

경주 국립공원지역 석조물의 표면침착물과 그 주변 대기미세먼지의 상관성 연구

도진영 · 김경원*

경주대학교 문화재학부, * 경주대학교 환경계획학과

Relativity of Airborne Particle and Deposition on the Stone Monuments in the National Park Area of Gyeongju

Jinyoung Do · Kyung W. Kim*

*School of Cultural Assets, *Department of Environmental Engineering,
Gyeongju University, San 42-1 Hyohyun-dong Gyeongju Gyeongbuk 780-210, KOREA*

1. 서 언

석조물은 대기오염물질의 저장소로서 역할을 하며, 먼지나 여러 종류의 입자성분들은 광물조직 사이에 포획된다(Saiz-Jimenez, 1993). 이러한 현상은 도심지역의 석조물에 대한 연구에서 활발히 진행되어 보고되고 있으며 그 원인과 대책에 대한 연구성과를 보이고 있다. 반면, 비도심지역의 석조물들은 대기에 의한 영향성이 적은지, 이에 대한 연구는 비교적 드물다.

경주에는 다수의 석조물들이 위치하고 있으며, 이 문화재들은 비도심지역인 경주남산을 비롯한 경주의 여러 국립공원 야외에서 오랜시간 주변환경과 반응하고 있다. 대부분의 석조물들의 상태는 양호하지 못하여 그 손상원인을 밝히고, 이에 따른 대책이 시급한 실정이다.

본 연구에서는 비도심지역, 경주 국립공원 내의 대기성분이 석조물의 손상에 미치는 영향을 살펴보기 위한 연구의 일환으로서, 대기성분 중의 미세먼지와 석조물 표면의 축적물과의 상관성을 조사하였다. 석조물의 구성성분과는 다른 성분을 다량 함유하고 있는 황사를 통하여 대기미세먼지가 석조물에 축적되는지, 구성성분이 무엇인지를 알아내기 위하여 황사기간을 전후하여 대기성분을 포집하고, 석조물 표면에 쌓인 축적물을 채취하였다.

2. 연구 방법

붓을 이용하여 석조물표면(서악리삼층석탑)에서 채취한 시료(2007년 3.15~4.10, 0.033mm 체로 거른 후 분말화)와 흡입기(polycarbonate filter, PM_{1.0}과 PM_{2.5} cyclone sampler, 2007년 3.12~5.9)를 이용하여 포집한 대기미세입자의 화학성분은 PIXE (Proton Induced X-ray Emission, 8-mm-diameter 10-nA beam of 2.5-MeV protons from a 1.7-MV Tandem Van de Graaff accelerator, Seoul National University)를 이용하여 분석하였다. 고해능 X선회절분석(8C2 beam line, Pohang Light Accelerator Source (PAL))을 실시하여 구성광물을 밝혔으며, Ion Chromatography법(TOA, IA-300)으로 수용성 이온성분(Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, F⁻, Cl⁻, NO₂⁻, Br⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻)을 분석하였다.

3. 연구결과 및 고찰

표 1에 나타낸 바와 같이 황사 전, 당시, 후의 석조물 표면시료들은 화학성분에서 차이를 보였다. 황사 때 석조물의 표면에서는 PIXE로 측정된 성분이 황사 전과 비교해서 10%정도 증가되었으며, 황사 후에 측정된 데이터는 황사 전의 값에 비해 약간(3%) 증가된 값을 보였다. 이는 황사현상이 지나간 후 대기미세먼지의 양은 줄었지만(황사현상; 25.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 이후; 7.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 석조물의 표면에는 황사 때 축적된 것들이 남아 있음을 의미한다.

표 1. PIXE로 측정된 서악리삼층석탑 표면시료의 주요 Element 함량(wt.%).

	Elemental sum	Al	Si	Ca	S
Before AD	40.76	1.43	16.84	11.01	2.47
AD*	54.58	3.88	34.77	4.25	4.30
After AD	43.55	3.02	23.12	3.49	4.29

* Asian Dust Storm Event

황사 때 석조물의 표면에는 Si, Al 및 Fe가 증가하였으며, 황사후의 결과를 볼 때 이러한 성분들은 표면에 침착되었다 하더라도 오래 머무는 것으로 보이지는 않는다. 석조물의 구성성분이 아닌 S성분은 황사와 관계없이 석조물 표면에서 검출되고 있으며, 황사 시 그 전에 비해 3배 가까이 증가된 값이 이후에도 감소되지 않는 점은 매우 우려스러운 점이다. 이는 X선회절분석결과 검출된 석고와 수용성 이온성분으로 검

출된 SO_4^{2-} 에서도 확인되었다. S 화합물의 축적은 암석과 대기의 경계면에서 석고를 형성함으로써 석조물의 손상에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(F. Delalieux et. al. 2001).

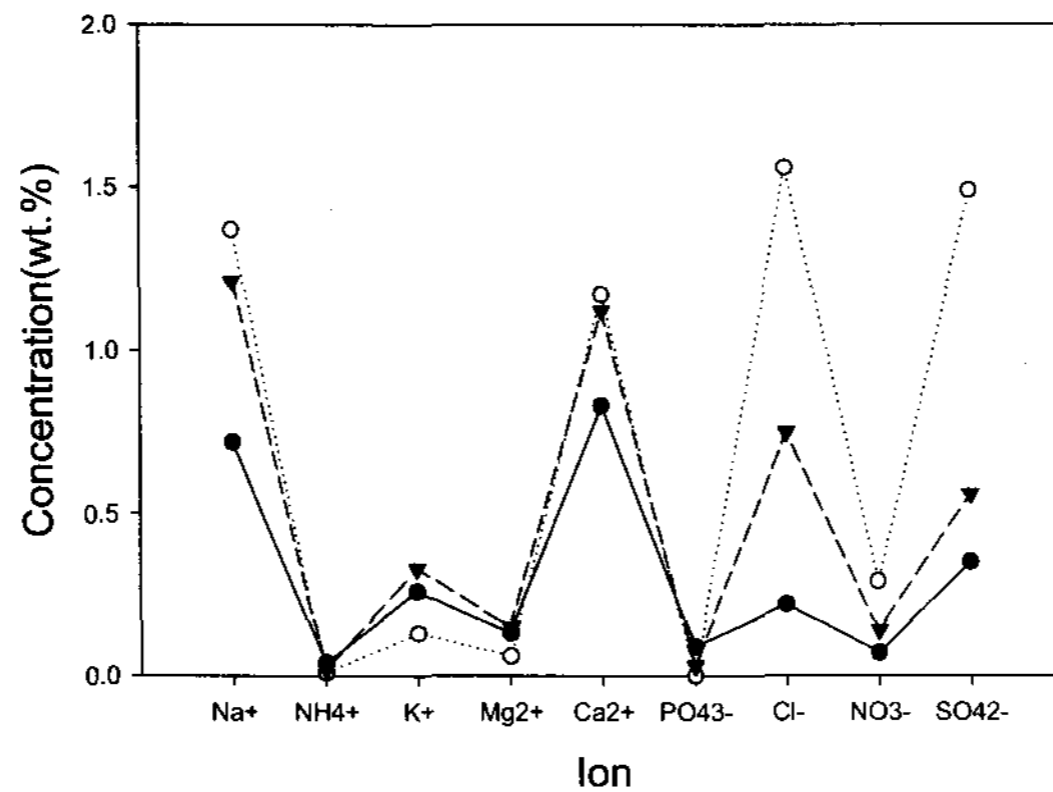


그림 1. 서악리삼층석탑 표면에서 채취한 시료의 수용성 이온함량(wt.%).

표 2. PIXE로 측정된 경주국립공원지역 대기미세먼지의 주요 element 양($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

	Mass	Al	Si	P	S	K	Ca	Fe	Pb
AD	25.5	1.4	6.0	1.2	0.5	0.8	0.4	0.8	0.3
Non-AD	7.1	0.5	1.0	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
Total	7.7	0.5	1.2	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1

표 3. PIXE로 측정된 경주국립공원지역 대기미세먼지의 trace element 양(ng/m^3).

	Ti	Cr	Mn	Cu	Zn	Se	Cd
AD	138.3	107.5	50.1	11.3	30.0	0.7	35.7
Non-AD	41.9	39.6	4.3	7.4	8.0	1.6	5.4
Total	45.2	41.9	5.9	7.5	8.8	1.6	6.5

표 4. 경주 국립공원지역 대기미세먼지의 주요 수용성 음이온량($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
AD	0.3	0.3	1.7
Non-AD	0.2	0.4	0.7
Total	0.2	0.4	0.7

같은 기간의 대기미세입자에서는 Si와 Al이 황사기간에 각기 6배, 3배씩 증가하였다. 지각토양성분과 관련 있는 이러한 성분들이 대기 중에 다량 있으며, 위에 나타난 결과로 보아 석조물 표면에 침착되는 것으로 보인다. 경주 국립공원 내 대기의 성분 중 석조물의 손상과 직접적으로 연관이 되는 S의 함량이 황사 때는 대기미세먼지의 2%, 정상적인 기간에서는 2.82%로 나타났으나 그 절대량은 황사 때가 더 높아 황사로 인해 S의 양이 줄어든 것은 아니다. SO_4^{2-} 의 절대량도 황사시에 2.4배 증가된 수치를 보였으며, 평균적으로 대기미세입자의 9.1%에 해당하여 우려스러울 정도임을 알 수 있다. 이런 S를 함유하고 있는 성분은 석조물의 구성성분이 아니기 때문에 석조물 표면에서 검출되고 있는 이 성분은 거의 다 대기물질에서 기인하였다고 볼 수 있다.

4. 결 론

경주 국립공원 내에 위치한 석조물의 표면침착물에서 검출된 화학성분은 주변 대기미세먼지의 구성성분과 상당한 상관관계가 있음이 연구결과 확인되었다. 경주의 비도심지역에서도 대기중에서 S함유 성분이 비교적 높게 나타나, 석조물 표면에서 상당히 높게 나타난 S의 원인으로 판단된다. 특히 S성분은 석조물에 침착된 후 오랜기간 표면에 머무는 것으로 조사되어 석조물의 손상에 영향을 끼칠 것으로 보인다.

사 사

본 연구는 과학기술부의 21세기 프론티어 연구개발 프로그램의 일환으로 추진 중인 양성자기반공학기술개발사업의 이용자 프로그램의 지원으로 수행되었으며, 고해능 X선회절분석기의 사용을 허가해준 PAL에 감사드린다.

참고문헌

1. W. Klemm, H. Siedel, Evaluation of the origin of Sulphate compounds in building stone by sulphur isotope ratio, Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies. Geological Society, London, 205, 2002, 419-429.
2. C. Saiz-Jimenez, Deposition of airborne organic pollutants on historic bulidings, Atmos. Environ., vol.27B, No.1, 1993, 77-85.
3. F. Delalieux, C. Cardell, V. Todorov, V. Dekov, R. Van Grieken, Environmental conditions controlling the chemical weathering of the Madara Horseman monument, NE Bulgaria, Journal of cultural heritage 2, 2001, 43-54.