



CONSERVATION STUDIES 29

인공풍화 실험을 이용한 보존처리제의 물성 변화 연구

*A Study on the Change of Conservation Materials Properties
Using Artificial Weathering Test*

도민환 · 한민수 · 이장준 · 전병규 · 송치영

인공풍화 실험을 이용한 보존처리제의 물성 변화 연구

*A Study on the Change of Conservation Materials Properties
Using Artificial Weathering Test*

도민환 · 한민수 · 이장준 · 전병규 · 송치영

Do Min-Hwan · Han Min-Su · LeeJang-Jon · Jun Byung-Kyu · Song Chi-Young

<Abstract>

Because stone cultural heritages in Korea are mostly situated outdoors without any notable protection, there are severe damages from physical, chemical and biological weathering. And this in turn causes deformation and structural damage. To counteract this problem and increase durability, various kinds of conservation materials are used in the conservation and restoration treatment. However, there are not many practical and technological experiments on this subject. Accordingly this research is for analysis of effect for treatment to make use a resin of the ethyl silicate for the granite in Mt. Nam of Gyeongju.

It takes a long time to confirm the test result regarding durability and side effects of the conservatives after treatment. So we built up an artificial environment through freezing and melting test, and evaluated the conservation materials.

As a result of this experiment, porosity and absorptivity was increased in accordance with processing of freezing and melting test. But other things such as elastic wave speed, elastic modulus, uniaxial compressive strength and tensile strength was decreased.

It will make a plan to form a method of research systematically for mechanism and element of weathering and to elicit a correlation among experiment of artificial weathering and practical natural weathering from next research.

1. 서론

우리나라의 석조문화재 대부분은 특별한 보호 시설 없이 옥외에 노출 되어 있어 장기간에 걸쳐 자연적 및 인위적 훼손을 심하게 받고 있기 때문에 원래의 모습이 훼손되어 있으며, 구성암석의 강도도 약화되어 있다. 이러한 풍화된 석조문화재의 보존·복원 처리 시에 보존처리제 처리가 가장 보편적으로 사용되고 있으나 석조문화재에 적용 후에 부작용의 발생 여부에 대해서는 평가가 제대로 되지 않았다. 따라서 보존처리제를 실제 석조문화재에 적용하기 전에 부작용의 발생 여부를 확인하는 것이 필요하다. 이러한 보존처리제의 부작용 및 내구성 평가가 필요할 경우 보존처리된 별도의 암석 시료를 인공풍화 처리하여 물성 변화를 관찰함으로써 그 효과를 파악할 수 있다. 특히 인공풍화실험은 자연 상태의 풍화노출실험에 비해 단시간에 실험을 효과적으로 조절할 수 있다는 장점이 있다.

인공풍화 실험법은 자연 환경보다 더 강한 환경을 인위적으로 조성시켜 풍화를 가속화시켜 실험 기간을 단축시키고, 각 풍화 요인에 대한 정확한 인위적 조절을 통해 그 영향 효과를 정량적으로 파악하게 하는 실험법이다(Hale and Shakoor, 1998; Park, 1996). 그런데 실제 자연 환경에서 발생하는 풍화는 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하기 때문에, 인공풍화실험에서 모든 요인을 고려하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 그러므로 인공풍화 실험에서는 풍화에 가장 큰 영향을 미치는 몇 가지의 요인을 선택하여 실시하게 되며, 각각의 요인에 대하여 자연계에서 발생하는 현상보다 극단적인 환경을 조성하여 풍화를 진행시키는 것이 일반적이다. 자연계에서 암석에 풍화를 발생시키는 요인으로는 공극이나 균열 내에서 물의 동결·융해, 산성비, 염의 결정화 작용, 온도의 상승 및 냉각에 따른 암석 구성 물질의 팽창률 차이, 바람, 침수와 건조 등이 있으나, 우리나라에서는 물의 동결-융해에 의한 풍화가 가장 큰 요인이므로 이 연구에서는 동결-융해에 의한 풍화만을 선택하여 인공풍화실험을 실시하였다.

2. 연구방법

(1) 지형 및 지질

경주는 경상북도 동남쪽에 경도 129° 31', 위도 35° 39' 상에 위치하고 있으며, 동쪽의 토함산(745m), 서쪽의 선도산(380m), 남쪽의 남산(494m), 북쪽의 소금강산(280m)으로 둘러싸여있다. 이 가운데 남산은 경주의 남쪽 낮은 구릉성 산지로 형산강과 남천 사이의 침식사면 사이에

남북으로 길게 자리 잡고 있다. 남북 길이 약 8km, 동서 폭 약 4km이고, 금오산(468m)과 고위산(494m) 능선으로 구성되어 있으며, 전체적으로 서고동저, 남고북저의 형태를 보인다.

이 지역의 지질을 살펴보면, 백악기의 대구층과 이를 관입한 각섬석흑운모화강섬록암, 흑운모화강암과 알칼리장석화강암, 제3기 화산암과 충적층으로 구성된다. 경주지역은 남산화강암체와 토함산화강암체로 크게 구분되는데, 연구 지역이 속한 남산 화강암체는 경주시 남쪽 남산(471m)에서 마석산(451m)을 지나 외동읍 모화리에 이르는 연장 약 20km, 폭 3~5km의 암주이다. 북부는 담홍색을 띠는 알칼리장석화강암, 남부는 알칼리장석화강암~흑운모화강암으로 구성되며, 동쪽은 I-형의 토함산화강암체와 분리된다(윤성효와 황인호 1990). 시료를 채취한 지점의 암석은 경주배리운을곡마애불좌상과도 같은 지질 분포를 보이는 것을 확인하였다(Figure 1).

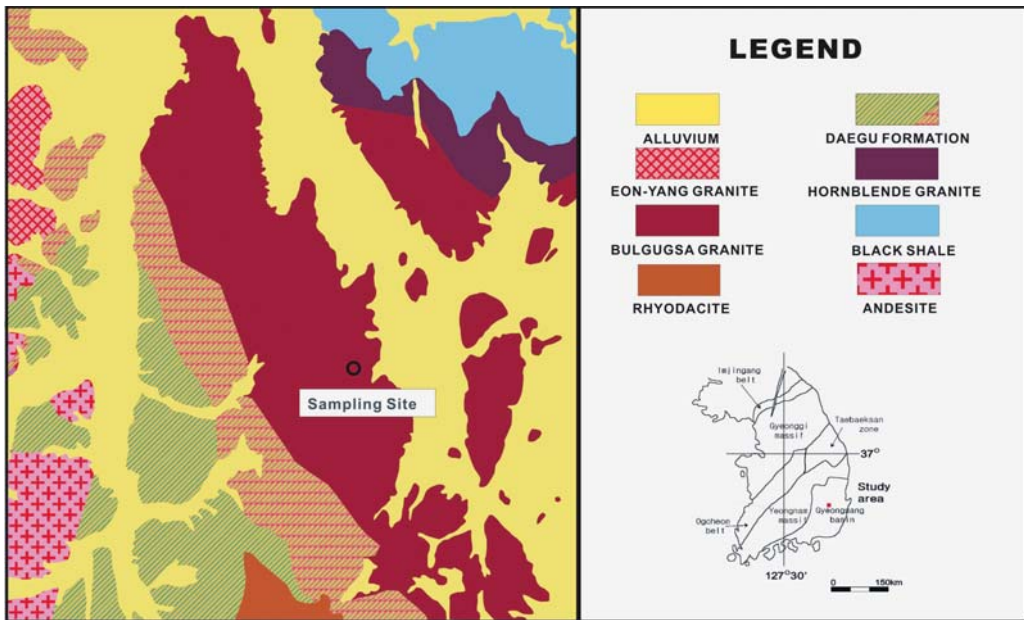


Figure 1. Geologic and index maps of the study area.

(2) 시료채취

이번 연구 대상 시료를 채취하기 위하여 경주 남산 일원의 석조문화재와 주변에 관한 지형 및 정밀지질조사를 실시하였다(Figure 2). 연구지역에 대한 야외조사 자료와 풍화와 관련된 기존의 연구자료를 검토한 결과, Erfan and Dearman(1978)과 Lee and Ed Freitas(1989) 등이

제시한 풍화 등급에 따라 I~Ⅵ 단계로 분류 및 적용하여, Grade Ⅲ의 등급에서 채취하였다, 이는 단기간에 인공풍화실험의 영향이 잘 나타날 수 있도록 하기 위하여 풍화가 좀 더 진행된 시료를 선택한 것이다.



Figure 2. Buddha images carved on rock surface in Namsan. (A) Seated Buddha image carved on rock surface of Yuneulgok in Bae-ri, (Designated cultural heritage No. 195 in Gyeongsangbuk-do). (B) Seated Stone Buddha statue at Bulgok of Namsan, (Treasure No. 198). (C) Buddhist images carved on rock surface at Tapgok of Namsan, (Treasure No. 201). (D) Seated Buddha image carved on rock surface near Sinseonam at Namsan, (Treasure No. 199). (E) Seated Buddha images carved on rock surface near Chilbulam at Namsan, (Treasure No. 200). (F) Seated Yeorae image carved on rock surface at Yongjangsa site, (Treasure No. 913).

(3) 시편제작

보존처리제의 처리 전·후 및 인공풍화실험 후 물성 변화를 알아보기 위하여 현장에서 채취한 암괴시료에서 NX 코어시험편(직경 54mm)을 얻어 표면 연삭기(KSA500-HA, 유압반자동식)를 이용하여 편평도의 오차가 0.02mm이하가 되도록 성형하였다(ISRM, 1981)(Figure 3). 공극률과 흡수율은 5개의 시료로 실험하여 평균값을 얻었으며, 일축압축강도와 같은 파괴 시험은 3개의 시료로 실험하여 평균값을 취했다.



Figure 3. Polishing machine (KSA500-HA) and Freezing-thawing test machine

(4) 동결·융해실험

콘크리트에 대한 동결·융해 시험법은 ASTM C-666, JIS A 6204등에 나와 있으며, ASTM에서 제안한 시험방법의 최저, 최고 온도는 $-17.8\pm 1.7^{\circ}\text{C}\sim 4.4\pm 1.7^{\circ}\text{C}$ 로 규정하고 있다. 그러나 암석에 대해서는 아직 규격화된 시험법은 없고, 일본토질공학회(1989), Nicholson and Nicholson(2000), 김성수와 박형동(1999), 광진철과 백환조(2000)등에서 $-20^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 의 온도 범위에서 동결·융해 실험을 실시하였다. 또한 Bortz et al(1993), Bortz and Wonneberger(1995)등의 시험법에서는 $-22^{\circ}\text{C}\sim 77^{\circ}\text{C}$ 범위, Park(1996)은 $-10^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ 범위, 京谷孝史 et al.(2000)은 $-15^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 범위에서 동결·융해 실험을 실시하였다.

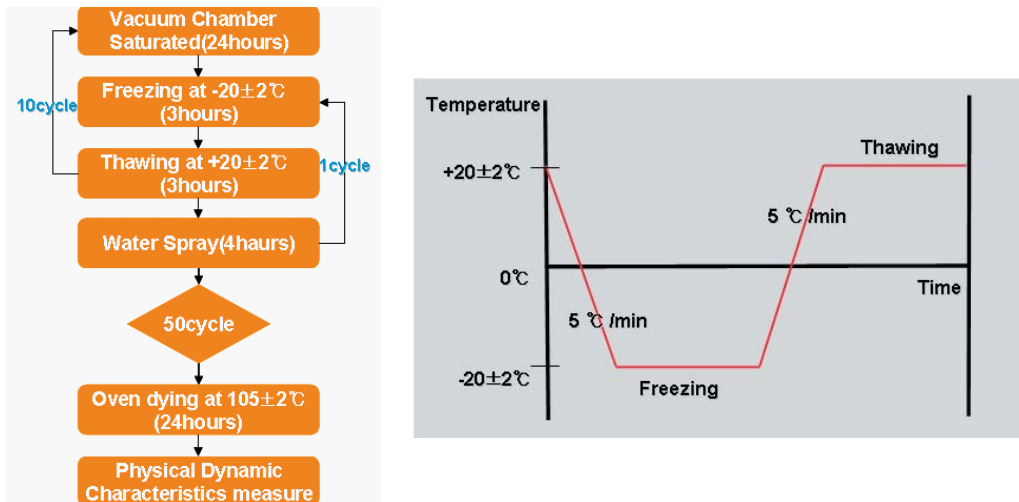


Figure 4. Artificial weathering cycle for freezing and thawing.

본 연구에서는 ASTM(American Society for Testing and Materials, 1997)의 C-666에 규정된 콘크리트 동결시험법과 이탈리아에서 실시한 석재의 동결압축강도 시험을 참고로 하여 $-20^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 의 온도 범위로 동결·융해 실험을 실시하였다(Figure 4).

3. 결과 및 토의

(1) 실험 대상 보존처리제 및 처리 방법

본 연구에서는 현재까지 암석의 보존처리와 관련된 연구에서 효과가 우수한 것으로 평가받은 에틸실리케이트 계열의 보존처리제를 사용하였다(Caselli and Kagi, 1985; Pascua et al, 1995; Lukaszewicz and Kwiatkowski, 1995). 또한 실리케이트 함량에 따른 정량적이고 공학적인 평가를 하기 위해 독일의 Remmers사에서 제조된 Funcosil Stone Strengthener 300 (KSE 300)을 이용하였다(Table 1.).

암석 내부에 존재하는 수분을 제거하여 보존처리제의 암석 내 침투 효율을 높이기 위하여 성형된 암석시료를 24시간 동안 105°C 오븐에 건조하였다. 보존처리제 처리방법은 진공함침기를 이용하여 보존처리제를 주입시키는 방법을 적용하였다. 본 실험에 앞서 실시한 기초실험을 통하여 보존처리제가 효과적으로 침투되는 시간과 건조시간을 확인하였다. 이 결과를 토대로 함침시간을 48시간으로 산정하였으며, 보존처리제의 효과적인 겔 형성을 위해서 항온·항습기를 이용하여 20°C , 50% RH의 환경을 유지하면서 40일 동안 건조하였다.

본 연구에서는 보존처리제 처리 전·후의 암석에 대한 탄성과 속도 P파와 S파를 측정하여 내부 입자 조직의 변화를 간접적으로 확인하고자 하였다. 그 결과, Table 3에서와 같이 보존처리제를 처리한 시료에서는 전반적으로 속도가 증가하는 경향을 보였으며, 이와는 반대로 공극률과 흡수율은 감소하는 것으로 나타났다. 이렇게 보존처리제 처리 후 암석의 물성이 변화하는 원인은 에틸실리케이트가 암석 내부의 공극에 침투하여 겔 형태의 실리콘 성분의 물질을 형성한 후 공극을 채웠기 때문으로 판단된다.

일축압축강도는 구성광물의 강도와 입자간의 결합력 등에 영향을 받는 것으로 물성평가항목 중 가장 일반적으로 사용된다. 실험결과는 전반적으로 보존처리제를 처리한 암석의 일축압축강도가 증가하는 경향을 보였다. 일축압축강도 시험 시 측정된 정탄성계수(영률, E_s) 또한 모든 보존처리제 처리 후 시편에서 증가하였다. 프아송비는 KSE 300에서 평균값이 0.26으로 나타

났다. 이는 축방향보다 횡방향의 변화가 적어 값의 변화폭이 작고, 미세균열의 영향이 축방향보다 횡방향으로 더 많이 받았기 때문으로 판단된다(Table 2).

인장강도는 실험이 간편하고, 신뢰성이 있는 결과를 나타내는 간접인장강도 측정법인 Brazilian test를 적용하였다. 실험결과, 보존처리제 처리 후 인장강도는 증가하였다.

Table 2. Physical properties of the Namsan alkali-feldspar granite in Gyeongju.

		Porosity (%)	Water Absorption (%)	Ultrasonic velocity		Uni.Comp. Strength* (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's ratio
				P-wave (m/s)	S-wave (m/s)				
Untreated sample	Min	3.13	1.23	2231.2	1496.1	122.2	5.1	28.1	0.27
	Max	3.89	1.54	2504.5	1653.4	149.9	6.4	45.8	0.37
	Mean	3.46	1.39	2396.1	1605.5	136.8	5.8	34.5	0.27
KSE 300	Min	1.52	0.59	2516.7	1828.7	148.3	6.4	34.4	0.25
	Max	2.03	0.8	2836.5	2145.6	167.4	7.3	53.5	0.27
	Mean	1.81	0.71	2685.3	2016.6	159	6.8	46.3	0.26

* Uni.Comp. Strength : Uniaxial Compressive Strength

(2) 동결-융해 풍화 메커니즘

물이 얼음으로 될 때 체적은 약 9% 팽창한다. Winkler(1973)는 물이 동결함에 따라 -22℃에서 200Mpa의 압력을 암석에 가한다고 보고하였으며, 이때 발생하는 직접적인 팽창압이 암석을 파괴하는 원인으로 생각하였다. 그러나 자연조건하에서는 암석내 공극이 완전히 물로 포화되어 동결하는 현상은 발생하기 어렵다고 일컬어지고 있다.

Everett(1961)는 암석 내 존재하는 공극 사이를 연결하는 모세관내에 얼음-물 계면이 존재하고, 이 계면에 화학적 기울기가 형성되어 물이 모세관 내를 통과하여 얼음·물 계면 부근에 흐른다고 발표하였다. 이때 유입한 물이 얼음과 접촉하여 동결하면 얼음 체적이 증가하여 압력도 증가하고, 이 증가 압력이 암석 강도보다 크게 되었을 때 암석 내에는 파괴가 발생한다.

Takagi(1980)는 광물입자와 물 사이에 필름 모양의 물이 두께를 일정하게 유지하고자 하기 때문에 흡수력이 생기어 주변 물을 빨아올린다는 것이다. Matsuoka(1986)의 흡착력이론에는 암석 파쇄속도와 단위체적당의 공극 표면적과 인장강도 등의 암석 물성과의 관계가 비교적 잘 설명되어 있다.

위에서 말한 바와 같이 온도의 변화로 인해 생기는 팽창과 수축은 물의 동반 없이는 기계적 풍화가 쉽게 일어나지 않는다는 사실을 알 수 있다. 따라서 동결·융해 실험을 좀 더 효과적으로 하려면 항상 암석 공극에 물이 있어야 체적증가로 인해 팽창압이 발생하여 풍화가 진행될 것으로 판단한다(이준성, 2002)

(3) 공극률과 흡수율

공극률(porosity)이란 암석 내의 공극의 분포 정도를 나타내는 것으로서, 시험편 중의 공극의 부피를 전체 시험편의 부피로 나누어 백분율로 표시한 값으로 나타낸다. 공극의 부피는 시료를 물로 포화시킨 후 공극에 채워진 물의 부피를 계산하여 구한다. 그러나 암석시료의 경우 공극의 크기가 극히 작고, 서로 연결되어 있지 않은 경우가 일반적이므로 침수에 의하여 100% 포화시키기는 어렵다. 따라서 일정한 기준시간 동안 침수시켰을 때 흡수되는 물의 양으로부터 대략적인 값을 구한다.

Figure 5는 KSE 300 처리 후 동결·융해 cycle과 공극률의 상관관계를 보여준다.

동결·융해 cycle과 공극률과의 관계 $Porosity = 0.0036 \text{ cycle} + 1.8548$ 을 보여 동결·융해 1cycle마다 0.0036%씩 증가하며, 상관성은 93.1%를 보인다.

흡수율이란 암석 시료의 공극에 물이 어느 정도 침투하는가를 나타내는 하나의 지표이며, 암석의 기본적인 물성의 하나이다. 경암의 흡수율은 10% 이하이며, 신선하고 치밀한 암석에서는 1%에도 달하지 않는 경우가 많고, 풍화에 따라 흡수율은 증가한다. 흡수율은 암석의 강도가 비교적 약한 암석에서 그 경향이 잘 나타나며, 경암에서의 흡수율은 거의 측정되지 않는 경향이 있다(김성환, 우병욱, 조성로, 1997).

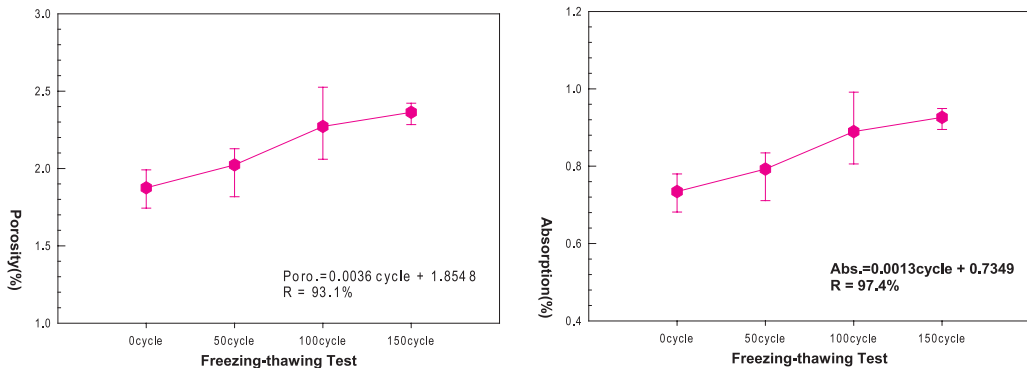


Figure 5. Change of porosity and absorption after freezing-thawing test.

Figure 5는 KSE 300 처리 후 동결·융해 cycle과 흡수율의 상관관계를 보여준다.

동결·융해 cycle과 흡수율과의 관계 $Abs. = 0.0013cycle + 0.7349$ 을 보여 동결·융해 1cycle마다 0.0013%씩 증가하며, 상관성은 97.4%를 보인다.

(4) 초음파 속도

초음파 속도는 암석 입자 자체의 성질과 내부의 불연속면 분포 및 입자 결합 상태를 간접적으로 반영하며, 물질의 변형 특성이 물질 내부로의 초음파 전파 속도에 의해 결정된다.(Kolsky H., 1953)

초음파 속도 측정 장비는 CNS Farnell에서 제조된 PUNDIT이었으며, 시험편을 본체에 연결된 발신기와 수신기 사이에 끼우고 적당한 힘(Hydraulic Pressure Jig, 1.0 MPa)으로 가압하여 P파는 500kHz의 초음파를 발생시켜서 발신기를 통해 시료를 통과시킨 후 수신기를 통해 다시 장비로 파가 되돌아오는 과정에서 전달 시간을 digital로 직접 읽을 수 있도록 고안되었다. 이 방법은 도착 시간을 직접 읽을 수 있어 조사가 빨리 진행될 수 있으나 파형을 볼 수 없어 신뢰성을 입증하기가 어렵다. 이러한 단점을 보완하기 위해 3번 측정하여 신뢰성을 높였다.

Figure 6은 동결·융해 cycle과 초음파 속도의 관계를 보여준다.

결과를 보면 동결·융해 과정을 거친 시료는 다소 불규칙적이지만 전반적으로 속도가 감소한 경향을 보이고 있다.

동결·융해 cycle과 초음파 속도와의 상관관계 $V_p = -3.9118cycle + 2666.3$ 을 보여 동결·융해 1cycle마다 3.9118m/sec 씩 감소하며, 상관성은 66.9%를 보인다.

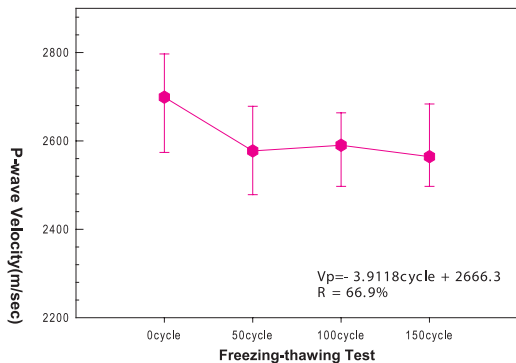


Figure 6. Change of P-Wave velocities after freezing-thawing test.

(5) 일축압축강도

일축압축강도 시료는 균열이 많은 시료나 다른 광물이 포함되어 있는 시료를 배제하는 작업을 거쳤으며, 혹시 있을지도 모를 불안한 요소들을 조금이나마 배제하기 위하여 한 번의 파괴 시험을 할 때 3개의 시료로 실험을 하여 평균값을 취했다.

Figure 7은 동결·융해 cycle과 일축압축강도의 상관관계를 보여주며, 동결·융해 cycle과 일축압축강도와의 관계는 $UCS = -0.0328cycle + 154.62$ 을 보여 동결·융해 1cycle마다

0.0328MPa씩 감소하며, 상관성은 57.6%를 보인다.

일축압축강도는 동결·융해 실험이 진행될수록 강도가 저하되는 양상을 보여주기도 하나 전반적으로 매우 불규칙적인 양상을 나타내고 있다. 동일한 암석 블록에서 채취한 코어시료이며, 공극률과 초음파 전달속도를 통한 균질성 확인 작업을 거쳤음에도 불구하고 암석의 불균질성에 의한 원래 시료의 강도차이에 의한 영향이 존재하는 것으로 판단된다. 또한 풍화과정에서 시료의 표면이 다소 불규칙해지기 때문에 압축강도 측정에 오차가 발생하는 것으로 사료된다.

Figure 7은 동결·융해 cycle과 탄성계수의 상관관계를 보여준다. 동결·융해 cycle과 탄성계수의 관계 $E = -0.0586\text{cycle} + 49.452$ 을 보여 동결·융해 1cycle마다 0.0586GPa씩 줄어들고 있고, 상관성은 88.87%를 보인다.

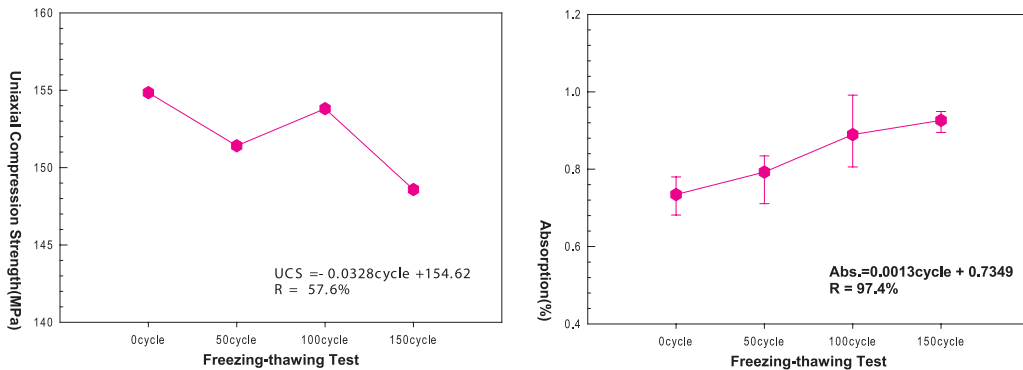


Figure 7. Change of Uniaxial Compressive stress and Young's Modulus after freezing-thawing test.

(6) 인장강도

인장강도를 구하는 시험법으로서 직접인장시험과 압열인장시험, 휨강도시험 등이 있다. 일축인장시험은 겉보기에는 간단하게 보이지만 암석에서는 상당히 어렵다. 왜냐하면 금속의 일축인장시험에 사용되는 시료 제작이 번거롭고, 시료를 시험기에 고정시키는 것이 어렵기 때문이다. 그래서 원주형 시료를 사용하여 실시하는 시험인 압열인장시험을 주로 실시하며, 이는 시료 제작이 용이하고 시험법도 비교적 간단하기 때문이다.

Figure 8은 동결·융해 cycle과 인장강도의 상관관계를 보여준다. 동결·융해 cycle과 인장강도의 관계 $E = -0.008\text{cycle} + 6.8102$ 을 보여 동결-융해 1cycle마다 0.008MPa씩 줄어들고, 상관성은 99.9%를 보여 정의상관관계에 가깝다.

4. 결론 및 제안

본 연구에서는 현재까지 석조문화재의 보존처리와 관련한 연구에서 효과가 우수한 것으로 평가받은 에틸실리케이트 계열의 KSE300 제품의 보존처리제를 사용하여 보존처리제 처리 후 동결·융해에 대한 내구성 및 효과를 정량적이고 공학적으로 평가하고자 경주남산일원의 석조문화재와 유사한 암석을 채취하여 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

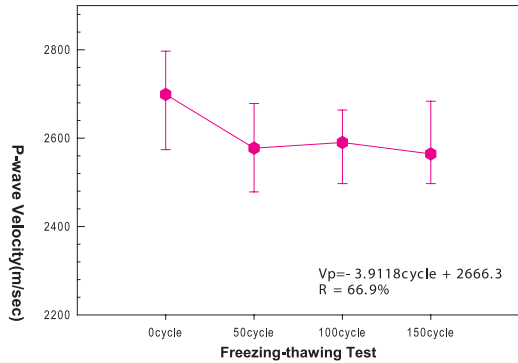


Figure 8. Change of Tensile Strength after freezing-thawing test.

- (1) 보존처리제가 처리된 암석의 흡수율과 공극률, 프아송비는 감소하였고, 탄성과 속도와 일축압축강도, 탄성계수, 인장강도는 증가하는 경향을 보였다.
- (2) 옥외에 노출되어 있는 석조문화재의 풍화 요인은 매우 다양하며, 대부분의 경우 하나 이상의 풍화요인이 복합적으로 작용한다.
- (3) 석조문화재 보존처리제의 내구성 및 효과를 연구하는 데에는 제한적인 연구 기간과 각 풍화요인에 대한 제어가 필요하므로 인공풍화실험의 수행은 필수적이다.
- (4) 동결·융해가 진행됨에 따라 공극률과 흡수율은 증가하였고, 초음파속도, 일축압축강도, 탄성계수, 인장강도는 물리적 특성이 감소하는 경향을 보인다.
- (5) 동결·융해 cycle과 여러 가지 관계식과 상관성을 살펴보면 일축압축강도와 탄성계수보다는 공극률과 흡수율의 상관성이 높게 나타난 점으로 볼 때 파괴시험보다는 비파괴시험을 이용해 풍화 정도를 살펴보는 게 좋을 것으로 판단된다.
- (6) 인공풍화실험 전·후의 물성 변화 중 공극률, 투수계수의 변화를 우선적으로 측정하였고, 이를 통해 인공풍화의 효과를 관찰할 수 있었다. 따라서 향후 인공풍화 과정을 각 요인에 따라 외국과 같이 적어도 수년~수십 년 규모가 되도록 지속적으로 진행하면 우리나라 석조문화재 장기적 보존 대책 수립에 적합한 정보가 구축될 것으로 판단된다.

〈참고문헌〉

1. 김성수, 1999, 인공풍화실험을 이용한 석재의 공학적 내구성 평가. 서울대학교 석사학위 논문, 82.
2. 김성수, 박형동, 1999, 인공풍화 실험을 이용한 석재 물성의 변화 연구, 한국자원공학 회지, 36, p.141~149.
3. 김성환, 유병옥, 조성로, 1997, 암석의 풍화에 따른 강도변화 특성에 관한 연구. '97 사 면안정 학술발표회, 26.
4. 곽진철, 2000, 풍화에 의한 편마암의 물성변화에 대한 연구. 강원대학교 석사학위논문, 91.
5. 일본토질공학회, 1989, 암석암반의 조사와 시험. 671.
6. 백환조, 곽진철, 2000, 풍화에 의한 국내 편마암체의 지질공학적 물성의 변화. 한국자원 공학회지, 37, p.262~271.
7. 이준성, 2002, 동결-융해에 따른 강원도 횡성군 풍암분지 백악기 세일의 지질공학적 특 성 변화. 강원대학교 석사학위논문.
8. 京谷孝史 et al., 2000, 다공질연암(대곡석)의 동결융해에 대한 역학물성열화의 정량적, 日本土木學會論文集(652), p.103~114.
9. Bortz, S. A. et al., 1993, Accelerated Weathering in Building Stone. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 30, p.1559~1562.
10. Bortz, S. A. and Wonneberger, B., 1995, Durability testing of thin stone. Rock Mechanics, Proc. 35th U.S. Sympo, p.373~378.
11. Caselli, A. and Kagi, D. (1995) Methods used to evaluate efficacy of consolidants on an Austrian sandstone, Methods of evaluating products for the conservation of porous building materials in monuments, ICCROM, p.121~130.
12. Everett, D. H., 1961, The thermodynamics of frost damage to porous, Trans, Farady Soc., 57, p.1541~1551.

13. Hale, P.A. and Shakoor, A., 1998, A laboratory investigation of the effects of climatic changes on unconfined compressive strength of selected sandstones. Proc. of the 8th Congress of the International. Association for Engineering Geology and the Environment, 4, p.2859~2867.
14. Irfan & et al., 1978, Engineering Classification and index properties of weathered granite. Bull. Unst. Ass. Eng.Geol., 17, p.79~90.
15. ISRM, 1981, Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities. Rock Characterization Testing and Monitoring, ISRM Suggested Methods, Pergamon Press, 31.
16. Kolsky H., 1953, Stress waves in solids Clarendon Press. Oxford, 211.
17. Lee, S.G. and Freitas, M.H., 1989, A revision of the description and classification of weathered granite and its application to granites in Korea, Quarterly Journal of Engineering Geology, 22, p.31~48.
18. Lukaszewicz, J.W. and Kwiatkowski, D. (1995) Consolidation of Gotland stone in monuments, Methods of evaluating products for the conservation of porous building materials in monuments, ICCROM, p.179~187.
19. Nicholson, D. T. and Nicholson, F. H., 2000, Physical Deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze-thaw weathering. Earth Surface Processes and Landforms, 25, p.1295~1308.
20. Park, H.D., 1996, Assessment of the geotechnical properties of the weathered rocks at historical monuments in Korea. Proc. of ISRM International Symposium: Eurock '96, p.1413~1416.
21. Pearce, J.A. (1983) Role of sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In Hawkesworth, C.J. and Norry, M.J. (EDs), Continental basalts and mantle Xenolith, Shiva, p.230~249.
22. Takagi, S., 1980, The absorption force theory of frost heaving, cold Regions Sci. Tech., 3, p.57~81.
23. Winkler, E. M., 1973, Stone Properites, Durability in Man's Environment., Springer-Verlag, New York.