

석조 문화재 보존용 저항변 Epoxy의 제조 및 물성 연구

Preparation and Physical
Properties of Epoxy with
Improved Yellowing Resistance
for the Preservation of Stone
Cultural Heritage

이승연¹, 오승준², 위광철^{3*}

한서대학교 국제디자인융합전문대학원¹,
한서대학교 문화재보존과학연구센터²,
한서대학교 문화재보존학과³

Lee Seungyeon¹, Oh Seungjun²,
Wi Koangchul^{3*}

International Graduate School of
Convergence Design, Hanseo University¹,
The Research Center of Conservation
Science for Cultural Heritage, Hanseo
University²,
Department of Cultural Heritage
Conservation, Hanseo University³

* Corresponding Author :
Wi Koangchul

Tel : 82-41-660-1043
E-mail : kcwi@hanseo.ac.kr

요약

석조 문화재 보존처리 시 사용되고 있는 Bisphenol A계 Epoxy 수지의 Yellowing 현상 개선과 재료의 다양성 확보를 위해 hydrogenated Bisphenol A계 주제 기반의 석조 문화재 보존용 Epoxy 수지를 제조하여 물성 비교 실험을 진행하였다. 실험 결과 제조한 Epoxy 수지가 인장강도, 접착 강도, 가공성에서 기존 재료보다 향상된 물성을 확인할 수 있었으며, 황변성은 약 5 ~ 8배 개선되었다. 이러한 결과는 대부분이 야외에 위치한 석조 문화재의 특성상 안정적인 보존 재료로서의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

주제어 : Epoxy 수지, 저항변 수지, 석조 문화재 복원, Epoxy 제조, 보존 재료

Abstract

The bisphenol A epoxy resin currently used for the conservation of stone cultural heritage items is known to suffer from yellowing discoloration. In order to mitigate this yellowing and explore the availability of more diverse materials for the conservation of stone cultural heritage items, a hydrogenated Bisphenol A-based epoxy resin was prepared and compared with the epoxy resin currently used in the conservation treatment of stone cultural heritage items. The newly prepared epoxy resin showed improved physical properties relative to the existing materials, especially in terms of tensile strength, adhesion, and machinability, while the yellowing discoloration was reduced by a factor of roughly five to eight. The results suggest that epoxy resin could be used as a stable material for the conservation treatment of stone cultural heritage items, most of which are located outdoors.

Keywords: Epoxy resin, Low-yellowing resin, Restoration of stone cultural heritage, Epoxy preparation, Conservation materials

투고일: 2021.09.16. 심사(수정)일: 2021.10.13. 게재확정일: 2021.10.25.

1. 서론

암석은 오래전부터 견고하고 변형이 적은 특성으로 인해 건축 및 대형문화재에 주요 구성 부재로 사용되어져 왔다. 이러한 암석으로 이루어진 석조 문화재는 대부분 야외에 위치하고 있으며 석탑, 석불, 석비, 석등, 당간지주 등 크기가 큰 대형 문화재가 대부분이다.

야외에 위치한 석조 문화재의 보존처리 과정은 예비조사 → 조사 및 분석 → 세척 → 미세블라스팅 세척 → 균열 충전 → 수지 처리 → 암석강화처리 → 보고서 기록 순서로 진행된다^[1]. 이 중 접착 및 복원 과정에는 휨, 전단, 압축력에 의해 파손된 석조문화재의 파손 부위를 견딜 수 있는 접착, 복원재가 사용되어야 한다. 접착, 복원에는 주로 Epoxy 수지와 필러 및 기존 부재를 일정 비율로 혼합하여 접착 및 복원재로 사용하고 있으며 특히, 석조 문화재는 파손 부위에 대한 접착이 처리과정의 많은 부분을 차지하기 때문에 접착 강도와 내약품성이 우수한 Epoxy 수지가 주로 사용되고 있다^[2]. 이러한 접착, 복원재는 석재 표면에 잘 접착되어 탈락되지 않고, 복원재로 사용하였을 때 원 부재와 조화를 이루어야 하며 강한 물성을 지녀야 한다.

일반적으로 석조 문화재 접착, 복원에는 주로 2 액형의 열경화성 Epoxy 수지가 가장 많이 사용되며 이러한 Epoxy 수지에는 Bisphenol A계 수지가 주재료로 사용된다. Bisphenol A계 Epoxy 수지는 석재 표면 공극에 수지가 침투하여 접착되기 때문에 접착성이 뛰어나며 내마모성, 내약품성, 내열성 등의 물성이 뛰어나다^[3]. 그러나 비가역성이고 충전재의 함량에 의해 물성의 변화가 나타나며^[4] 특히, 자외선에 의한 황변(Yellowing)의 취약성이 존재한다^[5].

이러한 점을 개선하기 위해 석조문화재 Epoxy 수지 개발 시험 연구^[4], 석조 문화재 복원용 우레탄 메움제 및 접착제에 관한 연구^[11], 석조문화재 보존처리용 Epoxy 수지 물성에 미치는 탈크 함량의 영향^[2], 석조문화재 보존을 위한 HBA계 Epoxy 수지/무기 첨가물 복합체의 혼합조건에 따른 성능 개선 연구^[10], Epoxy 수지/무기물 첨가제 복합체의 열팽창계수 조절 및 석조문화재의 응용^[3], 탈크 함량에 따른 석조 문화재 보존처리용 Epoxy 수지(L-30)의 내구성 연구^[12] 등의 선행연구가 이루어졌으나 UV에 의한 Yellowing현상을 개선하기 위한 재료학적 연구는 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 반응성 희석제가 포함된 석조 문화재 보존용 저황변 Epoxy 수지를 제조하고 인장 강도, 압축 강도, 접착 강도, 마모, 열화시험 등을 통해 적용성을 확인해보고자 하였다. 또한 현재 사용되고 있는 석재 보존용 Epoxy 수지와 물성 비교를 진행하여 재료의 다양성 확보 및 대체 재료로서의

가능성을 연구해 보았다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구 재료

본 연구에서 제조한 저황변 Epoxy 수지는 주제와 경화제로 이루어진 2 액형 Epoxy 수지로 주제는 시판 에폭시 주제들 중에서 황변성이 낮은 것으로 알려진 Cyclohexanol, 4,4-(1-methylethylidene)bis-polymer with (chloromethyl) oxirane에 점도 조절을 위해 경질의 반응성 희석제인 Trimethylolpropane triglycidyl ether와 연질의 반응성 희석제인 Aliphatic glycidyl ether (Alkyl-C12-14)-glycidylether를 첨가하여 제조하였으며 자외선 방지제는 HBA 계열중에 가장 안정한 것으로 알려져 일반적으로 사용하고 있는 1-(Methyl)-8-(1,2,2,6,6-pentamethyl-4-piperidinyl)-sebacate를 첨가하여 주제를 제조로 사용하였다. 경화 촉진제는 iodide 계열의 Ethyl triphenyl phosphonium iodide를 사용하였으며 Trimethylolpropane tris(3-mercaptopropionate)를 사용하였다. 주제와 경화제의 배합은 중량비 100 : 100 비율로 배합하였다. 이들의 경우 경화후 연질성을 강화시켜 석재의 열팽창이나 계절에 따른 수축 및 이완에도 충분한 접착 강도를 유지할 수 있도록 제조하였다.

비교군으로 설정한 Epoxy 수지는 현재 석조 문화재의 접착 및 복원에 주로 사용되고 있는 수지로 주제는 본 연구에서 사용한 수지와 동일한 Hydrogenated Bisphenol A를 주제로 하며 저점도의 수지로 배합비율은 중량비 100 : 50이다^[6]. 필러는 익산 미륵사지 석탑 보수정비 I (2019) 에 수록된 내용을 참고하여 제작하였으며 조성은 규산지르코늄 (Zirconiumsilicate), 규회석 (Wollastonite), 탈크 (Talc)를 중량대비 1 : 1 : 2 의 비율로 혼합하여 사용하였다^[7].

2.2. 연구 방법

2.2.1. Epoxy의 제조

제조된 Epoxy 수지는 주제와 경화제로 구성된 2 액형 수지로 배합 비율을 동일하게 하여 작업 시 혼합이 용이하도록 하였다. 제조 방법은 Epoxy 수지와 첨가제들을 Refreactor No. 101 반응기에서 Impeller를 이용하여 300 ~ 400 rpm의 속도로 60℃에서 1시간 동안 혼합하였으며, 각 반응성 희석제는 제조된 sample의 온도 의존성과 작업성을 고려하면서 첨가하여 제조하였다. 경화제 역시 같은 반응기에서 impeller를 이용하여 500 ~ 700 rpm의 속도로 30℃ 이하의 온도에서 3 시간 이상 혼합하여 제조하였다. 제조된 Epoxy 수지는 첨가제를 혼

함해 사용하였으며, 차후 환경에 따라 칩소제, 충전제의 첨가가 가능하도록 제조하였다^[8]. 제조된 석조 문화재 보존용 Epoxy 수지의 조성은 표 1과 같으며, 주제의 함량은 약 80 ~ 90 g, 반응성 희석제는 각각 약 10 ~ 20 g, 자외선 방지제는 약 1 ~ 10 g를 첨가하였다. 경화제는 약 60 ~ 70 g를 첨가하여 제조하였으며 주제와 경화제 동량 혼합하였을 때 가장 안정한 경화반응이 발생하는 것을 확인하였다^(표1).

표1. 제조 Epoxy의 조성 및 제조 비율

단위 : %

재 료	재 료 명	함량
주제	Hydrogenated Bisphenol A Epoxy Resin (Cyclohexanol, 4,4-(1-methylethylidene)bis-polymer with (chloromethyl)oxirane)	80 ~ 90
경질반응성 희석제	Trimethylolpropane triglycidyl ether (30499-70-8)	10 ~ 20
연질반응성 희석제	Aliphatic glycidyl ether (Alkyl-C12-14)-glycidylether (68609-97-2)	10 ~ 20
자외선 방지제	ZIKASORB-BS 1-(Methyl)-8-(1,2,2,6,6-pentamethyl-4-piperidiny)-sebacate (82919-37-7)	1 ~ 10
경화제	Trimethylolpropane tris(3-mercaptopropionate) (33007-83-9)	60 ~ 70

2.2.2. 시편 제작

시편은 본 연구에서 제조한 Epoxy 수지(이하 H)와 필러를 첨가한 시편(이하 HF), 기존에 사용되던 Epoxy 수지 (이하 A)와 필러를 첨가한 시편(이하 AF) 총 4종류로 설정하여 제작하였다. 시편 제작을 위해 먼저 Epoxy 수지의 주제 및 경화제를 혼합 비율에 맞춰 배합하였으며, Epoxy의 혼합 비율은 중량대비 H 100 : 100, A 100 : 50, 필러의 첨가 비율은 Epoxy 수지와 필러의 비율을 중량대비 1 : 1의 비율로 혼합하였다.

주제와 경화제를 각각 계량한 후 용기에 넣고 약 700 ~ 800 rpm의 속도로 교반하였다. 필러가 첨가되는 시편은 주제와 경화제를 먼저 교반한 후 필러를 넣어 동일 속도로 추가적으로 교반하였다. 물성 시편 제작용 경화 틀은 몰드와의 반응을 최소화하고, 규격화된 시편 형상, 경화 후 대상 시편의 분리가 용이하도록 Silicon 소재를 이용하여 제작하였으며, 보다 균일한 상태의 물성 시편을 얻기 위해 진공 탈포 장치 및 소도구 등을 이용해 미세기포를 최대한 제거하였다^[9].

인장강도 시편 제작은 KS M ISO 527-2(플라스틱 - 인장성의 측정 - 성형 및 압출 플라스틱의 시험 조건)에 제시된 1B 아령형으로 시편을 제작하였으며, 시편 크기는 150 × 20 × 5 mm로 시료 하나당 3개씩 총 12개를 제작하였다. 압축 강도 시편 제작은 KS M ISO 604(플라스틱 - 압축성의 측정)에 제시된 규격인 10 × 10 × 5 mm로 제작하였으며 시편은 대상 시료 하나당 3 개씩 총 12 개를 제작하였다.

접착 실험 시편 제작은 KS M ISO 4624 (도료와 바니시 - 부착 박리 시험)에 제시된 방법으로 0.2 g씩 동일한 양을 금속 Dolly에 도포하여 철제 판에 부착한 후 48 시간 동안 경화 후에 실험을 진행하였다. H 원액과 A 원액은 피착재가 석재일 때의 접착 강도를 확인하기 위해 동일한 KS 규격에 근거하여 화강암 석재에 추가로 부착하여 실험을 진행하였다. H의 석재 피착(이하 HR), A의 석재 피착(이하 AR)에 대한 추가 시편을 제작하였으며 0.2 g씩 동일한 양을 금속 Dolly에 도포하여 석재 판에 부착하였다. 시편은 대상 시료 하나당 5 개씩 30 개를 제작하였다.

마모율 측정 및 자외선 열화실험 시편 제작은 KS M ISO 5470-1(고무 또는 플라스틱 피복 직물 - 내마모성 측정 방법 - 제1부: 테이버 마모 시험기)에 제시된 규격인 지름 100 mm, 두께 5 T의 원판형으로 제작하였으며 시편은 대상 시료 하나당 3 개씩 제작하였다.

2.2.3. 실험 방법

물성 실험은 인장강도, 압축강도, 접착 강도, 마모율 측정 실험을 진행하였으며, 인장강도 실험은 KS M ISO 527-2(플라스틱 - 인장성의 측정 - 성형 및 압출 플라스틱의 시험 조건)에 근거하여 실시하였다. 측정은 만능재료시험기 (Shmadzu社, AGS-X 10kNX, Japan)를 사용하였으며, 크로스헤드의 속도는 5 mm/min 로 하중을 가하였다⁹⁾. 압축강도 실험은 KS M ISO 604(플라스틱 - 압축성의 측정)에 근거하여 실험하였으며, 인장강도 측정 기기와 동일한 만능재료 시험기로 1 mm/min 크로스헤드 속도로 하중을 가하였다.

접착 강도 측정 실험은 KS M ISO 4624(도료와 바니시 - 부착 박리 시험)에 근거하여 코팅 접착 강도 시험기(DeFelsko社, PosiTest AT-A Automatic, USA)로 응력 하중은 초당 0.2 MPa의 압력으로 설정하여 진행하였다. 마모율 측정 실험은 KS M ISO 5470-1(고무 또는 플라스틱 피복 직물 - 내마모성 측정 방법 - 제1부: 테이버 마모 시험기)에 근거하여 실험하였으며, 테이버 마모시험기(오션 과학社, COAD.101, Korea)로 마모시험기의 회전 속도는 70 rpm, 총 회전수는

500 회로 설정하여 실험하였다. 마모율은 마모 전 시편의 무게를 측정 후 마모가 완료된 시편의 무게를 측정하여 무게 감소를 퍼센트 비율로 나타내었다.

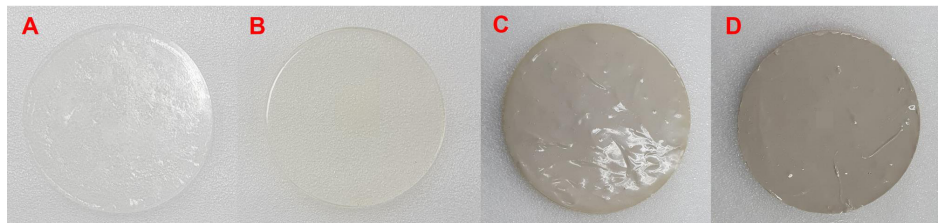
Epoxy의 자외선 폭로 시간에 따른 색상 변화 확인을 위해 자외선 열화 실험을 실시하였다. 실험은 자외선 열화시험기(Ecposure to Man-made Ultraviolet Light Test Chamber社, UV tester, Korea)를 사용하였으며, 96 시간 노출 후 24 시간 단위로 색 변화량을 확인하였다. 색도 측정은 분광측색계(KONICA MINOLTA社, CM-2600d, Japan)를 이용해 시편의 5 곳을 측정하였으며 최대값과 최소값을 제외한 나머지 3 개의 측정값을 평균화하여 산출하였다.

3. 연구 결과

제조된 석조 문화재 보존용 저항변 에폭시의 경화 시간은 외부 환경 및 기온에 따라 변화가 나타났으나 평균 24 시간 후로 완전 경화가 이루어졌다. 촉진제를 첨가할 경우 경화시간이 최고 4 시간 이내까지 조절할 수 있었으며 제조된 에폭시의 물성에는 문제가 발생하지 않았다. 제조된 Epoxy 수지를 이용해 제작된 시편은 도1에 나타내었다.



- (a) H 시편
- (b) A 시편
- (c) HF 시편
- (d) AF 시편



도1. 물성실험 시편 제작

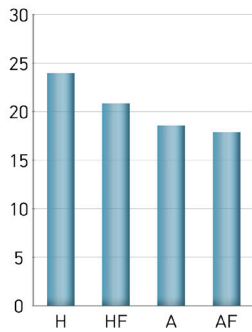
인장강도 실험 결과 H는 23.98 MPa, HF는 20.84 MPa, A는 18.56 MPa, AF는 17.88 MPa의 평균값을 나타내었으며, H의 인장 응력이 약 3 ~ 5 MPa 더 높은 것으로 확인되었다. 또한 H와 A의 원액 시편에 비해 필러가 함유된 시편의 인장 응력이 더 낮게 측정됐는데, 이는 필러가 첨가되어 Epoxy 수지의 분자 간 결합력이 감소하였기 때문으로 추정된다^(도2).

압축강도 실험 결과, H는 26.44 MPa, HF는 21.36 MPa, A는 34.99 MPa, AF는 34.45 MPa의 평균값을 확인하였으며, A의 압축 강도가 약 8 ~ 13 MPa 더 높은 것으로 나타났다. 또한 인장 강도와 마찬가지로 H와 A의 원액 시편에 비해 필러가 첨가된 시편의 압축 강도가 더 낮게 측정됐는데, 이는 필러의 함유로 인해 Epoxy 수지의 분자간 결합력이 감소할 수 있다는 선행 연구 결과와도 일치하는 것을 확인할 수

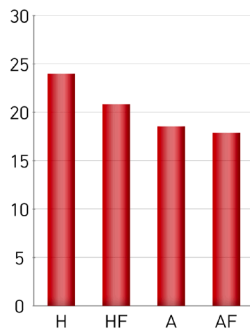
있었다(표3).

접착 강도 실험은 금속 피착재와 더불어 석재 피착재일 때의 접착 강도를 확인하기 위해 HR과 AR에 대한 추가 실험을 진행하였다. 실험 결과, H는 2.37 MPa, HF는 1.60 MPa, HR는 석재 피착재와 돌리가 함께 탈락되어 측정 불가하였으며, A는 0.77 MPa, AF는 2.05 MPa, AR은 6.97 MPa의 평균값을 나타내었다. 접착 강도는 H가 더 높은 값을 보였으며 필러가 첨가된 시편에서는 AF가 더 높은 값을 보였다. 피착재가 금속일 때보다 석재일 때 더 높은 값을 나타내었으며 이는 Epoxy 수지가 석재 내부의 공극까지 침투되어 더 높은 접착 강도를 가지는 것으로 판단된다(표4).

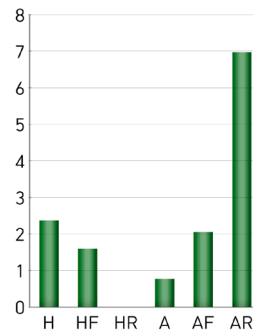
마모율 측정 결과 H는 0.66%, HF는 0.65%, A는 0.43%, AF는 0.45%의 결과를 나타내었다. 마모율은 H가 가장 높게 나타나서 경화 후 가공성이 더 우수한 것으로 보이지만 이들 수치만으로 평가된 완전 경화 후 가공성에서는 큰 차이가 없는 것으로 볼 수 있었다(표2).



도2. 인장강도 측정 결과



도3. 압축강도 측정 결과



도4. 접착 강도 측정 결과

표2. 마모율 측정 결과

시편명	마모 전(g)	마모 후(g)	마모율(%)
H	45.5	45.2	0.66
HF	63	62.6	0.65
A	46.3	46.1	0.43
AF	66.6	66.3	0.45

H의 자외선 열화 결과 Δb^* 의 24 시간 변화값은 0.45이며 96 시간 변화값은 3.04이다. ΔE^*ab 의 24 시간 변화값은 5.42이며 96 시간 변화값은 5.36이다. 자외선 노출 시간이 경과함에 따라 황변성을 확인할 수 있는 Δb^* 값이 지속적으로

증가하였으며 ΔE^*_{ab} 값은 일정한 값을 유지하였다. 이는 자외선에 의한 노출이 지속될수록 Yellowing 현상이 발생하였다는 사실을 확인할 수 있으나 변화량의 폭은 미세하다. A의 자외선 열화 결과, Δb^* 의 24 시간 변화값은 6.47이며 96 시간 변화값은 15.12이다. ΔE^*_{ab} 의 24 시간 변화값은 6.69이며 96 시간 변화값은 15.46이다. 자외선 노출 시간이 경과함에 따라 황변성을 확인할 수 있는 Δb^* 값이 지속적으로 증가하였으며 ΔE^*_{ab} 값은 Δb^* 값의 증가량에 비례해 증가하는 결과를 보였다. H에 비하여 A의 Δb^* 값이 약 5 ~ 8 배 더 높게 측정되었으며 이는 H에 함유된 자외선 방지제로 인해 H Epoxy 수지의 내황변성이 증가되었기 때문으로 판단된다^{(표3),(도5)}.

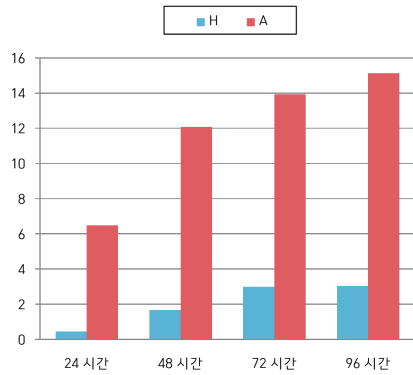
HF의 자외선 열화 결과, Δb^* 의 24시간 변화값은 9.14이며 96시간 변화값은 13.10이다. ΔE^*_{ab} 의 24시간 변화값은 9.48이며 96시간 변화값은 13.98이다. 자외선 노출 시간이 경과함에 따라 황변성을 확인할 수 있는 Δb^* 값이 지속적으로 증가하였으며 ΔE^*_{ab} 값은 Δb^* 값의 증가량에 비례해 증가하는 결과를 보였다. 이는 자외선에 의한 노출이 지속될수록 Yellowing 현상이 발생하였다는 사실을 확인할 수 있다. AF의 자외선 열화 결과, Δb^* 의 24 시간 변화값은 9.14이며 96 시간 변화값은 13.10이다. ΔE^*_{ab} 의 24 시간 변화값은 9.48이며 96 시간 변화값은 13.98이다. 자외선 노출 시간이 경과함에 따라 황변성을 확인할 수 있는 Δb^* 값이 지속적으로 증가하였으며 ΔE^*_{ab} 값은 Δb^* 값의 증가량에 비례해 증가하는 결과를 보였다. HF에 비하여 AF의 Δb^* 값이 약 1.5 배 더 높게 측정되었다. 이는 앞서 서술한 H와 동일하게 H에 함유된 자외선 방지제로 인해 H Epoxy의 내황변성이 증가되었기 때문으로, 필러가 함유된 시편 역시 동일한 결과로 판단된다. 또한 전체적으로 원액 시편인 H, A보다 필러가 함유된 HF, AF 시편의 Δb^* 값이 더 높게 측정되어 이는 Epoxy 수지에 함유된 필러에 의한 영향성 여부를 판단하기 위한 추가적인 실험이 필요할 것으로 사료된다^{(표4),(도6)}.

표3. Epoxy 시편 자외선 열화 실험 결과

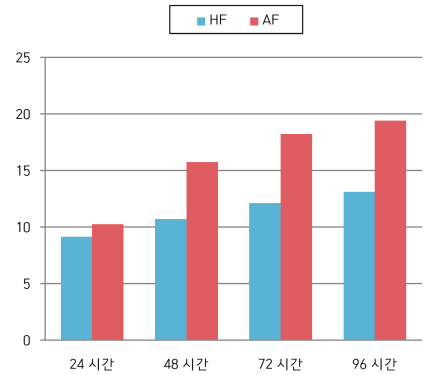
노출시간 시편명		24 시간	48 시간	72 시간	96 시간
ΔL^*	H	5.32	5.2	2.09	4.29
	A	-1.65	-2.46	-1.60	-3.12
Δa^*	H	-0.94	-1.01	-1.07	-1.05
	A	-0.47	-0.76	-1.05	-0.88
Δb^*	H	0.45	1.68	2.98	3.04
	A	6.47	12.07	13.92	15.12
ΔE^*_{ab}	H	5.42	5.56	3.78	5.36
	A	6.69	12.34	14.05	15.46
색상값	H				
	A				

표4. 필러 첨가 시편 자외선 열화 실험 결과

노출시간 시편명		24 시간	48 시간	72 시간	96 시간
ΔL^*	HF	-2.52	-3.12	-3.53	-4.74
	AF	-2.73	-3.90	-3.90	-4.94
Δa^*	HF	0.13	0.37	0.65	1.11
	AF	0.30	0.75	0.68	1.24
Δb^*	HF	9.14	10.69	12.10	13.10
	AF	10.26	15.74	18.23	19.42
ΔE^*_{ab}	HF	9.48	11.14	12.62	13.98
	AF	10.62	16.23	18.65	20.08
색상값	HF				
	AF				



도5. Epoxy 시편 Δb^* 값 결과



도6. Epoxy 필러 시편 Δb^* 값 결과

4. 결론

본 연구에서는 석조 문화재 보존용 Epoxy 수지를 제조하여 물리적 안정성, 내황변성 등을 확인하고 기존에 석조 문화재 복원에 사용되던 Epoxy 수지와의 기초 물성 비교 실험 및 자외선 열화 실험을 진행한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

제조한 H가 A보다 높은 인장강도 결과 값을 나타내었으며, 필러가 함유될 경우 각각의 원액보다 인장 응력이 소폭 하락하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 본 연구를 통해 제조한 H와 HF의 기계적 강도가 기존 재료를 상회하는 결과를 보여 항장력이 우수한 것으로 판단된다. 이는 석조 문화재 보존 후 복원 재료와 유물 간의 응력과 복원부의 강도가 우수해 전반적인 내구성이 증진된 재료임을 확인할 수 있었다. 또한 접착 강도는 H가 높게 확인되었으며, 피착재가 금속일 때 보다 석재일 때 더 높은 값을 나타내어 석재 표면에 존재하는 공극에 Epoxy 수지가 침투되어 높은 접착 강도를 나타내는 것으로 추정된다. 이러한 접착 강도의 증진은 기존 재료에 비해 중량이 높거나 크기가 큰 파편과의 계면 결합력을 향상시켜 보다 다양한 석조 문화재에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

가공성은 H와 HF의 결과 값이 A와 AF에 비해 높게 나타나 복원 후 성형 단계에서 우수한 절삭력으로 기존 재료보다 성형의 난이도가 감소할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 제조한 Epoxy 수지 H와 필러가 첨가된 HF의 가공성에서는 유의미한 차이를 확인할 수 없어 향후 절삭력을 조절할 수 있는 필러에 대한 연구도 필요하다고 판단된다. 자외선에 의한 Yellowing 현상은 H가 A에 비해 낮은 변화량을 나타내어 자외선에 의한 내구성이 높은 것을 확인할 수 있었다. 이러한 저황변 수지의 적용은 대부분이 야외에 위치한 석조 문화재의 경우 재료의

안정성 면에서 반드시 필요한 물성이다. 또한 이러한 내구성과 안정성을 기반으로 유물의 재처리를 최소화할 수 있고, 이는 유물의 피로도를 낮추는 효과로 이어질 것이다.

이와 같은 결론을 바탕으로 야외폭로시험 및 염수 분무 시험 등과 같은 신뢰성 평가와 작업 시 발생하는 유해물질측정시험 등을 통해 작업성과 인체 유해성에 대한 안정성 평가가 추가적으로 이루어진다면 실제 석조 문화재 보존처리 시 적용 가능할 것으로 판단된다. 또한 개발된 석조 문화재 보존용 Epoxy 수지와 최적화될 수 있는 필러의 연구는 재료의 접착 강도 및 가공성, 배합비율 정량화 등 다양한 기능성을 부여할 수 있을 것이며, 본 연구가 시작점이 될 수 있기를 바란다.

참고문헌

1. 김영택, 이용운, 조성남, 이주목, 낙성대 삼층석탑 보존처리 사례 연구, *박물관보존과학* **23**, p31-48, (2020).
2. 김다람, 도진영, 석조문화재 보존처리용 Epoxy수지 물성에 미치는 탈크 함량의 영향, *보존과학회지* **25**, p77-86, (2009).
3. 최용석, 채일석, 강용수, 원종옥, 김정진, 김사덕, Epoxy 수지/무기물 첨가제 복합체의 열팽창계수 조절 및 석조문화재의 응용, *보존과학회지* **27**, p115-121, (2011).
4. 김사덕, 김순관, 김창석, 홍정기, 강대일, 이명희, 석조문화재 Epoxy수지 개발 시험 연구, *보존과학연구* **20**, p139-154, (1999).
5. 한원식, 배진수, 박기정, 홍태기, 위광철, 토기·도자기 복원에 사용된 Epoxy 복원재료의 화학적 제거방법과 그 안정성에 관한 연구, *보존과학회지* **26**, p25-32, (2010).
6. 채우민, 장민경, 이용희, 황현성, 봉화 북기리 석조반가상의 보존 및 받침대 안정성 평가, *박물관보존과학* **17**, p85-100, (2016).
7. 미륵사지석탑보수정비사업단, *익산 미륵사지 석탑 보수정비 I*, p376-410, 국립문화재연구소 건축문화재연구소, 대전, (2019).
8. 국립문화재연구소, *도자기·토기 복원용 저항변·저수축 가역수지 개발 II*, p35-51, 국립문화재연구소, 대전, (2014).
9. 도민환, 석조문화재 보존처리용 충전제의 혼합비율에 따른 물성변화, 공주대학교 석사논문, p18-22, (2010).
10. 최용석, 이정현, 정용수, 강용수, 원종옥, 김정진, 김사덕, 석조문화재 보존을 위한 HBA계 Epoxy 수지/무기 첨가물 복합체의 혼합조건에 따른 성능 개선 연구, *보존과학회지* **28**, p265-276, (2012).
11. 한원식, 이호연, 박기정, 홍태기, 위광철, 석조문화재 복원용 우레탄 메움제 및 접착제에 관한 연구, *보존과학회지* **27**, p115-121, (2011).
12. 김다람, 탈크 함량에 따른 석조문화재 보존처리용 Epoxy수지(L-30)의 내구성 연구, 경주대학교 석사학위논문, p1-82, (2008).