

단 보

# 중국 요녕성 흑산 벤토나이트 광산의 광상 및 광물 특성 평가

노 진 환  
강원대학교 지질학과

국내의 벤토나이트(bentonite) 산업계가 현재 직면하고 있는 난제들 중의 하나는 한정된 국내 자원의 고갈로 인해 원광 확보에 많은 어려움을 겪고 있다는 점일 것이다. 제품 생산 면에서 높은 기술력을 인정받고 있는 선진 외국계 회사들이 최근에 국내에서 활발히 사업을 전개하는 과정에서 가공기술의 발전과 시장 확대가 이루어졌지만, 좋은 품위와 품질을 갖춘 벤토나이트 원광을 국내에서 확보하는 일은 갈수록 어려운 상황에 처하고 있는 실정이다. 이에 따라 중국을 비롯한 동남아의 개발도상국가에서 벤토나이트를 개발하여 수입하는 사업계획들이 관련업계에서 추진되고 있다. 이 같은 배경 하에서 중국은 벤토나이트의 자원잠재성, 우리나라와의 지정학적 관계 및 경제적 측면에서 우선적으로 검토되어야 할 대상국일 것이다. 그러나 중국 벤토나이트 광산에 대한 신뢰할만한 정보와 관련 자료에 대한 접근이 용이하지 않은 관계로, 관련업계에서 중국에 진출하여 사업추진을 하는데 있어서 다소 어려움을 겪을 것으로 예상된다.

이에 따라 중국의 벤토나이트 광산에 대한 이해를 증진시킨다는 취지에서, 필자는 수년 전에 중국 현지에서 조사한 흑산 벤토나이트 광산에 대해 소개하고자 한다.

## 개 설

### 팽윤토 및 몽탈석

중국에서는 “팽윤토(膨潤土)”라고 불리는 벤토나이트는 그 광물 조성과 물리화학적 특성의 차이에 의거하여 나라마다 다소 다르게 정의되고 있다. 미국에서는 스멕타이트 계열의 점토 광물로 변질된 광석 수준의 변질암을 통칭해서 벤토나이트로 취급한다. 그러나 영국에서는 벤토나이트라는 용어를 Na-형 벤토나이트에만 국한하여 사용하고 Ca-형 벤토나이트에 대해서는 ‘fuller’s earth’라는 용어를 사용하여 구분한다. 또한 이 방면의 선진국 중의 하나인 일본에서는 벤토나이트 중에서 물에 산포되었을 때 산성을 띠는 벤토나이트에 대해서는 ‘산성백토(酸性白土, acid clay)’라는 용어를 사용하여 구분하는 경향이 있다. 이 같이 벤토나이트와 관련된 용어가 지역적으로 다소 다르게 사용되는 관계로 국내뿐만 아니라 해외 시장에서도 원광과 제품 명칭에 있어서 다소간의 혼란이 야기되고 있는 실정이다.

일반적으로 벤토나이트는 스멕타이트군(smectite group) 점토 광물이 주된 광물 성분

을 이룬다. 중국에서 “몽탈석(蒙脫石)”이라고 불리는 몬모릴로나이트(montmorillonite)는 스멕타이트의 일종으로서, 전 세계적으로 대부분의 벤토나이트들이 이를 주성분으로 한다. 몬모릴로나이트는 층상구조(sheet structure)를 이루는 함수 알루미늄규산염(hydrated aluminosilicate) 광물로서 대개  $\mu\text{m}$ 크기의 극미립으로 산출된다. 몬모릴로나이트의 일반적인 화학식은  $(\text{Ca}_{0.5}, \text{Na})_{0.7}(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_4(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 이지만, 실제의 화학 조성은 산출지, 기원, 원물질의 조건 등에 따라 변화가 심하다.

### 광산 연혁 및 현황

흑산(Heishan) 벤토나이트 광산은 중국의 조형재료공사(造型材料公社) 소속으로 1956년도에 설립되어 현재에 이르기까지 중국에서 주요한 벤토나이트 광산으로서의 위치를 유지해 왔다. 광산 측에 의하면, 이 광산은 약 4000만 톤에 달하는 벤토나이트의 매장량을 갖는 것으로 평가되고 있다. 또한 이 광산은 연간 가채 광량이 20만톤에 이르고 연간 10만톤의 다양한 벤토나이트 제품을 생산하는 것으로 알려져 있다. 생산된 제품은 중국은 물론 12 개국에도 수출하는 것으로 광산측은 소개하고 있다. 광구의 범위는 약  $6\text{km}^2$ 에 달하고 대체로 평탄한 지형(최고 고도:  $72\text{m}$ )을 이룬다. 총 3000명에 이르는 직원이 이 광산에 종사한다.

### 위치 및 교통

흑산 벤토나이트 광산은 중국 요녕성 흑산현 십리(遼寧省 黑山縣 十里) 부근에 위치하고 지리적 좌표는 동경  $122^\circ 08' - 122^\circ 10'$  와 북위  $40^\circ 41' 30'' - 40^\circ 43' 30''$  에 해당된다(그림 1).

요녕성의 수도인 심양(沈陽)으로부터 서쪽으로 약  $150\text{km}$  떨어져 있어 자동차로 3시간 정도 걸린다. 동서로 가로지르는 102번 공로가 비교적 잘 개설되어 있고 3방향의 철로도 흑산현에만 총연장  $110.5\text{km}$ 에 이르는 관계로 교통은 비교적 편리한 편이다. 특히 광산 현장까지 철로가 개설되어 있어 화물 운송에도 매우 유리한 조건을 갖추고 있다.

### 기후 조건

광산이 위치하는 흑산현은 연평균  $8^\circ\text{C}$ ,  $560\text{mm}$  정도로 우리나라보다는 춥고 건조한 곳이다. 표 1에서 볼 수 있는 바와 같이, 강우가 7, 8월에 집중되고 겨울에는 평균 기온이  $-10^\circ\text{C}$ 에 이를 정도로 춥기 때문에 벤토나이트 채굴 작업에 큰 지장을 주는 것으로 알려져 있다. 광산측도 1년 중 5개월 정도는 이와 같은 기후 조건 때문에 작업을 중단할 수밖에 없는 실정임을 토로하고 있다.

표 1. 흑산현(黑山縣)의 월평균 기온 및 강수량.

월별	항목	기온 ( $^\circ\text{C}$ )	강수량 (mm)
1		-10.7	2.8
2		-7.3	3.7
3		0.2	8.7
4		9.0	32.0
5		16.7	41.1
6		21.3	80.9
7		24.0	156.8
8		23.1	125.0
9		17.4	70.8
10		9.8	28.8
11		0.1	10.0
12		-7.6	3.8
	연평균	8.0	561.6

## 지질 개요

흑산 광산 지역은 중생대 쥐라기의 화산암류 및 화산 쇄설성 퇴적암류들이 낮은 구릉을 이루며 분포하는 지질을 이룬다(그림 1). 중국의 지질 계통상 금강산조(金剛山組)와 건창조(建昌組)에 속하는 화산암류들이 주된 분포를 이룬다. 금강산조는 주로 응회질 사력암 내지 라필리 응회암으로 구성되며 이 지역 중생대층의 하부층을 이룬다. 이 층을 평행 부정합으로 피복하는 건창조는 다양한 화산암류 및 화산 쇄설성 퇴적암류를 이루고 여기에 벤토나이트 광상이 배태된다. 건창조의 화산암류는 안산암, 유문암, 흑요암 등이 주를 이룬다. 또한 여기에 빈번한 중·산성의 화산 분출 작용과 단층 작용에

의하여 형성된 소규모의 함몰 퇴적 분지(일종의 칼데라형 호수)에서 화산쇄설성 퇴적 암류인 응회암 및 응회질 사암들이 퇴적된 양상을 나타낸다. 표 3에서 볼 수 있는 바와 같이 화산 분출은 적어도 4회 이상에 걸쳐서 야기되었고 이들의 분출 암상과 화산쇄설암이 건창조를 이룬다.

흑산 광산의 광구에서 주된 지층을 이루는 건창조는 화산암류 특유의 불규칙한 지층 분포를 보여 지역마다 다소 차이를 보이지만, 대개  $N10^{\circ}-20^{\circ}E$ 의 주향과  $NW 5^{\circ}-15^{\circ}$ 의 완경사를 나타낸다. 이 지역에서 대개 500m 미만의 층후를 보이는 건창조의 지층은 2방향의 ( $N30^{\circ}-40^{\circ}E$ 와  $N10^{\circ}-20^{\circ}E$ ) 단층에 의해서 어긋나 있다.

건창조의 화산암류 중에서 가장 먼저 분출한

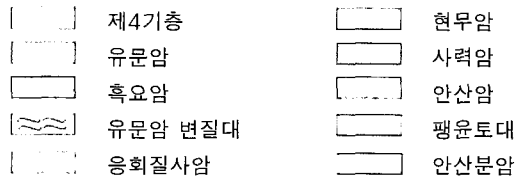
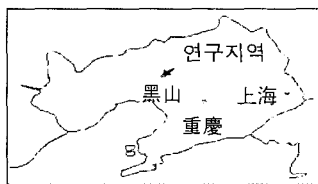
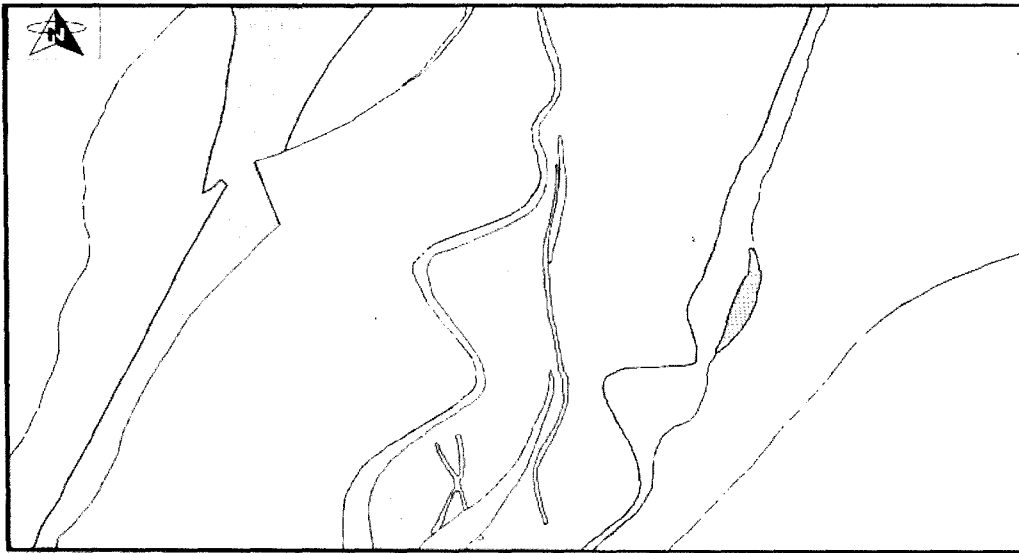


그림 1. 흑산 벤토나이트 광산의 위치 및 지질



것으로 여겨지는 안산암은 이 지역의 동측에 분포하지만, 광산 현장에서는 이곳에 광산 사무실과 벤토나이트 처리 시설이 위치하고 채굴된 광석으로 피복되어 있기 때문에 노출이 불량하다. 흑요암체는 안산암의 분출 이후에 형성된 것으로 부분적으로 송지암 내지 진주암의 암상을 띠고 곳에 따라 몬모릴로나이트나 제올라이트로 부분적 변질된 양상을 보인다. 때로는 수 m의 괴상체로서 벤토나이트질 응회암에 포함되기도 하고 수 cm 크기의 라필리(lapilli)로서 응회암에 포함되어 있는 경우를 흔히 볼 수 있다. 현미경하에서 흔히 소위 “perlitic texture”를 이루는 것이 특징이다. 흑요암을 수반하는 규질 화산활동은 적어도 2번 이상 야기되었던 것으로 보여진다. 이들 보다 후기에 생성된 유문암은 이 지역의 낮은 구릉상의 상정부를 이루며 분포하고 유문 구조가 잘 발달한다. 부분적으로 불석화된 부분이 있기 때문에 광산측에서 이에 대한 개발 가능성을 모색하기 위해서 곳곳에 파헤친 흔적이 많다.

대개 수 m 내지 수십 m 규모의 두께를 이루는 화산쇄설성 퇴적층은 벤토나이트화 된 응회질 퇴적층과 뚜렷한 층리를 보이는 응회질 사암이 주를 이룬다. 간혹 탄화된 형태의 규화목이 발견되고 상부에서는 흑요암의 쇄편도 함유되는 양상을 보인다. 대부분 벤토나이트로 변질되었지만, 부분적으로 박층으로 불석화된 층준도 개재된다.

## 벤토나이트 광상

### 광상 개발 현황

흑산 벤토나이트 광상은 표고 차 30m 내의 매우 낮은 구릉상의 지형을 이룬다. 1956년도에

개발된 이래 이 광상을 철로가 개설될 정도로 활발히 채굴되어 왔었기 때문에, 많은 부존량에도 불구하고 현재는 채굴 여건이 좋지 않은 것으로 여겨진다. 현재 채굴장은 깊이가 대략 10-15m 정도의 큰 웅덩이를 이루고 있고 여기에는 많은 물이 고여 있는 실정이다. 이와 같은 채굴장은 이 광산의 광구 내에 5개소에 달하며 이 작업장들은 모두 적어도 최근 몇 개월 동안은 가행되지 않았을 것으로 여겨진다. 현지 조사 결과, 이 채굴장들은 광상의 노출 조건이나 지형적 조건 등과 같은 채굴 조건들이 가장 좋은 곳으로 여겨진다. 그러나 과거 50년 가까이 오랜 세월 동안 이들 채굴장에서 작업이 이루어져 왔었던 관계로, 작업장의 심화로 인한 침구 및 고품위 광석의 채진 등으로 현재는 광석 채굴에 다소 어려움이 있을 것으로 여겨진다. 따라서 앞으로는 이 광산은 고품위 광석의 확보와 채굴 여건의 개선이 필요한 상황인 것으로 판단된다.

### 광상의 유형

흑산 광산의 벤토나이트 광상을 전술한 바와 같이 건창조에 개재되는 퇴적원 응회질 암석들에 주로 배태된다. 그 외에 유문암이나 흑요암의 쇄편을 다량 함유하는 라필리 응회암의 일부도 벤토나이트 광상을 이룬다. 벤토나이트 광상은 층상으로 부존한다. 현재의 채굴장들은 모두 동일 층준을 이루는 것으로 생각된다. 유문암과 흑요암체를 기준으로 그 상·하부에 각각 주요 벤토나이트 층이 개재되는 것이 특징이다. 하부의 벤토나이트 층은 5-20m 정도의 두께를 이루고 고품위를 이룬다. 현재 채굴되고 있는 벤토나이트는 대개 이 층준의 광석인 것으로 해석된다. 상위의 벤토나이트 층은 10m 전후의 두께를 갖고 다소 규질물이나 불석이 많이 혼재되어

다소 경질이고 저품위를 이룬다. 그 외에도 소 규모(1-3 m)의 벤토나이트 층이 3-4 개 개재되지만, 이들은 별로 가행 가치가 없는 것으로 여겨진다.

흑산 광산의 벤토나이트 광상은 화산재 같은 미립의 화산 쇄설성 퇴적물들이 물속에서 쌓인 후에 매몰되는 과정에서 숙성작용을 받아 형성된 것으로 해석된다. 이와 같은 광상 유형은 국내의 제 3기층에 부존하는 벤토나이트 광상들과 성인적으로 흡사하다. 주변 지질 조건이나 배태암층의 암석학적 조건 등이 국내의 영일-감포 일원의 벤토나이트 광상들과 거의 일치하는 것으로 여겨진다.

### 광상의 부존 상황 및 규모

전술한 바와 같이 이 광산의 벤토나이트 광체는 층상을 이루며 분포한다. 대개 10°NW 내외의 완경사를 이루며 광체가 연장성 좋게 부존되지만, 광구의 서측부에서는 단층에 의해서 절단되므로서 이 광산의 주된 벤토나이트 광체가 지하 심부(대개 100m 정도)로 잠적된다. 광산측에서 시행한 시추 자료를 토대로 작성된 단면도

상(그림 2)에서 이와 같은 상황을 잘 알 수 있다. 과거에 채굴된 곳은 주로 단면도상으로 우측에 위치한다. 다시 말해서 지표에 노출되었거나 유문암등의 화산암류가 약간 피복된 상태의 광체를 단순히 노천 채굴해 온 것으로 여겨진다.

광산측은 이 광산의 매장량이 4000만톤에 이른다고 이야기 하고 있으나, 이는 다소 과장된 것으로 여겨진다. 대부분 유문암체 하부에 부존하는 잠두 광체가 대부분으로서, 지표에 노출된 것을 기준으로 개략적으로 계산하면 300만톤 내외이다. 벤토나이트 같은 점토상의 비금속 광물들은 톤당 가격이 낮아서 대규모로 광석이 처리되어야 하고 갱도 개설이 어렵기 때문에 노천 채굴법으로 가행되는 것이 통례이다. 전 세계적으로 벤토나이트를 갱도 굴진을 통해서 개발하는 예가 노동력이 비교적 저렴한 중국에서도 드물다는 점을 감안하면, 이 잠두 광체의 개발 가능성은 현재로서는 매우 낮은 것으로 여겨진다.

그러나 벤토나이트 광체를 피복하고 있는 유문암과 흑요암의 두께가 10-30m 정도에 불과하고 이 잠두 광체의 일부는 현재의 채굴장에서 측면으로 굴진이 가능한 것으로 여겨진다. 이에 대한 측량 및 품위에 대한 자료가 없기 때문에

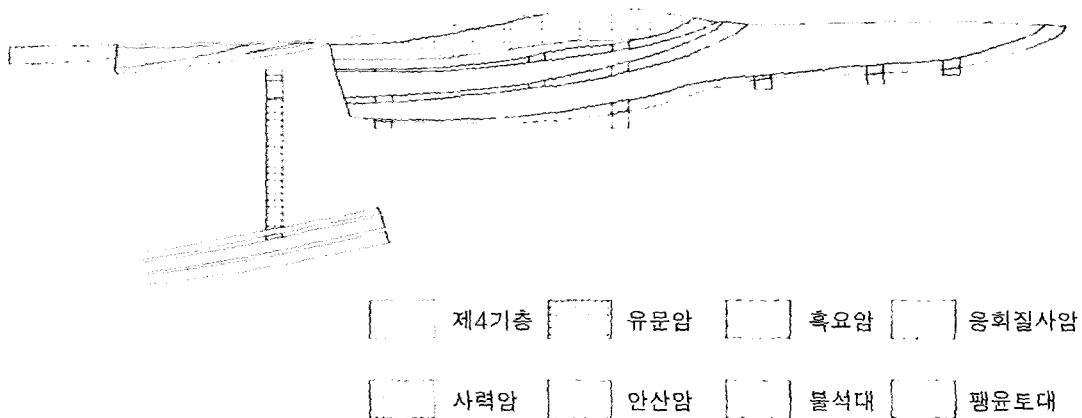


그림 2. 흑산 벤토나이트 광체의 부존상황 및 시추도.

정확한 계산은 불가능한 실정이지만, 광산측의 자료를 토대로 산정하면 대략 700-800만톤 정도는 가능할 것으로 여겨진다. 따라서 이 광산의 가채 광량은 대략 1000만톤 수준으로 보는 것이 타당할 것으로 여겨진다.

## 광물 특성

### 벤토나이트의 물리적 특성

흑산 벤토나이트는 일반적으로 매우 밝은 색을 띤다. 대개 베이지(beige) 색을 띠고 곳에 따라 순백색에 가까운 색조를 갖는 경우도 있다. 이는 원암이 산성 및 규질의 화산쇄설암인 것에 기인하는 것으로 여겨진다. 현재 개발 중인 Ca-형 벤토나이트가 광산 측에서 Na-형 벤토나이트라고 말하는 100m 지하 심부의 미개발 벤토나이트 광석(코아 샘플)보다 훨씬 밝은 색상을 갖는다. 이와 같은 흑산 벤토나이트 원광의 비교적 높은 백색도는 상품 가치 면에서 유리한 조건에 있는 것으로 평가된다.

현재 주로 가행되고 있는 벤토나이트는 비교적 연질(軟質) 광체로서 마치 비누와 같은 물성을 보이고 표면에서 건조되면 특징적인 "popcorn-like appearance"를 보인다. 그러나 규산 광물들과 제올라이트가 보다 많이 함유되는 상부의 벤토나이트 광체(지질 개요 참조)는 다소 경질이고 마치 제올라이트 광체와 같은 물성을 나타낸다. 또한 유문암체와 흑요암체에 가까운 곳에 위치하는 벤토나이트들은 이들의 쇄편이 많이 혼재된 저질 광체를 이루고 풍화가 심하게 진행되어 마치 토상의 광체를 이루는 것이 특징이다.

### 광물 조성 및 품위

흑산 벤토나이트를 구성하는 주성분 점토 광물은 몬모릴로나이트(montmorillonite)이고 여기에 단백석(opal-CT), 크리스토팔라이트(cristobalite) 및 석영 같은 규산 광물(silica mineral)과 클리놉틸로라이트(clinoptilolite) 같은 제올라이트(zeolite) 광물들이 불순 광물로서 함유된다(그림 3, 4). 그밖에 변질되기 이전의 원암에 함유되고 있었던 유문암 및 흑요암의 미세 쇄편들과 장식 및 석영의 반정들도 곳에 따라 주요 불순물의 역할을 한다. 이들 불순물중에서 단백석과 크리스토팔라이트는 이 벤토나이트의 품위는 물론 품질을 떨어뜨리는 가장 심각한 불순물인 것으로 생각된다. 이들은 통상 정제 과정에서도 제거되기 어려운 벤토나이트의 일반적인 불순 광물로서 X-선회절분석에 의하면 대개 15-20wt.%정도 함유되는 것으로 보인다. 이 정도의 함유는 국내산 벤토나이트보다 다소 많은 양으로서 이에 대한 효율적인 제거 공정의 개발이 필요할 것으로 여겨진다. X-선회절분석에서도 알 수 있는 바와 같이 이 광산에서 출하되고 있는 벤토나이트 제품에서도 이 불순 광물들이 많이 함유되고 있다. 앞으로 이 광석으로 고가의 제품들을 생산하기 위해서는 이 규산 광물들의 함량을 적어도 5wt.% 이하로 줄일 수 있는 공정 개발이 시급히 요구된다.

몬모릴로나이트는 하루 동안 대기 중에 방치한 건조 조건에서 d(001) 값이 14-15Å에 해당되는 주면 회절 격자상(basal reflection)을 나타낸다. X-선회절 강도로 보아 비교적 결정도가 양호한 상태인 것으로 해석된다. 주사전자현미경(SEM)에 의하면 대개 1-2µm 정도의 미세한 엽편상의 결정립을 이루고 단백석 또는 제올라이트 광물들과 함께 벌집 모양의 집합체를 이루는 것을 알 수 있다. 광석에 따라 몬모릴로나

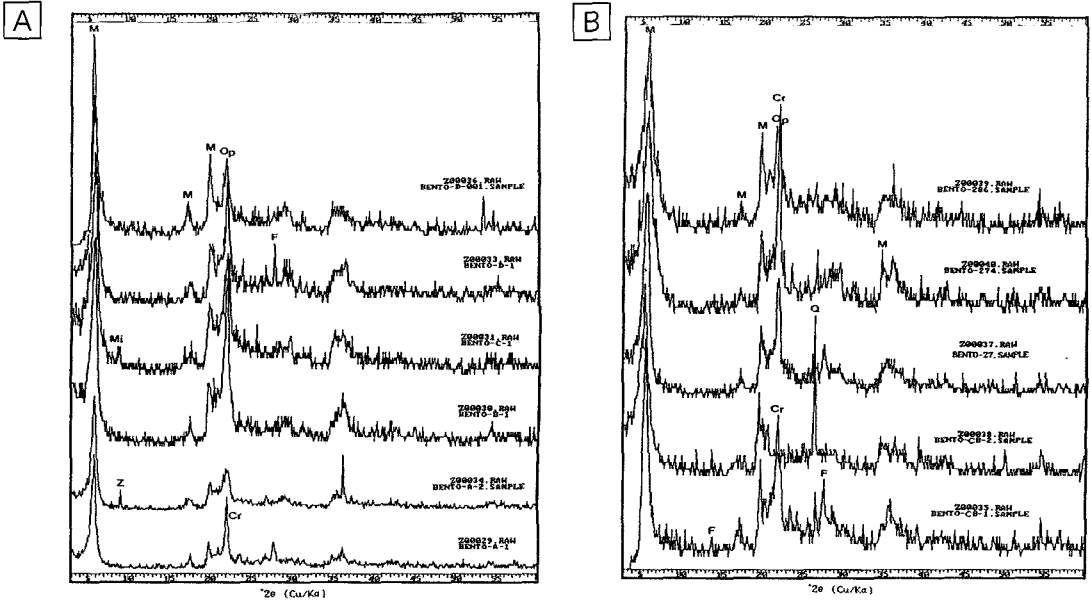


그림 3. 흑산 벤토나이트 원광 (A) 및 제품 (B)의 X-선회절 분석도.

M: montmorillonite, Op: opal-CT, Cr: cristobalite, Q: quartz, Z: zeolite, F: feldspar, Mi: mica.

이트 결정립의 만곡 정도는 다소 다른 나는 바, 대체로 각이 무딘 평탄한 편상 집합체를 이루는 것이 보편적이나, 북쪽 채굴장의 시료(C-1)와 시추 코아 시료(광산측이 Na-형 벤토나이트라고 말하는 시추 코아 시료: D-001, D-002)들은 다소 만곡된 결정형을 이루는 것이 특징이다.

현장에서 임의 채취된 흑산 벤토나이트 광석 15 개를 X-선회절분석(XRD), 시차열 분석(DTA) 및 주사전자현미경(SEM) 관찰 등을 통해서 반정량 분석해 본 결과, 대개 몬모릴로나이트 함량이 50-80wt.%에 이르는 것으로 분석되었다. 이는 광산 측에서 화학적 방법으로 평가한 40-70wt.%보다도 약간 상회하는 수치로서, 선진 외국에서 일반적으로 개발 가능한 벤토나이트의 평균 품위를 60wt.% 정도로 보고 있는 점을 감안하면, 이 광산의 광석은

품위 면에서는 비교적 좋은 조건에 있는 것으로 평가된다.

### 화학 조성

흑산 벤토나이트의 화학 조성을 구하기 위해서 실온에서 2일간 건조된 시료를 대상으로 X-선 형광분석(XRF)을 시행하였다. 흑산 벤토나이트의 원광 시료의 분석치는 표 2에 제시하였다. 또한 광산측에 의해서 제공된 제품 시료의 분석치는 세계적으로 유명한 벤토나이트 제품(미국 Wyoming 벤토나이트, 영국의 Ca-형 벤토나이트, 터키의 Ca-형 벤토나이트)들과 비교될 수 있도록 정리하였다(표 5).

흑산 벤토나이트의 화학 조성상의 특징은 높은 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성분비와 낮은 Fe 및 Na 함유도로 특징지어질 수 있다. 상대적으로 높은

SiO<sub>2</sub> 함유 정도는 규산 광물들과 유문암 및 흑요암의 미세 쇄편 등과 같은 불순물에 기인한 것으로 앞으로 정제 과정에서 SiO<sub>2</sub> < 60wt.%로 낮출 수 있도록 노력해야 할 것이다. 다른 지역산에 비해 비교적 낮은 Fe 함유도는 이 벤토나이트의 높은 백색도와 관련한 사항으로 품질 관리 면에서 유리한 조건이 될 것이다. 전반적으로 낮은 Na 함유량은 이 광산에서 산출되는 벤토나이트는 Na-형 벤토나이트에 속하지 않음을 시사한다. 광산 측에서 Na-형 벤토나이트라고 이야기하는 심부 광체(코아 시료: D-001, D-002)도 전형적인 Na-형 벤토나이트라고 볼 수는 없다(Wyoming 벤토나이트의 분석치 참조). 그러나 전형적인 Ca-형 벤토나이트(영국산 벤토나이트)에 비해서는 CaO/Na<sub>2</sub>O의 함유비가 훨씬 낮은 값을 나타낸다. 따라서 흑산 벤토나이트는 Na-형 벤토나이트와 'fuller's earth'(Ca-형 벤토나이트)의 중간 형태로서 분석된다.

**물리화학적 특성**

흑산 벤토나이트를 100g/l 비율로 초음파 진탕기 및 자석젓개를 사용하여 증류수에 산포시켜 하루 동안 방치한 후의 pH를 측정한 결과는 표 4와 같다. 표 4에서 볼 수 있는 바와 같이 이 광산에서 "white clay"라고 출하되고 있는 벤토나이트를 제외하고는 대부분 중성의 pH치를 나타낸다. 일반적으로 벤토나이트가 pH=7-8의 값을 보인다는 사실을 감안하면 흑산 벤토나이트들은 정상의 값을 보이는 것으로 분석된다. 그러나 소위 "white clay"라고 생산되고 있는 DB-2 시료는 특이하게 pH=2.5의 값으로 매우 높은 산도를 유지한다. 이는 일본 사람들이 말하는 소위 "산성백토(酸性白土, acid clay)"와 유사한 것으로 흑산 벤토나이트 원광의 성격상 자연적으로는 있을 수 없는 물질인 것으로 생각된다. 시료를 제공한 광산 측의 설명이 없

표 2. 흑산 벤토나이트 원광의 화학 성분표.

시료번호 성분	A-1	A-2	B-1	C-1	D-1	D-001	D-002
SiO <sub>2</sub>	66.71	66.80	64.15	63.27	65.72	57.07	60.33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.27	9.75	9.69	10.09	12.64	13.25	11.90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.46	1.25	1.26	1.91	1.72	2.55	2.16
TiO <sub>2</sub>	0.03	0.09	0.12	0.13	0.10	0.13	0.12
MnO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
CaO	1.23	1.24	1.28	1.64	1.38	2.40	2.39
MgO	1.74	1.87	2.14	2.49	1.75	2.50	1.99
K <sub>2</sub> O	1.88	0.47	0.11	0.17	2.02	0.39	0.39
Na <sub>2</sub> O	1.17	n.d.	0.13	0.09	0.71	0.53	0.48
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.05	0.03	0.04	0.03	0.02	0.02
L.O.I.	12.76	18.42	20.78	20.24	14.65	20.66	19.90
Total	100.27	99.92	99.69	100.05	100.75	99.51	99.78

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: total iron, L.O.I.: Loss on ignition



표 3. 흑산 벤토나이트 제품, 흑요암 및 기타 외국의 유명 제품들과의 성분 대비.

시료번호 성분	CB-1	CB-2	27	WB-1 <sup>1</sup>	UK-1 <sup>2</sup>	TB-1 <sup>3</sup>	P-1
	Heishan Bentonite			U.S.A	U.K	Turkey	
SiO <sub>2</sub>	62.40	58.81	63.40	55.60	55.20	70.70	70.74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.96	12.77	12.20	18.10	13.70	15.10	13.58
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.76	3.26	1.85	3.60	8.10	0.70	1.51
TiO <sub>2</sub>	0.11	0.50	0.11	0.10	0.70	0.05	0.13
MnO	0.03	0.01	0.03	n.d.	n.d.	n.d.	0.05
CaO	1.55	0.93	1.45	1.00	6.30	1.60	0.85
MgO	1.86	3.07	1.94	1.90	3.30	1.60	0.18
K <sub>2</sub> O	1.42	0.97	1.26	0.40	0.60	1.80	3.86
Na <sub>2</sub> O	0.76	0.34	0.86	1.60	tr.	0.40	3.83
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.05	0.04	n.d.	n.d.	n.d.	0.06
L.O.I.	17.91	19.28	16.73	8.00	9.90	5.00	5.06
Total	99.79	99.98	99.86	90.30	97.80	96.95	99.84

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: total iron, L.O.I.: Loss on ignition

CB-1, 27: Ca-bentonite, CB-2: white clay, P-1: obsidian

<sup>1</sup>: Wyoming bentonite, <sup>2</sup>: Ca-bentonite, <sup>3</sup>: white Ca-bentonite

있기 때문에 자세히는 알 수 없으나, 이는 아마도 벤토나이트의 흡착 특성이나 계면 활성을 개선할 목적으로 산처리(acid treatment)한 제품일 것으로 여겨진다. 즉, 이 산처리 과정에서 잔류된 산도로 인해서 위와 같은 낮은 pH 치를 갖게 된 것으로 보인다. 어쨌든 이와 같은 사실로 보아 흑산 광산에서 출하되고 있는 벤토나이트 제품은 2가지 유형, 즉 (1) Ca-형 벤토나이트와 (2) 산처리된 활성(acid activated) 벤토나이트인 것으로 생각된다.

산포된 벤토나이트 현탁액을 하루 동안 정치

시킨 후에 침강된 정도를 살펴 본 결과, 심부 광체 시료(광산측이 Na-벤토나이트라고 이야기하는 시료)인 D-001 및 D-002와 Ca-형 벤토나이트 제품인 CB-1 시료가 가장 잘 산포되고 소위 "colloidal property"가 뛰어난 것을 알 수 있었다. 이에 비해서 "white clay"라고 출하되고 있는 벤토나이트 제품은 산포 능력이 가장 떨어지는 것으로 나타났다. 흑산 벤토나이트들의 양이온 치환능(CEC)은 품위에 따라 다소 차이를 보이지만, 대개 70-80meq로서 벤토나이트의 일반적인 값을 유지하는 것으로 분석된다.

표 4. 벤토나이트로 산포된 용액의 pH.

벤토나이트 시료 번호	원 광							제 품		
	A-1	A-2	B-1	C-1	D-1	D-001	D-002	CB-1	CB-2	27
pH	7.3	8.11	7.3	7.0	7.1	8.0	8.0	7.9	2.5	8.7

**열적 특성**

흑산 벤토나이트의 열적 안정성과 팽윤도 및 소성 능력을 검증하기 위해서 전기 건조기에서 40℃로 건조 시키고 실온에서 하루 동안 방치한 후에 시차열분석을 실시하였다. 분석된 시료들은 불순물인 제올라이트와 단백석 등의 함유 정도에 따라 다소 다르게 나타나지만, 대개 Ca-몬모릴로나이트 특유의 흡열 반응대를 보였다(그림 4). 100℃ 근처에서 나타나는 층간수 이탈 반응 곡선에서 다소 이중적인 양상을 보이는 B-1, C-1 등의 시료들은 제올라이트의 함유에 기인한 것으로 보인다. 2가의 교환성 양이온의 존재를 시사하는 165℃ 근처의 부수적인 흡열 반응대의 강도가 심부광체의 광석들에서 상대적으로 매우 미약하게 나타나는 것은 특기할 만한 현상이다. 전형적인 Na-형 벤토나이트인 'Wyoming' 벤토나이트가 여기에서 거의 반응대를 형성하지 않는다는 사실을 감안하면, 이 시료들도 Na-형에 가까운(그렇지만 전형적인

Na-형은 아님) 열화학 반응을 보이는 것으로 감정된다.

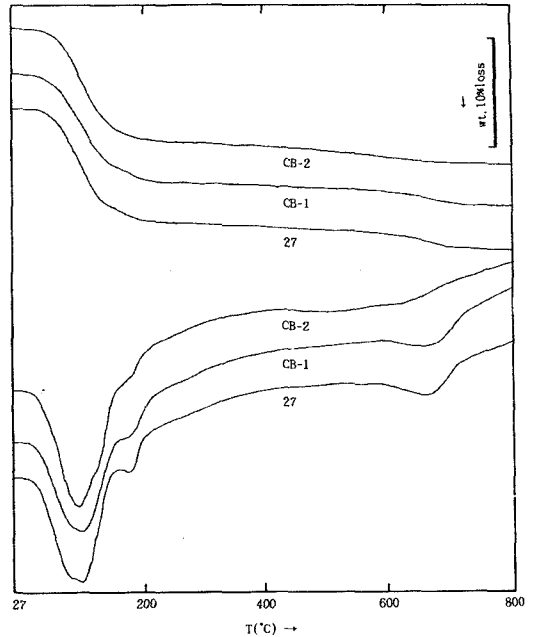


그림 4. 흑산 벤토나이트의 시차열(TG-DTA) 분석도.

표 5. 흑산 벤토나이트의 시차열분석(DTA, TGA) 자료.

시료번호	TG 탈수량(wt%)		DTA 반응 온도(℃)	
	층간수	구조수	탈수반응	OH기 이탈반응
A-1	8.0	1.5	90(166)	667
A-2	8.5	1.3	92(165)	667
B-1	9.3	1.0	70/93(166)	654
C-1	9.8	1.0	74/98(167)	648
D-1	11.6	1.4	76/92(166)	652
D-001	12.2	1.8	98(168)	654
D-002	14.3	1.5	98(170)	652
CU-1	9.6	1.2	91(165)	652
CU-2	10.0	1.3	86(164)	615(491)
27	10.2	1.2	76/92(166)	653

열 중량 분석(TGA)에서 나타나는 심부 광체 시료들의 높은 증간수량은 이 시료들이 상대적으로 양호한 팽윤 특성과 소성을 가질 것이라는 사실을 반증한다(표 5). 이들의 높은 산포 및 팽윤 특성은 이미 물리화학적 특성에서도 논의된 바와 같이 현재 가행중인 흑산 벤토나이트들보다 상대적으로 양호한 것으로 평가될 수 있다.

## 종합 평가

흑산 벤토나이트 광산의 광상 부존 현황 및 광물 특성에 대한 평가를 위해서 현지조사와 실험실에서 관련 실험을 수행한 바 있다. 현장에서 흑산 광산 측의 협조가 미흡했던 관계로 충분한 자료의 수집과 지질 조사 및 시료 채취가 원활히 이루어지지 않은 것을 아쉽게 생각한다. 그렇지만 전술한 바 있는 조사 내용과 각종 실험 자료들을 토대로 이 광산의 개발 잠재성 및 경제성 평가와 광석의 특성 평가에 대한 기초 자료 및 검토 의견의 제시는 가능할 것으로 사료된다.

흑산 벤토나이트 광산의 광체는 중생대의 응회암류를 모암으로 층상의 광상을 이룬다. 저품위 광석과 심부 광체까지 포함하면 전체 매장량이 4000만 톤에 이를 정도의 국제적 수준의 대규모 광산이다. 벤토나이트 광체는 그 유형별로 (1) 지표에 노출된 광체, (2) 유문암에 의해서 피복된 잠두 광체, 그리고 (3) 단층에 의해서 100m 정도 잠적된 심부 광체로 구분될 수 있다. 벤토나이트의 생산 원가나 개발 기술 여건 등을 고려할 때, 지표에 노출되지 않은 (2)와 (3)의 형태의 광체는 현재로서는 개발 가치가 없는 것으로 평가된다. 광산 측에서 주장하는 갱도 굴진을 통한 심부 광체의 개발 모색 방안은 현재로서는 신빙성이 없는 것으로 여겨진다.

이와 같은 해석은 갱도 굴진 및 채광 과정에서 필연적으로 뒤따르는 (1) 생산 원가의 상승과 (2) 안정성 문제 등에 근거한다. 그러나 유문암 체 하부에 부존하는 벤토나이트 광체는 특별한 채굴법(측면에서 저 품위 벤토나이트와 흑요암과 함께 채굴하는 방식 등)이 개발되면 어느 정도는 개발이 가능한 것으로 생각된다. 따라서 위와 같은 점을 고려하여 이 광산의 가채 광량은 지표에 노출된 광체를 중심으로 대략 1000만 톤 수준으로 평가할 수 있다.

흑산 벤토나이트는 주로 Ca-형 벤토나이트로 이루어져 있고 현재 개발되지 않고 있는 심부 광체만 유사 Na-형 벤토나이트의 성질을 갖는 것으로 분석된다. 품위와 백색 도는 양호한 편이지만, 정제 과정에서 제거되기 어려운 규산 광물들(특히 단백질과 크리스토타발라이트)이 주된 불순물로서 국내의 벤토나이트보다도 많이 혼재되는 것이 문제이다. 흑산 벤토나이트의 광물 특성으로 보아 광유 및 식용유의 정제 등과 같은 화공용으로 개발되는 것이 유리할 것으로 여겨진다. 원광을 특수 처리(인위적인 NA-치환체로 변화시키는 공정) 하지 않는 한 'drilling mud'나 'grouting' 공사에 사용되는 충전 및 방수용 벤토나이트로 사용하기는 어려울 것으로 생각된다. 광산 측에서 앞으로 개발할 예정이라는 부가 가치 높은 제품인 소위 "유기 벤토나이트(학술 명으로는 organophillic bentonite 또는 organoclay)"의 생산도 Na-벤토나이트에 근접하는 성질을 갖는 심부 벤토나이트 광체가 개발되지 않는 한 불가능할 것으로 생각된다.

결론적으로 흑산 벤토나이트 광상을 그 부존량에 있어서 상당한 잠재력이 있지만, 그동안 채굴하기 용이한 광체만을 40년 가까이 채굴해 왔었던 관계로 현재는 채굴 조건이 좋은 고품위 광체는 많이 채진된 실정이다. 광석의 품위는 양호한 편이나 광물의 상품 가치를 결정짓는 제



반 응용 광물학적 특성이 별로 뛰어나지 못한 Ca-형 벤토나이트인 것으로 분석된다. 또한 철로가 개설되어 있고 많은 작업 인력의 동원이 가능하다는 유리한 점도 있지만, 우기의 침수와 동절기의 혹심한 한파로 인한 작업상의 악조건을 고려하면 개발 여건도 좋은 것으로 평가할 수 없다. 따라서 잠두 광체의 규모나 질을 감안하면 이 광산의 개발 잠재력은 클 것으로 여겨지지만, 현재의 여건에서 보면 그 경제성이 낮은 것으로 평가된다.

### 참고 문헌

노진환, 오성진 (1994) 양남지역 제 3기층에 부존하는 벤토나이트의 지구화학 및 광물생성 관계. 한국광물학회지, 7, 111-127.

Christidis, G. and Scott, P.W. (1993)

Laboratory evaluation of bentonites. Industrial Minerals, 51-57.

Grim, R.E. (1968) Clay Mineralogy. McGraw-Hill, New York, 596 p.

Grim, R.E. and Guven, N. (1978) Bentonites: Geology, Mineralogy, Properties, and Uses. Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York, 256 p.

Harben, P.W.(1999) The Industrial Minerals HandyBook. Industrial Minerals Information Ltd., 296 p.

Inglethorpe, S.D., Morgan, D.J., Highley, D.E., and Bloodworth, A.J.(1993) Industrial Minerals Laboratory Manual: Bentonite, Technical Report Series WG/93/20, British Geological Survey, 116 p.

제 5회 산업광물 심포지움

5th IMB Symposium



**Feldspar**  
2004

**장석과 그 응용**

Feldspar and its Application

- 일 시: 2004년 4월 16일 10:00~18:00
- 장 소: 강원대학교 자연대 5호관 101호
- 주 최: 산업광물은행, 한국과학재단
- 등록 및 접수: 9:30~10:00, 개회식: 10:00
- 연락처: 산업광물은행(강원대학교 지질학과 내)
- Tel: 033-250-8560 Fax: 033-242-8560
- homepage: <http://imb.kangwon.ac.kr>



산업광물은행 · 한국과학재단

