한국광물학회지 제 21 권 제 1 호 (2008년 3월)
J. Miner. Soc. Korea, 21(1), 27-35 (March, 2008)

수질개선제 Lumilite® 원료광물의 광물학적 및 나노결정학적의 특징

Characteristics of Mineralogy and Nanocrystals of Ingredient Materials of Lumilite® for Water Treatment

이 진 국 (Jin Kook Lee)[1] · 박 기 호 (Ki Ho Park)[2] · 추 창 오 (Chang Oh Choo)[1,*]

[1]하천환경종합기술연구소
(Ecological River Environment Technology Institute, Kyungpook 780-912, Korea)
[2]일본 큐슈대학 SteinWeiss Lumilite 연구소
(Institute of SteinWeiss Lumilite, Kyushu Univ., Fukuoka City, Japan)

요약 : 천연 광물소재를 양이온 치환하여 환경개선재로 응용되고 있는 Lumilite®의 원료 중 원광의 광물학적 특징을 분석하고 구성광물의 나노결정의 발달특징을 관찰하였다. 이를 위하여 편광현미경에 의한 조직관찰, XRD, SEM, FTIR, XRF 분석을 실시하였다. 구성 광물상은 클리놉틸로라이트, 일라이트, 석영, 알바이트 사장석이며, 본 시료는 미립질의 치밀한 조직을 가지는 것이 특징이다. 나노결정의 크기는 70~100 nm 범위가 흔하며, 비교적 등립질 내지 반등립질로 구성된다. 나노결정들의 단면은 아원형 내지 완만한 각형이며, 나노결정의 표면에는 수 nm 크기의 원형돌기가 거의 균질하게 분포한다. 전시료의 화학조성은 SiO_2 74.22~75.65 wt.%, Al_2O_3 13.25~13.72 wt.%, CaO 4.23~5.15 wt.%이며, 그 외 주성분과 수분은 미량으로 함유된다. 원료물질은 결정학적으로 500℃까지는 안정한 상을 유지하나, 700℃에서는 구조가 거의 파괴된다. Lumilite®가 흡착능력이 뛰어나고 높은 양이온치환능력을 가지는 것은 나노결정들이 잘 발달하고, 이들 사이에는 다양한 미세공극이 잘 발달하기 때문인 것으로 보인다.

주요어 : Lumilite®, 클리놉틸로라이트, 일라이트, 나노결정

ABSTRACT : Characterization of mineralogy and nanocrystals of ingredient materials of Lumilite® used for water treatment was made using optical microscopy, XRD, SEM, FTIR, and XRF analyses. Constituent minerals identified by XRD and microscope are clinoptilolite, illite, quartz, and albite, characterized by dense and fine texture. The cross section of nanocrystals with the size 70~100 nm is generally round or subround. Numerous spheroids with few nanometers in diameter are extensively formed on the surface of nanocrystals. Bulk chemistry is SiO_2 74.22~75.65 wt.%, Al_2O_3 13.25~13.72 wt.%, CaO 4.23~5.15 wt.%, with other major elements being minimal. When heated to 700℃, the crystal structure was mostly destroyed, though it persisted to 500℃. It is likely that high capacity and applications of Lumilite® for water treatment are originated from its structural properties such as development of nanocrystals and various tiny pores.

Key words : Lumilite®, clinoptilolite, illite, nanocrystals

*교신저자: mineralogy@paran.com

서 언

현재까지 수질개선 및 정화기술은 상당히 많이 개발되어 각종 오폐수 처리장에서는 물리적, 화학적 기술과 더불어 미생물을 이용한 생물공학적 기술이 광범위하게 활용되고 있다. 그러나 이러한 정화기술은 대부분 각종 중금속이 고농도로 함유된 폐수에 적용되며, 하천방류수 기준으로 처리되기 때문에 이를 일반적인 용수로 재활용하기에 어려움이 있다. 국내에서 개발된 대부분의 수질정화 기술은 실험실 범위나 파일럿테스트 수준의 기술에 머무르고 있는 경우가 많다(왕창근과 이승근, 2001). 또한 적용대상의 규모가 큰 야외현장에서 손쉽게 활용하기에는 많은 문제를 내포하고 있어 경제성을 논외로 하더라도 본격적인 실용화는 여전히 더딘 상태에 있다. 물리화학적 변수가 복잡한 하천이나 댐의 경우, 오랜 기간에 걸친 담수로 인하여 수질이 저하되고 있으며, 최근 들어 급증하는 각종 환경오염물로 인하여 안전한 식수와 생활용수 확보가 중요한 사안으로 대두되고 있다(이동근과 조인철, 1998). 현재 개발된 대부분의 수처리 기술은 정수장으로 유입된 물을 여러 단계에 걸쳐 정수 처리할 뿐, 댐이나 호소현장에서 원수자체의 수질을 정화하지는 않는다. 호소수의 수처리는 산업시설이나 각종 오폐수와는 달리 그 기술이 생태적으로 안정성을 보장할 수 없다면 호소 내에 직접 시공이 매우 어려울 뿐만 아니라, 국내외에서도 이러한 처리예가 거의 없는 실정이다.

Lumilite®는 천연광물 소재를 이온치환시켜 개발된 수질개선제로서 탁수, 녹조, 적조, 후민(humin) 등으로 오염된 호소와 하천의 수질개선에 효과가 뛰어난 것으로 나타나, 2007년 일본 국토교통성 NETIS (New Technology Information System)의 신기술(QS-070011-A)로 등록된 바 있다.

이 연구의 목적은 상기 Lumilite® 구성물의 광물학적 및 화학적 특징을 밝히는데 있다. 이를 위하여 편광현미경에 의한 조직관찰, XRD, SEM, FTIR, XRF 분석을 실시하였다.

실 험 방 법

Lumilite® 제조에 사용되는 원광을 박편으로 제작하여 편광현미경으로 조직과 구성광물을 관찰하였으며, 25～400 배율 범위를 이용하였다. 구성광물의 감정을 위한 X-선회절분석(XRD)은 모노크로미터가 장착된 Philips X' Pert-PRO/MRD X-ray diffractometer를 이용하여 분말상태의 시료를 분석하였다. 기기조건은 Ni-필터링 CuKα (1.54056 Å)선을 이용하여 가속전압과 전류는 35 kV/25 mA, 3°에서 65° 범위에서 0.02° 간격으로 10 sec씩 스캔하여 측정하였다. 회절선은 SIROQUANT 프로그램을 이용하여 구성물질을 정량분석하였다. 온도에 따른 결정구조의 변화를 관찰하기 위하여 전기로를 이용하여 200, 300, 500, 700℃에서 각각 1 h 가열한 후, 이를 XRD로써 분석하였다.

적외선분광분석(FTIR)은 분말시료를 대상으로 KBr매질을 이용하여 400～4000 파수(wavenumber) 범위에서 1 cm^{-1} 해상도로 측정하였다. 흡수선의 강도는 투과율(transmittance)로 변환하여 나타내었다.

구성광물의 미세조직 관찰은 Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM, HITACHI model S-4200)를 사용하였다. 황화물과의 EDS스펙트럼의 중첩현상을 피하고 해상도를 높이기 위하여 시편을 백금(platinum)으로 코팅하여 제작하였다. SEM 관찰시의 가속전압과 전류는 각각 20 kV 및 10 nA이고, 100～70,000 배율을 사용하였다.

전시료(bulk sample)에 대한 화학성분 분석은 X선형광분석(X-ray fluorescence spectrometer, Philips PW2400)을 이용하였으며, 조암광물의 주원소를 대상으로 분석하였다. 양이온교환능력(CEC)은 일본 나카사키 대학, 큐슈산업협회, 미쯔이금속(주)분석실에 각각 의뢰하여 암모늄아세테이트법으로 측정하였다.

결과 및 토의

현미경적 조직

편광현미경 관찰에 따르면 Lumilite®소재는 미립질의 기질(matrix)부가 대부분을 이루고 있다. 니콜하에서는 담녹색의 간섭색을 보이며, 개방니콜하에서는 갈녹색 내지 담갈색이 특징적이다(그림 1a, b). 반정은 매우 소량이며, 그 크기는 0.1 mm 이하로 작고, 타형이 대부분이

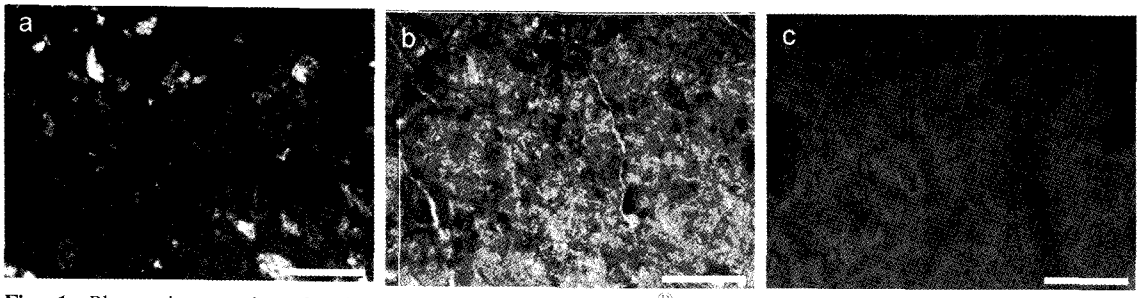

Fig. 1. Photomicrographs of solid section used for Lumilite®. (a) Under crossed nicol. (b) Under open nicol at the same image. (c) crossed nicol. Scale bars; (a) and (b) 0.2 mm, (c) 0.05 mm.

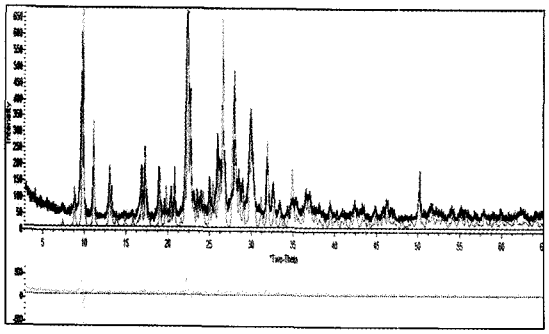

Fig. 2. Representative XRD reflections of solid powder used for Lumilite® product and calculated pattern.

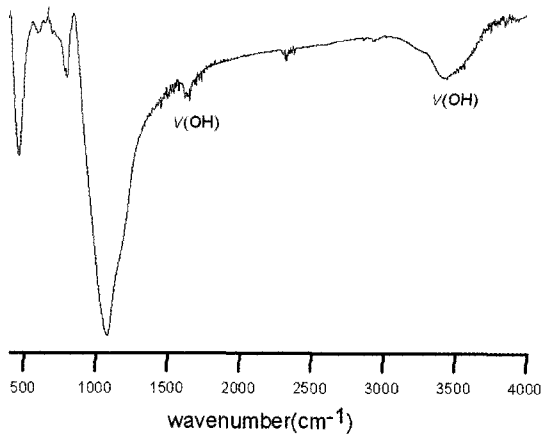

Fig. 3. FTIR spectrum shows (OH) groups and typical framework vibrations of clinoptilolite and silicates.

고 반자형도 관찰된다. 백색 내지 회백색의 간섭색을 보이는 입자들은 석영과 장석류인데, 장석입자는 형태가 불분명하고 그 내부는 변질된 양상을 나타낸다. 백운모는 벽개가 일부 관찰되지만 벽개나 입자의 가장자리 부분은 변질되어 있다. 기질부는 400배로 관찰하여도 입자의 형태가 구분되지 않고 치밀한데, 간섭색은 부분적으로는 약간 상이하지만, 전체적으로 보아 비정질 내지 유리질처럼 보인다(그림 1c).

XRD분석에 의한 광물조성

전시료에 대한 XRD분석을 실시한 결과 구성광물 종은 시료에 무관하게 균일하게 나타났으며, 클리놉틸로라이트, 일라이트(백운모), 석영, 알바이트 사장석이 대표적인 구성광물이다. 그림 2는 대표적인 회절선과 정량 계산한 회절선을 나타낸 것이다. 광물의 구성비는 시료에 따라 약간 상이하나, 클리놉틸로라이트 67~81 %, 일라이트 8~13%, 석영 10~11%, 알바이트 및 사장석 5~8% 정도이다. 회절선의 강도와 면적비는 클리놉틸로라이트가 가장 높다. 석영의 회절선은 클리놉틸로라이트와 약간 중첩되며, 그외 다른 광물들의 회절선은 약하게 나타나 쉽게 구분되지는 않는다.

적외선 분광분석(FTIR)

클리놉틸로라이트가 주를 이루는 광물상을 고려한다면 수산기(OH)와 골격구조(framework structure)에 해당하는 적외선 흡수선을 구분할 수 있다. 그림 3은 적외선분광분석의 스펙트럼을 나타낸 것이다. 3447 cm^{-1}에서 비대칭적으로 완만하게 나타난 흡수선은 결정구조 내의 (OH) 수산기의 신축모드(stretching mode)에 해당한다. 이 수산기는 골격구조 내의 산소와 수소결합을 하는 것이다. 일반적으로 적외선분석에서

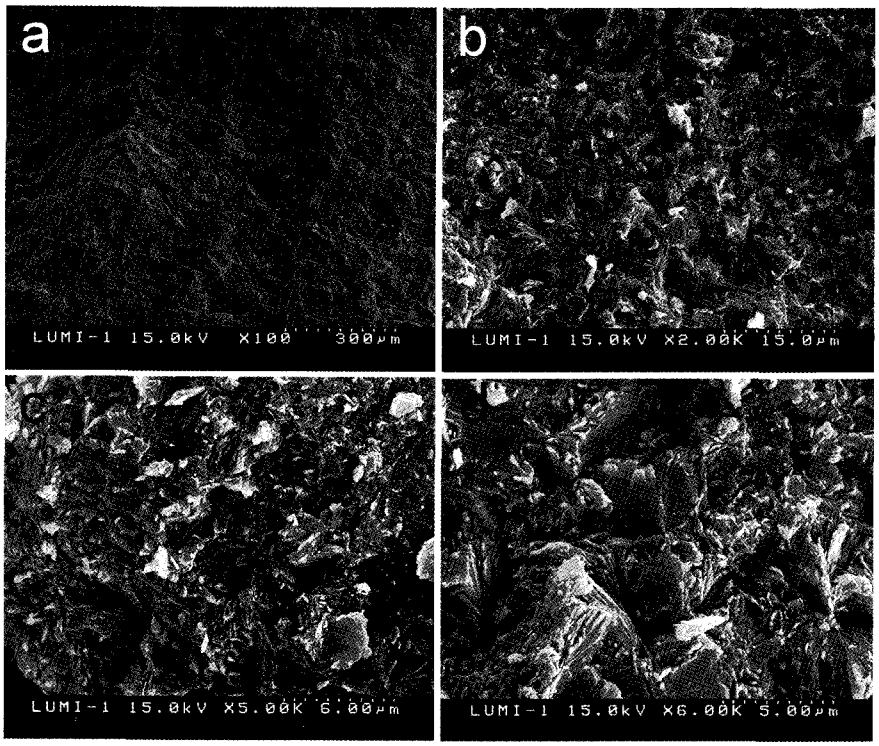

Fig. 4. SEM microphotographs. (a) ×100, (b) ×2,000, (c) ×5,000, (d) ×6,000.

는 1610~1650 cm^{-1} 범위에서 나타나는 약한 흡수선은 물분자 내의 굽힘모드(bending mode)인데, 본 시료의 경우 이 영역에서는 작은 흡수선이 여러 개로 갈라져 나타난다. 즉 1652, 1632, 1617 cm^{-1}에서 흡수선이 분리되거나 서로 간섭하여 흡수선의 형태가 불분명하다. 이들은 전술한 바와 같이 물분자의 굽힘모드에 해당된다. 1078 cm^{-1}에서 강하게 나타나는 흡수선은 Si- Al-O 비대칭신축진동(asymmetric stretching vibration)이다. 466 cm^{-1}에서 강하게 나타나는 흡수선은 Si-Al-O 굽힘모드에 해당된다. 본 시료에서 특징적인 현상은 3400~3700 cm^{-1}에서 강하게 나타나는 수산기 또는 흡착수에 해당하는 흡수선의 강도가 약하고 비대칭적인 것이라고 볼 수 있다. 이는 (OH)기나 흡착수의 함량이 적거나 약하게 결합되어 있을 것으로 해석된다. 클리놉틸로라이트를 제외하면 소량으로 함유되는 기타 광물들의 흡수선은 쉽게 인지되지 않는다. 예를 들면 일라이트에서는 대표적인 (OH) 수산기의 신축모드가 3620~3630 cm^{-1}에서 나타나지만, 본 시료에서는 일라이트의 적외선흡수선은 확인되지 않는다. 석영에서 가장 큰 1085 cm^{-1} 적외선 흡수선은 클리놉틸로라이트와 중첩되어 분명하지 않으며, 석영의 대표적 이중 분리선(doublet)은 800 cm^{-1} 및 781 cm^{-1}에서 약하게 인지된다.

미세조직의 특징과 나노결정의 발달

저배율에서 전자현미경(SEM) 관찰에 의하면 시료의 조직은 치밀하며 거칠게 보인다(그림 4a). 결정의 크기는 매우 작아서 2,000 배율에서도 뚜렷하게 구분되지 않으며(그림 4b), 5,000 배율에서부터 서서히 주상 및 판상의 결정형이 보이기 시작한다(그림 4c). 6,000 배율에서는 입자의 형태가 비교적 잘 관찰되는데, 치밀하게 적층된 엽편상의 결정은 5 μm 이하로 작으며, 특정한 방향성을 보이지 않고 방사상 또는 부챗살 형태를 보인다(그림 4d). 본 시료의 클리놉틸로라이트에서 발달한 이같은 정벽은 일반적인 클리놉틸로라이트에 비하면 매우 상이하다.

좀 더 고배율하에서 관찰할 시에 클리놉틸로

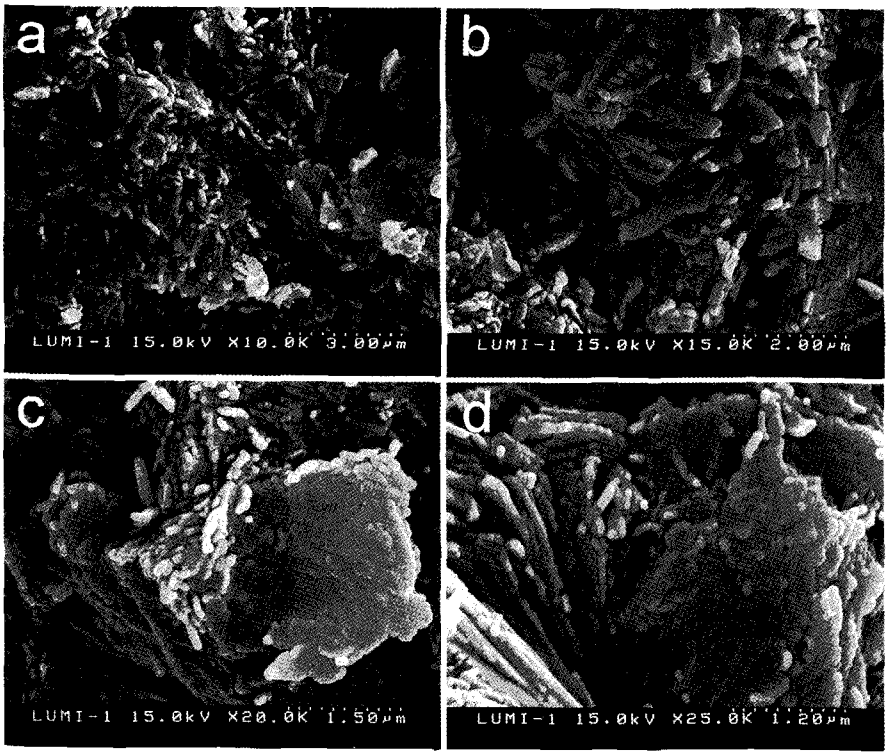

Fig. 5. SEM microphotographs showing *nanocrystals*. (*a*) ×10,000, (*b*) ×15,000, (*c*) ×20,000, (*d*) ×25,000.

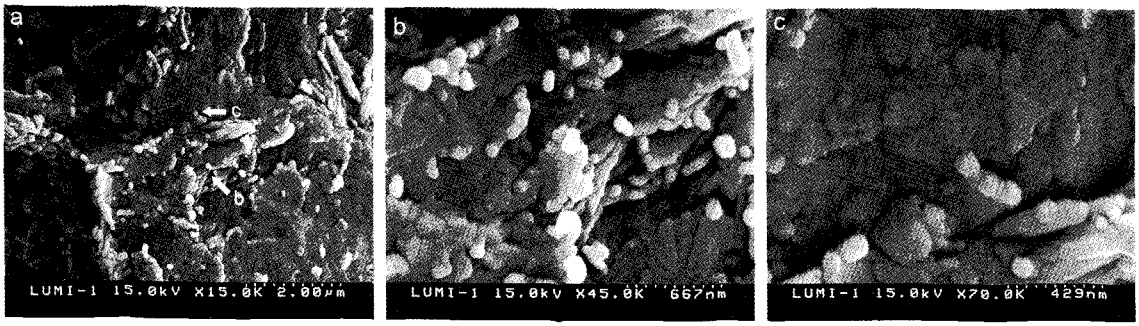

Fig. 6. SEM microphotographs showing nanocrystals. (a) ×15,000, (b) ×45,000, (c) ×70,000. Arrows in (a) denote enlarged points for (b) and (c).

라이트는 독특한 형태와 배열을 보여준다. 수천 배율 하에서 엽편상으로 보이던 결정들은 수십~수백 나노미터 크기의 수많은 작은 입자가 연결되어 있거나, 돌출되어 있다(그림 5). 나노결정들은 비슷한 방향으로 배열되어 치밀하게 연결되면서, 하나의 엽편상을 형성한다. 각 엽편상 결정의 두께는 다양하며, 그 크기도 균일하지 않지만, 엽편의 두께는 약 100~200 nm 정도가 흔하다.

그림 6에서 보듯이 수만 배의 고배율로 관찰하면 70~100 nm의 크기의 나노결정들이 현저하게 발달함을 볼 수 있다. 단면이 아원형 내지 모서리가 완만한 각형의 나노결정들은 서로 달라붙으면서 장축방향으로 결정이 성장된 형태를 보인다. 이러한 방식으로 나노결정들은 성장하면서 횡적으로도 인근의 입자들끼리 서로 접합되며, 점차 판상의 결정으로 커진다. 특이한 것은 미세한 나노결정의 표면에 수 nm 크기의

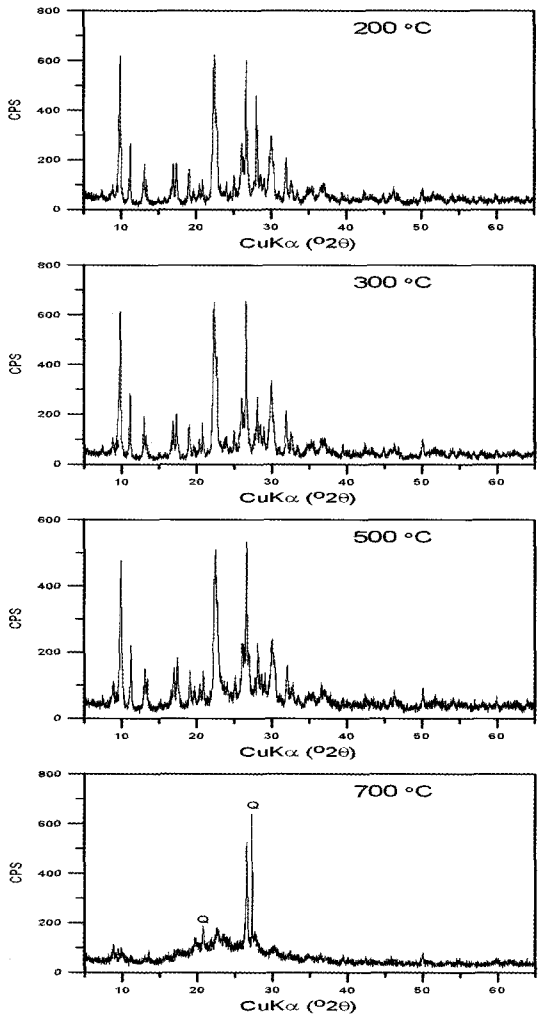

Fig. 7. XRD reflections with various temperatures. Q denotes quartz and most reflections indicate clinoptilolite.

원형돌기가 거의 광범위하게 분포한다. 이같은 나노수준의 작은 돌기발달은 합성 제올라이트, 슈베르트마나이트, 침철석과 같이 극미립질의 특징을 나타내는 광물들에서 흔히 관찰된다 (Loan *et al.*, 2005; Rustad and Felmy, 2005; 이성기 외, 2006; 추창오 외, 2007). 본 시료에 흔히 관찰되는 나노결정 표면의 작은 돌기는 결정이 충분히 성장하지 못한 상태임을 의미한다.

요약하면 본 시료는 나노결정에서부터 극미립질에 이르는 미세한 결정의 집합체임을 보여준다. 나노결정은 높은 비표면적, 빠른 확산 특성, 적용성 높은 공극율, 비정질의 다공성 실리

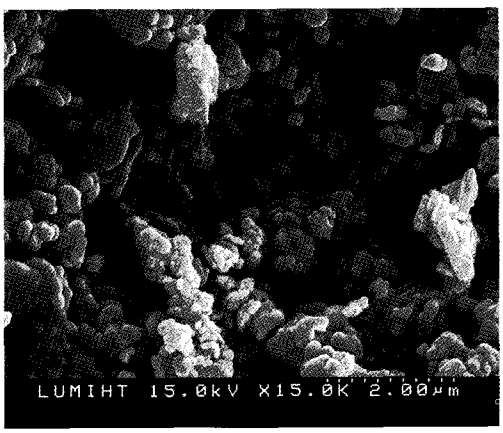

Fig. 8. SEM microphotograph of sample heated to 700℃.

카에 비하여 높은 물리적 강도 특성 때문에 촉매 및 흡착분야에서 높은 응용성을 갖는 다공성매질을 제조하는데 널리 사용되고 있는데, 산업적인 활용성이 높아 주목을 받는 합성 나노제올라이트의 경우 입자의 크기는 30~200 nm 범위가 흔하다(Zhang *et al.*, 2000; Wang, *et al.*, 2001).

온도에 따른 안정성

온도에 따른 물성의 안정성을 검토하기 위하여 열처리 실험을 한 후 XRD분석을 실시한 결과 온도가 증가함에 따라 변화를 보여준다(그림 7). 200~500℃까지는 구성광물 조성의 변화가 전혀 없다. 200℃에서는 클리놉틸로라이트의 강한 회절선인 8.99 Å (9.83도)의 (020)면과 3.99 Å (22.3도)의 (131)면의 회절선의 강도비는 비슷하게 나타난다. 그러나 300℃에서부터 이 두 회절선의 강도는 약간 차이가 나기 시작한다. 즉 3.99 Å에서의 회절선에 비하여 8.99 Å에서의 회절선의 강도는 약간 감소하는데, 이 같은 양상은 500℃에서도 관찰된다. 그러나 700℃에 이르면 석영을 제외한 다른 광물상의 회절선은 거의 소멸되어 정확하게 감정하기가 어렵다. 이는 광물들의 결정구조가 파괴되어 이 온도에서 더 이상 안정하게 존재할 수 없음을 의미한다.

이 같은 결과는 주사전자현미경(SEM) 관찰에서도 잘 인지된다. 대부분의 결정은 파괴되어 기존의 광물은 존재하지 않으며, 가장자리가 둥

Table 1. Chemical data of mineral mass used for of Lumilite® product (analyzed by XRF)

	mass-U	mass-O	mass-P
SiO_2	74.223	75.580	75.652
Al_2O_3	13.718	13.702	13.253
TiO_2	0.246	0.247	0.238
Fe_2O_3	1.645	1.556	1.466
MgO	1.157	1.223	1.226
MnO	0.022	0.030	0.023
CaO	4.227	4.152	4.179
K_2O	1.838	1.923	1.905
Na_2O	1.093	1.103	1.092
P_2O_5	0.050	0.051	0.050
L.O.I*	1.089	1.013	1.391
total (wt.%)	99.308	100.580	100.475

*L.O.I: Loss on ignition

근 입자를 형성하는데 대체로 구형이나 원반형의 형태를 유지한다(그림 8). 새롭게 형성된 입자의 크기는 0.1~0.4 μm 범위가 가장 흔하다. 이들은 형태가 구형에 가까운 것으로 보아 등방성에 가까운 물질, 즉 비정질을 형성한 것으로 보인다. 입자들은 대개 서로 달라붙어 엉겨 있거나, 여러 입자가 치밀하게 결합한 덩어리나 집합체를 이룬다. 전체적 볼 때, 고온에서 열적 변화를 겪으면서 기존의 광물 구조가 파괴되었고, 규소와 알루미늄을 위주로 하는 성분을 바탕으로 하는 새로운 결정이 형성되었다. 입자 덩어리 사이에는 많은 틈새가 발달하는데, 열변화로 인하여 매질물의 공극율은 크게 증가한 것으로 볼 수 있다.

XRF 분석에 의한 화학조성

전시료의 화학조성은 표 1과 같다. SiO_2는 가장 풍부한 성분으로서 74.22~75.65 wt.%이고, Al_2O_3는 13.25~13.72 wt.%, CaO는 4.23~5.15 wt.%인데 이들 성분이 대부분을 차지한다. 국내산 제올라이트 광석의 화학조성은 대부분 SiO_2 함량은 60 wt.% 이상, Al_2O_3 함량은 13~14 wt.% 범위로서 규질의 화학조성을 나타내며 SiO_2/Al_2O_3 함량비가 증가할수록 Na, K와 같은 알칼리원소의 성분은 증가하는 경향을 보인다(노진환, 2003a, b). 본 시료의 경우는 제올라이트 광석에 비하여 SiO_2 함량은 훨씬 높고 Al_2O_3 함량은 비슷한 범위, CaO 함량은 조금 높은 함량을 보인다. 알칼리원소와 Mg, Mn, Fe 등과 같은 성분은 비슷하다. 그러나 작열감량(L.O.I)은 1.013~1.391로서 일반적인 제올라이트 원광에 비하여 월등히 낮은 수치를 보인다. XRD 분석결과에 따르면 함수광물인 클리놉틸로라이트와 일라이트가 대부분을 차지하지만, 전시료의 작열감량은 의외로 상당히 낮다. 본 소재는 수분함량이 낮고 규질이 우세한 특성을 보인다.

수질개선제로서 활용성

천연 제올라이트의 우수한 흡착특성을 이용하여 수환경 개선용 기능성 소재로 활용 가능성은 이미 오래 전부터 제기되었으며, 최근에는 노진환(2003a, 2003b)에 의하여 특히 강조된 바 있다. 그러나 실내 실험실 규모에서 입증된 결과를 하천, 호소, 댐과 같은 현장에 적용할 시에 여전히 큰 차이가 존재한다. 이로 인하여 그 동안 실험실 수준에서는 많은 수질개선제가 개발되었지만 각종 현장에서는 여전히 광범위하게 활용되지 못하는 실정이다. 이는 수질문제의 현장의 물리화학적 환경이 복잡하고 대상의 규모가 크기 때문에 예측하지 못한 변수가 상존하기 때문이다.

Lumilite®를 수질개선제로 활용하기 위하여 각기 다른 수질특성을 갖는 여러 댐에 적용한 결과 그 효능은 우수한 것으로 나타났다. 대표적인 현장 적용 사례는 일본 큐슈 사가현에 소재하는 식수전용댐인 이키사 댐을 들 수 있다. 이 댐의 저수용량은 약 200만톤, 최대수심은 30 m인데, 후민에 의한 오염으로 인하여 물의 투명도는 1 m 내외로 탁하여 그동안 민원이 끊임없이 제기된 바 있다. 이 댐을 Lumilite® 기술로 처리한 결과, 탁도와 색도가 크게 개선되어 15일 경과 후의 물의 투명도는 10 m 정도로 향상되었으며, 처리수의 수질은 일본의 음용수 수질기준에 적합한 것으로 나타났다. 이는 일본에서도 식수전용댐에 최초로 적용되어 성공한 사례여서 Lumilite® 기술과 시공상황이 보도된 바 있다(佐賀新聞, 2007).

최근 일본 남부의 일부 댐들은 탁도와 녹조로 오염된 것으로 밝혀진 바 있다. 예를 들면, 야바케 댐은 2006년 8월 원수탁도가 9.5 NTU, 총인의 함량은 39 μg/L이며, 녹조현상이 동반된다. 물시료를 실내에서 Lumilite® 40 mg/L로 처리한 결과, 24 h 후의 탁도는 0.23 NTU, 총인은 3 μg/L로 개선되었다. 큐슈댐은 연중 탁도가 높은 댐인데, 2006년 9월, 50 NTU에 달한 탁수를 실내에서 Lumilite® 30 mg/L로 처리한 결과, 24 h 후의 탁도는 0.98 NTU로 크게 개선되었다.

2005년 9월 14일부터 3일간에 걸쳐 임하댐 원수에 대하여 한국수자원공사 수자원연구소와 공동으로 수행한 Jar Test 및 성층실험에서도 탁도가 상당히 개선됨을 확인하였다. 성층실험은 직경 15 cm, 높이 200 cm의 원통기둥을 이용하였고, 상층부 수온 30℃, 하층부 수온 4℃로 자동설정된 제어장치를 사용하였다. 이는 대형댐의 하층부에서 나타나는 저온환경에서도 응집제거 작용이 지속적으로 유지되는지를 확인하기 위함이었다. 반응이 일어나 응집된 탁질물은 위의 온도범위의 수온성층과 무관하게 최하층까지 잘 침전되어 대형댐 수질정화제로서도 그 효과가 기대된다.

본 시료의 경우 CEC 측정치는 시료에 따라 다양하나, 210~280 meq/100 g 범위를 보여 일반적인 광물종에 비하면 높은 편이다. 이처럼 수질개선제로서 효능이 우수한 이유는 전술한 바와 같이 잘 발달한 나노결정의 특성과 관련되는 것으로 보인다. 나노결정들은 극미립질이므로 높은 비표면적을 보유할 수 있으며, 미세하고 다양한 공극이 잘 발달하기 때문이다.

결 론

천연광물소재를 이용하여 개발된 수질개선제 Lumilite®의 광물상은 클리놉틸로라이트, 일라이트, 석영, 장석으로 구성되며, 미립질의 치밀한 조직을 가지는 것이 특징이다. 클리놉틸로라이트 나노결정의 크기는 70~100 nm 범위가 흔하며, 비교적 등립질 내지 반등립질 입자로 구성된다. 결정학적으로 500℃까지는 안정한 상을 유지하나, 700℃에서는 거의 모든 구조가 파괴된다. 전시료의 화학조성은 SiO_2 74.22~75.65 wt.%, Al_2O_3 13.25~13.72 wt.%, CaO 4.23~5.15 wt.%이며, 그 외 주성분과 수분은 미량으로 함유된다. Lumilite®가 수질개선제로서 효능이 뛰어나며 높은 양이온치환능력을 가지는 것은 나노입자들이 잘 발달하고, 입자들 사이에는 미세하고 다양한 공극이 잘 발달하기 때문인 것으로 보인다.

사 사

XRD 및 FE-SEM분석은 한국기초과학지원연구원(KBSI) 대구센터, FTIR분석은 경북대학교 공동실험실습관, XRF분석은 경북대학교 지질학과에서 수행되었다. 논문심사를 통하여 고견을 제시해 준 정찬호 교수님과 채수천 박사님께 심심한 사의를 표한다.

참 고 문 헌

노진환 (2003a) 천연제올라이트의 수환경 개선용 기능성 소재로의 활용에 관한 연구(I): 국내산 제올라이트의 양이온 교환특성. 한국광물학회지, 16, 135-149.

노진환 (2003b) 천연제올라이트의 수환경 개선용 기능성 소재로의 활용에 관한 연구(II): 국내산 제올라이트의 중금속 이온흡착특성. 한국광물학회지, 16, 201-213.

佐賀新聞 (2007) 2007년 12월 23일자. 일본 규슈.

왕창근, 이승근 (2001) 대청호 상수원수중의 탁도, 유기오염물질, 조류 및 투입분말활성탄 제거를 위한 DAF 공정응용. 환경공학회지, 19, 42-49.

이동근, 조인철 (1998) 진양호 수환경 개선대책. 경상대학교 환경보전연구소보, 6, 33-49.

이성기, 배인국, 장영남, 채수천, 류경원 (2006) 도시 소각재 용융슬래그로부터 P형 제올라이트 합성. 한국광물학회지, 19, 7-14.

추창오, 정교철, 이진국 (2007) 달성폐광산 산성광산배수의 발달특징과 슈베르트마나이트의 역할. 지질공학회지 17, 187-196.

Loan, M., Richmond, W.R. and Parkinson, G.M. (2005) On the crystal growth of nanoscale schwertmannite. Jour. Crystal Growth, 275, 1875-1881.

Rustad, J.R. and Felmy, A.R. (2005) The influence of edge sites on the development of surface charge on goethite nanoparticles: A molecular dynamics investigation. Geochim. Cosmoc- him. Acta, 69, 1405-1411.

Wang, Z.B., Wang, H.T., Mitra, A., Huang, L.M. and Yan, Y.S. (2001) Pure-silica zeolite low-k

dielectric thin film. Advanced Materials, 13, 746-749.

Zhang, B.J., Davis, S.A., Mendelson, N.H. and Mann, S. (2000) Bacterial templating of zeolite fibers with hierarchical structure. Chemical Commun., 2000, 781-782.

2008년 2월 25일 원고접수, 2008년 3월 12일 게재승인.