

# 경주 감은사지서삼층석탑 충전제 선정과 보존처리

이태종<sup>1</sup> | 김사덕 | 갈서연\*

국립문화재연구소 문화재보존과학센터, \*(재)계림문화재연구원

## Selection and Conservation for the Filler of Three-storied Stone Pagoda at the West of Gameunsaji Site in Gyeongju

Tae Jong Lee<sup>1</sup> | Sa Dug Kim | Seo Yeon Gal\*

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

\*Gyelim Research Institute of Cultural Heritage, Gyeongju, 780-150, Korea

<sup>1</sup>Corresponding Author: tj0819@korea.kr, +82-42-860-9381

**초록** 석조문화재의 내부공극은 강화처리만으로 효과를 보기 어렵고 고분자합성수지를 이용한 충전의 경우 재료적 이질감과 높은 강도, 저점도에 따른 유동성 향상으로 내부벽면만 접착, 강화되는 단점이 있다. 따라서 본 연구는 무기질 바탕의 다양한 충전제를 검색하여 충전효과검증을 통해 감은사지삼층석탑 공극부 충전에 효과적인 충전제를 선정, 보존처리를 실시하였다. 충전실험 결과 부재와 동일하거나 매우 유사한 물성을 지닌 KSE 500 STE + KSE Filler A · KSE Filler B 조합을 사용하여 충전하였다. 서탑 전체표면적은 252.6㎡이며 이중 내부공극이 발달한 부분은 17.77㎡(7.03%)로 내부를 충전(24,885㎖)하였다.

**중심어:** 감은사지서삼층석탑, 충전제, 강화처리, 공극, 무기질

**ABSTRACT** The open pore of stone cultural heritage is not expected to have an effect only by consolidation, and it has a drawback that only the internal wall adheres and gets consolidated due to the increase of liquidity caused by the low viscosity and difference of materials in the case of filling with high molecules synthetic resins. Therefore, this research selected the effective filler for Three-storied Stone Pagoda at the West of Gameunsaji Site through the verification of filling effects of materials using the information about various fillers based on minerals. As the result of filler experiment, got filled with the combination of KSE 500 STE + KSE Filler A·KSE Filler B that is the same as the Member or has very similar properties. The total surface area of the west stone is 252.6㎡ and the area where the internal opening has been developed is 17.77㎡ (7.03%) requiring a task that fills the internal(24,885㎖).

**Key Words:** Gameunsaji West Stone Pagoda, Filler, Consolidation, Pore, Injection, Materials

## 1. 서론

### 1.1. 연구개요

감은사지석탑을 구성하고 있는 암석은 석영안산암질 응

회암(dacite tuff)으로 반상조질을 가진 분출화산암종으로<sup>1</sup>, 비교적 균질한 암상을 보여주고 있으나 부분적으로 구성광물들의 상대적 함량과 입자들의 크기 및 반정과 바탕의 상대적 함량에 있어 다소의 차이가 공극으로 나타난다<sup>2</sup>.

이 공극은 암석의 풍화에 영향을 미친다. 특히 감은사지

**Table 1.** Materials for filler test.

	2K Injection Paste	Injection cream	KSE Filler A	KSE Filler B	Borehole Suspension
Form	micro powder	semiliquid emulsion	micro powder	micro powder	powder
Solvent	Acrylic emulsion	×	KSE 500 (Elasticity Consolidants)	KSE 500 (Elasticity Consolidants)	water
Component	Ultra-Fein, cement, Desulfation cement	Silane, siloxane	silicic acid ester mineral powder	silicic acid ester Quartz powder	Desulfation cement, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Lime, trass
Density	1.7kg/dm <sup>3</sup>	×	0.7kg/ℓ	0.8kg/ℓ	1.6kg/dm <sup>3</sup>

석탑은 주변 자연환경과 장기간 상호작용으로 물리·화학적 반응이 복합적으로 발생하여 다양한 풍화현상이 발생하고, 부재별 풍화도가 다르게 나타난다<sup>3</sup>. 따라서 석조물의 보존처리 과정에서 공극에 따른 풍화를 제어하기 위해 광물간의 결합력을 높여주는 처리가 진행된다.

서탑의 경우 입상박리와 엽상박리 등 소규모로 나타나는 손상은 강화처리 작업으로 어느 정도 효과를 기대할 수 있으나 공극이 활성화된 들뜬 부분은 강화제를 사용한 처리만으로 큰 기대를 할 수 없는 상황이다. 또한 옥개석 낙수면과 상층기단 면석 등 판상박리가 진행되어 부재 표면이 유실될 우려가 있는 곳 역시 강화처리뿐만 아니라 별도의 충전처리가 뒤따라야 한다. 이와 같이 풍화형태에 따른 처리를 위해 현장에서는 수많은 시행착오를 거쳐 처리효과를 최대화하고, 처리 후 부작용을 최소화할 수 있는 처리제를 개발·적용하고 있다<sup>4,5,6</sup>.

보존처리 현장에서 주로 사용되는 강화·충전제는 사용 목적과 범위에 따라 폴리비닐계 고분자와 아크릴계수지, 에폭시수지 및 실리콘수지 등의 폴리머수지가 사용되고 있다.

그 중 에폭시수지는 접착 및 충전, 성형에 이르기까지 다양하게 적용되며<sup>7</sup>, 서탑 부재처리에서는 접착에 한해 사용되었다. 풍화된 석질을 강화시키기 위해 암석 상태, 부재 모양, 기공도, 부재 크기 등을 고려한 silanes 강화제의 사용이 확대되고 있다<sup>8,9,10,11</sup>. 보존처리에 사용되는 silane(SiH<sub>4</sub>) 유도체들은 tetraethoxysilane(synonyms ethylsilicate, tetraethyl silicate, TEOS)과 같이 tri 또는 tetra-기능기 유도체이다. 중합은 물의 작용으로 시작되며 가수분해와 응결에 의한 것이다. 규소와 산소의 결합물질이며 규산염과 유기폴리머의 중간물질로 석영과 같은 광물학적 성질을 갖고 있기 때문에 강화제 뿐만 아니라 충전제 등 광범위하게 사용되는 재료이다.

본 연구는 에폭시 충전제를 대체하기 위한 재료선정과 충전효과를 검증하기 위해 실시하였다. 또한 보존처리를 실

시하기 위한 현장실험이기 때문에 재료 물성평가, 안정성 평가와 같은 실험실 연구는 실시할 수 없었으며 다양한 현장조건을 감안하여 처리기술 적용은 일반적인 방법을 따랐다.

## 1.2. 연구방법

기존 공극부에 대한 충전방법은 에폭시수지에 탈크, 등질석분 등을 혼합하여 대상문화재의 손상상태에 따라 적합한 농도를 맞추어 사용된다. 에폭시수지를 공극부 충전을 위한 목적으로 사용할 경우 기존 유동공극의 흐름을 차단하여 새로운 공극부를 형성하거나 약해진 암석의 강도에 비해 훨씬 강한 강도를 형성하기 때문에 제외하였다. 따라서 본 연구에서는 무기질 재료로 공극부 충전에 효과적이고 안정성을 겸한 충전제 중 유럽이나 동남아시아 지역 보존처리 현장에서 많이 사용되는 다섯 개의 충전제를 선정, 비교실험 하였다.

물성 평가는 이미 검증된 재료이기 때문에 이온크로마토그래피(DIONEX사 DX-500)분석을 통한 2차 반응생성물 검사만 실시하였다.

적용실험은 동일한 응회암에 인공으로 조성한 공극과 대체적으로 선정된 노두에서 확인된 공극에 충전제를 주입하여 효과를 검증하였다. 충전효과검증은 코어링 후 육안 관찰, 슈미트헤머(PROCEQ, DigiSchmidt-LD), 초음파탐상(PROCEQ, TICO), 열적외선촬영(FLIR system, ThermoCAM PM595)을 병행하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 충전실험 재료

서탑 공극부 충전재료는 암석에 적용되는 처리제가 암



Figure 1. The filler for experiment subjects. (a) Packing, (b) Liquefied.

석과 유사한 성질을 가짐으로써 처리 후 재질적 안정성과 2차적 물리·화학적 손상을 최소화 할 수 있어야 한다. 또한 내부공극을 효과적으로 충전하면서 구조적인 안정성을 추구하여야 한다.

선택된 일부 재료의 경우 공업용 알루미늄이나 또는 시멘트 성분을 혼합한 경우도 있으나 본 연구에서는 모든 가능성을 열어둔 상태로 실험을 실시하였다. 다음은 충전제의 종류와 간략한 특성을 정리한 것이다(Table 1, Figure 1).

### 2.1.1. 2K Injection Paste<sup>12</sup>

독일 쾰른대성당, 그리스 파르테논 신전 보수공사에 사용된 충전제로 공극부 뿐만 아니라 미세균열 충전도 가능할 만큼 강한 확산력을 지닌 재료이다.

주요 성분으로는 고로슬래그의 일종인 Ultra-Fein과 탈황시멘트, 시멘트이며 이중 시멘트 함량은 12%내외이다. 밀도는 1.7kg/dm<sup>3</sup>, 비중은 3.12~3.16이며 공기함유량은 1% 내외이다. 압축강도는 3일 경화에서 22.7MPa, 7일 경화에서 29.8MPa, 28일 경화에서 38.0MPa를 보이는데 이는 일반 시멘트(포틀랜드 시멘트)의 압축강도와 유사함을 알 수 있다.

Injection paste는 용매를 사용하여 공극부의 상황에 맞게 농도를 조절할 수 있다. 용매는 아크릴에밀전으로 5℃ 이상의 온도에서 사용가능하며, pH는 9로 약알칼리성이다. 용매의 비중은 1.03g/cm<sup>3</sup>이며 20℃ 기준으로 증기압은 23mbr이다.

### 2.1.2. Injection Cream<sup>12</sup>

Injection cram은 silane/siloxane 결합의 cream emulsion 형태로 유럽이나 멕시코 마야 유적 등에서 충전과 발수처리에 사용되고 있는 재료이다. 주재료인 실란은 수소화규

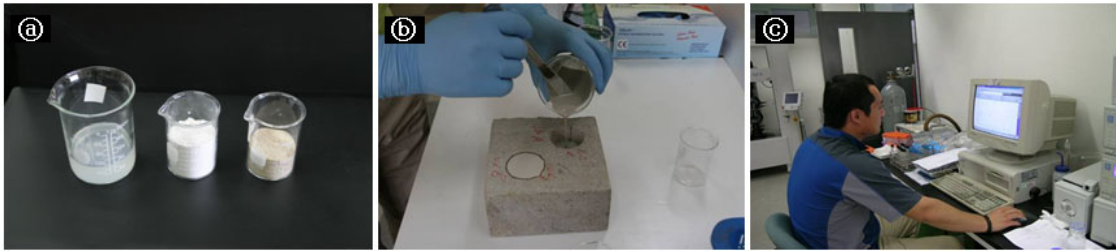
소의 총칭으로 모노실란이라고도 한다. 실란은 SiH<sub>4</sub>로 탄소 대신에 규소로 대체되어 있는 물질로 CH<sub>4</sub>와는 달리 매우 반응성이 커서 상온에서도 산화된다. 이러한 실란의 성질은 공기 중에 방치해두면 산화되어 실리콘을 형성하여 내부를 충전하는 역할을 한다.

Injection cram을 처리한 후 형성된 silane 또는 siloxane는 암석 내 실리카 화합물과 반응하여 물이나 다른 용제의 침투를 방지하면서 습기는 배출하는 보호막을 형성한다. 따라서 injection cram은 충전제보다는 발수제의 역할이 크며 미세균열만 잡아줄 수 있을 것으로 판단된다.

### 2.1.3. KSE Filler A

KSE Filler A는 silicic acid ethyl(SAE) module system 반응에 의해 생성되며, 성상은 밝은 회색 무정형 mineral 파우더로 경화 후 물이나 산·염기에 안정하다<sup>12</sup>. 다만, 고온에 노출될 경우 일부 팽창현상이 보이지만 기본적으로 비활성물질이기 때문에 안정하다고 볼 수 있다. 또한 규소 화합물의 특징적으로 나타나는 광택의 발생이 문제가 될 것으로 우려되나 농도 조절을 통해 해결할 수 있다.

농도 조절을 위해 사용되는 용제는 KSE 500 STE로 높은 결형성률을 보이는 silicic acid ethyl기반의 탄성강화제이다. KSE 500 STE는 ethyl을 용매로 사용하기 때문에 silicic acid가 암석내부로 스며들어갈 수 있으며, 암석내부로 침투한 silicic acid는 무정형의 silica-gel로 변환되고 ethyl는 해리되어 증발한다. 즉, 강화처리제와 유사한 패턴으로 반응함을 알 수 있다. Silicic acid 구성의 용제(KSE Filler A)와 용매(KSE 500 STE)는 규산염광물이 주를 이루는 암석의 구성광물과 동일한 성분으로 암석의 빈 공극을 채우는 충전물질로 작용한다. 본 충전제의 기준 희석농도는 70g/100



**Figure 2.** The filling of examined Analysis. ㉠ Dilution of the filler depending on weight ratio. ㉡ Injection of the filler for evaluating contraction rate. ㉢ The analysis of the filler properties using ion chromatography.

ml이며 겉보기 밀도는 약  $0.78\text{kg}/\ell$  (DIN 52110), 충전밀도는 약  $0.9\text{kg}/\ell$  (DIN ISO 787/11)이다.

#### 2.1.4. KSE Filler B

Filler A와 유사한 조성을 가진 물질로 silicic acid ethyl (SAE) module system 반응에 의해 생성된다. 성분의 99% 이상이 quartz powder로 흰색빛깔을 띤다. 석영은 silica 또는 이산화규소( $\text{SiO}_2$ )로 구성되며 많은 변종이 광범위하게 분포하는 광물로 알려져 있다. 화강암, 화강섬록암, 응회암 같은 silica가 많은 규장질암의 주구성 광물로 풍화에 대한 저항력이 매우 강하며, 사암 및 다른 쇄설성암에 농집(thickening)되는 경향이 있다. 이러한 농집 성질을 이용하여 충전개념을 적용한 것이 Filler B로 본 충전제의 기준 희석농도는  $40\text{g}/100\text{ml}$ 이다. 겉보기 밀도  $0.8\text{ kg}/\ell$ , 충전 밀도  $0.8\text{kg}/\ell$  (DIN ISO 787/11)이다. Filler A와 같이 KSE 500 STE를 용매로 사용한다.

## 2.2. 충전주입방법

### 2.2.1. Semiliquid법

판상박리가 확대되거나 열린 공극이 발달한 부위를 충전하기 위한 방법으로 용제의 양을 늘려 고농도로 충전제를 만들 경우 semiliquid상을 형성하게 된다. semiliquid상 충전제는 스틱이나 헤라를 이용하여 공극부를 충전하며, 이를 통해 내부를 강화시키는 방법이다.

### 2.2.2. Injection법

석영안산암질 응회암인 감은사지석탑은 close pore상태의 공극이 발달되어 있다. 따라서 부재 표면을 드릴링( $\text{Ø}3\text{ mm}$ )한 후 실리콘 튜브를 고정하여 압축주사기로 내부를 충전하는 방법이다.

## 2.3. 실험방법

본 실험은 공극을 효과적으로 충전하여 암석 강화와 내부응력에 따른 박락부위 보강 및 강도향상을 목적으로 한다. 충전제 선정에 의해 첫째, 이온크로마토그래피(DIONEX社 DX-500)분석을 통해 반응생성물이 확인된 충전제는 추가 실험에서 제외하였다. 둘째, 가장 양호한 결과를 보인 충전제는 semiliquid법과 injection법으로 공극 샘플을 충전하였다. 셋째, 파괴분석 및 비파괴분석 결과 injection법이 효과적인 것으로 확인되어 노두시편에 충전실험을 실시하였다.

### 2.3.1. 충전제 물성분석

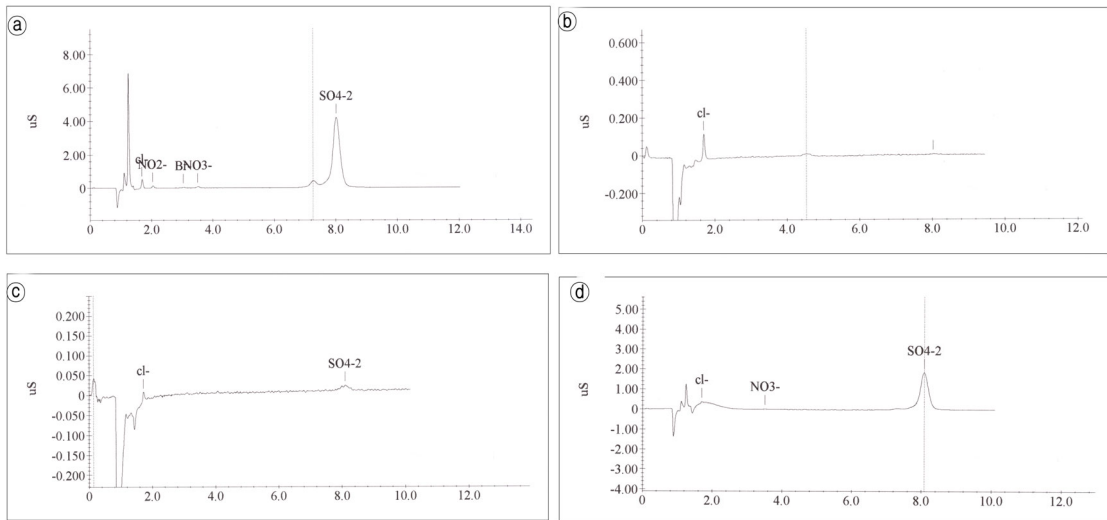
충전제 경화 후 수축정도를 확인하기 위해  $5\text{cm}(\text{Ø}) \times 5\text{cm}(d)$  크기로 코어링 하여 내부에 충전제를 주입하였다. 시편은 자연조건하에서 1, 5, 10, 15, 30일 경과 후 수축정도를 확인하였다. 또한 충전제의 반응생성물을 확인하기 위해 이온크로마토그래피(DIONEX사 DX-500)분석을 병행하였다(Figure 2-3, Table 2).

Injection cream은 경화되는 과정에서 대기 중의 수분을 흡수하여 액상으로 변하는 성질을 나타냈기 때문에 충전에 적합하지 않다고 판단되어 분석에서 제외시켰다.

분석결과 2K injection paste, borehole suspension은 반응물로 황산화물( $\text{SO}_4$ )이 검출되었으며, 약간의  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ 도 검출되었다. 이런 물질이 충전제로 선정되어 보존처리에 사용될 경우 수분과 반응하여 수용성 염의 형태로 암석에 화학적 손상을 가중 시킬 것이다<sup>13,14</sup>. 따라서 실험 결과 반응생성물이 미량 검출된 KSE Filler A, B 두 종류에 한해 충전효과 실험을 실시하였다.

### 2.3.2. 시편조건 및 제작

시편은 채석산지에서 확보한 동일 석재를 판석으로( $150 \times$



**Figure 3.** The results of the ion chromatography analysis. (a) 2K injection paste, (b) KSE filler A, (c) KSE filler B, (d) Borehole suspension.

**Table 2.** The results of the ion chromatography analysis.

	cation (ppm)						anion (ppm)				
	Li	Na	NH <sub>4</sub>	k	Mg	Ca	Cl	NO <sub>2</sub>	Br	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>
2K Injection Paste	0.087	5.65	0.616	2.38	0.391	0.001	0.27	0.14	0.08	0.15	5.43
KSE Filler A	0.008	1.05	-	0.282	0.025	0.001	0.06	-	-	-	-
KSE Filler B	0.024	1.37	0.016	0.032	0.002	0.003	0.01	-	-	-	0.023
Borehole Suspension	0.001	1.44	-	0.433	0.01	0.001	0.2	-	-	0.04	2.65



**Figure 4.** The sample is consists of dacitic tuff. (a) Producing samples for experiment, (b) The form of the sample internal opening, (c) The range of the sample internal opening.

150×70mm) 제작한 후 인공 요철을 만들어 공극을 형성하고 수지로 두 판석을 접합하였다. 이 후 코어링 작업의 용이성을 위해 두께 30mm가 되도록 얇게 제단하였다(Figure 4).

### 2.3.3. 시편 공극측정 및 충전제 주입

충전 전 공극 범위를 파악하고 내부 상태를 기록화 하였다. 이를 위해 시편표면에 그리드를 설정하여 초음파탐상 및 압

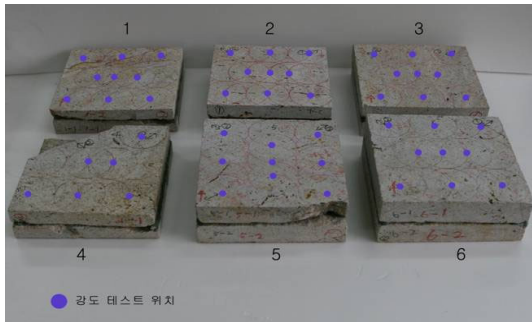
석용 슈미트해머를 이용, 충전 전 값을 측정하였다(Figure 5).

충전제 혼합비율은 article 에 제시된 KSE 500 STE + KSE Filler A · KSE Filler B를 100:40(중량비)로 혼합하여 주입하였다. semiliquid법으로 주입한 경우 100:100의 혼합비를 준수하였다. 1번과 2번 시편은 injection법으로 내부를 충전하였으며, 3, 4, 5, 6번 시편은 semiliquid법을 이용하여 내부를 충전하였다.





**Figure 5.** The verification of filling effects. (a) The sample images of the ultrasound exploration. (b) The sample measurement by Schmidt hammer. (c) The filler injection to the internal of the sample.



**Figure 6.** The measure location of the sample Schmidt hammer.

### 3. 결과 및 노두적용실험

#### 3.1. 충전결과 분석

충전제 주입 후 상온에서 약 25일 경화시켰으며, 야외조건을 조성하기 위해 24시간 강우에 노출시켰다. 시편 충전 후 초음파탐상과 암석용 슈미트해머를 이용하여 강도 변화를 측정하였다(Figure 6-7). 초음파와 슈미트해머를 이용한 내부관찰 외에 시편을 절단하여 확인된 단면으로 내부공극 충전 상태를 확인하고, 그 효과를 검증하였다.

위 표와 같이 일부 시편을 제외하고 충전제 주입 후 강도가 상승하였다. Injection법을 적용한 ②번 시편은 일률적 강도 상승을 보이나 ①번 시편 일부 지점은 강도가 떨어졌다. 이런 경우 다른 시편에서도 일부 확인되었으나 슈미트해머 테스트 시 규격화된 방법을 적용하지 못한 오류로 판단된다. 따라서 동일지점 5회상 타격한 평균값과 초음파탐상, 시편 절단 결과를 비교하였다. Semiliquid법으로 처리 시 주입구에서 멀어질 경우 강도 상승은 크게 기대할 수 없음을 알 수 있다. Injection법은 semiliquid법과 비교 시 저농도이고, 주사기의 압력을 이용하여 주입하기 때문에 내부 확산력이 높

아 일률적인 강도 상승을 보여주고 있다. 이는 초음파탐상결과와 일치하고 있어 injection법을 적용하여 공극내부를 충전하는 것이 효과적임을 알 수 있다(Figure 8).

다음은 강도 테스트 후 내부충전 현황을 보기 위해 시편을 절단한 그림이다(Figure 9).

Figure 9와 같이 semiliquid법(5번 시편) 보다 injection법(1번 시편)으로 내부를 충전한 샘플단면이 훨씬 깨끗하며 완전히 충전된 것으로 판단된다. Figure 9 (c)에서 관찰되는 이물질은 두 편을 접합할 때 사용된 에폭시수지이다.

#### 3.2. 노두 공극부 충전 및 열적외선 촬영

채석산지에서 확보한 암석의 내부공극에 선행실험을 통해 선정된 충전제와 주입방법으로 충전하였다. 공극이 확인되어 실험이 가능한 노두 시편은 4개이며 충전 후 37일 가량을 경화시켰다. 충전효과를 확인하기 위해 충전 전·후 열화상 카메라(Fire system ThermoCAM PM595)로 촬영하여 온도변화를 분석하였고 코어링을 통해 충전된 면을 육안으로 확인하였다(Figure 10,11).

Figure 10, 11과 같이 injection을 통한 충전제 주입은 1 mm내외의 균열까지 충전 가능하였다. 또한 내부 충전 후 열화상카메라를 이용한 온도변화를 살펴본 결과 공극축소에 따른 온도하강이 관찰되었다.

### 4. 보존처리

감은사지서탑에 나타나는 내부공극은 물리화학적 풍화의 결과로, 특히 상층기단부 동면과 남면에서 두께가 약 5 mm인 판상박리와 내부공극이 확인되었다. 판상박리 부분의 경계면만 보존처리 할 경우 빗물이나 오염물질이 지속적으로 침투하여 판상박리부 및 내부공극이 확대될 우려가 높다. 또한 석탑 전반에 나타난 공극은 부재 배부름현상과

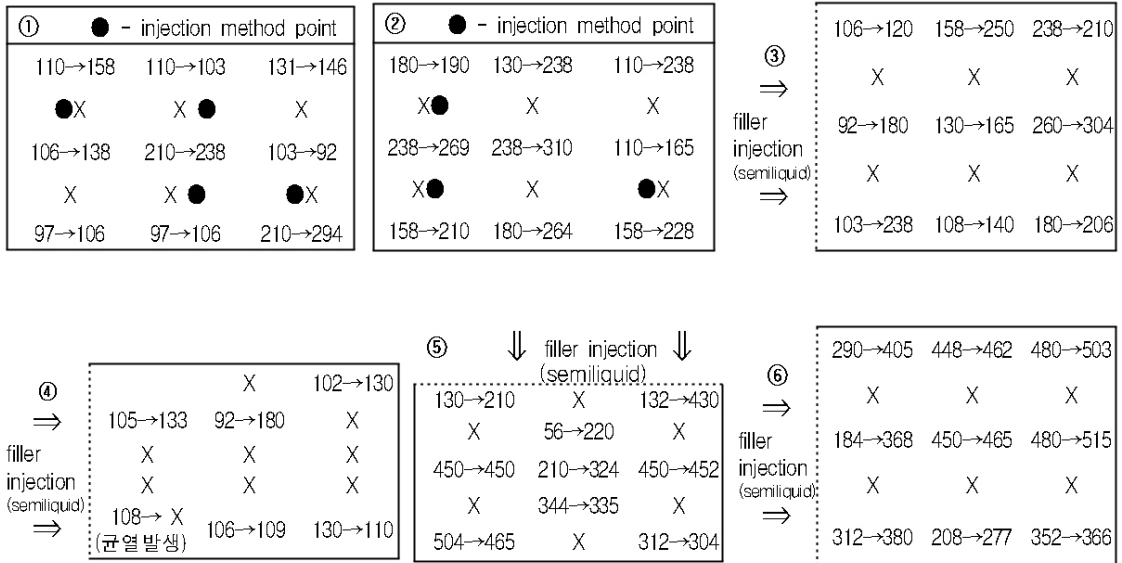


Figure 7. The change of estimated pressure strength by Schmidt hammer before and after of strength (kgf/cm<sup>2</sup>).

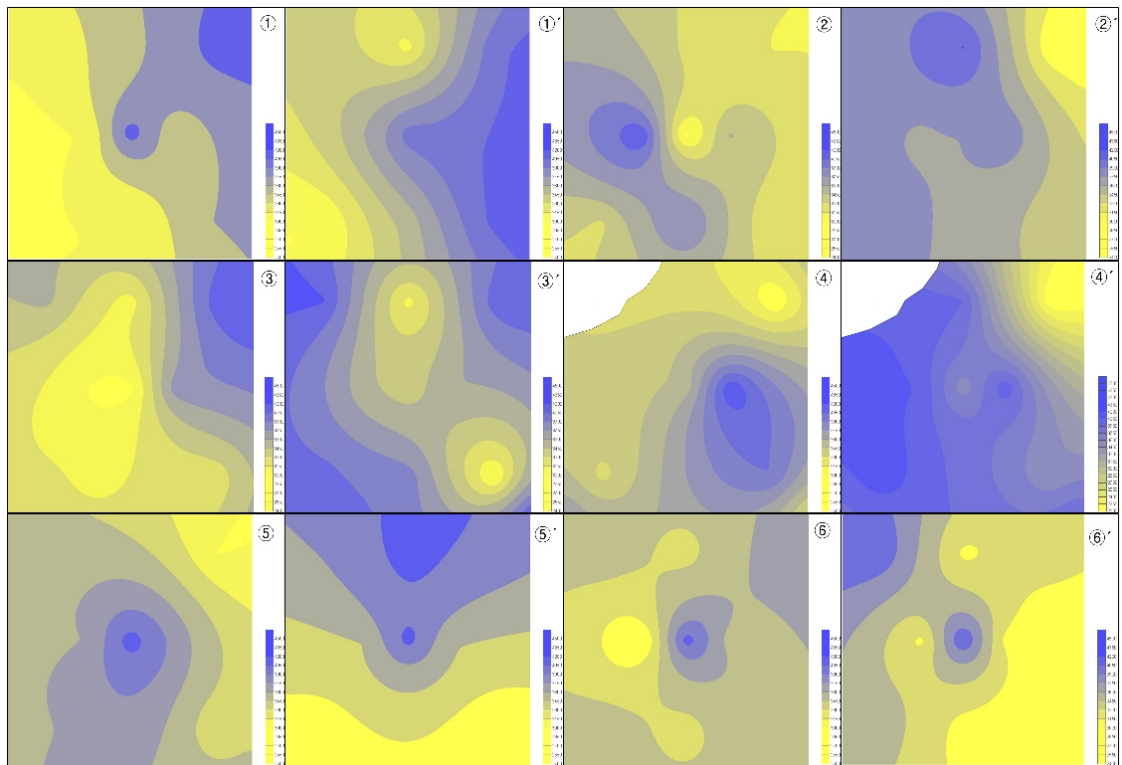


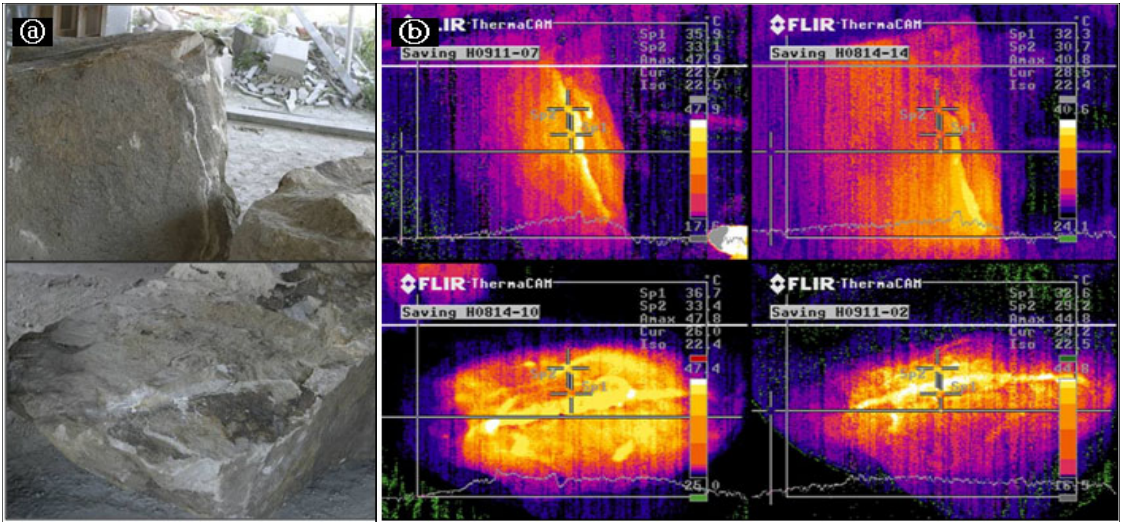
Figure 8. The results of ultrasound exploration for the change(m/s). ①~⑥ (filling before), ①'~⑥' (filling after).



**Figure 9.** Checking the cross section of the sample after filling. (a) Sample cut, (b) Sample No. 5; semiliquid method, (c) Sample No. 1; injection method.



**Figure 10.** (a) Injection method of outcrop sample filler. (b) and (c) Checking the results of filling.



**Figure 11.** Outcrop sample test. (a) The area of the outcrop sample filling. (b) The results of the outcrop sample area before and after filling by using an infrared thermography recording.

표면손실을 초래하기 때문에 내부를 충전하여야 한다. 때문에 충전제를 이용하여 내부의 빈 공간을 충전시켜 부재로부터 박리된 부위의 결합력을 회복시킨 후 매움제로 마감하였다. 내부 충전은 실험결과에 따라 KSE 500 STE + KSE Filler A · KSE Filler B를 중량비로 혼합, 충전하였으며 KSE 500STE와 Filler 혼합비는 10:2~10:40까지 내부공

극 형태에 따라 처리하였다.

서탑 전체표면적은 252.6m<sup>2</sup>이며 내부공극이 발달한 부분은 약 17.77m<sup>2</sup>(7.03%)로 내부를 채우는 충전작업이 요구된다. 인젝션을 통해 주입된 충전재량은 동면 4,068ml, 서면 7,776ml, 남면 9,301ml, 북면 3,740ml로 총 24,885ml의 충전제가 서탑의 내부공극을 충전하였다. 충전하는 과정에서



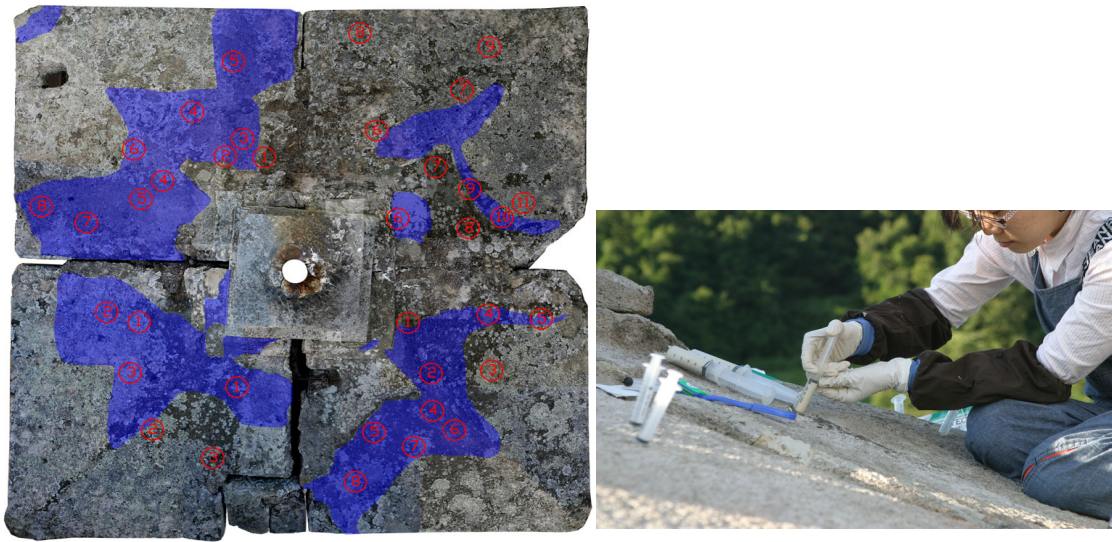


Figure 12. The range of opening pores for the 3rd storied roof underpinning stone and filling point.



Figure 13. The range of opening pores for Three-storied Stone Pagoda at the West of Gameunsaji Site from the left to the east, west south, north side view.

open pore가 형성된 내부공극의 경우 충전제가 토출되는 경우도 있었으며 또한 층상절리가 발달하여 탁음이 공극으로 확인되는 경우 충전작업을 실시할 수 없었기 때문에 공극면적과 실제 충전제 사용량은 약간의 차이를 보이고 있다. Figure 12는 3층옥개석 낙수면 공극범위(40,877cm<sup>2</sup>)와 충전 포인트를 도식한 것으로 3,663ml 충전제가 사용되었다.

## 5. 결론

감은사지서삼층석탑의 보존처리는 사업단이 2004년 구성된 후 보존처리 현장시설 구축, 과학적 조사, 다양한 연

구를 통해 2006년 6월 해체를 시작하여 2008년 6월까지 부재 보존처리와 복원작업을 실시하였다. 공극부 충전은 세척과 함께 서탑 보존처리에 가장 많은 시간이 소요된 작업이며 또한 중요한 공정이었다. 충전제 선정에서 보존처리까지의 내용을 정리하면 다음과 같다.

1. 서탑 전체표면적은 252.6m<sup>2</sup>이며 이중 내부공극이 발달한 부분은 17.77m<sup>2</sup>(7.03%)로 내부를 채우는 충전작업이 요구된다.

2. 충전제 선정은 인공으로 조성한 공극샘플과 신석계 작용으로 확보한 노두시료 중 공극이 확인된 부분에 대한 적용을 통해 효과적인 충전제를 선정하였다.

3. 충전효과 검증은 이온크로마토그래피, 초음파탐사, 슈미트해머, 열적외선촬영 등의 비파괴 조사와 단면관찰과 같은 파괴조사를 병행 실시하였다.

4. 충전제는 기본적으로 암석과 유사한 성질을 가진 재료를 선정함으로써 처리 후 재질적 안정성과 이질감을 최소화하였으며 2차 물리·화학적 손상 역시 최소화 될 수 있는 KSE 500 STE + KSE Filler A · KSE Filler B 혼합 충전하였다.

5. 서탑 공극부 충전작업은 공극면적 177,710cm<sup>2</sup>(17.77 m<sup>2</sup>)를 약 8개월의 보존처리 기간 동안 인젝션 방법으로 24,885mℓ를 충전하여 약화된 석질을 강화시킴과 동시에 내구력 향상과 구조적 안정감까지 부여하였다.

### 참고문헌

1. 국립문화재연구소, 한국문화재보존과학회, "감은사지삼층 석탑 강화처리제 선정 및 신석 제작용 석재연구". p8, (2006).
2. 이창섭, "화강암질암의 풍화에 따른 광물학적 변화와 공학적 특성변화". 한국암석학회 학술발표회 논문집, p24-27, (2009).
3. 국립문화재연구소 · 경주시, "감은사지서삼층석탑수리 보고서". p269, (2010).
4. 조연태, 김창석, 강대일, 이명희, "회암사지 선각왕사비 보존처리". 회암사지 선각왕사비 보존, 국립문화재연구소, p11-41, (2001).
5. 국립문화재연구소, 한국문화재보존과학회, "감은사지삼층석탑 강화처리제 선정 및 신석 제작용 석재연구", p143-178, (2006).
6. 국립문화재연구소, "석조문화재 보존 및 평가기술 연구", (2008).
7. 김사덕, 김순관, 김창석, 홍정기, 강대일, 이명희, "석조문화재 에폭시수지 개발 시험연구". *보존과학연구*, 20, p139-155, (1999).
8. 강상용, "석조문화재의 보존처리를 위한 가압침투 공정과 처리제 개발". 공주대학교 석사학위논문, p5-8, (2008).
9. 양희제, "익산 미륵사지석탑의 훼손도 평가와 보존처리 적용실험". 공주대학교 박사학위논문, p173-194, (2009).
10. 김정진, 최승원, 강용수, 원중욱, 김사덕, 장윤득, "비파괴 분석법을 이용한 강화제 처리 전후의 특성 변화 연구". 한국암석학회 학술발표회 논문집, p189-191, (2008).
11. 김성호, 김준영, 장유진, 강용수, 원중욱, 김사덕, 김정진, "석조 문화재 보존을 위한 강화제 처리 후 암석의 물리적 특성 변화 연구". 한국암석학회 학술발표회논문집, p108-110, (2009).
12. Remmers, Technical Information Sheet Article No. 0476, 0709, 0571.
13. Backbier, L., Rousseau, J., "Analytical Study of salt migration and efflorescence in a mediaeval cathedral". *Analytica Chimica Acta*, **283**, p855-867, (1993).
14. 도진영, "석조기념물 흑색표면층에 존재하는 염의 특성과 기원". *보존과학회지*, **15**, p15-25, (2003).