

미생물에 의한 티탄철석의 물리적 특성 변화

박영호, 강대완, 강성승*

Changes on Physical Property of Ilmenite due to Microorganism

Young-Ho Park, Dae Wan Kang, Seong-Seung Kang*

Abstract Laboratory tests for measuring absorption, porosity, P-wave velocity and uniaxial compressive strength (UCS) were performed to examine weathering characteristics of ilmenite by microorganism. Physical property changes were quantitatively estimated with comparing culture period on the condition of abiotic oxidation without microorganism and biooxidation with microorganism. As a result, the measured pH during 45 days was distributed in the range from 3.82 to 4.26, on the other hand, biooxidation showed the range from 2.20 to 2.57. The measured absorption according to microorganism and culture period represented 0.052% at final stage in the case of abiotic oxidation and 0.073% in the case of biooxidation. Porosity showed 0.206% at final stage in the case of abiotic oxidation and 0.281% in the case of biooxidation. In general, the values by biooxidation showed higher than that by abiotic oxidation. Change range of P-wave velocity with culture period showed that the measured value as 1410 m/s at final stage in the case of biooxidation was lower than 1886 m/s of that in the case of abiotic oxidation. The UCS was decreased with increasing culture period in all specimens and represented 241.1 MPa at final stage in the case of abiotic oxidation and 140.0 MPa in the case of biooxidation. In conclusion, it implies that influence of physical property on ilmenite by biooxidation related with microorganism was larger than that by abiotic oxidation.

Key words Microorganism, physical property, Ilmenite, Abiotic oxidation, Biooxidation

초 록 미생물의 유무에 따른 티탄철석의 물성변화를 살펴보기 위하여 공극률, 흡수율, 종파속도 및 일축압축강도(UCS) 등의 실내시험을 수행하였다. 물리적 성질 변화는 미생물을 배양하지 않은 무기적 산화와 미생물을 배양한 생물학적 산화의 조건에서 배양기간에 따라 정량적으로 비교하였다. 그 결과, 배양기간 45일까지 측정된 pH는 무기적 산화의 경우 3.82-4.26 범위에 분포하는 반면, 생물학적 산화에 의한 pH 값은 2.20-2.57 범위 내에서 분포를 보였다. 미생물 유무와 배양기간에 따라 측정된 흡수율의 경우 무기적 산화는 최종단계에서 0.052%, 생물학적 산화는 0.073%로 나타났다. 공극률의 경우 무기적 산화는 최종단계에서 0.206%, 생물학적 산화는 0.281%를 보였다. 미생물에 의한 생물학적 산화는 무기적 산화에 비해 전반적으로 높은 값을 보였다. 종파속도는 배양기간이 지남에 따라 전반적으로 초기 평균값에 비해 낮은 속도 분포를 보였으며, 무기적 산화는 최종단계에서 1886 m/s로, 생물학적 산화는 최종단계에서 1410 m/s로 나타났다. 일축압축강도는 배양기간 따라 모든 시험편에서 감소를 보이며, 무기적 산화의 경우 최종단계에서 241.4 MPa로, 생물학적 산화의 경우 140.0 MPa로 나타났다. 결론적으로 배양기간에 따른 티탄철석의 물리적 특성 변화는 미생물에 의한 영향이 크게 작용하였음을 의미한다.

핵심어 미생물, 물성변화, 티탄철석, 무기적 산화, 생물학적 산화

Received: Aug. 27, 2012

Revised: Sep. 18, 2012

Accepted: Sep. 18, 2012

***Corresponding Author:** Seong-Seung Kang

(Tel) +82622307112, (Fax) +82622332110

E-Mail) kangss@chosun.ac.kr

Chosun University, Seoseok-dong, Dong-gu, Gwangju, 501-759
Rep. of Korea

1. 서론

풍화는 작용 메커니즘에 따라 물리적, 화학적, 생물학적 풍화작용으로 구분할 수 있으며 암석의 공학적 성질을 좌우하는 중요한 요소 중에 하나이다. 물리적 풍화작용은 온도변화, 물, 염류의 결정화 등에 의하여 암석

이 서서히 쪼개어져 파쇄되는 현상이며, 화학적 풍화작용은 화학성분, 공기, 물 등이 화학적으로 반응하여 암석의 색 변화, 조암광물의 변질, 화학적 분해와 같은 현상이 발생하는 것이며, 생물학적 풍화작용은 미생물에 의한 산화나 지의류 등에 의한 광물 변질 등이 발생하는 현상을 나타낸다. 더군다나 이들 풍화작용은 개별적으로 발생하기 보다는 복합적으로 일어나는 예가 많다. 또한, 암석에 풍화가 발생하면 암반을 구성하는 암석의 강도가 저하되고, 그로 인해 결국에는 구조물 전체가 붕괴되는 결과를 가져온다. 따라서 암석의 저하 원인으로서의 풍화 메커니즘을 규명하는 것이 중요하고 이를 평가할 수 있는 방법이 필요하다.

암석의 풍화정도를 판단하기 위하여 변색, 변질 등을 육안으로 관찰하고 이를 바탕으로 정성적으로 풍화등급을 추정하는 정통적인 방법이 이용되어오고 있다. 그러나 최근에는 다양한 장비를 이용하여 실내 및 현장 시험을 함으로써 정성적인 방법과 정량적인 분석이 함께 이루어지고 있으며, 다양한 실험을 통한 풍화 메커니즘 및 이에 대한 특성을 규명하기 위한 수많은 연구들이 이루어지고 있다. 국내에서 수행된 암석 풍화에 관한 연구는 주로 동결융해에 의한 물리적 풍화특성에 관한 연구(Park et al., 2003; Jang et al., 2004; Um et al., 2009; Cho et al., 2009; Kang et al., 2011)와 화학적 및 지화학분석에 의한 화학적 풍화특성에 관한 연구(Woo and Park, 2004; Lee et al., 2007; Woo et al., 2009; Song et al., 2009; Um, 2012)가 집중되어 이루어 졌다. 하지만 생물학적 풍화에 의한 암석의 물성 특성에 관한 연구는 매우 빈약한 실정이다.

한편 국내외에서 미생물을 이용한 유용광물 용출과 이들의 특성에 관한 연구로부터 미생물의 성장환경과 활동에 영향을 미치는 pH, Eh, 미생물에 의한 광물의 용해 및 생성에 관한 결과들이 많은 연구자들에 의해 보고되었다(Brierley, 1978; Grishin et al., 1988; Bhatti et al., 1993; Zhang et al., 1997; Roh et al., 2006; Park et al., 2010; Yu et al., 2011, Lee et al., 2011; Park et al., 2012). 이들 연구결과에 따르면, 미생물에 의한 pH와 Eh가 이들의 대사작용 및 성장활동에 의한 반응 결과로서 광물의 산화작용을 촉진시키므로 암석의 풍화에 있어 중요한 요인으로 작용함을 나타냈다. 이처럼 미생물에 의한 산화는 미생물체가 에너지를 쉽게 얻기 위해서 산화작용이 일어나는 광물 표면에 직접적으로 부착하게 된다는 직접접촉산화 메커니즘에 대한 가설을 Siverman(1967)이 처음 제안한 이래로 이에 대한 많은 연구들이 이루어져왔다. Sand et al.(1995, 2001)은 미생물체가 부착된 광물 표면은 이들이 분비한 효소

로 인하여 부식작용이 일어나며, 이때 이들이 세포외중합체물질(extracellular polymeric substance)을 분비하여 광물의 표면을 효소적으로 공격한다고 설명하였다. 그리고 Rojas-Capana et al.(1995)는 미생물체가 분비한 유기질 캡슐(organic capsule)이 광물의 표면을 강하게 산화시키고, 박천영 외(2011)는 미생물의 직접접촉산화 메커니즘에 의하여 자연적으로 이루어진 미세한 공극 및 균열 등을 확장시킨다고 해석하였다. 이 연구는 미생물의 산화작용 메커니즘이 광물의 결함(imperfection)에 영향을 미친다는 점에 착안하여 미생물을 배양하지 않은 무기적 산화(abiotic oxidation)와 미생물을 배양한 생물학적 산화(biooxidation)의 두 조건하에 배양기간에 따른 각각의 공극률, 흡수율, 종파속도 및 일축압축 시험을 수행하였다. 즉, 암석이 인위적으로 만들어진 조건의 산화 환경에서 시간이 경과함에 따라 무기적으로 이루어지는 산화작용과 미생물에 의하여 생물학적으로 이루어지는 산화작용에 대한 비교분석을 통해 이들의 상관관계를 정량적으로 살펴보았다.

2. 시험대상 시료

연구지역은 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 경기도 포천시 관인면 삼율리 산144-1번지 함티탄철광산에 분포하는 티탄철석을 대상으로 암석 코어 제작용 암석 덩어리

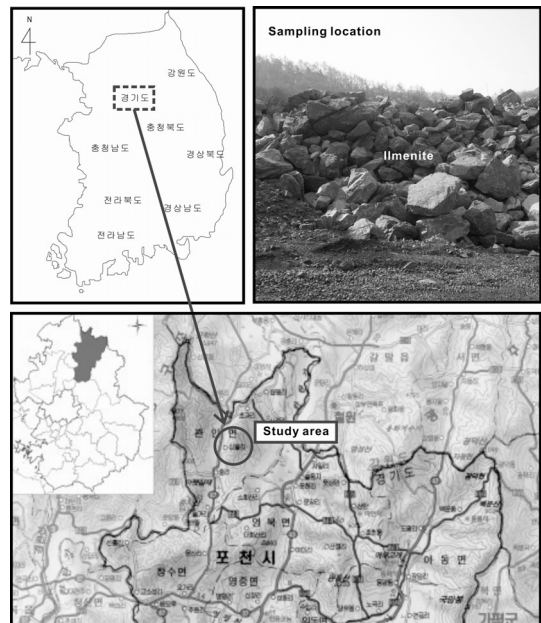


Fig. 1. Study area and sampling location

를 채취하였다. 이 지역은 경기변성암 복합체의 북쪽에 해당하는 지역으로서 선캄브리아기의 변성퇴적암류에 대비되는 변성퇴적암류와 이들을 관입하는 시대미상의 각섬암이 중앙부에 넓게 분포하고 있다. 또한 변성퇴적암류 중 운모편암은 남동부에 넓게 분포하며, 남서부에서는 규암과 석회암 및 운모편암이 호층을 이룬다. 특히 규암의 일부는 각섬암이 분포하는 중앙부에 포획되어 함티탄자철광체와 접하고 있으며 석회암은 규암 및 운모편암과 호층을 이루고 각섬암 내에 포획된 석회암이 중앙부와 남부에서 관찰된다. 상기의 변성퇴적암류와 각섬암들은 대보화강암류에 해당하는 화강암이 관입하고 있다. 아울러 광상유형은 정마그마 광상에 속하며 수반되는 광석광물로는 황철석, 섬아연석, 자철석, 티탄철석 등이 주를 이루고 있다.

3. 연구방법

3.1 시험편 제작

미생물의 의한 암석의 물성변화 특성을 관찰하기 위한 시료는 Fe의 성분이 주를 이루는 티탄철석이 사용되었다. 티탄철석 시험편은 미생물 및 성장-배양액(American Type Culture Collection; ATCC) 용액의 첨가량을 고려하여 크기를 최소화하였다. 즉, 시험편은 Fig. 2에 보이는 바와 같이 티탄철석 덩어리로부터 코어를 회수하여 직경 25 mm, 높이 50 mm 크기의 시험편으로 성형하였다. 특히, 이 연구가 무기적 산화와 생물학적 산화 등 두 조건의 산화환경에서의 물성변화를 비교분석한다는 점을 고려해볼 때, 시료 불균질성에 의한 물성변화의 영향을 최소화하기 위하여 두 개의 대상 암석 덩어리에서 각각 10개 씩 총 20개의 코어를 회수하여 시험편을 제작하였다.

3.2 실험방법

이 연구에서 사용된 미생물은 이들 자체만으로는 배양이 불가피하며, 미생물을 배양하기 위해서는 N, P 및 미량원소와 같은 무기성분과 에너지원이 필요하다. 따라서 이 연구에서는 생물학적 풍화를 유도하기 위한 방법으로 성장-배양액(ATCC)을 이용하여 미생물이 생존

할 수 있는 환경을 인위적으로 조성하였다. 여기서, 무기성분은 $(NH_4)SO_4$, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, $CaCl_2$ 및 KH_2PO_4 를 3차 초순수 증류수에 용해시켜 제조하였다. 에너지원은 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 를 무기성분에 첨가하였으며, 최종적으로 2개의 성장-배양액을 제조하였다. 그 이후에 미생물의 유무에 따른 산화환경 조건하에서 티탄철석의 물성변화를 비교분석하기 위해 생물학적 산화작용의 수조에는 산화에너지원인 티탄철석 코어 시험편 10개를 첨가하여 미생물을 배양시켰다. 반면, 무기적 산화작용의 수조에는 티탄철석 코어 시험편 10개만을 첨가하였다. 이때, 미생물 유무에 따른 티탄철석의 물성변화를 비교하기 위한 배양기간은 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45일 등 5일 간격의 총 10단계로 구성하였다. 배양기간에 따른 각 시험편의 물성시험은 ISRM(1979)과 KSRM(2010)에서 제안된 시험법을 적용하여 공극률, 흡수율, 탄성파속도 및 일축압축강도를 측정하였다.

4. 미생물의 산화작용 메커니즘

미생물에 의한 암석의 풍화작용은 다양한 원인들이 복합적으로 발생하여 이루어지는 과정으로서 광물의 구성 성분을 주 에너지원으로 활용하며, 이들의 대사작용을 통하여 산화를 촉진시킨다. 더군다나 이 연구에서 미생물에 의한 산화작용 메커니즘이 광물의 풍화에 있어 직접적인 영향을 미치는 요인으로 작용하기 때문에 이를 정확하게 이해하는 것이 중요하다.

Sand et al.(1995)은 황화광물에 포함되어 있는 금속이온은 미생물의 직접접촉산화작용(direct contact oxidation)과 간접접촉산화작용(indirect contact oxidation)에 의하여 일어남을 보고하였다. 직접접촉산화작용은 미생물체가 황화광물의 표면에 물리적으로 부착하여 산화작용을 일으키는 것이다(Fig. 3). 그림에서 보이는 바와 같이 미생물들이 황화광물 표면에 발달한 결함(defect)과 같은 특정 장소에 부착하고 있는 것을 관찰할 수 있다(Fig. 3(a)). 이러한 원인은 미생물에 의한 황화광물의 산화작용이 결정화가 잘 이루어진 결정면 보다는 결함이 있는 결정면에서 더 잘 일어나고, 이들의 특징이 산화작용을 일으킬 때 쉽게 산화에너지원을 방출하기 때문이다(Rojas-Chapana and Tributsch, 2004). 즉, 자연계에서 생성된 광물에는 자연적으로 발달된 균열, 파쇄대 및 미세한 공극들이 존재하며, 미생물들은 이들 장소로부터 쉽게 산화에너지원을 흡수할 수 있다(Bennett and Tributsch, 1978; Shrihari et al, 1991; Ohmura et al., 1993). 이처럼 미생물체는 특정 장소에 부착하여 산화작용을 일으키는 과정에서 대사작용을 통해 유기산

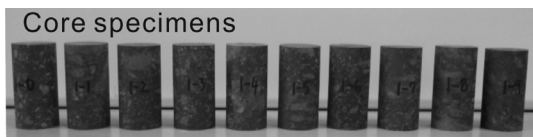


Fig. 2. Core specimens recovered from ilmenite rock blocks

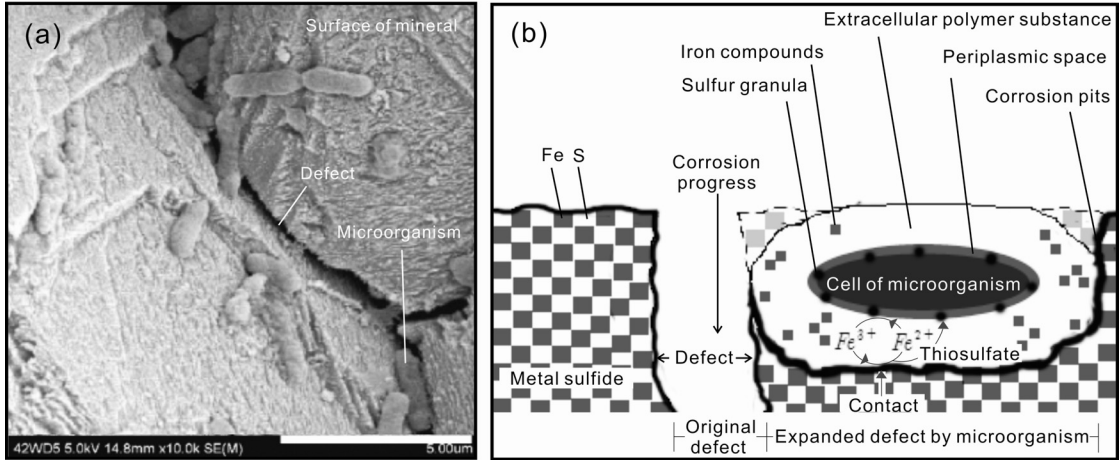


Fig. 3. Direct contact oxidation by characteristic of microorganism, (a) SEM image of microorganism attached to ilmenite surface, (b) corrosion of ilmenite by microorganism

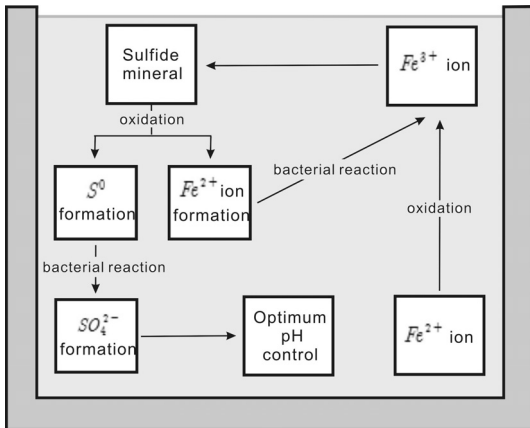


Fig. 4. Processing of indirect contact oxidation by microorganism

과 세포외중합체물질을 분비하며 광물 표면을 효소적으로 공격한다(Fig. 3(b)). 그 결과 미생물체가 분비한 효소로 인해 부식작용에 의한 충식이 일어나며 결함을 확장시킨다.(Sand et al., 1995; Park et al., 2011).

한편 간접접촉산화작용은 미생물이 용액 속에 용해되어 있는 Fe^{2+} 이온을 산화시켜 에너지원으로 활용하고, 산화에 의해 생성된 Fe^{3+} 이온이 황화광물을 산화시키는 것으로서 그 과정을 타나내면 Fig. 4와 같다. 그림에서 보여주는 바와 같이 공기와 접촉한 Fe^{2+} 이온이 Fe^{3+} 이온으로 산화되며, Fe^{3+} 이온이 황화광물을 무기적으로 산화시켜 Fe^{2+} 이온과 S^0 을 생성시킨다. 이때 생성된 Fe^{2+} 이온과 S^0 은 미생물과 반응하여 Fe^{3+} 와 SO_4^{2-}

를 생성한다. 이와 같이 미생물은 Fe^{2+} 이온을 산화에너지원으로 활용하는 과정을 반복하며 산화를 촉진시킨다(Tribusch, 2001; Park et al., 2010).

5. 연구결과

5.1 배양 전 물성시험 결과

배양 전의 물성시험으로부터 미생물 배양 유무와 배양기간에 따라 변화하는 티탄철석의 물성특성을 관찰하기 위해서 배양 실시 전 공극률, 흡수율, 종파속도 및 일축압축시험을 실시하였다. 그 이후에 측정된 각각의 시험편에 대한 초기 물성시험 결과를 정리하면 Table 1과 같다. 생물학적 산화를 위한 티탄철석 시험편의 초기 물성값을 살펴보면, 공극률은 0.136-0.266%의 범위로 평균 0.179%를 나타내며, 흡수율은 0.033-0.067%의 범위와 평균 0.043%를 보인다. 종파속도는 1524-2040 m/s의 범위이며, 평균 1921 m/s의 속도 분포를 나타낸다. 일축압축강도는 1회 측정의 결과이며, 475.0 MPa의 강도를 보인다. 반면, 무기적 산화를 위한 시험편의 경우 공극률은 0.119-0.276%의 범위로 평균 0.190%를 나타내며, 흡수율은 0.033-0.085%로 평균 0.048%이다. 종파속도는 1515-2057 m/s의 범위로 평균 1916 m/s의 속도 분포를 보인다. 일축압축강도는 389.7 MPa로 나타났다.

5.2 pH 측정결과

미생물 배양 유무와 배양기간에 따른 티탄철석의 pH 변화 결과를 Table 2에 정리하였다. 그리고 배양기간에

Table 1. The initial values of the physical properties on ilmenite core specimens (n: porosity, Ab: absorption, Vp: P-wave velocity, UCS; uniaxial compressive strength)

Specimen No.	For abiotic oxidation				For biooxidation			
	n (%)	Ab (%)	Vp (m/s)	UCS (MPa)	n (%)	Ab (%)	Vp (m/s)	UCS (MPa)
0	0.132	0.033	2057	389.7	0.183	0.045	2032	475.0
1	0.153	0.038	1515		0.175	0.045	1524	
2	0.135	0.034	2040		0.197	0.047	2032	
3	0.213	0.054	1850		0.167	0.039	2032	
4	0.163	0.038	2032		0.212	0.051	2032	
5	0.351	0.085	2040		0.156	0.033	2040	
6	0.119	0.029	2040		0.156	0.035	2024	
7	0.123	0.033	2016		0.136	0.033	1984	
8	0.236	0.061	2040		0.139	0.037	1984	
9	0.276	0.075	1533		0.266	0.067	1524	
Average	0.190	0.048	1916	0.179	0.043	1921		

Table 2. The results of the measured physical properties according to two oxidation conditions and culture period (n: porosity, Ab: absorption, Vp: P-wave velocity, UCS; uniaxial compressive strength, 0-day: initial average values)

Culture period (day)	Abiotic oxidation					Biooxidation				
	n (%)	Ab (%)	Vp (m/s)	UCS (MPa)	pH	n (%)	Ab (%)	Vp (m/s)	UCS (MPa)	pH
0	0.190	0.048	1916	389.7	4.26	0.179	0.043	1921	475.0	2.20
5	0.202	0.051	1916	174.9	4.22	0.234	0.058	1921	180.8	2.35
10	0.206	0.052	1908	385.3	4.04	0.235	0.057	1842	265.0	2.33
15	0.209	0.053	1885	221.2	4.00	0.230	0.055	1811	162.7	2.32
20	0.206	0.052	1876	285.8	3.87	0.282	0.068	1446	156.1	2.30
25	0.198	0.050	1884	225.1	3.82	0.234	0.057	1391	130.0	2.43
30	0.196	0.050	1880	163.7	3.83	0.251	0.060	1577	170.7	2.52
35	0.206	0.052	1886	192.2	3.84	0.282	0.069	1389	123.6	2.54
40	0.206	0.052	1876	278.5	3.85	0.298	0.067	1418	148.4	2.56
45	0.206	0.052	1886	241.4	3.87	0.281	0.073	1410	140.0	2.57

따른 무기적 및 생물학적 산화에 의한 pH 변화 관계를 Fig. 5에 나타냈다. 여기서, 초기 pH는 미생물이 충분히 적응할 수 있도록 배양 실시 24시간 이후를 0일로 시작하여 5일 간격으로 측정하였다. 그 결과를 살펴보면, 무기적 산화에 의한 pH는 3.82-4.26 범위의 분포를 보이는 반면, 생물학적 산화에 의한 pH 값은 2.20-2.57 범위 내에서 분포한다. 이와 같이 생물학적 산화작용에 의한 pH 값이 낮은 원인은 무기적 및 생물학적 산화작용이 복합적으로 작용하여 티탄철석의 산화를 촉진시킨 결과 때문으로 사료된다.

5.3 배양 후 물성시험 결과

티탄철석 시험편에 대한 물성시험은 무기적 및 생물학적 산화의 산화작용과 배양기간에 따라 흡수율, 공극

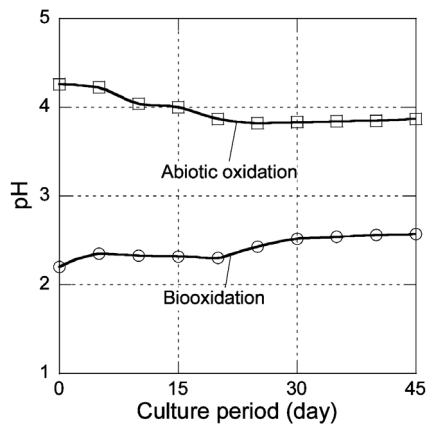


Fig. 5. The pH change by abiotic oxidation and biooxidation with culture period

를, 종파속도 및 일축압축시험을 수행하였다. 그 이후에 배양기간 동안 발생하는 무기적 및 생물학적 산화에 의한 각 단계별 시험편의 물성변화 양상을 비교분석하였다(Table 2). 이때, 배양 실시 전으로부터 배양 실시 이후에 측정된 흡수율, 공극률 및 종파속도는 식 (1)로 계산할 수 있다.

$$P_a = I_a - (I_b - M_a) \tag{1}$$

여기서, P_a (Property values after culture)는 배양 후 물성값, I_a (Initial average values)는 배양 전 초기 평균값, I_b (Initial values before culture)는 배양 전 초기 측정값, M_a (Measure values after culture)는 배양 후 측정값을 나타낸다.

식 (1)에 의해 계산된 각 물성시험에 대한 결과를 나타내면 Fig. 6과 같다. Fig. 6(a)는 미생물 배양 유무와 배양기간에 따라 측정된 흡수율의 변화를 그래프로 도

시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 배양기간이 지남에 따라 측정된 각 단계별 시험편의 물성치는 초기 평균값(배양기간 0일)에 비해 전반적으로 높은 값을 보이지만, 이는 미미한 증가량으로서 무기적 산화의 경우 최종단계(배양기간 45일)에서 0.052%로, 생물학적 산화의 경우 0.073%로 나타났다. 그러나 0-45일까지 이들의 변화폭은 전반적으로 큰 차이를 나타내며, 무기적 산화에 비해 생물학적 산화에 의한 흡수율이 더 큰 증가를 보인다.

Fig. 6(b)는 미생물 배양 유무와 배양기간에 따라 증가된 공극률을 도시한 것이다. 공극률은 흡수율의 경우와 비슷하게 배양기간에 따라 모든 시료에서 미미한 증가를 보이며, 무기적 산화는 최종단계에서 0.206%, 생물학적 산화는 0.281%로 나타났다. 결과적으로 공극률도 흡수율과 마찬가지로 0-45일까지 두 조건의 산화작용 하에서 측정된 물성치의 변화폭은 큰 차이를 보이며, 미생물에 의한 영향이 우세하게 작용하였음을 알 수 있다.

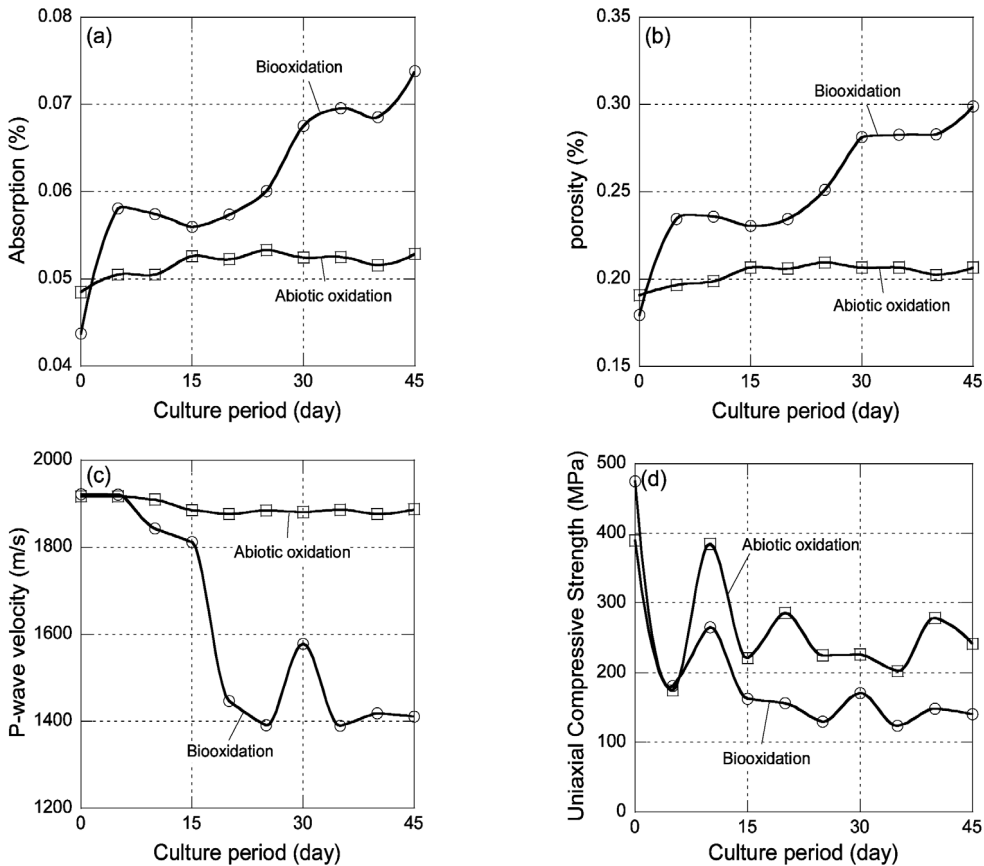


Fig. 6. Changes of (a) absorption, (b) porosity, (c) P-wave velocity and (d) uniaxial compressive strength by abiotic oxidation and biooxidation with culture period

Fig. 6(c)은 배양기간에 따른 무기적 및 생물학적 산화작용이 종파속도에 미치는 영향을 배양기간-종파속도의 관계로 보여주고 있다. 이들의 관계를 살펴보면, 초기 평균값에 비해 무기적 산화는 미미한 수준의 속도 분포를 보이며 최종단계에서 1886 m/s로 나타난 반면, 생물학적 산화는 전반적으로 큰 변화의 속도분포를 보이며 최종단계에서 1410 m/s로 나타났다. 이와 같이 생물학적 산화에 의한 종파속도가 비교적 큰 감소를 보이는 원인은 아직 정확하게 제시할 수는 없지만 미생물의 직접접촉산화작용에 의한 결과로서 기존에 발달한 균열 및 미세한 공극과 같은 결함을 확장시킨 현상으로 해석된다(Fig. 3).

Fig. 6(d)는 배양기간에 따른 무기적 및 생물학적 산화작용에 의해 일축압축강도가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 일축압축강도는 두 조건의 산화작용 하에서 초기 측정값(배양기간 0일)에 비해 전반적으로 낮은 측정값을 보이며, 특히 배양기간 10일 이후부터 뚜렷한 차이를 보인다. 무기적 산화의 경우 일축압축강도는 최종단계에서 241.4 MPa로 측정된 반면 생물학적 산화의 경우 140.0 MPa로 나타났다. 이와 같이 일축압축강도는 모든 시험편에서 뚜렷한 강도변화를 보이지만, 배양기간에 따른 각 시험편의 측정된 물성치에 대한 변화폭을 비교해보면, 무기적 산화에 비해 생물학적 산화에 의한 영향이 더 크게 작용하였음을 알 수 있다.

6. 결 론

자연계에서 발생하는 풍화에 의한 암석의 물성변화는 예측이 어려우며, 이들은 단독으로 작용하기 보다는 복합적으로 작용하는 예가 많기 때문에 암석의 풍화 메커니즘 규명과 함께 풍화 특성 및 평가법을 확립하는 것이 중요하다. 따라서 이 연구는 생물학적 풍화작용에 대한 암석의 풍화지표를 제시하기 위해 배양기간에 따른 무기적 및 생물학적 산화작용에 대한 풍화실험을 수행하여 이들의 관계를 정량적으로 비교분석 하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 무기적 및 생물학적 산화 두 조건의 산화작용과 배양기간에 따른 pH 측정 결과에서 무기적 산화의 경우 3.82-4.26의 범위 내에 분포를 보인 반면 생물학적 산화는 2.20-2.57의 범위 내에 분포하였다.
2. 흡수율과 공극률은 배양기간이 지남에 따라 측정된 각 단계별 시험편의 물성치는 초기 평균값에 비하여 전반적으로 더 높은 값을 보였다. 흡수율의 경우 무

기적 산화는 최종단계에서 0.052%, 생물학적 산화는 0.073%, 공극률의 경우 무기적 산화는 최종단계에서 0.206%, 생물학적 산화는 0.281%로 각각 나타났다.

3. 종파속도는 배양기간이 지남에 따라 전반적으로 초기 평균값에 비해 낮은 속도 분포를 보였으며, 무기적 산화는 최종단계에서 1886 m/s로, 생물학적 산화는 최종단계에서 1410 m/s로 나타났다.
4. 일축압축강도는 배양기간 동안 모든 시험편에서 초기 측정값에 비해 낮은 값을 보였다. 특히, 10일 이후부터 무기적 및 생물학적 산화작용의 변화 폭이 뚜렷한 차이를 보였다. 무기적 산화의 경우 최종단계에서 241.4 MPa로, 생물학적 산화의 경우 140.0 MPa로 나타났다.
5. 결론적으로 무기적 및 생물학적 산화의 산화작용과 배양기간에 따른 터탄철석의 물성변화에 대한 상관관계를 정량적으로 비교해 볼 때, 미생물이 터탄철석의 물성변화에 큰 영향을 미쳤을 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 2011학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Bhatti, T. M., J. M. Bigham, L. Carlsin and O. H. Tuovinen, 1993, Mineral products of pyrrhotite oxidation by *Thiobacillus ferrooxidans*, *Applied and Environmental Microbiology*, 59, 6, 1984-1990.
2. Bannett, J. C. and H. Tributsch, 1978, Bacterial leaching patterns on pyrite crystal surfaces, *Journal of Bacteriology*, 134, 310-317.
3. Brierley, J. A., 1978, Thermophilic iron-oxidizing bacteria found in copper leaching dumps, *Applied and Environmental Microbiology*, 36, 3, 523-525.
4. Cho, T. J., S. B. Lee, T. J. Hwang and K. S. Won, 2009, Variations of mechanical properties of Hallasan trachyte with respect to the degree of weathering, *Tunnel & Underground Space, Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, 19, 4, 287-303.
5. Grishin, S. I., J. M. Bigham and O. H. Tuovinen, 1988, Characterization of jarosite formed upon bacterial oxidation of ferrous sulfate in a packed-bed reactor, *Applied and Environmental Microbiology*, 54, 12, 3101-3106.
6. ISRM, 1981, Rock characterization testing and monitoring, ISRM suggested methods, Editor E. T. Brown, The Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Pergamon Press, pp. 1-211.
7. Jang, H. S., B. A. Jang, and J. S. Lee, 2004, Variations

- of Engineering geological characteristics of the cretaceous shale from the Pungam sedimentary basin in Kangwon-do due to freezing-thawing, *The Journal of Engineering Geology*, 14, 4, 401-416.
8. Kang, S. S., J. I. Kim, Y. Obara and A. Hirata, 2011, Estimation of weathering characteristics of sandstone and andesite by freeze-thaw test, *Tunnel & Underground Space, Journal of Korea society for Rock Mechanics*, 21, 2, 145-150.
 9. KSRM, 2010, Rock standard method, KSRM suggested methods, Editor C. Park, The Commission on Testing Methods, Korean Society for Rock Mechanics, CIR Press, pp. 1-123.
 10. Lee, C.S., T. C. Cho, S. B. Lee and K. S. Won, 2007, A study of weathering characteristic of Baeknokdam trachyte in Jeju Island, *The Journal of Engineering Geology*, 17, 2, 235-251.
 11. Lee, C. W., Y. H. Park, B. J. Kim, J. S. Yoon, D. W. Wi, C. Y. Park and S. S. Kang, 2011, Variation of slake durability and P-wave velocity of pyrrhotite due to weathering of microorganism, Korean Society for Rock Mechanics, September 29-30, Pyeongchang, Kangwondo, Korea, 219-223.
 12. Ohmura, N., K. Kitamura and H. Saiki, 1993, Selective adhesion of Thiobacillus ferrooxidans to pyrite, *Applied and Environmental Microbiology*, 59, 12, 4044-4050.
 13. Park, C. Y., K. H. Jeong, B. J. Kim, H. Wi and Y. G. Lee, 2011, The corrosion and the enhance of bioleaching for galena by moderate thermophilic indigenous bacteria, *Journal of The Korean Society for Geosystem Engineering*, 48, 1, 11-24.
 14. Park, C. Y. and B. J. Kim, 2010, Characteristics of thermophilic bacteria and secondary materials attached on the pyrrhotite, Uljin, *Journal of Mineralogical Society of Korea*, 23, 315-329.
 15. Park, Y. H., C. W. Lee, T. Y. Na, D. W. Kang and S. S. Kang, 2012, Physical property variation of pyrrhotite by weathering of microorganism, The Korean Society of Engineering Geology, April 5-6, Busan, Korea, 185-189.
 16. Park, Y. J., K. H. You, K. Y. Yang, I. Woo, C. Park and W. K. Song, 2003, Weathering characteristics of granite by freeze-thaw cyclic test, *Tunnel & Underground Space, Journal of Korea society for Rock Mechanics*, 13, 3, 215-224.
 17. Roh, Y., J. M. Oh, Y. J. Seo and H. D. Jang, 2006, Microbial leaching of iron from magnetite. *Tunnel & Underground Space, Journal of Mineralogy Society of Korea*, 19, 4, 265-275
 18. Rojas-Chapana, J. A., M. Giersig and H. Tributsch, 1995, Sulfur colloids as temporary energy reservoirs for Thiobacillus ferrooxidans during pyrite oxidation, *Archives of Microbiology*, 163, 352-356.
 19. Rojas-Chapana, J. A. and H. Tributsch, 2004, Interfacial activity and leaching patterns of Leptosprillum ferrooxidans on pyrite, *FEMS Microbiology Ecology*, 47, 19-29.
 20. Sand, W., T. Gerke, A. Hallmann and A. Schippers, 1995, Sulfur chemistry, biofilm, and the (in)direct attack mechanism-a critical evaluation of bacterial leaching, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 43, 961-996.
 21. Sand, W., T. Gehrke, P. G. Jozsa and A. Schippers, 2001, (Bio)chemistry of bacterial leaching - direct vs indirect bioleaching, *Hydrometallurgy*, 59, 159-175.
 22. Shirihari, Kumar, R., K. S. Gandhi and K. I. A. Natarajan, 1991, Role of cell attachment in leaching of chalcopyrite mineral by Thiobacillus ferrooxidans, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 36, 278-282.
 23. Silverman, M. P., 1967, Mechanism of bacteria pyrite oxidation, *Journal of Bacteriology*, 6, 153-206.
 24. Song, W. K., I. Woo and B. C. Kim, 2009, Analysis on weathering characteristics of rocks in Dokdo by accelerated weathering test, *Tunnel & Underground Space, Journal of Korea society for Rock Mechanics*, 29, 4, 318-327.
 25. Tribusch, H., 2001, Direct versus indirect bioleaching, *Hydrometallurgy*, 59, 177-185.
 26. Um, J. G., 2012, A study of weathering characteristics of cretaceous granite in Kimhae area due to Artificial weathering processes, *Tunnel & Underground Space, Journal of Korea society for Rock Mechanics*, 22, 1, 32-42.
 27. Um, J. G., I. Woo and H. J. Park, 2009, Variation of engineering geological characteristics of jurassic granite Wonju due to freeze-thaw weathering, *Journal of Korea Society for Economic and Environmental Geology*, 42, 4, 261-272.
 28. Woo, I. and H. J. Park, 2004, Classification of weathering for the granite and granite gneiss in Okcheon Belt-Jecheon·Geumsan·Gimcheon in Korea, *Journal of Korea Society for Economic and Environmental Geology*, 37, 3, 355-364.
 29. Woo, I., J. G. Um and H. J. Park, 2009, Variation of geomechanical characteristics of granite and orthogneiss in Wonju area due to accelerated artificial chemical weathering tests, *Tunnel & Underground Space, Journal of Korea Society for Rock Mechanics*, 19, 3, 213-225.
 30. Yu, J. Y., H. J. Koh and H. G. Song, 2011, Surface texture changes due to the oxidation of pyrite by Acidithiobacillus Ferrooxidans, *Journal of Mineralogical Society of Korea*, 24, 235-244.
 31. Zhang, C., S. Liu, T. J. Phelps, D. R. Cole, J. Horita, S. M. Fortier, M. Elless and J. W. Valley, 1997, Physiochemical, mineralogical, and isotopic characterization of magnetite-rich iron oxides formed by thermophilic iron-reducing bacteria, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61, 21, 4621-4632.



박영호

2011년 조선대학교 에너지자원공학과
공학사

Tel: 062-230-7115

E-mail: socottie@naver.com

현재 조선대학교 에너지자원공학과 석
사과정



강대완

1982년 조선대학교 자원공학과 공학사
2009년 순천대학교 조경학과 이학사
2011년 순천대학교 조경학과 이학석사

Tel: 062-230-7110

E-mail: kdwk0602@hanmail.net

현재 조선대학교 에너지자원공학과 박
사과정



강성승

1993년 조선대학교 자원공학과 공학사
1996년 강원대학교 자연대학 지구물리
학과 이학석사

2000년 Kumamoto University 토목공
학과 Ph.D.

Tel: 062-230-7112

E-mail: kangss@chosun.ac.kr

현재 조선대학교 에너지자원공학과 교수
