

# 분황사석탑 구성 화강암의 훼손현상

도진영

경주대 문화재학부

## Deterioration of granite in Bunhwangsaseoktap (Stone pagoda of Bunhwnagsa Temple)

Jinyoung Do

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

**초록** 분황사석탑은 가장 오래된 신라시대의 모전석탑이다. 탑신부는 벽돌처럼 제작된 검은 안산암으로 이루어져 있으며, 화강암으로 조성된 감실이 1층탑신석에 있다. 1915년 대대적인 수리가 행해졌으나, 현재 석탑의 구성암석에서는 여러 손상의 형태들이 나타나고 있다. 특히 구성화강암 표면에서는 박리, 사질상입자분해 등이 심하게 나타나고 있다. 본 연구에서는 다양한 분석을 통하여 구성화강암의 정확한 훼손현황을 살펴보고, 탑신부에 나타나고 있는 백화현상과의 관계를 통해 그 손상원인을 찾아보았다. 연구결과, 구성 화강암은 석탑 표면에 발생된 백화현상의 원인 물질로 인해 훼손이 가중되고 있는 것으로 밝혀졌다. 백화현상의 원인 물질은 질산나트륨, 황산나트륨 등의 수용성 염류로, 백색 줄눈몰타르에서 기인한 것이다. 석탑의 외부는 이러한 백색 줄눈몰타르가 수분과 반응하여 재결정화되고 있지만, 많은 부분이 빗물에 의해 씻겨 내려가다가 밖으로 배수되는 것으로 생각된다. 이 과정에서 빗물에 용해된 염성분들이 감실을 구성하고 있는 화강암을 거쳐가게 되고, 다공성의 화강암은 모세관현상에 의해 이 염들을 수분과 함께 암석의 내부로 흡수한다. 그러므로 구성화강암이 갖고 있는 염문제를 줄일 수 있는 방법은 백색 줄눈몰타르를 용해성이 적은 다른 물질로 대체하는 것이다. 또한 석탑내부로 흘러들어온 수분이 백색 줄눈몰타르를 용해시킬 수 있기 때문에, 상부에서 석탑내부로 수분이 흘러내리지 않도록 조치를 취하는 것이 필요하다.

**ABSTRACT** The Bunhwangsaseoktop is the oldest stone brick pagoda in Silla Period. The pagoda body is made by piling small brick-shaped stones trimmed from black andesite and the first-story core has a shrine, which is made by granite. In 1915 it was repaired on a large scale, but now is severely damaged. Many kind of the stone decay like flaking, granular disintegration have occurred especially on the granite surface of the pagoda. In this study have been investigated the stone decay type and its cause in relation to efflorescence on the body part. Various analysis show that the deterioration on the granite is due to the same materials that lead to efflorescence on the body stone surface. The soluble salt like sodium nitrate, calcium sulfate and sodium sulfate come from white joint mortar. This salt solution is recrystallized in the outside of the pagoda, but most of them flow down with rain. In This process the porous granite absorbs the dissolved salts with moisture into the inside by capillary action. In order to reduce this problem, therefore, white joint mortar is changed with other less soluble materials. And it is necessary to take steps to prevent water from seep into the inside of the stone, because this water dissolves the white joint mortar.

### 1. 서론

분황사석탑은 전탑의 형식을 딴 모전탑으로, 제작시

기는 신라 선덕여왕(서기 634년)로 추정되어 1400년의 역사를 자랑하고 있는 석탑이다. Fig. 1은 1915년 보수 처리되기 전 분황사석탑의 모습으로, 3층의 형태를 보이

고 있으나 분황사 마당 한편에 남아 있는 부재들로 보아 원래는 그 이상의 탑이었음을 알 수 있다. 1915년 일본인에 의해 수리되었으며, 해체시 발견된 유물들로 미루어 고려시대에서도 탑을 해체하고 수리했던 것으로 여겨지고 있다.<sup>1)</sup> 기단부위는 일제시대 해체복원되는 과정에서 시멘트몰타르를 이용해 야석들로 제작되어 있으며, 탑신부는 안산암으로 구성되어 있다. 1층탑신석의 사면에는 양옆에 인왕상을 조각한 여단이문을 둔 감실이 제작되어 있다. 이 부분과 1층탑신받침은 화강암으로 구성되어, 이 석탑에서는 서로 다른 성질을 지닌 암석으로 이루어져 나타나는 석조문화재의 훼손현상을 잘 살펴볼 수 있다.

현재 분황사석탑에서는 크고 작은 많은 문제점들이 여러 논문과 발표자료를 통해 제시되고 있는 실정이다.<sup>2),3),14)</sup> 가장 심각한 현상으로 손꼽히는 백화현상은 미관상의 문제로 세간에 오르내리지만, 이로 인해 구성암석이 겪게 되는 이차적인 훼손은 미관을 떠나 본질적인 문제점에 봉착하게 된다. 특히 1층탑신받침과 감실입구 문, 문틀 및 인왕상을 이루고 있는 화강암의 훼손은 매우 심각한 상태이다. 감실입구에 새겨진 인왕상 부조에서는 이미 그 형태를 상실한 부분이 많이 관찰되며, 그 외에도 대부분의 화강암표면에서는 박리와 사질상입자 분해 등과 같은 현상들이 매우 빈번하게 나타나고 있다. 분황사석탑은 화강암 뿐만 아니라, 벽돌처럼 제작된 안산암과 그들을 접합시키는 백색 몰타르 등 다양한 구성물질로 되어 있는 복잡한 구조로, 그 훼손원인을 찾는다는 것은 그리 간단한 일이 아니다. 또한 일제시대 수리시 사용된 보수처리물질에 대한 사항과 그 이후의 보수 과정에 대한 기록이 남아 있지 않기 때문에 신라시대나 고려시대에 사용된 접합물질에서 기인된 손상인지, 그 이후의 보수처리물질로 인한 훼손인지를 찾기는 더욱 어려운 실정이다.

분황사석탑의 인왕상 조각은 부드러우면서도 힘차게 표현되어 7세기 신라 조각양식을 살펴볼 때 좋은 자료가 되는 것으로 평가되고 있다.<sup>3)</sup> 그러나 이와 같이 중요한 부분이 여러 원인으로 인하여 심각하게 훼손되고 있음이 드러나고 있다. 본 연구에서는 다양한 분석을 통하여 분황사석탑 감실과 탑신받침을 구성하고 있는 화강암의 정확한 훼손현황을 살펴보고, 탑신부의 구성 안산암에서 육안으로 드러나고 있는 백화현상과의 관계를 통해 그

손상원인을 찾고자 한다. 나아가 더 이상의 손상을 방지할 수 있도록 원인을 차단할 수 있는 방법에 대해 논해보고자 한다.



(a) south

(b) west

Fig. 1 The oldest photo of Bunhwangsaseoktop(in 1915, in Chosungojekdobo).<sup>4)</sup>

## 2. 시료 및 분석방법

### 2.1 대상시료

분황사석탑 구성화강암에서 시료를 채취하여, Table 1에 각각 시료의 채취위치와 그 특징을 실었다. 시료는 석조물의 방향에 따른 문제점을 파악하기 위하여 모든 방향에서 채취하였다. 암석시료는 대상문화재에서 이탈되고 있는 부분과 이미 떨어진 것을 취하였으며, 표면 오염물질은 메스로 긁어내어 얻었다. Fig. 2에는 대상물에서 채취한 시료를 사진으로 정리하여 나타내었다.

### 2.2 분석방법

구성화강암의 상태를 조사하기 위하여 Scalar사의 DG-2 이동식 디지털현미경을 이용하여 석조물의 표면을 검사하였으며, 채취한 시료는 Leica사의 DME 실체현미경으로 확대하여 분석하였다. 또한 LEO Electron Microscope Ltd.의 Leo1455VP 환경주사전자현미경을 이용하여 구성화강암의 미세조직을 관찰하였다.

화강암의 표면에 형성된 오염물과 박리암석 시료를 채취하여 분말화 한 후 XRF로 화학성분을 정량적으로 측정하였다. XRF 분석은 Shimadzu XRF - 1700 Sequential X-ray Fluorescence Spectrometer로 시행하였으며, 전류는 40kV, 전압은 30mA이며 Rh target을 검량선으로 작성하여 정량하였다. 시료는 분말화한

Table 1. Sampling location and deterioration type of samples in Bunhwangsaseoktap

	Name	Sampling Location and its characteristic deterioration properties
granite	Bun6	South, Edge of left Inwangsang, granite, flaking
	Bun7	North, right gate of shrine, granite flaking
	Bun9	East, prop of body stone, granite, granular disintegration
	Bun10	East, prop of body stone, granite, flaking
	Bun11	South, prop of body stone, granite, flaking
	Bun15	West, right prop of body stone, granite, flaking
	Bun16	East, prop of body stone, granite, green and black biological colonization in back side of flaking
	Bun20	South, left Inwangsang, granite, flaking
	Bun22	East, prop of body stone, granite, flaking
	Bun29	West, prop of body stone, granite, flaking
	Bun31	South, Inwangsang, granite, flaking, black discoloration, granular disintegration
	Bun32	East, prop of body stone, granite, flaking
	Bun35	North, Inwangsang, granite, flaking, granular disintegration
white layer on granite in shrine	Bun3	North, inner side of shrine, left wall, white cluster
	Bun4	North, inner side of shrine, front wall, grey powder
	Bun5	North, inner side of shrine, right wall, grey powder
	Bun8	North, inner side of shrine, right wall, white cluster with stone particle
	Bun25	South, inner side of shrine, soil
white material on andesite	Bun18	East, body of 2-story, andesite, white cluster(surface: grey, inner side: white)
	Bun19	East, body of 2-story, andesite, brown layer
	Bun30	West, body of 1-story, white cluster
	Bun33	North, roof stone of 1-story, white stalactite
	Bun34	North, body of 1-story, white mortar in joint

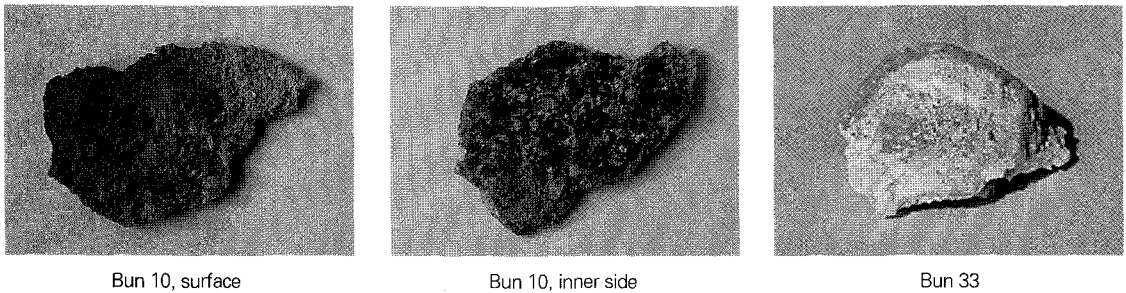


Fig. 2. Analysed samples of Bunhwangsaseoktap.

후 용제와 함께 녹여 비드를 제작하여 하였다. 또한 SEM에 부착된 Oxford사의 에너지분산 X-선분석기(EDS)로 현미경 상에서 관찰되는 부위를 반정량적으로 검사하였다.

광물성분 분석을 위하여 시료를 분말화 한 후 XRD를 이용하였으며, 분석은 Rigaku RINT2200 모델의 X선 회절기로 실시하였으며, 분석조건은 40kV/30mA의  $CuK\alpha$ 선을 이용하였다.

구성화강암에는 염들이 침전되어 있는 것이 관찰되어 이들 염에 의한 역학적 풍화 잠재성을 관찰하기 위하여

염류를 분석하였다. 이온 측정을 위해서, 분말화한 시료 100mg 정도를 증류수 100ml에 넣은 후 1시간 동안 교반하고 8시간 동안 방치하였다. 가라앉은 것과 물위에 떠있는 것들은 원심분리 후 여과지로 걸러내었다. 걸러진 용액 중  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ 과  $SO_4^{2-}$  등의 음이온은 DIONEX사의 DX-500 이온크로마토그래프를 이용하였으며 엘루언트는 1.7mM  $NaHCO_3$ 와 12.5mmol  $H_2SO_4$ /1.8mM  $Na_2CO_3$ 를 사용하였다.  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  및  $K^+$  와 같은 양이온은 ICP-AES (SHI-MADZU/ICPS-1000IV)를 사용하여 분석하였다.

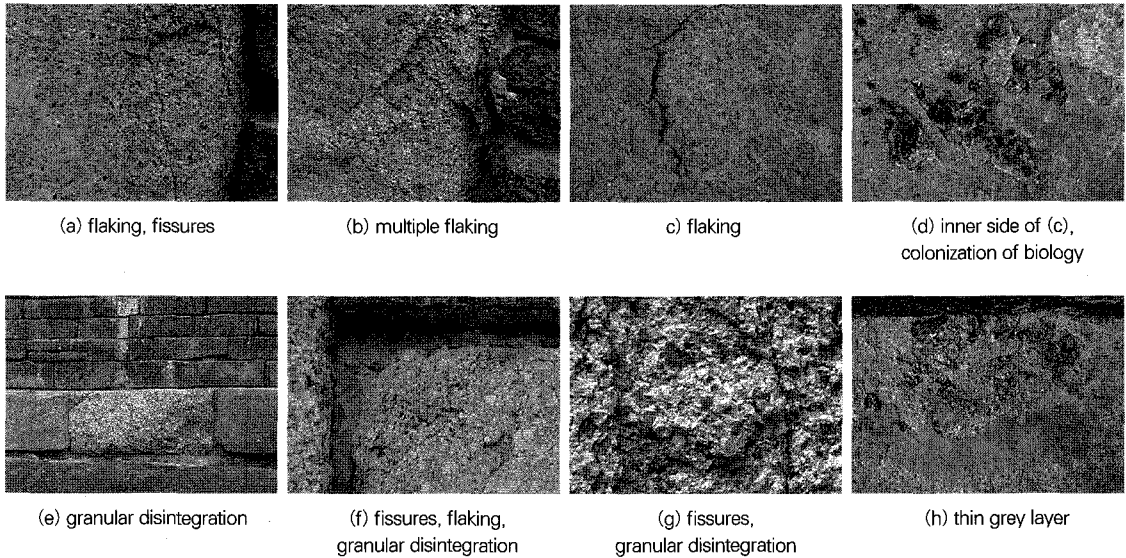


Fig. 3. Deterioration type of granite in shrine of Bunhwangsaseoktop.

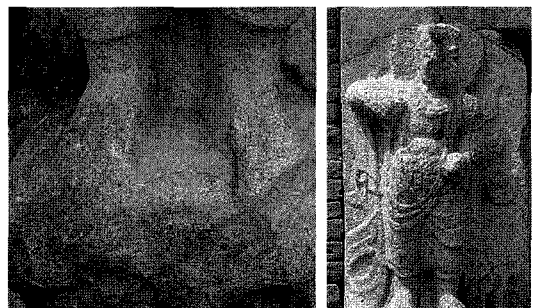
### 3. 결과 및 고찰

분황사석탑에서 심각한 손상을 보이는 곳 중 대표적인 부분은 1층탑신부의 감실부위로, 감실은 사면에 있으며, 여닫이문 양옆으로는 인왕상이 조각되어 있다. 이 감실은 안산암으로 이루어진 탑신석과 달리 화강암으로 구성되어 있는데, 표면에서는 심하게 박리가 발생하고 있으며(Fig. 2(a),(b),(c)), 하부에서는 Fig. 2(d)에 나타난 것과 같이 박리부위의 내면에 녹색과 녹흑색의 생물체가 서식하고 있다. 1층탑신받침과 줄눈몰타르가 접하고 있는 부분에서는 화강암의 구성광물입자가 날날이 떨어져 나오는 사질상입자분해가 심하게 발생하고 있다(Fig. 2(e),(f),(g),(h)). 이로 인해 분황사석탑의 중요한 부분인 인왕상이 Fig. 3과 같이 대부분 이미 형체를 상실할 정도로 손상되어 있다.

#### 3.1 화강암 박리편

손상되고 있는 화강암의 상태와 그 원인을 정확하게 밝히기 위하여, 박리된 화강암 시편을 취하여 미세조직, 화학성분과 염성분 분석을 실시하였다. 이들 시료의 화학성분에서는 Table 2에 나타난 것과 같이 일반적인 화강암의 성분과 크게 다른 Ca, Na, 및 S이 검출되었다. 여기서는 검출된 화학성분들간의 상호관계는 자료의 수

도 적을뿐더러 함량이 일정치 않아 거론하기 어려워 검출성분의 특징을 중심으로 정리하였다. 시료마다 차이를 보이기는 하지만, Ca의 함량은 6.83~82.12 wt.%로 상당히 높게 나오고 있다. 그중 상부에서 수분이 떨어지는 동면 1층옥개받침에서 채취한 Bun9와 Bun10 시료에서는 Ca이 80%대의 함량을 보이면서 상부에서 떨어져 있는 수분에 큰 영향을 받는 것으로 보인다. 이 시료가 함유하고 있는 Na의 함량은 다른 시료들에 비해 상대적으로 낮아(0.64, 0.82wt.%) 상부에서 떨어지는 물방울이 Na를 소량 함유하는 것으로 생각된다. 그러나 서면에서 채취한 Bun15 시료의 내면에서는 5.92 wt.%를 보이고 있어 시료들 간에 그 함량폭이 큼을 알 수 있다. 이와 더불어 S의 함량은 높지는 않지만, 주목할 만큼



(a) Inwangsang, flaking, (b) North, Inwangsang, break out, fissures

Fig. 4. Deterioration of the Inwangsang in Bunhwangsaseoktop.

Table 2. Chemical composition of samples in Bunhwangsaseoktop(in wt.%)

	Name	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO	Total
granite	Bun6	4.55	2.35	15.20	49.86	0.86	4.83	17.64	-	-	4.71	-	100.0
	Bun7	3.57	2.60	13.12	61.55	2.17	6.32	8.59	-	-	2.09	-	100.01
	Bun9	0.64	-	3.65	10.84	-	1.60	81.39	-	-	1.88	-	100.0
	Bun10	0.82	-	4.29	10.13	-	1.61	82.12	-	-	1.03	-	100.0
	Bun11	0.57	0.78	15.19	62.85	2.25	3.84	6.46	1.00	-	7.07	-	100.01
	Bun15(S)	2.46	2.37	13.64	60.39	3.85	3.77	7.38	0.04	-	5.77	0.33	100.0
	Bun15(ln)	5.92	3.14	2.41	62.19	11.07	3.73	8.09	-	-	0.17	3.28	100.0
	Bun16(S)	1.51	2.14	14.56	43.03	1.96	3.30	30.51	-	-	2.98	-	99.99
	Bun16(ln)	1.21	1.22	12.26	65.26	2.28	4.87	6.83	0.42	-	5.64	-	99.99
	Bun20	2.01	0.75	10.75	65.83	2.10	5.15	9.09	-	-	4.33	-	100.01
Bun22	1.42	2.98	8.95	33.06	1.33	1.71	41.17	-	-	9.39	-	100.01	
white layer on granite in shrine	Bun3	1.35	0.47	6.46	24.47	-	1.08	64.67	-	-	1.41	-	99.91
	Bun4	3.04	0.45	8.13	29.56	2.62	1.91	51.79	-	-	2.50	-	100
	Bun5	1.72	1.57	13.87	36.52	0.40	1.66	40.01	0.26	-	3.98	-	99.99
	Bun8	0.63	-	4.51	93.15	-	-	0.58	-	-	1.12	-	99.99
	Bun25	5.14	1.05	16.21	58.95	4.27	4.80	3.61	-	-	5.98	-	100.01
white material on andesite	Bun18	0.67	-	9.62	40.25	3.21	1.68	42.89	-	-	1.69	-	100.01
	Bun33	1.52	-	0.63	1.58	-	-	96.27	-	-	-	-	100.0

의 값으로 검출되었다(0.86~11.07wt.%). 화강암 자체는 S성분을 거의 함유하고 있지 않아 시료내에서 검출되는 이 성분은 외부로부터 유입되었을 수밖에 없다. 또한 Bun9, Bun10 시료에서는 이 성분이 검출되지 않는 점이 주목되는데, 이로써 상부에서 떨어지는 수분에는 S 성분이 들어 있지 않음을 알 수 있다. 시료들이 함유하고 있는 Fe성분 또한 0.17~9.39에 이르기 까지 매우 다양한 값을 보이고 있다. 이 철성분을 화강암자체에서 기인한 것으로 본다면, 철함량이 다른 다양한 화강암종이 분황사석탑에 이용되었음과 암석에 철성분이 불균일하게 내포되었음 실제로 인왕상의 하부에서 철광물에서 기인한 것으로 보이는 붉은 줄들이 관찰됨에서 그 원인을 찾아볼 수 있다.

화강암 박리편에 대한 염분석 결과, 차이는 있지만 상당량의 Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>가 검출되었다(Table 3). 화학분석 결과, Ca에 비해 상대적으로 소량이었던 Na과 K가 수분에 용해되었을 때는 유사한 함량으로 검출되고 있는 점이 주목되는 점이다. 이는 화강암 박리시편이 함유하고 있는 Ca이 상대적으로 물에 잘 용해되지 않는 화합물상태로 존재하다는 것을 의미하며, 이에 반해 Na이나 K로 구성된 화합물의 물에 대한 용해성은 크다고 할 수 있다. 즉, 시편에 함유되어 있는 대부분의 Ca은 물에 대한 용해성이 크지 않는 칼슘화합물의 형태로 존재하며, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>가 검출되는 것으로 보아, Ca<sup>2+</sup>과 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>가

결합한 황산칼슘염의 형태도 유추해 볼 수 있다. 이와 더불어 Ca이 상대적으로 용해성이 큰 Ca(OH)<sub>2</sub>와 같은 칼슘화합물로 존재할 수 있음도 배제할 수는 없으나 그 함량은 소량일 것으로 생각된다.

이외에도 Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>가 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 결합된 염의 존재를 생각할 수 있으며, 분석 기기상의 문제로 검출되지 못한 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>와 결합된 염 및 다중염이 형성되었을 수도 있다.<sup>12),13)</sup> 이들의 기원에 대해서는 다른 분석결과와 함께 논의하도록 하겠다. 염은 물에 용해되면 산성과 염기성 pH 값을 보여 암석의 다른 구성 광물들의 용해를 유도하며, 이온교환 과정으로 인해 광물들은 부식된다.<sup>5)</sup> 특히 황산염은 매우 활성적인 부식물질로서 석조물에 반응하는 것으로 알려져 있다.<sup>10),11)</sup> 이와 같이 알려진 수용성 염들의 작용으로 인해 분황사 구성화강암 표면에 박리와 사질상, 분말상입자분해가 가중되는 것으로 본다.

화강암 박리시편을 전자현미경하에서 관찰한 후 그 특징적인 모습을 Fig. 5에 실었다. 대부분 암석시편의 표면에서는 밝은 색의 작은 입자들이 관찰되며, 이 입자들이 많은 곳을 EDX로 분석하였을 때(Table 4) Na, S, Ca이 이 입자들에 관여하고 있음을 생각해 볼 수 있다. 사질상입자분해 시료인 Bun9에서는 광물입자 표면이 이물질로 얇게 피복되어 있음이 관찰되며, 이물질의 피복이 두텁게 형성된 것으로 보이는 Bun10의 화학성분은 85.5%의 CaO가 검출되어 이 이물질이 Ca 화합물임

Table 3. Ion concentrations in granite and white material samples of Bunhwangsaseoktop

	Name	anion(ppm)				cation(ppm)				
		Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
granite	Bun29	35.5	51.3	329.7	33.9	203.5	346.9	6.9	205.4	42.5
	Bun31	28.2	17.4	169.8	21.3	308.1	147.9	4.0	185.3	19.5
	Bun32	44.3	8.2	81.1	30.2	205.8	417.8	2.0	193.4	21.4
	Bun35	42.3	6.7	318.2	16.2	254.9	597.3	5.4	197.6	60.5
white layer on granite	Bun3	822.2	13596.3	4659.6	-	2983.6	4191.3	0.9	147.2	318.1
	Bun4	1675.2	8671.0	62422.7	37.2	228921.3	173.3	7.4	42094.1	10.3
	Bun5	367.5	3393.6	4958.3	14.4	3958.6	1137.0	6.0	545.0	42.6
white material on andesite	Bun19	47.5	71.9	168.7	2.7	638.4	353.0	131.8	810.7	58.8
	Bun34	391.0	1928.5	12055.6	-	73323.3	150.4	21.3	3154.7	15.5

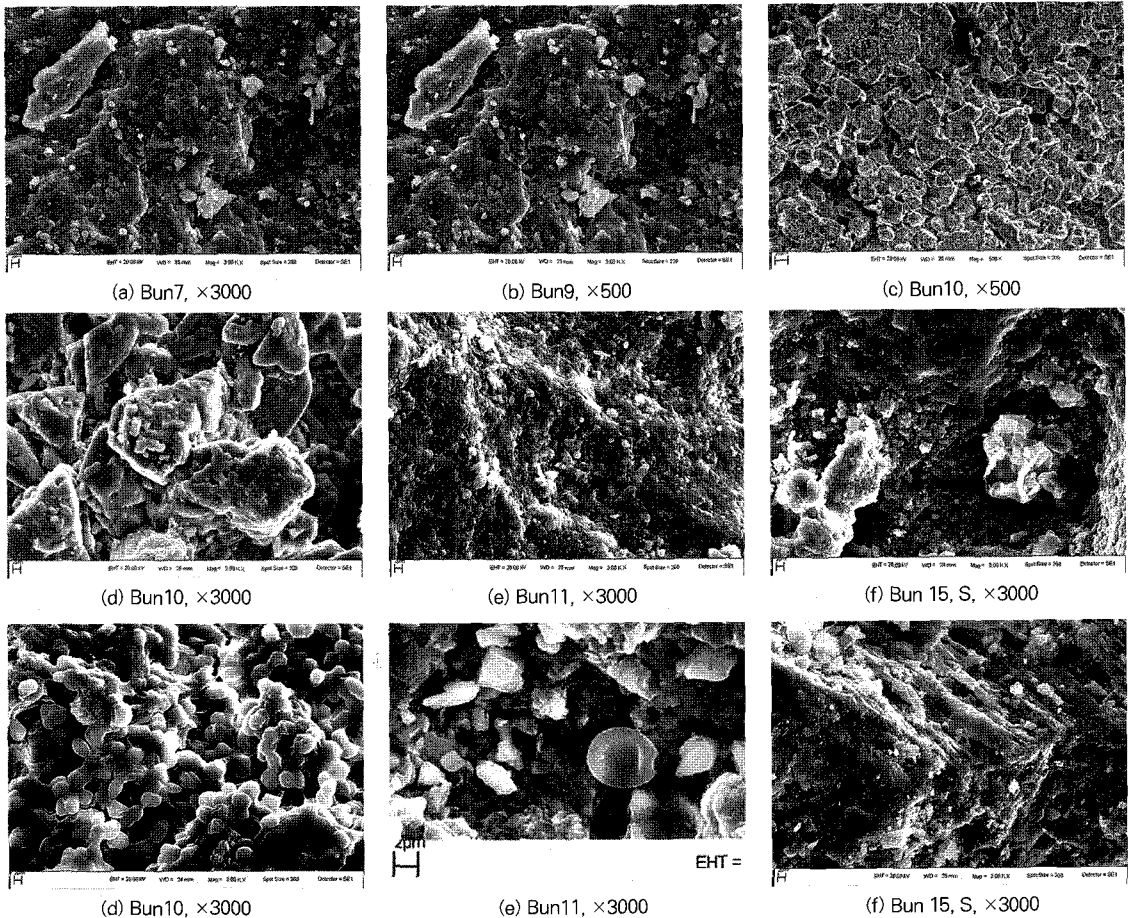


Fig. 5. Microstructure of flaking granite samples in Bunhwangsaseoktop.

을 알 수 있다. Bun11시료의 표면에서도 작은 입자가 관찰되고 있으나, 이 부위에서는 상대적으로 Fe가 높게 검출되고 있다. 이 시료의 전체 화학성분에서도 높은 Fe가 검출되는 것으로 보아 여기에서 검출된 Fe는 원암에서 기인한 것으로 보인다. 박리의 표면과 내면의 차이점

을 살펴보기 위해 실시한 Bun15와 Bun16 시료분석에서는 Fig. 5(f),(g),(h)와 같은 결과를 보였다. Bun15 시료 표면에서는 백색입자덩어리가 관찰되며, 이 부분의 화학성분으로는 Ca이 75.8% 검출되어 이 입자는 칼슘 화합물인 것으로 보인다. 이 시료의 내면은 Fig. 5(g)에

Table 4. Chemical composition of samples in Fig. 5 and Fig. 7(in wt.%)

Name	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO	Cl	Total
Bun7 (×3000)	3.60	2.45	13.47	59.64	5.47	-	5.71	6.51	-	-	2.63	0.51	-	99.99
Bun10 (×3000)	0.92	-	4.12	8.15	-	-	1.31	85.50	-	-	-	-	-	100.0
Bun11 (×3000)	0.77	0.85	16.07	58.86	1.40	-	5.51	4.64	1.00	-	10.90	-	-	100.0
Bun15(S)-A (×3000)	0.89	1.10	3.11	8.24	5.38	-	3.77	75.76	-	-	1.75	-	-	100.0
Bun15(l)n (×3000)	11.51	14.57	3.94	31.57	18.67	-	5.04	5.91	-	-	-	5.96	2.83	100.0
Bun16(l)n (×3000)	1.63	2.57	15.62	51.62	5.71	-	4.26	10.68	0.31	-	7.60	-	-	100.0
Bun22 (×3000)	2.82	3.28	13.06	49.73	-	-	2.63	17.60	1.10	-	8.76	1.02	-	100.0
Bun3 (×3000)	0.51	-	2.23	5.04	28.27	-	-	63.94	-	-	-	-	-	99.99
Bun4 (×3000)-A	34.04	-	1.44	4.61	54.38	-	-	5.54	-	-	-	-	-	100.01
Bun8 (×3000)-A	38.76	-	10.99	37.61	1.54	-	9.46	1.63	-	-	-	-	-	99.99
Bun18 (×3000)	0.95	0.76	12.48	48.54	2.02	-	1.73	31.43	-	-	1.98	-	0.11	100.0

서 보는 것과 같이 독특한 모양을 보이고 있는데, 이곳에서 높은 Na와 S 성분이 검출되는 것으로 미루어 이 물질들은 황산나트륨화합물로 추정된다. 육안으로 보았을 때 흑색, 녹흑색 생물체의 서식이 관찰되는 Bun16시료의 내면에서는 Fig. 5(h)에서 보이는 것과 같은 둥근 생물체의 흔적을 미세관찰을 통해 살펴볼 수 있다. 또한 Bun22 시료의 관찰에서는 긴 막대 모양의 결정체가 군집을 이루며 형성된 모습이 보이는데, 화학성분 결과로 미루어 볼 때 광물입자 위에서 Ca 화합물이 결정화되어 가는 모습으로 추정된다.

### 3.2 감실 내부벽면의 백색물질

감실 내부벽면에서는 백색물질이 두텁게 암석표면을 피복하고 있음을 Fig. 6과 같이 쉽게 관찰할 수 있으며, Fig. 7에는 이곳에서 채취한 시료들의 전자현미경사진을 실었다. 이곳에 형성된 백색물질은 채취한 곳에 따라 약간의 차이를 보이고 있다. 모두 북면에서 취한 시료들이지만 Bun 3과 Bun 5 시료에서는 Bun 4와는 달리 Na의 함량이 높지 않았다(Table 2). Bun 3 시료에서는 CaO의 함량과 SO<sub>3</sub>의 함량이 주목되며, Bun 4 시료에서는 다른 성분과 함께 CaO의 함량이 높게 검출되었다. 그러나 Bun 4 시료와 Bun 8 시료에서는 상당히 높은 함량의 Na이 검출되고 있으며, Fig. 7(b)의 Bun 4 시료 내의 A입자와 Fig. 7(d) Bun 8 시료내의 A입자는 각기 Na<sub>2</sub>O함량이 34%와 38.8%, SO<sub>3</sub>의 함량이 54.4%, 1.54%를 보임으로서 황산나트륨화합물임을 알 수 있다. 또한 CaO의 함량도 높아, 황산칼슘화합물의 존재도 생각해볼 수 있다. 감실 내부 바닥에 있는 흙의 화학성분

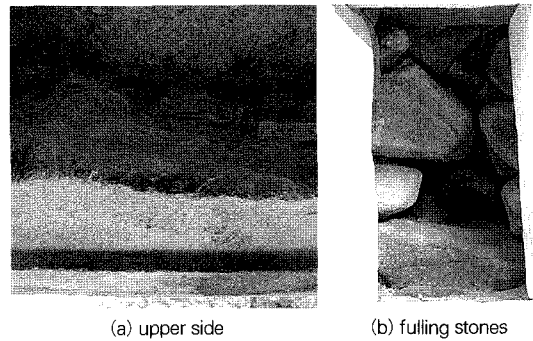


Fig. 6. Inner side of shrine in Bunhwangsaseoktop.

의 결과도 암시하는 바가 매우 크다. 감실 내 바닥의 흙, Bun 25 시료는 Na<sub>2</sub>O와 SO<sub>3</sub>의 함량이 보통의 토양층이 지니고 있는 함량보다 높았다. 이는 바닥 흙 또한 무엇인가의 영향을 받았음을 암시해주는 것이다. 이를 살펴보기 위해 이들 시료에 대한 수용성염 성분 분석을 실시하였다. 시료의 화학성분 분석결과 예상하였던 대로 Bun 4 시료에서 상당히 우려할 정도의 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 Na<sup>+</sup>가 검출되었다. Bun 4 시료는 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 화합물을 다량함유하고 있을 것으로 추정되며, 검출된 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 함량으로 보아 NaNO<sub>3</sub> 화합물의 존재도 예상된다. 반면에 Bun 3과 5 시료에서는 Na<sup>+</sup>와 더불어 Ca<sup>2+</sup>와 K<sup>+</sup> 등의 양이온이 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 함께 상당량 검출되고 있다. 여기에서 중요한 것은 검출된 이온들이 생성하는 염들이 모두 물에 잘 용해되는 것들로서 수분의 존재에 따라 용액과 결정으로 쉽게 바뀐다는 것이다. 빗물이 스며들어 이곳에 형성된 염을 해리시키고, 각각 해리된 이온들이 재결정화될 때, 부유도양이 함께 포획되어 미갈색 또는 갈색의 색상으로 나타나게 된다. 더군다나 여기에 존재할 것으로

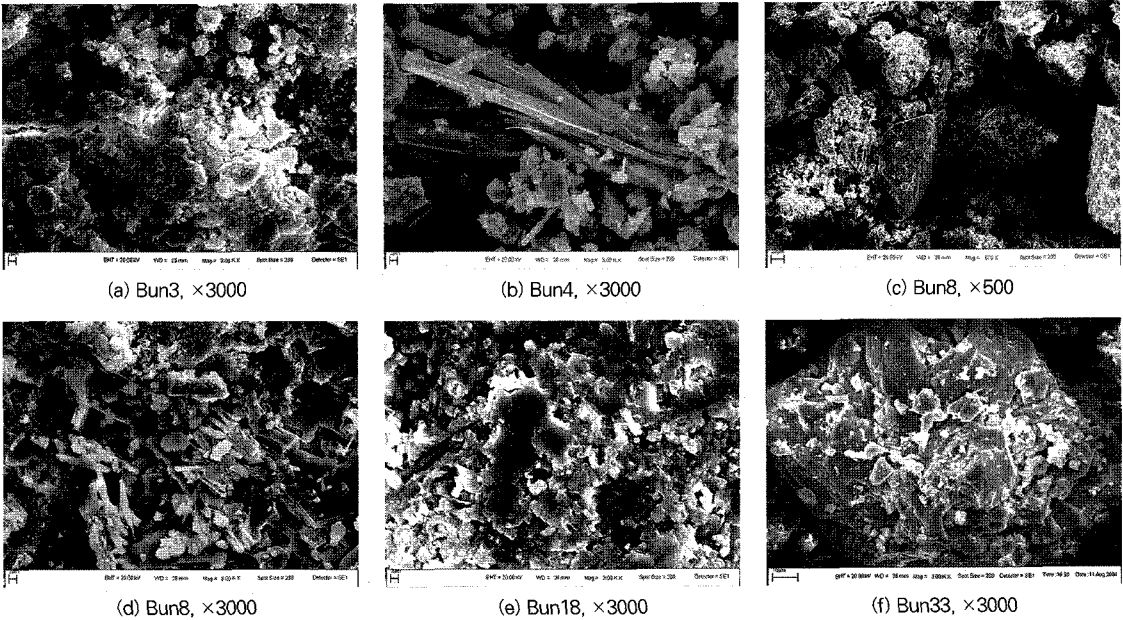


Fig. 7. Microstructure of white surface layer in inner side of shrine and white material on andesite in Bunhwangsaseoktop.

추정되는 질산염은 그 높은 용해도 때문에 석조물 표면에서 결정화되어 백화(efflorescence) 현상을 야기시키는 주 물질임이 여러 논문을 통해 보고되고 있다.<sup>(6),(7),(8),(9)</sup>

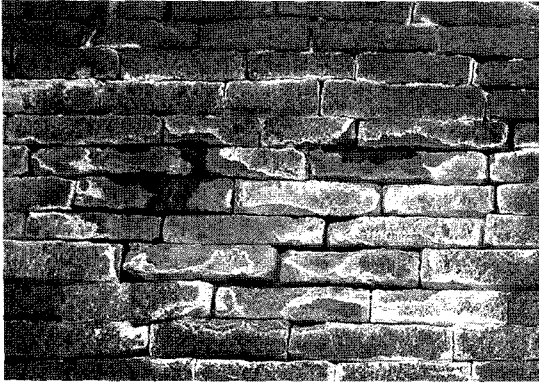
### 3.3 안산암 부재사이의 백색 줄눈몰타르

그렇다면 화강암 손상의 원인이 되고 있는 염과, 감실 내부 암석표면에 형성된 백색 물질들은 어디에서 기인한 것일까? 앞서 말했지만, 분항사석탑에서 육안으로 선명하게 관찰되는 훼손현상은 Fig. 8(a)와 같은 백화현상이다. 더욱이 옥개부의 옥개받침에는 백색 고드름이 Fig. 8(b)처럼 형성되어가고 있다. 이곳에서 채취한 시료 Bun 33의 현미경 관찰에서는 백색의 결정입자를 잘 볼 수 있는데, Fig. 8(c)에서처럼 바늘모양의 결정이 군집되어 있는 형태로 실제현미경에서 관찰이 되며, Fig 7(f)의 전자현미경사진에서는 큰 결정 위에 작은 크기의 입자들이 부착되어 있는 모습으로 관찰되고 있는데, 이 부위의 구성 화학성분은 거의 칼슘이다(96.3%). 소량의 Na이(1.5%) 검출되었으며, 이외에 Al 및 Si가 함유되어 있는 것은, 주변토양이 부유되어 이물질로서 포획되어 나타난 결과로 추정된다. 이 부분을 곱게 분쇄하여 X-선 회절분석을 한 결과 Fig. 8(d)와 같은 패턴을 얻었

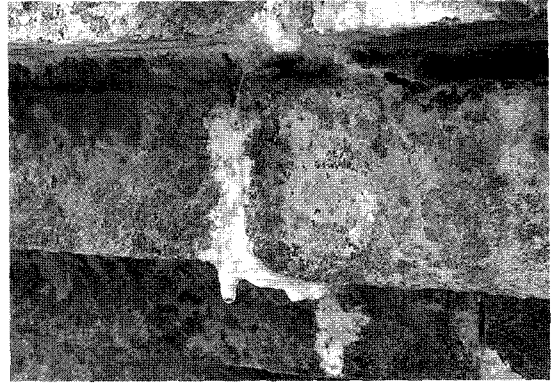
다. 여기에서 나타난 주 피크는 모두 방해석(calcite, CaCO<sub>3</sub>)로 동정되어, 백색 고드름으로 형성된, 즉 재결정화된 백색물질은 거의 방해석임을 알 수 있다. 그러나 이 물질 내에 적은 량이지만, Na 화합물이 들어있을 수 있음도 화학성분을 통해 생각해 볼 수 있다. Bun18은 탑신구성 안산암의 표면에서 채취한 백색시료로서, 백색과 흑갈색으로 섞여 있는 형태이다. 이곳에서 주목되는 것은 Si, Al, K, Fe 등 전형적인 암석의 화학성분이 Ca와 함께 검출된 점이다. 미세조직 관찰상 이 표면오염물은 위의 Bun33 시료와 비슷한 모습을 보이고 있다. 이것은 다시 말해 백색물질에 이물질, 즉 공기 중에서 부유한 토양이 포획되었음을 말해주는 것이다. 안산암 표면에 형성된 또 다른 백색물질 시료인 Bun19의 수용성 염 성분은 박리된 화강암시료에서와 비슷한 형태로 검출되고 있다(Table 3). 이와 같이 석탑의 표면에서 쉽게 관찰되는 백색물질의 성분이 감실내부 암석표면에 형성된 백색물질과 화강암 시료에서 분석된 결과와 유사한 형태로 도출되고 있는 점으로 보아, 동일한 원인으로 유추할 수 있다.

석탑의 표면, 감실내부에 있는 백색물질들의 기원은 분석결과 안산암 부재를 연결하는 백색 줄눈몰타르로 유추된다. 백색 줄눈몰타르에서 채취한 Bun 34 시료에서

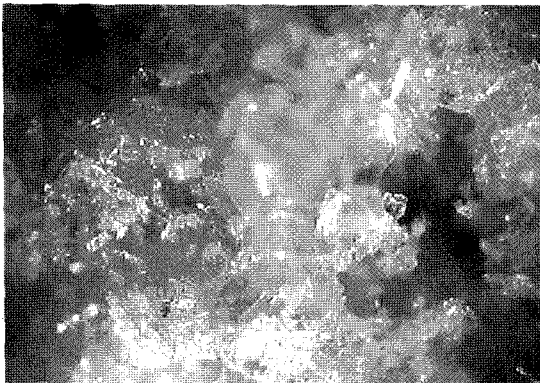




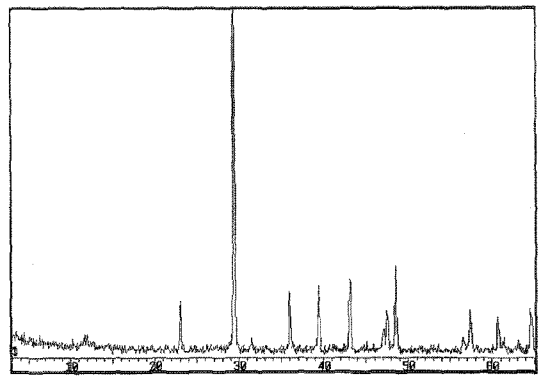
(a) North, body of 1-story, efflorescence, seep



(b) North, roof stone of 1-story, white stalactite



(c) Bun33, stereomicroscope, ×200



(d) Bun33, XRD pattern

Fig. 8. Efflorescence in Bunhwangsaseoktop and its mineral composition.

는  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ 가 주성분으로 검출되었는데, 이는 석탑표면 및 감실내부 백색물질의 성분과 매우 유사한 결과이다. Fig. 8(b)는 백색물질이 빗물에 용해되어 재결정화되고 있는 모습을 잘 보여주고 있으며, 백화현상이 나타나고 있는 주변에서는 석탑내부로 들어간 수분이 줄눈 사이로 스며나오는 모습이 Fig. 8(a)과 같이 관찰되면서, 백색 줄눈몰타르가 백화현상의 원인물질임을 뒷받침해주고 있다. 석탑의 외부는 이러한 백색 줄눈몰타르가 수분과 반응하여 재결정화되고 있지만, 많은 부분 빗물에 의해 씻겨 내려가다가 밖으로 배수되는 것으로 생각된다. 이 과정에서 빗물에 용해된 염성분들이 감실을 구성하고 있는 화강암을 거쳐가게 되고, 다공성의 화강암은 모세관현상에 의해 이 염들을 수분과 함께 암석의 내부로 흡수하게 되며, 이로 인해 손상이 일어나고 있는 화강암표면에서 다량의 염성분이 검출되는 것으로 짐작된다. 이와 달리 감실내부는 직접적인 강수에는 노출되어 있지 않으나, 상부에서 비나 눈에 의해 용해된 백색

줄눈몰타르 용액이 석탑의 내부로 스며들어, 아래로 천천히 흘러내리면서 암석의 표면에 도달하게 된다. 이것이 시간이 지남에 따라 수분은 증발하고 백색물질만이 토양성분과 함께 암석표면에서 두껍게 형성되어지는 것으로 보인다.

#### 4. 결론

분황사석탑의 감실부분은 사질상입자분해 및 박리현상이 심각하게 진행중이다. 연구결과, 감실부위 구성 화강암들은 분황사석탑 표면에서 발생하고 있는 백화현상의 원인 물질들로 인해 훼손이 가중되고 있는 것으로 밝혀졌다. 문제가 되고 있는 백색물질의 용액이 스며들거나 떨어져 닿은 화강암 부위는 심한 박리와 사질상입자분해가 일어나고 있다. 특히 박리현상은 매우 심각할 정도이며, 조각이 된 인왕상의 형태까지도 손상시키고 있

다. 손상의 주원인인 염성분은 탑신에서 보이는 백화현상을 일으키는 백색물질에서 기인한 것으로 질산나트륨, 황산칼슘, 황산나트륨 등의 수용성 염류들이다. 이들은 수분에 의해 해리된 이온들로부터 생성이 쉽게 되는 염으로, 암석표면에서 재결정될 때 부유토양이 함께 포획되어 옥개부 옥개받침 끝에서 상대적으로 수분에 잘 용해되지 않는 방해석 등을 형성하고 있다. 석탑의 외부는 이러한 백색 줄눈물타르가 수분과 반응하여 재결정화되고 있지만, 많은 부분이 빗물에 의해 씻겨 내려가다가 밖으로 배수되는 것으로 생각된다. 이 과정에서 빗물에 용해된 염성분들이 감실을 구성하고 있는 화강암을 거쳐가게 되고, 다공성의 화강암은 모세관현상에 의해 이 염들을 수분과 함께 암석의 내부로 흡수하게 되며, 이로 인해 손상이 일어나고 있는 화강암표면에서 다량의 염성분이 검출되는 것으로 짐작된다. 이러한 물질은 이전에 보수했을 때에 사용된 백색 줄눈물타르에서 기인된 것으로 추정되므로, 화강암의 보존처리 방법으로 단순히, 함유된 염류를 탈염하고 강화처리 하는 것만을 채택하는 것은 충분하지 못하다. 화강암의 손상은 원인이 되는 백색 줄눈물타르가 있는 한 계속될 것이기 때문이다. 염문제를 줄일 수 있는 시급한 방법은 문제가 되고 있는 백색 줄눈물타르를 용해성이 적은 다른 물질로 대체하는 것이다. 또한 석탑내부로 흘러들어온 수분이 석탑바깥으로 스며나올 때 백색 줄눈물타르를 용해시킬 수 있기 때문에, 상부에서 석탑내부로 빗물, 눈 등 수분이 흘러내리지 않도록 조치를 취하는 것이 현재 이 분황사석탑에 있어 가장 필요한 보존방안이라고 생각한다.

## 5. 참고문헌

1. 문화재관리국, *분황사석탑*, 9-10 (1992).
2. 박경식, *분황사모전석탑에 대한 고찰*, *분황사의 제조명*, 신라문화재학술발표회논문집, 20, 161-197 (1999).
3. 강우방, *분황사의 금강역사상*, *분황사의 제조명*, 신라문화재학술발표회논문집, 20, 199-2177 (1999).
4. 조선총독부, *조선고적도보*, 3, 319-321 (1915).
5. Butterworth, B., *Transaction of the 7th*

*International Ceramic Congress*, London, 2, 275-285 (1960).

6. Alves, C., Salt Systems on granitic Monuments(Braga-NW Portugal), *Proceedings of the EC workshop*, 109-114 (1996).
7. Winkler E.M., *Stone in Architecture*, 3ed., Springer-Verlag, Germany, 166 (1994).
8. Winkler E.M. and Wilhelm E.J., Saltburst by hydration pressures in architectural stone in urban atmosphere, *Geol Soc Am Bull*, 81(2), 567-572 (1970).
9. Arnold. A. Zehner K., Salt weathering on monuments, *Analytical methodologies for the investigation of damaged stones*, 14-21 (1990).
10. Bulgini, R., Rate of formation of Black crusts on marble. A case study, *Journal of Cultural Heritage* 1, 111-116 (2000).
11. Gertis, K., Steinzerstorung aus bau-physikalischer Sicht -Ist mangelhafter Regenschutz Schuld, *Bautenschutz und Bausanierung*, 10, 2, .95-98 (1987).
12. Riederer, J., Staub-Reinhalt, *Luft*, 33, 5 (1973).
13. Nord, A., Ericsson, T., Chemical Analysis of Thin Black Layers on Building Stone, *Studies in Conservation*, 38, 25-35 (1993).
14. 김은영 외, 석조문화재보존관리연구, 부록 1, 문화재청, 149-164 (2001).