

[Research Paper]

## 열물성의 변화가 고체 가연물의 열분해에 미치는 영향

홍터기 · 이종원\* · 박설현\*\*†

조선대학교 대학원 기계시스템공학과, \*한국항공우주연구원 항공우주응용재료팀,  
\*\*조선대학교 기계시스템·미래자동차 공학부

## Influences of changes in the Thermal Properties on Pyrolysis of Solid Combustibles

Ter-Ki Hong · Jong Won Lee\* · Seul-Hyun Park\*\*†

Department of Mechanical Systems Engineering, Graduate School of Chosun University

\*Aerospace Application and Materials Research Team, Korea Aerospace Research Institute (KARI)

\*\*School of Mechanical System and Automotive Engineering, Chosun University

(Received June 14, 2017; Revised June 14, 2017; Accepted June 16, 2017)

### 요 약

고체 연료의 열물성 변화가 가연물의 열분해 특성에 미치는 영향을 고찰해 보기 위해서 KS F ISO 5660-1에 제시된 콘 칼로리미터 실험을 수행하였고, Fire Dynamics Simulator (FDS) 1차원 열분해 모델의 수치해석을 수행하였다. 고체 연료로는 열분해과정 중 Char를 발생시키지 않는 Poly Methyl Methacrylate (PMMA)를 사용하였으며, 문헌에 보고된 PMMA의 열물성치와 열분해 물성치를 FDS의 입력 변수로 설정하여 콘 칼로리미터 실험의 수치해석을 수행하였다. 콘 칼로리미터 실험을 통해 측정된 고체가연물의 질량 감소 결과와 일치하는 열분해 모델의 계산 결과를 바탕으로 열물성치와 열분해 물성치의 변화가 고체 가연물의 질량 감소에 어떠한 영향을 주는지를 고찰해 보았으며, 열전도계수와 비열을 상온의 상수 값으로 입력한 경우 가연물의 질량 감소의 예측에 있어 상당한 오차를 유발할 수 있다.

### ABSTRACT

In order to investigate the influence of changes in the thermal properties of solid combustibles on thermal decomposition, a series of solid pyrolysis experiments were performed using a cone calorimeter specified in KS F ISO 5660-1. In the present study, Poly Methyl Methacrylate (PMMA) which does not produce Char during pyrolysis process was used as solid fuel. Results obtained from cone calorimeter experiments were compared to ones obtained from numerical analysis of Fire Dynamics Simulator (FDS) 1D pyrolysis model adopted with thermal properties of solid fuel as input parameters. Comparisons between experimentally calculated and model-predicted mass loss rate were then made to elucidate the effect of changes in the thermal properties on pyrolysis of PMMA.

**Keywords** : Poly Methyl Methacrylate (PMMA), Fire Dynamics Simulator (FDS), Thermal Pyrolysis; Solid Combustibles

### 1. 서 론

산업 발전으로 인한 도시의 발달과 인구의 증가로 인해 화재의 위험성은 점차 증가하고 있다. 화재로 인해 발생하는 막대한 인적·물적 피해 손실을 최소화하기 위해서는 화재의 성장 및 확산에 대한 이해가 필요하다. 특히 고체 가연물의 열분해를 통해 발생하는 기체 연료의 생성과정과에 대한 이해는 화재 성장을 파악하는데 중요한 요소이다. 고

체 가연물의 열분해를 통해 발생한 기체 연료가 공기와 적절하게 혼합되어 일정 온도 조건에 도달하면 자연 발화되어 화염이 발생되고 가연물 표면에 열을 재공급함으로써 기체 연료의 발생을 촉진시킨다. 이 과정에서 고체 가연물이 어떠한 속도로 열분해가 일어나는지를 나타내는 질량 감소율(Mass Loss Rate, MLR)은 유효 연소열과의 상관관계를 통해 가연물에서 발생하는 열방출율(Heat Release Rate, HRR)을 결정짓는 중요한 인자이다. 특히 가연물의 열분해

† Corresponding Author, E-Mail: [isaac@chosun.ac.kr](mailto:isaac@chosun.ac.kr), TEL: +82-62-230-7174, FAX: +82-62-230-7171

© 2017 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

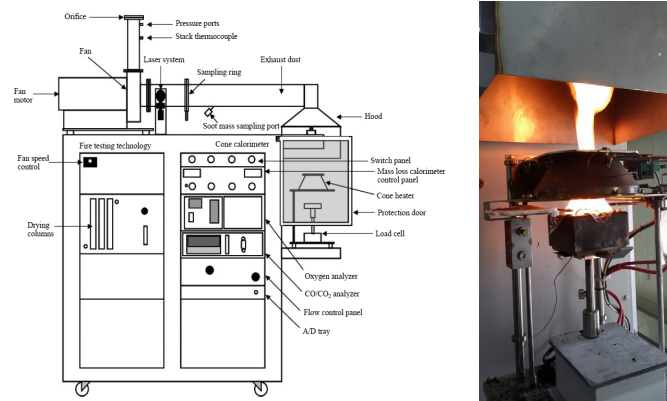


Figure 1. KS F ISO 5660-1 Cone calorimeter apparatus<sup>(3)</sup>.

과정에 관여되어 있는 각종 열물성치의 상호작용을 통해 변화하는 열분해 특성에 대한 이해가 화재의 성장을 해석하고 분석하는데 있어 반드시 선행되어야 한다.

Rhodes와 Quintiere<sup>(1)</sup>는 Poly Methyl Methacrylate (PMMA) 열분해 물성치(Arrhenius 상수, 활성화 에너지, 반응열)와 열물성치(열전도계수, 비열, 밀도 등)의 값이 증감에 따라 가연물 샘플이 받는 열유속과 샘플의 두께가 질량 감소율에 어떠한 영향을 주는지를 수치적으로 해석하였다. 이 연구를 통해 고체 가연물의 열분해 물성치와 열물성치는 질량 감소율과 점화 시간에 다양한 방식을 통해 영향을 줄 수 있으며 샘플의 열적 두께에 영향을 줄 수 있다는 것을 보여주었다. Linteris<sup>(2)</sup>는 PMMA의 열분해 물성치와 열물성치의 범위를 임의로 설정하고 이들의 변화가 주어진 열유속의 범위 내에서 가연물의 열분해에 어떠한 영향을 미치는가에 대해 연구하였다. 하지만 PMMA의 열분해 실험과의 비교 검증 없이 1차원 열분해 모델을 이용하여 열물성치와 열분해 물성치의 변화에 따른 질량 감소율의 민감도 분석만을 수행하였다. 반면 Lee<sup>(3)</sup>는 열가소성 플라스틱, 섬유 강화 플라스틱, 목재 등의 고체 가연물을 콘칼로리미터 열분해 실험을 수행하였고 이를 통해 측정된 고체 가연물의 질량감소 결과를 정확히 예측할 수 있는 열분해 물성치와 열물성치를 열분해 모델을 통해 역산하였다. 이 과정을 통해 고체 가연물의 열분해 시 Char가 발생하거나 가연물 내부에 층이 존재하는 경우 층간 모호한 열전달 경계조건에 의해 열물성치의 정확한 예측이 불가능하다는 사실을 보고한 바 있다.

앞서 살펴본 선행연구<sup>(1-4)</sup>를 통해 밝혀진 바와 같이 열분해 모델에 부정확한 열물성치나 열분해 물성치를 입력한 경우, 열적 두께와 질량 감소율, 점화 시간 등의 예측에 큰 영향을 주기 때문에 정확한 예측을 위해서는 열분해 실험을 통해 얻어진 결과를 바탕으로 검증이 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 선행연구의 연장선상에서 콘칼로리미터(Cone Calorimeter, KS F ISO 5660-1) 실험을 통해 측정된 고체 가연물의 질량감소를 Fire Dynamics Simulator

(FDS)의 1차원 열분해 모델을 통해 해석하였다. 본 연구에서는 다른 합성수지에 비해 광범위한 열물성치 데이터가 구축되어 있어 비교적 연구가 용이한 PMMA를 사용하여 열분해 실험을 수행하였다. 아울러, PMMA는 열분해과정 동안 Char를 발생시키지 않기 때문에 열분해 특성을 연구하기에 유리하다. 선행연구<sup>(5-9)</sup>를 통해 보고되어 있는 다양한 PMMA의 열물성치와 열분해 물성치를 비교·분석하여 최적의 물성값을 선택하고 열분해 시 고체 가연물의 질량 감소에 어떠한 영향을 주는지를 콘칼로리미터 실험에 측정된 질량 감소와 열분해 모델을 통해 예측된 결과를 비교하여 각각의 물성치의 변화가 어떠한 영향을 미치는지 정성적으로 제시하였다.

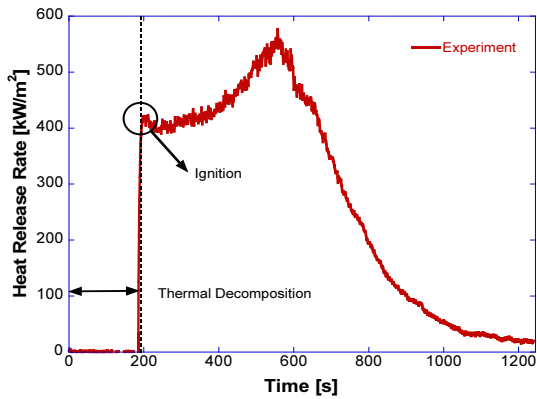
## 2. 실험 및 수치해석 방법

### 2.1 콘 칼로리미터(ISO-5660)를 이용한 PMMA의 열분해 실험

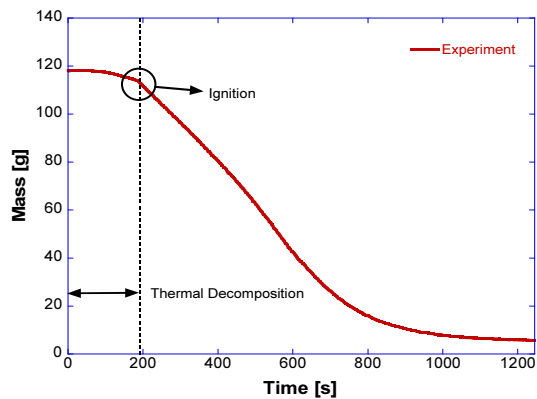
PMMA의 열분해 실험을 위해 Figure 1에 제시되어 있는 콘 칼로리미터를 사용하였다. 가열된 콘으로부터 복사 열유속이 도달하는 유효 표면적이  $88.4 \text{ cm}^2$ 인 PMMA 샘플 ( $100 \text{ (W)} \times 100 \text{ (L)} \times 10 \text{ (T)} \text{ mm}$ )을 홀더에 고정하였고 열분해 실험 중 샘플이 부풀어 홀더 밖으로 빠져나가는 것을 방지하기 위해 금속 메쉬를 사용하였다.

PMMA 샘플과 콘의 방열판 사이의 거리는  $25 \text{ mm}$ 이며 열분해 실험에 적용된 환기 유동(Ventilation flow)은  $24 \text{ L/s}$ 이다. 샘플의 표면온도는 샘플 홀더의 중앙에 K-type 열전대를 고정하여 데이터 수집 장치를 통해 측정하였다. 콘 히터는  $50 \text{ kW/m}^2$ 의 수직 방향으로 방출하도록 히터 표면의 온도를 조정 하였으며, 샘플 표면의 열유속이  $50 \text{ kW/m}^2$ 에 도달하는지 실험 전 열유속계를 설치하여 확인하였다. 실험의 종료는 화염의 소멸과 샘플의 질량 변화가 없는지를 관찰하여 결정하였다.

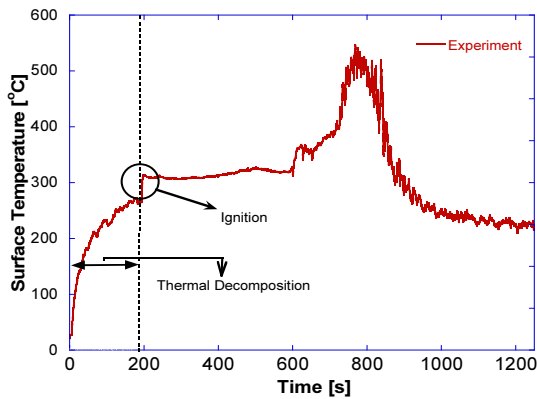
PMMA 샘플은 주어진 복사 열유속 조건에서 실험 시작 후, 약  $200 \text{ s}$  뒤 자연 발화되었다. 샘플의 발화 여부는 Figure



(a) Measured heat release rate of PMMA sample as a function of time



(b) Measured mass of PMMA sample as a function of time



(c) Measured surface temperature of PMMA sample as a function of time

Figure 2. Experimental results obtained from The ISO 5660 cone calorimeter test.

4a의 열방출율(heat release reate, HRR) 그래프의 결과로부터 판단하였다. 발화 이후 약 1000 s 가량은 고체 연료의 열분해를 통해 발생한 기체 연료의 연소 반응으로 생성된 화염에서 전달 되는 복사열유속이 가연물의 질량 감소에 영향을 미친다. Figure 4b에 도시되어 있는 바와 같이 자연 점화가 일어나기 이전 열분해를 통해 PMMA 샘플의 질량은 118.2 g에서 114 g로 4.2 g 감소하였다. 반면 PMMA 샘플의 표면온도가 약 350 °C에 도달하여 자연 점화(Figure

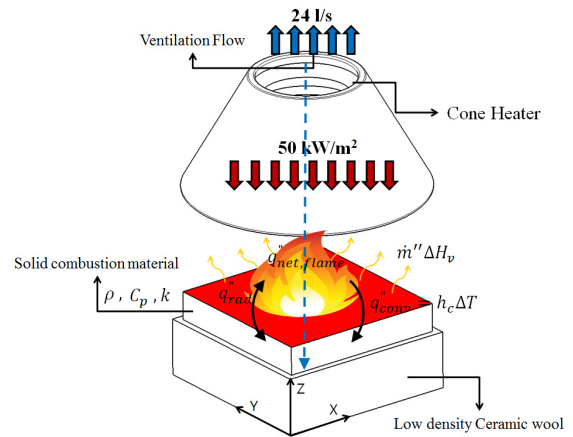


Figure 3. Schematic diagram of ISO 5660 cone calorimeter test.

3c)가 발생되면 질량이 급격히 감소하기 시작하여 화염 소멸 시 까지 대부분(112.5 g)이 감소하였다.

### 2.2 PMMA의 1차원 열분해 모델 및 해석 방법

본 연구에서는 FDS 1차원 열분해 모델을 적용하여 PMMA 샘플의 열분해 과정을 모사하고 실험결과와 비교·분석하고자 하였다. FDS 열분해 모델은 열분해를 통해 발생된 기체 연료의 연소반응을 고려하지 않고, Figure 3에 제시된 콘 칼로리미터 실험 조건을 아래의 식으로 표현하였다. 식 (1)의 지배방정식은 1차원 열전도식이며, 샘플 표면(x=0)의 경계 조건은 식 (2)와 같다. 식 (2)는 샘플 표면의 경계 조건으로 Figure 3의 콘히터와 샘플 표면에서 발생하는 복사 열유속( $\dot{q}''_{rad}$ )과 샘플 표면과 대기에서 발생하는 복사 열유속( $\dot{q}''_{conv}$ ), 그리고 샘플에서 발생하는 열분해 유속과 기화열( $\dot{m}''\Delta H_v$ )로 나타낼 수 있다. 즉 열분해 유속( $\dot{m}''$ )은 활성화 에너지(E), 밀도( $\rho$ ), Arrhenius 상수(A), 기체 상수(R), 샘플 표면 온도(T)로 식 (3)의 Arrhenius 식을 표현할 수 있다. 식 (4)는 시편의 바닥에서 경계 조건 ( $x=M$ )으로 단열 경계 조건을 표현하였다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z}(0, t) = \dot{q}''_c + \dot{q}''_r - \dot{m}'' \Delta H_v \quad (2)$$

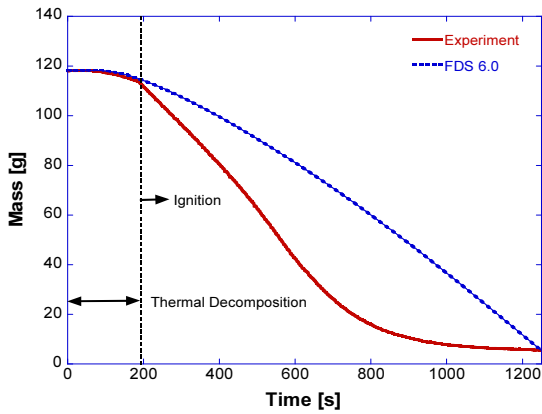
$$\dot{m}'' = A \rho \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (3)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x}(M, t) = 0 \quad (4)$$

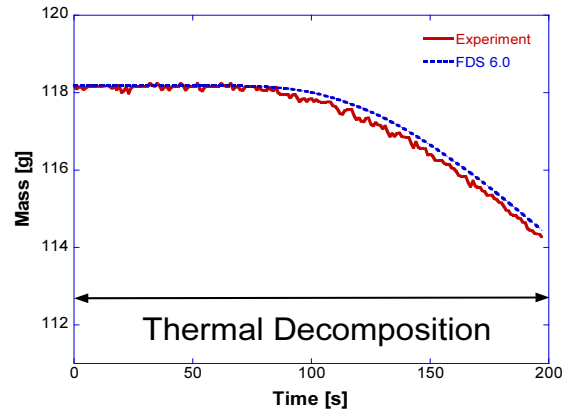
일반적으로 고체가연물의 열물성치(열전도계수, 비열, 밀도)는 온도에 따라 변화하는 것으로 보고되고 있다.<sup>(1)</sup> 고체가연물의 질량 감소율은 식 (3)에 제시되어 있는 바와 같이 Arrhenius 식으로 바탕으로 계산하게 되므로 온도 의존성에 영향을 줄 수 있는 열물성치의 변화는 질량 감소율을

**Table 1.** Summary of Thermal Properties for PMMA used<sup>(6)</sup>

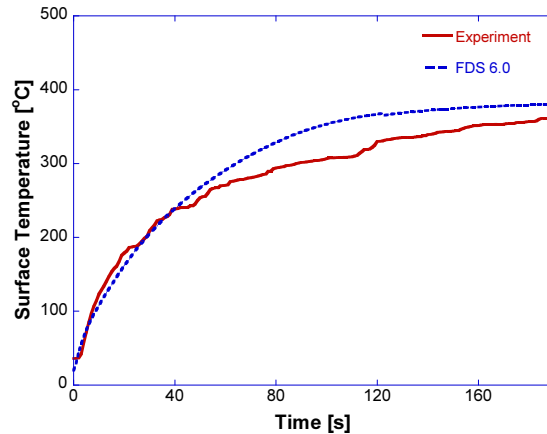
Parameter	Units	Range		Typical Value
Thermal Conductivity, $k$	$W/(m \cdot K)$	$(T < 378 K), 0.45 - (3.8 \times 10^{-4}) T$		0.336 (300 K)
		$(T > 378 K), 0.27 - (2.4 \times 10^{-4}) T$		
Specific Heat, $c_p$	$kJ/(kg \cdot K)$	$(0.6014 + 0.00036 T)$		1.69 (300 K)
Density, $\rho$	$kg/m^3$	1105	1205	1155
Heat of Reaction, $\Delta H_{reac}$	$kJ/kg$	870	2000	1830
Activation Energy, $E$	$kJ/kmol$	$1.781 \times 10^5$	$1981 \times 10^5$	$1.881 \times 10^5$
Pre-exponential, $A$	$1/s$	$7.6 \times 10^{12}$	$9.6 \times 10^{12}$	$8.6 \times 10^{12}$



(a) Measured and calculated mass of PMMA sample as a function of time



(b) Measured and calculated mass of PMMA sample with time before ignition



(c) Measured and calculated surface temperature of PMMA sample as a function of time

**Figure 4.** Comparisons between measured and calculated mass and surface temperature of PMMA sample.

계산하는 데 있어 중요한 인자이다. 따라서 본 연구에서는 FDS 열분해 모델의 해석과정 중 온도에 따라 증감하는 열물성치의 변화가 샘플의 질량 감소율에 어떠한 영향을 주는지를 실험결과와 비교하여 분석해 보았다. 아울러, FDS 열분해 모델의 해석에 필요한 또 다른 입력 인자인 열분해 물성치(반응열, 활성화 에너지, Arrhenius 상수)의 변화에 따라 영향 받은 샘플의 질량 소모율의 변화도 실험결과와 비교하여 분석하였다. FDS 열분해 모델에 사용된 PMMA

의 열물성치와 열분해 물성치는 Korver<sup>(6)</sup>이 제시한 값을 사용하였으며 Table 1에 정리되어 있다.

### 3. 실험-수치해석 결과 및 고찰

Figure 4에는 FDS의 열분해 모델에 Table 1에 제시된 열물성치와 열분해 물성치를 입력하여 계산한 PMMA의 질량 감소와 표면의 온도를 실험값과 비교하여 도시하였다.

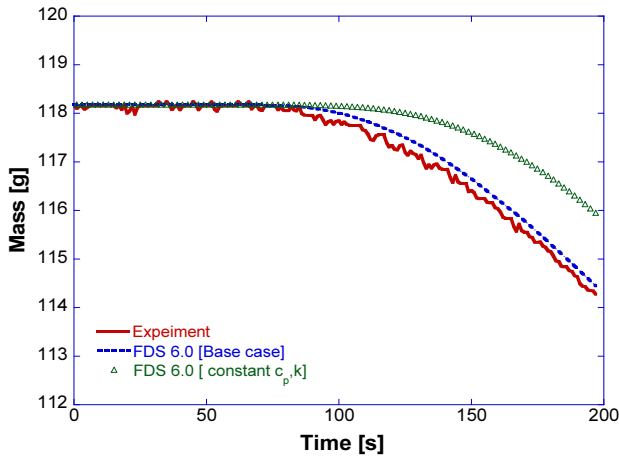


Figure 5. Calculated mass as a function of time with constant input parameters,  $c_p$  and  $k$ .

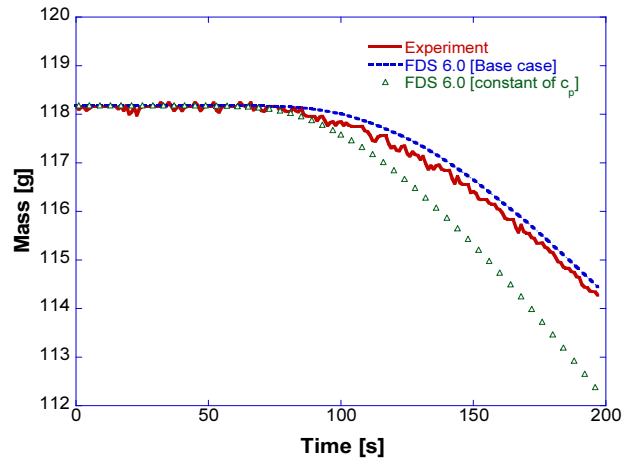


Figure 6. Calculated mass as a function of time with constant input parameters,  $c_p$ .

열분해 모델에 입력된 열전도 계수와 비열은 Table 1에 정의된 온도의 함수로 각각 입력하였으며, 밀도, 반응열, 활성화 에너지, Arrhenius 상수는 Table 1에 제시된 대표값(Typical value)으로 입력하였다. Figure 4a에서 볼 수 있는 바와 같이 큰 칼로리미터 실험 결과에서는 약 200 s를 기준으로 자연 점화되어 급격하게 PMMA의 질량이 감소하지만, FDS 열분해 모델 결과에서는 자연 점화 이후 연소반응으로 인한 급격한 질량 감소를 고려하지 않고 큰 히터에서 주어진 복사 열유속에만 의존하여 열분해가 일어나기 때문에 질량 감소에서 큰 차이를 보이게 된다. 따라서 큰 칼로리미터 실험결과와 FDS 열분해 모델의 계산 결과 비교는 앞서 기술한 것처럼 자연 점화가 일어나기 전 열분해 구간에서만 수행하였다. Figure 4b와 Figure 4c에 자연 발화 이전에 실험을 통해 측정된 PMMA의 질량과 표면온도와 FDS 열분해 모델을 통해 계산된 결과를 각각 도시하였다. 자연 발화 전까지 측정된 PMMA의 질량 감소는 4.2 g이었으며 FDS 열분해 모델을 통해 계산된 질량 감소는 3.2 g으로 비교적 잘 일치하고 있다. 또한 PMMA 표면의 온도 역시 FDS 열분해 모델의 예측결과가 실험 결과와도 비교적 잘 일치하고 있다.

열물성치 변화가 열분해 특성을 미치는 영향을 고찰해 보기 위해, Figure 4b의 PMMA 질량 감소를 계산하기 위해 입력된 열물성치 및 열분해 물성치를 Base case로 설정하고 추가 분석을 실시하였다. 추가 분석에서는 Base case에 입력한 열전도계수와 비열을 Table 1에 제시된 대표값으로 상온 상태에서 상수로 고정시켜 계산을 수행한 뒤 그 결과를 Figure 5에 도시하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 열분해 모델에 상수로 열물성치로 입력하여 계산된 PMMA의 질량 감소는 모델을 통해 계산된 결과가 실험에서 측정된 결과나 Base case에 비해 작게 예측된다.

Figure 6은 FDS의 열분해 모델에서 비열은 Table 1에 정의된 상온의 상수 값( $1.69 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )으로 고정하고 열전도

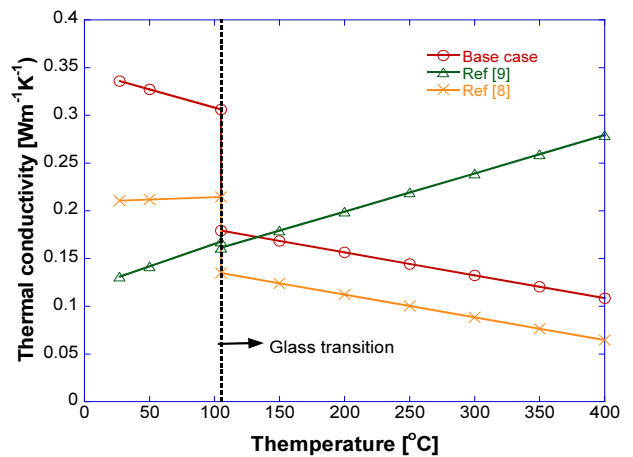


Figure 7. Thermal conductivity plotted as function of temperature for Base, Ref [8], and Ref [7] cases.

계수는 정의된 온도의 함수로 입력한 경우 PMMA의 질량 감소를 계산한 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 비열이 상수로 고정된 경우 실험결과와 Base case로 계산된 질량 감소와는 상당한 차이를 보이고 있으며 질량 감소를 과다 예측하고 있다. 이는 온도가 상승에 함 따라 커져야 할 비열 값이 상수로 고정되어 PMMA 표면의 온도가 높아져 열분해가 촉진되기 때문이다.<sup>(1)</sup> 즉, 온도에 따라 변하는 PMMA의 비열의 변화를 열분해 모델에 고려하지 않은 경우 실제 측정된 고체연료의 질량 감소와는 큰 차이를 보일 수 있다.

참고문헌<sup>(6)</sup>에 보고된 바와 같이 PMMA의 비열은 대부분 온도가 상승함에 따라 동일하게 증가하는 경향을 보이고 있지만, 열전도계수의 경우 Figure 7에 도시되어 있는 바와 같이 온도별로 정의된 값의 차이가 크고 증감의 경향도 서로 상이하다. PMMA의 유리 천이점(Glass transition) 105 °C을 기준으로 Base case는 열전도계수가 감소하고 있으며 특



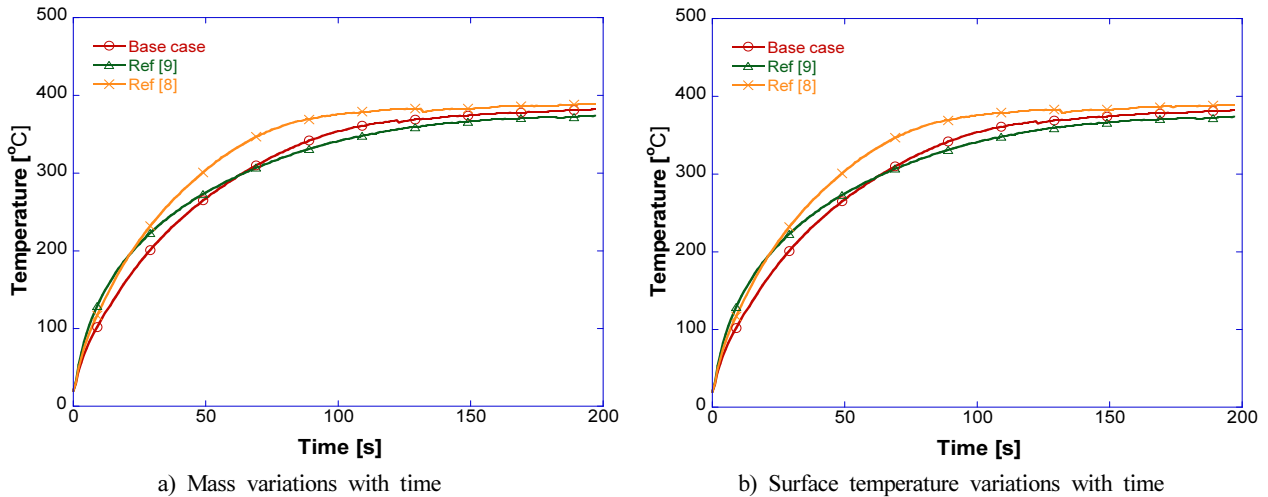


Figure 8. Calculated mass as function time with parameter inputs for Base, Ref [8], and Ref [7] cases.

히 105 °C 이후에는 감소세가 두드러지는 경향을 보이고 있다. 참고문헌<sup>(8)</sup>에 보고된 열전도계수는 105 °C까지는 거의 일정하다가 그 이후 감소하는 경향을 보이고 반면 참고문헌<sup>(9)</sup>에 보고된 PMMA의 열전도계수는 온도가 증가함에 따라 꾸준히 증가하는 경향을 보인다.

Figure 8은 FDS 열분해 모델에 PMMA의 비열은 Table 1에 정의된 온도의 함수로 입력하고, 열전도계수는 Figure 7 제시된 값을 온도의 함수로 각각 입력하여 계산한 PMMA의 열분해 질량과 샘플 표면의 온도를 도시한 그래프이다. Figure 7에 볼 수 있는 바와 같이 참고문헌<sup>(8)</sup>에 보고된 열전도계수는 유리 천이점 105 °C 이후에서 가장 큰 값을 가지며 참고문헌<sup>(7)</sup>에서 보고된 값이나 Base case에 입력된 값에 비해 온도가 증가할수록 훨씬 큰 값을 가지고 있다. 열분해 초기(자연 발화 이전)에 열전도계수가 큰 경우 고체 가연물의 내부로 열전도가 촉진되어 표면온도의 온도는 오히려 낮아지는 것을 알 수 있다(Figure 8b). 결국 Base case를 기준으로 105 °C 이후 열전도계수가 큰 경우(참고문헌<sup>(9)</sup>)는 열분해 초기의 고체 가연물 표면의 온도가 낮아 Figure 8a에 제시되어 있는 바와 같이 질량 소모가 작아지지만, 열전도계수가 작은 경우(참고문헌<sup>(8)</sup>)는 반대로 질량 소모가 커지게 된다.

Figure 9은 자연 발화 온도와 비슷한 300 °C의 비열과 열전도계수를 상수로 FDS 열분해 모델에 입력하여 계산된 질량 감소를 도시한 그래프이다. 그림에 요약되어 있는 바와 같이 열물성치를 입력 시 상온 상태의 값을 입력하여 계산한 결과(Figure 5)에 비해 자연발화 지점의 열물성치를 입력한 경우 콘 칼로리미터 실험을 통해 측정된 결과에 가까워지는 것을 볼 수 있다. 즉, 열분해가 진행되어 발화가 이루어지는 온도의 열물성치를 모델에 입력하는 것이 질량 소모를 예측하는데 도움이 된다.

PMMA의 비열과 열전도계수를 제외한 나머지 열물성치(밀도)와 열분해 물성치(반응열, 활성화 에너지, Arrhenius

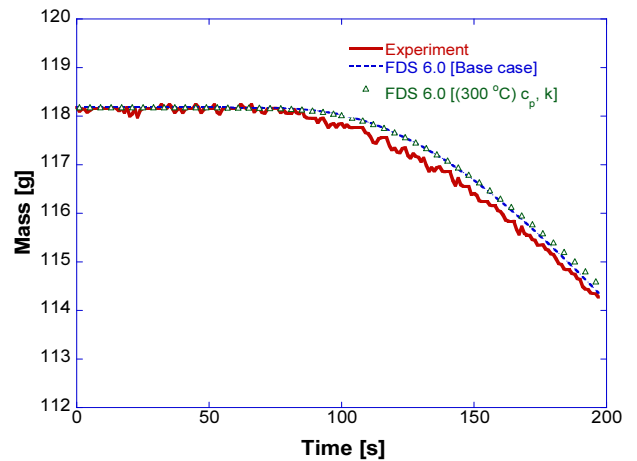


Figure 9. Calculated mass as a function of time with thermal properties at 300 °C.

상수)의 변화가 열분해 특성에 미치는 영향을 파악해 보기 위해 콘칼리미터 실험결과로 측정된 질량 감소와 열분해 모델의 계산 결과를 비교하여 Figure 10에 도시하였다. 열분해 모델의 계산 시 열전도계수와 비열은 Table 1에 정의된 함수로 입력하였으며, 나머지 열물성치와 열분해 물성치는 제시된 최대 - 최소값을 입력하여 샘플의 질량 감소를 계산하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 밀도의 증감(Figure 10a)에 따라 PMMA의 질량 감소는 거의 영향을 받지 않지만 반응열(Heat of reaction, HRR)의 증감은 Figure 10b에서 관찰할 수 있는 것처럼 질량 감소에 큰 영향을 미친다. Figure 10c와 d에는 PMMA의 활성화 에너지(E) 및 Arrhenius 상수의 증감에 따라 계산된 질량 감소가 도시되어 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 Arrhenius 상수의 증감은 PMMA의 질량 감소에 큰 영향을 미치지 않지만 활성화에너지의 증감에 따라 PMMA의 질량 감소는 크게 변화함을 알 수 있다.

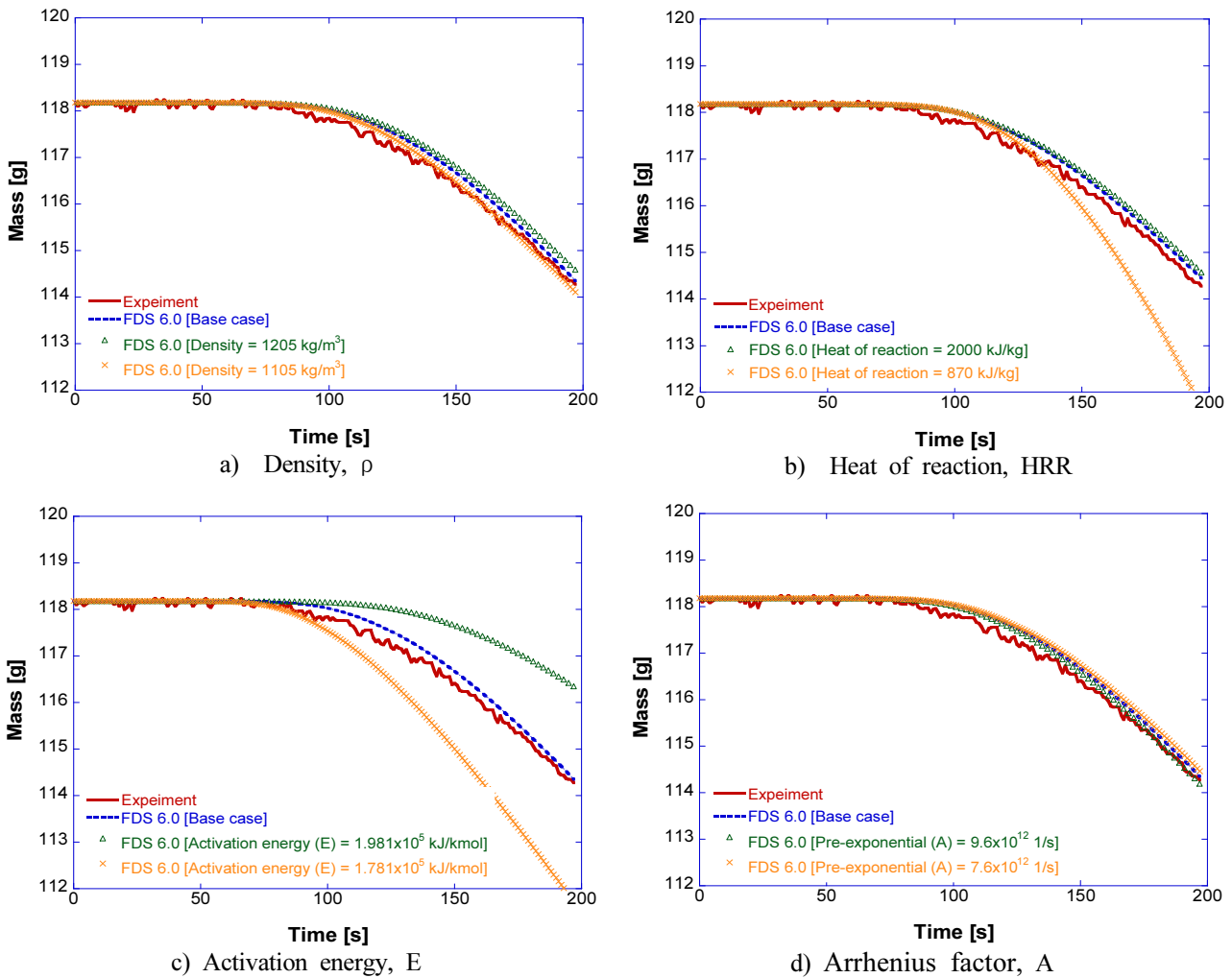


Figure 10. Mass loss variations with input parameters,  $\rho$ , HRR, A and E.

### 4. 결 론

본 연구에서는 KS F ISO 5660-1의 규격을 만족하는 콘 칼로리미터를 이용하여 PMMA 고체 가연물의 열분해 실험을 진행하였다. 열분해 실험을 통해 PMMA의 질량 감소를 측정하였고, 고체 가연물의 열물성치 및 열분해물성의 변화가 열분해 특성에 미치는 영향을 고찰해 보기 위해서 FDS 1차원 열분해 모델의 질량 감소 계산결과와 비교·분석해 보았다. FDS 열분해 모델에 PMMA의 열물성치와 열분해 물성치를 변수로 입력하여 계산된 질량 감소를 콘 칼로리미터 실험을 통해 측정된 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) FDS의 열분해 모델의 대표적인 입력 변수인 고체 가연물의 열전도계수와 비열을 상온의 상수 값으로 입력한 경우 가연물의 질량 감소의 예측에 있어 상당한 오차를 유발할 수 있으며, 문헌에 보고된 온도 함수로 입력하는 것이 바람직하다.

(2) 문헌에 보고된 PMMA의 열전도계수는 유리 천이점을 기준으로 값이 상승하는 경향과 감소하는 경향으로 대비되

며, 본 연구에서 콘칼리미터 실험에 사용한 PMMA 샘플의 경우 유리 천이점을 기준으로 열전도계수가 감소하는 값을 온도 함수로 입력하는 경우 질량 감소를 잘 예측하였다.

(3) 아울러, FDS 열분해 모델에 열전도계수와 비열을 온도의 함수로 입력할 수 없는 경우, 자연 발화(발화) 온도에서 측정된 물성치를 입력하는 것이 질량 감소를 정확히 예측하는 데 도움이 된다.

(4) FDS 열분해 모델의 계산에 또 다른 입력인자인 밀도와 Arrhenius 상수의 증감은 비교적 질량 감소를 예측에 데 큰 영향을 미치지 않았지만, 활성화 에너지와 반응열의 증감은 가연물의 질량 감소를 계산하는 데 큰 영향을 미치므로 선택에 주의를 기울여야할 것으로 판단된다.

### 후 기

본 연구는 국민안전처 소방안전 및 119 구조·구급기술 연구개발사업(MPSS-소방안전-2015-66)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## References

1. B. T. Rhodes and J. G. Quintiere, "Burning Rate and Flame Heat Flux for PMMA in a Cone Calorimeter", *Fire Safety Journal*, Vol. 26, No. 3, pp. 221-240 (1996).
2. G. T. Linteris, "Numerical Simulations of Polymer Pyrolysis Rate: Effect of Property Variations", *Fire and Materials*, Vol. 35, No. 7, pp. 463-480 (2011).
3. S. H. Lee, "Material Property Estimation Method Using a Thermoplastic Pyrolysis Model", Worcester Polytechnic Institute, Masters Thesis (2006).
4. E. Y. Park and D. S. Park, "Combustion Characteristics of Car Components Using Cone-Calorimeter", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 25, No. 3, pp. 237-247 (2009).
5. J. Li and S. I. Stoliarov, "Measurement of Kinetics and Thermodynamics of the Thermal Degradation for Non-Charring Polymers", *Combustion and Flame*, Vol. 160, No. 7, pp. 1287-1287 (2013).
6. K. T. Korver, "A Generalized Model for Wall Flame Heat Flux During Upward Flame Spread on Polymers", Department of Fire Protection Engineering, University of Maryland, Masters Thesis (2015).
7. R. B. Stephens, G. S. Cieloszyk and G. L. Salinger, "Thermal Conductivity and Specific Heat of Non-Crystalline Solids: Polystyrene and Polymethyl Methacrylate", *Physics Letters A*, Vol. 38A, No. 3, pp. 215-217 (1972).
8. T. Steinhaus, "Evaluation of the Thermophysical Properties of Poly (Methyl Methacrylate): A Reference Material for The Development of a Flammability Test for Micro-Gravity Environments", University of Maryland, Masters Thesis (1999).
9. S. I. Stoliarov, S. Crowley, R. E. Lyon and G. T. Linteris, "Prediction of the burning rates of non-charring polymers", *Combustion and Flame*, Vol. 158, No. 5, pp. 1068-1083, (2009).