

## 해수와 대기오염물질이 석조문화재에 미치는 영향: 감은사지 삼층석탑을 중심으로

정종현<sup>†</sup> · 손병현\* · 정민호\*\* · 임현호\*\*\* · 김경원\*\*\*\* · 김현규\*\*\*\*\*

서라벌대학 보건행정과, \*한서대학교 환경공학과, \*\*공주대학교 문화재보존과학과  
\*\*\*부산대학교 대기과학과, \*\*\*\*경주대학교 환경공학과, \*\*\*\*\*한국기초과학지원연구원 부산센터  
(2007. 4. 10. 접수/2007. 7. 24. 채택)

## Effects of Seawater and Air Pollutants on Stone Cultural Properties: Three-Story Stone Pagodas in Gameunsa Temple Site

Jong-Hyeon Jung<sup>†</sup> · Byung-Hyun Shon\* · Min-Ho Jung\*\* · Heon Ho Leem\*\*\* ·  
Kyung-Won Kim\*\*\*\* · Hyun-Gyu Kim\*\*\*\*\*

*Department of Health Administration, Sorabol College*

*\*Department of Environmental Engineering, Hanseo University*

*\*\*Department of Cultural Health Conservation Sciences, Kongju University*

*\*\*\*Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University*

*\*\*\*\*Department of Environmental Engineering, Gyeongju University*

*\*\*\*\*\*Korea Basic Science Institute, Busan Center*

(Received April 10, 2007/Accepted July 24, 2007)

### ABSTRACT

The effect of seawater and air pollutants on the three-story stone pagodas on Gameunsa Temple Site have been studied in order to establish conservation basic plan. Also, an experimental study has been conducted to evaluate the effect of seawater salt and air pollutants on the weathering of granite. The results could be summarized as follows. Because the three-story stone pagodas on Gameunsa Temple Site are located outdoors, the external appearance has been largely deteriorated due to natural and artificial factors such as typhoon, wind, microorganisms, moisture, extreme change in temperature, air pollutants, and seawater, etc. When G.J fresh granite was dipped into the seawater, dissolution rate of three minerals (Mg, Ca, and K) are increased linearly until about 40 days and then increased abruptly. After seawater dipping experiments, the mineral compositions of the granite surface were lower than that of the G.J fresh granite but Poisson's ratio and absorption ratio were slightly increased. Therefore, from these results we can say that stone cultural properties could be weathered by seawater and air pollutants and it's considered being a meaningful experiment to study the conservation method of stone cultural properties from seawater.

**Keywords :** Gameunsa Temple Site, three-story stone pagodas, seawater, weathering, salt content, granite, absorption ratio, stone cultural property

### I. 서 론

경주지역에 위치한 감은사지는 문무왕 후반기에 창건되기 시작하여 신문왕 2元年(682)에 완성된 호국사찰로

서, 2007년 현재 감은사지에는 신문왕 원년에 완성된 동·서 삼층석탑 2기와 금당지 및 회랑지가 정비되어 있다. 감은사지 동·서 삼층석탑의 가장 큰 특징은 각 부분들이 하나의 석재로 구성된 것이 아니라 수십 개의 석부재로 조립되었다는 것이다. 외부 환경에 노출되어 1,000여년 세월을 기온 변화와 태풍, 탑 표면의 생물학적 훼손, 주변지역의 지질과 구조상의 문제 등으로 인하여 감은사지 서 삼층석탑은 1959년 12월, 동 삼층

<sup>†</sup>Corresponding author : Department of Health Administration, Sorabol College  
Tel: 82-54-770-3713, Fax: 82-54-741-5429  
E-mail: airgas@sorabol.ac.kr

석탑은 1996년 4월에 해체 및 복원되었다.<sup>1,4)</sup> 문화재청과 경주시 및 국립문화재연구소에서는 감은사지 삼층석탑에 대한 보존 및 관리 방안의 일환으로 경주석탑 보수사업단을 구성하였다. 석조문화재의 과학적인 기초 조사를 위하여 감은사지 부지 내에 기상관측장비를 설치하여 기상 환경자료를 관측하고 있으며, 최근에는 풍화 훼손의 상대가 매우 심한 서 삼층석탑의 3층 부분을 해체하여 과학적으로 복원하기 위하여 실험 및 정비 공사를 진행하고 있는 실정이다.<sup>5,6)</sup>

또한, 경주지역에 소재한 우리나라의 대표적인 국보급 석조문화재들은 고고학·역사학·미술사학적 관점에서 연구가 진행되기는 하였으나, 석조문화재가 가지고 있는 재질의 특성 등 석재의 물성을 바탕으로 한 암석학적 풍화와 훼손보존에 대한 연구는 미진하다.<sup>7)</sup> 특히 석조문화재에 대한 풍화원인과 메커니즘을 규명하기 위한 연구는 부족한 실정이다. 이와 함께 감은사지 석탑의 경우 지리적으로 바다와 인접해 있어 염 및 염화나트륨, 태풍, 기온변화, 미생물 및 환경오염물질 등의 원인으로 인하여 세계적인 국보급 문화유산이 크게 훼손되고 있으나, 이러한 문제점을 해결하기 위한 기초연구는 초보적인 단계에 있다.

따라서 본 연구에서는 우리민족의 대표적인 문화유산인 감은사지 삼층석탑을 보다 효과적으로 보존하기 위한 기초연구의 일환으로, 감은사지 서 삼층석탑에서 탈락된 암편을 이용하여 물리·화학적 특성을 조사하였고, 감은사지 삼층석탑 표면 암석에서 진행되는 생물학적 훼손현상을 조사하였으며, 이와 함께 풍화가 석조문화재에 미치는 영향인자 중에서 해수와 대기오염물질 등이 석조문화재에 미치는 영향을 확인하였다. 이를 위하여 석조문화재와 같은 재질의 경주산 화강암을 이용하여 신라 문무왕 수중릉(水中陵) 인근지역에서 채취한 해수에 침수시킨 후 시간의 경과에 따른 화강암 구성광물의 변화를 조사하여 화강암의 물성분석을 수행하였으며, 이를 바탕으로 바다물이 석조문화재의 훼손에 미치는 영향을 환경학적인 측면에서 고찰하여 향후 감은사지 삼층석탑 및 바닷가 인근지역에 위치한 기타 석조문화재를 보존하기 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

## II. 연구대상 및 방법

### 1. 연구대상

우리나라의 문화재는 그 중요도에 따라 국가 지정 문화재와 시도 지정 문화재로 구분할 수 있다. 국보 및 보물로 지정된 석조문화재는 우리나라 전역에 다수 분

포되어 있으며, 본 연구에서는 경상북도 경주시 양북면 용당리 15-1번지에 위치한 국보 제112호 문화재인 감은사지 삼층석탑을 선정하였다.

### 2. 물성분석 및 측정실험

본 연구에서는 감은사지 삼층석탑과 환경오염과의 상관관계를 규명하기 위한 기초연구의 일환으로 감은사지 삼층석탑에서 탈락된 암석 시편 및 이와 유사한 경주지역 화강암에 대한 물리·화학적 특성을 조사하여 비교하였다. 경주지역 화강암은 경주에 위치한 석재회사에 의뢰하여 국제암반공학회(ISRM, 1981)에서 제안한<sup>8)</sup> 6단계의 기준 중에서 F(Fresh) 등급의 화강암 석재를 선택하였으며, 시료의 화학분석은 기초과학지원연구원 부산분원과 한서대학교 기술혁신센터에 의뢰하여 유도결합 플라즈마 방출분광기(ICP, model : ICP-IRIS, Thermo Jerrell Ash社)와 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS, model : MLAN 6100, PERKIN ELMER社), 원자흡수분광기(AA, model : AA SCAN 1 and Smith-Hieftic 4000, Thermo Jerrell Ash社), X-선 회절분석기(XRD, model : D/MAX 2200+ULTIMA) 등을 이용하여 정량분석하였다. 이와 함께 편광현미경은 자동계수기(mechanical counter)가 장착된 Nikon社의 Eclipse E600W 편광/현사 현미경을 사용하였다. 또한, 감은사지 삼층석탑 표면 암석에서 진행되는 생물학적 훼손현상을 조사하기 위하여 표면 암석에서 채취한 미생물을 현미경을 이용하여 분석하였다.

한편, 경주시 대기질 현황을 분석하기 위하여 대기측정차량을 이용하였으며, 대기질 조사는 2006년 12월 6일~7일에 실시하였다. 경주지역 및 감은사지 석탑 주변의 풍향 및 풍속 등 대기질 현황을 비교하기 위해 본 연구자의 이전의 자료<sup>9)</sup>와 감은사지 삼층석탑 인근에서 조사된 측정자료<sup>10,11)</sup>를 비교 및 분석하였다. 대기질 측정차량을 이용한 측정항목<sup>12,13)</sup>은 환경정책기본법에 준하여 총 6개 항목을 분석하였다. 각 항목별 측정장비 중 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>는 미국 API社(Model : 400A)와 ML社(Model : ML9810B)의 분석기를 이용하였으며, PM<sub>10</sub>은 미국 MET ONE社(Model : BAM-1020)와 Andersen社(Model : FH62C14)의 분석기를 이용하였으며, 문화재청에 요청하여 제공받은 감은사지 부지 내 기상관측장비에서 확보한 기초자료는 제한적으로 활용하였다.

또한, 본 연구에서는 경북 경주시 양북면(陽北面) 봉길리(奉吉里) 앞바다에 있는 신라 문무왕 수중릉(水中陵) 인근지역에서 해수를 채취하여 시료로 사용하였다. 또한, 해수가 화강암에 미치는 영향을 조사하기 위

하여 석조문화재와 같은 산지의 화강암을 채취하여 감은사지 인근지역에서 채취한 해수에 4~8주간 침수하여 시간의 경과에 따른 물성의 변화를 조사하였다. 한편, 시료의 형태는 실험의 특성과 물성분석에 맞게 정육면체 형태로 제작하였으며, 실험 전·후 경주 화강암 시료의 물리적 특성을 파악하고, 특히 해수 및 염분에 의한 화강암 내구성의 변화 및 인공적으로 침수된 화강암의 풍화일수의 증가에 따른 화강암 시료의 흡수율의 변화를 조사하기 위하여 밀도, 흡수율, Poisson비 등을 한국공업규격 KS-F 2518, 2519(석재의 물리적 시험법)에 준하여 측정하였다. 이와 함께 해수의 금속이온은 기초과학지원연구원 대덕본원의 유도결합 플라즈마 질량분석기(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, X-series(X5, X7), VG Elemental Ltd.) 등을 이용하여 분석하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 감은사지 석탑 및 주변지역 영향분석

감은사지 삼층석탑은 오랫동안 자연에 노출되어 있으면서 지속적인 creep 현상으로 인한 부재의 이완과 파손, 풍화현상 등으로 인하여 붕괴의 위험에 처해 왔다. Fig. 1(A)에서는 경주 감은사지 동 삼층석탑(국보 제 112호)의 외부전경을 나타낸 것이다. 동 삼층석탑은 1990년대 붕괴 위험이 대두되어 1996년에 해체 및 복원 되었으나, 2002년 태풍과 석탑 강도 저하현상의 영향으로 인하여 1층 부분 옥개석 받침돌 일부가 탑신에서 분리되었고, 그 이후에도 석조물 일부에서 부재 탈락현상이 발생하고 있는 실정이다. Fig. 1(B)와 (C)에서는 감은사지 삼층석탑의 훼손현황을 나타내었으며, 감은사지 동탑은 옥개석의 받침돌 일부가 탑신에서 떨어져 나가 큰 돌덩어리 3개와 작은 파편들로 부서지는 등 부재 탈락현상을 나타내고 있으며, 최근 태풍 및 해양 등의 영향으로 급격하게 풍화 및 훼손이 진행되고 있는 실정이다. 특히 감은사지 동 삼층석탑 북측면 동쪽의 상층 기단면석 상단부와 북서측면 2층 탑신석 상단부 등 2곳에서 괴상박리와 균열이 진행되어 2005년 8월 국립경주문화재연구소가 보수작업을 펼치기도 하였으나, 감은사지 삼층석탑 옥개 받침석에 구멍이 생기는 등 삼층석탑의 훼손이 심각하게 진행<sup>1,5,6)</sup> 중인 것으로 확인되었다.

Fig. 2에서는 감은사지 서 삼층석탑 표면 암석의 훼손 양상을 조사하여 나타내었다. 서 삼층석탑을 복원한 지 40여년이 지난 탑의 내부에 설치된 고임쇠가 탑의 집중하중에 의하여 서면 옥개 받침석 일부가 떨어지는

현상이 발생하기도 하였으며, 석재 부재의 강도 저하 및 3층 옥개석의 일부가 부서져 탈락하는 상황에 처하기도 하였다. 2007년 현재 감은사지 서 삼층석탑은 해체 및 보수 정비공사가 진행 중에 있으며, 그 동안 태풍, 빗물, 기온변화, 생물 서식, 대기오염물질, 해수분무 및 염분 등에 의한 감은사지 서 삼층석탑의 훼손이 가속화되어 왔다. 감은사지 서 삼층석탑의 기단부는 담회색과 담갈색을 띠고 있고,<sup>1,5,6,14,15)</sup> 기단부와 다수의 부재들에서 부분적인 선택 풍화가 확인되었다. 이와 함께 심한 박리/박락현상과 황색변화, 황색피각, 흑색피각들이 혼재하여 복합적으로 발생하고 있으며, 전체적으로 탑의 표면에서 고착·엽상지의류가 확인되었고, 부재 사이에 선태류와 초본식물이 자생하고 있으며, 풍화작용에 의하여 탑의 손실된 부분에서는 콘크리트 모르타르로 성형된 부분이 일부 확인되었다. 따라서 감은사지 삼층석탑은 옥외에 노출된 상태로 다양한 기계적, 물리·화학적 풍화현상이 진행되고 있으며, 특히 부재 표면에 미세균열이 발달되어 있는데 수평균열과 수직균열들이 다양한 형태로 진행되고 있다. 또한, 암석의 차별적인 풍화로 인하여 상대적으로 풍화에 약한 엽기성 포획암이 탈락되어 발생한 공동현상, 균열, 박리 및 부재의 탈락과 결실로 인하여 부재간의 이격현상도 확인되었으며, 이외에도 표면에는 마모와 입상분해가 전반적으로 진행되고 있는 것으로 조사되었고, 기타 물리·화학 및 생물학적 풍화작용으로 인하여 석재의 성분, 성질 및 조직 등에 많은 변화가 초래되고 있는 것으로 확인되었다.

Table 1에서는 대기오염도를 확인하기 위해 경주역 광장에서 측정된 대기질 분석결과(G.J A)와 감은사지 삼층석탑이 위치한 인근지역의 대기질 측정자료(G.J B, G.J C)를 비교하여 나타내었다. 대기측정차량을 이용하여 측정된 자료와 이전의 자료<sup>9)</sup>를 비교한 경주지역의 대기오염물질 농도는 PM<sub>10</sub>은 37.5~80.5 µg/m<sup>3</sup>, SO<sub>2</sub>는 0.003~0.016 ppm, NO<sub>2</sub>는 0.014~0.039 ppm, CO는 0.7~1.4 ppm, O<sub>3</sub>는 0.011~0.025 ppm의 분포를 나타내었다. 최근 환경정책기본법 제 10조 제 2항, 동법 시행령 제 2조 규정에 의하면 PM<sub>10</sub>의 연간평균치(50 µg/m<sup>3</sup> 이하)와 24시간평균치(100 µg/m<sup>3</sup> 이하)가 대폭 강화되었으나, 경주시는 2007년 현재 B-C 0.5% 이하 중유 공급사용 지역으로 규정되어 있으며, 대기오염물질을 다량 발생하는 B-C 0.5% 이하 중유를 다수의 아파트, 산업체, 목욕탕, 숙박시설(호텔, 콘도, 유스호텔) 등에서 자유롭게 사용하고 있다. 향후 경주지역 주민의 건강에 막대한 위해를 유발하며, 환경오염물질을 다량 발생하는 B-C 0.5% 중유의 사용을 적극적으로 관리하여

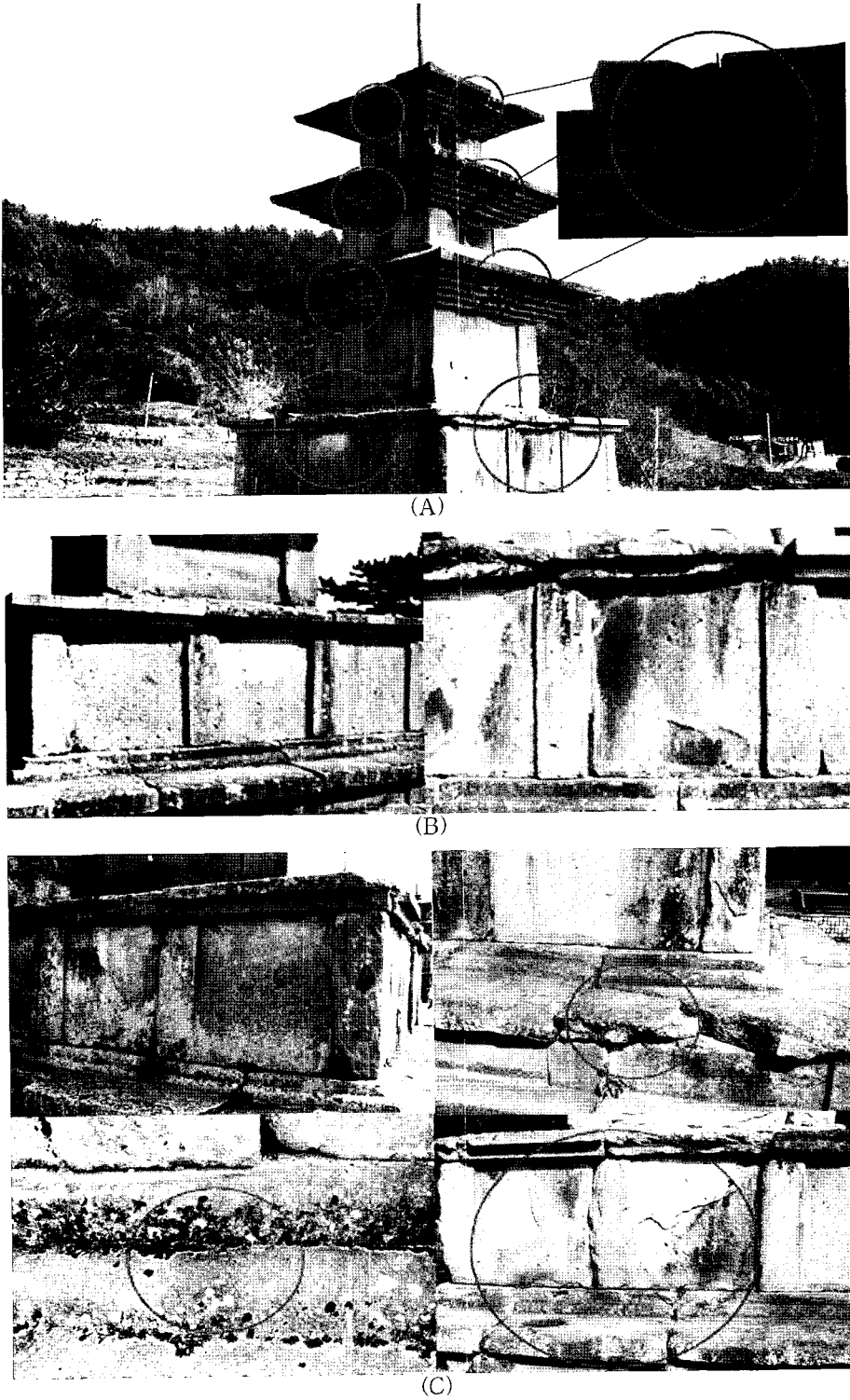


Fig. 1. Eastern and western three-story stone pagodas in Gameunsa Temple Site in Gyeongju.

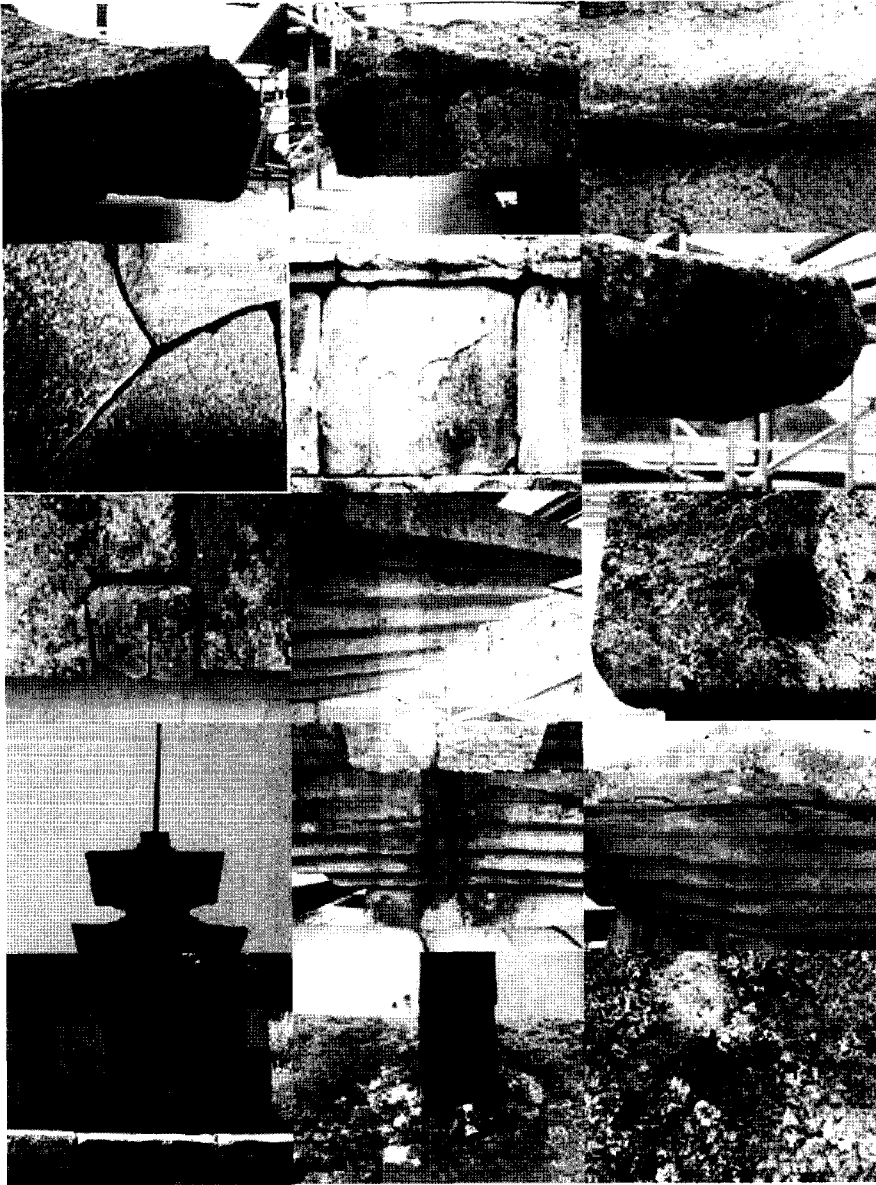


Fig. 2. Western three-story stone pagodas in Gameunsa Temple Site in Gyeongju.

Table 1. The air pollutants concentrations in Gameunsa Temple Site and boundary

Sampling site	Pollutant	TSP ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SO <sub>2</sub> (ppm)	O <sub>3</sub> (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)	CO (ppm)	Pb ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
G.J A	2006	108.1	67.0	0.009	0.011	0.039	1.1	-
	2003	80.1	37.5	0.003	0.019	0.015	1.03	0.025
G.J B	2006 <sup>(11)</sup>	-	150.0	0.005	0.016	0.024	0.5	-
G.J C	2006 <sup>(11)</sup>	-	67.0	0.004	0.026	0.018	0.5	-
	2001 <sup>(10)</sup>	73.6	43.3	0.011	0.010	0.013	1.1	0.012

야 할 시점이며,<sup>16)</sup> 환경부와 문화재청 및 경주시는 향후 보다 적극적인 대책을 수립하여야 할 시점이다. 이와 함께 감은사지 삼층석탑 및 주변지역에서 조사된 측정자료<sup>10,11)</sup>를 비교한 대기오염물질 농도는 PM<sub>10</sub>은 43.3~150 µg/m<sup>3</sup>, SO<sub>2</sub>는 0.004~0.011 ppm, NO<sub>2</sub>는 0.013~0.024 ppm, CO는 0.5~1.1 ppm, O<sub>3</sub>은 0.010~0.026 ppm의 분포를 나타내었으며, PM<sub>10</sub>의 농도가 일부 높게 나타난 것은 감은사지 삼층석탑 주변지역에서 굴착공사가 일부 기간 동안 진행되었기 때문인 것으로 판단되며, 나머지 기간 동안의 대기오염물질 농도는 모두 낮은 상태를 나타내었다. 감은사지 삼층석탑 주변지역의 대기질 상태는 양호한 오염도를 나타내었고, 대기환경보전법상 기준치 이하인 것으로 확인되었다.

한편, 감은사지 삼층석탑 주변의 대기질 뿐만 아니라 대기유동장 및 기상상태와 대기오염물질의 거동 및 2차적인 대기화학적 반응 등은 석탑에 중요한 영향을 미치는 요소이다. 해수가 감은사지 삼층석탑에 미치는 영향에 대한 원인을 정확히 규명하기 위해서는 얼마나 많은 해수의 염분이 어떠한 경로를 통하여 감은사지 삼층석탑에 침적되는지를 이해하는 과정이 필요하며, 이는 태풍을 포함한 강수와 해풍 등 대기유동장 및 기상상태에 의해 주로 이루어지기 때문이다. 그러나 감은사지 삼층석탑의 보존적 측면에서 대기유동장 및 기상상태가 중요한 환경요소임에도 불구하고 이를 정량적으

로 분석하기란 어려운 실정이다. 경주지역 기상관측 현황을 살펴보면 기상청 산하의 유인관측소가 없는 가운데 감포 등을 비롯한 경주시 외곽의 5~6 지점에서의 자동기상관측만이 이루어지고 있는 실정이다. 특히 경주시내의 경우 성건동에 위치한 환경부 산하의 지역대기 측정소에서만 조사가 이루어지고 있으며, 태백산맥 말단에 위치한 주변의 산 및 구릉지역의 영향과 경주지역이 위치한 지리적, 지형적 특성으로 인하여 대기운동은 해륙풍 및 산곡풍 등의 중규모 순환이 존재함은 물론 포항 및 울산지역으로부터 형성된 저지대의 수렴성까지 존재하는 매우 복잡한 양상을 가지고 있을 것으로 판단되어진다. 이러한 이유로 감은사지 삼층석탑에 영향을 미치는 대기유동장 및 기상상태 대한 정성적 분석을 수행하였다.

이전의 연구<sup>15,17,18)</sup>에서 확인된 바와 같이 해수에 포함된 염분은 수백 km까지 영향을 미치는 것으로 조사되었으며, 바닷물에서 기인한 이온(Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)들이 바다에서 멀리 떨어질수록(~45 km) 염분의 영향은 감소하는 경향을 보였으며, 각각의 원소들이 바닷물과 밀접한 관련이 있는 것으로 조사되었고, 감은사지의 경우 인근 바닷가로부터 1 km 이내에 위치하고 있으므로 염의 영향을 많이 받았을 것으로 사료되며, 바닷물에서 기인한 염의 농도는 해염입자의 수송 뿐 아니라 풍속 및 태풍 등의 영향과 함께 복합적으로 작용하는 것으

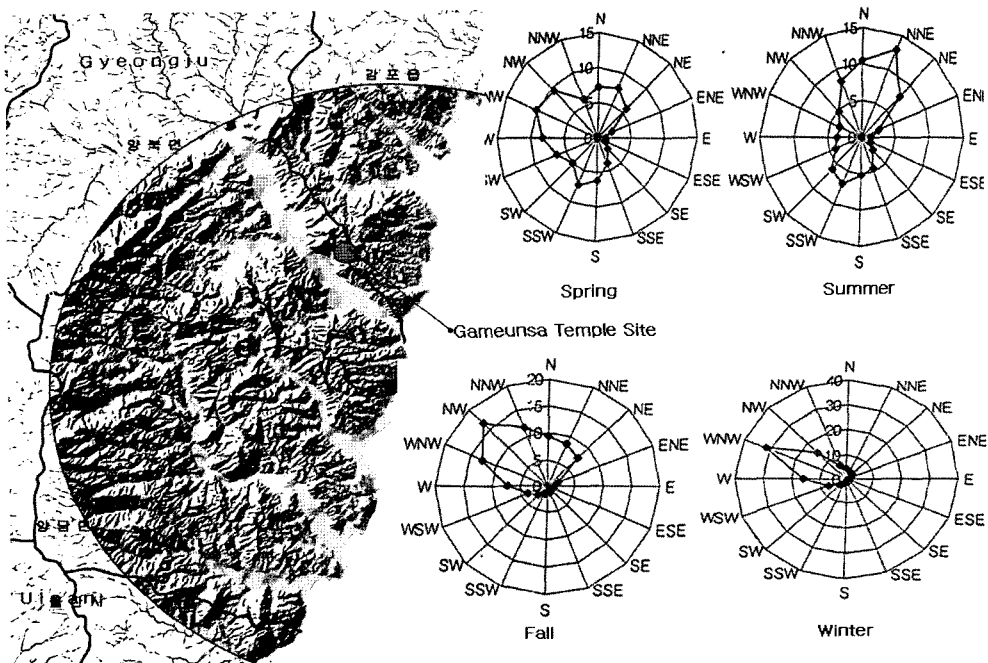


Fig. 3. The wind roses at Gameunsa Temple Site in Gyeongju.

로 판단된다. 감은사지 삼층석탑은 태풍 OLGA(1999), RUSA(2002), MAEMI(2003), NABI(2005), EWINIAR(2006) 등의 영향으로 직접적인 피해가 초래 되었으며, 평상시에도 감은사지 삼층석탑 주변지역에는 강한 바람과 함께 해염입자 등의 유입 및 침적으로 인하여 Fig. 1(A)에서 조사된 바와 같이 삼층석탑 훼손이 심각하게 진행되고 있는 것으로 판단되며, 이러한 경향은 감은사지 삼층석탑 옥계석의 받침돌 파손 및 부재 탈락현상 등으로 확인되었다. 또한, 태풍과 함께 경주지역에 내린 강우 가운데 지형적 영향으로 인한 북동기류가 발생시킨 국지적 강우 또한 동해상의 해염입자를 다수 포함한 습윤한 공기의 응결로 인해 형성된 것이므로 감은사지 삼층석탑에 염분을 전달 및 침적하게 하는 원인이자로 작용하는 것으로 판단된다.

Fig. 3에서는 감은사지 삼층석탑에 영향을 미치는 바람의 영향을 살펴보기 위하여 감은사지 삼층석탑 인근 지역에서 관측한 결과를 바람장미도로 나타내었다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 감은사지 삼층석탑 인근의 풍향 및 풍속의 발생빈도를 비교·분석한 결과, 모든 기간에 걸쳐 서북서풍(WNW) 및 북서풍(NW)이 가장 많은 빈도를 나타낸 가운데 다음으로 북북동풍(NE)이 많은 발생하였음을 알 수 있다. 특히 봄철, 여름철, 가을철에 걸쳐 관측된 북북동풍(NE) 및 남남서(SSW) 풍의 경우 포함 및 울산지역에서 형성된 해풍이 경주지역으로 유입된 것으로 사료된다. 특히 동해상에 인접한 감은사지 삼층석탑의 경우 대기유동장 및 기상상태 등으로 인하여 해수 위의 염분 등이 다량 유입되고, 이로 인한 감은사지 삼층석탑 암석의 조암광물은 입자간 조적을 느슨하게 만들어 입상분해를 촉진시키며, 암석의 표면을 용해하여 변색을 유발시키고, 다양한 침전물의

접착과 오염물질을 피복시키며, 이차오염에 의한 표면 변색과 풍화를 촉진되는 것으로 사료된다. 이와 함께 최근 들어 인근 도시지역 공단에서 발생된 환경오염물질의 영향<sup>9)</sup>으로 인하여 감은사지 삼층석탑의 부식현상과 풍화작용 등에 의하여 감은사지 삼층석탑이 영향을 받는 것으로 판단된다.

2. 물성분석

감은사지 삼층석탑에 사용된 석재는 인근지역에서 산출되는 석영안산암질 응회암(dacitic tuff)으로 반상조적을 가진 화산암의 일종이다. Table 2에서는 감은사지 삼층석탑에서 탈락된 암석 시편과 경주지역에서 채취한 화강암류의 물성분석을 결과를 비교하여 나타낸 것이며, Fig. 4(A)와 Fig. 4(B)에서는 편광현미경과 X-선 회절분석기를 이용하여 조사한 감은사지 삼층석탑의 결정구조를 나타내었다.<sup>19,20)</sup> 석영안산암질 응회암의 편광현미경 사진과 조암광물 부물성비를 조사한 결과, Bi는 흑운모, St는 스틸바이트, Hb는 각섬석, PI는 사장암(斜長岩), Qz는 석영성분이며, 감은사지 삼층석탑은 사장석, 흑운모 및 각섬석 등으로 구성되어 있으며, 바탕은 미정질 내지 유리질로 구성되어 있는 것으로 조사되었다. Fig. 4(C)에서는 감은사지 삼층석탑의 결정구조 분석결과를 나타내었으며, 감은사지 삼층석탑의 광물조성 및 결정구조 분석결과 anorthosite와 muscovite가 확인되었다. 또한, 감은사지 삼층석탑과의 물성<sup>19,21)</sup> 비교를 위하여 경주지역 4군데 석재 산지에서 채취한 화강암류(GJ D, GJ E, GJ F, GJ G)와 성분을 비교한 결과, 실리카(SiO<sub>2</sub>), 알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 산화 제2철(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 등이 전체의 80~90%를 차지하는 주성분이며, 그 밖의 성분으로는 CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O 등의 산화물이 존

Table 2. Analysis of three-story pagodas on Gameunsa Temple Site, Gyeongju (wt.%)

		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	LOI	Total
Western three-story pagoda in Gameunsa Temple Site	A	51.05	27.4	4.32	0.11	0.89	4.89	0.91	-	5.02	4.42	-	99.01
	B <sup>19)</sup>	66.49	15.68	3.34	0.11	0.36	3.32	0.87	0.34	3.89	2.81	2.69	99.9
	C	67.73	15.71	3.51	0.08	0.36	2.80	0.78	0.16	4.09	3.03	2.05	100.3
	D	66.66	15.66	3.81	0.08	0.39	3.00	0.94	0.15	4.01	2.78	2.37	99.85
	E <sup>19)</sup>	65.10	17.04	3.52	0.11	0.46	3.29	1.23	0.17	4.49	2.38	2.37	100.16
	F <sup>5,6)</sup>	66.58	15.87	3.24	0.06	0.35	3.00	0.67	0.17	3.93	2.74	2.45	99.06
Eastern three-story pagoda in Gameunsa Temple Site <sup>5,6,20)</sup>		62.13	15.07	3.55	0.54	0.82	3.10	1.25	0.81	4.23	3.40	1.22	94.9
		67.32	15.85	3.76	0.05	0.36	2.75	0.46	0.21	3.98	2.84	-	97.58
G.J	D	68.86	16.23	2.41	0.06	0.33	2.45	0.75	0.09	4.80	2.76	0.86	99.6
	E	72.46	14.31	1.76	0.05	0.32	1.97	0.90	0.08	3.75	3.27	0.76	99.63
	F	72.78	14.44	1.55	0.05	0.27	2.02	0.76	0.07	4.28	2.80	-	99.02
	G	71.32	15.09	1.77	0.05	0.25	2.07	0.67	0.07	4.38	3.06	0.87	99.6

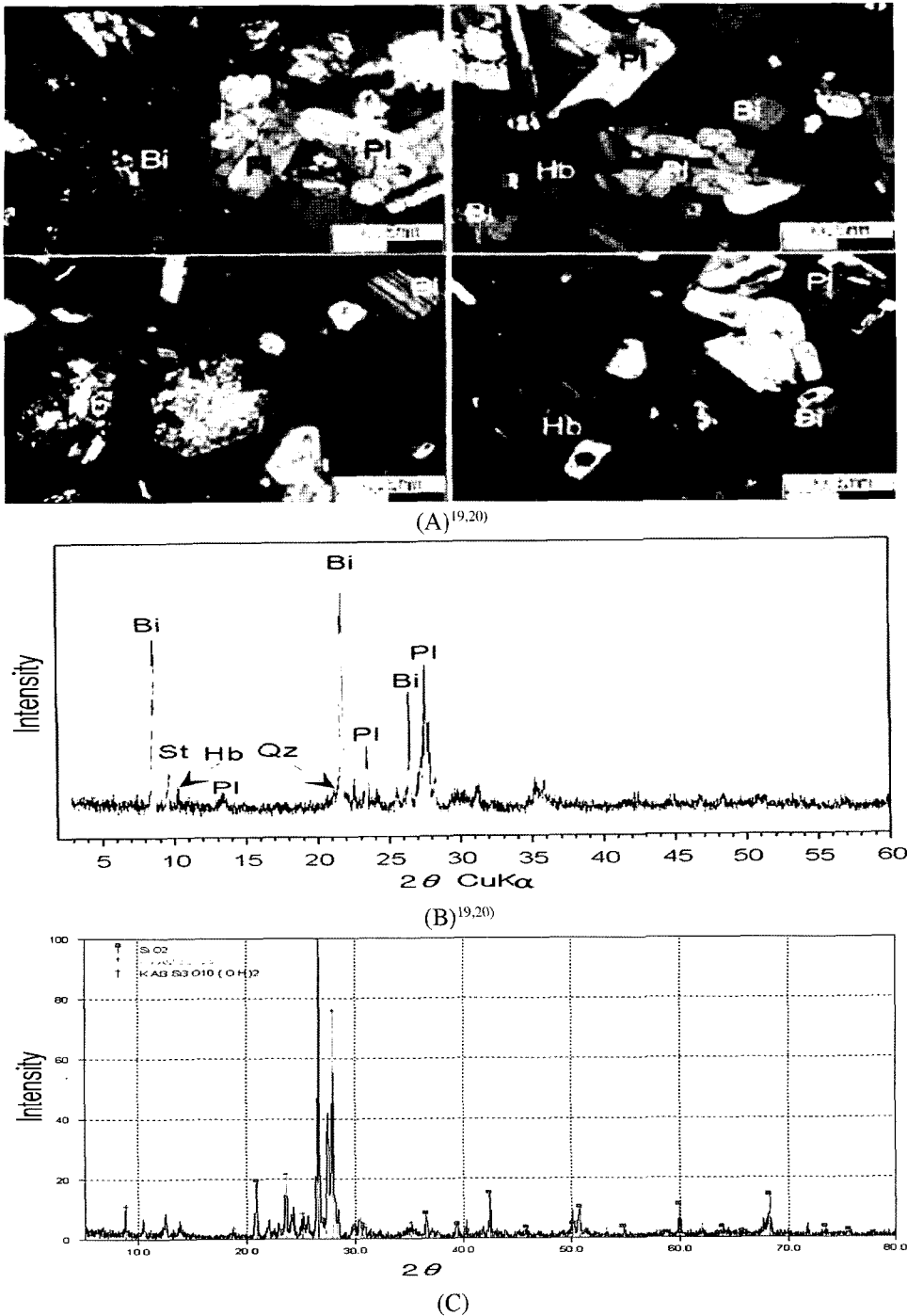
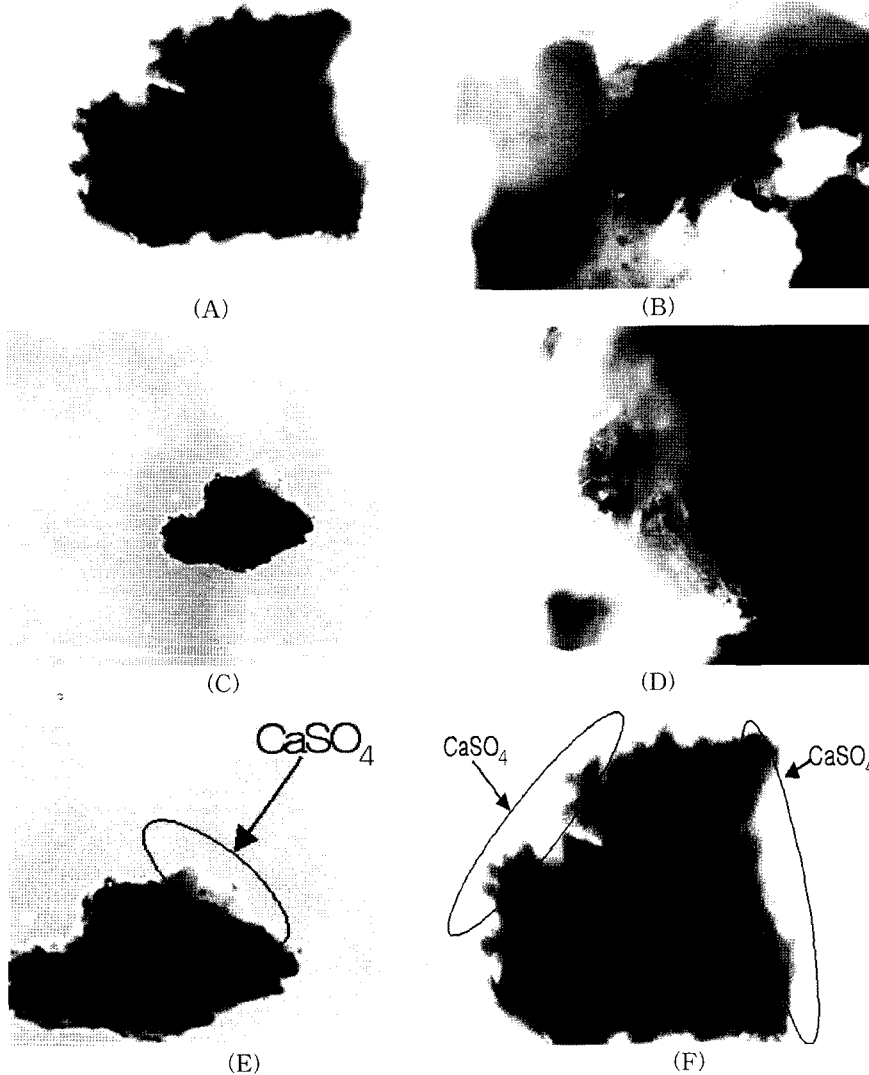


Fig. 4. XRD and microphotograph profile of western three-story stone pagodas on Gameunsa Temple Site.

재하였다. 특히 경주지역 4군데 석재 산지에서 채취한 경주화강암의 조성은 실리카( $\text{SiO}_2$ )가 68.86~72.78 wt%로서 거의 균질한 조성을 보이고 있으며, 알루미늄

( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )의 함량도 14.31~16.23 wt%로서 전형적인 화강암의 범위를 나타내었다. 또한,  $\text{Na}_2\text{O}$ 와  $\text{K}_2\text{O}$ 의 함량은 각각 3.75~4.80 wt%, 2.76~3.27 wt%이었으며, 산화 제





**Fig. 5.** Biodegradation characteristics and physicochemical reactions of eastern three-story pagodas on Gameunsa Temple Site in Gyeongju.

2철( $Fe_2O_3$ )의 함량도 1.55~2.41 wt%로서 화강암의 전형적인 성질을 나타내고 있다.

한편, 물성분석에서는 다소 차이가 있지만 감은사지 삼층석탑은 석영안산암질 용결 은회암과 함께 흑운모를 소량 함유하고 있는 중립/조립질의 석영이 풍부한 화강암으로 구성되어 있다. 그러나 경주지역에서 채취한 화강암과는 달리 1,000여 년간의 세월과 바닷물, 염분, 태풍, 미생물, 빗물, 습기, 산성비, 풍화, 기온변화, 대기오염물질 등의 영향으로 인하여 감은사지 삼층석탑 표면에서는 광물질이 빠져나가 재질이 연약해지는

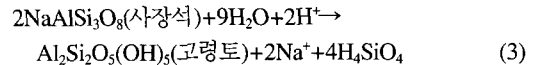
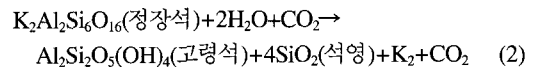
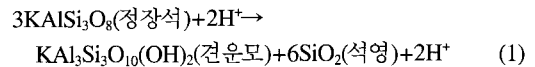
현상이 확인되었으며, 특히 구성 성분 중 실리카( $SiO_2$ ) 등 일부 성분은 용출현상이 가속화되고 있는 것으로 Table 2에서 일부 확인할 수 있었다. 따라서 감은사지 삼층석탑의 성분 및 조직이 경주지역에서 채취한 화강암과 비교하여 상대적으로 물리·화학적 풍화가 진행되고 있는 것으로 사료된다. Fig. 5에서는 감은사지 삼층석탑에서 진행되는 생물학적 훼손현상을 조사하기 위하여 Fig. 1(C)와 Fig. 2에서 확인 및 채취한 시료를 현미경을 이용하여 분석하였다. 감은사지 삼층석탑의 기단부는 여러 색상의 변색이 관찰되고 있으며, 표면박

리와 박탈현상이 심각하여 풍화훼손의 상태가 심각한 실정이다. Fig. 5(A)와 Fig. 5(C)에서는 gypsum과 클로로필(엽록소)을 가진 조류(algae)가 감은사지 삼층석탑에 공생하는 것으로 보이며, Fig. 5(B)와 Fig. 5(D)에는 감은사지 삼층석탑에 공생하는 이끼류의 밑 부분을 촬영한 것으로서 균류(fungi) 등의 공생미생물이 부착되어 있는 것으로 보이며, 감은사지 삼층석탑에 서식하는 생물은 조류·균류·지의류·이끼류 등의 혼합체인 것으로 나타났다.

전체적으로 감은사지 삼층석탑에 서식하는 서식양태는 이끼의 뿌리부가 석조문화재의 표면에 서식하는 형태이며, 곰팡이들이 이끼류와 공생하고 있는 것으로 확인되었으며, 일부 조류를 포함하는 지의류들이 감은사지 삼층석탑에 존재하는 것으로 확인되었다. 우리나라 석조문화재에 나타나는 지의류는 암석표면에서 생육하며, 엽상이거나 표면에 흩뿌려진 형태로 성장하며, 밝은 녹색 또는 회녹색의 엽상 형태의 지의류는 쉽게 제거되나, 석조문화재의 요철면에 버짐처럼 번져나가는 경우에는 제거하기가 매우 어려우며, 지의류를 제거한 경우에도 석조문화재 표면에는 녹갈색, 연녹색, 하얀색, 황색 및 회색 등의 반점이 남기도 한다. 또한, 지의류는 석조문화재 표면에 깊숙이 박혀 생육하기 때문에 암석 표면에 완전히 고착하기도 하며, 풍화된 석조물 표면에 지의류가 암석 입자를 함유하고 분리 및 이탈되어 박리현상 및 석조문화재의 외관을 훼손시키기도 한다.<sup>22)</sup> 또한, 조류·균류·이끼류 등은 유기산을 생성하여 외부에 분비하므로 감은사지 삼층석탑에 영향을 미치게 되며, 이로 인하여 표면박리와 박탈현상이 가중되어 풍화훼손이 증가되며, 균류는 옥살산(oxalic acid)과 구연산(citric acid) 등을 생성하여 화강암, 대리석, 석회석 등의 훼손을 가속화시킨다. 조류·균류·지의류·이끼류 등으로부터 발생하는 이러한 유기산들은 Fig. 5(E)와 Fig. 5(F)에서 나타낸 바와 같이 조류·균류 등이 산성물질 및 기타 화학적 변형물질과 복합적으로 접촉하게 되며, 석조문화재 표면 성분 중 칼슘 계열의 성분을 용해시키고, 알루미늄(Al) 같은 금속이온을 킬레이트(chelate)화하여 암석을 훼손시키는 것으로 보고되고 있으며,<sup>23,24)</sup> 특히 지의류는 조류와 균류의 공생체로서 석조문화재의 표면<sup>25-27)</sup> 등과 같은 건조하고, 척박한 환경에서도 생존이 가능하다. 이와 함께 감은사지 삼층석탑의 표면에서는 고착 및 엽상지의류와 선대류 및 초본식물 등이 확인되었다.

석조문화재와 암석의 화학 및 광물학적 풍화는 주로 용해, 수화, 가수분해, 산화환원, 탄산화 및 킬레이트화 작용 등으로 구분되어지며, 풍화현상은 이러한 원인들

이 상호 복합적으로 작용하여 감은사지 삼층석탑의 성분, 성질 및 조직구조를 변화시키는 것으로 조사되었다.<sup>23,24)</sup> 특히 수소이온에 의한 가수분해와 수화반응으로 인한 석조문화재와 암석의 이차광물을 생성시키는 주요 반응은 아래 식 (1), (2), (3)에 나타낸 바와 같이 장석이 고령석이나 견운모 형태로 변화하는 것으로 알려지고 있으며, 특히 대부분의 석조문화재를 구성하고 있는 화강암류의 풍화는 장석류 등의 변질에서 시작되는 것으로 이전연구<sup>4,28)</sup>에서 확인되었다.



따라서 감은사지 삼층석탑에 서식하는 조류·균류·지의류·이끼류 등은 균사가 성장하여 석조문화재의 내부로 침투하게 되며, 지의류 내부로 흡수된 물은 결빙 및 용해과정을 반복하면서 화강암류 및 암석표면에 강한 훼손인자로 작용하여 석조문화재를 급격하게 손상시키는 것으로 사료되며,<sup>25-29)</sup> 지의류 포자의 이동현상은 감은사지 삼층석탑 및 주변지역에도 영향을 미치기도 하며, 이러한 인자는 감은사지 삼층석탑에 틈을 만들고 표면에 서식하고 있는 것을 감은사지 삼층석탑 암석표면에서 관찰하였다.

### 3. 해수에 의한 용출광물 특성

Table 3에서는 감은사지 인근지역에서 채취한 해수의 수질·화학적 특성을 분석하여 나타내었다. pH는 7.42로 약 알칼리성이며, 전기전도도(Cond.)는 45.1 mS/cm을 나타내었다. 금속이온은 유도결합 플라즈마 질량분석기(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer)로 분석되었으며, Table 3에 나타낸 바와 같이 양이온 성분으로서  $\text{Ca}^{2+}$  321 mg/l,  $\text{K}^+$  410 mg/l,  $\text{Mg}^{2+}$  939 mg/l,  $\text{Si}^+$  0.54 mg/l, 그리고  $\text{Na}^+$  0.96%가 검출되었다.

한편, 감은사지 삼층석탑에서 탈락된 암석 시편은 해수에 의한 침수실험 및 구성광물 용출실험을 수행하기에 제공된 총량이 부족하였다. 따라서 Table 4에서는 해수가 석재에 미치는 영향을 조사하기 위해, 경주지역 화강암 산지에서 채취한 신선한 경주산 화강암 시료(침수실험 前)와 이 시료를 4주 및 8주 동안 해수에 침수한 이후의 화강암 시료에 대하여 표면 구성광물의 성분변화를 분석하여 나타내었다. 경주시 양북면(陽北面)

**Table 3.** Properties of seawater used in this study

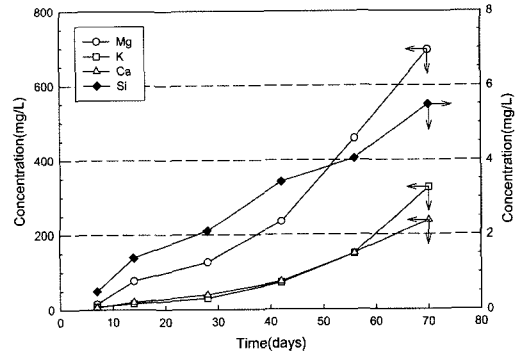
pH	Cation, (unit : mg/l, except that of the Na is %)								Conductivity (mS/cm)
7.42	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	Si	45.1
	<0.1	321	<0.02	410	939	<0.01	0.96	0.54	

**Table 4.** Chemical compositions of G.J fresh granite after dipping into the seawater

	G.J Granite		
	G.J Fresh Granite	After 4 Weeks	After 8 Weeks
Al	6.84±1.64	6.32±1.48	5.78±1.50
Ca	1.27±0.44	1.06±0.51	0.90±0.36
Fe	1.08±0.99	2.39±1.62	2.13±1.08
K	2.50±0.70	2.08±0.52	1.93±0.54
Mg	0.37±0.40	0.49±0.37	0.44±0.29
Na	3.35±1.02	3.23±0.93	2.80±1.04
Si	28.43±2.37	31.04±2.07	29.79±1.78
Ti	0.22±0.29	0.29±0.38	0.26±0.31

봉길리(奉吉里) 앞바다에서 채취한 해수에 경주산 화강암을 침수한 후 시간의 경과에 따른 화강암 내 광물질 성분이 용액으로 용출되어 지는 특성을 조사한 결과, Al, Ca, Na 및 K 이온의 함량은 경주산 화강암(G.J fresh granite)에 비해 낮게 검출되었다. 특히 Ca와 Na의 경우 해리된 성분들이 해수와의 접촉에 의해 용해 제거되며, 또한 알루미늄(Al) 경우에는 금속이온을 킬레이트(chelate)화하여 석재의 풍화를 가속화시키는 것으로 조사되었다. 이러한 경향은 Table 4에서 확인한 바와 같이 경주산 화강암의 경우, 알루미늄(Al) 함량은 약 6.5~6.8 wt.% 정도였으나, 해수를 이용하여 침수실험을 수행한 실험 이후의 화강암 표면의 농도는 감소되는 경향을 나타내었으며, 이러한 결과는 본 연구팀의 이전 연구결과<sup>30)</sup>와 유사한 경향을 나타내었다. 또한 암석 표면의 구성광물들은 대부분 경주산 화강암(G.J fresh granite)보다 해수 침수한 후에 분석한 시료에서 낮게 나타났으며, 특히 본 연구에서 조사된 바와 같이 해수는 화강암과 같은 광물의 구성성분 변화에 영향을 주는 것으로 판단되며, 바닷물은 석조문화재의 풍화 및 훼손속도를 상대적으로 가속화시키는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 6에서는 해수에 경주산 화강암(G.J fresh granite)을 침수시켰을 때 용출되어 나오는 4가지 광물성분(Mg, Ca, K, Si)의 이온농도 변화를 그림으로 나타낸 것이다. 광물성분의 용출특성을 조사하기 위하여 70일간의 용출실험을 수행한 결과, 해수에 침수된 경주산



**Fig. 6.** Cation concentrations of released from G.J fresh granite-seawater interaction with dipping time.

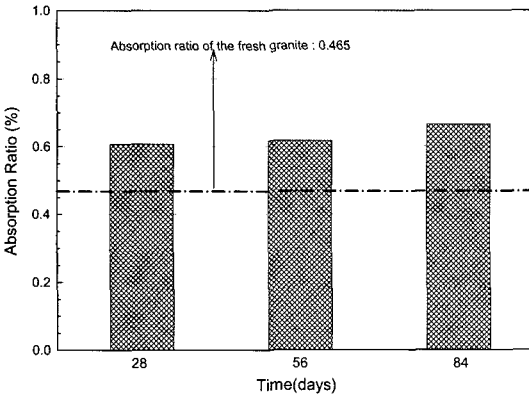
화강암(G.J fresh granite) 석재로부터 광물성분이 계속해서 증가하여 용출되었다. 이는 대부분의 광물성분이 반응초기에 용출량이 급격히 증가하고, 시간의 경과에 따라 용출량이 지수곡선을 따라 증가량이 점차 둔화되는  $y = a(1 - e^{-bx})$  함수 형태를 보인 산성용액의 경향<sup>4,30)</sup>과는 다른 경향을 나타내었다. 본 연구에서 조사된 실험결과 Ca, Mg, K 성분은 용출량이 많아 해수가 화강암의 풍화에 크게 영향을 끼치는 것으로 확인되었으며, 특히 Ca 성분은 대기 중의 산성우에 포함된 음이온성분( $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ )들과 결합하여 석조문화재의 표면에 각종 염(황산염, 마그네슘염, 나트륨염)의 생성 기원<sup>4)</sup>이 될 수 있을 것으로 판단된다.

**4. 침수실험 전·후 화강암의 물리적 특성**

Table 5는 침수실험이 수행된 전·후의 화강암<sup>31,32)</sup>의 물성변화를 조사하기 위하여 밀도와 Poisson비를 측정하여 나타낸 것이다. 암석과 광물의 밀도는 아주 다양하지만 풍화작용을 받지 않은 일반적인 화강암의 밀도는 2.50~2.81(평균 2.64)  $g/cm^3$ 이었으며, 본 실험에서 사용한 경주산 화강암(G.J fresh granite)의 평균밀도는 2.58~2.59  $g/cm^3$ 이었다. 인공적으로 침수실험이 수행된 화강암 시료들의 밀도는 평균 2.35~2.74  $g/cm^3$ 이었으며, 경주산 화강암(G.J fresh granite)과 비교하여 약간 작은 값을 나타내었다. 이러한 원인은 인공적인 침수실험에 의하여 석재 화강암 시료입자의 공극과 절리가 발달하였기 때문인 것으로 판단되며, 특히 해수 및 염분

**Table 5.** Physical properties for granite from forced weathered sample

Physical properties	Dipping time			Normal Granite <sup>30,31)</sup>
	G.J Fresh Granite	After 4 Weeks	After 8 Weeks	
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.58~2.59	2.35~2.74		2.50~2.81
Poisson's ratio	0.28	0.33	0.35	0.20~0.30

**Fig. 7.** Absorption ratio of the G.J fresh granite with dipping time to seawater.

에 의하여 화강암의 내구성이 감소할 수 있음을 수치적으로 확인하였다. 한편, Table 5에서 조사된 바와 같이 인공적으로 침수된 시료들의 Poisson비는 상대적으로 높은 값을 나타내었으며, 이러한 원인은 인공적인 침수로 인하여 조암광물의 입자결합이 약해지고 암석의 강도가 낮아졌기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 7에서는 인공적으로 침수된 화강암 석재의 풍화일수의 증가에 따른 화강암 시료의 흡수율의 변화를 측정하여 나타내었다. 화강암 시료의 흡수율은 공극률과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단되며, 화강암 시료 내부에 수분이 침투하여 흡수율을 증가시키는 것으로 사료된다. 본 연구에서 조사된 화강암 시료의 흡수율은 0.607~0.665%로서 경주산 화강암(흡수율 0.465%)과 비교하여 4주 및 8주 동안 해수에 침수한 이후 화강암 시료의 흡수율이 상대적으로 증가하여 해수에 의하여 화강암 시료의 내구성이 감소할 수 있음을 수치적으로 확인하였으며, 향후 문화재청 및 관련기관에서는 해수에 의한 염분 등의 영향으로부터 석조문화재의 훼손을 저감시키기 위하여 보다 적극적인 대책을 수립하여야 할 시점으로 판단된다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 경주권역 석조문화재를 보다 효과적으

로 보존하기 위한 기초연구의 일환으로 감은사지 삼층 석탑 표면 암석에서 진행되는 물리·화학·생물학적 훼손특성 등 다양한 관점에서 고찰하였으며, 석조문화재의 풍화에 미치는 해수의 영향을 알아보기 위해 해수에 신선한 화강암을 침수한 후 화강암의 물리·화학적 특성을 조사하였으며, 이상의 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 감은사지 삼층석탑을 보호하기 위해서는 바닷물, 염분, 태풍, 미생물, 습기, 산성비, 기온변화, 대기오염 물질 등을 저감시키기 위한 구체적인 방안을 준비하여야 할 시점으로 사료되며, 해수에 의한 염분 등의 영향으로 감은사지 삼층석탑 표면에서 광물질의 용출 속도가 가속화되어 석재의 재질이 연약해질 가능성이 크며, 물리/화학적 풍화 및 조류·균류·지의류·이끼류 등에 의한 생물학적 풍화작용에 의하여 감은사지 삼층석탑의 훼손이 심각하게 진행되고 있는 것으로 확인되었다.

2. 해수에 경주산 화강암(G.J fresh granite)을 침수시킬 경우 후 암석표면의 구성광물들은 대부분 경주산 화강암(G.J fresh granite)보다 해수에 침수한 이후의 시료에서 낮은 농도값을 나타내었으며, 특히 화강암의 구성광물 중 Ca, Mg, K 성분은 용출량이 많아 해수가 화강암의 풍화에 크게 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

3. 해수에 의한 침수실험이 수행된 전·후의 화강암의 물성을 측정된 결과, 경주산 화강암(G.J fresh granite)의 평균밀도는 2.58~2.59 g/cm<sup>3</sup>이었고, 인공적으로 침수실험이 수행된 화강암 시료들의 밀도는 평균 2.35~2.74 g/cm<sup>3</sup>으로 경주산 화강암(G.J fresh granite)과 비교하여 약간 작은 값을 나타내었다. 이러한 원인은 인공적인 침수실험에 의하여 화강암 시료입자의 공극과 절리가 발달하였기 때문인 것으로 판단되며, 특히 해수 및 염분에 의하여 화강암의 내구성이 감소할 수 있음을 수치적으로 확인하였다.

4. 침수실험을 수행한 결과 인공적으로 침수된 시료들의 Poisson비는 상대적으로 높은 값을 나타내었으며, 이러한 원인은 인공적인 침수로 인하여 조암광물의 입자결합이 약해지고 암석의 강도가 낮아졌기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 인공적으로 침수된 화강암 석재의 풍화일수의 증가에 따른 화강암 시료의 흡수율의

변화를 조사한 결과, 해수에 침수한 이후 화강암 시료의 흡수율이 상대적으로 증가하여 해수에 의하여 화강암 시료의 내구성이 감소할 수 있음을 수치적으로 확인하였다. 향후 문화재청 및 관련기관에서는 해수에 의한 염분 등의 영향으로부터 석조문화재의 훼손을 저감시키기 위하여 보다 적극적인 대책을 수립하여야 할 시점으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며(KRF-2005-042-C00174), 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 정중현, 손병현, 이근직, 최원준, 김경원, 김현규, 정민호 : 경주 感恩寺址 三層石塔의 훼손특성 및 보존. 대한환경공학회 추계학술연구발표회 논문집, 834-837, 2006.
2. 정중현, 이근직, 손병현, 김현규, 최석규, 이강우 : 경주권역 석조문화재의 생물학적 훼손특성. 대한환경공학회 추계학술연구발표회 논문집, 2005.
3. 정중현, 손병현, 정덕영 : 대기오염물질에 의한 석조문화재 영향조사(I) - 우리나라와 중국의 대기오염물질 발생현황-. (재)한국환경민간단체진흥회 · 경주환경운동연합. 환경연구논문집, 1, 53-65, 2001.
4. 손병현, 정중현, 김현규, 유정근, 이형근 : 화강암의 풍화에 미치는 염분과 산성우의 영향. (사)대한환경공학회지, 27(1), 101-108, 2005.
5. 경주시 · 국립문화재연구소 : 感恩寺址삼층석탑, 86-198, 2005.
6. 경주시 · (주)고려구조ENG : 정밀안전진단보고서 感恩寺址삼층석탑(서탑), 11-59, 2001.
7. 이정은, 이찬희, 이명성 : 경주 분황사석탑의 풍화훼손도 평가와 보존과학적 진단. 한국문화재보존과학회, 18, 19-32, 2006.
8. Brown, E. T. : ISRM(International Society for Rock Mechanics), Rock characterization testing and monitoring. ISRM Suggested Methods, Pergamon Press, 1981.
9. 정중현, 손병현, 김현규, 최원준, 남철현 : 경주권역으로의 대기오염물질 유입현황과 석조문화재에 미치는 영향. 한국환경보건학회, 31(5), 349-359, 2005.
10. 한국수력원자력(주) : 신월성원자력발전소 1,2호기 건설사업 환경영향평가서 초안, 51-782, 2002.
11. 한국수력원자력(주) : 중 · 저준위 방사성폐기물 처분 시설부지 환경영향평가서 초안, 51-707, 2006.
12. 정중현, 최석규, 조세환 : 북천지역 자연학습 체험단지 조성을 위한 기본계획(I) - 하상분석, 대기질 및 생태분석-. 한국환경위생학회, 28(2), 23-39, 2002.
13. 정중현, 손병현, 정덕영, 김현규, 이협희 : 폐기물소각로의 유해 대기오염물질 배출 특성. 한국환경위생학

- 회지, 29(5), 17-26, 2003.
14. Correns, C. W. : Growth and dissolution of crystals under linear pressure. *Discussions of the Faraday Soc.*, 5, 267-271, 1949.
15. Winkler, E. M. and Wilhelm, E. J. : Saltbrust by hydration pressures in architectural stone in urban atmosphere. *Geology Society American Bulletin*, 81(2), 567-572, 1970.
16. 정중현, 최원준, 임원호, 조기철, 최봉욱, 손병현 : 경주시의 대기질 개선을 위한 난방연료별 오염물질 배출 특성 조사. *경주환경운동연합 환경연구논문집*, 2, 29-55, 2007.
17. Zezza, F. and Macri, F. : Marine aerosol and stone decay. *The Science of the Total Environmental*, 167, 123-143, 1995.
18. Chabas, A. and Lefevre, R. A. : Chemistry and microscopy of atmospheric particulates at Delos. *Atmospheric Environment*, 34, 225-238, 2000.
19. 이명성 : 경주 불국사 및 감은사지 석탑의 재질특성과 보존과학적 손상 평가. *공주대학교 문화재보존과학과 박사학위논문*, 42-46, 2007.
20. 국립문화재연구소 : 감은사지삼층석탑(서탑) 강화처리제 선정 신석제작용 석재 연구, 6-8, 2006.
21. 이상현 : 感恩寺址 3층석탑(동탑)과 羅原里 5층석탑의 암석과 풍화현상의 특징에 대한 연구. *한국문화재보존과학회*, 5(1), 1996.
22. 국립문화재연구소 : 석조문화재 침해생물 도감, 2006.
23. Nagano, T. and Nakashima, S. : Study of colors and degrees of weathering of granitic rocks by visible diffuse reflectance spectroscopy. *Geochemical Journal*, 23, 75-83, 1989.
24. Sharma, A. and Rajamani, V. : Weathering of gneissic rocks in the upper reaches of Cauvery river, South India -Implications to neotectonics of the region-. *Chemical Geology*, 166, 203-223, 2000.
25. Kim, E. Y. : The change of natural environmental in the Seoul area : environmental mineralogy of the granite weathering. *Journal of the Geological of Society of Korea*, 30, 284-296, 1994.
26. 김은영 : 한국의 보존과학의 현황과 전망. 새천년 정책 연구보고서, 6, 1-5, 2000.
27. 정중현, 최석규 : 환경오염에 의한 석조문화재 훼손 현황 조사와 보존대책. (재)한국환경민간단체진흥회 · 경주환경운동연합. 환경연구논문집, 1, 5-28, 2001.
28. Kim, S. J., Lee, M. S., Kim, W. S. and Lee, S. J. : The change of natural environmental in the Seoul area -environmental mineralogy of the granite weathering-. *Journal of the Geological of Society of Korea*, 30, 284-296, 1994.
29. 이상현 : 국내 석조문화재 보존에 있어 세척과 보존처리 문제. 새천년 정책 연구보고서, 6, 46-50, 2000.
30. 손병현, 정중현, 김현규, 여환구, 오광중 : 화강암의 풍화에 미치는 환경오염물질의 영향. *대한환경공학회 춘계학술연구발표회 논문집*, 경성대학교, 1361-1363, 2004.
31. 김영화, 홍순호 : 풍화현상에 수반되는 화강암의 물성 변화에 관한 연구. *광산지질*, 30, 221-232, 1990.
32. Lee, S. G. : Weathering of granite. *Journal of the Geological Society of Korea*, 29, 396-413, 1993.