CONSERVATION STUDIES 29

석조문화재 보존처리제의 현황 조사

Research on present statue of conservation materials in the stone cultural heritage

송치영 · 한민수 · 이장존 · 전병규

석조문화재 보존처리제의 현황 조사

– '접착 · 충전제와 발수 · 강화제' 를 중심으로 –

Research on present statue of conservation materials
in the stone cultural heritage
– Focus on adhesive, filler, repellent, consolidant materials –

송치영 · 한민수 · 이장존 · 전병규 (국립문화재연구소 보존과학연구실)
Song Chi-Young · Han Min-Su · Lee Jang-Jon · Jun Byung-Kyu
(National Research Institute of Cultural Heritage)

<Abstract>

Precise scientific-diagnosis for preserving stone cultural properties has been well-advanced, but research on proper methods for conservation, restoration and repair is still in early stage.

Accordingly it is quite difficult to establish conservation treatment methods compatible to unique characteristics and environments of each cultural property. We tried to select most compatible conservation materials through thorough assessment of conservation materials in current use. This research is focused on conservation and restoration materials except cleaner, which are used as adhesive, filler, repellent and consolidant. Conservation treatments for stone cultural properties were first tested in 1960's and have been carried out by various methods under relevant organizations and conservation treatment companies since. We investigated present status of conservation materials being used for cultural properties. Based on these data, we will look through types and properties of the conservation materials to figure out existing problems.

Among many kinds of resins, the ratio of conservation materials used in cultural properties is very low. Therefore, new conservation materials equipped with proved long-term stability should be developed as soon as possible.

Ⅰ. 서 언

석조문화재의 보존을 위해 풍화상태에 대한 과학적 정밀진단은 많이 이루어지고 있는 실정이다. 그러나 보존처리의 방법과 복원, 보존수리 등에 관한 연구는 아직 미흡한 단계이고, 문화재마다 각각의 특성과 환경에 맞는 보존처리 방법이 실행되어야 하므로 명확한 처리 방법을 수립하기에는 어려움이 따른다. 따라서 보존처리제의 사용 현황을 정확히 인식하고 경향을 파악하여 보다 신중한 약품을 선택하고자 1980년대부터 현재에 이르기까지 문화재 보존처리에 사용된 처리제 현황을 조사하였다. 연구대상은 세정을 제외한 보존과 복원 처리제로 접착제, 충전제, 발수제, 강화제를 중심으로 하였다.

석조문화재의 보존처리는 문화재가 파괴될 때마다 필수적으로 이루어졌지만, 정확한 지침이 없을 뿐더러 수지에 대한 연구는 미비하여 대부분이 유럽의 제품을 사용하고 있는 실정이다. 그러나, 자국의 암석에 맞는 처리제를 사용하는 것이 최선이므로 기존에 사용되었던 처리제의 단점을 개선하는 것이 필수적이다.

석조문화재 보존처리는 국립문화재연구소에서 1960년대부터 시도하여 그 이후에도 각 기관과 보존처리 업체에서 다양한 연구방법으로 시행되고 있다. 이러한 자료를 바탕으로 문화재 보존처리제의 현황을 조사하였고, 몇 가지 수지들에 대해 종류와 간략한 특성들을 살펴본 후 문제점이나 고려할 사항에 대해 요약 정리하고자 한다.

Ⅱ. 보존처리제 종류와 사례

1. 석조문화재 보존처리제의 종류

석조문화재의 보존처리는 2005년 개정된 「문화재수리표준시방서」와 각 보존기관에서 발간된 수리보고서의 내용을 토대로 하였으며, 처리 과정은 크게 상태조사와 세정, 접착, 복원, 충전, 강화, 발수, 고색처리, 수리 후 정리로 나뉜다. 수리 전 상태조사는 육안조사와 문헌, 지화학 분석 등을 통해 풍화훼손도를 진단하는 것이고, 그 후 세정과 접착, 복원과 충전, 강화, 발수 등의 처리가 이루어진다. 또한 보존처리 후에는 장기적으로 석조문화재의 처리 전 상태와 비교 · 분석한다. 이 때 그 동안 사용되었던 보존처리제와 방법에 대한 효과를 검증할 수 있으며, 각 수지에 대한 문제점을 고찰하고 향후 개선방향에 대해서도 모색한다.

보존처리제는 주로 접착과 보강, 충전, 강화 등을 위해 사용된다. 보존처리에 사용되는 수지는 문화재에 아무런 영향을 끼치지 않고, 가역성과 내구성이 있어야 하며, 작업자에게 유해하지 않아야 한다.

석조문화재의 보존처리는 에폭시계열과 실리케이트 계열, 아크릴 계열, 이소시아네이트 계열 수지, 비닐계 고분자 화합물을 바탕으로 하는 보존처리제가 사용되고 있다. 그 중에서 접착이나 충전의 용도로는 에폭시계열이 일반적이고, 실리케이트와 아크릴 계열, 이소시아네이트 계열 수지는 주로 강화 및 발수의 용도로 사용되고 있다.

세계 보존과학계에서는 에폭시 수지가 1950년대 문화재 수리복원 재료로 사용되었고, 1970년대부턴 송광사 보수공사에 사용되면서 우리나라에서도 목조나 석조물의 수리복원 재료로 광범위하게 사용되기 시작하였다. 유럽에서는 1970년대 이후 강화용으로는 실리케이트 계열와 아크릴 계열 처리제를 사용하였으며, 충전용으로는 포틀랜드 시멘트를 주로 사용하였다.

에폭시계열 수지는 가장 용도가 넓으며, 접착강도가 우수하고, 수축팽창에 대한 안정성이 있어 석조문화재 균열부위의 충전이나 파손, 접착보강에 많이 사용된다. 또한 단독으로 사용되지 않고, 목적에 따라 희석제, 가소성 첨가제, 점도 조절제, 충전제 등을 첨가하여 사용한다. 보통 접착과 충전의 기능을 동시에 담당하므로, 첨가제를 이용하여 수지의 농도를 조절하는데 이는 전문가들의 숙련된 경험으로 이루어진다. 그러나 에폭시 수지는 자외선과 같은 주변 환경에 따라 황변현상과 균열이 발생될 수 있으므로 수지의 선택이나 작업에 있어 주의를 요한다. 또한 경화제를 첨가하지 않으면 기후나 온도에 관계없이 장기간 보존이 가능하며, 일반적으로 경화제를 첨가하여 열경화성의 물질로 변화시킨 상태로 사용된다. 에폭시 주제를 반응시키는 경화제로는 지방족 아민계, 방향족 아민계, 폴리아미드 아민계, 폴리아미드계, 산 무수물계 등 종류가 다양하나, 석조문화재 수리복원에 주로 사용되는 경화제는 상온에서 경화되고 비교적 독성이 적은 폴리아미드 아민계이다.

아랄다이트 AW106은 점성의 액체로 각종 경화제와 여러 배합비율을 이용하여 사용된다. 경화제는 HY837이 많이 사용되며, 점성이 높아 주로 접착이나 충전에 첨가제와 함께 사용된다. 아랄다이트 AY103은 점성이 낮아 접착하기 전 해당 면을 경화하는데 주로 사용된다.

국립문화재연구소 보존과학연구실에서는 1998년부터 황변현상 등의 문제점을 해결하고, 기존 수지보다 우수한 에폭시수지 개발시험을 착수하여 2종류의 에폭시수지(L-30, L-40)를 개발하였고, 현재는 실리케이트와의 결합 구조를 가진 수지도 연구 · 개발 중에 있다.

실리케이트계열 수지는 가수분해 및 축합반응으로 상온에서 공기 중의 수분과 반응하여 무기 고분자인 폴리실록산 유도체를 생성시키는 안정된 화합물이다. 생성된 실리콘 유도체는 열적 및 화학적으로 매우 안정된 물질로서 발수효과와 표면강화, 열에 대한 저항력 증가, 기계적 강도를 증가시킨다(조연태, 2003).

에칠실리케이트는 실리케이트 입자가 공극을 차단하지 않고 암석의 모세관을 통해 침투하면서 대기 중 수분과 반응하는데 그 과정에서 에탄올은 증발하고, 공극 속에 실리카겔만 남아 공극을 메우는 것이다. 무엇보다 실리카는 암석의 구성성분인 석영과 동일한 성분이므로 암석과 반응 후 부작용이 발생하지 않고, 열이나 산화에 안정한 성질을 갖고 있다. 에칠실리케이트는 적절한 가수분해와 적당한 실리카 함량을 포함할 때 세라믹의 형태를 가지는 내열성의 물질로 사용되며, 방청성을 가진 도막을 형성한다. TEOS(에칠실리케이트)는 금속 Silicon과 무수에탄올의 합성에 의해 다음과 같은 식이 만들어진다.

$$Si + 4C_2H_5OH \rightarrow Si(OC_2H_5)_4 + 2H_2 \uparrow$$

TEOS

이는 강화처리나 발수용으로 많이 사용되며, 문화재 분야에서 이러한 약품은 일반적으로 강화와 발수 처리를 병행한다. 고분자 실리콘(silicon)은 구성 성분에 따라 에칠실리케이트(ethyl silicate)와 실란(silanes)계, 실록산(siloxanes)계로 구성된다. 실란계는 침투성을 가장 중요한 물성으로 하여 구조가 조밀한 부분의 침투성 발수제로 많이 사용되며, 대표적으로 isobutyl ethoxy silane, isooctyl ethoxy silane 등을 꼽는다. 실록산 올리고머계는 표면 발수성을 향상시키기 위한 역할을 하므로 비교적 기공이 큰 부분에서 이용되며, 내후성도 우수하므로 석재나 콘크리트 외벽에 많이 이용된다.

발수제는 액상의 유기질 고분자 물질로 콘크리트 구체에 도포하면 공극내부에서 경화하여 발수성을 부여함으로써 외부에서 침투하는 물을 차단하는 원리이다. 석조 건축물엔 실리콘 처리에 의해 통기성이 있는 발수 피막이 구조물의 표면에 형성되는 것으로 비가 내렸을 경우에도 젖지 않고 백화현상을 방지할 수 있다. 또한 몰탈 내부의 수분 침입을 방지할 수 있어 함유수분의 동결 · 융해 피해를 최소화할 수 있다. 이와 같은 처리제는 Silres BS290이 대표적이며, 유기용제로 희석한 발수처리제로써 침투력이 좋고, 높은 알칼리성 저항력을 가진다.

아크릴 계열 수지는 투명성과 내후성, 내산성 등이 우수하며, 자외선과 열, 기후에 대한 저항성

이 커 1980년대 이전에 많이 사용되었고, 최근에는 아크릴계 고분자가 활용되어 여러 제품이 다양하게 개발되고 있다. 과거에는 paraloid B-72와 cyanoacrylate가 대표적으로 사용되었으나, 처리 후 가역성이 없고, 표면 코팅으로 암석의 공극 속 수분이 빠져나올 수 없으며, 자외선이나 열, 기후에 대한 저항성이 커 옥외에서 주로 사용된다. 그러나 비가역성이라는 점과 표면 코팅으로 인한 광택이 있을 수 있어 기존 제품에 대해서는 문화재 분야에서 잘 활용되지 않았다. 따라서 최근 poly(methyl methacrylate)라는 고분자가 물성을 조절하여 단점을 개선하고 있으며, 이는 투명성과 내화학성, 기계적 성질이 우수하여 다양한 종류의 모노머를 공중합한다. methyl methacrylate(MMA), acrylic acid(AA), methacrylic acid(MA), ethyl acrylate(EA), ethyl methacrylate(EMA), methacrylic acid(MA), butyl methacrylate(BMA) 등이 대표적이다.

접착과 충전에는 에폭시계열 수지가 가장 많이 사용되며, 아랄다이트 CY230, AW106, AY103, SV426, SV427 등이 있으며, 그 밖에도 DR, GY Series가 있다. 주제마다 각각의 경화제와 첨가제를 달리 혼합하여 처리한다. 또한 충전의 경우는 접착제에 다양한 충전재료와 첨가제를 혼합하여 물성과 점성을 조절하여 사용하게 되며, 폴리머 시멘트 몰탈도 최근에 충전제로 이용된다.

접착 및 충전에 사용되는 시멘트 계열 재료는 오래 전 이집트의 피라미드 축조부터 사용된 재료로써 문화재 보수에 많이 사용되고 있다. 현재에 이르러 기존 시멘트나 콘크리트에 고분자를 결합한 폴리머 시멘트콘크리트를 사용하고 있는데, 이는 시멘트와 폴리머를 혼화해서 만든 것으로 보통 콘크리트와 달리 폴리머 피막이 형성된 이후에 수분증발을 차단한다. 이 보수재료는 특정 고분자 화합물을 혼합하여 원 재료의 물성을 개선시킨 것으로, 동결융해에 대한 저항성이 크며, 접착력과 내산성이 우수하고, 인장강도, 휨강도 등이 높다. 또한 점도 조절이 용이하여 틈새의 폭에 관계없이 작업할 수 있다는 장점이 있으나 경화 시 체적변화가 있고 가격이 비싸다는 단점이 있다(주부기, 2002). 국내 · 외에서 석조문화재 보수로 균열이나 틈을 메우기 위한 충전 재료로 활용되고 있으며, 일본과 캄보디아 앙코르와트 유적 보존처리 시에 일반적으로 사용된다.

넓은 부위의 이격이나 절리는 폴리우레탄폼(Polyurethane Foam)으로 충전하는데, 이는 M.D.I(Methyi Dlisociante)와 P.P.G(Poly Propilene Glcols) 발포제 촉매, 계면활성제 및 기타 첨가제를 혼합하여 만든 발포제이다. 흡수율이 낮고, 압축강도가 우수하며, 경화 후 물, 산, 용매, 미생물발생에 대한 저항성이 높다.

강화용 수지는 아크릴계와 실리케이트계가 주로 사용되며, 아크릴 계열로는 Paraloid B-72, Eurostac, Duracyl Plus 등이 있고, 실리케이트 계열로는 유럽에서 많이 상용화되고 있는 Wacker, Remmers 제품을 대표로 그밖에 Tegovakon, Synton X-30, SH 등도 사용된다. 발수용 수지는 실란계열의 AD25, SS-101, 실록산계의 DWR, Silres BS 290L (Wacker)이 대표적이다 (Table 1).

Table 1. The variety of conservation materials and general properties

용도	제품명	계열	국가 및 회사	특 징
접착·충전용	Araldite AW106	Epoxy	CIBA-geigy (스위스)	• 일반적으로 사용됨. • AW106:HY837 = 1 : 1 • AW106:HY953 = 1 : 1
	Araldite AY103 Araldite SV 426, 427	Epoxy Epoxy		• 양생기간 동안 습기에 민감함. • AY103:HY956 • 충진이나 보강에 주로 사용. • SV427:HV427 = 1 : 1 • SV426:HV426 = 10 : 2
	Araldite XN1023	Epoxy		• XN1023:XN1024 = 10 : 1
	DR429	Epoxy		• DR429:DH429
	GY253	Epoxy		• 경화제 : Epomate B-002
	L-30, L-40	Epoxy	(주)풍림산업 (한국)	• 색상변화가 적고, 물성이 우수함. • 현장에서 가장 많이 사용됨. • 주제와 경화제 사용.
	HXTAL NYL-1	Epoxy	Conservation Materials Ltd.(미국)	• 낮은 점도와 무황변현상. • 주제 : 경화제 = 3:1
	Cyanoacrylate PSNY-6	Acryl-base Isocyanate base	-	• 순간 접착제로 이용 • 다공질 석재에는 부적합
	Polymer Cement Mortar	Cement	JSA (일본)	• 앙코르와트 균열부위 충전 • 시멘트 몰탈 중합체 • 사암, 대리암 계통 암석에 주로 사용
강화용	Paraloid B72	Acryl-base	-	• 표면색상변화 • 먼지를 흡수하며, 발수효과가 짧음
	EUROSTAC 2501	Acryl-base	-	• 폴란드에서 사용(10차 ICDCS 참조) • 경화제 : Eurostac 2503

용도	제품명	계열	국가 및 회사	특 징
강화용	Duracryl Plus	Acryl-base	-	• Duracryl Plus, pulvis (Spofa-Dental)
	PMMA (메틸메타크릴레이트)	Acryl-base		• 앙코르와트 적용하며, 광택이 있다. • 파라핀, 석영입자, 유리입자, 석분혼합 사용
	Wacker Series	Silicate-base	Wacker (독일)	• 290L 제품은 발수효과 겸용
	Remmers Series	Silicate-base	Remmers (독일)	• KSE Series는 앙코르 와트에서 적용
	Tegovakon	Silane/ Siloxane base	Goldschmidt AG (독일)	• Tegovakon T (소수성) 테트라에톡시실란, 올리고머, 메틸실록산 혼합 • Tegovakon H (친수성) 테트라에톡시실란, 에탄올 포함 • Tegovakon V (친수성) 테트라에톡시실란, 올리고머, 에탄올 혼합
	Syton X 30	Silica acid	Wilmington (미국)	• 30% SiO_2 함유 • 황변현상으로 현재 사용하지 않음
발수용	AD25	Silane	미국	• 알콕시실란&메틸알콜 • 석조문화재 코팅제로 많이 사용
	SS-101	Silane	일본	• 알킬알콕시실란 • 발수경화제
	Silres BS290L	Silane/ Siloxane	독일	• 발수효과 우수
	DWR	Siloxane	국산	• 오르가노폴리실록산

2. 보존처리 사례와 분석

(1) 접착 및 충전

석조문화재 보존처리 방법은 크게 충전 및 보강과 접합하는 경우로 나뉜다. 부분적인 균열은 고분자 유기접착제로 충전하여 더 이상의 진행을 막는 반면, 물리적인 풍화로 인해 구조적으로 문제가 될 수 있는 열극이나 파손된 표면은 충전 · 보강할 필요성이 있다. 이때는 수지에 탈크와 실리카, 규회석, 포록, 운모, 석분과 같은 충전제를 첨가하는데, 충전제는 수지에 대한 점도 조절 뿐만 아니라, 수지의 특성도 변화시키기 때문에 종류와 양의 선택이 무엇보다 중요하다. 충전제 등 첨가제의 양에 따라 수지의 응집력이 저하되어, 접착불량이 발생될 수 있으며, 처리 후엔 장기간 야외에 노출되어, 건습의 반복과 수축 팽창의 반복으로 접착부위가 떨어질 우려가 있다. 이때에 사용되는 처리제는 주로 에폭시수지가 가장 많이 사용되며, AW106과 AY103,

SV427, L-30 등이 문화재 보존업계에서 대표적으로 사용되는 수지이다.

다양하게 사용되는 에폭시수지는 내수성과 내약품성을 비롯하여 화학적 저항력이 우수하고 각종 충전제를 다량 첨가할 수 있는 장점이 있어 국내 · 외에서 1950년대를 시작으로 문화재 수리복원 재료로 폭넓게 사용되었다(김사덕, 1999).

문화재 보수현장에서 주로 사용되던 아랄다이트가 문제점이 발생하면서, 국립문화재연구소와 (주)풍림산업은 공동으로 L-30을 개발하여 보존처리 현장에 권장하고 있다. L-30은 다른 에폭시수지에 비해 초 저점도형으로 사용이 간편하며, 황변현상이 없다. 또한 탄력성을 부여하여 충전용으로 개발된 L-40도 표면처리의 경우는 L-30을, 접착 및 충전용으로는 L-40 Fast를 사용하고 있다. 그러나 에폭시수지 및 충전제의 선정은 석탑의 여건에 맞게 고려되어야 한다. 비교적 파손이 큰 부위에 한해서는 AW106과 HY953을 사용하고, 보강부에는 이 수지에 탈크나 규회석, SiO_2 분말을 혼합하여 고정시킨다.

Araldite AW106, GY250은 접착성이 가장 우수하고 경화 시 수축이 적으므로 사용범위가 가장 넓은 수지이다. 종류가 다양하여 목재, 석재, 금속 등 다양한 재질의 접착제로 사용되며, F.R.P 용으로도 가장 적합하다. 그러나 경화 후 재용해가 불가능하다는 단점이 있다. SV427, XN1023는 인공목재합성수지용으로 많이 사용되며, 석조물의 보수복원 및 유물 보존처리용으로 활용되고 있다. 그러나 암석과 에폭시 수지 간의 서로 다른 재질의 파괴강도는 풍화에 노출되었을 때 들뜸 현상과 암석 자체의 손상을 초래할 수 있다. 또한 장시간 자외선에 황변되는 문제점이 있어, 최근 이러한 단점을 보완하는 연구가 진행 중이다.

충전용으로 사용되는 폴리우레탄폼은 경주남산탑곡마애조상군(2004)과 정림사지오층석탑(2007)에서 보존처리한 바 있으며, 옥개석의 이격은 폴리우레탄폼을 메움재로 사용하였다. 틈의 최 하단에 폴리에칠렌폼으로 받침을 만들고, 폴리우레탄폼을 발포한다. 그 위에 방수용 실리콘 수지로 충전하여 빗물이 유입되지 않도록 틈을 메우고, 2차로 석분을 혼합 충전하여 다른 석재표면과 동질감이 나도록 질감처리한다. 감은사지삼층석탑의 경우는 2006, 2007년에 에틸실리케이트 수지 KSE500STE를 이용하여 충전한 바 있다. 이러한 충전제는 유럽에서 사용하는 방법이나, 우리나라에서는 첫 시도되므로 수지에 대한 물성 규명과 암석과의 관계를 명확히 하기 위해 사전실험이 수반되어야 한다.

이러한 다양한 보존처리제를 각각의 특성에 맞게 사용하는 것이 무엇보다 중요하며, 그에 따른 문제점도 많이 발생하므로 기존에 처리된 사례를 중심으로 현 상태를 파악하고자 한다.

Table 2. Present statue of adhesive and filler of stone cultural properties

접착 및 충전				
처리년도	지정번호	문화재명	처리제	사용방법
1978	비지정	송광사 침계루	XN1023 : XN1024	–
1980	국보 10	실상사 백장암삼층석탑	AW106 : HY953 XN1023 : XN1024 Silicon Rubber KE17RTV	접착복원
1980	국보 198	단양적성비	AW106 : HY953	이탈부위 접착복원
1980	보물 499	낙산사칠층석탑	AW106 : HY953	이탈부위 접착복원
1981	보물662	화암사우화루	SV427 : HV427 GY252 : HY2962	–
1981	지방유형 4	신륵사탑	AW106 : HY953	이탈부위 접착복원
1982	보물49	나주동문외석당간	PSNY-6 GY252 : HY2962	이소시아네이트PSNY-6 20%희석 접착 : GY252 : HY2962(1:1)
	비지정	태강릉 병풍석	GY252, HY2962 AW106 : HY953 SV427 : HY427	강화 : GY252 : HY2962(1:1) 작은결손 : HY953(10:8) 큰결손 : SV427 : HY427(1:1)
	비지정	개풍현화사석등	쓰리본드 2083 AW106 : HY953	쓰리본드2083(1:1) 충전 : AW106 : HY953(1:1)
1983	보물546	청풍석조여래입상	AY103 : HY956 AW106 : HY953	접착면경화 : AY103 : HY956(5:1) 접착 : AW106 : HY953(10:8)
1985	비지정	청평사지대웅전앞석계단	AW106 : HY837	접착 : AW106 : HY837(100:35)
1986	시유74	행주대첩비	AW106 : HY837	접착 : AW106 : HY837(100:35)
1986	보물7	고달사원종대사혜진탑	AW106 : HY837	AW106 : HY837(100:35) 충전 : 폴리비닐알코올+규조토
1986	보물386	옥천교	AY103 : HY956 AW106 : HY837	접착면강화 : AY103 : HY956(10:2) 접착 : AW106 : HY837(100:35)
1988	보물219	개태사지석불입상	AW106 : HY837	AW106 : HY837(100:35), 충전보강 : 폴리비닐 알코올+규조토
1988	보물136	남산미륵곡석불좌상	AW106 : HY837	접착 : AW106 : HY837(100:35)
1988	보물1021	내원사석남암수석조비로자나불좌상	AW106 : HY837	접착 : AW106 : HY837(100:35)
1988	보물465	영천신월동삼층석탑	AW106 : HY837	접착 : AW106 : HY837(100:35)
1989	보물45	익산연동리석불좌상	AW106 : HY837	접착 : AW106 : HY837(100:35)
1989	국보64	법주사석연지	AW106 : HY837 AW106 : HY953 sv427 : HV427	접착및충전 : AW106 : HY837(100:35), AW106 : HY953(1:1) SV427 : HV427(1:1) +유리섬유(부직 그라스울)

접착 및 충전				
처리년도	지정번호	문화재명	처리제	사용방법
1989	보물1417	법주사희견보살상	AW106 : HY953 SV427 : HV427	충전 : AW106:HY953(1:1), SV427:HV427(1:1) +석분, 유리섬유(부직 그라스울)
1991	보물111	개선사지석등	AW106 : HY837	접착: AW106:HY837(100:35)
1991	보물679	광덕동석조보살입상	AW106 : HY837	접착:AW106:HY837(100:35)
1992	국보53	연곡사동부도	AW106 : HY837 SV427 : HV427	접착및충전 : AW106:HY837(100:35)+유리섬유 SV427:HV427
1992	국보54	연곡사북부도		
1992	보물154	연곡사서부도		
1992	보물153	연곡사동부도비		
1992	보물151	연곡사삼층석탑		
1992	보물152	연곡사현각선사탑비		
1992	보물116	영주석교리석불상	AW106 : HY837	접착 : AW106 : HY837(100:35)
1992	보물122	경주두대리마애석불입상	SV427 : HV427	SV427 : HV427(1:1)
1992	–	제주항몽순의비	AW106 : HY956	접착 : AW106 : HY956(100:18)
1993	보물981	태평2년명마애약사불좌상	AY103 : HY956 AW106 : HY953	접착 : AY103 : HY956(100:20) AW106 : HY953(1:1)
1993	시유78	초선대마애석불	AY103 : HY956, AW106 : HY953	접착 : AY103 : HY956(100:20), AW106 : HY953(1:1)
1993	시유109	석남사마애여래입상	AY103 : HY956 AW106 : HY953	접착 : AY103HY956(100:20), AW106 : HY953(1:1)
1995	보물388	회암사무학대사홍융탑	AW106 : HY953u	접착및보강 : AW106 : HY953u
1995	유형62	귀신사석탑	AW106 : HY837	접착 : AW106 : HY837(100:35)
1995	비지정	남원만복사지석인상	AW106 : HY837	접착 : AW106 : HY837(100:35)
1996	보물798	운주사원형다층석탑	AW106 : HV953K	AW106 : HV953K(1:0.8)+동질 석분 = 7:3 혼합
1998	보물581	월성골굴암마애여래좌상	AW106 : HW836	AW106 : HW836(6:4 or7:3)
1998	보물72	단속사지동삼층석탑	AW106 : HY953 SV427 : HV427	접착 : AW106 : HV953(1:1), 복원 : SV427 : HV427(1:1)
1999	국보39	나원리오층석탑	AY103 : HV956, AW106 : HY953	접착 : AY103 : HY956(100:20), AW106 : HY953(1:1)
1999	국보59	법천사지광국사현묘탑비	AW106 : HY837 AY103 : HY956	충전 : GY252 : HY2962 접착 : AW106 : HY837(100:35) 충전 : AY103 : HY956(100:20) 폴리비닐알콜, 규조토

접착 및 충전				
처리년도	지정번호	문화재명	처리제	사용방법
1984 2007	보물73	단속사지서삼층석탑	AW106 : HV953, SV427 : HY427	접착복원 : AW106 : HY953(1:1) 신석제작 : SV427 : HV427(1:1)
2000	보물77	춘천칠층석탑	AY103 : HY956 AW106 : HY953u AW106 : HY953k L-30	접착 및 균열충전 : L-30, AY103 : HY956(5:1) AW106 : HY953u(1:1)(+탈크) 충전 : AW106 : HV953k(석분)
2001	보물376	함양석조여래좌상	AW106	접착 : AW106
2001	보물139	월정사석조보살좌상	AW106 : HY953U AY103 : HY956	접착 : AW106 : HY953U(100:80) 미세결손 : AY103 : HY956(100:20)
2004	보물395	선암사삼층석탑	SEA#1	전기 프라이마 도포 4시간 후, 균열부위 충전 : SEA#1 주제:경화제 (100:20)
2005 ~2007	국보112	감은사지삼층석탑	AW106 : HY953 KSE500STE	접착 : AW106 : HY953(실리카P) KSE500STE(+Fullstöff A, B)
2006	국보6	중원탑평리칠층석탑	L-30	접착 및 충전, 복원 : L-30+탈크,실리카파우더,석분
2006	보물682	지보사삼층석탑	AW106 : HY953 L-30	접착 및 충전 : L-30+탈크, 실리카파 우더, 석분, 마이크로바룬 AW106 : HV953(1:1)
2006	보물225	신륵사다층석탑	L-30 AY103 : HY956 AW106 : HY837	균열충전 : L-30+탈크 : 실리카파우더(55:20) 표면도포 및 접착: AY103 : HY956(100:20) AW106 : HY837(100:35)
2007	보물474	벽송사삼층석탑	L-30+탈크, 석분	복원 및 충전 : L-30(탈크,석분)
2007	국보17	부석사무량수전앞석등	L-30+탈크, 석분	접착 및 충전 : L-30(탈크,석분)
2007	보물249	부석사삼층석탑	L-30+탈크, 석분	접착 및 충전 : L-30(탈크,석분)
2007	국보9	부여정림사지오층석탑	L-30 Paraloid B-72 폴리우레탄폼, 실리콘수지 충전	접착및충전 : L-30, Paraloid B-72 (석분,탈크,마이크로바룬) 옥개석이격충전 : 폴리우레탄폼, 실리콘 수지(석분혼합)
2007	국보40	정혜사지십삼층석탑	폴리우레탄폼, L-30, Dow corning977	깊은균열충전 : 폴리우레탄폼, Dow Corning977, L-30
2007	보물1021	석남암수석조비로자나 불좌상	AW106 : HY953	접착 : AW106 : HY953(1:1)
2008	보물185	무량사오층석탑	L-30	충전 : L-30+탈크,실리카파우더

접착 및 충전				
처리년도	지정번호	문화재명	처리제	사용방법
–	비지정	선정릉 지구의 정릉 병풍석	AY103 : HY956 샌드HB1 : YG1	접착 : AY103 : HY956(1:1) 충전 : 샌드HB1 : YG1(100:35)
–	국보64	창덕궁 석연지	AW106 : HY837 AY103 : HY956	접착 : AW106 : HY837(100:35) 충전 : AY103 : HY956(100:20)
–	비지정	충무통제사비	AW106 : HY837	접착 : AW106 : HY837(100:35)
–	비지정	화천군전적기념비	AW106 : HY837	접착 : AW106 : HY837(100:35)

(2) 강화 및 발수

에칠실리케이트 계열 수지는 구조적 특성 상 암석의 기본 성분과 다르지 않기 때문에 암석과의 이질감을 적게 할 수 있다. 열이나 산화에 안정하며, 가수분해하여 SiO_2를 형성하므로, 암석 공극에 규산염 광물이 암석 내부에서 바인딩 물질로 작용한다. 에칠실리케이트의 가장 큰 장점은 암석 내부의 공극을 완전히 막지 않으며, 열려진 공극은 열린 체로 유지되어 수증기의 출입이 자유롭다는 점이다. 과거에는 아크릴 계열 수지인 Paraloid B-72를 주로 사용하였으나, 현재는 거의 금속이나 도자기 접합에만 사용되며, 유럽에서 도입된 이래 점차 석재 강화처리는 실리케이트계 수지가 사용되기 시작하였다.

발수경화용 합성수지는 외부로의 증발이 용이해야 하고, 우수한 발수효과가 자연환경에 대한 지속적인 내수성을 지니고 있어야 하며, 처리 후 석재의 색상변화가 없어야 한다. 석조문화재는 1980년대 후반부터 꾸준히 발수강화 처리를 시작하였으나, 현재에 이르러서는 발수와 강화의 개념을 정확하게 요구하고, 사용에 대한 정확한 효과를 검증할 수 있는 방법이 없어 처리에 소극적이다. 발수제는 과거에는 일본 제품인 SS-101과 DWR 제품을 많이 사용하였으나, 현재에 이르러서는 실란과 실록산 계열의 Wacker 290과 Wacker 90L이 사용되고, 최근 Remmers 제품이 국내에서 시도되고 있으며, 이 밖에 K2 제품도 과거에 사용된 바 있다.

촉진내후성 및 염 풍화시험을 통해 강화 및 발수제에 적합한 합성수지를 선정한다. 강화제는 석재의 구조적인 특성인 비중 증가, 공극률 감소 등 기계적 특성을 향상시키며, 발수제는 수분이 내부로 흡수되는 것을 막는 보호막의 역할로 침수 및 모세관력에 의한 흡수율을 감소시키는 역할을 담당한다. 그러므로 연구대상 석재의 물성 및 풍화도, 풍화진행상태 등을 체계적으로 조사한 후에 알맞은 처리제를 선택해야 한다. 보존처리 후 이차적인 표면 변화의 여부를 확인하고 암석의 상태를 오히려 훼손시킬 수 있으므로 사전에 시험과정이 충분히 이루어져야 한다.

아크릴수지인 아크릴에멀전SB, 아크릴 바인더-17은 수용성으로 벽화 및 단청의 박락방지 및 벽체나 흙 또는 부패된 목재의 경화처리제로 사용된다. Paraloid B-72는 유용성 수지로서 톨루엔 또는 크실렌 등으로 용해시켜 사용하며, 인골, 패 · 골각제품의 경화처리용으로 사용된다. 부식된 목재 또는 흙의 경화처리제로서 사용되며 유물 보존처리에 특히 많이 사용되었다.

Table 3. Present statue of consolidant & repellent of stone cultural properties

강화 및 발수					
순번	처리년도	지정번호	문화재명	처리	처리제
1	1982		개풍현화사석등	강화	Paraloid B-72(10%)
2	1986	보물 7	고달사원종대사혜진탑	발수강화	SS101
3	1989	보물1417	법주사희견보살상	강화	Paraloid B72(3%)
4	1992	국보53	연곡사동부도	발수강화	DWR
5		보물153	연곡사동부도비	발수강화	DWR
6		국보54	연곡사북부도	발수강화	DWR
7		보물151	연곡사삼층석탑	발수강화	DWR
8		보물 154	연곡사서부도	발수강화	DWR
9		보물152	연곡사현각선사탑비	발수강화	DWR
10	1993	시유109	석남사마애여래입상	발수강화	DWR
11	1996	보물 168	경주천군리삼층석탑	발수강화	에칠실리케이트
12	1998	보물 581	월성골굴암마애여래좌상	발수강화	WackerOH100 Wacker 290, 90L
13	1999	사적 296	관상감관천대	발수강화	DWR
14		국보 59	법천사지광국사현묘탑비	발수	SS101,
15	2000	보물 77	춘천칠층석탑	발수	DWR
16	2001	보물 139	월정사석조보살좌상	강화	Ethyl Silicate28
17		국보 41	용두사지철당간	발수	발수 : K2
18	2005	국보 112	감은사지삼층석탑		Remmers
19	2006	보물 354	천흥사지오층석탑	발수강화	에칠실리케이트계
20		국보 6	중원탑평리칠층석탑	강화	Wacker OH100
21		보물 682	지보사삼층석탑	발수강화	Wacker OH100 DWR, SS101
22		국보 6	중원탑평리칠층석탑	강화	Wacker OH100
23		보물 225	신륵사다층석탑	발수	DWR
24	2007	국보 17	부석사무량수전앞석등	강화	Wacker OH100
25		보물 249	부석사삼층석탑	강화	Wacker OH100
26		보물 474	벽송사삼층석탑	강화	Wacker OH100
27		국보 9	부여정림사지오층석탑	강화	Wacker OH100
28	2008	보물 185	무량사오층석탑	강화	WackerOH100

Ⅲ. 처리제 특성에 따른 문제점 고찰

접착 및 충전에 사용되는 에폭시 수지의 경우는 1970년대를 시작으로 1980년 실상사 백장암 삼층석탑 복원에서부터 본격적으로 사용하기 시작하였다. 현재에 이르러 발생되는 문제점을 생각해 볼 때, 큰 차이점이 없으며, 종류도 다양화되지 않았다. 문화재 보수에서 가장 많이 사용하는 에폭시 수지의 경우는 황변과 비가역성이 가장 큰 단점으로 부각되므로, 이에 대한 대체가 시급한 실정이다.

강화 및 충전제로 많이 사용되고 있는 에칠실리케이트는 최근 유럽에서 인증을 받고 있으나, 자국의 암석과 환경에서 다른 반응을 보일 수 있으므로 사전실험을 실시한 후, 문제점 발생을 체크하고 수지를 선택해야 한다.

1980, 1990년대 보수 현장을 조사한 결과, 에폭시 수지의 들뜸 현상과 변색현상이 가장 심각한 문제점으로 대두되었다.

Figure 1은 보존처리의 잘못된 예로써, 에폭시 수지 접착 후 들뜸 현상이 나타났다. Figure 1A은 거창상림리석조관음입상의 발부분을 복원한 것으로 원 부재와 수지의 계면차이로 인해 들

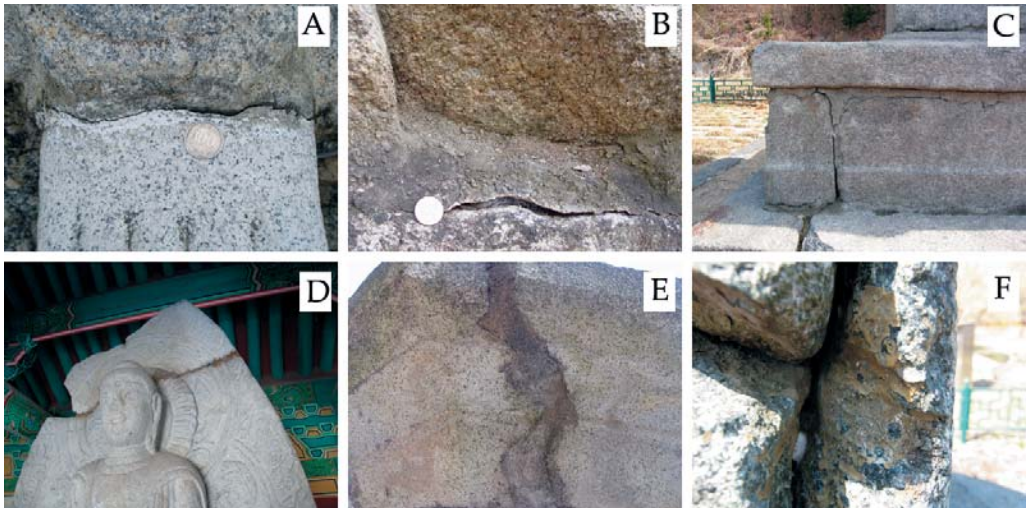

Figure 1. The wrong example of conservation treatment Ⅰ.
(A) Geochangsangrimriseokjogwaneumipsang(Treasure No.378) (B) Standing stone Maitreya bodhisattva statue of Daejosa Temple(Treasure No.217) (C) Byeoksongsa Three-storied Pagoda(Treasure No.474) (D) Manbok Temple Site Standing Buddha Image(Treasure No.43) (E) Stone stupa of MangHaesa site(Treasure No.173) (F) Eungyotopbi of the Monk Jeunggak in Silsang Temple(Treasure No.39)

뜸현상이 일어나고 있다. Figure 1B는 대조사석조미륵보살입상의 뒷부분으로 비교적 큰 이격을 많은 부위 충전제로 마감하였으나, 곳곳에 들뜸현상이 나타나고 있으며, 벽송사삼층석탑의 기단부 또한 부재 사이의 이격을 수지로 채웠으나 이 또한 분리현상을 보인다(Figure 1C). 이와 같이 에폭시 수지의 가장 큰 문제점은 암석 자체의 접착 부위에 요철이 있으므로 수지와 연결부위를 잘 마감하는 것이다. 이러한 문제점이 나타나는 것은 수지 자체의 문제인지, 배합비율이나 외부 환경에 의한 문제인지를 먼저 파악해야 하며, 실내 연구가 수반되어야 한다. 만복사지 석불입상의 파손된 광배와 망해사지 석등의 옥개석은 에폭시 수지를 이용하여 비교적 넓은 부위를 접합하였으나, 수지 자체의 색변화가 일어난 모습이다(Figure 1D, 1E). 또한 Figure 1F는 실상사증각대사응료탑비로써 수리 복원 후의 사진이며, 수지를 접착한 후 분리되어 변색현상을 보이고 있는 것을 확인하였다.

금산사 석등이나 실상사백장암삼층석탑에서 보존처리 한 예를 살펴보면(Figure 2A, 2B), 에폭시 수지 자체가 부재와의 접착 계면이 맞지 않아 떨어져 나갈 우려가 있다. 이는 수지 자체만 떨어져 나가면 문제가 되지 않지만, 접착강도가 암석보다 강하므로 암석 입자와 함께 박락되므

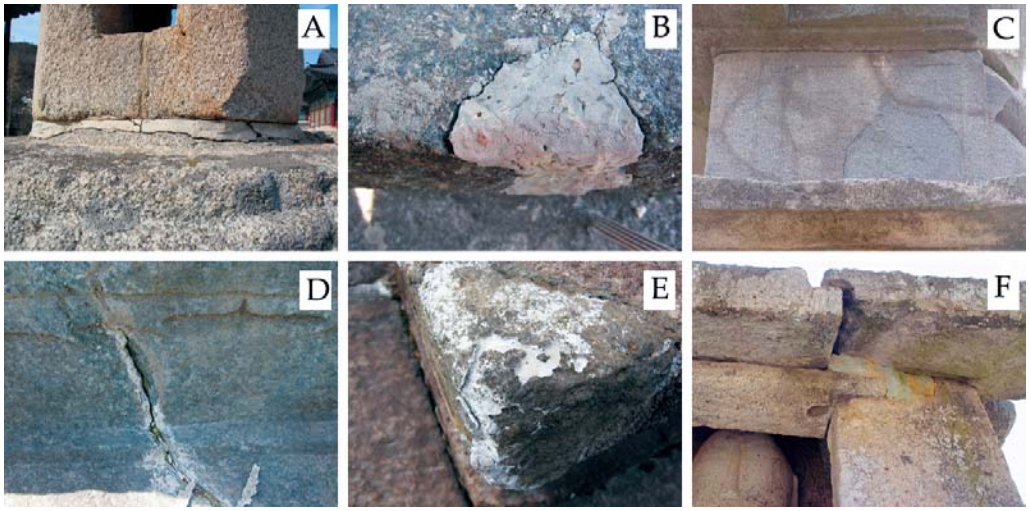

Figure 2. The wrong example of conservation treatment II.
(A) Guemsansa stone Lantern(Treasure No.828) (B) Three storied stone pagoda in Baekjangam of Silsangsa(National Treasure No.10) (C) Five-story Pagoda of Magoksa(Treasure No.799) (D) Sucheolhwasangneunggabowoltapbi in Silsang Temple(Treasure No.34) (E) Multi-storied stone Pagoda of Daewonsa(Treasure No.1112) (F) The stone buddhas and Shrine in the Unjusa Temple(Treasure No.797)

로 문화재가 손상될 수 있다. 그러나 이러한 문제점은 접착제 선정의 문제점일 수도 있지만, 주제와 경화제, 수지와 충전제의 배합비율 문제일 수 있으며, 처리 시 온 · 습도의 환경 영향도 고려되어야 한다. 마곡사오층석탑(Figure 2C)의 경우 균열 보수를 위해 에폭시수지를 사용하였는데, 이때에는 물론 저점도 수지를 이용하여 미세한 균열부위에도 충전해야 하지만, 암석 내부로 스며드는 접착제는 미관을 해치고 있다. 또한 실상사수철화상능가보월탑비(Figure 2D)와 같이 균열부위를 충전한 부위가 내부에 깊게 침투하지 못하여 금방 떨어져 나오는 경우도 종종 발생한다. 따라서 접착제 자체의 물성도 중요하지만 수지와 암석과의 결합 시, 접착 계면의 차이를 감소시키는 방법에 대해서도 연구되어야 할 것이다. 대원사다층석탑(Figure 2E)의 경우 결실된 부위를 에폭시 수지로 복원하였으나, 복원 재료의 표면이 박리현상이 발생된다. 이는 재료의 선정이나 배합비율 등에 따른 문제점으로 파악된다. 운주사석조불감(Figure 2F)은 폴리우레탄폼을 이용하여 복원 처리한 예로써, 복원 재료가 부적합한 경우이다. 이는 폴리우레탄폼을 이용한 처리제로 암석의 틈을 메우는 충전재료로 사용하기에는 강도와 색이 적합하지 않다. 폴리우레탄의 경우는 넓은 이격 부위를 메우는 데는 가장 적합한 충전 재료이지만, 암석과 같은 강도를 갖는다거나 암석과 동일한 색을 나타내기엔 부적합하므로 선행된 보존처리 사례를 통하여 처리방법이 신중해야 한다.

이와 같이 복원 재료가 되는 수지 선정은 보존처리 과정 중에 선행되어야 할 가장 중요한 과제이다. 접착 및 충전의 경우에는 어떠한 재질에 사용되는지를 조사하고, 비교적 동일한 물성을 선택해야 한다. 강화나 발수처리의 경우에는 암석 표면을 도포하는 것이므로 향후 변색되지 않는 것이 첫 번째 목표이다. 또한 암석의 내구성을 향상시키는 처리인 만큼 보존처리 전과 비교했을 때 재질의 강도가 향상되고 표면장력 향상으로 발수능력이 높아져야 하므로 수지 선정에 있어서 물성 측정과 같은 실험적 데이터가 분석되어야 한다.

Ⅳ. 결 언

우리나라 문화재 보존 · 보수는 각 처리방법에 따른 지침이 따로 있지 않은 실정이다.

보존과학에 대한 연구 기간이 오래지 않은 이유일 것이며, 따라서 보존처리 재료에 대한 연구도 아직 미비하다. 이는 1980년대 초반부터 이루어졌던 석조문화재 보존처리 현황과 문제점을 파악해야할 시기라고 할 수 있다. 연구자가 많지 않은 만큼 석조문화재 보존처리는 아직 실험단계라고 할 수 있으므로 재료에 대한 기초적인 연구부터 꾸준히 발전해 나가야 한다. 사용되는 수지의 종류와 문화재 특성은 물론 실내 · 외 환경에 따라 다르게 나타나므로 처리과정에 대한 변화과정을 데이터로 축적하여 후대 복원처리에 참고해야 한다.

접착 · 충전에 사용되는 수지는 과거엔 에폭시계열의 아랄다이트가 많이 사용되었으나 현재는 황변현상에 대해 보완된 L-30, L-40을 많이 사용하고 있다. 또한 넓은 부위를 충전할 때에는 그에 적절한 성능 개선이 이루어져야 할 것으로 예상된다. 강화와 발수에 사용되는 수지는 과거에는 동일 개념으로 발수제만을 이용하여 빗물 침투 방지를 목적으로 하였으나, 최근에는 재질의 물성 향상에 목적을 둔다.

대부분의 석조문화재는 외부환경에 그대로 노출되어 있을 뿐 아니라 서로 다른 환경에 처해있으면서 복합적인 요인들에 의해 풍화가 진행되므로 적용되는 보존처리제는 어느 경우에나 동일하게 적용할 수 없다. 아울러 보존처리가 시행된 이후에도 해당 문화재의 현황과 주변의 환경변화에 대한 정기적인 모니터링이 동반되어야 한다.

또한 그 동안 많은 종류의 합성수지가 개발되었지만, 문화재 분야에서 실질적으로 이용된 보존처리제의 비율은 매우 낮다. 이는 일반 산업분야에서 요구되는 특성과 문화재에서 요구되는 특성이 다르고, 훨씬 높은 안정성 확보와 검증을 필요로 하기 때문이다. 과거에 상업적으로 인증을 받은 처리제의 물성이라 하더라도 잠재적 손상 가능성을 염두해 두어야 한다. 따라서 석조문화재 보존처리에 대해서는 암석과 처리제, 각각의 특성에 맞는 처리제를 선택하며, 물성뿐 아니라 화학적 지식도 상호 보완되어야 할 것이다. 장기적으로는 안정성이 입증된 신소재 개발을 통해 보존처리가 한 단계 높아짐을 기대해야 할 것이다.

〈참고문헌〉

1. 강상용, 2008, 석조문화재의 보존처리를 위한 가압함침 공정과 처리제 개발. 공주대학교 석사학위논문.

2. 국립문화재연구소, 2006, 감은사지삼층석탑(서탑) 강화처리제 선정 및 신석 제작용 석재 연구.

3. 권해경, 2006, 「무기징크 프라이머용 에틸실리케이트 바인더의 加水分解反應 硏究」, 석사학위논문.

4. 김병호, 1997, 「문화재와 더불어 살아온 길」, 미광출판사, p.391~411.

5. 김사덕, 김순관, 김창석, 홍정기, 강대일, 이명희, 1999, 「석조문화재 에폭시수지 개발 시험 연구」, 보존과학연구 20집.

6. 남병직, 2007, 철기문화재 접합복원재료(에폭시수지)의 내후성에 대한 연구. 경주대학교 석사학위논문.

7. 문화재관리국, 1981~1993년도 문화재수리보고서.

8. 박기정, 2002, 충전제 배합에 따른 접착제의 물성(석조문화재를 중심으로). 한서대학교 석사학위논문.

9. 엄두성, 김사덕, 홍정기, 강대일, 이명희, 1999, 「석조문화재 발수경화제 시험 연구(Ⅰ)」, 보존과학연구20.

10. 온두현, 1975, 문화재 적용에 있어서 합성수지의 응용. 공학연구 제3집, p.41~46.

11. 원종옥, 2002, 석조문화재보존관리연구(석재에 따른 실리콘계 발수제의 특성분석).

12. 이용희, 2005, 문화재보존처리재료, 보존과학기초연구교육. p.222~248.

13. 이홍석, 1990, 입자충전 에폭시수지의 경화반응 및 역학적 성질. 충남대학교 석사학위논문.

14. 주부기, 2002, 폴리머 시멘트 콘크리트의 물리적 특성에 관한 연구. 조선대학교 석사학위논문.

15. Hans Leisen, 2004, Success and limits for stone repair mortars based on tetra ethyl silicate – Conservation of the reliefs at ankor wat temple, Cambodia. 10th International Congress on deterioration and conservation of stone, p.331~338.

16. Marisa Laurenzi Tabasso, 2004, Products and methods for the conservation of stone : Problems and trends. 10th International Congress on deterioration and conservation of stone, p.269~282.

17. Rosario Villegas Sanchez, 2004, Characterization of stone and evaluation of treatments for the megalithic monument of menga(Anteqquera, Spain). 10th International Congress on deterioration and conservation of stone, p.849~855.