

석조문화재 적용을 위한 강화제 및 충전제 현장실험: 초음파 속도를 이용한 일차검증

송차영* | 전병규** | 한민수* | 이정준* | 김사덕*¹

*국립문화재연구소 보존과학연구실

**공주대학교 문화재보존과학과

Field Experiments of Consolidant and Filler for Stone Cultural Heritage: Primary Verification Using Ultrasonic Velocity

Chi Young Song* | Byung Kyu Jun** | Min Su Han* | Jang Jon Lee* | Sa Dug Kim*¹

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

**Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University, Gongju, 314-701, Korea

¹Corresponding Author : kimsadug@ocp.go.kr, +82-42-860-9251

초 록 알칼리화강암으로 구성된 경주 남산 삼릉계곡 선각육존불 주변 암반을 대상으로 보존처리제 성능을 평가하였다. 이 연구에 적용된 보존처리제는 에틸실리케이트 계열의 암석 강화용 처리제와 에폭시 계열의 수지이다. 처리 과정은 에폭시 계열의 수지를 박리면에 주입 후 암석 강화용 처리제를 총 3차례 도포 하였으며, 처리 전과 후의 물성 변화를 비교하기 위해 초음파 속도를 측정하였다. 초음파속도 측정 결과, 박리면 주변의 저속도대는 강화제 및 충전제 처리 후 평균 27.8%의 속도 증가가 나타났다. 이 결과는 석조문화재에 대한 보존처리제의 강화 효과를 입증하는 것으로서, 최소 3회 정도를 처리하는 것이 효과를 극대화 시키는 것으로 나타났다.

중심어 : 알칼리화강암, 보존처리, 초음파 속도, 강화효과

ABSTRACT We carried out the effect verification of conservation treatment focusing on basement rock of alkali granite at the Yukjonbul (two-pairs of Buddha Triads) carved on rock cliff of Samneung valley in Namsan mountain of Gyeongju. The conservation treatments were used to ethylsilicate-type rock consolidant and epoxy-type resin. It is treatment method that the epoxy-type resin have been applied one time into the exfoliation area, after rock consolidation treatment have been worked for three times. As the result of measuring ultrasonic velocity, P-wave velocity of the exfoliation area was relatively increased after applied the conservation treatments. The ultrasonic velocity of all area was increased as 27.8%. This result has been proved with consolidation effects by consolidant and filler for stone cultural heritages. The treatment method should be worked about three time to consolidate sufficiently for rocks.

Key Word : Alkali granite, Conservation treatment, Ultrasonic velocity, Consolidation effect

1. 서론

석탑이나 미애불 등의 석조문화재에 대한 연구는 고고학적, 미술사학적 및 암석학적으로 많이 진행되어 왔다. 석조문화재의 암석학적 연구는 주로 지질 및 광물에 대한 특성과 풍화 또는 훼손과 관련한 것이며^{2,3,4}, 나아가 대체석 확보를 위한 산지 추정 연구도 활발하다^{5,6,7,8}. 이는 보존처리를 하기 전에 반드시 선행되어야만 하는 연구로 많은 전문가들에 의해 다루어지고 있다. 이를 기초로 석조문화재의 풍화에 대한 정량적인 평가기술과 보존처리 방안 등에 대한 기술이 개발되어야 할 단계이다. 특히 유럽의 석조문화재에 대한 보존방법이나 보존처리제에 대한 연구는 국내 석조문화재의 적용에도 시사하는 바가 아주 크다^{9,10}.

현재 진행되고 있는 연구의 대부분은 보존처리 방법과 재료에 대하여 서로 개별적으로 진행되고 있는 경우가 많아 실제 적용에 있어 많은 어려움이 있다. 보존처리 재료의 분석자료는 보통 독자적으로 수행한 연구 결과를 근거로 사용하므로, 실제 문화재 재질과의 효과적인 검증법에 대한 연구는 전무한 상태이다. 따라서 석조문화재 구성부재의 특성을 고려한 보존처리제 재료의 선정과 이들에 대한 처리 방법을 통한 성능을 검증할 수 있는 기법에 대하여 체계적이고 장기적인 연구가 필요하다. 또한 정확한 조사와 과학적 데이터를 제공하는 현장 적용 연구가 지속된다면 실제 문화재를 처리하는데 중요한 역할을 할 것이다.

따라서 2007년도 국립문화재연구소 연구개발 사업인 '석조문화재 풍화훼손지도 및 보존처리제 표준화 구축' 사업에서는 실질적인 현장적용을 목표로 현재 가장 많이 사용되고 있는 석조문화재 보존처리용 강화제와 충전제를 대상으로 보존처리 효과를 검증하고자 하였다. 이 연구의 대상 문화재는 세계문화유산으로 지정될 만큼 석조문화재를 많이 보유한 경주 남산 기운데, 삼릉계곡 선각육존불(경상북도유형문화재 제21호)을 대상으로 하였고, 실험은 주변의 암반에 적용하였다¹. 이와 같은 현장적용 실험과 평가를 통하여 보존처리제의 성능을 검증하고 효과적인 처리 방안을 모색하고자 한다.

2. 연구지역 및 실험방법

2.1. 연구지역

이 연구를 위해 문화재를 대상으로 한 실험이 불가하여 경주 남산 삼릉계곡 선각육존불 주변의 암반을 선정하였다(Figure 1A). 삼릉계곡 선각육존불과 주변암반의 구성 암석은 알칼리화강암으로서 경주 남산 일대를 구성하는 기반암과 동일 종류의 암석이다. 경주 남산에는 선각육존불 뿐만 아니라 많은 석조문화재가 존재하며 세계문화유산으로 지정될 만큼 보존 가치가 매우 높다.

연구대상으로 선정한 지역은 삼릉계곡 선각육존불 위쪽이며, 등산로를 따라 약 10m 정도 떨어진 두 지역을 Site A와 B로 설정하였다. Site A는 지대가 평탄하고 넓어 작업에 용이한 장점이 있고, 암반 표면에 풍화가 많이 진행되어 공동이 많으며, 박리박락과 수직방향의 층상박리 등이 나타난다(Figure 1B). Site B는 절리와 큰 박락층을 가지고 있고, 삼릉계곡 선각육존불과 동일한 풍화양상을 지니고 있어 연구지역으로 적합할 것으로 판단하였다(Figure 1C).

또한 연구대상 지역의 암반이 삼릉계곡 선각육존불과 동일 암석임을 규명하기 위하여 각각 일부 시료를 편광현미경(Leitz, Orthoplan)과 X-선 회절분석기(Rigaku D/Max-IIb, CuK α , 40kV, 100mA)를 이용하여 광물조성을 분석하였다. 이 결과, 주요 구성광물은 알칼리 장석과 석영, 흑운모, 각섬석, 사장석 등으로 확인되어 삼릉계곡 선각육존불 암석과 동일한 알칼리화강암으로 판단하였다(Figure 1D, 1E). X-선 회절분석 결과에서도 석영과 사장석, 정장석 등이 검출되었다(Figure 1F).

2.2. 실험방법

2.2.1. 보존처리제 선정

석조문화재 강화용 보존처리제는 일반적으로 실리콘계 수지와 이크릴계 수지가 사용되어 왔다. 그러나 이크릴계 수지는 탄성이 좋아 깨짐 현상은 발생하지 않지만, 부산물을 형성한다는 단점이 있어 사용 정도가 줄고 있다. 실리콘계 수지는 규소와 산소의 결합으로 이루어져 화강암질 암석과 유사하므로 해당 암석의 적용에 있어 부작용이 적은 것으로 알려져 있다. 이는 Ca을 주성분으로 하는 대리암이나 석회암, 방해석 같은 암석 및 광물에는 사용 효과를 극대화시키지 못한다는 단점을 가지고 있으나, 높은 침

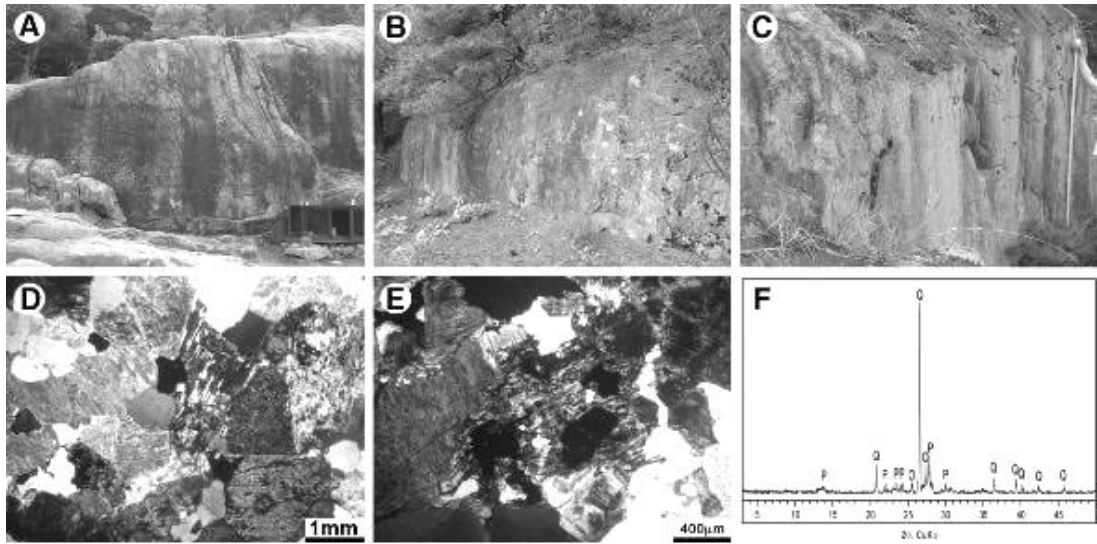


Figure 1. (A) Yükjörbul carved on Rock Surface in Samreung valley. (B) Survey site A. (C) Survey site B. (D) Graphic texture composed of quartz and alkali feldspars, biotite and which feldspars are highly clay mineralization. (E) Alkali feldspars charged into clay minerals and highly chloritized biotite. (F) X-ray diffraction patterns showing host rock(Q: Quartz, P: Plagioclase, O: Orthoclase).

투성과 가역성, 모세수분이 생기지 않을 뿐 아니라 열이나 산화에 안정한 성질 등 많은 장점을 지니고 있다.

이 수지는 가수분해 및 축합반응으로 상온에서 공기 중 또는 석재 중에 있는 수분과 반응하여 무기 고분자인 폴리 실록산(polysiloxane) 유도체를 생성시키는 안정된 화합물이다. 생성된 실리콘 유도체는 열적 및 화학적으로 매우 안정한 물질로서 발수효과, 표면경화, 열에 대한 저항력 증가 및 기계적 강도를 증가시킨다⁹. 현장 적용에 사용된 강화제는 현재 석조문화재 보존처리에 가장 많이 사용되고 있는 Wacker OH100과 Remmers KSE300을 선정하였다¹. 이 실험에 적용한 보존처리제의 특성을 간단히 정리하면 Table 1 과 같다.

석조물의 균열부분 충전 및 파손부위의 접착 보강에는 일반적으로 합성수지 사용이 주를 이룬다. 경천사십층석

탑의 보수공사 과정에서 합성수지(에폭시 수지, 아크릴 수지, 실리콘 수지, 비닐 수지 등에 대한 각종 물성시험을 거쳐 접착강도, 수축, 팽창 등 안정성을 확인한 바 있다. 이 결과, CIBA의 아랄다이트 AW106 제품이 접착력이 우수하며, 내후성 실험과 압축 전단강도에서도 우수한 결과를 나타낸 바 있다. 그러나 2~3년 경과 후 공기에 노출된 아랄다이트는 황변현상이 발생함에 따라 2002년부터 문제점을 보완한 에폭시 수지 L-30이 사용되었다^{12,13}.

L-30은 지방족 사슬에서 나오는 유연성과 방향족 구조의 견고함이 잘 조화되어 있고, 사용되는 경화제 구조에 따라 많은 물성의 변화를 줄 수 있다. 내후성이 아랄다이트 접착제보다 떨어지며, 비가역성이라는 단점이 있지만 접착성, 내약품성, 내열성, 내마모성 및 기계적 강도가 좋고, 저장 안정성이 좋다는 장점이 있어 석조문화재 보존처

Table 1. Physical properties of conservation materials.

Property	Wacker OH100	Remmers KSE300	Property	L-30(Epoxy resin)	
				Resin(100)	Hardner(50)
Content of Ethylsilicate(%)	100	99~100	Hardening time	Physical cure 24hrs	Chemical cure 7days
Density(g/cm ³) at 20°C	0.997	1.0	Gravity	1.2	0.97
Viscosity(mpas)	1.6 at 25°C	1.2 at 20°C	Viscosity(mpas)	300~400 at 20°C	230~300 at 20°C
Color	Clear, slightly yellow	Clear, slightly yellow	Color	Clear	Clear

리에 많이 사용되고 있다^{4,15}. 따라서 이 연구 사이트의 균열 및 피손부위 충전에는 이랄다이트 AW106(Hardner 953)과 L-30을 적용하였으며, 탈크와 규사, 규회석 등의 백색분말로 점성을 조절하여 작업에 용이토록 하였다.

에폭시 수지에 첨가되는 재료는 일반적으로 암석과의 물성 차이를 보완하거나, 균열방지, 질감 표현, 작업성 향상 등 물성 개선을 위해 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 대상의 풍화상태나 작업 상황에 맞는 점도 조절 등 첨가제의 배합량이 변화할 수 있으므로 이번 현장 적용에서는 에폭시 수지에만 초점을 맞추어 변화를 판단하였다.

2.2.2. 영역설정

주변 정리와 세척을 실시한 후 영역 설정을 위해 암반에 대한 도면을 작성하였다. 선행 조사된 비파괴 진단을 바탕으로 가로, 세로 각각 50×50cm의 영역을 한 구역으로 설정하였고, Site A의 4곳, Site B의 2곳에 충전 및 강화 처리를 실시하였다(Table 2). Figure 2A, 2B는 Site A와 B의 영역 기준을 설정한 것이며, Figure 2C, 2D는 CAD를 이용한 2D 그래픽 도면이다.

Site A에서는 균열, 박리박락, 탈락 등 복합적인 풍화 현상이 보이며, Site B는 선각육준불의 암상과 절리양상

Table 2. Selected conservation materials for this study.

	Site A						Site B				
	1	2	3	4	5	6	1	2	3		
Wacker CH100	●		None	None	●		None	●			
Remmers KSE300		●						●			●
Arakite AW106								●			
L-30						●					

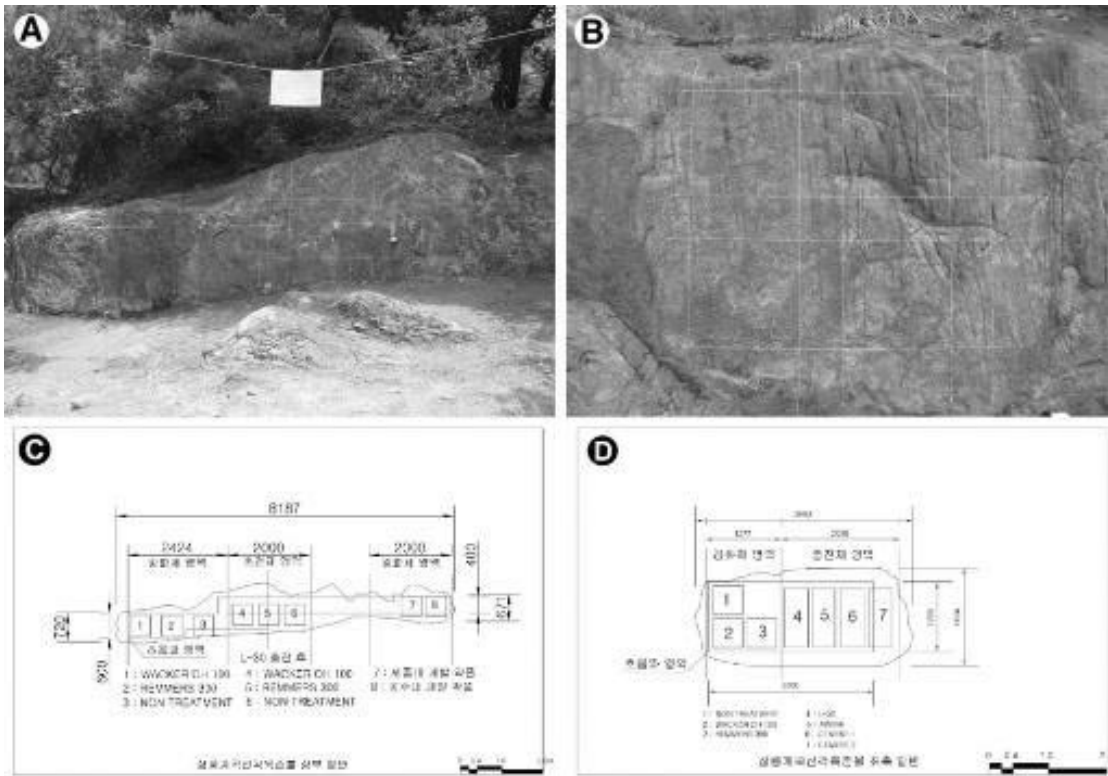


Figure 2. Photographs and maps of the survey site A and B.

이 비슷하다. Site A는 전면방향이 N10W를 하고 있으나, 주위 수목으로 인해 일사량이 많지 않은데 반해, Site B는 선각육존불과 같이 N14W 방향을 하고 있어 직사광선의 영향으로 일사량이 많다. 같은 시각 표면온도를 측정 한 결과, Site B와 선각육존불은 Site A에 비해 표면온도가 약 3℃정도 높게 나타나는 것을 확인하였다.

2.2.3. 보존처리 방법

현장 적용은 기초조사, 처리, 평가로 구분하여 진행하였다. 기초조사 단계에서는 암반의 풍화 상태를 진단하고, 강화와 충전제 실험 영역을 설정하였다. 이후 주변 정리를 거쳐 연구대상 영역을 증류수로 세척하였다. 처리 단계는 연구 영역을 설정한 후 박리박락이 심하게 진행된 곳은 충전 작업을 선행하고, 모든 영역에 대해 강화처리를 실시하였다. 각 단계별 평가는 초음파 전달속도를 측정하여 해석하였다.

표면 강화용 보존처리제의 침투효과를 높이기 위해서는 표면이 건조하고, 흡수성이 뛰어난 상태여야 한다. 또한 처리 시 조건은 온도 10~20℃에서 습도 40%로 맞추고, 처리가 완성되면 2~3일 동안 강수로부터 보호해야 한다. 또한 보존처리제가 침투되기도 전에 증발할 우려가 있으므로 천막을 이용해 직사광선을 피해야 한다. 그러나 대부분의 석조문화재는 옥외에 위치하므로 이와 같은 조건을 충족시키기 어려우므로 최대한의 이상적인 조건을 맞추는 것이 필요하다.

도포량은 강화제의 제품 설명에서 각각 약간의 차이를 보이고 있다. Wacker OH100은 1㎡당 0.5~15ℓ의 권장량을 가지며, 6cm의 풍화 깊이에서 사용되는 예시에서는 1㎡당 5ℓ 처리 후, 3.5ℓ를 사용한다고 되어 있다. Remmers KSE300은 1㎡당 0.5~9ℓ의 권장량을 가진다. 두 제품 모두 한 번의 처리 후, 암석 상태에 따라 그 이상의 처리를 하며, 암석 표면에 더 이상 침투 하지 않을 때까지 도포 하라고 명시되어 있다. 따라서 본 실험에 사용된 도포량은 풍화되어 박락된 면의 깊이로 산정하였으며, 동일한 조건으로 실험을 진행하기 위하여 두 제품의 도포량은 같게 하였다. 박락된 면의 깊이는 0.1mm~5cm의 분포를 보이고 있어 Wacker OH100의 예시와 비슷한 풍화 깊이를 보이고 있다. 6cm의 풍화 깊이에서 사용되는 1㎡당 5ℓ를 실험 지역에 맞는 면적 비로 계산하면 0.5㎡당 1.25ℓ가 된다. 그러나 1ℓ의 도포량 만으로 더 이상 흡

수되지 않고 흘러내릴 정도가 되어 모든 영역을 1ℓ씩 도포하였다.

암석의 풍화상태가 한 번의 강화제 사용으로는 충분하지 않다 판단되어 그 이상의 처리를 하였으며, 2차는 500ml, 3차는 250ml를 도포하였을 때, 충분히 흡수되었다. 3차 처리를 한 후, 4차 처리를 고려하였으나, 3차 처리 과정 중 흡수되는 양보다 흘러내리는 양이 더 많아 더 이상의 처리는 하지 않기로 하였다.

도포 방법은 현장에서 일반적으로 적용되는 브러쉬 도포법으로 하였고, 처리 간격은 강화제의 양생 기간과 연구 결과를 참고하여 27일로 정하였다. 표준조건(20℃, 50% RH)에서 에틸실리케이트가 실리카 겔 상태로 변환하는 기간은 약 2주로 알려져 있으나, 실외에 위치한 문화재에는 적용하기 어렵기 때문에 동일 암석 및 조건을 갖춘 실험적 연구가 지속되어야 한다.

Site A5, A6 영역의 충전 작업은 암반 표면에 발생된 공동에 수지 몰탈을 주입하는 작업으로 육안으로 판단할 수 없는 내부 공동과 박리면을 알코올로 확인하고, 내부 공동 면적을 예상하였다. 처리 시 충전물의 흐름을 방지하기 위해 박리면 주변을 에폭시로 메우는 작업을 병행하였다. Site A5 영역은 L-30(주제:경화제=2:1, 90g)과 첨가제(규회석:규사=120:100, 90g)를 배합한 혼합 수지, Site A6 영역은 Araldite AW106(주제:경화제, Araldite HY953=100:80, 90g)과 첨가제(규회석:규사=120:100, 90g)를 배합한 혼합 수지를 각각 사용하여, 주사기로 주입하였다. 충전작업 후, 두 영역도 각각 3회 강화 처리하였다.

3. 결과 및 해석

3.1. 암반의 풍화도

매질을 통과하는 초음파의 속도는 매질의 입자 조직과 구조에 의해 영향을 받으며, 이 원리는 재료역학분야의 비파괴시험에 널리 사용되고 있다⁶. 암석물리학 분야에도 초음파의 속도 변화를 이용하여 암석 내에 존재하는 균열의 분포 등, 암석의 다른 공학적 성질을 찾는 데 널리 이용되고 있다^{7,18}.

최근 국내에서도 초음파를 이용한 석조문화재의 재질에 관한 연구가 활발하다^{9,20,21}. 석조문화재를 구성하는 암석

의 풍화상태는 서로 다르며, 풍화상태에 따라 초음파 속도 역시 차이를 보이게 된다. 초음파 속도는 암석의 탄성계수 및 밀도와 밀접한 관계를 가지고 있어 암석의 물성 및 풍화 정도를 산출해 낼 수 있으며, 석조문화재의 안정성을 평가하는데 이용된다. 또한 구성 암석의 초음파 속도를 종합하여 석조문화재의 풍화 등급을 산정 할 수 있다²².

이 연구에 사용된 초음파 장비는 암석 및 콘크리트 분야에 많이 쓰이는 영국 CNS Faml사의 PUNDIT PLUS로 출력전압 1200V, 초당 10회의 초음파 펄스이고, 탐촉자는 54KHz를 사용하였으며, 간접전달방식을 이용하였다. 측정 간격은 간접전달방식의 경우 탐사거리에 따라 음속이 측정값에 차이가 발생하기 때문에 정확한 탐사 결과를 얻기 위해서는 탐촉자 간 측정 거리는 종파를 구분해 낼 수 있는 15cm 이상으로 해야 한다²³. 또한 일본건축학회는 간접전달방식의 측정 간격을 10cm 이상으로 제안하고 있다. 이 실험에서는 비교적 대규모 암반의 풍화도 산정에는 20cm 간격으로 측정하였으며, 소규모로 진행되는 보존처리제 평가에는 10cm 간격으로 설정하였다.

보존처리제 평가에 앞서 암반의 풍화등급 산출과 상태를 진단하고, 전체적인 초음파 속도 분포 값을 구하여 보존처리제 평가에서 오차가 발생 할 수 있는 지역을 배제하였다. Site A는 123개 지점, Site B는 98개 지점을 각각 측정하였다. 이 결과, Site A 영역의 속도는 평균

1737.9%이고, Site B는 1528.0%의 속도대를 보였다 (Table 3).

Site A 영역에서 초음파 속도가 434.6%와 같이 매우 낮은 속도를 보이는 곳은 연구 영역에서 제외하였다. 이들은 대부분 굴곡이 심하거나 탐촉자의 측정압에 의해 이미 박락 및 탈락 현상이 발생하는 부분이기도 하다. 이러한 결과를 바탕으로 속도 분포가 비교적 안정적이고 표면 굴곡이 적어 평가에 오차를 최소화할 수 있는 영역을 설정하였다.

Table 3. The results of ultrasonic velocity (%) in each site.

Field	Min	Max	Mean	k
Site A	434.6 %	2635.1 %	1737.9 %	0.48
Site B	792.7 %	2094.2 %	1528.0 %	0.54

풍화도 산정 기준은 신선한 암석의 초음파 속도인 5000%의 극경압에 해당하는 속도로 분석하였다. 풍화도는 Iliev(1967)에 의한 암석의 풍화도 지수와 초음파 속도 관계식을 이용하였다²². Iliev 관계식은 직접법의 초음파 속도만 적용 가능하므로 이미 잘 알려진 계수 1.5를 적용하여 간접전달방식에 따른 보정을 실시하였다²⁴. 풍화도 지수 관계식에 적용한 결과, Site A는 0.48, Site B는 0.54로서 Highly Weathered 등급으로 산출되었다(Table 3).

Table 4. Variation of ultrasonic velocity(%).

Field		Average	Unreated	Filling(%)	1st consolidant(%)	2nd consolidant(%)	3rd consolidant(%)
None	[A-3]		1519.8	-	-	-	1671.8
	[B-1]		1641.8	-	-	-	1875.3
Con-solidation	[A-1]		1862.3	-	1853.8	1908.3	2081.3
	variation		0	-	-8.5(0.5%)	54.5(2.9%)	173.0(8.3%)
	[A-2]		1430.2	-	1998.7	2064.8	2228.5
	variation		0	-	568.5(28.4%)	66.1(3.2%)	163.7(7.3%)
	[B-2]		1905.8	-	1919.5	2013.3	2166.8
	variation		0	-	13.7(0.7%)	93.8(4.7%)	153.5(7.0%)
	[B-3]		1800.2	-	1829.0	1922.6	2120.0
	variation		0	-	28.8(1.6%)	93.6(4.9%)	197.4(9.3%)
Filling	[A-5]		1437.7	1743.3	1747.4	1780.5	2023.6
	variation		0	305.6(17.5%)	4.1(0.2%)	33.1(1.9%)	243.1(12.0%)
	[A-6]		1352.1	1450.0	1569.9	1725.8	1890.5
	variation		0	97.9(6.8%)	119.9(7.6%)	155.9(9.0%)	164.7(8.7%)

3.2. 처리효과 및 검증

물질의 변형 특성은 물질 내부로 전파되는 초음파 속도에 의해서도 확인할 수 있으며 이 원리를 이용하여 강화제가 암석에 미치는 영향을 평가하였다. 보존처리 후 암반의 물성 변화를 평가하기 위하여 GRID를 제작하여, 가로 30지점, 세로 30지점의 초음파 속도를 측정하였다.

3차에 걸친 강화 처리는 외기에 노출된 환경적 영향으로 기온이나 습도에 의해 어느 정도 유동성이 있다고 판단되므로, 단계별 상승이 일정하지 않음을 가정하였다. 초음파 속도는 평균값들 간의 증감으로 나타냈으며, 이 결과를 Table 4에 정리하고 Figure 3의 그래프로 나타내었다.

또한 각 영역에 대한 초음파 속도의 분포 경향을 파악하고자 SUFFER 프로그램을 이용하여 실측도에 투영하여 2D 모델링하였다.

이 프로그램은 규정된 범위의 속도 분포에 따라 등고선을 산출한 다음 육안으로 쉽게 판독이 가능하고, 색으로 구분하여 풍화면을 용이하게 평가할 수 있다. 따라서 낮은 속도대는 노란색으로, 높은 속도대는 파란색으로 표현하였다. 각 영역을 모두 최소 850%, 최대 3200%으로 지정하여 동일한 조건 하에서 비교할 수 있도록 하였다. 또한 암반 표면의 박리, 박락, 균열, 절리 등으로 인해 초음파 속도가 균일하게 나오지 않을 수 있으므로 이 부분은 선으로 표시하였다.

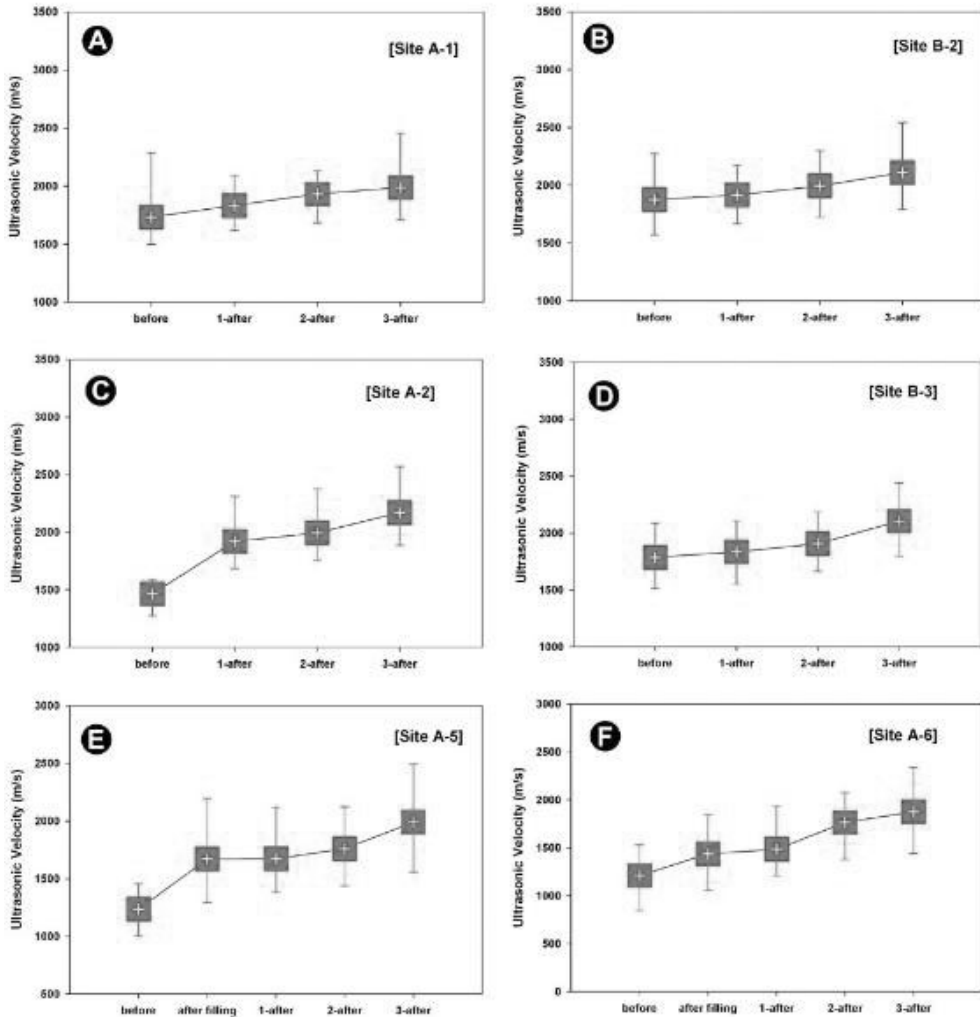


Figure 3. (A) Site A1; treated by Wacker OH100. (B) Site B2; treated by Wacker OH100. (C) Site A2; treated by Remmers KSE300. (D) Site B3; treated by Remmers KSE300. (E) Site A5; treated after L-30. (F) Site A6; treated after Araldite AW106.

Site A1 영역에서는 OH100 강화제로 1차 처리를 실시한 후, 처리 전보다 낮은 속도를 보였다. 이는 초음파 속도 측정 과정의 오차라고 판단할 수도 있지만, 한 번의 강화 처리만으로 효과가 없다는 것을 지시한다고 볼 수도 있다. 그러나 2·3차의 강화 처리가 실시된 후에는 박리면을 중심으로 속도가 높아지는 것을 확인할 수 있으며, 단계별 초음파 속도의 투영도는 Figure 4와 같다. 처리 전 1862.3%의 속도에서 3차 강화 처리 후 2081.3%

로 총 219.0%(+10.5%)의 속도가 향상된 것으로 측정되었다(Figure 3A).

동일한 강화제를 도포한 Site B2 영역은 삼릉계곡 선각 육존불의 표면 상태와 비슷하게 미세 절리 및 균열 등이 수직, 수평으로 발달되어 있는 곳이다. 이 영역을 초음파 속도로 투영한 결과, 수직으로 미세 절리가 발달된 곳은 강화의 효과가 뚜렷하게 나타나지 않았다(Figure 5). 이는 강화 처리 시 접도가 낮은 처리제가 도포 직후 깊게 침투

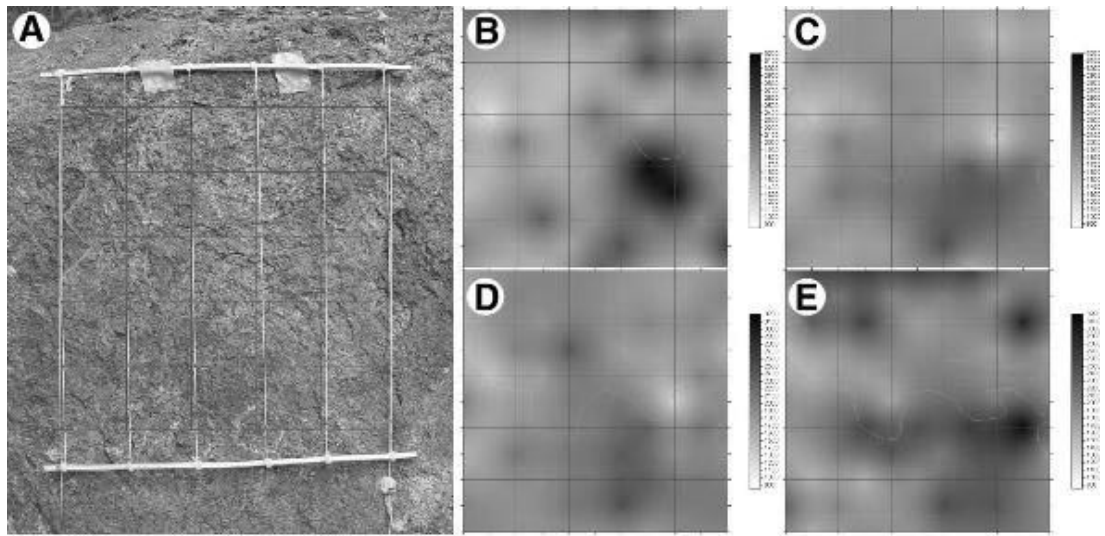


Figure 4. Site A1 ; Treated by Wacker CH100. (A) Rock surface. (B) Ultrasonic velocity map of untreated surface. (C) After one-time treated map. (D) After two-time treated map. (E) After three-time treated map.

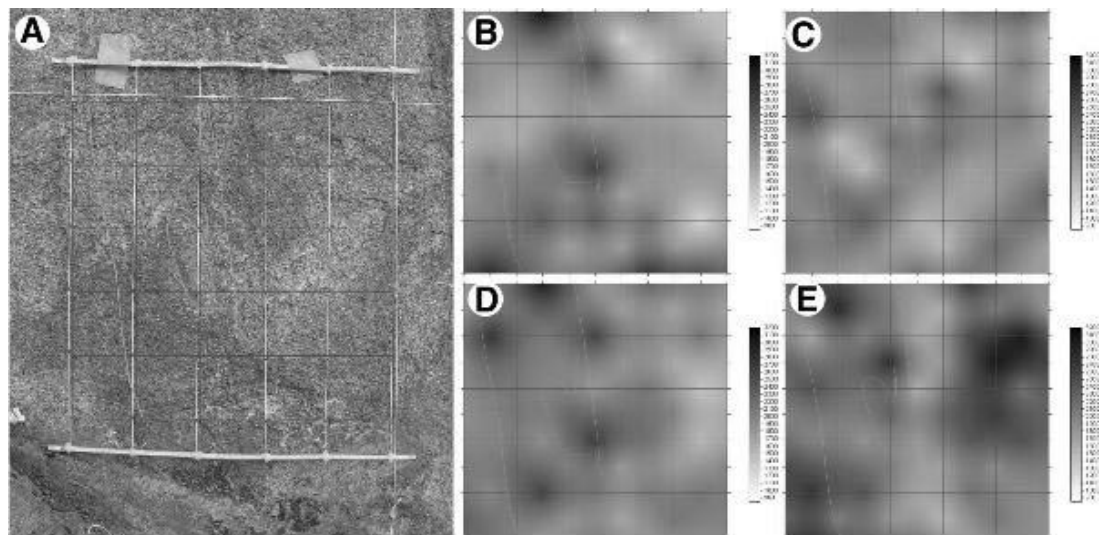


Figure 5. Site B2; Treated by Wacker OH100. (A) Rock surface. (B) Ultrasonic velocity map of untreated surface. (C) After one-time treated map. (D) After two-time treated map. (E) After three-time treated map.

하지 못하고 절리면을 따라 흘러내려 강화 효과가 저감되었기 때문에 판단된다. 초음파 속도는 처리 전 1905.8㎍에서 3차 처리 후 2166.8㎍의 속도로 총 261.0㎍(+12.0%)가 증가하였다(Figure 3B).

KSE300 강화제를 도포한 Site A2 영역은 강화 처리 전 매우 낮은 저속도를 보이고 있었으나, 1차 강화 처리 후 초음파 투영도에서 나타나듯이 속도가 급격하게 증가한 것을 볼 수 있다. 박리와 박락 부위에서 모두 점진적으로

속도의 증가가 나타났다(Figure 6). 처리 전에는 1430.2㎍의 초음파 속도를 보였으나 3차 강화 처리 후 2228.5㎍로서 798.3㎍(+35.8%) 증가하였다(Figure 3C). 이는 강화제의 종류가 다른 Site A1 영역에 비해 초음파 속도가 더욱 상승된 결과이다.

Site A2 영역과 동일한 강화제를 도포한 Site B3 영역은 Figure 7의 투영도에서 보듯이 단계적으로 초음파 속도가 빨라졌으며, 처리 전 1800.2㎍에서 319.8㎍

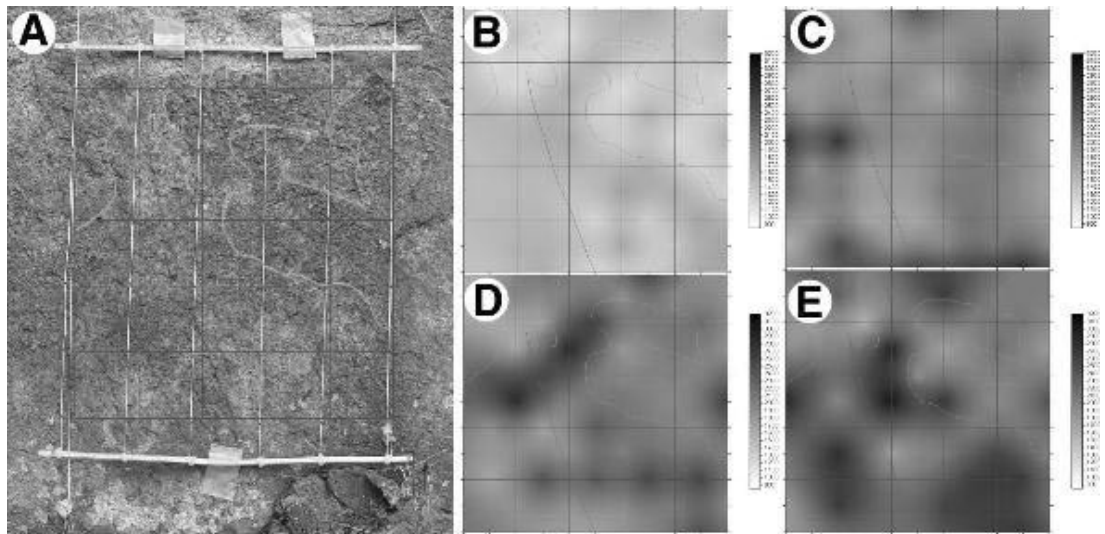


Figure 6. Site A2; Treated by Remmers KSE300. (A) Rock surface. (B) Ultrasonic velocity map of untreated surface. (C) After one-time treated map. (D) After two-time treated map. (E) After three-time treated map.

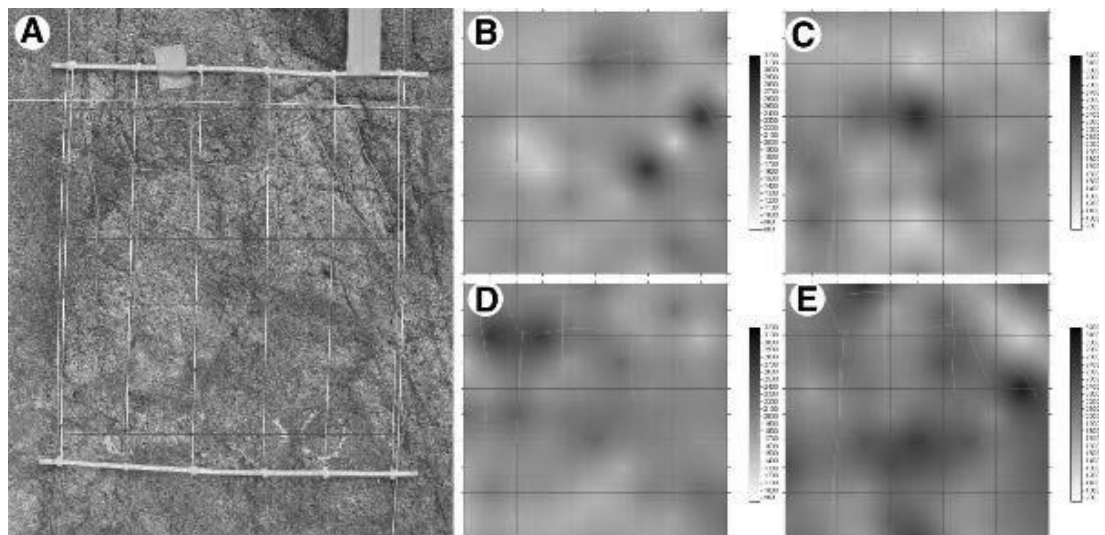


Figure 7. Site B3; Treated by Remmers KSE300. (A) Rock surface. (B) Ultrasonic velocity map of untreated surface. (C) After one-time treated map. (D) After two-time treated map. (E) After three-time treated map.

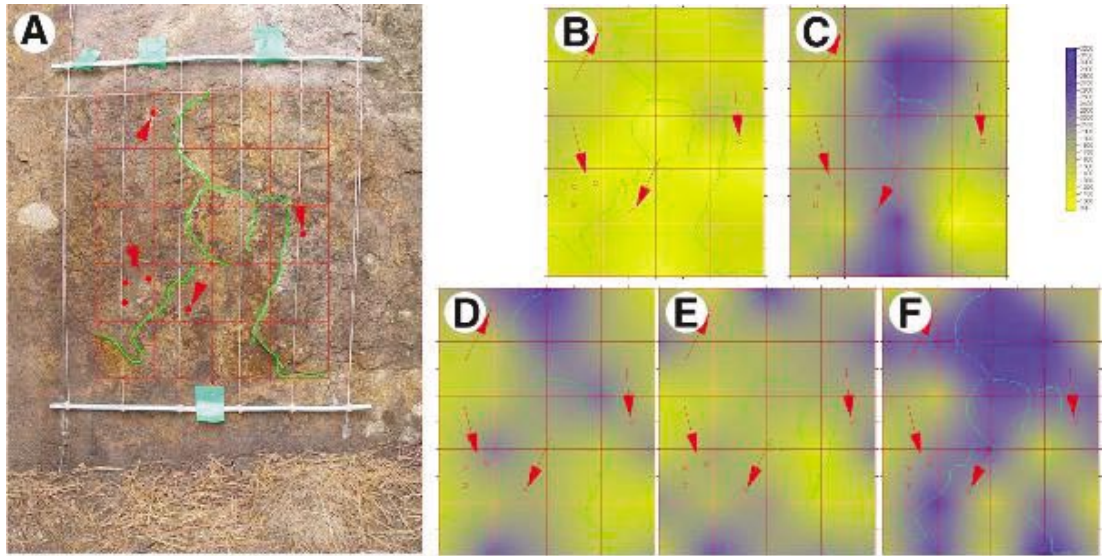


Figure 8. Site A5; Treated by Remmers KSE300 and Filler L-30. (A) Rock surface. (B) Ultrasonic velocity map of untreated surface. (C) After filler treated map. (D) After one-time treated map. (E) After two-time treated map. (F) After three-time treated map.

(+15.1%) 증가된 2120.0%의 속도를 보였다. 이 또한 강화제의 종류가 다른 Site B2 영역에 비해 초음파 속도는 더 많은 증가율을 보였다(Figure 3D).

박리박락이 심하게 진행된 Site A5, A6 영역은 충전 작업을 선행한 후 강화 처리를 한 영역으로서, 초음파 투영도에 화살표 표시를 하여 충전제를 투입한 위치를 표기

하였다. Site A5, A6 영역 모두 충전 부위를 중심으로 초음파 속도가 급격히 증가하였으며, 투영도에서도 속도의 큰 상승 효과가 있음을 알 수 있다(Figure 8, 9). L-30으로 처리한 Site A5 영역의 경우 처리 전 1437.7%의 저속도를 보였으나, 충전 처리 후, 평균 1743.3%를 보여 총 305.6%가 증가하였다. 또한 3차 강화 처리를 마

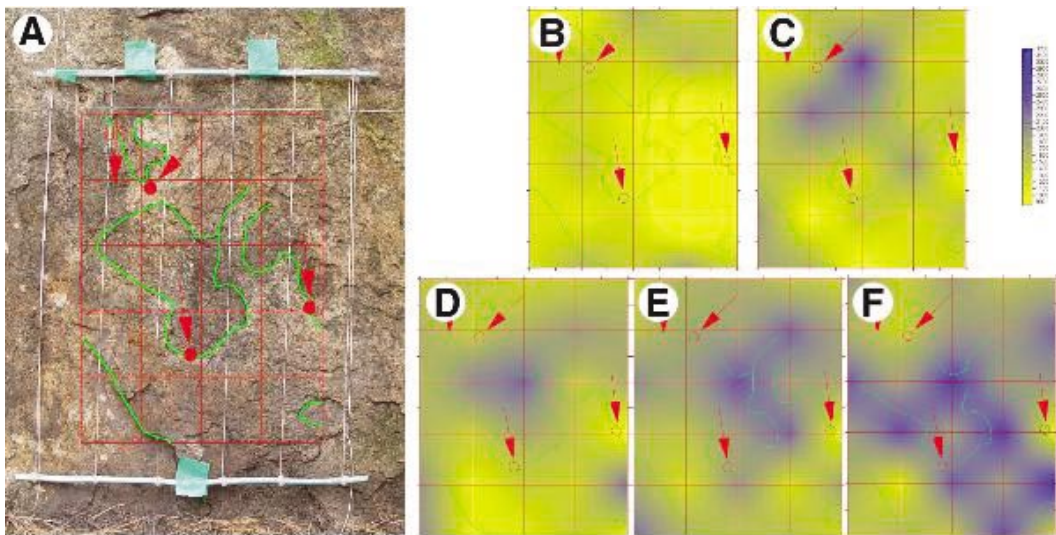


Figure 9. Site A6; Treated by Remmers KSE300 and Araldite AW106. (A) Rock surface. (B) Ultrasonic velocity map of untreated surface. (C) After filler treated map. (D) After one-time treated map. (E) After two-time treated map. (F) After three-time treated map.

친 후는 2023.6%의 속도를 보여 처리 전과 후의 증감은 585.9%(+29.0%)이다(Figure 3E).

아탈다이트 AW106으로 처리한 Site A6 영역은 처리 전 1352.1%의 속도를 보여 연구 영역 중 가장 낮은 속도 분포대를 보였다. 그러나 박리된 내부 공동의 매움 작업이 완성된 후 97.9%가 증가하였고, 3차 강화 처리 후의 속도는 1890.5%가 되어 처리 전보다 538.4% (+28.5%)가 증가한 것으로 나타났다. 따라서 충전이 충분히 된 것으로 판단되며, 강화 처리 후에도 충전 부위를 중심으로 속도가 증가하는 경향을 보이고 있다(Figure 3F).

석조문화재에서 강화제 적용의 완전한 침투를 가정하진공함침 조건으로 강화처리를 실시하였을 때, 초음파 속도 증가율은 20.1%로 나타났다. 그러나 현장에서 총 3차에 걸쳐 이루어진 강화처리의 속도대를 비교해보면, 진공함침법과 비슷한 상승률을 보이는 것을 확인할 수 있다. 따라서 강화처리를 3회 도포할 경우, 수치상으로만 비교한다면 현장에서도 진공함침법의 침투율과 비슷한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 강화제의 도포는 1, 2차 처리와 수치 상 비교하였을 때, 최소 3회 이상은 도포를 해야 효과를 극대화 시킬 수 있으며, 이 암반에 대해서는 그 이상의 처리는 필요하지 않다고 판단하였다. 필요 이상

의 양을 도포하는 경우, 약품이 침투하지 못한 체 표면에 유리상태로 남아 있게 되어 공극을 막을 수 있으므로 암반의 상태를 고려한 보존처리가 실시되어야 할 것이다.

4. 보존과학적 고찰

여름에서 겨울에 걸친 3차례의 보존 처리 후 강화제의 양생 과정이 완성되었다고 판단되어 초음파를 이용해 각 영역의 변화를 다시 한 번 검토하였다. Table 5는 처리 전과 3차 처리 후, 처리 후 4개월 이후(겨울철)에 대해 각 시기별 초음파 속도를 비교한 표이다.

이미 1~3차에 걸친 표면강화 처리와 충전작업 후의 초음파 속도는 지속적인 증가를 보였지만, 처리 후 방치한 상태로 4개월이 지난 시점의 초음파 속도를 비교해 보면 소폭의 증감만이 관찰된다. 이는 계절에 따른 온도과 습도의 변화 때문에 보존처리제와 암석 자체에서 오는 오차이거나 초음파 속도 측정 자체가 가지는 주위 환경이나 기구, 표면의 습도, 탐촉자의 측정압 등에 의해 유동성을 가질 수 있다. 따라서 10% 미만의 변화는 효과를 판단하는데 크게 영향을 미치지 않은 것으로 볼 수 있다.

3차 처리가 완성 되었을 때, 강화처리를 한 Site A는

Table 5. Variation of ultrasonic velocity(%).

	Site	Untreated(%)	3rd Consolidation(%)	After 4month(%)
Nore	[A-3]	1519.8	1671.8	1746.5
Consolidation	[A-1]	1862.3	2081.3	2119.8
	variation	0	219.0 (10.5%)	38.5 (1.8%)
	[A-2]	1430.2	2228.5	2142.4
	variation	0	798.3 (35.8%)	-86.1 (3.9%)
Filling & Consolidation	[A-5]	1437.7	2023.6	2065.7
	variation	0	585.9 (29.0%)	42.1 (2.0%)
	[A-6]	1352.1	1890.5	1041.7
	variation	0	538.4 (28.5%)	-57.5 (3.0%)
Nore	[B-1]	1641.8	1875.3	1792.1
Consolidation	[B-2]	1905.8	2166.8	2045.5
	variation	0	261.0 (12.0%)	-137.5 (6.3%)
	[B-3]	1800.2	2120.0	2069.0
	variation	0	319.8 (15.1%)	-46.5 (2.2%)

OH100이 10.5%의 변화를 보인 반면, KSE300이 35.8%의 변화를 보였고, Site B 또한 OH100은 12.0%의 변화율을 보인데 반해, KSE300은 15.1%를 보여, KSE300의 초기 강도값이 높음을 지시한다. 이는 실내연구에서 경주남산 알칼리화강암을 대상으로 실험하였을 때, Remmers KSE300 제품이 강도 상승에 효과적이었음을 입증해주는 결과이다¹⁾. 그러나 이후 일정 시간이 지난 후 초음파 속도를 비교해 보면, Site A는 OH100이 1.8% 증가하였으나, KSE300은 3.9% 감소한 결과를 확인하였으며, Site B는 두 영역 모두 초음파 속도가 각각 6.3%, 2.2%로 소폭 감소한 것으로 나타났다(Table 5).

석조문화재의 보존처리는 구성재질의 기계적 강화와 그 지속성을 향상시켜 장기간 유지시키는 데 목적이 있다. 이 실험에서 처리 후 4개월이 지난 후에 모니터링한 결과, 강화제에 대한 효과가 일정한 지속성을 유지하지 못하는 것으로 나타났다. 이는 살리카이트 계열 강화제의 지속성이 5년이라고 알려진 기존의 연구결과와는 다른 것으로서 앞으로 이에 대한 충분한 검증과 면밀한 고찰이 필요한 것으로 파악되었다. 그러나 3차 처리를 실시하는 동안 온도 제어가 불가능하였고, 강우를 차단하지 못하였기 때문에 나타나는 결과일 수도 있다. 따라서 환경 제어를 통한 실험법이 병행되어 비교분석이 뒷받침되어야 할 것이다.

Site A5, A6 영역과 같이 충전작업을 선행한 영역은 비교적 높은 효과를 얻을 수 있었지만, L-30으로 충전한 영역에 비해 Araldite AW106으로 충전한 영역은 지속력이 떨어지는 것으로 나타났다(Table 5). 그러나 강화와 충전 작업을 병행한 보존처리가 끝난 후의 암반 풍화지수는 처리 전에는 HW(highly weathered) 등급에 해당하였지만, 현재 0.33~0.44의 MW(moderately weathered) 등급으로 상승된 결과를 확인하였다.

현장 적용성 연구의 궁극적 목적은 실제적으로 문화재에 적용할 수 없는 평가 방법을 시도하여 신뢰할 수 있는 과학적 증거 자료를 도출하고, 나아가 보존처리제의 선정 기준을 마련하는 것이라 할 것이다. 한편 지정된 사이트에서 단기간에 결과를 기대할 수는 없으며, 정기적으로 장기간에 대한 자료의 축적과 온습도 변화에 따른 평가가 지속적으로 진행되어야 할 것이다. 그러나 외기에 노출된 문화재인 만큼 주변 환경의 영향을 받게 되어 있어 보존처리의 효과를 극대화시킬 수는 없을 것이다. 따라서 보존환경을 고려한 최적조건의 처리방안을 도출하여야 할 것이다.

5. 결론

1. 경주 남산 삼릉계곡 선각육존불 주변 암반을 대상으로 석조문화재 강화제와 충전제의 효과 및 검증 실험을 수행하였다. 전체적으로 강화처리 4영역, 충전처리 2영역으로 구분하였으며 강화용 보존처리 3회를 실시한 결과, 보존처리제 처리 후 전반적으로 초음파 속도가 증가하였다.

2. 초음파 속도는 3차 강화처리 후, Site A1 영역은 219.0%가 증가하고, Site A2 영역은 798.3%가 증가하여 Site A1 영역보다 높은 속도대를 보였다. Site A5 영역은 충전 처리 후 305.6%의 증가를 보였고, 강화 처리 후의 속도는 585.9%가 증가하였다. Site A6 영역은 박리면의 매움 작업을 거친 후 97.9%가 증가하고, 3차 강화 처리 후 처리 전 보다 538.4%가 증가하였다. Site B2 영역은 261.0%, Site B3 영역은 319.8% 증가 효과를 보였다.

3. 보존처리제 처리가 완료된 후 전체 초음파 속도는 Remmers KSE300으로 처리하였을 때 최대 35.8%의 증가율을 보인다. 이는 실내 실험에서 도출된 20.2%의 증가율보다 높은 수치를 나타내고 있어, 암반에 대해 효과적인 강화가 있었던 것으로 나타났다. 또한 1, 2차에 비해 3차 처리를 실시하였을 때, 단계별 초음파 속도가 증가하는 것을 확인하였으며 최소 3회 이상 실시하여야 효과를 극대화시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 강화처리제의 도포와 충전 작업은 내부 공동이 메워짐으로 초음파 속도를 높이는 효과를 보인다. 그러나 충전 영역 Site A5, A6을 4개월 후 초음파 속도 측정으로 관찰한 결과, L-30을 이용한 충전 작업이 Araldite AW106의 충전 혼합체에 비해 지속성이 큰 것을 확인하였다. 이 결과를 바탕으로 향후 10년간 정기적으로 효과를 평가하여 초음파 속도의 증감곡선을 살펴보고, 보존처리제의 문제점을 정량적으로 판별할 것이다.

사 사

이 연구는 문화재청 국립문화재연구소에서 수행하는 문화재보존기술개발연구(R&D)사업인 '석조문화재 손상제어 기술 연구'의 일환으로 이루어졌음을 명기하며, 이에 감사한다.

참고문헌

- Lee, C.H., Lee, M.S., Kim, Y.T. and Kim, J., "Deterioration assessment and conservation of a heavily degraded Korean stone Buddha from the Ninth century". *Studies in Conservation*, 51, p305-316, (2006).
- 이상현, "국내 석조문화재의 보전대책 수립을 위한 지질학적 고찰". *보존과학회지*, 7, p9-18, (1998).
- 김영택, 이찬희, 이명성, "부여 정림사지 오층석탑의 보존과학적 풍화훼손도 평가". *자원환경지질*, 38, p675-687, (2005).
- 이찬희, 이정은, 신은정, 김사덕, "경천사십층석탑의 암석학적 특성과 풍화훼손도". *지질학회지*, 44, p756-779, (2008).
- 좌용주, 이상원, 김진섭, 손동운, "경주 불국사와 석굴암의 석조 건축물에 사용된 석재의 공급지에 대하여". *지질학회지*, 36, p335-340, (2000).
- Lee, C.H., Lee, M.S., Suh, M. and Choi, S.W., "Weathering and deterioration of rock properties of the Dabotap pagoda (World Cultural Heritage), Republic of Korea". *Environmental Geology*, 47, p547-557, (2005).
- 이명성, 이정은, 표수희, 송치영, 이찬희, "논산 관촉사 석등의 훼손도 진단 및 기원암의 성인적 해석". *보존과학회지*, 17, p5-18, (2005).
- 이찬희, 김영택, 이명성, "부여 정림사지 오층석탑 구성암석의 원산지 추정". *지질학회지*, 43, p183-196, (2007).
- Leisen, H., "Success and limits for stone repair mortars based on tetra ethyl silicate - Conservation of the reliefs at ankor wat temple, Cambodia". *International Congress on deterioration and conservation of stone*, 10, p331-338, (2004).
- Tabasso, M.L., "Products and methods for the conservation of stone : Problems and trends". *International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, 10, p269-282, (2004).
- 송치영, 한민수, 이장준, 전병규, 엄두성, 김사덕, "석조문화재 보존처리제의 정량화 연구". *한국문화재보존과학회 춘계학술대회*, (2008).
- 조연태, 김창석, 강대일, 이명희, "화암사지 선각왕사비 보존처리". *보존과학연구*, 22, p11-41, (2001).
- 김사덕 외, "경천사십층석탑, I. 해체에서 복원까지". *국립문화재연구소*, p83-91, (2005).
- 김사덕, 김순관, 김창석, 홍정기, 강대일, 이명희, "석조문화재 에폭시수지 개발 시험연구". *보존과학연구*, 20, p139-155, (1999).
- 송치영, 한민수, 이장준, 전병규, "석조문화재 보존처리제의 현황 조사". *보존과학연구*, 29, p164-180, (2008).
- Sayers, C.M., Allen, D.R., Haines, G.E. and Proudfoot, G.G., "Texture and stress determination in metals by using ultrasonic Rayleigh waves and neutron diffraction". *Phil. Trans. R. Soc. London.*, A320, p182-200, (1986).
- King, M.S., Chaudhry, N.A., Shakeel, A., "Experimental ultrasonic velocities and permeability for sandstones with aligned cracks". *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 32, p155-163, (1995).
- Singh, V.P., "Investigations of attenuation and internal friction of rocks by ultrasonics". *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 13, p69-74, (1976).
- 서만철, 송인선, 최희수, "암석의 파괴 확률 분석을 통한 불국사 삼층석탑 구조 안전 진단". *지구물리*, 4, p57-69, (2001).
- 서만철, 송인선, 최희수, "초음파 속도 분석을 통한 불국사 다보탑 구조 안전 진단". *지구물리*, 5, p199-209, (2002).
- 이선명, 이명성, 조영훈, 이찬희, 전성원, 김주옥, 김선덕, "한성 청룡사삼층석탑의 풍화훼손도 진단과

- 보존처리". *자원환경지질*, 40, p661-673, (2007).
22. Illiev I. G., "An attempt to measure the degree of weathering of intrusive rocks from their physico-mechanical properties". Proceeding of the First International Congress, *International Society of Rock Mechanics*, Lisbon, 1, p109-114, (1967).
23. 임홍철, 김연수, 이상균, 송영철, "초음파를 이용한 콘크리트 시편의 피복두께 이하에 위치한 균열깊이 탐사". *한국구조물진단학회*, 6, p181-188, (2002).
24. 조영훈, 전유근, 조성남, 이찬희, "석조문화재 표면 풍화도 평가를 위한 초음파 탐사의 응용". *2008년 춘계지질과학기술 공동학술대회 초록집*, p188, (2008).
-