

단 보

## 중국 길림성 구태 벤토나이트 광산의 광상 및 광물 특성 평가

노 진 환

강원대학교 지질학과

지난 호에 게재되었던 흑산 벤토나이트 광산에 이어서 같은 취지로 중국 길림성(吉林省)의 대표적인 벤토나이트 광산인 구태(九台) 벤토나이트 광산을 소개하고자 한다. 이 보고의 내용은 필자가 수년 전에 현지를 방문해서 조사한 자료를 토대로 구성된 것이지만, 짧은 조사 기간과 광산 측에서 제공한 한정된 정보와 자료에 의존할 수밖에 없었기 때문에 충분한 조사가 이루어지기 어려웠다. 단지 중국산 광물자원에 대한 국내의 비상한 관심을 고려하여, 부족하나마 구태 광산의 벤토나이트의 개발 여건 및 잠재성, 광물특성 등에 대한 소개를 하고자 한다. 이에 따른 독자들의 현명한 판단과 중국 광산 측의 넓은 이해를 구하고자 한다.

### 개 설

#### 위치, 교통 및 지형

구태 광산은 중국 길림성의 수도인 장춘(長春)에서 북동 방향으로 50km 정도 떨어져 있는 곳에 위치한다. 행정구역상으로는 길림성 구태시의 외곽 도로상에 위치하여 교통이 매우 편리하

다. 또한 광산 근처에 철로가 개설되어 있어 화물 운송에도 유리한 여건을 갖추고 있다.

광산 주변의 지형은 해발 200~250m 높이의 잔구들이 산재되어 대부분 저평원을 이루는, 만주 지역에서는 비교적 높은 산지를 이룬다. 낮은 능선부를 따라 곳곳에 제올라이트(zeolite) 채굴장이 조성되어 인위적으로 지형이 변형된 곳이 많다. 적은 강수량과 이 지방 특유의 점토질 토양 특성으로 인해서 뚜렷한 하계망을 형성하지 못하고 골짜기를 따라 단속적으로 실개천 정도의 흐름이 있을 뿐이다.

#### 광산 연혁 및 현황

길림성 비금속광공공사(非金屬鑛工公司) 소속의 구태 광산은 중국의 주요 벤토나이트(bentonite, 膨潤土) 광산들 중의 하나이다. 연간 생산 규모가 3~5만 톤에 달하는 이 광산은 1959년에 설립되어 그동안 주로 야금 및 주조 공업용 벤토나이트를 생산해 왔었다. 전세계적으로 벤토나이트는 노천 채굴 방식으로 개발되는 데 비해서 이 광산에는 주로 갱도를 개설하여 지하에서 채굴하는 방식으로 벤토나이트의 채광이 이루어지고 있다. 이 광산에서 생산되는

벤토나이트는 중국에서도 드물게 주로 Na-형 벤토나이트이고 제반 응용 특성이 뛰어난 소위 "와이오밍 형(Wyoming-type)"인 것으로 알려져 있다. 또한 Ca-형 벤토나이트도 일부 노천에서 채굴하여 현재 제품으로 출하되고 있다. 중국 내에서 이 광산의 매장량은 600만 톤 정도의 규모인 것으로 평가하고 있다.

### 지질 개요

구태 광산 주변은 주로 중생대 백악기의 최하부층인 관성조(管城組)에 속하는 화산암 및 화산쇄설암류들이 분포한다. 국부적으로 제 3기의 안산암이 피복되기도 한다. 이 지역 부근의 지질 계통을 총괄한 종합 지층 주상도(그림 1)에서 알 수 있는 바와 같이, 관성조는 단순 쇄설성 암상 위주의 상위의 백악기 지층들과는 달리 화

산암 내지 화산쇄설암의 암상이 현저한 지층으로서 대개 1km 이상의 두께로 발달하는 것으로 알려져 있다. 이 광산 주변의 지질을 이루는 관성조는 유문암 및 진주암과 같은 규질 화산암류와 이들의 화산쇄설암류인 유리질 응회암, 역질 응회암, 응회질 사암 및 라필리 응회암 등으로 구성된다. 벤토나이트와 불석 층들은 주로 진주암과 유리질 응회암의 변질암으로서 관성조의 주요 암층을 이룬다.

전체적인 지층 분포나 구성 암상으로 보아, 이 지역의 화산암 및 화산쇄설암들은 퇴적분지 내에서 야기되었던 산성 화산활동의 결과로 형성된 것으로 여겨진다. 관성조의 주향은 다소 불규칙적이거나 대개 N20~60°W이고 20~35°NE의 화산쇄설암층으로 비교적 급경사를 나타낸다. 단층으로는 NW 및 NS 방향의 정단층과 NW 방향의 역단층이 3방향으로 발달하는 것으로 알려져 있다.

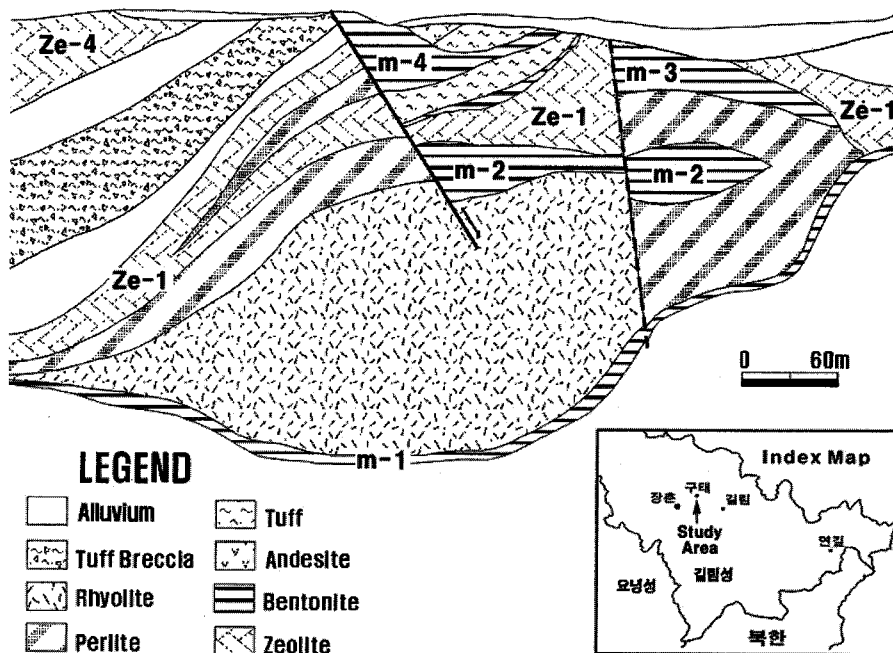


그림 1. 구태 벤토나이트 광산 일대의 지질 단면도.

## 벤토나이트 광산

### 개발 현황

구태 광산은 개발 초기에는 원래 년 간 10만 톤 규모의 채광량과 8만 톤 규모의 제품 생산을 목표로 설계되었던 것으로 알려져 있다. 그 후에 채광 규모를 년 간 5만 톤 그리고 제품 생산량은 3.8만 톤으로 조정되었다. 광산측에 의하면 현재 3~5만 톤 규모의 생산량을 유지해 온 것으로 알려져 있다. 현지 조사 결과 이와 같은 채광 실적과 현황을 확인할 수 있었다.

구태 광산은 채광 작업장, 즉 갱도 입구와 노천 채굴장이 광산 사무소와 제품 처리시설로부터 떨어져 있다. 이 광산은 현재 지하 88~125m에서 심부 광체를 채굴하고 있다. 권양기가 시설되어 있는 사갱을 통해서 지하 100~125m 심도에 개설된 운반 갱도에 이를 수 있다. 운반 갱도를 따라 5~6명이 작업할 수 있는 작업장이 3-4개소 개설되어 있다. 채광 과정에서는 특별한 굴착 장비 없이 인력에 의존하여 채굴되고 있는 것으로 보인다. 권양기가 다니는 사갱은 갱목으로 지보(支保)가 비교적 잘 되어 있지만, 운반 갱도에는 다소 미비된 곳이 흔히 관찰된다. 갱내의 공기 순환은 비교적 양호한 것으로 여겨지나, 운반 갱도에서 볼 수 있는 지하수의 많은 유출은 갱의 안전 유지상 다소 문제가 될 것으로 보인다.

벤토나이트 광석의 처리 시설과 제품의 제조 시설은 통상적인 건식 시설로서 광석의 분쇄, 분급 및 건조로 이어지는 단순한 공정인 것으로 보인다. 따라서 벤토나이트의 품질 개선을 위한 특별한 공정 시설이나 정제 과정은 이루어지지 않고 있는 실정이다. 주로 주철, 주조 및 야금용으로 국내에 출하되고 있는 최근에 농업용 배양토로서 일본으로부터 주문을 받은 것으로 알려져 있다.

이 광산에서는 유용 광물로서 벤토나이트, 제올라이트, 진주암이 산출되는 것으로 알려져 있다. 따라서 중국의 광업 및 재료 관련 연구 기관에서 많은 연구를 수행하여 많은 조사 및 연구 자료들이 보고 되어 있는 실정이다. 또한 이 광산이 갱도 굴진에 의한 개발을 위주로 하기 때문에 체계적이고도 방대한 시추 자료들이 갖추어져 있다.

이 광산은 현재 Na-형 및 Ca-형 벤토나이트에 대한 2개의 광권 및 채굴 허가서(중국에서는 Ca-형 벤토나이트와 Na-형 벤토나이트가 별도의 법정 광물로 취급되고 있음)를 갖고 있다. 그러나 벤토나이트와 산출지가 중첩되는 제올라이트에 대한 광권은, 우리나라의 제도상으로는 다소 이해되지 않지만, 다른 광산에 별도로 인정되고 있는 실정이다. 물론 구태 광산의 상급 기관인 길림성 비금속광공공사에 이 지역 벤토나이트와 제올라이트의 광권 및 채굴권이 총괄된다는 설명이 광산 측으로부터 있었지만, 개발 과정에서 다소 문제가 될 수 있는 소지가 있을 것으로 여겨진다. 그밖에 경량 소재로 활용되는 진주암(perlite)도 많이 부존하는 것으로 조사되었으나 현재 개발은 이루어지지 않고 있는 실정이다. 이는 광석의 품질이 다소 저질이고 열적 팽창 특성이 기준치 이하이기 때문인 것으로 여겨진다.

### 광산의 부존 상황

구태 광산에서 벤토나이트 광산은 중생대 백악기 관성조의 진주암 및 응회암을 원암으로 하여 부존된다. 원암의 분포에 따라 층상으로 부존되고 제올라이트 층이나 진주암층과 함께 산출되는 경향을 보인다(그림 2). 벤토나이트 광화 양상이 원암의 발달 여건에 규제되는 경향이 뚜렷하고 대개 15~35° 정도의 벤토나이트 층으로서는 비교적 급격한 경사를 이룬다. 벤토나이트 광체는 그 부존 상황에 따라 다음과 같이

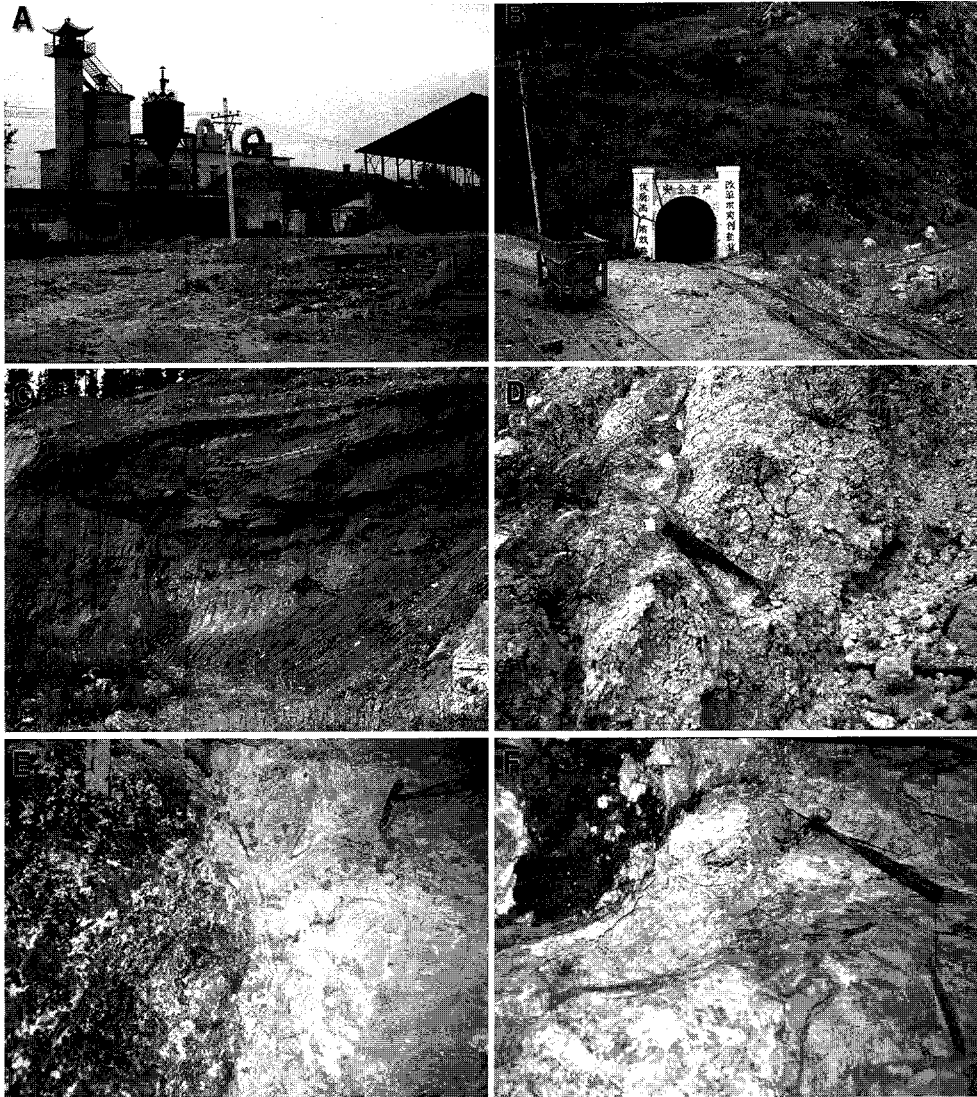


그림 2. 구태 광산의 전경(A, B)과 벤토나이트 광석의 야외(C, D) 및 갱내(E, F)에서의 산출상태.

구분될 수 있다: (1) 이 지역의 주된 화산암인 유문암 및 진주암의 하부에 존재하는 심부 광체, (2) 유문암 상부와 진주암 내에 렌즈상으로 부존하는 광체, (3) 부분적으로 지표에 노출되는 천부 광체. 이들 벤토나이트 광체들은 단층에 의해서 절단되어 그 분포가 사뭇 단속적이지만, 심부 광체는 비교적 정연한 분포를 이루는

경향이 있다.

현장에서 “1호 광체”라고 불리는 광체는 Na-형 벤토나이트로서 현재 이 광산에서 갱내 채굴하는 주된 대상이다. 대개 3~5m 정도의 두께를 이루는 이 광체는 연장성이 좋고 이 광산에서는 가장 질이 좋은 광석들이 산출되는 것으로 알려져 있다(그림 2). 이 광체는 대개 회록색의

벤토나이트로 구성되나 흔히 하부에서는 다소 이질적인 백색의 벤토나이트를 수반하는 경향을 보인다(그림 2). 이 광체 내에는 이 광체의 원암이 진주암이라는 사실을 강하게 시사하는 흑색의 진주암 잔류물들이 흔히 존재한다.

“2호 광체”인 유문암 상위의 광체는 현재 개발되고 있지 않고 있는 광체이다. 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 유문암과 제올라이트 광층 사이에 놓이거나 진주암체 내에서 단속적으로 발달한다. 광산측에서 이 광체에 속하는 광석을 제공하지 않아 그 품질을 알 수 없지만, 시추 자료와 관련 문헌에 의하면 10m 전후의 두께를 이루는 Na-형 벤토나이트인 것으로 알려져 있다. 아마도 그 품위가 다소 저질이거나 제올라이트 광체와의 개발상의 문제 때문에 현재 개발이 유보되고 있는 것으로 사료된다.

“3호 광체”라고 불리는 천부의 벤토나이트 광체는 주로 Ca-형 벤토나이트로서 현재 노천 채굴중이다(그림 2). 단면도 상에서 m-3 또는 m-4로 표시된다. 풍화되면 베이지 색조를 발현하며 제올라이트 광체와 접촉하기도 한다. 광체의 발달이 대개 산정부 쪽으로 20~30°로 경향되어 노천 채굴에 다소 어려움이 뒤따를 것으로 여겨진다.

### 광상의 유형 및 성인

일반적으로 벤토나이트 광상은 속성 작용, 열수변질 작용 및 풍화 작용에 의해서 형성되는 것으로 알려져 있다. 대개의 경우 속성 작용이 주된 생성 요인이 되지만, 여기에 열수 작용이나 풍화 작용이 부가되어 벤토나이트의 형성에 관여되는 경우가 많다. 이와 같은 경우에는 광물의 특성이나 광체의 부존 상황이 다소 복합적인 양상을 나타낸다.

구대 벤토나이트 광상은 지질 시대는 다르지만 우리나라의 구룡포 일대의 제올라이트 및 벤

토나이트 광상과 지질 여건이나 광상 유형이 유사하다. 구대 벤토나이트 광산은 대부분의 벤토나이트 광상이 그렇듯이 화산 유리질 암석에 광체가 부존한다. 그러나 원암이 대부분 유문암류의 수화 변질된 형태인 진주암질 암석이라는 점에서 이 광상의 특색이 있다. 지질 개요에서 언급한 바와 같이 이 지역은 퇴적 분지 부근에서의 산성 화산 활동의 결과로서 유문암류 및 응회암류 그리고 이들의 변질암인 진주암이 주된 암석상을 이룬다. 이와 같은 화산 활동이 호성 퇴적 분지 근처에서 이루어졌다는 것은 수화 변질암의 형태인 진주암과 응회질 사암이 존재한다는 사실로서 유추될 수 있다.

일반적으로 화산암류는 화학적으로 불안정한 유리질 성분으로 대부분 구성되기 때문에, 물과 접촉하면 쉽게 변질되어 스멕타이트나 제올라이트 광물질로서 전이되게 된다. 이 과정은 변질 용액의 기원에 따라 속성 작용 또는 천열수 작용으로 구분할 수 있지만, 실제로는 그 구분이 다소 모호한 경우가 많다. 일반적으로 유화 광물의 배태가 현저하지 않고 주위에 열수를 공급할만한 관입암체가 존재하지 않는한 속성 작용의 결과로 간주하는 경향이 있다. 구대 벤토나이트 광상도 이와 같은 관점에서 기본적으로는 속성 작용에 의해서 형성된 것으로 여겨진다.

벤토나이트의 생성 메커니즘을 이해하는 것은 광상의 부존 상황과 광석의 특성을 이해하는 데 중요하다. 원암의 화산 유리질 성분이 스멕타이트군(smectite group) 점토 광물인 몬모릴로나이트(montmorillonite)로 변질됨으로써 벤토나이트가 형성된다는 것은 주지의 사실이다. 따라서 유리질 원암이 수화 및 변질되는 과정에서 벤토나이트의 주된 구성 광물이 어떻게 생성되고 이 과정에서 화학 성분들의 유동이 어떻게 진행되는지를 파악해야만 광체의 부존 상황과 광석의 특성을 잘 이해할 수 있을 것이다.

이 지역에서의 벤토나이트 광화작용 과정을

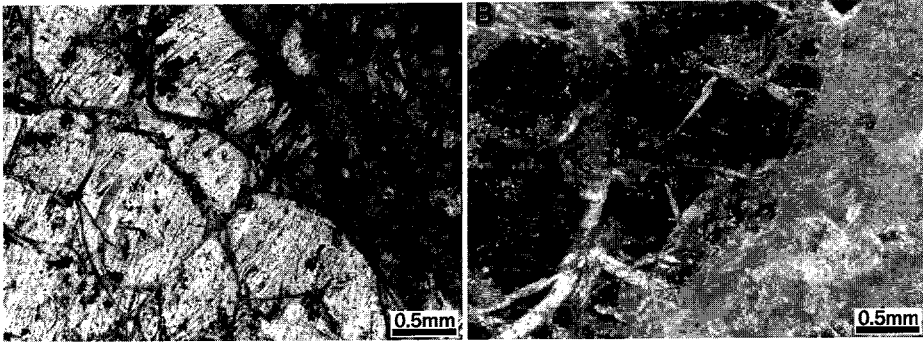
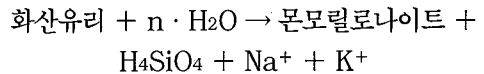


그림 3. 구태 광산에서 진주암질 암석에서 산출되는 벤토나이트의 편광현미경 사진.

보다 명확히 파악하기 위해서, 부분적으로 벤토나이트화된 진주암편을 편광현미경하에서 관찰하였다(그림 3). 진주암의 신선한 부분은 진주암 특유의 소위 “perlitic texture”가 발달하고 비정질의 유리질 성분이 바탕을 이룬다. 이 유리질 성분들이 열극에 다소 규제되는 경향을 보이면서 극미립의 몬모릴로나이트로 변질되는 과정이 잘 관찰된다(그림 3). 이 과정에서의 화학 성분들의 유동 상황을 파악하기 위해서 극소 면적에서의 미세 화학분석법인 전자현미 분석(electron microprobe analysis)을 시도하여 신선한 유리질 성분과 변질된 부분의 화학 조성을 대비해 보았다(표 1).

표 1에서 알 수 있는 바와 같이 진주암의 조성이라고 볼 수 있는 유리질부는 매우 규질이고 알칼리가 비교적 풍부함을 알 수 있다. 또한 여기서 전자현미 분석법으로 분석될 수 없는 H<sub>2</sub>O의 함량을 분석 차감량으로 간접적으로 추산하면 유리질부는 5.33wt%, 변질부는 16.73wt%로 계산된다. 이 계산치는 함수유리질 암석인 진주암과 몬모릴로나이트에서의 함수

량에 근접하는 값인 것으로 여겨진다. 이 양자의 함수량을 대비하면 벤토나이트의 광화 과정에는 당연히 많은 양의 물이 개입되어야한다는 사실을 알 수 있다. 화학 성분들간의 유동 관계는 위의 성분 대비표를 비교하면 그 증감 관계를 쉽게 파악할 수 있을 것이다. 통상적으로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성분은 변질 과정에서 비유동적 성향, 즉 잔류 짐적된다는 점을 고려하여 성분을 대비하면, 벤토나이트화 과정에서 SiO<sub>2</sub>와 알칼리 성분(Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O)의 용탈과 알칼리 토금속 성분(CaO, MgO)의 상대적인 부화 양상이 뚜렷하다는 사실을 알 수 있다. 이와 같은 화학 성분 유동 관계를 고려하여 벤토나이트화 과정을 모식적인 화학 반응식으로 표현하면 다음과 같다.



위와 같은 성분 유동 관계는 화산쇄설암류의 속성 변질 과정에서 흔히 볼 수 있는 반응 과정으로서, 이에 의거하여 구태 지역 벤토나이트

표 1. 벤토나이트화된 진주암편의 전자 현미 분석(ESPM) 결과(wt%).

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Total
유리질부	75.44	0.03	12.52	0.44	0.45	1.58	1.49	2.72	94.67
변질부	62.83	0.07	14.25	0.72	1.42	2.24	0.66	1.08	83.27

광체의 광화작용의 성격을 설명할 수 있을 것으로 여겨진다. 이 지역 벤토나이트 광체간에 인지되는 산출 양상 중에서, 보다 심부에 Na-형 벤토나이트가 부존되고 지표 가까이에서는 주로 Ca-형 벤토나이트가 형성된다는 것은 이 광산의 개발에 있어서 매우 중요한 사항이다. 이와 같은 산출상의 특징은 위의 반응식에서 말해주듯이 초기에 야기된 벤토나이트화 과정에 용탈된 알칼리 성분들이 지하 심부로 유입됨으로써 Na-형 벤토나이트를 형성시킬 수 있는 개연성을 시사한다. 물론 원암의 조건에 따라 이와 같은 성향을 보일 수도 있지만, 이 지역에 화산암체가 성분적으로는 비교적 균일한 유문암적 조성을 갖는다는 점을 고려하면 이와 같은 해석은 배제될 수 있는 것으로 사료된다.

### 광산의 규모 및 매장량

구태 광산의 벤토나이트 광산의 규모를 산정하는 데에는 (1) 이 광산이 특이하게 갱도 굴진을 통한 심부 개발을 위주로 한다는 점과, (2) 동일한 광구에 제올라이트 광체가 혼재된다는 점이 고려되어야 할 것이다. 중국 측에서 제공한 광구 및 광상 규모도와 각 지점에서 시추한 자료를 검토하면, 개발 심도에 따라 매장량의 산정치가 크게 달라진다. 약 5.5km<sup>2</sup>에 달하는 광구공제 범위 내에서 D급 광석까지 합하면 최고로 5000만 톤 정도까지 산정될 수 있는 규모로 보고 된바 있다. 그러나 이 광산에서 실제 개발되고 있는 것은 몬모릴로나이트의 품위가 50~70%정도의 B 및 C급 광석이라는 사실과 심부 개발의 경우에는 채굴 한계(-200m 정도)가 엄연히 존재한다는 점을 고려하면 위와 같은 추산은 현실적으로 너무 거리가 있는 수치인 것으로 생각된다.

이 광산의 심부에 발달하는 1호 및 2호 광체에서 Na-형 벤토나이트의 규모를 광산 측에서 제

공한 시추 자료를 토대로 추산하면 대략 600만 톤 정도의 광량이 인정될 수 있을 것으로 여겨진다. 기왕에 100~125m 정도의 깊이까지 갱도가 개설되어 있고 심부 광체의 연장성이 비교적 양호한 것으로 보고 되어 있다는 점을 고려하여 이와 같은 산정이 가능하다. 1982년에 보고된 “길림성 구태광산 팽윤토 및 불석광상 지질보고”에서 Na-형 벤토나이트의 매장량은 B급 (195만 톤)과 C급 (504만 톤)을 합쳐서 700만 톤 정도로 평가된 바 있다. 또한 길림성 ‘비금속광공공사’에서 최근에 발간된 보고서에 의하면 지하 125m 기준으로 616만 톤의 매장량에 가채광량을 380만 톤 정도로 산정하고 있는 실정이다.

중국의 값싼 노동력과 현재 심부 갱도가 개설되어 있다는 점을 고려하면 지하 150m 전후까지는 개발이 가능할 것으로 여겨진다. 그러나 광체로 설정한 C급 광석 중에서 몬모릴로나이트 함량이 60% 이하의 저질 광석들은 경제성이 없다는 점을 고려하면 이 광산의 Na-형 벤토나이트의 매장량을 600만 톤 규모로 평가하는 것이 타당할 것으로 여겨진다. 여기서 이 광산의 채굴 조건, 채굴 실적 및 개발 기술 정도로 미루어 보아 회채율을 70% 정도로 설정하여 대략 400만 톤 정도의 가채 광량을 인정할 수 있을 것으로 여겨진다.

Ca-형 벤토나이트의 광량을 대개 0.5km<sup>2</sup>의 광체 부존 면적을 보이는 3호 광체를 기준으로 도면상으로는 거의 300만 톤 정도의 매장량을 나타낸다. 그러나 광층이 산정부를 향하여 비교적 급경사를 이루며 분포하고 주위에 제올라이트 광체가 곳곳에 밀접하게 산재되어 있기 때문에 노천 채굴 여건이 좋지 않은 상태이다. 또한 Na-형 벤토나이트보다 상대적으로 상품 가치가 떨어지기 때문에 개발 단가가 많이 드는 갱도 개설을 통한 개발이 현실적으로 어렵다는 점을 고려해야 할 것이다. 따라서 고품위 부분만

을 노천 채굴 방식으로 개발해야하므로 실제로는 가채 광량으로 대략 100만 톤 정도의 규모가 인정될 수 있을 것으로 여겨진다. 그러나 이 Ca-형 벤토나이트 광체는 제올라이트와의 동시적인 개발이 불가할 경우에는 위에서 산정된 수치보다 그 잠재성이 크게 평가절하 될 것으로 여겨진다.

## 광물 특성

### 물리적 특성

구태 벤토나이트는 그 유형과 원암 조건 및 불순물의 내용 등에 따라 색깔이 다양하게 나타난다. Ca-형 벤토나이트(시료번호: 2-2 또는 C)는 신선한 경우에는 대개 선홍색을 보이지만 풍화되면 베이지 색을 띠는 경향이 있다. 일반적으로 Na-형 벤토나이트 보다 밝은 색조를 이루고 보다 토상의 연성 물성을 나타낸다. 건조되면 벤토나이트 특유의 소위 “popcorn-like appearance”를 잘 나타낸다. 이에 비해서 Na-형 벤토나이트는 보다 경질이고 회록색(시료번호: B-1), 회흑색 및 순백색의 다양한 색깔을 보인다.

Na-형 벤토나이트는 회록색 광석(시료 번호: B-1)과 순백색의 광석(시료 번호: A-1)이 비교적 뚜렷한 경계를 이루며 산출된다. 회록색 벤토나이트가 주된 광석 유형이고 회흑색을 띠는 광석은 진주암의 색상이 잔존된 것으로 보다 경질이고 대개 저품위를 이룬다. 순백색을 띠는 벤토나이트는 최근 제약 및 화장품 공업에 고가로 활용되는 소위 “white bentonite”와 유사한 색깔과 물성을 나타낸다. 현재 이 광산에서는 회록색 광석과 순백색 광석을 구분하지 않고 혼합하여 Na-형 벤토나이트 제품을 생산하고 있는 바, 이는 앞으로 시정되어야 할 것으로 여겨진다.

### 광물 조성 및 품위

구태 벤토나이트 원광들의 광물 조성 and 조적 그리고 불순물을 감정하기 위해서 X-선회절 분석(XRD)과 주사전자현미경(SEM) 관찰을 시도하였다. 원광들의 X-선회절 분석도(그림 4)에서 알 수 있는 바와 같이 구태 벤토나이트들은 전형적인 몬모릴로나이트 유형의 광물상을 나타낸다. 불순 광물로는 단백석(opal-CT) 내지 크리스토팔라이트(cristobalite) 유형의 규산 광물(silica mineral)들이 주요 불순물을 이루고 그밖에 원암에서 잔존된 장석류와 Ca-형 벤토나이트에서만 수반되는 제올라이트 광물인 클리놉틸로라이트(clinoptilolite), 고령석(kaolinite) 등이 함유된다.

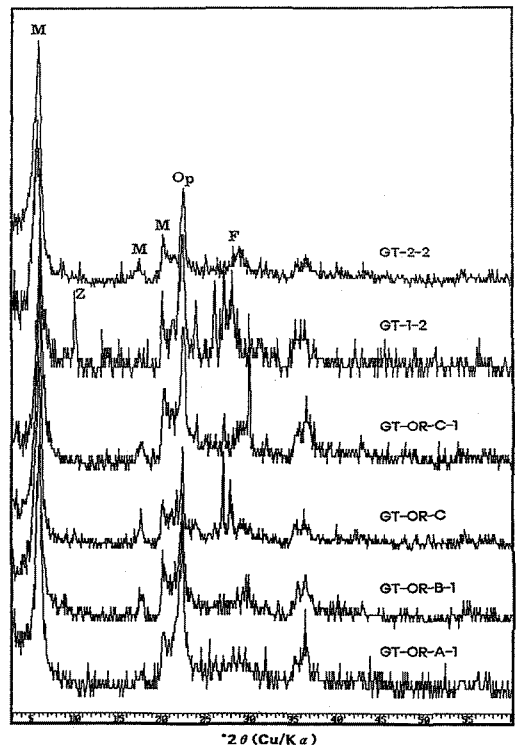


그림 4. 구태 벤토나이트 원광의 X-선회절분석도.  
M: montmorillonite, Z: zeolite, Op: opal-CT, F: feldspar



Na-형 벤토나이트의 몬모릴로나이트들은 결정립의 윤곽이 뚜렷하지 않고 비교적 판상을 이루는 경향이 있다(그림 5). Na-형 벤토나이트가 Ca-형보다 규산 광물들이 보다 많이 함유된다. 몬모릴로나이트는 흔히 크리스토팔라이트와 밀접한 공생 관계를 보이며 산출된다. 규산 광물들은 몬모릴로나이트와 마찬가지로 1~2 $\mu\text{m}$  정도의 크기립을 이루고 흔히 미세 공극 내에 집중되어 산출되는 경향을 나타낸다(그림 5).

이는 이 규산 광물들이 광물 생성 순서상 광화 작용 말기에 공극 충전상으로 규질의 잔류 용액으로부터 침전되었음을 지시한다. 따라서 원암의 조성이 보다 규질일수록 규산 광물이 보다 많이 혼재될 수 있는 개연성을 시사한다. Ca-형 벤토나이트는 상대적으로 규산 광물의 함유도가 낮고 곳에 따라 제올라이트 광물을 수반하는 것

이 특징이다. 결정립의 윤곽이 보다 뚜렷하고 대개 2~3 $\mu\text{m}$  크기의 균일한 입도를 이룬다(그림 5). 결정립들의 만곡 현상이 두드러지며 전체적으로 벌집 모양(honeycomb texture)의 집합체를 이루는 경향이 있다. 지표에서 풍화가 심하게 진행된 Ca-형 벤토나이트는 2차적인 변질 광물로서 고령석이 수반되기도 한다. 몬모릴로나이트의 (hk0)의 회절선의 강도를 규산 광물의 회절선의 강도와 비교하여 벤토나이트 내의 몬모릴로나이트 함량을 반정량적으로 구해보았다. 이 결과에 의하면 구태 벤토나이트 원광의 품위는 대개 55~75wt%로서 B~C급 광석에 해당된다. Na-형 및 Ca-형 벤토나이트 모두 규산 광물들이 주요 불순물을 이룬다. 이 불순 광물의 함유도는 Na-형의 경우 20~30wt%, Ca-형 몬모릴로나이트의 경우에는 10~20wt%

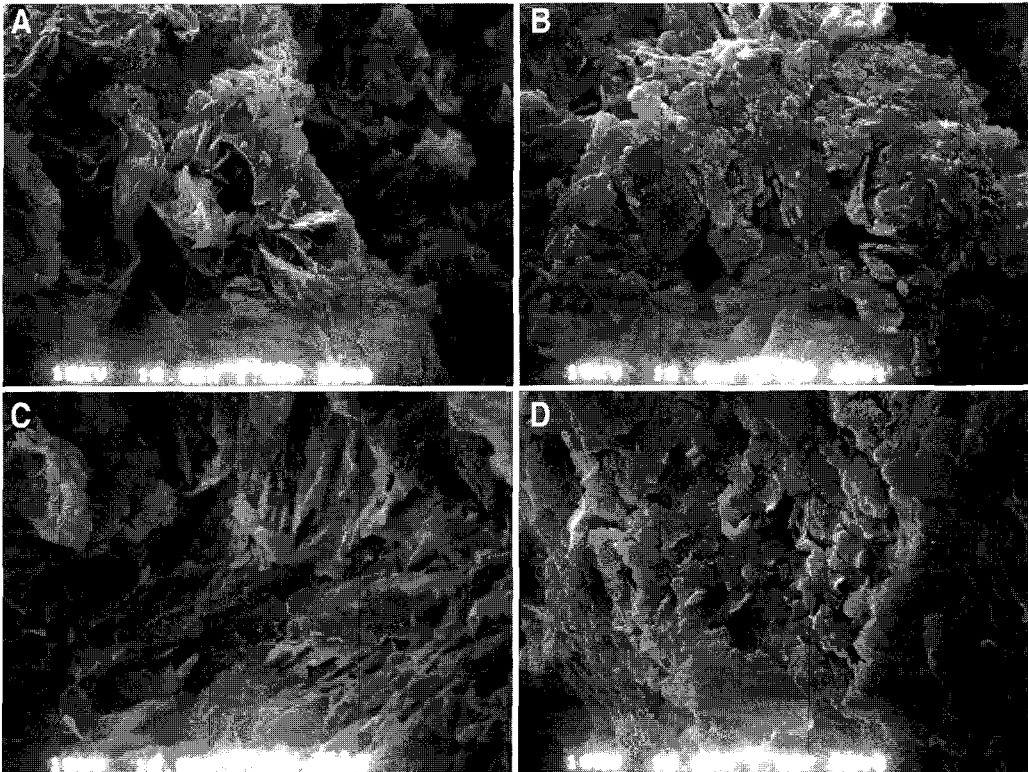


그림 5. 구태 광산에서 산출되는 벤토나이트의 주사전자현미경(SEM) 사진.

정도 함유되는 것으로 분석된다. Na-형 벤토나이트에서는 회색의 광석보다 순백색의 광석이 규산 광물을 보다 많이 함유하는 것으로 나타난다. 회색의 광석은 규산 광물외에 변질 않은 원암의 유리질 성분까지도 많이 함유되어 광석으로 사용하기는 어려울 것으로 생각된다. 이 규산 광물들은 벤토나이트의 상업적 특성을 저하시킬뿐더러 몬모릴로나이트에 비해서 물성적으로 훨씬 경질이기 때문에 활용시에 사용 장비나 기기의 마모를 가져오는 심각한 불순물이다. 이에 비해서 제올라이트나 장석은 연질이고 팽윤성은 없으나 몬모릴로나이트와 유사한 화학적 특성을 지니므로 약간 함유될 경우에는 별로 심각한 문제가 되지 않는다. 통상 벤토나이트에서 심각한 불순물이 될 수 있는 함철 광물들은 이 벤토나이트에서는 거의 함유되지 않는 것으로 분석된다. 이는 원암이 원래 Fe의 함유도가 지극히 낮은 규질 화산암 및 화산쇄설암류인 것에 기인하는 것으로 사료된다.

광석의 처리 과정과 제품 공정에서 이와 같은 불순물들의 제거는 효과적으로 이루어지지 않고 있는 것으로 보인다. 구태 광산에서 생산하는 2가지 종류의 벤토나이트 제품, 즉 Na-형 벤토나이트(시료번호: GT-PR-A-1)와 Ca-형 벤토나이트(GT-PR-C)를 X-선회절 분석을 해본 결과, 광석과 별다른 차이 없이 규산 광물이 많이 검출되었다. 흑산 광산의 제품들과 비교되도록 그 결과를 그림 15에 도시하였다. 구태 광산 제품들은 흑산(黑山) 광산의 제품들 보다 규산 광물을 더 많이 함유하고 있는 것으로 분석된다. 또한 원광 중에 존재하지 않았던 석영이 검출되는 것이 특기할만한 사실이다. 흑산 광산 제품에서도 볼 수 있는 이와 같은 양상은 아마도 건조과정중에 규산 광물들 중의 일부가 석영으로 전이된 것으로 해석된다. 벤토나이트의 제품 공정에서 필수적으로 벤토나이트 분말을 건조시킬 목적으로 열풍 처리하게 되는데, 이 과정에서

너무 고온으로 처리되었기 때문인 것으로 여겨진다. 즉, 과도한 가열 효과의 결과로, 규산 광물( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )→석영( $\text{SiO}_2$ )+ $\text{H}_2\text{O}$ , 반응이 진행되었기 때문인 것으로 사료된다. 이와 같은 과도한 열처리에 의한 영향은 제품에서 몬모릴로나이트의 (001)의 X-선회절 강도가 원광보다 현저히 감쇄되는 현상에서도 찾아 볼 수 있다. 일반적으로 몬모릴로나이트는 100℃ 이상의 온도로 가열하면 층간수의 이탈과 동시에 층간 구조가 협착되어 몬모릴로나이트의 팽윤특성 (swelling property)을 잃게 되는 것으로 알려져 있다. 따라서 구태 광산의 벤토나이트 제조 공정에서 건조 과정은 효과적으로 이루어지지 않는 것으로 보여 지는 바, 이에 대한 시급한 개선이 요청된다.

구태 벤토나이트는 국내에서 산출되지 않는 Na-형 벤토나이트가 주된 광석 형태를 이룬다는 점에서 이 광산의 경제적 잠재성이 인정될 수 있다. 그러나 불순물로서 규산 광물이 많이 혼재되는 관계로 그 품위는 양호하지 못한 것으로 평가된다.

또한 제품의 제조 공정이 단순한 분체 및 건조 과정으로만 이루어져 있기 때문에 효율적인 품질 개선이 되지 않고 있는 실정이다. 그럼에도 불구하고 중국 내에서도 드물게 Na-형 벤토나이트를 생산하기 때문에 이 광산이 과거 40년 가까이 개발되어 온 것으로 여겨진다. 이 광산의 제품을 개선하고 보다 고부가가치 제품을 개발하기 위해서는 기본적으로 공정상 정제 과정의 보완이 이루어져야 할 것이다. 우선 규산 광물의 함유도를 적어도 10wt% 이하로 낮출 수 있는 정제 공정이 개발되어야 하고 건조 처리 방식도 개선되어야 할 것이다. 이와 같은 벤토나이트 제품의 품질 개선을 위해서는 현행의 건식 공정에 싸이클론(cyclone)을 이용한 습식 정제 공정과 원광 특성에 맞는 건조 시설 등이 보완적으로 적용되어야 할 것이다. 또한 현재 구

분하지 않고 함께 Na-형 벤토나이트 제품으로 개발하고 있는 회록색 및 순백색 벤토나이트들은 이들의 물성 특히 불순물 함유도가 현격히 다르기 때문에 앞으로는 별도로 취급되어야 할 것이다.

## 화학 조성

구태 벤토나이트의 원광 및 제품들의 화학 조성을 구하기 위해서 실온에서 3일간 방치된 시료를 대상으로 X-선형광 분석법으로 화학 분석을 하였다. 분석 과정에서 물의 함량에 의한 승화성 원소들의 검출 정도를 검증하기 위해서 105℃에서 작열시킨 건조 시료와 수화 상태의 천연 시료를 각기 분석하여 비교해 보았다. 여기서 작열감량(Loss on ignition: L.O.I.)은 벤토나이트중의 물과 승화성 원소들의 함량을 의미하는 것으로 간주될 수 있다. 시료의 전처리 과정이 일률적일 경우에 벤토나이트의 상대적인 품위를 간접적으로 나타내는 수치가기도 하다. 벤토나이트의 일반적인 화학 조성은 천연 상태의 분석치로서 표현된다. 여기서 벤토나이트중의 물의 함량은 100%에서 분석 총합을 빼 값으로서 가늠될 수 있다.

구태 벤토나이트 원광들의 화학조성상 특징은 높은 (1)  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  함량비와 (2) 비교적 높은  $\text{Na}_2\text{O}$  함량 그리고 (3) 비교적 낮은  $\text{FeO}$ 와  $\text{MnO}$  함량이라고 말할 수 있다(표 2). 상대적으로 높은 Si 함유도는 규산 광물이 많이 함유하는 것에 기인한 것으로, 흑산 광산의 벤토나이트들보다도 높은 값을 보인다. 특히 Na-형 벤토나이트 광석들이 Ca-형 보다 현저하며, 그 중에서도 순백색의 광석이 가장 높은  $\text{SiO}_2$  함유도를 보인다.  $\text{SiO}_2$ 의 함유도는 규산 광물의 함량, 광석의 경도 및 백색도와 상응하는 상관 관계를 나타내는 것으로 여겨진다. 벤토나이트 제품의 분석치에서도 Na-형의 경우 68%에 달할 정도

로 매우 높은  $\text{SiO}_2$  함유도를 보이는 바, 이는 효과적인 정제 공정이 이루어지지 않고 있다는 사실을 단적으로 시사하는 것으로 생각된다. 이 방면의 선진국들의 제품들이 55~60wt% 범위의  $\text{SiO}_2$  함량을 나타낸다는 사실을 감안하면, 앞으로 이 광산에서  $\text{SiO}_2$  함량을 60% 이하로 줄일 수 있는 정제 방안을 시급히 마련해야 할 것이다.

구태 광산의 벤토나이트 광석들이  $\text{Na}_2\text{O}$  함량이 2.5wt% 이상의 비교적 높은 값을 보인다는 것은 이 벤토나이트들이 대부분 Na-형 벤토나이트라는 것을 시사한다. Ca-형 벤토나이트도 비교적 높은  $\text{Na}_2\text{O}$  값을 보이지만, Na-형에 비해서는  $\text{Na}_2\text{O}/\text{CaO}$ 의 함유비가 상대적으로 낮은 수치를 나타내는 것으로 구분될 수 있다.  $\text{CaO}$ 의 함유량은 Na-형 벤토나이트로는 전반적으로 높은 값을 보인다. 비교적 낮은 금속 원소들(Fe, Mn, Ti)의 함유도는 원암이 산성의 규질 화산암류인 것에 기인한 것으로 벤토나이트의 백색도와 유관한 응용 분야에서는 품질면에서 유리한 조건이 될 수 있을 것으로 여겨진다.

요컨대 구태 벤토나이트 광석들은 Na-형 벤토나이트 위주의 광석인 관계로 질(quality)적으로는 좋으나 품위 및 등급(grade) 면에서는 떨어지는 것으로 평가된다. 이는 전적으로 원암의 조건, 즉 규질이 높은 알칼리 함유도를 갖는 산성 화산암류인 것에 기인하는 것으로 해석된다. 따라서 앞으로 이 벤토나이트를 효율적으로 개발하는 데에는 정제 공정을 개선하는 것이 중요하고도 시급한 과제일 것으로 여겨진다.

## 팽윤성 및 물리화학적 특성

구태 벤토나이트 광석과 제품들은 300mesh 이하로 분쇄하여 20ml의 벤토나이트를 물 200ml에 산포시켜 그 팽윤도와 산포성(dispersion property)을 조사해 보았다. 그럼

표 2. Na-형 및 Ca-형 벤토나이트 원광과 제품들(Na- 및 Ca-형)의 화학성분.

시료 성분	Na-형 벤토나이트 원광						Ca-형 벤토나이트 원광			제 품		
	A-1	A-2	B-1	B-2	C-1	C-4	C-6	OR-C-1	OR-C-2	2-2	PR-A*	PR-C*
	건조시료											
SiO <sub>2</sub>	78.56	78.88	75.10	76.26	77.66	75.08	77.03	72.16	76.75	75.33	76.17	73.82
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.48	13.65	15.10	14.41	13.81	14.63	13.66	17.79	14.44	15.48	14.27	16.14
FeO	1.54	0.93	2.65	1.99	1.85	1.78	1.71	2.04	1.91	1.82	1.94	2.16
TiO <sub>2</sub>	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.00	0.01	0.03	0.03	0.01	0.03	0.05
MnO	0.06	0.10	0.04	0.07	0.09	0.08	0.07	0.17	0.16	0.18	0.07	0.10
CaO	1.38	1.78	1.64	1.81	2.06	1.41	1.62	2.28	1.91	1.89	1.76	1.91
MgO	2.36	1.92	2.38	2.01	1.99	1.38	2.04	2.53	2.15	2.83	1.88	1.96
K <sub>2</sub> O	0.28	0.55	0.18	0.40	0.24	1.19	0.24	1.15	0.28	0.46	0.74	1.51
Na <sub>2</sub> O	2.84	2.81	2.89	2.88	2.90	3.15	2.93	2.81	2.70	2.68	2.88	2.75
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.04
L.O.I	19.43	17.55	19.51	18.17	17.32	14.86	21.28	17.90	18.50	18.79	12.85	17.61
	천연시료											
SiO <sub>2</sub>	65.66	67.51	62.84	65.54	66.34	65.84	65.15	61.49	65.95	64.09	67.94	63.82
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.26	11.58	12.70	12.29	11.76	12.83	11.62	15.15	12.41	13.08	12.66	13.90
FeO	1.31	0.81	2.26	1.74	1.62	1.58	1.51	1.80	1.69	1.59	1.77	1.92
TiO <sub>2</sub>	0.09	0.10	0.14	0.20	0.12	0.09	0.16	0.16	0.17	0.15	0.12	0.16
MnO	0.05	0.09	0.03	0.06	0.08	0.07	0.06	0.16	0.15	0.16	0.06	0.09
CaO	1.18	1.56	1.39	1.60	1.82	1.25	1.40	2.02	1.68	1.64	1.60	1.69
MgO	1.94	1.61	1.96	1.70	1.70	1.18	1.67	2.16	1.87	2.36	1.66	1.64
K <sub>2</sub> O	0.24	0.46	0.14	0.34	0.20	1.05	0.20	0.96	0.23	0.38	0.66	1.29
Na <sub>2</sub> O	2.81	2.78	2.85	2.84	2.86	3.08	2.87	2.69	2.70	2.68	2.86	2.74
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.04
Total	84.56	86.52	84.33	86.32	86.51	86.99	84.64	85.61	86.85	86.13	89.34	87.28

FeO: total iron, L.O.I.: loss on ignition, \*PR-A: Na-형, PR-C: Ca-형 벤토나이트 제품

6에서 볼 수 있는 바와 같이 구태 벤토나이트가 원광 및 제품 모두 매우 우수한 산포성과 팽윤도를 나타내었다. 특히 산포성에 있어서 매우 뛰어난 특성을 보이는 것으로 평가되었다. 흑산 벤토나이트와 비교한 그림 6에서 그 우수성이 명확히 인지된다. 구태 벤토나이트 제품들은 산포시킨 후 50일이 지나도 일부만 침강되고 대부분 졸(sol) 상태를 유지하는 뛰어난 교질 특성(colloidal property)을 갖는다(그림 6B).

'Free-swelling Method' 로 구태 벤토나이트의 팽윤도를 측정해 본 결과, Na-형 벤토나이트는 950%/month, Ca-형 벤토나이트는 300%/month 그리고 흑산 벤토나이트는 360%/month의 팽윤성을 나타내었다. 이와 같은 구태 Na-형 벤토나이트의 우수한 팽윤성 및 산포성으로 미루어 볼 때, 이 벤토나이트를 'drilling mud' 나 기타 토목 공사용 제품으로 개발하는 것이 유리할 것으로 여겨진다.

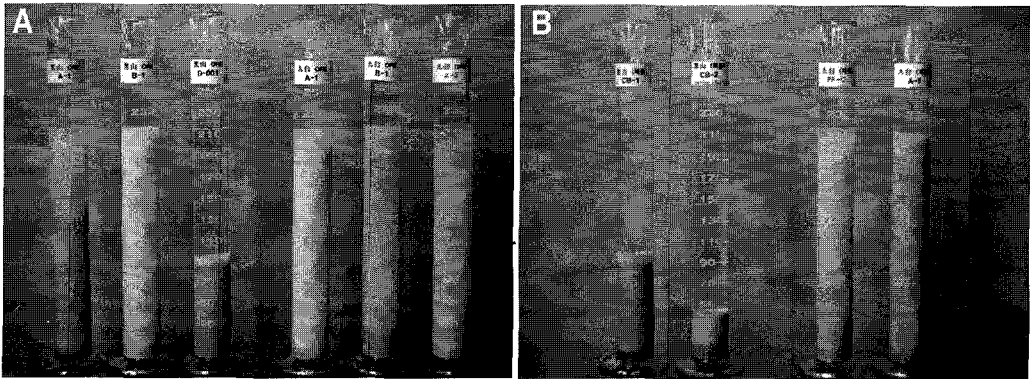


그림 6. 구태 및 흑산 벤토나이트 원광과 제품의 팽윤도 및 산포성 비교 사진.

표 3. 벤토나이트에서 용출된 용액의 pH와 교환성 Na<sup>+</sup> 이온 농도

농도	시료번호	원 광			제 품	
		OR-A-1	PR-B-1	OR-2-2	PR-A-1	PR-C
pH		9.7	9.8	7.7	9.5	8.0
ENa <sup>+</sup> /100g(me.%)		32.0	29.8	27.2	32.2	25.4

물에 산포되었을 때, 용액의 pH 수치는 Na-형 벤토나이트는 약알칼리성(pH: 9.5~9.8)을 띠고 Ca-형 벤토나이트는 중성에 가까운(pH: 7.7~8.0) 값을 보였다(표 3). 이 분석 결과에 의하면 구태 벤토나이트는 소위 '산성 백토(acid clay)'의 성향을 보이는 광석은 없는 것으로 사료된다.

구태 벤토나이트의 양이온 교환 특성을 조사하기 위해서 1M 암모늄아세테이트(ammonium acetate) 용액으로 벤토나이트 시료를 용탈시켜서 알칼리 이온들의 농도를 원자흡광 분석기(A.A.)로 분석하였다(표 4). 분석 결과, K<sup>+</sup>은 거의 검출되지 않았고 Na<sup>+</sup>이 많이 검출되었다. 이는 구태 벤토나이트의 교환성 양이온이 주로 Na이라는 사실을 시사하는 것으로 여겨진다. 또한 시료를 암모늄 이온으로 치환시킨 후에 NaCl 용액으로 역치환 시킨 용액을 증류법(distillation method)으로 양이온 교환 능력(CEC)을 분석해 본 결과, 이 벤토나이트들은

50~60meq/g 정도의 비교적 낮은 값을 갖는 것으로 밝혀졌다. 이는 불순물로서 양이온 교환 특성이 없는 규산 광물들이 많이 혼재되는 것에 기인한 것으로 여겨진다. 앞으로 정제 공정이 보완되면 양이온 교환 능력은 크게 개선될 수 있을 것으로 생각된다.

### 열적 특성

구태 벤토나이트의 주된 광물 성분인 몬모릴로나이트의 광물 유형을 감정하고 벤토나이트의 수화 정도, 열적 안정성 및 소성 능력을 검증하기 위해서 시차열분석을 시행하였다. 승온을 10℃로 1100℃까지 DTA, TG 및 DTG 방식으로 가열 실험하였다. 이해를 돕기 위해서 일반적으로 잘 알려져 있는 몬모릴로나이트의 DTA 분석 곡선의 양상을 도시하였다(그림 7). 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 몬모릴로나이트의 유형은 열화학적 반응 양상에 따라 소위 "Cheto

형”과 “Wyoming 형” 그리고 그 중간 형태로 구분된다.

구태 광산의 벤토나이트 원광들은 불순물인 단 백석과 제올라이트 광물들의 함유 정도에 따라 그 DTA 분석 곡선의 양태가 다소 다르게 나타나지만, 대개 몬모릴로나이트 특유의 흡열 반응대, 즉 (1) 100℃ 근처에서의 층간수 이탈 반응, (2) 670℃ 부근에서의 OH기 이탈 반응 및 구조 붕괴, 그리고 (3) 860-900℃ 범위에서의 소결(sintering) 반응대가 인지된다(그림 8). 흑산 벤토나이트와 비교한 그림 7에 나타나는 바와 같이 이 벤토나이트들은 모두 “Cheto 형”과 “Wyoming 형”의 중간 유형에 속하는 것으로 해석된다(그림 7). 또한 구조상 층간 양이온으로서의 존재를 시사하는 170℃ 부근의 소위 “shoulder peak”의 수반 양상을 근거로, 심부 벤토나이트 광석들(GT-OR-A-1, GT-OR-B-1)은 Na-형 벤토나이트이고 지표부의 벤토나이트

광석들(GT-OR-C-1, GT-1-2)은 흑산 광석들과 마찬가지로 Ca-형 벤토나이트임을 알 수 있다.

열중량 분석(TG 및 DTG) 결과에서 수분의 탈수 반응 과정이 명확히 해석되는데, 그 반응 추이와 탈수 정도를 정리하여 그림 7과 표 4에 나타내었다. TG 반응 곡선상에서는 별다른 차이를 보이지 않으나, 이를 미분한 곡선이 DTG 상으로는 Ca-형 벤토나이트와 Na-형 벤토나이트가 200℃ 이전의 층간수 이탈 과정에서 분명한 차이를 보인다. 즉, Na-형 벤토나이트는 주 반응대의 탈수 추이에 있어서 이원적인 정점을 이루는 DTG 곡선을 형성하는 데 비해서, Ca-형 벤토나이트는 주 반응대에서는 하나의 정점을 이루고 Ca 이온과 연관된 물의 이탈로 보여지는 부수적인 정점을 이루는 낮은 강도의 곡선이 170℃ 근처에서 수반되는 경향을 보인다.

벤토나이트 제품의 DTA 분석 곡선은 원광과

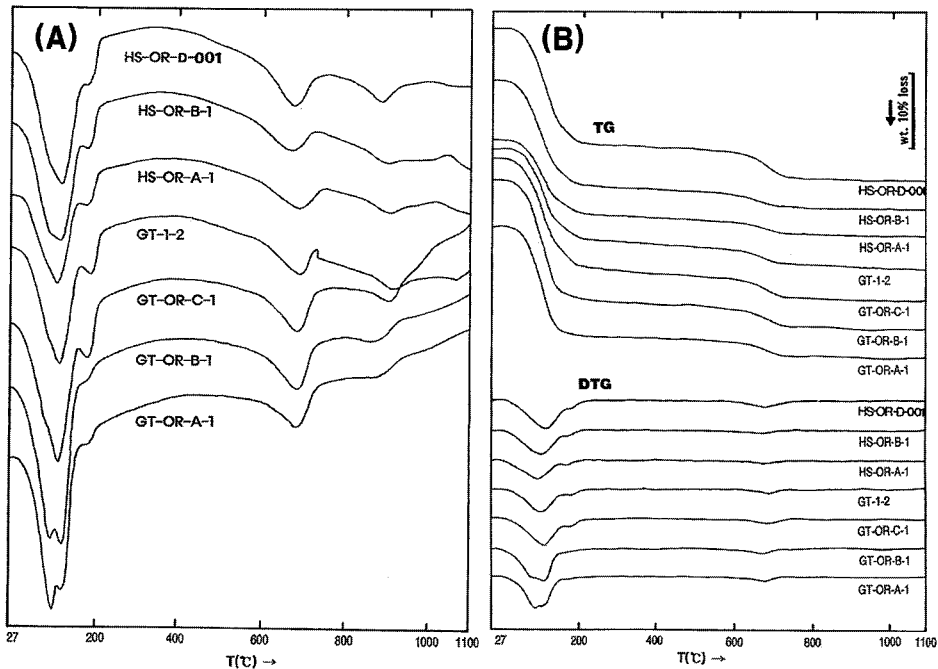


그림 7. 구태 및 흑산 벤토나이트 원광의 시차열분석도(A) 및 열중량분석도(B).

표 4. 구태 벤토나이트의 시차열분석 (DTA, TGA) 자료.

시료번호	TG 탈수량(wt%)		DTA 반응 온도(℃)	
	층간수	구조수	탈수반응	OH기 이탈반응
GT-OR-A-1	15.0	2.6	80(170)	670(870)
GT-OR-B-1	16.9	3.1	107(168)	675(860)
GT-OR-C-1	16.0	3.0	102(174)	676(895)
GT-1-2	12.5	2.5	98(172)	675(900)
GT-PR-A-1	13.5	3.3	100(168)	674(870)
GT-PR-C	14.5	3.0	98(168)	675(894)

별다른 차이를 보이지 않는다(그림 7). Na-activation 시키는 경우 나타나는 170℃ 흡열대의 강도 감소 현상 등이 전혀 감지되지 않는 것으로 보아, 구태 광산에서는 전술한 바와 같이 품질 개선을 위한 특수 처리를 하지 않는 것으로 해석된다. 구태 제품들은 원광과 마찬가지로 'Cheto 형'과 'Wyoming 형'의 중간 유형이지만, 흑산 제품의 일부(HS-PR-27)는 소위 'Cheto 형'과 유사한 DTA 반응 곡선을 나타내는 것으로 밝혀졌다. TG와 DTG에서 원광과 비교해서 층간수 탈수 정도에서 차이를 나타내지만, 전체적인 분석 곡선의 양상은 유사한 것으로 나타난다(그림 7). 원광에 비해서 수분 함유도가 낮은 경향을 보이는 바, 이는 제조 공정에서의 가열 처리에 기인한 것으로 보인다. 원광과 제품에서 모두 Na-형 벤토나이트가 Ca-형 벤토나이트보다 상대적으로 높은 구조수, 즉 OH 함유 정도를 보인다(표 4). 그러나 전세계적으로 성능이 우수한 것으로 잘 알려져 있는 'Wyoming 형' 벤토나이트의 수치(5wt%)에는 미달되는 값을 보여준다.

### 종합 평가

구태 벤토나이트 광산의 광상 부존 현황과 광물 특성에 관한 평가를 위해서 현지 조사와 실

험실에서 관련 실험을 수행하였다. 광산 측에서 제공한 많은 자료, 특히 방대한 시추 자료와 현장 기술진들의 적극적인 협조로 매우 짧은 기간임에도 불구하고 이 광산에 대한 현황을 파악할 수 있었다. 입수된 관련 자료의 검토, 현지 조사 결과, 그리고 시료들에 대한 각종의 분석 및 시험 결과들을 토대로, 구태 광산에 대한 합작 개발의 타당성 여부를 가름할 수 있는 기술적인 측면에서의 평가가 이루어질 수 있었다.

### 광상 부존 현황에 대한 사항

구태 벤토나이트 광산의 광체는 중생대 유라기 관성조에 속하는 진주암 및 응회암을 원암으로 10~35° 정도의 경사를 보이며 대개 층상으로 부존된다. 광상은 퇴적분지 내에서 분출한 규질의 화산암 및 화산쇄설암류가 속성변질되어 형성된 것으로 사료된다. 벤토나이트 광체는 유형별로 (1) 유문암 및 진주암의 하부에 존재하는 심부의 Na-형 벤토나이트 광체 (1호 광체), (2) 유문암 상부와 진주암 내에 렌즈상으로 부존하는 Na-형 벤토나이트 광체(2호 광체), 그리고 (3) 부분적으로 지표에 노출되는 Ca-형 벤토나이트 광체(3호 광체)로 구분될 수 있다. 현재 이 광산에서 주로 개발되고 있는 광체는 (1)의 Na-형 벤토나이트 광체로서, 중국에서도 드물게 갱도 개설을 통한 채굴이 지난

40년 동안 지하 80~125m에서 이루어져 왔었다. 이 Na-형 벤토나이트 광체는 대개 3~5m 정도의 두께를 이루고 연장성이 양호한 것으로 생각된다. (2)와 (3)의 광체는 (1)의 광체에 비해 다소 단속적으로 발달하고 보다 두터운 렌즈상의 광체를 이룬다. 이 광체들은 흔히 공간적으로 제올라이트 광체들과 교호되거나 공간적으로 밀접히 연계되어 산출되는 것이 특징이다.

### 광상 규모 및 매장량에 관한 사항

이 광산의 심부에 발달하는 Na-형 벤토나이트는 중국의 값싼 노동력과 현재 심부 갱도가 개설되어 있다는 점을 고려하면 지하 150m 전후까지는 개발이 가능할 것으로 여겨진다. 광산 측에서 제시한 광구 면적과 방대한 양의 시추 및 품위 분석 자료를 검토해 본 결과, 이 광산의 Na-형 벤토나이트의 매장량을 600만 톤 규모로 평가하는 것이 타당할 것으로 여겨진다. 여기서 이 광산의 채굴 조건, 채굴 실적 및 개발 기술 정도로 미루어 보아 회채율을 70% 정도로 설정하여 대략 400만 톤 정도의 가채 광량이 인정될 수 있을 것으로 평가된다. Ca-형 벤토나이트의 광량은 부분적으로 지표에 노출되어 있는 3호 광체를 기준으로 도면상으로는 거의 300만 톤 정도의 매장량을 나타낸다. 그러나 광층이 산정부를 향하여 비교적 급경사를 이루며 분포하고 주위에 제올라이트 광체가 밀접하게 접촉되어 있기 때문에 개발상의 어려움이 뒤따른다. 또한 Na-형 벤토나이트보다 상대적으로 상품 가치가 떨어지기 때문에 개발 단가가 많이 드는 갱도 개설을 통한 개발이 현실적으로 어렵다는 점이 고려되어야 한다. 따라서 고품위 부분만을 노천 채굴 방식으로 개발하는 것을 전제로 Ca-형 벤토나이트의 가채 광량은 대략 100만 톤 정도의 규모인 것으로 평가된다.

### 광석의 품위 및 광물 특성에 관한 사항

구태 광산은 국내에서는 부존되지 않는 것으로 알려진 Na-형 벤토나이트를 연간 3~5 만톤 정도 채굴하는 중국에서도 드문 Na-형 벤토나이트 광산이라는 점에서 우선 이 광산에 대한 투자 가치가 인정될 수 있을 것이다. 이 광산에서 Na-형 벤토나이트로 개발되고 있는 광석들을 각종 시험 및 분석을 해 본 결과, 광산 측의 주장대로 심부에서 채굴된 광석들은 모두 Na-형 벤토나이트에 해당되는 제반 광물 특성을 지닌 것으로 평가된다.

그러나 구태 벤토나이트는 중국에서는 방영석이라고 불리우는 단백색 내지 크리스토파라이트 형태의 규산 광물들을 불순물로서 많이 함유하는 관계로 대개 55~75wt% 품위를 보이는 B~C급 광석에 해당되는 것으로 분석된다. 이 불순 광물의 함유도는 Na-형의 경우 20~30wt%, Ca-형 벤토나이트의 경우에는 10~20wt% 정도 함유되고 그외에 제올라이트 광물도 약간 수반된다. 이 불순 광물의 함유도는 Na-형의 경우 20~30wt%, Ca-형 벤토나이트의 경우에는 10~20wt% 정도 함유되고 그외에 제올라이트 광물도 약간 수반된다. Na-형 벤토나이트에서는 회흑색의 광석보다 순백색의 광석이 규산 광물을 보다 많이 함유하는 것으로 나타난다. 회흑색 광석은 규산 광물 외에 원암의 유리질 성분도 많이 함유되어 있어 벤토나이트 광석으로 취급되기 어려울 정도로 낮은 품위를 보인다. 구태 Na-형 벤토나이트는 "Cheto-형"과 "Wyoming-형"의 중간형의 광물 특성을 가지며 팽윤성을 비롯한 응용적인 측면에서의 제반 광물 특성이 전반적으로 우수한 것으로 나타난다. 특히 산포성이 매우 뛰어나기 때문에 drilling mud, 페인트 공업용 등에 유용할 것으로 사료된다.



## 제품 공정에 관한 사항

구태 광산에서 광석의 처리 및 제품의 제조 과정이 다소 조악한 시설의 분쇄, 분급 및 건조 형식의 단순 공정으로 이루어져 있다. 따라서 제품의 품위 및 품질의 개선이 효율적으로 이루어지지 않고 있는 것으로 보인다. 질(quality)적으로는 우수하지만 품위(grade)가 다소 떨어지는 구태 벤토나이트 광석들의 부가 가치를 높이기 위해서는 적절한 정제 시설이 제품 공정에 보완되어야 할 것이다. 특히 고부가 가치 제품 제조에 심각한 장애가 되는 규산 광물들의 함량을 10wt% 이하로 줄이는 제조 공정의 마련이 시급히 요청되고 있는 실정이다. 또한 원광에는 존재하지 않던 석영이 규산 광물로부터 합성될 정도로 과도하게 시행되고 있는 가열에 의한 건조 처리 방식도 시급히 개선되어야 할 것이다.

## 개발상의 문제점

구태 벤토나이트 광산이 안고 있는 개발상의 문제점으로는 (1) 40년 동안의 심부 광체 채굴로 인한 채광장의 심부화 및 생산 원가의 증가, (2) 동일 광구에 설정된 또 다른 법정 광물인 제올라이트에 대한 채굴 권한 문제, 그리고 (3) 제품의 품위와 질을 저하시키는 규산질 불순 광물들의 정제 문제를 들 수 있을 것이다. 채굴장의 심부화에 따른 개발상의 어려움을 극복하는 방안은 현재 개발되지 않고 있는 유문암 위에 부존하는 2호 광체를 적극 개발하고, 무리하게 채광 규모를 높이지 않으면서 부가 가치 높은 제품을 개발하는 것이 좋을 것이다. 2호 광체의 개발 과정에서 필연적으로 이 광산이 채굴권을 갖고 있

지 않은 제올라이트 광체의 훼손이나 채굴이 불가피한 실정이다. 또한 부가 가치 높은 제품 개발을 위해서는 필연적으로 전술한 바와 같이 규산 광물들의 효과적인 정제 방안과 이에 따른 제조 공정의 개선이 선행되어야 할 것이다.

## 참고 문헌

- 노진환 (2003) 중국 요녕성 흑산 벤토나이트 광산의 광상 및 광물특성 평가. 광물과산업, 16권 2호, 1-12.
- 노진환, 오성진 (1994) 양남지역 제 3기층에 부존하는 벤토나이트의 지구화학 및 광물생성관계. 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.