

일광광산 폐갱 유출수에 의해 형성된 바이오매트의 생광물학적 연구

Biomineralogical Study on the Microbial Mats Formed from the Mine
Drainage of the Abandoned Ilkwang Mine in Pusan, Korea

안윤희 (Yun-Hee An) · 황진연 (Jin-Yeon Hwang) · 김근수 (Gun-Soo Kim)

부산대학교 지질학과

(Department of Geology, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea)

요약 : 일광광산의 폐갱 유출수 수로와 집수지에는 황색 및 적갈색의 침전물인 바이오매트가 다량 나타난다. 이들 바이오매트에 대해 X-선분말회절분석 (XRD), 적외선분광분석 (IR), 주산전자현미경 및 에너지분산분석 (SEM-EDX) 등을 이용하여 바이오매트의 구성 성분과 생광물화작용에 대해 검토하였다. 유출수에 의해 침전된 바이오매트의 상부 층에는 주로 황색의 바이오매트가 나타나며, 튜브상의 박테리아성 물질과 작은 구상 입자의 집합체인 박테리아성 물질로 구성되어 있다. 이들 박테리아성 물질은 주로 비정질 내지 저결정질의 산화철광물로 구성되어 있다. 이러한 성분과 형태로 보아 이들 물질은 철박테리아에 해당되는 것으로 사료된다. 형성된 후 오래된 바이오매트는 적갈색을 띠며, 주로 산화철광물의 구상 집합체로 구성된다. 바이오매트를 구성하는 산화철광물의 황색 바이오매트는 주로 침철석이며, 적갈색 바이오매트는 침철석과 함께 적철석이 포함된다. 즉, 바이오매트의 진화에 따라 침철석에서 적철석으로 광물화작용이 일어나는 것으로 사료된다.

ABSTRACT : Microbial mats, the yellow and reddish brown deposits formed from the mine drainage, occur on the bottom of drain and mine tailing pond of the Ilkwang mine in Pusan, Korea. The constituents of microbial mats and their biomineralization were studied by using XRD, IR, and SEM-EDX. The upper part of the microbial mat is yellow-colored and composed of tube-shaped and small spheroid bacterial materials, which are mainly made up of amorphous and poor-crystalline iron-oxide minerals. The shape and composition of bacterial materials suggest that they are probably belong to iron bacteria. The earlier-formed microbial mats are reddish brown and composed of spheroidal iron-oxide mineral aggregates. The iron-oxide minerals of the yellow microbial mats are mainly goethite, but those of the reddish brown microbial mats contain abundant hematite along with goethite. This implies that with the evolution of biomats, goethite may be transformed to hematite.

서 언

부산광역시 기장군 일광면에 위치하는 일광광산은
과거 구리를 주 채광 대상으로 한 광산으로 1931년

에 발견되어 1938년부터 1945년까지 우리나라 최
대의 동광산이었으며, 구리 이외에도 중석, 금, 은
등이 산출되었으나 현재는 폐광 상태에 있다. 광산
주변에는 폐광 후 처리되지 않은 광미 및 폐석들이

산재해 있으며, 현재 폐갱으로부터 갱내 폐수가 유출되고 있다. 이 유출수는 pH 2~3의 강산성으로 광석에서 용출된 Fe와 같은 여러 중금속을 포함하고 있다. 우리나라 휴·폐광산을 대상으로 실시한 환경오염의 실태 조사에 의하면 일광광산의 폐갱 유출수에 중금속이 비교적 많이 함유되어 있는 것으로 나타났다 (민정식, 1996). 일광광산의 폐갱 유출수가 통과하는 배수로 및 배수를 일시적으로 저류하는 집수지, 그리고 주변의 하천바닥과 퇴적물에는 황색 또는 적갈색의 침전물이 잘 나타난다.

일반적으로 폐광산의 배수로에 나타나는 이러한 침전물은 미생물의 작용과 관련이 많은 것으로 알려져 있다. 이와 같은 미생물들에 의해 생성된 침전물을 바이오매트 (microbial mats 또는 biomat)라 부른다 (Southam and Beveridge, 1992; Davis, 1995; 田崎, 1995, 1996). 이러한 바이오매트에는 박테리아와 같은 미생물에 의해 형성되거나 미생물을 구성하는 광물인 생광물 (biomineral)이 다량 함유되는 것으로 알려져 있다 (Mann et al., 1987; Tazaki and Koiwasaki, 1994; Urrutia and Beveridge, 1994). 박테리아가 특정 원소를 취하여 선택적으로 세포에 농집 및 고정시킴으로써 광물의 생성에 관여하는 사실은 잘 알려져 있으며, 이와 같이 생물체와 관련된 생광물은 현재 250여종이 알려져 있다 (田崎, 1996).

본 연구에서는 '일광광산 폐갱 유출수에 의해 형성된 바이오매트를 대상으로 구성물질의 종류 및 특성을 생광물학적 측면에서 자세히 규명하고, 나아가 이들 물질의 형성과정을 밝히고자 한다.' 이러한 생광물에 대한 연구는 지구 물질순환의 규명이나 환경오염의 정화 등 지구환경 문제를 해결하는데 매우 중요하다 (田崎, 1995, 1996).

연구 방법

일광광산 폐갱 유출수의 수로와 집수지에서 황색 및 적갈색의 바이오매트 시료를 색상 및 위치별로 다수 채취하고 (Fig. 1), 그 산출상태를 조사하였다. 바이오매트에 포함되어 있는 미생물 및 광물입자를 관찰하기 위해 편광현미경을 사용하였다. 그

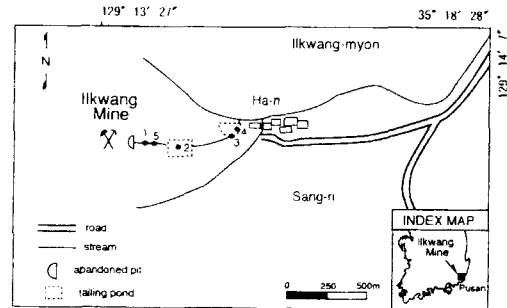


Fig. 1. The schematic map showing the sampling sites, mine drain, and tailing pond of the Ilkwang mine in Ilkwang-myeon, Kijang-gun, Pusan.

리고 박테리아의 존재 여부를 알기 위해 Gram 염색법 (이연태, 1984)을 사용하였다. 바이오매트의 광물조성을 파악하기 위하여 X-선분말회절분석을 실시하였다. X-선회절분석은 Rigaku사의 Geigerflex 2301을 사용하여 CuK α 선으로 Ni-filter를 사용하였다. 통상의 측정조건은 전압 30 kV, 15 mA, scan speed 2 $^{\circ}$ 2 θ /min, 시정수 1 sec, slit 1 $^{\circ}$ ~0.3 mm~1 $^{\circ}$ 로 측정하였다. 적외선분광분석은 Mattson사의 Polaris FT-IR spectrometer를 사용하여 KBr 정제법으로 측정하였다. 주사전자현미경 (SEM) 및 에너지분산분석 (EDX)은 JEOL사의 JSM-840A와 JSM-5400을 병행하여 수행하였다. 구성광물의 자세한 성분을 조사하기 위해 산화철광물 및 유기물의 제거실험을 수행하였다. 산화철광물의 제거 실험은 Mehra and Jackson (1960)에 의한 Dithionite-citrate-bicarbonate (DCB) 방법을 사용하였으며, 유기물 제거 실험은 Jackson (1969)의 방법에 따라 과산화수소 (H₂O₂) 용액과 나트륨아세테이트 (NaOAc) 용액을 사용하였다.

결 과

바이오매트 (microbial mat)의 분포상태

일광광산의 폐갱으로부터 유출된 갱내수가 통과하는 수로 바닥과 그 인접부에는 황색 및 적갈색을 띠는 많은 바이오매트가 형성되어 있다. 바이오매

트 상부 약 1~3 cm 정도까지 황색의 침전물이 잘 나타나고 있으며 그 아래 부분은 적갈색의 침전물이 주로 나타난다. 또한 물이 닿지 않은 수로 가장 자리의 약간 건조된 부분에서도 적갈색의 바이오매트가 나타난다. 수로 바닥 이외에도 낙엽, 배수관, 물통 등의 위에도 황색의 침전물이 나타난다. 유출수의 수로 바닥의 일부 지점에서는 직경 약 5~10 cm의 반구상의 볼록볼록한 형태의 황색 바이오매트가 관찰되었다. 이 부분의 내부 단면을 관찰해보면 녹색의 섬유질이 방사상으로 분포되어 나타난다. 이 섬유질 물질은 녹조류에 해당하는 것으로 보인다.

최종적으로 광산폐수를 모으는 집수지 바닥과 가장자리에도 바이오매트가 다량 나타난다. 이 집수지 물가의 얇은 곳에서는 황색의 바이오매트가 얇게 나타나고 있으며, 그 바로 아래의 바이오매트와, 수위가 낮아져서 물가의 건조된 바이오매트는 적갈색을 띠고 있다. 이러한 바이오매트의 분포상태는 전술한 폐갱입구 부근의 배수로에서 보여지는 것과 같은 경향을 나타낸다. 즉 침전된 후 얼마되지 않은 상부의 바이오매트는 황색을 띠고 있으며, 침전된 후 시간이 오래 경과된 하부의 바이오매트는 적갈색을 띠는 경향이 나타난다. 폐갱 유출수가 흘러간 수로 주변의 암석 표면에도 황색의 침전물이 부착되어 있는 것이 잘 관찰된다. 그리고 유출수가 합류되는 광산 마을 아래의 하천 바닥과 측면에서도 황색 내지 적갈색의 침전물이 잘 나타나는데 하류로 갈수록 그 침전물의 양이 급격히 감소한다.

바이오매트 (microbial mats)의 구성물질

편광현미경관찰

바이오매트 중의 미생물과 광물을 동시에 확인하기 위하여 우선 쉽게 관찰이 가능한 편광현미경을 사용하였다. 시료를 증류수에 섞어 슬라이드 글라스 위에 고르게 편 후 개방니콜 하에서 바이오매트를 관찰하였다. 그 결과, 황색 바이오매트에서는 담갈색을 띠는 긴 튜브상의 물질과, 검은 색을 띠며 작은 입자들의 불규칙적 집합체가 주로 관찰되

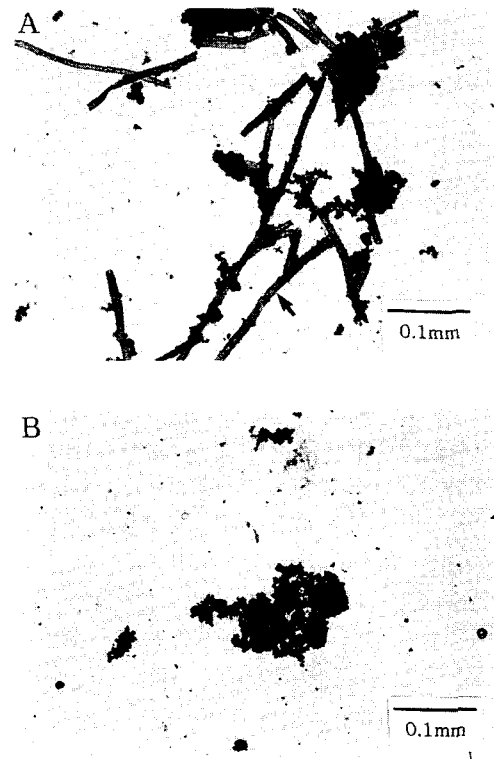


Fig. 2. Photomicrographs showing the tube-like materials of the yellow microbial mat (A) and the aggregates of spheroidal materials of the reddish-brown microbial mat (B) from the Ilkwang mine.

었다 (Fig. 2A). 여기서 튜브상의 물질은 길이가 약 0.02~1 mm 정도로 크기가 다양하며, 전체적으로 다소 투명하게 보이나 작은 입자들의 집합체를 이룬 물질은 검고 불투명하게 나타났다. 이 황색 바이오매트에 나타나는 물질에 대해 Gram 염색법 (이연태, 1984)에 의한 염색처리 결과 바이오매트 구성물질이 모두 붉은색을 나타내어 미생물의 존재가 확인되었다. 또한, 이들 물질은 과산화수소수와 반응하여 기포가 발생하는 것이 확인되었다. 과산화수소의 반응에 의한 기포가 튜브상 물질의 양쪽 끝에서 굴뚝과 같이 발생하는 것으로 보아 역시 속이 빈 튜브 형태인 것이 확인되었다. 작은 입자의 집합체에서도 기포가 발생하면서 그 크기가 다소 작아지는 것이 관찰되어 역시 박테리아와 같

Table 1. Mineral composition of the microbial mats from the Ilkwang mine.

Color	Sample	Iron oxide		Feldspar	Quartz	Illite
		Goethite	Hematite			
yellow	1-A	+++		+	+	
	1-B	+				
	1-C	++				
	5-A	+			+	
	5-B	+			+	
reddish-brown	2-A	++	+	+	+	
	3-A	+	+		+	+
	3-B	+			+	+
	4-A	+	++	+	+	+
	4-B	+	++		++	+
	4-C	+	+		+	+

+++ : abundant, ++ : moderate, + : rare.

은 유기물질로 생각된다. 특히 긴 튜브상의 물질은 형태와 크기로 보아 광산폐수에 형성된 바이오매트 중의 철박테리아와 유사하다 (Temple and Colmer, 1951). 그리고 작은 입자들의 집합체도 일반적인 구균상 박테리아와 유사한 형태를 하고 있다. 적갈색의 바이오매트에는 튜브상의 물질은 잘 나타나지 않고, 검은 입자들의 집합체가 주로 관찰된다 (Fig. 2B). 황색 바이오매트에 비해서 이들 검은 입자들이 약간 큰 것으로 구성되어 있다. 이상과 같이 관찰한 황색 및 적갈색 바이오매트 물질에는 뚜렷하게 광물의 결정으로 보이는 쇄설성 입자들은 나타나지 않았다.

X-선회절분석

X-선회절분석 결과, 바이오매트 시료에는 산화철광물이 다량 함유되고 그 외에 석영과 일라이트도 소량 포함되며 시료에 따라 구성 광물조성이 약간 다르게 나타났다 (Table 1). 바이오매트 시료의 X-선회절선은 전체적으로 높은 백그라운드와 폭 넓은 회절선을 보이며 대부분의 시료에서 산화철광물의 작은 회절선이 나타난다 (Fig. 3). 바이오매트 시료에서 백그라운드가 높게 나타나는 것은 산화철광물 또는 유기물이 다량 존재하기 때문이다 (田崎, 1995). 모든 바이오매트 시료들은 주로 산

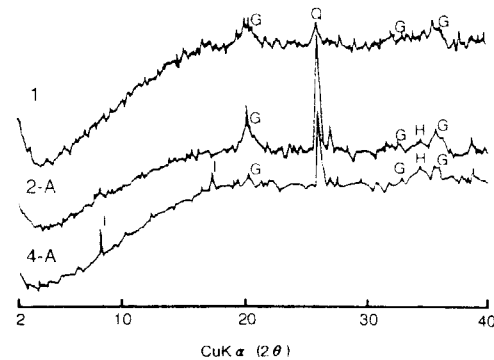


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of bulk microbial mats. 1; yellow microbial mat, 2-A and 4-A; reddish-brown microbial mat.

화철광물로 되어 있으나, 적갈색의 바이오매트 시료에서는 산화철광물 외에도 석영과 일라이트가 소량 포함되어 있다. 대표적인 바이오매트 시료에 대한 X-선회절 패턴을 보면 황색 바이오매트 시료에서는 침철석의 회절선에 해당되는 4.2 Å, 2.6 Å, 2.4 Å 부근에 폭 넓은 회절선을 보이고, 소량의 석영 회절선도 검출된다. 적갈색 바이오매트 시료 (2-A, 4-A)에서도 침철석에 해당되는 회절선과 적철석에 해당되는 2.5 Å의 회절선이 나타나며, 이

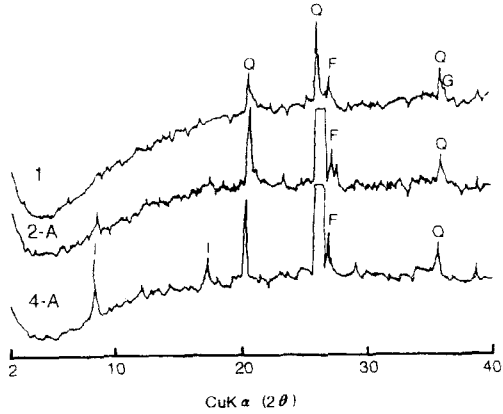


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of microbial mats after removing iron oxides. 1; yellow microbial mat, 2-A and 4-A; reddish-brown microbial mat.

외에도 일라이트 (10 Å), 석영 (3.3 Å)의 회절선이 나타났다 (Fig. 3). 바이오매트의 광물성분을 보다자세히 조사하기 위하여 산화철광물 제거 실험과 유기물 제거 실험을 행하였다. 산화철광물 제거 실험을 행하여 본 결과, 황색 및 적갈색을 나타냈던 바이오매트 시료들이 암회색 또는 녹회색으로 변화하였다. 산화철광물을 제거한 후의 X-선회절 패턴은 실험전의 회절 패턴과 비교해 볼 때 백그라운드 값이 상당히 낮아졌으며, 침철석 및 적철석의 산화철광물 회절선이 거의 나타나지 않고 대신에 석영과 장석의 회절선이 크게 나타났다 (Fig. 4). 그리고 유기물 제거 실험 전후의 중량을 비교한 유기물 함량을 검토한 결과, 황색 바이오매트는 약 4~5% 정도였으며, 적갈색 시료는 약 2~3%로 나타났다. 이와 같이 황색 바이오매트가 적갈색의 것보다 유기물의 함량이 높게 나타났다. 이는 시간이 경과함에 따라 광물화작용이 진행되기 때문으로 생각된다. 유기물을 제거하고 난 후 X-선회절패턴 (Fig. 5)을 보면 무처리와 비교할 때 산화철광물과 석영 및 일라이트의 회절선들이 약간 뚜렷해지는 경향이 나타났으나 큰 차이는 없었다. 유기물 제거 실험 후에도 회절선의 패턴이 크게 차이가 나지 않는 것과 이 실험에 의한 유기물의 함량이 비교적 적게 나타나는 것은 바이오매트를 구성하는 박테리

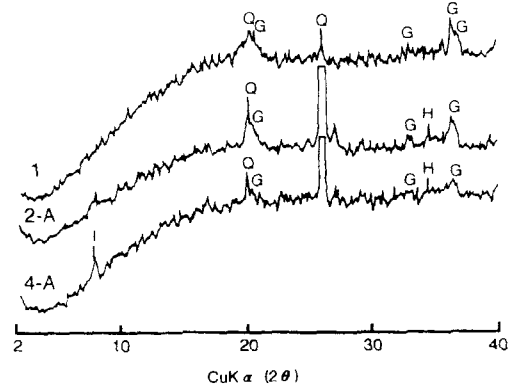


Fig. 5. X-ray diffraction patterns of microbial mats after removing organic matter. 1; yellow microbial mat, 2-A and 4-A; reddish-brown microbial mat.

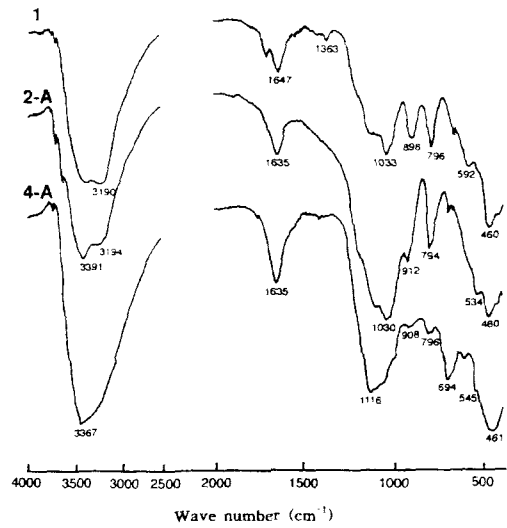


Fig. 6. Infrared spectra of bulk microbial mat. 1; yellow microbial mat, 2-A and 4-A; reddish-brown microbial mat.

아와 같은 미생물 자체가 광물로 되어 있기 때문으로 생각된다.

적외선분광분석 (IR)

황색 및 적갈색의 바이오매트 시료들에 대해 적외선분광분석을 행하였다. 황색 바이오매트 시료에

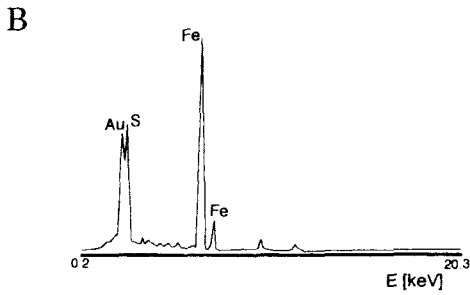
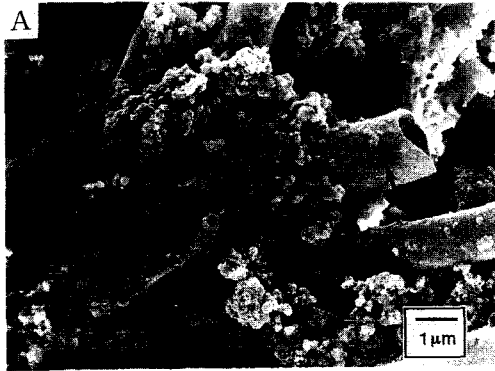


Fig. 7. Scanning electron micrograph (A) and EDX analysis (B) of yellow microbial mat. The arrow in the picture (A) indicates EDX analysis point.

서는 침철석에서 주로 나타나는 흡수선 (Russell, 1979)과 유사하게 $796,898\text{ cm}^{-1}$ 부근에서 비교적 강한 흡수선이 나타난다 (Fig. 6). 그리고 $3,190\text{ cm}^{-1}$ 부근의 흡수선도 침철석의 수소결합을 한 OH에 의한 흡수선 (Russell and Fraser, 1994)으로 생각된다. 적갈색 바이오매트의 두 시료에서는 $912,908\text{ cm}^{-1}$ 의 흡수선이 약하게 나타나는데 이는 황색 바이오매트와 비교해 볼 때 침철석에 의한 것으로 생각된다. 적갈색 바이오매트 시료에서는 534 및 545 cm^{-1} 의 흡수선이 나타나며, 460 cm^{-1} 부근의 흡수선이 강하게 나타나는데 (Fig. 6) 이들의 흡수선은 알려진 적철석의 흡수선 (Wilson, 1994)과 유사한 것으로 보인다. 산화철광물의 제거 실험을 행한 후의 각 시료에 대해서도 적외선분광분석을 행하여 본 결과, 전술한 침철석 및 적철석에 해당되는 흡수선들은 현저히 강도가 감소하였다. 적갈색 바이오매트 시료에서는 석영 및 일라이트 등

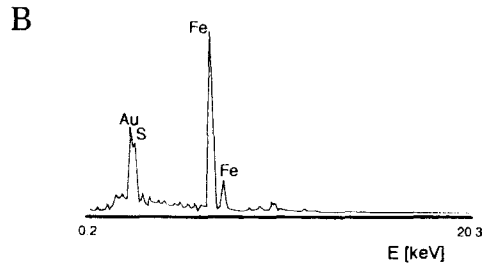
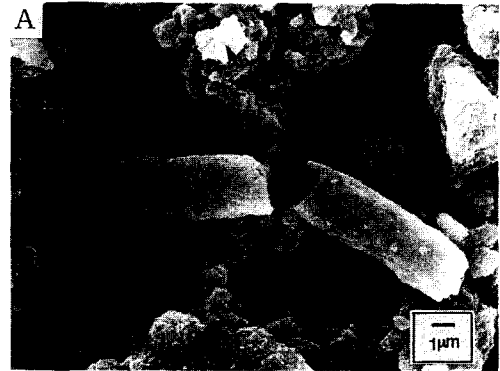


Fig. 8. Scanning electron micrograph (A) and EDX analysis (B) of yellow microbial mat. The arrow in the picture (A) indicates EDX analysis point.

의 여러 광물이 포함되어 있어 산화철광물의 흡수선을 식별하기 다소 어렵다. 그리고 유기물 제거 실험 후의 적외선분석에서는 황색 바이오매트 시료중의 침철석에 의한 흡수선 ($796,898\text{ cm}^{-1}$)이 약간 더 커지고, 적갈색 바이오매트 시료에서 $545,460\text{ cm}^{-1}$ 의 적철석에 의한 흡수선이 약간 더 커지는 것으로 나타났다. 이러한 실험결과는 X-선회절분석결과와 일치하는 것으로 산화철광물로 침철석과 적철석이 나타나는 것으로 확인된다.

주사전자현미경 (SEM) 관찰 및 에너지분산분석 (EDX)

바이오매트시료를 구성하는 물질의 형태를 자세히 관찰하기 위하여 주사전자현미경을 사용하였으며 에너지 분산분석 (EDX)을 이용하여 화학성분을 검토하였다. 황색 바이오매트에서는 편광현미경에서 관찰한 것과 같이 튜브상의 박테리아 물질과

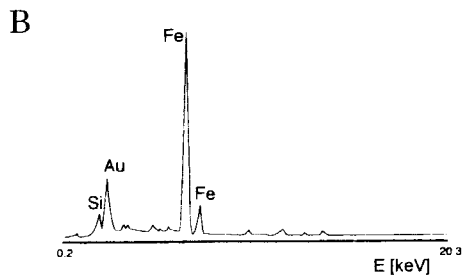
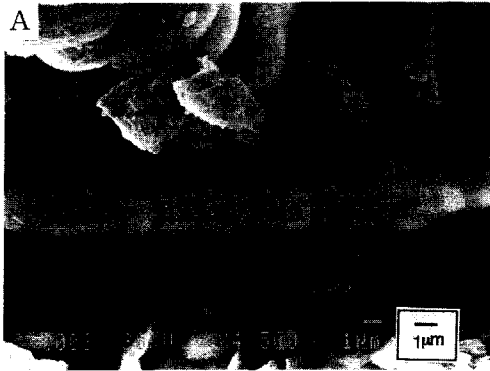


Fig. 9. Scanning electron micrograph (A) and EDX analysis (B) of reddish-brown microbial mat. The arrow in the picture (A) indicates EDX analysis point.

함께 작은 입자들의 집합체 형태가 잘 관찰된다 (Fig. 7, 8). 튜브상의 물질은 양끝에 원통의 빈공간이 잘 관찰되며, 튜브의 길이는 20~50 μm 이고 폭은 대개 3~10 μm 정도로 크기가 비교적 다양하다. 이러한 형태는 금속광산의 폐수에 의해 형성된 철박테리아의 일종인 *Thiobacillus ferrooxidans* (Temple and Colmer, 1951)와 유사하다. 에너지분분석을 한 결과, 튜브상의 물질은 다량의 Fe와 함께 S가 상당량 포함되며 그 외의 화학성분은 거의 나타나지 않았다 (Fig. 7). 그리고 작은 입자들의 집합체 물질에 대해서도 여러 곳을 분석하였으나, 역시 다량의 Fe와 S로 주로 구성되어 있었다 (Fig. 8). 즉 화학성분상으로는 튜브상의 물질과 유사하였다. 작은 입상의 물질은 형태로 볼 때 가장 단순한 박테리아의 형태인 구균상의 일종으로 생각되는데 성분상으로 보아 철박테리아에 해당되

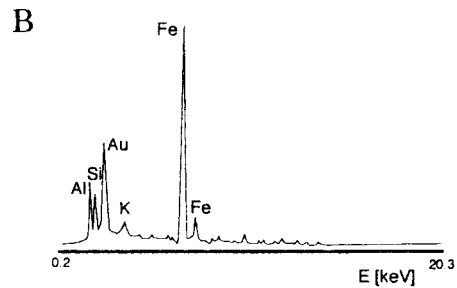
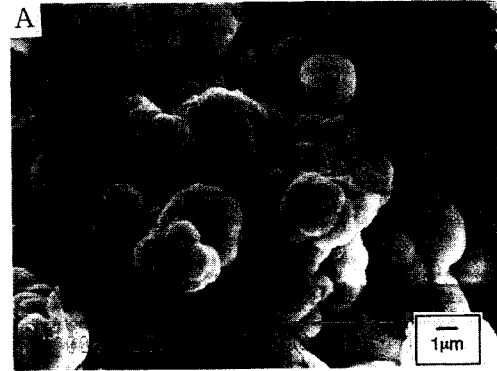


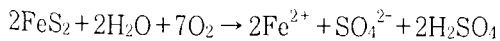
Fig. 10. Scanning electron micrograph (A) and EDX analysis (B) of reddish-brown microbial mat. The arrow in the picture (A) indicates EDX analysis point.

는 것으로 생각된다. 적갈색 바이오매트 시료 중에서 황색 바이오매트 바로 아래에 나타나며 그다지 오래되지 않은 시료와, 집수지 가장자리에서 오래되어 고화된 시료에 대해 전자현미경으로 관찰하였다. 오래되지 않은 적갈색 바이오매트에서 Fig. 9에서와 같이 염주와 같은 구상의 집합체가 관찰되며 이 부분의 성분은 다량의 Fe와 함께 소량의 Si가 포함된다. 여기서 황색 바이오매트와는 다르게 S의 성분이 나타나지 않는다. 이러한 염주와 같은 것 이외에도 마디가 잘린 듯한 긴 형태도 관찰되었는데, 이러한 긴 형태와 크기로 보아 황색 바이오매트의 튜브상 물질에서 기원된 것으로 생각된다. 오래되어 약간 고화된 적갈색 바이오매트에서는 거의 모든 부분이 Fig. 10에서 보이는 바와 같이 직경 약 3~10 μm 의 구상체로 구성되어 있다. 이 부분의 화학성분은 역시 다량의 Fe와 함께 소량의

Si, Al, K가 함유되고 있고 S는 검출되지 않는다. 이러한 구상체의 형태로 보아서는 도양에 나타나는 적철석의 형태 (Schwertmann and Kampf, 1985)와 유사하다. 구상체의 표면은 솜털과 같은 형태를 보여 매우 작은 미립물질이 표면에 부착되어 있을 것으로 생각된다. 에너지분산분석과 X-선 회절분석의 결과를 함께 검토해 볼 때, 적갈색 바이오매트 시료에서 Fe 이외에 Si, Al, K 성분이 소량 함유하는 것은 석영 및 일라이트의 성분과 관계 있는 것으로 생각된다.

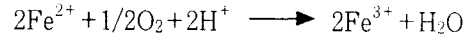
고 찰

일광광산의 폐갱 유출수 수로와 집수지에 형성된 황색 및 적갈색 바이오매트의 구성물질에 대한 형태적 및 광물학적 특성을 조사하였다. 그 결과, 황색 바이오매트는 주로 튜브상 및 구균상의 박테리아성 물질로 구성되어 있는 것으로 나타났으며, 이들은 성분 및 형태적으로 보아 철박테리아에 해당되는 것으로 나타났다. 철박테리아의 세포벽 내외부에 침철석, 레피도크로사이트, 수산화철 등의 산화철광물이 생성되는 것으로 알려져 있다 (Mann et al., 1987; Tazaki and Ishida, 1996; 田崎, 1995). 본 광산의 바이오매트에서도 침철석과 같은 산화철광물이 다량 포함하는 것으로 보아 튜브상 철박테리아의 구성물질이 이러한 산화철광물인 것으로 생각된다. 따라서 철박테리아 내에 산화철광물의 형성과정과 그 이후의 광물화작용에 대해 간단히 고찰해 본다. 먼저 일광광산의 광석에 수반되는 황철석, 섬아연석, 방연석 등의 황화광물이 공기 및 물에 노출되어 산화작용을 받아 아래의 반응식에 따라 산성수가 생성될 수 있다.



이 과정에서 2가철 이온 및 산이 발생한다. 이렇게 황화광물의 산화에 의해 생성된 2가철 이온은 낮은 pH 환경에서 매우 안정하여 산화되지 않고 용존된다 (Garrels and Christ, 1965). 물 속에 2가철 이온의 함량이 많아지면 2가철 이온을 3가철 이온

으로 산화시킬 때 발생하는 에너지를 이용하는 철박테리아가 서식하게 된다. 이러한 철박테리아는 산성 환경하에서 존재하지만, 중성 또는 알칼리성의 물에서는 2가철 이온이 자연적으로 산화되므로 대사작용이 어려워 생존할 수 없다 (Kucera and Wolfe, 1957). 그러므로 일광광산의 폐갱 유출수는 일광광산에 수반되는 황화광물의 산화로 생긴 2가철이온을 다량으로 함유하고 있으며 pH가 2~3으로 철박테리아가 서식할 수 있는 좋은 환경을 제공해준다. 이러한 철박테리아는 아래 반응식과 같이 세포질막에 2가철 이온을 부착시켜 3가철로 산화시킨다 (Norris and Barr, 1985).



철박테리아의 세포질은 pH가 6.5 정도로 생물체의 주변환경 (폐갱 유출수)과 세포질 사이에는 항상 4이상의 pH 농도 구배가 형성된다 (Walsh and Mitchell, 1972). 즉 폐갱 유출수에 용존된 2가철 이온이 철박테리아의 세포질의 높은 pH로 인해 3가철 이온으로 산화된다. 이렇게 형성된 3가철 이온은 물과의 반응에 의해 산화철광물로 형성되어 철박테리아의 세포벽 내외부에 침전된다 (Mann et al., 1987; Tazaki et al., 1994; Urrutia and Beveridge, 1994). 그리고 이러한 3가철 이온은 일반적으로 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 의 성분을 가지는 수산화철 (ferrihydrite)로 침전되는 것으로 알려져 있다 (Schwertmann and Fischer, 1973; Carlson and Schwertmann, 1981). 이러한 수산화철은 비정질에 가까운 구조를 하고 있으므로 그 존재 여부의 판단이 매우 어렵기 때문에 본 연구에서 확인하지는 못하였다.

본 광산에 관찰되는 바이오매트의 분포상태로 보아 시간이 경과함에 따라 황색 바이오매트가 적갈색의 바이오매트로 변환되는 것으로 나타났다. 따라서 이러한 변화에 따른 그 구성물질의 변화를 고찰해 보면 다음과 같다. 황색 바이오매트 중 튜브상의 철박테리아는 전자현미경하에서 속이 빈 형태를 나타내었다. 그러나 적갈색의 바이오매트에서는 이러한 속이 빈 튜브 형태는 나타나지 않고 속이 꽉 찬

막대상의 형태와 공이 일렬로 연결된 염주와 같은 모양이 관찰되었다. 그리고 오래되어 고화된 적갈색 바이오매트에는 대부분 구상체들로 구성되어 있었다. 이러한 사실로 보아 튜브상의 박테리아가 성장함에 따라 튜브의 내벽에 산화철광물이 점차 집적되게 되어 튜브의 공극이 좁아져 끝내 모든 공극을 산화철광물로 충전되게 되는 것으로 생각된다. 이렇게 충전된 물질은 공극률의 감소와 광물화작용에 의해 수축되어 구상으로 차츰 변화되는 것으로 생각된다. 오래된 적갈색 바이오매트에서 나타나는 구상의 물질은 그 크기가 서로 대개 비슷하고 적철석과 같은 산화철광물의 형태와도 유사하다. 그 구상체의 표면에는 솜털 같이 매우 작은 입자가 부착되어 있는 것도 관찰되었는데 이들은 그 성분으로 보아 미립의 일라이트, 실리카광물, 침철석 등의 광물일지도 모른다. 황색의 바이오매트에 나타나는 구균상 박테리아 물질들도 광물화작용에 의해 차츰 합체되어 입자가 커지는 것으로 생각된다.

바이오매트의 구성 성분에 대한 검토를 해보면 다음과 같다. X-선회절분석의 결과로 볼 때, 황색 바이오매트에서는 결정도가 낮은 산화철광물인 침철석이 나타났으며, 적갈색 바이오매트에서는 적철석이 나타났다. Stumm and Morgan (1981)에 의하면 박테리아에 의해 생긴 초기의 수산화철 및 산화철광물은 시간이 지남에 따라 변하는데 습기가 많은 곳에서는 침철석으로, 건조한 곳에서는 적철석으로 변한다고 한다. 따라서 본 광산의 바이오매트에서도 이와 유사한 경향이 나타나는 것으로 생각된다. 적갈색 바이오매트에서는 석영 및 일라이트가 소량 포함되어 있는데, 이들 광물의 기원에 대해서는 금번의 연구만으로 판단하기 어렵다. 이러한 광물은 물이나 바람으로 이동되어 혼합된 채설성 물질이 혼합될 수도 있으며, 그 이외에도 용액에서 침전된 것 혹은 구조와 같은 미생물에 의해 형성된 것 등도 배제할 수 없을 것 같다. 최근 박테리아에 의한 일라이트의 형성에 대한 Tazaki (1997)와 Urrutia and Beberidge (1994)의 연구 등으로 볼 때 생광물학적 과정에 의한 이들 광물의 형성에 대한 가능성도 있을 것으

로 생각된다. 이에 대해서는 더 많은 검토가 요구된다.

결 론

1. 일광광산의 폐갱 유출수 수로의 바닥과 집수지에는 유출수에 의해 형성된 황색 및 적갈색의 바이오매트들이 다량 나타난다. 바이오매트의 분포상태로 보아 시간의 경과에 따라 황색 바이오매트가 적갈색의 바이오매트로 변하는 것으로 생각된다.
2. 황색의 바이오매트에는 길이 10~50 μm 인 튜브상의 철박테리아와 작은 입상의 집합체로 나타나는 구균상의 박테리아성 물질로 주로 구성되어 있다. 이들은 비정질 내지 저정질의 산화철광물로 구성되어 있는 것으로 생각된다.
3. 바이오매트를 구성하는 산화철광물에 있어서 황색의 바이오매트는 주로 침철석이며, 적갈색 바이오매트는 침철석과 함께 적철석이 많이 포함된다. 즉, 바이오매트의 진화에 따라 침철석에서 적철석으로 광물화작용이 일어나는 것으로 사료된다.
4. 이 광산에 있어 pH 2~3인 강산성과 Fe를 다량 함유하는 폐갱 유출수의 조건에 의해 철박테리아가 다량 서식하여 바이오매트를 형성한 것으로 사료된다.

사 사

본 논문은 부산대학교 기성회연구비의 일부 지원에 의해 연구되었으며, 이에 감사한다.

참 고 문 헌

- 민정식 (1996) 휴·폐광산지역의 환경오염 실태 및 대책. 대한자원환경지질학회·대한지질학회 제12회 공동학술강연회 발표논문집, 1-5.
- 이연태 (1984) 현대미생물학. 탐구당, 119-120.
- 田崎和江 (1995) 微生物がつくる 鉱物. 地質ニュース, 489, 17-30.
- 田崎和江 (1996) 바이오미네랄리제이션과 환경.

- 資源と素材, 112, 827-835.
- Calson, L. and Schwertmann, U. (1981) Nature occurrence of ferroxihite (δ' -FeOOH). *Clays Clay Minerals*, 28, 272-280.
- Davis, B. S. (1995) The geomicrobiology of the oxic zone of two base metal mines tailings impoundments: The Kidd Creek mine and the Kam Kotia mine sites. M. Sc. thesis, Univ. Guelph, Ontario, Canada, 486.
- Garrels, R. M. and Christ, C. L. (1965) *Solution, Minerals and Equilibria*. Happer & Row, Inc., New York, 210.
- Jackson, M. L. (1969) *Soil chemical analysis-advanced course*. Published by the author, Dept. of Soils, Univ. Wisconsin, 17-20.
- Kucera, S. and Wolfe, R. S. (1957) A selective enrichment method for *Gallionella Ferruginea*. *J. Bacteriol.*, 74, 347.
- Mann, H., Tazaki, K., Fyfe, W. S., Beveridge, T. J. and Humphrey, R. (1987) Cellular lepidocrosite precipitation and heavy metal sorption in *Euglena* sp. (unicellular algae) - Implications for biomineralization. *Chem. Geol.*, 63, 39-43.
- Mehra, O. P. and Jackson, M. L. (1960) Iron oxide removal from soil and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Minerals*, 7, 317-327.
- Norris, D. R. and Barr, D. W. (1985) Growth and iron oxidation by acidophilic moderate thermophiles. *FEMS Microbiol. Lett.*, 28, 221-224.
- Russell, I. D. (1979) Infrared spectroscopy of ferrihydrite: evidence for the presence of structural hydroxyl groups. *Clay Minerals*, 14, 190-214.
- Russell, J. D. and Fraser, A. R. (1994) *Clay Mineralogy: Spectroscopic and chemical determinative method*. Chapman & Hall, London, 11-67.
- Schwertman, U. and Fischer, W. R. (1973) Natural "amorphous" ferric hydroxide. *Geoderma*, 10, 237-247.
- Schwertman, U. and Kämpf, N. (1985) Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of Southern and Central Brazil. *Soil Sci.*, 139, 144-350.
- Southam, G. and Beveridge, T. J. (1992) Enumeration of thiobacilli with pH-neutral and acidic mine tailing and their role in the development of secondary mineral soil. *Applied Environ. Microbiol.*, 58, 1283-1288.
- Stumm, W. and Morgan, J. J. (1981) *Aquatic Chemistry: An introduction emphasizing equilibria in nature water*. John Wiley and sons, Inc., New York, 780.
- Tazaki, K. (1997) Biomineralization of layer silicates and hydrated Fe/Mn oxides in microbial mats: an electron microscopical study. *Clays Clay Minerals*, 45, 203-212.
- Tazaki, K., Zhou, G. and Koiwasaki, K. (1994) Mineralization and chemical characteristics of biomats from the mining and drainage area. *Sci. Rep., Kanazawa Univ.*, 39, 47-63.
- Tazaki, K. and Ishida, H. (1996) Bacteria as nucleation sites for authigenic minerals. *J. Geol. Soc. Japan*, 102, 866-878.
- Temple, K. L. and Colmer, A. R. (1951) The autotrophic oxidation of iron by a new bacterium: *Thiobacillus ferrooxidans*.

- dans. Jour. Bacteriol., 82, 605-611.
- Urrutia, M. M. and Beberidge, T. J. (1994) Formation of fine-grained metal and silicate precipitations on a bacterial surface (*Bacillus subtilis*). Chem. Geol., 116, 261-280.
- Walsh, F. and Mitchell, R. (1972) A pH dependent succession of iron bacteria. Environ. Sci. Technol., 6, 809-812.
- Wilson, M. J. (1994) Spectroscopic and Chemical Determination Methods. Chapman & Hall, 49-52.