운주사 석조문화재의 보존상태와 보존방안에 대한 연구

김 사 덕 (국립문화재연구소 보존과학연구실)
이 찬 희 (공주대학교 문화재보존학과)
최 석 원 (공주대학교 지질환경학과)
신 은 정 (국립문화재연구소 보존과학연구실)

국문 요약

이 연구에서는 전남 화순군에 위치한 운주사의 석조문화재를 중심으로 암석의 풍화대 형성과 풍화의 진행에 따른 암석학적 특성과 지화학적 특성을 종합 검토하였다. 이 결과를 중심으로 석조물을 이루는 암석의 기계적, 화학적, 광물학적 및 물리적 풍화에 영향을 미치는 풍화요소를 규명하였고, 이들을 정량화하여 석조문화재의 보존방안 강구를 위한 기초자료로 활용하고자 한다. 이 연구를 위하여 야외 정밀조사 및 총 18개의 시료(화산력 응회암 7점, 화산회 응회암 4점, 화강암류 4점, 화강편마암 3점)에 대한 전암분석과 암석의 특성 및 광물감정을 실시하였다. 또한 각각의 석조물에 대한 훼손현황을 반정량적으로 기재하였다.

운주사 일대의 지질을 이루는 암석은 화산력 응회암이며 대체로 N30-40W의 주향과 10 20NE의 경사를 갖고 있다. 이 화산력 응회암은 운주사를 중심으로 매우 넓게 분포하고 있으며 운주사 경내에 분포하는 석조물은 모두 화산력 응회암으로 조형되어 있다. 현재 운주사 경내의 석조물들은 대부분 심한 균열의 발달과 함께 구조적 불균형을 이루고 있으며, 생물학적 오염 및 암석의 풍화가 상당히 진행되어 각력이 탈락하고 광물의 입상분해가 발생하는 등 풍화와 훼손양상이 아주 심각하다. 또한 석조물 곳곳의 철편과 시멘트 몰탈은 산화되어 적갈색의 침전물과 회백색의 침전물을 형성하고 있다. 이들 석조물에 대해 육안 훼손정도를 기재한 결과 대부분의 석조물들이 MD(moderate damage)에서 SD(severe damage) 등급의 훼손정도를 보이고 있다.

각 암석의 X선 회절분석 결과, 대부분의 시료들은 석영, 정장석, 사장석, 방해석 및 자철석 등의 광물로 구성되어 있다. 현미경하에서는 석영과 장석류가 심하게 변질되었으며, 타형의 결정형을 보이는 흑운모는 풍화되어 이차 풍화광물인 녹니석으로 변질되어 있다. 또한 응회암 곳곳의 열극대에 적갈색의 철분 침전물이 관찰되는 것으로 보아 암석의 내부까지 풍화가 진행되고 있음을 알 수 있다.

연구지역의 석조물을 이루는 응회암류는 Subalkaline, Peraluminous의 영역에 도시되며, 시료의 SiO_2(wt.%) 범위는 화산력 응회암이 70.08 73.69, 화산회 응회암은 70.26 78.42의 범위를 보이고 있다. 또한 주성분원소에 대한 화학적풍화지수(CIA)와 풍화잠재지수(WPI) 계산치에서 CIA의 범위는 화산력 응회암은 55.05 60.75, 화산회 응회암은 52.10 58.70, 화강암은 49.49 51.06 화강편마암은 53.25 67.14의 범위를 보이며 이들은 편마암류와

응회암류에서 큰 값을 갖는다. WPI는 응회암류와 편마암류의 시료에서 0선 이하에 있거나 0선에 근접되어 도시되는 것으로 보아 상위 CIA에서와 같이, 이들 응회암류와 편마암류가 화학적인 풍화 작용을 쉽게 받고 있음을 시사한다.

암석의 분말시료와 석조물의 피복시료를 채취하여 전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과 암석의 이차적인 풍화산물인 스멕타이트, 불석군의 점토광물이 관찰된다. 그리고 암석의 생물학적 풍화 요소인 하등식물의 균사류 및 지의류의 모근과 포자가 함께 관찰된다. 이는 암석의 내부까지 생물체가 압력을 가하고 있어 석조물의 기계적 풍화작용을 가중시키고 있으며, 이와 함께 석조물 내에 점토광물화가 상당히 진행된 것으로 판단된다.

암석의 풍화가 상당히 진행되어 비, 바람, 수목, 지반 등 자연환경 의해 훼손이 가속화되고 있는 상태이다. 이에 대한 방안으로 1차 수목 제거 등 주변 환경정비와 배수로 설치 등 물 침투 방지에 대한 지반환경 조성이 필요하고, 2차 지의류 제거 등 생물학적 처리와 합성수지를 사용한 균열부분 접착복원과 암석 재질을 강하게 하는 경화 및 발수처리를 실시한다. 그리고 풍화의 원인인 바람, 햇빛, 비 등을 차단시킬 수 있고 주변경관과 어울리는 보호시설을 건립하여 보존하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

주제어 : 운주사, 화산력응회암, 훼손 정도, 풍화 진행, 주변 환경, 보호시설

Ⅰ. 서 론

운주사(雲住寺)는 전라남도 화순군 도암면 대초리에 소재하며 경위도는 126°52′58″, 34°55′26″상에 위치한다. 운주사에 분포하는 석조문화재의 성격을 밝히려는 노력은 여러 사람들에 의해 조사 연구된 바 있으며, 또한 유적의 현황이나 성격 등의 규명을 위한 작업이 전개되고 있다. 또한 사역(寺域)의 발굴조사사업이 전남대학교 박물관에 의해 1984년부터 1991년까지 네 차례에 걸쳐 시도되어 사역의 규모, 건물터의 위치와 변천과정, 사찰의 개창시기 등에 관해 상당한 이해를 가질 수 있게 되었다. 이에 의하면 운주사는 고려 초(11세기 초반)에 창건된 이후 12세기의 전성기를 거쳐 1495년에 네번째의 중창을 하였고, 이후 1600년 이전에 폐사되었다.

현재 운주사 경내에는 보물 제796호, 제797호, 제798호를 비롯하여 석불 91기, 석탑 21기가 있으며 재질이 풍화를 받기 쉬운 응회암이나, 석불 및 석탑에 대한 암석의 종류와 지질학적 구조안정성, 암석학적 풍화와 훼손 및 보존 방안에 관한 연구는 이루어지지 않고 있다.

우리나라 대부분의 석조문화재와 마찬가지로 운주사의 석불 및 석탑들은 아무런 보호시설 없이 옥외에 노출되어 있다. 이러한 유물을 이루는 석재는 옥외에서 생물학적 과정이나 암석 위에 자라는 지의류(地衣類) 또는 조류(藻類)의 배설물에 의해서 형성된 킬레이트(chelate)라는 유기분자로부터 방출된 수소가 가수분해 작용에 참여하게 되어 풍화작용을 촉진하게 된다.

이와 같이 석조문화재를 약화시키는 주된 요인은 열, 물, 대기, 생물 등으로 이에 의해 풍화 작용을 받아 열화하고 마멸되어 붕괴된다. 따라서 이 연구에서는 전남 화순군에 위치한 운주사의 석조물을 중심으로 암석의 풍화대 형성과 풍화의 진행에 따른 암석학적 특성과 주성분 원소, 미량원소 및 희토류원소의 지구화학적 특성과 거동을 종합 검토하였다. 이 결과는 석조물을 이루는 암석의 기계적, 화학적, 광물학적 및 물리적 풍화에 영향을 미치는 풍화요소를 규명하고 이들을 정량화하여, 보존 과학적 연구를 위한 기초 자료로 활용 될 수 있을 것이다.

II. 조사 및 연구방법

본 연구에서 석조물의 주를 이루고 있는 화산력 응회암과 화산회 응회암 그리고 석조물을 보강하는데 쓰인 화강암과 화강편마암의 시료를 야외에서 채취하였다. 이들은 석조물과 풍화양상을 같이하는 시료들이며, 화강암과 편마암은 석조물의 보강재나 산재된 암석들이다. 따라서 육안관찰과 풍화등급으로 세분하여 화산력 응회암 7점, 화산회 응회암 4점, 화강암 4점, 그리고 화강편마암 3점으로 총 18점의 시료를 채취하였으며, 이들 시료들은 구성광물 및 풍화특성을 살펴보기 위하여 박편제작을 하여 편광현미경으로 관찰하였다. 육안관찰에서는 광물의 조직, 색깔, 크기, 반정유무, 쇄설물의 크기, 풍화의 정도 등을 기재하였고, 편광 현미경을 이용하여 조암광물의 광학적 성질, 산출상태, 모드분석, 광물공생군, 풍화에 의한 변질광물의 생성등을 관찰하였다.

석재로 쓰인 응회암의 암석학적 특성을 알아보기 위해 편광현미경과 전자현미경(SEM)을 사용하였다. 전자현미경의 모델은 Link SA의 에너지 분산형 X-선 분석기(EDXA, PV 9100/60)가 장착된 Shimatzu 사의 ISI-SX-40 이다. 분석시료는 탄소와 금으로 이중피복한 것을 이용하였다. 또한 일부 시료에서 X-선 회절 분석을 실시하였다. 분석기기는 Rigaku제 D/Max-IIB model이였고, X-선은 CuKα에 조건은 30kV와 15mA 였다.

암석, 광물의 화학적 성질 및 풍화에 의한 지화학적인 성분변화를 알아보기 위해 아게이트 유발로 분말시료를 제작하여 ACTLABS에서 주성분 원소, 미량원소 및 희토류원소를 분석하였다. 분석기기는 유도결합 아르곤 플라즈마 질량분석기(ICP, ICP-MS)와 중성자 활성분석기(INAA)를 이용하여 정량분석 하였다. 분석결과는 분석과정에서 필수적인 신뢰도 측정을 이용하여 평가 되었다.

III. 암석 및 암석화학적 특성

1. 암석 및 광물학적 특성

석조물은 대부분이 야외에 오랜 세월동안 위치해 있었으므로 암석 구성성분의 용해에 의

한 변색, 물 침투에 의한 표면과 절리면의 차별풍화, 표면의 박리현상 등의 영향을 받고 있으며 이들은 풍화정도에 따라 암석의 구성성분과 변질정도의 차이를 나타낸다.

편광현미경에서 관찰한 운주사 응회암류는 미세한 알칼리 장석과 석영으로 된 유리질 샤드 등의 기질에 안산암과 유문암의 암편이 존재하고 있으며<그림 1. A, B, C, E> 이들 기질 위에는 용식된 석영과 장석 반정이 드문드문 들어 있다<그림 1. B, C>. 또한 유리질 기질에는 동심원상의 균열이 발달하는데 이를 진주암 균열(perlitic crack)이라 한다<그림1. F>

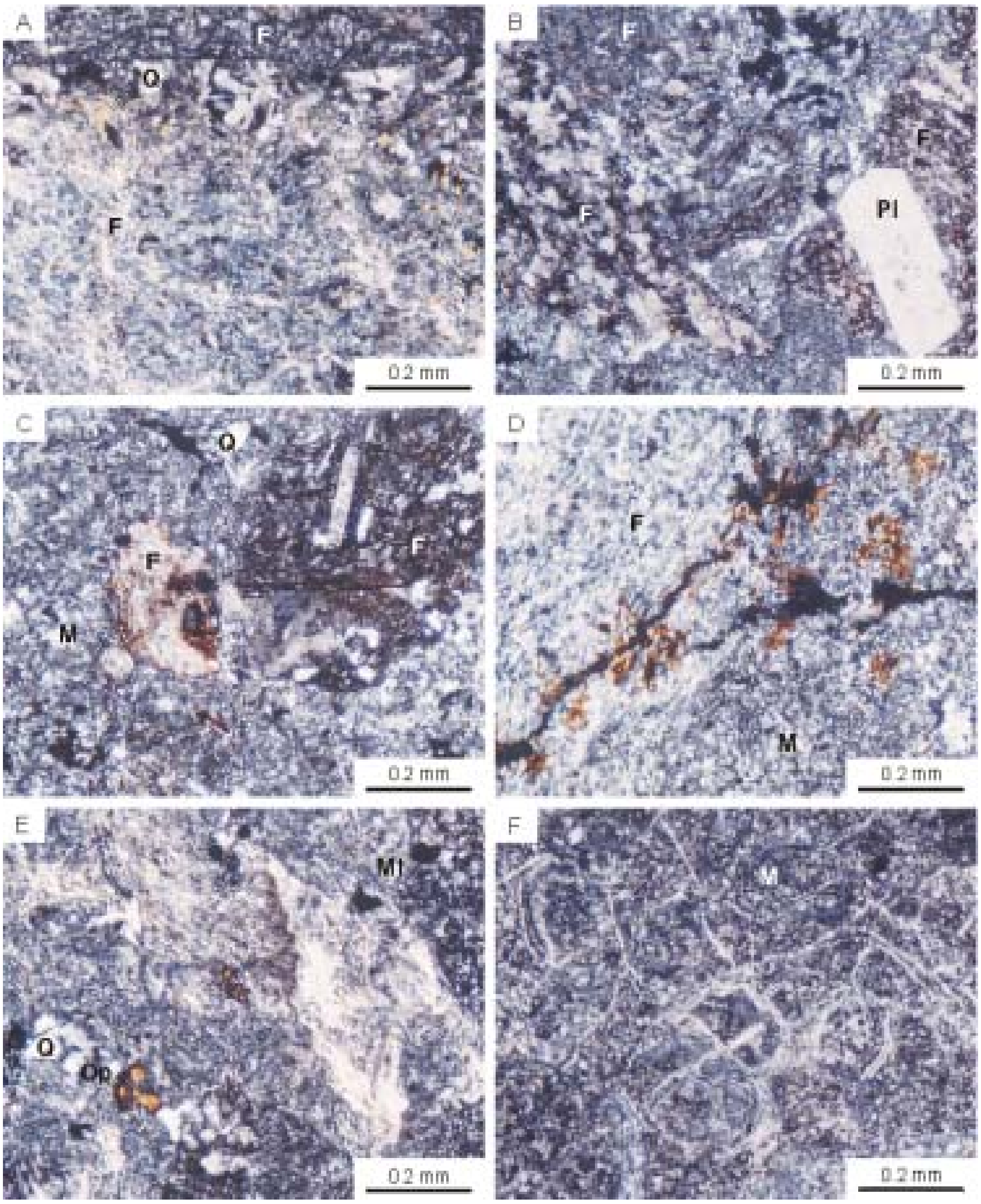
암석 파편으로서는 조면 조직을 보여주는 조면암과 성분을 알 수 없는 화산 유리로 된 화산암도 발견된다. 조면암 파편 속에는 이차 광물인 자철석이 다량 포함되며 철분에 의하여 적갈색의 침전물이 형성된 곳이 관찰된다<그림 1. D, E>. 기질 부분은 용식된 석영과 장석으로 되어 있는데 석영은 대체로 파쇄되고, 원마되었으며 파동소광을 보이고 있다. 장석은 알바이트 쌍정과 칼스바드 쌍정을 이룬 장석류가 우세하게 나타나며 그밖에 자철석 같은 이차광물을 포함하기도 한다<그림 1. E>.

이들 암석에 관한 X-선 회절분석 결과<그림 2>, 석조문화재의 구성광물은 석영, 정장석, 사장석, 방해석, 자철석 등이 주류를 이루고 있으며, 기질과 장석류는 심하게 변질 되어있다. 흑운모는 이차 풍화광물인 녹니석으로 변질된 모습을 보인다. 또한 응회암 곳곳의 열극대에 적갈색의 철분 침전물이 나타나고 있다.

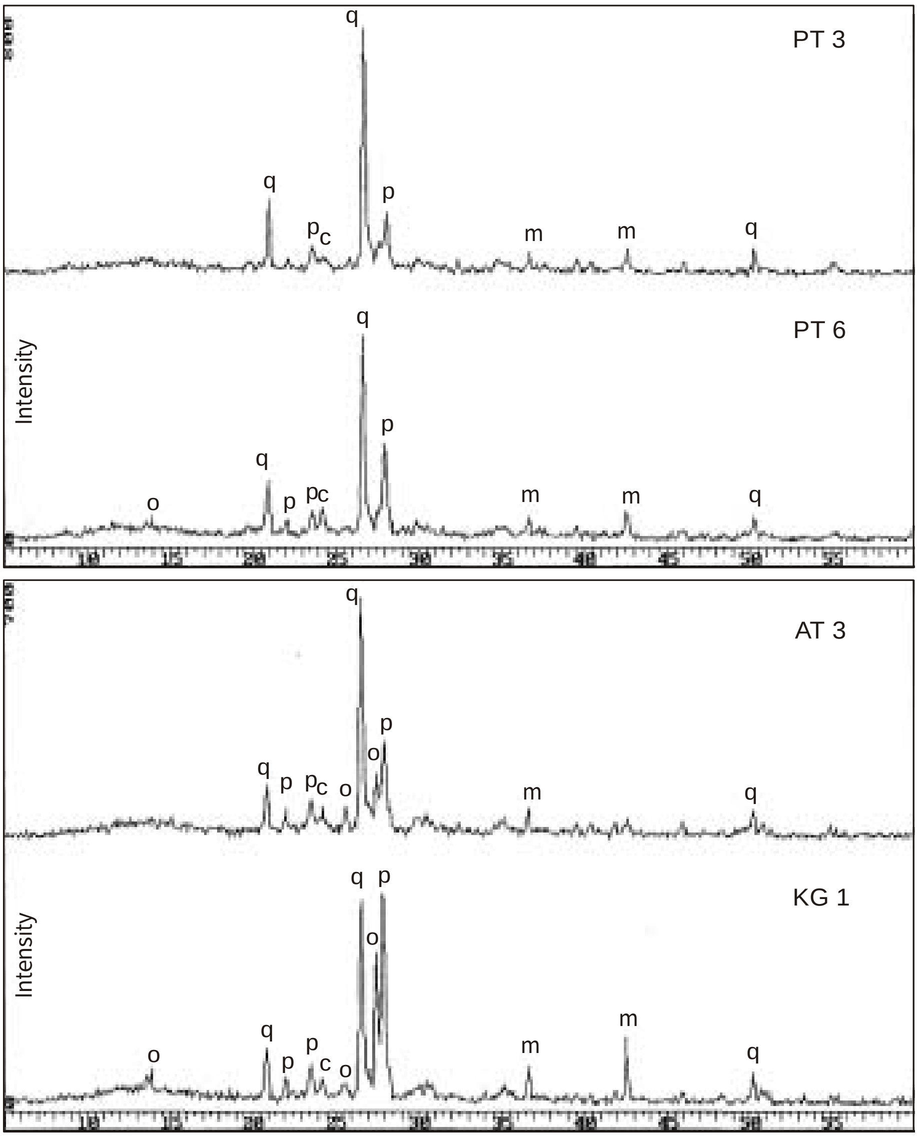
2. 암석화학적 특성

연구지역 내에 분포하며 석조유물을 구성하는 암석과 산재 암석을 대상으로 암석, 광물의 화학적 성질 및 풍화에 의한 지화학적인 성분변화를 알아보기 위해 총 18개 시료에 대해 주성분 원소, 미량원소 및 희토류원소를 분석하였다. 이 시료들의 주성분, 미량 및 희토류원소의 절대적인 거동특성은 여기서 논할 수 없으므로 각 시료별 상대적인 증감을 표현하였다.

총 18개의 암석 시료는 화산력 응회암(PT), 화산회 응회암(AT), 화강암류(KG, BG) 그리고 편마암류(GG)이며, 연구대상 시료에 포함된 주성분원소 (SiO_2, Al_2O_3, MnO, CaO, K_2O, MgO, Na_2O, TiO_2, Fe_2O_3 등)와 21개의 미량원소 (Ba, Sr, Y, Zr, Be, V, As, Co, Cr, Cs, Hf, Cu, Ni, Pb, Zn, S, Rb, Sb, Sc, Th, U) 및 희토류 원소에 대한 분석 결과는 <표 1>, <표 2>에 나타내었다.



<그림 1> 현미경 관찰 결과
Q=quartz(석영), F=rock fragments(암편), Pl=plagioclase(사장석),
Mt=magnetite(자철석),
Op=opaque mineral(불투명광물), M=matrix(석기).



2θ CuKa

<그림 2> X-선 회절분석 결과.
q=quartz(석영), p=plagioclase(사장석), c=calcite(방해석), o=orthoclase(정장석), m=magnetite(자철석).

<표 1> 석재 시험편의 주성분원소(wt.%) 분석결과

	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6	PT7	AT1	AT2	AT3	AT4	BG1	BG2	KG1	KG2	GG1	GG2	GG3
SiO_2	70.69	70.53	70.52	70.06	71.26	70.81	71.69	78.42	72.32	70.26	70.24	65.90	67.09	70.80	70.69	72.67	66.95	64.61
Al_2O_3	13.64	15.23	13.80	16.34	15.80	15.79	16.05	10.79	14.27	14.85	14.04	16.45	16.26	13.71	13.97	14.84	17.03	19.86
$Fe_2O_3^*$	1.44	1.60	1.72	1.36	1.48	1.66	1.34	0.82	2.20	2.02	1.35	3.50	2.30	2.12	1.39	1.99	2.67	3.16
MnO	0.046	0.058	0.059	0.047	0.039	0.039	0.124	0.046	0.054	0.050	0.047	0.068	0.025	0.047	0.054	0.062	0.028	0.033
MgO	0.41	0.51	0.46	0.54	0.56	0.38	.044	0.09	0.11	0.18	0.46	1.18	0.47	0.16	0.10	0.57	0.76	1.12
CaO	0.50	0.35	0.27	0.35	0.56	0.27	0.28	0.09	0.36	0.23	0.67	2.92	2.66	0.75	0.64	2.30	0.58	0.68
Na_2O	3.71	3.49	2.09	3.34	2.50	3.15	3.15	0.63	5.25	3.39	1.96	3.63	3.02	4.00	4.04	3.08	1.66	2.09
K_2O	3.02	4.78	5.10	4.46	4.57	4.22	4.32	8.06	2.96	5.37	5.02	5.10	4.91	5.23	5.15	2.22	7.09	4.66
TiO_2	0.219	0.212	0.216	0.180	0.206	0.212	0.164	0.116	0.355	0.322	0.174	0.460	0.454	0.164	0.102	0.326	0.379	0.426
P_2O_5	0.05	0.03	0.07	0.02	0.12	0.02	0.03	0.03	0.06	0.06	0.03	0.24	0.32	0.04	0.04	0.07	0.17	0.15
LOI**	1.70	1.99	2.44	2.67	2.79	3.24	2.75	1.09	1.01	1.35	2.66	0.51	0.31	0.22	0.44	1.06	2.18	2.07
Total	99.22	98.78	98.76	99.40	100.26	98.79	100.30	100.18	98.95	98.09	98.64	99.95	98.61	100.24	99.63	100.04	99.50	99.67
CIA***	55.05	56.90	58.34	59.66	60.10	60.64	60.75	52.10	53.26	55.72	58.70	49.49	49.74	50.14	51.06	53.25	58.78	67.14
WPI****	1.68	1.07	-2.14	-1.90	-2.60	-4.03	-2.75	2.57	4.68	3.10	-2.68	11.24	10.66	8.29	7.27	5.43	0.71	-2.57

*; Total Fe as Fe_2O_3, **; loss-on-ignition, ***; chemical index of alteration, **** ; weathering potential index

<표 2> 석재 시험편의 미량 및 희토류 원소의 분석결과(ppm)

	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6	PT7	AT1	AT2	AT3	AT4	BG1	BG2	KG1	KG2	GG1	GG2	GG3
Ba	711	651	1017	680	664	804	570	1702	1026	1565	64	849	1781	220	125	810	1771	831
Sr	189	211	190	212	202	168	203	99	329	231	166	376	677	38	31	224	154	127
Y	22	17	13	12	17	11	8	12	18	17	14	19	9	32	67	40	41	36
Zr	131	125	144	95	138	140	104	108	283	273	130	266	355	224	196	95	442	287
Be	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	3	2	2	5	1	2	2
V	9	16	18	9	26	9	9	13	10	11	11	36	30	<5	12	26	26	80
As	2	<2	17	<2	<2	2	11	3	3	10	2	<2	<2	<2	2	<2	10	<2
Co	3	9	4	4	4	2	4	2	4	4	3	7	6	3	3	4	4	11
Cr	93	69	32	15	34	47	21	120	106	51	9	23	123	122	60	35	53	114
Cs	12.9	6.4	9.8	11.1	10.2	6.1	5.1	2.9	3.9	5.2	11.5	7.5	2.8	2.7	6.2	2.2	4.2	5.9
Hf	4	3.3	4.1	2.6	4.3	4.2	3.2	3	6.9	6.5	3.8	5.5	9.6	7.2	8.6	2.7	11.5	8.6
Cu	8	10	9	6	8	7	6	8	18	8	6	80	12	17	8	11	7	26
Ni	46	34	22	10	20	22	13	65	59	30	3	11	67	67	33	14	29	72
Pb	32	41	56	26	20	19	31	36	55	33	24	38	30	32	33	29	41	35
Zn	46	56	64	48	62	47	46	27	42	60	51	104	70	39	38	32	34	56
S %	0.005	0.005	0.009	0.006	0.009	0.005	0.007	0.005	0.007	0.010	0.006	0.067	0.008	0.005	0.003	0.004	0.005	0.027
Rb	101	178	122	161	162	131	128	160	96	112	176	209	130	162	282	50	145	195
Sb	0.4	0.4	0.9	<0.2	<0.2	0.2	0.8	0.3	<0.2	<0.2	0.4	<0.2	<0.2	<0.2	0.3	<0.2	0.6	0.2
Sc	3.1	3.3	3.1	2.5	3.2	3	2.8	2	2.8	3	3	6	2.1	5.8	5.5	7.2	8.4	12.9
Th	14.4	14.5	14	12.1	16.5	17	15.6	11.7	10.3	108	17.1	32.1	25.6	22.8	46.7	4	28.2	19.8
U	4.7	3.7	2.9	2.9	8.1	4	1.6	2.8	3	2.3	4.5	10.4	4.9	3	10.2	1	3.2	6.7
rare earth elements(ppm)																		
La	71.6	44.3	17.3	23.8	28.1	24.4	5.9	15.2	82	57.1	33.9	51.8	96.9	51.7	54.1	33	66.5	71.4
Ce	88	59	35	37	45	42	29	26	72	76	54	89	163	90	104	56	114	112
Nd	39	29	9	13	22	10	<5	9	36	31	18	35	59	35	52	19	52	53
Sm	7.5	4.2	1.1	1.6	3.4	2	0.9	1.4	5.2	5	2.9	5.5	8.7	6.6	10	3.3	8.4	8.5
Eu	1.8	0.7	0.5	0.4	0.6	0.4	0.3	0.3	0.9	1.3	0.6	1.2	1.6	0.5	0.4	0.9	2	1.4
Yb	2	1.7	1.4	1.3	1.9	1.8	1.3	1.5	2.5	2.1	1.8	1.5	0.2	3	8.2	6.1	4.4	2.8
Lu	0.31	0.24	0.24	0.18	0.29	0.26	0.2	0.25	0.38	0.32	0.27	0.22	-0.05	0.45	1.23	0.91	0.68	0.42

(1) 주성분 원소의 거동특성

석조물의 본체를 구성하는 암석인 응회암류의 분석치를 살펴보면 SiO_2의 함량이 증가함에 따라서 화산력 응회암은 Al_2O_3, Na_2O만이 감소경향을 보이며, 화산회 응회암은 K_2O는 증가하는 경향이 Al_2O_3, Na_2O, TiO_2, Fe_2O_3는 감소하는 경향을 나타내나 그 이외의 다른 원소에서는 뚜렷한 경향을 나타내지는 않는다. 일반적으로 분석치에서 Al_2O_3, K_2O, Na_2O, TiO_2, Fe_2O_3의 성분 변화폭은 크게 나타나며 MnO, MgO는 성분변화의 폭이 적게 나타난다. 이는 응회암류의 일반적 경향과 암석의 풍화에 의한 상대적인 소실효과가 반영된 것으로 판단되며 이들 경향은 암석의 조성에 따른 차이를 나타내주고 있다.

응회암류의 전체 SiO_2(wt.%) 조성변화 폭은 70.26 78.42로서 다소 넓은 범위를 보여주며, 지역 및 암종에 따라서 분화경향이 다소 다르다. 연구지역에서 화산력 응회암은 70.08 73.69, 화산회 응회암은 70.26 78.42, 흑운모화강암은 65.90 67.09, 알칼리장석 화강암은 73.69 73.80, 화강편마암은 64.61 72.67이다. 그러나 이들 암석의 분석치는 신선한 것도 있으나 풍화양상이 심한 것도 있어서 암석의 화학적 진화를 설명하기에는 많은 문제가 내포하고 있는 것이다.

SiO_2에 대한 알칼리 관계도에서 연구지역 암석인 응회암류는 모두 Subalkaline계열의 유문암 영역에 도시되며, SiO_2에 대한 알칼리 변화량은 화산력 응회암은 7.19 8.27(wt.%), 화산회 응회암은 6.98 8.76 (wt.%)의 범위를 보이며, SiO_2의 증감에 따라서 특별할 경향성은 보이지 않지만, 다소의 성분변화와 함께 감소하는 경향을 보인다. 이처럼 동일 암종에서 다소의 차이를 보이는 것은 풍화 과정에 따른 알칼리 성분의 용해로 암석내에서 알칼리의 함량이 감소한데 기인한 것으로 판단된다.

알루미나 포화지수 값에 의한 구분법에서는 연구지역의 응회암류는 모두 알루미늄이 과다한 Paraluminuous의 영역에 도시된다. 이들 $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$에 대한 $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$의 비는 성분변화 폭이 크며 정의 상관관계를 갖는다. 이들은 풍화과정에서 암석의 풍화작용에 의하여 알칼리 성분의 소실효과와 관련 된 것으로서 사장석, 정장석 및 흑운모가 풍화에 따라 점토광물과 산화철 광물이 생성되었기 때문인 것으로 해석된다.

(2) 미량 및 희토류 원소의 거동특성

응회암류의 각 암석별 미량 및 희토류 원소의 분석결과는 표 2와 같으며 표에서 SiO_2가 증가함에 따라 PT는 Pb, Cs, Ni는 증가하고 Sr, Rb, Ce, Sm 및 La의 조성은 감소하는 경향을 나타내고 있으며, AT에서는 Sr, Zr, Ba, Zn, Cs, Ce, La, Sm, Lu, Y 및 Eu의 조성만

이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 SiO_2의 증가에 따른 원소의 증감은 특별한 경향을 보여주지 않는 원소도 있다.

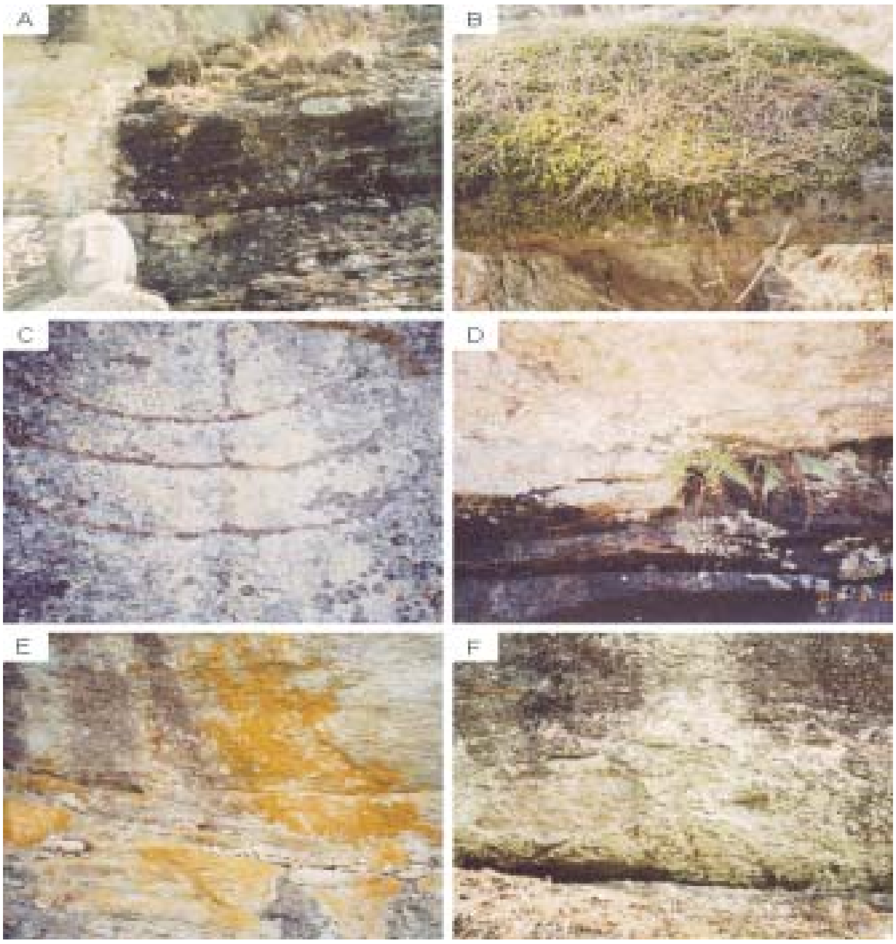
일반적으로 응회암류에서 Be, Co, Cu, Sc, Yb를 제외한 모든 원소에서 비교적 높은 함량을 가지며 조성의 변화폭도 크게 나타나고 있다. 이들은 각각 암석의 풍화도의 차이와 분화경향을 반영하는 것이나, 이들 자료를 가지고 암석의 성인과 생성환경을 논하기에는 불충분하다.

IV. 암석의 훼손 및 풍화 특성

1. 암석의 생물학적 오염

운주사 석탑과 석불은 생물학적 오염이 가중되어 있으며 균류, 조류, 지의류나 선태류들은 암석의 표면에 고착되어 기생하면서 황갈색, 녹색 등의 다양한 색으로 나타나고 있다. 또한 이들이 생장을 멈추면 암흑색 또는 흑갈색으로 변색되어 미관상의 오염과 암석의 풍화도 촉진시키고 있다. 지의류에 의한 석조물의 피복도(biological coverage)를 보면 평균적으로 50%이상으로 부착생물의 번식이 아주 심각한 수준이며<사진 1. A>옥개석은 100%이상의 피복도를 보인다<사진 1. B> 또한 직사광선을 받기 어려운 석불군 후면 암반에서는 담록색, 황갈색, 암흑색을 띠는 지의류가 피복되어 있으며<사진 1. A, C, D, E, F> 이는 암석의 약 1.5 2cm 깊이 까지 포자근과 균사에 영향을 받은 것으로 나타난다. 또한 이들 암반사이로 지하수 및 지표수의 유출과 함께 지의류가 암석의 풍화를 가중시키는 역할을 하고 있다<사진 1. D, F>.

이러한 곳은 암석의 박리현상과 함께 화학적 및 광물학적 풍화도 심하게 진행되어 있어 약한 충격에도 쉽게 떨어져 나온다. 토양화의 깊이를 나타내는 심도는 남조류, 지의류 및 선태류의 번식에 의해 암석의 표면이 얼마나 침식을 당하였는지 여부를 보여주는 지표가 된다.

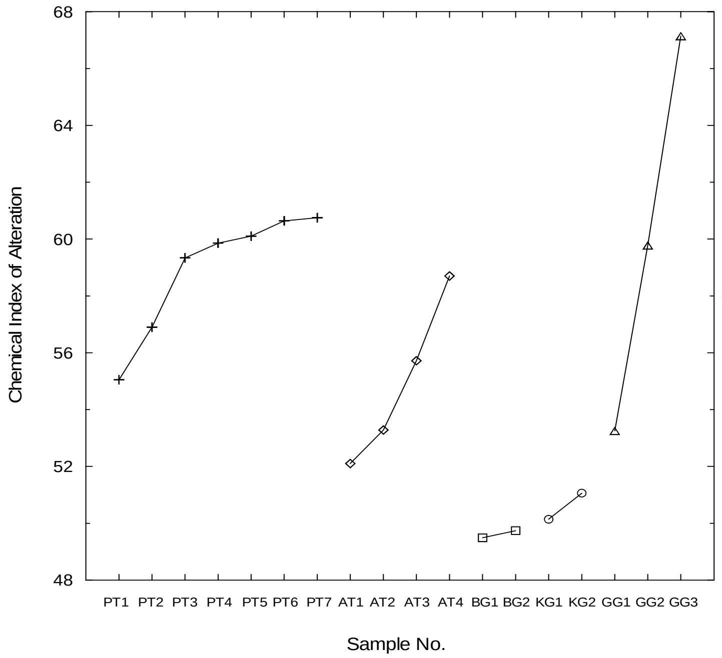


<사진 1> 생물학적 풍화상태

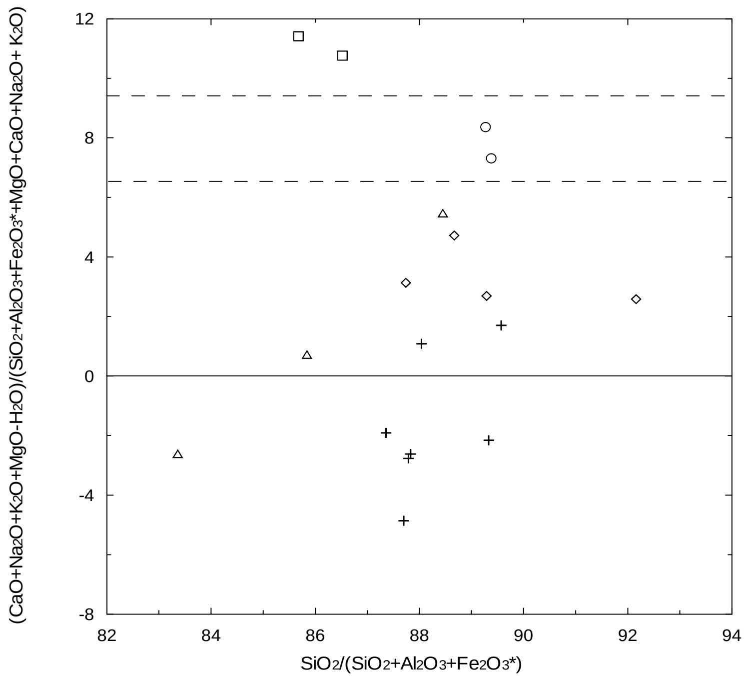
2. 화학분석, X-선 및 전자현미경적 분석

암석의 광물-화학적 풍화는 주로 용해, 수화, 가수분해, 산화환원, 탄산화 및 킬레이트화 작용 등이 있으나, 대부분은 서로 복합적으로 작용하여 암석의 구성성분, 성질 및 조직을 파괴한다. 이러한 암석들의 풍화는 쌍정과 벽개가 발달된 장석과 운모류의 변질에서부터 시작된다. 이들 석조물주변에 탈락된 암편중에 석조물과 풍화양상을 같이하는 시료를 채취하여 화학분석, X-선 및 전자현미경분석(SEM)을 하였다.

일반적으로 풍화단면에서 풍화작용의 진행정도를 측정하는 방법으로 주원소의 분석결과를 이용하여 화학적인 풍화작용의 정도를 풍화지수와 풍화 포텐셜로 나타낸다. 일반적으로



<그림 3> 각 시료별 화학적풍화지수(CIA) 도시;
+=화산력 응회암, ◇=화산회 응회암, □=흑운모화강암, ○=K-장석 화강암, △=편마암류.



<그림 4> 각 시료별 풍화의 잠재지수(WPI) 도시;
+=화산력 응회암, ◇=화산회 응회암, □=흑운모화강암, ○=K-장석 화강암, △=편마암류.

사용하는 풍화지수는 유동성이 작은 Al_2O_3에 대한 알칼리 원소의 변화를 나타내는 화학적 풍화지수로서, 풍화작용이 진행되면서 유동성이 작은 Al_2O_3는 시료에 잔류하고 있는 반면에 칼크-알칼리 계열의 원소들은 용액에 녹아 쉽게 유실됨으로써 이 풍화지수는 커진다. 즉 이 지수 값이 클수록 풍화작용이 많이 진행되었음을 시사한다. 따라서 화학분석치의 오차량 배분을 통해 분석치의 합을 100.00으로 재계산하여 다음과 같은 식으로 CIA를 계산하여 그림 4에 도시하였다.

$$CIA = [\ Al_2O_3\ /\ (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)\ ] \times 100$$

그림 4를 보면 각 시료별 PT, AT, BG, KG, GG의 풍화지수(CIA)를 도시하였다. 각각의 CIA의 범위는 PT에서 55.05 60.75, AT에서는 52.10 58.70, BG KG는 49.49 51.06, GG은 53.25 67.14의 범위를 보여주고 있다. 이 그림으로 각 시료들의 풍화양상의 차이를 알 수 있는데 응회암류, 편마암류 그리고 화강암류를 비교해 보면 응회암류와 편마암류에서 풍화도가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 칼크-알칼리계열의 광물이 변질 또는 용해되어 칼크-알칼리 계열의 원소가 손실되어 Al_2O_3의 몰비가 큰 점토광물로 변화된 효과를 나타내는 것으로 보인다. 풍화작용을 많이 받은 순으로 나타내기 위하여 각각의 평균을 구하여 비교해보면 화강편마암>화산력응회암>화산회응회암>K-장석화강암>흑운모화강암 순으로 나타난다. 또한 석조물을 이루는 응회암류는 기울기가 급하면서 분석치의 큰 차이가 보이는 것은 다른 시료들의 비해 석조물을 이루는 암석에서 풍화가 상대적으로 많이 진행되었음을 알 수가 있다.

또한 풍화의 잠재지수(WPI)를 나타내기 위하여 화학 분석치의 분석오차를 분배함으로써 풍화과정의 분석치를 다시 계산하여 풍화의 잠재지수 횡축에 $SiO_2/(SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3^*)$의 백분율을 취하고 종축에$(CaO+Na_2O+K_2O+MgO-H_2O)/(SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3^*+MgO+CaO+Na_2O+K_2O)$의 백분율을 취하여 그림 5에 나타내었다. 이 그림에서 WPI는 0을 기준으로 해서 0선 아래의 낮은 값은 0선 위의 높은 값 보다 풍화의 포텐셜이 크다고 말하고 있다.

PT의 경우 -4.83 1.69, AT의 경우 2.57 4.68, BG의 경우 11.24 10.66, KG의 경우 7.27 8.29, GG의 경우 -2.57 5.43으로 나타나고 있다. PT의 경우 거의 모든 시료에서 포텐셜이 크게 나타나고 있으며 0선 위에서 화강암류를 제외한 모든 시료가 0선 가까운 값을 가진다. 또한 같은 화강암류내 에서도 장석류가 많이 포함된 KG에서 포텐셜이 낮아지는 것을 알수 있다. 이는 장석류의 이동성이 강한 Ca, K 와 Na 성분의 상대적 소실효과와 비유동성의 SiO_2와 Al_2O_3, $Fe_2O_3^*$의 상대적 증가에 기인된 것으로 판단된다. 일반적으로 상위

풍화지수에서 나타난 바와 같이 화강암류보다 석조물을 이루는 응회암류에서 성분 이동폭이 크게 나타나고 있으며, 이는 석조물을 이루는 암석에서 화학적인 풍화작용을 쉽게 받는다는 것을 말해준다.

일반적인 암석의 풍화기준은 광물입자의 탈색내지 변색정도, 흑운모와 장석의 화학적 분해정도, 일차조직의 보존정도 및 미세균열의 발달상태에 따라 6등급으로 나뉘어 진다. 이를 운주사 경내 석조물에 적용하면 석조물의 풍화 등급은 CW(completely weathered)에 속한다. 이는 육안으로는 드러나는 암석의 기계적, 광물학적 및 화학적 풍화작용이 끊임없이 진행되고 있다는 것을 시사한다.

V. 보존방안 제언

1. 환경요인과 관련된 문제점과 대책

석조문화재가 위치해 있는 지점의 보존환경은 석조문화재의 상태를 좌우하는 기본적이면서 근본적인 요인이기 때문에 석조문화재 보존방안에 있어서 일차적으로 고려해야 할 사항이다. 환경요인은 수목의 생육, 빗물 침투 및 배수, 지반수분 등이 있으며 모두 빗물과 수분과 관련이 있다. 석조문화재 주변 수목이 생육함으로서 나무뿌리 압력에 의해 석재의 균열이 벌어지고 구조적 문제점이 발생시키며, 나뭇가지에서 흘러내린 빗물은 석조문화재에 떨어지면서 부분적으로 오염시키고 극심한 생물서식을 초래시킨다.

운주사 경내의 석탑 및 석불은 산턱, 산밑, 하천 주변의 옥외에 있어서 수목과 수풀에 의해 생물 서식을 증가시키고, 오랜 세월동안 강수, 대기중의 수분 및 지표수의 유입 등으로 인해 석재가 수분과의 상호작용으로 석재 자체에 풍화가 아주 심하게 발전된 상태이다. 또한 암석 자체의 결함에 의하여 많은 공극과 각력의 탈락이 발달되어 있고, 이는 위와 같은 반응이 지속되면서 시간이 지날수록 풍화 양상은 다양하면서 심한 풍화 과정을 거치게 될 것이다.

구멍이 뚫어진 부분은 각력이 풍화에 의해 떨어져 나간 자리이거나 유색광물 및 장석(정장석, 미사장석, 퍼사이트 및 사장석)이 있던 자리로서 강수의 분해작용에 의하여 광물조직이 이완되고 암석의 물리적 강도도 약화시켰다. 따라서 여기에서 분비되는 무기 염류가 하등식물에 양분을 공급하고 훼손된 조직의 결함은 서식장소를 제공하게 되어 고등식물로 까

지 천이를 일으키게 된 것이다. 겨울에는 수분의 결빙과 해동이 반복되면서 암석을 기계적으로 파괴할 것이다. 또한 석조물 주변의 토양에 있는 수분이 기단부 및 석불하단을 따라 상승하기도 하며, 증발 과정에서 잔류물을 침전시킬 것이다. 그러나 이와 같은 자연환경 요인을 차단하기는 각각의 석조물을 실내로 이전하기 전에는 극히 어려운 상태이다.

따라서 석조문화재 주변은 경관을 해치지 않는 범위에서 수목과 수풀을 제거하고, 강우 후 즉시 배수가 되어 석조문화재 주변은 건조가 될 수 있도록 배수로 정비를 하여 모든 수분의 유지시간을 최대한 단축시키는 것이 필요하다. 석불의 경우 하부에 지대석을 설치 지반에서 침투하는 수분을 차단해야 할 것이다. 또한 각각의 석조물에는 각종 수분과 반응에 의하여 풍화도가 극에 달해있으며, 시멘트 몰탈이 처리된 부분과 철편이 삽입된 부분에서는 회백색 및 적갈색 침전물과 자생한 결정질 광물 및 하등생물도 번성하고 있다. 이는 강수의 침입이 자연스럽게 배출되지 못하고 오랫동안 머물다가 흡수되어 스며 나오기 때문이다. 따라서 석조물에 대하여 강수가 스며드는 것을 방지하기 위한 방수처리도 필요할 것이다.

2. 구조상의 문제점과 대책

석불에서는 커다란 문제가 되지는 않지만, 석탑은 기단부의 각 면과 모서리, 그리고 각 탑신의 면이나 모서리에서 이격이 아주 심하며, 박리·박락과 석재 부재의 결손과 균열이 심한 양상을 보인다. 풍화가 진행됨으로 암석의 강도가 약해지고 탑의 구조적 불균형에 의한 사하중, 활하중 및 편압에 의하여 탑의 각 부재의 틈이 상당히 벌어져 있는 곳도 있다. 따라서 이러한 편압력으로 인해 응력집중이 되는 부재에서는 부재의 탈락과 균열이 발달되며 이러한 구조적 틈 혹은 균열대를 따라 풍화가 더욱 촉진되었다.

또한 석조물의 부재별 이격과 사이에 충진된 잡석의 산출상태는 기단석의 융기흔적과 서로 어긋난 이격이 잘 나타나 있다. 탑신과 옥개석 사이 혹은 각 부재별 사이에 충진된 잡석의 충격으로 발달된 균열대도 잘 보여준다. 석탑에 나타난 부재의 이격 정도는 거의 모든 면에서 부재와 부재 사이는 넓은 이격을 보이는 것도 있으며 특히 지대석과 탑신부에서는 구조적 불안을 야기할 정도로 불균형이 심한 상태로 놓인 것도 있다. 따라서 구조적 불안정은 장기간 정기적 상태 진단을 통해 진행성 여부를 판단하여 예술적 가치를 훼손하지 않는 범위에서 지반의 구조적 안정을 위한 지질공학적 보강이 필요하다.

3. 암석풍화상태에 대한 문제점과 대책

운주사 석조문화재의 대부분은 풍화에 의한 표면 박리 및 미세 균열현상이며 심각한 상태, 표면 지의류 등 생물 훼손이다. 석탑 및 불상 부재의 일부가 박락 또는 박리 되는 등 훼손이 심각한 상태이며 이미 풍화가 상당히 진행되어 비·바람에 의해 훼손이 가속화되고 있는 상태이다. 이에 대한 보존 대책으로는 균열 및 박리부분은 합성수지를 사용하여 접착 복원 후 암석 재질을 강하게 하는 경화 및 발수처리를 실시해야 한다. 이와 함께 생물학적 처리 및 세척을 한 후 풍화의 원인인 바람, 햇빛, 비 등을 차단시킬 수 있는 보호시설을 건립하여 보존하는 것이다.

(1) 표면 보존처리 방법

석조문화재의 균열에 대한 보존처리에는 외관을 훼손하지 않도록 접착제와 발수경화제 등의 보수용 합성수지로 시공하는 것이 일반적이다. 마감재로는 하중에 의한 영향을 심하게 받지 않는 상부는 생석회를, 하부는 강력한 에폭시 계열의 수지를 이용하는 것이 좋을 것으로 보인다. 암석의 공극을 충진하는 보존처리 과정에서는 합성수지만으로는 점도가 낮아 접착이 불가능하기 때문에 경화제와 속결제를 혼합하여 점도를 조절하며 사용한다. 그러나 수리부분의 표면이 자외선, 습도 등의 주변환경에 의하여 황색으로 변하고 균열이 발생되는 등 문제점이 발생될 수 있으므로 합성수지의 선택이나 작업에 주의를 요한다.

현재 많이 사용하는 충진 접착제로는 에폭시수지 L-30, L-40 등이 있다. 풍화 손상된 석재는 발수경화용 합성수지를 사용하여 석재내부에 침투시켜 약화된 석재조직의 응집력을 회복시켜주고, 석질을 경화하여 물의 침투로 인하여 발생될 수 있는 풍화나 손상을 방지하여야 한다. 또한 외부로의 증발이 용이해야 하고, 우수한 발수효과가 자연환경에 대한 지속적인 내수성을 지니고 있어야 하며, 처리 후 석재의 색상변화가 없어야 한다. 우리나라에서 사용되고 있는 발수경화용 합성수지로는 Wacker 290L, Wacker OH, Wacker OH100, DWR, SS-101 등이 있다. 그러나 보다 근본적인 방법으로는 석탑 및 석불에 직접적인 영향을 미치는 지면습도를 최소화하고, 강수와 유수 및 지하수의 침입을 저감할 수 있는 차수 및 배수시설이 설치되어야 할 것이다.

(2) 표면 오염물 제거 방법

경내 석조물에 나타난 이차적 오염현황은 황갈색 수산화철에 의한 암석의 변색과 강수의 유동흔적을 따라 나타나는 암회색 침전물, 탑의 이격에 삽입된 철편의 부식으로 인한 적갈

색의 침전물, 석조물 전반에 걸쳐 서식하고 있는 하등식물에 의한 오염 등이다. 이들은 증류수에 의한 정기적이 세척이 필요하다. 국제적으로 많이 사용하고 있는 세척제가 있지만 화공약품보다는 증류수를 사용하여 주기적인 세척이 더 좋은 방법일 수 있다.

생물훼손을 저감시키는 방법으로는 주로 중성세제를 사용한 세척이나 고압으로 물을 분무하여 표면에 부착하고 있는 생물들을 제거하는 방법 등이 그동안 사용되어 왔다. 그러나 세제의 경우 필연적으로 인과 질소 등을 다량 함유하고 있어 일차 세척 후 생물훼손의 재발생이 곧바로 일어나며 표면에 잔류하는 이들 물질 때문에 도리어 생물의 착생을 더 용이하게 만드는 부작용이 있다. 고압으로 물을 분무하여 세척하는 방법은 유럽의 대형 구조물에 많이 사용하고 있으나 2차오염과 표면 손상을 발생시킨다.

또한 생물제거제를 도포하고 세척하는 방법을 택하고 있으나 너무 깨끗하다는 문제점이 발생되곤 한다

따라서 운주사 석조문화재의 경우 오염이 심한 부분에 대해 증류수를 사용하여 주기적인 세척을 한 후 현재 사용하고 있는 생물제거제 K-201, ACC 322 등을 도포만하는 것이 바람직하다.

(3) 보호시설 건립방안

석조문화재의 암석풍화가 심한 경우에는 비·바람 등을 차단시킬 수 있는 보호시설을 건립하여 보존하는 것이다. 그러나 보존에 문제가 있다고 하여 옥외에 있는 모든 문화재를 실내로 이전하고 보호시설을 건립할 수도 없다. 왜냐하면 문화재는 그 문화재가 위치한 주변 환경과 더불어 하나의 큰 문화재가 되기도 하며 그 지역과 역사를 같이 하고 있기 때문이다. 문화재 훼손 방지를 위한 보호시설의 설립과 보존처리 방안은 반드시 필요하겠으나 문화재와 주변 환경과의 조화를 고려하는 것이 매우 중요한 과제라고 할 수 있다. 그러기에 문화재의 특성을 잘 나타낼 수 있고, 주변환경과 조화를 이룰 수 있는 보호시설이 건립되어야 할 것이다. 더 나아가 보호시설이 문화재의 올바른 보존 뿐만 아니라 문화재와 더불어 문화재적 가치를 함께 할 수 있는 시설로 건립되어야 할 것이다.

운주사 석조 문화재 역시 외부에 노출되어 훼손이 진행되고 있기에 훼손이 심한 몇몇 석조 문화재에 우선적으로 보호시설의 건립이 요구된다. 보호시설 건립은 불상군 별로 건립하되 흩어져 있는 불상은 소규모 전시관을 건립하며 운주사 전체가 옥외박물관이라고 할 만큼 많은 석조문화재들이 자연경관과 더불어 조화를 이루고 있음을 감안하여 건립되어야 할 것이다. 운주사가 전통사찰인 점에 유의하여 보호시설은 전통사찰건축기법으로 축조하는 등의 방법을 통해 주변환경을 저해하지 않도록 해야 할 것이다.

또한 이러한 보호시설의 건립으로 현재 상태에서는 비·바람 등 자연 환경의 영향을 직접적으로 받지 않아 보존에 도움이 되고 있으나 오랜 세월동안 익숙해져 왔던 환경의 갑작스런 변화로 발생하는 암석의 열화현상 등에 대한 처리방안은 주기적 정밀진단을 통하여 문제점이 발생시 재처리나 다른 보존대책을 세울 수 있도록 해야 할 것이다.

VI. 결 론

1. 운주사 일대의 지질을 이루는 암석은 화산력 응회암이며 대체로 N30-40W의 주향과 10 20NE의 경사를 갖고 있다. 이 화산력 응회암은 운주사를 중심으로 매우 넓게 분포하고 있으며 운주사 경내에 분포하는 석조문화재는 이 화산력 응회암으로 조형되어 있다.
2. 경내의 석탑 및 석불은 구조적 불균형에 기인한 편압력에 의해 발달한 작은 틈과 암석의 층리를 따라 풍화가 깊이 진행되는 현상, 벌어진 틈을 메운 시멘트나 다른 몰탈 및 철편에 의한 부식이 심각하다. 또한 부분적으로는 표면의 입상분해와 손으로 긁어도 석재가 떨어져 나갈 정도로 심한 풍화가 촉진된 곳도 있다. 따라서 박리현상과 표면풍화에 의해 석재 자체의 성능이 크게 저하되어 있다.
3. 운주사 경내의 석불과 석탑을 이루는 화산력 응회암은 생물학적 오염에 의한 심한 착색과 풍화현상을 보인다. 또한 석불과 석탑을 이루는 응회암의 각력이 탈락하고 이를 시멘트로 메우거나 결손된 부분재에는 석조물과는 재질이 다른 보강재로 보수하는 등 시각적 부조화와 훼손 양상이 심하게 나타나고 있다.
4. 석불 및 석탑의 암석명, 보수 암석, 자연적인 훼손등급, 인위적인 훼손등급 및 식생 피복도를 6단계로 나누어 정성적인 육안 훼손등급을 기재한 결과 MD(moderate damage)에서 SD(severe damage)등급에 속함을 보였다.
5. X-선 회절분석 결과, 석조문화재의 구성광물은 석영, 정장석, 사장석, 방해석, 자철석 등이 주류를 이루고 있으며, 기질과 장석류는 심하게 변질 되어있다. 흑운모는 이차 풍화광물인 녹니석으로 변질된 모습을 보인다. 또한 응회암 곳곳의 열극대에 적갈색의 철분 침전물이 나타나고 있다.
6. 화학적풍화지수(CIA) 계산치에서 화산력 응회암은 55.05-60.75, 화산회 응회암은 52.10-58.70, 화강편마암은 53.25-67.14로 석재보강재로 쓰인 화강암(49.49-51.06)

에 비하여 풍화가 매우 빠르게 진행되고 있다.

7. 풍화잠재지수(WPI)는 일반적으로 상위 풍화지수에서 나타난 바와 같이 화강암류보다 응회암류와 편마암류에서 성분 이동폭이 넓게 나타나고 있으며, 0선에 근접되어 도시되는 것으로 보아 화학적인 풍화작용을 쉽게 받는다는 것을 말해준다.
8. 암석의 분말시료와 석조물의 피복시료를 채취하여 전자현미경으로 관찰한 결과 암석의 이차적인 풍화산물인 스멕타이트, 불석군의 점토광물 그리고 풍화 요소인 균사류와 지의류의 모근과 포자가 관찰된다. 이는 암석 깊숙이까지 생물체가 피복하고 있어 암석의 기계적 풍화작용을 가중시키고 있으며, 이와 함께 암석내에 점토광물화가 상당히 진행된 것으로 판단된다.
9. 운주사 석조문화재는 1차 수목 제거 등 주변 환경정비와 배수로 설치 등 물 침투 방지에 대한 지반환경 조성이 필요하고, 2차 지의류 제거 등 생물학적 처리와 합성수지를 사용한 균열부분 접착복원과 암석 재질을 강하게 하는 경화 및 발수처리를 실시해야 한다. 그리고 풍화의 원인인 바람, 햇빛, 비 등을 차단시킬 수 있고 주변경관과 어울리는 보호시설을 건립하여 보존하는 것이 좋다. 또한 이들 석조물에 대한 풍화요소와 주변환경 변화에 대한 장기적인 모니터링과 함께 풍화요소를 저감 할 수 있는 처리방법을 강구해야 할 것이다.

참 고 문 헌

김진섭·이준동·정남일, 1999, 「경남 남해군 일원의 백악기 화산암류에 대한 암석화학적 연구」, 『대한지구과학회지』 20권, p.640 651.

남기상·조규성, 1993, 「암석의 풍화에 따르는 주요성분의 상대적 이동」, 『대한광산지질학회지』 26권, p.67 81.

서만철·김민규·최석원, 1994, 「경북 추령터널 부근 암석의 풍화특성에 관한 지구물리학적 연구」, 『대한자원공학회지』 4권, p.269 281.

이상헌·박경립, 1995, 「석조문화재의 특징과 암석에 대한 지질학적 연구(Ⅱ)-경기도 하남시, 양평군 및 여주군을 중심으로-」, 『보존과학회지』 4권, p.11 42.

이수곤, 1989, 「서울 화강암의 지질공학적 특성」, 『대한광산지질학회』 제22차 학술발표회 논문요약집.

이석훈·김수진, 2001, 「유구지역 화강암질 편마암의 풍화작용에 따른 원소의 거동」, 『한국광물학회지』 14권, p.39 51.

이희근·이정인, 양형식, 1983, 「우리나라에 분포하는 주요 암석류의 역학적 특성연구(제2집)」, 『대한광산학회지』 20권, p.101 109.

정창희·김길승, 1966, 「1/50000 능주지질도폭 및 설명서」, 국립지질조사소.

채상정, 1999, 「충남지역 석불의 암석과 풍화특성에 관한 연구」, 『이학석사학위논문』, 공주대학교 대학원.

최석원·이찬희, 2000, 「부여 대조사 화강암 미륵보살입상의 물리적 및 화학적 풍화」, 『대한지질학회』 36권, p.559 574.

Chen, J., Hans-Peter Blume, Beyer, L., 2000, Weathering of rocks induced by lichen colonization. Catena, v. 39, p.121 146.

Clayton, K.M., 1969, Weathering. Oliver and Boyd, Edinburgh.

Cullers, R.L, 1988, Mineralogical and chemical changes of soils and stream. Cullers, R.L., 1988, Sediment formed by intense weathering of the Danburg granite, Georgia, U.S.A. Lithos, v. 21, p.301 314

Goldich, S.S., 1938, A study of rock weathering. Jour. of Geology, v. 46, p.17 58.

Holdren, G.R. Jr., and Speyer, P.M., 1985, Reaction-rate surface area relationships for alkali feldspar during the early stage of weathering. Geochimica Cosmochimica Acta, v. 49, p.675 681.

Hugh R. Rollinson, 1993, Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman Scientific and Technical.

Keller, W.D., 1970, Environmental aspects of clay minerals. Jour. of Sedimentary Petrology, v. 40, p.788 813.

LeBas, M.J. *et al*, 1986, A chemical clsasification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. Jour. Petrology, v. 27, p.745 750.

Martin R., Lee, Parsons, I., 1995, Microtextural controls of weathering of perthitic alkali feldspars. Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 59, p.4465 4488.

Tachi, Y., Shibutani, T., Sato, H., Yui, M., 1998, Sorption and diffusion behavior of selenium in tuff. Jour. of Contaminant Hydrology, v. 35, p.77 89.

Abstract

A Study on the Conservation State and Plans for Stone Cultural Properties in the Unjusa Temple, Korea

Kim, Sa-Duk / Lee, Chan-Hee / Choi, Seok-Won / Shin, Eun-Jeong

Synthesize and examine petrological characteristic and geochemical characteristic by weathering formation of rock and progress of weathering laying stress on stone cultural properties of Unjusa temple of Chonnam Hwasun county site in this research. Examine closely weathering element that influence mechanical, chemical, mineralogical and physical weathering of rocks that accomplish stone cultural properties and these do quantification, wish to utilize by a basic knowledge for conservation scientific research of stone cultural properties by these result. Enforced component analysis of rock and mineralogical survey about 18 samples (pyroclastic tuff; 7, ash tuff; 4, granite ; 4, granitic gneiss; 3) all to search petrological characteristic and geochemical characteristic by weathering of Unjusa temple precinct stone cultural properties and recorded deterioration degree about each stone cultural properties observing naked eye.

Major rock that constitution Unjusa temple one great geological features has strike of N30-40W and dip of 10-20NE being pyroclastic tuff. This pyroclastic tuff is ranging very extensively laying center on Unjusa temple and stone cultural properties of precinct is modeled by this pyroclastic tuff. Stone cultural propertieses of present Unjusa temple precinct are accomplishing structural imbalance with serious crack, and because weathering of rock with serious biological pollution is gone fairly, rubble break away and weathering and deterioration phenomenon such as fall off of a particle of mineral are appearing extremely. Also, a piece of iron and cement mortar of stone cultural properties everywhere are forming precipitate of reddish brown and light gray being oxidized. About these stone cultural properties, most stone cultural propertieses show SD(severe damage) to MD(moderate damage) as result that record Deterioration degree.

X-ray diffraction analysis result samples of each rock are consisted of mineral of quartz, orthoclase, plagioclase, calcite, magnetite etc. Quartz and feldspar alterated extremely in a microscopic analysis, and biotite that show crystalline form of anhedral shows state that become chloritization that is secondary weathering mineral being weathered. Also, see that show iron precipitate of reddish brown to crack zone of tuff everywhere preview rock that weathering is gone deep.

Tuffs that accomplish stone cultural properties of study area is illustrated to field of Subalkaline and Peraluminous, SiO_2(wt.%) extent of samples pyroclastic tuff 70.08-73.69, ash tuff extent of 70.26-78.42 show.

In calculate Chemical Index of Alteration(CIA) and Weathering Potential Index(WPI) about major elements extent of CIA pyroclastic tuff 55.05-60.75, ash tuff 52.10-58.70, granite 49.49-51.06 granitic gneiss shows value of 53.25-67.14 and these have high value gneiss and tuffs. WPI previews that is see as thing which is illustrated being approximated in 0 lines and 0 lines low samples of tuffs and gneiss is receiving esaily weathering process as appear in CIA. As clay mineral of smectite, zeolite that is secondary weathering produce of rock as result that pick powdering of rock and clothing material of stone cultural properties observed by scanning electron micrographs (SEM). And roots of lichen and spore of hyphae that is weathering element are observed together. This rock deep organism being coating to add mechanical weathering process of stone cultural properties do, and is assumed that change the clay mineral is gone fairly in stone cultural properties with these. As the weathering of rocks is under a serious condition, the damage by the natural environment such as rain, wind, trees and the ground is accelerated. As a counter-measure, the first necessary thing is to build the ground environment about protecting water invasion by making the drainage and checking the surrounding environment. The second thing are building hardening and extirpation process that strengthens the rock, dealing biologically by reducing lichens, and sticking crevice part restoration using synthetic resin. Moreover, it is assumed to be desirable to build the protection facility that can block wind, sunlight, and rain which are the cause of the weathering, and that goes well with the surrounding environment.

Keyword : Unjusa temple, pyroclastic tuff, Deterioration degree, weathering process, surrounding environment, protection facility