

2025년 추계학술발표대회 : 일반부문

실리카 에어로젤 및 나노 그래핀 플레이크를 적용한 변성 실리콘 실란트 조성물의 내화 및 내열 성능 평가

Evaluation of Fire and Heat Resistance Performance of Modified Silicone Sealant Composition Applying Silica Aerogel and Nano Graphene Flakes

○ 윤 도 수*

Yoon, Do-Su

박 기 선**

Park, Keesun

김 수 민***

Kim, Sumin

Abstract

This study proposes a novel fire-resistant and heat-resistant modified silicone sealant composition to overcome the limitations of conventional fire-retardant sealants. The composition synergistically enhances performance by incorporating traditional fillers with advanced materials, specifically silica aerogel and nano-graphene flakes. Experimental results show the composition achieves a UL-94 V-0 rating and maintains over 85% of its initial tensile strength after thermal aging at 200°C for four weeks. Significantly, it passed the 60-minute fire resistance test (KS F 2845), demonstrating its potential to substantially improve the fire safety of building joints and fire-stopping penetration systems.

키워드 : 내화 변성 실리콘, 내열성, 난연성, 실리카 에어로젤, 나노 그래핀, 화재 안전

Keywords : Fire-Resistant Sealant, Heat Resistance, Flame Retardancy, Silica Aerogel, Nano Graphene, Fire Safety

1. 서론

1.1 연구 배경 및 필요성

현대 건축물의 고층화, 대형화 추세는 화재 발생 시 대규모 인명 및 재산 피해로 이어질 수 있는 위험성을 내포한다. 특히, 방화구획을 관통하는 설비 배관이나 벽과 바닥의 접합부 등에 시공되는 내화 채움 구조는 화염 및 유독가스의 확산을 저지하는 핵심 방화 시스템이지만, 화재 시 가장 취약한 부분이 될 수 있다(Nam et al., 2024). 선박이나 건물 내부의 환기 덕트와 같은 숨겨진 경로는 화재 시 연기 확산의 주된 통로가 되어 위험을 가중한다(Liu et al., 2024). 이러한 구조에 사용되는 건축용 실란트는 구조체의 수밀성과 기밀성을 확보하는 중요한 역할을 하지만, 대부분 유기 고분자 기반으로 제조되어 열에 취약한 한계를 가진다. 기존 방화 실란트는 주로 화염의 전파를 억제하는 난연성(Flame Retardancy)에 초점을 맞춰 개발됐다. 그러나 실제 화재 환경에서 실란트는 직접적인 화염뿐만 아니라 복사열에 의한 고온에 노출된다. 이에 따라 기존 실란트는 연화, 용융, 탈락하여 방화구획에 틈을 형성하고, 이는 화염과 유독가스의 새로운 확산 경로가 되어 방화 시스템 전체를 무력화시킨다.

따라서 건축물의 실질적인 화재 안전성을 확보하기 위해서는 난연성뿐만 아니라 고온에서도 형상과 물리적 성능을 유지하는 내열성(Heat Resistance)이 복합적으로 요구된다.

1.2 연구 목적

본 연구는 전통적인 무기 충전제와 첨단 나노 소재의 시너지 효과를 통해 난연성과 내열성이 동시에 극대화된 새로운 변성 실리콘 실란트 조성물을 개발하고, 그 성능을 정량적으로 평가하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 기존의 난연·내열 첨가제인 수산화알루미늄과 산화철에, 초단열 특성이 있는 실리카 에어로젤과 고온에서 안정적인 탄화층(Char Layer) 형성을 촉진하는 나노 그래핀 플레이크를 복합적으로 적용하였다. 각 소재의 유기적인 상호작용 메커니즘을 규명하고, 실험을 통해 개발된 조성물의 기계적 물성, 난연성, 내열성 및 최종 내화 성능을 종합적으로 평가하여 건축물 내화 채움 구조의 안전성을 획기적으로 향상할 수 있는 기술적 토대를 마련하고자 한다.

1.3 연구의 범위 및 방법

본 연구는 변성 실리콘 수지를 기반으로 하는 내화·내열 실란트 조성물 개발에 초점을 맞춘다. 연구의 범위는 문헌 고찰을 통한 핵심 첨가제 선정, 실험 계획에 따른 시편 제작, 그리고 제작된 시편의 성능 평가로 구성된다. 연구 방법으로, 첫째, 문헌 및 선행 연구 분석을 통해 실란

* 삼성물산(주), 공학석사, 건축시공기술사

** (주)지에스모아, 공학석사

** 연세대 건축공학과 교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Architectural Engineering, Yonsei University, kimsumin@yonsei.ac.kr)

트의 내화 및 내열 성능에 영향을 미치는 주요 첨가제(수산화알루미늄, 산화철, 실리카 에어로젤, 나노 그래핀 플레이크 등)의 특성과 작용 기제를 고찰한다. 둘째, 선정된 첨가제를 변성 실리콘 수지에 배합하여 대조군과 단계별 실험군 시편을 제작한다. 셋째, 제작된 시편을 대상으로 KS F 4910(건축용 실링제)에 따른 기본 물성(인장강도, 신율 등), UL-94 수직 연소시험을 통한 난연성, 200℃ 고온 환경 노출 후 물성 변화를 통한 내열성, 그리고 KS F 2845(유리구획 부분의 내화 시험방법)에 따른 최종 내화 성능을 종합적으로 평가하고 분석한다.

2. 이론적 고찰

2.1 건축용 실란트의 내화 성능 요구사항

건축물 내화 채움 구조에 적용되는 실란트의 종합적인 내화 성능은 재료 자체가 연소에 저항하는 난연성과 고온 환경에서 구조적 안정성을 유지하는 내열성의 복합적인 결과로 평가된다. 이러한 성능은 실제 화재 시나리오에서 방화구획의 연속성을 유지하는 능력으로 나타나며, 이는 구체적으로 차열성(Integrity)과 차열성(Insulation)이라는 두 가지 핵심 지표로 측정된다.

차열성은 실란트가 고온에 노출되었을 때 균열, 용융, 탈락 없이 그 형태를 유지하여 화염이나 고온 가스가 틈새를 통해 인접 구획으로 확산하는 것을 방지하는 능력을 의미한다. 이는 재료의 우수한 내열성에 좌우된다. 반면, 차열성은 재료의 낮은 열전도율을 통해 비화재면의 온도가 재실자의 피난 안전을 위협하거나 가연물의 자연 발화를 유발할 수 있는 임계 온도(일반적으로 평균 140K, 최고 180K 이상 상승 방지) 이상으로 상승하는 것을 억제하는 성능으로, 재료의 난연성과 단열 특성과 밀접히 관련된다.

그러나 대부분의 건축용 실란트는 유기 고분자를 기반으로 하므로 열에 매우 취약하다. 일반적인 유기계 실란트는 고온 환경에서 쉽게 열 분해되어 연화, 수축 및 접착력 상실과 같은 물리적 변형을 겪는다. 이러한 변형은 방화구획에 치명적인 틈을 발생시켜 화재 확산의 직접적인 경로를 제공하게 된다(Nam et al., 2024). 따라서 이상적인 내화 실란트는 우수한 난연성을 기본으로, 고온에서도 낮은 열팽창률과 높은 체적 안정성을 유지해야 한다. 또한, 열전도율을 최소화하여 효과적인 단열층을 형성함으로써 비화재면으로의 열전달을 차단하는 복합적인 성능을 확보해야만 내화 채움 구조의 신뢰성을 보장한다.

2.2 내화 및 내열 성능 향상 재료

2.2.1 전통적 난연·내열 첨가제

수산화알루미늄(Aluminum Hydroxide, $\text{Al}(\text{OH})_3$)은 대표적인 무기계 난연제로, 약 220℃ 이상에서 흡열 반응을 통해 분해되면서 다량의 수증기(H_2O)를 발생시킨다. 이 수증기는 가연성 가스를 희석하고 재료 표면을 냉각시켜 연소

확대를 지연시키는 역할을 한다(Nam et al., 2024). 산화철(Iron Oxide, Fe_2O_3)은 고온에서 안정적인 구조를 유지하여 실란트 매트릭스의 열적 변형을 막고, 경화 후 강도를 보강하는 내열제로 기능한다.

2.2.2 실리카 에어로젤(Silica Aerogel)

실리카 에어로젤은 기공률이 90% 이상인 나노 다공성 구조로 인해 현존하는 고체 물질 중 가장 낮은 열전도율(약 $0.013\text{W/m}\cdot\text{K}$)을 나타낸다(Qu et al., 2025). 이러한 초단열 특성은 실란트에 적용 시 내부로의 열전달을 효과적으로 차단하여 차열 성능을 획기적으로 향상한다(Goryunova & Gahramanli, 2024). 또한, 실리카 에어로젤은 그 자체로 불연성을 띠며, 다른 고분자와 복합화될 때 우수한 난연성을 부여하는 것으로 보고된 바 있다(Maleki et al., 2018).

2.2.3 나노 그래핀 플레이크(Nano Graphene Flakes, GNP)

GNP는 2차원 판상 구조를 가진 나노 소재로, 고분자 매트릭스 내에서 열분해 가스의 이동을 물리적으로 차단하고, 연소 시 표면에 견고하고 밀도 높은 탄화층(Char Layer)을 형성한다. 이 탄화층은 산소 유입과 열전달을 동시에 차단하는 방어막으로 작용하여 난연성과 내열성을 모두 증대시킨다(Ali, Kim, & Bhattacharyya, 2021). 특히, 인계 난연제와 같은 다른 첨가제와 결합 시, 화재 초기에는 물리적 장벽을, 후기에는 화학적 탄화층을 형성하는 이중 장벽 효과(Double Barrier Effect)를 통해 난연 효율을 극대화하는 것으로 알려져 있다(Chen et al., 2017).

2.2.4 첨가제 간의 복합 방어 메커니즘

본 연구에서 제안하는 조성물의 핵심은 각 첨가제의 개별 성능을 넘어서는 시너지 효과에 있다. 제안된 복합 방어 메커니즘은 초기 열 차단(Initial Thermal Shielding), 흡열 냉각(Endothermic Cooling), 탄화층 안정화(Char Layer Stabilization)의 순차적이고 상호 보완적인 단계로 작동한다.

화재 초기, 실리카 에어로젤의 초저열전도 특성이 실란트 내부로의 열 침투 속도를 급격히 늦추는 초기 열 차단 역할을 수행한다(Goryunova & Gahramanli, 2024; Qu et al., 2025). 이렇게 확보된 시간 동안 수산화알루미늄은 안정적으로 열을 흡수하며 분해되어 수증기를 방출하고, 이를 통해 가연성 가스를 희석하고 표면 온도를 낮추는 흡열 냉각 효과를 극대화한다(Nam et al., 2024). 온도가 더욱 상승하면, 나노 그래핀 플레이크가 고밀도의 안정적인 탄화층 형성을 촉진하여 물리적 방어막을 구축한다. 이 그래핀 강화 탄화층은 실리카 에어로젤의 다공성 구조가 고온에 의해 붕괴하는 것을 막아 단열 성능을 더 오래 유지하는 탄화층 안정화 기능을 한다(Ali, Kim, & Bhattacharyya, 2021). 이처럼 각 재료의 장점을 극대화하고 단점을 보완하는 상호작용은 기존 실란트가 도달할 수 없었던 수준의 내화·내열 성능을 발휘하게 하는 핵심적인 원리이다.

3. 실험

3.1 사용 재료

본 연구에서는 주재료로 변성 실리콘 수지를 사용하였으며, 가소제로는 다이아이소노닐 프탈산, 보강제로는 실리콘디옥사이드, 경화제로는 실란계 화합물을 사용하였다. 무기 충전제로는 탄산칼슘을 적용하였다. 내화·내열 성능 향상을 위한 핵심 첨가제로는 산화철(Fe_2O_3), 수산화알루미늄($\text{Al}(\text{OH})_3$), 실리카 에어로젤 분말, 나노 그래핀 플레이크(GNP)를 사용하였으며, 추가적인 성능 개선을 위해 붕소 처리된 티타늄과 벤즈이미다졸론계 화합물(Pigment Yellow 181)을 특정 실험군에 적용하였다.

3.2 시편 제작

핵심 첨가제의 효과 검증을 위해, 첨가제가 없는 대조군과 4종의 실험군으로 구성했다. 실험군 1은 산화철, 수산화알루미늄, 실리카 에어로젤, GNP를 기본 조성에 첨가한 그룹이다. 실험군 2와 실험군 3은 실험군 1의 구성에 각각 붕소 처리 티타늄과 벤즈이미다졸론계 화합물을 추가하여 부가적인 성능 향상 여부를 관찰하였다. 실험군 4는 실험군 1과 동일한 구성을 가지나, 실리카 에어로젤과 GNP를 각각 인산염과 실란으로 표면 처리하여 매트릭스와의 계면 결합력 증대 효과를 확인하고자 하였다. 모든 시편은 표 1의 조성비에 따라 2축 스크류 압출기를 사용하여 균일하게 혼합 및 탈포하여 제작하였다.

표 1. 대조군 및 실험군의 성분 배합비 (단위: wt%)

성분	대조군	실험군1	실험군2	실험군3	실험군4
변성실리콘수지	100	100	100	100	100
다이아이소노닐 프탈산	50	50	50	50	50
실리콘디옥사이드	20	20	20	20	20
실란 경화제	20	20	20	20	20
탄산칼슘	80	80	80	80	80
산화철	20	20	20	20	20
수산화알루미늄	70	70	70	70	70
실리카 에어로젤	-	10	10	10	-
화학 개질 된 실리카 에어로젤	-	-	-	-	10
나노 그래핀 플레이크	-	10	10	10	-
화학 개질 된 나노 그래핀 플레이크	-	-	-	-	10
붕소 처리된 티타늄	-	-	10	10	-
Pigment Yellow 181	-	-	-	10	-

3.3 성능 평가 방법

3.3.1 기계적 물성 평가

내화/내열제 첨가에 따른 실란트의 기계적(물리적) 성능 변화를 평가하기 위해 KS F 4910(건축용 실링제) 규격에 따라 인장강도와 접착성을 측정하였다. 이는 첨가제가 실란트 본연의 구조적 성능에 미치는 영향을 확인하여, 실제 건축 환경에서의 적용 가능성을 판단하기 위함이다. 인장강도는 아령형 3호 시편을 제작하여 만능 인장 시험기(UTM)로

500mm/min의 속도로 측정하였다. 접착성은 전착 강판 사이에 시편을 적용하여 7일간 경화한 후 UTM으로 측정하였다.

3.3.2 내열 및 난연 성능 평가

재료의 연소 저항성 및 고온 안정성을 종합적으로 평가하였다. 난연 성능은 UL-94 수직 연소 시험을 통해 평가하였다. 127mm x 12.7mm x 1.6mm 크기의 시편에 10초간 2회 화염을 가한 후, 자기 소화 시간 및 적하물(drip)의 발화 여부를 관찰하여 V-0, V-1, V-2 등급을 판정하였다(Chen et al., 2017).

내열 성능은 초고온 오븐을 사용하여 등은 TGA(200℃)로 열노화를 4주 동안 수행하였으며, 매주 동일 시편에 대해 인장강도, 신율, 중량 변화를 측정하였다. 인장 시험은 KS F 4910에 따라 아령형 3호 시편 및 H형 시편으로 시행하였고, 중량 변화는 초기 중량 대비 변화를 산출하였다.

3.3.3 내화 성능 평가

실제 화재 상황을 모사하여 종합적인 내화 성능을 평가하기 위해 KS F 2845(유리구획 부분의 내화 시험방법)에 따라 60분간 내화 시험을 시행하였다. 시험체를 표준 화재 온도 곡선에 따라 가열하며 화염의 관통 여부(차염성)와 비가열면의 온도 상승(차열성)을 평가하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 기계적 물성

기계적 물성 측정 결과는 그림 1과 그림 2에 나타내었다. 인장강도는 대조군(28kgf/cm²) 대비 실험군 1~4에서 각각 +28.57%, +35.71%, +35.71%, +46.43% 증가하였다. 접착성은 대조군(26kgf/cm²) 대비 실험군 1~3에서는 변화가 없었고(0.00%), 실험군 4에서만 +15.38%(26→30kgf/cm²)의 유의한 증가세를 보였다.

이는 GNP가 고분자 매트릭스 내에서 강화재(reinforcement) 역할을 하여 응력 분산에 기여했기 때문으로 판단된다. GNP는 고유의 우수한 기계적 특성과 폴리머와의 강력한 계면 결합을 통해 효과적인 응력 전달을 가능하게 하여 복합재의 강도를 향상한다(Ali, Kim, & Bhattacharyya, 2021). 특히, 필러를 표면 처리한 실험군 4의 인장강도(41kgf/cm²)와 접착성(30kgf/cm²) 모두에서 가장 우수한 수치를 기록했다. 이는 필러 표면 처리가 실리콘 매트릭스와의 계면 결합력을 증대시켜 응력 전달 효율을 극대화했기 때문으로 분석된다. 이 결과는 난연제 첨가 시 기계적 물성이 저하되는 일반적인 문제를 GNP 적용을 통해 개선할 수 있음을 보여준다.



그림 1. 기계적 물성 평가 결과(인장강도)

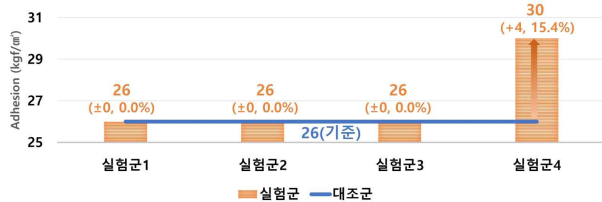


그림 2. 기계적 물성 평가 결과(접착성)

4.2 내열 및 난연 성능

TGA 분석 결과, 그림 3과 같이 실험군 1~4는 대조군에 비해 열적 안정성이 크게 향상되었음을 확인하였다. 200℃ 이상에서 본격적인 열분해가 시작된 후, TGA 중량 감소율은 대조군 15.15% 대비 실험군 1~4에서 각각 26.01%, 31.22%, 32.61%, 28.12% 증가하였다.

특히 실험군 3이 가장 낮은 중량 감소율(0.1021%)을 나타냈으며, 이는 열분해 억제 및 탄화층 안정화에 의한 열적 안정성 향상으로 해석된다. 이는 첨가된 무기 필러들이 고온에서 안정적인 구조를 형성하고, 실리카 에어로젤과 GNP가 열분해를 억제했기 때문이다. 벤즈이미다졸론계 화합물이 추가된 실험군 3은 가장 낮은 중량 감소율을 보여 최고의 내열성을 나타냈다. UL-94 시험 결과, 모든 실험군은 최고 등급인 V-0 등급을 획득하여 우수한 자기 소화성을 보였다.



그림 3. TGA 중량감소율 (%) 시험 결과

4.3 내화 성능

KS F 2845(유리구획 부분의 내화 시험방법)에 따른 내화 성능 시험 결과, 표 2와 같이 대조군은 가열 시작 후 40분 이내에 차염성(화염 관통) 및 차열성(비가열면 온도 상승) 성능을 모두 상실하여 내화 기준을 만족하지 못했다. 반면, 핵심 첨가제가 포함된 실험군 1~4는 모두 60분의 시험 시간 동안 화염 관통이나 기준 온도 초과 없이 안정적인 성능을 유지하여 내화 기준을 통과하였다. 이는 실리카 에어로젤의 단열 효과와 GNP 기반 탄화층의 방어 효과가 복합적으로 작용하여 열과 화염의 전파를 효과적으로 차단했음을 시사한다.

표 2. KS F 2845(유리구획 부분의 내화 시험방법) 내화 성능 시험 결과

구분	차염성 (60분)	차열성 (60분)	판정
대조군	40분 (실패)	37분 (실패)	부적합
실험군 1	60분 (통과)	60분 (통과)	적합
실험군 2	60분 (통과)	60분 (통과)	적합
실험군 3	60분 (통과)	60분 (통과)	적합
실험군 4	60분 (통과)	60분 (통과)	적합

5. 결론

본 연구는 변성 실리콘 수지에 다양한 내화·내열 첨가제를 적용한 조성물의 성능을 평가하였다. 기계적 물성 평가 결과, 그래핀과 에어로젤의 표면 처리를 진행한 실험군 4가 가장 높은 인장강도와 접착성을 보여 필러와 매트릭스 간의 계면결합력 향상이 물성 개선에 중요한 요인임을 입증하였다. 내열 및 난연 성능 평가에서는 모든 실험군이 우수한 성능을 보였으며, 특히 실험군 3은 가장 뛰어난 내열 안정성을 나타냈다. 마지막으로, 모든 실험군은 60분 내화 시험을 성공적으로 통과하여 뛰어난 내화 성능을 증명하였다.

이상의 평가 결과를 종합하면, 본 연구에서 제안한 조성물 중 특히 표면 처리된 필러를 적용한 실험군 4가 기계적 물성, 내열 및 난연, 내화 성능 간의 균형이 가장 우수하였다. 따라서 본 조성물은 내화 채움 구조와 같은 화재 취약 부위에 적용되어 층간 화재 확산을 방지하고 재실자의 안전 확보에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Ali, I., Kim, N. K., & Bhattacharyya, D. (2021). Effects of Graphene Nanoplatelets on Mechanical and Fire Performance of Flax Polypropylene Composites with Intumescent Flame Retardant. *Molecules*, 26(13), 4094.
2. Chen, W., Liu, Y., Liu, P., Xu, C., Liu, Y., & Wang, Q. (2017). The preparation and application of a graphene-based hybrid flame retardant containing a long-chain phosphaphenanthrene. *Scientific reports*, 7(1), 8759.
3. Goryunova, K. I., & Gahramanli, Y. N. (2024). Insulating materials based on silica aerogel composites: synthesis, properties and application. *RSC Advances*, 14(43), 34690-34707.
4. Liu, Z., He, H., Zheng, J., Huang, Y., Zhuang, H., Chen, Y., & Lai, D. (2024). Effect of ventilation ducts on smoke spread between two adjacent cabins arranged along a corridor: An experimental and numerical investigation. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 159, 108245.
5. Maleki, H., Montes, S., Hayati-Roodbari, N., Putz, F., & Huesing, N. (2018). Compressible, Thermally Insulating, and Fire Retardant Aerogels through Self-Assembling Silk Fibroin Biopolymers Inside a Silica Structure—An Approach towards 3D Printing of Aerogels. *ACS applied materials & interfaces*, 10(26), 22718-22730.
6. Nam, J., Park, K., Yang, S., & Kim, S. (2024). Advancing building fire safety through heat resistant and flame retardant hybrid silicone sealant. *Journal of Building Engineering*, 91, 109528.
7. Qu, W., Liu, K., Zeng, H., Hu, Q., & Wang, L. (2025). Effect of SiO₂ aerogel and perlite on properties of foamed concrete. *Scientific Reports*, 15(1), 10945.