

석조문화재 표면에 발생된 오염물 현황 및 특성에 관한 연구

-경천사십층석탑에 발생된 오염물을 중심으로-

A Study on the Present Condition and Characteristic of Appeared Contaminants on the Surface of Stone Cultural Properties

-Focus on the Contaminants of Ten storied pagoda of Gyeongcheonsa-

金振亨 · 李柱玩 · 韓京淳* · 都珍榮*

Jin Hyung Kim, Ju Wan Lee, Kyoung Soon Han* and Jin Young Do*

ABSTRACT

The conservation problem of stone cultural properties is widely influenced by environmental pollution nowadays as well as aging symptoms itself. Most stone cultural properties are directly affected by air pollution such as smoke, acid-rain, etc., resulting surface separation and pulverization.

In the case of Ten storied pagoda of Gyeongcheonsa, once located in the center of the Seoul, the surface shows excessive contaminant by air pollution. It is very difficult to identify chemical structure and formation system of these contaminant. Also the discoloration and stains on the surface are not pleasant to see.

Through the examination of the contaminant by SEM-EDS, it is observed that the major mineral is Gypsum and many other minerals were also revealed. The contaminant layer seems to be thin and wide at the south face of pagoda and thick and narrow at the north face. This distribution pattern could provide information on the surface characteristics of pagoda. Further, the information could help to identify

* 경주대학교(Gyeongju University)

the relationship between geological and environmental factors and the surface patterns.

I. 서론

대기오염물질은 노출된 석조문화재들에 치명적인 영향을 주고 있는데 이는 급속한 산업 발전과 더불어 폭발적인 자동차 보유 대수의 증가, 대도시로의 인구 밀집 그리고 전반적인 주거 환경의 변화와 소비 증대로 인한 연료 사용량의 증가로 대기질이 더욱 악화 되고 있기 때문이다¹⁾. 현대의 에너지원은 대부분 석유, 석탄 및 천연가스 같은 화석연료를 사용하고 있어 연소시 대기오염물질을 배출하여 도시 대기오염의 주범인 광화학스모그 및 산성비의 원인이 되고 있다²⁾. 이러한 대기오염물질 중 SO₂는 수분과 함께 작용하여 금속재료, 대리석, 석회석 등에 부식을 야기 시키는³⁾ 한편, 훼손의 가속화가 이루어져 흑색으로 탈바꿈하는 등의 문제가 발생되고 있다⁴⁾.

1996년 1월부터 1997년 6월까지 원각사지십층석탑과 유사한 대리석 시편을 탑골공원(종로)과 광화문에서 옥외 노출 여부에 따른 산성비가 시편에 미치는 영향에 대해 실험한 결과에 의하면 옥외에 노출된 시편이 실내보다 7.7배 정도의 부식감량이 높게 나타났고 색변화 또한 노출된 시편이 옥내의 시편보다 1.2배 정도 변색도가 높게 나타났으며, 산성비에 대한 용해 실험 결과, 산성비는 대리석의 부식감량에 직접적인 영향을 주는 것으로 나타났다⁵⁾. 이와 같은 환경오염으로 인한 노출문화재의 피해는 심각하다.

그리하여 본고에서는 현재 보존처리가 진행 중인 경천사십층석탑을 통하여 표면에 생성된 오염물의 각 부재별 발생정도 및 오염물의 진행 상태를 조사 실시하였고 발생된 오염물의 성분을 분석하였다. 경천사십층석탑의 경우 우리나라의 산업화가 이루어지기 시작한 시기에 대도심 중심에 위치했었던 약력을 가지고 있어 좋은 사례라 할 수 있다.

II. 조사방법

1. 경천사십층석탑의 오염층 분포조사




경천사십층석탑의 오염물 조사에 있어서 조사 대상인 석탑의 각 부재별에 표면에 생성된 흑색 오염물을 중심으로 실시하였다. 조사 조건에 있어서 부재 방향별 위치는 해체 당시의 부재위치를 그대로 적용하였다.

Table 1. 오염물 면적 단위표

단위 \ 단계	1	2	3	4	5	계속	비고
10mmX10mm	100mm ²	200mm ²	300mm ²	400mm ²	500mm ²	계속	

※단위산출근거: 오염물제거에 있어서의 효율적 제거 계측을 위한 임의적인 면적

Table 2. 경천사십층석탑 오염층 정도별 기준표

	단계별 세부사진	비 고
A		오염정도가 심화된 상태이고 표면에 형성된 오염층 뒤의 조각 면은 부식이 심화되어 원형조각을 알아 볼 수 없을 정도의 단계(퇴화층 형성)
B		오염층의 형성되어 있지만 조각의 원형의 손상이 이루어지지 않아 오염층 안쪽의 조각은 상태가 양호한 상태이며 오염층의 두께는 1mm이상 형성된 단계
C		오염층이 1mm이내로 형성된 단계로서 제거가 용이하며 내부조각 상태도 양호한 단계
D		미세한 오염층으로서 조각 표면에 얇게 도포 되듯이 형성된 단계

2. 경천사십층석탑의 표면오염물 분석

1) 분석방법

(1) 현미경 분석

현미경 관찰은 탑으로부터 원석과 함께 박락된 파편을 수지에 마운팅 한 후 가공하여 단면을 광학현미경(Optical Microscope, Carl Zeiss, AxioTech/Progress 3012, Germany)으로 관찰하였다. 또한 관찰에 사용된 현미경의 배율을 50X 이다.

(2) X-선 회절분석

석재의 광물 성분을 알아보기 위해 박락된 파편의 일부를 미소부 X-선 회절분석기(Micro-area X-ray diffraction system, MAC Science, MXP18VA, Japan)를 이용하여 분석을 실시하였다. 미소부 X-선 회절분석시 Target은 Cu를 사용하였다. 계측 후 분석데이터는 피이크 매칭(peak matching) 프로그램을 이용하여 각 피이크를 동정하였다. 또한 흑색오염물의 경우 광물 조성분석을 위하여 시료를 아게이트 유발에서 분쇄한 후, 분말 X선회절분석을 실시하였다. XRD 분석은 Rigaku RINT2200 모델의 X선회절기를, 분석조건은 40kV/30mA의 $CuK\alpha$ 선을 이용하였다.

(3) 형광 X-선 분석(EDXRF)

분말 상태가 아닌 일정크기의 오염물을 취하여 chamber에 넣고, 분석하고자 하는 위치를 선정하여 각 부분의 성분을 정성분석 하였다. 분석시 오차를 줄이기 위해 동일시료에 대해 5회 분석하였으며, 분석시 조건은 20kV, 0.5mA, 300micro collimator를 사용하였고, 분위기는 Vacuum상태에서 100sec간 분석하였다.

(4) 유도결합플라즈마발광분석(ICP-AES)

오염물을 분말화하여 시료 약 50mg을 칭량하고 100ml 테프론 비이커에 넣은 다음 질산(HNO₃)과 불산(HF)을 각각 5ml씩 가해 가열판에서 200℃로 용해 후 건조시켰다. 건조된 시료에 질산(HNO₃) 3ml + 과염소산(HClO₄) 5ml를 가해 과염소산에서 흰 증기가 날 때까지 가열한 후 증류수로 희석, 100g의 시료를 제작하여 주성분과 미량성분을 분석하였다. 분석에는 유도결합플라즈마발광분석기(СПS 1500R, Japan)를 이용하였고, 출력 1.31kW, 냉각가스 유량 18 l/min, 보조가스 0.5 l/min, 캐리어가스 1.0 l/min, 측정높이 12.4mm로, 다만 K, Na의 출력은 1.7kW로 분석하였다.

(5) 전자현미경 분석

석재 및 오염물의 양상을 알아보기 위하여 SEM(Scanning Electron Microscope, Jeol, JSM-5910LV, Japan)을 이용하였고, 성분분석은 여기에 부착된 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy, Oxford 7324, England)를 사용하여 분석하였으며, 분석조건은 20kV, spotsize는 50으로 실시하였다. 또한 원소별 mapping을 실시하여 성분별 분포도를 알아보았다.

Ⅲ. 조사결과

1. 오염물 현황 조사 결과

경천사십층석탑의 오염물은 주로 흑색을 띠며 오염층의 형성부위는 노출된 탑부재의 표면에 주를 이루고 있는데 석탑의 드잡이 공사에 사용되었던 층과층 사이의 균형이나 요동을 막기 위해 철판에 의해 발생된 수평적인 공간에도 흑색 오염물이

생성되어 있다. 그리고 오염물의 현황(Table 4)에서와 같이 흑색오염물의 발생은 석탑의 북쪽 부재들의 오염현황이 대체적으로 심한 편이며 남측면의 부재는 북측면의 부재보다 오염물의 진행 상태나 오염물의 넓이에서 차이를 보이며 분포된 것을 알 수 있다. 그리고 서측면과 동측면의 부재는 오염물의 발생 상태나 표면의 훼손진행 상태가 두드러진 차이를 보이고 있진 않지만 북측면 부재의 상태보다는 양호하였다. 그리고 남쪽 부재들의 오염상태에 있어서 오염물의 분포를 살펴보면 한 부재의 조각면 안에서도 수직적인 면에 비해 안쪽으로 경사면을 이루는 부재면 일수록 오염부위가 넓고 두꺼운 층으로 형성되어 있다. 그에 반해 바깥쪽으로 완만한 각이 형성된 조각면 일수록 오염물의 면적이나 두께에서 현격한 차이를 보이고 있으며, 대체적으로 오염층의 형성이 이루어지지 것을 볼 수 있다.

그러나 석탑의 옥개석 밑면의 경우 방향성에 상관없이 오염층이 큰 두께로 발생된 것을 조사되었는데 이와 같은 현상이 일어날 수 있는 이유는 대기오염으로 인한 대기 중의 오염물질이 빗물과 함께 석재에 내부로 침투되었다가 외부로 방출되는 과정에서 석회암 재질인 석탑이 화학적인 반응과 결부되면서 내부의 석출물이 석재 표면에 생성된 것이다. 옥개석 밑면에 오염층의 심화는 앞에서와 같은 현상이 반복되면서 수분에 의한 옥개석 밑면으로의 집중현상이 일어난 것으로 추정된다. 그리하여 빗물이나 채광에 직접 접촉되는 면인 옥개석의 낙수면에선 대조적으로 오염물질의 생성이 이루어지지 않은 것이다. 또한 오염이 심화된 일부 탑신석을 살펴보면 오염물 형성의 일정한 패턴을 찾아 볼 수 있는데 부재표면에 오염물이 발생한 부분에 마치 물길 같은 모양의 부분에는 오염물이 생성되지 않은 것을 볼 수 있다(Photo 1). 이 같은 현상은 주변과 같이 오염층이 생성되었거나 과정 중에 2차적으로 우기와 같은 다량의 빗물이 연속적으로 유입되면서 조각에 의해 자연스럽게 형성된 굴곡으로 배수되면서 조각부분이 배수로 역할을 하여 생성되었거나 생성중인 오염층과 직접적인 접촉이 이루어지면서 자연 제거가 이루어진 것이다. 이러한 부분은 오염층만 없을 뿐이고 풍화정도는 주변 면과 같았다.

그리고 석탑의 방향성과 관계하여 오염물의 정도가 차이가 나는 것은 주변 환경

적인 상황, 즉 수분이나 채광에 의한 직접적인 영향권에 속해 있는지, 구조적인 조건에 의하여 유입된 수분의 배출이 원활히 이루어지는지에 따라 오염층의 발생 빈도가 차이를 보이고 있다.

Photo 1과 같이 경천사십층석탑의 표면에 생성된 오염물 제거에 있어 오염정도나 오염물의 진행단계별, 그리고 조각이나 문양 위에 생성된 오염층의 제거 등의 각기 다른 조건과 상황에 맞는 적절한 처리가 필요할 수 있다.



Photo 1.
경천사십층석탑
(2층가조립현황)
발생된 오염물의 현황

경천사십층석탑의 오염층에 대한 단계별 면적을 조사한 결과는 Fig. 1~3과 같다. 먼저 Fig. 1의 오염층 단계별 오염면적 비율을 보면, 전체적으로는 B(83%) > C(12%) > A(4%) > D(1%)의 순서로 오염면적의 대부분이 B단계임을 알 수 있다. 그리고 전체를 기단부와 탑신(1층~상륜부)으로 나누어 분석한 결과, 기단부에서는 B(60%) > C(31%) > D(9%) > A(0%), 탑신(1층~상륜부)에서는 B(85%) > C(10%) > A(5%) > D(0%)로 기단부[(A+B):(C+D)=60:40]보다 탑신[(A+B):(C+D)=90:10]의 오염단계가 높게 나타났다.

Table 3. 부재별 오염물 분포현황

번호	부재명	오염유무	오염정도별	오염총단위	비고
1	하대 저석(북)	X	-	-	A type
2	하대 저석(북동)	X	-	-	
3	하대 저석(동)	X	-	-	
4	하대 저석(남동)	X	-	-	
5	하대 저석(남)	X	-	-	
6	하대 저석(남서)	X	-	-	
7	하대 저석(서)	X	-	-	
8	하대 저석(북서)	X	-	-	
9	하대 중석(북)	O	C	2	A type
10	하대 중석(북동)	O	D	1	
11	하대 중석(동)	O	B	8	
12	하대 중석(남동)	O	B	10	
13	하대 중석(남)	O	B	8	
14	하대 중석(남서)	O	C	8	
15	하대 중석(서)	O	C	4	
16	하대 중석(북서)	O	C	1	
17	하대 감석(북)	X	-	-	A type
18	하대 감석(북동)	X	-	-	
19	하대 감석(동)	O	D	1	
20	하대 감석(남동)	X	-	-	
21	하대 감석(남)	X	-	-	
22	하대 감석(남서)	X	-	-	
23	하대 감석(서)	O	D	2	
24	하대 감석(북서)	X	-	-	
25	중대 중석(북)	O	C	10	A type
26	중대 중석(북동)	O	C	3	
27	중대 중석(동)	O	B	16	
28	중대 중석(남동)	O	C	5	
29	중대 중석(남)	O	B	7	
30	중대 중석(남서)	O	B	5	
31	중대 중석(서)	O	B	14	
32	중대 중석(북서)	O	B	3	
33	중대 감석(북)	O	D	3	A type
34	중대 감석(북동)	X	-	-	

번호	부재명	오염유무	오염정도별	오염층단위	비고
35	중대 갑석(동)	O	D	1	A type
36	중대 갑석(남동)	X	-	-	
37	중대 갑석(남)	O	D	2	
38	중대 갑석(남서)	X	-	-	
39	중대 갑석(서)	O	D	2	
40	중대 갑석(북서)	X	-	-	
41	상대 중석(북)	O	B	1	A type
42	상대 중석(북동)	O	B	2	
43	상대 중석(동)	O	B	1	
44	상대 중석(남동)	O	B	4	
45	상대 중석(남)	O	C	3	
46	상대 중석(남서)	O	C	4	
47	상대 중석(서)	O	B	3	
48	상대 중석(북서)	O	B	2	A type
49	1층 난간석(북)	O	C	5	
50	1층 난간석(북동)	X	-	-	
51	1층 난간석(동)	O	C	8	
52	1층 난간석(남동)	X	-	-	
53	1층 난간석(남)	O	B	15	
54	1층 난간석(남서)	O	B	5	
55	1층 난간석(서)	O	B	8	
56	1층 난간석(북서)	O	B	8	
57	1층 탑신석(북)	O	B	8	A type
58	1층 탑신석(북동)	O	C	8	
59	1층 탑신석(동)	O	C	10	
60	1층 탑신석(남동)	O	C	6	
61	1층 탑신석(남)	O	B	12	
62	1층 탑신석(남서)	O	C	14	
63	1층 탑신석(서)	O	C	8	
64	1층 탑신석(북서)	O	B	10	
65	1층 옥개석(북)	O	B	20	A type
66	1층 옥개석(북동)	O	B	10	
67	1층 옥개석(동)	O	B	20	
68	1층 옥개석(남동)	O	B	10	

번호	부재명	오염유무	오염정도별	오염층단위	비고
69	1층 옥개석(남)	○	B	20	A type
70	1층 옥개석(남서)	○	B	10	
71	1층 옥개석(서)	○	B	20	
72	1층 옥개석(북서)	○	B	10	
73	2층 난간석(남)	○	B	16	A type
74	2층 난간석(북)	○	B	6	
75	2층 난간석(북동)	○	B	3	
76	2층 난간석(동)	○	B	5	
77	2층 난간석(서)	○	B	5	
78	2층 난간석(북서)	○	B	3	A type
79	2층 탐신석(북)	○	B	15	
80	2층 탐신석(북동)	○	B	5	
81	2층 탐신석(동)	○	B	10	
82	2층 탐신석(남동)	○	B	2	
83	2층 탐신석(남)	○	B	8	
84	2층 탐신석(남서)	○	B	6	
85	2층 탐신석(서)	○	B	8	
86	2층 탐신석(북서)	○	B	6	A type
87	2층 옥개석(북)	○	B	25	
88	2층 옥개석(북동)	○	B	10	
89	2층 옥개석(동)	○	B	25	
90	2층 옥개석(남동)	○	B	10	
91	2층 옥개석(남)	○	B	25	
92	2층 옥개석(남서)	○	B	10	
93	2층 옥개석(서)	○	B	25	
94	2층 옥개석(북서)	○	B	10	B type
95	3층 난간석(북)	○	B	10	
96	3층 난간석(동)	○	B	8	
97	3층 난간석(남)	○	B	10	
98	3층 난간석(서)	○	B	7	A type
99	3층 탐신석(북)	○	A	8	
100	3층 탐신석(북동)	○	A	2	
101	3층 탐신석(동)	○	A	5	
102	3층 탐신석(남동)	○	B	8	

번호	부재명	오염유무	오염정도별	오염층단위	비고
103	3층 탑신석(남)	O	B	5	A type
104	3층 탑신석(남서)	O	B	5	
105	3층 탑신석(서)	O	B	8	
106	3층 탑신석(북서)	O	B	6	
107	3층 옥개석 下(북)	O	A	25	A type
108	3층 옥개석 下(북동)	O	A	5	
109	3층 옥개석 下(동)	O	B	32	
110	3층 옥개석 下(남동)	O	A	5	
111	3층 옥개석 下(남)	O	B	32	
112	3층 옥개석 下(남서)	O	B	5	
113	3층 옥개석 下(서)	O	B	32	
114	3층 옥개석 下(북서)	O	B	5	
115	3층 옥개석 上(북)	O	B	7	A type
116	3층 옥개석 上(동)	O	B	7	
117	3층 옥개석 上(남)	O	B	8	
118	3층 옥개석 上(서)	O	B	8	B type
119	4층 난간석 (북)	X	-	-	
120	4층 난간석 (동)	X	-	-	
121	4층 난간석 (남)	O	B	3	
122	4층 난간석 (서)	X	-	-	B type
123	4층 탑신석 (북)	O	B	20	
124	4층 탑신석 (동)	O	B	10	
125	4층 탑신석 (남)	O	B	15	
126	4층 탑신석 (서)	O	B	5	B type
127	4층 옥개석 (북)	X	-	-	
128	4층 옥개석 (동)	O	B	10	
129	4층 옥개석 (남)	O	B	20	
130	4층 옥개석 (서)	O	B	10	B type
131	5층 난간석 (북)	X	-	-	
132	5층 난간석 (동)	X	-	-	
133	5층 난간석 (남)	X	-	-	
134	5층 난간석 (서)	X	-	-	B type
135	5층 탑신석 (북)	O	B	5	
136	5층 탑신석 (동)	O	B	3	

번호	부재명	오염유무	오염정도별	오염층단위	비고
137	5층 탐신석 (남)	O	B	5	B type
138	5층 탐신석 (서)	O	B	3	
139	5층 옥개석 (북)	O	B	15	B type
140	5층 옥개석 (동)	O	B	15	
141	5층 옥개석 (남)	O	B	15	
142	5층 옥개석 (서)	O	B	15	
143	6층 난간석 (북)	O	C	3	
144	6층 난간석 (동)	X	-	-	A type
145	6층 난간석 (남)	O	B	5	
146	6층 난간석 (서)	X	-	-	
147	6층 탐신석 (북)	O	A	5	B type
148	6층 탐신석 (동)	O	B	8	
149	6층 탐신석 (남)	O	B	10	
150	6층 탐신석 (서)	O	B	5	
151	6층 옥개석 (북)	O	B	15	B type
152	6층 옥개석 (동)	O	B	15	
153	6층 옥개석 (남)	O	B	15	
154	6층 옥개석 (서)	O	B	15	
155	7층 난간석 (북)	O	C	1	B type
156	7층 난간석 (동)	O	B	2	
157	7층 난간석 (남)	O	B	3	
158	7층 난간석 (서)	O	C	1	
159	7층 탐신석 (북)	O	B	3	B type
160	7층 탐신석 (동)	O	B	3	
161	7층 탐신석 (남)	O	C	3	
162	7층 탐신석 (서)	O	B	3	
163	7층 옥개석 (북)	O	B	15	B type
164	7층 옥개석 (동)	O	B	15	
165	7층 옥개석 (남)	O	B	15	
166	7층 옥개석 (서)	O	B	15	
167	8층 난간석 (북)	O	B	3	B type
168	8층 난간석 (동)	X	-	-	
169	8층 난간석 (남)	O	B	3	
170	8층 난간석 (서)	X	-	-	

번호	부재명	오염유무	오염정도별	오염층단위	비고
171	8층 탑신석 (북)	O	B	3	B type
172	8층 탑신석 (동)	O	B	2	
173	8층 탑신석 (남)	O	C	3	
174	8층 탑신석 (서)	O	B	1	
175	8층 옥개석 (북)	O	C	10	B type
176	8층 옥개석 (동)	O	B	10	
177	8층 옥개석 (남)	O	C	10	
178	8층 옥개석 (서)	O	B	10	
179	9층 난간석 (북)	O	B	1	B type
180	9층 난간석 (동)	O	B	1	
181	9층 난간석 (남)	O	B	3	
182	9층 난간석 (서)	X	-	-	
183	9층 탑신석 (북)	O	B	5	B type
184	9층 탑신석 (동)	O	C	2	
185	9층 탑신석 (남)	O	C	5	
186	9층 탑신석 (서)	O	B	2	
187	9층 옥개석 (북)	O	B	10	B type
188	9층 옥개석 (동)	O	C	10	
189	9층 옥개석 (남)	O	C	10	
190	9층 옥개석 (서)	O	B	10	
191	10층 난간석 (북)	O	A	3	B type
192	10층 난간석 (동)	O	B	1	
193	10층 난간석 (남)	O	B	3	
194	10층 난간석 (서)	O	B	1	
195	10층 탑신석 (북)	O	B	2	B type
196	10층 탑신석 (동)	O	B	3	
197	10층 탑신석 (남)	O	C	3	
198	10층 탑신석 (서)	X	-	-	
199	10층 옥개석 (북)	O	B	10	B type
200	10층 옥개석 (동)	O	B	12	
201	10층 옥개석 (남)	O	B	12	
202	10층 옥개석 (서)	O	B	10	

※ A-type: 각부재 방향별 조사, B-type: 단일부재 방향별 조사

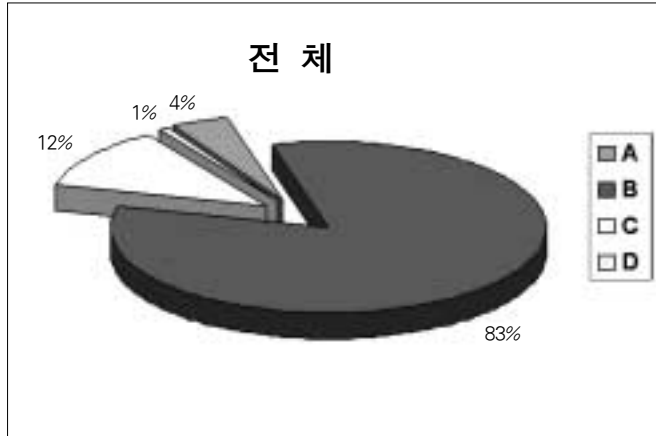


Fig. 1.
경천사십층석탑 오염 단계별
면적 분포도

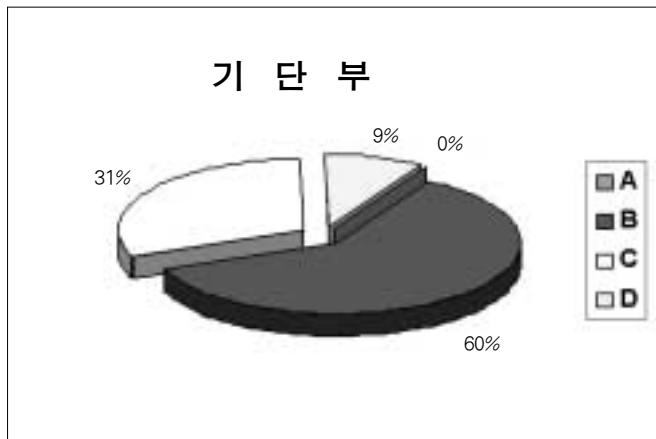


Fig. 2.
오염단계별
면적분포도(기단부)

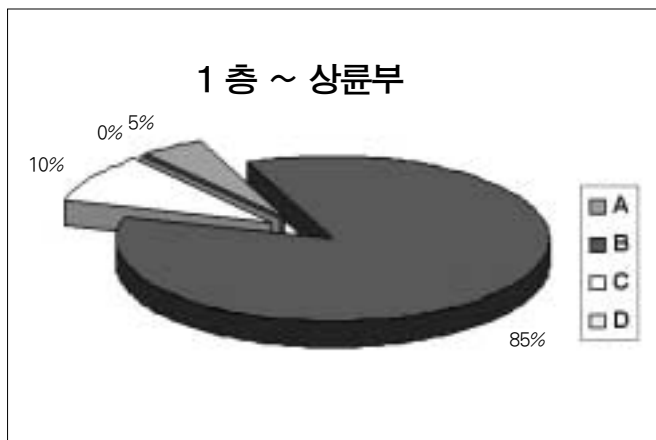


Fig. 3.
오염단계별
면적분포도(1층~상륜부)

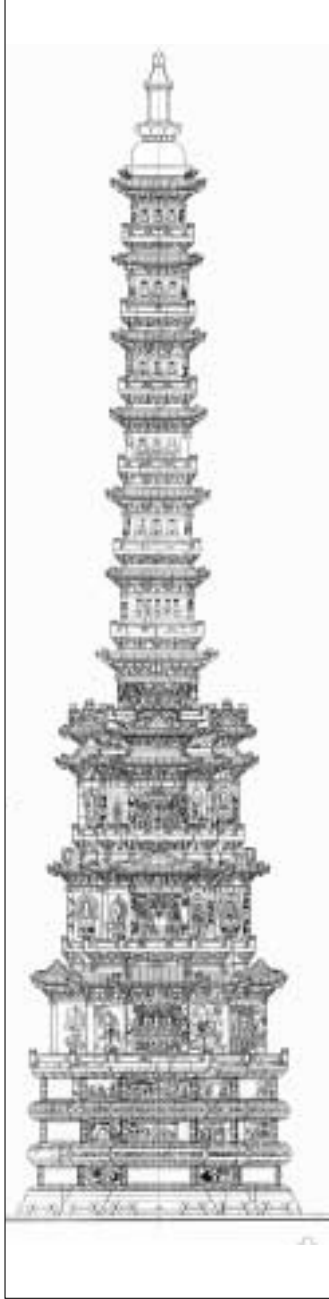


Photo 2. 경천사십층석탑의 실측도면



Photo 3. 1902년 당시 전경

Fig. 4.
경천사십층석탑 오염물의
방위별 분포도(전체)

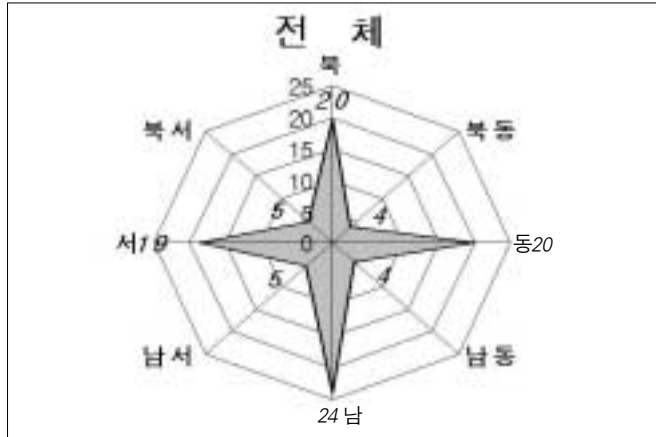


Fig. 5.
기단부 오염층 분포

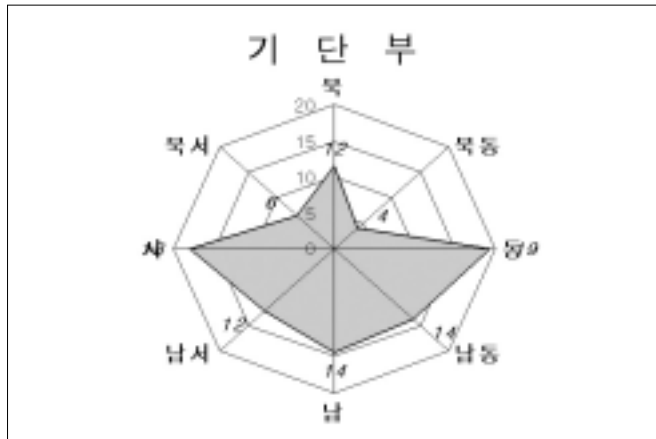


Fig. 6.
1층 오염층 분포



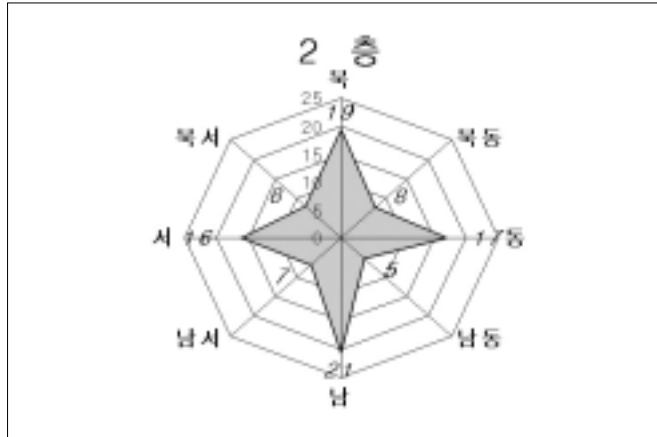


Fig. 7.
2층 오염총 분포

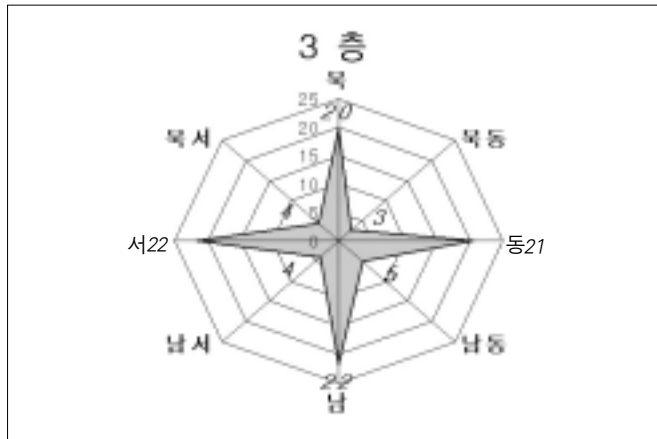


Fig. 8.
3층 오염총 분포

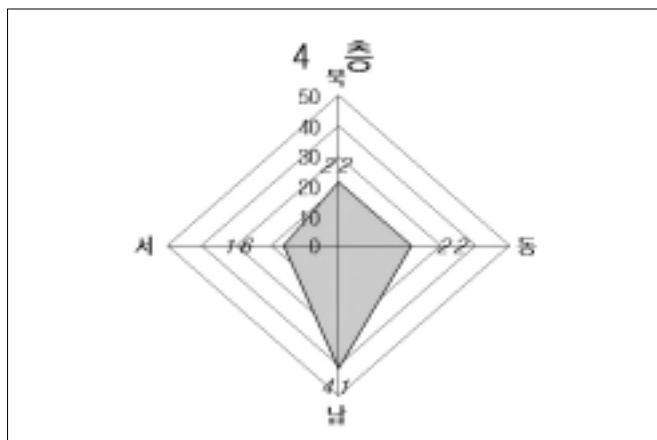


Fig. 9.
4층 오염총 분포

Fig. 10.
5층 오염층 분포

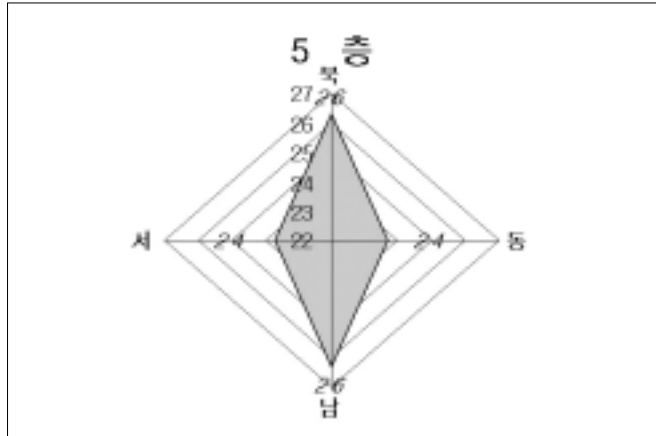


Fig. 11.
6층 오염층 분포

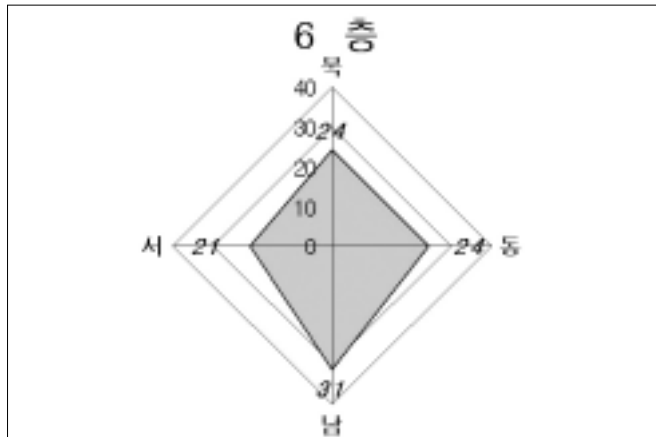
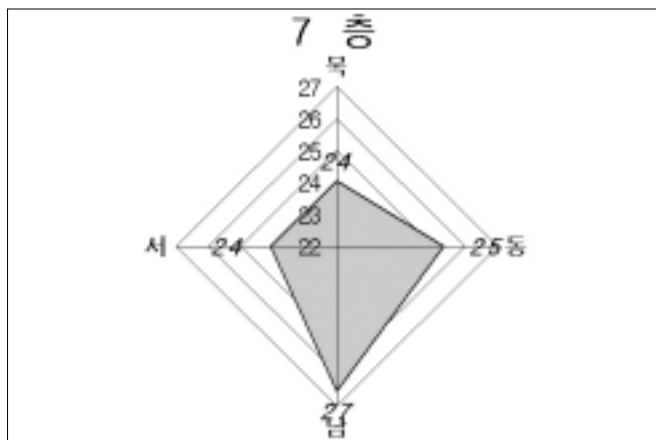


Fig. 12.
7층 오염층 분포



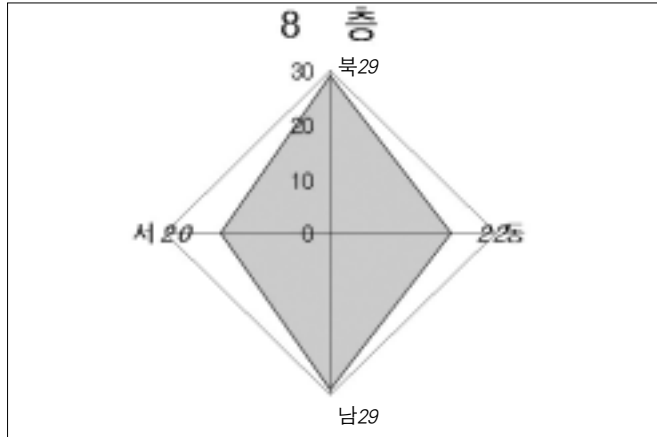


Fig. 13.
8층 오염층 분포

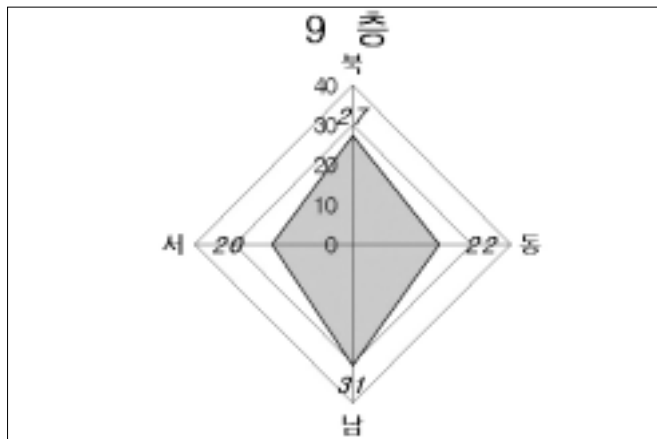


Fig. 14.
9층 오염층 분포

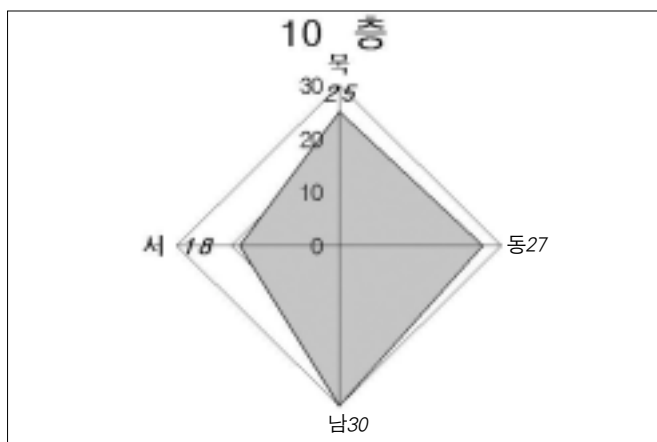


Fig. 15.
10층 오염층 분포

또한 Fig. 4를 보면, 전체적으로는 남쪽이 24%로 가장 넓었고, 다음으로 북쪽과 동쪽이 각각 20%, 서쪽이 19% 그리고 북서쪽과 남서쪽이 각각 5%, 북동쪽과 남동쪽이 각각 4%로 나타났다.

각 층별로 나누어 보면, 8방향으로 부재가 있는 기단부~3층까지 중 기단부는 서→남→동쪽면, 1층은 북→서→남쪽면의 오염면적이 넓게 있었고, 2층과 3층은 동·서·남·북쪽면이 넓게 나타났다. 또한 4방향으로만 부재가 있는 4층~10층은 남(31%) > 북(25%) > 동(24%) > 서(20%)로 나타났지만, 4층은 남쪽면이 41%로 다른 면과의 오염면적 비율 차이가 다른 층보다 컸고, 5층과 7층은 모든 방향으로 별 차이 없이 비슷하게 나타났다.

Fig. 16~19를 보면, 표면의 오염정도가 심화되어 조각면도 부식되어 조각원형을 알아볼 수 없는 단계인 A단계는 북(71%) > 북동(12%) > 동 = 남동(9%) 로 존재하고 있었으며, 남→서→북서쪽면은 A단계가 없었다. 또한 표면의 오염층은 형성되어 있으나 조각원형은 부식되지 않은 단계인 B단계는 남(25%) > 동 = 서(21%) > 북(17%)로서 84%를 차지하고 있는데, 이는 4층~10층까지는 4방향으로만 부재가 존재하며 각 옥개석받침 부분의 오염정도가 심하기 때문이다. 그리고 오염층의 제거가 용이한 단계인 C단계는 남(23%) > 북(19%) > 동(18%) > 남서(16%), 미세한 오염층만이 존재하는 D단계는 서(33%) > 북(25%) > 동 = 남동(17%) 로 조사되었다.

즉, 전체적으로 표면의 오염층은 형성되어 있으나 조각원형은 부식되지 않은 단계인 B단계가 오염면적 중 83%를 차지하고 있으며, 남쪽면이 가장 넓은 오염면적을 차지하고 있었다. 하지만 오염단계가 가장 심한 단계인 A단계는 남쪽면에서는 나타나지 않았고, 북쪽면이 71%를 차지하고 있었다. 이것으로서 경천사십층석탑의 오염면적은 남쪽이 가장 넓지만, 북쪽의 오염정도가 심한 것을 알 수 있었다.



Fig. 16.
A단계오염총분포



Fig. 17.
B단계오염총분포



Fig. 18.
C단계오염총분포



Fig. 19. D단계오염층분포

2. 석재표면에 형성된 오염물 분석결과

1) 현미경 분석

현미경분석 결과 박락층은 원석층과 유백색의 중간층, 그리고 검회색의 오염물층 등 크게 세부분으로 나누어졌으며, 이들 층의 두께는 오염물의 위치와 방향에 따라 다르게 나타났다. 특히 photo 4에서 보는 것과 같이 남동쪽의 오염층의 경우 유백색의 중간층이 거의 존재하지 않았으며, 오염층의 경우도 약 100 μ m로 매우 얇게 존재하였고, 오염층 자신도 박락이 일어나고 있는 것이 관찰되었다. 하지만, photo 5와 같이 남서쪽의 오염물의 경우 중간층이 약 100 μ m, 오염층이 약 600 μ m정도로 매우 두꺼운 것을 알 수 있다. 이들 층은 층별 구성원소가 다를 것으로 예상되는데 이는 SEM-EDX 분석에서 잘 알 수 있었다.

2) X선회절분석

XRD 분석에 의한 흑색오염층의 주광물성분은 방해석(Calcite)과 석고(Gypsum)로 부분에 따라서는 석고결정이 원석의 방해석보다 훨씬 더 많이 형성되어 있는 곳도 관찰된다.



Photo 4.
오염물-남동-대물렌즈 5X

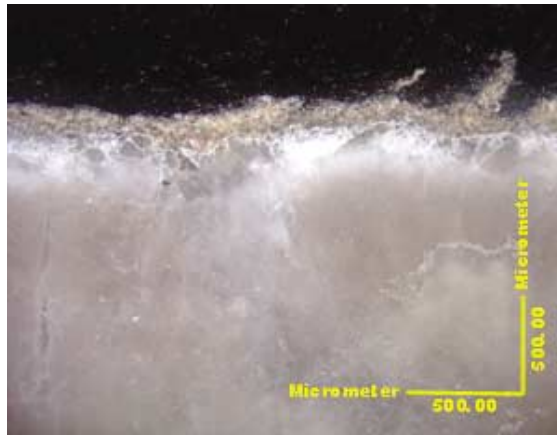


Photo 5.
오염물-남서-대물렌즈 5X

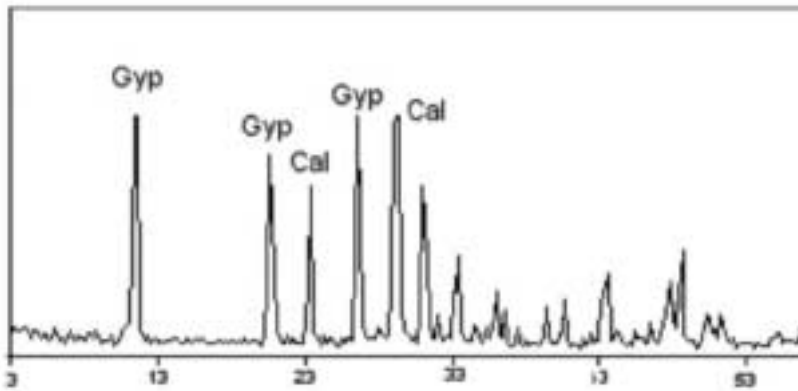


Fig. 20.
XRD Pattern - 흑색오염층 부위

3) X선형광분석(EDXRF)

Fig. 21~26은 경천사십층석탑의 오염물을 X-선 형광분석에 의한 성분을 분석한 그래프로 부재의 방향과 오염색에 따라 측정된 결과이다.

Fig. 21.
남쪽 오염물 -
검정색 - Ca, Fe, S, K

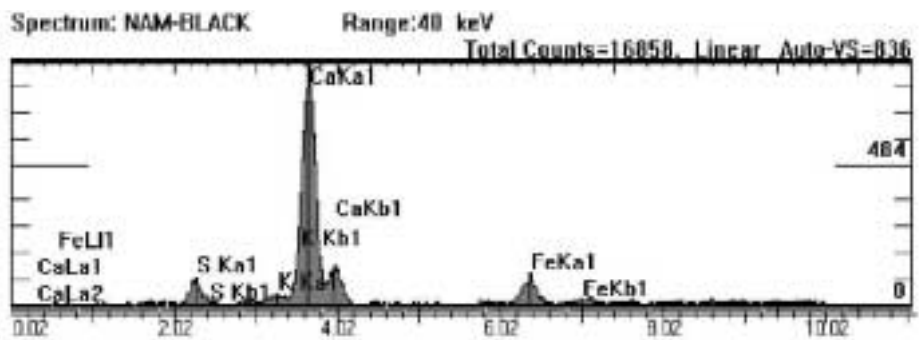


Fig. 22.
남쪽 오염물 - 흰색(안쪽) - Ca

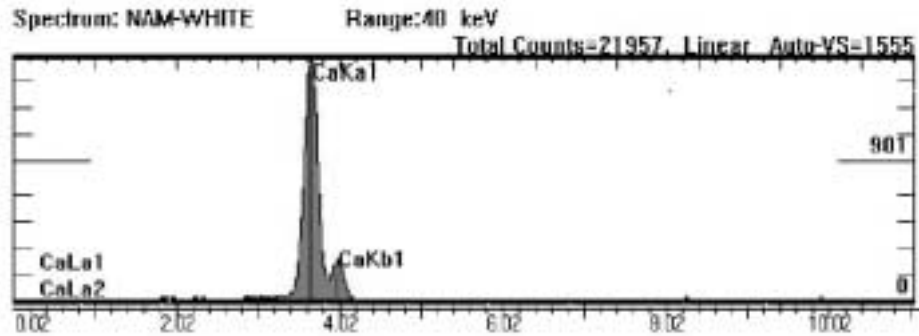
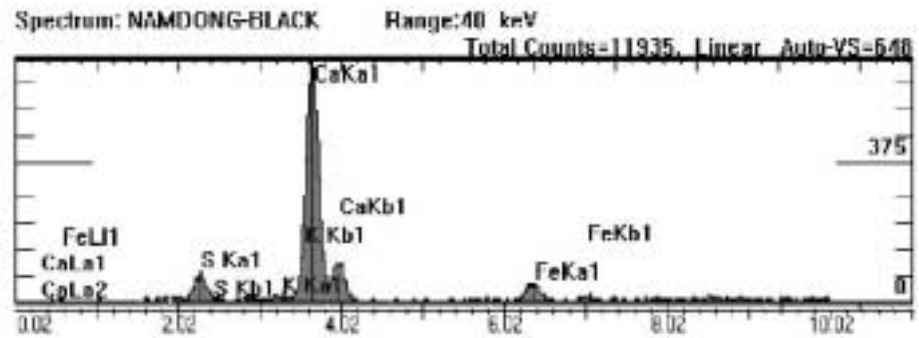


Fig. 23.
남동쪽 오염물 -
검정색 - Ca, Fe, S, K



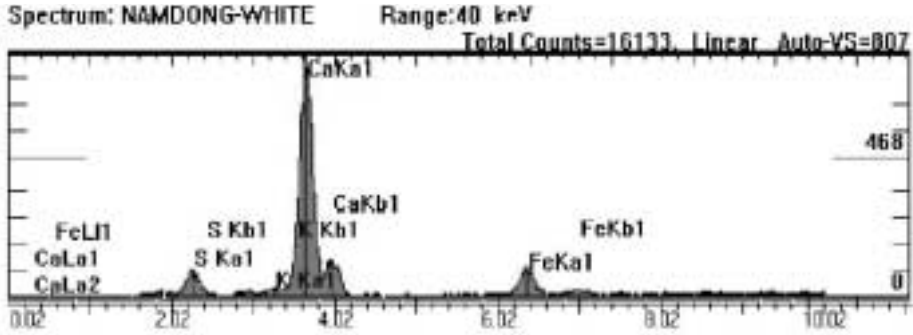


Fig. 24.
남동쪽 오염물
- 흰색 - Ca, Fe, S, K

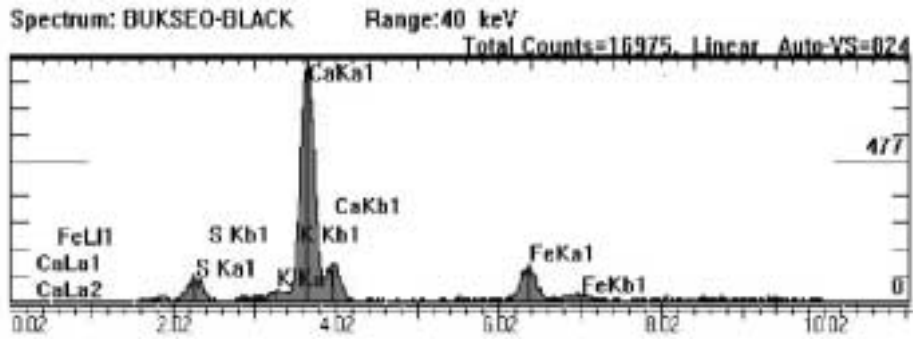


Fig. 25.
북서쪽 오염물
- 검정색 - Ca, Fe, S, K

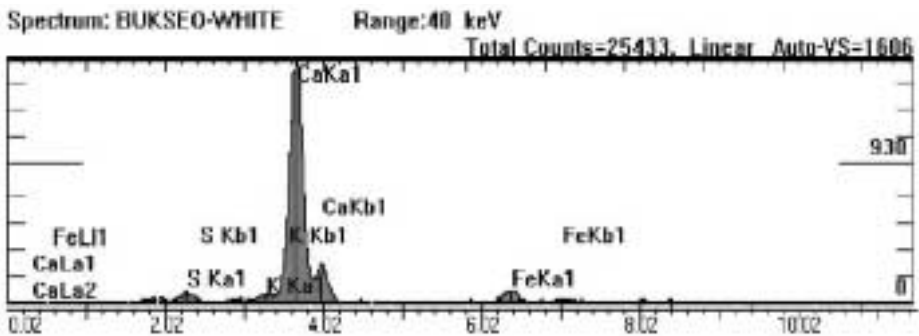


Fig. 26.
북서쪽 오염물
- 흰색 - Ca, Fe, S, K

남쪽 오염물의 검은색 부분은 X선 형광분석 결과 주성분은 Ca, Fe, S 및 K peak가 동정되었다. 검정색 오염물의 안쪽인 흰색 부분의 경우 주로 Ca 피크였으며, Fe, K 및 S의 경우 작은 피크로 검출되었다.

남동쪽 오염물의 검정색 부분에서는 Ca, Fe 및 S가 주성분으로 나타났으며 K peak도 검출되었고, 남쪽 오염물과 같은 성분이었다. 남동쪽 오염물의 검정색 오염물 안쪽인 흰색 부분의 경우 주성분이 Ca 이었으나, Fe, K, S도 검정색 오염물에서와 비슷하게 나타났다.

북서쪽 검정색 오염물의 경우 Ca, Fe, S이 주성분으로 나타났으며, K peak가 검출되었고, 북서쪽 검정색 오염물의 안쪽인 흰색 부분의 경우 주성분은 Ca였고, Fe, K, S의 경우 검정색 오염물에서보다 낮게 검출되었다.

오염물의 검정색 부분을 정성 분석한 결과 북서, 남, 남동에서 모두 Ca, Fe, S, K의 peak가 검출되었고, 흰색 부분의 경우 주로 Ca으로 이루어졌으며, K는 거의 검출되지 않았고, Fe와 S의 경우도 모두 적게 검출되었다. Ca가 높게 나타나는 이유는 원암의 재질에서 기인한 것으로 사료되며, 검은색 오염물의 대부분은 대기 중 먼지의 흡착으로부터 경화된 물질로 추정된다.

4) 유도결합플라즈마발광분석(ICP-AES)

ICP 분석결과 이물질의 성분은 Table 4와 같이 대부분 원석의 주성분인 Ca가 19~20wt%로 높게 나타났으며, 특이하게 2층 북쪽 옥개석에서는 15wt%로 다른 곳에 비해 낮은 함량치를 보였다. 이밖에 Al과 Fe, K 등이 약 0.3~0.8wt%로 나타났다. 이는 오염물의 주성분이 주로 원석에서 기인한 것으로 볼 수 있으며, 나머지 원소의 경우 대기의 이물질들에서 나타날 수 있는 성분들로 대기 분진 등이 고착된 것으로 추측할 수 있다. 하지만 이는 오염물 층의 두께가 매우 얇아 시료의 채취에서 나타날 수 있는 오차일 수도 있으며, 이를 보정하기 위해서 SEM-EDX를 통한 층별 원소 함량을 측정하였다.

5) 전자현미경 분석(SEM-EDX)

현미경에서 관찰된 박락층에 대해 SEM-EDX를 이용하여 분석한 결과 Photo 6, 7에서와 같이 관상의 석고(Gypsum) 결정이 관찰되며 그 외에 다양한 크기의 이물

Table 4. 경천사십층석탑 옥개석 이물질의 조성비

단위 : wt%

원소	위치	2층 옥계석	2층 옥계석	2층 옥계석	2층 옥계석	2층 난간석
		동쪽	서쪽	남쪽	북쪽	남쪽
Ca		19.3	20.3	19.8	15.2	20.1
Al		1.80	1.02	1.27	0.84	1.07
Fe		0.79	0.48	0.59	0.36	0.49
K		0.57	0.27	0.36	0.31	0.30
Na		0.29	0.17	0.21	0.17	0.18
Mg		0.33	0.17	0.22	0.10	0.11
Mn		0.011	0.007	0.009	0.005	0.008
Zn		0.010	0.008	0.017	0.007	0.011
Cu		0.011	0.018	0.008	0.007	0.010
Ti		0.068	0.043	0.050	0.036	0.040
계		23.18	22.486	22.534	17.035	22.319

질이 관찰된다. 이 부위에 대한 EDX 피크(Fig. 27)와 그 정량분석 결과(Table 5)에서 Ca, S, K가 주피크로 나타났고, 이외에 Si와 Al이 검출되었다. Ca는 Calcite와 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 의 석고(Gypsum) 구성성분으로, S는 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 의 집섬의 구성성분으로 추정되며, K, Si, Al은 외부의 먼지의 침착에서 기인된 토양성분이나 원석에 소량 존재하는 사장석(Albite)의 구성성분에서 기인한 것으로 사료된다.

이에 대한 원소의 층별 존재분포도를 보기 위해 mapping을 실시하였는데(Fig. 28~29), 이러한 결과는 Al, Si, S, C 등이 오염층에서 집중적으로 분포한다는 것을 알 수 있었다.

V. 결론

경천사십층석탑의 표면에 생성된 오염물은 대기 중에 발생된 오염물을 대기오염으로 인한 물질의 이동과 침착의 현상으로 생성되었다 할 수 있으나 화학적으로 매우 복잡한 체계를 갖고 있고 그 생성원인과 메커니즘을 규명하는 것이 굉장히 어려

Photo 6.
경천사십층석탑 흑색오염층의
표면 전자현미경사진(1,000배)

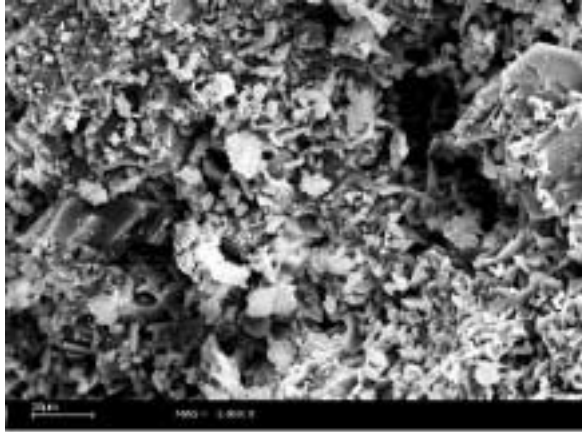


Photo 7.
경천사십층석탑 흑색오염층의
표면 전자현미경사진(3,000배)

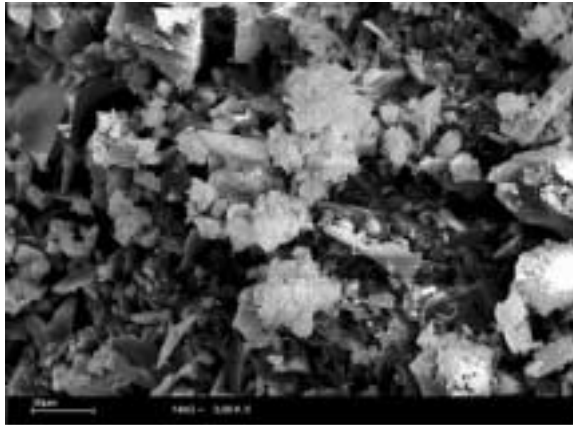


Fig. 27.
경천사십층석탑 흑색오염층
표면부위의 EDX 피크

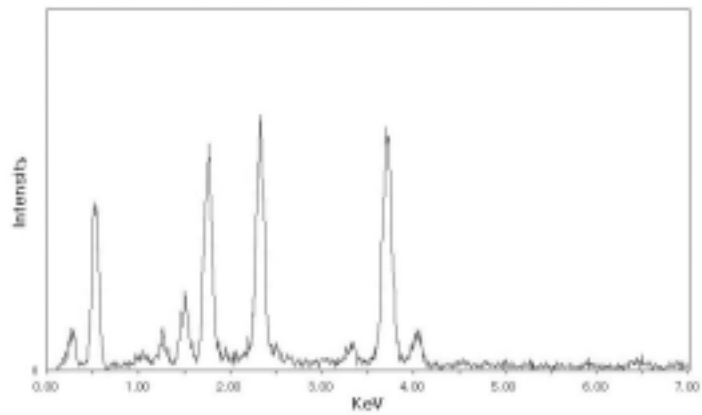


Table 5. 경천사십층석탑 흑색오염층 표면부위의 EDX 정량분석값

Element	Element Wt.%
Al	2.90
Si	8.06
S	29.18
K	29.77
Ca	30.08
Total	100.00

운 일이다. 그리고 생성된 흑색오염층은 산성비와 복합적인 작용으로 녹아내리게 되면서 암석의 표면에 얼룩을 형성하게 되어 시각적으로도 좋지 않은 결과를 초래한다. 또한 흑색오염층의 생성은 과거에 비해 진정되는 기미를 보이고 있으나 오염층의 발생원인이 화학적으로 복잡한 체계를 갖고 있는 만큼 표면에 남아있는 오염물은 미학적인 면이나 석조물의 보존측면에서도 대책이 시급한 시점에 있다. 현재의 흑색 오염물질은 경천사십층석탑의 넓은 부분에 걸쳐서 분포되어 있는데, 옥개석 밑면과 탑신석에 주로 오염물이 생성되어 있고, 옥개석 밑면의 경우에는 방위와 상관없이 일률적인 오염층의 분포가 된 상태이며, 탑신석의 경우 남 > 북, 동 > 서 순의 오염층면적 분포 현황을 나타내고 있었으며, 오염층의 두께나 심화정도는 발생 면적과는 다소 다른 경향을 나타내고 있었는데 조각원형이 부식되지 않은 단계인 B단계가 오염면적 중 83%를 차지하고 있으며 석탑의 남쪽면에서 높은 분포를 나타냈다. 그러나 오염단계가 가장 높은 단계인 A단계는 남쪽면에서는 분포빈도가 낮게 나타낸 반면, 북쪽면에 71%를 차지하고 있었다. 이를 종합해 보면 경천사십층석탑의 오염면적 분포에서는 석탑의 남쪽에서 넓게 분포하는 것으로 나타났고, 오염정도별 분포에서는 석탑의 북쪽이 오염이 심화된 것을 알 수 있었다. 이러한 석탑의 오염물에 대한 분포 조사는 오염물이 생성될 시기의 지리적 위치나 오염물 생성 조건에 대한 연구, 그리고 주변 건물이나 산세 등과의 상관관계를 알 수 있다. 이는 나아가 전국 곳곳에 산재된 노출 석조문화재에 대한 오염물질의 생성원인이나 과정을 밝혀내는 연구에서도 작은 기여가 되어지길 바라는 바이다.

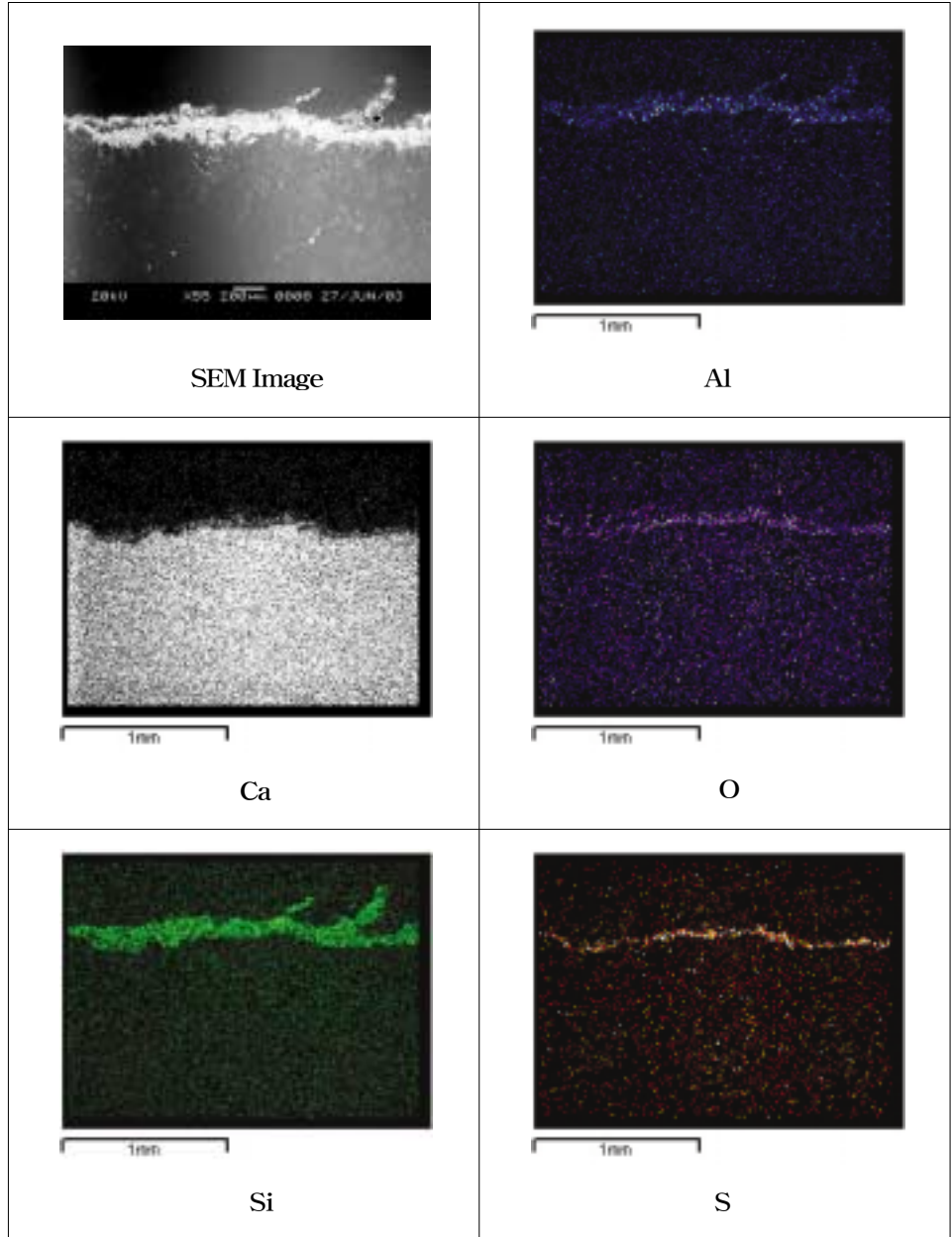


Fig. 28.
남서쪽 오염물 박락층 - 55배
- SEM-EDX mapping 결과

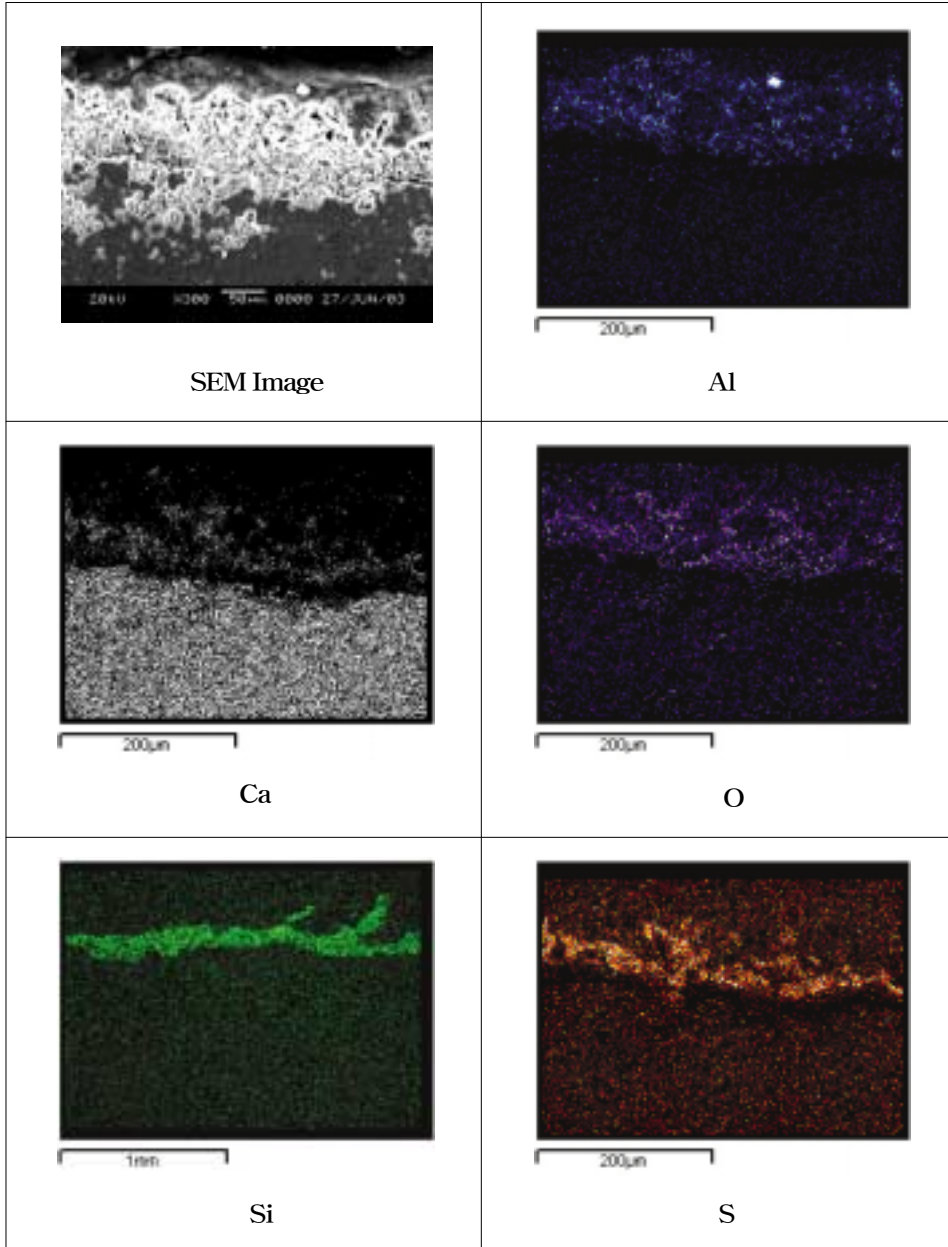


Fig. 29.
남서쪽 오염물 박락층 -
300배 - SEM-EDX
mapping 결과

참고문헌

1. 서기수 외, 1997, 국지 기상 특성에 따른 군산, 대구 및 포항의 대기질의 일변화, *한국환경과학회지*, 6(6).
2. 김희강 외, 1988, 대기오염과 제어, 동화기술.
3. 국립환경연구원, 1992, 대기오염과 산성비에 대한 피해조사 및 평가에 관한 연구 (Ⅱ).
4. EPA, 1969, Air Quality Criteria for Sulphur Oxides, Environmental Protection Agency Publ, No. AP-50.
5. 노재식, 1980, 대기환경이 문화재에 미치는 영향 연구, *보존과학연구*, 1:61-67.
6. 김사덕, 1996, 산성비에 의한 대리석 문화재의 부식에 관한 연구.