



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2014년 2월

박사학위논문

미생물에 의한 함철광석의 물성 및
강도 변화 특성에 관한 연구

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

강대완

미생물에 의한 함철광석의 물성 및
강도 변화 특성에 관한 연구

Variations of Physical Properties and Strength of
Ferruginous Minerals due to Microorganism

2014년 2월 25일

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

강대완

미생물에 의한 함철광석의 물성 및 강도 변화 특성에 관한 연구

지도교수 강 성 승

이 논문을 공학 박사학위신청 논문으로 제출함

2013년 10월

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

강 대 완

강대완의 박사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 박 천 영 (인)

위 원 조선대학교 교수 고 진 석 (인)

위 원 순천대학교 교수 김 정 빈 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 대 현 (인)

위 원 조선대학교 교수 강 성 승 (인)

2013년 12월

조선대학교 대학원

- 목 차 -

목차	i
List of tables	iii
List of figures	vi
Abstract	ix
1. 서론	1
2. 연구배경	4
2.1 미생물의 특성	4
2.2 미생물의 산화작용 메커니즘	6
3. 연구지역 지질 및 광상	9
3.1 제2연화광산	9
3.1.1 제2연화광산 지질 및 광상	9
3.1.2 자류철석	9
3.2 동원리소스 관인광산	13
3.2.1 관인광산 지질 및 광상	13
3.2.2 티탄철석	16
3.3 한덕철광 신예미광산	17
3.3.1 신예미광산 지질 및 광상	17
3.3.2 자철석	19
4. 시험방법	21
4.1 시험편	21
4.2 미생물 배양 및 시험편 산화시험	23
4.3 실내시험	24
4.3.1 슬레이크 내구성 시험	24
4.3.2 흡수율	26
4.3.3 종파속도	28
4.3.4 일축압축시험	29

5. 초기 물성값과 보정	30
6. 연구결과	36
6.1 자류철석의 물성변화	36
6.1.1 배양기간에 따른 자류철석의 pH 변화	36
6.1.2 자류철석의 슬레이크 내구성 시험	39
6.1.3 자류철석의 흡수율	43
6.1.4 자류철석의 종파속도	48
6.1.5 자류철석의 일축압축강도	53
6.2 티탄철석의 물성변화	55
6.2.1 무기적 및 생물학적 산화에 따른 티탄철석의 pH 변화	55
6.2.2 티탄철석의 흡수율	58
6.2.3 티탄철석의 종파속도	63
6.2.4 티탄철석의 일축압축강도	68
6.3 자철석의 물성변화	71
6.3.1 무기적 및 생물학적 산화에 따른 자철석의 pH 변화	71
6.3.2 무기적 및 생물학적 산화에 따른 자철석의 Eh 변화	74
6.3.3 자철석의 흡수율	77
6.3.4 자철석의 종파속도	82
6.3.5 자철석의 일축압축강도	87
7. 함철광석의 물성변화에 대한 종합적 고찰	90
7.1 자류철석의 물성변화 고찰	90
7.2 티탄철석의 물성변화 고찰	92
7.3 자철석의 물성변화 고찰	94
8. 결론	96
참고문헌	99

List of tables

Table 5-1. The initial values of absorption and P-wave velocity on pyrrhotite, ilmenite, and magnetite	32
Table 6-1. The results of the measured pH with an interval of 3 days during culture period on specimen-U for uniaxial compressive strength and specimen-S for slake duability test of pyrrhotite, 0 day: controled pH	37
Table 6-2. The results of the measured weight with culture period and the number of slaking cycles on slake durability test	40
Table 6-3. The results of the calculated slake durability index with culture period and the number of slaking cycles, I_{dn} : Slake durability index ...	40
Table 6-4. The results of the measured absorption before and after culture with culture period on Specimen-U and Specimen-S of pyrrhotite, M_{dry} : dry weight, M_{sat} : saturated weight, Ab: absorption	44
Table 6-5. The results of normalized absorption with culture period on Specimen-U and Specimen-S of pyrrhotite, 0 day: initial average values	45
Table 6-6. The results of the measured P-wave velocity (V_p) before and after culture with culture period on Specimen-U and Specimen-S of pyrrhotite	49
Table 6-7. The results of normalized P-wave velocity (V_p) with culture period on Specimen-U and Specimen-S of pyrrhotite, 0 day: initial average value	50
Table 6-8. The results of the measured uniaxial compressive strength (UCS) with culture period on Specimen-U and Specimen-S of pyrrhotite, 0 day: initial value	54
Table 6-9. The results of the measured pH with abiotic oxidation and bio-oxidation tests and culture period on ilmenite	56
Table 6-10. The results of the measured absorption before and after abiotic oxidation and bio-oxidation tests with culture period on ilmnenite, M_{dry} :	

dry weight, M_{sat} : saturation weight, Ab: absorption	59
Table 6-11. The results of normalized absorption on abiotic oxidation and bio-oxidation tests of ilmenite with culture period, 0 day: initial average values	60
Table 6-12. The results of the measured P-wave velocity (V_p) before and after abiotic oxidation and bio-oxidation tests with culture period on ilmenite	64
Table 6-13. Table 6-13. The results of normalized P-wave velocity (V_p) before and after abiotic oxidation and bio-oxidation tests with culture period, 0 day: initial average values	65
Table 6-14. The results of the measured uniaxial compressive strength (UCS) before and after abiotic oxidation and bio-oxidation tests with culture period of ilmenite, 0 day: initial average values	69
Table 6-15. The results of the measured pH with abiotic oxidation and bio-oxidation tests and culture period on magnetite	72
Table 6-16. The results of the measured Eh with abiotic oxidation and bio-oxidation tests and culture period on magnetite	75
Table 6-17. The results of the measured absorption before and after abiotic oxidation and bio-oxidation tests with culture period on magnetite, M_{dry} : dry weight, M_{sat} : saturation weight, Ab: absorption	78
Table 6-18. The results of normalized absorption on abiotic oxidation and bio-oxidation tests of magnetite with culture period, 0 day: initial average values	79
Table 6-19. The results of the measured P-wave velocity (V_p) on abiotic oxidation and bio-oxidation tests of magnetite with culture period, 0 day: initial average values	83
Table 6-20. The results of normalized P-wave velocity (V_p) on abiotic oxidation and bio-oxidation tests of magnetite with culture period, 0 day: initial average values	84
Table 6-21. The results of the measured uniaxial compressive strength (UCS) before and after abiotic oxidation and bio-oxidation tests with culture	

period of magnetite, 0 day: initial average values 88

List of figures

Figure 2-1. Theoretical growth curve of microorganism, lag, log, stationary and death phases	5
Figure 2-2. Direct contact oxidation by microorganism; (a) SEM image of microorganism attached to mineral surface and (b) corrosive oxidation mechanism by microorganism	7
Figure 2-3. Processes of indirect contact oxidation by microorganism	8
Figure 3-1. Geological map of South Korea and the locations of the studies areas	11
Figure 3-2. The geological map and sampling location of pyrrhotite obtained from the second Yeonwha mine	12
Figure 3-3. Microphotographs in (a) open- and (b) cross-polarized lights of pyrrhotite	12
Figure 3-4. The geological map and sampling location of ilmenite obtained from the Kwanin mine	15
Figure 3-5. Microphotographs in (a) open- and (b) cross-polarized lights of ilmenite	16
Figure 3-6. The geological map and sampling location of magnetite obtained from the Shinyemi mine	19
Figure 3-7. Microphotographs in (a) open- and (b) cross-polarized lights of magnetite	20
Figure 4-1. Specimen preparation for physical tests in laboratory, (a) core recovery, (b) cutting and (c) polishing	22
Figure 4-2. Core specimens for physical tests in laboratory, (a) pyrrhotite, (b) ilmenite and (c) magnetite	22
Figure 4-3. Slake durability test for slake durability index, (a) apparatus and (b) controller	25
Figure 4-4. Process of absorption measurement, (a) desiccator and vacuum oil pump for saturation, (b) Measurement of immersed and saturated	

weights and (c) drying oven for measurement of dry weight	27
Figure 4-5. Measurement of P-wave velocity; (a) component of CND tester and (b) measurement method	28
Figure 4-6. A view of the uniaxial compression test for uniaxial compressive strength (UCS) in laboratory	29
Figure 5-1. The initial values of absorption and P-wave velocity in pyrrhotite	33
Figure 5-2. The initial values of absorption and P-wave velocity in ilmenite ..	34
Figure 5-3. The initial values of absorption and P-wave velocity in magnetite	35
Figure 6-1. Variation of pH with culture period on (a) Specimen-U, and (b) Specimen-S of pyrrhotite	38
Figure 6-2. The result of slake durability test with culture period and the number of slaking cycles	42
Figure 6-3. Slake durability index with culture period and the number of slaking cycles	42
Figure 6-4. Variation of measured absorption before and after culture with culture period on (a) Specimen-U and (b) Specimen-S of pyrrhotite ..	46
Figure 6-5. Variation of normalized absorption with culture period on (a) Specimen-U, and (b) Specimen-S of pyrrhotite	47
Figure 6-6. Variation of measured V_p before and after culture with culture period on (a) Specimen-U and (b) Specimen-S of pyrrhotite	51
Figure 6-7. Variation of normalized V_p with culture period on (a) Specimen-U, and (b) Specimen-S and (c) of pyrrhotite	52
Figure 6-8. Variation of measured uniaxial compressive strength with culture period on Specimen-U of pyrrhotite	54
Figure 6-9. Variation of pH with culture period on (a) abiotic oxidation test, and (b) bio-oxidation test of ilmenite	57
Figure 6-10. Variation of measured absorption before and after (a) abiotic oxidation and (b) bio-oxidation tests with culture period on ilmenite ..	61
Figure 6-11. Variation of normalized absorption with culture period on (a) abiotic oxidation test, and (b) bio-oxidation test of ilmenite	62
Figure 6-12. Variation of measured V_p before and after (a) abiotic oxidation	

and (b) bio-oxidation tests with culture period on ilmenite	66
Figure 6-13. Variation of normalized V_p with culture period on (a) abiotic oxidation test, and (b) bio-oxidation test of ilmenite	67
Figure 6-14. Variation of measured uniaxial compressive strength (UCS) with culture period on (a) abiotic oxidation test, and (b) bio-oxidation test of ilmenite	70
Figure 6-15. Variation of pH with culture period on (a) abiotic oxidation test, and (b) bio-oxidation test of magnetite	73
Figure 6-16. Variation of Eh with culture period on (a) abiotic oxidation test, and (b) bio-oxidation test of magnetite	76
Figure 6-17. Variation of measured absorption before and after (a) abiotic oxidation test and (b) bio-oxidation test with culture period on magnetite	80
Figure 6-18. Variation of normalized absorption with culture period on (a) abiotic oxidation test, and (b) bio-oxidation test of magnetite	81
Figure 6-19. Variation of measured V_p before and after (a) abiotic oxidation test and (b) bio-oxidation tests with culture period on magnetite	85
Figure 6-20. Variation of normalized V_p with culture period on (a) abiotic oxidation test, and (b) bio-oxidation test of magnetite	86
Figure 6-21. Variation of measured uniaxial compressive strength (UCS) with culture period on (a) abiotic oxidation test, and (b) bio-oxidation test of magnetite	89
Figure 7-1. Variation of (a) pH, (b) absorption, (c) velocity, and (d) uniaxial compressive strength with culture period on pyrrhotite	91
Figure 7-2. Variation of (a) pH, (b) absorption, (c) velocity, and (d) uniaxial compressive strength with culture period on ilmenite	93
Figure 7-3. Variation of (a) pH, (b) absorption, (c) velocity, and (d) uniaxial compressive strength with culture period on magnetite	95

Abstract

Variations of Physical Properties and Strength of Ferruginous Minerals due to Microorganism

By DAE WAN KANG

Adv. Prof. : Seong-Seung Kang, Ph.D,
Dept. of Energy and Resources Engineering
Graduate School of Chosun University

Weathering is generally classified with physical, chemical and biological weatherings and one of the important factors depending on the physical properties of rocks. The physical weathering is related to rock fracturing due to temperature change, water and crystallization of salts. The chemical weathering is related to color change of rock, alteration of rock-forming minerals and chemical resolution due to chemical composition-air, rain and infiltration water in rocks. The biological weathering is related to oxidation due to microorganism and alteration of minerals due to a lichen. In general, weathering occurs in combination rather than independently. If weathering occurs to rocks, the strength of weathered rocks will be weakened. After all, the rocks are broken. Therefore, it is very important to understand the mechanism of weathering in rocks. Studies of rock weathering are usually focused on the relation between mechanical and geological properties. In present, many studies have been performed with physical and chemical weathering mainly, not common in biological weathering.

The purpose of this study is to examine weathering characteristics of pyrrhotite, ilmenite, and magnetite by microorganism throughout various laboratory tests such as slaking durability, absorption, P-wave velocity (V_p), uniaxial compressive strength (UCS). For this purpose, firstly initial values of ferruginous minerals was measured, and also pH and Eh were measured according to culture period. Secondly, the laboratory tests were carried out.

Then, differences obtained from the results were compared and analyzed. Finally, physical properties of pyrrhotite, ilmenite, and magnetite by microorganism were quantitatively analyzed.

By the initial values of above three ferruginous minerals, the measured absorption was distributed the range from 0.125% to 0.238% in pyrrhotite, 0.029% to 0.085% in ilmenite, and 0.099% to 0.153% in magnetite. In addition, the measured V_p was distributed in the range from 3676.5 m/s to 4386.0 m/s in pyrrhotite, 1515.2 m/s to 2057.6 m/s in ilmenite, and 1400.0 m/s to 1506.0 m/s in magnetite.

In the case of pyrrhotite, the measured pH of Specimen-U during 90 days was distributed in the range from 1.43 to 2.07, on the other hand, one of Specimen-S showed the range from 1.10 to 1.73, respectively. The absorption of Specimen-U was distributed in the range from 0.157% to 0.238% before culture, and 0.202% to 0.417% after culture. On the other hand, one of Specimen-S showed the range from 0.125% to 0.228% before culture, and 0.182% to 0.375% after culture. The measured V_p of Specimen-U was distributed in the range from 3816.8 to 386.0 m/s before culture, and 1725.3 to 4201.7 m/s after culture, and one of Specimen-S in the range from 3876.5 to 4032.3 m/s before culture, and 1372.3 to 3937.0 m/s after culture. The UCS was dominantly decreased with increasing culture period.

In the case of ilmenite, the measured pH of abiotic oxidation test during 45 days was distributed in the range from 3.82 to 4.26, on the other hand, while the measured pH of bio-oxidation test showed the range from 2.20 to 2.57. The absorption of abiotic oxidation test according to microorganism and culture period was distributed in the range from 0.029 to 0.085% before culture, and 0.033 to 0.090% after culture. The absorption of bio-oxidation test was distributed in the range from 0.033 to 0.068% before culture, and 0.045 to 0.097% after culture. The measured V_p of abiotic oxidation was distributed in the range from 1515.2 to 2057.6 m/s before culture, and 1503.2 to 2057.6 m/s after culture, and the measured V_p of bio-oxidation in the range from 1515.2 to 3040.8 m/s before culture, and 1563.2 to 2057.6 m/s after culture. The UCS was

decreased with increasing culture period in both specimens for abiotic oxidation test and for bio-oxidation test, however, their differences are more larger bio-oxidation test than abiotic oxidation test.

In the case of magnetite, the measured pH of abiotic oxidation test during 45 days was distributed in the range from 4.02 to 5.16, on the other hand, while the measured pH of bio-oxidation test showed the range from 1.50 to 1.90. The measured Eh of abiotic oxidation test and bio-oxidation test were distributed in the range from 174.9 to 111.9 mV, and from 285.2 to 319.3 mV, respectively. The absorption of abiotic oxidation test according to microorganism and culture period was distributed in the range from 0.099 to 0.125% before culture, and 0.074 to 0.101% after culture. The absorption of bio-oxidation test was distributed in the range from 0.124 to 0.153% before culture, and 0.125 to 0.367% after culture. The measured V_p of abiotic oxidation was distributed in the range from 1453.5 to 1492.5 m/s before culture, and 1344.1 to 1470.5 m/s after culture, and the measured V_p of bio-oxidation in the range from 1428.6 to 1497.0 m/s before culture, and 1210.3 to 1451.6 m/s after culture. The UCS was decreased with increasing culture period in all cases, however, the difference by bio-oxidation test is more larger than that by abiotic oxidation test.

As a result, the differences by bio-oxidation test showed higher than that by abiotic oxidation test. It implies that variation of physical properties on ferruginous minerals such as pyrrhotite, ilmenite, and magnetite is highly dependent on microorganism.

1. 서론

풍화는 작용 메커니즘에 따라 물리적, 화학적, 생물학적 풍화작용으로 구분할 수 있으며, 암석의 공학적 성질을 좌우하는 중요한 요소 중 하나이다. 물리적 풍화작용은 온도변화, 물, 염류의 결정화 등에 의하여 암석이 서서히 쪼개어져 파쇄되는 현상이며, 화학적 풍화작용은 화학성분, 공기, 물 등이 화학적으로 반응하여 암석의 색 변화, 조암광물의 변질, 화학적 분해와 같은 현상이 발생하는 것을 가리킨다. 또한 생물학적 풍화작용은 미생물에 의한 산화나 지의류 등에 의한 광물 변질 등이 발생하는 현상을 나타낸다. 이들 풍화작용은 각기 서로 독립적으로 발생하기 보다는 복합적으로 일어나는 경우가 많다. 암석에 풍화가 발생하면 암반을 구성하는 암석의 강도가 저하되고, 그로 인하여 결국 구조물 전체가 붕괴되는 결과를 가져온다. 따라서 암반 구조물의 안정성을 확보하기 위해서는 암석 물성 특성의 변화 원인 중의 하나인 풍화 메커니즘을 규명하는 것이 중요하고, 아울러 이를 평가할 수 있는 방법이 필요하다.

암석의 풍화정도를 판단하기 위한 방법은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 한 가지 방법은 암석의 변색, 변질 등을 육안으로 관찰하고 이를 바탕으로 풍화등급을 추정하는 정통적인 정성적 방법이다. 또 다른 방법으로서 다양한 장비를 이용하여 실내 및 현장 시험을 하여 그 결과로부터 풍화등급을 추정하는 정량적 방법을 들 수 있다. 이 방법은 정성적 방법과 함께 사용됨으로 정확도와 신뢰도가 정성적 방법에 비해 더 높다. 최근에는 풍화에 대한 다양한 실내외 실험을 통한 풍화 메커니즘 이해와 풍화 특성을 규명하기 위한 많은 연구들이 수행되고 있다. 국내에서 수행된 암석 풍화에 관한 연구는 주로 동결융해시험을 이용한 물리적 풍화특성에 관한 연구(박연준 외, 2003, 장현식 외, 2004, 엄정기 외, 2009, 조태진 외 2009, 강성승 외, 2011)와 화학적 및 지화학적 분석에 의한 화학적 풍화특성에 관한 연구(우익과 박혁진, 2004, 이창섭 외, 2007, 우익 외 2009, 송원경 외, 2009, 엄정기, 2012)가 집중적으로 이루어 졌다. 이와는 달리 생물학적 요인에 의한 암석의 풍화 특성에 관한 연구는 아직까지 매우 미미한 상태에 있다.

한편 미생물 특성에 관한 연구는 미생물의 성장환경과 활동에 영향을 미치는 pH, Eh에 따른 광물의 용해 및 생성, 그리고 광물의 표면 부착과 용출특성으로부터 유용광물 회수율에 따른 결과 등이 국내외 많은 연구자들에 의해 보고되었다

(Buddington and Lindsley, 1964; Brierley, 1978; Grishin et al., 1988; Bhatti et al., 1993; Zhang et al., 1997; Schippers and Sand, 1999; Edwards et al., 2001; 노열 외, 2006; 박천영과 김봉주, 2010; 박천영 외, 2010; 유재영 외, 2011; 조강희, 2011). 이들 연구결과에 따르면, 미생물에 의한 pH와 Eh가 이들의 대사작용 및 성장활동에 의한 반응 결과로서 광물의 산화작용을 촉진시키므로 암석의 풍화에 있어 중요한 요인으로 작용한다고 하였다. 이처럼 미생물에 의한 산화는 미생물체가 에너지를 쉽게 얻기 위해서 산화작용이 일어나는 광물 표면에 직접적으로 부착하게 된다는 직접접촉산화 메커니즘에 대한 가설을 Silverman(1967)이 처음 제안한 이래로 이에 대한 연구들이 이루어져 왔다. Sand et al.(1995, 2001)는 미생물체가 부착된 광물 표면은 이들이 분비한 효소로 인하여 부식작용이 일어나며, 이때 이들이 세포 외중합체물질(extracellular polymeric substance)을 분비하여 광물의 표면을 효소적으로 공격한다고 설명하였다. 그리고 Rojas-Chapana et al.(1995)는 미생물체가 분비한 유기질 캡슐(organic capsule)이 광물의 표면을 강하게 산화시킨다고 하였다. 이인화와 박천영(2001)는 미생물이 직접접촉산화 메커니즘에 의하여 자연적으로 이루어진 미세한 공극 및 균열 등을 확장시킨다고 보고하였다. Griffith(1920)는 미세한 균열이 존재하는 암석과 같은 취성재료에서 응력집중에 따른 파괴역학이론을 제시한 바 있다. 엄정기와 신미경(2009)에 따르면 암석 내부의 결함은 미세 전단변형 구조, 공극, 암상 변화, 광물로의 용탈로 인한 미세 공동이나 미세균열이 존재하며, 이러한 미세균열이 확장되면 균열면의 표면적이 증가하여 결국 표면에너지가 증가되어 균열이 전이되면 탄성에 따른 변형에너지가 감소됨을 나타냈다.

하지만 미생물에 의한 암석의 물성변화를 파악하기 위하여 살아있는 미생물을 대상으로 이들의 성장환경 및 활동에 영향을 미치는 인자들과 미생물의 산화작용 메커니즘이 광물의 결함(imperfection)에 미치는 영향을 파악하기에는 다소 어려움이 있다. 그러나 이상에서 언급한 미생물의 특성에 관한 연구 결과들로부터 생물학적 풍화에 의한 암석의 물성 특성에 대한 적용 가능성은 충분히 파악할 수 있을 것으로 판단된다. 이 연구에서는 토착호산성박테리아(이하 미생물)를 배양하여 첫째, 제2연화광산에서 채취한 자류철석으로부터 미생물이 최적의 성장환경 조건에서 변화시키는 pH와 미생물의 이론적인 성장주기의 관계를 살펴보았다. 둘째, 미생물에 의한 pH 변화 양상에 따른 암석의 물성변화 특성을 비교분석하고 그 결과를 바탕으로 다른 암종에서의 적용 가능성을 검토 하였다. 셋째, 동원리소스 관인광산의 티탄철석과 한덕철광 신에미광산의 자철석을 대상으로 미생물을 배양하지 않은 무

기적 산화작용과 미생물을 배양한 생물학적 산화작용에 따른 암석의 물성변화 특성의 관계를 정량적으로 비교분석하였다. 마지막으로, 이들 결과를 바탕으로 미생물에 의한 암석의 풍화지표를 제시할 수 있는지의 가능성을 검토 하였다.

2. 연구배경

2.1 미생물의 특성

미생물을 배양하기 위해서는 질소(N), 인(P) 및 황(S)과 같은 무기성분과 에너지원이 필요하다(박천영 외, 2010(b)). 그 밖에 온도, 압력, pH 등의 외부적인 환경조건이 적절하게 갖추어지면 미생물이 원활하게 대사 작용을 할 수 있으며, 이에 따른 개체수의 변화량은 일정한 성장주기의 형태를 나타낸다(최호형, 2004). Figure 2-1은 최적의 성장조건에서 나타나는 미생물의 이론적 성장 주기곡선을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 유도기는 미생물의 개체군이 주요 에너지원과 반응하여 환경에 적응하는 시기, 지수성장기는 미생물의 개체수가 급격하게 증가하며 세포의 증식이 활발해지는 시기, 정체기는 미생물의 개체수가 최대에 이르며, 물질 대사는 여전히 진행되나 미생물의 급격한 증가로 인하여 필수 영양성분이 고갈되거나 노폐물이 축적되어 성장을 제한하는 시기이고, 사멸기는 미생물이 정체기에 도달한 이후 더 이상 물질대사를 할 수 없으며 그 수가 점차 줄어드는 시기이다. 이러한 미생물의 성장곡선 형태는 미생물이 이분법 증식에 의한 세포분열로 개체수를 증가시키는 현상이다. 즉, 미생물의 성장은 이들이 이분법 증식을 함으로서 한 개의 세포가 분열 시 두 개의 세포로 증가하는 2의 지수비율로 늘어나는 것으로 시간에 따른 세포의 증가형태를 대수(log)로 보았을 때, 동일한 성장속도비율로 증가하지만 지수의 값은 산술적으로 시간이 지남에 따라 급격하게 증가하는 것을 의미한다. 이처럼 미생물의 성장주기는 미생물의 개체수와 밀접한 관계가 있으므로 이를 측정하는 방법이 요구된다. 일반적으로 미생물의 개체수에 대한 측정은 주로 미생물의 대사 작용에 의하여 소비되는 용존산소 감소량을 측정하여 개체수를 추정하는 방법(Landesman et al., 1966), 미생물의 활동에 의해 증가되는 산도로 개체수를 추정하는 방법(McGoran et al., 1969), 그리고 미생물 활동에 의하여 용해된 Fe^{2+} 이온 함량을 측정하여 개체수를 추정하는 방법(MacDonald and Clark, 1970) 등이 사용된다. 특히, pH의 경우와 같이 산도에 의한 영향은 미생물의 성장환경 뿐만 아니라 암석을 구성하는 광물의 산화에 있어 직접적인 영향을 미치므로 중요한 요인 중에 하나로 작용한다. 더군다나 이 연구에서와 같이 pH가 낮은 산성 환경(pH 0~5.4)에서 성장하는 호산성의 특성을 지닌 미생물의 경우 산도가 낮아질수록 그 개체수가

증가하는 것이 일반적인 특징이므로 pH의 감소는 이들의 개체수 변화량을 간접적으로 반영하는 결과로서 pH와 개체수의 변화량은 상호 반비례 관계를 나타낸다.

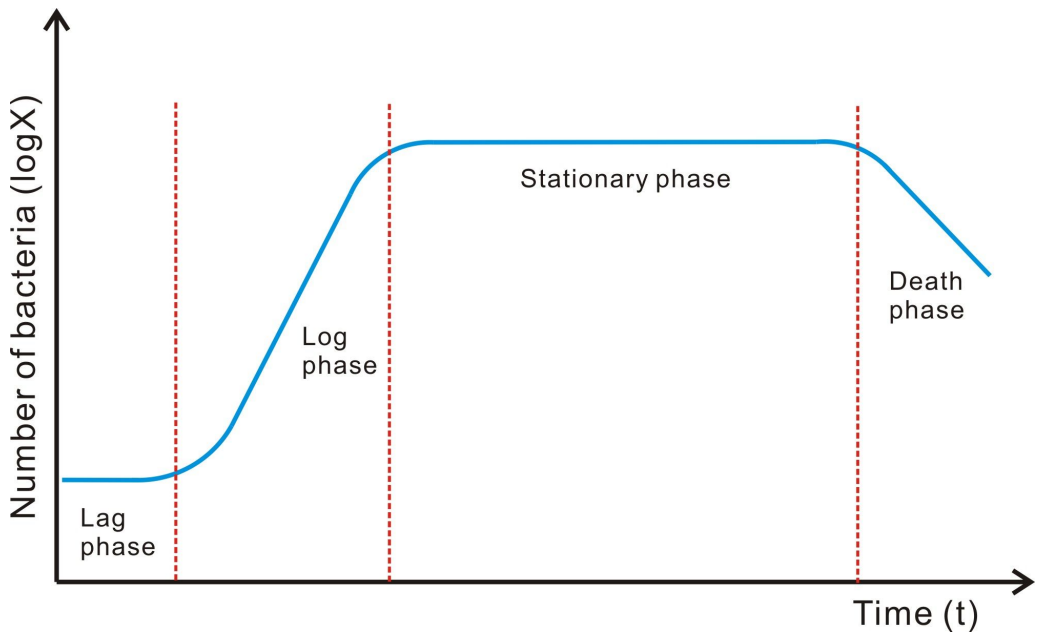


Figure 2-1. Theoretical growth curve of microorganism, lag, log, stationary and death phases.

2.2 미생물의 산화작용 메커니즘

미생물에 의한 암석의 풍화작용은 다양한 원인들이 복합적으로 발생하여 이루어지는 과정으로서 광물의 구성 성분을 주 에너지원으로 활용하며, 이들의 대사 작용을 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 직접접촉 산화작용(direct contact oxidation)과 간접접촉산화작용(indirect contact oxidation)에 의하여 일어남을 보고하였다. 직접접촉산화작용은 미생물체가 황화광물의 표면에 물리적으로 부착하여 산화작용을 일으키는 것이다(Figure 2-2). 그림에서 보이는 바와 같이 미생물들이 황화광물 표면에 발달한 결함(defect)이 있는 특정 장소에 부착하고 있는 것을 관찰할 수 있다(Figure 2-2(a)). 이러한 원인은 미생물에 의한 황화광물의 산화작용이 결정화가 잘 이루어진 결정면 보다는 결함이 있는 결정면에서 더 잘 일어나고, 이들의 특징이 산화작용을 일으킬 때 쉽게 산화에너지를 방출하기 때문이다(Rojas-Chapana and Tributsch, 2004). 즉, 자연계에서 생성된 광물에는 자연적으로 발달된 균열, 파쇄대 및 미세한 공극들이 존재하며, 미생물들은 이들 장소로부터 쉽게 산화에너지를 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 유기산과 세포외중합체 물질을 분비하며 광물 표면을 효소적으로 공격한다(Figure 2-2(b)). 그 결과 미생물체가 분비한 효소로 인해 부식작용에 의한 충식 현상이 일어나며, 아울러 결함을 확장시킨다.(Sand et al., 1995; 박천영 외., 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 Figure 2-3과 같다. 그림에서와 같이 산소와 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 미생물에 의해 Fe^{3+} 와 SO_4^{2-} 로 산화된다. 이와 같이 미생물은 Fe^{2+} 이온을 산화에너지를 활용하는 과정을 반복하며 산화를 촉진시킨다(Tributsch, 2001).

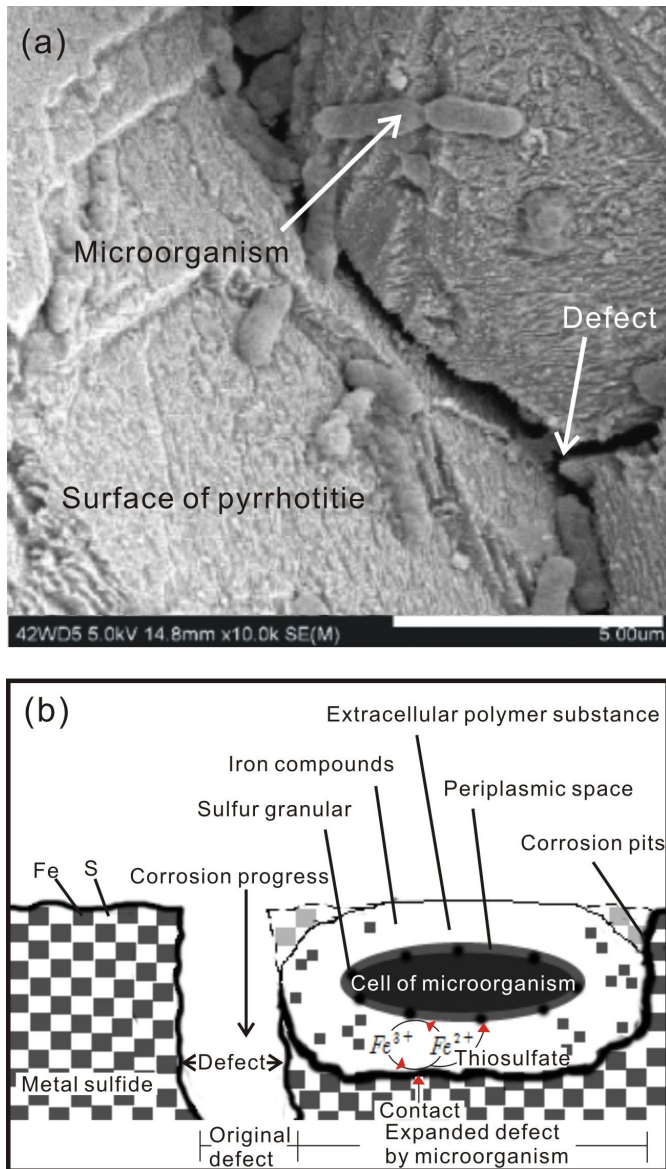


Figure 2-2. Direct contact oxidation by microorganism, (a) SEM image of microorganism attached to mineral surface and (b) corrosive oxidation mechanism by microorganism.

이 연구에서는 토착호산성 박테리아를 이용하여 제2연화광산의 자류철석, 동원리소스 관인광산의 티탄철석과 한덕철광 신예미광산의 자철석을 대상으로 용해-산화작용 시험을 실시하였다. 토착호산성 박테리아를 이용한 자류철석의 용해-산화작용에 대한 연구로서 Miller and Risatti (1988), 박천영과 김봉주(2010)를 들 수 있으며, 티탄철석의 용해-산화작용에 대한 연구로서는 Cappelle et al. (2010), Navarrete et al. (2013)을 예로 들 수 있다. 또한 미생물을 이용한 자철석의 용해-산화작용에 대한 연구는 노열 외(2006, 2007), Roh et al. (2007)에 의해 수행된 바 있다.

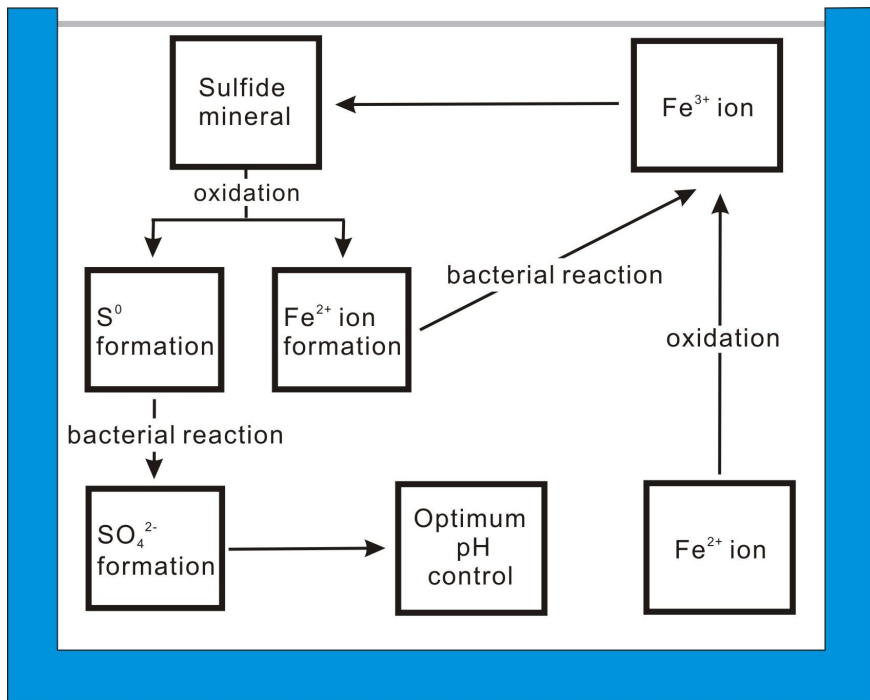


Figure 2-3. Processes of indirect contact oxidation by microorganism.

3. 연구지역 지질 및 광상

3.1 제2연화광산

3.1.1 제2연화광산 지질 및 광상

연구지역의 지질은 Figure 3-1과 같으며, 제2연화광산은 행정구역상으로 강원도 삼척시 원덕읍 풍곡리 280번지에 위치한다(Figure 3-2). 광산 부근의 지질은 함백향사의 동단 부에 속하고 선캠브리아기의 화강편마암을 기반으로 그 상부에 캠브리아기-오르도비스기의 양덕통 장산규암층과 묘봉슬레이트층, 대석회암통의 풍춘석회암층, 화절층, 동점규암층 및 두무동층 등이 분포되며 이들을 관입한 화강반암 및 석영반암으로 구성된다(Yun, 1979). 지질구조는 EW 방향의 향사축을 갖는 함백향사가 NS계의 역단층에 의해 서측이 상승하고 동측이 하강한 단층의 동측부에 해당한다(대한광업진흥공사, 1981).

광상은 NS 역단층과 NW 습곡축에 따른 단층을 따라 화성암이 관입하여 주변 석회암을 교대하여 형성된 전형적인 스카른형 광상이다. 광체는 모두 12개 이상으로 모암 및 화성암의 관계에 따라 하반광체군(월곡하반광체), 상반광체군(월곡상반광체) 및 선곡광체로 크게 3개 그룹으로 구분된다(한갑수, 1972). NW습곡축에 따른 단층을 중심으로 서쪽은 월곡구, 동쪽은 선곡구로 구분되고 월곡광체는 화강반암과의 접촉부에 발달되는 광체이며 선곡광체는 화강반암의 관입방향 및 풍춘석회암층, 묘봉층의 석회암 주변부에 발달되는 광체이다(대한광업진흥공사, 1981; 이현구 외, 2007). 광석광물은 섬아연석, 방연석, 황동석 및 자류철석 등이다. 제2연화광산은 1961년 (주)영풍광업이 1969년 개발을 착수한 뒤 월 50,000 톤 규모로 개발하였고 1983년까지 5,349,000 톤을 처리하여 499,364 톤의 정광(연 18,007톤, 아연 476,208 톤, 동 5,149 톤)을 생산하였다.

3.1.2 자류철석

육방정계(六方晶系)에 속하는 광물로서 화학성분은 $Fe_{(1-x)}S$ ($0 < x < 0.2$)인데 일

반적으로 철이 조금 적어서 Fe_5S_8 에서 Fe_7S_8 까지 변화한다. 육각 판상(板狀)을 나타내기도 하지만, 대개는 괴상(塊狀) 또는 입상(粒狀)의 집합체이며 흔히 큰 덩어리로 산출된다. 쪼개짐은 없으나 때로 밑면에 평행한 열개(裂開)가 있다. 단구(斷口)는 불규칙적이거나 아패각상(亞貝殼狀)이다. 경도는 3.5 ~ 4.0이고, 비중은 4.58 ~ 4.64이다. 조흔색(條痕色)은 회흑색(灰黑色)이거나 고동황색이다. 신선한 파면은 금속광택이 강하지만 대기 중에서는 녹슬어서 갈색 또는 흑갈색으로 변하여 광택을 잃는다. 자성(磁性)이 있는데 개체에 따라 강약이 있다. 구조적으로 보아 육방정계 이외에 단사정계(單斜晶系)에 속하는 것도 있는데 후자(後者)가 자성이 강하다. 환원할 때 생성되는 산물로 온도에 따라 고온형, 중간형, 저온형으로 나뉜다. 고온형은 육방정계에 속하며 고온에서만 안정하다. 중간형은 천연의 것을 가열하거나 합성하여 얻는다. 또한 초구조(超構造)를 가지며 자성이 강한 편이다. 저온형은 실온에서 안정하며 단황철석(單黃鐵石), 육방자황철석, 단사자황철석으로 나뉜다. 단황철석은 화학성분 FeS 로 육방정계에 속하며 육방자황철석에서 분리, 산출된다. 육방자황철석은 화학성분 $Fe_9S_{10} \sim Fe_{11}S_{12}$ 로, 육방정계에 속한다. 단사자황철석은 화학성분 Fe_7S_8 으로 단사정계에 속하며 자성이 강하다. 주로 접촉교대광상, 함동황화철광광상(含銅黃化鐵鑛鑛床), 고온열수광상 등에서 산출되며, 적색이 우세하다는 의미의 그리스어 pyrrhos에서 연유한다(한국광물자원공사, 2010). 자류철석의 연마면에 대한 반사현미경 사진은 Figure 3-3에서 보인다.

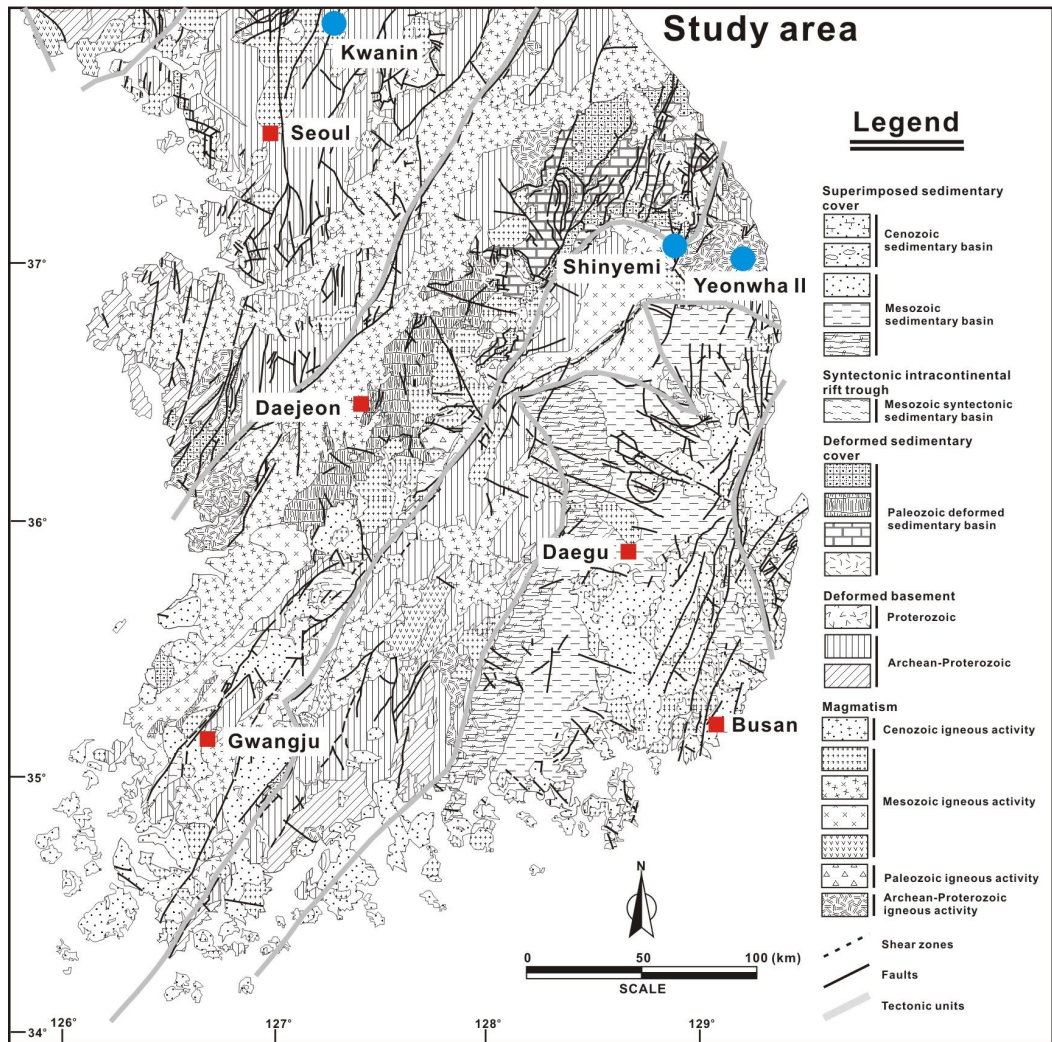


Figure 3-1. Geological map of South Korea and the locations of the studied areas.

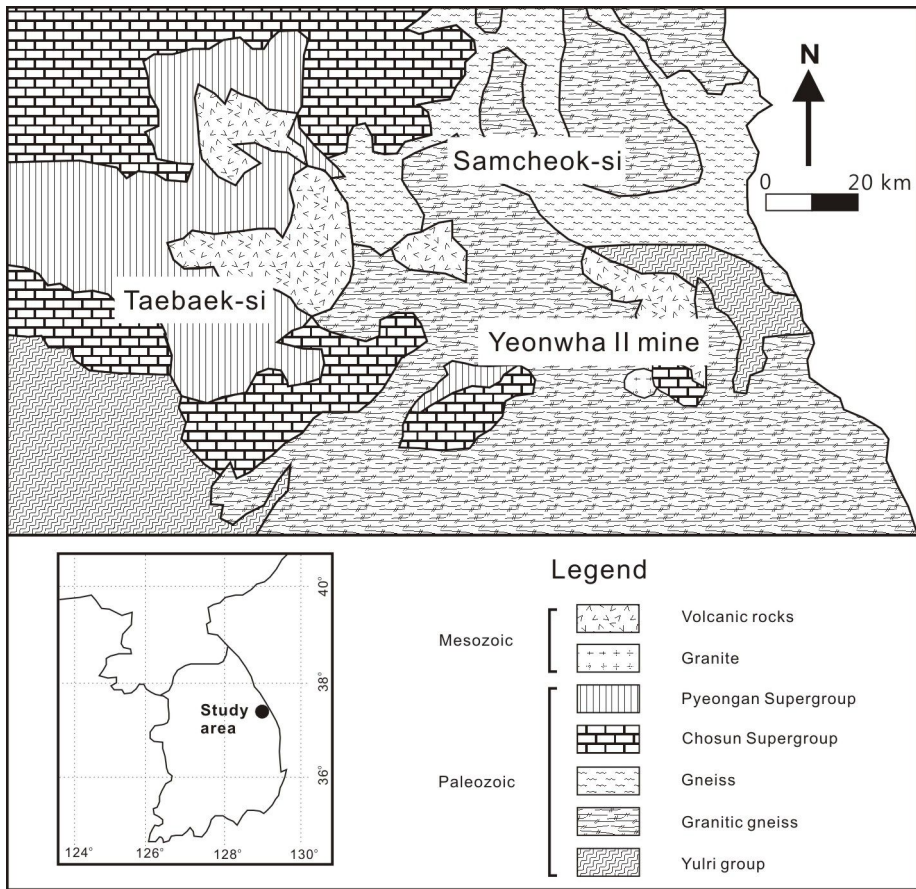


Figure 3-2. The geological map and sampling location of pyrrhotite obtained from the second Yeonwha mine.

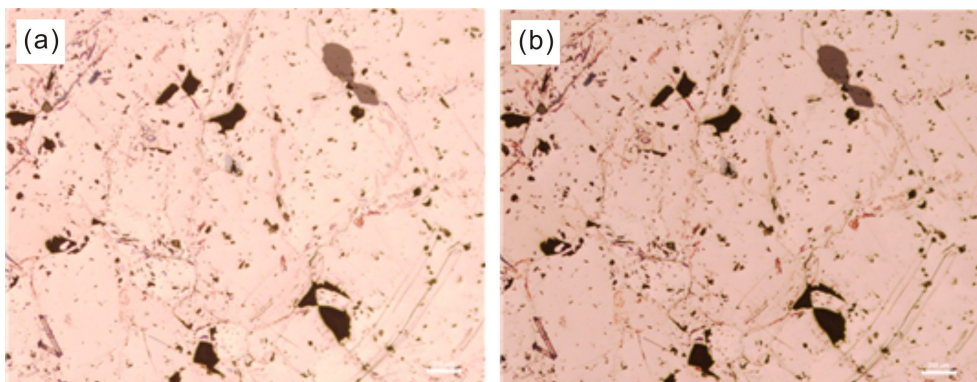


Figure 3-3. Microphotographs in (a) open- and (b) cross-polarized lights of pyrrhotite.

3.2 동원리소스 관인광산

3.2.1 관인광산 지질 및 광상

관인광산은 행정구역상 경기도 포천시 관인면 삼율리 144-1번지에 위치한다 (Figure 3-4). 본 역의 지질은 선캠브리아기의 변성퇴적암류를 기저로 이를 후기에 관입한 선캠브리아기의 반려암질암, 또는 후기에 이들을 관입한 중생대 쥐라기의 흑운모화강암과 백악기의 석영반암 및 암맥류 등으로 구성된다. 변성퇴적암류는 광구 남동부와 중서부에 분포되는데 지형적으로 고지대를 이루며 흑운모-각섬석편마암, 석영-운모편암, 각섬석편암, 석회질암 및 규암의 호층으로 구성된다. 석회질암은 연천 14호 남서부와 광체 상, 하반에서 단속적으로 발달되어 자철광상의 형성과 밀접하게 관련됨을 시사한다. 본 암은 석회암, 백운암질석회암 등으로 구성되며 층리가 발달되고 유백색, 담황색, 회색, 녹회색을 띤다. 특히 광체 접촉부에 분포되는 본 암은 부분적으로 스카르화 및 규화되어 치밀한 암상을 보여 준다. 규암은 담회색, 담황색, 회색을 띠며, 층리면을 따라 다량의 백운모가 배태되어 석영편암상을 보여주기도 한다. 본 암은 광구남부 세계고개 부근에서는 폭 50 ~ 60 m 정도이나 본광체 서측에서는 폭 10 ~ 20 m로 축소된다. 반려암질암은 광구 남부에서 중앙부에서 NE-NS방향으로 분포한다. 반려암질암은 자철석 광화작용과 밀접히 관련되는 암으로 본 암 내에 국부적으로 함티탄자철석과 일메나이트가 산포상으로 배태되어 광화대를 형성하기도 한다(이현구 외, 2007). 장호완 외(1987)에 따르면 본 암은 조립-거정질, 중립질 또는 편마상 알카리 반려암질암으로 3분하고 이들을 분별정출 분화과정의 산물로 해석하였다. 본 암의 주 조성광물은 각섬석, 사장석, 휘석이며, 소량의 석영, 인회석, 스피넬, 함티탄자철석, 티탄철석 및 견운모, 녹니석 등이 수반된다. 흑운모화강암은 연천 3호 대부분 및 연천 13호 서측에 저반상으로 넓게 분포되며 풍화작용을 받아 대체로 저지대를 이룬다. 본 암은 담회색, 회색을 띠는 중조립질암으로 주 조성광물은 석영, 장석, 흑운모, 각섬석, 백운모이며 소량의 인회석, 스피넬, 불투명광물 등이 수반된다. 본 암의 관입시기는 K-Ar 절대연령 측정결과(김규한과 이현주, 1994) 116.4±1.7 Ma로 나타나 중생대 쥐라기 화성활동과 관련된 것임을 암시한다.

광상은 정마그마성 함티탄자철 광상으로 알려져 왔으나, 김규한과 이현주(1994)

은 변성퇴적암내 석회질암이 반려암질암의 관입으로 접촉교대작용을 받아 형성된 스카른광상으로 해석한 바 있다. 본 광산에는 과거 개발 완료된 본광체와 현재 활발히 개발하고 있는 신광체로 구분되며 신광체는 본 광체 북동측 150 m 정도 떨어져 있으며, 이들 광체는 구조에 의해 반복되는 것으로 동일광체이다. 본 광체는 개발 완료된 상태로 규모는 장경 80 ~ 150 m, 단경 10 ~ 60 m 정도이고 개발심도는 220 m정도 이다. 품위는 Fe 15.8 ~ 48.9 %, TiO₂ 10.4 ~ 22.3 % 이다.

신광체는 광체 형태가 파이프상이며 침강 방향은 하1갱을 경계로 상부는 N20 ~ 30°E, 그 하부에서는 N50 ~ 60°E로 변화되나 침강 각도는 35 ~ 40°정도이다. 광석광물은 함티탄자철석과 티탄철석이 주이며 소량의 자류철석, 황철석 및 황동석 등이 수반된다. 자철석의 입도는 0.2 ~ 3 mm로 중세립질이고 형태는 반자형이다. 광체 규모는 하1갱 1중단은 장경 95 m, 단경 25 m정도이나 개발갱에서는 장경 200 m, 단경 50 m로 확대되며, 개발갱 0편은 장경 170 m, 단경 25 m로 개발 상부 갱 수준에 비해 다소 축소되는 경향이다. 품위는 Fe 41.0 ~ 49.2 %, TiO₂ 18.0 ~ 19.3 % 정도이다.

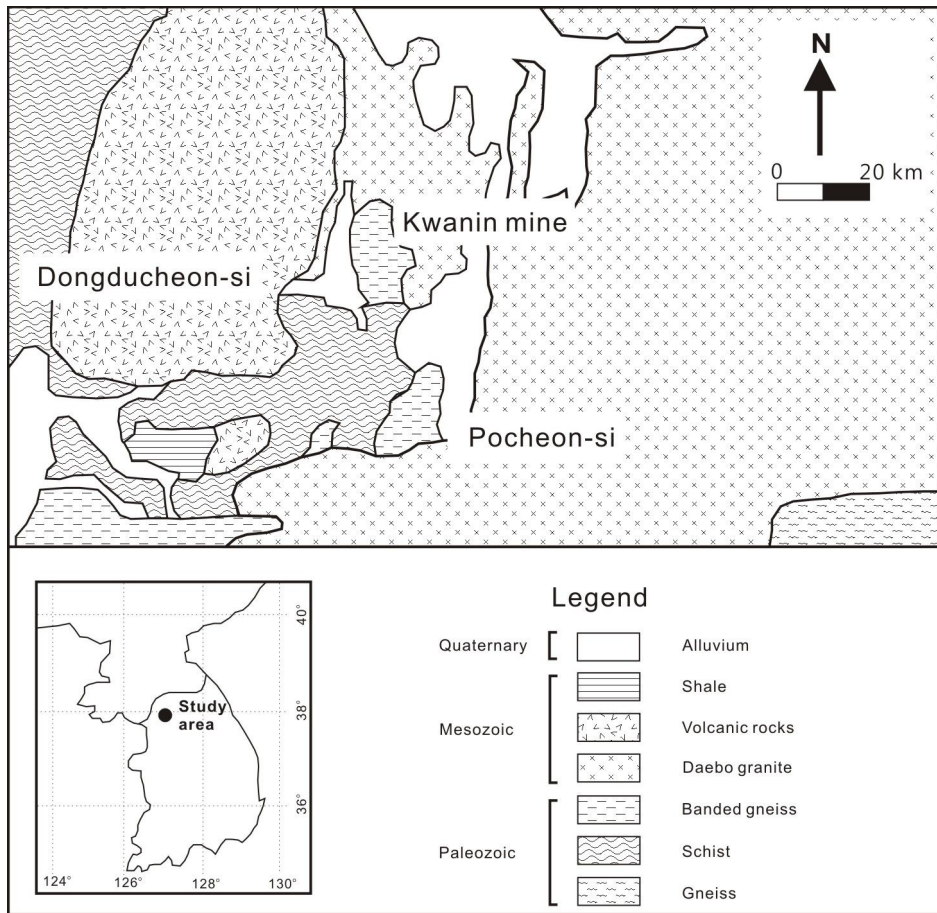


Figure 3-4. The geological map and sampling location of ilmenite obtained from the Kwanin mine.

3.2.2 티탄철석

육방정계(六方晶系)에 속하는 광물로서 화학성분은 $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ 이다. 때로는 능면체, 후판상(厚板狀), 박판상, 엽편상 결정을 나타내는데 보통은 괴상, 입상을 이루며 사철에 섞여 사상(砂狀)을 이룬다. 경도는 5 ~ 6이며, 비중은 4.5 ~ 5.0이다. 철흑색으로 불투명하고 아(亞)금속광택을 가지며, 조흔색(條痕色)은 흑색 또는 갈적색이다. 잘 부스러지며 자철석과 비슷하지만 자력(磁力)이 약한 점으로 식별할 수 있다. 티탄의 중요한 광석으로 티탄은 페인트나 백분 등의 백색안료의 원료가 되며, 철에 섞여 특수강(特殊鋼)을 만든다. 각종 암석에 소량으로 포함되어 널리 분포하며 때로는 염기성암 속에 큰 덩어리로 산출된다(한국광물자원공사, 2010). 티탄철석의 연마편 현미경 사진은 Figure 3-5에서 보인다.

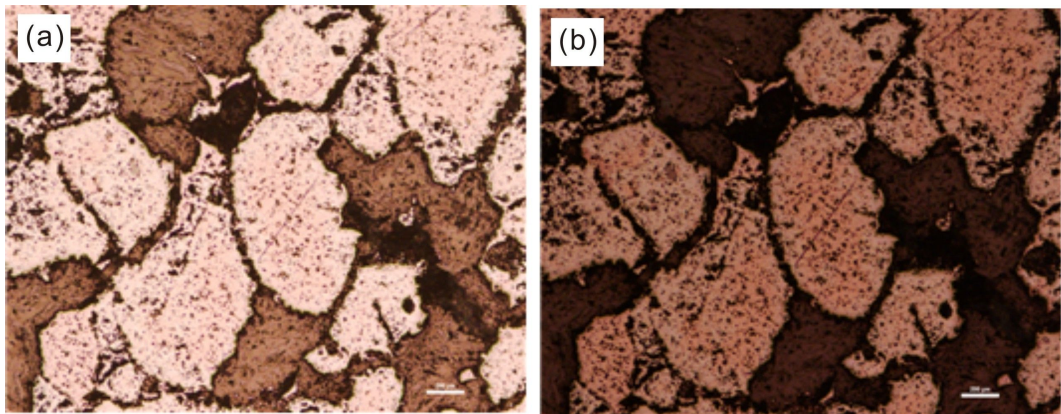


Figure 3-5. Microphotographs in (a) open- and (b) cross-polarized lights of ilmenite.

3.3 한덕철광 신예미광산

3.3.1 신예미광산 지질 및 광상

신예미광산은 행정구역상으로 강원도 정선군 신동면 조동리에 위치한다(Figure 3-6). 광산 부근의 지질은 고생대 조선누층군 대석회암층군의 상부층인 막동층과 이를 부정합으로 피복하는 평안누층군의 하부층인 홍점통의 지층 및 이를 후기에 관입한 시대미상의 석영조면암으로 구성된다. 막동층은 암색이 청회색 내지 담회~암회색을 띠는 판상석회암으로 구성되고, 지역적으로 괴상석회암이나 석회규산염암 등이 분포한다. 막동층 상부에는 소위 직운산 세일로 지칭되는 석회질세일, 사질세일을 협재한다. 본 층은 일반적으로 하부에는 판상석회암이 우세하나 상부로 감에 따라 이질물의 함량이 증가하여 미립의 점토물질이 박막상으로 층리에 평행하게 발달하고 있으며, 부분적으로 층식석회암상을 보이는 곳도 관찰된다. 본 층의 전반적인 주향과 경사는 $N30 \sim 45^{\circ}E$, $25 \sim 60^{\circ}NW$ 범위이며, 층후는 대략 500 m 내외이다. 층 상부에 협재되는 직운산 세일층은 연속성이 양호하며, 적색 내지 암녹색의 사질 세일 및 암회색 석회질 세일 등으로 구성되어 있다. 본 지층은 화성암과 접촉부에서 화성암체의 영향으로 인해 미약하나마 부분적으로 스카른화, 석회규산염암화, 혼펠스화 되어 있다. 본 석회암층과 석영조면암의 접촉부에서는 철광상이 발달되며 협재된 세일층의 상하반에 연, 아연, 철광상 등의 접촉교대 및 열수교대 광상이 형성되어 있다(이동진, 1984).

홍점통은 예미산(989.2 ML)을 중심으로 그 북측과 조동리 및 함백일대에 넓게 분포하며, 주로 저색의 사암 내지 사질세일로 구성되고, 부분적으로 소폭의 석회암이 협재하며, 기저부에는 간혹 역암 등도 관찰된다. 홍점통의 전반적인 주향과 경사는 $N10 \sim 45^{\circ}E$, $10 \sim 60^{\circ}NW$ 범위가 우세하다. 석영조면암은 상기 지층들을 후기에 관입한 회백 내지 백색의 치밀질로서 세립 내지 중립질의 석영 및 장석류의 반정이 육안으로 인지되는 석영반암과 미립질로서 반정이 인지되지 않는 규장질암 또는 미문상반암류인 석영규장암으로 구성된다. 예미 지구 및 주변부에 발달하는 구조선의 대부분은 단층대로서 지형적으로는 계곡부를 형성하고 있다. 이러한 구조선들은 지표상에서 쉽게 인지되지 않는으나, 갭도 내에서는 구조선을 중심으로 열수의 유입에 따른 교대작용을 수반하여 스카른 광물이 배태되거나 철 광체가 배태되는 양상

을 보이고 있어 본 역에 발달하는 구조선군은 광상 형성과 밀접한 관계를 보이는 것으로 판단된다. 본 역에 발달하는 주요 구조선들은 대부분 NS-NE의 방향성을 보이며, 이에 부수적으로 NW-SE 방향의 소규모 구조선들이 관련되어 발달하고 있다 (조동진, 1989; 배영부, 1992).

광상은 조선누층군 막동층과 화성암류 접촉부에 발달하는 접촉 및 열수교대광상과 모암의 파쇄대 및 단층열극대를 열수가 충전하여 형성된 열극충전형 광상이다. 본 광산의 광상은 지역적으로는 연, 아연, 모리브덴 광체로 형성된 동부광화대와 연, 아연, 모리브덴광체 및 자철광체로 형성된 서부광화대로 구분된다. 자철광체는 막동층과 후기 관입된 석영조면암의 접촉부에 형성된 접촉 및 열수교대광상이 주광체를 이루며 부분적으로 광화용액이 주변모암의 열극을 충전하여 형성된 열극충전광상으로 구성된다. 주로 괴상, 렌즈상, 원통상, 또는 맥상형태로 발달하고 있다. 주 조성광물은 자철석이며 소량의 자류철석, 섬아연석, 황철석, 스카른광물 등이 수반된다(배영부, 1992).

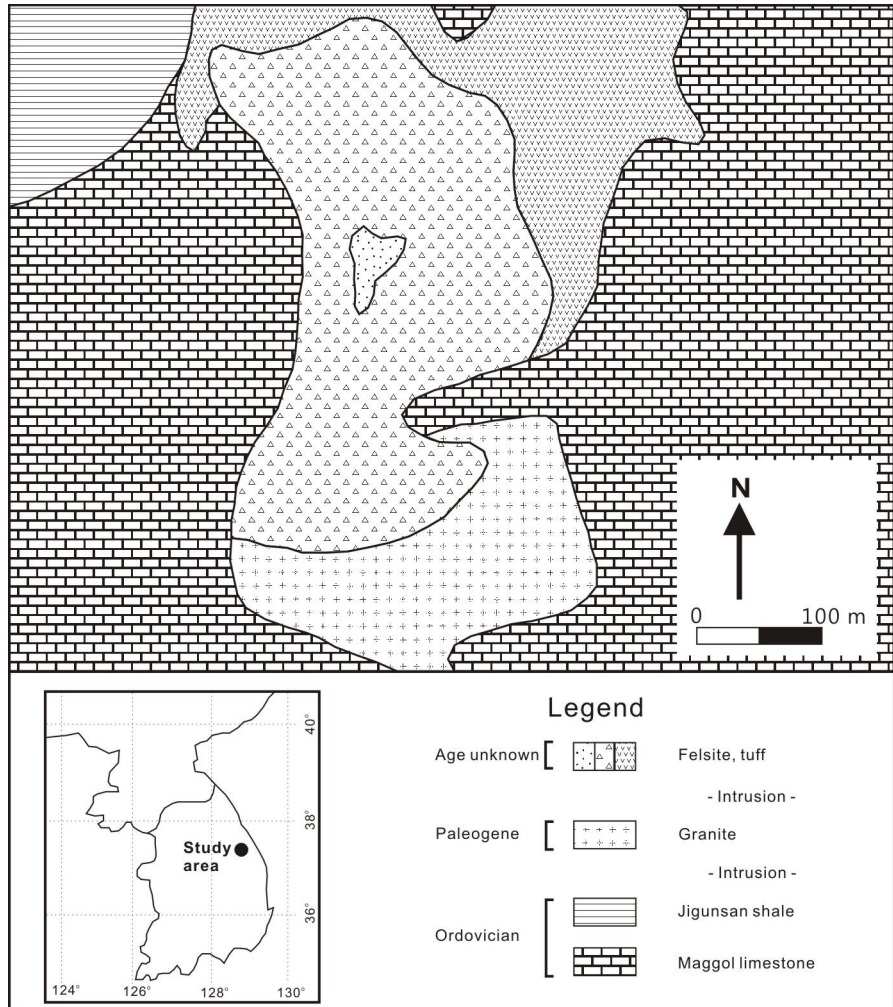


Figure 3-6. The geological map and sampling location of magnetite obtained from the Shinyemi mine.

3.3.2 자철석

등축정계(等軸晶系)에 속하는 광물로서 화학성분은 $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 이다. 흔히 티탄을 함유하는데, 그 함량이 6%에 달하는 경우도 있다. 이는 주로 티탄철석이 혼재(混在)하기 때문이며, 그 밖에 망간, 인(磷), 마그네슘 등을 함유하는 경우도 있다. 순수한 것은 72.41%의 철분을 함유한다. 보통은 괴상(塊狀), 입상(粒狀), 사상(砂狀)을 이루는데, 때로 엽편상(葉片狀)을 나타내기도 한다. 경도는 5.5 ~ 6.5이며, 비

중은 4.9 ~ 5.2이다. 쪼개짐(劈開)은 분명하지 않으며, 단구(斷口)는 껍각상(貝殼狀) 또는 불평탄하다. 철흑색에 불투명하며 금속광택이 있으며, 조흔색(條痕色)은 흑색이다. 강한 자성(磁性)이 있어, 천연자석이 된다. 산소 중에서 가열하면 220℃에서 적색 산화철 Fe_3O_4 로 변하지만, 자성이나 결정구조에는 변함이 없다. 550℃에서는 결정구조가 적철석으로 변하여 자성이 없어진다. 대부분의 화성암 중에 부성분광물로서 산재하며, 화성암의 접촉변성대에서 괴상으로 산출된다. 또한, 해변의 검은 모래에 많은 자철석 알갱이가 포함되어 있다. 점재(點在)하는 자철석 결정은 결정편암 중에도 널리 발견되며, 고기(古期)의 변성암 중에서 광층이 렌즈 모양으로 산출된다. 광상으로는 접촉교대광상 등에서 산출된다(한국광물자원공사, 2010). 자류철석의 연마편 현미경 사진은 Figure 3-7에서 보인다.

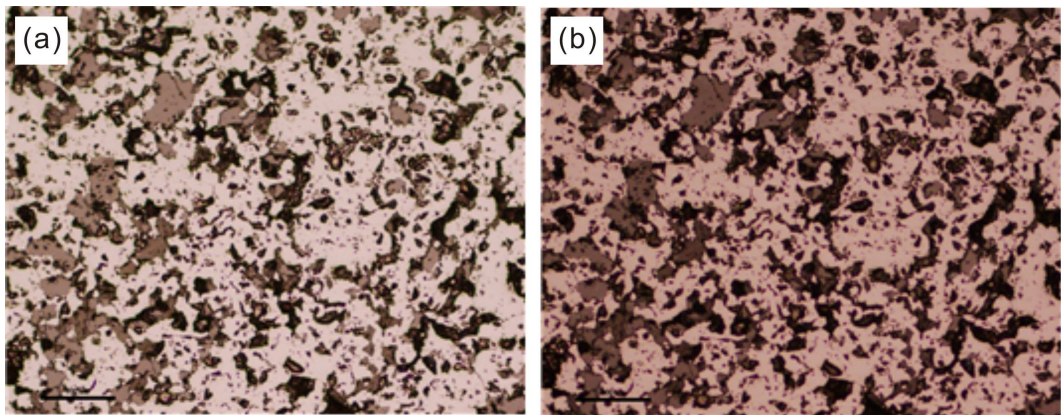


Figure 3-7. Microphotographs in (a) open- and (b) cross-polarized lights of magnetite.

4. 시험방법

4.1 시험편

미생물에 의한 암석의 물성변화 특성을 관찰하기 위한 시험편은 배지(culture medium)의 크기, 광액농도(pulp density), 미생물 및 성장-배양액(American Type Culture Collection; ATCC) 용액의 첨가량을 고려하여 크기를 최소화하였다. 박천영과 김봉주(2010), 박천영 외(2010, 2011)는 박테리아를 이용하여 유용금속이온의 용출량을 높일 수 있다는 연구결과를 보고한 바 있다. 또한 유용광물 회수율이 높다는 것은 박테리아의 생존 여부와 비례한다고 하였으며, 이때 사용한 미생물 배지의 광액농도는 미생물 배지(L)와 각 시료의 무게(g) 비를 10:1의 비율로 한 결과라는 점을 고려하여 광액농도는 식 (4.1)로 계산하였다. 즉, 이 연구에서 사용된 배지의 최대수용 용량은 약 15L로서 광액농도를 각각 10%로 하였을 때, 시험편은 성장-배양액의 첨가량에 대한 광석의 무게 비를 자류철석, 티탄철석, 그리고 자철석의 시험편 총 무게가 각각 약 1000 ~ 1300 g이 되도록 제작하였다.

$$Pulp\ density(\%) = \frac{W}{V} \times 100 \quad (4.1)$$

여기서, W는 각 시료의 무게(g), V는 배양액의 무게(L)이다.

시험편은 직경 25 mm, 높이 약 50 mm 크기의 원형시험편으로서 배양기간을 고려하여 자류철석과 티탄철석으로부터 각각 20개, 자철석으로부터 30개의 암석코어를 회수하였다. 티탄철석의 경우 무기적 산화와 생물학적 산화 등 두 조건의 산화환경에서 물성변화를 비교분석한다는 점을 고려하고, 시료의 불균질성에 의한 물성변화의 영향을 최소화하기 위하여 두 개의 대상 암석 덩어리에서 각각 10개씩, 총 20개의 코어를 회수하여 시험편을 제작하였다. 또한 자철석의 경우는 티탄철석과 같이 두 조건의 산화환경에서 물성변화 분석을 위한 암석코어 시료 20개와 초기 물성시험을 위한 10개 등 총 30개의 코어를 회수하여 시험편을 제작하였다. 제작과정과 각 암석의 시험편은 Figure 4-1과 Figure 4-2에서 보여준다.

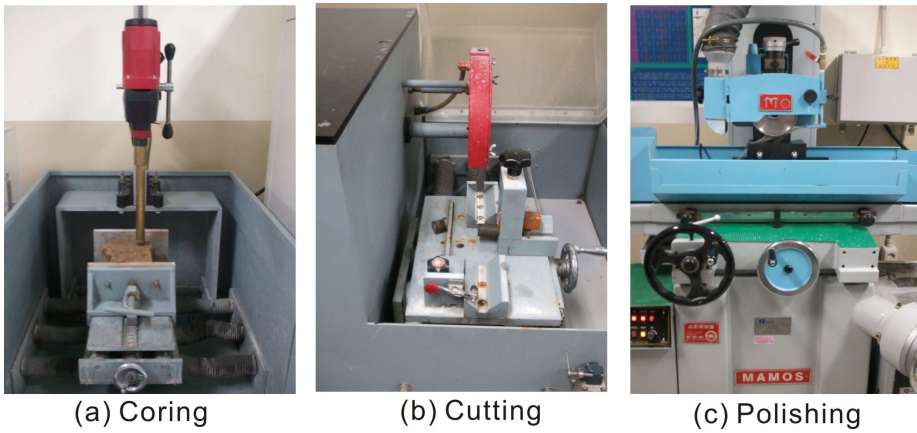
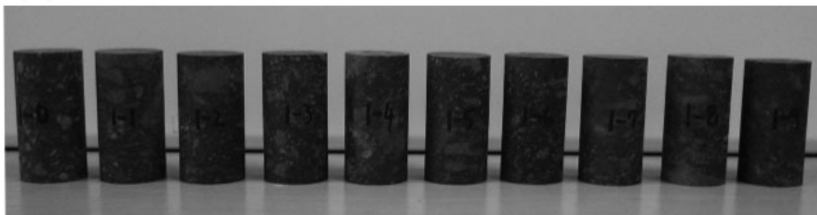


Figure 4-1. Specimen preparation for physical tests in laboratory, (a) core recovery, (b) cutting and (c) polishing.

(a) Pyrrhotite



(b) Ilmenite



(c) Magnetite



Figure 4-2. Core specimens for physical tests in laboratory, (a) pyrrhotite, (b) ilmenite and (c) magnetite.

4.2 미생물 배양 및 시험편 산화시험

이 연구에서 생물학적 풍화를 유도하기 위하여 자류철석, 티탄철석, 자철석의 산화반응에 토착호산성 박테리아를 이용하였다. 선정된 미생물은 basal salt와 에너지원(energy source)으로 구성된 성장-배양액(growth-medium)에서 20°C ~ 25°C로 12회 계대배양 하여 성장시킨 이후에 미생물 2L를 채취하여 배양 전 제조된 성장-배양액(ATCC, 이하 배지)에 접종시켜 생물학적 산화시험을 위한 배지를 조성하였다. 성장-배양액의 조성은 무기성분과 에너지원으로 구성하였다. 여기서, 제조된 성장-배양액의 무기성분은 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.2 g/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5 g/L, CaCl_2 0.25 g/L 및 KH_2PO_4 3.0 g/L을 3차 증류수 1.0 L에 용해시켜 제조하였으며, 에너지원으로 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 5.0 mg/L을 무기성분에 첨가하였다. 반면, 무기적 산화시험을 위한 배지는 미생물을 첨가하지 않고 생물학적 산화시험의 배지와 동일한 구성성분으로 제조하였다. 최종적으로 각 시험대상 시료 당 2개의 배지를 제조하였다. 특히, 자류철석 시험편의 경우 미생물 성장주기에 따른 개체수 변화량으로 인한 pH 변화로부터 암석의 물성변화 특성을 관찰하기 위하여 각각의 배지에 동일한 조건으로 코어 시험편 10개씩 첨가하였다. 그리고 미생물이 배양 초기에 제조된 배지의 환경에서 쉽게 적응할 수 있도록 황산(H_2SO_4)을 첨가하여 pH를 2.50으로 조절하였다. 반면, 티탄철석의 경우 미생물의 유무에 따른 산화작용의 조건하에서 티탄철석의 물성변화를 비교분석하기 위하여 무기적 및 생물학적 산화시험을 위한 배지에 산화에너지원인 코어 시험편 10개씩을 각각 첨가하였다. 그 이후에 미생물에 의한 각 시료의 물성변화 특성을 관찰하기 위한 배양기간은 미생물을 배양하지 않은 기간(배양기간 0일)을 시작으로 자류철석의 경우 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90일 등 10일 간격으로 총 10단계, 티탄철석과 자철석은 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45일 등 5일 간격으로 총 10단계로 각각 구성하였다.

4.3 실내시험

4.3.1 슬레이크 내구성 시험

미생물 배양 전 후의 암석 중량 변화에 따른 내구성을 살펴보기 위하여 슬레이크 내구성 시험을 실시하였다. 즉, 미생물 배양 전 각 시험편의 슬레이크 내구성 시험으로부터 미생물 배양 이후 각 시험편의 배양기간 별로 측정된 슬레이크 내구성 시험 회수에 따른 중량 변화 및 내구성 지수를 비교하여 미생물에 의한 암석의 물성변화 특성을 살펴보았다. 시험편은 직경 25 mm, 높이 약 50 mm의 1인치 코어 시험편을 사용하였다. 슬레이크 내구성 시험 장치(Figure 4-3)는 DONG AH TESTING MACHINE에서 제작한 모델 번호 DA-643을 이용하였다. 시험 방법은 2 mm 정방형 철망으로 이루어진 직경 140 mm, 길이 100 mm의 원통형 드럼에 중량 90 ~ 110 g 내외의 건조된 자류철석 코어 시험편을 넣고 10분간 200회 회전시킨 후 시료의 건조 무게를 측정한다. 이러한 과정을 3회 반복하여 식 (4.2)으로부터 슬레이크 내구성 지수(Slake durability index, I_{dn})를 구한다.

$$I_{dn} = \frac{B-D}{A-D} \times 100(\%) \quad (4.2)$$

여기서, A는 시료를 포함한 드럼의 무게(d), B는 해당 cycle 횟수에 따른 드럼과 남은 시료의 무게, D는 드럼의 무게를 나타낸다.

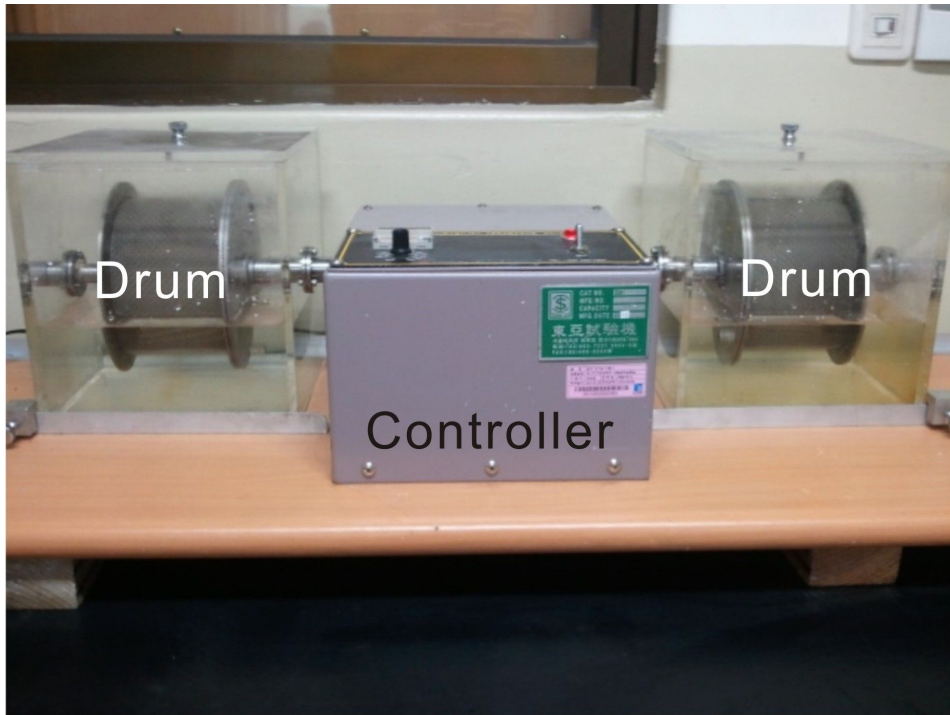


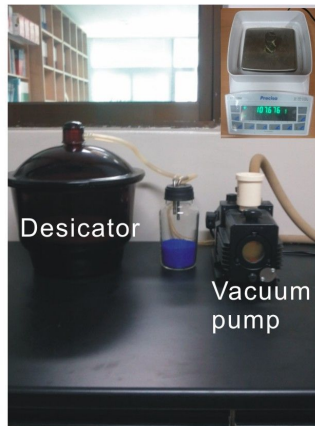
Figure 4-3. Slake durability test for slake durability index, (a) apparatus and (b) controller.

4.3.2 흡수율

미생물 배양 전 후에 대한 암석의 물성변화 특성을 알아보기 위하여 흡수율 측정을 실시하였다. 즉, 시험편 배양 전 각 시험편의 초기 흡수율로부터 미생물 배양 이후 각 시험편의 배양기간 별로 측정된 흡수율의 결과를 비교하였다. 시험편은 앞서 설명된 슬레이크 내구성 시험에서 사용된 것과 같은 크기의 1인치 코어 시험편을 사용하였다. 측정 방법은 한국암반공학회(2010)에서 규정한 시험법에 근거하여 총 3단계에 걸쳐 측정을 실시하였으며, 그 절차는 다음과 같다(Figure 4-4). 첫째, 데시케이터와 ULVAC KIKO, Inc. 의 모델번호 GLD-051 진공오일펌프를 이용하여 시험편을 12시간 이상 800 Pa(6 torr)이하의 진공상태에서 수침하여 포화시킨다. 둘째, 포화된 시험편은 모델번호 JH-600 수중무게 측정 장치에 있는 바구니에 넣고, 0.001 g까지 측정이 가능한 Precisa Gravimetrics AG의 모델번호 Precisa Balances 320XT 시리즈 전자저울을 이용하여 시험편의 수중무게(M_{sub})를 측정한다. 그리고 시험편을 수조에서 꺼내어 젖은 천으로 표면을 닦아내고 시험편의 표면 건조 포화상태의 무게(M_{sat})를 측정한다. 셋째, 건조기를 이용하여 24시간 이상 105°C에서 ± 3 정도의 온도를 유지한 이후에 시험편의 건조무게(M_{dry})를 측정한다. 마지막으로 앞서 측정된 수중무게, 포화무게, 건조무게를 각각 이용하여 식 (4.3)으로부터 흡수율을 구한다.

$$\text{흡수율 (\%)} = \frac{M_{sat} - M_{dry}}{M_{dry}} \times 100 \quad (4.3)$$

(a) Saturation



(b) Immersion



Absorption



(c) Drying

Figure 4-4. Process of absorption measurement, (a) desiccator and vacuum oil pump for saturation, (b) Measurement of immersed and saturated weights and (c) drying oven for measurement of dry weight.

4.3.3 종파속도

미생물 배양 전 후 암석에서 나타날 수 있는 속도 차이를 살펴보기 위하여 종파속도(V_p) 측정을 실시하였다. 즉, 미생물 배양 전 각 시험편의 초기 V_p 측정 결과로부터 미생물 배양 이후 각 시험편의 배양기간에 따라 측정된 V_p 의 결과를 비교하였다. 시험편은 앞서 설명된 슬레이크 내구성 시험이나 흡수율 시험을 위해 사용된 것과 같은 크기의 코어 시험편이 사용되었다. 종파속도는 Figure 4-5에서 보는 바와 같이 MISUNG C & S INSPECTION Co. Ltd. 의 모델 번호 CND02-02 Concrete Non-Destructive Tester(CND)를 사용하여 측정되었다. 이 장치는 Concrete Non-Destructive Tester 본체와 두 개의 발 수신 센서, 그리고 센서에서 본체로 신호를 전달 할 수 있는 BNC connector cable로 구성되었다. 측정 방법은 CND 본체에 시험편의 길이를 입력한 이후 발신 센서로부터 생성된 펄스가 시험편을 통과하여 수신센서에 도달할 때의 초기과를 기록하였다. 측정값은 각 시험편 별로 3번 측정해서 얻은 값에 대한 평균값을 사용하였다. 시험편의 종파속도는 시험편의 길이(L)과 종파의 초기 도달 시간(T)을 이용하여 식(4.4)로부터 구할 수 있다.

$$\text{종파속도} = \frac{L}{T} (m/s) \quad (4.4)$$

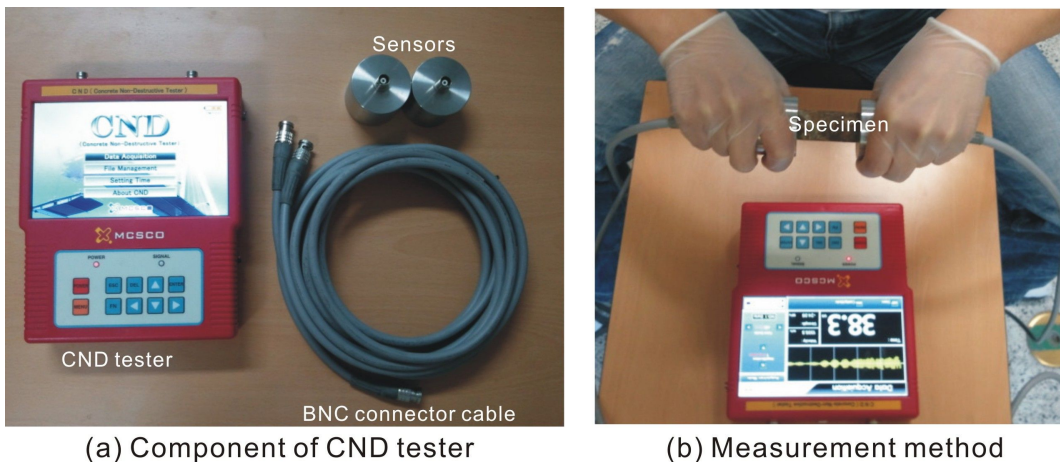


Figure 4-5. Measurement of P-wave velocity, (a) component of CND tester and (b) measurement method.

4.3.4 일축압축시험

미생물 배양 전과 후에 대한 암석의 물성변화 특성을 알아보기 위하여 일축압축시험을 실시하였다. 시험편은 상하 압축면에 대한 편평도를 유지하기 위하여 직경 150 mm의 diamond grinding wheel을 이용하여 편평도의 오차가 ± 0.02 mm 내가 되도록 정밀하게 연마를 하였다. 일축압축시험은 ISRM(1981)과 한국암반공학회(2010)에서 규정한 시험법에 근거하여 실시하였다(Figure 4-6). 이때 사용된 만능재료 시험기는 DEAKYOUNG TECH & TESTER MTG. Co. Ltd.의 모델 번호 DTU-900HC 시리즈를 사용하였다. 시험 시 시험편 축하중의 편심을 방지하기 위해 spherical platen을 이용하였다. 측정 시 변형률과 축하중 값들은 일본 KYOWA사의 모델 번호 UCAM-65B-AC M14의 데이터로거를 통하여 저장되며, 모든 자료는 컴퓨터를 사용하여 처리된다. 이들 일축압축시험으로부터 일축압축강도, 탄성계수인 영률(Young's modulus, E), 그리고 포아송비(Poisson's ratio, ν)를 각각 구할 수 있다.

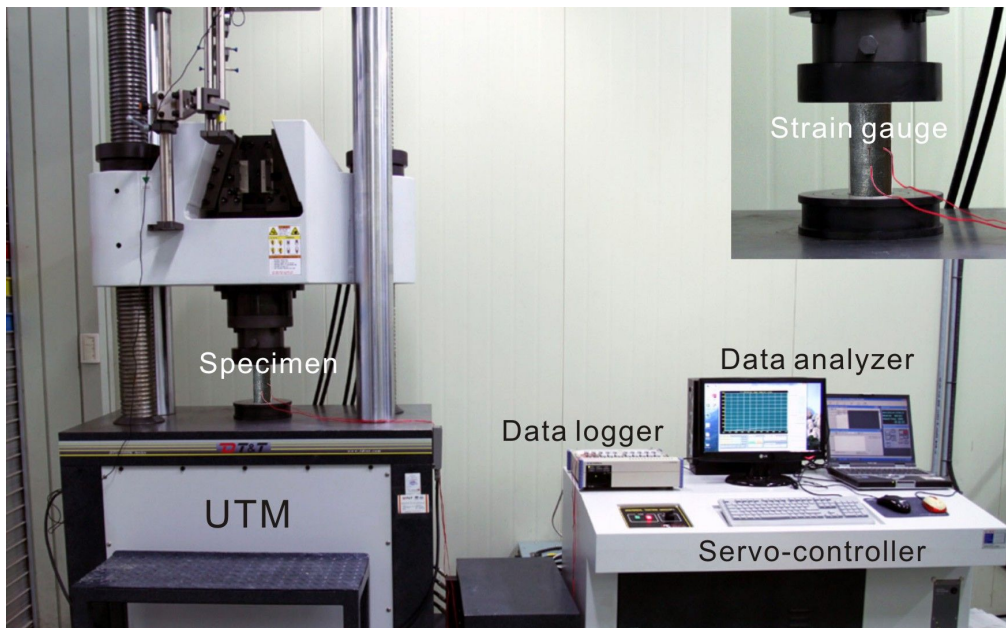


Figure 4-6. A view of the uniaxial compression test for uniaxial compressive strength (UCS) in laboratory.

5. 초기 물성값과 보정

시험편의 미생물 산화시험 전 자류철석, 티탄철석, 자철석의 측정된 초기 흡수율 및 종파속도 결과를 정리하면 Table 5-1과 같다. 그리고 이들로부터 각 시험편에 대한 초기 물성값의 분포를 Figure 5-1, Figure 5-2, Figure 5-3에 각각 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 자류철석의 초기 흡수율 범위는 0.125 ~ 0.238%이며, 평균은 0.19%로 나타났으며(Figure 5-1(a)), 종파속도는 3676.5 ~ 4386.0 m/s이며, 평균은 약 3980 m/s로 나타났다(Figure 5-1(b)). 티탄철석의 초기 흡수율 범위는 0.029 ~ 0.085%이며, 평균은 0.05%로 나타났으며(Figure 5-2(a)), 종파속도는 1515.2 ~ 2057.6 m/s이며, 평균은 약 1919 m/s를 보였다(Figure 5-2(b)). 그리고 자철석의 초기 흡수율 범위는 0.099 ~ 0.153%이며, 평균은 0.12%로 나타났으며(Figure 5-3(a)), 종파속도는 1400.0 ~ 1506.0 m/s이며, 평균은 약 1466 m/s를 보였다(Figure 5-3(b)). 하지만, 그림에서 보는바와 같이 각 광석에 따라 몇몇 시험편에 있어 초기 물성값은 평균값으로부터 큰 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다.

각 광석의 시험편으로부터 측정된 초기 물성값의 최소값과 최대값의 차이는 자류철석의 경우 흡수율이 0.113%, 종파속도가 약 709 m/s의 편차를, 티탄철석의 경우 흡수율이 0.056%, 종파속도가 약 543 m/s의 편차를, 그리고 자철석의 경우 흡수율이 0.054%, 종파속도가 약 106 m/s의 편차를 나타냈다. 흡수율에 있어서 자류철석의 물성값 편차가 큰 반면 티탄철석과 자철석은 거의 비슷한 편차를 보였다. 반면, 종파속도에 있어서는 자류철석과 티탄철석은 큰 편차를 보였으며, 자철석은 상대적으로 작았다. 하지만, 이 연구에서 각 배양기간별로 측정된 시험편의 개수를 1개로 제한하였고, 사용된 각 시료들도 동일한 지역과 환경에서 채취하였으며, 각 시험편 별로 최소 3회 이상 측정된 결과임을 고려해 볼 때, 초기 평균 물성값에 대하여 각 시험편 별로 측정된 물성값의 심한 편차는 측정에 의한 오류라기보다는 시료 자체의 상태에 기인한 것으로 판단할 수 있다. 따라서 미생물 산화시험 전에서 미생물 산화시험 이후에 측정된 각 시험편의 물성 변화에 대한 결과는 기준점을 바탕으로 정규화할 필요성이 있다. 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 미생물 산화시험 전후의 관계를 분석하기 위한 기준점을 초기 평균값으로 하여 미생물 산화시험 전후의 각 단계별 물성 변화량에 대한 측정값의 차이를 초기 평균값으로부

터 뺀 정규화식을 식 (5.1)와 같이 제시하였다.

$$P_a = I_a - (I_b - M_a) \quad (5.1)$$

여기서, P_a (Property value after culture)는 미생물 산화시험 후 물성값, I_a (Initial average value)는 미생물 산화시험 전 초기 평균값, I_b (Initial value before culture)는 미생물 산화시험 전 초기 측정값, M_a (Measured values after culture)는 미생물 산화시험 후 측정값을 각각 나타낸다.

Table 5-1. The initial values of absorption and P-wave velocity on pyrrhotite, ilmenite, and magnetite.

No.	Pyrrhotite		Ilmenite		Magnetite	
	Ab (%)	V _p (m/s)	Ab (%)	V _p (m/s)	Ab (%)	V _p (m/s)
1	0.216	4065.0	0.033	2057.6	0.099	1479
2	0.185	4237.3	0.061	1515.2	0.103	1479
3	0.157	4386.0	0.038	2040.8	0.099	1474
4	0.205	4065.0	0.085	1850.2	0.099	1453
5	0.212	3968.3	0.029	2032.5	0.108	1506
6	0.185	4000.0	0.034	2040.8	0.116	1479
7	0.238	3816.8	0.038	2040.8	0.125	1462
8	0.207	3920.0	0.076	2040.8	0.122	1492
9	0.162	4273.5	0.031	2016.8	0.099	1483
10	0.192	4098.4	0.054	1533.7	0.118	1462
11	0.228	3937.0	0.045	2032.5	0.125	1459
12	0.171	3983.7	0.045	1524.5	0.124	1462
13	0.186	3932.2	0.047	2032.5	0.135	1470
14	0.125	3800.0	0.039	2032.5	0.152	1400
15	0.208	3832.3	0.033	2032.5	0.141	1436
16	0.189	3846.2	0.051	2040.8	0.149	1483
17	0.203	3676.5	0.035	2024.3	0.125	1497
18	0.143	4032.3	0.033	1984.1	0.153	1445
19	0.184	3965.0	0.067	1984.1	0.141	1428
20	0.194	3759.4	0.037	1524.4	0.134	1479
Avg.	0.190	3,980.0	0.050	1,919.0	0.120	1,466

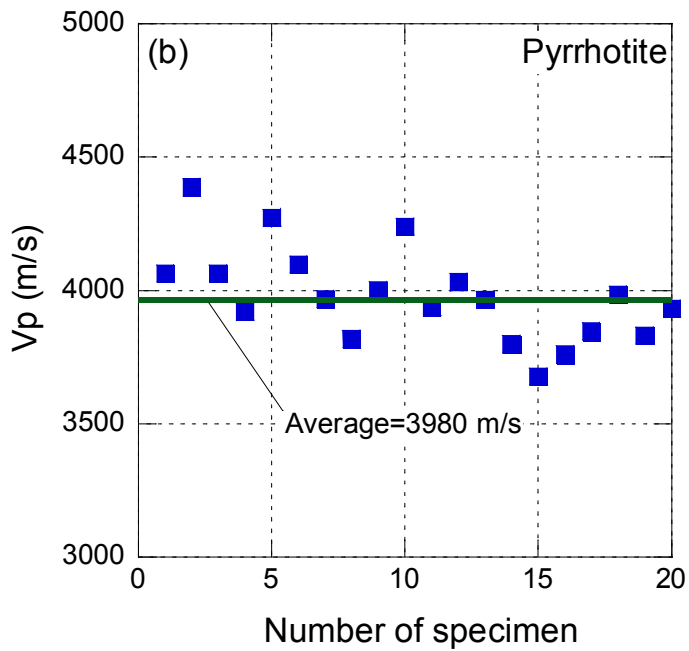
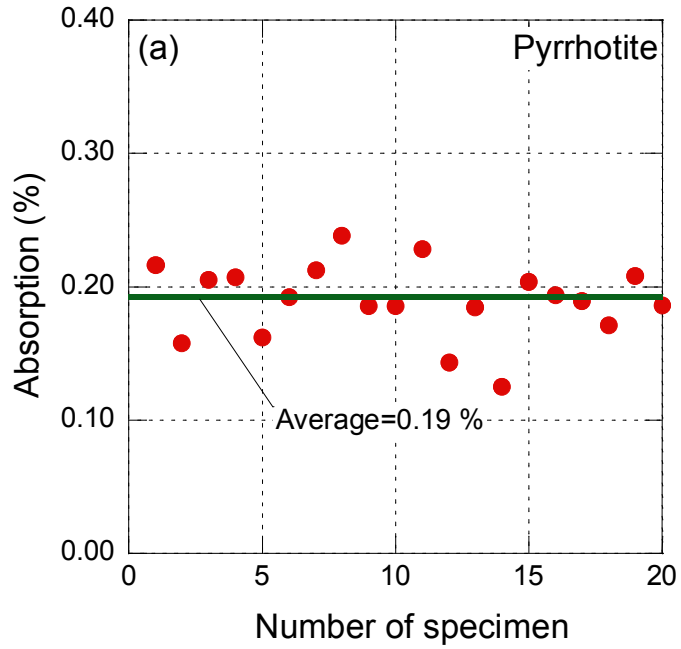


Figure 5-1. The initial values of absorption and P-wave velocity in pyrrhotite.

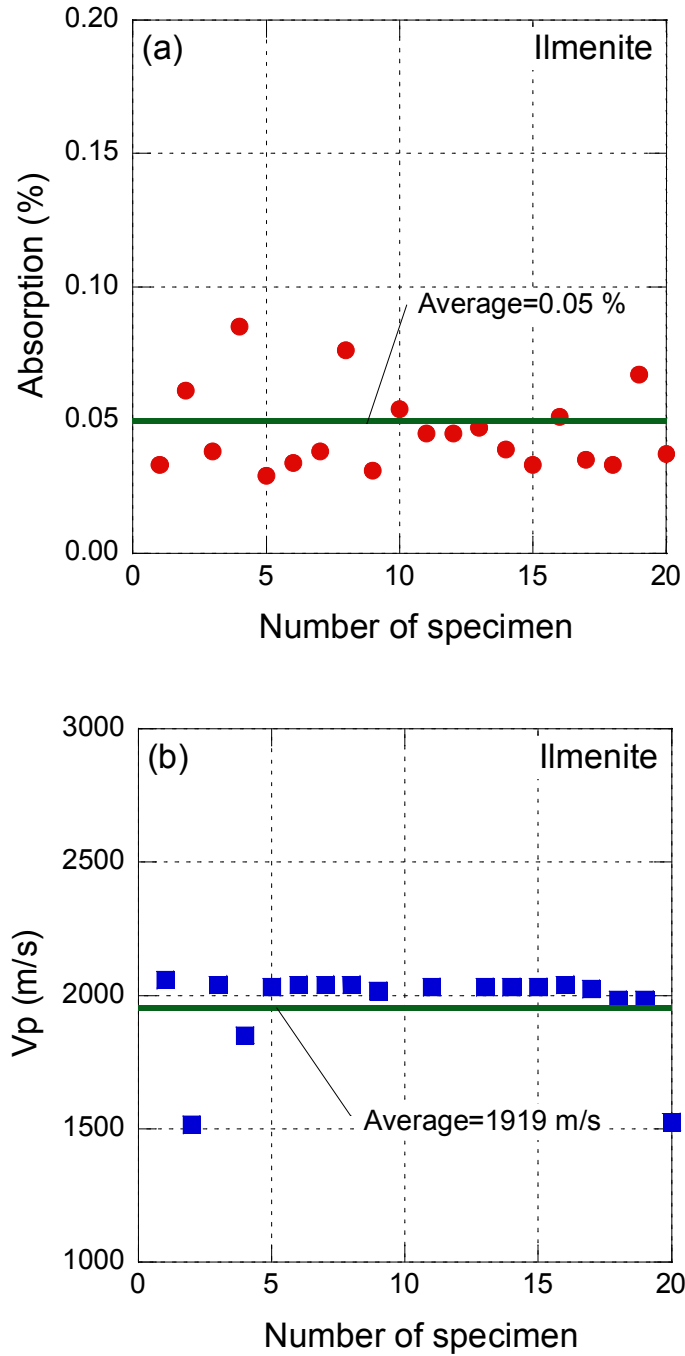


Figure 5-2. The initial values of absorption and P-wave velocity in ilmenite.

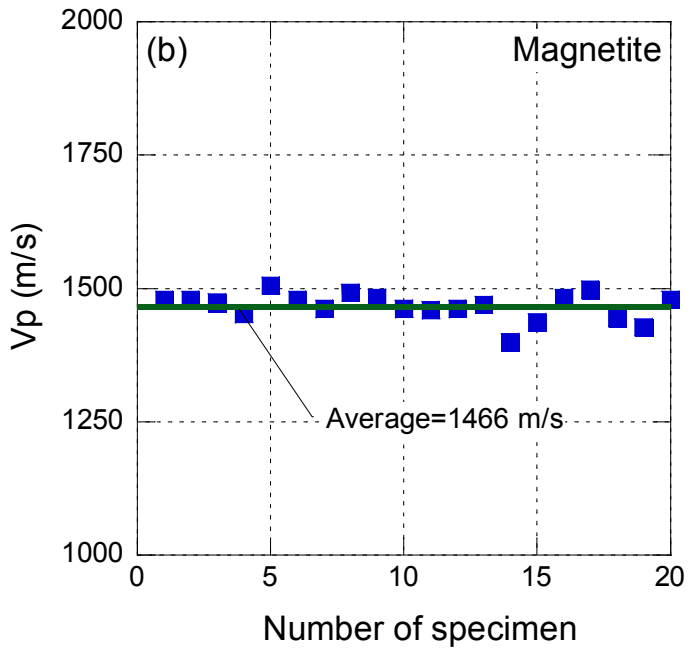
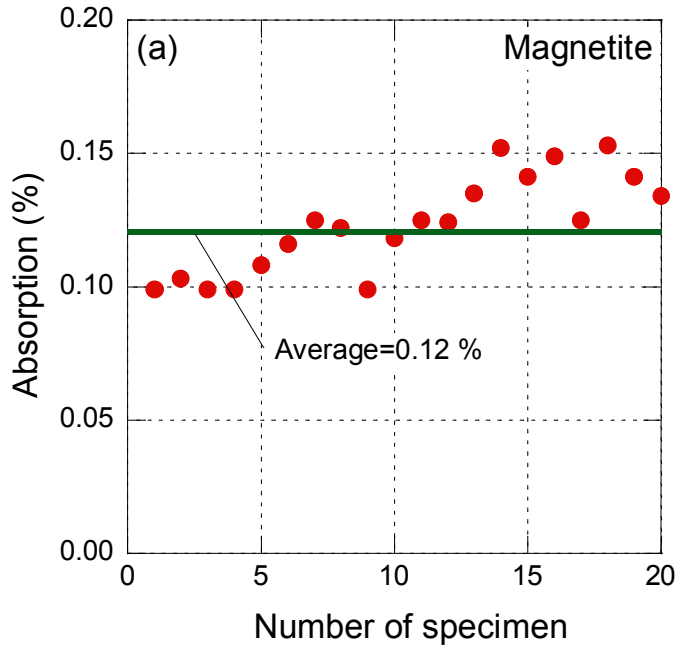


Figure 5-3. The initial values of absorption and P-wave velocity in magnetite.

6. 연구결과

6.1 자류철석의 물성변화

최적의 성장조건에서 미생물의 개체 수 변화량으로 인한 pH 변화로부터 제2연화광산 자류철석의 물성변화 특성을 파악하기 위하여 미생물의 배양기간에 따른 슬레이크 내구성 시험, 흡수율, 종파속도 및 일축압축시험 등의 실내시험을 실시하였다. 미생물의 배양기간에 따른 자류철석의 물성변화는 미생물 산화시험 전의 물성시험 결과로부터 미생물 산화시험 이후의 각 단계별 물성시험 결과의 관계를 미생물에 의한 pH 결과와 비교분석하였다. 이때, 미생물 산화시험 전의 초기 물성 결과로부터 미생물 산화시험 이후의 물성 변화를 비교분석하기 위한 정규화한 흡수율과 종파속도는 식 (5.1)로 계산되었다. 각 물성값의 변화 양상을 살펴보면 다음과 같다.

6.1.1 배양기간에 따른 자류철석의 pH 변화

미생물의 배양기간 동안 3일 간격으로 측정된 자류철석의 pH 결과를 정리하면 Table 6-1과 같다. 여기서 Specimen-U는 일축압축강도 시험을 위한 시험편을, Specimen-S는 슬레이크 내구성 시험을 위한 시험편을 각각 나타낸다. 그리고 배양기간에 따른 자류철석의 pH 변화 관계는 Figure 6-1에 나타내었다. Specimen-U의 경우 배양기간 동안 측정된 pH는 1.43 ~ 2.07 사이의 분포를 보인다(Figure 6-1(a)). 배양기간에 따른 pH의 특징을 살펴보면, 10 ~ 30일 구간에서는 완만한 감소, 30 ~ 40일 구간에서는 급격한 감소기, 40 ~ 80일 구간에서는 완만한 증가, 그리고 80 ~ 90일 구간에서는 급격하게 증가하는 경향을 보였다. Specimen-S의 경우 배양기간 동안 측정된 pH는 1.10 ~ 1.73 사이의 분포를 보이며(Figure 6-1(b)), 이 시험편의 경우도 값의 차이는 있지만 Specimen-U의 pH 경향과 거의 일치하였다. 특히, 배양기간 0 ~ 3일 사이에서 발생한 급격한 pH 감소는 미생물을 배양하는데 있어 조성된 환경에서 이들이 쉽게 적응기를 가질 수 있도록 첨가한 황산에 의해 pH가 조절된 결과이다.

Table 6-1. The results of the measured pH with an interval of 3 days during culture period on specimen-U for uniaxial compressive strength and specimen-S for slake duability test of pyrrhotite, 0 day: controled pH

Measured interval	Specimen-U	Specimen-S
day	pH	pH
0	2.50	2.50
3	1.73	1.68
6	1.70	1.60
9	1.65	1.54
12	1.62	1.48
15	1.67	1.50
18	1.73	1.50
21	1.60	1.48
24	1.61	1.54
27	1.64	1.63
30	1.76	1.60
33	1.50	1.17
36	1.43	1.10
39	1.44	1.13
42	1.50	1.16
45	1.48	1.14
48	1.51	1.14
51	1.53	1.21
54	1.56	1.21
57	1.61	1.29
60	1.64	1.31
63	1.69	1.35
66	1.71	1.35
69	1.72	1.34
72	1.75	1.36
75	1.76	1.39
78	1.81	1.42
81	1.81	1.40
84	1.86	1.47
87	1.98	1.67
90	2.07	1.73

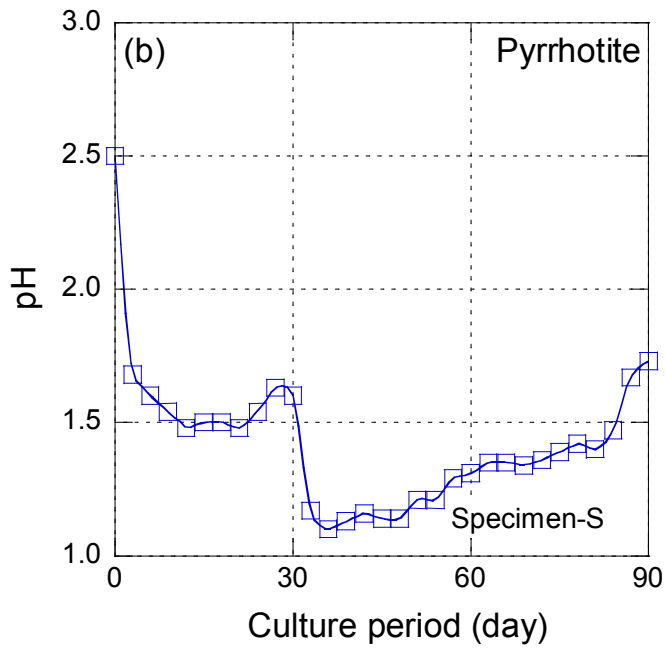
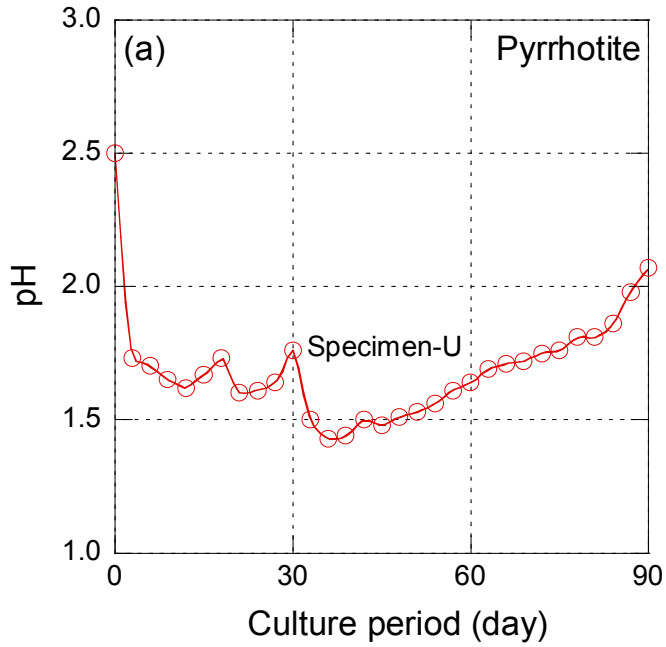


Figure 6-1. Variation of pH with culture period on (a) Specimen-U, and (b) Specimen-S of pyrrhotite.

6.1.2 자류철석의 슬레이크 내구성 시험

미생물 배양기간과 슬레이크 내구성 시험 횟수에 따라 측정된 중량변화의 결과를 정리하면 Table 6-2와 같다. 그리고 슬레이크 내구성 시험 횟수에 따라 미생물의 영향을 받지 않은 시료와 미생물을 배양한 시료의 중량변화 관계를 Figure 6-2에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 미생물을 배양하지 않은 산화시험의 경우(culture period=0) 슬레이크 내구성 시험과 무관하게 중량 변화는 거의 관찰되지 않았다. 반면, 미생물을 배양한 산화시험의 경우(culture period=10 ~ 90) 배양기간에 따라 중량 변화 차이가 관찰되었다. 공통적으로 슬레이크 내구성 시험 횟수가 증가할수록 중량이 감소하는 경향을 보였다. 특히, 미생물 배양기간이 20일 ~ 40일과 80일의 중량 변화 폭이 가장 크게 나타났다. 미생물 배양기간에 따른 산화시험에 의한 슬레이크 내구성 시험 3회 실시한 결과를 정리하면 Table 6-3과 같다. 그 결과로부터 구한 슬레이크 내구성 지수의 변화를 Figure 6-3에 도시하였다. 미생물을 배양하지 않은 산화시험의 경우 슬레이크 내구성 지수에 따른 변화 폭이 거의 나타나지 않았지만, 미생물을 배양한 산화시험의 경우 모든 시료에서의 변화 폭이 다르게 나타났으며, 그 양상은 거의 비슷하였다. 즉, 슬레이크 내구성 시험의 횟수가 증가할수록 변화 폭이 크게 나타났음을 알 수 있다. 3회의 슬레이크 내구성 시험에서 슬레이크 내구성 지수는 3개의 변곡점을 보였다. 이를 간략히 살펴보면, 배양기간 0 ~ 30일 구간에서는 슬레이크 내구성 지수가 감소, 30 ~ 60일 구간에서는 증가, 60 ~ 80일 구간에서는 감소, 80 ~ 90일 구간에서는 증가하는 W 형태의 증감곡선을 보였다. 또한 슬레이크 내구성 지수는 배양기간이 30일에서 가장 작은 값을 나타냈다.

Table 6-2. The results of the measured weight with culture period and the number of slaking cycles on slake durability test

Culture period (day)	Cycles of slaking durability test			
	Weight for 0-cycle (g)	Weight for 1-cycle (g)	Weight for 2-cycle (g)	Weight for 3-cycle
0	110.01	109.99	109.92	109.91
10	98.36	98.05	97.68	97.46
20	107.16	106.18	105.8	105.50
30	104.00	103.00	102.36	101.77
40	97.01	96.21	95.85	95.49
50	99.07	98.35	98.27	97.93
60	102.39	102.01	101.86	101.68
70	93.77	93.38	93.01	92.94
80	87.42	86.79	86.39	85.46
90	97.91	97.49	97.30	97.09

Table 6-3. The results of the calculated slake durability index with culture period and the number of slaking cycles, I_{dn} : Slake durability index

Slake durability index for 1-cycle				
Culture period (day)	Weight after 0-cycle (g)	Weight after 1-cycle (g)	Weight of drum (g)	I_{d1} (%)
0	110.007	109.992	2010.6	99.9
10	98.602	98.055	2010.6	99.4
20	107.472	106.183	2010.6	98.8
30	104.716	102.999	2010.6	98.3
40	97.667	96.219	2010.6	98.5
50	99.330	98.352	2010.6	99.0
60	102.54	102.009	2010.6	99.4
70	95.086	93.338	2010.6	98.1
80	87.708	86.797	2010.6	98.9
90	98.186	97.492	2010.6	99.2

Table 6-3. Continued

Slake durability test index for 2-cycle				
Culture period (day)	Weight after 0-cycle (g)	Weight after 1-cycle (g)	Weight of drum (g)	I_{d2} (%)
0	110.007	109.920	2010.6	99.9
10	98.602	97.687	2010.6	99.0
20	107.472	105.850	2010.6	98.4
30	104.716	102.363	2010.6	97.7
40	97.667	95.857	2010.6	98.1
50	99.330	98.179	2010.6	98.8
60	102.54	101.855	2010.6	99.3
70	95.086	93.005	2010.6	97.8
80	87.708	86.390	2010.6	98.4
90	98.186	97.300	2010.6	99.0
Slake durability test index for 3-cycle				
Culture period (day)	Weight after 2-cycle (g)	Weight after 3-cycle (g)	Weight of drum (g)	I_{d3} (%)
0	110.007	109.911	2010.6	99.9
10	98.602	97.468	2010.6	98.8
20	107.472	105.502	2010.6	98.1
30	104.716	101.767	2010.6	97.1
40	97.667	95.394	2010.6	97.6
50	99.330	97.405	2010.6	98.0
60	102.54	101.581	2010.6	99.0
70	95.086	92.742	2010.6	97.5
80	87.708	85.462	2010.6	97.4
90	98.186	97.088	2010.6	98.8

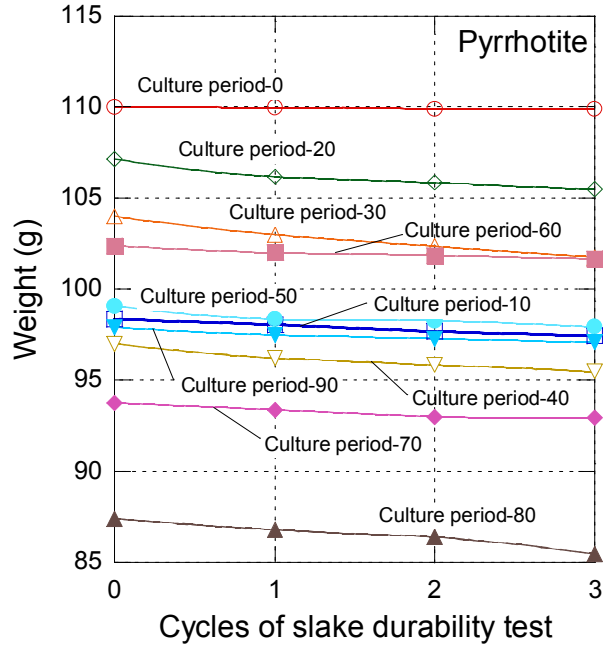


Figure 6-2. The result of slake durability test with culture period and the number of slaking cycles.

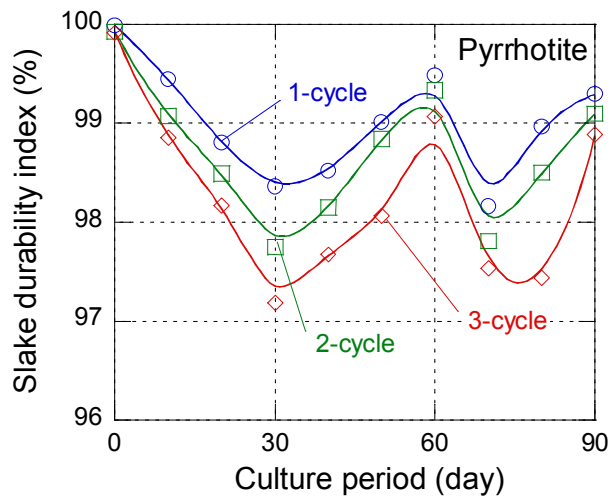


Figure 6-3. Slake durability index with culture period and the number of slaking cycles.

6.1.3 자류철석의 흡수율

미생물 산화시험 전 자류철석 시험편에 대한 각 단계별 초기 흡수율의 결과로부터 미생물 산화시험 이후 각 단계별로 측정된 흡수율의 결과를 정리하면 Table 6-4와 같다. 그리고 미생물 배양기간과 각 단계별로 측정된 흡수율의 관계를 Figure 6-4에 나타내었다. Specimen-U의 경우 미생물 산화시험 전 초기 흡수율은 0.157 ~ 0.238%, 미생물 산화시험 이후에 측정된 흡수율은 0.202 ~ 0.417%의 범위를 보였다(Figure 6-4(a)). Specimen-S의 경우 미생물 산화시험 전 초기 흡수율은 0.125 ~ 0.228%, 미생물 산화시험 이후에는 0.182 ~ 0.375% 사이의 분포를 나타냈다(Figure 6-4(b)). Specimen-U와 Specimen-S의 미생물 배양기간과 흡수율 관계에 좀 더 자세히 살펴보면, Specimen-U에서는 미생물을 배양하지 않은 산화시험 시료의 경우 흡수율의 변화가 거의 없는 반면, 미생물을 배양한 산화시험 시료의 경우 배양기간이 0 ~ 60일 구간에서는 배양기간이 증가할수록 흡수율이 서서히 증가하다가 그 이후 구간에서는 거의 일정한 상태를 나타냈다. Specimen-S에서도 미생물을 배양하지 않은 산화시험 시료의 경우 흡수율의 변화는 거의 없는 반면, 미생물을 배양한 산화시험 시료의 경우 배양기간이 0 ~ 40일 구간에서는 배양기간이 증가할수록 흡수율이 서서히 증가하다가 그 이후 구간에서는 거의 일정한 상태를 나타냈다.

이들의 결과를 식 (5.1)를 이용하여 계산한 후 정리하면 Table 6-5와 같다. 초기 평균값을 기준점으로 하여 계산된 각 단계별 정규화 흡수율의 변화를 Figure 6-5에 도시하였다. Specimen-U의 경우 미생물 배양기간에 따라 계산된 정규화된 흡수율은 0.195 ~ 0.404% 사이의 분포를 나타냈다. Specimen-U의 배양기간에 따른 정규화된 흡수율 변화를 살펴보면, 배양기간 0 ~ 30일 구간에서는 보통 기울기 증가, 30 ~ 40일 구간에서는 급격한 기울기 증가, 그리고 40 ~ 90일 구간에는 거의 변화가 없었다(Figure 6-5(a)). Specimen-S의 정규화된 흡수율은 0.183 ~ 0.350% 사이에 분포를 나타냈으며, 정규화된 Specimen-U의 흡수율 결과와 거의 동일한 경향을 나타냈다(Figure 6-5(b)).

Table 6-4. The results of the measured absorption before and after culture with culture period on Specimen-U and Specimen-S of pyrrhotite, M_{dry} : dry weight, M_{sat} : saturated weight, Ab: absorption

Specimen-U						
Culture period (day)	Before culture			After culture		
	M_{dry} (g)	M_{sat} (g)	Ab (%)	M_{dry} (g)	M_{sat} (g)	Ab (%)
0	109.225	109.462	0.216	109.225	109.462	0.216
10	108.661	108.832	0.157	107.139	106.923	0.202
20	111.262	111.491	0.205	107.688	107.380	0.286
30	104.98	105.198	0.207	99.846	99.527	0.320
40	107.218	107.392	0.162	102.200	101.830	0.363
50	106.556	106.761	0.192	99.715	99.317	0.400
60	110.994	111.230	0.212	104.918	104.482	0.417
70	109.855	110.117	0.238	103.461	103.052	0.396
80	107.282	107.481	0.185	87.728	87.391	0.385
90	105.363	105.558	0.185	93.926	93.564	0.386
Avg.	-	-	0.196	-	-	-
Specimen-S						
0	110.007	110.258	0.228	110.007	110.258	0.228
10	100.164	100.308	0.143	98.362	98.542	0.182
20	110.541	110.745	0.184	107.160	107.432	0.253
30	108.806	108.943	0.125	104.000	104.216	0.207
40	104.688	104.901	0.203	97.019	97.380	0.361
50	106.924	107.132	0.194	99.077	99.430	0.356
60	110.861	111.071	0.189	102.390	102.74	0.341
70	104.100	104.279	0.171	93.770	94.086	0.336
80	109.854	110.083	0.208	87.420	87.748	0.375
90	109.070	109.273	0.186	97.919	98.256	0.344
Avg.	-	-	0.184	-	-	-

Table 6-5. The results of normalized absorption with culture period on Specimen-U and Specimen-S of pyrrhotite, 0 day: initial average values

Culture period (day)	Normalized absorption (%)	
	Specimen-U	Specimen-S
0	0.195	0.183
10	0.241	0.222
20	0.277	0.252
30	0.309	0.265
40	0.397	0.341
50	0.404	0.345
60	0.401	0.335
70	0.394	0.348
80	0.396	0.350
90	0.397	0.341

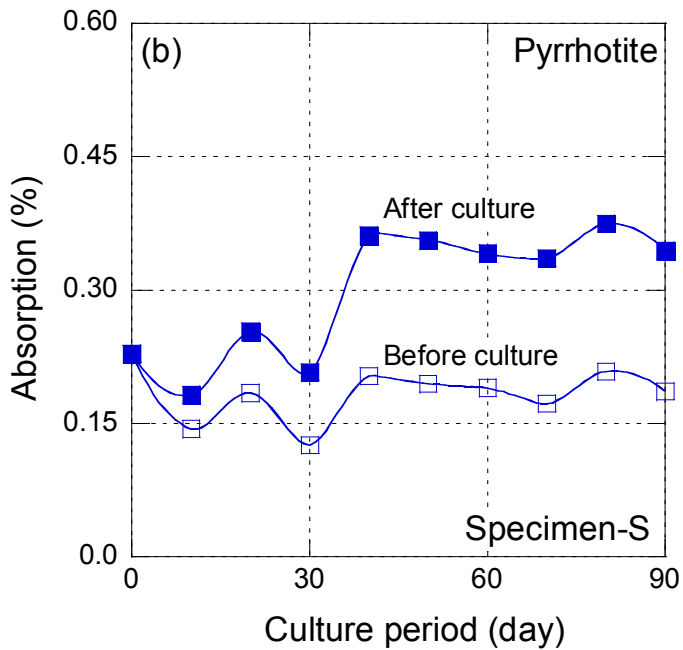
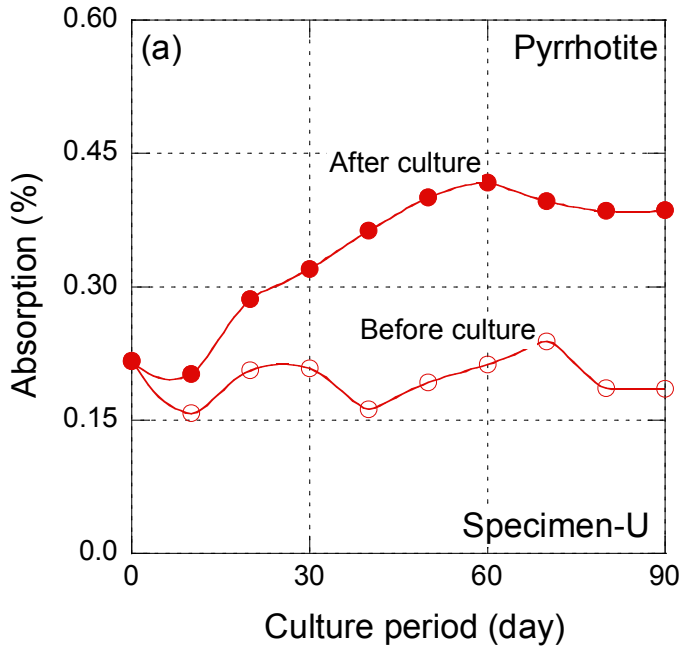


Figure 6-4. Variation of measured absorption before and after culture with culture period on (a) Specimen-U and (b) Specimen-S of pyrrhotite.

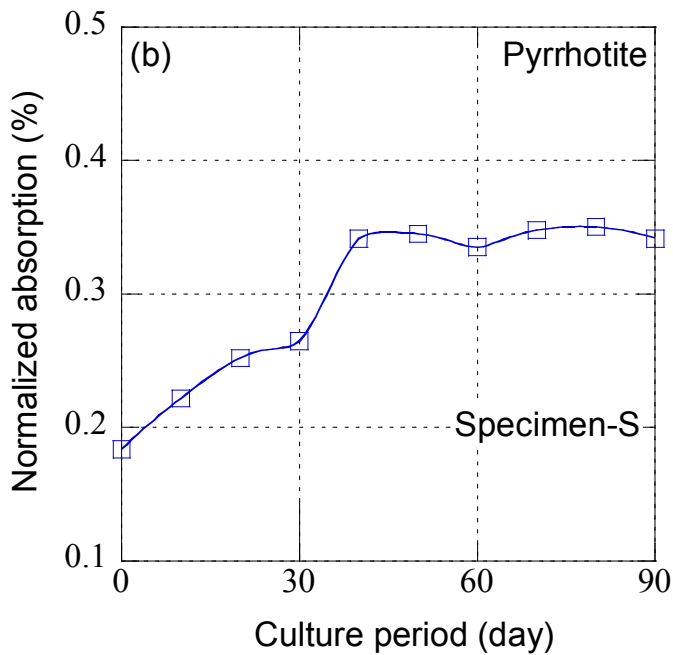
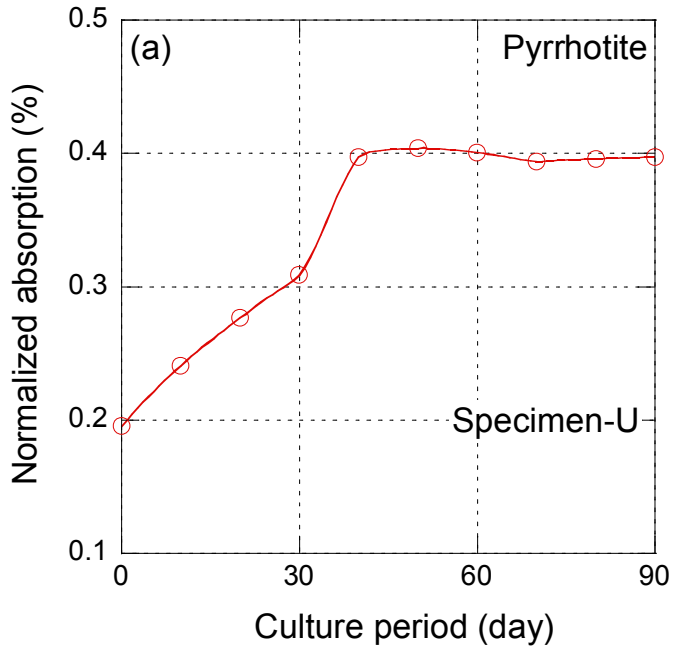


Figure 6-5. Variation of normalized absorption with culture period on (a) Specimen-U, and (b) Specimen-S of pyrrhotite.

6.1.4 자류철석의 종파속도

미생물 산화시험 전 자류철석 시험편에 대한 각 단계별 초기 종파속도의 결과로부터 미생물 산화시험 이후 각 단계별로 측정된 종파속도의 결과를 정리하면 Table 6-6과 같다. 그리고 미생물 배양기간과 각 단계별로 측정된 종파속도의 관계를 Figure 6-6에 나타냈다. Specimen-U의 미생물 산화시험 전 초기 종파속도는 3816.8 ~ 4386.0 m/s, 미생물 산화시험 이후에 측정된 종파속도는 1725.3 ~ 4201.7 m/s의 범위를 보였다(Figure 6-6(a)). Specimen-S의 경우 미생물 산화시험 초기 종파속도는 3676.5 ~ 4032.3 m/s, 미생물 산화시험 이후에는 1372.3 ~ 3937.0 m/s 사이의 분포를 나타냈다(Figure 6-6(b)). 미생물 산화시험 전 종파속도의 변화 폭은 Specimen-U와 Specimen-S 모두에서 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 반면 미생물 산화시험 후에는 Specimen-U와 Specimen-S 모두에서 배양기간이 증가함에 따라 종파속도가 감소하는 경향을 보였다.

이들의 결과를 식 (5.1)를 이용하여 정규화 종파속도로 계산하여 정리하면 Table 6-7과 같다. 초기 평균값을 기준으로 하여 계산된 각 단계별 정규화 종파속도 변화는 Figure 6-7에 도시하였다. Specimen-U의 경우 미생물 배양기간에 따라 계산된 정규화된 종파속도는 1991.5 ~ 4083.0 m/s 사이의 분포를 나타냈다. Specimen-U의 배양기간에 따른 정규화된 종파속도 변화를 살펴보면, 배양기간 0 ~ 20일 구간에서는 완만한 기울기 감소, 20 ~ 40일 구간에서는 급격한 기울기 감소, 40 ~ 70일 구간에서는 완만한 감소, 그리고 70 ~ 90일 구간에서는 변화가 거의 없음을 나타냈다(Figure 6-7(a)). Specimen-S의 정규화된 종파속도는 1437.4 ~ 3876.5 m/s 사이에 분포를 나타냈으며, Specimen-U의 배양기간에 따른 정규화된 흡수율 변화 결과와 거의 비슷한 경향을 나타냈다(Figure 6-5(b)).

Table 6-6. The results of the measured P-wave velocity (V_p) before and after culture with culture period on Specimen-U and Specimen-S of pyrrhotite

Specimen-U		
Culture period (day)	Before culture V_p (m/s)	After culture V_p (m/s)
0	4065.0	4065.0
10	4386.0	4201.7
20	4065.0	3649.6
30	3920.0	2648.6
40	4273.5	2427.2
50	4098.4	2102.7
60	3968.3	2074.3
70	3816.8	1725.3
80	4000.0	1937.1
90	4237.3	2149.5
Avg.	4083.0	-
Specimen-S		
0	3937.0	3937.0
10	4032.3	3906.2
20	3965.0	3649.6
30	3800.0	3246.8
40	3676.5	2524.0
50	3759.4	2500.0
60	3846.2	2475.2
70	3983.7	1639.0
80	3832.3	1372.3
90	3932.2	1493.1
Avg.	3,876.5	-

Table 6-7. The results of normalized P-wave velocity (V_p) with culture period on Specimen-U and Specimen-S of pyrrhotite, 0 day: initial average value

Culture period (day)	Normalized V_p (m/s)	
	Specimen-U	Specimen-S
0	4083.0	3876.5
10	3898.7	3750.4
20	3667.6	3561.1
30	2811.6	3323.3
40	2236.7	2724.0
50	2087.3	2617.1
60	2189.0	2505.5
70	1991.5	1531.8
80	2020.1	1416.5
90	1995.2	1437.4

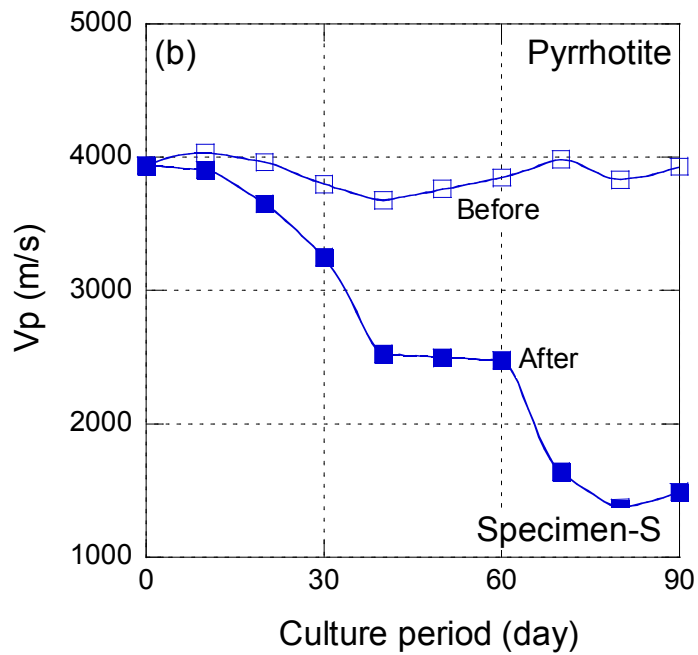
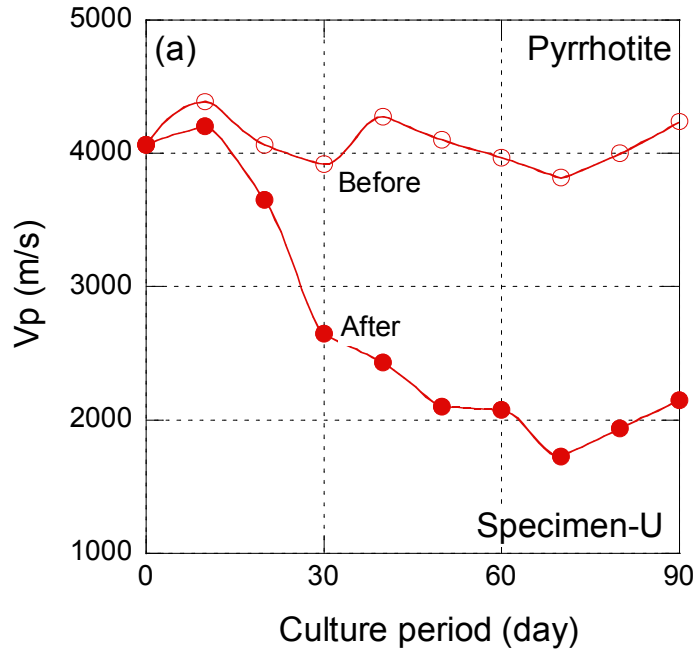


Figure 6-6. Variation of measured V_p before and after culture with culture period on (a) Specimen-U and (b) Specimen-S of pyrrhotite.

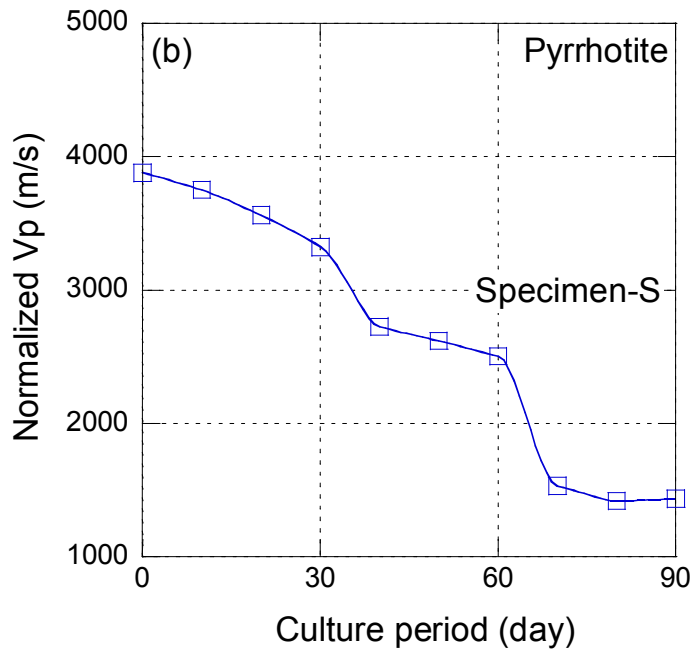
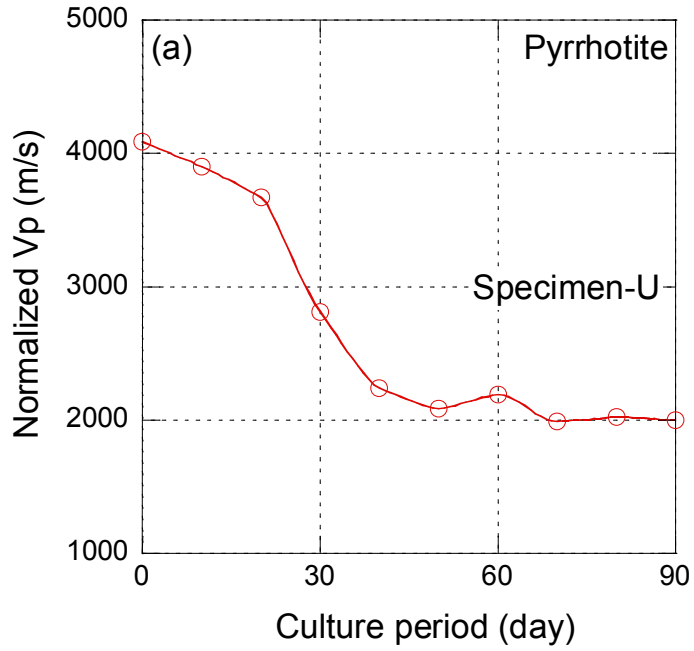


Figure 6-7. Variation of normalized V_p with culture period on (a) Specimen-U, and (b) Specimen-S and (c) of pyrrhotite.

6.1.5 자류철석의 일축압축강도

미생물의 배양기간에 따라 측정된 일축압축강도의 결과를 정리하면 Table 6-8과 같다. 그리고 미생물 배양기간과 각 단계별로 측정된 일축압축강도 관계를 Figure 6-8에 나타냈다. 일축압축강도는 Specimen-S의 경우 슬레이크 내구성 시험을 위한 시료로서 슬레이크 내구성 시험에 의한 자류철석 시험편의 내구성 감소로 인하여 일축압축강도 측정이 불가능하여 Specimen-U 시료만을 대상으로 하였다. 미생물을 배양하지 않은 산화시험 시료(culture period-0)의 일축압축강도는 117.4 MPa이었으며, 미생물 산화시험 이후의 일축압축강도는 배양기간이 지남에 따라 각 단계별로 현저한 강도 저하를 보였다. 미생물 배양기간에 따른 일축압축강도 특징을 보면, 배양기간이 0 ~ 10일 구간에서는 완만한 감소, 10 ~ 20일 구간에서는 급격한 감소, 20 ~ 30일 구간에서는 완만한 감소, 30 ~ 40일 구간에서는 급격한 감소, 그리고 40 ~ 90일 구간에서는 완만한 감소를 타나냈다.

Table 6-8. The results of the measured uniaxial compressive strength (UCS) with culture period on Specimen-U and Specimen-S of pyrrhotite, 0 day: initial value

Culture period (day)	Specimen-U
	UCS(MPa)
0	117.49
10	113.7
20	75.55
30	71.63
40	25.87
50	25.38
60	21.07
70	14.79
80	18.72
90	17.93

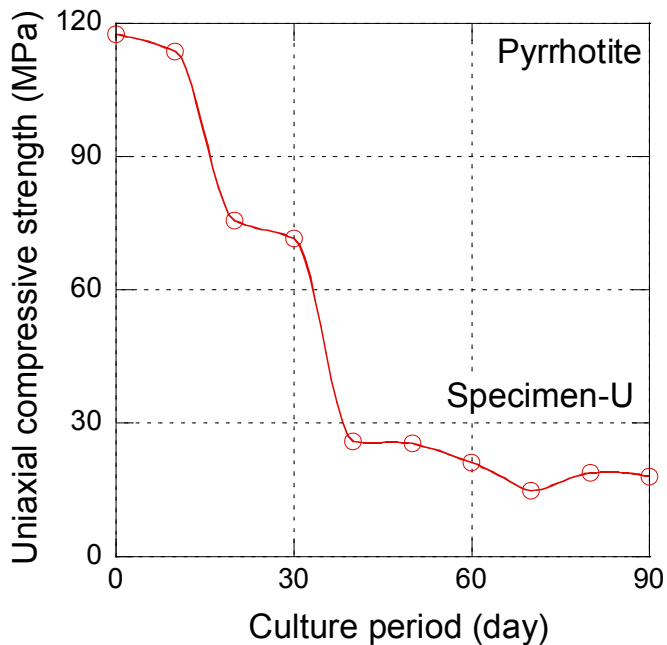


Figure 6-8. Variation of measured uniaxial compressive strength with culture period on Specimen-U of pyrrhotite.

6.2 티탄철석의 물성변화

동원리소스 관인광산 티탄철석 시험편에 대해 미생물을 배양하지 않은 무기적 산화시험과 미생물을 배양한 생물학적 산화시험을 배양기간에 따라 흡수율, 종파속도 및 일축압축강도 등의 물성시험을 실시하였다. 그 이후에 배양기간 동안 발생하는 무기적 및 생물학적 산화시험에 의한 각 단계별 물성변화 양상을 비교하기 위하여 식 (5.1)을 이용하여 정규화 흡수율과 정규화 종파속도를 각각 계산하였다. 각 물성값의 변화를 살펴보면 다음과 같다.

6.2.1 무기적 및 생물학적 산화에 따른 티탄철석의 pH 변화

미생물의 배양 유무와 배양기간에 따른 티탄철석의 pH 변화 결과를 정리하면 Table 6-9와 같다. 그리고 배양기간에 따른 무기적 및 생물학적 산화시험에 의한 pH 변화 관계를 Figure 6-9에 나타내었다. 여기서, 초기 pH는 미생물이 충분히 적응할 수 있도록 배양 실시 24시간 이후를 0일로 시작하여 5일 간격으로 측정하였다. 무기적 산화시험의 경우 측정된 pH는 3.82 ~ 4.26 범위의 분포(Figure 6-9(a))를 보인 반면, 생물학적 산화시험의 경우 측정된 pH는 2.20 ~ 2.57 범위(Figure 6-9(b))를 보였다.

Table 6-9. The results of the measured pH with abiotic oxidation and bio-oxidation tests and culture period on ilmenite

Measurement period (day)	Potential of hydrogen (pH)	
	Abiotic oxidation test	Bio-oxidation test
0	4.26	2.20
5	4.22	2.35
10	4.04	2.33
15	4.00	2.32
20	3.87	2.30
25	3.82	2.43
30	3.83	2.52
35	3.84	2.54
40	3.85	2.56
45	3.87	2.57

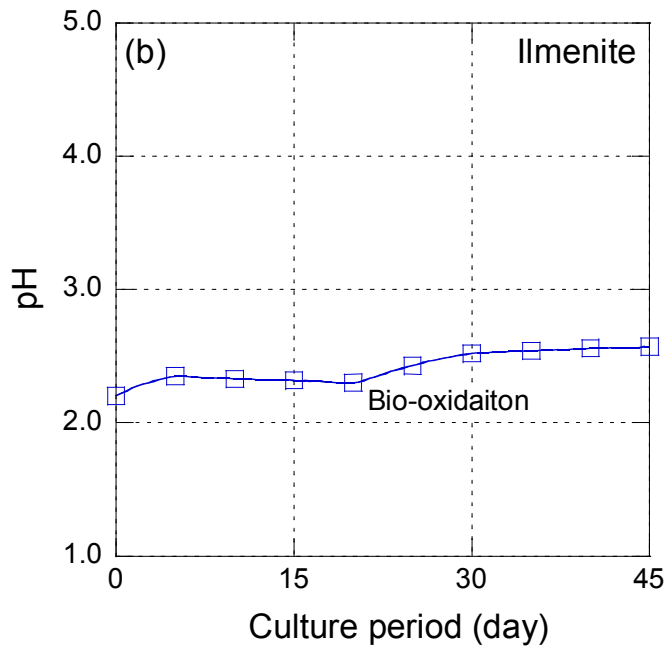
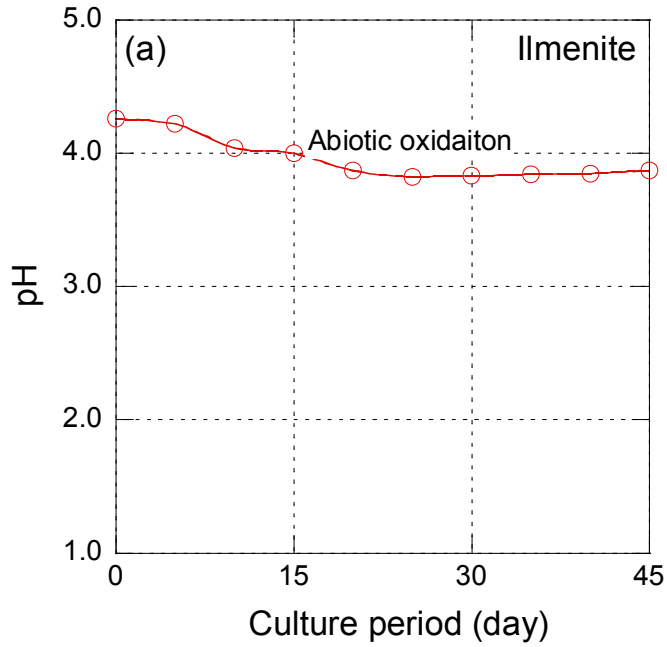


Figure 6-9. Variation of pH with culture period on (a) abiotic oxidation test, and (b) bio-oxidation test of ilmenite.

6.2.2 티탄철석의 흡수율

미생물 산화시험 전 측정된 티탄철석 시험편에 대한 초기 흡수율의 결과로부터 미생물 산화시험 이후 각 단계별로 측정된 흡수율의 결과를 정리하면 Table 6-10과 같다. 그리고 미생물 유무와 배양기간에 따라 측정된 흡수율의 관계를 Figure 6-10에 나타내었다. 무기적 산화시험을 위한 미생물 산화시험 전 시험편의 초기 흡수율은 0.029 ~ 0.085%이며, 미생물 산화시험 이후 각 단계별로 측정된 흡수율은 0.033 ~ 0.090% 사이에 분포를 나타냈다. Figure 6-10(a)에서 알 수 있듯이 무기적 산화시험의 경우는 미생물 산화시험 전후 흡수율 변화 폭이 큰 차이 없이 거의 일정하였다. 반면, 생물학적 산화시험을 위한 미생물 산화시험 전 시험편의 초기 흡수율은 0.033 ~ 0.067%이며, 배양 이후에는 0.045 ~ 0.097%의 범위 내 분포를 보였다. 생물학적 산화시험의 경우 미생물 산화시험 전후 변화 폭을 살펴보면 배양 전 보다 미생물 산화시험 후가 더 큰 흡수율을 보이며, 이들의 차는 무기적 산화시험의 결과보다 훨씬 더 큰 차이를 보였다(Figure 6-10(b)). 이들의 결과를 정규화 식 (5.1)을 이용하여 계산한 후 정규화 흡수율을 정리하면 Table 6-11과 같으며, 배양기간과 흡수율 변화 관계를 Figure 6-11에 나타내었다. 그림에서와 같이 미생물 유무와 관계없이 배양기간이 경과됨 따라 티탄철석의 정규화 흡수율은 초기 평균값(culture period-0)에 비해 전반적으로 높은 값을 보였다. 무기적 산화시험의 경우 흡수율이 0.048 ~ 0.053% 범위에 분포하며, 최종단계(culture period-45)에서는 0.052%(Figure 6-11(a))를 나타냈다. 반면, 생물학적 산화시험의 경우 흡수율이 0.043 ~ 0.073% 범위에 분포하며, 최종단계에서는 0.073%(Figure 6-11(b))로 나타났다.

Table 6-10. The results of the measured absorption before and after abiotic oxidation and bio-oxidation tests with culture period on ilmnenite, M_{dry} : dry weight, M_{sat} : saturation weight, Ab: absorption

Abiotic oxidation test						
Culture period (day)	Before			After		
	M_{dry} (g)	M_{sat} (g)	Ab (%)	M_{dry} (g)	M_{sat} (g)	Ab (%)
0	99.930	99.963	0.033	99.930	99.963	0.033
5	96.672	96.731	0.061	96.665	96.727	0.064
10	106.117	106.158	0.038	106.109	106.154	0.042
15	102.947	103.035	0.085	102.937	103.030	0.090
20	100.383	100.413	0.029	100.363	100.397	0.033
25	98.498	98.532	0.034	98.491	98.527	0.036
30	98.337	98.375	0.038	98.321	98.361	0.040
35	91.111	91.181	0.076	91.098	91.172	0.081
40	98.332	98.363	0.031	98.326	98.361	0.035
45	96.567	96.620	0.054	96.550	96.607	0.059
Avg.	-	-	0.048	-	-	-
Bio-oxidation test						
0	100.574	100.620	0.045	100.574	100.620	0.045
5	97.615	97.659	0.045	97.592	97.650	0.059
10	102.090	102.139	0.047	102.060	102.123	0.061
15	106.206	106.248	0.039	106.165	106.220	0.051
20	104.693	104.728	0.033	104.664	104.725	0.058
25	102.659	102.712	0.051	102.624	102.691	0.065
30	109.946	109.985	0.035	109.910	109.967	0.051
35	100.744	100.778	0.033	100.700	100.760	0.059
40	99.776	99.843	0.067	99.698	99.795	0.097
45	105.064	105.103	0.037	104.978	105.042	0.060
Avg.	-	-	0.043	-	-	-

Table 6-11. The results of normalized absorption on abiotic oxidation and bio-oxidation tests of ilmenite with culture period, 0 day: initial average values

Culture period (day)	Normalized absorption (%)	
	Abiotic oxidation test	Bio-oxidation test
0	0.048	0.043
5	0.050	0.058
10	0.050	0.057
15	0.052	0.055
20	0.052	0.057
25	0.053	0.060
30	0.052	0.067
35	0.052	0.069
40	0.051	0.068
45	0.052	0.073

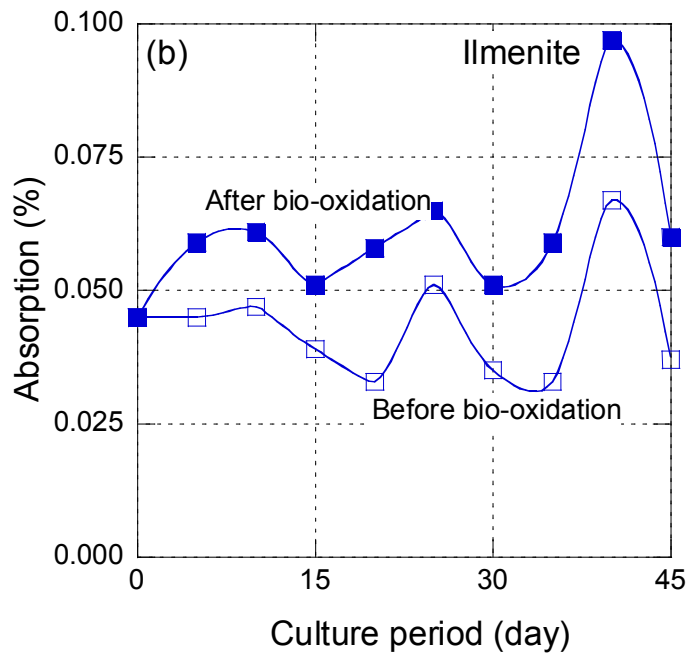
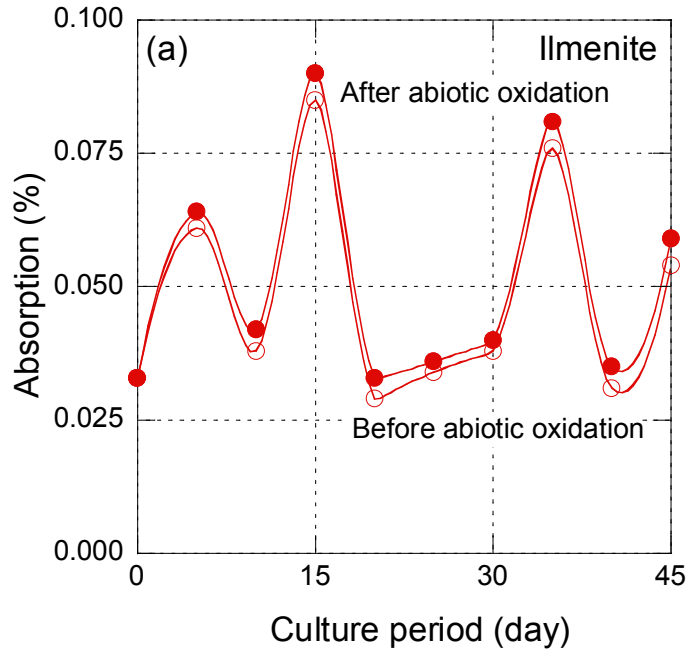


Figure 6-10. Variation of measured absorption before and after (a) abiotic oxidation and (b) bio-oxidation tests with culture period on ilmenite.

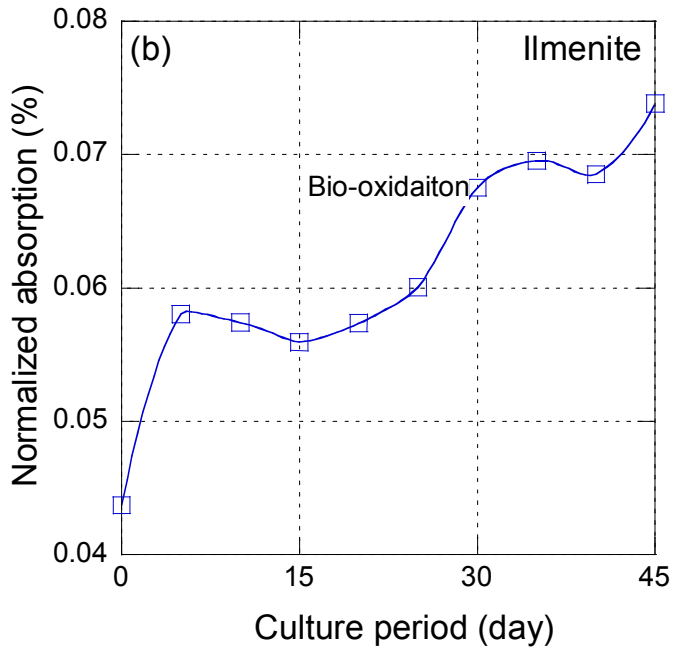
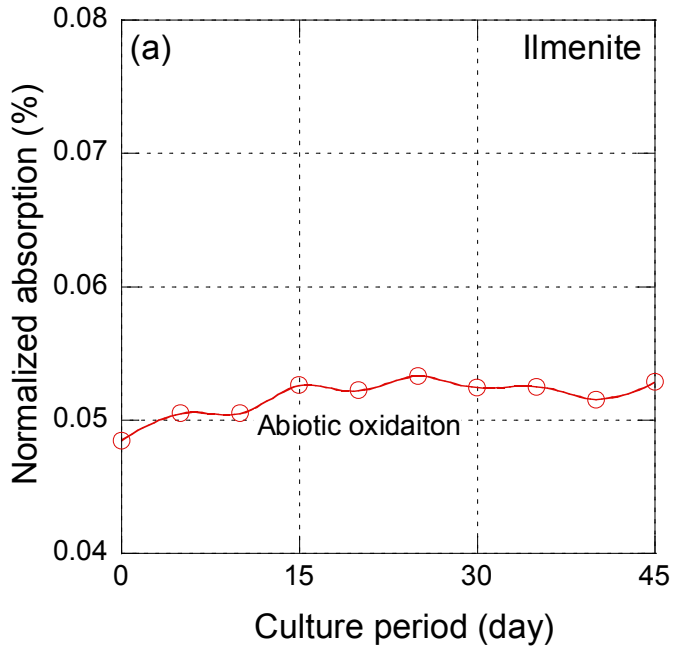


Figure 6-11. Variation of normalized absorption with culture period on (a) abiotic oxidation test, and (b) bio-oxidation test of ilmenite.

6.2.3 티탄철석의 종파속도

미생물 산화시험 전 측정된 티탄철석 시험편에 대한 초기 종파속도의 결과로부터 미생물 산화시험 이후 각 단계별로 측정된 종파속도의 결과를 정리하면 Table 6-12와 같다. 그리고 미생물 유무와 배양기간에 따라 측정된 종파속도의 관계를 Figure 6-12에 나타냈다. 무기적 산화시험을 위한 미생물 산화시험 전 초기 종파속도는 1515.2 ~ 2057.6 m/s의 범위를 보이며, 미생물 산화시험 이후 각 단계별로 측정된 종파속도는 1503.2 ~ 2057.6 m/s 범위의 속도 분포를 나타냈다. Figure 6-12(a)의 미생물 배양기간에 따른 미생물 산화시험 전후와 종파속도 관계에서도 볼 수 있듯이 종파속도 변화 폭은 미생물 배양기간 15일까지 거의 없다가 그 이후부터 매우 미미한 변화 양상을 보임을 알 수 있다. 반면에, 생물학적 산화시험을 위한 미생물 산화시험 전 초기 종파속도는 1524.5 ~ 2040.8 m/s의 범위를 보이며, 미생물 산화시험 이후에는 1013.8 ~ 2032.5 m/s 범위의 속도분포를 나타냈다. 생물학적 산화시험의 경우도 배양기간 15일까지는 그 종파속도 변화 폭이 작다가 그 이후부터는 매우 크게 나타남을 알 수 있다(Figure 6-12(b)). 또한 미생물 산화시험 전후의 종파속도 변화 폭이 무기적 산화시험보다 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이들의 결과를 정규화 식 (5.1)를 이용하여 계산하여 정규화 종파속도를 정리하면 Table 6-13과 같으며, 배양기간에 따른 미생물 유무와 정규화 종파속도의 변화 관계를 Figure 6-13에 도시하였다. 무기적 산화시험의 경우 정규화 종파속도는 1880.4 ~ 1916.9 m/s 분포로 초기 평균값에 비해 미미한 감소를 보이며, 최종단계에서는 1886.4 m/s로 나타났다(Figure 6-13(a)). 생물학적 산화시험의 종파속도 에서는 1410.6 ~ 1921.2 m/s 범위의 분포를 보여 무기적 산화시험의 결과에 비해 상대적으로 큰 감소를 보였으며, 최종단계에서는 1410.6 m/s를 나타냈다(Figure 6-13(b)).

Table 6-12. The results of the measured P-wave velocity (V_p) before and after abiotic oxidation and bio-oxidation tests with culture period on ilmenite

Abiotic oxidation test		
Culture period (day)	Before V_p (m/s)	After V_p (m/s)
0	2057.6	2057.6
5	1515.2	1512.2
10	2040.8	2032.5
15	1850.2	1818.5
20	2032.5	1992.0
25	2040.8	2008.0
30	2040.8	2004.3
35	2040.8	2016.1
40	2016.8	1976.3
45	1533.7	1503.2
Avg.	1916.9	-
Bio-oxidation test		
0	2032.5	2032.5
5	1524.5	1524.4
10	2032.5	1954.1
15	2032.5	1922.5
20	2032.5	1557.6
25	2040.8	1530.2
30	2024.3	1493.6
35	1984.1	1452.3
40	1984.1	1480.9
45	1524.4	1013.8
Avg.	1921.2	-

Table 6-13. The results of normalized P-wave velocity (V_p) before and after abiotic oxidation and bio-oxidation tests with culture period, 0 day: initial average values

Culture period (day)	Normalized V_p (m/s)	
	Abiotic oxidation test	Bio-oxidation test
0	1916.9	1921.2
5	1916.9	1921.1
10	1908.6	1842.8
15	1885.2	1811.2
20	1876.4	1446.3
25	1884.1	1391.0
30	1880.4	1390.5
35	1886.2	1389.4
40	1876.4	1418.0
45	1886.4	1410.6

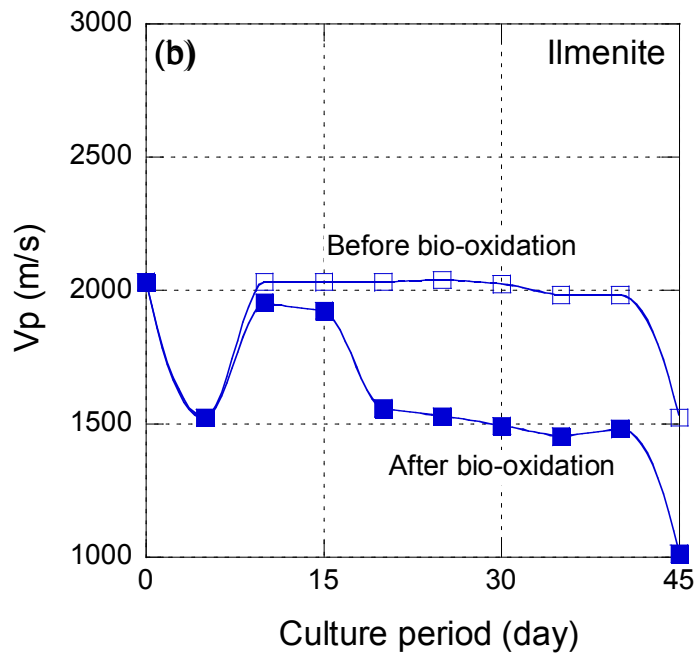
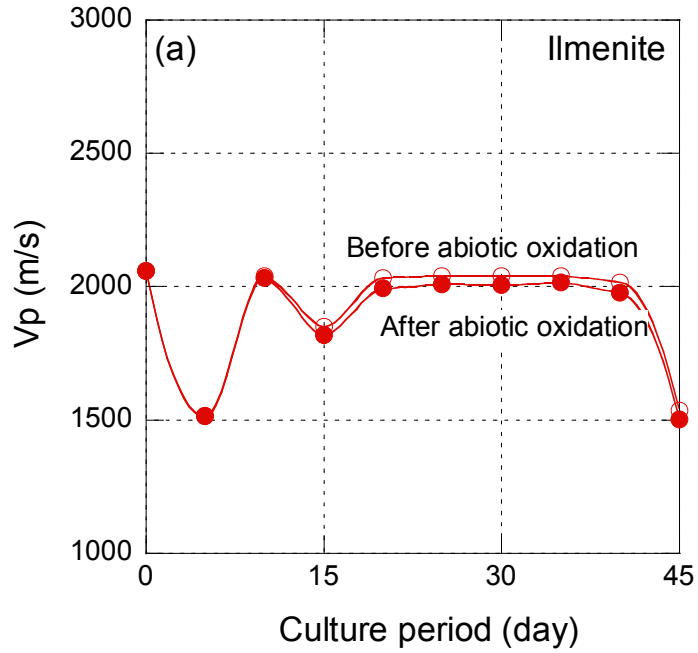


Figure 6-12. Variation of measured V_p before and after (a) abiotic oxidation and (b) bio-oxidation tests with culture period on ilmenite.

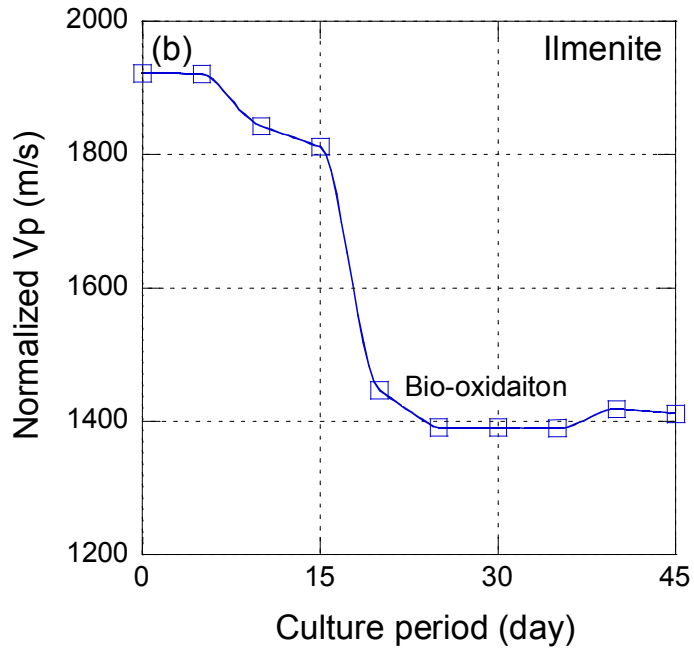
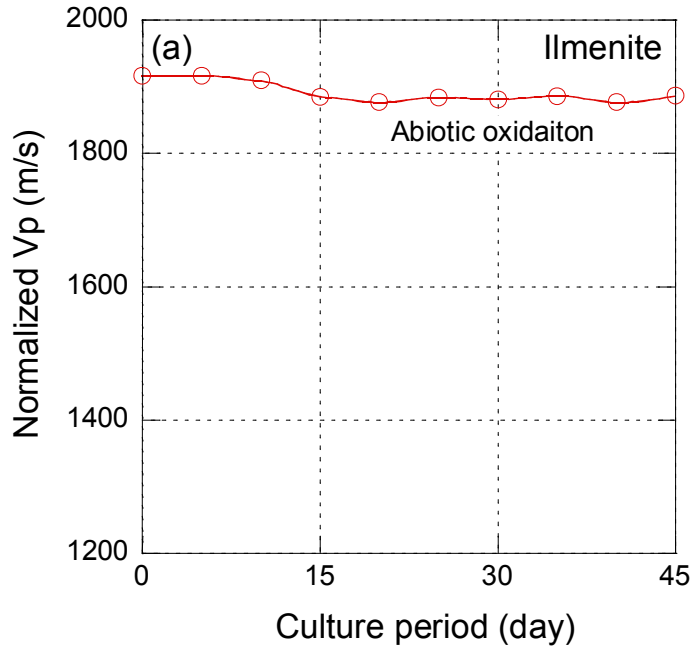


Figure 6-13. Variation of normalized V_p with culture period on (a) abiotic oxidation test, and (b) bio-oxidation test of ilmenite.

6.2.4 티탄철석의 일축압축강도

미생물 배양기간에 따라 미생물 산화시험 전 일축압축강도의 초기 측정값의 결과로부터 미생물 산화시험 이후 각 단계별로 측정된 일축압축강도의 결과를 정리하면 Table 6-14와 같다. 그리고 미생물 유무와 배양기간에 따라 각 단계별로 측정된 일축압축강도의 관계를 Figure 6-14에 나타내었다. 일축압축강도는 두 조건의 산화작용 하에서 초기 측정값에 비해 전반적으로 낮은 값을 보였다. 미생물 배양기간이 10일 전까지는 무기적 및 생물학적 산화작용에 의한 일축압축강도 차이가 거의 나타나지 않았지만, 그 이후부터는 뚜렷한 차이를 보였다. 무기적 산화시험의 경우 전반적으로 각 단계별로 측정된 일축압축강도는 불규칙한 분포를 나타내며, 최종단계에서 241.4 MPa를 보였다(Figure 6-14(a)). 반면, 생물학적 산화시험의 경우 배양기간 5일을 제외한 각 배양기간별로 측정된 일축압축강도는 0일 ~ 15일 구간에서 2번의 급격한 감소 이후 15일 ~ 45일까지 123.6 ~ 170.7 MPa의 범위 내 분포를 보이고, 최종단계에서는 135.0 MPa를 나타냈다(Figure 6-14(b)).

Table 6-14. The results of the measured uniaxial compressive strength (UCS) before and after abiotic oxidation and bio-oxidation tests with culture period of ilmenite, 0 day: initial average values

Culture period (day)	Before	After	
	UCS (MPa)	Abiotic oxidation test	Bio-oxidation test
		UCS (MPa)	UCS (MPa)
0	389.7	432.3	432.3
5	475.0	174.9	180.8
10	-	385.3	265.0
15	-	221.2	162.7
20	-	285.8	156.1
25	-	225.1	130.0
30	-	163.7	170.7
35	-	192.2	123.6
40	-	278.5	148.4
45	-	241.4	135.0
Avg.	432.3	-	-

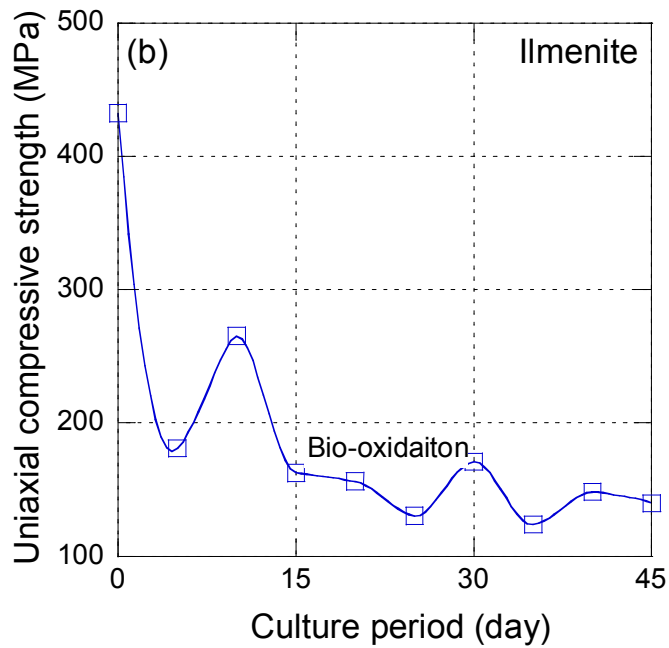
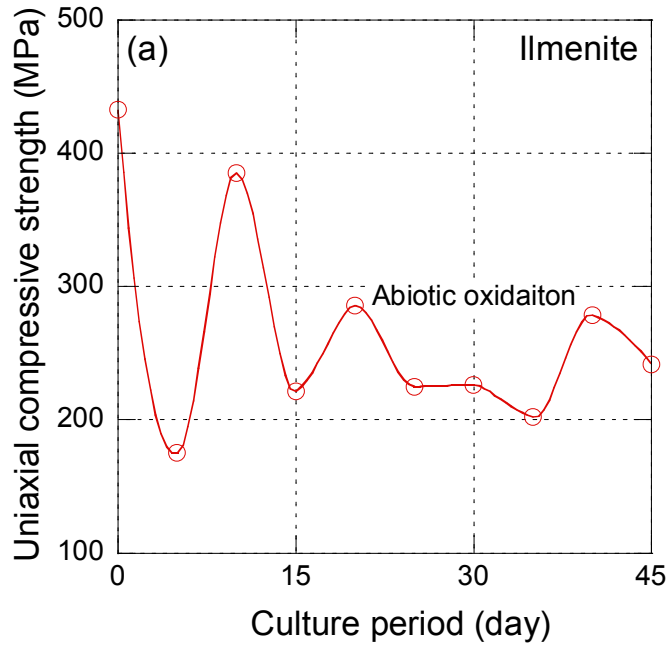


Figure 6-14. Variation of measured uniaxial compressive strength (UCS) with culture period on (a) abiotic oxidation test, and (b) bio-oxidation test of ilmenite.

6.3 자철석의 물성변화

한덕철광 신예미광산 자철석 시험편에 대해 미생물을 배양하지 않은 무기적 산화시험과 미생물을 배양한 생물학적 산화시험을 배양기간에 따라 흡수율, 종파속도 및 일축압축강도 등의 물성시험을 실시하였다. 그 이후에 배양기간 동안 발생하는 무기적 및 생물학적 산화시험에 의한 각 단계별 물성변화 양상을 비교하기 위하여 식 (5.1)을 이용하여 정규화 흡수율과 정규화 종파속도를 각각 계산하였다. 각 물성값의 변화를 살펴보면 다음과 같다.

6.3.1 무기적 및 생물학적 산화에 따른 자철석의 pH 변화

미생물 배양 유무와 배양기간에 따른 자철석의 pH 변화 결과를 Table 6-15에 정리하였다. 그리고 배양기간에 따른 무기적 및 생물학적 산화시험에 의한 pH 변화 관계를 Figure 6-15에 나타내었다. 여기서, 초기 pH는 미생물이 충분히 적응할 수 있도록 배양 실시 24시간 이후를 0일로 시작하여 5일 간격으로 측정하였다. 무기적 산화시험의 경우 측정된 pH는 4.02 ~ 5.16 범위의 분포(Figure 6-15(a))를 보이는 반면, 생물학적 산화시험의 경우 측정된 pH는 1.50 ~ 1.90 범위(Figure 6-15(b))를 보였다.

Table 6-15. The results of the measured pH with abiotic oxidation and bio-oxidation tests and culture period on magnetite

Measurement period (day)	Potential of hydrogen (pH)	
	Abiotic oxidation test	Bio-oxidation test
0	4.02	1.62
5	4.55	1.50
10	4.69	1.50
15	4.94	1.71
20	4.97	1.75
25	5.12	1.85
30	5.02	1.90
35	5.12	1.87
40	5.15	1.85
45	5.16	1.88

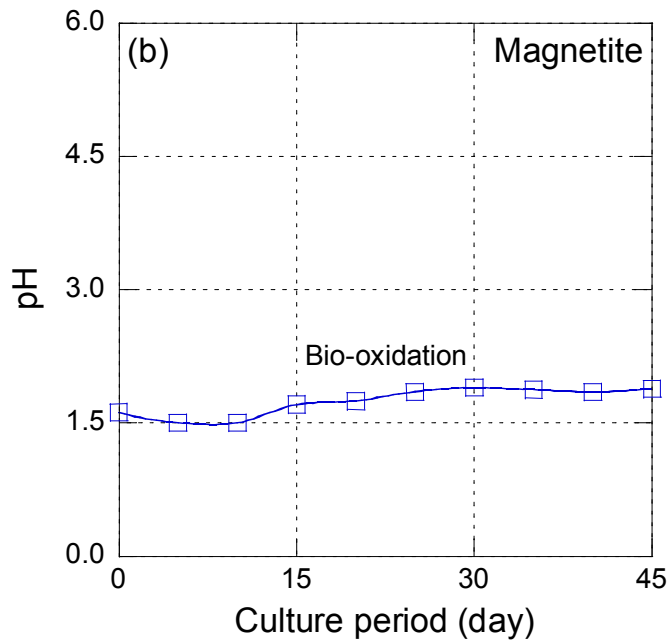
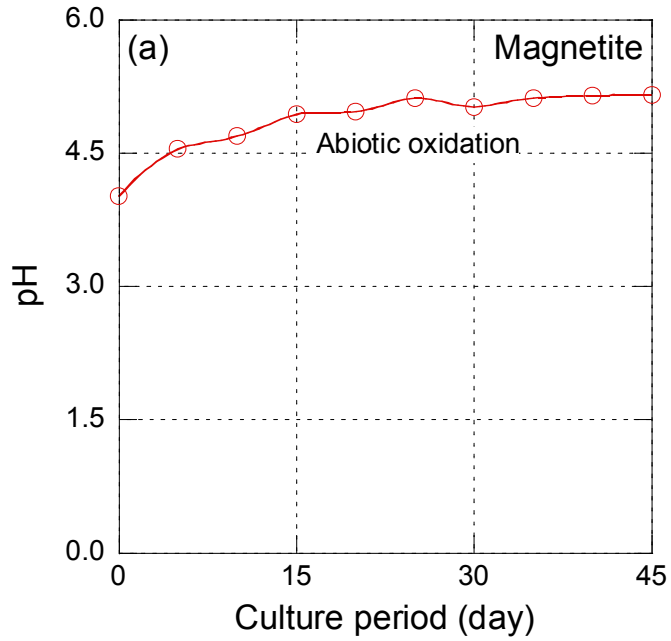


Figure 6-15. Variation of pH with culture period on (a) abiotic oxidation test, and (b) bio-oxidation test of magnetite.

6.3.2 무기적 및 생물학적 산화에 따른 자철석의 Eh 변화

일반적으로 미생물의 개체수에 따른 활동도는 이들 대사에 의한 용존산소 감소량, Fe^{2+} 이온의 함량 측정 및 Eh의 증가 측정 등 다양한 방법들로 나타낸다 (Landesman et al., 1966; MacDonald and Clark, 1970; Giaveno et al., 2007). 미생물 배양 유무와 배양기간에 따른 자철석의 Eh 변화 결과를 Table 6-16에 정리하였다. 그리고 배양기간에 따른 무기적 및 생물학적 산화시험에 의한 Eh 변화 관계를 Figure 6-16에 나타내었다. 무기적 산화 시험에 의한 Eh 값을 살펴보면 174.9 ~ 111.9 mV 범위 내에서 분포를 보이며, 배양기간 동안 지속적으로 감소하는 경향을 보인다. 반면, 생물학적 산화 시험에 의한 Eh는 285.2 ~ 319.3 mV의 분포를 보였으며(Figure 16(a)), 특히 0 ~ 15일까지 뚜렷하게 증가하는 경향이 나타났다(Figure 16(b)). 이와 같은 Eh가 증가하는 원인은 자철석에 포함되어 있는 Fe^{2+} 가 Fe^{3+} 로 산화될 때 1개가 발생하며, 이를 식(2)에서와 같이 Nernst 방정식을 이용하여 전위차를 계산하면 Fe^{3+} 가 증가함에 따라 Eh가 증가하기 때문이다(박천영 외, 2010(b)). 즉, 미생물의 개체 수 증가 따른 활동도가 증가한 결과로 판단된다.

$$Eh(V) = E^o + \frac{0.05916}{1} \log\left(\frac{[Fe^{3+}]}{[Fe^{2+}]}\right) \quad (2)$$

Table 6-16. The results of the measured Eh with abiotic oxidation and bio-oxidation tests and culture period on magnetite

Measurement period (day)	Eh(mV)	
	Abiotic oxidation test	Bio-oxidation test
0	174.9	285.2
5	145.5	314.7
10	138.1	315.9
15	124.1	319.3
20	122.6	307.0
25	114.4	295.1
30	119.6	290.6
35	114.2	294.3
40	112.5	295.2
45	111.9	295.7

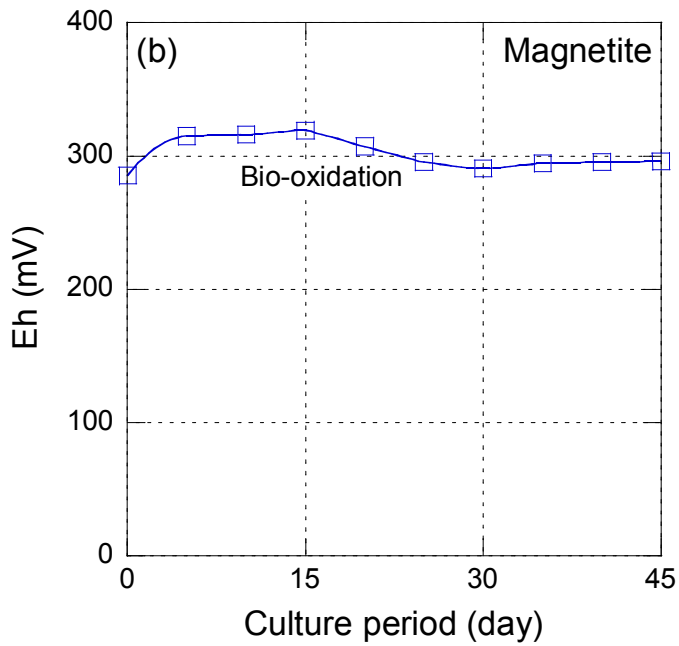
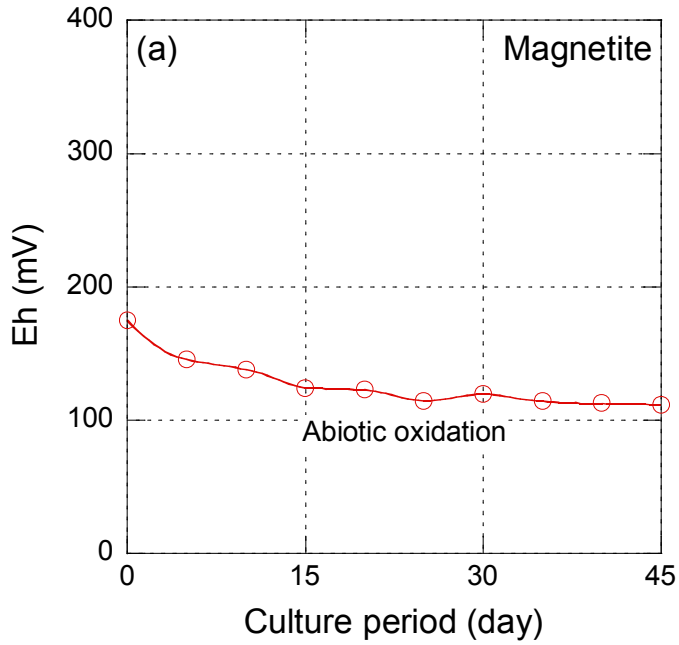


Figure 6-16. Variation of Eh with culture period on (a) abiotic oxidation test, and (b) bio-oxidation test of magnetite.

6.3.3 자철석의 흡수율

미생물 산화시험 전 측정된 자철석 시험편에 대한 초기 흡수율의 결과로부터 미생물 산화시험 이후 각 단계별로 측정된 흡수율의 결과를 정리하면 Table 6-17과 같다. 그리고 미생물 유무와 배양기간에 따라 측정된 흡수율의 관계를 Figure 6-17에 나타내었다. 무기적 산화시험을 위한 미생물 산화시험 전 초기 흡수율은 0.099 ~ 0.125%, 미생물 산화시험 이후 각 단계별로 측정된 흡수율은 0.074 ~ 0.101% 사이에 분포를 나타내며(Figure 6-17(a)), 미생물 산화시험 전후 흡수율 변화 폭이 큰 차이를 보이지 않았다. 반면 생물학적 산화시험을 위한 미생물 산화시험 전 초기 흡수율은 0.124 ~ 0.153%, 미생물 산화시험 이후에는 0.125 ~ 0.367%의 범위 내에서 분포를 보였으며(Figure 6-17(b)), 미생물 산화시험 전후의 변화 폭에 큰 차이를 보였다. 그리고 이들의 결과를 정규화한 식 (5.1)로 계산하여 정리하면 Table 6-18과 같다. 초기 평균값으로부터 미생물 유무와 배양기간에 따라 계산된 각 단계별 흡수율의 변화 관계를 Figure 6-18에 나타내었다. 그림에서와 같이 미생물 유무와 관계없이 배양기간이 경과됨 따라 계산된 각 단계별 자철석 시험편의 흡수율은 초기 평균값(culture period-0)에 비해 전반적으로 높은 값을 보였다. 무기적 산화시험의 경우 0.090 ~ 0.107% 범위의 분포에 최종단계(culture period-45)에서는 0.107%(Figure 6-18(a))로 나타났다. 반면, 생물학적 산화시험의 경우 0.125 ~ 0.367% 범위로 최종단계에서는 0.318%(Figure 6-18(b))로 나타났다.

Table 6-17. The results of the measured absorption before and after abiotic oxidation and bio-oxidation tests with culture period on magnetite, M_{dry} : dry weight, M_{sat} : saturation weight, Ab: absorption

Abiotic oxidation test		
Culture period (day)	Before	After
	Ab (%)	Ab (%)
0	0.099	0.099
5	0.103	0.090
10	0.099	0.090
15	0.099	0.101
20	0.108	0.087
25	0.116	0.081
30	0.125	0.074
35	0.122	0.077
40	0.099	0.084
45	0.118	0.099
Avg.	0.099	
Bio-oxidation test		
0	0.125	0.125
5	0.124	0.132
10	0.135	0.270
15	0.152	0.287
20	0.141	0.279
25	0.149	0.281
30	0.125	0.317
35	0.153	0.342
40	0.141	0.367
45	0.134	0.285
Avg.	0.138	

Table 6-18. The results of normalized absorption on abiotic oxidation and bio-oxidation tests of magnetite with culture period, 0 day: initial average values

Culture period (day)	Normalized absorption (%)	
	Abiotic oxidation test	Bio-oxidation test
0	0.099	0.125
5	0.090	0.132
10	0.090	0.270
15	0.101	0.287
20	0.087	0.279
25	0.081	0.281
30	0.074	0.317
35	0.077	0.342
40	0.084	0.367
45	0.107	0.318

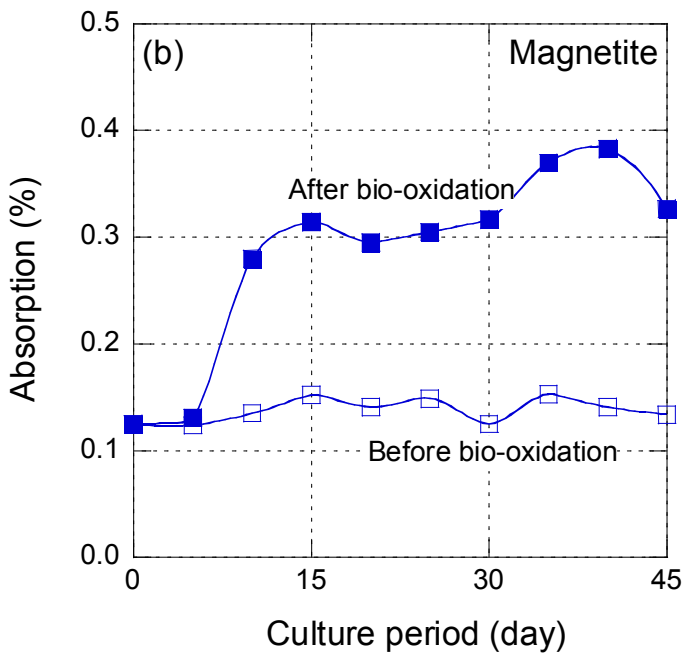
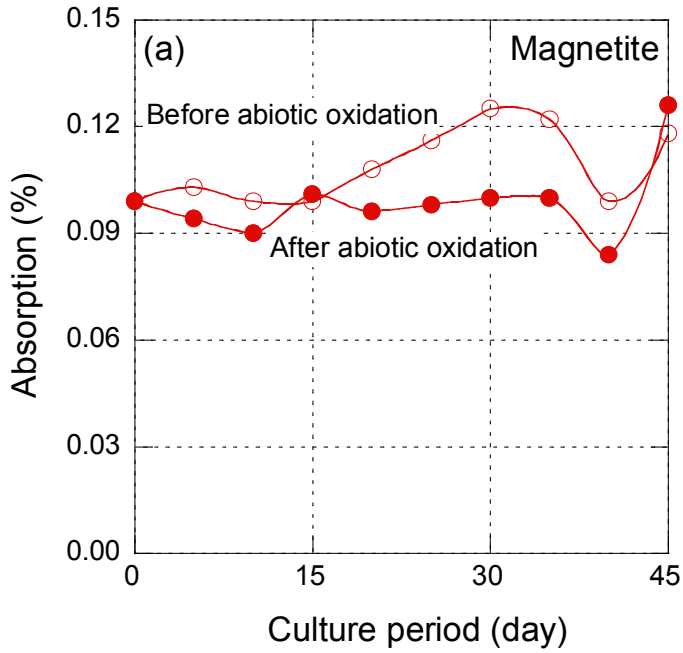


Figure 6-17. Variation of measured absorption before and after (a) abiotic oxidation test and (b) bio-oxidation test with culture period on magnetite.

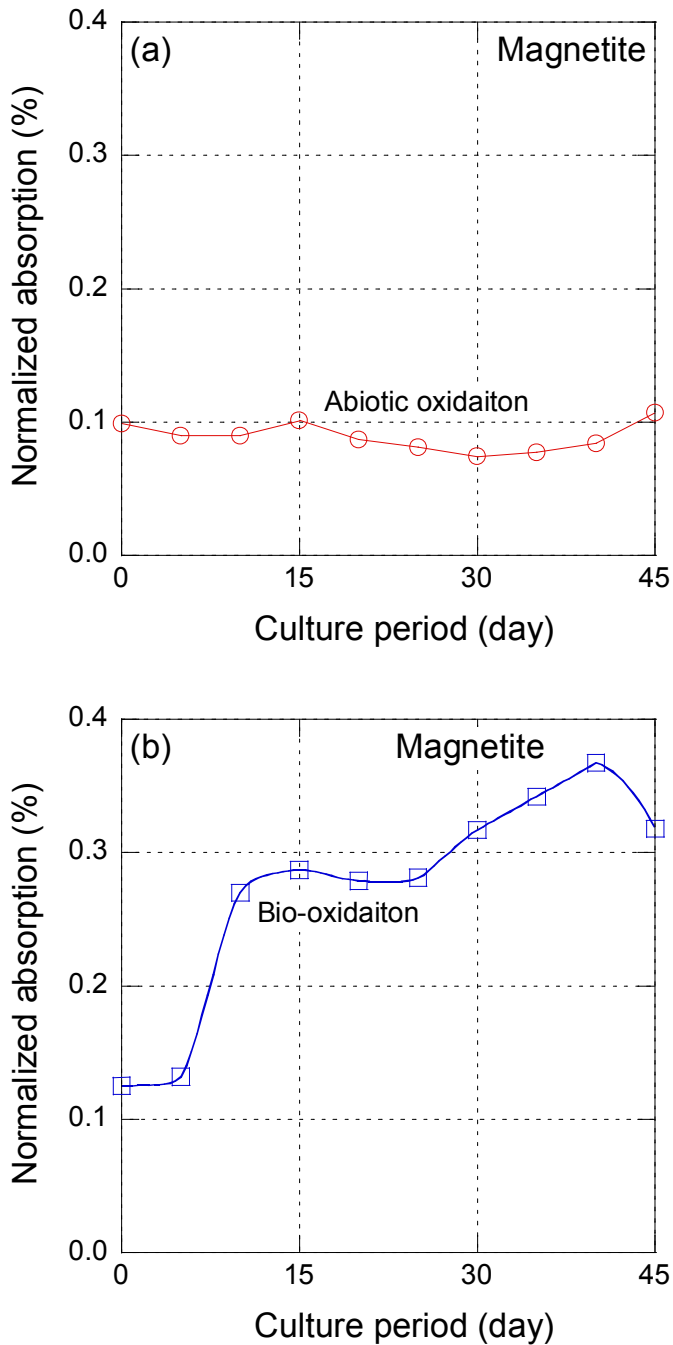


Figure 6-18. Variation of normalized absorption with culture period on (a) abiotic oxidation test, and (b) bio-oxidation test of magnetite.

6.3.4 자철석의 종파속도

미생물 산화시험 전 측정된 자철석 시험편에 대한 초기 종파속도의 결과로부터 미생물 산화시험 이후 각 단계별로 측정된 종파속도의 결과를 정리하면 Table 6-19과 같다. 그리고 미생물 유무와 배양기간에 따라 측정된 종파속도의 관계를 Figure 6-19에 나타냈다. 무기적 산화시험을 위한 미생물 산화시험 전 초기 종파속도는 1453.5 ~ 1492.5 m/s의 범위를 보이며, 미생물 산화시험 이후 각 단계별로 측정된 종파속도는 1344.1 ~ 1479.5 m/s 범위의 속도 분포를 나타냈다. Figure 6-19(a)의 미생물 배양기간에 따른 종파속도 관계에서도 알 수 있듯이 무기적 산화시험의 경우 종파속도 변화 폭은 미생물 배양기간 15일까지 거의 없다가 그 이후부터 매우 미미한 변화 양상을 보임을 알 수 있다. 반면에, 생물학적 산화시험을 위한 미생물 산화시험 전 초기 종파속도는 1428.6 ~ 1497.0 m/s의 범위를 보이며, 미생물 산화시험 이후에는 1210.3 ~ 1459.6 m/s 범위의 속도분포를 나타냈다. 생물학적 산화시험의 경우도 미생물 배양기간 10일까지는 종파속도 변화 폭이 작다가 그 이후부터는 매우 크게 나타남을 알 수 있다(Figure 6-19(b)). 또한 미생물 산화시험 전후의 종파속도 변화 폭이 무기적 산화시험보다 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이들의 결과를 정규화 식 (5.1)를 이용하여 계산하여 정규화 종파속도를 정리하면 Table 6-20와 같으며, 배양기간에 따른 미생물 유무와 정규화 종파속도의 변화 관계를 Figure 6-20에 도시하였다. 무기적 산화시험의 경우 정규화 종파속도는 1361.1 ~ 1479.5 m/s 분포로 초기 평균값에 비해 미미한 감소를 보이며, 최종단계에서는 1361.1 m/s로 나타났다(Figure 6-20(a)). 생물학적 산화시험의 종파속도 에서는 1230.3 ~ 1459.6 m/s 범위의 분포를 보여 무기적 산화시험의 결과에 비해 상대적으로 큰 감소를 보였으며, 최종단계에서는 1230.3 m/s를 나타냈다(Figure 6-20(b)).

Table 6-19. The results of the measured P-wave velocity (V_p) on abiotic oxidation and bio-oxidation tests of magnetite with culture period, 0 day: initial average values

Abiotic oxidation test		
Culture period (day)	Before	After
	V_p (m/s)	V_p (m/s)
0	1479.5	1479.5
5	1479.3	1466.3
10	1474.9	1457.7
15	1453.5	1440.9
20	1506.0	1474.9
25	1479.3	1453.7
30	1462.0	1423.5
35	1492.5	1440.9
40	1483.7	1433.3
45	1462.5	1344.1
Avg.	1477.3	1441.5
Bio-oxidation test		
0	1459.6	1459.6
5	1462	1436.8
10	1470.6	1381.2
15	1400.6	1210.3
20	1436.8	1282.1
25	1483.7	1305.5
30	1497.0	1319.3
35	1445.1	1262.6
40	1428.6	1231.5
45	1479.3	1250.0
Avg.	1456.3	1313.9

Table 6-20. The results of normalized P-wave velocity (V_p) on abiotic oxidation and bio-oxidation tests of magnetite with culture period, 0 day: initial average values

Culture period (day)	Normalized V_p (m/s)	
	Abiotic oxidation test	Bio-oxidation test
0	1479.5	1459.6
5	1466.5	1434.4
10	1462.3	1370.2
15	1466.9	1269.3
20	1448.4	1304.9
25	1453.9	1281.4
30	1441.0	1281.9
35	1427.9	1277.1
40	1429.1	1262.5
45	1361.1	1230.3

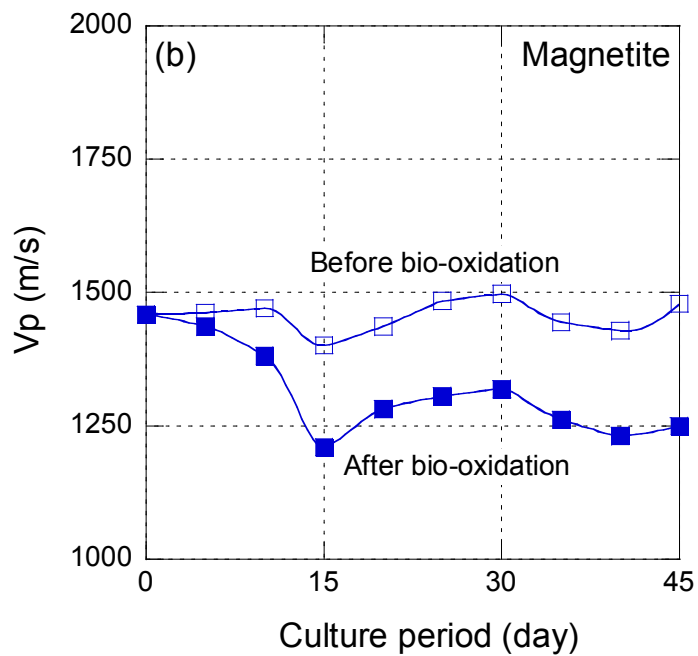
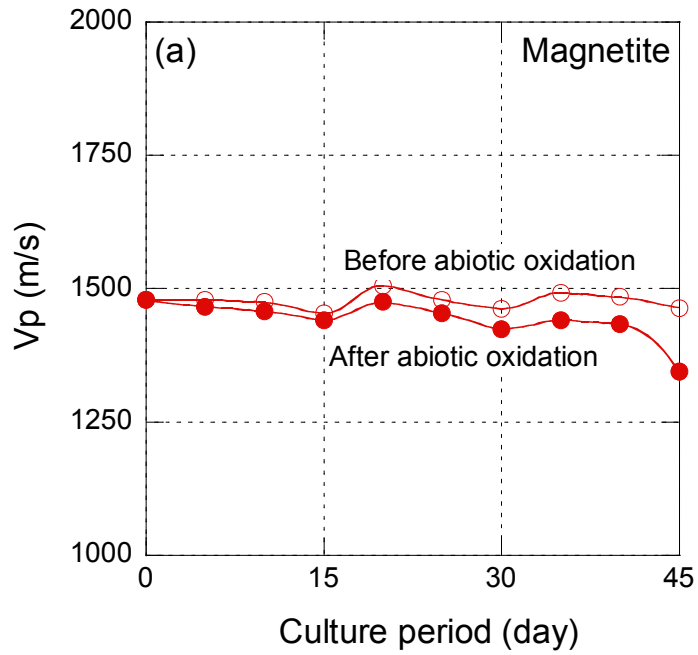


Figure 6-19. Variation of measured V_p before and after (a) abiotic oxidation test and (b) bio-oxidation tests with culture period on magnetite.

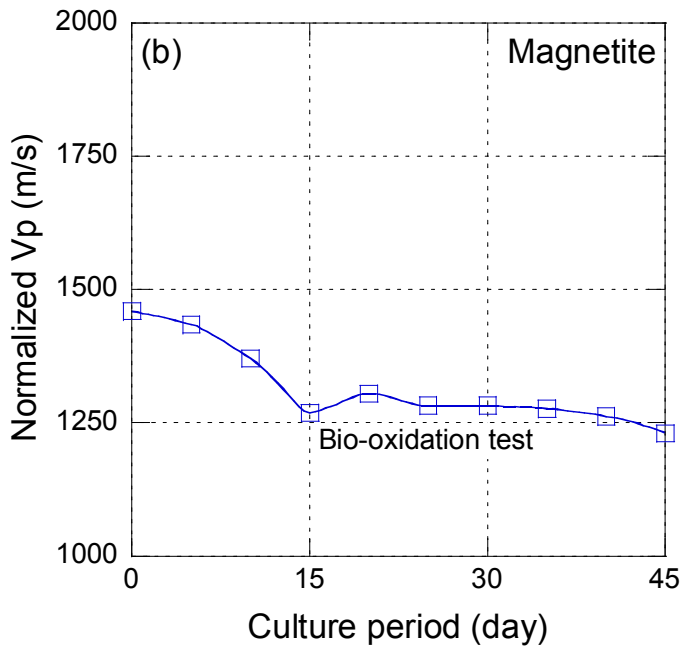
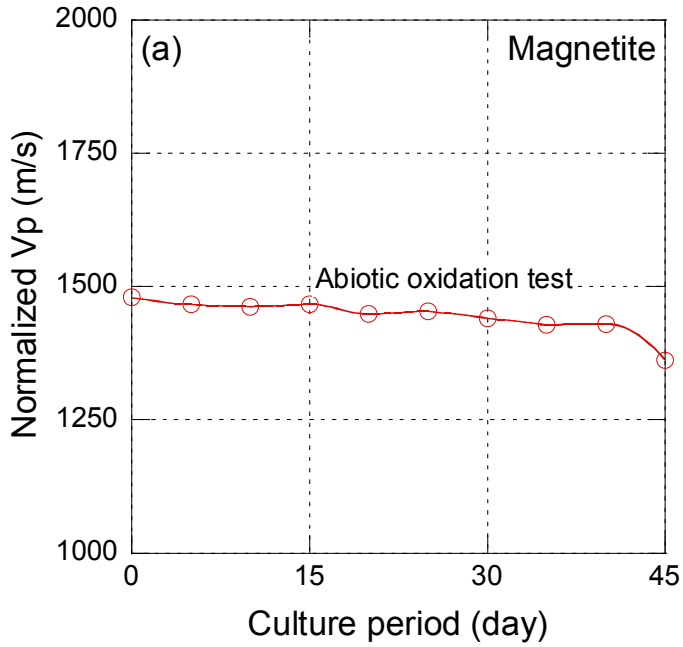


Figure 6-20. Variation of normalized V_p with culture period on (a) abiotic oxidation test, and (b) bio-oxidation test of magnetite.

6.3.5 자철석의 일축압축강도

미생물 배양 전 일축압축강도의 초기 측정값의 결과로부터 배양 이후 각 단계별로 측정된 일축압축강도의 결과를 정리하면 Table 6-21과 같다. 그리고 미생물 유무와 배양기간에 따라 각 단계별로 측정된 일축압축강도의 관계를 Figure 6-21에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 일축압축강도는 두 조건의 산화작용 하에서 초기 측정값(culture period-0)에 비해 전반적으로 낮은 측정값을 보였다. 특히 배양기간 10일 이후부터는 뚜렷한 차이를 나타냈다. 무기적 산화시험의 경우 전반적으로 각 단계별로 측정된 일축압축강도는 불규칙한 분포를 나타내며, 최종단계에서 168.8 MPa를 보였다(Figure 6-21(a)). 반면, 생물학적 산화시험의 경우 배양기간별로 측정된 일축압축강도는 0 ~ 10일 구간에서 급격한 감소 이후 10 ~ 45일까지 76.0 MPa ~ 117.5 MPa의 범위 내 분포를 보이고, 최종단계에서는 94.0 MPa를 나타냈다(Figure 6-21(b)).

Table 6-21. The results of the measured uniaxial compressive strength (UCS) before and after abiotic oxidation and bio-oxidation tests with culture period of magnetite, 0 day: initial average values

Culture period (day)	Before	After	
	UCS (MPa)	Abiotic oxidation test	Biooxidation test
		UCS (MPa)	UCS (MPa)
0	248.1	168.3	168.3
5	130.3	167.5	157.9
10	229.4	158.8	117.5
15	158.2	147.0	115.3
20	133.0	159.2	102.1
25	124.6	173.9	94.4
30	154.4	157.9	96.2
35	-	155.9	76.0
40	-	144.7	76.4
45	-	168.8	94.0
Avg.	168.3	-	-

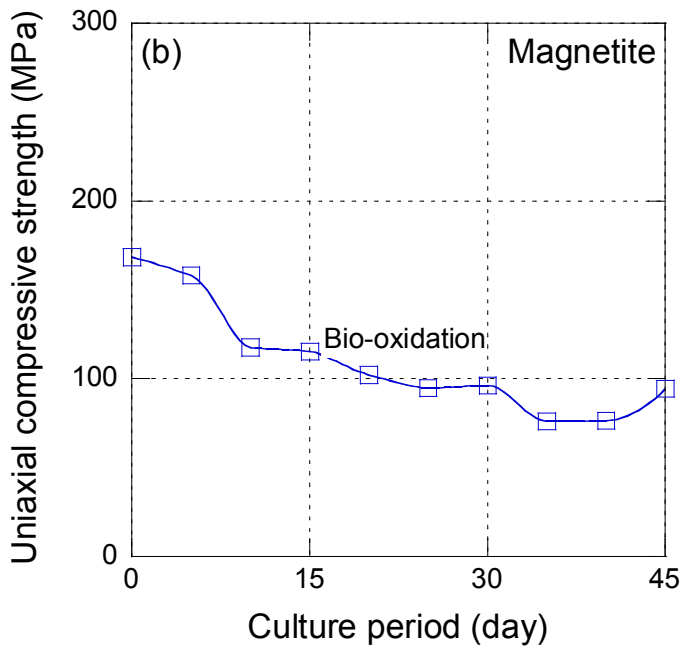
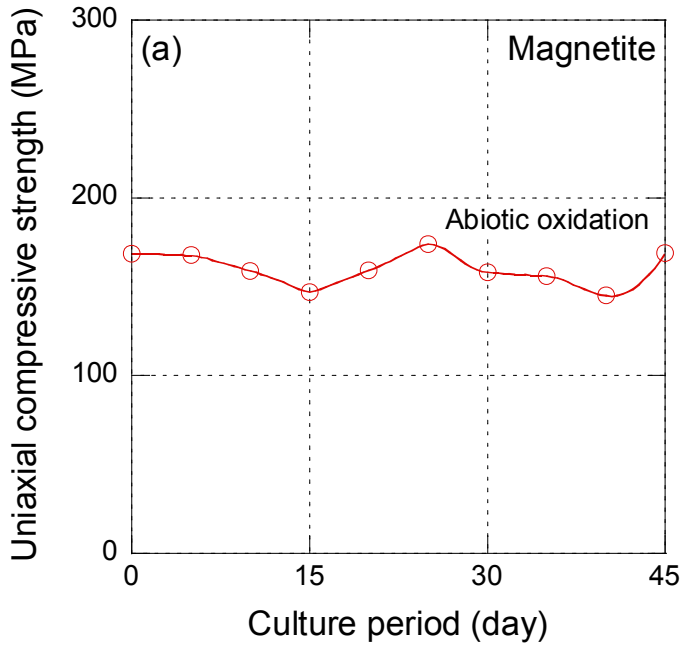


Figure 6-21. Variation of measured uniaxial compressive strength (UCS) with culture period on (a) abiotic oxidation test, and (b) bio-oxidation test of magnetite.

7. 함철광석의 물성변화에 대한 종합적 고찰

함철광석인 자류철석, 티탄철석, 그리고 자철석의 물성 변화가 미생물 배양기간에 따라 어떤 특성을 보이는가를 살펴보기 위하여 각 시험편에 다양한 물성 실험을 실시하였다. 그 실험 결과를 바탕으로 철을 함유한 암석에 미생물이 미치는 생물학적 특성을 역학적인 측면에서 정량적으로 비교분석하였다. 이들 함철광석의 물성변화를 값의 변화를 살펴보면 다음과 같다.

7.1 자류철석의 물성변화 고찰

미생물 배양기간에 따른 자류철석의 pH에 대한 전체 측정결과를 비교하면 Figure 7-1(a)와 같다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 두 배지 모두 pH 변화량의 차이는 존재하지만, 배양기간에 따른 pH 변화 양상은 거의 일치하였다. 미생물 배양기간에 따른 자류철석의 정규화된 흡수율에 대한 전체 결과를 살펴보면 Figure 7-1(b)와 같다. 두 배지 모두 0일 ~ 40일 구간까지는 흡수율이 증가하다가 그 이후부터는 거의 일정한 상태를 유지하였다. 이것은 미생물의 개체수가 40일 전까지 급격하게 증가하면서 미생물이 자류철석의 흡수율에 영향을 미친 반면, 40일 이후에는 이들의 개체수가 더 이상 증가하지 않아 미생물의 영향이 크게 감소되었기 때문인 것으로 판단된다.

미생물의 배양기간에 따른 자류철석의 정규화된 종파속도 측정 결과를 나타내면 Figure 7-1(c)와 같다. 두 배지 모두에서 미생물 산화시험 전 변화 폭은 큰 차이를 보이지 않았지만, 미생물 산화시험 이후에는 배양기간에 증가함에 따라 종파속도가 감소하는 경향을 보였다. 마지막으로 자류철석의 Specimen-S에 대한 일축 압축강도를 살펴보면 Figure 7-1(d)와 같다. 미생물 배양기간이 40일 전까지는 미생물 개체수가 급격히 증가하여 2번의 큰 변화를 보이지만, 그 이후에는 이들의 개체수가 더 이상 증가하지 않고 거의 일정하게 유지되었다. 그리고 Specimen-S에 대한 일축압축강도 변화는 Specimen-S의 정규화된 종파속도 변화 양상과 거의 일치함을 보였다.

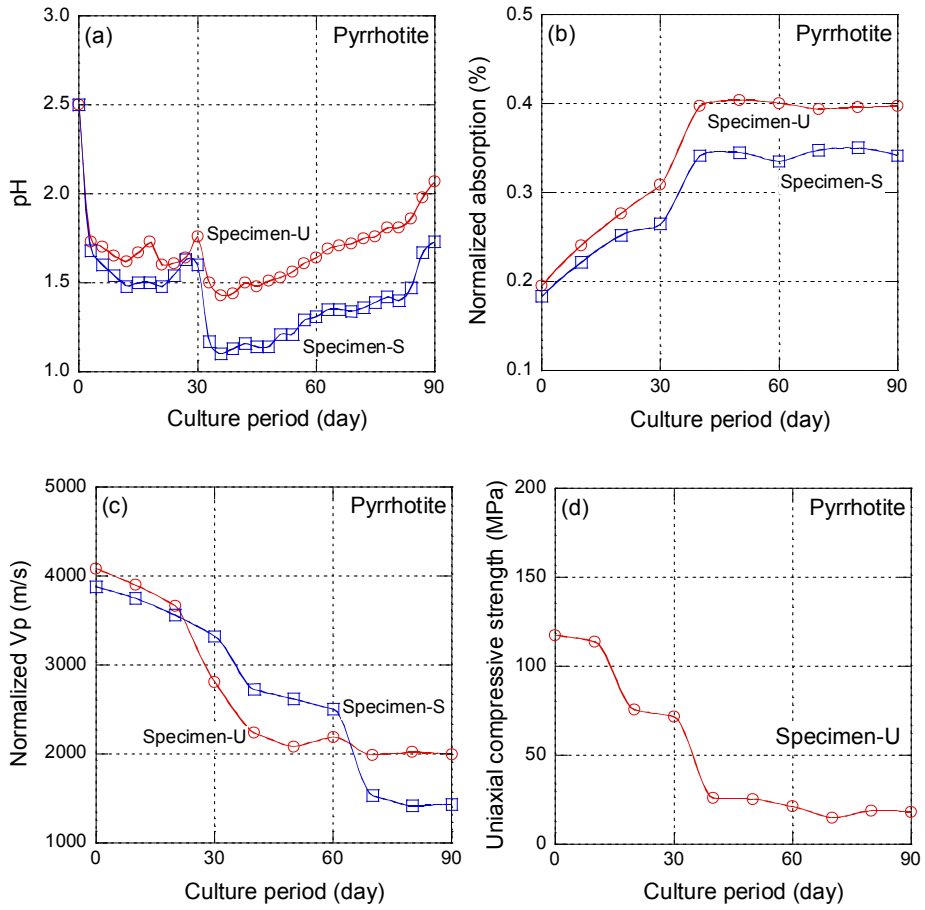


Figure 7-1. Variation of (a) pH, (b) absorption, (c) velocity, and (d) uniaxial compressive strength with culture period on pyrrhotite.

7.2 티탄철석의 물성변화 고찰

무기적 및 생물학적 산화시험과 배양기간에 따른 티탄철석의 pH에 대한 전체 측정 결과를 살펴보면 Figure 7-2(a)와 같다. 미생물 배양기간에 따른 무기적 및 생물학적 산화시험의 변화 폭은 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 즉, 생물학적 산화 시험에 의한 pH 값들이 무기적 산화시험에 의한 pH 값들 보다 작은 값의 범위에 분포되어 나타났다. 이것은 Fe^{3+} 이온의 증가로 인한 무기적 산화작용과 미생물에 의한 생물학적 산화작용이 복합적으로 작용하여 티탄철석의 산화를 촉진시킨 것에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 미생물 산화시험 전 측정된 초기 흡수율로부터 미생물 산화시험 이후 각 단계별로 측정된 흡수율의 증가량은 전반적으로 미미하였다. 무기적 및 생물학적 산화시험과 미생물 배양기간에 따른 티탄철석의 정규화된 흡수율에 대한 전체 결과를 살펴보면 Figure 7-2(b)와 같다. 일반적으로 흡수율은 경암의 경우 10% 이하이며, 더군다나 신선하고 치밀한 암석에서는 1%도 되지 않은 경우가 많다. 또한 흡수율은 암석의 강도가 비교적 약한 연암에서 그 경향이 비교적 잘 나타나는 반면, 경암에서는 큰 변화를 보이지는 않는다(김성환 외, 1997). 이러한 점을 고려해 볼 때, 티탄철석은 무기적 및 생물학적 산화작용에 의한 영향을 크게 받지 않음을 의미한다. 그럼에도 불구하고 0 ~ 45일까지 이들의 변화폭은 큰 차이를 나타내며 무기적 산화시험에 비해 생물학적 산화시험에 의한 흡수율이 더 큰 증가를 보였다. 결과적으로, 티탄철석의 경우 미생물에 의한 생물학적 산화작용이 무기적 산화작용보다 더 큰 영향을 미쳤음을 지시한다.

무기적 및 생물학적 산화시험과 미생물의 배양기간에 따른 티탄철석의 정규화된 종파속도 측정 결과를 나타내면 Figure 7-2(c)와 같다. 티탄철석에 있어 무기적 산화에 비해 생물학적 산화시험에 의한 종파속도가 상대적으로 큰 감소를 보여, 미생물에 의한 생물학적 산화작용이 무기적 산화작용보다 종파속도에 더 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 이와 같은 원인은 아직 정확하게 밝힐 순 없지만, 미생물 산화작용 메커니즘에서도 언급했듯이 자연 상태에서 발달한 기존의 균열 및 미세한 공극과 같은 결함이 미생물의 직접접촉산화작용에 의해 확장됨으로써 나타나는 것으로 사료된다. 마지막으로 무기적 및 생물학적 산화시험과 미생물 배양기간에 따른 일축압축강도의 결과를 살펴보면 Figure 7-2(d)와 같다. 무기적 및 생물학적 산화작용 두 조건 모두에서 뚜렷한 일축압축강도 감소 양상을 보였지만, 일축압축

강도 영향에 무기적 산화작용보다는 생물학적 산화작용이 더 크게 작용했음을 알 수 있다.

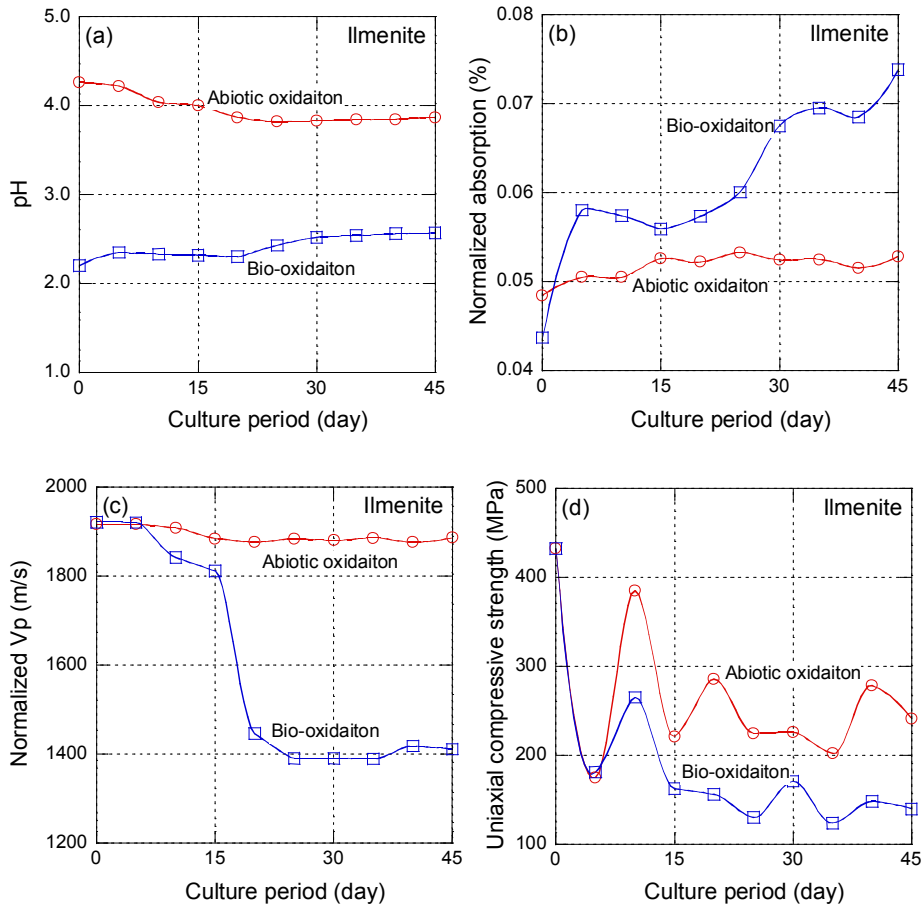


Figure 7-2. Variation of (a) pH, (b) absorption, (c) velocity, and (d) uniaxial compressive strength with culture period on ilmenite.

7.3 자철석의 물성변화 고찰

무기적 및 생물학적 산화시험과 배양기간에 따른 자철석의 pH에 대한 전체 측정 결과를 살펴보면 Figure 7-3(a)와 같다. 무기적 및 생물학적 산화시험 변화 폭은 큰 차이를 보이며 생물학적 산화시험에 의한 pH 값들이 무기적 산화시험에 의한 pH 값들 보다 상대적으로 낮은 범위에 분포되어 있음을 알 수 있다. 또한 자철석의 pH 결과는 티탄철석의 변화 양상과 거의 비슷하지만, 그 변화 폭은 자철석이 티탄철석보다 더 크게 나타났으며, 두 조건 모두 자철석의 산화작용이 티탄철석보다 더 활발하게 작용했음을 의미한다. 무기적 및 생물학적 산화시험과 미생물 배양기간에 따른 자철석의 정규화된 흡수율에 대한 전체 결과를 살펴보면 Figure 7-3(b)와 같다. 자철석의 흡수율에 있어서 미생물 산화시험 전 측정된 초기 흡수율로부터 미생물 산화시험 이후 각 단계별로 측정된 흡수율의 증가량은 전반적으로 미미하였다. 이는 자철석이 무기적 및 생물학적 산화작용에 의한 영향을 크게 받지 않음을 의미한다. 또한 자철석의 정규화된 흡수율 변화 양상은 티탄철석의 결과와 매우 잘 일치한다. 결과적으로, 자철석의 경우도 미생물에 의한 생물학적 산화작용이 무기적 산화작용보다 더 큰 영향을 미쳤음을 알 수 있다.

무기적 및 생물학적 산화시험과 미생물의 배양기간에 따른 자철석의 정규화된 종파속도 측정 결과를 나타내면 Figure 7-3(c)와 같다. 자철석에 있어 무기적 산화에 비해 생물학적 산화시험에 의한 종파속도가 상대적으로 큰 감소를 보여, 미생물에 의한 생물학적 산화작용이 무기적 산화작용보다 종파속도에 더 큰 영향을 미쳤음을 알 수 있으며, 이러한 결과는 티탄철석의 결과와 잘 일치한다. 마지막으로 무기적 및 생물학적 산화시험과 미생물 배양기간에 따른 일축압축강도의 결과를 살펴보면 Figure 7-3(d)와 같다. 초기 평균값을 기준으로 하여 비교해 보면, 두 조건 모두에서 뚜렷한 강도 감소를 보이지만, 무기적 산화에 비해 생물학적 산화의 변화가 더 크게 나타났다. 이러한 사실은 일축압축강도 영향에 생물학적 산화작용이 무기적 산화작용보다 더 크게 작용했음을 지시한다.

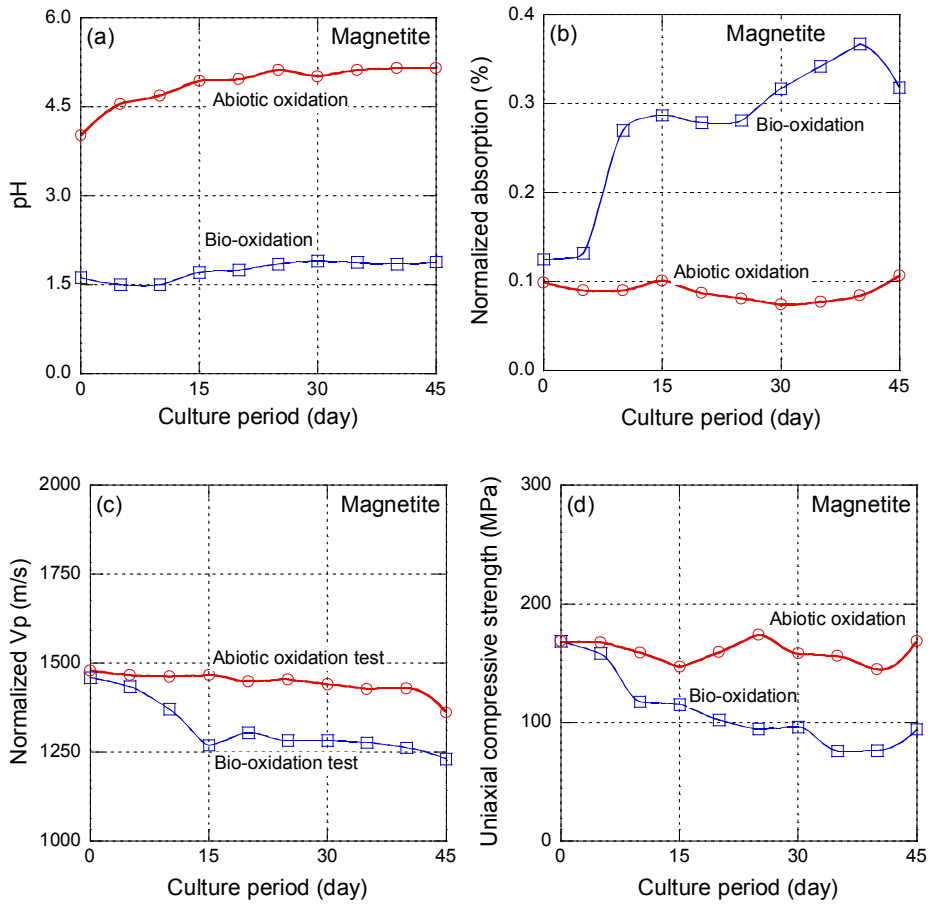


Figure 7-3. Variation of (a) pH, (b) absorption, (c) velocity, and (d) uniaxial compressive strength with culture period on magnetite.

8. 결론

본 연구는 제2연화광산의 자류철석, 동원리소스 관인광산의 티탄철석, 그리고 한덕철광 신예미광산의 자철석을 대상으로 미생물에 의한 이들 함철광석의 물성 변화 특성을 살펴보기 위한 것으로서 최적의 성장조건에서 배양한 미생물이 자류철석의 물성 변화에 미치는 영향을 분석하고 다른 함철광석에 적용 가능성을 평가하였다. 그 결과를 바탕으로 티탄철석과 자철석의 배양기간에 따른 무기적 및 생물학적 산화작용에 대한 실내실험을 수행하여 이들의 관계를 정량적으로 비교분석하였다.

시험에 이용된 함철광석들의 초기 물성값은 자류철석의 경우 초기 흡수율 범위는 0.125 ~ 0.238%, 평균은 0.19%이며, 종파속도는 3676.5 ~ 4386.0 m/s, 평균은 약 3980 m/s로 나타났다. 티탄철석의 경우 초기 흡수율 범위는 0.029 ~ 0.085%, 평균은 0.05 이며, 종파속도는 1515.2 ~ 2057.6 m/s, 평균은 약 1919 m/s를 보였다. 그리고 자철석의 초기 흡수율 범위는 0.099 ~ 0.153%, 평균은 0.12%이며, 종파속도는 1400.0 ~ 1506.0 m/s, 평균은 약 1466 m/s였다. 하지만, 흡수율에 있어서 자류철석의 물성값의 편차가 큰 반면 티탄철석과 자철석은 거의 비슷한 편차를 보였으며, 종파속도에 있어서는 자류철석과 티탄철석은 큰 편차를 보였으며, 자철석은 상대적으로 작았다.

자류철석의 pH는 Specimen-U에서 1.43 ~ 2.07, Specimen-S에서 1.10 ~ 1.73 이다. 흡수율은 Specimen-U의 경우 미생물 산화시험 전 초기에는 0.157 ~ 0.238%, 미생물 산화시험 이후에 측정된 값은 0.202 ~ 0.417%이며, Specimen-S의 경우 미생물 산화시험 전 시험의 초기 흡수율은 0.125 ~ 0.228%, 미생물 산화시험 이후에는 0.182 ~ 0.375%이다. 종파속도는 Specimen-U의 경우 미생물 산화시험 전 초기에서 3816.8 ~ 4386.0 m/s, 미생물 산화시험 이후에 측정된 값은 1725.3 ~ 4201.7 m/s이고, Specimen-S의 경우 미생물 산화시험 전 초기에서 3876.5 ~ 4032.3 m/s, 미생물 산화시험 이후에 측정된 값은 1372.3 ~ 3937.0 m/s이다. 일축 압축강도는 미생물 배양기간이 진행될수록 현저한 강도 저하를 보였다.

티탄철석의 pH는 무기적 산화시험에서 3.82 ~ 4.26, 생물학적 산화시험에서 2.20 ~ 2.57의 범위이다. 흡수율은 무기적 산화시험을 위한 미생물 산화시험 전 초

기에는 0.029 ~ 0.085%, 미생물 산화시험 이후 각 단계별로 측정된 값은 0.033 ~ 0.090%이다. 생물학적 산화시험을 위한 미생물 산화시험 전 시험의 초기 흡수율은 0.033 ~ 0.068%이며, 미생물 산화시험 이후에는 0.045 ~ 0.097%로 미생물 산화시험 전 보다 이후가 더 큰 흡수율을 보인다. 종파속도는 무기적 산화시험의 경우 미생물 산화시험 전 초기 종파속도는 1515.2 ~ 2057.6 m/s, 미생물 산화시험 이후에는 1503.2 ~ 2057.6 m/s이다. 생물학적 산화시험에서 미생물 산화시험 전 초기 종파속도는 1515.2 ~ 3040.8 m/s, 미생물 산화시험 이후에는 1563.2 ~ 2057.6 m/s이다. 티탄철석에 있어서 미생물의 유무와 배양기간 따른 종파속도에 대한 결과는 무기적 산화에 비해 생물학적 산화시험에 의한 종파속도가 상대적으로 큰 감소를 보여, 미생물에 의한 생물학적 산화작용이 무기적 산화작용보다 종파속도에 더 큰 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. 미생물 배양기간에 따른 일축압축강도 결과에 의하면, 무기적 및 생물학적 산화작용 두 조건 모두에서 뚜렷한 일축압축강도 감소 양상을 보였지만, 일축압축강도 영향에 무기적 산화작용보다는 생물학적 산화작용이 더 크게 작용했음을 알 수 있다.

자철석의 pH는 무기적 산화시험에서 4.02 ~ 5.16, 생물학적 산화시험에서 1.50 ~ 1.90이다. Eh는 무기적 산화시험에서 174.9 ~ 111.9 mV로 배양기간 동안 지속적으로 감소하는 경향을 보이고, 생물학적 산화시험에 의한 Eh는 285.2 ~ 319.3 mV이다. 흡수율은 미생물 산화시험 전 시험편의 초기 흡수율은 0.099 ~ 0.125%, 미생물 산화시험 이후 각 단계별로 측정된 흡수율은 0.074 ~ 0.101%이다. 생물학적 산화시험을 수행한 미생물 산화시험 전 시험편의 초기 흡수율은 0.124 ~ 0.153%, 미생물 산화시험 이후에는 0.125 ~ 0.367%로 큰 차이를 보인다. 종파속도는 무기적 산화시험을 수행한 미생물 산화시험 전 초기 종파속도는 1453.5 ~ 1492.5 m/s, 미생물 산화시험 이후에는 1344.1 ~ 1470.5 m/s이다. 생물학적 산화시험에서 미생물 산화시험 전 초기 종파속도는 1428.6 ~ 1497.0 m/s, 미생물 산화시험 이후에는 1210.3 ~ 1451.6 m/s이다. 자철석은 무기적 및 생물학적 산화작용에 의한 영향을 크게 받지 않지만, 무기적 산화시험에 비해 생물학적 산화시험에 의한 흡수율이 더 큰 증가를 보였다. 결과적으로 자철석에 있어서 무기적 산화에 비해 생물학적 산화시험에 의한 종파속도가 상대적으로 큰 감소를 보이며, 미생물에 의한 생물학적 산화작용이 무기적 산화작용보다 종파속도에 더 큰 영향을 미쳤음을 의미한다. 미생물 배양기간에 따른 일축압축강도 결과에 의하면, 무기적 및 생물학적 산화작용 두 조건 모두에서 뚜렷한 일축압축강도 감소 양상을 보이지만, 일축압

축강도 영향에 무기적 산화작용보다는 생물학적 산화작용이 더 크게 작용했음을 알 수 있다.

결론적으로 자류철석, 티탄철석, 자철석의 풍화작용에 있어서 미생물이 매우 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 하지만, 생물학적 풍화에 대한 풍화지표를 산정하기 위해서는 자류철석, 티탄철석, 자철석뿐만 아니라 더욱 다양한 함철광석을 이용한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다. 또한 각 단계별로 가능한 많은 자료를 확보하여 대상 시료에 대한 물성 편차를 최소화하여 그 신뢰도를 높이는 정량적인 연구가 필요하다고 사료된다.

참 고 문 헌

- 강성승, 김종인, 오바라 유조, 히라타 아즈오, 2011, 동결융해시험에 의한 사암 및 안산암의 풍화특성 평가, 한국암반공학회지, 21, 2, 145-150.
- 김규한, 이현주, 1994, 연천 고남산 지역에 분포하는 반려암질암의 암석화학과 관입 시기, 자원환경지질학회지, 27, 1, 29-39.
- 김성환, 유병옥, 조성로, 1997, 암석의 풍화에 따른 강도변화 특성에 관한 연구, 사면안정 학술발표회, pp. 115-136.
- 노열, 오종민, 서용재, 장희동, 2006, 미생물을 이용한 자철석으로부터 철 침출에 관한 연구, 한국광물학회지, 19, 4, 265-275.
- 노열, 오종민, 서용재, 장희동, 2007, 미생물을 이용한 신예미 자철석으로부터 철 침출에 관한 연구, 한국광물학회지, 19, 4, 265-275.
- 대한광업진흥공사, 1981, 한국의 광상.
- 박연준, 유광호, 양광용, 우익, 박찬, 송원경, 2003, 동결-융해 시험에 의한 화강암의 풍화 특성 연구, 한국암반공학회지, 13, 3, 215-224.
- 박천영, 김봉주, 2010, 울진 자류철석 표면에 부착한 고온성박테리아와 2차 생성물의 특성, 한국광물학회지, 23, 4, 315-329.
- 박천영, 김순오, 김봉주, 2010, 상온에서 토착박테리아를 이용한 방연석의 용출 특성, 한국광물학회지, 23, 4, 331-346.
- 박천영, 정경훈, 김봉주, 위환, 이윤국, 2011, 고온성토착박테리아에 의한 방연석의 충식작용과 용출 향상, 한국지구시스템공학회지, 48, 1, 11-24.
- 배영부, 1992, 신예미광산의 북압광체에 관한 연구, 한국지구과학회지, 13, 2, 127-135.
- 송원경, 우익, 김복철, 2009, 풍화가속실험을 통한 독도 암체의 풍화특성 분석, 한국암반공학회지, 19, 4, 318-327.
- 엄정기, 신미경, 2009, 경남 함안군 백악기 이암의 동결-융해에 따른 물성변화 및 미세균열 발현특성, 한국암반공학회지, 19, 2, 146-157.
- 엄정기, 우익, 박혁진, 2009, 동결-융해 풍화에 의한 원주지역 주라기 화강암의 지질공학적 특성변화, 대한자원환경지질학회지, 42, 3, 261-272.
- 엄정기, 2012, 인공풍화과정에 의한 김해지역 백악기 화강암의 풍화특성에 관한 연

- 구, 한국암반공학회지, 22, 1, 32-42.
- 우익, 박혁진, 2004, 옥천대지역 -제천·금산·김천- 에 분포하는 화강암 및 화강편마암의 풍화분류에 관한 고찰, 대한자원환경지질학회지, 37, 3, 355-364.
- 우익, 엄정기, 박혁진, 2009, 강원도 원주일대에 분포하는 화강암 및 화강편마암의 화학풍화실험에 의한 물성 변화 연구, 한국암반공학회지, 19, 3, 213-225.
- 유재영, 고현진, 송홍규, 2011, 애시디싸이오바실러스 페로악시덴스에 의한 황철석 산화에 따른 표면 조직의 변화, 한국광물학회지, 24, 3, 235-244.
- 이동진, 1984, 신예미 광산의 철광석에 대한 광물학적 연구, 한국동력자원연구소 광물연구, 133-153.
- 이인화, 박천영, 2001, *Thiobacillus ferrooxidans*에 의한 pyrite의 생물학적 침출에 따른 기질 표면 특성변화, 한국생물공학회지, 16, 3, 295-301.
- 이평구, 강민주, 최상훈, 2011, 제2연화광산 직내골 광미장 침출수에 오염된 하천수계의 시·공간적 수질변화 및 중금속 제거효율, 한국지하수토양환경학회지, 16, 1, 19-31.
- 이창섭, 조태진, 이상배, 원경식, 2007, 제주도 한라산조면암의 풍화특성에 관한 연구, 대한지질공학회지, 17, 2, 235-251.
- 이현구, 문희수, 오민수, 2007, 한국의 광상, 아카넷, 1-762.
- 장현식, 장보안, 이준성, 2004, 강원도 횡성군 풍암분지 백악기 셰일의 동결-융해에 따른 지질공학적 특성 변화, 대한지질공학회지, 14, 4, 401-416.
- 장호완, 염병우, 박노영, 1987, 고방산 함티탄자철광상의 모암인 알카리반려암질암의 암석화학적 연구, 광산지질, 20, 2, 85-95.
- 조강희, 2011, 토착호산성박테리아의 황철석 표면 부착과 용출특성, 조선대학교 석사학위논문.
- 조동진, 1989, 신예미 스카른 광상의 암석학적 지구화학적 특징, 서울대학교 석사학위논문.
- 조태진, 이상배, 황택진, 원경식, 2009, 풍화진행에 따른 한라산조면암의 역학적 특성변화, 한국암반공학회지, 19, 4, 287-303.
- 최호형, 2004, 미생물학, 아카데미서적, pp. 34-158.
- 한갑수, 1972, 제2연화광산의 지질광상에 대하여, 광산지질, 5, 4, 211-220.
- 한국광물자원공사, 2010, 자원용어사전.
- 한국암반공학회, 2010, 암석표준시험법, pp. 1-123.

- Bhatti, T. M., Bigham, J. M., Carlsin, L. and Tuovien, O. H., 1993, Mineral products of pyrrhotite oxidation by *Thiobacillus ferrooxidans*, *Applied and Environmental Microbiology*, 59, 6, 1984-1990.
- Bennett, J. C., and Tributsch, H., 1978, Bacterial leaching patterns on pyrite crystal surfaces, *Journal of Bacteriology*, American Society for Microbiology, 134, 1, 310-317.
- Brierley, J. A., 1978, Thermophilic iron-oxidizing bacteria found in copper leaching dumps, *Applied and Environmental Microbiology*, 36, 3, 523-525.
- Buddington, A. F. and Lindsley, D. H., 1964, Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents, *Journal of Petrology*, 5, 2, 310-357.
- Cappelle, I. J., Navarrete, J. and Borrok, D. M., 2010, Bioleaching of lunar and martian planetary simulants and ilmenite in the presence of iron-oxidizing bacteria, 2010 GSA Denver Annual Meeting, 42, 5, 89.
- Edwards, K. J., Hu, B., Hamers, R. J., Banfield, J. F., 2001, A new look at microbial leaching patterns on sulfide minerals, *FEMS Microbiology Ecology*, 34, 3, 197-206.
- Giaveno, A., Lavalle, L., Chiacchiarini, P. and Donati, E., 2007, Airlift reactors: characterization and applications in biohydrometallurgy. In: Dondi, E. R. and Sand, W. (eds.), *Microbial Processing of Metal Sulfides*, Springer, 169-191.
- Griffith, A. A., 1920, The phenomena of rupture and flow in solids, *Philosophical Transaction of Royal Society London A*, 221, 163-198.
- Grishin, S. I., Bigham, J. M. and Tuovinen, O. H., 1988, Characterization of jarosite formed upon bacterial oxidation of ferrous sulfate in a packed-bed reactor, *Applied and Environmental Microbiology*, 54, 12, 3101-3106.
- 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, 1-211.
- Landesman, J., Duncan, D. w. and Walden, C. C., 1966, Iron oxidation by washed cell suspensions of the chemoautotroph, *Thiobacillus ferrooxidans*, *Canadian Journal of Microbiology*, 12, 1, 25-33.
- MacDonald, D. G. and Clark, R. H., 1970, The oxidation of aqueous ferrous

- sulfate by *Thiobacillus ferrooxidans*, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 48, 6, 669–676.
- Mcgoran, C. J. M., Duncan, D. W. and Walden, C. C., 1969, Growth of *Thiobacillus ferrooxidans* various substrates, *Canadian Journal of Microbiology*, 15, 1, 135–138.
- Miller, K. W. and Risatti, B., 1988, Microbial oxidation of pyrrhotites in coal chars, *Fuel*, 67, 1150–1154.
- Navarrete, J. U., Cappelle, I. J., Schnittker, K. and Borrok, D. M., 2013, Bioleaching of ilmenite and basalt in the presence of iron-oxidizing and iron-scavenging bacteria, *International Journal of Astrobiology*, 12, 2, 123–134.
- Ohmura, N., Kitamura, K. and Saiki, H., 1993, Selective adhesion of *Thiobacillus ferrooxidans* to pyrite, *Applied and Environmental Microbiology*, 59, 12, 4044–4050.
- Roh, Y., Oh, J., Suh, Y. and Jang, H. D., 2007, Microbial leaching of iron from magnetite under aerobic and anaerobic environments, *Goldschmidt2007*.
- Rojas-Chapana, J. A., Giersig, M. and Tributsch, H., 1995, Sulfur colloids as temporary energy reservoirs for *Thiobacillus ferrooxidans* during pyrite oxidation, *Archives of Microbiology*, 163, 5, 352–356.
- Rojas-Chapana, J. A., Tributsch, H., 2004, Interfacial activity and leaching patterns of *Leptosprillum ferrooxidans* on pyrite, *FEMS Microbiology Ecology*, 47, 1, 19–29.
- Sand, W., Gerke, T., Hallmann, A., Schippers, A., 1995, Sulfur chemistry, biofilm, and the (in)direct attack mechanism—a critical evaluation of bacterial leaching, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 43, 6, 961–996.
- Sand, W., Gehrke, T., Jozsa, P. G., and Schippers, A., 2001, (Bio)chemistry of bacterial leaching – direct vs indirect bioleaching, *Hydrometallurgy*, 59, 2–3, 159–175.
- Schippers, A. and Sand, W., 1999, Bacterial leaching of metal sulfides proceeds by two in direct mechanisms via thiosulgate or via polysulfides and sulfur, *Applied and Environmental Microbiology*, 65, 1, 319–321.

- Shirihari, Kumar, R., Gandhi, K. S. and Natarajan, K. A., 1991, Role of cell attachment in leaching of chalcopyrite mineral by *Thiobacillus ferrooxidans*, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 36, 2, 278-282.
- Silverman, M. P., 1967, Mechanism of bacterial pyrite oxidation, *Journal of Bacteriology*, 94, 4 1046-1051.
- Tribusch, H., 2001, Direct versus indirect bioleaching, *Hydrometallurgy*, 59, 2-3, 177-185.
- Yun, S., 1979, Structural and compositional characteristics of skarn zinc-lead deposits in the Yeonhwa-Ulchin mining district, Southeastern Taebaegsan region, Korea, *Journal of Korean Institute of Mining Geology*, 12, 13, 147-176.
- Zhang, C., Liu, S., Phelps, T. J., Cole, D. R., Horita, j., Fortier, S. M., Elless, M. and Valley, J. W., 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.

감사의 글

공학도가 된지 어언 39년, 조경학을 포함하여 두 개의 대학 졸업장과 조경학 석사를 거쳐 공학박사 학위를 받았습니다. 저에게 끝마침은 미지의 세계로의 새로운 출발이기도 합니다. 목표를 세워 또 다른 어떠한 일에 도전할까하는 깊은 상념에 잠기곤 합니다.

새로운 일에 도전하고, 어려운 과정을 극복하면서 목적지까지 도달하였을 때의 희열은 항상 가슴 설레는 일이었습니다. 박사과정을 마치면서 힘들고 어려운 난관에 봉착할 때마다 항상 자신의 일처럼 도와주신 많은 분들이 계셨기에 좋은 결실을 얻을 수 있었습니다. 되새겨 보면 모든 일들이 그러하듯 저 혼자만의 의지와 노력만으로 되는 일은 아닌 듯 싶습니다. 이 자리를 빌려 도움을 주신 많은 분들께 감사의 마음을 전하고 싶습니다.

먼저, 본 논문이 완성되기까지 나이든 제자를 흔쾌히 받아주시고 지도를 아끼지 않으신 강성승 교수님께 감사 말씀 올립니다. 그리고 바쁘신 와중에도 학문적인 조언을 아끼지 않으신 강추원 교수님, 한오형 교수님, 고진석 교수님, 박천영 교수님, 논문심사위원이시면서 꼼꼼하게 지도까지 하여주신 순천대학교 김정빈 교수님, 조선대학교 김대현 교수님, 깊이 감사드립니다.

“學而時習之不亦說乎”라 하였습니다. 배움의 길은 즐겁고 끝이 없으며, 현실에서는 보다 나은 삶을 위한 수단일지도 모릅니다. 배우고 익혀서 인생의 참뜻을 이해하고 실천하여 홍익인간이 될 때까지 가슴속에 깊이 새겨 노력하고 또 노력하겠습니다.

끝으로 공부한다고 자리를 많이 비워 미안한 강동그룹 임·직원과 매사에 참고, 이해하여준 내 가족들에게도 감사한 마음 전합니다. 그리고 이제 22개월째 접어든 내 아들 승기가 먼 훗날에 열심히 최선을 다하였던 아버지였다고 기억되면 좋겠습니다.

그 어떤 것보다도 값지고 자랑스럽고 가슴 뿌듯한 논문을 금년 6월 23일에 타계하신 아버님 영전에 바치고 싶습니다.

2013년 12월 12일
고려시멘트 집무실에서
강 대 완 배상

저작물 이용 허용서

학과	에너지자원공학과	학번	20117387	과정	박사
성명	한글 : 강 대 완 한문 : 姜 大 浣 영문 : DAE WAN KANG				
주소	전라남도 장성군 장성읍 영천로 35				
연락처	E-MAIL : kdwk0602@hanmail.net				
논문제목	한글 : 미생물에 의한 함철광석의 물성 및 강도 변화 특성에 관한 연구 영어 : Variations of Physical Properties and Strength of Ferruginous Minerals due to Microorganism				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함.
다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(○) 반대()

2013년 12월 3일

저작자 : 강 대 완 (인)

조선대학교 총장 귀하