납석의 결정형, 조직 및 미시적 산출상태를 면밀히 관찰함으로써, 납석 광석의 품질을 보다 정밀하게 평가할 수 있는 방안을 제공한다.

특히 간이 화학분석 장치(EDS)가 장착된 주사전자현미경을 사용하면 극미량 함유되는 불순광물 성분들을 효율적으로 감정할 수 있어서 편리할 것으로 여겨진다.

결 언

국내 납석 광상은 대부분 백악기에 형성된 열수변질형 광상으로서, 지질여건상 전남지역과 경상남도 지역에 밀집되어 분포한다. 부존량과 생산량을 기준 한다면 약 50년간 활용 가능한 납석이 부존되어 있다고 하지만, 3-4개 광산을 제외하고는 대부분 저품위 광상을 이루고 앞으로 지속적으로 개발이 이루어질 수 있다고 보기 어려운 상황이다. 이러한 점에서 본다면 국내 납석 광상의 자원 잠재성은 그 동안 알려진 것처럼 그렇게 높지 않은 것으로 평가된다. 특히 고품위 납석 자원의 고갈은 심각한 상황이며, 앞으로 이를 극복하기 위한 새로운 광체의 탐광이 시급히 요구된다.

국내산 납석 자원의 효율적 관리와 부가가치 향상을 위해서 우선 개선되어야 할 사항은 관련 법규의 정비와 관련 업계 및 행정기관의 전문성 제고라고 여겨진다. 현행 광업법상의 납석을 비롯한 관련 광종들(고령토 및 운모)의 광물분류 체계가 모호하게 설정되어 있고, 관련 인허가 부서에서의 전문성 및 지도력 부족으로 관련 산업계에 심각한 비효율성과 오류가 야기되고 있는 실정이다. 현재 국내에서 납석으로 출원되어 개발되고 있는 납석들의 상당수가 학술적으로는 납석으로 간주될 수 없는 광석들이었다는 사실이 위와 같은 판단을 뒷받침한다. 이는 광석을 기본적으로 유용광물의 함유도와 존재상태에 대한 이해를 바탕으로 다루지 않고 단순히 화학성분의 농도 개념으로만 파악하려는 기존의 안이한 광석 평가 방식에 기인하는 것으로 여겨진다.

세계적으로 주목받고 있는 국내에서의 납석 자원의 잠재성과 시장규모를 고려한다면, 앞으로 우리나라는 납석의 연구개발에 관련한 선도적 역할을 해야 할 것으로 여겨진다. 이를 위해서 한 시바빠 개선되고 보완되어야 할 사항은 납석의 광석평가 방식이 그 품위와 품질 개념 하에서 응용광물학적으로 적용되어야 한다는 것이다.

사 사

이 연구에서는 과학기술부 주관의 국가지정 연구소재은행인 '산업광물은행'에 수장되어 있는 납석 표본들이 이용되었음을 밝히고자 한다. 이 연구에 필요한 화학분석(XRF 및 ICPS)을 대행해준 윤혜은 박사를 비롯한 기초과학지원연구소의 연구원들과 논문 작성과정에서 자료정리를 도와준 강원대학교 광물연구실 학생들에게 사의를 표하고자 한다.

참고 문헌

- 고상모, 김문영, 김대업, 김용욱, 김수영, 이한영, 高木哲一, 内藤一樹, 須藤定久, 이현구 (2000) 한국과 일본의 비금속광물자원에 대한 조사연구. 과학기술부, KR-00(T)-19, 158p.
- 고상모, 송민섭 (2000) 국내 일라이트-운모의 부존현황 및 자원잠재성. 제4회 산업광물 심포지움 논문집, "일라이트-운모와 그 응용 중에서", 산업광물은행과 한국과학재단. 18-30.
- Chang, L.L.Y., 2002, *Industrial Mineralogy: Materials, Processes, and Uses*. Prentice Hall, 472 p.
- Harben, P.W. and Kuzvart, M., 1996, *Industrial Minerals: A Global Geology*. Industrial Minerals Information LTD., 462 p.
- Industrial Minerals, 2001, *Refractory Minerals: Trends & developments in supply & demand*, No 410, 90 p.
- Koh, S.M. and Chang H.W. (1997) Geological and geochemical characteristics of the Bukok hydrothermal clay deposits in the Haenam area, Korea. *Resource Geology*, 47, 29-40.
- Koh, S.M., Takagi, T., Kim, M.Y., Naito, K., Hong, S.S. and Sudo, S. (2000) Geological and geochemical characteristics of the hydrothermal clay alteration in South Korea. *Resource Geology*, 50, 229-242.
- Naito K., Kim, M. Y., Takagi T., Koh, S. M., Hida T. and Sudo S. (1999) *Geology and alteration zoning of the Nohwado*

pyrophyllite deposit, Southwest Korea (On the No. 1 deposit of the Nohwado mine). Resource Geology, 49, 165-173.

Takagi T., Koh, S. M., Kim, M. Y., Naito K. and Sudo S. (2000) Geology and hydrothermal alteration of the Milyang pyrophyllite deposit, Southeast Korea. Resource Geology, 50, 243-256.

Taylor, J.C. (1991) Computer programs for standardless quantitative analysis of minerals using the full powder diffraction profile. Powder Diffraction, 6, 2-9.

Taylor, J.C. and Matulis, C.E. (1994) A new

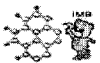
method for Rietveld clay analysis. Part 1. Use of a universal measured standard profile for Rietveld quantification of montmorillonite. Powder Diffraction, 9, 119-123.

Taylor, J.C. and Hinczak, I. (2001) Rietveld Made Easy: A practical guide to the understanding of the method and successful phase quantification. J.C. Taylor and I. Hinczak, 201 p.

Won, C. K. (1987) Igneous activity. In Geology of Korea (D. S. Lee ed.), 287-344, Kyohak-sa, Seoul, Korea.

산업광물은행 2005년도 홈페이지

<http://www.kimb.or.kr>



산업광물은행
Industrial Mineral Bank

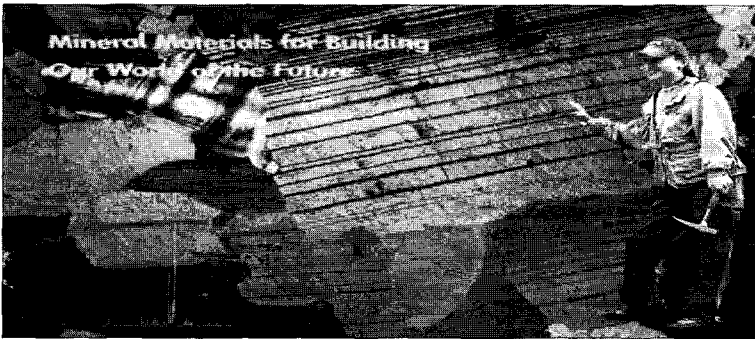
국가 지정
소재은행

MOST 과학기술부 지정

강원대학교 부설

산업광물은행은 광물소재에 관한 산·학·연 연구개발을 도모하기 위해 과학기술부의 지원으로 설립되었습니다.

산업광물이란 | 소재은행소개 | 소재별안감청 | 자료실 | 연구개발광장 | 광물과산업지 | 후원기관 | 관련정보망 | 방명록



LOGIN

아이디

비밀번호

로그인

회원가입



청정기능성광물공학협의회

「광물과산업」지



IMB NEWS

- 05/07/22 산업광물 소재 2종 추가 new
- 05/07/19 홈페이지 서비스 일시 오류 new
- 05/06/24 KORES. <전문가 칼럼> 수록
- 05/06/15 일본국립과학박물관 제공 소재
- 05/06/09 일본산 광물 4종 확보
- 05/06/07 IMB, 전문연구인력 모집 공고
- 05/05/31 [자료실], 납석 발표논문 추가

Meetings & Upcoming Events

- 05/07/06 총주 및 사목 일대 현지조사
- 05/06/22 정선 일대 지질조사 예정
- 05/06/10 IMB, 일본 방문 사진자료
- 05/05/19 '05 한국광물학회 학술발표회
- 05/05/17 일본 관련연구수 방문 예정
- 05/05/17 정기협 제2회 정기세미나 참석

국내외 학술행사 안내

Industrial Mineral Repository

Mineralogical Resources & Documents

이 포터는 산업광물은행에서 보유하고 있는 소규모 자료실의 위치를 소개하고, 소규모 자료실에 대한 사항을 안내해 드리는 곳입니다. 산업광물에 대한 관심 및 광물 교역과 산업광물 활용에 대한 관심 수 있으며, 광물 연구 및 광장에 대한 도움도 드리고 있습니다.

산업광물해설 | 광합권러러 | 참고·압하기

자료 검색

영역	217720
종류	123
종류	1