

아크릴계 보존처리제를 이용한 사암의 가압함침 보존처리

김연철 | 김사덕* | 김형중¹
공주대학교 신소재공학부, *국립문화재연구소

Conservation Treatment of Sand Stone by Pressurized Impregnation with Acrylic Materials

Youn Cheol Kim | Sa Duk Kim* | Hyung Joong Kim¹

Department of Advanced Material Engineering, Kongju National University, Cheonan, 330-717, Korea,
*National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 305-380, Korea

¹Corresponding Author: hyungjk@kongju.ac.kr, +82-41-521-9393

초록 석조 문화재의 보존을 위한 효과적인 처리 방법으로 제안되는 가압 함침 방법으로 methyl methacrylate (MMA), MMA-butyl acrylate (PMB73) 공조성물 및 MMA-vinyl trimethoxy silane (PMV5) 공조성물을 사용하여 사암 및 화강암에 함침 처리한 후 물리 화학적 특성을 평가하였다. 화강암과 비교하여 사암의 경우 함침율이 3.2 - 3.7 wt%로 높은 값을 보였고 고압 반응기 내에 감압 공정 도입 시 32%의 함침율 증가를 나타내었다. 물리화학적 특성인 발수성, 휨강도, 충격 특성 및 초음파 속도 등도 화강암보다 사암에 대해 아크릴계 가압함침 처리제의 효과가 두드러지게 나타남을 알 수 있었고, 이는 사암의 공극이 많아 단량체 함침율이 크기 때문으로 해석할 수 있었다. 아크릴계 처리제별 사암에 대한 충격파괴 에너지는 PMMA의 경우 1.22 J, PMB73은 1.84 J, 그리고 PMV5의 경우 2.8 J을 나타내었다. 충격 특성에서 무기 특성을 개선한 PMV5가 최적의 성질을 나타내는 것은 아크릴계 처리제의 분자 구조보다는 처리제의 무기 친화 특성이 석재의 충격 특성에 더 많은 영향을 주기 때문으로 해석할 수 있었다.

중심어: 사암, 아크릴계 단량체, 가압함침, 충격특성, 감압공정

ABSTRACT After pressurized impregnation treatment, which has been proposed as an effective conservation method for stone cultural property, was executed with methyl methacrylate (MMA), MMA-butyl acrylate (PMB73) mixture and MMA-vinyl trimethoxy silane (PMV5) co-monomer mixture, the physical-chemical properties on the sand stone and the granite impregnated were evaluated. Compared to the case of granite, the impregnation ratios of sand stone showed larger values in the range of 3.2 to 3.7 wt% and these were increased up to 32% when the decompression process was applied to autoclave. The physical properties of sand stone such as anti-moisture property, flexural strength, impact property and ultrasonic velocity were also higher values than those of granite, which can be interpreted by high impregnation ratio resulted in many void within sand stone. The impact failure energy was 1.22 J for PMMA, 1.84 J for PMB73, and 2.8 J for PMV5, respectively. Since the inorganic affinity of treatment agent is more effective than the molecular structure of acrylic agent, PMV5 improved inorganic property indicates the optimum impact property.

Key Words: Sand stone, Acrylic monomers, Pressurized impregnation, Impact property, Decompression

1. 서 론

2007년 4월 현재 국보 66기, 보물 467기 등 542기의 국가 지정 문화재와 687기의 시도 유형문화재로 지정되어 있을 만큼 방대한 석조 문화재를 구성하는 암석의 종류는 화강암이 약 70%로 가장 큰 비중을 차지하고 있으며 이밖에 사암, 대리암 등으로 구성되어 있다. 이렇게 석조 문화재가 많이 존재하는 이유는 석조 문화재를 구성하고 있는 재료인 암석이 내구성이 뛰어나 오랜 시간이 지난 지금까지 보존되었기 때문이다. 그러나 석조 문화재를 구성하고 있는 암석들도 시간이 지나고 환경이 변화됨에 따라 조금씩 풍화되어 그 표면이 부식되고 탈락, 균열, 박락, 박리와 같은 풍화 현상을 나타내고 있다. 그 피해는 공업화의 급격한 진행으로 환경오염이 증가되고 대기 조성물의 변화와 산성비로 인해 점점 가속화되고 있다. 석조 문화재는 다른 문화재와는 달리 대부분이 옥외에 존재하고 있고 크기가 커서 외부 풍화 환경으로부터 완전히 격리시켜 보존하는 방법은 사용할 수 없으므로 풍화된 암석을 강화 효과를 가지는 보존 처리제를 이용하여 보강하고 외부로부터 침투되는 풍화 인자를 차단하여 풍화된 암석의 보호하는 방법을 사용하게 된다.

석조 문화재의 효과적인 보존처리 방법은 풍화된 암석의 기계적 강도를 높이고 외부로부터 침투되는 풍화 인자를 차단하여 풍화작용의 진행을 저하시킴으로서 원형 그대로 석조 문화재를 보존할 수 있어야 한다. 기존의 연구에서 국내 석조 문화재의 많은 부분을 차지하는 화강암에 압력과 같은 물리적인 힘으로 암석의 깊은 곳까지 단량체(monomer)를 함침(이하, 가압 함침 공정) 시키고 이들 단량체를 중합하여 내부 공간의 공극이 고분자 물질로 채워져 풍화의 가장 큰 원인인 수분과 염류의 침투가 어렵게 되는 동시에 이들 고분자 물질들이 암석 조직을 단단히 결합시키는 결합제로 작용하게 되어 물리 화학적 특성의 향상을 가져오는 것으로 확인되었다^{1,3}. 또한 아크릴계 수지를 함침 처리제로 가압 함침 처리할 경우에 산소 차단성, 내수성, 자외선, 열, 기후에 대한 저항성이 우수하기 때문에 옥외에 사용되는 발수 경화제로 우수한 성질을 나타낸다.⁴ 특히 poly(methyl methacrylate, PMMA)는 투명성, 내화학성, 기계적 성질이 우수하여 석조 문화재의 보존 처리제로 사용이 기대되고 다양한 종류의 단량체를 공중합하여 보존 처리제의 물성을 조절할 수 있는 장점을 가지고 있다. 다만 기존의 다른 강화 처리제들처럼 처리 후 이들 함침 처리제가 풍화되어 거

칠어진 표면의 미세한 공간에 메워짐으로 인해 표면 광택이 발생하거나 색감이 짙어질 수 있는데 이를 근본적으로 해결하기 위해서는 광택도 조절과 색의 농담 조절을 위한 더 많은 연구가 필요하다.

화강암과 사암의 경우 암석의 광물학적 특성이 달라 가압 함침 공정의 변수들을 다르게 할 필요가 있을 것으로 판단된다. 특히 화강암에 비해 사암의 경우는 공극이 많은 특징을 가지고 있기 때문에 아크릴계 함침 처리제의 종류와 가압함침 전 감압 처리 공정 등이 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 MMA의 내충격성 향상을 위해 butyl acrylate를 공중합한 PMB73⁵과 무기 친화성 개선을 위해 vinyl trimethoxy silane (VTMS)를 공중합한 PMV5⁶를 보존 처리제로 사용하고, 가압함침 사전 처리공정으로 감압 공정을 채택하여 함침 및 물리 화학적 특성을 평가하여 사암에 대한 가압함침 처리 공정을 연구하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 실험재료

Methyl methacrylate (MMA)와 butyl acrylate (BA)는 SAMCHUN chemical의 제품을, vinyl trimethoxy silane (VTMS)는 Aldrich사의 제품을 추가 정제 없이 사용하였다. 개시제로는 SAMCHUN chemical의 benzoyl peroxide (BPO)를 사용하였고 합성된 발수처리제의 비교를 위해 기존의 (발수)강화처리제인 Wacker사의 stone strengthener OH 100을 사용하였다.

사암은 인도산을 사용하였고 물성 비교를 위한 화강암으로 전라북도 익산시 황등면(이하, 황등석)에서 생산되는 암석을 사용하였다. 시편의 크기는 시험에 따라 50 × 50 × 50 mm, 50 × 50 × 30 mm의 함침 시험용 육면체 시편과 충격강도를 측정하기 위한 80 × 30 × 20 mm 크기의 충격강도 시편을 석재 절단기로 제조하여 사용하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 처리제의 가압함침 공정

암석 시편은 vacuum oven에서 암석 내부에 존재하는 수분을 제거하기 위해 약 100 °C 정도로 하루나 이틀 동안 일정 무게에 도달할 때까지 충분히 건조한 후 시편의 온도를 상온까지 냉각시킨 다음 함침을 실시하였다. 암석 시편의 건조가 완료되면 함침 전 암석 시편의 무게를 측정하고 개

시제를 단량체의 1 wt%로 녹여 용액 상태로 만들어진 함침 처리 용액이 담긴 용기에 암석시편을 넣은 다음, 이 용기를 최대 압력 35 atm까지 견딜 수 있도록 제작된 고압 함침기 (autoclave)에 넣고 진공펌프를 이용하여 2시간 동안 76 torr 감압상태에서 감압처리 한 후 6 atm에서 12시간 동안 가압하여 함침하였다. 함침된 암석시편은 표면에 묻은 함침 단량체 용액을 흡수성이 좋은 천으로 닦아내어 완전히 제거하고 플라스틱 랩(wrap)과 알루미늄 foil로 감싼 다음 비닐 bag으로 완전히 밀봉한 후 다시 zip bag에 넣어 80 °C 의 water bath에 넣어 8시간 동안 중합반응 시켜 암석의 기공에 고분자가 함침 되도록 하였다. 자세한 가압함침 공정은 이전의 논문³에 기록되어 있다.

2.2.2. 측정

가압함침 후의 함침율은 다음과 같이 무게 변화를 이용하여 측정하였다.

$$\text{함침율(\%)} = \frac{\text{함침후 무게(g)} - \text{함침전 무게(g)}}{\text{함침전 무게(g)}} \times 100$$

함침 처리된 암석의 내수성을 측정하기 위해 흡수율을 KS F2518 "석재의 흡수율 및 비중 시험 방법"으로 측정하였다.

$$\text{흡수율(\%)} = \frac{\text{침수후 시편의 질량(g)} - \text{건조된 시편의 질량(g)}}{\text{건조된 시편의 질량(g)}} \times 100$$

힘 강도는 universal testing machine(Hounsfield Co., model H25K)을 사용하였다. 시편의 크기는 100 × 35 × 10 mm로 하였고 crosshead speed는 1 mm/min으로 하여 측정하였다. 테스트 방법은 ISO 178에 따라 시험하였으며 7개의 시편의 평균치를 구하였다. 충격강도를 측정하기 위해 대영 C&T사의 30 Kg-cm 용량의 아이조드(Izod) 충격 시험기를 이용하였다. 암석 시편의 크기는 80 × 30 × 20 mm의 시편을 사용하였다. 충격추의 에너지를 0.74 J, 0.86 J, 0.98 J, 1.10 J로 변화시켜 함침처리하지 않은 시편과 처리한 시편 각각 5개씩을 시험하여 암석 시편의 파괴와 크랙발생 여부를 관찰하였다. 초음파 탐상기는 측정 양단의 초음파 통과 속도를 측정하는 장치로서 측정 대상물의 밀도에 의존한다 한편 밀도는 시편을 구성하는 재료의 압축강도와 비례적인

밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 비교적 치밀하고 균질한 암석의 경우 밀도와 압축강도와의 상관관계를 경험적으로 정리하여 초음파 속도에 의한 초음파 전달속도 방향축에 대한 압축강도를 구할 수 있다. 이러한 관계식의 하나인 아래 식에 CNS Farnell사의 Pundit-plus 모델을 이용하여 direct testing 방법⁷으로 측정된 P파의 속도를 대입하여 압축강도를 구하였다.

$$\begin{aligned} \text{일축압축강도(kg/cm}^2\text{)} &= 66.039 \times \exp(5.78598 \times 10^{-4} \times V_p) \\ V_p &= P\text{파의 속도(m/s)} \end{aligned}$$

3. 연구 결과 및 고찰

3.1. 함침율 및 내부 함침 확인

암석 시편 내부에 존재하는 수분이나 공기 등은 아크릴계 처리제의 가압 함침 후 시편에 남아 석재의 물리화학적 특성에 영향을 줄 수 있으므로 효과적인 제거를 위해 약 100 °C 정도로 조정된 진공 오븐에서 충분히 건조한 후 시편의 온도를 상온까지 냉각시킨 다음 함침을 실시하였다. 사암의 경우 화강암과 비교할 때 기공이 많기 때문에 진공 오븐에서의 건조로 충분하지 못할 것으로 예상하여, 고압 반응기에서 76 torr 정도로 감압하는 공정을 추가하여 함침율을 비교하였다. Table 1은 6 atm, 12시간의 가압 함침 조건과 80 °C 8시간의 중합 조건에서의 함침율을 감압 공정 적용 전후 시편에 대해서 나타낸 것이다. 실험 결과 화강암에서는 감압 공정의 추가가 함침율에 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 반면 사암에 감압 공정이 추가된 경우에는, MMA를 기준으로 약 32 % 정도의 함침율 증가 효과를 보였다.

보존 처리를 위해 가압함침 공정을 적용하고자 하는 이유는 효과적으로 처리제가 석재의 내부 깊숙하게 충분히 침투되어야 할 필요가 있기 때문이다. Figure 1은 화강암(황등석)과 사암의 가압 함침 처리 시편에 대한 PMMA의 내부 함침 정도를 살펴보기 위해서 함침이 끝난 시편의 가운데를 절단하고 중심 부분의 암석을 잘라 표면과 중앙부분의 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) spectrum을 보여주는 것이다. 미처리 시편의 경우 EDS 분석 결과 탄소가 검출되지 않았지만, 함침 처리한 시편에서는 표면부와 중심부 모두에서 탄소가 검출되었고 탄소 함량 차이가 크지 않게 나타났다. 이는 처리제가 표면부터 내부까지 일정하게 침투되었음을 나타내는 결과로 볼 수 있었다.

Table 1. Impregnation ratios of pressurized specimen without (1) and with (2) decompression process.

Stone type		MMA	PMV5	PMB73	OH100
Granite	(1)	0.263	0.102	0.210	0.101
	(2)	0.257	0.104	0.207	-
	(2)/(1)	0.98	1.02	0.99	-
Sand Stone	(1)	3.719	3.245	3.226	2.451
	(2)	4.923	4.478	4.476	-
	(2)/(1)	1.32	1.38	1.39	-

Table 2. EDS results of treated stones and untreated granite with MMA.

Spectrum		C	O	Al	Si	others	Total(%)
Untreated		0	61.76	7.57	23.89	6.78	100
Granite	Surface	9.96	56.72	5.55	23.51	4.26	100
	Middle	8.12	56.83	6.78	21.80	6.47	100
Sand Stone	Surface	26.54	49.37	0.56	20.81	1.72	100
	Middle	25.23	49.39	1.35	22.66	1.38	100

Table 2에 이 EDS 분석 결과를 나타내었다.

3.2. 함침시편의 물리화학적 특성

암석의 풍화에 가장 큰 영향을 주는 물은 외부로부터 암석의 내부까지 조압 광물과 화학 반응을 일으키는 오염 물질의 전달과 동결 융해에 의한 기계적 풍화를 촉진하는 풍화 요소이다. 함침 처리제를 암석에 처리할 경우 함침된 고분자는 암석의 기공을 막아 물의 흡수를 방해하거나 흡수되는 물의 양을 감소시킨다. Figure 2는 화강암(황등석)과 사암의 시간에 따른 물 흡수율을 측정한 결과이다. 아크릴계 처리제가 가압 함침 처리된 암석의 물 흡수율이 현저히 감소되는 것을 확인할 수 있었다. OH100의 경우 물 흡수율 개선 효과가 화강암과 사암 모두에서 40%대로 아크릴계 처리제에 비해 적게 나타남을 알 수 있었다. 화강암에 대한 아크릴계 처리제의 발수성에 대한 개선이 60% 정도인데 반해 사암에 대해서는 80% 정도의 개선 효과를 보여주어 특히 사암에 있어서의 개선 효과가 두드러지게 나타남을 알 수 있었다. 이는 사암이 공극의 크기와 공극률이 화강암보다 크고 그로 인해 더 쉽게 많은 양의 처리제가 함침될 수 있었던 효과로 여겨진다.

일반적으로 외부에서 암석이 견딜 수 있는 일정 강도 이상의 힘이 가해지면 암석은 파괴된다. 암석의 조직 구조에 따르면 화강암의 경우 강한 강도를 가지는 석영과 약한 강도를 가지는 장석과 운모 부분의 계면에서 분리가 발생하며 파손이 일어난다. 이렇게 암석의 약한 결합 부분을 함침

처리를 통해 결합시킴으로서 보강해 주면 외부의 힘에 의해 쉽게 파손되는 것을 방지하여 강도를 증가시킬 수 있다.

Figure 3은 PMMA, PMB73, PMV5, OH100으로 처리된 시편과 미처리 시편의 휨강도 측정 결과를 나타낸 것이다. 미처리 시편 및 OH100에 비하여 아크릴계 처리제를 이용하여 함침 처리를 한 경우 화강암과 사암 모두에 있어서 큰 폭으로 휨 강도가 증가하였다. 특히 충격 특성과 무기 친화성을 개선하기 위해 공중합시킨 PMB73과 PMV5의 휨 강도 증가가 두드러지게 나타났다.

Figure 4는 여러 가지로 함침 처리된 암석시편과 처리되지 않은 시편의 Izod 충격시험 결과를 나타낸 것이다. 충격 시험은 석조 문화재의 모서리 부분 및 얇은 부분이 외부 충격으로 인해 파괴되어 깨지는 현상과 유사한 현상을 예측할 수 있는 시험이어서 시행하였다. 충격 강도 시편에 일정한 에너지를 가하면 깨지지 않고 형태를 유지하거나 파괴, 크랙 발생 현상이 일어나는데 이런 현상의 발생을 보고자 하였다. 각 시편에 0.74 J, 0.86 J, 0.98 J, 1.10 J로 충격에너지를 변화시켜 충격을 가했는데 미처리 시편과 OH100으로 함침 처리된 화강암과 사암 시편은 0.98 J의 에너지로 충격을 가할 때 충격에너지를 이기지 못하고 모두 파괴되었다. 하지만 아크릴계 함침 처리제가 처리된 시편의 경우 일부 시편이 높은 충격에너지에서 파괴가 일어났지만 낮은 충격에너지에서는 대부분이 파괴되지 않아 충격특성이 상당히 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 함침 처리제가 암석의 내부 미세공극에 충전됨으로서 암석 자체를 강화시킴과 동시에 외부 충격을 흡수하고 충격 에너지를

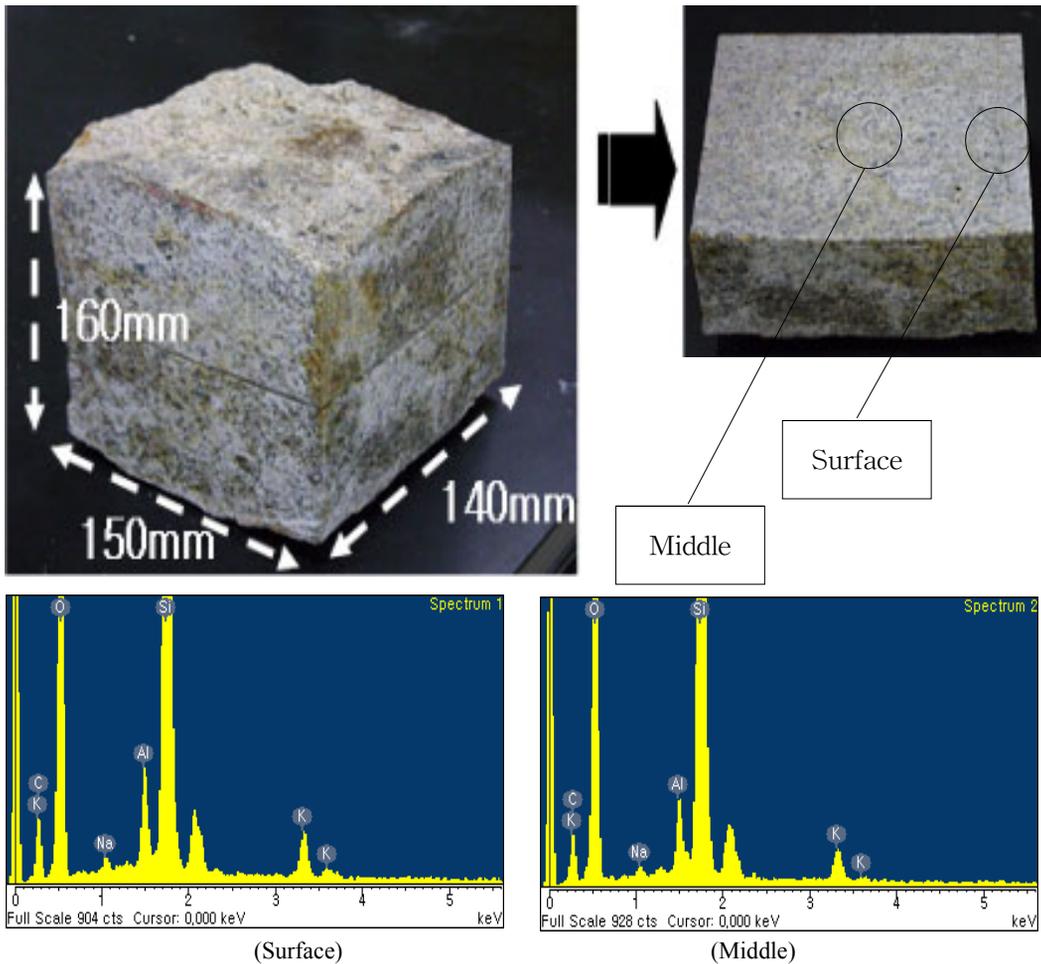


Figure 1. Photograph of treated stone and EDS spectra of the indicated site on the stone treated with MMA.

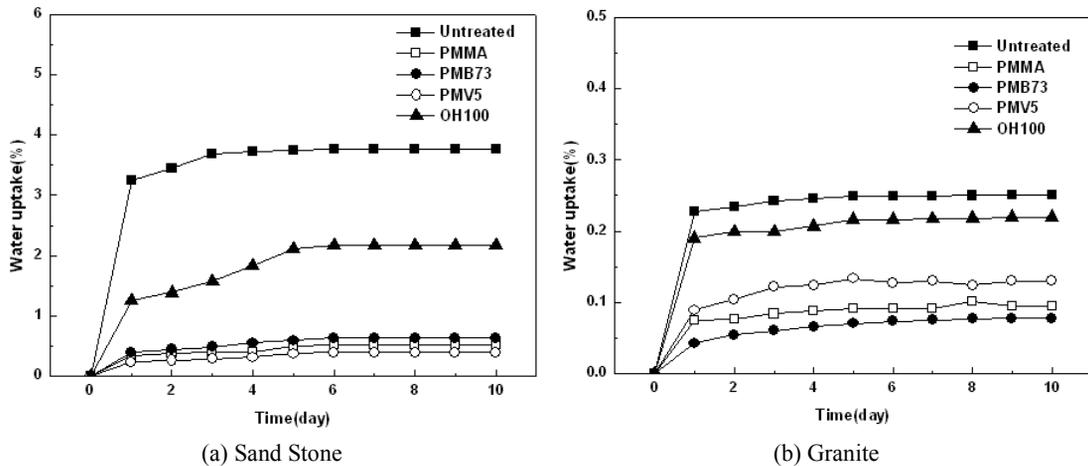


Figure 2. Moisture uptake ratio of stones impregnated with various agents. (a) Sand stone, (b) Granite.

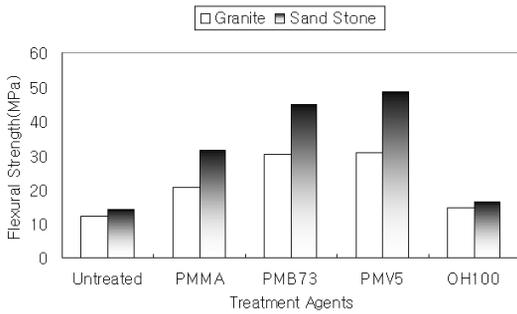
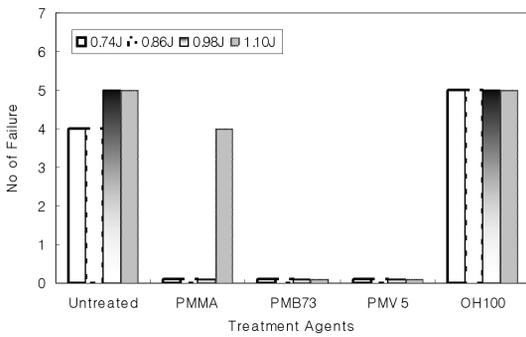
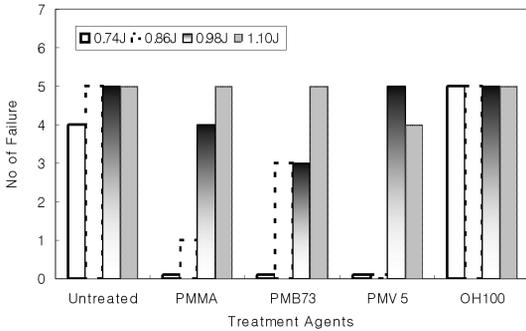


Figure 3. Flexural strength of stones treated with various agents.



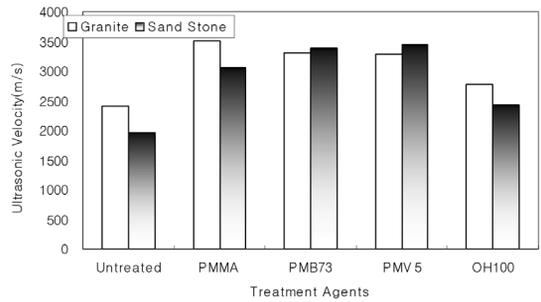
(a) Sand stone



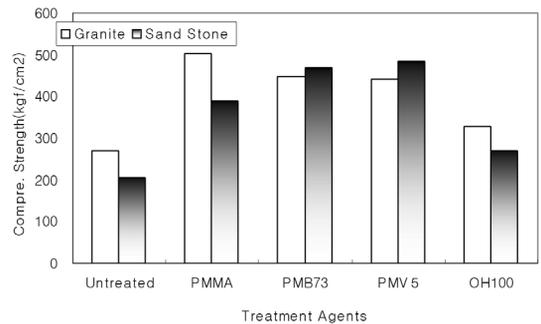
(b) Granite

Figure 4. Izod impact test results for impregnated. (a) Sand stone and (b) Granite with various agents.

분산시켜 암석 시편을 깨어지는 현상으로부터 보호하기 때문에 해석할 수 있었다. 함침 처리제별 충격 특성을 살펴보면 화강암과 사암 모두에서 PMV5를 처리제로 사용했을 때 개선 현상이 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다. 이와 같은 충격특성의 개선 효과는 화강암 대비 사암에서 두드러지게 나타났고, 사암에 PMV5가 함침된 경우 0.74 J에서 2.8 J까지 파괴에너지가 증가하였다. 화강암 대비 사암에서 두드러지게 나타나는 이유는 처리제의 함침율



(a) Ultrasonic velocity



(b) Uniaxial compression strength

Figure 5. (a) Ultrasonic velocity, and (b) Uniaxial compression strength of stone specimens treated with various agents.

이 크기 때문에 나타나는 현상으로 유추할 수 있고 PMV5가 충격 강도에서 최적의 특성을 보이는 것은 아크릴계 처리제의 분자구조보다는 처리제의 무기 친화특성이 석재의 충격 특성에 더 많은 영향을 주기 때문으로 해석할 수 있었다.

Figure 5에 여러 종류의 아크릴계 처리제로 처리한 화강암과 사암의 초음파 속도와 일축 압축강도를 나타내었다. 초음파탐상기를 이용하여 광물의 조성 및 구조가 같은 암석의 초음파 통과 속도를 측정할 경우 같은 속도를 가져야 한다. 화강암과 사암 시편의 경우 모두 암석의 조성 및 구조가 유사하여 거의 유사한 초음파의 속도를 나타낸다. 하지만 함침 처리 후 암석 시편은 미세 기공이 고분자 물질로 채워져 있기 때문에 초음파의 속도가 증가됨을 예상할 수 있으며 이를 이용하여 초음파 속도로부터 일축 압축 강도를 계산하였다. 우선 아크릴계 고분자로 함침된 경우 함침율이 OH 100보다 높은 값을 가지기 때문에 초음파 속도의 증가율이 약 두 배 이상 차이를 나타내게 된다. 즉 암석 시편에 더 많은 양의 고분자가 미세 기공에 함침됨에 따라 초음파를 빠르게 전달하여 그 속도가 증가됨을 의미한다. 또

한 PMMA, PMB73, PMV5으로 처리한 시편 모두 미처리 시편의 경우 보다 함침처리 공정을 통해 PMMA은 약 56%, PMB73은 약 71%로 초음파 속도가 증가되었으며 PMV5의 경우 75%로 가장 높은 증가율을 보였다.

4. 결론

화강암과 비교할 때 아크릴계 함침 처리제 종류별 사암에 대한 물리 화학적 특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 사암의 경우 공극이 많기 때문에 화강암에 비하여 함침율이 높게 나타났고, 화강암과는 달리 고압 반응기 내에 감압 공정을 도입할 경우 약 32%의 함침율 증가를 나타내었다.

(2) 함수율, 휨 강도 충격 강도 및 초음파 속도 등의 결과로부터 화강암보다 사암에 대해서 아크릴계 가압함침 처리제의 효과가 두드러지게 나타남을 알 수 있었고 이는 사암의 단량체 함침율이 크기 때문으로 해석할 수 있다.

(3) 아크릴계 처리제별 사암에 대한 파괴 충격에너지는 PMMA의 경우 1.22 J, PMB73은 1.84 J, 그리고 PMV5의 경우 2.8 J로 PMV5가 가장 우수한 내충격성을 나타내었다. 충격 강도에서 무기 특성을 개선한 PMV5가 최적의 특성을 보이는 것은 PMMA와 PMB73과 같은 단순 아크릴계 처리제의 분자 구조에 따른 효과라기보다 PMV5에 포함된 VTMS의 methoxy silane 측쇄로 인한 처리제의 무기 친화 특성이 석재의 충격 특성에 더 많은 영향을 주었기 때문으로 해석할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국립문화재연구소의 2009년도 연구용역사업인 석조 문화재 보존 처리제 개발 과제 (과제고유번호: 09B012Y-00130-2009)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. jBACH, "25 years of acrylic total penetration, a tried and tested process". <http://www.jbach-stein.de/07vor/eng1.htm>
2. jBACH, "Possibilities of preserving laser cleaned crusts on marble". <http://www.jbach-stein.de/07vor/eng2.htm>
3. Kang, Y.S., Suh, M.C., Kim, U.Y. and Kim, H.J., "Conservation study of stones by using acrylic monomer". *Polymer(Korea)*, **32**, p213-218, (2008).
4. Alessandrini, G. et. al., "Comparative Evaluation of Fluorinated and Unfluorinated Acrylic Copolymers as Water-Repellent Coating Materials for Stones". *J. Appl. Polym. Sci.*, **76**, p962-977, (2000).
5. Chea, J.S., Kim, Y.C., and Kim, H.J., "Conservation process of stones by using acrylic resins under stones". *2008 Autumn Symposium*, Korean Society of Conservation Science for Cultural Heritage, (2007).
6. Chea, J.S., Kim, Y.C. and Kim, H.J., "Development of acrylic conservation agent enhanced inorganic affinity for stones". *2008 Autumn Symposium*, Polymer Society Korea, (2007).
7. <http://www.sensorcraft.com/pundit/punditplus.pdf>