

수산화마그네슘이 첨가된 저밀도 폴리에틸렌과 에틸렌 비닐 아세테이트 혼합물의 난연성

정영진[†] · 임형미* · 진 의** · 오정규**

강원대학교 소방방재공학과, *한국세라믹기술원, **강원대학교 소방방재연구센터
(2011년 7월 12일 접수, 2011년 7월 26일 심사, 2011년 7월 26일 채택)

Combustion-Retardation Properties of Low Density Polyethylene and Ethylene Vinyl Acetate Mixtures with Magnesium Hydroxide

Yeong-Jin Chung[†], Hyung Mi Lim*, Eui Jin**, and JungKyo Oh**

Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University, Gangwon-do 245-710, Korea

*Eco-composite Materials Center, Green Ceramics Division, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Seoul 153-801, Korea

**Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National University, Gangwon-do 245-711, Korea

(Received July 12, 2011; Revised July 26, 2011; Accepted July 26, 2011)

수산화마그네슘이 첨가된 저밀도 폴리에틸렌-에틸렌 비닐 아세테이트 혼합물의 연소성을 시험하였다. 저밀도 폴리에틸렌-에틸렌 비닐 아세테이트에 수산화마그네슘을 40~80 wt% 첨가하여 용융 혼합하고 성형 후 콘칼로리미터(ISO 5660-1)를 이용하여 그의 연소성을 시험하였다. 수산화마그네슘을 첨가한 시험편은 첨가하지 않은 시험편에 비하여 그의 연소성이 감소하였다. 이것은 순수한 저밀도 폴리에틸렌-에틸렌 비닐 아세테이트에 첨가한 수산화마그네슘의 흡열 분해 때문에 연소 억제성이 향상된 것으로 생각된다. 수산화마그네슘을 첨가한 시험편은 첨가하지 않은 시험편에 비해 낮은 최대열방출률과 낮은 유효연소열을 나타내었고, 수산화마그네슘 함량이 증가할수록 착화시간은 길어지고, 최대열방출률은 감소하였다.

It was performed to test the combustive properties of low density polyethylene and ethylene vinyl acetate (LDPE-EVA) mixture by the addition of magnesium hydroxide. Flame retardant of natural magnesium hydroxide was added to the mixture of LDPE-EVA in 40 to 80 wt% concentration. The composite was compounded to prepare specimen for combustive analysis by cone calorimeter (ISO 5660-1). Comparing with virgin LDPE-EVA, the specimens including the magnesium hydroxide had lower combustive properties. It is supposed that the combustion-retardation properties in the composites improved due to the endothermic decomposition of magnesium hydroxide. The specimens with magnesium hydroxide showed both the lower peak heat release rate (PHRR) and lower effective heat of combustion (EHC) than those of virgin polymer. As the magnesium hydroxide content increases, time to ignition increased and the peak heat release rate decreased.

Keywords: magnesium hydroxide, combustion properties, heat release rate (HRR), effective heat of combustion (EHC)

1. 서 론

일반적으로 플라스틱 제품에 관련된 화재사고에 의한 인명 및 재산 피해는 날로 증가되고 있으며, 전선 및 건축 내장재와 같은 플라스틱 제품에 의한 화재시 화염에 의한 피해보다는 맹독성 가스에 의한 인명 피해가 주를 이루고 있다. 이러한 고분자 재료의 연소는 난연제를 사용함으로써 부분적으로 조절될 수 있다. 고분자 재료의 연소를 저지시키기 위하여 우선 고분자의 열분해를 단절시키든지, 또는 가연성 기체의 발생을 완전히 억제시키거나 산소 공급을 안정시켜 연소의 연

쇄 반응을 차단시켜 줌으로써 연소 반응을 억제 할 수 있다[1,2].

고분자 재료의 난연화는 고분자 자체의 개질을 통해 내열성을 향상시키는 방법, 무기재료 등의 충전체에 의하여 가연성을 저하시키는 방법, 난연성 재료 등의 복합화에 의하여 고분자를 보호하는 방법, 또는 난연제를 첨가하여 가연성 고분자에 난연성을 부여하는 방법들이 있지만, 일반적으로는 난연제 첨가에 의한 것이 주를 이룬다[3]. 이러한 난연제는 원재료가 첨가물과의 혼화성이 좋아야 하고, 제품의 기계적인 성질에 영향을 주지 않아야 하며, 연소 시 발연 및 독성 가스의 발생이 적어야 한다.

첨가형 난연제의 사용은 알려진 바와 같이 고분자 물질에서 쉽게 탈리되는 문제점이 있기는 하지만 반응형에 비하여 매우 경제적이며,

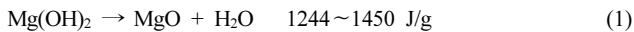
[†] 교신저자(e-mail: yjchung@kangwon.ac.kr)

Table 1. Compositions of the LDPE-EVA Mixtures with Magnesium Hydroxide

| Item | Specimen | | | | |
|------------------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | No. 1 | No. 2 | No. 3 | No. 4 | |
| Compositions (wt%) | LDPE | 50 | 30 | 20 | 10 |
| | EVA | 50 | 30 | 20 | 10 |
| | Mg(OH) ₂ | | 40 | 60 | 80 |
| | Total | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Specimen specification | Thickness (mm) | 5.3 | 5.3 | 5.3 | 6.4 |
| | Mass (g) | 49.2 | 58.3 | 70.6 | 110.5 |
| | Density (g/cm ³) | 0.93 | 1.10 | 1.33 | 1.73 |

간편하게 고분자 물질의 난연성을 향상시킬 수 있는 것으로 알려져 있다[4,5]. 따라서 고분자 물질의 사용이 점차 증대되고 그 난연성 역시 중요시되고 있는 현재, 환경 친화적인 첨가형 난연제의 사용에 따른 다양한 연구가 필수적이라 할 수 있다.

첨가형 난연제는 주로 열가소성수지나 고무류에 사용되며, 인계, 할로젠계와 같은 유기계와 산화안티몬, 금속수산화물과 같은 무기계 난연제가 있다[1-3,6]. 이들 중 수산화물 난연제는 연소시 연소하는 부위에 물층을 형성시키고, 산화막을 형성시키는 난연기구를 가지고 있다[7]. 일반적으로 수산화마그네슘은 가장 널리 사용되는 것 중의 하나이다. 수산화마그네슘은 흡열반응을 통하여 수증기를 방출함으로써 분해된다[8-11]. 그것은 300~330 °C에서 물과 같은 물수로 초기 질량의 약 31% 정도를 남기면서 분해하기 시작한다[10].



특히 수산화마그네슘은 수산화알루미늄보다 높은 온도에서 분해되며 높은 분해 온도는 폴리프로필렌(polypropylene)과 폴리아미드(polyamide)와 같은 고분자에 적합한 것으로 알려졌다[11]. 전선 피복재로 사용되는 저밀도 폴리에틸렌-에틸렌 비닐 아세테이트(low density polyethylene-ethylene vinyl acetate, LDPE-EVA) 혼합수지에 적용되는 경우, 충전율이 높아지면 고분자의 물성이 저하되는 문제점이 있을 수 있어, 함량을 최소화하면서 난연성을 확보하는 것이 무기계 첨가형 난연제에서는 연구되고 있다[1,12,13]. 소재에서의 난연성 평가는 한계산소지수(limited oxygen index, LOI) 및 연소테스트(UL94)에서 매겨진 등급으로 난연성 수준을 평가하기도 하지만, 실제 화재발생 시 가연물의 안정성은 화재조건에 노출되었을 때의 착화성, 열방출률, 화재의 전파 및 연소가스의 유해성 등으로 평가할 수 있다. 이들 중 건자재의 중요한 성질은 연소하는 동안에 발생하는 열방출률(heat release rate)이다. 열방출률은 화재시에 대상 물질의 잠재 위험성을 나타내기 때문에 중요하다. 열방출률을 측정하기 위하여 많은 기술들이 발전되어 왔는데 그 중의 하나가 콘칼로리미터(cone calorimeter)이다[14]. 콘칼로리미터에 의한 열방출률 측정은 대부분의 유기재료가 연소 중에 산소 1 kg 이 소비되면 약 13.1 MJ의 열이 방출되는 산소 소비 원리를 바탕으로 하고 있다[15]. 화재발생시 가연물의 안전성은 화재조건에 노출되었을 때의 착화성, 열방출률, 화재의 전파 및 연소가스의 유해성 등으로 평가할 수 있다[16].

본 연구에서는 고분자 재료의 화재 위험성을 개선하기 위하여 수산화마그네슘 난연제를 첨가하여 제조된 LDPE-EVA 복합체 시험편에 대해 콘칼로리미터(ISO 5660-1)[17]를 이용하여 착화성, 열방출률을 측정하여 수산화마그네슘 함량별 재료의 난연성을 비교 분석하였다.

2. 실험

2.1. 재료 및 시험편 제조

본 연구에 사용된 시험편은 LDPE-EVA 수지를 용융 혼합하고, 수산화마그네슘을 첨가하여 제조하였다. 제조 방법은 용융 혼합기(High viscosity kneader, 대성테스트)를 180~200 °C로 유지한 상태에서, LDPE [MFI < 5, 한화석유(주)]와 EVA [poly(ethylene-co-vinyl acetate, cable grade VS430, 26 wt% vinyl acetate, 호남석유화학(주))]를 1 : 1 질량비로 투입하여 용융 혼합하고, 용융된 LDPE-EVA 혼합수지에 수산화마그네슘 난연제[Mg(OH)₂, M3-C2, (주)나노텍세라믹스]를 40, 60, 80 wt% 함량으로 첨가하고 완전히 용융 혼합하였다. 수산화마그네슘이 혼합된 LDPE-EVA 난연 복합체를 냉각한 후에 적당한 크기로 자른 뒤, 핫프레스(Hot press)의 온도를 230 °C로 설정하여 몰드(100 mm × 100 mm)에 복합체를 넣고 5 min간 가열, 가압(12~13 psi)한 뒤 2~3 차례 몰드 내의 공기를 빼주는 작업을 실시하고 5 min간 다시 가열, 가압한 다음, cooling press (8 psi)로 옮겨 10 min간 냉각한 뒤 꺼내어 시험편을 몰드에서 분리하였다. Table 1은 수산화마그네슘이 혼합된 LDPE-EVA 난연 복합체 시험편의 조성 및 시험편의 상세를 나타내었다.

시험편의 체적밀도는 시험하기 전에 부피와 무게를 측정하여 계산하였다. 수산화마그네슘의 함량이 높아질수록 밀도는 높아지고, LDPE-EVA 수지의 밀도 0.93 g/cm³와 수산화마그네슘의 밀도 2.34 g/cm³를 기준으로 수산화마그네슘 함량별 예상되는 이론적 밀도값 1.49, 1.78, 2.06 g/cm³ 대비 낮다. 측정된 체적 밀도는 무기물의 충전에서 발생하는 입자 간, 수지 내, 입자와 수지 계면에 잔류하는 기공이 복합체 내에 트랩되어 빠져나오지 못하였기 때문으로 추정되고, 측정된 체적밀도와 이론적인 밀도의 비율에서 추정할 수 있는 충전율은 각각 74, 75, 84 wt%이다. 따라서 수산화마그네슘을 각각 40, 60, 80 wt% 함량별로 첨가한 LDPE-EVA 복합체에서는 무기물의 함량이 높아질수록 LDPE-EVA 복합체의 체적밀도와 함께 충전율이 높아져서, 입자와 수지 계면에 잔류하는 기공의 양은 충전율을 낮추는 주 원인이 아니며, 또한 수산화마그네슘과 수지 계면의 결합은 양호한 것으로 추정된다.

2.2. 콘칼로리미터 시험

연소특성 시험은 ISO 5660-1의 방법에 의해 dual cone calorimeter (Fire Testing Technology)를 이용하여 열유속(heat flux) 50 kW/m² 조건에서 수행하였다[17]. 사용한 시험편의 크기는 100 mm × 100 mm × 5.5 mm (± 2 mm)의 규격으로 제작하였으며, 시험조건은 습도 50%, 온도 23 °C 조건을 유지하였다. 시험편은 단열재인 저밀도 유리섬유를 이용하여 높이를 조절하였으며, 시험 홀더로의 열손실을 감소시키

Table 2. Combustive Properties of the Specimens of LDPE and EVA Mixtures with Magnesium Hydroxide

| Specimen | TTI (sec) | MLR (g/s) | MHRR (kW/m ²) | PHRR (kW/m ²) | EHC (MJ/kg) | TOC (g) |
|----------|-----------|-----------|---------------------------|---------------------------|-------------|---------|
| No. 1 | 38 | 0.088 | 355 | 692 | 34.7 | 103.9 |
| No. 2 | 58 | 0.064 | 221 | 443 | 34.4 | 87.4 |
| No. 3 | 87 | 0.046 | 139 | 243 | 30.3 | 99.5 |
| No. 4 | 179 | 0.027 | 9 | 19 | 3.4 | 6.7 |

TTI, time to ignition; MLR, mass loss rate; MHRR, mean of heat release rate; PHRR, peak of heat release rate; EHC, effective heat of combustion; TOC, total oxygen consumption

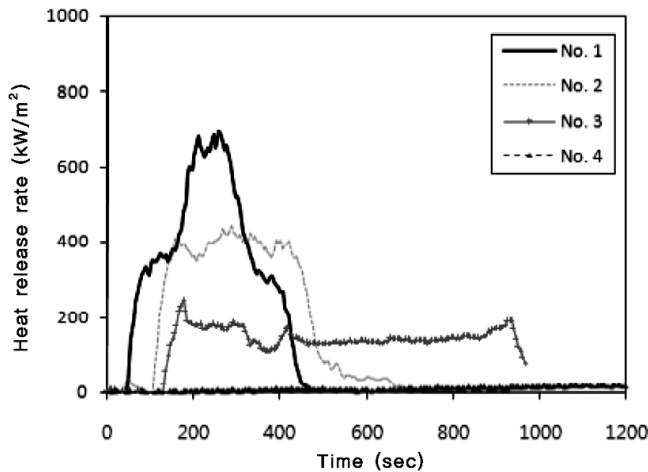


Figure 1. Heat release rate curves of the specimens of LDPE and EVA mixtures with magnesium hydroxide at 50 kW/m² external heat flux.

기 위하여 전도도가 낮은 고밀도 세라믹판 재료로 절연시켰다. 시편 홀더는 수평방향으로 위치시켰다.

설정된 외부 열유속에 노출된 시편이 착화되어 연소될 때의 열방출율은 연소 생성물 흐름 속의 산소 농도와 유속으로부터 유도된 산소 소비량을 측정하여 평가하였다. 연소시험은 지속적인 불꽃 연소가 시작된 때부터 30 min 경과 후에 종료하였으며, 추가로 2 min간의 데이터 수집시간을 부여하였다.

본 연구에서 선정된 시험편은 콘칼로리미터에 수평으로 설치하고 외부 점화장치를 부착한 상태로 50 kW/m² 외부 열유속에 수신편 동안 노출시켜 착화되는 시간과 착화된 시료로부터 열방출 관련 값을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

가연성 물질이 연소될 때의 에너지 방출 속도, 연기생성, 가스 독성은 가연물의 종류, 밀도, 수분함량, 열침투성 및 열적특성 등에 따라 결정된다[18-20]. 시험하는 동안에 측정되는 주 연소특성은 열방출률이다. 그것은 시료 표면적당 발생한 순간적인 열량의 크기이며, 재료의 연소 위험성을 가장 잘 나타낼 수가 있는 요소이며, 연소모델링을 위한 중요한 측정값이다[21,22]. 가연물과 관련하여 연소 특성의 이해를 돕는 다른 중요한 성질은 착화시간(time to ignition, TTI)과 질량감소율(mass loss rate, MLR)이다. Table 2는 측정된 시험편들의 연소성질을 나타내었다.

Figure 1은 Table 1의 시험편 조성에 대한 열방출률 커브를 나타내었다. 시험편 no. 1의 수치 단독 조성에서 보여주는 바와 같이 열방출률 커브가 가장 높게 나타났다. 수산화마그네슘을 첨가한 시편의 열

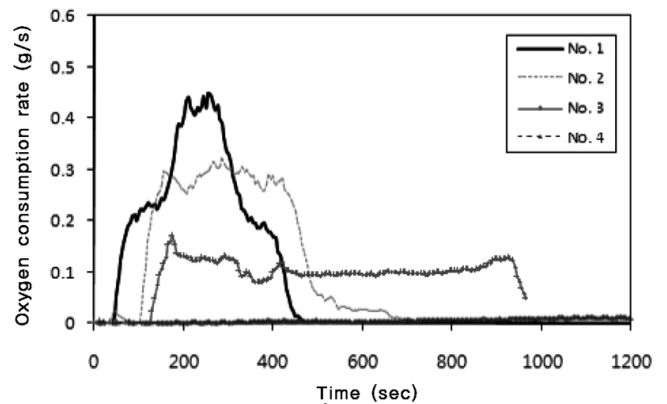


Figure 2. Oxygen consumption rate curves of the specimens of LDPE and EVA mixtures with magnesium hydroxide at 50 kW/m² external heat flux.

방출률 커브는 첨가된 수산화마그네슘 함량에 따라 전반적으로 감소하였다. 이것은 첨가된 수산화마그네슘이 시험편의 연소역제 효과에 의해 열방출률이 낮아지는 것으로 설명될 수 있다[7,23]. 즉, 50 kW/m²의 외부 열원에서 시험한 시험편의 단위 면적당 평균열방출률(mean heat release rate per unit area, MHRR)은 수산화마그네슘이 첨가되지 않은 시험편에 대하여 355 kW/m²로 나타났으며, 시험편 no. 2, no. 3에 대하여 221, 139 kW/m²로 나타났다. 80 wt%로 첨가된 no. 4는 9 kW/m²으로서 시험편 no. 1보다 매우 낮게 나타났다. 그리고 단위면적당 최대 열방출률(peak heat release rate per unit area, PHRR)은 시험편 no. 2, no. 3에 대하여 각각 443, 243 kW/m²로 나타났다. 특히 no. 4의 시험편은 19 kW/m²로 나타났다. 이것은 수산화마그네슘이 첨가되지 않은 시험편 no. 1의 PHRR, 692 kW/m²와 비교하여 PHRR가 현저히 낮게 측정되었다. 즉, 수산화마그네슘 첨가량의 함량이 증가할수록 MHRR 및 PHRR은 감소하였다.

시험편의 표면에 대한 외부 열유속과 화염으로부터의 열유속은 시험편의 열방출률이 최대가 되도록 빨리 다다르게 한 다음, 열분해 전단이 시편의 안쪽으로 이동함에 따라 숯층이 점진적으로 생성된다. 이 숯층은 외부 열속에 노출된 표면과 열분해 전단 사이에 증가되는 열적 저항을 형성한다. 결과적으로 열방출률이 지속적으로 감소되는 것으로 본 시험결과와 일치한다[23]. No. 4의 경우는 무기물이 다량 함유되어 시험편의 열적 저항 작용에 시너지 효과로 나타나는 것으로 이해된다. 이것은 수산화마그네슘의 열분해 시에 MgO의 생성에 의한 산화피막을 이루어 공기 중의 산소(O₂) 차단효과로 설명되어 질 수 있다[7].

즉 공급된 열이 고분자 연소에 사용되기 전에 수산화마그네슘 난연제가 산화마그네슘과 물로 분해되는 흡열반응에 공급되어, 고분자 연소 지연 효과를 준다.

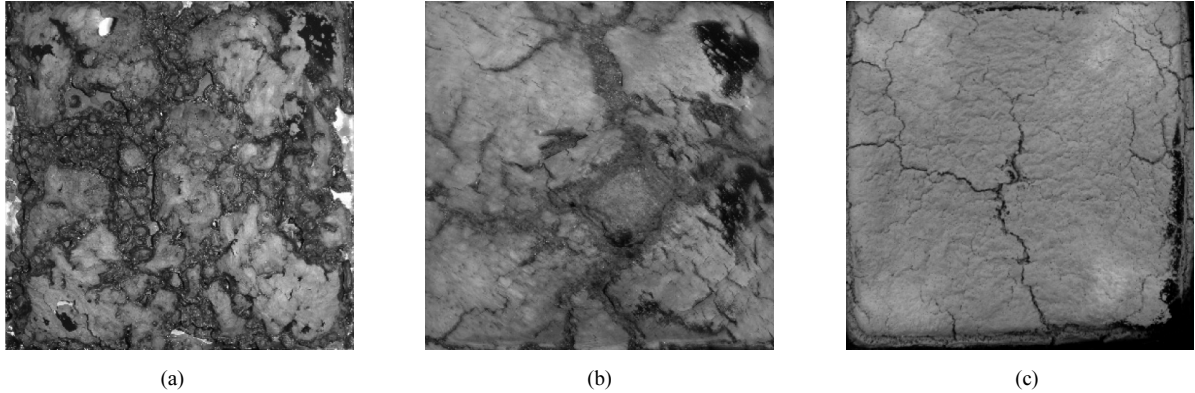


Figure 3. Residues after combustion of the Specimens of LDPE and EVA Mixtures with Magnesium Hydroxide. (a) 40 wt%, (b) 60 wt%, and (c) 80 wt%.

HRR은 질량감소율(mass loss rate, MLR)과 유효연소열(effective heat of combustion, EHC)의 함수이며, 다음과 같은 식으로 설명되어 있다[23].

$$\dot{Q} \text{ (HRR)} = \dot{m} \cdot \Delta h_c \quad (2)$$

여기에서 \dot{Q} (kW) = 열방출률 ; \dot{m} (kg/s) = 질량감소율 ; Δh_c (kJ/kg) = 유효연소열로 표시된다. 질량감소율은 화재거동에 대하여 추가적인 정보를 준다[24]. Table 2에 나타낸 바와 같이 LDPE-EVA에 수산화마그네슘이 첨가된 시험편 no. 2, no. 3, no. 4에 대하여 질량감소율은 각각 0.064, 0.050, 0.027 g/s으로써 첨가되지 않은 시험편 no. 1 (0.088 g/s)에 비하여 낮았다. 이것은 수산화마그네슘의 첨가에 따라 시험편에서 가연 성분인 LDPE-EVA 함량이 적어졌기 때문이기도 하고, 전술한 열방출률의 경우와 같이 수산화마그네슘 첨가 시험편의 산화막 생성에 의한 연소억제 효과에 의해 질량감소율이 낮아지는 것으로 설명될 수 있다[7,23].

유효연소열은 질량감소율과 함께 물질의 화재거동에 추가적인 정보를 제공해 주기 위하여 사용될 수 있다. 유효연소열은 한 가지의 분해형태를 갖는 균일한 시험편의 연소시간 동안의 상수로서 이론적인 순연소열의 값보다 적다[25]. 한 가지 이상의 분해형태를 갖는 재료나 복합재료 또는 비균일한 재료의 유효연소열은 반드시 일정하지는 않다. Table 2에 나타낸 바와 같이 수산화마그네슘이 첨가된 시험편(EHC = 30.3, 34.4 MJ/kg)이나 첨가하지 않은 시험편 no. 1 (EHC = 34.7 MJ/kg)이나 특별한 차별성이 없으나, 특별히 시험편 no. 4는 3.4 MJ/kg으로서 이것은 시험편에 무기물 함량의 비율이 크므로 이해된다.

Table 2와 Figure 2에 시간에 따른 총산소소비량을 나타내었다. 총산소소비량(total oxygen consumption: TOC)은 가연성 물질의 연소반응 속도를 예측할 수 있는데, 시험편에 수산화마그네슘이 첨가된 경우, TOC 값이 각각 87.4, 99.5 g/초로서 처리하지 않은 시험편 no. 1의 총산소소비량의 값(103.9 g)보다 작게 측정되었으며, 수산화마그네슘 80 wt%가 첨가된 시험편 no. 4는 9.8 g의 더 낮은 값으로 나타났다. 이것은 수산화마그네슘 함량이 증가함에 따라 질량감소율 값이 작아지게 되므로 인하여 열방출률값이 작아지는 것으로 식 (2)에 의하여 설명되어질 수 있다. 즉, 열방출률은 질량감소율에 비례한다. 질량감소율이 낮아지는 것은 연소반응이 지연되는 것으로서 전술한 열방출률의 경우와 마찬가지로 시험편의 표면에 생성된 MgO 산화피막이 형성되어 연소조건이 불리하기 때문으로 판단된다[7,23].

연소 착화시간(TTI)은 시험편의 열원에 의한 노출로부터 지속적인 불꽃연소의 시작 전까지를 나타내며 Table 2에 나타내었다. 수산화마그네슘이 첨가된 경우, TTI 값이 수산화마그네슘 함량 증가에 따라 각각 58, 87, 179 s로서 처리하지 않은 공시험편 no. 1의 TTI의 값(38 s)보다 긴 시간으로 측정되었다. 이것은 수산화물의 흡열반응에 의한 열분해 및 생성된 MgO 산화피막의 작용으로 인하여 착화시간이 길어지는 것으로 판단된다[7,23].

Figure 3에 시험편의 연소 종료 후 탄화된 형태로서 시험편의 잔여물 사진을 나타내었다. LDPE-EVA 수지 단독 시험편 no. 1은 완전 연소 후 탄화 잔여물이 존재하지 않았다. 수산화마그네슘이 가장 적게 첨가된(40 wt%) 시험편 no. 2(a)의 연소 후 겉보기 잔여물은 일부 숯을 포함한 검은 색깔의 잔여물이 회색으로 혼재하였다. 수산화마그네슘 60 wt%로 첨가된 시험편 no. 3(b)은 열은 회색 및 검은색으로 혼재되었다. 그러나 시험편 no. 4(c)는 곱게 정리된 회백색의 표면을 나타내었다. 이것은 수산화마그네슘의 열분해 생성물에 의한 양호한 연소억제 효과 및 잔여 무기물로 판단된다[8].

4. 결 론

LDPE-EVA 혼합물에 40~80 wt%의 수산화마그네슘을 첨가한 시험편의 연소특성에 관한 실험을 ISO 5660-1 표준에 따른 콘칼로리미터를 이용하여 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

LDPE-EVA 혼합물에서 수산화마그네슘의 함량이 증가함에 따라 착화시간(TTI)은 길어지고, 최대열방출률(PHRR)은 감소하였다.

열방출률은 수산화마그네슘의 함량이 40, 60 wt%첨가된 시험편에 대하여 각각 221, 139 kW/m²으로 나타났다. 이것은 수지 단독 조성(시험편 no. 1)의 열방출률, 355 kW/m²와 비교하여 낮은 값으로 나타났다. 특히 수산화마그네슘 함량이 80 wt%인 시험편은 9 kW/m²의 현저히 낮은 값으로서 연소억제 효과가 우수하게 나타남을 알 수 있었다.

수산화마그네슘의 함량이 80 wt% 첨가된 시험편 no. 4의 착화시간이 179 s로서 수산화마그네슘을 첨가하지 않은 공시험편 no. 1 (38 s)보다 매우 길게 나타났다. 이것은 수산화마그네슘의 열분해가 흡열반응으로 진행되어 착화를 지연시키고, 또한 열분해 시에 생성된 MgO의 산화피막에 의한 연소억제 효과가 우수한 것으로 판단된다.

본 연구를 통하여 질량감소율의 감소는 열방출률값이 작아지는 것에 부합함을 확인하였다.

참고 문헌

- G. L. Nelson, *Fire and Polymers*, American Chemical Society, Washington D.C. (1990).
- M. Lewis, S. M. Altas, and E. M. Pearce, *Flame-Retardant Polymer Materials*, Plenum Press, New York (1975).
- S. J. Park, S. W. Song, J. R. Lee, B. G. Min, and J. S. Shin, *J. Korean, Ind. Eng. Chem.*, **15**, 41 (2004).
- J. Y. Shieh and C. S. Wang, *Polymer*, **42**, 7617 (2001).
- C. S. Wang and J. Y. Shieh, *J. Appl. Polym. Sci.*, **73**, 353 (1999).
- Y. Tanaka, *Epoxy Resin Chemistry and Technology*, Marcel Dekker, New York (1988).
- J.-P. Hsu and A. Nacu, *Colloids Surf. A : physicochem. Eng. Aspects*, **262**, 220 (2005).
- W. E. Horn, *Inorganic Hydroxides and Hydroxycarbonates: Their Function and Uses as Flame-Retardant Additives*, eds. A. F. Grand AF, C. A. Wilkie, *Fire Retardancy of Polymeric Materials*, 285, Marcel Dekker, New York (2000).
- R. N. Rothern, *Effects of Particulate Fillers on Flame Retardant Properties of Composites*, ed. Rothern RN, *Particulate Filled polymer Composites*, 263, Rapra Technology Ltd., Shrewsbury (2003).
- M. Lewin and E. D. Weil, *Mechanisms and modes of action in flame retardancy of polymer*, eds. A. R. Horrocks and D. Price, *Fire retardant Materials*, 31, Woodhead Publishing, Cambridge, UK. (2001).
- R. N. Rothern and P. R. Hornsby, *Polym. Degrad. Stab.*, **54**, 383 (1996).
- H. M. Lim, J. Yun, M. Hyun, Y. Yoon, D. J. Lee, C. M. Whang, S. O. Jeong, and S. H. Lee, *J. of Ceramic Processing Research*, **10**, 571 (2009).
- H. M. Lim, J. Yoon, S. O. Jeong, D. J. Lee, and S.-H. Lee, *Kor. J. Mater. Res.*, **20**, 691 (2010).
- V. Babrauskas, *New Technology to reduce Fire Losses and Costs*, eds. S. J. Grayson and D. A. Smith, Elsevier Applied Science Publisher, London, UK. (1986).
- M. M. Hirschler, *Thermal decomposition and chemical composition*, 239, *American Chemical Society Symposium Series 797* (2001).
- M. M. Hirschler, *Advances in Combustion Toxicology*, **2**, 229 (1990).
- ISO 5660-1, *Reaction-to-Fire Tests - Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate - Part 1 : Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method)*, Geneva (2002).
- Y. J. Chung, *J. Ind. Eng. Chem.* **16**, 15 (2010).
- F. M. Pearce, Y. P. Khanna, and D. Raucher, *Thermal analysis in polymer flammability*, Chap. 8, *Thermal Characterization of Polymeric Materials*, Academic Press, New York, U.S.A. (1981).
- J. D. DeHaan, *Kirks's fire investigation*, fifth edition, 84, Prentice Hall. (2002).
- V. Babrauskas, *Fire and Materials*, **8**, 81 (1984). doi: 1002/fam.810080206.
- V. Babrauskas and S. J. Grayson, *Heat release in Fires*, 644, E & FN Spon (Chapman and Hall), London, UK. (1992).
- V. Babrauskas, *Heat Release Rate*, Section 3, *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Fourth ed., National Fire Protection Association, Massachusetts, U.S.A. (2008).
- M. J. Spearpoint and G. J. Quintiere, *Combustion and Flame*, **123**, 308 (2000).
- J. G. Quintiere, *Principles of Fire Behavior*, Chap. 5, Cengage Learning, Delmar, U.S.A. (1998).