Journal of Conservation Science
Vol. 25, No.1, pp 77-86(2009)
Printed in the Republic of Korea

석조문화재 보존처리용 에폭시수지 물성에 미치는 탈크 함량의 영향

김다람 | 도진영*

국립문화재연구소 경주석탑보수정비사업단
*경주대학교 문화재학부

Effect of Talc Content on the Physical Properties of the Epoxy Resins in Conservation Treatment of Stone Monument

Daram Kim | Jinyoung Do*

Stone Pagoda Restoration Team, National Research Institute of Cultural Hertage, Gyeongju, 780-250, Korea
*School of Cultural Assets, Gyeongju University, Gyeongju, 780-210, Korea

Corresponding Author : daramjy@hanmail.net, +82-54-741-1463

초 록 석조문화재 보존처리제로 사용되는 에폭시수지의 물성변화를 충전제의 함량변화와 인공풍화를 통한 가속화시험으로 연구하였다. 탈크를 첨가한 에폭시수지 시편에서 함수율이 감소하였고 표면접촉각이 증가하여 수분에 대한 저항성이 높았다. 탈크의 첨가량을 일정량 증가시켰을 때 접착 성능에서는 문제가 발생되지 않았으나 에폭시수지 자체의 압축강도는 저하되었다. 탈크 함량에 따른 에폭시수지의 물성변화는 그 주변 환경요소에 각기 다른 경향을 보였다. 온·습도 변화에 의한 인공풍화시험 후 탈크가 첨가된 에폭시수지는 순수한 에폭시수지에 비해 함수율과 색차변화가 작았고 표면접촉각은 커진 것으로 확인되었다. 자외선조사에 의한 인공풍화시험에서는 탈크함량이 증가할수록 에폭시의 물성이 악화되는 결과를 보였다. 이는 에폭시수지의 내구성을 향상시키기 위해서 첨가하는 탈크의 함량은 대상 석조문화재의 주변환경에 따라 다르게 적용되어야 함을 의미한다.

중심어 : 석조문화재, 에폭시수지, 탈크, 인공풍화시험, 물성

ABSTRACT The physical properties of the epoxy resins were studied with an addition of filler content and the application of artificial weathering test. When talc as a filler was added to the epoxy resin (L-30), the water resistance seemed to be increased because of the results of the reducing of water absorption rate and the increasing of contact angle. Although the adhesive strength of epoxy resins was not affected by the increasing amount of talc, its compressive strength was reduced. The physical properties of the epoxy resins had different trends according to the site environments. The artificial weathering test with the change of temperature and humidity showed that the changes of water absorption rate and colour differences of the epoxy resins containing talc were lower than the pure epoxy resin itself. However, the contact angle was higher. The artificial weathering test with ultraviolet irradiations showed the opposite result; the damage of epoxy resins was increased with the increasing of talc content. These mean the site environment of the stone monuments should be considered to determine the content of talc added to increase the durability of epoxy resin.

Key Word : Stone monument, Epoxy resins, Filler, Artificial weathering test, Physical properties

접수 '09. 02. 24 / 심사 '09. 03. 03 / 승인 '09. 03. 08

1. 서 론

문화재의 보존처리는 원형유지, 동일한 재질과 제작방법을 적용하는 것을 원칙으로 하고 있다. 그러나 유기물의 경우 제작 당시와 동일한 재질을 찾기는 거의 불가능하며, 무기질 문화재의 경우 다양한 실험과 사료를 바탕으로 선정하여도 보존처리 시에는 다른 물질이 사용되는 등 예외의 경우가 대부분이다. 특히 석조문화재는 파손부위에 대한 접착이 처리과정의 많은 부분을 차지하기 때문에 접착력과 내약품성이 우수한 에폭시수지가 주로 사용되고 있다.[1] 에폭시수지는 신발 제조공정, 비행선과 우주산업, 자동차 제조분야, 그리고 전자산업 등 분야에 적용되며, 내구성 변화를 방지하기 위하여 탈크, 운모, 탄산칼슘, 유리섬유, 금속분말 등 충전제를 첨가한다.[2,3,4]

석조문화재는 대부분 야외에 위치하고 있기 때문에 보존처리된 에폭시수지에서 광학반응이나, 산화반응 등으로 인하여 화학적구조와 물성변화를 보인다. 이러한 에폭시수지의 내구성 변화는 보존처리된 석조문화재에서 접착제의 균열과 박락, 피착재와 접착제의 분리 그리고 접착제의 색상 변화 등 다양한 양상으로 확인되고 있다 (Figure 1). 이러한 내구성변화에 따른 문제점을 개선하기 위하여 보존처리 시 탈크(활석), 석분, 안료, 유리섬유과 같은 충전제를 첨가하고 있다. 이 중 탈크는 내열성과 화학적 안정성이 우수하며 수축율이 낮은 물질로 석재와 에폭시수지 사이의 물성차이(강도, 흡수율 등)를 보완해 주고 균열방지와 에폭시수지의 농도 조절을 위해 에폭시수지의 충전제로서 광범위하게 사용되고 있다.[5]

그러나 에폭시수지에 첨가되는 충전제의 함량에 대한 정확한 데이터는 없으며, 보존처리 현장에서는 처리자의 경험에 의해 사용하고 있는 실정으로, 내구성의 개선을 위해서라도 이에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 충전제의 함량에 따른 에폭시수지의 내구성 변화를 인공풍화시험을 통한 가속화시험을 병행하여 살펴보았다. 다양한 종류의 충전제가 에폭시수지 내구성 개선을 위하여 사용되고 있으나, 보존처리현장에서 가장 많이 사용되고 있는 탈크를 대상으로 연구하여, 탈크의 첨가량에 따른 에폭시수지 내구성의 개선을 도모하고자 하였다.

에폭시수지에 탈크를 첨가 시 나타나는 내구성 변화를 확인하기 위해 탈크 함량에 따른 물성실험과 환경적인 요인 중 온·습도와 자외선이 내구성에 미치는 영향을 확인하였다. 물성은 충전제의 함유 비율에 따른 밀도, 함수율, 강도 그리고 색상 변화 등을 측정하였다. 여기에 현미경을 이용한 미세조직 관찰을 통하여 에폭시수지 물성변화 결과를 보완하였다. 외부환경에 의한 영향을 확인하기 위하여 온·습도가 주기적으로 변화하는 인공풍화시험기 내에서 시험편의 손상을 가속화 시키고 자외선을 조사하였다.

2. 연구방법

2.1. 시편제작

에폭시수지는 주제 : 경화제 = 100 : 50 (중량비)인 L-30(풍림화학)을 사용하였다. L-30은 Hydrogenated B.P.A(지방족 구조)타입의 에폭시수지로 분자량이 비교적 크고, 염기성에 약한 polyoxy alkylene amine을

(a) Gyeongju Namsan Chilbulam Maeseokbul (b) Four Faced Stone Buddha statue at Gulbul Temple Site

Figure 1. Crack, discoloration and detachment in epoxy resin layers after treatment on stone monument.

Table 1. Physical properties of the epoxy resins (L-30).

Properties	Epoxy resin	Harcher
Viscosity(cps) at 25℃	300~400	230~300
Specific gravity	1.20	0.971
Mix ratio	100	50
Setting time at 25℃	Physical : 24hour, Chemical : 7 day	
compressive strength (kg/㎠)	107~175.2	

경화제로 사용한다. 제조사에서 명시한 L-30(이하 에폭시수지)의 물성은 Table 1과 같다. 주제와 경화제를 혼합한 에폭시수지와 탈크를 부피비 에폭시수지 : 탈크 = 3:0, 3:1, 3:2, 1:1 (중량비 = 5:0, 5:1, 5:2, 5:3)로 시편을 제작하였다. 시편제작 시 기포를 제거하기 위해 진공처리 후 각 실험 방법에 적합한 크기와 형태로 가공하였다. 에폭시수지의 경화는 제조사에서 권장하는 조건인 20~24℃에서 7일 동안 진행하였다.

밀도, 함수율, 모세관흡수율, 색상 변화 및 미세조직관찰을 위한 시편은 φ30, 높이 약 10㎜ 크기의 원기둥 형태로 제작하였다. 압축강도를 측정하기 위한 시편은 KS 규격 KS M ISO 604「플라스틱 - 압축의 측정」과 KS M 3816「플라스틱의 압축강도 시험방법」에 제시된 시편의 크기 중 가장 적당하다고 기술된 φ12, 높이 32㎜의 원기둥형태로 제작하였다. 접착강도 측정법은 KS F 2761「콘크리트용 접착제의 접착강도 시험방법」을 적용하였으며 거창화강암을 대상으로 실시하였다. 40×40×80㎜ 크기의 화강암 시편을 앞의 시편제작에 적용된 탈크와 에폭시수지의 비율로 혼합한 에폭시수지로 접착하였다. 접착면은 실질적인 보존처리 시 에폭시수지를 적용할 때와 실험실 시험 결과를 비교하기 위하여 KS 규격에 따라 접착면이 균일한 시편과 요철이 약 3㎜가 넘지 않은 시편 두 종류를 제작하였다.

2.2. 측정방법

수분이 에폭시수지 내부에 침투하는 정도와 형성된 공극을 파악하기 위하여 밀도, 함수율 그리고 모세관물흡수계수를 측정하였다.[6,7]

평형접촉각 측정을 통해 액체가 고체표면의 표면장력보다 클 때 액체 방울이 고체의 표면에 이루는 각을 조사하였다. 평형접촉각은 고체의 표면상태에 따라 변화하는데 특히 표면에 손상이 많을 경우에는 공극의 형성으로 인해 표면접촉각이 줄어든다. 이를 통하여 인공풍화시험 후 에폭시수지의 손상 여부를 확인하였다(Phoenix 300, SEO, Korea).[8]

강도변화는 접착제의 경우 피착재를 지탱하는 힘이 변화하는 것을 의미하며 어느 지점까지 강도가 낮아지면 피착재를 접착하지 못하고 분리된다. 이를 위해 접착제의 자체 강도와 압축강도를 측정하였으며 피착재와 접착제간의 관계를 확인하기 위하여 접착강도시험을 실시하였다. 각 시험은 KS 규격 K MS ISO「플라스틱 - 압축의 측정」, KS F 2761「콘크리트용 접착제의 접착강도 시험방법」을 기준으로 하였다.

또한 에폭시수지 시편을 자외선과 온·습도에 의한 인공풍화시험기에 적용한 후, 색상변화를 분광색차계(Minolta, 2500-D)로 측정하였으며 실체현미경 (Leica, CME)과 주사전자현미경 (S-4200, Hitachi)을 이용하여 균열양상과 탈크의 분포정도 그리고 공극 등을 관찰하였다.

2.3. 인공풍화 시험

인공풍화시험은 실제 자연환경에서의 매우 느린 속도와 복합적인 요인에 의해 발생하는 암석의 풍화현상을 연구하기 위해 풍화의 속도와 요인을 인위적으로 제어하는 실험으로 자연환경보다 더 강한 손상조건을 설정하여 손상시간을 단축시키는 실험방법이다.[9]

본 연구에 적용된 온·습도에 의한 인공풍화시험은 2006년 경주지역 기상관측 자료를 기준으로 편성된『석조문화재 손상 메카니즘 및 평가기술 개발』중「수용성 염성분에 의한 석조문화재 박리박락 메커니즘 규명」의 인공풍화 프로그램을 응용하여 총 80회에 걸쳐 진행하였다(Table 2).[10]

에폭시수지의 변색 정도를 파악하기 위하여 KS 규격 KS M ISO 4892-1,「플라스틱-실험실 광원에 의한 노출 시험방법 - 제1부 : 통칙」와 KS M ISO 4892-3,「플라스틱-실험실 광원에 의한 폭로 시험방법 - 제3부 : 자외선 형광 램프」에 따라 자외선에 의한 인공풍화 실험을 진행하였다. 자연광과 유사한 파장의 스펙트럼을 가지는 UV-A형의 램프 중에서 320㎚~380㎚ 파장범위를 갖는 UV-A 365로 진행하였다. 자외선 조사 시험기의

Table 2. Climatic program for artificial weathering test (Gyeongju area).

	Seg 1	Seg 2	Seg 3	Seg 4	Seg 5	Seg 6	Seg 7	Seg 8
Characteristics of section	up	stay	up	stay	down	stay	down	stay
Temperature (℃)	25	25	30	30	25	25	-3	-3
Rel. Humidity (%)	70	70	90	90	70	70	0	0
Running time (hour)	2	4	2	4	2	4	2	4
Starting point (time)	22:00	0:00	04:00	06:00	10:00	12:00	16:00	18:00
Raining point (time)					10:30 -12:30			

순간발광강도는 44㎽/㎠, 적산조도는 239㎜J/㎠ (10초)이다. 총 자외선 조사기간은 3일이며 시험기기의 내부온도는 33℃를 유지하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1. 탈크 함량에 따른 에폭시수지의 물성

탈크 함량에 따른 시편의 물성은 Table 3에 나타낸 바와 같이 탈크 첨가량이 증가함에 따라 밀도는 증가한 반면 함수율은 감소하였고, 모세관물흡수계수는 거의 변화를 보이지 않았다. 밀도의 증가는 첨가된 탈크의 무게에 의해 시편의 무게가 증가함에 따라 상승한 것으로 판단된다. 또한 열린 공극의 정도에 따라 변화하는 모세관물흡수계수의 경우 모든 시편에서 0.0006 kg/㎡$^{0.5}$ 이하로 낮게 측정되었는데, 이는 열린 공극의 분포가 미미하여 모세관현상에 의해 시편 내부로 수분이 흡수될 가능성이 낮음을 보여준다. 이로 인하여 함수율도 낮은 값으로 측정된 것으로 보이며 탈크의 함량이 증가할수록 함수율이 감소하는데 이는 소수성인 탈크가 수분의 흡수를 차단하여 나타난 결과로 판단된다.

젖음성을 파악하기 위한 평형접촉각 측정결과는 순수한 에폭시수지가 52.413°로 가장 작았다. 탈크를 가장 많이 함유한 LT3에서 66.010°으로 가장 높게 측정되어, 탈크함량이 증가함에 따라 접촉각도 증가하는 비례관계를 보이고 있다(Table 3). 접촉각이 증가한다는 것은 액체가 시편의 표면에 잘 스며들지 않고 물방울 형태로 존재하여 젖음성이 감소하는 것을 뜻하며 이와 같은 결과는 함수율 측정결과와 일치한다.

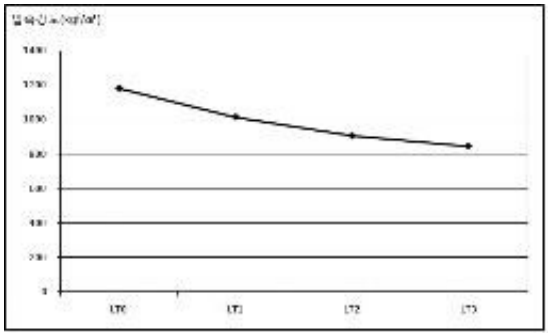
에폭시수지의 압축강도는 충전제가 첨가되지 않은 순수한 LT0 시편에서 1181.84 kgf/㎠으로 가장 높게 측정되었다. 첨가된 탈크량이 증가할수록 압축강도는 낮아져 에폭시수지와 탈크의 바율이 1 : 1인 LT3에서 가장 낮은 값인 845.45kgf/㎠으로 측정되었다(Figure 2(a)).

암석을 접착한 후 에폭시수지의 접착강도를 측정한 시험에서는 모든 시편의 파괴위치가 접착면이 아닌 암석부위였기 때문에 두 물질간의 접착강도 측정은 불가능하였다(Figure 2(b)). 이는 암석과 에폭시수지 간 접착면의 강도가 암석 자체보다 크다는 것을 의미하는 것으로, 에폭시수지의 접착강도는 탈크의 함량과 시편의 요철상태에 영향을 받지 않을 만큼 강도가 높은 것으로 나타났다.

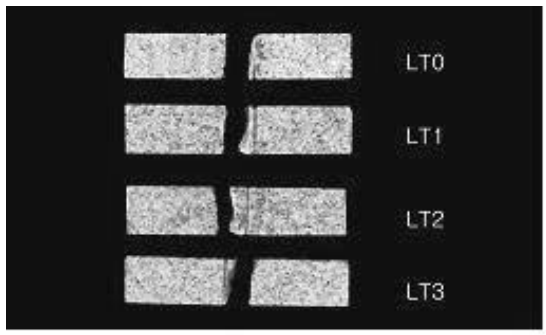
즉, 시편의 강도 측정 결과는 탈크의 함량이 에폭시수지 자체 강도에는 영향을 미치지만, 접착제로 사용될 때는 접착강도에 영향을 줄 정도의 변수로 작용하지 않음을 보여준다. 제시한 바율에 따라 탈크를 첨가하여도 석조문화재에 접착제로서의 역할이 충분히 가능할 것으로 사료된다.

Table 3. The density, water absorption rate capillary water and Water contact angle uptakes of the epoxy resins by the addition of talc.

Sample	epoxy resins : talc		Bulk density	Water absorption rate	Capillary water absorption	Contact angle
	by volume	by volume	(g/㎤)	(wt.%)	coefficient (kg/㎡$^{0.5}$)	(°)
LT0	3:0	5:0	1.145	0.19	0.0005	52.413
LT1	3:1	5:1	1.287	0.19	0.0005	56.859
LT2	3:2	5:2	1.357	0.17	0.0006	61.524
LT3	3:3	5:3	1.472	0.16	0.0005	66.010



(a) Compressive strength



(b) Sample shapes after adhesive strength test

Figure 2. The compressive strength and adhesive strength of the epoxy resin samples by the addition of talc.

에폭시수지의 주제와 경화제는 모두 무색투명한 액체이며 경화된 순수 에폭시수지 또한 무색투명한 고체이기 때문에 그 자체로는 색상측정이 불가능하여 흰색을 배경으로하여 색상을 측정하였다. 백색인 탈크의 영향으로 에폭시수지에 탈크의 첨가량이 증가함에 따라 L* 값이 높아져 백색에 가까워졌으며 a*값은 높아져 청색에, b*값의 수치는 내려가 황색에 가까워지는 경향을 보였다(Table 4). 이를 바탕으로 색차를 계산한 결과 LT1 (에폭시수지 : 탈크 = 3 : 1)와 LT2 (에폭시수지 : 탈크 = 3 : 2)의 ⊿E*는 9, LT1 (에폭시수지 : 탈크 = 3 : 1)와 LT3 (에폭시수지 : 탈크 = 1 : 1)의 ⊿E*는 13으로, 탈크의 함량이 증가할수록 색차가 커지는 것으로 확인되었다(Table 5). 반면 LT2와 LT3의 ⊿E*는 4로 탈크량이 증가함에 따라 전 단계와의 색차는 줄어드는 결과를 보였다.

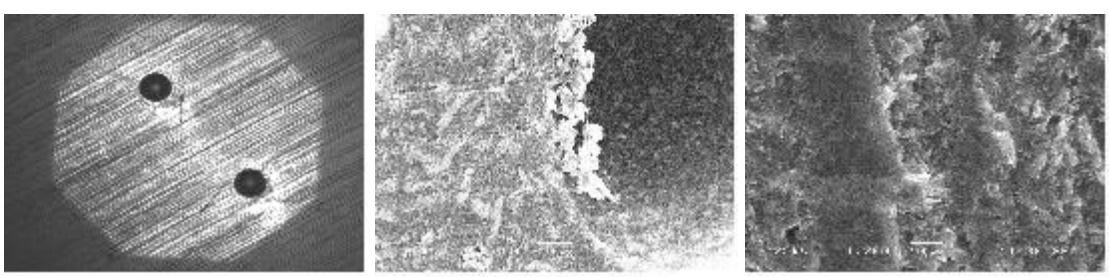
Table 4. L*a*b* chromatic system of the epoxy resin samples by the addition of talc.

Sample	L*	a*	b*
LT0	55.74	1.19	0.86
LT1	52.10	−0.53	2.28
LT2	60.85	−0.65	3.67
LT3	64.93	−0.74	4.26

Table 5. Chrominance (⊿E*) of the epoxy resin samples by the addition of talc.

Sample	LT1	LT2	LT3
LT1	–	9	13
LT2	9	–	4
LT3	13	4	–

시편의 표면을 현미경으로 관찰한 결과 타원형의 기포가 관찰되었는데, 이는 주제와 경화제를 혼합하여 사용해야하는 에폭시수지의 특성상 필연적으로 나타나는 현상으로 여겨진다. 시편제작 시 진공장치를 이용하여 기포를 충분히 제거하였음에도 불구하고 에폭시수지 자체에 기포가 잔류하는 것이 관찰되는 것으로 보아, 진공처리가 불가능한 보존처리 현장에서는 더욱 많은 기포가 발생할 것으로 판단된다. 전자현미경하에서 관찰한 결과, 첨가된 탈크의 함량 변화에 따라 차별화된 특징이 확인되지 않았으며 다만, 탈크 함량이 증가할수록 표면이나 공극 내에서 탈크 입자가 더 많이 확인되었다(Figure 3).



(a) LT0 (×50, by optical microscope) (b) LT2 (×50, by SEM) (c) LT3 (×1200, by SEM)

Figure 3. Microstructures of the epoxy resin samples by the addition of talc.

3.2. 인공풍화시험 후 에폭시수지의 물성

온·습도 변화로 손상을 가속화시킨 인공풍화시험 후의 에폭시수지 물성을 Table 6에 나타내었다. 순수한 에폭시수지의 밀도는 1.140g/㎤으로 풍화시험으로 인해 감소하였으며, 탈크가 첨가된 시편의 밀도 역시 전체적으로 0.003~0.005g/㎤ 감소하였다. 함수율은 인공풍화시험 후 순수한 에폭시수지의 경우 0.6% 증가하여 가장 높은 증가율을 보였으며, 전체적으로 탈크의 함량이 증가함에 따라 흡수율이 감소하는 경향을 보였다. 모세관물흡수계수는 탈크를 첨가하지 않은 LT0 시편에서 시험 전과 비교하여 2배 증가하였고, 탈크를 첨가한 모든 시편에서도 LT0에 비해서는 작지만 증가하였다. 모세관현상은 공극의 크기가 0.1㎛보다 작은 경우 모세관 응축에 의해 일어난다. 모세관물흡수계수가 증가하였다는 것은 온·습도의 변화에 의해 0.1㎛보다 작은 미세한 공극이나 균열이 발생하였다는 것으로 볼 수 있다. 그리고 순수한 에폭시수지보다 탈크를 첨가함에 따라서 함수율과 모세관물흡수계수의 변화가 작은 것으로 보아 첨가제로 사용된 탈크가 온·습도에 의한 변화를 저하시키는 것으로 판단된다.

에폭시수지 시편을 인공풍화시험 30회, 60회 및 80회 이후 105℃에서 48시간 건조시킨 다음 무게를 측정하였다. 시편의 무게는 인공풍화시험 전에 비해 증가되는 경향을 보였으며, 30회 인공풍화시험 후의 무게는 순수한 에폭시수지의 경우 0.48% 증가하여 가장 큰 증가율을 보였고, 탈크의 함량이 증가함에 따라 증가율이 작아졌다. 인공풍화시험 30회 이후 시료의 무게증가율은 점점 감소하였다. 인공풍화시험 80회 후 무게 변화는 30회 인공풍화한 결과와 같이 순수한 에폭시수지에서 가장 높은 변화율을 보였으며, 첨가한 탈크의 함량이 증가함에 따라 증가율이 감소하였다(Figure 4). 이는 인공풍화시험 진행시 공급된 습기가 시편 내부로 스며든 후에 건조시켜도 시편 밖으로 빠져나가지 못하여 나타난 결과로 보인다. 인공풍화시험으로 인해 수분이 시편 내부로 들어오는 통로, 즉 모세관이 확장되었음을 의미한다. 이러한 현상은 보존처리 후 대부분 외부환경에 노출되는 석조문화재의 경우에서 확연하게 나타날 것으로 예상된다. 또한 에폭시수지에 탈크를 첨가하지 않았을 경우 그 변화가 더 심할 것으로 보인다.

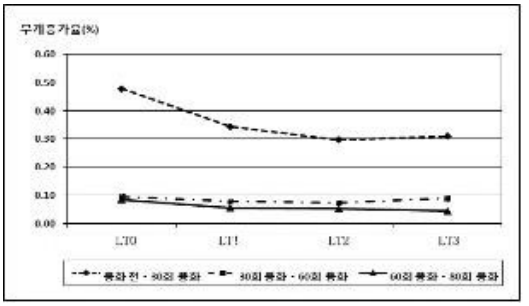


Figure 4. Weight increasing rate of the epoxy resin samples by addition of talc after the artificial weathering test by the change of the temperature and humidity.

시편표면의 평형접촉각은 온·습도와 자외선에 의한 인공풍화시험에서 확연한 차이를 보였다. 특히 탈크를 첨가하지 않은 순수한 에폭시수지의 접촉각은 온·습도와 자외선에 의한 인공풍화시험 후 각각 39.265°, 36.848°로 측정되어 가장 큰 변화가 있었다. 첨가된 탈크의 함량이 증가함에 따라 접촉각이 증가하여 젖음성이 감소하는 것은 탈크의 함량이 증가할수록 표면에 손상이 작게 발생한 것으로 볼 수 있다. 이러한 결과는 앞서의 함수율과 모세관물흡수계수 측정결과와 같은 해석이다. 모든 시편에서 온·습도에 의한 인공풍화시험보다는 자외선에 의한 인공풍화시험 후 접촉각이 더 감소하여 시험된 에폭시수지는 자외선에 의해 더 많이 손상되는 것으로 판단된다(Figure 5).

Table 6. Density, water absorption rate and capillary water uptake coefficient of the epoxy resin samples by the addition of talc after artificial weathering test by change of the temperature and humidity.

Sample	Bulk density (g/㎤)		Water absorption rate (wt.%)		Capillary water absorption coefficient (㎏/㎡·h$^{1/2}$)	
	before	after	before	after	before	after
LT1	1.145	1.140	0.19	0.79	0.0005	0.0011
LT2	1.287	1.282	0.19	0.65	0.0005	0.0009
LT3	1.357	1.353	0.17	0.52	0.0006	0.0009
LT3	1.472	1.465	0.16	0.58	0.0005	0.0009

Table 7에 나타낸 바와 같이 인공풍화시험 후 모든 시편의 압축강도는 감소하였다. 가장 큰 변화를 보인 시편은 첨가된 탈크 함량이 가장 많은 LT3으로, 약 26%의 감소율을 보였다. 그 외 시편은 근소한 차이를 보이며, 탈크 함량이 증가할수록 압축강도의 감소율은 낮았다. 이와 같은 결과는 일정량 탈크가 첨가된 에폭시수지가 풍화되면 순수한 에폭시수지에 비해 압축강도의 감소율이 낮아지며, 탈크 함유비율이 일정 비율을 넘어서면 압축강도가 급격히 낮아짐을 의미한다.

인공풍화시험 후 에폭시수지의 압축강도 감소율은 탈크의 함량에 따라 변화를 보이는 반면, 에폭시수지에 탈

Table 7. Compressive Strength of the epoxy resin samples by the addition of talc after the artificial weathering test.

Sample	Compressive strength (kgf/cm²)		Reducing rate (%)
	before weathering	after weathering	
LT0	1181.84	1079.68	-8.64
LT1	1014.73	938.48	-7.51
LT2	906.39	844.64	-6.81
LT3	845.45	624.48	-26.14

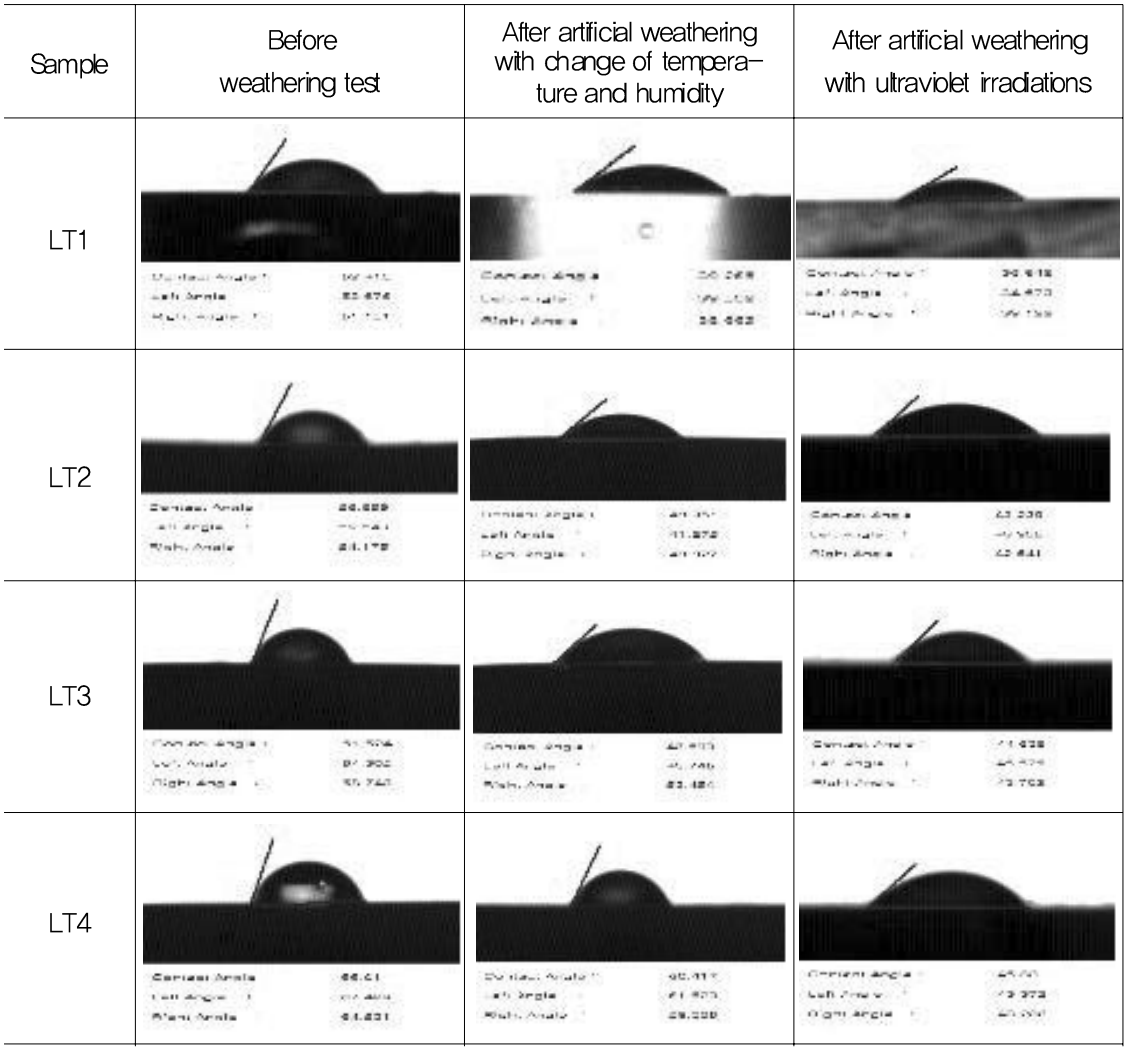


Figure 5. Contact angle of the epoxy resin samples by the addition of talc after the artificial weathering test.

크를 첨가하여 접착한 암석시편을 인공풍화시킨 후 측정한 접착강도는 인공풍화시험 전과 마찬가지로 암석부위가 파괴되어 측정이 불가능하였다(Figure 6). 따라서 온·습도에 의한 풍화 후 에폭시수의 자체 강도는 약해지지만 암석과의 접착에 영향을 미칠 정도로 심각한 손상을 일으키지 않는 것으로 보인다.

인공풍화시험 후 모든 시편에서 색상변화가 확인되었다. 온·습도 조건 하의 인공풍화시험은 Table 8에 나타낸 바와 같이 순수한 에폭시수지에서는 L*과 a*는 증가하였고, b*는 감소하는 경향을 보였다. 반면 탈크가 첨가된 시편에서는 L*과 a*는 감소하고, b*는 증가하여 반대되는 경향을 보였다. 색차는 순수한 에폭시수지의 ⊿E*가 2.86으로 가장 큰 변화를 보였으며, LT3의 ⊿E*가 0.60으로 가장 작은 변화를 보였다. 즉, 온·습도 조건 하의 인공풍화시험은 탈크의 첨가량이 증가할수록 에폭시수지의 색차는 작아지는 것으로 확인되었다.

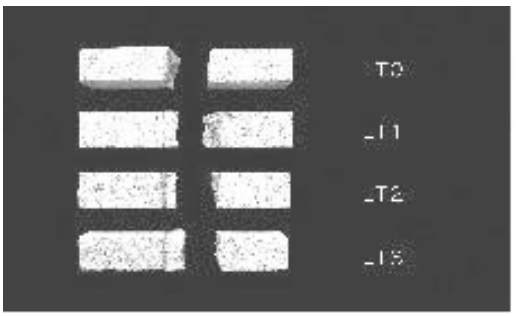


Figure 6. The shape of epoxy resin samples after adhesive strength test applied with artificial weathering test.

자외선 조건의 풍화시험 이후 모든 시편의 L*이 감소하여 명도가 낮아지고, a*와 b*가 증가하여 적색과 황색에 가까워졌다. 특히 b*의 변화가 큰 것으로 측정되었으며 육안관찰에 의해서도 황색변색이 뚜렷하게 확인되었다. 모든 시편의 ⊿E*는 육안으로 확인이 가능할 정도인 12이상으로, 온·습도에 의한 인공풍화시험 후 보다 손상이 심각한 것으로 나타났다. 그 중 탈크를 첨가하지 않은 시편 LT0의 ⊿E*가 17.83으로 가장 큰 변화를 보였다(Table 9).

탈크의 함량에 따른 변화는 탈크량이 증가할수록 색차가 작아졌던 온·습도에 의한 인공풍화시험 결과와는 달리, 자외선에 의한 인공풍화시험 이후에는 색차가 커진 것으로 밝혀졌다. 그러나 탈크를 첨가한 시편이 순수한 에폭시수지보다 색차가 작아서, 탈크가 첨가되었을 때 손상 정도가 낮은 것으로 판단된다. 이러한 결과는 에폭시수지로 보존처리 시 석조문화재가 위치하고 있는 주변의 온·습도변화와 자외선의 영향을 고려해야한다는 것을 의미하며, 이에 따라 탈크의 함량을 조절해야 할 것으로 판단된다.

균열 발생은 온·습도에 의한 인공풍화시험 30회 후 탈크를 첨가하지 않은 시편 LT0에서 가장 먼저 균열과

Table 8. L*a*b* chromatic system of the epoxy resin samples by addition of talc applied with artificial weathering test by the change of temperature and humidity.

Sample	L*		a*		b*		⊿E*
	before weathering	after weathering	before weathering	after weathering	before weathering	after weathering	
LT0	55.74	53.00	1.19	2.02	0.86	0.65	2.86
LT1	52.10	50.92	−0.53	−0.82	2.28	2.34	1.22
LT2	60.85	59.71	−0.65	−1.02	3.67	3.87	1.21
LT3	64.93	64.53	−0.74	−1.13	4.26	4.48	0.60

Table 9. L*a*b* chromatic system of the epoxy resin samples by addition of talc applied with artificial weathering test by the ultraviolet irradiations.

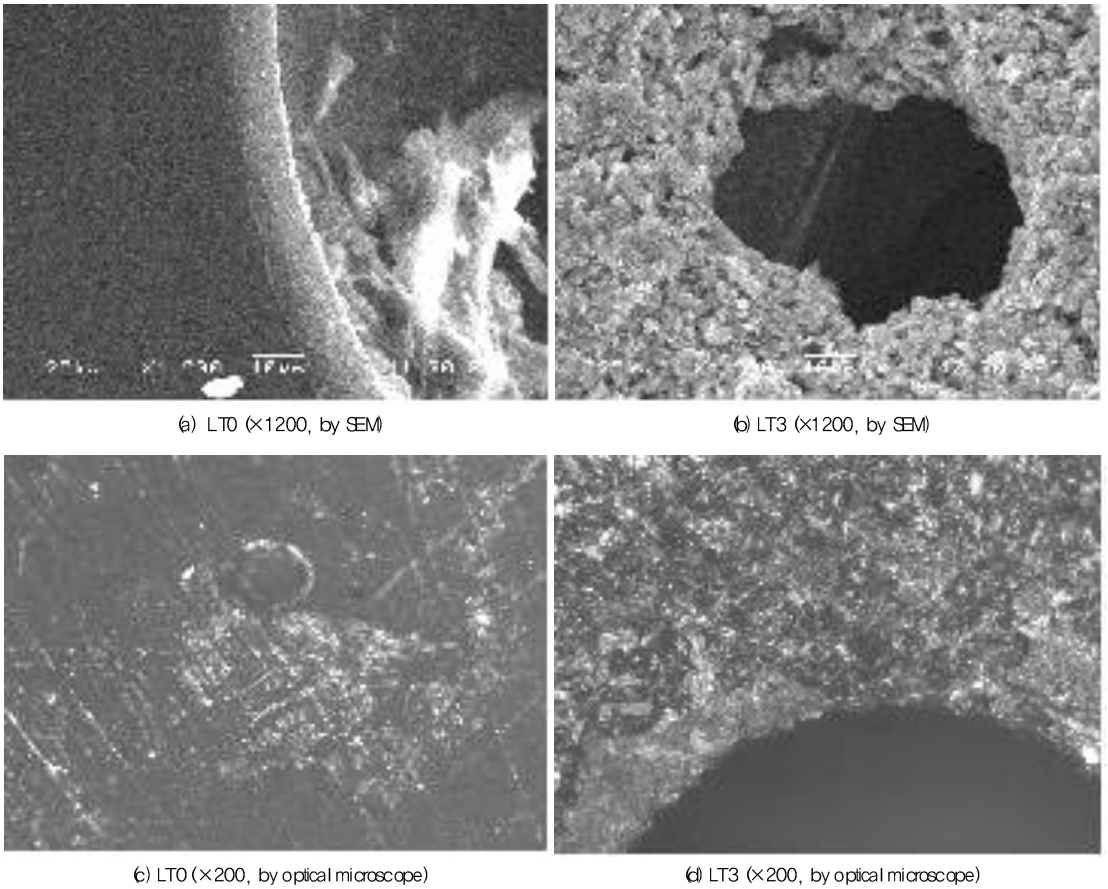
Sample	L*		a*		b*		⊿E*
	before weathering	after weathering	before weathering	after weathering	before weathering	after weathering	
LT0	51.00	41.88	2.14	2.42	0.30	15.61	17.83
LT1	51.30	49.43	−0.65	1.47	2.35	14.33	12.31
LT2	58.55	54.23	−0.97	2.65	3.79	18.79	16.02
LT3	64.85	58.16	−1.09	3.03	4.13	18.98	16.79

미세한 박리가 발생하였다. 이 균열과 미세한 박리는 함수율과 모세관물흡수계수를 증가시키는 원인으로 작용하였을 것으로 보인다. 탈크를 첨가한 시편에서는 온·습도에 의한 인공풍화시험에서 60회부터 표면의 변화가 확인되었다(Figure 7). 반면 자외선에 의한 풍화에서는 탈크의 첨가 여부에 관계없이 모든 시편에서 동일하게 균열과 박리가 발생하였다. 인공풍화시험 이후 시편의 공극 가장자리를 중심으로 박리가 발생되는 것으로 관찰되었다.

4. 결 론

석조문화재 보존처리제인 에폭시수지는 탈크 함량이 증가함에 따라 함수율의 감소를 보였고 평형접촉각은 증가하여 내구성이 향상되는 결과를 얻었다.

온·습도변화에 따른 인공풍화시험 결과, 충전제를 첨가하지 않은 순수한 에폭시수지에서는 30회 인공풍화시험 후 형태적인 변화가 관찰되어 탈크가 첨가되었을 때보다 손상되기 쉬운 것으로 밝혀졌다. 이러한 결과는 소수성인 탈크가 수분 흡수를 차단하여 에폭시수지의 손상을 줄여주는 역할을 했기 때문으로 여겨진다. 또한 탈크를 첨가함으로서 에폭시수지의 자체강도는 작아졌으며 온·습도에 의한 인공풍화시험 후에는 순수한 에폭시수지와 탈크함량이 큰 시편의 압축강도 감소율이 컸다. 그러나 접착강도 시험에서는 인공풍화시험 전·후 모든 시편에서 모두 암석부위가 파손되는 결과를 보여, 에폭시수지에 일정량의 탈크를 첨가시키는 것은 접착력에 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. 실제 보존처리와 실험의 경우



(a) LT0 (×1200, by SEM) (b) LT3 (×1200, by SEM)

(c) LT0 (×200, by optical microscope) (d) LT3 (×200, by optical microscope)

Figure 7. Microstructures of the epoxy resin samples after 80cycle artificial weathering test by temperature and humidity ; (a) LT0 : the disintegration in the outlines of pore, (b) LT3 : the talc particle in the epoxy resin, microstructures of the epoxy resin samples (L-30) after the ultraviolet irradiations ; (c) LT0 : the disintegration in surface and change of color, (d) LT3 : the disintegration in the outlines of pore.

를 비교하기 위해 요철이 있는 표면을 대상으로 시험하였을 때에도 동일한 결과가 확인되었다. 따라서 에폭시수지를 사용하여 석조문화재를 접착할 경우 탈크를 에폭시수지와 동량으로 첨가시켜도 접착제로서의 역할에 문제가 없으며 오히려 수분에 대한 저항성을 높여 보존성을 향상시킬 것으로 보인다. 또한 압축강도를 감소시켜 에폭시수지의 석재 보존처리제로서의 단점인 강도문제를 보완할 것으로 판단된다.

그러나 자외선에 의해서는 탈크 함량이 적을수록 에폭시수지의 손상이 덜 발생하는 결과를 보였다. 따라서 석조문화재를 에폭시수지로 보존처리할 경우, 자외선에 많이 노출되는 부위는 탈크의 첨가량을 최소화 하는 것이 바람직할 것이다. 이러한 결과는 보존처리될 석조물의 주변환경에 따라 에폭시수지에 탈크를 비롯한 충전제의 첨가량을 조절하여 사용하여야 함을 의미한다.

참고문헌

1. 김다람, "*탈크 함량에 따른 석조문화재 보존처리용 에폭시수지(L-30)의 내구성 연구*". 경주대학교 석사논문, (2008).
2. 김사덕, 강대일, "*문화재 수리복원 재료의 동향 - 특히 합성수지 중심으로 -*". 문화재, 37, 문화재청.
3. 김현중, "*에폭시수지 접착제의 특성과 응용*, 접착 및 계면 기술강좌(3)". 2, (2001).
4. 김신희, "*문화재 접합·복원재료 중 Epoxy 수지의 자외선 노화 거동에 관한 연구*". 한서대학교, (2005).
5. 문화재청, "문화재수리보고서". (1989~2001).
6. 도진영, "*암석의 물리적 성질과 수분흡수도가 풍화, 손상에 미치는 영향*". 한국문화재보존과학회제14회추계학술대회, (2001).
7. 도진영, 임권웅, "*수용성염이 석조문화재 표면 박리현상에 미치는 영향*". *보존과학회지*, 22, p119-133, (2008).
8. 이상진, 권정순, 남병직, 안병찬, "*접착복원재료 및 기술의 안정성 평가 기법 개발*". *보존과학회지*, 21, p41-48, (2007).
9. 김성수, "*인공풍화실험을 이용한 석재의 공학적 내구성 평가*". 서울대학교 석사학위논문, (1999).
10. 국립문화재연구소, "석조문화재 박리박락 손상메커니즘 규명". *석조문화재 손상 메카니즘 및 평가기술 개발*, (2007).