

암석의 물리적 성질과 수분흡수도가 풍화, 손상에 미치는 영향

도진영

서울대학교 지구환경과학부, 석조문화재보존과학연구회,
서울시 관악구 신림동 산 56-1

The Influence of Physical Properties and Water Uptakes of the Stones on their Weathering and Deterioration of Stones

Jinyoung Do

Stone Conservation Science Laboratory, School of Earth and Environmental Science,
Seoul National University, Silim-dong, Kwanak-ku, Seoul, 151-742, KOREA

1. 서론

자연적으로 지어진 건물 외벽 및 석조물들의 손상은 눈에 띄게 나타나고 있으며, 특히 몇 십년 전부터 이런 현상은 더욱 심각해지고 있다. 오랜 역사를 지닌 석조 문화 유산 뿐만 아니라 제작된 지 얼마 되지 않은 것들도 증가하는 공기오염으로 인해 심각하게 풍화 손상되었고 나아가 파손으로까지 위협을 받고 있고 있는 실정이다. 그러나 많은 손상원인이 서로 복잡하게 연관되어 손상의 정확한 작용 메커니즘을 파악하기는 무척 어렵다.

풍화의 내적 요인은 암석 종류와 암석의 특성적인 성질에서부터 기인한다. 외적 요인으로는 환경오염과 인간 활동의 영향으로 이해되어진다. 크게 물리적 요소, 화학적 요소, 물리·화학적 요소, 생물학적 요소 등으로 나눌 수 있는데, 물리적 요소는 주로 암석 구조에 작용하며, 역학적인 작용에 의해 손상이 일어난다. 화학적인 과정은 광물입자와 결합 물질의 화학적인 손상을 야기시킨다. 광물성분의 가수분해, 산화환원반응, 이온 교환, CO₂, SO₂, NO_x와의 반응, 해리과정 등이 화학적인 손상의 중요 원인들이다. 물리·화학적 요소는 두 현상이 동시에 암석구조와 암석 구성물질에 작용을 하며, 수분흡수와 탈수에 의한 염결정, 염결정의 해리과정, 수화, 탈수화 등이 대표적인 현상이다. 이처럼 대부분의 손상과정에는 수분이 작용하고 있다. 생물학적으로는 이끼와 같은 저등생물체가 습기저장장소로서의 역할을 하고, 박테리아와 같은 미생물의 물질변화산물 생성, 유기산 생성 등으로 암석에 손상을 일으킨다[Dietz, F., 1990].

암석은 여러 종류의 광물과 복잡한 조직을 보이는 불균일한 물질로 물리적, 화학적 성질이 다양하게 나타난다. 그 중 사암과 석회암과 같은 다공질 퇴적암의 물리적 성질은 암석의 자연적인 풍화 또는 오염에 (인간에 의해 야기된 요소) 의한 암석의 손상에 중요한 영향을 끼친다.

여러 종류의 사암과 석회암의 신선한 부위와 풍화 손상된 부위를 취해서 밀도, 기공도, 포화도 등의 물리적 성질과 물흡수도, 모세관 물흡수도 등의 수분과 관련된 여러 성질을 측정하였다. 다양하게 나타나고 있는 손상의 형태, 특히 암석 표면에서 나타나고 있는 흑색층에서의 두터운 흑색외각, 얇은 흑색막-성질을 측정하여 풍화 손상의 메커니즘을 살펴보고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 분석 시료

독일 베를린 박물관(Museumsinsel)에 위치한 5 개 박물관 건물의 외벽에 사용된 자연석을 대상으로 연구하였다. 1832 년에서부터 1930 년에 걸쳐 순차적으로 세워진 건물들의 외벽은 여러 종류의 사암들과 석회암 등의 자연석이 사용되었다. 지어진 지 오래되지 않았지만 표면의 흑색층, 분말상으로 떨어지는 현상, 틈 등의 다양한 형태의 풍화 손상이 암석의 표면에서 보여지고 있다. 표 1에 사용된 석재의 종류와 손상의 형태를 나타내었다.

1.2. 물리적 성질

암석의 물리적 성질은 주로 기공(pore)에 의해 결정되고 기공부피로부터 참밀도(absolute density), 겉보기 밀도(bulk density)가 계산된다. 암석에 수분의 침투는 기공의 크기와 기하학적 구조에 크게 영향을 받는데, 기공은 고립된 상태 및 표면과 연결되어 열린 형태로 존재한다. 풍화에는 표면과 연결된 기공들이 주로 영향을 미치며, 이곳에서 수분, 오염물질의

표 1. 시료의 채취 장소, 암석 종류 및 손상형태

건물	채취장소	암석	색	손상형태
Nationalgalerie (NG)	북서쪽 벽면 (NG-NW)	Nebraer 사암	적색	각질, 부스러짐, 변색, 두꺼운 흑색외각, 얇은 흑색막
	남동쪽 벽면 (NG-SE)	Nebraer 사암	적색	두꺼운 흑색외각, 얇은 흑색막, 틈, 변색
Pergamon-Museum (PM)	남동쪽, 북쪽 벽면	프랑크 무셀석회암	진회색	각질, 탈색(백색), 두꺼운 흑색외각, 얇은 흑색막

침투, 반응, 이탈 등이 일어난다. 이러한 기공공간을 기공도로서 표현할 수 있다.

물리적 성질을 측정하기 위한 시료는 육면체나 원통형 등의 모양으로 크기는 사방 최소 40 mm 이상이어야 한다. 그러나 풍화 손상된 암석의 표면층은 그 두께가 단지 μm 에서 mm 밖에 되지 않기 때문에 표면층 만의 물리적인 성질을 구할 수는 없어, 풍화된 면을 포함한 시료와 풍화되지 않은 시료로 나누어 측정하였다. 측정 방법은 DIN 52102를 따랐다.

(1) 겉보기 밀도 (bulk density): $R = m_r/v_r$: 암석시료의 질량과 부피로부터 산출

v_r : 고립된 기공의 부피, (부력방법: $v_r = m_1 - m_2$),

m_r : 시료의 건조 무게 (110 °C에서 무게가 일정할 때 까지 건조 시킴)

m_1 : 진공 하에서 시료가 물에 포화되었을 때의 무게,

m_2 : 물속에서의 시료 무게 (부력법)

(2) 참밀도 (absolute density): 조성광물의 밀도와 기공 모두를 고려한 밀도

$\rho_o = m_r/v_o$, v_o : 열려진 기공의 부피: $v_o = v_{roh} - v_{porenvolumen}$

($v_o = m_r - m_2$; 시험용액의 밀도가 1 일 때)

(3) 기공도 (porosity): $P = (1 - \rho_r / \rho_o) * 100$

1.3. 수분과 관련된 암석의 성질

비, 눈, 수증기 등 수분의 흡착, 증발, 모세관 응축에 의해 암석은 항상 습기를 함유하고 있다. 암석 내 수분의 이동을 관찰하는 것은 그 손상 원인을 밝히는데 있어 중요하다. 습기 흡수, 건조, 이 현상들의 반복에 의한 수분의 이동은 오염물질의 흡수에도 중요한 역할을 한다. 수분의 이동은 온도에도 영향을 받으며, 수분의 형태변화에 따라 암석에도 물리적인 손상을 끼친다. 일반적으로 큰 틈, 쪼개짐, 절리, 사질화, 박리 등은 수분으로 인해 암석에 뚜렷이 나타나는 풍화현상들이다. 흐르는 물은 약 1 mm보다 큰 기공 안에서 배수류에 의해 이동된다. 작은 크기의 기공 안에서는 모세관현상이 물의 이동을 지배하게 된다. 기공의 크기가 0.1 μm 보다 작은 경우 모세관 응축이 일어나고, 그래서 습한 기후에서는 0.001 μm 보다 작은 기공의 경우, 안에 늘 수분이 채워져 있게 된다[Sneathlage, R., 1984].

1.3.1. 물흡수량(또는 총 물흡수량)과 물흡수도

물흡수량은 암석이 총체적으로 물을 함유할 수 있는 양으로, DIN 52103 법에 따라 측정하였다. 대기압과 진공 하에서 시료의 무게를 잰 후 24시간 동안 증류수 속에 시료가 완전히 잠기게 하고, 무게가 일정해지면 증가된 무게를 측정하여 아래의 식에 따라 계산한다. 원래는 150 bar 압력 하에서 측정하여야하나 복잡한 부가적인 기기가 필요하기 때문에 본 실험에서는 간단히 진공 하에서 (30 mbar) 측정하였다. 몇 개의 시료에 대해 실시한 압력

하의 실험결과와 차이가 없음이 입증되었다.

(a) 물흡수량(total water absorption)

$W_a = m_{m,a} - m_{tr}$ (g), $m_{m,a}$: 대기압 하에서 물속에 담근 시료의 무게

$W_v = m_{m,v} - m_{tr}$ (g), $m_{m,v}$: 진공 하에서 물속에 담근 시료의 무게

(b) 물흡수도 (물흡수율)

$W_{g,a} = (W_a/m_{tr}) * 100$, (in wt.%), $W_{g,v} = (W_v/m_{tr}) * 100$, (in wt.%)

$W_{v,a} = W_{g,a} * D_{roh}$, (in Vol.%)

(c) 포화도 (S): $S_{vak} = W_{g,a}/W_{g,v}$

암석의 풍화를 논의함에 있어 물흡수도와 더불어 포화도 S 도 중요한 요인이다. 암석은 포화도가 높을수록 수분에 위협을 받는데, 포화도가 1 에 가깝다는 것은 대기압 하에서 이미 대부분의 기공에 물이 찰 수 있음을 의미한다. 풍화저항성의 한계값으로서의 S 값은 0.75로 규정되어 있으며, 여러 실험을 통해 나타난 결과로는 S 값이 0.6 보다 적거나 같으면 암석은 수분에 거의 영향을 받지 않는다고 할 수 있다[Hoecker H, 1988].

1.3.2. 모세관 물흡수량 및 계수

작은 크기의 기공에서는 모세관현상이 물의 이동을 지배하게 된다. 기공의 크기가 0.1 μm 보다 작은 경우 모세관 응축이 일어나게 된다.

(a) ω : 모세관 물흡수계수 $\text{kg}/(\text{m}^2\text{t}^{1/2})$

$\omega = W/t^{1/2}$, $W = \omega t^{1/2}$, (W: 표면적으로 흡수된 물흡수량 kg/m^2 , t: 시간)

무게를 잰 시료를 증류수에 담구어 (시료의 한 표면을 젖은 스폰지 위에 올려 놓음) 특정 시간 간격 동안에 증가된 무게를 측정한다. 곡선의 초기 부분을 제외하고는 모세관 물흡수량은 시간의 제곱근($t^{1/2}$)에 대해서 보통은 직선으로 나타난다. 이때 모세관 물흡수계수는 그 기울기로부터 계산된다. 측정시간은 1시간 이나, 그전에 시료의 다른 한쪽 끝까지 젖게 되면 마친다.

(b) B: 물침투계수 $\text{cm}/(\text{t}^{1/2})$: 물이 침투되어 올라온 높이와 시간 사이의 관계

$B = h/t^{1/2}$ (h: 올라온 높이 cm, t : 시간)

3. 연구 결과 및 검토

3.1. Nationalgalerie의 적색 사암

표 2에 손상이 되지 않은 내부 시료와 풍화 손상된 시료의 측정 결과를 나타내었다. 적색 사암인 Nationalgalerie의 Nebraer 사암은 시료의 채취 위치에 따라 겉보기 밀도가 차

표 2. 시료의 물리적 성질 (밀도, 기공도, 포화도, 각종 물흡수도)

		density(g/cm ³)		Porosity (Vol.%)	Saturated Value	W _{g,a} (wt.%)	W _{v,a} (Vol.%)	W _{g,v} (wt.%)
		bulk	absolute					
NG-SE	S	2.11-2.13	2.60-2.61	18.37- 19.05	0.60-0.66	5.22-5.85	11.13- 12.34	8.63-9.03
	I	2.12-2.13	2.61	18.26- 18.60	0.56	4.75-4.86	10.15- 10.35	8.56-8.77
NG-NW	S	1.91-1.96	2.59-2.61	24.64- 26.79	0.65-0.72	8.39-9.41	16.44- 18.26	12.63- 14.03
	I	1.96-1.98	2.60-2.61	24.38- 24.66	0.65-0.69	7.99-8.63	15.78- 16.94	12.34- 12.56
PM	S	2.58	2.67	3.23	0.82	1.02	2.64	1.25
	I	2.60	2.64	2.60	0.81	0.80	2.12	0.98

W_{g,a}: 대기압 하의 물흡수도, W_{g,v}: 진공 하의 물흡수도, W_{v,a} = W_{g,a} * D_{bulk}
S: 풍화 손상된 표면을 함유하고 있는 시료, I: 내부의 손상되지 않은 시료

이를 보였다. 건물의 북서쪽(NG-NW)에서 채취한 시료의 겉보기 밀도가 1.96-1.98 g/cm³, 남동쪽(NG-SE)의 시료들은 2.1 g/cm³로 차이를 보였으나 참밀도는 약 2.6 g/cm³로 비슷한 값을 보였다. 그 값으로부터 기공도가 각각 18 Vol.%와 24 Vol.%로 계산되었다. 상대적으로 높은 기공도를 보인 시료는 많은 물흡수량을 보였다. 북서쪽에서 채취한 시료는 남동쪽의 시료에서 보다 큰 물흡수도를 보였고 이 두쪽의 시료들 중 풍화 손상된 부위를 함유하고 있는 시료들에서는 시료에 따라 물흡수도가 큰 변화를 보였다. 풍화 손상된 표면시료와 신선한 내부시료의 측정된 수치를 비교해 볼 때 채취 위치에 상관없이, 손상된 표면부위의 측정값이 내부의 값보다는 높게 입증되었다. 북서쪽의 내부 시료에서는 남동쪽 시료의 손상된 표면 시료에서 보다 높은 물흡수도를 보였는데, 이는 풍화상태 뿐만 아니라 Nebraer 사암 종류의 다양성으로도 고려되어진다.

모세관으로 흡수된 물의 양(ω)을 표 3에 나타내었고, 시간의 제곱근에 따라 그림 1에 표시하였다. 남동쪽 시료의 모세관 물흡수값인 ω 값이 0.04 kg/m²s^{1/2}, 북서쪽 시료의 값이 0.15-0.32 kg/m²s^{1/2}로 측정됨으로서, 북서쪽 시료의 모세관 물흡수가 남동쪽 시료에 비해 더 큼을 알 수 있다.

사암에서의 높은 물흡수계수 ω 는 오염물질이 포함되어 있는 습기들이 아주 짧은 시간 동안에 많은 양이 암석 안으로 들어올 수 있음을 암시한다. 이때 함께 들어온 염이 암석 안에서 녹고, 밖으로 이동하면서 건조하게 된다. 이곳에서 물이 증발되면서 쌓이게 되는 것이

표 3. 시료의 모세관 물흡수도

시료		ω (kg/m ² s ^{1/2})	B (cm/s ^{1/2})	W ^{AK}
NG-SE	OS	0.043-0.047	0.044-0.055	0.085-0.098
	I	0.036-0.037	0.043-0.049	0.074-0.083
NG-NW	OS	0.157-0.318	0.139-0.141	0.120-0.225
	I	0.154-0.296	0.125-0.129	0.119-0.236
PM	OS	0.0251	0.0623	0.0403

W^{AK}: Water capacity, OS: 표면 부위, I: 신선한 내부부위

다. 적색 사암을 덮고 있는 얇은 검은 층에서는 측정 초기에는 모세관 물흡수가 낮음이 관찰되었다. 그러나 시간이 지날수록 물흡수량이 급격히 증가함을 알 수 있다. 흑색 표면층에서는 습도가 높은 조건 하에서 모세관 응축이 일어날 수 있을 정도로 기공크기의 분포에 변화가-작은크기로의-있었을 것으로 추측된다.

3.2. Pergamon Museum의 석회암

사람들과는 달리 페르가몬 박물관의 무셀석회암의 참밀도는 2.64 g/cm³으로 2.60 g/cm³인 겔보기밀도와 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 기공도는 2.60 Vol.% 로 작은 값을

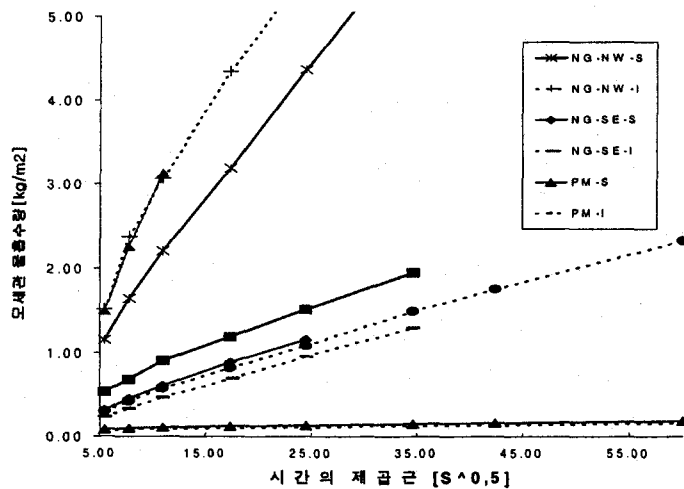


그림 1. 시간에 따른 여러 시료들의 모세관 물흡수도 (w-value)
(S: 풍화 손상된 표면을 함유하고 있는 시료, I: 내부의 손상되지 않은 시료)

보였다. 대기압과 진공 하의 물흡수도 또한 사암과 비교하였을 때 작은 기공공간 때문에 낮은 물흡수도를 보였다(대부분 약 0.8 wt%). 신선한 내부 시료와 풍화 손상된 부위를 포함하고 있는 시료 모두에서 낮은 물흡수도를 보였지만, 풍화 손상된 부위를 함유하고 있는 시료의 물흡수도가 신선한 부위에서 보다 높게 나타났다. 그러나 매우 작은 기공크기의 결과로 포화도는 대부분 0.8 이상의 높은 값으로 나타났다. 풍화된 표면에서 나타난 높은 포화도 값은 확장된 기공공간을 잘 설명해주고 있다. 확대된 기공로에 의해서 평상시의 강우 시에도 신선한 암석에서 보다 기공 안에 더 많은 수분이 침투될 수 있다. 조밀한 석회암의 표면시료에서는 ($0.0251 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$) 사암에 비해 ($0.043\text{-}0.318 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$) 현저히 적은 모세관 흡수력을 보이고 있다. 적은 물흡수도는 습기의 공격이 단지 표면에만 제한적으로 이루어짐을 추측할 수 있다. 녹은 표면물질이 이때 바로 씻겨지거나 느슨한 외각을 형성하게 된다.

3. 총 합

분석된 사암들은 기공도 값이 크고, 높은 물흡수도를 보이나, 포화도는 풍화저항성의 한계 값 보다 낮은 값을 보여, 스며든 수분이 다시 표면으로 이동하기 쉽다. 사암에서의 높은 물흡수계수 ω 는 오염물질이 포함되어 있는 습기들이 아주 짧은 시간 동안에 많은 양이 암석 안으로 들어올 수 있음을 암시한다. 이때 함께 들어온 염이 암석 안에서 녹기도 하고, 밖으로 이동하면서 건조하게 된다. 이곳에서 수분이 증발되면서 쌓이게 되는 것이다.

석회암의 물흡수량은 사암에 비해 현저히 적으나 높은 포화도로 인해 일단 들어온 수분은 바로 빠져 나가지 않고, 암석내에 머물러 있게 된다. 그러나 적은 물흡수도 값은 습기의 공격이 단지 석회암의 표면에만 제한적으로 이루어질 것임을 추측하게 한다. 이때 손상된 표면 물질이 바로 씻겨지거나 느슨한 외각을 형성하게 된다.

풍화손상된 부위를 포함하고 있는 모든 시료는 신선한 부위와 비교시 높은 기공도 값을 보였으며, 물흡수량도 많음이 관찰되었다. 표면이 흑색층으로 덮힌 암석의 물흡수량은 측정 초기에는 적게 나타나 이 층이 수분의 흡수를 제지하는 경향을 보였으나, 시간이 지날수록 급격한 수분의 흡수를 보였다. 이 흑색층은 습도가 높은 조건 하에서 모세관 응축이 일어날 수 있을 정도로 작은 크기의 기공으로 이루어져 있음을 추측할 수 있다. 일단 이 흑색층을 통과해 들어온 수분은 암석 내부로 이동하게 되고, 표면의 흑색층이 건조됨에 따라 암석 내부에 머물러 있던 수분이 빠져 나가는 것이 쉽지 않게 되어 이 흑색층은 수분을 저장하게 하는 역할을 할 수 있다.

참고문헌

- Begonha, A., Sequeira Braga, M., Black crusts and thin black layers in granitic monuments: Their Characterization and The Role of Air Pollution, 8th International Congress on Deterioration and Conservation of stone, 1, 1996, p. 371-375.
- Begonha, A., Physical characteristics of the Oport granite related to stone decay in monuments, III. International symposium on the conservation of monuments in the mediterranean basin, 1994, p. 541-546.
- Biscontin, G., Drussi, G., Maravelaki, P., Physical-chemical Investigations of Stone Architecturic Surfaces in Venice: the Scuola Grande dei Carmini, Conservation of Architectural Surfaces: Stones and Wall Covering, 1993, p. 125-136.
- Dietz, F., Ursachen des Steinzerfalls, Das Bauzentrum, 1990, Nr. So, p. 42-52.
- Gertis, K., Steinzerstoerung aus bauphysikalischer Sicht - Ist mangelhafter Regenschutz Schuld ?, Bautenschutz und Bausanierung, 10, 2, 1987, p. 95-98.
- Hoecker H., Bedeutung molekularer Untersuchungen feur die Ursachenforschung in der Steinzerstoerung, Bautenschutz und Bausanierung, 1988, So.H., p. 87-91.
- Kiessl, K., Gesteinschoedigung aus bauphysikalischer Sicht, Bautenschutz und Bausanierung, So.H., 1989, p. 56-60.
- Ordaz, J., Porosity and Capillarity in some Sandstone and Dolomite Monumental Stones, 5th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, 1985, p. 93ff.
- Riederer, J., Protection From Weathering of Building Stone in Tropical Countries, Case Studies in the Conservation of Stone and Wall Paintings, 1986, p. 151-154.
- Robertson, E., Physical Properties of Building Stone, Conservation of Historic Stone Buildings and Monuments, 1982, P. 62ff.
- Schuh, H., Physikalische Eigenschaften von Sandsteinen und ihren verwitterten Oberflaechen, Muenchner geowissenschaftliche Abhandlungen, 1987
- Snethlage, R., Hygric and thermal Properties as Criteria for the selection of natural stone exchange Material, 5th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, 1985, p. 113-120.