

## 참깨묵의 자연발화온도와 활성화 에너지를 통한 화재 및 폭발의 위험성 평가

변성호\* · 최유정\* · 유두열\* · 김경수\* · 오재근\*\* · 문병선\*\* · 최재욱\*,†

\*부경대학교 소방공학과  
 48513 부산광역시 남구 용소로 45  
 \*\*국립과학수사연구원

26460 강원도 원주시 입춘로 10  
 (2020년 10월 12일 접수, 2020년 12월 10일 수정본 접수, 2021년 1월 13일 채택)

## Assessment of the Risks of Fire and Explosion through the Spontaneous Ignition Temperature and Activation Energy of Sesame Seed Oil Cakes

Sung-Ho Byun\*, Yu-Jung Choi\*, Doo-Yeol Yoo\*, Kyoung-Su Kim\*, Jae-Geun Oh\*\*,  
 Byung-Seon Moon\*\* and Jae-Wook Choi\*,†

\*Department of Fire Protection Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea

\*\*National Forensic Service, 10, Ipchun-ro, Wonju-si, Gangwon-do, 26460, Korea

(Received 12 October 2020; Received in revised from 10 December 2020; Accepted 13 January 2021)

### 요 약

참깨묵은 4류 위험물 중 동식물류로서 기름을 추출하고 생성된 찌꺼기를 보관하는 중에 열이 축적되어 자연발화의 원인에 의해 화재가 발생되고 있다. 참깨묵의 자연발화에 대한 원인을 규명하기 위하여 시료용기의 두께(3 cm, 5 cm, 7 cm 및 14 cm)를 변화시켜 저장량에 따른 자연발화온도를 구한 결과 3 cm의 경우 180 °C, 5 cm의 경우 160 °C, 7 cm의 경우 145 °C, 14 cm의 경우 130 °C를 구하였다. 시료용기의 두께가 두꺼워질수록 발화한계온도는 낮아졌으며, 발화지연시간 및 최고온도에 도달하는 시간이 길어졌다. 또한 발화와 비발화의 평균온도인 발화한계온도에 의한 결보기 활성화 에너지는 97.10 [kJ/mol]로서 참깨묵의 발화특성을 파악하였다.

**Abstract** – Sesame seed oil cakes are classified as the animal or plant origin among the flammable liquids, and the fire occurs due to the spontaneous ignition through the accumulation of heat during the storage of residues after the extraction of sesame oil. In order to elucidate the cause of the spontaneous ignition of sesame seed oil cakes, the thickness (3 cm, 5 cm, 7 cm and 14 cm) of the sample container was varied, and the spontaneous ignition temperature was measured depending on the storage volume. Thus, the spontaneous ignition temperature was measured to be 180 °C at the thickness of 3 cm, 160 °C at 5 cm, 145 °C at 7 cm and 130 °C at 14 cm. As the thickness of the sample container increased, the critical ignition temperature decreased, and the induction time to spontaneous ignition and the time to reach the maximum temperature became longer. Furthermore, the apparent activation energy by the critical ignition temperature, which is the average temperature-of ignition and non-ignition, was 97.10 [kJ/mol]. With these data, ignition characteristics of sesame seed oil cakes were determined.

**Key words:** Sesame seed oil cakes, Thickness, Spontaneous ignition temperatures, Ignition delay time, Apparent activation energy

### 1. 서 론

자연발화는 외부로부터 별도의 열원 없이 물질 자체의 열이 장시간 축적되어 스스로 발열하여 발화에 이르는 현상으로서, 방열보다

축열이 클 때 발생하는 현상이다. 자연발화의 원인으로는 산화열, 분해열, 흡착열, 중합열, 발효열 등 다양한 원인으로 발생하며, 자연발화에 도달하기까지의 소요시간은 몇 시간에서부터 수개월에 이르며, 물질의 상태, 표면적, 수분, 열의 축적 조건 등 발생하는 원인이 다양하기 때문에 원인을 정확하게 파악하기 어렵다[1,2].

소방청에서 제공하는 국가화재정보시스템의 자료에서 2019년의 경우 427건의 자연발화가 발생되었으며 자연발화로 인한 피해가 증가하고 있는 것으로 나타났다[3].

이러한 자연발화 현상은 산업현장 또는 우리가 흔히 접하는 다중

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jwchoi@pknu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

시설에서도 발생되고, 특히, 폭염 조건에서는 화학 반응 속도가 빨라져 발생하는 열이 증가하게 되어 자연발화의 위험성은 더욱 커진다.

국립과학수사연구원(National Forensic Service; NFS)의 자료에 따르면 2018년 9월 폭염에 의해 포대 안에 목공용 광택도료(오일스테인)칠에 사용한 걸레 및 톱밥을 넣어두고 실외에서 방치하여 7시간 만에 자연발화가 발생하였으며, 2018년 7월 P 아파트에서 유리창문을 통해 직사광선에 노출된 라텍스 배개가 열이 축적되어 자연발화가 발생하였다.

또한 2018년 10월 D 화력발전소에서 옥내 저탄장에 보관 중이던 유연탄에서 자연발화가 발생하였으며, 2018년 2월 야적된 상태로 퇴비를 그대로 방치하여 발효열에 의해 자연발화가 발생하였다[4,5].

그 중 기름집이나 사료 또는 비료로 많이 보관하는 참깨묵의 경우에는 4류 위험물로서 식물유 중에 반건성유에 속하여 요오드 값이 100~130이다. 요오드 값은 유지 100 g에 흡수될 수 있는 요오드의 g수로서 요오드 값이 클수록 불포화도가 높기 때문에 자연발화의 위험성이 증가하게 된다. 참깨묵은 약 200 °C 정도의 온도에서 볶은 후 압착 공정을 거쳐 기름을 추출하고 남은 찌꺼기를 높은 온도의 상태로 보관한다. 그러나 이러한 과정에서 발생한 에너지가 그 계로부터 제거되지 않고 축적되어 발화점에 도달하게 됨으로서 화재가 발생되어 인명 및 재산의 피해가 발생되고 있다[6,7].

자연발화에 대한 연구는 국내에서는 Choi 등[8]은 화력발전소의 연료인 우드펠릿의 발화한계온도와 자연발화온도를 통해 걸보기 활성화 에너지를 구함으로써 우드펠릿의 위험성 예측을 파악하였으며, Jung[9]은 들깨묵의 시료 용기 두께 변화에 따라 최소자연발화온도와 발화한계온도를 측정하였다. 국외에서는 Yang 등[10]은 석탄의 장기침수에 따른 자연발화의 영향에 대하여 연구하였다. 이처럼 자연발화에 대한 연구는 계속 진행되고 있으나, 가연성 물질 중 고체 형태의 경우에는 외형, 규격, 구성성분, 입도분포 등 변수에 따라 결과가 다르게 나타내기 때문에 기존의 실험 자료로는 자연발화를 예방하기에 어려운 측면이 많다[11,12].

따라서 본 연구에서는 시료용기의 두께를 3 cm, 5 cm, 7 cm 및 14 cm를 사용하여 참깨묵의 최소 자연발화온도를 측정하고, 걸보기 활성화 에너지를 구하였다. 이를 통하여 참깨묵의 발화특성을 파악하고 참깨묵을 사용하는 사업장의 화재·폭발을 예방하는 기초 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2-1. Frank-Kamenetskii의 열발화 이론[13]

열발화 이론은 가연물의 자연발화 현상을 계 내부에서의 발열과 계 외부로의 방열과의 관계를 이용하여 계의 열적 균형을 설명한 이론이다.

가연성 고체의 자연발화의 경우에는 산소의 확산 및 고체와 기체 간의 열전달을 고려하지 않고 계의 크기 변화와 내부의 온도 관계를 고려하는 Frank-Kamenetskii의 열 발화 이론을 적용할 수 있다. 자연발화는 물질의 열전도도, 밀도, 입자의 크기 및 시료의 저장량 등에 따라서 자연발화 온도가 다르다.

따라서 Fourier의 열전도 방정식에 Arrhenius형 반응식을 조합하고 축대칭 1차원의 형상을 고려해 열전도도가 장소와 온도에 의존하지 않고, 0차 반응으로 보면 식 (1)이 된다.

$$C_p \rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) = K \left( \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{J}{X} \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \sigma Q_s A_0 \exp^{-E/RT} \quad (1)$$

식 (1)을 해석하기 위하여 무차원 변환을 이용하면 무차원 온도  $\theta$ , 무차원 좌표  $\xi$  및 무차원 시간  $\tau_d$ 을 도입한다.

$$\theta \equiv \left( \frac{E}{RT_a} \right) (T - T_a) \quad (2)$$

$$\xi \equiv \frac{X}{a} \quad (0 \leq \xi \leq 1) \quad (3)$$

$$\tau_d \equiv \frac{Kt}{C_p \rho a^2} \quad (4)$$

식 (2) ~ (4)를 이용하여 식 (1)을 풀면 식 (5)와 같이 된다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau_d} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \frac{J}{\xi} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} + \delta \exp(-\theta) \quad (5)$$

여기서  $\delta$ 는 무차원 반응속도(Frank-Kamenetskii의 Parameter)로서 식 (6)과 같다.

$$\delta = \frac{E Q_s a^2 \sigma A_0 \exp^{-E/RT_a}}{K R T_a^2} \quad (6)$$

식 (6)을 정리하고 자연로그를 취하면 (7)식과 같이 된다.

$$\ln \frac{\delta_c T_c^2}{\sigma a^2} = -\frac{E}{R T_c} + \ln \frac{Q_s A_0 E}{K R} \quad (7)$$

## 3. 실험장치 및 실험방법

### 3-1. 실험시료

본 실험에 사용된 시료는 J회사에서 수입한 중국산 100%로서 참깨에서 기름을 짜고 남은 찌꺼기인 참깨묵을 사용하였다. 시료의 비체적은 2.638 cm<sup>3</sup>/g이고 입도는 1680~1190 μm으로 측정되었다.

참깨묵의 중량 감소 및 발열현상을 파악하기 위하여 TG-DTA (Perkin Elmer제 model TGA7)를 사용하여 실험을 행하였다[14].

질소의 기류 하에서 승온속도는 5 °C/min으로 변화시켜 50~900 °C 까지 측정한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. TGA에서 200~400 °C 사이에서 60% 정도의 중량 감소는 참기름의 기화에 의해서 나타나고 있으며, DTA의 발열 peak는 참기름의 기화와 연소에 의한 것으로 사료된다.

### 3-2. 실험장치[15]

본 연구에서 사용한 실험장치는 Fig. 2로서 항온조, 열전대, 온도 제어장치, 기록장치 및 시료용기로 구성되어 있다.

항온조는 높이, 길이, 폭이 각각 30 cm로 내용적 27 l인 열의 확산이 빠르고 균일한 온도 분포를 유지 할 수 있는 열풍 순환식 항온조를 사용하였다. 항온조의 가열히터는 1.5 kW 5개를 설치하였으며, 내부의 공기는 Ø10 cm인 Sirocco fan을 부착하여 강제 순환시켰다. 항온조 상부의 배기구에는 릴레이 스위치의 작동에 의해 설정온도보다 내부온도가 높을 때 팬이 자동으로 작동되게 하였다.

열전대는 주위 온도의 측정용과 시료의 중심 온도 측정용을 사용하였다. 주위온도의 제어 및 측정용 열전대는 시료용기와 항온조 벽면의 중심에 설치하였으며, 시료 중심의 온도 측정용 열전대는

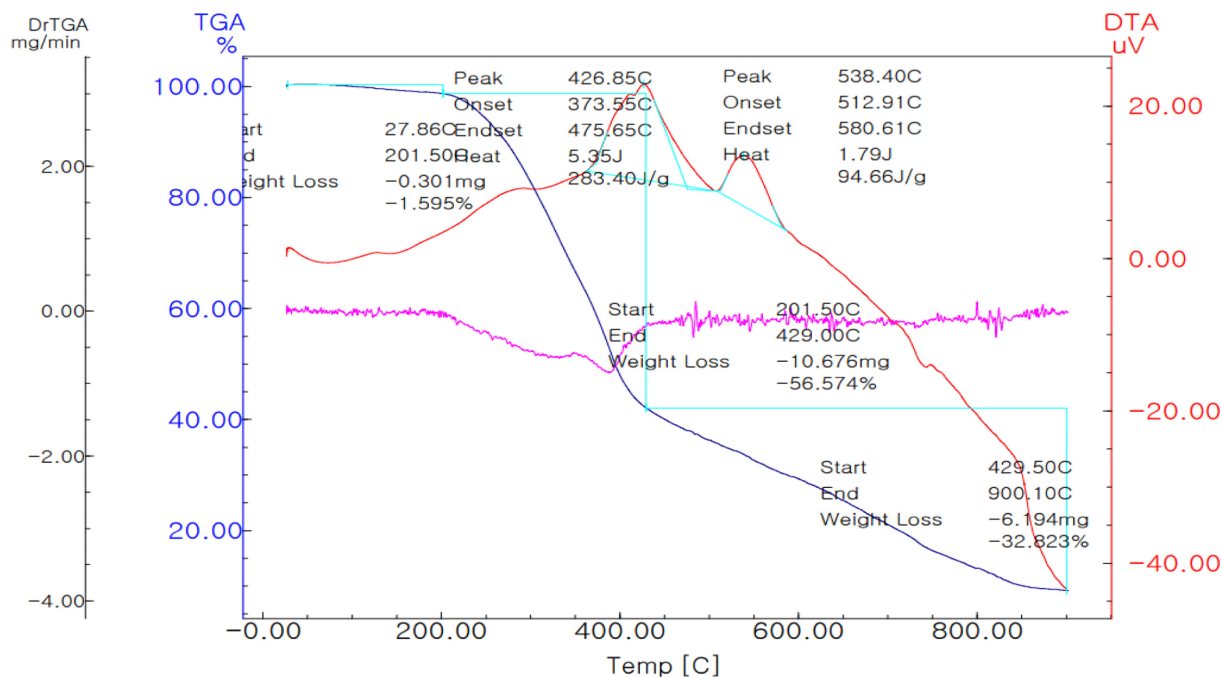


Fig. 1. TG-DTA analysis of sesame seed oil cakes.

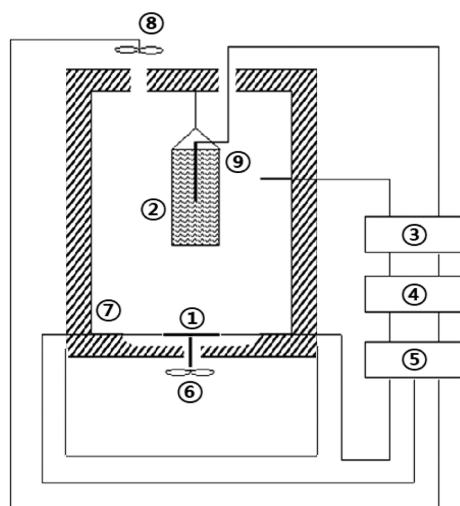


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus for spontaneous ignition temperature measurement.

1. Electric furnace
2. Sample
3. Program controller
4. Temperature recorder
5. Relay switch
6. Sirocco fan
7. Heater
8. Fan
9. Chromel-alumel thermocouple

시료용기의 중심에 직경 0.35 mm인 2조의 Chromel-Alumel 열전대를 설치하였다.

온도제어장치는 제조사 Konics의 EC-5600을 사용 하였으며, 기록장치는 제조사 Yoko gawa의 model 4151로서 시료 중심온도 및 설정온도를 팬형 기록계를 사용하여 연속적으로 기록하도록 하였다.

시료용기는 무한평판에 접근하도록 형상을 입방체로 하였으며, 앞면과 뒷면에는 300 mesh인 스테인리스 망으로 설치하였다. 또한 그 외의 부분은 약 1 cm의 석고판으로 단열시켜 열전달이 일차원 방향으로 되게 하였다.

시료용기는 높이가 20 cm, 길이 20 cm, 두께가 3 cm인 Small 용기와 두께가 5 cm인 Intermediate 용기, 폭이 7 cm인 Large용기 및 두께가 14 cm인 Extra large용기를 사용하였다.

### 3-3. 실험방법 [16]

항온조는 온도제어장치를 이용하여 실험하고자 하는 온도로 설정하고, 항온조의 중심에 참깨묵을 넣은 시료용기를 넣고 중심 온도 측정용 열전대를 시료의 용기 중심에 삽입하여 온도 변화를 관찰하였다.

깨묵의 발화와 비발화의 판정은 동일한 온도에서 3개 이상의 실험으로 시료의 중심온도의 변화와 실험 종료 후 실험물질의 색깔 변화를 확인하여 결정하였다.

실험을 동일조건에서 반복하여 시료가 발화한 최저온도와 시료가 비발화한 최고온도의 평균온도를 발화한계온도로 하여 이를 활성화 에너지를 구하는데 이용하였다. 또한 발화와 비발화의 온도 차이가 5 °C일 때 실험을 종료하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4-1. 용기의 두께에 따른 자연발화온도

#### 4-1-1. 시료용기가 3 cm일 경우

시료 용기의 두께가 3 cm일 때 사용된 시료의 양은 0.42 kg을 충전하여 자연발화온도를 구하였다. Fig. 3은 175 °C에서 비발화된 온도의 상태를 나타내었으며, Fig. 4는 180 °C에서 발화된 형상을 나타내었다.

Fig. 3은 실험시작 후 약 1시간 12분경에 설정온도인 175 °C에 도달하였으나, 50시간 이상 경과하여도 발화되지 않았으며, 설정온도보다 약 10 °C 높게 나타났다.

Fig. 4는 1시간 18분경에 설정온도인 180 °C에 도달하였으며, 3시간 6분에 최고발화온도 242 °C를 기록하였으며, 시간이 경과함에

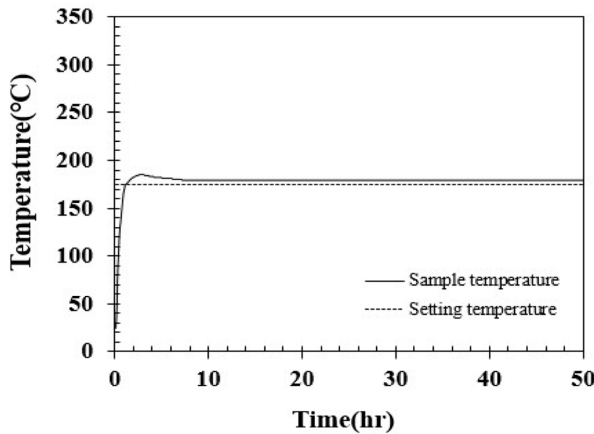


Fig. 3. Relation between time and temperature for sesame seed oil cakes in 3 cm vessel (at 175 °C).

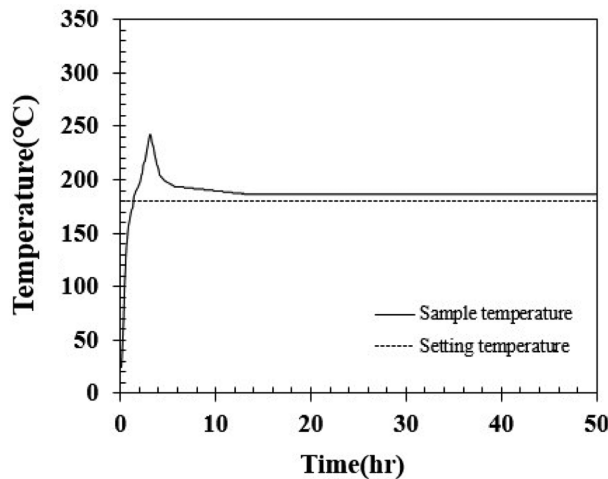


Fig. 4. Relation between time and temperature for sesame seed oil cakes in 3 cm vessel (at 180 °C).

따라 온도가 더 이상 상승하지 않고 온도가 서서히 하강하는 것을 확인하였다.

자연발화는 발열속도가 방열속도보다 클 때 발화되므로 175 °C에서 비발화한 것은 발열속도보다 방열속도가 더 빠르기 때문에 발화되지 않았으며 축열에 의한 자기 가열만으로 인해 설정온도보다 약 10 °C 높게 나타난 것으로 사료된다.

따라서 용기의 두께가 3 cm일 경우 참깨묵의 발화온도인 180 °C와 비발화한 온도 175 °C의 평균온도인 발화한계온도 177.5 °C를 구하였다.

#### 4-1-2. 시료용기가 5 cm일 경우

시료 용기의 두께가 5 cm일 때 사용된 참깨묵의 양은 0.70 kg로서 Fig. 5와 Fig. 6은 각각 155 °C와 160 °C에서 비발화 및 발화된 것을 나타내었다.

Fig. 5는 3시간 42분에 설정온도인 155 °C에 도달하였으나 15시간 이후부터는 설정온도보다 약 7 °C 높은 상태로 일정하게 유지함으로서 비발화 되었다.

Fig. 6은 3시간 24분에 설정온도에 도달하였으며, 발화로 인하여 온도가 서서히 상승하다가 9시간 경에 급속히 온도가 상승하여 10

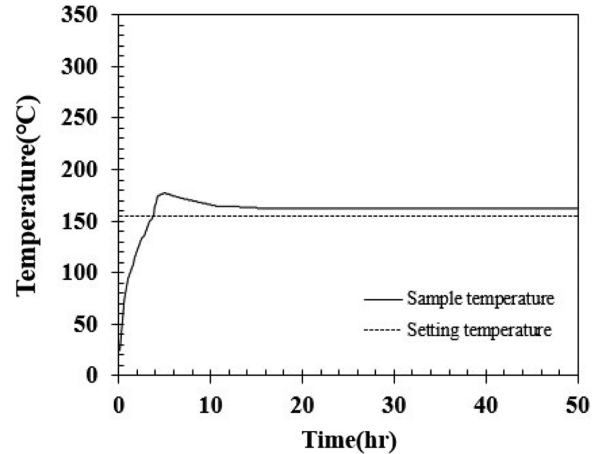


Fig. 5. Relation between time and temperature for sesame seed oil cakes in 5 cm vessel (at 155 °C).

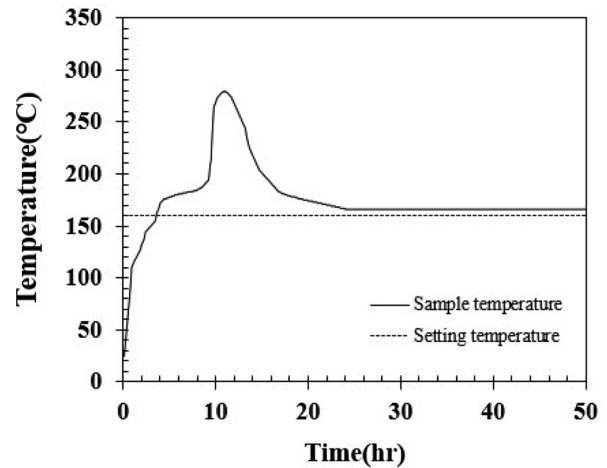


Fig. 6. Relation between time and temperature for sesame seed oil cakes in 5 cm vessel (at 160 °C).

시간 54분에 최고온도인 280 °C를 기록하였으며 시간이 경과함에 따라 온도가 하강하여 설정온도에 도달하였다.

따라서 발화된 온도 155 °C와 비발화된 온도 160 °C의 평균값인 157.5 °C의 발화한계온도를 구하였다.

#### 4-1-3. 시료용기가 7 cm일 경우

시료 용기의 두께가 7 cm일 때 사용된 참깨묵의 양은 1.01 kg이며, Fig. 7은 140 °C에서 비발화된 것을 나타냈으며, Fig. 8은 145 °C에서 발화된 것을 나타내었다.

Fig. 7은 5시간 48분에 설정온도에 도달하였으나 비발화 되었으며, Fig. 8은 5시간 30분에 설정온도에 도달하여 발화되어 19시간 24분 312 °C에서 최고온도를 기록하였다.

따라서 시료용기가 7 cm 일 때 발화한 온도와 비발화한 온도의 평균온도인 발화한계온도인 142.5 °C 임을 알 수 있다.

#### 4-1-4. 시료용기가 14 cm일 경우

시료 용기의 두께가 14 cm일 때 실험에 사용된 시료의 양은 1.96 kg이며, Fig. 9는 125 °C에서 비발화된 것을 나타내었으며, Fig. 10은 130 °C에서 발화되었다.

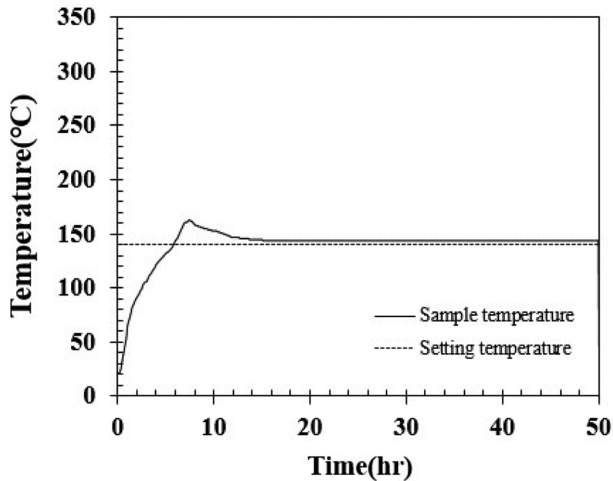


Fig. 7. Relation between time and temperature for sesame seed oil cakes in 7 cm vessel (at 140 °C).

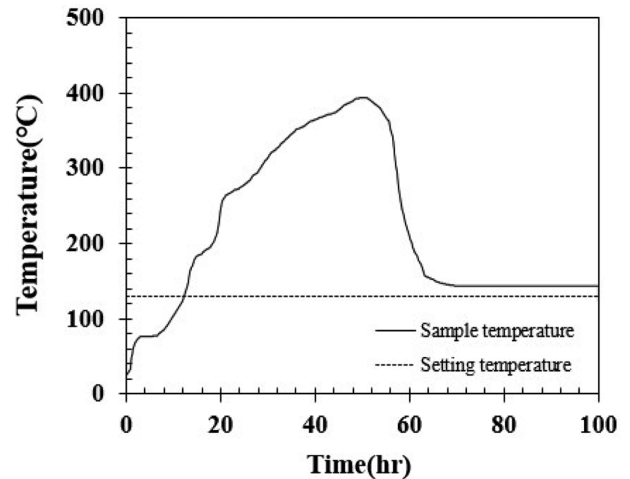


Fig. 10. Relation between time and temperature for sesame seed oil cakes in 14 cm vessel (at 130 °C).

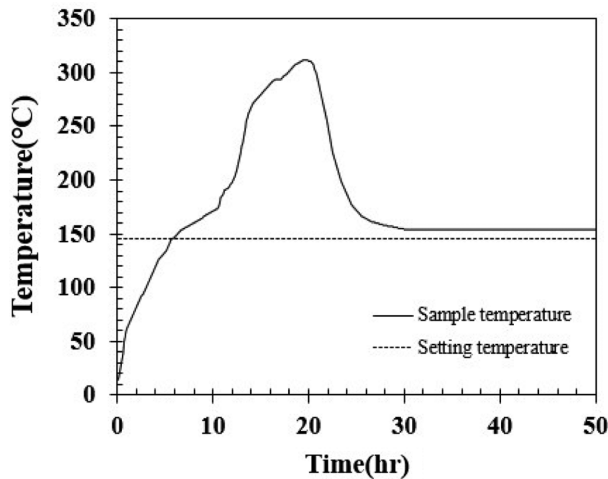


Fig. 8. Relation between time and temperature for sesame seed oil cakes in 7 cm vessel (at 145 °C).

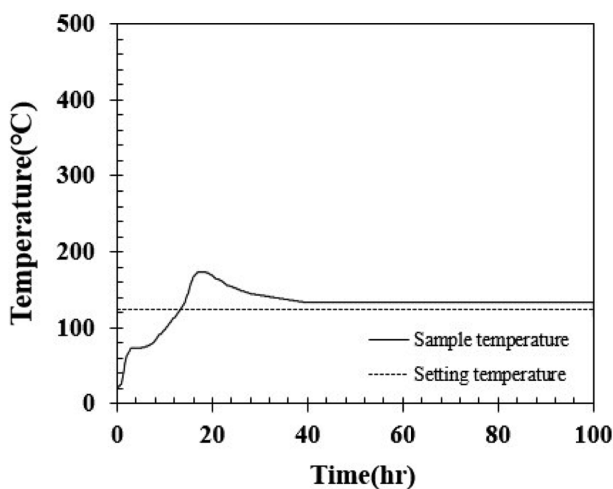


Fig. 9. Relation between time and temperature for sesame seed oil cakes in 14 cm vessel (at 125 °C).

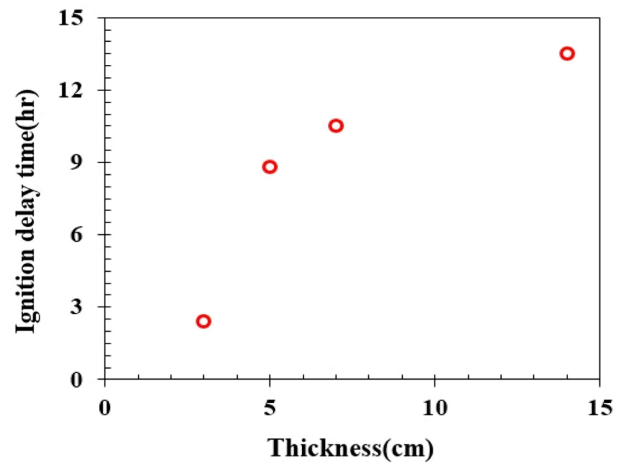


Fig. 11. Relation between ignition delay time and thickness for sesame seed oil cakes.

Fig. 9는 13시간 24분에 설정온도에 도달하였으나 발화되지 않았으며, Fig. 10은 130 °C에서 12시간 18분에 설정온도에 도달하였으며, 49시간 24분에 394 °C 최고온도를 기록하였다.

따라서 시료용기가 14 cm 일 때 발화한계온도는 127.5 °C를 구하였다.

#### 4-1-5. 시료용기의 두께에 따른 발화지연시간

자연발화가 일어나기 위해서는 일정한 시간이 소요되는데 이때의 시간을 발화지연시간(Ignition delay time)이라고 한다[17,18].

Fig. 11은 시료용기의 두께에 따른 발화지연시간을 나타내었으며, 설정온도보다 30 °C 높을 경우에 발화지연시간으로 판별하였다.

용기의 두께가 3 cm일 때 2시간 24분, 5 cm일 때 8시간 48분, 7 cm일 때 10시간 30분, 14 cm일 때 13시간 30분으로 시료용기의 두께가 두꺼워질수록 발화유도시간이 길어지는 것으로 나타났다. 이것은 시료용기의 두께가 두꺼워질수록 시료 층의 두께가 두꺼워지고 시료의 표면에서 중심까지 열전달이 어렵기 때문인 것으로 판단된다.

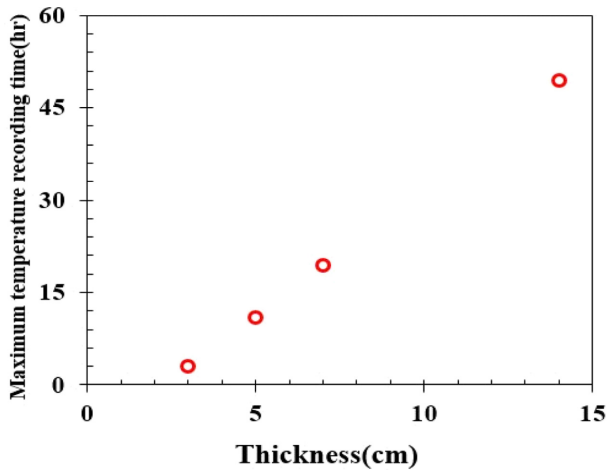


Fig. 12. Relation between maximum temperature recording time and thickness for sesame seed oil cakes.

#### 4-1-6. 시료용기의 두께에 따른 최고온도도달시간

Fig. 12는 시료용기의 두께에 따른 최고온도도달시간을 나타내었다. 용기의 두께가 3 cm 일 때 최고온도 도달시간은 3시간 6분경에 242 °C를 기록하였으며, 5 cm 일 때 10시간 54분경에 280 °C, 7 cm 일 때 19시간 24분경에 312 °C를 구하였다. 또한 14 cm 일 때 최고온도 도달시간은 49시간 24분경에 최고온도 394 °C를 기록하였다.

시료용기의 두께가 두꺼워질수록 최고온도에 도달시간이 길어졌다. 이것은 시료의 두께가 두꺼워질수록 시료의 표면에서 중심까지 열전달이 어려워 최고온도에 도달되는 시간이 길어지는 것으로 판단된다.

#### 4-2. 겉보기 활성화 에너지

시료용기의 두께별 실험 결과로부터 구한 발화한계온도를 통하여 겉보기 활성화 에너지에 필요한 값을 Table 1에 나타내었다. 참깨묵의 겉보기 활성화 에너지를 구하기 위하여 식 (7)에서  $\ln \frac{Q_s A_0 E}{K R}$ 와  $\frac{E}{R}$ 는 언제나 상수가 되므로,  $\ln \frac{\delta_c T_c^2}{\sigma a^2}$ 을  $\frac{1}{T_c}$ 에 대해 최소자승법으로 정리하면 식 (8)을 얻을 수 있다. 또한 이 결과를 도시화하면 Fig. 13과 같이 직선이 얻어진다.

$$\ln \frac{\delta_c T_c^2}{\sigma a^2} = 47.35 - 11.68 \times 10^3 \times \frac{1}{T_c} \quad (8)$$

식 (8)로부터 기울기의 절대값을 나타내면 식 (9)가 얻어진다.

$$\frac{E}{R} = 11.68 \times 10^3 \text{ [K]} \quad (9)$$

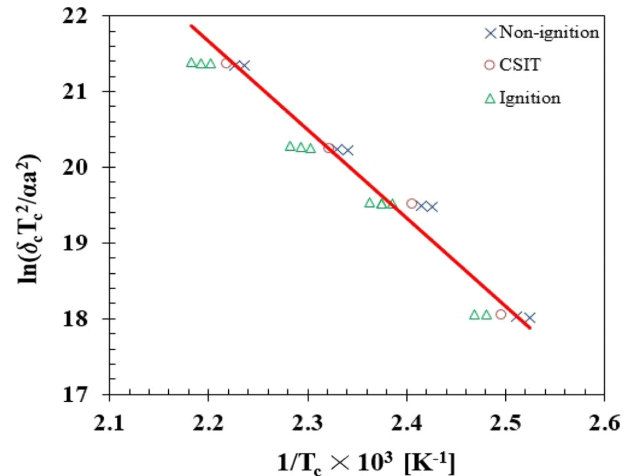


Fig. 13. Determination of activation energy for sesame seed oil cakes.

이를 통하여 활성화 에너지는 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$E = 97.10 \text{ [kJ/mol]} \quad (10)$$

## 5. 결 론

참깨묵을 사용하여 시료의 용기의 두께에 따라 자연발화온도를 구하였으며, 발화한계온도를 통하여 겉보기 활성화 에너지를 구함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시료용기의 두께가 3 cm인 경우 참깨묵의 자연화온도는 180 °C이고, 비발화 온도는 175 °C를 구하였으며, 발화한 온도와 비발화 온도의 평균값인 177.5 °C의 발화한계온도를 구하였다.
- (2) 시료용기 두께가 5 cm인 경우 발화한계온도는 157.5 °C를 구하였으며, 시료용기 두께가 7 cm인 경우 발화한계온도 142.5 °C를 구하였다. 또한 시료 용기의 두께가 14 cm일 때 발화한계온도는 127.5 °C임을 알 수 있다.
- (3) 발화한계온도를 통해 화학 반응을 일으키기 위한 최소한의 에너지인 겉보기 활성화 에너지를 구한 결과 97.10 [kJ/mol]을 얻었다.
- (4) 시료의 용기의 두께가 두꺼워질수록 발화지연시간 및 최고온도에 도달하는 시간이 길어지는 것으로 나타났다.

## Nomenclature

- a : Half thickness of sample vessel [m]  
 $A_0$  : Pre-exponential factor of Arrhenius equation [1/s]  
 $C_p$  : Specific heat [J/mol·K]

Table 1. Relation between critical spontaneous ignition temperature and thickness in each sample vessel for sesame seed oil cakes

| a [m]                | $T_c$ [K] | $\delta_c$ | $\sigma$ [g/cm <sup>3</sup> ] | $\ln \frac{\delta_c T_c^2}{\sigma a^2}$ | $\frac{1}{T_c} \times 10^3$ [K <sup>-1</sup> ] |
|----------------------|-----------|------------|-------------------------------|---|--|
| $1.5 \times 10^{-2}$ | 450.66    | 0.878      | 0.421                         | 21.3559                                 | 2.2190   |
| $2.5 \times 10^{-2}$ | 430.66    |            |                               | 20.2434                                 | 2.3220   |
| $3.5 \times 10^{-2}$ | 415.66    |            |                               | 19.4996                                 | 2.4058   |
| $7.0 \times 10^{-2}$ | 400.66    |            |                               | 18.0398                                 | 2.4959   |

|       |   |
|-------|---|
| E     | : Activation energy of reaction [J/mol]   |
| J     | : Shape parameter [-]                     |
| K     | : Heat conductivity of body [W/m·K]       |
| $Q_s$ | : Heat of reaction per unit mass [J/kg]   |
| R     | : Universal gas constant [J/mol·K]        |
| t     | : Time [sec]                              |
| T     | : Mean temperature of internal system [K] |
| $T_a$ | : Ambient temperature [K]                 |
| $T_c$ | : Critical auto ignition temperature [K]  |
| X     | : Coordinate [-]                          |

### Greek Letters

|          |   |
|----------|---|
| $\delta$ | : Dimensionless reaction rate [-]                 |
| $\theta$ | : Dimensionless temperature [-]                   |
| $\xi$    | : Dimensionless distance [-]                      |
| $\rho$   | : Density of mixture system [mol/m <sup>3</sup> ] |
| $\tau_d$ | : Dimensionless time [-]                          |
| $\sigma$ | : Density of sample [kg/m <sup>3</sup> ]          |

### References

- Lee, H. P. and Park, Y. J., Combustion Engineering, Hwasoomok, Korea, 114-116(2015).
- Choi, J. W. and Jin, S. G., Fire Protection Safety Engineering, Hwasoomok, Korea, 40-42(2018).
- National Fire Data System : Fire Statistics, <http://nfds.go.kr/stat/general.do>.
- Jo, Y. G., Cases of Natural Ignition due to Heat Waves, National Forensic Service, <https://www.kfpa.or.kr/webzine/201812/sub/disasters7.html>.
- Park, J. K., Kim, R. H., Jung, M. J., Song, S. H., Yoon, S. C., Jun, D. W. and Lee, N. H., "Management and Mechanisms of Spontaneous Ignition in Waste Pile (I)," *J. of Korea Society of Waste Management*, **36**(4), 401-412(2019).
- Ministry of Food and Drug Safety : Edible Oils and Fats, [https://www.foodsafetykorea.go.kr/foodcode/01\\_03.jsp?idx=28](https://www.foodsafetykorea.go.kr/foodcode/01_03.jsp?idx=28).
- Lee, H. P., Kim, D. J., Kim, Y. C., Koo, J. H., Park, Y. J., Park, Y. J., Ahn, H. H., Lee, S. E., Lee, J. H. and In, S. J., Theory of Hazardous Materials, Hwasoomok, Korea, 714-715(2015).
- Choi, Y. J., Kim, J. H. and Choi, J. W., "A Study on the Spontaneous Ignition Characteristics and Fire Risk of Commercial Wood Pellets," *The Korean Institute of Chemical Engineers*, **55**(5), 623-628(2017).
- Jeong, J. H., "A Study on the Auto Ignition Characteristics of Perilla Oil-Cake for Fire Prevention," Graduate School, Pukyong National Univ., Korea, 28-35(2019).
- Yang, Y., Li, Z., Si, L., Gu, F., Zhou, Y., Qi, Q. and Sun, X., "Study Governing the Impact of Long-Term Water Immersion on Coal Spontaneous Ignition," *Arabian Journal for Science and Engineering*, **42**, 1358-1369(2017).
- Choi, J. J., "Hazard Estimate of Flour Evaluated from its Characteristics of Heat Decomposition and Spontaneous Ignition," Chungnam National Univ., Graduate School of Industry, Korea, 1-5(2010).
- Ou, S. H. and Lee, K. W., "Explosion Characteristics and Flame Velocity of Suspended Plastic Powders," *Korean Chemical Engineering Research*, **54**(3), 367-373(2016).
- Frank-Kamenetskii, D. A., "Diffusion and Heat Exchange in Chemical Kinetics," Princeton University Press, NJ, USA, 202-266(1955).
- Kök, M. V. and Pamir, M. R., "Comparative Pyrolysis and Combustion Kinetics of Oil Shales," *J. Analytical and Applied Pyrolysis*, **55**(2), 185-194(2000).
- Lim, W. S. and Choi, J. W., "A Study on Spontaneous Ignition Temperature and Activation Energy of Hydroxy Propyl Methyl Cellulose," *J. of the Korean Society of Safety*, **22**(5), 77-83(2007).
- Kim, H. S., Choi, Y. J. and Choi, J. W., "A Study on the Spontaneous Ignition Characteristics of Wood Pellets related to Change in Flow Rate," *J. of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, **20**(4), 590-596(2019).
- Kim, H. S., Choi, Y. J., Kim, J. H., Jeong, P. H. and Choi, J. W., "A Study on the Ignition Temperature and Ignition Induction Time According to Storage Amount of Wood Pellets," *Fire Science and Engineering*, **33**(1), 7-14(2019).
- Choi, J. W., Fire Protection Chemical Experiment Report, Hwasoomok, Korea, 106-114(2018).