

## 에틸렌-프로필렌 디엔 단량체/폴리프로필렌/클레이 나노복합체의 연소성 Combustive Properties of Ethylene-Propylene Die Monomer/ Polypropylene/Clay Nanocomposites

정영진

Yeong-Jin Chung

강원대학교 소방방재공학과  
(2011. 10. 18. 접수/2011. 11. 21. 수정/2011. 12. 9. 채택)

### 요 약

에틸렌-프로필렌 디엔 단량체/폴리프로필렌에 바탕을 둔 에틸렌-프로필렌 디엔 단량체, 폴리프로필렌, 산화아연, 스테아르산, 그리고 클레이의 효과에 대하여 연소성을 조사하였다. 에틸렌-프로필렌 디엔 단량체/폴리프로필렌/클레이 나노복합체는 성형 후 콘칼로리미터(ISO 5660-1)를 이용하여 연소시험을 하였다. 그 결과 나노복합체는 에틸렌-프로필렌 디엔 단량체/폴리프로필렌 단독 조성에 비하여 최대열방출률을 감소시켰다. 이에 반하여 고무 연화제로 사용된 스테아르산은 자체의 연소성에 의하여 평균열방출률을 증가시켰다.

### ABSTRACT

Effects of ethylene-propylene diene monomer (EPDM)/polypropylene (PP), zinc oxide, stearic acid, and clay on the combustive properties based on EPDM/PP were investigated. The EPDM/PP/clay nanocomposites was compounded to prepare specimen for combustive analysis by cone calorimeter (ISO 5660-1). It was found that the combustive properties in the nanocomposites decreased due to the fire resistance compared with unfilled EPDM/PP. The nanocomposites showed the lower peak heat release rate (PHRR) than that of virgin EPDM/PP, while stearic acid for softening rubber increased the mean heat release rate (MHRR) by itself, combustible.

**Key words** : Clay nanocomposites, Combustive properties, Peak heat release rate (PHRR)

### 1. 서 론

전선 및 건축 내장재와 같은 플라스틱 제품에 의한 화재시 인명 피해가 주를 이루고 있다. 이러한 고분자 재료의 연소는 난연제를 사용함으로써 가연성 기체의 발생을 완전히 억제시키거나 산소 공급을 안정시켜 연소의 연쇄 반응을 차단시켜 줌으로써 연소 반응을 억제시킬 수 있다.<sup>1,2)</sup>

또한 이와는 다른 방법으로 고분자물질에 층상 clay를 나노수준으로 분산시켜 강도, 내열성, 방염성, 내용제성 등의 물성을 향상시켜, 산업 전반에 걸쳐 적용시키는 연구가 진행되고 있다.<sup>3-6)</sup> 고분자 매트릭스에 층상구조의 점토광물을 나노스케일의 관상으로 분산시킨 고분자/clay 나노복합재료는 분산상의 크기가 수 mm

또는 수  $\mu\text{m}$ 에 도달하는 것으로서, 종래의 복합재료에 비해 소량의 첨가만으로도 획기적인 물성의 향상을 도모할 수 있어 활발한 연구가 이루어지고 있다.<sup>7,8)</sup> 이러한 나노복합재료의 대표적 예로서 폴리이미드, 폴리스티렌, 폴리프로필렌 등의 열가소성수지와 에폭시수지를 비롯한 열경화성수지를 대상으로 많은 연구가 진행되었으며, 내열성, 내용제성, 난연성, 인장물성, 인장탄성률 등의 물성이 현저하게 향상될 수 있음이 보고되고 있다.<sup>9-12)</sup>

층상구조를 갖는 점토광물의 일종인 montmorillonite (MMT)는 약 1 mm 정도 두께의 음전하를 갖는 옥사이드 층들이 적층되어 있으며, 이러한 옥사이드 층사이의 중간층(interlayer 또는 gallery)에는  $\text{Na}^+$ 와 같은 양이온이 존재하여 음전하를 띠고 있는 옥사이드층의 전하를 상쇄하고 있는 형태를 하고 있다.<sup>13)</sup> 이와 같은 실리케이트 층간의 강한 인력으로 인해 고분자 사슬이

침투하기가 대단히 어렵기 때문에, 말단에 양이온기를 갖는 저분자량의 알킬암모늄 이온과 같은 유기화제로 clay를 먼저 처리한 후 고분자수지와 혼합하는 방법이 사용되고 있다.

이와 같은 범용 소재인 고분자 수지에 층상 clay를 나노수준으로 분산시켜 강도, 내열성, 방염성, 내용제 성 등의 물성을 향상시킬 수 있다면, 전자재 및 내구 재료 사용함에 있어 매우 바람직할 것으로 판단된다. 이들이 화재조건에 노출되었을 때에 화재위험성을 평가하기 위하여서는 착화성, 열방출률, 화재의 전파 및 연소가스의 유해성 등으로 평가할 수 있다.

이들의 연소성 평가는 한계산소지수(limited oxygen index, LOI) 및 연소테스트(UL 94)에서 측정된 등급으로 수준을 평가하기도 하지만, 실제 화재발생 시 가연물의 안정성은 화재조건에 노출되었을 때의 전자재가 연소되는 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.<sup>14)</sup> 콘칼로리미터에 의한 열방출률 측정은 대부분의 유기재료가 연소 중에 산소 1 kg이 소비되면 약 13.1 MJ의 열이 방출되는 산소 소비 원리를 바탕으로 하고 있다.<sup>15)</sup>

본 연구에서는 고분자 재료의 화재 위험성을 개선하기 위하여 Na<sup>+</sup>-MMT 및 dimethyl dihydrogenated tallow ammonium(2M2HT)로 개질한 실리케이트(C15A)와 Ethylene Propylene Diene Monomer(EPDM), polypropylene(PP)로 제조된 나노복합체를 콘칼로리미터(ISO 5660-1)<sup>16)</sup>를 이용하여 이들의 착화성, 열방출률을 측정하고 연소성을 검토하였다.

## 2. 실험

### 2.1 재료

고무성분인 EPDM은 KEP-359(ENB type)을 사용하였고, 플라스틱 성분으로서 polypropylene(PP) homopolymer는 LG-Caltex사의 H540로서 melt index(MI)가 8 g/10 min(230 °C × 2.16 kg)이고 밀도가 0.903 g/cm<sup>3</sup>인 등급을 선택하였다. Clay는 미국 Southern Clay사의 cloisite 15A를 사용하였다. 고무를 가교시키기 위한 가교제의 처방은 전체 EDPM/PP양 대비 zinc oxide(ZnO) 10.0 phr, stearic acid(CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>16</sub>COOH) 1.0 phr, sulfur 0.3 phr로 하였다.

본 연구에 사용된 시험편은 기 제조된 것을 그대로 사용하였다.<sup>17)</sup> 그 제조 방법은 internal mixer(Haake

**Table 1.** Composition of Ethylene-Propylene Diene Monomer (EPDM)/Polypropylene (PP)/Clay Nanocomposites

Sample	EPDM	PP	ZnO (phr)	Stearic Acid (phr)	Clay (phr)
EP	60	40	0	0	0
EPZS	60	40	10	1	0
EPZSC3	60	40	10	1	3
EPZSC5	60	40	10	1	5

**Table 2.** Specifications of Ethylene-Propylene Diene Monomer (EPDM)/Polypropylene (PP)/Clay Nanocomposites

Sample	Thickness (mm)	Mass (g)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
EP	7.10	62.63	0.88
EPZS	7.27	69.85	0.96
EPZSC3	7.23	70.50	0.97
EPZSC5	7.35	72.06	0.98

Polyab Rheomix 3000)을 이용하여 블렌드 작업을 수행하였으며, EPDM과 충전제를 50 °C, 60 rpm의 조건으로 torque가 일정해질 때까지 용융 혼합하고 상온에서 가교 약품들을 첨가하여 배합한 후 Hot press(Carver-2518)을 이용하여 160 °C에서 적정가교시간(t<sub>90</sub>) 동안 가교시켜 두께 1.2 mm 정도의 sheet 형태로 제조하였다. Table 1은 EPDM/PP/clay nanocomposites 시험편의 조성과 상세를 나타내었다. 시험편의 체적밀도는 시험하기 전에 부피와 무게를 측정하여 계산하였다.

EPDM/PP와 clay 혼합에 있어 EPDM/PP을 clay의 층간 사이로 효과적으로 침투시키기 위해서는 화학적 친화성이 있어야 하며 EPDM/PP 용융체가 clay의 층간 사이로 잘 삽입될 수 있게 초기 층간거리가 충분히 넓어야 한다. Clay의 삽입능 및 분산성이 EPDM/PP의 연소성에 영향을 미칠 것으로 예측하였다.

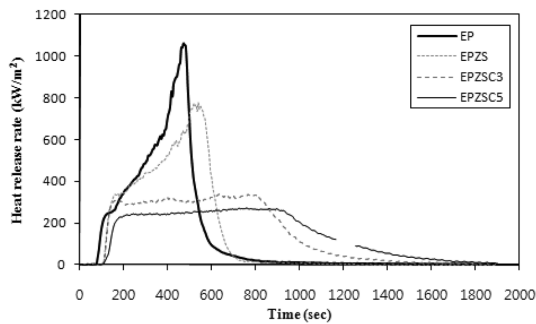
## 3. 결과 및 고찰

가연성 물질이 연소될 때의 에너지 방출 속도, 연기 생성, 가스 독성은 가연물의 종류, 밀도, 수분함량, 열 침투성 및 열적특성 등에 따라 결정된다.<sup>18,19)</sup> 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.<sup>20,21)</sup> 가연물과 관련하여 연소 특성의 이해를 돕는 다른 중요한 성

**Table 3.** Combustive Properties of the Specimens of Ethylene-Propylene Diene Monomer (EPDM)/Polypropylene (PP)/Clay Nanocomposites

Specimen	TTI <sup>a</sup> (sec)	MLR <sup>b</sup> (g/s)	MHRR <sup>c</sup> (kW/m <sup>2</sup> )	PHRR <sup>d</sup> (kW/m <sup>2</sup> )	EHC <sup>e</sup> (MJ/kg)
EP	70	0.033	144	1065	38.5
EPZS	99	0.057	247	780	37.9
EPZSC3	96	0.053	154	340	38.3
EPZSC5	103	0.035	153	270	37.9

<sup>a</sup>Time to ignition; <sup>b</sup>mass loss rate; <sup>c</sup>mean of heat release rate; <sup>d</sup>peak of heat release rate; <sup>e</sup>effective heat of combustion.

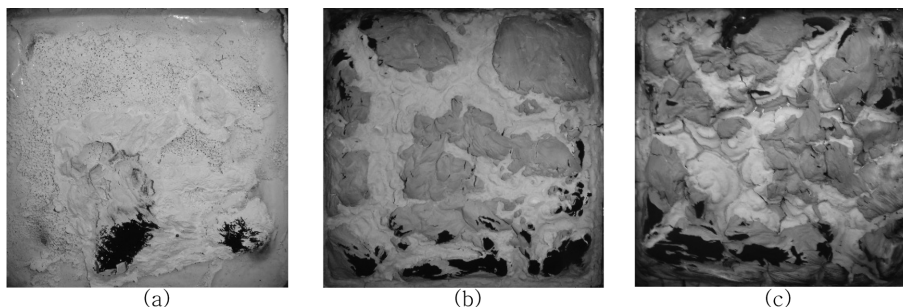
**Figure 1.** Heat release rate curves of the specimens of ethylene-propylene diene monomer (EPDM)/polypropylene (PP)/clay nanocomposites at 35 kW/m<sup>2</sup> external heat flux.

질은 착화시간(time to ignition, TTI)과 질량감소율(mass loss rate, MLR)이다. Table 3은 측정된 시험편들의 연소성질을 나타내었다.

Figure 1은 Table 1의 시험편 조성에 대한 열방출률 커브를 나타내었다. EPDM/PP 단독 조성의 시험편 EP에서 보여주는 바와 같이 열방출률 커브가 가장 높게 나타났다. 산화아연과 clay가 첨가된 시험편의 열방출률 커브는 각각의 첨가량에 따라 전반적으로 감소하였

다. 이것은 첨가된 산화아연, clay의 연소억제 작용에 의해 열방출률이 낮아지는 것으로 설명될 수 있다. 즉, 35 kW/m<sup>2</sup>의 외부 열원에서 시험한 시험편의 단위 면적당 최대열방출률(peak heat release rate per unit area, PHRR)은 10,655 kW/m<sup>2</sup>(at 473 sec)로 나타났으며, 시험편 EPZS에 대하여 780 kW/m<sup>2</sup>(at 543 sec)로 나타났다. 여기에 clay를 첨가시킨 EPZSC3, EPZSC5에 대하여 함량의 증가분에 따라 각각 340 kW/m<sup>2</sup> 이하(at 159~814 sec), 270 kW/m<sup>2</sup> 이하(at 177~936 sec)로 나타났다.

산화아연의 화학학적 반응성은 천연고무와 대부분 타입의 합성고무를 경화시키는 공정에서 유기성 촉진제를 활성화하는 데에 사용된다. 또 산화아연의 반응되지 않은 부분은 가황화 하는 동안 형성된 산성 분해물을 생성시키는 황(S)을 중화시키는 데에 염기성으로 비축되어 사용된다. 산화아연은 1975 °C 근처에서 아연(Zn)기체와 산소(O<sub>2</sub>)로 분해되므로, 상당한 열안정성을 갖으나, 난연제로서는 지극히 제한된 효과를 준다.<sup>22,23</sup> 특히 clay를 첨가시킨 나노복합체의 경우 clay의 함량에 따라 최대열방출율이 EPDM/PP 단독 조성에 비하여 1/3~1/4 정도로 낮아졌다. 이것은 Na<sup>+</sup>-MMT를 dimethyl dihydrogenated tallow ammonium(2M2HT)로 개질한 실리케이이트(C15A)에 의해 층간 용이하게 삽입된 유기고

**Figure 2.** Photographs of residues after combustion of the specimens of ethylene-propylene diene monomer (EPDM)/polypropylene (PP)/clay nanocomposites at 35 kW/m<sup>2</sup> external heat flux. (a) EPZS, (b) EPZSC3, and (c) EPZSC5.

분자사슬의 유동성 저하에 기인한 것으로 설명된다.<sup>17,24)</sup>

한편 Table 3에 나타낸 평균열방출률값은 예상했던 충전제에 따른 평균방출률 효과로 나타나지 않았다. 이것은 짧은 시간에 연소가 끝나는 시험편과 난연성 효과로 인한 장시간의 연소로 구분되는 상황으로 인한 것이며, 또 폴리머의 연화제로 사용된 스테아르산의 첨가는 자체의 연소성으로 인하여 평균열방출률이 다른 시험편에서도 공통적으로 증가한 것으로 판단된다.<sup>25)</sup> 따라서 시험편 EPZS에 대한 평균열방출률(247 kW/m<sup>2</sup>)은 Table 1, 시료의 조성상 산화아연의 지극히 제한된 난연효과와 스테아르산의 연소성 때문에 평균열방출률이 높게 나타난 것으로 짐작된다. 여기에 clay를 첨가한 나노복합체 EPZSC3, EPZSC5는 각각 스테아르산의 연소성을 억제 시켰으나 EDPM/PP 단독 조성 EP 보다는 높았다. 이것은 clay의 연소 억제성이 작용하였지만, 스테아르산의 연소성이 상당히 크게 작용한 것으로 판단된다.

시험편의 표면에 대한 외부 열유속과 화염으로부터의 열유속은 시험편의 열방출률이 최대가 되도록 빨리 도달하게 한 다음, 열분해 전단이 시험편의 안쪽으로 이동함에 따라 슛층이 점진적으로 생성된다. 이 슛층은 외부 열속에 노출된 표면과 열분해 전단 사이에 증가되는 열적 저항을 형성한다. 결과적으로 최대열방출률이 지속적으로 감소되는 것으로 본 시험결과와 일치한다.<sup>26)</sup> 시험편 EPZSC3, EPZSC5의 경우는 clay 및 산화아연의 나노복합체가 열적 안정성을 가지고 있어서 이들 시험편의 열적 저항 작용에 대하여 시너지 효과로 나타나는 것으로 이해된다.

HRR은 질량감소율(mass loss rate, MLR)과 유효연소열(effective heat of combustion, EHC)의 함수이며, 다음과 같은 식으로 설명되어진다.<sup>26)</sup>

$$\dot{Q}(\text{HRR}) = \dot{m} \cdot \Delta h_c \quad (1)$$

여기에서  $\dot{Q}$ (kW) = 열방출률;  $\dot{m}$ (kg/s) = 질량감소율;  $\Delta h_c$ (kJ/kg) = 유효연소열로 표시된다. 질량감소율은 화재거동에 대하여 추가적인 정보를 준다.<sup>27)</sup> 또 질량감소율은 비질량감소율과 기화되는 면적의 곱으로 표현된다.

$$\dot{m} = \dot{m}'' \cdot A \quad (2)$$

여기에서  $\dot{m}''$ (kg/s · m<sup>2</sup>) = 비질량감소율(specific mass loss rate, SMLR); A(m<sup>2</sup>) = 기화되는 면적

Table 3에 나타낸 바와 같이 EDPM/PP 단독 조성의 시험편(EP)의 경우 0.033 g/s이며 충전제를 포함한 시험편 EPZS, EPZSC3은 각각 0.057 g/s, 0.053 g/s으로 높

았다. 이것은 스테아르산의 첨가로 인한 연소성이 크게 작용하기 때문으로 예상된다. 그러나 clay 함량을 증가시킨 시험편 EPZSC5에 대하여는 질량감소율이 낮아졌다. 이것은 산화아연의 난연 작용과 clay의 첨가에 따라 앞서 설명한 열방출률의 경우와 같이 실리케이트(C15A)에 의해 충전 용이하게 삽입된 유기고분자사슬의 유동성 저하에 기인하여 스테아르산의 연소성을 억제하는 것으로 설명될 수 있다. 탄화하지 않는 열가소성 플라스틱은 액체와 유사한 거동을 한다. 따라서 비질량감소유속을 예측하는 일반적인 식은 다음과 같다.<sup>28)</sup>

$$\dot{m}'' = \dot{q}''/L \quad (3)$$

$\dot{q}''$ (kW/m<sup>2</sup>): 연료표면에 대한 순수 열유속(화염으로부터 나오는 실제 열유속)

L(kJ/g): 기화열

그러므로 EPDM/PP 단독 조성(EP)에 스테아르산이 첨가된 시험편에 대하여 질량감소율이 큰 값을 나타낸 것은 다른 충전제를 가한 시험편에 비하여 비교적 기화열이 작으므로 예상된다.

유효연소열은 질량감소율과 함께 물질의 화재거동에 추가적인 정보를 제공해 주기 위하여 사용될 수 있다. 유효연소열은 한 가지의 분해 형태를 갖는 균일한 시험편의 연소시간 동안의 상수로서 이론적인 순연소열의 값보다 적다.<sup>27)</sup> 한 가지 이상의 분해형태를 갖는 재료나 복합재료 또는 비균일한 재료의 유효연소열은 반드시 일정하지는 않다. Table 3에 나타낸 바와 같이 충전제를 첨가한 시험편(EHC = 37.9~38.3 MJ/kg)과 첨가하지 않은 EPDM/PP 단독 조성의 시험편(EHC = 38.5 MJ/kg)은 특별한 차별성이 없다. 이것은 식(1)에 적용하면 질량감소율( $\dot{m}$ )의 차별성이 적기 때문인 것으로 설명될 수 있다.

연소 착화시간(TTI)은 시험편의 열원에 의한 노출로부터 지속적인 불꽃연소의 시작전 까지를 나타내며 Table 2에 나타내었다. 수지단독 조성(EP)에 대하여 TTI 값이 70 sec로, EPZS, EPZSC3, EPZSC5에 대하여 99~103 sec로 측정되었다. 이것은 산화아연 및 clay 첨가에 의한 조성체에 대하여 난연성이 존재함으로 착화시간이 지연되는 것으로 판단된다.<sup>17,22,23)</sup>

Figure 2에 시험편의 연소 종료 후 탄화된 형태로써 시험편의 잔여물 사진을 나타내었다. 수지 단독 시험편(EP)은 완전 연소 후 탄화 잔여물이 존재하지 않았다. 산화아연과 스테아르산이 첨가된 시험편 EPZCS(a)의 연소 후 겉보기 잔여물은 밝은 회백색으로 나타났고, 일부 약간의 탄화된 부분이 혼재하였다. Clay가 첨

가된 EPZSC3(b)은 열은 회색과 진한 회색이 혼재되었으며, 일부 탄화된 부분이 혼재하였다. 그러나 EPZSC5(c)은 더욱 어두운 회색의 불규칙한 표면 및 탄화된 표면이 더욱 증대되었다. 이것은 수산화아연과 clay의 첨가에 의한 연소억제 효과로 판단되며, clay의 첨가에 의한 나노복합체의 연소억제 기능이 더욱 큰 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

EPDM/PP/Clay 나노복합체 시험편의 연소특성에 관한 실험을 ISO 5660-1 표준에 따른 콘칼로리미터를 이용하여 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) EPDM/PP/ZnO 복합체에서 폴리머 연화제로 사용된 스테아르산은 자체의 연소성으로 인하여 평균열방출률(MHRR)이 247 kW/m<sup>2</sup>으로 나타났으며, EPDM/PP 단독 조성의 시험편(MHRR = 144 kW/m<sup>2</sup>)보다 높은 평균열방출률을 나타내었다.

2) EPDM/PP/Clay 나노복합체에서 시간에 따른 최대 열방출률은 EPDM/PP 단독 조성의 시험편(PHRR = 1065 kW/m<sup>2</sup>)보다 매우 낮은 340, 270 kW/m<sup>2</sup>로 나타났다. 이것은 고분자 물질에 대하여 clay의 처리에 의한 연소억제가 효과적인 것으로 판단된다.

3) 또 첨가된 clay의 층간 용이하게 삽입된 유기 고분자 사슬의 유동성 저하에 기인한 연소억제 효과가 clay의 함량에 의존하여 향상되는 것으로 판단된다.

4) 본 연구를 통하여 고분자 물질에 clay의 첨가에 의한 나노복합체의 적용은 화재위험성이 저감될 수 있음을 알았다.

#### 참고문헌

1. G.L. Nelson, "Fire and Polymers", American Chemical Society, Washington DC.(1990).
2. M. Lewis, S.M. Altas, and E.M. Pearce, "Flame-Retardant Polymer Materials", Plenum Press, New York(1975).
3. A. Usuki, M. Kawasumi, Y. Kojima, A. Okada, T. Kurauchi, and O. Kamigato, "Swelling behavior of Montmorillonite Cation Exchanged for  $\omega$ -Amino Acids by  $\epsilon$ -Caprolactam", J. Mater. Res., Vol.8, pp.1174-1178(1993).
4. A. Usuki, M. Kawasumi, Y. Kojima, A. Okada, Y. Fukushima, T. Kurauchi, and O. Kamigato, "Synthesis of Nylon 6-clay Hybrid", J. Mater. Res., Vol.8, pp.1179-1184(1993).
5. Y. Kojima, A. Usuki, M. Kawasumi, A. Okada, Y. Fukushima, T. Kurauchi, and O. Kamigato, "Mechanical Properties of Nylon 6-Clay Hybrid", J. Mater. Res., Vol.8, pp.1185-1189(1993).
6. P.B. Massersmith and E.P. Giannelis, "Synthesis and Barrier Properties of Poly(E-caprolactone)-Layered Silicate Nanocomposites", J. Polym. Sci.: Part A: Polym. Chem., Vol.33, pp.1047-1057(1995).
7. Z. Wang and T.J. Piannavaia, "Nanolayer Reinforcement of Elastomeric Polyurethane", Chem. Mater., Vol.10, pp.3769-3771(1998).
8. R. Krishnamoorti and E.P. Giannelis, "Rheology of End-Tethered Polymer Layered Silicate Nanocomposites", Macromolecules, Vol.30, pp.4097-4102(1997).
9. A. Oya and Y. Kurokawa, "Factors Controlling Mechanical Properties of Clay Mineral/Polypropylene Nanocomposites", J. Mater. Sci., Vol.35, pp.1045-1050(2000).
10. T.L. Padmananda, D. Kaviratna, and T.J. Pinnavaia, "On the Nature of Polyimide-Clay Hybrid Composites", Chem Mater., Vol.6, pp.573-575(1994).
11. R.A. Vaia, K.D. Jandt, E.J. Kramer, and E.P. Giannelis, "Kinetic of Polymer Melt Intercalation", Macromolecules, Vol.28, pp.8080-8085(1995).
12. P.B. Massersmith and E.P. Giannelis, "Synthesis and Characterization of Layered Silicate-Epoxy Nanocomposites", Chem Mater., Vol.6, pp.1719-1725(1994).
13. T.J. Pinnavaia, "Intercalated Clay Catalysts", Science, Vol.220, pp.365-371(1983).
14. 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).
15. M.M. Hirschler, "Thermal Decomposition and Chemical Composition", American Chemical Society Symposium Series 797(2001).
16. 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).
17. Y.C. Yang and Y.W. Chang, "Fracture Behavior of EPDM/Clay Composite", Applied Chemistry, Vol.4, No.2, pp.85-88(2000).
18. Y.J. Chung, "Comparison of Combustion Properties of Native Wood Species Used for Fire Pots in Korea", J. Ind. Eng. Chem., Vol.16, pp.15-19(2010). doi: 10.1016/j.jiec.2010.01.031.
19. 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).
20. J.D. DeHaan, "Kirks's Fire Investigation", Fifth Edition, pp.84-112, Prentice Hall(2002).
  21. V. Babrauskas, "Development of Cone Calorimeter-A Bench-Scale Heat Release Rate Apparatus Based on Oxygen Consumption", Fire and Materials, Vol.8, No.2, pp.81-95(1984). doi: 1002/fam.810080206.
  22. N.N. Greenwood and A. Earnshaw, "Chemistry of Elements", Butterworth-Heinemann, Oxford(1997). ISBN 0080379419.
  23. M.M. Hirscher, "Reduction of Smoke Formation from and Flammability of Thermoplastic Polymers by Metal Oxides", POLYMER, Vol.25(March), pp.405-411(1984).
  24. J. Zhang, D.D. Jiang, and C.A. Wilkie, "Thermal and Flame Properties of Polyethylene and Polypropylene Nanocomposites Based on an Oligomerically-modified Clay", Polm. Degrad. Stab., Vol.91, pp.298-304 (2006).
  25. J. Woodthikkanokkhan and P. Tunjongnawin, "Investigation of the Effect of Mixing Schemes on Cross-link Distribution and Tensile Properties of Natural-acrylic Rubber Blends", Polymer Testing, Vol.22, No.3, pp.305-312(2002).
  26. V. Babrauskas and S.J. Grayson, "Heat Release in Fires", E & FN Spon (Chapman and Hall), London, UK.(1992).
  27. 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).
  28. J.G. Quintire, "Principles of Fire Behavior", Chap. 5, Cengage Learning, Delmar, U.S.A.(1998).