

PF8) 화강암의 강제풍화에 미치는 수분의 동결-융해 영향 Effects of Freezing-thawing on the Forced Weathering of Granite

손병현·김현규¹⁾·정종현²⁾

한서대학교 환경공학과, ¹⁾포항공과대학교 환경공학부, ²⁾서라벌대학 생명보건학부

1. 서론

경주시 남산 및 인근지역은 역사유적지구가 호주 케언스에서 열린 유네스코 세계유산위원회 총회(2000. 11.)에서 세계문화유산으로 등재됨으로써 경주 남산과 인근지역이 인류공동의 문화유산으로 거듭나게 되었다. 국내의 석조문화재는 주로 석탑, 석불, 부도, 비석, 당간지주 등으로 구성되어 있으며, 삼국시대 이래로 조선말까지 축조된 것으로서 대부분 실외에 설치되어 있어 자연적인 풍화현상으로 원래의 모습과 형태가 크게 훼손되어 있다.

석조문화재는 시간이 경과함에 따라 여러 가지 환경적 요인에 따라 훼손되는데, 주요한 원인은 비, 바람, 빗물, 지하수, 해수의 염분, 기온변화, 수분의 동결-융해, 생물서식, 그리고 환경오염물질 등이며, 이들 요인 중에서 한가지 현상이 영향을 미치는 것이 아니라 이들이 동시에 복합적으로 영향을 미친다. 지금까지 석조문화재에 대한 역사학적, 암석학적, 미술학적 및 고고학적 측면에서의 연구는 상당한 성과를 이루었지만, 과학적인 방법을 동원한 대부분의 연구는 일정기간 동안 i)인위적으로 제조한 산성수에 암석 침수실험(심규훈, 2000), ii)동결융해 반복 실험(김성수, 1999) iii)염분의 결정화 실험(김근미, 2001) iv)유해가스(이산화황과 이산화질소)에 문화재 노출 실험(대한민국 체육부, 1996) 등을 거친 후 암석의 물리적 특성을 분석하여 이들 각각의 단일 실험인자가 미치는 영향을 분석한 것들이 대부분이다. 그러나 지금까지의 연구에서 알 수 있듯이, 실제의 자연환경에서는 석조문화재의 훼손에 영향을 미치는 수많은 인자들이 개별적으로 작용을 하는 것이 아니라 복합적으로 영향을 미치므로 종합적인 영향을 동시에 파악해야 한다. 본 연구에서는 석조문화재에 미치는 여러 가지 영향중에서 수분의 동결-융해와 유해가스(이산화황, 이산화질소, 이산화탄소)가 동시에 석조문화재의 풍화에 미치는 영향에 대해 고찰해 보고자 한다.

2. 연구 방법

수분의 동결-융해에 의한 석재의 풍화는 물이 암석의 공극 사이에서 결빙되면서 부피팽창을 하는 과정에서 암석에 인장응력을 가하게 되는 현상을 의미한다. 수분의 동결과 융해는 온도변화에 의해 일어나기 때문에 이 과정에는 온도의 영향이 필연적으로 동반된다. 본 연구에서는 석조문화재의 풍화에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 평가되고 있는 수분의 영향을 파악하기 위해 석조문화재와 동일 재질의 화강암을 이용하여 인위적 동결융해 강제풍화(forced weathering)실험을 하며, 이와 동시에 황산화물, 질소산화물, 그리고 이산화탄소와의 복합 영향을 실험적으로 살펴보고자 한다. 또한 장기적으로는 석조문화재의 보존이 연구의 최종목적이므로 보존방법의 일환으로 석조문화재에 광촉매를 코팅 하여 광촉매의 코팅이 석조물의 보존에 어느 정도 영향을 미치는지를 과학적인 방법으로 규명해 보고자 한다.

강제풍화실험의 목표는 짧은 시간내에 풍화과정을 파악하는 것이다. 그러므로 경주지역의 10년간 기상자료에서 얻은 최저온도(-13.4℃), 최고온도(35.2℃), 및 상대습도(75.9%)를 기준으로 좀 더 가혹한 조건(-150℃, 35℃, 90%)에서 실험을 수행하였다. 또한 이산화황과 이산화질소의 농도도 최근 8년간의 연평균농도(이산화황 9 ppb, 이산화질소 20 ppb) 보다 더 가혹한 조건(SO₂ 10 ppm, NO₂ 10 ppm)에서 실험을 수행하였다. 본 연구에서 동결-융해 실험은 항온습습기(JEIO TECH, 150AT/PM)를 사용한 자동제어방식을 사용하였고, 실험조건은 온도범위 -15℃ ~ 35℃로 설정하였으며, 수분의 공급방식은 포화상대습도의 유지에 의한 응결현상유도 방식을 사용하였다. 위에서 설명한 실험조건은 그림 1과 같다. 또한 항온습습기 내부로 MFC를 이용하여 유해가스를 500ml/min(SO₂ 10ppm, NO₂ 10ppm, CO₂ 1%, air balance)로 주입하였다.

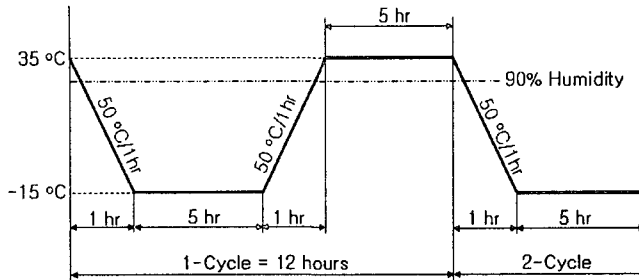


Fig. 1. Forced weathering cycle for freezing and thawing.

동결-융해 실험 후 암석내 구성광물의 변화양상을 4가지 mineral 성분을 대상으로 시료당 24~36회의 측정을 수행한 후 통계적으로 분석하였다. 통계처리는 상자그림(box plots)을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 신선한 화강암 재료와 강제풍화(동결-융해)가 어느 정도 진행된 시료의 EDX와 물리적 특성 분석결과, Table 1에서 볼 수 있듯이 강제풍화가 진행된 시료일수록 Al, Na 및 Ca 함량은 신선한 시료에 비해 낮게 검출되었는데, 이는 Ca의 경우 사장석 내의 Ca성분이 수화이온의 형태로 제거되었기 때문에 사료되고, Na의 경우 해리된 Na성분이 물과의 접촉에 의해 용해 제거되었을 것으로 판단된다. 또한 균류 등 미생물이 유기산을 생성하여 암석의 칼슘성분을 용해시키고 알루미늄 같은 금속이온을 chelate하여 암석을 훼손하는 것으로 판단된다. 또한 풍화가 진행된 시료의 경우 비중과 기공도의 저하를 초래함을 알 수 있다. 이와 같이 기공도가 감소하면 암석 내부의 공극이 넓어져 수분의 침투가 용이해지고 이와 더불어 암석의 풍화는 가속을 받게 된다.

Table 1. Physical/chemical properties of fresh and weathered granite.

	chemical composition(wt.%)								physical property	
	O	Si	Al	Na	K	Fe	Ca	Mg	density(g/cm ³)	porosity(%)
fresh material	68.75	20.44	4.99	3.09	1.14	0.55	0.60	0.39	2.59	0.49
weathered material	68.16	21.64	4.82	2.71	1.37	0.48	0.53	0.24	2.55	0.54

그림 2는 암석 표면의 구성성분을 분석한 것으로서 동결-융해 실험전 시료(raw granite), 약 85 cycle 동결-융해 실험(암석을 TiO₂로 코팅한 것과 코팅하지 않은 것) 후 암석표면의 구성성분의 변화를 분석한 결과이다. 그림 2(a-d)에서 볼 수 있듯이, 암석표면의 구성광물들은 대부분 Si 성분을 제외하고 raw granite보다 동결-융해 반복 실험 후의 시료에서 낮은 평균농도값을 보였다. 이는 암석시료의 풍화에 동결-융해의 영향이 있음을 의미한다.

그림 3은 85 cycle 동결-융해 반복 실험 후, TiO₂로 코팅한 시료와 코팅하지 않은 시료에 대한 압축강도를 분석한 것이다. 그림 3에서 볼 수 있듯이, 동결-융해 반복실험 횟수가 증가할수록 압축강도가 감소함을 알 수 있으며, 또한 TiO₂로 코팅한 시료가 코팅하지 않은 시료 보다 압축강도의 감소비율이 적음을 알 수 있다. 이는 TiO₂로 코팅한 화강암이 동결-융해에 의한 암석의 풍화 영향을 덜 받는다는 것을 의미하므로 대부분 화강암으로 구성된 석조문화재의 보존에 TiO₂ 코팅처리가 유용한 방법이 될 수 있음을 의미한다.

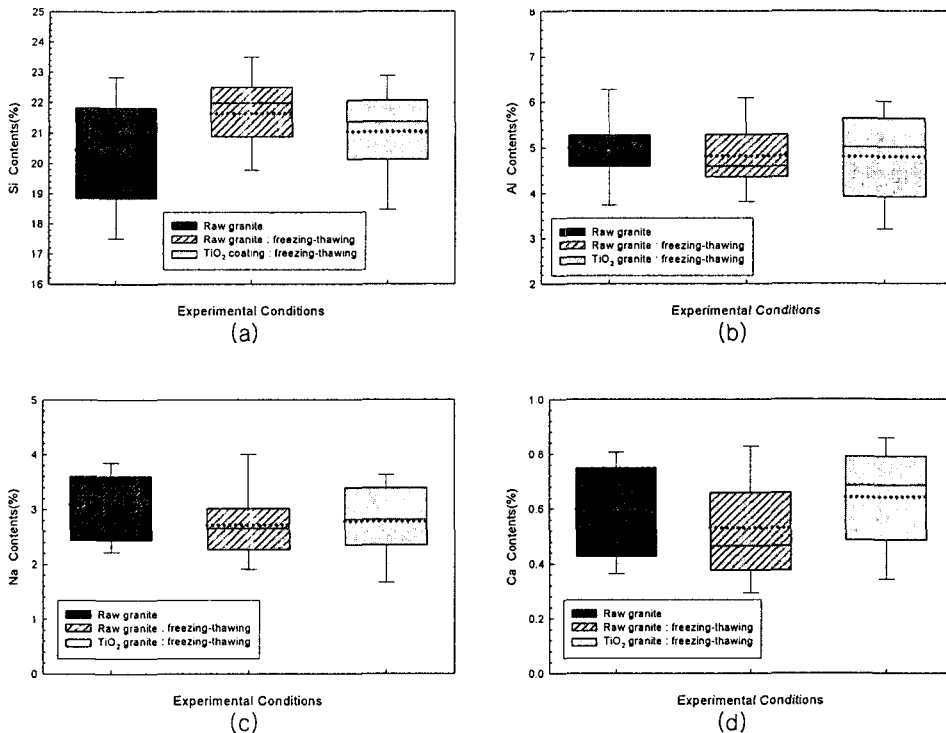


Fig. 2. Comparison of mineral compositions with experimental conditions.

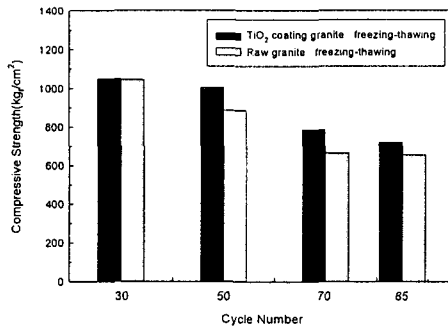


Fig. 3. Change of compressive strength after freezing-thawing test.

사 사

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며(KRF-2003-042-C00002), 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 한국문화재 보존과학회 (2001) 석조문화재 보존관리 연구, 문화재청.
- 심규훈 (2000) 석조조형물의 화학적 풍화가 미치는 영향:산성비의 영향, 한서대학교 대학원 석사학위논문.
- 김성수 (1999) 인공풍화 실험을 이용한 석재의 공학적 내구성 평가, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
- 김근미 (2001) Geotourism 대상지역의 지질공학적 특성 및 장기보존기술, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
- 대한민국 체육부 (1996) 박물관내 전시 및 수장 공간의 공조환경연구.