

혼합 액체 연료의 화학반응 인자 계측에 관한 실험적 연구

최효현* · 임준석* · 김철진* · 손재훈***

An Experimental Study on Measurement of Chemical Kinetic Parameters of a Liquid Fuel with Various Components

Hyo-Hyun Choi, Jun-Seok Lim, Chul-Jin Kim and Chae Hoon Sohn

ABSTRACT

Thermal analyses are conducted to measure chemical kinetic parameters of an unknown liquid fuel with various components. Thermal Analyses are divided into two different methods such as TGA(Thermo-Gravimetric Analysis) and DSC(Differential Scanning Calorimetry). Non-isothermal experimental results are analyzed by adopting TGA and they are filtered by Freeman-Carroll method. As a results of the analysis, chemical parameters of the activation temperature and the reaction order are measured to be 6128.2 K and 1.4, respectively. Furthermore, the chemical kinetic parameters are obtained by a variety of mathematical processing methods. It has been found that they show a little difference depending on the processing method.

Key Words : Thermo-Gravimetric analysis, Differential scanning calorimetry, Activation temperature, Reaction order

1. 서론

로켓 엔진이나 가스터빈 엔진 등에 사용되는 연료는 일반적으로 탄화수소계의 액체 연료로서 단일 성분이 아닌 여러 성분으로 구성된 혼합물이다[1]. 따라서 연소실에 사용되는 연료의 화학적 특성에 따라 추진기관의 연소 성능과 안정성이 좌우된다.

연료의 화학반응을 모사하기 위해서 상세 화학반응 기구를 사용하는 것이 권장된다. 상세 화학반응 기구에는 보통 수십에서 수천가지의 개별 화학반응 단계식이 포함되고[2], 각 식에 대한 화학반응 인자(chemical kinetic parameter)가 알려져 있어야 한다. 화학적 특성을 나타내는 대표적인 인자는 활성화 에너지(activation energy), 빈도인자(frequency factor or pre-exponential factor), 반응 차수(reaction order)이다.

상세 화학반응이 알려져 있지 않은 경우에는 부득이 총체적인 일단계 화학반응식을 사용한다. 일단계 반응은 화염 구조나 중간 생성물의 농도를 정확히 예측하기에는 적합하지 않다. 그러나, 전체적인 연소 특성을 파악하는 용도로 여전히 많이 사용되고 있다. 일단계 반응식을 이용하여 연료의 점화/연소 수

치해석을 하기 위해서는 먼저 일단계 반응에 적합한 활성화 에너지, 빈도인자, 반응 차수를 구해야 한다[3].

본 연구에서는 여러 성분으로 구성된 액체 연료의 화학반응 인자들의 값을 측정하고자 한다. 활성화 온도와 반응 차수를 계산하기 위해 다양한 데이터 처리 방법을 사용하였다. 또한, 구성 성분이 알려져 있지 않은 액체 연료를 시험 분석하여, 액체 연료의 혼합물로서의 물리적 특성을 파악하였다.

2. 열 분석

본 연구에서 연구 대상으로 삼은 액체 연료는 미지의 혼합 액체로서 구성성분이 정확하게 알려지지 않은 물질이다. 액체의 열적 특성이 명확하지 않고, 문헌에도 나타나 있지 않기 때문에 본 액체 연료의 연소 특성을 파악하기 위한 수치해석과 실험을 수행하는데 큰 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 혼합 액체 연료의 성분분석 및 기초 데이터를 획득하기 위하여 열중량 분석법(Thermo-Gravimetric Analysis, 줄여서 TGA) 및 시차주사열량 측정법(Differential Scanning Calorimetry, 줄여서 DSC)을 활용하였다.

이러한 열분석 장치는 크게 변환기(transducer), 기록기(recorder), 온도조절기(temperature controller)로

* 세종대학교 대학원 기계공학과

** 세종대학교 기계항공우주공학부

† 연락처자, chsohn@sejong.ac.kr

구성되어 있으며, 실험 방법에 대해서는 기존 연구 자료에 상세히 기술되어 있다[4]. 열분석을 통해 혼합액체에 대한 무게 변화로 인한 열유동의 변화 상태를 분석하고, 그때의 혼합물 구성 성분의 특성을 분석하였다. 또한 열중량 분석법을 통해 활성화 온도와 반응차수 및 빈도 인자를 획득하였다.

3. 열중량 분석 이론 및 적용 결과

본 연구에서 사용된 시험 분석 방법인 TGA는, 열 분석 중에서 고분자를 포함한 유기물질 및 무기 물질의 온도 변화에 따른 무게 변화를 측정하여 분석하는 방법이다. 열에 의한 변화는 흡착과 탈착 반응, 승화, 기화, 산화, 환원, 분해 등과 같은 열 변화에 의해서만 무게 변화가 일어나기 때문에 열중량 분석법이 유용한 방법으로 적용될 수 있다. 이러한 TGA를 이용한 열 중량 실험법을 분류하면, 고정된 온도에서 수행하는 등온 실험법(isothermal experiment)과 실험온도 범위를 정한 후 승온 속도를 일정하게 유지하여 설정된 온도까지 상승시키는 비등온 실험법(non-isothermal experiment)으로 나눌 수 있다. 이로부터 얻은 실험 결과 값을 미분법과 적분법이라는 수학적 방법을 통해 후처리하여, 열분해 과정에서 일어나는 반응 상수, 빈도 인자 및 활성화 에너지 값을 구할 수 있다. 후처리 방법인 미분법에는 Kissinger[5], Freeman-Carroll[6], Chatterjee-Conrad[7], Furross[8], Anderson[9], Friedman[10] 등이 제시한 방법이 있고, 적분법에는 Flynn-wall[11], Ozawa[12], Doyle[13], Coats-Redfern[14] 등이 제시한 방법이 있다.

본 연구에서는 TGA 분석을 통해 얻은 결과를 이용하여 Freeman-Carroll이 제시한 미분법의 후처리 방법을 이용하여 화학반응 인자(활성화 온도, 반응차수, 빈도 인자)값을 구하고자 한다. 또한 다른 다양한 수학적 처리 방법에 따라 구한 인자 값들을 서로 비교하였다. 선행 연구 결과로부터, 이러한 열중량 분석에 의해 특정 물질($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)에 대한 화학반응 인자를 측정할 사례 및 처리 방법의 타당성을 찾아볼 수 있다[12].

Fig. 1은 연구 대상 액체 연료의 TGA 분석을 수행한 두 가지 결과로서 온도에 따른 오일의 무게 변화를 나타낸다. 첫 번째 실험에서는 1.5 bar의 정압을 유지하고, 온도 범위, 40~300°C에서 30°C씩 그리고 300~500°C에서 10°C씩 온도를 상승시키며 실험하였다. 초기 오일량은 8.335 mg이며, purge gas로는 공기를 이용하였다. 두 번째 실험에서는 오일의 온도 범위, 20~800°C에서 20°C씩 온도를 올라가며 도범을 수행하였고, 초기 오일량은 15.443 mg, purge gas로는 N_2 를 주입하였다. 두 곡선 모두 어느 적정 온도에서 오일의 양이 급격히 감소함을 볼 수 있다. purge

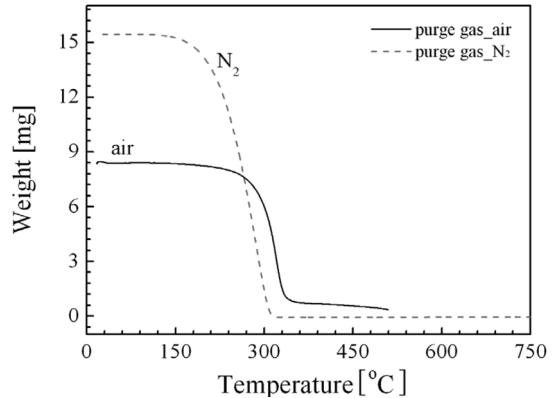


Fig. 1. Oil weight as a function of temperature from TGA.

gas에서 공기인 경우보다 N_2 인 경우, 오일양의 급격. 두로 관찰되는 온도에서 더 낮음을 알 수 있다. 이는 N_2 로 purge할 경우에는 화학반응이 없지만, 공기로 purge했을 경우에는 화학반응이 발생하므로, 공기 주입시 온도가 더 급격히 상승하기 때문에 발생하는 현상이다.

열 무게 측정 곡선으로부터 반응 속도를 구하는 방법에서는 식 (1)의 속도식을 이용한다[15].

$$\beta \frac{dx}{dT} = kf(x) \quad (1)$$

여기에서 x 는 반응하는 시료의 무게, k 는 반응율 상수(reaction-rate constant, 비율 속도함수)이고, $f(x)$ 는 반응 모델 함수(reaction model function)로서 $(1-x)^n$ 로 가정한다. β 는 승온 속도로서 온도의 시간 변화율, 즉 dT/dt 를 나타낸다. 반응율 상수, k 는 Arrhenius 형태로 다음의 식 (2)와 같이 표현된다.

$$k = Ae^{-E/RT} \quad (2)$$

여기서 A 는 빈도인자, E 는 활성화 에너지, R 은 일반 기체상수이다. 무게감량, w 에 대한 반응 시료의 무게, x 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$-dx = \frac{m_0}{w_\infty} dw \quad (3)$$

여기서 m_0 는 시료의 초기 양이고, w_∞ 는 최고 무게감량이다. 이 식의 좌변을 m_0 부터 x 까지 적분하고 우변을 0으로부터 w 까지 적분하면 다음의 식 (4)가 얻어진다.

$$x = \frac{m_0}{w_\infty} (w_\infty - w) \quad (4)$$

식 (2), (4)를 식 (1)에 대입하고 대수방정식으로 나타낸 후 미분하면 반응차수, n 을 계산할 수 있는 다음의 식 (5)가 얻어진다.

$$\frac{\Delta \log(dw/dt)}{\Delta \log(w_\infty - w)} = n - \frac{E}{2.3R} \frac{\Delta(1/T)}{\Delta \log(w_\infty - w)} \quad (5)$$

식 (5)는 Freeman-Carroll의 방법으로 비등온 실험 결과의 해석에 가장 널리 이용되는 식으로 반응차수 값, n 과 활성화 에너지 값, E 를 계산할 수 있다. 계산된 반응차수, n 값은 1.4이고, 활성화 온도, E/R 은 6128.2 K이다.

Chatterjee-Conrad법은 대표적인 미분법으로, 식 (1)의 양변을 $f(x)$ 로 나눈 다음에 자연로그를 취하면 다음의 식 (6)이 얻어진다.

$$\ln \left\{ \frac{\beta dx/dT}{f(x)} \right\} = \ln A - \left(\frac{E}{R} \right) \frac{1}{T} \quad (6)$$

식 (6)을 통해 $1/T$ 에 대한 $\ln \left\{ \frac{\beta dx/dT}{f(x)} \right\}$ 의 직선의 기울기는 $-E/R$, 절편은 $\ln A$ 에 해당 하므로, E 와 A 를 결정할 수 있다. Fig. 2는, Chatterjee-Conrad법의 식 (6)을 이용하여 활성화 온도를 구하기 위한 그림이다. 이때, 기울기로 구한 활성화 온도는 8137.1 K이며, 절편으로 얻어진 빈도 인자의 값은 5.4×10^3 이다.

미분법 중 또 다른 한 방법인 Friedman법은 비등온 실험 결과 해석에 가장 널리 쓰이는 방법으로 전환율 함수(반응 모델 함수)를 모르는 상태에서 E 값을 구할 수 있다. 그러므로 단일 반응의 경우 E 값의

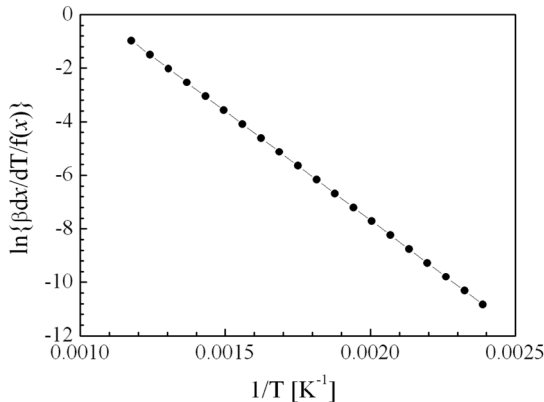


Fig. 2. Experimental data processed by the Chatterjee-Conrad's Method.

신뢰도가 높은 것으로 알려져 있다. 하지만 E 값만을 구할 수 있다는 한계를 지니고 있다[9].

Coats-Redfern 방법은 적분법의 한가지 방법으로서, 적분법 역시 미분법과 마찬가지로 전환율 함수를 결정해야하는 한계를 지니고 있다. Coats-Redfern 방법에서는 식 (1)로부터 식 (7)과 같은 적분식을 구성하여 E, A 를 결정할 수 있다[14].

$$g(x) = \int_0^x \frac{dx}{f(x)} \quad (7)$$

$$= \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) dT = \frac{AE}{\beta R} P(u)$$

여기서 u 는 E/RT 이고, $P(u)$ 는 다음의 식 (8)과 같이 정의된다.

$$P(u) = - \int_{\infty}^u \frac{\exp(-u)}{u^2} du \quad (8)$$

식 (8)의 적분 해석해가 없기 때문에 어떠한 근사치를 사용하느냐에 따라 다양한 적분법이 소개 되었으며, 여기서는 $P(u)$ 의 근사표현으로 다음의 식 (9)를 사용하였다.

$$P(u) \approx \left(1 - \frac{2}{u}\right) \frac{\exp(-u)}{u^2} \quad (9)$$

식 (9)를 식 (7)에 대입하고 자연로그를 취하면 다음의 식 (10)과 같은 대수식이 완성된다.

$$\ln g(x) = \ln \left\{ \frac{AR}{\beta E} \left(1 - \frac{2RT}{E}\right) \right\} - \left(\frac{E}{R} \right) \frac{1}{T} \quad (10)$$

다음으로, 반응차수를 가정한 후 식 (11)의 관계 식으로부터 여러 변수를 구한다. 다음의 식 (11)은 반응차수를 1로 가정하여 얻은 식이다.

$$\ln \left\{ \frac{-\ln(1-x)}{T^2} \right\} \quad (11)$$

$$= \ln \left\{ \frac{AR}{\beta E} \left(1 - \frac{2RT}{E}\right) \right\} - \left(\frac{E}{R} \right) \frac{1}{T}$$

$$\ln \left\{ \frac{1 - (1-x)^{1-n}}{T^2} \right\} \quad (12)$$

$$= \ln \left\{ \frac{AR}{\beta E} \left(1 - \frac{2RT}{E}\right) \right\} - \left(\frac{E}{R} \right) \frac{1}{T}$$

Coats-Redfern법을 이용하여 식 (11)을 도시하여 얻은 결과는 Fig. 3과 같다. 기울기로부터 활성화 에

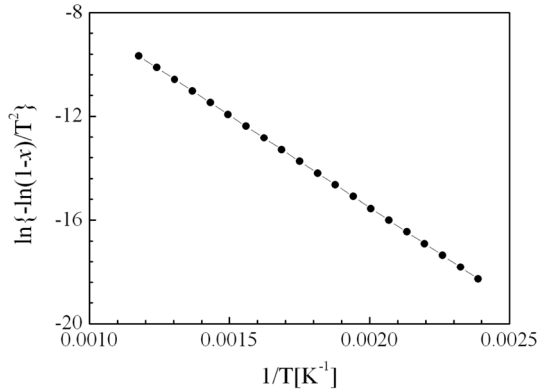


Fig. 3. Application of Coats-Redfern's Method to Experimental Data.

너지를 구한다. 반응차수를 1로 가정하여 얻은 활성화 온도는 7098.2 K이다. 또한 반응차수가 $n \neq 1$ 인 경우에는 다음의 식 (12)를 이용하여 여러 변수를 구할 수 있다. 식 (12)를 이용하여 n 값을 (1.4)로 가정한 경우에 구한 활성화 온도 값은 8493.3 K이다.

또한 DTG(Derivative Thermogravimetry) 곡선의 최대분해 속도인 극점에서의 세 특성 값인 극점 온도, 극점 높이, 극점 전환율을 이용하여 화학반응인자를 결정하는 방법인 PPM(Peak Property Method)이 있다 [16]. DTG 곡선의 극점에서, 미분값은 0이며, 온도는 T_m 이다. 이를 화학반응 인자로 나타낸 수식으로 정리하면 식 (13)과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{E}{nRT_m^2(1-x_m)^{1-n}} = \frac{A}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT_m}\right) \quad (13)$$

Fig. 4에, PPM 방법을 적용하기 위해 필요한 세 가지 특성 값인 H_m , T_m , x_m 을 나타내었다. 이것을 이용하여 반응차수, 활성화 에너지 등을 구할 수 있다. H_m 은 최대 분해 속도(즉, 극점)에서의 피크 높이(H_m , peak height)를 나타내며, 극점에서의 dx/dt 을 의미한다. T_m 은 피크 온도(T_m , peak temperature), x_m 은 최대 분해 속도에서의 전환율(x_m , conversion rate at peak temperature)을 나타낸다. H_m 은 식 (1)을 통해 식 (14)과 같이 표현 될 수 있다.

$$H_m = \frac{A}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT_m}\right) (1-x_m)^n \quad (14)$$

E , A 와 세 특성치 값, H_m , T_m , x_m 의 관계를 식 (13), (14)를 통해 구하여 식 (15), (16)에 나타내었다. 이를 통해 활성화 온도 및 빈도 지수를 구할 수 있지만, 반응 차수를 구하기 위해서는 몇 가지 식을 개발하거나 식 (15), (16)의 식을 통해 관계식을 더 찾아내

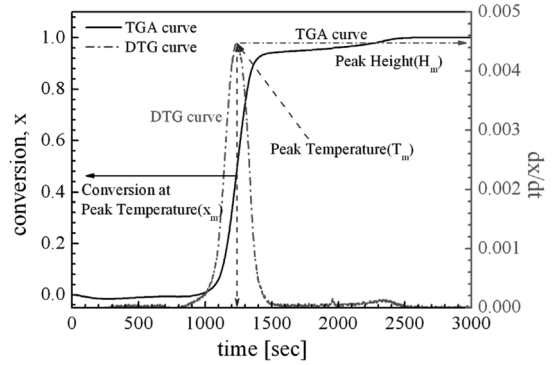


Fig. 4. Three peak properties of DTG.

야만 한다. 따라서 반응 차수를 구하기 위해 최대 분해 속도에서의 전환율을 식 (17)과 같이 도입하였다.

$$E = \frac{nRT_m^2 H_m}{(1-x_m)} \quad (15)$$

$$A = \frac{H_m \beta \exp\left(\frac{E}{RT_m}\right)}{(1-x_m)^n} \quad (16)$$

$$x_m \approx 1 - \left\{1 - \left(\frac{n-1}{n}\right) \phi_a\right\}^{1/(n-1)} \quad (17)$$

$$\phi_m = \frac{P(u_m)}{[\exp(-u_m)/u_m^2]} \quad (18)$$

식 (17)에서 ϕ_a 는 ϕ_m 의 평균값을 나타낸다. ϕ_m 은 반응 차수를 결정하기 위해 도입된 전환율 계수(conversion factor)로 식 (18)과 같이 표현된다. 식 (18)에서 $P(u_m)$ 은 다음의 식 (19)로 정의된다.

$$P(u_m) = - \int_{\infty}^{u_m} \frac{\exp(-u)}{u^2} du \quad (19)$$

식 (17)과 식 (18)에서 ϕ_m , x_m 은 다음과 같은 관계를 가지고 있다[10].

$$\begin{aligned} x_m &= 1 - \left\{1 + (n-1) \left(\frac{AE}{\beta R}\right) P(u_m)\right\}^{1/(1-n)} \\ &= 1 - \left\{1 - \left(\frac{n-1}{n}\right) \phi_m\right\}^{1/(n-1)} \end{aligned} \quad (20)$$

본 연구에서 혼합액체 연료에 대해 측정된 데이터로부터 Fig. 4와 같은 결과를 얻었다. 이로부터 피크온도는 312 K, 피크높이 0.00448, 극점 전환율

Table 1. Kinetic parameters calculated by various analysis methods

Method	E/R(K)	n	A
Freeman carroll	6128.2	1.4	2.5E+4
Coats Redfern	7098.2	(1)	4.7E+2
	8493.3	(1.4)	7.1E+3
	11125.1	(2.137)	1.2E+6
PPM	6054	2.137	1.1E+6
Chatterjee Conrad	8137.1	(1)	5.4E+3
Friedman	5150.8	-	-

0.45854, $\beta=0.24986$ 의 값을 얻을 수 있다. 식 (15), (16)를 통해 얻은 활성화 에너지 값은 6054 K이며, 빈도 인자로 1.1×10^6 의 값을 얻었다. 또한 반응차수 n은 2.137로 측정되었다.

그 외 다양한 수학적인 후처리 방법을 통해 구한 혼합 액체 연료의 활성화 에너지 및 반응차수 값을 정리하여 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 괄호안의 수치는 가정한 값을 의미한다. 이로부터 후처리 방법에 따라 화학반응 인자의 여러 가지 조합이 가능함을 알 수 있다.

4. 시차주사열량 측정 이론 및 결과

열중량 분석법(TGA)과 함께 추가적으로 시차주사열량 측정법(DSC, Differential scanning calorimetry)을 이용하여 시료를 분석하고 두 결과를 비교 분석하였다.

DSC는 시차열분석(DTA, Differential Thermal Analysis) 방법을 응용한 것이다. DTA에서는 시료와 열적으로 안정한 표준물질을 동시에 가열했을 때 양쪽의 물질 간 온도차를 시간 혹은 온도의 함수로 측정한다[17]. 이와 같은 시차열분석을 열중량 분석과 병용하면 가열에 따른 질량의 감소가 발열 반응인지 흡열 반응인지를 알 수 있다.

이를 응용하여 DSC는 시료와 표준물질을 동시에 가열해서 온도차가 생긴 경우, 그 온도차를 없애기 위해 필요한 에너지를 시간 혹은 온도의 함수로 측정하여 기록하는 방법이다. 여기서 에너지는 전기적 에너지 혹은 열을 의미한다.

DSC의 피크면적은 발열량(또는 흡열량)에 비례하므로 아래 식에 따라 반응열을 정량화할 수 있다.

$$M \cdot \Delta H = K \cdot A \tag{21}$$

여기서 M은 시료의 질량, ΔH 는 시료의 단위 질량당의 에너지변화량, K는 장치상수, A는 피크면적을 의미한다. 여기서, 피크면적은 Fig. 5의 DSC 곡선(heat

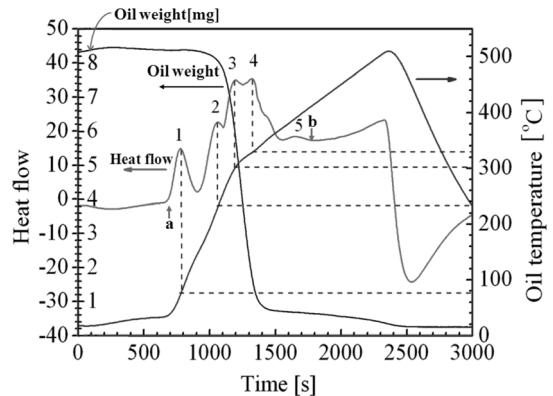


Fig. 5. Results from TGA and DSC.

flow 곡선)을 a부터 b구간까지 적분한 면적을 의미한다. M과 ΔH 값을 알고 있는 시료에 대해, 이와 같이 계산된 피크면적을 위 식(6)에 대입하여 장치 상수를 구한다. 그리고, 미지 시료의 피크면적을 측정하여 위 식에 대입하면 ΔH 를 구할 수 있고 이로부터 heat flow를 얻는다.

Fig. 5는 DSC 분석 결과로써 혼합액체 연료를 가열하는 과정에서 온도에 따른 heat flow 곡선을 나타낸 그래프이다. 각 peak 점에서 온도가 각각 71°C, 233°C, 302°C, 328°C, 388°C이다. 이 그림에서 peak 1~5에서 나타나는 반응은 흡열반응이다.

DSC 분석 결과로부터 혼합 액체는 총 5가지 성분 (peak의 개수와 일치함)으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 추가로 액체오일의 온도 변화에 따른 중량변화, 기체오일의 산화반응으로 인한 열유속(heat flow), 액체연료의 온도 변화를 알 수 있다.

성분 1, 2는 끓는점이 낮으며, peak 시점에서 오일 양 변화가 없어, 미약하게 증발하는 것으로 볼 수 있다. 다음 성분 3, 4는 증발하면서 오일 양의 급격한 감소를 야기하며, 그때 오일의 열적 변화를 일으키고, 오일의 열유속(heat flow) 역시 크게 변화하였다. 이때 발생하는 급격한 오일 양 변화로부터 자연 발화를 일으키는 온도는 약 300°C라고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 연소기에 사용되는 탄화수소계열의 미지의 혼합 액체 연료의 화학반응 인자를 계측하기 위한 실험을 수행하였다. 열중량 분석법(TGA)을 수행하여 여러 가지 인자의 값을 계측하였고, 가능한 수학적인 후처리 방법을 통해 구한 인자의 값을 서로 비교하였다.

수학적인 후처리 방법에 따라 활성화 온도, 빈도 지수, 반응 차수 값의 차이를 보이며, 이는 화학반응 인자의 여러 가지 조합이 가능함을 의미한다. 이러

한 자료는, 화학반응 인자가 알려져 있지 않은 미지의 연료에 대한 연소 해석에 활용될 수 있을 것이다.

추가적으로 시차주사 열량 측정방법(DSC)을 통해 혼합 액체 연료의 열적 특성(성분의 개수와 증발, 점화특성)을 파악하였다. 열중량 분석뿐만 아니라 DSC 방법으로 활성화 에너지 및 반응 차수를 구할 수 있으므로, 추후 두 방법으로 얻은 값을 비교하여 좀 더 정확한 인자 값을 얻을 수도 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 일부 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0015626).

참고문헌

- [1] Edward, T., "Kerosene fuels for aerospace propulsion - composition and properties", American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002 - 3874, 38th, AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2002
- [2] Turns, S. R., "An Introduction to Combustion Concepts and Applications", 2nd ed. McGRAW-HILL International Editions, 2000
- [3] Westbrook, C. K., Dryer, F. L., "Chemical kinetic modeling of hydrocarbon combustion" Progress in Energy and Combustion Science, 1984, Vol. 10, pp. 1-57
- [4] Haines, P. J., "Principle of Thermal Analysis and Calorimetry", Royal Society of Chemistry, 2002
- [5] Kissinger, H. E., "Reaction kinetics in differential thermal analysis", Analytical Chemistry, 29, 1957, pp. 1702-1706
- [6] Freeman, E. S. and Carroll, B., "The application of thermo-analytical techniques to reaction kinetics. The thermogravimetric evaluation of the kinetics of the decomposition of calcium oxalate monohydrate", Journal of Physical Chemistry, 62, 1958, pp. 394-397
- [7] Chatterjee, P. K. and Conrad, C. M., Journal of Polymer Science, Part 1, 6, 1950, pp. 317
- [8] Fuoss, R. M., Salyer, I. O., and Wilson, H. S., 1964, "Evaluation of rate constants from thermogravimetric data", Journal of Polymer Science, Part A, 2, 3147
- [9] Anderson, D. A. and Freeman, E. S., "The kinetics of the thermal degradation of polystyrene and polyethylene", Journal of Polymer Science, 54, 1961, pp. 253-260
- [10] Friedman, H. L., "Kinetics of thermal degradation of char-forming plastics from thermogravimetry. Application to a phenolic plastic", Journal of Polymer Science, Part C, 6, 1963, pp. 183-195
- [11] Flynn, J. H. and Wall, L. A., "A quick, direct method for the determination of activation energy from thermogravimetric data", Polymer, Letter, 4, 1966, pp. 323-328
- [12] Ozawa, T., "A new method of analyzing thermogravimetric data", Bulletin of the Chemical Society of Japan, 38(11), 1965, pp. 1881-1886
- [13] Doyle, C. D., "Kinetic analysis of thermogravimetric data", Journal of Applied Polymer Science, 6, 1962, pp. 639
- [14] Coats, A. W. and Redfern, J. P., "Kinetic parameters from thermogravimetric data", Journal of Polymer Science, 3, 1965, pp. 917-920
- [15] 신상미, "열방성 액정 고분자의 열분해 거동 및 촉진 열화 시험에 의한 내구성 평가", 한양대학교 대학원 석사학위논문, 2007
- [16] 장은석, 김승도, 신대현, 이경환, "미분중량곡선의 극점 특성치를 이용한 HDPE 열분해 동역학 변수 결정에 대한 연구", Korean Chemical Engineering Research, Vol. 42, No. 3, June, 2004, pp. 280-287
- [17] 신세진, 정의덕, 정영언, "기기분석화학", 형설출판사, 2000

접수일 : 2011. 06. 17
 심사완료일 : 2011. 07. 08