경주 남산 삼릉계곡 선각육존불의 훼손도 평가와 표면 강화처리제 적용 효과

김재환¹ · 이명성^{1*} · 이재만¹ · 조성남² · 김지영³ · 이찬희³

¹국립문화재연구소 보존과학연구실, ²(주)엔가드 문화재연구소, ³공주대학교 문화재보존과학과

Deterioration Assessment and Consolidation Effect of Ethylsilicate Consolidants for Samneunggyeseongakyukjonbul(Rock-carved Yukjonbul Buddha in Samneung Valley) in Namsan, Gyeongju

Jae Hwan Kim¹, Myeong Seong Lee^{1*}, Jae Man Lee¹, Seung Nam Jo²,
Jiyoung Kim³, and Chan Hee Lee³

¹Conservation Science Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon 305-380, Korea

²Research Institute of Cultural Heritage, Enguard Co. Ltd., Seoul 134-060, Korea

³Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University, Korea

요 약: 이 연구는 경주 남산 삼릉계곡 선각육존불의 재질 및 풍화특성을 고려한 강화제의 처리방안을 도출한 것이다. 선각육존불은 알칼리장석화강암으로 구성되어 있으며 절리를 따라 표면에 박리박락과 입상분해가 진행되어 보존처리가 시급하다. 알칼리장석 화강암을 대상으로 강화처리 실내실험과 현장실험을 실시한 결과 풍화도가 높은 암석은 에칠실리케이트의 함량이 높은 OH 100과 KSE 300에서 강화효과가 큰 것으로 나타났다. 또한 처리 후 동결 및 염풍화에 대한 내구성은 OH 100이 우수하였다. 현장적용 결과에서 KSE 300에 의한 처리가 뚜렷한 물성증가를 보이고, 선각육존불에서 염풍화가 확인되지 않으므로 KSE 300에 의한 강화처리가 가장 우수한 강화효과를 나타내는데 적합한 처리제로 판단된다.

핵심어: 선각육존불, 알칼리장석화강암, 입상분해, 강화처리, 현장적용

Abstract: This study demonstrates the consolidation effect of ethylsilicate consolidants considering material characteristics and weathering degree of Samneunggyeseongakyukjonbul(rock-carved Yukjonbul Buddha in Samneung Valley) in Namsan, Gyeongju. The buddha statue is composed of alkali feldspar granite and contains numerous sets of joint with exfoliation and granular disintegration, therefore the statue is necessary to be treated for surface strength. The laboratory and in-situ tests of consolidation effect showed more increase of ultrasonic velocity that KSE 300, a relatively highly concentrated consolidant, performed more increase of ultrasonic velocity and decrease of porosity than others after treatments in weathered granite. And the consolidated rock with OH 100 was more resistant to salt weathering. For the buddha statues, KSE 300 is more applicable to enhance surface strength because it showed higher consolidation effect for long term than OH 100 and the statues has not been weathered by salts.

Key words: Seongakyukjonbul, alkali-feldspar granite, granular disintegration, consolidation, in-situ application

*Corresponding author

Tel: 042-860-9267

E-mail: mslee75@korea.kr

서 론

경주 남산 삼릉계선각육존불(이하 선각육존불)은 통일신라시대의 대표적인 선각마애불상으로 경상북도 유형문화재 제21호로 지정되어 있다. 이 마애불은 서쪽에 아미타삼존(전면불)을 새긴 선각삼존불입상(Fig. 1a)과 동쪽에 석가삼존(후면불)을 새긴 선각삼존불좌상(Fig. 1b)으로 구성되어 있다. 선각육존불은 마애불의 다양한 조각 방식 중에서 선새김으로만 조각을 했다는 점과 여섯 구의 부처상과 보살상을 함께 배치했다는 것이 주된 특징이다.

선각육존불이 조각되어 있는 암반은 수십 개의 절리에 의해 분리되어 있어 구조적인 불안정이 초래되고 있다. 특히 수직 및 수평절리들이 불규칙한 방향성을 갖고 서로 교차하면서 켜기형 탈락과 박리박락이 발달하고 있다. 또한 암반 표면은 입상분해가 심각하게 진행되어 선각면이 점차 유실되고 있는 상태임에 따라 보존처리가 시급하게 요구되는 상황이다.

지금까지 석조문화재의 자연적 풍화로 인한 훼손을 저감하기 위해 다양한 보존처리 방법이 시행되어 왔다(Lee *et al.* 2006; Lee *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2009; Lee *et al.*,). 최근에는 암석의 표면물성을 강화하기 위해 강화제를 적용한 연구가 활발히 진행되고 있다(Han *et al.*, 2008; Song *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2011).

문화재는 한번 훼손되면 원상태로 복구하는 것이 매우 어렵기 때문에 보존처리제의 실제적인 적용 이전에는 임상테스트를 선행하는 것이 매우 중요하다

(Lee *et al.*, 2011). 특히 강화제는 국내에 도입되어 활용된 지 얼마 되지 않아 그 효과나 사후 일어날 수 있는 부작용에 대한 연구 자료가 상당히 부족한 실정이다.

이 연구에서는 선각육존불의 효과적이고 안전한 보존처리를 위해 재질특성과 손상상태를 분석하여 표면 강화제의 종류와 처리방법에 따른 처리효과를 평가하였다. 이를 위해 선각육존불의 암석 및 광물학적 분석을 실시하고, 풍화훼손도 평가를 실시하였다. 또한 선각육존불과 동일한 암석으로 이루어지고 유사한 풍화상태를 보이는 주변 노두를 탐색하고 시료를 채취하여 강화제를 적용하는 실내실험과 현장실험 수행하였다. 이 결과를 토대로 세계문화유산으로 지정된 경주 남산 석조문화재에 적합한 강화처리 방안을 제안하고자 한다.

연구방법

이 연구에서는 선각육존불의 표면 강화처리 방안을 수립하기 위해 선각육존불의 재질특성과 풍화상태 진단을 수행하고 이를 근거로 선각육존불과 동일한 재질의 남산 화강암을 채취하여 강화처리 실험을 실시하였다. 실험은 강화처리 전후의 물성분석과 인공풍화시험을 실시하고 야외 암반에 현장적용을 통해 표면강화제의 중장기 안정성과 강화효과를 평가하였다.

우선 이 연구를 위해 선각육존불에서 탈락된 암편과 노두 암석시료에 대한 광물학적 및 조직적 특성 분석과 조암광물의 정밀한 동정을 위해 편광현미경 관찰(Axiotech 100HD/Progress 3012, Carl Zeiss)과

Fig. 1. Field occurrence of the Seongakyukjonbul. a; Seongaksamjonbulipsang. b; Seongaksamjonbuljwasang.

Table 1. Properties of consolidants used in the study

Name	Solution Applied	Classification	Main ingredient	Solvent	Concentration (wt%)	Density (g/cm ³)
OH 100	As supplied	Alkoxysilane	TEOS	Free	100	1.0 at 25
KSE 300	As supplied	Alkoxysilane	TEOS	Ethanol	99	1.0 at 20
IT1G	Blended in lab.	Functional Alkoxysilane	TEOS/GPTMS	Water/Ethanol	35	-

X-선 회절분석(M18XAHF22, MAC Science), 전압 대자율(SM30, ZH instruments) 분석을 실시하였다. 또한 재료의 강도 및 정량적인 풍화도를 산출하기 위해 초음파탐사(PUNDIT Plus, CNS FARNELL)를 수행하였다.

실내실험에서는 남산화강암의 처리 전·후와 처리 후 인공풍화에 의한 물성 변화를 알아보기 위하여 코어시험편(직경 54 mm)을 제작하고, 열충격시험(400°C, 600°C)을 실시한 후 공극률과 초음파속도를 기준으로 풍화등급을 세 등급으로 분류하였다. 실험에 사용된 강화제는 사암 및 화강암질 문화재의 표면강화에 광범위하게 이용되는 알콕시실란계 SILRES BS OH 100(Wacker-Chemie GmbH, 이하 OH 100으로 표기), KSE 300(Remmers Baustofftechnik GmbH) 및 IT1G 이다(Table 1).

OH 100과 KSE 300은 시판되고 있는 암석 강화제이며, IT1G는 국내에서 새롭게 개발된 암석강화제로서, TEOS(tetraethoxysilane, 98%, Sigma-Aldrich)와 GPTMS(98%, 3-Glycidoxy propyl-trimethoxy silane, Sigma-Aldrich)을 1:1로 섞은 뒤 에틸알콜과 물에 35%로 희석하고, 실리카 파티클(humed silica, AEROSIL OX 50, Evonik)과 촉매(DBLT)를 첨가하여 교반한 것이다(Kim *et al.*, 2007). 처리방법은 강화제의 최대 처리효과를 파악하고자 함침 방법을 선택하였다. 처리가 완료된 시료에 대해 공극률과 초음파속도를 측정하여 처리 전의 암석과 비교하였다.

세 종류의 강화제는 코어시험편을 이용한 실내실험을 통해 강화효과를 평가한 후 가장 좋은 효과를 보인 것을 현장적용 실험에 사용하였다. 현장적용은 암반의 풍화상태에 따라 처리영역을 구분하여 실시되었고, 선행연구결과를 바탕으로 적용량과 횟수를 결정하여 브러쉬 도포로 실시하였다(Song *et al.*, 2009), 처리 간격은 권장되는 강화제의 양생기간을 참고하여 약 40일로 정하였다. 각 단계별 처리효과는 초음파속도 측정을 통해 평가하였으며 강화 효과의 지속성을 알아보기 위해 3년 동안 물성변화를 평가하였다.

재질특성 및 훼손상태

암석 및 광물학적 특징

선각육존불이 위치한 경주 남산은 알칼리장석 화강암으로 구성되어 있으며 이미 여러 연구자들에 의해 암석 및 광물학적 특징에 대해 연구가 되어 있는 상태이다(Lee *et al.*, 1995; Lee and Hwang, 1999; Jwa *et al.*, 2000). 선각육존불도 중립질의 담홍색 알칼리장석 화강암으로 이루어져 있다. 전반적으로 유백색을 띠며 정동이 발달한 것이 특징이다(Fig. 2a). 편광현미경 관찰결과, 알칼리장석, 석영, 흑운모, 각섬석 및 불투명광물로 구성되어 있으며 반자형의 입상 조직으로 나타난다(Fig. 2b).

석영은 대체로 반자형 내지 타형이며 알칼리장석과 문상조직을 보인다. 알칼리장석은 대부분 퍼사이트이며 일부는 정장석으로 구성된다. 흑운모와 각섬석은 석영과 알칼리장석 사이의 간극을 충전하고 있으며 소량 존재한다. 이 흑운모는 부분적으로 녹니석화되어 있는 부분도 관찰된다. 이 암석을 분말화하여 X-선 회절분석을 실시한 결과에서도 석영, 사장석, 알칼리장석, 각섬석이 검출되었다(Fig. 2c).

선각육존불이 조각되어 있는 암반의 전압대자율은 0.09~4.25($\times 10^{-3}$ SI unit) 사이의 값을 보이며, 주변 암반도 이와 유사한 0.04~3.00($\times 10^{-3}$ SI unit) 사이의 값을 가진다(Fig. 2d). 특히 하나의 암반에서도 이 범위 내에서 측정지점에 따라 변화가 크게 나타났다. 이러한 대자율 특성은 Jwa *et al.*(2000) 및 Lee(2007)에 의해서도 보고된 바 있다.

풍화도 평가

경주 남산 선각육존불은 지질환경을 바탕으로 형성된 자연암반에 조각된 것으로서 전면에 걸쳐 불규칙한 불연속면이 잘 발달되어 있으며, 수직, 수평 및 저경사를 갖는 불규칙한 절리들이 서로 교차하고 있다. 절리대의 이격에는 대부분 토양이 채워져 있으며 암석의 파편이 일부 산재하고 있다. 다양한 방향의

Fig. 2. Lithological and Mineralogical characteristics of the Seongakyukjonbul. (a) rock surface, (b) Thin section under polarizing microscope, (c) X-ray diffraction pattern, (d) Magnetic susceptibility values.

Fig. 3. Deterioration aspects (a) and ultrasonic velocity 2D modeling (b) of the Seongakyukjonbul.

불연속면이 서로 교차하면서 압편 탈락과 박리박락이 발생하였으며, 박리박락 부위를 따라 입상분해 및 변색이 진행되어 있다(Fig. 3a).

선각육존불을 구성하고 있는 암반의 물성을 정량적으로 평가하기 위해 전면에 걸쳐 초음파속도를 측정하였다. 측정결과, 선각삼존불입상은 1320~5079 m/s, 선각삼존불좌상은 963~4897 m/s로 나타났다. 초음파속도를 이용한 풍화등급을 살펴보면 신선한 단계(Fresh)에서 완전 풍화 단계(Completely weathered)에 걸쳐 다양한 범위에 속한다. 전체적으로 선각삼존불 입상보다 선각삼존불좌상이 조각된 암반에서 초음파속도가 더 낮게 측정되었으며, 절리가 집중되어 있는 부위를 따라 저속도대를 보이고 있다(Fig. 3b). 이처럼 저속도대가 분포하고 있는 지점은 취약한 물성을 가지고 있다는 것을 지시한다.

강화제의 성능평가

선각육존불의 표면에는 불연속면이 서로 수직, 수평 및 대각선으로 교차하여 박리박락 등이 발달되어 있으며, 박리박락 부위를 따라 입상분해 등이 진행되어 강화처리가 필요한 상황이다. 따라서 실제 보존처리 이전에 강화제의 처리효과와 안정성 평가를 위해 실내의 임상실험을 실시하였다. 우선 강화제의 처리 전과 후에 암석의 공극률과 초음파 속도를 측정하여 변화를 분석하였으며, 강화 처리된 암석의 동결-융해와 염에 대한 내구성을 평가하기 위해 인공풍화실험을 실시하였다.

선각육존불의 풍화도는 신선한 단계에서 완전 풍화 단계까지 다양하게 나타나기 때문에 실험용 시료는 신선한 암석과 열충격을 가해 인공적으로 풍화시킨 풍화암을 모두 선택하였다. 열충격법은 형태를 크게 변형시키지 않으면서 암석의 물리적 특성을 저하시켜 실제 자연 풍화암과 유사한 물리적 특성의 부여할 수 있다(Kim *et al.*, 2011). 또한 온도를 달리하는 방법으로 열처리 전의 신선한 암석(미처리, 이하 SS)과

풍화암(400°C에서 2시간 열처리, 이하 WS) 및 심한 풍화암(600°C에서 2시간 열처리, 이하 HWS) 등 세 등급의 시료를 제작하였으며, 각 등급의 물성은 Table 2와 같다.

강화처리 전·후 물성변화

강화제의 처리 전·후 중량변화를 살펴보면 HWS에서 처리 후 중량 증가가 가장 커 강화제의 침투량이 높은 것을 알 수 있으며, 강화제별로 OH 100은 4.64 g, KSE 300은 4.24 g, IT1G는 각각 2.11 g의 침투량을 보인다(Fig. 4). 강화처리 후 중량변화가 없

Fig. 4. Change rate of physical properties by consolidation.

Table 2. Properties of the stone samples used in the study

Weathering grade*	Weight (g)	Density (g/cm ³)	Open porosity (%)	Absorption rate (%)	Ultrasonic velocity (m/s)
SS	611.97	2.59	2.04	0.79	3626.30
WS	610.25	2.55	2.65	1.04	2312.47
HWS	605.56	2.49	4.63	1.86	955.60

*: SS; Sound stone, WS; Weathered stone, HWS; Highly weathered stone

을 때까지 안정화기간을 거친 후 공극률과 초음파속도를 측정하여 처리 전과 비교하였다. 풍화등급 및 강화제에 상관없이 공극률은 감소하고, 초음파속도는 증가하였다. 이는 암석 내부에 침투한 강화제가 입자 사이의 공극을 충전함에 따라 물성을 향상시킨 것으로 판단된다.

공극률의 감소율을 살펴보면, SS에서는 KSE 300, WS와 HWS에서는 OH 100이 높은 공극률의 감소를 보인다(Fig. 4). 초음파속도는 SS에서는 큰 변화가 없지만 WS와 HWS에서 OH 100과 KSE 300이 높은 증가율을 보이고 있다(Fig. 4). 초음파속도는 강화제의 침투량이 증가함에 따라 증가하는 경향이 있으며, 이는 침투량이 암석의 물성향상과 강화효과에 중요한 역할을 한다는 것을 지시하는 것이다.

특히 OH 100과 KSE 300은 IT1G보다 암석 내부에 더 많이 침투하여 더욱 높은 강화효과를 나타낼 것으로 판단된다. 또한 에칠실리케이트의 함량이 침투량이 영향을 미친다는 점을 미루어볼 때 충분한 강화효과를 내기 위해서는 강화제 내 에칠실리케이트의 함량을 고려하는 것이 중요함을 알 수 있다.

인공풍화실험

이 연구에서는 강화제에 대하여 중장기적 성능을 평가하기 위해 강화제에 함침처리한 시료를 대상으로 동결-융해 및 염풍화 실험을 실시하였다. 동결-융해 실험은 시료가 충분히 포화된 상태에서 -20℃에서 2시간 동결하고 +20℃에서 2시간 융해하는 것을 1cycle로 설정하여 총 500 cycle까지 진행하였으며,

100 cycle마다 공극률과 초음파속도를 측정하였다.

동결-융해 실험이 진행되는 동안 보존처리제 및 풍화등급에 따른 공극률과 초음파 속도의 변화를 보면, 전체적으로 공극률은 증가하고 초음파속도는 감소하는 경향을 보였다(Fig. 5). 공극률의 경우 OH 100, KSE 300, IT1G 모두 SS, WS에 비해 HWS에서 공극률의 증가가 뚜렷하게 나타나며, 300 cycle 이후에 공극률의 증가가 크게 나타난다.

초음파속도의 경우 OH 100, KSE 300, IT1G 모두 100 cycle에서 감소하였으며 이후 500 cycle까지 일정하게 유지되고 있는 경향을 보인다. 이는 동결-융해 작용 초기 단계에서 암석 내부의 강화제가 물리적으로 파괴되어 공극률을 증가시키고 초음파 전달속도를 감소시키는 것으로 해석할 수 있다. 이 결과는 깨짐성이 강한 에칠실리케이트계 강화제의 특성에 의한 것이다.

염풍화에 대한 강화제의 내구특성을 살펴보기 위해 염용액 침적실험을 실시하였다. 실험은 황산나트륨(Na_2SO_4) 수용액에 시료를 4시간 침적한 뒤 20시간 상온 건조시켜 염결정을 성장시키는 방법으로 실시하였다. 침적 후 건조되는 과정까지 1cycle로 하여 총 50cycle까지 반복적으로 실시하였다. 이 때 사용한 염은 순도 99% 이상의 황산나트륨 분말이며, 이를 증류수에 용해시켜 염 수용액을 제조하였다. 염풍화 실험에서는 5cycle 간격으로 건조 질량을 측정하여 실험 전 시편에 대한 중량 변화를 살펴보았다(Fig. 6).

실험 결과, 염풍화 실험 횟수가 증가할수록 시편의 중량이 계속적으로 감소하는 경향을 보이며, 풍화도

Fig. 5. Change of porosity(%) and ultrasonic velocity(m/s) after freezing-thawing test for consolidated rock.

Fig. 6. Weight change by salt weathering test of consolidated rock.

가 높을수록 중량 감소율이 점차 크게 나타남을 알 수 있다. 강화제별로 중량 변화율을 살펴보면, SS에서는 OH 100, KSE 300, IT1G 모두 중량이 감소하였으나, 변화율이 0.2% 이내로 미약하게 나타난다. WS에서는 OH 100이 KSE 300과 IT1G에 비해 중량 변화율이 작게 나타난다

특히 IT1G와 KSE 300으로 처리한 HWS는 35 cycle 후 암석이 완전히 파괴되어 형태가 크게 변형된 반면 OH 100은 35cycle 후 중량이 서서히 감소하다가 45cycle 후 암석 파괴가 발생하였다. 따라서 암석의 풍화도가 높을수록 염 풍화에 대한 내구성이 급격히 떨어지며, 강화제 종류별로는 OH 100 > KSE 300 > IT1G 순으로 내구성이 뛰어난 것으로 판단된다.

보존처리제의 현장적용

이 연구에서는 경주 남산 선각육존불 주변 암반을 대상으로 실내실험 결과에서 강화효과 및 인공풍화(동결-융해, 염 풍화)에 대한 내구성이 좋은 OH 100과 KSE 300을 이용하여 현장적용 실험을 실시하였다. 현장적용 사이트는 선각육존불 인근의 주변 암반으로 선정하였다(Fig. 7a). 처리 영역 설정은 암반의 풍화도에 따라 두 구역으로 구분하고, 풍화도가 낮은 구역(1, 2구역)은 직접 강화제를 처리하고, 높은 구역(3, 4구역)은 균열이나 큰 공동을 충전 처리한 후 강화제를 도포하였다.

강화처리는 양모봇을 이용하여 총 3차(1차 1000 ml, 2차 500 ml, 3차 250 ml)에 걸쳐 실시하였으며(Fig. 7b), 충전처리는 강화처리 전 암반 표면에 발생되어 있는 큰 공동에 대해 수지 몰탈을 주입하여 적용하였다(Song *et al.*, 2009). 처리 전의 암반의 풍화상태와 처리 후의 물성변화는 초음파속도를 이용하여 평가하였다(Fig. 7c). 또한 3차 강화처리가 완료된 후 강화효과의 지속성을 알아보기 위해 3년 동안 물성변화를 모니터링 하였다.

충전 및 강화처리 결과, 모든 영역에서 초음파속도는 계속적으로 증가하였다. 초음파속도의 변화 경향을 살펴보면, 강화처리 기간에는 계속적으로 증가하나 강화 처리가 끝난 이후에는 서서히 감소하는 경향을 보인다(Fig. 7d). 이는 암석 내부의 공극이 강화제에 의해 채워졌다가 시간이 지남에 따라 원래의 공극을 일부 회복하였음을 의미한다.

강화효과를 알아보기 위해 충전 및 강화처리에 의한 초음파속도의 증가율을 산출하였다. 1구역은 26.6%, 2구역은 70.4%, 3구역은 60.9%, 4구역은 88.8% 증가하였다. 전체적으로 KSE 300이 OH 100보다 높은 증가율을 보이고 있으며, 충전처리를 병행할 경우 더 높은 증가율을 기대할 수 있다(Fig. 7e).

처리 이후 모니터링 기간 동안 1구역은 23.2%, 2구역은 29.4%, 3구역은 38.5%, 4구역은 40.2% 감소하여 풍화도가 낮은 암석보다 높은 암석이 강화처리에 의한 물성변화가 큰 것으로 나타났다. 또한 모니터링 기간 동안 초음파속도 감소는 OH 100가 낮았으나, 처리 전과 비교하였을 때 KSE 300이 OH 100보다 강화효과가 큰 것으로 판단된다.

Fig. 7. In-situ application of the consolidants and ultrasonic velocity change during and after in-situ consolidation of alkali-feldspar granite. (a) In-situ application site, (b) Consolidation treatment by brushing, (c) Ultrasonic velocity measuring, (d) Monitoring Results by application areas, (e) Increasing and Decreasing rate of Ultrasonic velocity.

고찰 및 결론

경주 남산 삼릉계곡 선각육존불은 크고 작은 다양한 절리들이 교차하면서 박리박락이 발달하고 있다. 또한 절리계를 따라 스며든 수분에 의해 물리적 및 화학적 풍화의 복합작용으로 구성암석이 약화되고 있어 이에 적합한 강화 및 충전 처리가 요구된다. 따라서 이 연구에서는 선각육존불에 대하여 재질특성을 규명하고 풍화훼손상태를 정량적으로 평가하였으며 이를 근거로 적용 가능한 강화제의 성능 및 안정성을 검토하고 현장적용 실험을 실시하였다.

경주 남산일대의 알칼리장석 화강암을 대상으로 실내에서 강화제 처리 전과 후의 중량, 공극률, 초음파 속도의 변화에서 강화처리에 따라 중량과 초음파 속도는 증가하였으며, 공극률은 감소하였다. 특히 풍화등급이 높을수록 중량변화가 크게 나타나며, 풍화된 암석에서 에칠실리케이트의 함량이 낮은 ITIG보다 함량이 높은 OH 100과 KSE 300에서 초음파 속도 증가가 더욱 컸다. 이는 에칠실리케이트의 함량과 암석 내부로 침투하는 강화제의 함량이 강화 효과에 매우 중요한 인자로 작용한다는 것을 보여주는 결과이다.

강화제 처리 후 암석의 내구성을 평가하기 위해 인공풍화실험(동결-융해, 염 풍화)을 실시하였다. 동결-융해 실험 결과, 에칠실리케이트 강화제로 처리된 암석은 풍화등급이 높을수록 겨울철 동결작용에 의해 물성이 급격히 떨어질 수 있음을 알 수 있다. 그러나 에칠실리케이트 함량과 동결 풍화작용은 뚜렷한 상관관계를 갖지 않는 것으로 판단된다. 염 풍화 실험 결과에서 강화처리 후 입상분해 작용은 암석의 풍화등급이 높을수록 현저히 나타나게 된다. 보존처리가 필요한 대부분의 석조문화재가 중간 풍화암 이상의 풍화등급을 가진 점을 고려하면 에칠실리케이트 함량이 높은 OH 100과 KSE 300이 보다 효과적일 것으로 판단된다.

강화제의 현장적용 실험 결과, 초음파속도는 강화제 처리 횟수가 늘어날수록 지속적으로 증가한 반면 3차 처리가 끝난 이후에는 서서히 감소하는 경향을 보였다. 전체적으로 KSE 300이 OH 100보다 높은 증가율을 보이고 있으며, 충전처리를 병행할 경우 더 높은 증가율을 기대할 수 있다. 처리 이후 모니터링 기간 동안 OH 100이 낮은 초음파 속도 감소율을 보였으나, 처리 전 초기값과 대비하였을 때 KSE 300으로 처리했을 때 강화처리 효과가 가장 우수한 것

로 해석된다.

선각육존불의 입상분해와 박리박락으로 인한 선각부 유실을 줄이고, 물성을 보강하기 위해서는 OH 100이나 KSE 300을 이용하여 표면 강화처리를 실시하는 것이 효과적일 것으로 판단된다. 이 결과는 경주 남산에 산재하고 있는 알칼리장석 화강암제 석조 문화재에 광범위하게 적용될 수 있으며, 각 문화재의 풍화도와 동결 및 염풍화 환경을 고려하여 적합한 강화제를 선택할 수 있을 것이다.

사 사

이 연구는 2012년 문화재청 및 국립문화재연구소의 지원을 받아 ‘문화유산융복합연구(R&D): 석조문화재 훼손진단 및 모니터링 기술 연구’사업의 일환으로 이루어졌다.

참고문헌

- Han, M.S., Lee, J.J., Jun, B.K., Song, C.Y., and Kim, S.D., 2008, Quantitative Evaluation for Effectiveness of Consolidation Treatment by using the Ethysilicate for the Namsan Granite in Gyeongju. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 21, 183-192.
- Jwa, Y.J., Lee, S.W., Kim, J.S., and Sohn, D.W., 2000, Source area of stones used for the stone buildings of Bulguksa Temple and Seokguram Grotto. *Journal of the Geological Society of Korea*, 36, 335-340.
- Kim, E.K., Park, S.Y., Jo, H.D., Won, J.O., and Do, J.Y., 2007, Development of Alkoxysilane Mixed Solution as Stone Preservation and Consolidation Materials. *Journal of Conservation Science*, 21, 21-32.
- Kim, J.H., Han, M.S., Song, C.Y., Lee, J.M., Kim, M.J., and Lee, M.S., 2009, An Estimation on Field Application of Consolidants According to Rock Quality. *Journal of Conservation Science*, 30, 80-91.
- Kim, J.H., Lee, M.S., Lee, M.H., Lee, J.M., and Park, S.M., 2011, A Study on Effects of Temperature for Physical Properties Change of rocks. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 20, 141-150.
- Kim, S.D., Lee, M.S., Han, B.I., Lee, J.J., and Song, C.Y., 2009, Deterioration Diagnosis and Conservation Treatment of the Jincheon Sagongnimaeyeoraeapsang(Stone Relief of Standing Buddha in Sagok-ri), Korea. *Journal of Conservation Science*, 25, 323-334.
- Lee, J.D. and Hwang, B.H., 1999, Petrology of the granitoids in the Namsan-Tohamsan area around Gyeongju, Korea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 20, 80-95.
- Lee, M.S., 2007, Assessment of Conservation Scientific Deterioration and Material Characteristics for Rock Properties of the stone Pagodas in the Bulguksa Temple and Gameunsaji Temple Site, Gyeongju, Korea. Graduate School, Kongju National University, 288p.
- Lee, J.W., Ham, C.H., Kim, S.D., and Lee, C.H., 2009, Removal Methods of paint Pollutants on the Stone Cultural Heritage using Poultices. *Journal of Conservation Science*, 25, 421-430.
- Lee, M.S., Kim, J.H., Lee, J.M., and Lee, J.J., 2011, Consolidation Efficiency of In-situ Application Considering Weathering Grade and Rock Properties for Stone Cultural Heritage in YEONGYANG AREA, Gyeongsangbuk-do. *Journal of Conservation Science*, 27, 277-290.
- Lee, S.M., Lee, M.S., Jo, Y.H., Lee, C.H., Jeon, S.W., Kim, J.O., and Kim, S.D., 2007, Deterioration Diagnosis and Conservation Treatment of the Three-storied Stone Pagoda in the Cheongryongsa Temple, Anseong, Korea. *Journal of the Economic and Environmental Geology Society of Korea*, 40, 661-673.
- Lee, T.J., Kim, S.D., and Gal, S.Y., 2010, Selection and Conservation for the Filler of Three-storied Stone Pagoda at the West of Gameunsaji Site in the Gyeongju. *Journal of Conservation Science*, 26, 361-370.
- Lee, C.H., Lee, M.S., Kim, Y.T., and Kim, J., 2006, Deterioration assessment and conservation of heavily degraded Korean stone Buddha from the ninth century. *Journal of Conservation Science*, 51, 305-316.
- Lee, M.J., Lee, J.I., and Lee, M.S., 1995, Mineralogy and major element geochemistry of A-type alkali granite in the Kyeongju Area, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 31, 583-607.
- Song, C.Y., Jeon, B.K., Han, M.S., Lee, J.J., and Kim, S.D., 2009, Field Experiments of Consolidant and Filler for stone Cultural Heritage: Primary Verification Using Ultrasonic Velocity. *Journal of Conservation Science*, 25, 87-100.

2012년 11월 5일 접수
2012년 11월 9일 심사개시
2012년 12월 11일 채택