

무기계 내화 필러로 충전된 실리콘 고무 복합체의 열적, 물리적 특성

류현준 · 조선태 · 김영선 · 백성현 · 진성훈* · 심상은†

인하대학교 화학공학과, *㈜그레이스 콘티넨탈 코리아

(2016년 10월 6일 접수, 2016년 11월 14일 수정, 2016년 11월 24일 채택)

Thermal and Physical Properties of Silicone Rubber Composites Filled with Inorganic Fire-proof Fillers

Hyun Jun Ryu, Sun Tae Cho, Young Seon Kim, Sung-Hyeon Baek, Sung Hoon Jin*, and Sang Eun Shim†

Department of Chemistry & Chemical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

*Technology Research and Laboratory, Grace Continental Korea Co. Ltd., Bucheon 14501, Korea

(Received October 6, 2016; Revised November 14, 2016; Accepted November 24, 2016)

초록: 무기계 내화 필러는 실리콘 고무의 내화 성능 보강재로서 많은 관심을 받고 있다. 본 연구에서는 실리콘 고무 내화 필러로서 잘 알려진 수산화마그네슘(MDH), 수산화알루미늄(ATH)과 미네랄 울 2종의 실리콘 복합체를 제작해 열적, 물리적 특성을 비교 분석하였다. 가스토치 화염시험, 콘칼로리미터, TGA 분석을 통해 미네랄 울 2종의 내화 성능이 기존의 내화 필러 복합체보다 우수함을 확인하였다. 주사전자현미경(SEM), 만능재료시험기(UTM)를 통해 필러의 표면적이 큰 MDH를 실리콘 고무에 효과적으로 분산시킨 MDH/실리콘 고무 복합체가 인장, 인열, 신장율에서 우수한 특성을 나타냈고, 미네랄 울/실리콘 고무 복합체는 (MDH, ATH)/실리콘 고무 복합체에 비해 압축 강도, 경도에서 우수한 특성을 확인하였다.

Abstract: Inorganic fillers have attracted a great deal of interest as reinforcing materials for fire-proof performance in silicone rubber (SR). In this study, magnesium hydroxide (MDH) and aluminium hydroxide (ATH)/SR composites, well known fire-proof materials, and mineral wool/SR composites were analyzed for thermal and physical properties. It was confirmed that mineral wool/SR composites have an improved fire-proof performance than the (MDH, ATH)/SR composites through gas torch flame test, cone calorimeter, and thermogravimetric analysis (TGA). MDH/SR shows great tensile, tear strength and elongation at break through SEM and UTM due to the fine dispersion of MDH in SR. Also, mineral wool/SR composites show compressive strength and hardness properties higher than those of (MDH, ATH)/SR composites.

Keywords: silicone rubber, fire-proof, ceramization, inorganic fillers, flame test.

서 론

현대사회의 고도의 발전으로 인해 인구의 조밀화가 가속화되고 있고, 구조물은 점차 초고층화를 이루면서 주거용과 산업용 건축물의 경계가 허물어지고 있다. 이에 따라 우리는 주변에 다양한 가연성 물질들을 쉽게 찾아볼 수 있으며 항상 화재의 위험성에 노출되어 있다. 따라서 화재가 발생했을 때 방화 대책으로써 가장 중요한 불길의 확산을 막는 내화재료 연구의 필요성이 대두되고 있다.¹⁻³

특히, 우리가 일상생활에서 접하는 재료인 금속, 유기 및 무기, 고분자 재료에 내화 성능을 부여하는 연구가 많이 진행되고 있다. 위와 같은 다양한 산업 내화 재료 중에서도 실리콘 고무는 강한 열저항성, 좋은 열적 안정성, 절연 특성을 가지는 합성 고무 중의 하나로서 실리콘 고무는 건설, 전자, 운송 등 다양한 내화 재료로 활용 가능성이 크다.⁴⁻⁸ 실제로 고온의 환경에 노출되어 열적 안정성이 요구되는 전자제품, 자동차 부품, 전선 등에 쓰이고 있고, 그 시장규모도 점차 커지고 있다. Polydimethylsiloxane(PDMS)의 기본 골격인 Si-O 결합은 기본적으로 고온에서 우수한 결합 안정도를 보이고 있어 다른 합성 고무에 비해 내화 재료로서 적합하다. 또한 실리콘 고무는 상대적으로 낮은 열방출률(heat release rate, HRR)을 가지며, 연소 시 유독한 가스를 배출하지 않아 친환경

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: seshim@inha.ac.kr

©2017 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

경 내화 재료로서도 유리한 장점을 가지고 있다.^{9,10}

하지만, 실리콘 고무는 불꽃에 가까이 해도 불에 쉽게 타지 않는 내열성을 가지고 있지만 한번 불이 붙으면 지속적으로 불에 타는 성질을 가지고 있어, 실리콘 고무에 내화 필러를 충전해 이러한 성질을 보완한 실리콘 복합소재를 만들 필요성이 있다.^{11,12}

대표적인 난연 필러로서 실리콘 고무에 충전할 수 있는 물질은 magnesium hydroxide(MDH)와 aluminium hydroxide(ATH)가 있다. MDH와 ATH는 주로 고온의 환경에서 탈수 반응의 흡열반응에 의해 연소를 지연시키며 분해 시 발생한 수증기가 기체상의 가연성 물질의 농도를 희석시킴으로써 내화제의 역할을 하고 있다.¹³⁻¹⁸

위의 2종의 난연 필러 외에도 더 우수한 내화 특성을 보여주는 미네랄 섬유 및 유리 섬유 필러를 실리콘 고무에 충전하는 연구도 활발히 진행되고 있다. 난연 섬유소재는 불꽃이 섬유에 직접적으로 접촉하고 있을 때는 타지만 불꽃을 제거하면 스스로 타지 않는 섬유 소재를 뜻한다. 또한 미네랄 섬유는 자체적으로 내열성, 불연성, 단열성이 뛰어나 실리콘 고무에 충전되어 미네랄 섬유/실리콘 고무 복합체를 형성했을 때 MDH와 ATH에 비해 더욱 뛰어난 내화 성능을 나타낼 수 있다.

특히, 미네랄 섬유 및 분말 실리콘 고무 복합체는 고온의 환경에서 실리콘 고무 표면에 불가피하게 형성되는 재(ash) 층에 단단한 세라믹층이 생성되어 실리콘 복합체 내부로의 화염의 확산을 효과적으로 막을 수 있어 우수한 내화 특성이 구현된다. 실리콘 복합체에 화염을 가할 경우 바인더 역할을 하고 있는 실리콘 고무는 분자구조상 주사슬인 실록산 결합(Si-O)의 열분해로 인해 SiO₂ 입자가 생성된다. 생성된 SiO₂ 입자는 무기계 섬유 필러와 결합을 형성하여 세라믹층이 생성된다. 연소로 인해 생성된 세라믹층은 외부의 충격에도 버틸 수 있는 기계적 강도를 나타내고 있어 화재 후 사고로 인해 발생할 수 있는 인명 피해를 최소화할 수 있다.

본 연구에서는 기존의 내화 필러로서 잘 알려진 (MDH, ATH)/실리콘 고무 복합소재와 미네랄 울/실리콘 고무 복합소재를 비교 분석을 실시하였다. 1시간 가스토티치 화염 시험 후의 시험편의 모양 비교 및 시험편의 상부, 하부의 온도를 분석하여 복합체의 단열성능을 분석했다. 또한 필러/실리콘 고무 복합체의 가스토티치 화염시험, 콘칼로리미터, TGA, SEM, UTM을 통하여 4종류 내화 필러를 혼합한 실리콘 복합체를 비교 분석하였다.

실 험

재료. 실리콘 고무는 Grace Continental Ltd.에서 제조된 실리콘 고무(TS333/45)를 사용하였다. 충전된 필러는 입자 사이즈가 0.6~1.0 µm인 MDH와 입자 사이즈가 8 µm인 ATH가

사용되었고, 미네랄 섬유계 필러는 각 40~150, 130~160 kg/m³의 밀도값을 가지는 미네랄 울이 사용되었다. 경화제는 Akzo Nobel에서 제조된 2,4-dichlorobenzoylperoxide (DCBP)가 사용되었다.

시험편. 실리콘 고무 100 phr 기준으로 5 L sigma blade kneader를 이용하여 무기계 내화 필러 40 phr을 상온조건에서 1시간 동안 혼합하였다. 이후 kneader에서 혼합된 컴파운드를 two roll mill을 통해 추가적으로 혼합 작업을 하였다. 이후 시험편의 함량별(10, 20, 30, 40 phr) 조건에 따라 희석 배합 및 경화제 DCBP 1.2 phr을 two roll mill을 이용하여 혼합하였다. 이후 DCBP가 혼합된 실리콘 고무를 자동프레스(10 ton)를 이용하여 120 °C 5분간 press molding을 통해서 150 mm×150 mm×2 mm 크기의 스위트 모양의 시험편을 제작하였다. 위의 시험편의 배합표는 Table 1에 나타내었다. 본 논문에서 사용하는 코드명은 필러와 실리콘 고무의 영문 이름 앞자리와 필러 함량을 표시하여 부여하였다. 예를 들어 MGS40의 경우 magnesium hydroxide의 MG, silicone rubber의 S, 필러 함량을 의미하는 40으로 코드를 부여하였다.

시험분석. 가스토티치 화염시험: 시험편께 2 mm(2T)의 시험편에 가스토티치(약 1200 °C)를 이용하여 1시간 동안 가혹하게 한 곳만을 집중해서 태우는 내화 성능 시험 테스트를 진행하였다.

콘칼로리미터 시험: 콘칼로리미터 테스트는 ISO 5660-1 기준에 준용하여 수행하였고, heat flux는 50 kW/m²로 시험을 진행하였다. 시험의 크기는 2 mm×100 mm×100 mm로 제작되었다. 시험조건은 C-factor(오리피스 상수) 0.04246로 계산되었고, 데이터는 HRR_{peak}(peak heat release rate, kW/m²), HRR_{mean}(mean heat release rate, kW/m²)로 나타내었다.

열적 특성: 경화된 실리콘 고무 복합체 시료 10-20 mg를 채취하여 열적 특성을 분석했다. 열중량 분석기(thermogravimetric analysis, TGA)는 Q50(TA Instruments, USA)를 이용하여 질소분위기와 산소분위기에서 승온속도 10 °C/min로 40-900 °C 범위에서 열적 특성을 분석하였다.

표면 특성: 전자주사현미경(FE-SEM, Hitachi S-4300)을 이용하여 실리콘 복합체의 내화 테스트 전후 표면 특성을 관찰하였다. 샘플 전처리에는 진공증착방식을 이용하여 백금 코팅을 한 후에 분석하였다.

기계적 특성: 기계적 특성은 인장강도, 파단신율, 인열강도, 압축강도, 경도, 비중을 바탕으로 분석을 진행하였다. 인장시험 규격은 KS M 6518에 따라 아령형 3호 시험편을 제작하였다. 시험기기는 universal testing machine(DUT-2TC, 대경엔지니어링)을 사용하여 인장속도 500 mm/min로 인장강도, 파단신율을 측정했다. 인열강도 시험 규격은 KS M 6518의 B type형 시험편을 제작하고 500 mm/min으로 시험을 진행하였다. 압축시험 규격은 KS M ISO 7743에 따라 원기둥 모양의 시험편을 사용하여 시험을 진행하였다. 경도시험 규격은

Table 1. Formulations of Fire-proof Silicone Rubber Composites

Sample code	Composition (phr)						
	Silicone rubber	Pt catalyst	Curing agent	Mg(OH) ₂	Al(OH) ₃	Mineral wool A	Mineral wool B
RAWSR	100	-	-	-	-	-	-
MGS10				10	-	-	-
MGS20				20	-	-	-
MGS30				30	-	-	-
MGS40				40	-	-	-
ALS10				-	10	-	-
ALS20				-	20	-	-
ALS30				-	30	-	-
ALS40				-	40	-	-
WAS10	100	0.2	1.2	-	-	10	-
WAS20				-	-	20	-
WAS30				-	-	30	-
WAS40				-	-	40	-
WBS10				-	-	-	10
WBS20				-	-	-	20
WBS30				-	-	-	30
WBS40				-	-	-	40

압축시험 규격과 동일한 원기둥 모양의 시편을 제작하여 KS M 6518 시험 방법의 스프링 경도계(Shore A type)를 이용하여 시험을 진행하였다. 비중은 전자비중측정기(MD-300S, ALFAMiRAGE)를 이용하여 측정하였다.

결과 및 토론

세라믹화 진행 모식도. 실리콘 고무는 열분해에 의해서 분말 형태의 SiO₂의 세라믹 물질로 변환된다. 실리콘 고무 외부에 형성된 SiO₂ 층 자체는 단열 효과, 내부로부터 발생하는 휘발성 가스의 누출 방지효과, 열의 대류와 전도 및 복사

에 의한 화재의 확대를 방지하는 역할을 할 수 있다. 하지만, SiO₂ 층 단독으로는 약한 기계적 강도 때문에 쉽게 공기 중으로 흩어져 효과적인 내화 성능을 발휘하기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 실리콘 고무에 무기계 내화 필러를 충전하여 내화 성능을 보강하는 연구를 진행하였다. Figure 1은 본 논문에서 무기계 섬유 필러를 혼합한 WAS, WBS 복합체를 대상으로 화염테스트를 진행했을 때 세라믹 물질이 만들어지는 모습을 설명한 모식도이다. Figure 1에서 실리콘 고무에 규산칼슘, 알루미늄 성분의 섬유계 필러와 백금촉매를 혼합한 실리콘 복합체에 화염을 가할 경우 바인더 역할을 하고 있는 실리콘 고무의 분해로 인해 SiO₂ 입자가 생성된

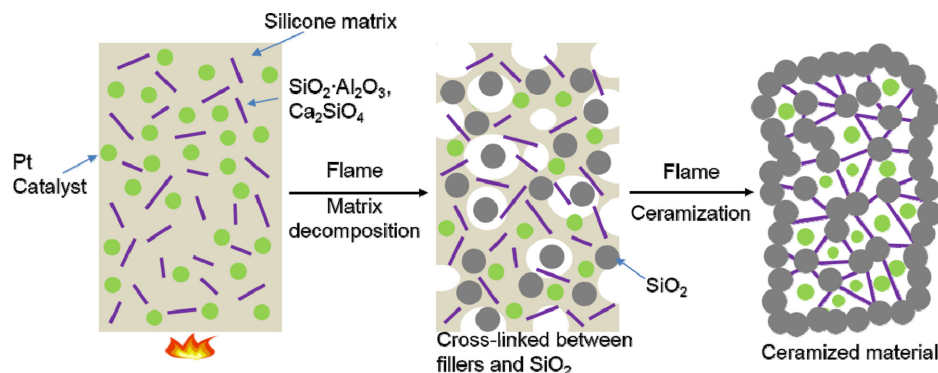


Figure 1. Schematic diagram of the ceramization of mineral wool/silicone rubber composites.

다. 생성된 SiO_2 는 무기계 섬유 필러와 가교 결합을 형성하여 세라믹 물질이 생성되기 시작하고 무기계 섬유 필러와 결합하지 못한 SiO_2 입자는 Figure 2에서 보이는 것과 같이 하얀색 분말 형태로 복합체 표면에 남아있게 된다.

이 과정에서 백금은 열과 함께 실리콘 고무와 필러간의 세라믹화의 촉매 역할을 한다. 지속적으로 화염이 가해질 경우 바인더 역할을 하고 있는 실리콘 고무는 모두 분해되고, SiO_2 결정과 무기계 섬유 필러와의 결합으로 세라믹 물질이 만들

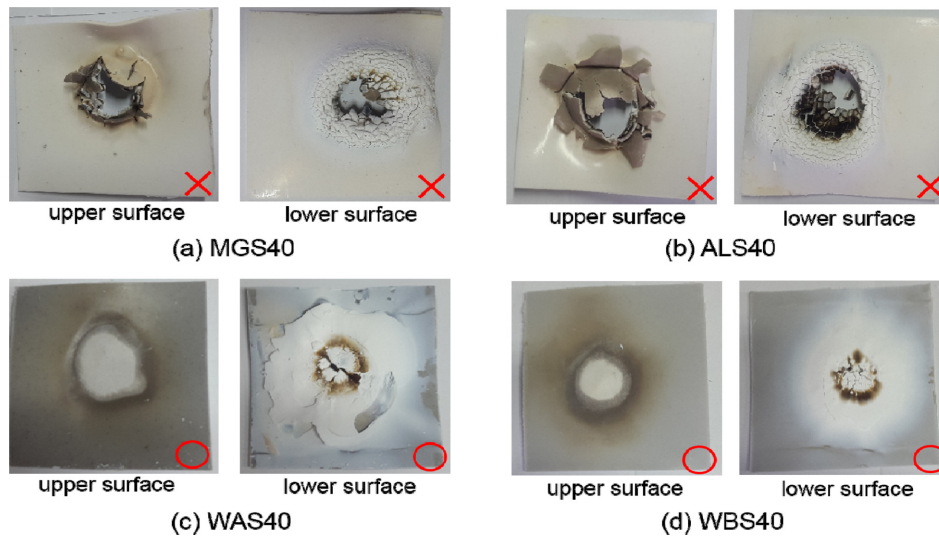


Figure 2. Photos of silicone rubber composites containing fire-proof fillers residues after gas torch flame test.

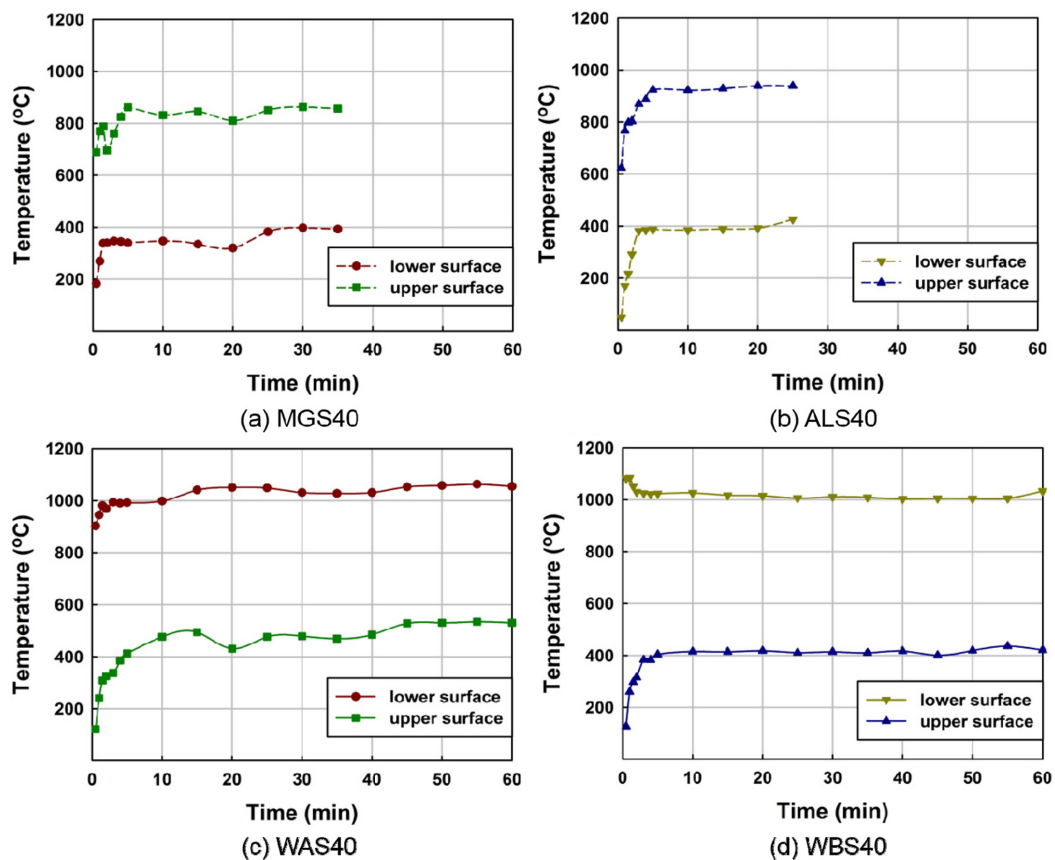


Figure 3. Heat insulation properties of fire-proof fillers/silicone rubber composites.

어 지게 된다.¹⁹⁻²¹

내화 테스트 및 전후 표면특성. Figure 2는 두께가 2 mm 인 시험편에 가스토티(약 1200 °C)를 이용하여 가혹하게 1시간 동안 중심부에 집중적으로 화염을 가한 후의 시험편의 모습이다. Figure 2(a)와 2(b)에서, 무기계 내화제로서 많이 사용되는 MDH, ATH를 필러로 사용한 복합체의 내화 테스트 결과, 30분 전후로 시험편의 화염이 직접적으로 닿는 하부면, 닿지 않는 상부면 모두 관통되었다.

하지만, 무기계 섬유를 혼합한 Figure 2(c)와 2(d)의 경우 고강도의 세라믹화가 진행되면서 1시간 이상의 불길에도 시험편이 전혀 관통되지 않는 모습을 보이고 있다. 형성된 세라믹층은 외부의 강한 기계적 충격에 쉽게 부서지지 않는 특성을 나타내었다. Figure 2에서 공통적으로 보이는 백색 결정은 실리콘 고무의 열분해로 인해 생긴 SiO_2 결정이다.

Figure 3은 가스토티 내화시험 시 시험편의 상부면 및 하부면의 온도를 측정해 실리콘 복합체의 단열 성능을 확인한 실험 결과이다. Figure 3(a)와 3(b)의 경우, 상부면과 하부면의 온도차이가 대략 400~500 °C 난다. 하지만, 30분 전후로 시험편이 관통되어 더 이상 온도 측정을 할 수 없었다. 가장 단열 성능이 낮았던 시험편은 MGS40으로 평균적으로 480 °C의 단열 성능을 나타내었다.

실리콘 고무에 미네랄 섬유 필러를 혼합한 WAS40, WBS40의 경우 시험편은 약 500~600 °C의 단열 특성을 나타내었고, 분말 형태의 필러인 MDH, ATH를 혼합한 MGS40, ALS40에 비해 더 우수한 단열 특성을 나타내었다.

4종 복합체 중에서 가장 우수한 단열 성능을 나타낸 시험편은 WBS40로 확인되었다.

내화 필러를 혼합한 실리콘 복합체의 내화 테스트 전과 화염이 가해진 후 세라믹화가 진행된 표면 특성을 SEM 이미지를 통해 Figure 4에 나타내었다. 실리콘 복합체에 화염이 가해지면서 생성된 세라믹층은 복합체 내부로의 열과 산소의 흐름을 차단하여 불길의 확산을 효과적으로 막아주고 복합체의 최대 열방출률 감소에도 영향을 주었다. MDH, ATH를 혼합한 MGS40, ALS40 복합체의 경우 분말 형태의 필러가 균일하게 실리콘 고무 매트릭스에 골고루 분산되어 있음을 확인하였다.

또한 내화테스트 후에 세라믹 표면에서도 분말 형태의 필러의 모습이 남아있음을 확인할 수 있었다. 미네랄 섬유를 혼합한 WAS40, WBS40 복합체의 경우 직경 2~6 μm 의 섬유 형태의 필러가 분산되어 있었고, 세라믹화가 진행된 후의 표면에서도 섬유 형상이 남아 있음을 확인할 수 있었다. 내화테스트 후의 모든 시험편에서 실리콘 고무가 분해되고 생성된 SiO_2 결정을 SEM 이미지 상의 흰색 결정 형태로 확인할 수 있었다.

실리콘 복합체의 열적 특성. Figure 5는 실리콘 복합체의 열적 특성을 TGA를 통해 나타내었다. Figure 5(a)는 N_2 분위기

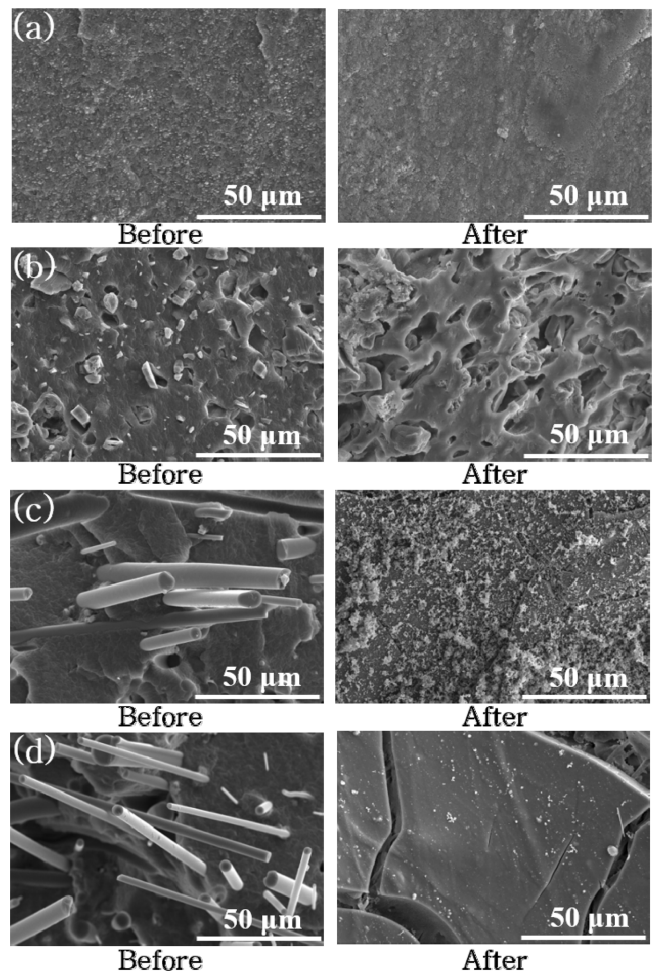


Figure 4. SEM images of silicone rubber composites: (a) MGS40; (b) ALS40; (c) WAS40; (d) WBS40.

기에서 분석을 진행했다. WAS40, WBS40의 분해 단계는 각각 2단계, 1단계로 나타났다. WAS40, WBS40의 바인더 역할을 하고 있는 실리콘 고무가 분해되는 온도가 RAWSR과 비교해서 약 80 °C 정도 향상되었음을 확인할 수 있었다. 이는 고온 상태에서 미네랄 섬유를 혼합한 실리콘 복합체의 세라믹화가 일어나 실리콘 고무의 분해 속도를 줄이는 효과를 주었다고 여겨진다.

또한 O_2 분위기에서 실리콘 복합체의 열중량 변화를 관찰한 그래프를 Figure 5(b)에 나타내었다. Figure 5(a)의 N_2 분위기에서 RAWSR의 세라믹 잔류량은 약 2.8%로 나타난 반면, Figure 5(b)의 O_2 분위기에서는 48%로 나타났다. 이는 O_2 분위기에서 실리콘 복합체 열분해 시 SiO_2 가 더 잘 생성된다고 여겨진다. 또한 내화성능이 우수한 WAS40, WBS40 실리콘 복합체의 경우 세라믹 잔류량이 약 80%로 MGS40, ALS40의 약 60%와 비교했을 때 더 많았으며, 이는 우수한 내화성능을 나타내는데 기여했다고 보여진다. Figure 5(b) 그래프를

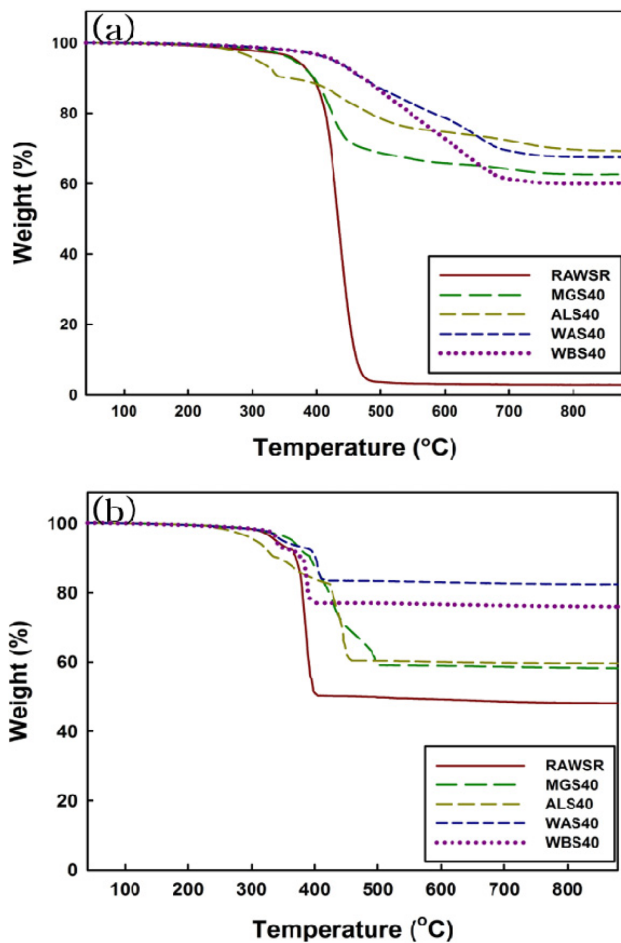
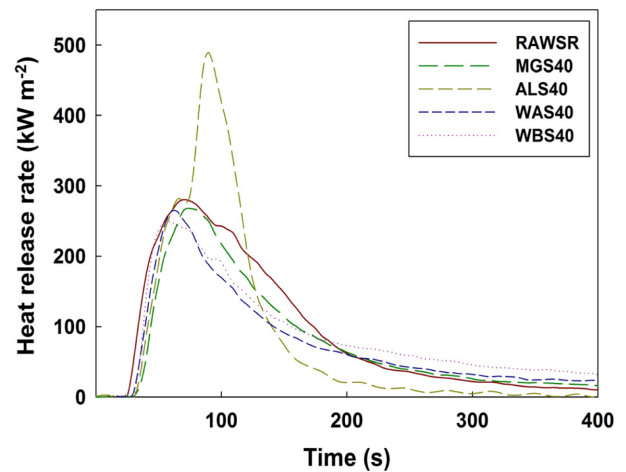


Figure 5. TGA curves of fire-proof fillers/silicone rubber composites analyzed in (a) nitrogen; (b) air.

보았을 때, 세라믹이 형성되는 구간도 WAS40, WBS40의 경우 350~420°C 정도로 MGS40, ALS40의 350~500°C에 비해 빠르게 실리콘 복합체 표면에 세라믹층이 형성되어 우수한 내화성을 보여주는데 기여했다고 여겨진다.

준불연성 테스트(Cone Calorimeter Test). 내화 필러를 혼합한 실리콘 복합체의 연소 특성을 평가하기 위해 ISO 5660-1 기준에 준용하여 50 kW/m²의 heat flux를 가하여 5가지 시험편의 열 방출특성 그래프를 Figure 6에 나타내었다. 열방출률은 시료 표면적에서 순간적으로 발생하는 열량의 크기이다. 시험편에 착화가 시작되면 연소되는 정도에 따라 열을 방출하는데 최대 열방출률은 화재 초기성장 속도와 크기를 나타내는 중요한 변수이다. 또한 착화시간(TTI)은 시험편에 화염이 착화되어 10초 이상 연소를 지속하는데 까지 걸리는 시간을 측정한 값으로 재료의 화염특성을 결정하는 중요한 지표 중 하나이다.

Figure 6에서 RAWSR의 TTI 값 19초에서 내화 필러를 충전한 실리콘 복합체 TTI 값이 23초 이상으로 증가되었고, 이



Sample code	HRR _{peak} (kW/m ²)	HRR _{mean} (kW/m ²)	TTI (s)
RAWSR	280.49	67.80	19
MGS40	272.21	37.37	27
ALS40	505.77	115.79	26
WAS40	267.51	28.51	23
WBS40	250.27	32.98	25

Figure 6. HRR curves and results of cone calorimeter test of RAWSR and its composites with 40 phr fire-proof fillers.

는 실리콘 복합체가 연소 환경에 놓였을 때, 내화 필러가 실리콘 고무의 분해를 저지시켜 착화시간을 길어지게 만드는 효과를 주었다고 여겨진다. 최대 열방출률 특성은 RAWSR의 경우 280.49 kW/m²로 나타났으며, MDH, ATH를 내화 필러로 사용한 MGS40, ALS40 복합체의 경우 각각 272.21, 505.77 kW/m²로 나타났다. ALS40의 경우 5종의 시험편 중에서 가장 높은 열방출률 값을 나타내었다. 이는 열방출률 값이 낮을수록 내화 필러로서 좋은 성능을 보여주는 내용과 상반된다. 즉, 내화 필러로서 널리 사용하고 있는 ATH가 내화성을 보여주는 다양한 실험 특성 지표들 중에서 열방출률 특성은 다소 부족하다고 여겨진다. 시험편 5가지 중에서 가장 낮은 열방출률 특성을 나타낸 시험편은 WBS40으로 250.27 kW/m²로 나타났으며, 이는 RAWSR에 비해 약 10% 가량 낮아진 것으로 분석되었고 상대적으로 시험편 WBS40가 가장 우수한 열방출률 특성을 나타내었다고 볼 수 있다.

기존의 내화 필러로 많이 쓰이는 MDH, ATH를 혼합한 MGS40, ALS40 복합체의 최대 열방출률에 비해 미세알루미늄 유계 필러를 혼합한 WAS40, WBS40 복합체의 최대 열방출률이 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 이는 Figure 5(a)의 TGA 분석에서 WAS40, WBS40의 내열 성능이 우수하여 실리콘 고무의 분해 속도를 늦춰 최대 열방출률이 낮게 나타난 것으로 설명될 수 있다.^{22,23}

실리콘 복합체의 기계적 특성. 내화 필러를 혼합한 실리콘 복합체의 인장, 인열, 신장률 특성을 보여주는 그래프를 Figure 7에 나타내었다. 인장, 인열, 신장률 값은 필러의 함량이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 분말 형태의 필러를 혼합한 복합체 MGS, ALS에 비해 섬유 형태의 필러를 혼합한 복합체 WAS, WBS의 인장, 인열, 신장률 값이 낮은 것으로 나타났다. 이는 섬유 형태의 필러의 표면적이 분말 형태의 표면적보다 작아 실리콘 고무 매트릭스에서 분산성이 떨어지고 상대적으로 물리적 특성 값이 낮게 측정된 것으로 해석된다. 4종의 복합체 중에서 인장, 인열, 신장률 값에서 가장 우수한 성능을 보여주는 복합체는 MGS로 나타났다. SEM 이미지 상에서 확인한 것과 같이 MGS 복합체가 4가지 필러 종류 중에서 입자 사이즈가 가장 작아 실리콘 고무 매트릭스

와의 상호작용이 가장 크고 물리적 특성이 우수한 것으로 설명된다.

반면, 실리콘 복합체의 압축강도, 경도, 비중 값이 필러 함량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내는 그래프를 Figure 8에 나타내었다. 압축강도(compressive strength)는 지름 3 cm, 높이 1.2 cm 원기둥 모양의 시험편이 25% 만큼 수축되었을 때 힘의 크기를 단면적으로 나눈 값이다. 압축강도는 필러 함량이 증가할수록 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 4가지 복합체 중에서 압축강도가 가장 우수한 복합체는 WBS로 나타났고 모든 시험편을 통틀어 압축강도가 가장 큰 값을 나타내는 시험편은 WBS40으로 나타났다. 그리고 차례로 WAS, ALS, MGS 순으로 압축강도가 나타났다. 압축강도가 가장 크게 나타난 복합체 WBS는 경도에서도 역시 가

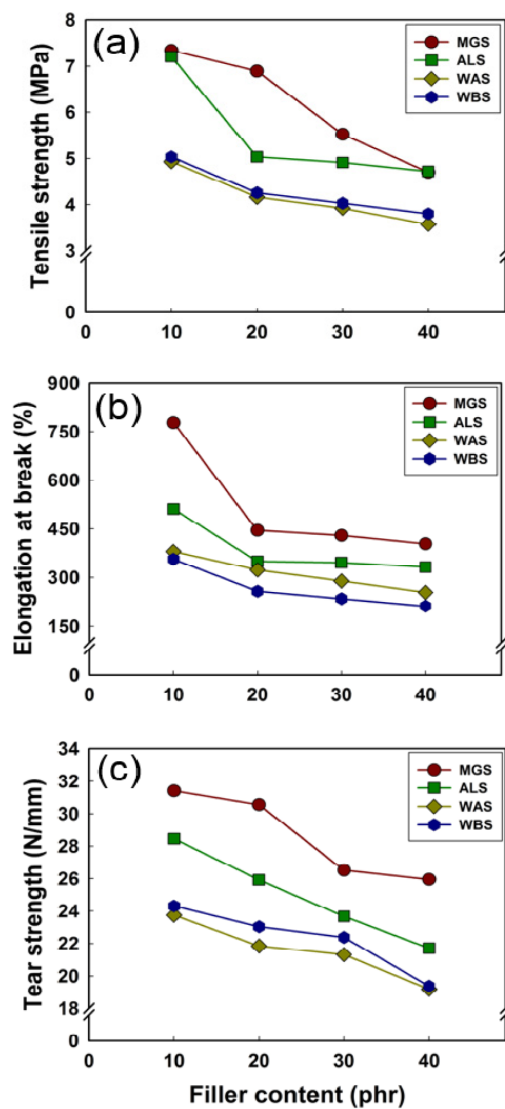


Figure 7. (a) Tensile strength; (b) elongation at break; (c) tear strength of silicone rubber composites containing fire-proof fillers.

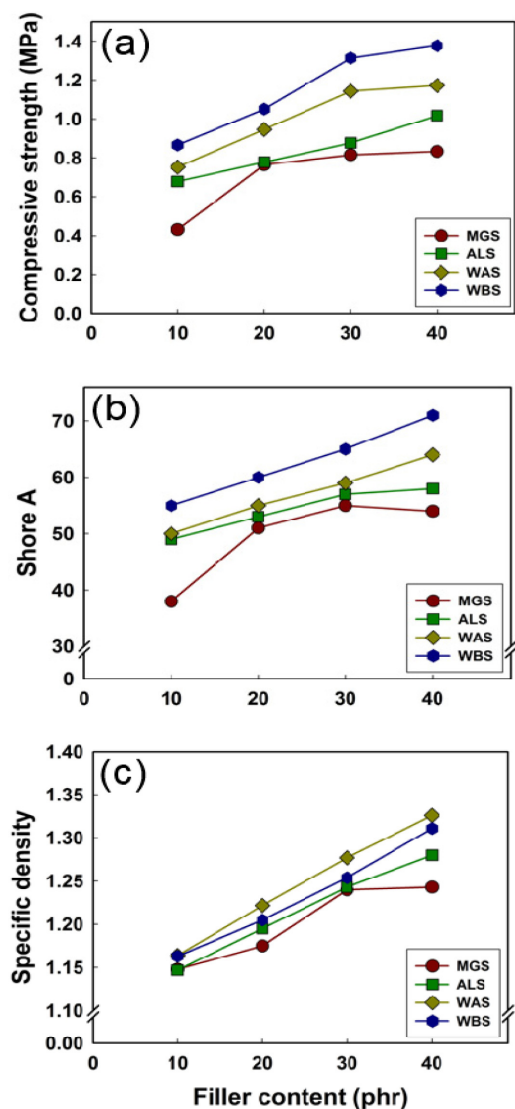


Figure 8. (a) Compressive strength; (b) hardness; (c) specific densities of silicone rubber composites containing fire-proof fillers.

장 큰 값으로 측정되었고, 다른 복합체의 경도 경향성도 압축강도와 동일하게 나타났다.

결 론

본 연구에서는 실리콘 고무에 내화 성능을 부여하기 위해 무기계 내화 필러 4종을 충전하였다. 4가지 종류의 복합체의 내화 특성 및 물리적 특성을 가스토치 내화시험, 콘칼로리미터, TGA, 만능재료시험기 등을 이용하여 비교분석을 실시하였고 다음의 결론을 얻었다.

1) 기존에 널리 사용되고 있는 내화 필러를 혼합한 복합체 MGS40, ALS40에 비해 섬유 형태의 내화 필러를 혼합한 복합체 WAS40, WBS40의 내화 성능 및 단열 성능이 가스토치 내화시험으로부터 더 우수하다고 확인되었다.

2) TGA분석 결과, 복합체 WAS40, WBS40의 내열성이 MGS40, ALS40에 비해 우수하고, 산소 분위기에서 복합체 WAS40, WBS40의 세라믹 잔류량이 약 20% 정도 더 많고, 이는 화염을 가할 때 생성되는 세라믹층이 두꺼워 효과적으로 불길을 차단한 것으로 확인되었다.

3) 열방출률 특성 역시 RAWSR 및 복합체 MGS40, ALS40 비해 WAS40, WBS40의 열방출률 특성이 약 10% 우수한 것으로 확인되었다.

4) 인장강도, 인열강도, 신장률 특성은 4종의 복합체 중에서 SEM을 통해 분말 형태로 실리콘 고무 매트릭스에 효과적으로 분산될 수 있는 필러가 혼합된 복합체 MGS군에서 우수한 특성을 나타냈다.

감사의 글: 이 연구는 2015년도 한국산업기술진흥협회(KOITA) 연구지원을 받아 수행되었기에 감사드립니다 (1711032791/KOITA-2015-7).

참 고 문 헌

1. Y. J. Kwon, *J. Korea. Concrete Inst.*, **17**, 8 (2005).
2. H. G. Kim, J. K. Kim, P. K. Jang, B. C. Kim, C. W. Kim, and I. Y. Jang, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, **16**, 17 (2016).
3. C. R. Yoon, J. H. Lee, D. S. Bang, I. Y. Jang, J. P. Won, and W. Y. Park, *Elastom. Compos.*, **45**, 87 (2010).
4. J. L. Zhuo, J. Dong, C. M. Jiao, and X. L. Chen, *Plast. Rubber Compos.*, **42**, 239 (2013).
5. R. N. Jana, G. B. Nando, and D. Khastgir, *Plast. Rubber Compos.*, **32**, 11 (2003).
6. J. C. Wang, Y. H. Chen, and Q. Q. Jin, *High Perform. Polym.*, **18**, 325 (2006).
7. S. L. Fang, Y. Hu, L. Song, J. Zhan, and Q. L. He, *J. Mater. Sci.*, **43**, 1057 (2008).
8. L. Yang, Y. Hu, H. D. Lu, and L. Song, *J. Appl. Polym. Sci.*, **99**, 3275 (2006).
9. R. R. Buch, *Fire Safety J.*, **17**, 1 (1991).
10. S. Hamdani, C. Longuet, D. Perrin, J. Lopez-cuesta, and F. Ganachaud, *Polym. Degrad. Stab.*, **94**, 465 (2009).
11. W. Dong, X. Zhang, Y. Liu, Q. Wang, H. Gui, J. Gao, Z. Song, J. Lai, F. Huang, and J. Qiao, *Polymer*, **47**, 6874 (2006).
12. P. Hornsby and C. Watson, *Plast. Rub. Proc. Appl.*, **11**, 45 (1989).
13. S. Fang, Y. Hu, L. Song, J. Zhan, and Q. He, *J. Mater. Sci.*, **43**, 1057 (2008).
14. P. Hornsby, *Int. Mater. Rev.*, **46**, 199 (2001).
15. S. LU and I. Hamerton, *Prog. Polym. Sci.*, **27**, 1661 (2002).
16. Q. Wu, J. Ju, and B. Qu, *Polym. Int.*, **52**, 1326 (2003).
17. K. Pal and J. Rastogi, *J. Appl. Polym. Sci.*, **94**, 407 (2004).
18. S. Levchik and E. Weil, *J. Fire Sci.*, **24**, 345 (2006).
19. K. Hanyashida, S. Tsuge, and H. Ohtani, *Polymer*, **44**, 5611 (2003).
20. L. Hanu, G. Simon, J. Mansouri, R. Burford, and Y. Cheng, *J. Mater. Process. Tech.*, **153**, 401 (2004).
21. G. Marosi, A. Marton, P. Anna, G. Bertalan, B. Marosfoi, and A. Szep, *Polym. Degrad. Stab.*, **77**, 259 (2002).
22. K. W. Lee, *A Study on the Characteristics of Fire Hazard for Plastic Materials*, KOSHA, 2003.
23. Y. Zhang, J. He, and R. Yang, *Polym. Degrad. Stab.*, **125**, 140 (2016).