

석조문화재 표면 산화물의 산출상태와 지구화학적 거동: 익산 미륵사지 석탑

이동식¹ · 이찬희^{2*} · 양희제¹ · 최기영³

¹국립문화재연구소 미륵사지석탑보수정비사업단, ²공주대학교 문화재보존과학과, ³공주대학교 화학교육과

Geochemical Behavior and Occurrence of Surface Oxidized Materials on the Stone Cultural Heritage: Iksan Mireuksaji Stone Pagoda

Dong Sik Lee¹, Chan Hee Lee^{2*}, Hee Jae Yang¹ and Ki-young Choi³

¹Iksan Mireuksaji Stone Pagoda Conservation Team, National Research Institute of Cultural Properties, Iksan, 570-911, Korea

²Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University, Kongju, 314-701, Korea

³Department of Chemistry Education, Kongju National University, Kongju, 314-701, Korea

The Iksan Mireuksaji stone pagoda, designated as national treasure No. 11 in Korea, has been in the process of disassembling for reconstruction as part of the cultural heritage conservation program. The pagoda is mainly consisting of granite, which is relatively resistant to weathering. However, it has lost its original rock color due to various contaminants deposited at the surface since it exposed to the atmospheric environment long time. In this research, we categorized the secondary inorganic contaminants into the genetic type, and also quantitatively examined occurrences and types of pollutants in the oxidation area of the pagoda surface in which the area is clearly distinguished by naked eyes. Geochemical behavior of soluble pollutants through reaction experiments are demonstrated, and effective methods of cleaning for the conservation and scientific applicability of the surface cleaner are also studied.

Key words : Stone cultural heritage, Inorganic contaminants, Oxidation, Reaction experiment, Cleaner

국보 제11호 익산미륵사지석탑은 현재 문화유산의 원형보존을 위하여 해체복원 중이다. 이 석탑의 구성암석은 비교적 풍화에 강한 화강암으로 이루어져 있으나 오랜 세월 동안 대기환경에 노출되면서 다양한 형태의 오염물이 피복되어 원암의 색상을 잃었다. 이 연구에서는 이차적 무기오염물을 성인적 유형으로 세분하고, 육안으로 확연히 판별되는 산화변색된 부재만을 엄선하여 오염물질의 산출상태 및 오염종을 정량분석 하였다. 또한 용해실험을 통해 가용성 오염종의 지구화학적 거동특성을 규명하고 세정방법 및 효과 등을 분석하여, 표면 세정제의 보존과학적 적용가능성을 검토하였다.

주요어 : 석조문화재, 무기오염물, 산화작용, 용해실험, 세정제

1. 서 언

익산 미륵사지는 전라북도 익산시 금마면 기양리 미륵산 남쪽기슭에 동서로 형성된 낮은 구릉에 위치하며 가람배치는 정남쪽에서 서쪽으로 23기울려 조성하였다. 현재 사적 제150호로 지정되었고 미륵사지 서탑은 1962년에 국보 제11호로 지정된 석조문화재로서 백제 무왕대(AD 600~641)에 창건된 것으로 알려져 있다.

이 석탑은 비교적 풍화에 강한 화강암질암으로 조성되어 있으나 오랜 세월동안 자연에 직접 노출되어 있으면서 대부분 석재의 표면이 훼손된 상태로서 원암의 조직과 색을 상실하였다.

모든 암석의 조암광물들은 항상 환경에 지배를 받아 풍화과정을 거치게 되는데, 석조문화재의 구성석재는 인위적인 및 자연적인 영향이 서로 공존하면서 풍화 메카니즘의 촉진을 유발한다. 특히 공업화의 급속한 발

*Corresponding author: chanlee@kongju.ac.kr

전은 석조문화재의 원형보존에 많은 문제점을 야기하였고, 물이나 대기의 화학반응은 석조문화재의 풍화와 훼손을 유발하는 인자로 대단히 중요하다. 이들은 상호반응을 통하여 풍화잔류물을 남기고 잔류물이 결정화되면 부피가 팽창하여 암석 조직과 구성광물에 물리화학적 풍화를 촉진시키는 역할을 한다.

미륵사지 서탑에도 이와 같은 화학적 풍화작용에 의해 부재는 회백색, 암회색, 암흑색, 적갈색 등의 산화물이 피복되어 있다. 표출 형태에 따라 부재 전면이나 부분적으로 산출되는 경우와 산포상으로 나타나기도 하나, 보통 대기와 직접적으로 접촉하는 표면에서 쉽게 볼 수 있다. 또한 풍화에 의해 박리나 박락 또는 균열된 곳에서도 쉽게 관찰된다. 이들의 대부분은 암석이 형성될 때 광물 내에 철 성분을 함유한 유색광물이 대기중의 산소나 물 분자에 포함된 산소와의 반응을 통해 갈철석이나 적철석이 형성되는 과정에서 고유의 색을 표출시키고 있다.

이 미륵사지 석탑의 해체와 복원에 관련된 보존과학적 및 암석학적 연구는 꾸준히 진행된 상태이며 유기 및 무기오염물의 거동과 제어방안에 대한 실험적 연구도 수행되고 있다(Yang *et al.*, 2004; 2006; Cho and Jwa, 2005; Lee *et al.*, 2006a; 2006b). 그러나 이 석탑 부재의 표면산화에 의한 무기오염물질의 산출상태와 오염종의 거동은 연구된바 없다. 따라서 이 연구에서는 적갈색으로 나타나는 이차적 무기오염물에 대한 산출상태와 정량분석을 실시하였다. 또한 용해실험을 통해 가용성 오염 중을 규명하고 세정방법 및 효과 등을 분석하여 표면 세정제의 보존과학적 적용을 검토하였다.

2. 현황 및 연구방법

2.1. 현 황

익산 미륵사는 백제무왕 대에 미륵하생신앙을 기반

으로 창건한 호국사찰로 3탑 3금당의 가람배치를 가지고 있다. 그러나 백제가 멸망하면서 목탑과 강당 등 주요건물이 소실된 채 유지되다가 고려시대에 호국불교와 더불어 중창되었다. 조선시대에는 사찰의 중심축이 서원을 중심으로 북쪽으로 이동하였다. 이후 조선의 억불정책에 의해 불교가 정체됨으로서 임진왜란을 전후로 미륵사는 사찰로서 기능을 상실하게 된다(NRICP, 2003).

현재 미륵사지 내에 존재하는 석탑은 서탑을 지칭하는 것으로써 국보 제11호이다. 이 탑은 중립질 흑운모 화강암으로 축조된 국내 최대 최고의 현존 석조문화재로서 목조건물의 기구법을 변안한 한국의 시원 탑이다(Fig. 1). 이 석탑은 창건 이후 몇 차례 수리 및 개축이 있었으나 이와 관련된 직접적인 자료는 찾아보기 어렵다. 그러나 현재 유존해 있는 형태를 볼 때 선인들은 탑의 변형에 대한 최소한의 보존을 위한 노력이 보인다. 정확한 보강 시점은 알 수 없으나 남북측면 일부와 서측면에 쌓은 석축을 그 예로 들 수 있다(NRICP, 2003; 2004).

현재의 모습은 일제강점기 때 주변 환경정리와 더불어 석탑을 보수하였고 이때 사용된 보강재가 포틀랜드 시멘트다. 주로 붕괴된 부분에 콘크리트를 타설하여 부재의 도괴를 방지하였는데 상당부분 변형되었다. 따라서 역사적인 문화유산을 보존하기 위해 1998년 구조안전진단 결과, 불안정 판정에 의거 해체가 결정됨에 따라 2001년부터 해체하기 시작하였으며 현재 1층과 석축부분을 해체하고 있다(NRICP, 2003).

2.2. 연구방법

이 연구에서는 해체된 부재를 대상으로 정밀 단위부재조사를 통하여 시료로서의 대표성을 갖도록 시료를 수습하여 암석학적 및 광물학적 분석을 실시하였다. 전 암시료의 화학분석은 X선 형광분석(XRF), 유도결합쌍

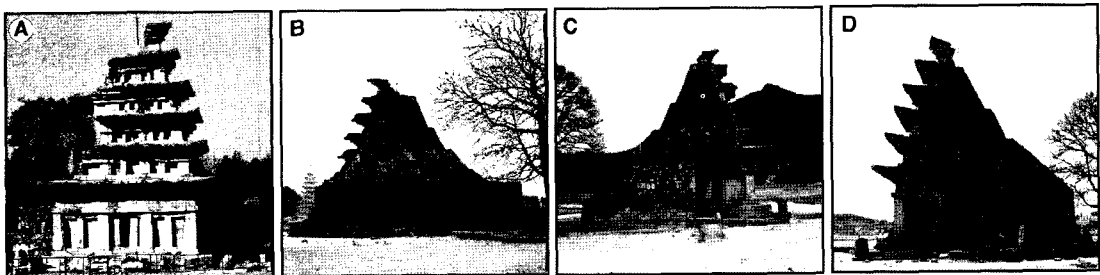


Fig. 1. General views of the Mireuksaji stone pagoda before conservation treatment in 2000 after concrete maintenance in 1915s. Eastern (A), Western (B), Southern (C) and Northern (D) views of the pagoda, respectively.

아르곤 플라즈마 원자방출분광분석 및 질량분석(ICP-AES, ICP-MS)과 중성자방사화분석(INNA)을 이용하여 정량분석 하였다. 이 탑에 대한 조암광물의 상대적 함량, 반정량적인 광물조성, 광물학적 공생관계, 조직 및 풍화 생성광물은 박편을 대상으로 전통적인 방법에 따라 모드 분석을 실시하였다.

모드조성은 자동계수기가 장착된 Leitz사 모델의 Orthoplan(071948) 편광/반사 겸용 현미경을 이용하였으며, 주사전자현미경(SEM) 모델은 LINK사의 에너지 분산형 X선 분석기(EDXA, PV 9100/60)가 장착된 Shimadzu사의 SIS-SX-40이다. 분석 시료는 탄소와 금으로 이중 피복하여 이용하였다. 또한 조암광물의 정확한 동정을 위하여 X선 회절 분석을 실시하였다. 분석기기는 Rigaku제 모델 D/Max-IIb였고, X선은 CuK α 에 조건은 30 kV와 15 mA였다.

한편 암석 표면에 침착된 수용성 오염물질을 분석하기 위해 채취된 시료를 박편(3520 mm)으로 만들어, 표준시험법에 의해 1시간 동안 교반한 후 30분 정도 침전시켜 채수한 시료를 대상으로 음이온과 양이온을 분석하였다. 박편은 각각의 용매에 1/2, 1, 2, 3, 5시간 함침하여 채수하였다. 이때 사용된 용매는 pH 6.2와 5.0 용매제이다. 양이온 측정시료는 합성수지(polypropylene) 병에 담아 분석이 진행되는 동안 냉장 보관하였고, 전처리하는 용기에 금속이온이 흡착되는 것을 방지하기 위해 6N 질산(HNO₃)을 1ml 적정하여 산도를 유지하였다.

용존 양이온 분석기기는 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Perkin- Elmer, Model; Elan 6000)이고 아르곤 가스를 이용하여 10,000K 정도의 온도에서 생성된 플라즈마에서 방출되는 양이온들을 질량분석기를

통해 정량적으로 분석하였다. 용매 내의 용존 음이온은 이온크로마토그래피(IC; Waters Corporate Headquarters, Model; Waters 2690)를 이용하여 분석하였고, 분석 값에 대한 신뢰도와 재현성을 검증하기 위해 표준 시료, 공시료 및 중복시료를 이용하여 분석치의 정확성을 높이고 오차를 줄였다.

3. 석재의 암석학적 특성

3.1. 암석 및 광물학적 특징

미륵사지 일대의 구성암석은 중생대 쥐라기의 흑운모 화강암이 주류를 이루고 있으며, 석탑의 부재 또한 미륵산의 암석과 동일한 것이다. 한편 미륵사지 일대의 화강암에 대한 암석학적 연구와 석탑부재의 암석에 대한 정밀조사연구에서 두 암석의 암석학적 특성과 성인적 동질성을 규명하였다. 또한 미륵산 남쪽 사면에서 석탑에 필요한 석재를 공급 조달하였을 가능성을 보고하기도 하였다(Cho and Jwa, 2005; Yang *et al.*, 2006).

이 탑을 구성하는 석재는 중립질 흑운모 화강암으로서 Q-A-P 삼각도상에서는 화강섬록암과의 경계부에 도시된다. 조암광물은 석영, 사장석, K-장석, 흑운모 등이며 인회석, 지콘, 스펀, 갈염석 등이 소량 또는 미량으로 수반된다. 석영은 대체로 중립질의 타형으로 매우 약한 파동소광과 봉합조직을 보여준다. 중립질의 사장석은 자형이나 반자형으로 누대조직을 흔히 보여주며, 이 조직을 따라 선택적인 변질작용을 받았다. 사장석 주변부는 부분적으로 밀메카이트(myrmekite)조직을 형성하기도 하였다. K-장석은 조립질의 미사장석과 정장석, 퍼어다이트로 세립의 사장석이나 흑운모 등을 포획

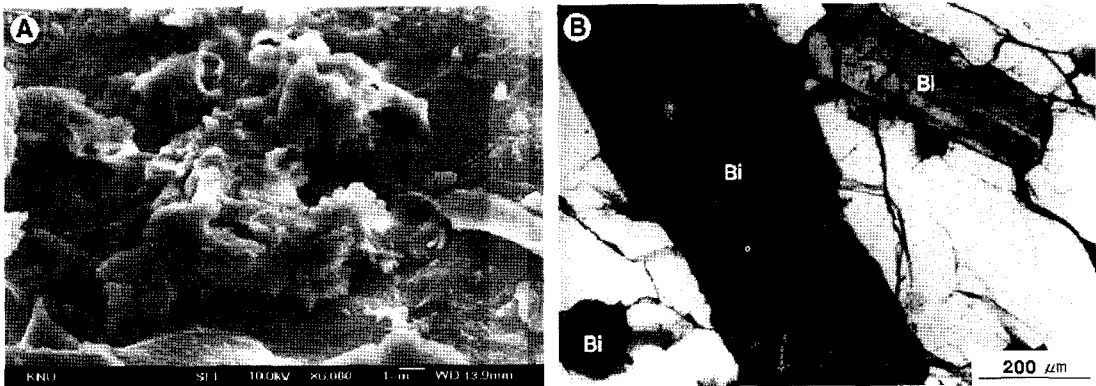


Fig. 2. Scanning electron microphotograph showing kaolinitic clay minerals on the surface of K-feldspar (A). Rock forming minerals of rock properties showing chlorite and iron oxyhydroxide along the oxidizing biotite cleavages and clay minerals along the grain boundaries of K-feldspars (B).

하고 있다. 흑운모는 대체로 증립질에 타형내지 반자형으로 산출되며, 부분적으로 녹니석화 작용을 받았다. 견운모, 점토광물, 녹염석, 방해석 및 녹니석 등이 미량 산출되며 함철광물로부터 유출된 것으로 보이는 갈철석과 공존하고 있다.

전반적으로 익산지역에서 산출되는 화강암의 기초물성은 아주 우수하다. 그러나 석조문화재에 사용된 화강암의 대부분은 암석자체의 결함을 따라 손상이 진행되어 직간접적으로 석재에 손상을 가지고 빠른 풍화과정을 수반하면서 광물조직을 변형시킨다(Lisci *et al.*, 2003). 따라서 석조문화재의 강도를 결정하는 것은 광물조성과 암석의 조직이다. 이 연구에서는 먼저 석재의 표면조직과 절단대 광물입자의 변질형태를 관찰하여 풍화정도를 파악하였다. 주사전자현미경으로 관찰한 결과, 운모와 장석 층간은 분해되면서 이차적인 점토광물이 생성되었고 이들은 운모류의 미세파쇄 작용을 가중시키고 있다(Fig. 2A).

또한 표면 산화물에 따라 조암광물이 어떠한 형태로 변질되었는지 알아보기 위해 편광현미경으로 관찰한 결과, 표면에만 국한적으로 영향을 주었을 뿐 광물 내부 조직까지는 영향을 주지 않은 것으로 나타났다. 대부분의 조암광물은 등립질 입상조직을 갖는 석영, 사장석, 정장석 및 흑운모로 구성되었고 장석류는 성장누대조직, 쌍정 또는 입자 경계를 따라 이차적으로 변질되어 점토광물화 작용을 받았다. 흑운모는 벽개면을 따라 철-망간 수산화물과 녹니석으로 교대되어 있다(Fig. 2B). 이는 모든 화강암에서 나타날 수 있는 화학적 풍화작용으로서 암종과 물성에 따라 달라질 수 있다.

3.2. 지구화학적 특성

미륵사지 석탑의 구성암석에 대한 무기오염물질의 전암 화학조성을 알아보기 위해 전암에 함유된 각 성분과 일부 미량 및 희토류 원소를 분석하였다(Table 1). 이 결과, SiO₂의 함량은 71.98~73.10 wt.%로 거의 일정하며 대체적으로 국내 화성암류의 증립 또는 조립질 흑운모화강암 화학조성과 유사하다. Al₂O₃ 함량 또한 13.22~14.34 wt.%로써 산성 화성암류의 범위에 포함되며 Na₂O와 K₂O의 함량은 3.01~3.64 wt.%, 3.98~4.63 wt.%이다. Fe₂O₃의 함량은 2.25~2.55 wt.%로 상당히 높은 편이다. 이 외의 성분은 상대적으로 낮은 함량을 가지고 있다.

이 분석 값을 이용하여 신선한 화성암류의 화학적 진화를 설명하기에는 많은 문제점을 내포하고 있다. 이는 분석시료가 풍화로 인해 오염된 부분과 훼손도가

심한 곳에 한정되어 수습되었기 때문이다. 그러나 주 성분 원소중에서 MnO 및 Na₂O와 K₂O를 제외한 대부분의 성분이 부화되어 있으며, 특히 SiO₂와 더불어 Fe₂O₃이 높게 부화되어 있다.

지구화학적으로 부화와 결립이 있다는 것은 석탑 부

Table 1. Chemical compositions of major (wt.%), minor and rare earth elements (ppm) for host rocks of the Mireuksaji stone pagoda.

No.	MRS-1	MRS-2	MRS-3
SiO ₂	73.10	71.99	71.98
Al ₂ O ₃	13.22	14.34	13.96
Fe ₂ O ₃	2.33	2.55	2.25
MnO	0.03	0.05	0.04
MgO	0.44	0.46	0.45
CaO	1.34	1.59	1.01
Na ₂ O	3.01	3.64	3.20
K ₂ O	4.63	3.98	4.04
TiO ₂	0.31	0.41	0.35
P ₂ O ₅	0.13	0.14	0.34
LOI	1.60	1.11	1.82
Total	100.12	100.26	99.43
CIA*	59.55	60.89	62.86
WPI**	3.25	4.65	2.64
Ba	876	877	872
Co	5	5	7
Cr	297	332	465
Cu	37	37	51
Cs	4.8	6.9	4.7
Hf	3.1	5.4	4.3
Ni	132	182	232
Pb	20	14	10
Rb	240	193	224
S	750	660	460
Sc	1.9	1.8	2.2
Sr	415	457	418
Th	14.6	11.7	14.5
U	12.9	9.2	34.4
Y	7	11	10
Zn	300	211	173
Zr	139	166	161
La	63.2	23.7	28.9
Ce	34	34	28
Nd	36	15	18
Sm	6.1	3.6	3.6
Eu	1.0	0.9	1.0
Tb	<0.5	<0.5	0.5
Yb	0.5	0.8	0.6
Lu	0.07	0.13	0.09

Fe₂O₃; as total FeO, CIA*; Chemical index of alteration, WPI**; Weathering potential index by Nesbitt and Young (1982).

재 표면이 풍화되어 광물구성 성분 및 조직에 변화가 있다는 것을 의미한다. 특히 암석은 복합적인 외부 환경에 노출되면 풍화를 촉진시켜 광물의 조직을 파괴한다. 이러한 풍화의 진화과정은 풍화단면에 대한 원소들의 거동 특성과 부화 및 결핍정도를 근거로 화학적 풍화지수(CIA)와 풍화 포텐셜(WPI)을 구할 수 있다 (Nesbitt and Young, 1982; 1984).

일반적으로 암석의 풍화지수는 유동성이 작은 Al_2O_3 에 대한 알카리 원소의 변화를 나타내는 것으로 지수 값이 클수록 강한 풍화작용을 지시한다. 미륵사지 석탑의 산화부위에 대한 CIA는 59.55~62.86으로 신선한 화강암에 비해 매우 높은 화학적 풍화도를 보였다. 또한 풍화 포텐셜은(WPI) 2.64~4.65으로 계산되었다. 따라서 미륵사지 석탑 구성암석의 풍화지수와 잠재력은 전반적으로 매우 높음을 알 수 있다.

4. 산화작용과 물성변화

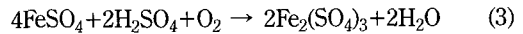
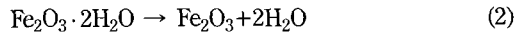
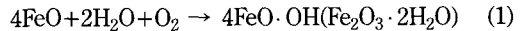
4.1. 풍화요인 및 산화

산화작용의 화학적 의미는 각 원소의 산화수가 증가하는 것을 말한다. 석조문화재의 산화란 석재표면에 피복된 황갈색, 흑갈색, 적갈색 등의 이차적 오염물질을 통칭하는 변색의 일종으로서 적화되었다고 표현한다. 산화요인으로는 외적요인과 내적요인으로 나눌 수 있으며, 전자는 대기오염물질과 반응하여 나타는 현상이고, 후자는 조암광물이 화학적으로 분해되면서 나타나는 현상이다. 이들은 대부분 복합적으로 나타나며 주로 함철광물과 강수(산성비)의 반응에 의해서 생성되며 석조문화재 부재의 수평을 맞추기 위해 삽입한 철판에 녹이 생기면서 확산되기도 한다.

미륵사지 석탑 부재에 발생된 산화현상은 대기오염 물질보다는 광물에 내포된 철화합물에 의해 나타나기 때문에 암석의 철함량 및 함철광물의 종류가 중요한 역할을 한다. 철은 화합물로서 토양, 암석, 광물 등에 존재하고 있으며 알루미늄 다음으로 다량 존재하고 있다. 유리금속 상태로 산출되는 일은 극히 드물고 광석으로는 적철석, 자철석, 갈철석, 황철석, 능철석등이 있으며 조암광물로는 흑운모, 각섬석 등의 유색광물에 구성원소로 포함되어 있다.

순수한 철은 백색의 광택을 가진 금속이지만 습기가 있으면 녹이 슬고 뜨거울 때 수증기와 반응하여 산화철(Fe_3O_4)이 된다. 그리고 염소와 황 및 인과는 격렬히 반응하지만 질소와는 직접 반응하지 않고 탄소나 규소와는 화합하는 성질을 가지고 있다. 또한 광물내

미량의 철은 Fe^{2+} 로 존재하지만 습한 공기와 반응하여 Fe^{3+} 로 변한다. FeO 는 산소와 물이 반응하여 Fe_2O_3 로 변화되거나 $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ 로 변화되는데, 이 과정에서 Fe^{2+} 성분이 광물 내에서 유리되어 갈철석이나 적철석을 형성하면서 분해되어 암석표면으로 용출될 때 다양한 형태의 산출상태를 보여준다.



이와 같은 반응식은 (1)과 (2)의 형태로 나타나는데 생성된 갈철석과 적철석은 암석표면으로 용출되는 과정에서 전면이나 부분적 및 절리된 면을 따라 표출된다. 갈철석은 탈수 작용에 의해 다시 적철석으로 변화될 수 있다. 또한 대기중의 화합물과 조암광물에 포함된 철과 반응하여 황갈색이나 적갈색으로 변색되는 경우도 있는데 이러한 반응식은 (3)과 (4)이다.

4.2. 산출상태

미륵사지 석탑의 건축은 화강암 재료를 기구조적조

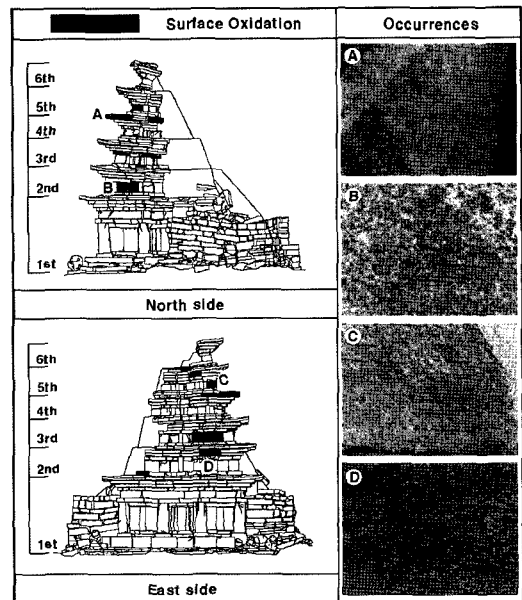


Fig. 3. Detail sketches of oxidation area and occurrences of rock properties in the stone pagoda. (A) Oxidization part along the joint plane of the northern 4th roof stone. (B) Partial spot oxidization on the surface of the northern 2nd body stone. (C) Dark brown oxidation part of the eastern 5th body stone. (D) Reddish brown oxidation part of the eastern 2nd body stone.

형식으로 쌓아 올렸기 때문에 외부 환경조건에 많은 제약을 받을 수밖에 없는 구조적 훼손요인을 가지고 있다. 따라서 대기와 직접적으로 접하는 표면에서는 황갈색, 흑갈색, 적갈색 등의 표면 산화현상이 관찰된다. 이러한 현상은 외면석이나 적심석 모든 부재에서 산발적으로 나타나는데 해체된 부재 중 약 4%가 이에 해당된다. 이 연구에서는 적심석 부재를 제외한 외면부재만을 대상으로 하였다. 산화오염물에 대한 산출상태를 보면 부재 전면이 변색되었거나, 부분적 또는 띠와 반점 형태로 나타나는데 대부분 반점형태를 보인다(Fig. 3).

표면에 노출된 산화 부재에 대해 40배 확대현미경으로 표면을 관찰한 결과, 흑운모가 먼저 풍화되면서 변

색을 유발하는데 황갈색이나 적갈색으로 변하고 흑운모와 인접한 광물까지 영향을 받았다. 특히 유색광물이 인접해 있으면 변색의 정도는 더욱 심화되어 관찰된다. 이러한 광물로는 백운모와 장석이 있다. 처음 흑운모에서 표출된 색은 주변 광물표면으로 침범되면서 원의 형태로 나타나고, 멀어질수록 연한 색을 띤다.

모든 흑운모가 이러한 현상을 보이는 것은 아니며 노출 위치와 풍화정도 그리고 철분의 유무에 따라 표출되는 정도에 차이가 있다. 같은 면이라 할지라도 광물조성의 화학성분에 따라 산화현상이 나타날 수도 있고 안나타날 수도 있다. 대부분의 변색은 부분적이며 산발적으로 나타난다. 간혹 전면에 걸쳐 변색이 나타나는 경우는 흑운모의 밀집성과 연관이 있으며 중첩된

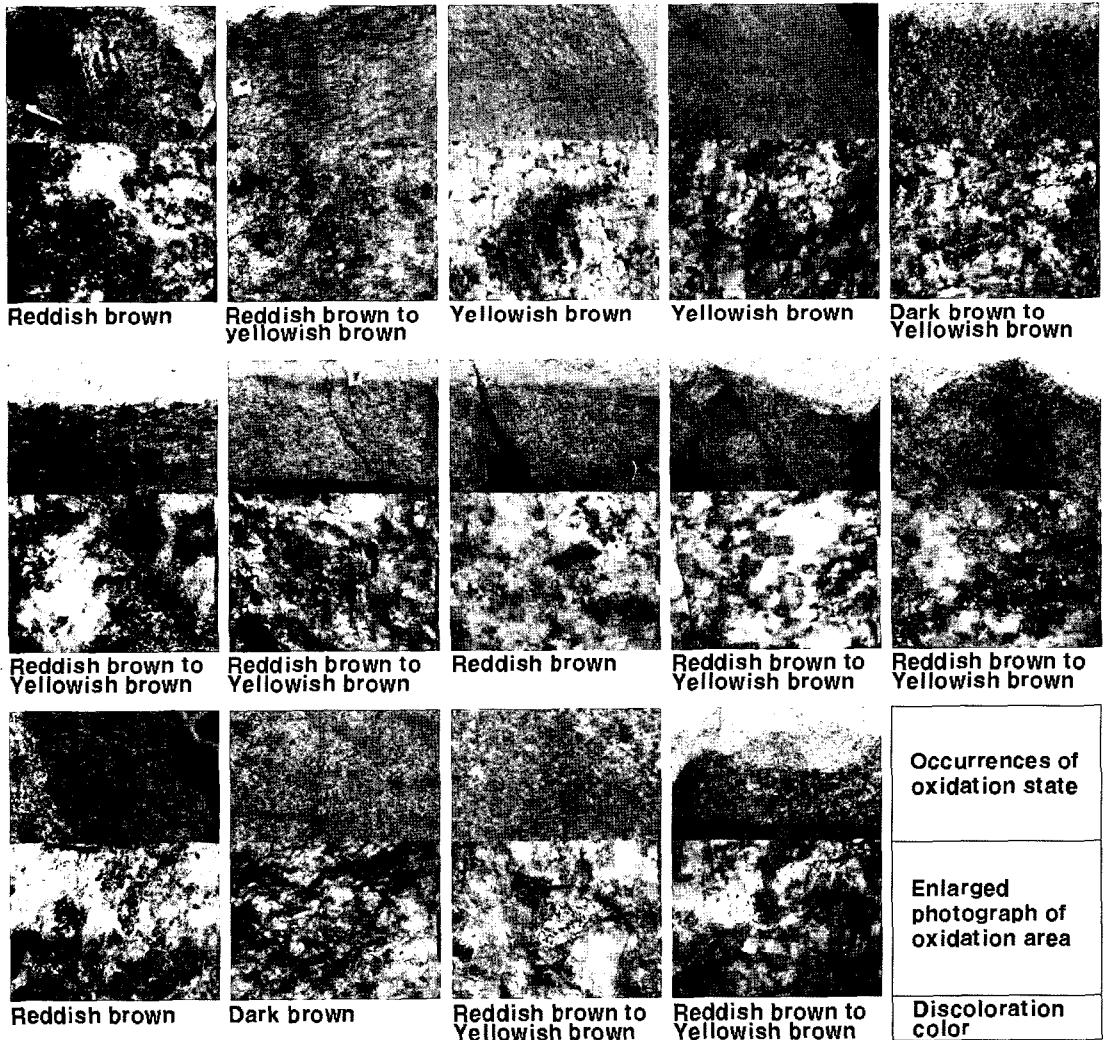


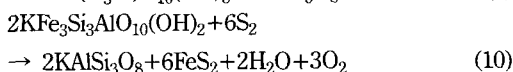
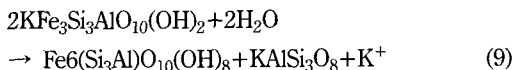
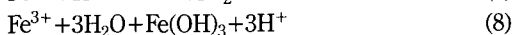
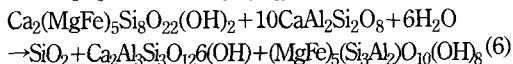
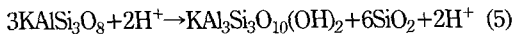
Fig. 4. Occurrences and discoloration showing the surface oxidation area on the rock properties in the stone pagoda.

간섭효과로 인해 광물의 공간 비율이 침범되면서 전면에 나타난다(Fig. 4).

이와 같은 현상은 조암광물이 풍화되면서 이차광물화 작용을 받아 외면이나 벽개면을 따라 표출되어 변색을 일으킨다. 따라서 쉽게 풍화되는 암석일수록 산화현상을 일으킬 가능성이 높으며 철성분이나 철화합물이 암석에 수반되는 경우에 강하게 나타난다. 광물의 안정순서를 보면 철산화물-알루미늄산화물-석영-백운모-정장석-흑운모-Na사장석-각섬석-Ca사장석-휘석-감람석 순으로 감람석이 가장 쉽게 풍화되고 철산화물이 가장 안정하다. 그러나 철산화물이 안정되어 있다 하여도 감람석의 풍화과정에서 녹니석으로 교대되는 동안 벽개면을 따라 표면으로 쉽게 표출된다. 따라서 강한 풍화 저항을 가졌다 하여도 주변부의 광물에 따라 표면 변색을 일으킬 수 있다.

미륵사지 석탑을 구성하는 광물 중 산화를 유발할 수 것은 장석류와 각섬석 및 운모류가 있고 수반광물로 자철석과 황철석이 있으며 변질광물로는 견운모와 녹니석이 있다. 화학분석 결과, Fe₂O₃의 함량이 2.25~2.55wt.%로 상당히 높게 나타났고 부화정도도 높았다. 정장석은 변질작용을 받아 견운모질 광물로 변화되면서 수반된 Fe³⁺가 치환되어 결정면을 따라 식(5)와 같이 변색을 일으킨다. 이때 미립의 백운모나 녹니석이 산출된다.

사장석은 각섬석과 같이 벽개면을 따라 풍화되면서 석영과 녹니석으로 분해되는데 때로는 녹염석이 산출되기도 한다(식 6). 녹니석은 흑운모의 변질작용으로도 생성된다. 이러한 변질은 광물내 미량으로 존재하는 철이 밖으로 유출되는 것을 말하며 이때 암석과 가장 친밀하게 반응하는 산소와 물의 영향으로 산화철이나 수산화철로 변화되어 표면에 갈색 또는 암갈색으로 표출된다(식 7과 8).



또한 각섬석은 흑운모와 공생하여 광물 내부에 저어 콘, 스피넬 및 불투명 광물이 공존하기도 하고 흑운모의 벽개면을 따라 녹니석으로 교대되기도 한다. 흑운모는 입자경계나 벽개면을 따라 이차적인 풍화를 받아 녹니석, 녹염석 및 불투명 철광물인 자철석, 황철석으로 교대되면서 표면에 다양한 변색을 일으키는 원인이 된다(식 1~4, 9~12). 녹니석이 생성되었다는 것은 철성분이 높은 각섬석이나 흑운모가 변질되어 표면에 다양한 형태의 변색을 발생시킬 수 있는 가능성이 높다. 이와 같은 형태의 변색을 발생시킬 수 있는 반응을 종합하면 위와 같다.

4.3. 산화도와 물성변화

여기에서는 산화현상을 보이지 않는 부재들과 산화작용이 나타난 부재간의 상관관계를 통해 풍화특성을 알아보려고 각각의 압축강도와 전암 대자율 측정값을 이용하여 비교분석을 하였다.

4.3.1. 타격법에 의한 풍화도 측정

이 방법은 암석에 해머(Hammer)로 타격하였을 때 반발정도를 측정하여 압축강도를 판정하는 검사방법으로 반발경도 측정법 중의 하나이다. 이는 해머로 암석 표면을 타격하였을 때 반동되는 반발도(R)를 실험적으로 수치화 한 것이다. 압축강도로 환산한 표준값은 일본전력중앙연구소의 강도 추정식에 의거하였다. 이 석탑에 사용된 암석의 압축강도는 단위 부재당 5회 이상을 타격하여 얻은 평균값으로 151~1,975 kg/cm²의 범위를 보였으며, 대부분 300~1,500 kg/cm² 사이의 값을 갖는다. 측정된 암석은 총 310개 부재다.

한국기술용역협회의 암석분류 기준에 따르면, 이 석탑의 부재는 연암(125~400 kg/cm²)의 압축강도에 해당되는 부재는 14%, 중경암(400~800 kg/cm²) 부재는 35%, 경암(800~1,200 kg/cm²)은 28%, 극경암(1,200 kg/cm²이상)은 22%로 나타났다. 암석의 변질은 착색 및 피각물에 의해 광물이 풍화되면서 표출되는데 여기에 균열이나 절리가 발달되면 풍화가 촉진된다. 이로 인해 암석 내부는 신선할지라도 표면부터 광물이 변질되면서 내부까지 풍화가 진행된다. 이때 조건이 맞으면 산화변색과 같은 현상을 보인다.

석탑 부재중 이러한 현상을 보일 수 있는 부재는 약 77% 정도이고 더 극명하게 표출될 수 있는 단계인 중경암 이하로 분류된 부재가 약 49%이다. 그러나 석탑 부재중 산화현상을 보이는 것은 14부재뿐이다. 육안적으로 확연히 식별할 수 있는 것만을 선택하였기 때문

이지만 더 세밀하게 분석을 하면 이보다 많은 부재가 변색되어 있다. 그리고 부재 표면은 오랜 시간 동안 외부에 노출되면서 양파껍질구조 형태의 박리 및 박락에 의해 표면이 떨어져 나가는데 이때 변색된 부분도 동고되어 더욱 신선한 면처럼 보일 수 있다.

산화현상을 보이는 시료의 변색범위는 244~1,510 kg/cm²로 연암에서 극경암까지 모든 암석에서 나타나고 있다. 특히 주요 변색을 일으키는 구간은 674~1,009kg/cm²이고 이 중에서도 중경암에 해당되는 674~771kg/cm² 사이에서 집중적인 변색현상을 보였다(Fig. 5). 장석 및 유색광물의 일부가 풍화되면서 변색을 유발하고 미세균열의 발달과 더불어 장석이나 운모류와 같은 광물이 변질되면서 집중적으로 색을 유발하기 때문이다.

위에서 살펴본 바와 같이, 동일한 성인의 암석이라도 광물의 불균질성 때문에 다소 화학성분이 달라지는데 특히 철성분의 유무나 조직적 관계에 따라 표면적으로 나타나는 정도의 차이를 보인다. 따라서 암석에 가해지는 사이트 환경 및 광물과의 상관관계는 일정하지 않게 작용하고 있으며 신선한 암석의 압축강도를 갖는 암

석보다 풍화작용을 받아 압축강도가 약한 암석에서 변색이 일어날 가능성이 높다는 것을 알 수 있다.

4.3.2. 대자율과 풍화도

대부분의 화성암은 불투명 광물을 함유하고 있고 함량에 따라 각기 다른 자기적 성질을 나타내는데 풍화에 따라 정도의 차이가 있다. 따라서 미루사지 석탑 부재의 풍화도와 자성광물의 자화강도를 비교하였다. 전암 대자율 측정기는 KT-6(Pocket Susceptibility Meter) 모델을 사용하였다. 대자율은 외부자기장에 대한 자화강도이며 $I=k \cdot H$ 로 정의되고 I 는 자화강도, H 는 자기장, k 는 대자율로 암석의 자기적 특성을 결정하는 상수이다. 이 탑에 사용된 것과 같은 종류의 화강암 이 갖는 평균 대자율은 $2.512(\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 이다.

대자율은 1.256보다 높으면 자철석 계열로 낮으면 티탄철석 계열의 암석으로 구분하기도 한다(Ishihara, 1977). 이 기준에 비취볼 때 대부분 풍화된 상태에서도 미루사지 석탑의 구성암석은 95% 이상이 자철석 계열에 속한다. 전체적인 전암 대자율 분포는 0.17~7.78

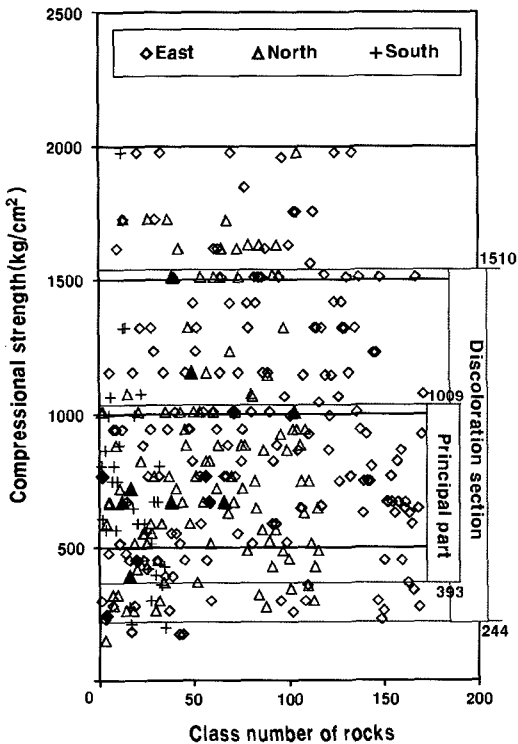


Fig. 5. Distribution of compressive strength and the scope of discolorations for rock properties in the stone pagoda. ▲ ; oxidized samples.

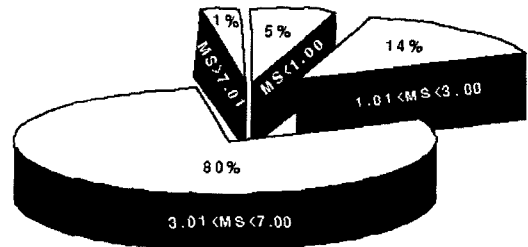


Fig. 6. Magnetic susceptibility range of rock properties in the stone pagoda.

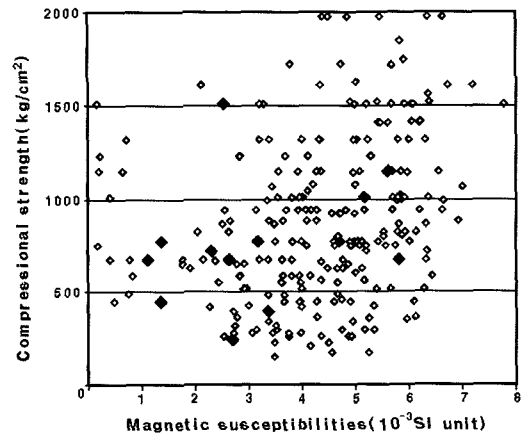


Fig. 7. Correlations between the magnetic susceptibility and the compressive strength of rock properties in the stone pagoda. ▲ ; oxidized samples.

(10^{-3} SI unit)의 범위이며 80% 정도가 3.01~7.00에 속하고, 14%는 1.01~3.00에, 5%는 1.00 이하에서 그리고 7.01 이상 되는 부재도 1% 정도 포함되어 있다(Fig. 6). 암석은 지속적으로 풍화를 받아 광물이 변질되거나 새로운 물질을 생성하게 되는데 이때 광물에 포함된 자철석도 변질된다. 이는 대자를 값이 낮아진다는 의미로 자성이 없는 적철석으로 변질되었다고도 할 수 있다.

일반적으로 두 물질을 분석하지 않고 식별할 수 있는 방법은 표면에 변색된 정도를 관찰하면 된다. 자철석은 보통 검은 변색을 띄고 적철석은 붉은색으로 나타난다. 전암 시료의 변색 범위를 보면 0.77~5.85의 대자를 값을 갖는 곳에서 산화현상이 관찰되나, 이 범위에 해당되는 다른 시료나 이보다 낮은 대자를 값을 갖는 부재에서는 산화변색이 관찰되지 않았다. 또한 전자의 변색범위보다 높어도 변색이 나타나지 않았다(Fig. 7).

결과적으로 산화변색은 대자를 값과 무관하다고 할 수 있으나 비교적 강한 자성을 가진 구간에서는 변색이 나타나지 않는 것으로 보아 어느 정도 풍화과정을 거친 암석표면에서 발생될 확률이 높았다. 또한 반발

도로부터 얻은 부재의 압축강도와 대자율과의 관계를 도시해 보았으나 특별한 상관관계는 존재하지 않았다. 그러나 앞에서 논한 것처럼 비교적 낮은 압축강도와 대자를 값을 갖는 풍화면에서 산화변색이 일어날 수 있는 가능성이 높다는 것을 보여주었다.

5. 수용성 산화염의 거동과 세정효과

5.1. 물리화학적 특성

표면 산화물의 오염종과 가용성 이온의 함량을 확인하기 위해 표준교반 시험법을 적용하였다. 표면산화된 암석시편을 pH 6.2와 pH 5.0 용매체에 넣고 일정시간 동안 교반하여 시료를 채수하였다. 각각의 용출된 가용성 무기오염물질을 분석한 결과는 Table 2 및 3과 같다. 먼저 용매체에 따른 이온들의 거동을 알아보기 위해 pH를 기준으로 물리적인 특성을 검토하였다. pH 6.2 용매체의 교반수 pH는 5.62~6.35(평균; 6.04)이며 pH 5.0 용매체의 교반수 pH는 6.10~6.42(평균; 6.26)로 용매체와 상관없이 중성을 띠고 있으며, 전반적으로 pH

Table 2. Selected concentrations of minor elements from the solvent samples after reaction experiments.

No.	SolventTime	Al ($\mu\text{g/l}$)	As ($\mu\text{g/l}$)	Ba ($\mu\text{g/l}$)	Cd ($\mu\text{g/l}$)	Co ($\mu\text{g/l}$)	Cr ($\mu\text{g/l}$)	Cu ($\mu\text{g/l}$)	Mn ($\mu\text{g/l}$)	Mo ($\mu\text{g/l}$)	Ni ($\mu\text{g/l}$)	Pb ($\mu\text{g/l}$)	Se ($\mu\text{g/l}$)	Sn ($\mu\text{g/l}$)	Sr ($\mu\text{g/l}$)	U ($\mu\text{g/l}$)	Zn ($\mu\text{g/l}$)
pH 6.2 Solvent	1/2h	20.793	0.684	0.351	0.015	0.137	0.198	12.815	0.541	0.608	0.252	0.031	0.032	0.236	0.812	0.127	3.875
	1h	20.704	1.040	0.385	0.024	0.135	0.294	13.526	0.587	0.826	0.249	0.043	0.230	0.544	0.981	0.142	3.489
	2h	19.932	1.374	0.264	0.023	0.222	0.427	9.496	0.550	1.229	0.227	0.043	0.327	0.519	0.996	0.150	2.651
	3h	20.180	1.670	0.245	0.020	0.155	0.474	4.717	0.557	1.613	0.211	0.035	0.195	1.349	0.860	0.228	2.266
	5h	26.347	2.280	0.220	0.023	0.163	0.509	5.619	0.628	2.334	0.268	0.064	0.151	1.321	0.822	0.315	2.550
pH 5.0 Solvent	1/2h	21.806	0.623	1.261	0.052	0.818	0.158	12.497	3.962	0.995	0.781	0.031	0.206	0.816	4.357	0.187	8.063
	1h	17.835	0.801	1.028	0.132	0.891	0.259	5.482	3.940	1.020	1.133	0.176	0.106	1.150	4.455	0.231	6.824
	2h	18.181	1.055	0.872	0.101	0.888	0.325	9.943	4.199	1.320	0.782	0.144	0.101	1.253	4.594	0.197	6.188
	3h	18.578	1.344	0.718	0.074	0.900	0.334	10.395	4.447	1.632	0.761	0.127	0.093	1.334	4.316	0.206	5.194
	5h	26.247	1.660	0.900	0.040	1.072	0.411	8.508	5.066	2.158	0.526	0.135	0.635	1.578	4.442	0.328	3.895

Table 3. Selected physical properties and concentrations of major elements from the solvent samples after reaction experiments.

No.	Solvent Time	Ca (mg/l)	Fe (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	Si (mg/l)	T ($^{\circ}\text{C}$)	pH	Eh (mV)	EC ($\mu\text{s/cm}$)	Cl (mg/l)	F (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	SO ₄ (mg/l)
pH 6.2 Solvent	1/2h	0.072	0.026	0.115	0.012	3.840	2.517	29.1	5.62	80.7	13.0	nd	0.258	2.999	9.998
	1h	0.268	0.026	0.172	0.013	5.366	2.664	28.8	5.82	67.7	19.1	1.071	0.688	0.250	4.485
	2h	0.351	0.026	0.397	0.012	7.714	2.840	28.8	6.14	48.9	24.8	0.302	0.794	nd	6.188
	3h	0.424	0.026	0.388	0.011	9.600	2.951	28.3	6.26	41.1	29.4	1.324	0.179	1.894	2.662
	5h	0.476	0.032	0.753	0.012	12.302	3.135	29.6	6.35	38.5	38.8	0.819	1.509	2.149	4.728
pH 5.0 Solvent	1/2h	1.783	0.038	0.740	0.142	6.163	0.627	29.7	6.10	51.5	30.1	3.048	0.266	0.441	5.702
	1h	2.244	0.033	0.994	0.144	8.421	0.561	29.7	6.15	47.4	40.3	2.349	0.214	0.733	8.544
	2h	2.601	0.032	1.229	0.144	10.608	0.601	29.8	6.25	42.0	44.3	2.417	nd	0.898	10.454
	3h	2.769	0.032	1.401	0.139	12.124	0.636	29.8	6.38	33.4	50.7	3.818	0.542	2.995	6.290
	5h	2.742	0.038	1.655	0.128	14.320	0.972	31.4	6.42	31.3	58.5	4.362	0.887	3.742	7.110

nd; not detected

5.0 용매가 더 중성에 가까웠다. 한편 Eh는 용매제와 상관없이 함침시간에 반비례 형태로 감소하는 반면에 EC는 함침시간에 비례하는 방향으로 증가됨을 알 수 있었다. 그러나 온도는 특별한 관계가 없었다(Fig. 8).

이 석탑의 산화물 시료에서 용출된 이온들의 함량은 다음과 같고, 이에 대한 주성분의 양이온 함량을 살펴보면 pH 6.2 용매(평균 $Ca^{2+}=0.318$, $Fe^{n+}=0.027$, $K^+=0.365$, $Mg^{2+}=0.012$, $Na^+=7.764$, $Si^{2+}=2.821$ mg/l)를 사용한 것보다, pH 5.0 용매(평균 $Ca^{2+}=2.429$, $Fe^{n+}=0.035$, $K^+=1.204$, $Mg^{2+}=0.139$, $Na^+=10.327$, $Si^{2+}=0.679$ mg/l)에서 유리되는 함량이 전반적으로 높게 나타나고 있다. 이는 부채에 파괴된 오염물을 세정할 수 있는 능력이 큰 반면에 암석 구성광물을 쉽게 이온화시켜 조적이 파괴되거나 광물질의 변질을

을 유발하여 풍화를 가속화함으로써 더 큰 훼손을 유발시킬 수 있는 여지도 있다.

주목할 점은 풍화에 대한 저항력이 매우 강한 Si^{2+} 는 산성보다 중성수에서 탁월한 용출을 보이고 있음을 볼 수 있으며 유사한 실험결과가 나온 경우도 있다. 이와 비슷한 미량 양이온은 Al^{3+} , As^{2+} , Cr^{2+} , Se^{2+} 등이고 Cr^{2+} 는 용매제와 상관없이 거의 비슷하게 유리되고 있고, 대부분의 주성분 양이온처럼 pH 5.0 용매에서 용출함량이 높게 나타나고 있다. 이는 Lee *et al.* (2006a; 2006b)에 의해 보고된 석탑부재의 백화 오염물의 결과와 유사한 것이다. 용존 음이온의 경우는 Br^- 및 PO_4^{2-} 은 검출한계 미만이었고 NO_3^- , SO_4^{2-} 은 비교적 안정적인 검출을 보이나 pH 용매제와 무관하게 일정한 방향성이 없이 불규칙적으로 유리되는 경향을 보

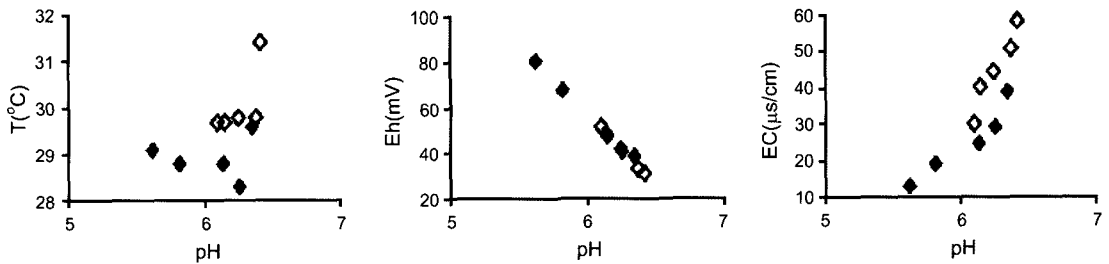


Fig. 8. Diagrams showing temperature, Eh and EC values versus pH of water samples after reaction experiments of oxidation samples for rock properties in the stone pagoda. ◆ ; pH 6.2 solvent, ◻ ; pH 5.0 solvent.

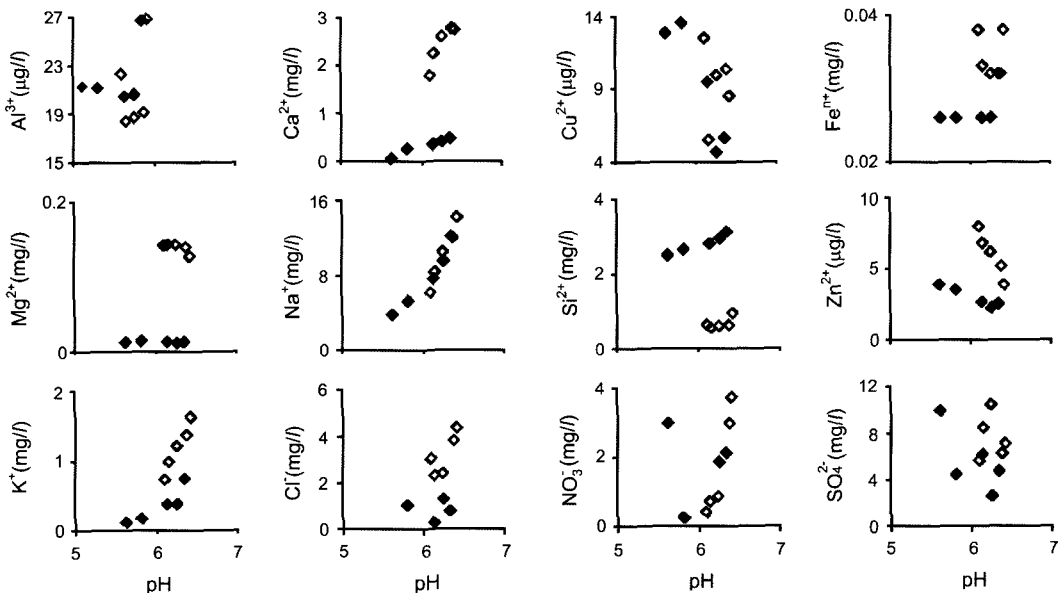


Fig. 9. Concentrations of cations and anions versus pH of solvent samples after reaction experiments of oxidation samples for rock properties in the stone pagoda. ◆ ; pH 6.2 solvent, ◻ ; pH 5.0 solvent.

였다. 그러나 Cl은 pH 5.0 용매에서 F는 pH 6.2 용매에서 높은 함량으로 검출되었다.

이처럼 피각된 수용성 무기 오염물질을 광물입자로부터 안정적으로 유리시키기 위해서는 대상 시료에 대한 용매제의 선택이 아주 중요하다. 따라서 각 이온들의 선택적 pH 범위의 상관성을 분석함으로써 제거

해야할 대상 오염의 특성을 규명할 수 있다. 각 이온들과 pH의 관계를 보면 As^{2+} , Ca^{2+} , Cr^{2+} , Mo^{2+} , Na^+ , K^+ , Rb^{2+} , Si^{2+} , Sn^{2+} , U^{+} 등은 정의 상관도를 나타내고 있는데 이중 As^{2+} 와 Cr^{2+} 을 제외한 이온들은 pH 5.0 용매제에서 용출능력이 좋다. Ba^{2+} 및 Zn^{2+} 은 부의 상관도를 가지고 있다. 일정범위 내에서

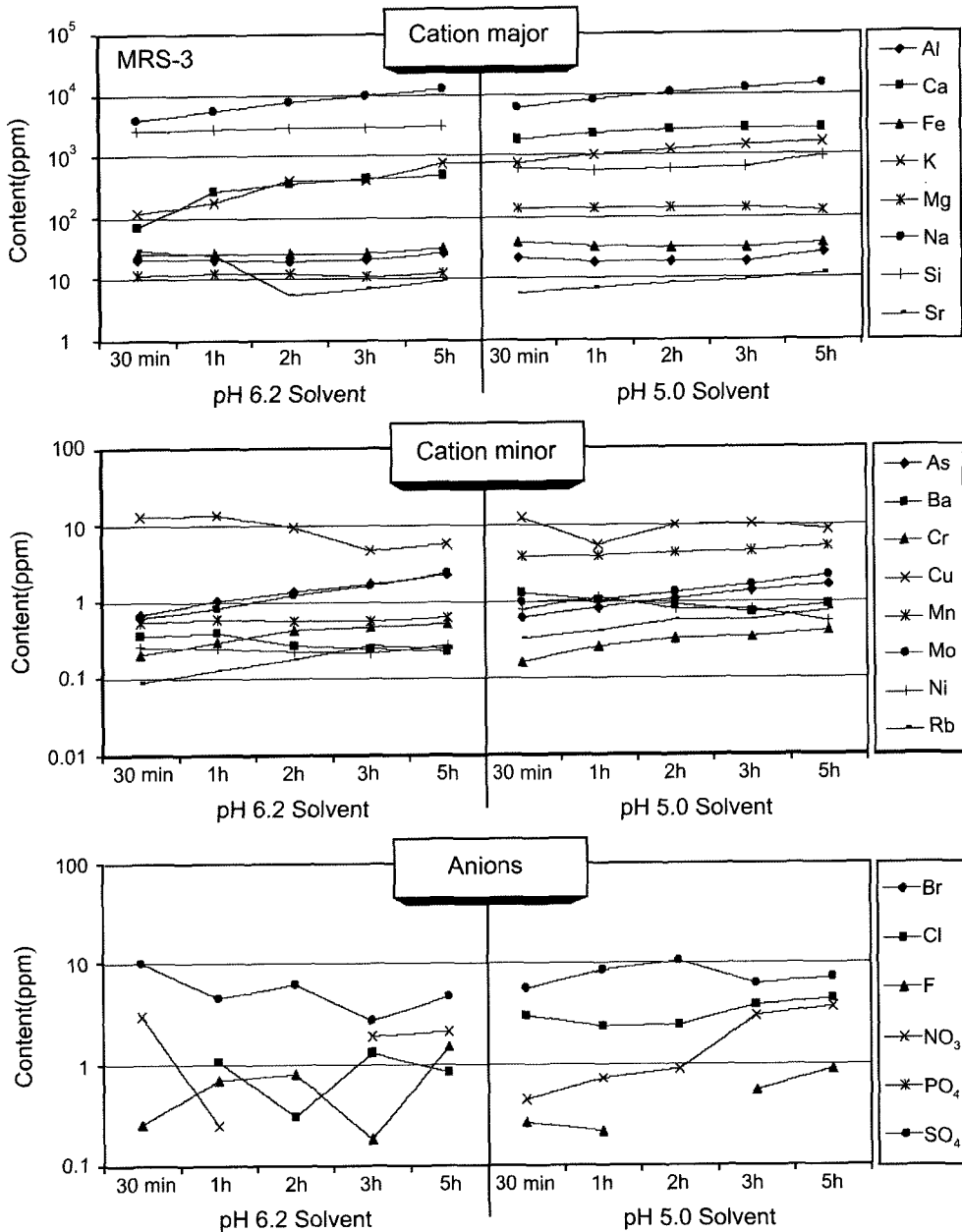


Fig. 10. Concentration variations of dissolved-ion with reaction time of solvent samples after reaction experiments of oxidation samples for rock properties in the stone pagoda.

용매제에 따라 정 및 부의 관계를 갖는 이온은 Cd^{2+} , Co^{2+} , Mn^{2+} , Pb^{2+} , NO_3^- 등이다. 그리고 pH와 무관하거나 불규칙적으로 용출되는 이온은 Al^{3+} , Cu^{2+} , Fe^{n+} , Ni^{2+} , Mg^{2+} , Se^{2+} , Sr^{2+} , F, Cl, SO_4^{2-} 등이다(Fig. 9).

5.2. 세정효과

모든 시료는 산화 변색된 부분이 포함되도록 박편으로 제작하고 함침시간별로 채수하여 용출된 수용성 무기오염물의 함량을 분석하는 것이다. 세정에 따른 가장 이상적인 반응시간과 효과를 얻을 수 있는 동시에 향후 직접적인 오염물을 대상으로 처리할 때 선택적 세정조건을 제한하여 착색이나 피각된 오염물을 제거할 수 있도록 고려하였다. 세정효과는 용매제의 선택에 따라 검출되는 이온함량이 달라짐을 분석결과를 통해 알 수 있다(Fig. 10). 전반적인 이온들은 pH 5.0 용매제를 사용하였을 때 높은 용출함량을 보였으나, 예외적으로 As, Cr, Si, F 이온들은 pH 6.2 용매제에서 높게 나타나기도 하였다.

특히 주목할 점은 Si 성분이다. 암석구성 광물중 가장 높은 성분비율을 가진 주성분으로 풍화에 아주 강한 광물이지만 산성비에 지속적으로 노출되면 광물이 화학적으로 용식될 수 있다. 이 연구결과에서도 대부분 예상과 같은 결과를 가져왔으나, Si는 예외적으로 산성용매제보다 중성 매질을 사용할 때 검출함량이 높았다. 또한 침지시간이 길어질수록 용매제와 상관없이 검출함량도 증가하는 의미 있는 결과가 도출되었다.

산화변색을 유발하는 철성분의 유리는 pH 5.0 용매제에서 반응성이 좋았으나 차별화된 매질은 되지 못하였다. 최초 30분 동안 침지하였을 때 가장 이상적인 용출능력을 보였으나 훼손에 대한 함침과의 상관관계가 없다면 5시간 이상으로 침지하면 더 많은 이온을 유리시킬 수 있을 것으로 판단된다. 양이온의 세정에 대한 거동특성을 살펴보면 침지시간이 길수록 효과가 좋은 이온으로는 Ca, K, Na, Si의 주원소와 As, Co, Cr, Mn, Mo, Sn, U의 미량원소가 여기에 속한다. 이와 반대되는 경향을 보이는 원소로는 Ba, Cu, Se, Zn으로 최초 30분~1시간 사이에서 가장 좋은 용출능력을 보여준다. 이외의 원소들은 반응시간과 무관하게 혼재된 양상을 떠나 경우에 따라 침지시간을 조절하면 많은 오염종을 부하시킬 수 있다.

음이온인 Cl, F, NO_3^- , SO_4^{2-} 등은 비교적 안정적으로 검출되었고 이외의 이온은 검출한계 미만이거나 불규칙적으로 검출되었다. 전반적으로 음이온을 세정하기

위해서는 용매제나 침지시간에 대한 사전 지식을 갖고 세정을 하여야 할 것으로 보인다. 따라서 착색이나 피각된 오염물을 제거하는데 사용될 용매제의 선택과 계획된 함침시간이 중요한 요소이다. 필요이상의 함침시간은 암석에 또 다른 이차적인 오염원을 제공할 수 있기 때문에 어떤 목적으로 특정오염물을 제거할 것인가를 설정하고 이에 맞는 조건이 충족될 수 있도록 해야 할 것이다.

6. 결 언

1. 익산 미륵사지 석탑의 구성암석은 담회색의 중립질 화강암이고 부분적으로 반상조직을 갖는다. 대부분의 조암광물은 풍화를 받아 입자경계면을 따라 이차적인 점토광물이 생성되었거나 벽개면을 따라 철-망간 수산화물과 녹니석으로 교대되었다.

2. 광물조직을 관찰한 결과, 표면의 오염물이 내부 조직까지 영향을 주지 않은 것으로 판단된다. CIA는 59.55~62.86로 신선한 화강암에 비해 매우 높은 화학적 풍화도를 보였으며, WPI는 2.64~4.65으로 전반적인 화학적 풍화민감도가 높은 것으로 나타났다.

3. 부재 표면의 산화변색 형태는 주로 대기에 직접 노출된 표면에 전면적, 부분적, 반점, 띠모양으로 표출되고 조암광물이나 조직의 변질 및 대기오염물질과 반응하여 황갈색, 적갈색, 흑갈색등과 같은 다양한 변색을 유발시켰다.

4. 석탑 부재의 압축강도 값은 151~1,975 kg/cm^2 의 범위이고 대부분 300~1,500 kg/cm^2 사이의 값을 갖는데, 산화현상을 보이는 변색부재의 범위는 244~1,510 kg/cm^2 이다. 주로 연암과 중경암 사이의 풍화를 받은 674~771 kg/cm^2 부분에서 집중적인 변색현상을 보였다.

5. 전암 대자율 분포는 0.17~7.78(10^{-3} SI unit)의 범위로 주로 80% 정도가 3.01~7.00에 속한다. 이 중 산화변색을 보이는 구간은 1.11~5.85으로 비교적 강한 자성을 가진 구간에서는 변색이 나타나지 않는 것으로 보아, 어느 정도 풍화과정을 거친 암석표면에서 발생할 확률이 높음을 보였다.

6. 수용성 오염물질을 세정하기 위한 용매제의 선택은 pH 6.2 보다 pH 5.0에서 전반적으로 용출 능력이 뛰어났으나 음이온의 경우는 대부분 불안정적으로 검출되는 경우가 많았다. 세정에 따른 pH와 물리적 특성을 보면 Eh는 명확한 부의 상관도를 가지며 EC는 정의 상관도를 가지나 온도는 특별한 상관도를 보여주지

않았다.

7. 수용성 오염물질을 세정하기 위한 함침시간은 초기 60분내에서 가장 많은 오염종이 부하되는 결과를 얻었다. 특히 철이온의 경우도 최초 30분 동안 침지하였을 때 가장 이상적인 용출능력을 보였다. 따라서 세정제를 수회 도포하는 방식으로 반복처리하면 산화변색된 부분과 더불어 부하된 오염물을 제거하는데 효과가 있을 것이다.

사 사

이 연구는 국립문화재연구소에서 수행하는 “석조문화재 보존처리를 위한 손상평가기술 연구개발 사업”과 공주대학교 “Star Project”의 지원으로 이루어졌음을 명기하며, 이 연구를 위해 보내주신 관계자 여러분의 관심과 격려에 깊이 감사드린다. 또한 원고의 세심한 심사와 건설적인 비평을 해주신 대전대학교 정찬호 교수님께도 감사드린다.

참고문헌

- Cho, K.M. and Jwa, Y.J. (2005) Study on the source area of the stones from stone cultural properties; geomorphological and petrological approach for the Iksan area. *Journal of Petrological Society of Korea*, v. 14, p. 24-37.
- Ishihara, S. (1977) The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geology*, v. 27, p. 293-305.
- Lee, D.S., Lee, C.H. and Kim, S.D. (2006a) Formation of efflorescence and dissolving experiments for removing control on the stone pagoda of the Mireuksaji temple site, Iksan, Korea. *Journal of Conservation Science*, v. 19, 5-18.
- Lee, D.S., Lee, C.H. and Kim, J. (2006b) Weathering impact for rock properties and material characteristics of concerts used stone pagoda of the Mireuksaji temple site, Iksan, Korea. *Economic and Environmental Geology*, v. 39, p. 285-299.
- Lisci, M., Monte, M. and Pacini, E. (2003) Lichens and higher plants and stone: a review. *International Biodegradation and Biodegradation*, v. 51, p. 1-17.
- Nesbitt, H.W. and Young, G.M. (1982) Early Proterozoic climate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, v. 299, p. 715-717.
- Nesbitt, H.W. and Young, G.M. (1984) Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, v. 48, p. 1523-1534.
- NRICP(National Research Institute of Cultural Properties) (2003) Report of the conservation and restoration for Iksan Mireuksaji stone pagoda I. National Research Institute of Cultural Properties, p. 237-268.
- NRICP(National Research Institute of Cultural Properties) (2004) Report of the conservation and restoration for Iksan Mireuksaji stone pagoda II. National Research Institute of Cultural Properties, p. 221-252.
- Yang, H.J., Kim, S.D., Lee, C.H. and Choi, S.W. (2004) Deterioration assessment and dissection process for rock properties of stone pagoda in the Mireuksaji temple site, Korea. *Journal of Conservation Science*, v. 16, p. 77-88.
- Yang, H.J., Lee, C.H., Choi, S.W. and Lee, M.S. (2006) Petrological characteristics and provenance presumption for rock properties of the stone pagoda in Mireuksaji temple site, Iksan, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, v. 42, p. 293-306.

2007년 6월 2일 원고접수, 2007년 8월 20일 게재승인.