The Journal of Engineering Geology
pISSN : 1226-5268 eISSN : 2287-7169

Vol. 33, No. 4, December, 2023, pp. 543-553
https://doi.org/10.9720/kseg.2023.4.543

RESEARCH ARTICLE

한국의 납석 광산 분포 현황 및 활용 방안

강성승[1*] · 나태유[2] · 노정두[3]

[1]조선대학교 에너지자원공학과 교수, [2]한국지질자원연구원 연구원,
[3]전남연구원 전라남도탄소중립지원센터 전문연구위원

Distribution of Agalmatolite Mines in South Korea and Their Utilization

Seong-Seung Kang[1*] · Taeyoo Na[2] · Jeongdu Noh[3]

[1]Professor, Department of Energy and Resources Engineering, Chosun University
[2]Researcher, Geology and Space Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
[3]Researcher, Jeollanamdo Carbon Neutral Center, Jeonnam Research Institute

Abstract

The current status of domestic a agalmatolite mines in South Korea was investigated with a view to establishing a stable supply of agalmatolite and managing its demand. Most mined agalmatolite deposits were formed through hydrothermal alteration of Mesozoic volcanic rocks. The physical characteristics of pyrophyllite, the main constituent mineral of agalmatolite, are as follows: specific gravity 2.65~2.90, hardness 1~2, density 1.60~1.80 g/cm^3, refractoriness ≥29, and color white, gray, grayish white, grayish green, yellow, or yellowish green. Among the chemical components of domestic agalmatolite, SiO_2 and Al_2O_3 contents are respectively 58.2~67.2 and 23.1~28.8 wt.% for pyrophyllite, 49.2~72.6 and 16.5~31.0 wt.% for pyrophyllite + dickite, 45.1 and 23.3 wt.% for pyrophyllite + illite, 43.1~82.3 and 11.4~35.8 wt.% for illite, and 37.6~69.0 and 19.6~35.3 wt.% for dickite. Domestic agalmatolite mines are concentrated mainly in the southwest and southeast of the Korean Peninsula, with some occurring in the northeast. Twenty-one mines currently produce agalmatolite in South Korea, with reserves in the order of Jeonnam (45.6%) > Chungbuk (30.8%) > Gyeongnam (13.0%) > Gangwon (4.8%), and Gyeongbuk (4.8%). The top 10 agalmatolite-producing mines are in the order of the Central Resources Mine (37.9%) > Wando Mine (25.6%) > Naju Ceramic Mine (13.4%) > Cheongseok-Sajiwon Mine (5.4%) > Gyeongju Mine (5.0%) > Baekam Mine (5.0%) > Minkyung-Nohwado Mine (3.3%) > Bugok Mine (2.3%) > Jinhae Pylphin Mine (2.2%) > Bohae Mine. Agalmatolite has low thermal conductivity, thermal expansion, thermal deformation, and expansion coefficients, low bulk density, high heat and corrosion resistance, and high sterilization and insecticidal efficiency. Accordingly, it is used in fields such as refractory, ceramic, cement additive, sterilization, and insecticide manufacturing and in filling materials. Its scope of use is expanding to high-tech industries, such as water treatment ceramic membranes, diesel exhaust gas-reduction ceramic filters, glass fibers, and LCD panels.

Keywords: industrial raw material, agalmatolite (pyrophyllite), mine, reserves, ceramic membrane

초 록

본 연구는 국내 산업원료 광물인 납석의 지속적이고 체계적인 개발과 안정적인 수급 관리를 위할 목적으로 국내 납석 광산 현황을 살펴보고 산업용 원료로써 그 활용 방안을 모색하기 위함이다. 국내 납석 광산

OPEN ACCESS

***Corresponding author:** Seong-Seung Kang
E-mail: kangss@chosun.ac.kr

Received: 22 November, 2023
Revised: 5 December, 2023
Accepted: 6 December, 2023

Ⓒ 2023 The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

은 대부분 중생대 화산암류가 열수변질을 받아 형성된 광상으로써, 납석의 주 구성 광물인 엽납석의 물리적 특성은 비중 2.65~2.90, 굳기 1~2, 밀도 1.60~1.80, 내화도 29 이상이며, 색은 보통 백색, 회색, 회백색, 회녹색, 황색, 황녹색을 띠는 것으로 나타났다. 국내 납석의 화학성분 중 SiO_2와 Al_2O_3는 엽납석의 경우 58.2~67.2%와 23.1~28.8%, 엽납석 + 딕카이트의 경우 49.2~72.6%와 16.5~31.0%, 엽납석 + 일라이트의 경우 45.1%와 23.3%, 일라이트의 경우 43.1~82.3%와 11.4~35.8%, 딕카이트의 경우 37.6~69.0%와 19.6~35.3%인 것으로 분석되었다. 국내 납석 광산의 분포는 한반도 남서부와 남동부 지역에 집중해서 분포하며, 그 외에 한반도 동북부 지역에도 일부 분포하는 것으로 조사되었다. 국내 납석 생산 광산은 21개이며, 매장량은 전남(45.6%) > 충북(30.8%) > 경남(13.0%) > 강원(4.8%), 경북(4.8%) 순으로 전남이 가장 많은 것으로 나타났다. 국내 납석 생산량 상의 10개 광산은 중앙자원광산(37.9%) > 완도광산(25.6%) > 나주세라믹광산(13.4%) > 청석-사지원광산(5.4%) > 경주광산(5.0%) > 백암광산(5.0%) > 민경-노화도광산(3.3%) > 부곡광산(2.3%) > 진해납석광산(2.2%) > 보해광산 순인 것으로 분석되었다. 납석은 열전전도, 열팽창성, 열변형, 팽창계수, 부피밀도가 낮고, 내열성과 부식 저항성이 높으며, 살균 및 살충 효능이 우수한 성질이 있으므로 내화 재료, 도자기 재료, 시멘트 첨가제, 살균및 살충 제조재, 충전재 등 다양한 분야에 활용되는 것으로 나타났다. 또한 납석은 수처리 세라믹 분리막 소재, 디젤엔지 배기가스 저감장치 세라믹 필터 소재, 그리고 유리섬유 및 LCD 패널 소재 등 활용범위가 첨단산업분야로까지 확대되는 것으로 분석되었다.

주요어: 산업원료광물, 납석(엽납석), 광산, 매장량, 세라믹 분리막

서 론

엽납석을 주된 광물 성분으로 하는 납석은 일반적으로 칼크 – 알칼리 계열의 산성 – 중성의 화산암류가 열수변질작용을 받아 형성된다. 납석(agalmatolite)은 한 가지만의 순수한 광물로 산출되는 경우가 거의 없으며, 대부분 두 가지 이상의 광물이 함께 산출된다. 따라서 납석을 구성하고 있는 광물은 국가마다 다르게 산출된다. 예를 들면, 남아프리카의 원더스톤(wonderstone)이라 불리는 납석은 90% 이상의 엽납석(pyrophyllite)과 경녹니석(chloritoid), 금홍석(rutile), 녹렴석(epidote) 등의 광물 수반, 일본의 로제키(Roseki) 납석은 60%을 차지하는 엽납석과 견운모(sericite), 고령석(kaolinite) 등의 광물 수반, 그리고 브라질과 중국의 납석은 엽납석, 백운모(muscovite), 다이아스포(diaspore), 남정석(kyanite), 석영 등의 광물로 구성된 것으로 알려졌다(KOMIS, 2018). 납석은 엽납석($Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$)이 주된 광물 성분이지만, 카올리나이트($Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$)와 딕카이트(dickite, $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$)와 같은 고령토질 납석이나 일라이트(illite, $KAl_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$)와 같은 견운모질 납석도 납석으로 취급되어 개발되고 있다(No and Koh, 2005). 이러한 광물로 구성된 납석은 내마모성, 내열성, 흡착성, 평활도 등의 광물 특성이 있으므로 내화재, 충전재, 유리섬유, 수처리재 등 다양한 산업용 제품으로 개발되어 사용되고 있다(Jeong, 2016). 특히 수처리재로서 납석은 세라믹 분리막의 핵심 원료로 활용가치가 높다(Keren and Sparks, 1994; Elzinga and Sparks, 1999; Prasad et al., 2008; Sheng et al., 2009; Jeong, 2016). Keren and Sparks(1994)는 엽납석에서 오염물질인 보론(Boron) 제거 시 이온강도와 pH의 영향을 살펴봤는데, 이온강도와 pH가 증가할수록 제거 효율이 증가하는 것으로 나타났다. Elzinga and Sparks(1999)는 엽납석 혼합물에서 니켈 제거 시 침전에 의한 효과와 흡착에 의한 효과를 함께 고려해야 하는 것으로 나타났다. Prasad et al.(2008)은 온도에 따른 이가 독성 금속인 납, 구리, 아연의 제거를 살펴본 결과 엽납석의 흡착반응은 흡열반응에 의한 것으로 나타났다. Sheng et al.(2009)은 엽납석이 산성 활성화를 통해 methtylene blue의 흡착 성능을 향상 시킴을 보였다. Jeong(2016)은 생물반응조(Membrane Bioreactior, MBR)에 납석 세마릭 분리막을 적용하여 하수처리 능력을 평가한 결과 적용 시간에 따라 슬러지의 물리화학적 특성이 변화한 것으로 나타났다.

미국지질조사국(United States Geological Society, USGS)에서 발간한 2015년 광물 연감의 세계 납석 생산량 자료에 따르면, 세계 최대 납석 생산국은 한국이며, 두 번째가 일본으로 이들 두 나라의 납석 생산량이 세계 총생산량의 약 70%를

차지하는 것으로 나타났다(USGS, 2015). Table 1은 전세계 대표적인 납석 생산국과 생산량 정리한 것이며 Fig. 1은 그것을 그래프로 나타낸 것이다(KOMIS, 2018). 또한 2021년 KIGAM에서 발표한 2011~2020년까지 국내 납석의 생산량과 판매량(해외수출 포함)을 살펴보면 Fig. 2와 같다(KIGAM, 2021). 국내 납석은 주로 한반도 남서부와 남동부 지역에 집중해서 분포하며, 그 밖에 한반도 동북부에도 일부 분포하는 것으로 보고되었다(Cho, 2000; No and Koh, 2005; Yoo et al., 2009; KOMIS, 2018). 국내에서 납석을 생산하고 있는 광산은 2017년 기준 21개로 과거보다 약 84% 감소한 것으로 보고되었다(No and Koh, 2005; KOMIS, 2018). 국내 납석 생산량도 2018년 약 346천 톤을 생산한 이래 매년 꾸준히 감소하는 추세에 있는 것으로 나타났다(KIGAM, 2021). 납석 광산 수의 감소는 납석 생산량과 밀접한 관계가 있으므로 국내 납석 자급률이 100%이면서 생산량의 30%가 국외로 수출되는 중요한 광물이라는 측면에서 볼 때, 국내 납석의 지속적이고 체계적인 개발과 관리 방안이 요구된다.

결과적으로 납석은 국내에서 안정적으로 원자재 공급이 가능한 점, 세라믹 필터 촉매용, 자동차용 핵심 SCR부품, 유리섬유 제품 등 다양한 분야로의 활용이 가능한 점, 그리고 청정에너지, 대기환경 및 물 환경보호 등 지구환경보전 측면에서 효과가 높은 점 등의 특성을 갖기 때문에 미래의 산업용으로써 활용가치가 더욱 높아질 것으로 기대된다. 따라서 본 연구에서는 국내 납석의 생산량을 증가시키고 지속적인 납석 개발을 위하여, 현재 납석을 생산하고 있는 국내의 납석광산 현황을 면밀하게 살펴보고, 납석의 산업용 원료로써 활용 방안도 함께 모색하고자 한다.

Table 1. Pyrophyllite production in six countries (USGS, 2015)

Country	Production (tonne)				
	2011	2012	2013	2014	2015
Korea	510,708	483,133	524,881	662,865	600,000
Japan	350,000	340,000	340,000	340,000	340,000
India	251,939	248,022	217,690	207,454	147,431
Pakistan	69,176	75,891	88,989	80,289	113,509
Peru	30,389	30,399	31,678	17,859	26,209
South Africa	121,368	18,734	17,336	22,500	16,801
Total	1,410,000	1,250,000	1,270,000	1,370,000	1,280,000

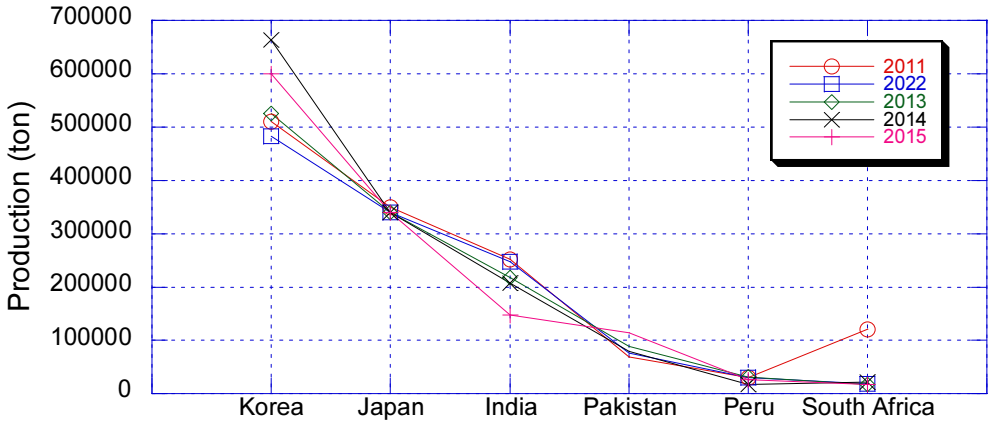

Fig. 1. Pyrophyllite production in six countries (KOMIS, 2018).

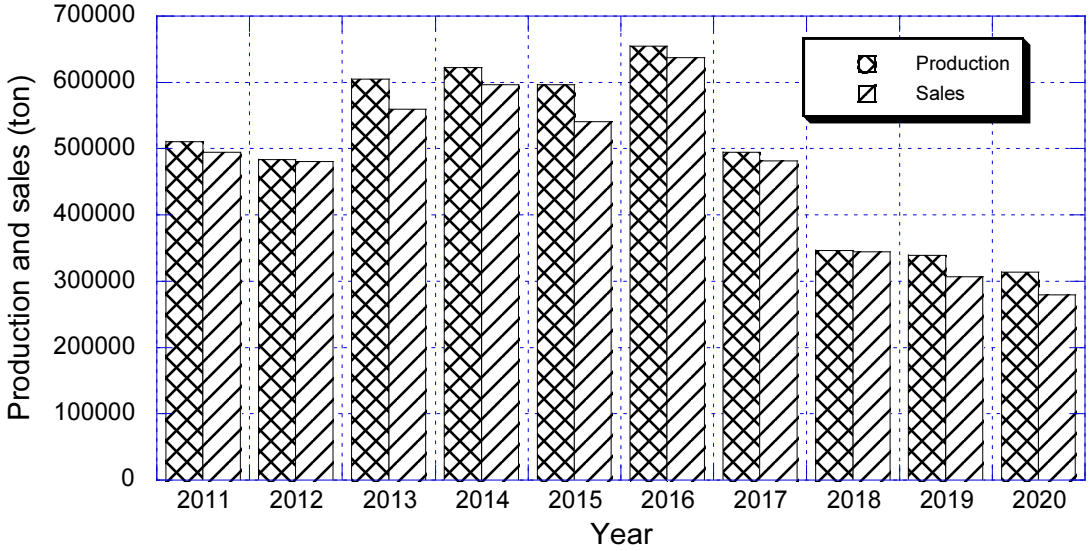

Fig. 2. Production and sales volumes of pyrophyllite in South Korea, 2011~2020 (KIGAM, 2021).

납석의 특성

납석의 주 구성 광물인 엽납석은 층상구조형의 필로규산염(pyrophyllosicates) 광물로써 광물 결정축의 상대적 길이와 축각에 의하여 구분하는 6정계 중 단사정계(monoclinic system) 또는 삼사정계(triclinic system)에 해당한다. 단사정계는 3개의 결정축 a, b, c의 길이가 서로 다르고($a \neq b \neq c$) 3개의 축각 중 β각이 직각이 아닌 결정($\alpha = \gamma = 90^\circ$, $\beta \neq 90^\circ$)을 포함하며, 삼사정계는 결정축은 단사정계와 동일한 반면, 3개의 축각 모두가 직각이 아닌 결정($\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$)들을 포함한다. 엽납석은 층간 결합력이 약해 경도가 매우 낮고, 가장 일반적인 결정형은 2층 단사구조지만 1층 삼사구조도 나타난다(Klein and Hurlbut, 1985; Deer et al., 1992). Fig. 3은 단사정계 및 삼사정계의 결정축의 상대적 길이와 축각에 대한 모식도와 엽납석의 구조 모식도를 보여준다. 엽납석은 입상이나 치밀질 괴상을 이루며 쪼개짐과 요곡성이 있다. 엽납석의 비중(specific gravity)은 2.65~2.90, 굳기(hardness)는 1~2, 색은 백색, 회색, 회백색, 회녹색, 황색, 황녹색, 광택은

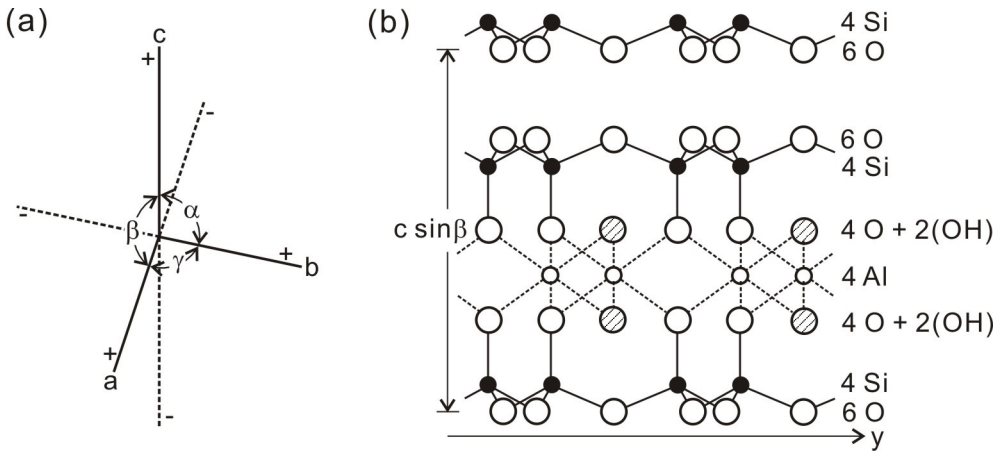

Fig. 3. Illustration of crystal axes in (a) the monoclinic and triclinic system and (b) structure of pyrophyllite (Klein and Hurlbut, 1985; Deer et al., 1992).

은백색의 진주광택을 띤다(Deer et al., 1992). 일반적인 엽납석의 광물학적 특성을 정리하면 Table 2와 같다. 국내 업체에서 생산하는 내화물용 및 위생도기용 납석의 물리적 및 열적 특성인 밀도(volume density)는 1.60~1.80 범위이며 내화도(refractoriness)는 29 이상인 것으로 나타났다(Koh, 2007). No and Koh(2005)에 의해 몇몇 국내 납석 광산에서 채취한 납석 시료를 X-선 형광분석기(XRF) 방법으로 분석한 결과에 따르면, 엽납석의 경우 SiO_2는 58.2~67.2%, Al_2O_3는 23.1~28.8%, 엽납석 + 딕카이트가 혼합된 경우 SiO_2는 49.2~72.6%, Al_2O_3는 16.5~31.0%, 엽납석 + 일라이트가 혼합된 경우 SiO_2는 45.1%, Al_2O_3는 23.3%, 일라이트의 경우 SiO_2는 43.1~82.3%, Al_2O_3는 11.4~35.8%, 딕카이트의 경우 SiO_2는 37.6~69.0%, Al_2O_3는 19.6~35.3%의 범위를 가지는 것으로 나타났다(Table 3).

Table 2. Mineralogical characteristics of pyrophyllite (Deer et al., 1992)

Mineral	Chemical composition	Color and luster	Specific gravity	Hardness	Crystal system
Pyrophyllite	28.3 wt.% Al_2O_3 66.7 wt.% SiO_2 5.0 wt.% H_2O	White, gray, grayish white or green, brown, brownish green, pearly luster	2.65~2.90	1~2	Monoclinic, triclinic, radiated lamellar

Table 3. Compositions of domestic agalmatolite ores, as determined by X-ray fluorescence (No and Koh, 2005)

Ore type	Chemical composition (wt.%)									
	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5
Pyrophyllite	58.2~67.2	23.1~28.8	0.4~0.7	0.4~3.3	0.0	0.0	0.5	0.2~1.3	0.0~0.1	0.1~0.3
Pyrophyllite + Dickite	49.2~72.6	16.5~31.0	0.3~1.4	2.1~3.4	0.0	0.0	0.4	0.0~1.8	0.0~0.1	0.1~0.3
Pyrophyllite + Illite	45.1	23.3	0.4	3.1	0.0	0.0	0.4	0.6	1.4	0.1
Illite	43.1~82.3	11.4~35.8	0.1~0.7	0.1~2.0	0.0	0.0	0.5~0.6	0.0~1.6	0.5~9.0	0.1
Dickite	37.6~69.0	19.6~35.3	0.1~0.6	0.4~4.9	0.0	0.0	0.4	0.2~0.7	0.0~0.1	0.1~0.2

국내 납석 분포 및 생산 현황

국내 납석의 분포 현황을 살펴보면, 주로 한반도 남서부의 전남 해남, 진도, 완도와 남동부의 경남 밀양, 김해, 동래, 양산 지역에 집중 분포하며, 그 밖에 한반도 동북부의 충북 단양에도 일부 분포하는 것으로 나타났다(Cho, 2000; No and Koh, 2005; Yoo et al., 2009). 대부분 이들 지역에 분포하는 국내 납석 광상의 특징은 백악기 또는 제3기의 화산암 기원의 열수변질형 광상, 고생대 부정합형의 열수변질형 광상 및 변성 광상으로 구분되며, 백악기의 열수변질형 광상이 가장 우세한 것으로 나타났다(No and Koh, 2005). 납석 광산의 위치는 Fig. 4에서 보여주며, 이를 정리하면 Table 4와 같다. 국내에서 납석을 생산하고 있는 광산은 과거 114개(No and Koh, 2005)에서 2017년 기준 국내 납석 생산 광산은 21개(KOMIS, 2018)로 93개가 줄어 약 84%가 감소한 것으로 나타났다. 2018년 한국자원정보서비스(Korea Mineral Resource Information Service, KOMIS)에서 발표한 지역에 따른 국내 납석 매장량을 정리하여 그래프로 나타내면 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 국내 납석 광산은 주로 전남과 경남에 분포하지만, 매장량은 전남이 전체의 45.6%로 가장 많고, 다음으로 충북 30.8%, 경남 13.0%, 강원과 경북이 각각 4.8%를 차지하는 것으로 나타났다.

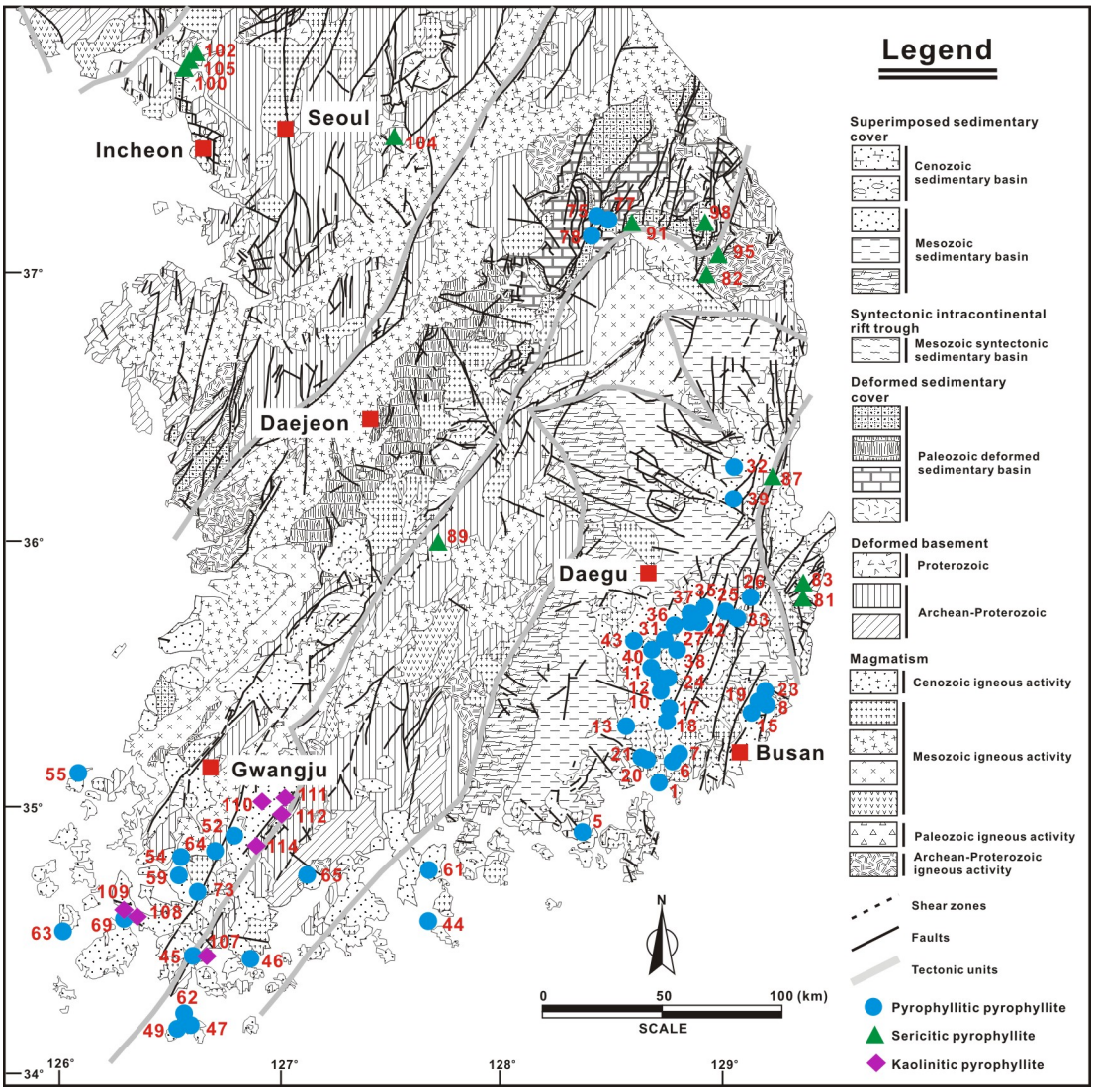

Fig. 4. Geology and distribution of agalmatolite deposits in South Korea (modified after No and Koh, 2005).

Table 4. Agalmatolite deposits in South Korea (No and Koh, 2005)

Pyrophyllite type								
No	Mine name	Region	No	Mine name	Region	No	Mine name	Region
1	Gadeok	Busan	28	Naenam	Gyeongbuk	55	Mokpo-Jido	Jeonnam
2	Noksan	Busan	29	Daerim-Bongwha	Gyeongbuk	56	Bongwhang	Jeonnam
3	Noksan 1st mine	Busan	30	Daepung	Gyeongbuk	57	Sudo	Jeonnam
4	Gangnam-Gimhae	Gyeongnam	31	Donggok	Gyeongbuk	58	Sinan	Jeonnam
5	Gwangdo	Gyeongnam	32	Bunam	Gyeongbuk	59	Sinok	Jeonnam
6	Gimhae	Gyeongnam	33	Bulguksa	Gyeongbuk	60	Yaksan	Jeonnam
7	Gimhae Deockbong	Gyeongnam	34	Sabang	Gyeongbuk	61	Yeosu	Jeonnam
8	Dongrae-Jeongkwan	Gyeongnam	35	Sannae	Gyeongbuk	62	Wando	Jeonnam
9	Muyeon	Gyeongnam	36	Samseong	Gyeongbuk	63	Okchul	Jeonnam

Table 4. Continued

Pyrophyllite type								
No	Mine name	Region	No	Mine name	Region	No	Mine name	Region
10	Weondong	Gyeongnam	37	Samweon	Gyeongbuk	64	Weolpyeong	Jeonnam
11	Milyang	Gyeongnam	38	Seodo	Gyeongbuk	65	Iwha	Jeonnam
12	Milyang Sungjin	Gyeongnam	39	Jukjang	Gyeongbuk	66	Ilpyeong	Jeonnam
13	Bukmyeon	Gyeongnam	40	Jungang	Gyeongbuk	67	Jangsan	Jeonnam
14	Samchang	Gyeongnam	41	Cheongsong	Gyeongbuk	68	Jukjeon	Jeonnam
15	Yongchensan	Gyeongnam	42	Taewoong	Gyeongbuk	69	Jindo	Jeonnam
16	Wuyong	Gyeongnam	43	Pungsan	Gyeongbuk	70	Chungdo	Jeonnam
17	Yurim	Gyeongnam	44	Gaedo	Jeonnam	71	Pyeongil	Jeonnam
18	Wungyong	Gyeongnam	45	Gusi	Jeonnam	72	Hansong	Jeonnam
19	Jeonggwan	Gyeongnam	46	Gukbo-Yaksan	Jeonnam	73	Haenam	Jeonnam
20	Jukgok	Gyeongnam	47	Gwangyeong	Jeonnam	74	Gukil	Chungbuk
21	Jinhae	Gyeongnam	48	Namgok	Jeonnam	75	Gwangseong	Chungbuk
22	Changwon Bukmyeon	Gyeongnam	49	Nowha	Jeonnam	76	Daeyoung	Chungbuk
23	Cheonbulsan	Gyeongnam	50	Nokjin	Jeonnam	77	Daehyeon	Chungbuk
24	Munwha Taeryong	Gyeongnam	51	Doam	Jeonnam	78	Youngchun	Chungbuk
25	Hankuk	Gyeongnam	52	Dado	Jeonnam	79	Youngchun GongYe	Chungbuk
26	Gyeongbuk	Gyeongbuk	53	Daedeok	Jeonnam			
27	Gyeongju	Gyeongbuk	54	Dogcheon	Jeonnam			
Illite type								
80	Gwangpyeong	Gyeongbuk	89	Dongchang	Chungbuk	98	Yeonwha	Gangwon
81	Daejang	Gyeongbuk	90	Taekwang ceramic	Chungbuk	99	Hoengseong	Gyeonggi
82	Daehyeon	Gyeongbuk	91	Saerona	Gangwon	100	Daemyong	Gyeonggi
83	Maxtech	Gyeongbuk	92	Youngchun	Gangwon	101	Sejong	Gyeonggi
74	Seongwhang	Gyeongbuk	93	Jungsan	Gangwon	102	Sinheung	Gyeonggi
85	Oseong	Gyeongbuk	94	Donghae	Gangwon	103	Anseong	Gyeonggi
86	Ojeon	Gyeongbuk	95	Baekbyong	Gangwon	104	Yongmun	Gyeonggi
87	Yucheon	Gyeongbuk	96	Sama	Gangwon	105	Hanheung	Gyeonggi
88	Seonwoo Youngcheon	Chungnam	97	Samjin	Gangwon	106	Hanheung ceramic	Gyeonggi
Dickite type								
107	Baekam	Jeonnam	108	Bugok	Jeonnam	109	Okmae	Jeonnam
Kaolinite type								
110	Dongbok	Jeonnam	112	Cheonun	Jeonnam	114	Songseok	Jeonnam
111	Byeokson	Jeonnam	113	Boknae	Jeonnam			

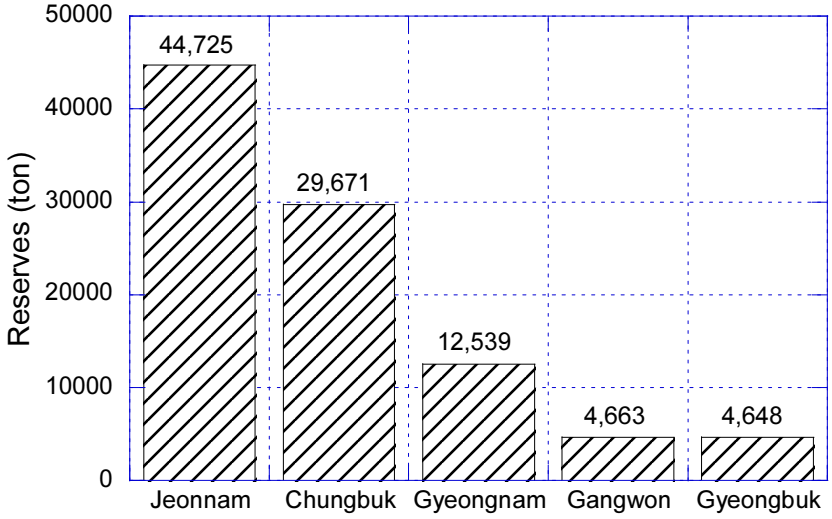

Fig. 5. Reserves of agalmatolite by region in South Korea (KOMIS, 2018).

국내 납석 생산량 상의 10개 광산과 2012~2016년까지 생산량 현황을 살펴보면 Table 5와 같다(KOMIS, 2018). Table 5에서 알 수 있듯이, 국내에서 납석을 가장 많이 생산하는 광산은 전체 생산량의 37.9%를 차지하는 충북 단양의 중앙자원광산이며, 다음으로 전남 완도의 완도광산 25.6%, 전남 나주의 나주세라믹광산 13.4%, 충북 단양의 청석-사지원광산 5.4%, 경북 경주의 경주광산 5.0%, 전남 해남의 백암광산 5.0%, 전남 완도의 민경-노화도광산 3.3%, 전남 해남의 부곡광산 2.3%, 그리고 경남 진해의 진해납석광산 2.2%으로 나타났다(납석 생산량 자료가 없는 보해광산 제외함). Fig. 6은 전남 나주의 나주세라믹광산과 전남 해남의 부곡광산에서 채취한 납석을 보여준다. 나주세라믹광산의 납석은 회백색이나 회녹색을 띠며 분말은 회색을 띠지만, 부곡광산의 납석은 백색이나 황색을 띠며 분말은 백색을 띠는 것으로 관찰되었다.

Table 5. Production of agalmatolite in operating mines (KOMIS, 2018)

Mine	Location	Production (ton)				
		2012	2013	2014	2015	2016
Jungang resource	Chungbuk Danyang	3.3	95.2	124.3	103.3	164.5
Wando	Jeonnam Wando	128.5	138.0	134.0	127.1	111.2
Naju ceramics	Jeonnam Naju	56.0	55.6	50.8	52.2	58.2
Cheongseok-Sajiweon	Chungbuk Danyang	22.9	3.0	29.5	24.7	23.6
Gyeongju	Gyeongbuk Gyeongju	23.0	22.5	21.6	24.0	21.6
Baekam	Jeonnam Haenam	22.9	20.5	20.4	20.8	21.5
Minkyeong-Nowhado	Jeonnam Wando	103.5	109.1	101.0	11.6	14.3
Bugok	Jeonnam Haenam	23.0	22.5	17.8	13.7	9.8
Jinhae pyphyllite	Gyeongnam Jinhae	6.8	12.2	15.7	3.6	9.4
Bobae	Busan Gangseo	68.0	80.1	68.2	52.7	-

Fig. 6. Aggregate and powder of agalmatolite obtained from the (a) Naju ceramic and (b) Bugok mines.

납석 활용 방안

납석은 내마모성의 물성적으로 안정된 광물로써 중성의 pH를 띠어 살균제와 살충제 효능이 우수하고, 높은 내열성과 낮은 가열 및 응축 효과도 뛰어나다. 이러한 성질을 갖는 납석은 용도에 따라 내화 재료, 도자기 재료, 시멘트 첨가제, 페인트, 아스팔트 및 고무 충전제, 살충제 제조용 분산 충전재, 플라스틱 및 제지용 충전재, 그리고 유리섬유재 등으로 이용된다(Cho, 2000; Koh, 2007). 현재 국내에서 납석을 활용한 핵심 산업분야로는 수처리 세라믹 분리막 소재, 디젤엔진 배기가스 저감장치 세라믹 필터 소재, 유리섬유 및 LCD 패널 소재 등을 들 수 있다(Jeollanamdo, 2012). 환경과 에너지에 대한 높은 관심과 기술 혁신으로 수처리 세라믹 분리막 소재로써 주목받고 있는 납석은 우수한 내열성, 내약품성, 내유기용매성 및 역학적 강도 등 다양한 조건이 요구되는 세라믹 분리막(ceramic membrane) 분야에 효과적으로 활용될 수 있을 것이다(Keren and Sparks, 1994; Prasad et al., 2008; Jeong, 2016). 특히, 세라믹 분리막을 이용한 수처리 기술은 고분자 유기막에 비해 고온, 낮은 pH 등의 악조건에도 적용이 가능하여 다양한 하수 및 폐수 처리에 적용될 수 있을 뿐만 아니라 가스 분리와 정제, 정밀화학, 제약산업 및 에너지기술 분야에도 적용될 수 있을 것이다. 또한 납석은 디젤엔진 배기가스 후처리 장치로서 NOx, HC, CO 가스 저감 장치 필터인 DOC(Diesel Oxidation Catalyst)와 디젤엔진에서 불완전 연소 후 남은 그을음 제거하는 필터인 DPF(Diesel Particulate Filter)의 세라믹 필터용으로도 폭넓게 활용될 수 있을 것이다. 유리장섬유용으로 사용되는 납석은 전기절연 재료나 유리섬유강화플라스틱(Fiberglass Reinforced Plastic, FRP)용으로 경량 고강도 구조재의 적용 분야인 자동차나 항공 산업, 건자재, 요트 및 스포츠용품 산업 등에 이용될 수 있다. 시멘트 제조 시 주원료인 석회석과 함께 부원료인 철분, 규산염, 알루미나, 석고 등이 사용되는데, 광물 조성상 알루미나, 규산염, 소량 철분으로 구성된 납석을 이용할 경우 시멘트 조성비 제어에 매우 유리하므로 향후 시멘트 부원료로 적극 활용할 수 있을 것이다. 그 외에도 납석은 납석에 수반되는 광물의 종류에 따라 그 사용 분야도 달라지는데 석영은 내구성, 남정석은 내화성, 견운모는 윤활성을 증가시키는 특성이 있다. 따라서 판상 벽개를 가진 엽상의 경우 도자기나 충진제, 작은 결정의 괴상 구과상 집합체는 내화제 등으로도 사용될 수 있다(Cho, 2000). 납석의 제품별 화학적 및 물리적 성질을 정리하면 Table 6과 같다.

Table 6. Chemical and physical properties of agalmatolite by product (KIGAM, 2010)

Use	Product	Chemical properties				Physical properties	
		SiO_2 (wt.%)	Al_2O_3 (wt.%)	Fe_2O_3 (wt.%)	CaO (wt.%)	Refractoriness (%)	Outage (%)
Refractories	Acidic refractories, bricks	59.8	32.10	0.30	0.15	33	6.66
	Neutral refractories, bricks	64.4	24.60	1.17	-	34	9.78
Ceramics	Ceramics, tiles	68.0	21.60	0.60	3<	34	4.28
Cement, etc.	Back cement additive	75.8	15.17	0.25	-	-	5.00
	Pesticide additive	60.8	15.32	1.00<	-	28	-

결 론

국내에서 생산되고 있는 산업원료 광물 중 자급도가 100% 이상이며 가장 많은 양을 수출하는 납석의 지속적이고 체계적인 개발과 안정적인 수급 관리를 위해 국내 납석 광산의 현황과 산업용 원료로써 활용 방안을 살펴보았다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

국내 납석 광산은 대부분 중생대 화산암류가 열수변질을 받아 형성된 광상이며, 수반되는 점토광물상에 의해 구분하면 딕카이트가 우세한 고령토질 납석과 일라이트가 우세한 견운모질 납석 광상인 것으로 조사되었다. 납석의 주 구성 광물인 엽납석의 물리적 특성은 비중 2.65~2.90, 굳기 1~2, 밀도 1.60~1.80, 내화도 29 이상이며, 색은 광산에 따라 다르나 대부분 백색, 회색, 회백색, 회녹색, 황색, 황녹색을 보이는 것으로 나타났다. 국내 납석의 화학성분은 엽납석의 경우 SiO_2는 58.2~67.2%, Al_2O_3는 23.1~28.8%, 엽납석과 딕카이트가 혼합된 경우 SiO_2는 49.2~72.6%, Al_2O_3는 16.5~31.0%, 엽납석과 일라이트가 혼합된 경우 SiO_2는 45.1%, Al_2O_3는 23.3%, 일라이트의 경우 SiO_2는 43.1~82.3%, Al_2O_3는 11.4~35.8%, 딕카이트의 경우 SiO_2는 37.6~69.0%, Al_2O_3는 19.6~35.3%로 구성광물에 따라 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.

국내 납석 광산의 분포도는 한반도 남서부의 전남 해남, 진도, 완도와 남동부의 경남 밀양, 김해, 동래, 양산 지역에 주로 분포하며, 그 외에도 한반도 동북부의 충북 단양에도 일부 분포하는 것으로 분석되었다. 2018년 기준 국내 납석을 생산하고 있는 광산은 21개이며, 매장량은 전남(45.6%) > 충북(30.8%) > 경남(13.0%) > 강원(4.8%), 경북(4.8%) 순으로 전남이 가장 많은 것으로 나타났다. 국내 납석 생산량 상의 10개 광산은 충북 중앙자원광산(37.9%) > 전남 완도광산(25.6%) > 전남 나주세라믹광산(13.4%) > 충북 청석-사지원광산(5.4%) > 경북 경주광산(5.0%) > 전남 백암광산(5.0%) > 전남 민경-노화도광산(3.3%) > 전남 부곡광산(2.3%) > 경남 진해납석광산(2.2%) > 부산 보해광산 순인 것으로 분석되었다.

납석은 열전전도, 열팽창성, 열변형, 팽창계수, 부피밀도가 낮고, 내열성과 부식 저항성이 높으며, 살균 및 살충 효능이 우수한 성질이 있으므로 내화 재료, 도자기 재료, 시멘트 첨가제, 살균 및 살충 제조재, 충전재 등 현재 다양한 분야에 활용되고 있는 것으로 나타났다. 또한 납석은 수처리 세라믹 분리막 소재, 디젤엔진 배기가스 저감장치 세라믹 필터 소재, 그리고 유리섬유 및 LCD 패널 소재 등 활용범위가 첨단산업분야로까지 더욱 확대되는 것으로 분석되었다.

사 사

이 과제(결과물은)는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(과제관리번호: 2021RIS-002).

References

Cho, H.K., 2000, Pyrophyllite and its application, Journal of the Mineralogical Society of Korea (Mineral & Industry), 13(1), 28-38.

Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., 1992, An introduction to the rock-forming minerals (2nd edition), Longman Scientific & Technical, 324-326.

Elzinga, E.J., Sparks, D.L., 1999, Nickel sorption mechanisms in a pyrophyllite-montmorillonite mixture, Journal of Colloid and Interface Science, 213(2), 506-512.

Jeollanamdo, 2012, Industrialization plan for pyrophyllite, Proceedings of the Jeollanamdo-Chosun University Joint Seminar on Pyrophyllite, Gwangju, 1-87.

Jeong, Y., 2016, Development and performance evaluation of pyrophyllite-based ceramic membranes for wastewater treatment, Master Thesis, Korea University, 1-118 (in Korean with English abstract).

Keren, R., Sparks, D.L., 1994, Effect of pH and ionic strength on Boron adsorption by pyrophyllite, Soil Science Society of America Journal, 58(4), 1095-1100.

KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2010, Resource overview, 429-435.

KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2021, 2020/2021 Mineral commodity supply and demand, 194-203.

Klein, C., Hurlbut, C.S., 1985, Manual of mineralogy (20th edition), John Wiley & Sons, 36-40.

Koh, S.M., 2007, Suggestion on quality specifications of domestic pyrophyllite according to utilization, Journal of the Mineralogical Society of Korea (Mineral & Industry), 20(1), 61-70.

KOMIS (Korea Mineral Resource Information Service), 2018, Status of pyrophyllite, Retrieved from https://www.komis.or.kr.

No, J.H., Koh, S.M., 2005, Current status and mineral characteristics of domestic pyrophyllite, Journal of the Mineralogical Society of Korea (Mineral & Industry), 18(1), 1-17.

Prasad, M., Xu, H.Y., Saxena, S., 2008, Multi-component sorption of Pb(II), Cu(II) and Zn(II) onto low-cost mineral adsorbent, Journal of Hazardous Materials, 154(1-3), 221-229.

Sheng, J., Xie, Y., Zhou, Y., 2009, Adsorption of methylene blue from aqueous solution on pyrophyllite, Applied Clay Science, 46(4), 422-424.

USGS (United States Geological Survey), 2015, Minerals Yearbook 2015, Mineral Commodity Summaries, 158-159.

Yoo, J.H., Kim, Y.U., Lee, G.J., 2009, Mineralogical characteristics and designation of key beds for the effective surveys of the Jeonnam pyrophyllite deposits, Journal of the Mineralogical Society of Korea (Mineral & Industry), 22(4), 297-305.