

[Research Paper]

## 우드펠릿의 저장량에 따른 발화온도 및 발화유도시간에 관한 연구

김형석 · 최유정 · 김정훈\* · 정필훈\*\* · 최재욱\*\*\*\*†

부경대학교 대학원 대학원생, \*광명토탈엔지니어링 이사,  
\*\*부산 경상대학교 소방안전·전기전자계열 교수, \*\*\*부경대학교 소방공학과 교수

### A Study on the Ignition Temperature and Ignition Induction Time According to Storage Amount of Wood Pellets

Hyeong-Seok Kim · Yu-Jung Choi · Jung-Hun Kim\* ·  
Phil-Hoon Jeong\*\* · Jae-Wook Choi\*\*\*\*†

Graduate Student, Pukyong National Univ., \*Director, Kwangmyung Total Engineering,

\*\*Professor, Division of Fire Protection & Safety Engineering, Electrical & Electronics Engineering, Busan Kyungsang College,

\*\*\*Professor, Dept. of Fire Protection Engineering, Pukyong National Univ.

(Received December 6, 2018; Revised January 3, 2019; Accepted January 8, 2019)

#### 요 약

우드펠릿은 화력발전소 및 화목 보일러의 연료로 많이 사용되고 있으나 발열량이 높은 우드펠릿을 장기간 보관 시 자연발화의 위험성이 있다. 본 연구에서는 시료 용기의 크기에 따라 유량의 변화에 따른 최소자연발화온도와 발화한계온도를 구하였으며, 발화한계온도를 이용하여 겔보기 활성화 에너지를 측정함으로써 우드펠릿의 발화 특성을 예측하였다. 겔보기 활성화 에너지는 190.224 kJ/mol을 구하였다. 용기에 저장된 시료량이 두꺼워질수록 시료 표면에서 중심까지의 열전달이 어려워 발화유도시간이 긴 것으로 나타났으며, 용기의 크기가 같을 경우 유량의 양이 많아질수록 자연발화온도는 낮아졌다. 또한 시료용기가 커질수록 자연발화온도는 낮아지고 발화유도시간은 길어지는 것으로 나타났다.

#### ABSTRACT

While wood pellets are often used as a fuel in thermoelectric power plants and firewood boilers, there is a risk of ignition temperature when strong wood pellets, which have a high calorific value, for prolonged periods of time. In this research study, the minimum auto ignition temperature and the ignition limitation temperature according to the change in flow rate depending on the size of the test vessel were calculated, and based on these temperatures, the apparent activation energy was calculated to predict the combustive properties of the material. The apparent activation energy was calculated to be 190.224 kJ/mol. The thicker the sample is storage in the vessel, the longer the ignition induction time was due to the increased difficulty in heat being transferred from the surface of the vessel to the middle section area of the vessel. For vessel of the same size, the higher the flow rate, the lower the auto ignition temperature was. It was also confirmed that increases in the size of the test vessel lowered the auto ignition temperature and increased the ignition induction time.

**Keywords** : Flow rate, Minimum ignition temperature, Apparent activation energy, Ignition induction time

#### 1. 서 론

우드펠릿은 에너지원으로서의 가치가 높아 사용량이 많아져 우드펠릿 시장은 전 세계적으로 2011년 이후로 매년 약 14%씩 성장하고 있다<sup>(1)</sup>.

게다가 2015년에 채택된 파리협정으로 인하여 중국, 인도, 러시아 등은 2030년까지 온실가스 발생량을 대폭 감축시키는 것을 목표로 공언하였고, 우리나라 또한 이에 동참하여 온실가스 감축 목표를 세워 온실가스 감축에 관한 규제가 점점 강화되고 있다<sup>(2)</sup>.

† Corresponding Author, E-Mail: [jwchoi@pknu.ac.kr](mailto:jwchoi@pknu.ac.kr), TEL: +82-51-629-6740, FAX: +82-51-629-5214

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

발전소에서 석탄과 함께 사용되는 우드펠릿은 연소 시에 생성되는 CO는 약 400 mg/m<sup>3</sup>로서 석탄과 거의 비슷하게 발생되고, NO<sub>x</sub>는 석탄보다 약간 높게 생성되며, SO<sub>x</sub>는 석탄이 약 15 mg/m<sup>3</sup>가 발생되지만 우드펠릿은 발생되지 않는다<sup>(3)</sup>.

자연발화란 어떤 화원을 주지 않아도 물질이 공기 중 상온에서 스스로 발열하여, 그 열이 오랜 시간동안에 축적되어 발화점에 도달하면 연소를 일으키는 현상이다<sup>(4)</sup>. 또한 공기 중에서 직접적인 착화원의 공급없이 물질의 반응으로 발생한 열의 축적에 의해 발화점에 도달하는 반응열의 축적에 의하여 화재가 발생하는 경우에도 자연발화에 해당한다<sup>(5)</sup>.

자연발화에 대한 선행연구로는 Lee<sup>(6)</sup>, Koh<sup>(7)</sup>, Hilado<sup>(8)</sup>의 연구가 있다. 자연발화온도에 영향을 주는 인자로는 온도, 수분, 촉매, 공기가 많은 영향을 받고 있다<sup>(9)</sup>.

우드펠릿은 저장하는 공정 중에 파쇄되어 분말형태로 저장될 경우에는 자연발화가 발생되기 쉬워지고, 2015년 4월 H 화력발전소에서 우드펠릿이 사이로에서 컨베이어로 연결되는 공정에서 혼소하여 화재가 발생된 것은 외부연소나 방화, 미소화원에 의한 발화의 원인이 아니라고 판단되어 자연발화에 의한 사건인 것으로 추정되었다.

따라서 본 연구에서는 H 화력발전소에서 사용되는 시료의 저장량에 따른 자연발화온도를 평가하기 위하여 용기의 크기를 L 20 cm × H 20 cm × W 3 cm, 5 cm 및 7 cm에 시료를 3 cm, 5 cm 및 7 cm의 두께로 넣어 시료량의 변화와 유량의 변화에 따른 자연발화온도와 발화가 일어나는데 걸리는 발화유도시간을 측정하였으며, 용기 내부의 최고온도를 구함으로써 우드펠릿의 화재 예방을 위한 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 Frank-Kamenetskii의 열발화 이론

우드펠릿의 자연발화에는 계내의 온도분포를 고려한 Frank-Kamenetskii의 열발화 이론을 적용하였다.

Fourier의 열전도식에 Arrhenius형 반응식을 조합시켜 축대칭 1차원의 형상을 고려하여 열전도도가 온도와 장소에 의존하지 않고, 0차 반응으로 보면 에너지 방정식은 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 위해 무차원 변환을 위해 무차원 온도  $\theta$ , 무차원 좌표  $\xi$ , 무차원 시간  $\tau_d$ 를 도입한다.

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

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

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

식 (2)~(4)를 사용하여 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 식 (1)을 푸는 과정에서 발열속도 항에 도입되어야 하는 무차원 반응속도로서 Frank-Kamenetskii의 Parameter라고 하여 식 (6)과 같다<sup>(10)</sup>.

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

여기서, 수식에 해당하는 각각의 계수 및 상수는 아래와 같다.

$a$	: Half thickness of sample vessel	m
$A_0$	: Pre-exponential factor of Arrhenius equation	1/s
$C_0$	: Concentration of reactant	mol/m <sup>3</sup>
$C_p$	: Specific heat	J/mol · K
$E$	: Activation energy of reaction	J/mol
$J$	: Shape parameter	dimensionless
$K$	: Thermal 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
$X$	: Coordinate	dimensionless
$\delta$	: Dimensionless reaction rate	dimensionless
$\theta$	: Dimensionless temperature	dimensionless
$\xi$	: Dimensionless distance	dimensionless
$\sigma$	: Density of sample	kg/m <sup>3</sup>
$\rho$	: Density of mixture system	mol/m <sup>3</sup>
$\tau_d$	: Dimensionless time	dimensionless

## 3. 실험장치 및 실험방법

### 3.1 실험시료

본 실험에서 사용한 시료는 K 회사에서 공급하고 있으며, H 화력발전소의 열량첨가제로 사용하고 있는 우드펠릿을 이용하였다. Table 1은 KOTITI Testing & Research Institute에

**Table 1.** Characteristics of Wood Pellet<sup>(12)</sup>

Test Item(s)		Unit	Limit	Test Result
Diameter		mm	6-8	8
Length		mm	L ≤ 40	20
Unit Volume Mass*		kg/m <sup>3</sup>	Min. 600	650
Total Moisture*		wt. %	Max. 10	8.1
Ash***		wt. %	Max. 3.0	3.0
Fines		wt. %	Max. 2.0	2.0
Gross Calorific Value	As Air Dried Basis	kcal/kg	Min. 4,300	4,680
	As Dried Basis		Min. 4,200	4,530
	As Received Basis		Min. 4,100	4,300
Net Calorific Value*		wt. %	Min. 3,900	3,940
Chlorine***		wt. %	Max. 0.05	0.03
Sulphur***		wt. %	Max. 0.05	0.03
Nitrogen***		wt. %	Max. 0.5	0.5
Hydrogen**		wt. %	Report	6.22
Ash Fusion Temperature		°C	Min. 1,150	1,211
Trace Element	As	mg/kg	Max. 1.0	Less than 0.5
	Cd	mg/kg	Max. 0.5	Less than 0.1
	Cr	mg/kg	Max. 10	6
	Cu	mg/kg	Max. 10	5
	Pb	mg/kg	Max. 10	Less than 1
	Hg	mg/kg	Max. 0.05	Less than 0.01
	Ni	mg/kg	Max. 10	3
	Zn	mg/kg	Max. 100	12
Biomass**		wt. %	Max. 90	95.7
DNA Test			Negative	Negative

\* As Received Basis, \*\* As Dried Basis, \*\*\* As Air Dried Basis

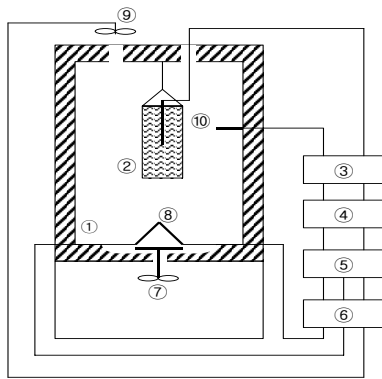
서 Test report를 참고하여 물질의 물리적 특성 값을 나타내었다<sup>(11)</sup>.

### 3.2 실험장치 및 조건

본 연구에서 사용한 실험장치는 Figure 1에 나타내었으며, 향온조는 내용적 27 L (30 cm × 30 cm × 30 cm)의 열풍순환식 향온조이며 내부의 온도분포를 균일하게 유지하기 위해 Sirocco fan (ø 10 cm)을 사용해 내부의 공기를 강제로 순환시켰으며, 향온조의 히터는 1200 °C까지 온도조절이 가능한 1.5 kW의 히터 5개를 설치하여 열을 가하였다. 향온조 상부에 있는 배기구에 팬을 설치하여 설정온도보다 내부의 온도가 높아지면 릴레이 스위치에 의하여 팬이 자동으로 작동한다. 온도측정용 열전대는 주위온도를 제어 및 측정하고 시료의 중심온도를 측정하기 위해 사용하며, 전자는 시료용기와 향온조의 벽면중앙에 설치하고, 후자는 직경이 0.35 mm로 2조의 Chromel-Alumel로 구성된 열전대를

시료용기 중앙에 설치하였다. 온도제어장치(제조사: Konics, EC- 5600)는 프로그램의 설정에 의해 주위온도를 제어하는 방식으로 냉접점을 거친 보정된 온도를 제어할 수 있도록 하였으며, 이를 설정온도와 비교하고 그 차이에 의해 1.5 kW의 히터 5개의 전류치를 제어하여 릴레이 스위치로서 상부 팬의 작동을 on-off로 제어할 수 있도록 하였다. 온도 기록장치(제조사: Yoko gawa, model 4151)는 펜형 기록계로서 설정온도 및 시료중심온도를 연속적으로 기록하도록 되어 있다<sup>(13)</sup>.

시료용기의 크기는 Small (L 20 cm × H 20 cm × W 3 cm), Intermediate (L 20 cm × H 20 cm × W 5 cm), Large (L 20 cm × H 20 cm × W 7 cm)로서 형상을 입방체로 하여 무한평판에 접근하도록 하였으며, 이 용기는 300 mesh의 스테인리스 망으로 가로와 세로의 앞면과 뒷면을 일차원 방향으로 열전달이 되게 하였으며, 다른 부분은 약 1 cm의 석고판으로 단열시켰다<sup>(14)</sup>.



- ① Electric furnace
- ② Sample
- ③ Cold junction
- ④ Program controller
- ⑤ Temperature recorder
- ⑥ Relay switch
- ⑦ Sirocco fan
- ⑧ Heater
- ⑨ Fan
- ⑩ Chromel-alumel thermocouple

Figure 1. Schematic diagram of experimental apparatus for spontaneous ignition temperature measurement.

### 3.3 실험방법

온도제어장치 프로그램을 미리 설정한 후 정해진 온도로 가열된 항온조의 중앙에 우드펠릿을 충전한 두께가 3 cm인 직육면체의 용기를 장치의 내부에 설치하고, 열전대를 시료용기의 중심에 고정하였다.

시료용기를 실험 장치에 넣어 시료의 중심온도가 변하는 것을 관찰하여 중심온도가 설정온도에 비해 급격하게 상승하면 「발화」로 판정을 하여, 시료의 중심온도가 설정온도와 비슷하게 유지가 될 때는 「비발화」로 판정을 하여 1회 실험을 중지하였다.

같은 조건 하에서 실험을 반복하여 발화한 최저온도와 발화하지 않는 최고온도와의 차이가 1 °C일 경우 실험을 중단하고, 양자의 평균온도를 발화한계온도로 하였다<sup>(14)</sup>.

또한 용기의 두께가 5 cm와 7 cm일 경우에도 발화와 비발화를 동일한 방법으로 실험장치에 넣어 실험을 하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

우드펠릿을 사용하여 실험한 결과로 시료용기의 두께와 유량의 변화를 주었을 때 구한 자연발화온도와 발화유도시간 등에서 차이를 확인할 수 있었다. 또한 비발화와 발화로 판단되는 발화한계온도를 통하여 걸보기 활성화 에너지도 확인할 수 있었다.

### 4.1 시료용기의 두께가 3 cm일 경우 자연발화온도

Figure 2, 3, 4, 5는 각각 시료용기의 두께가 3 cm일 때 시료의 중심에 설치된 배관으로부터 공기의 유량을 0 NL/min, 0.5 NL/min, 1.0 NL/min, 1.5 NL/min로 변화시켜 자연발화에 대한 결과를 나타내었다.

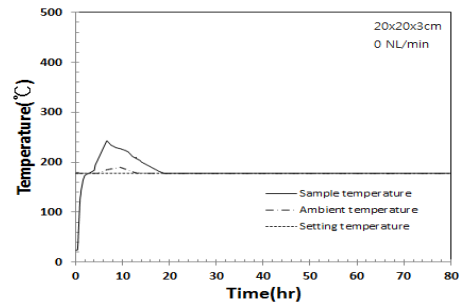


Figure 2. The relationship between the temperature and time of wood pellets with a 3 cm vessel at 178 °C when the flow rate was 0 NL/min.

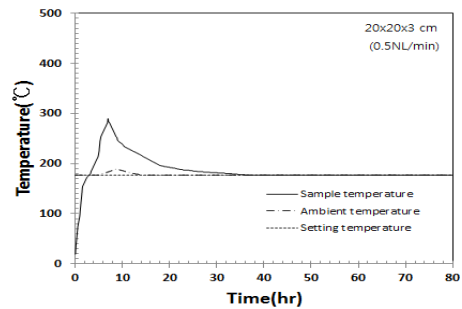


Figure 3. The relationship between the temperature and time of wood pellets with a 3 cm vessel at 177 °C when the flow rate was 0.5 NL/min.

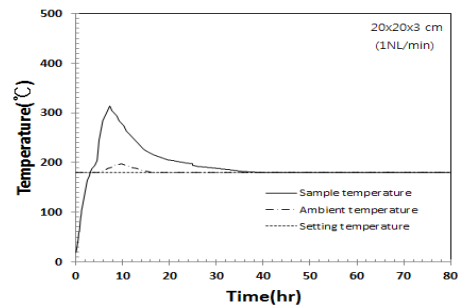


Figure 4. The relationship between the temperature and time of wood pellets with a 3 cm vessel at 176 °C when the flow rate was 1.0 NL/min.

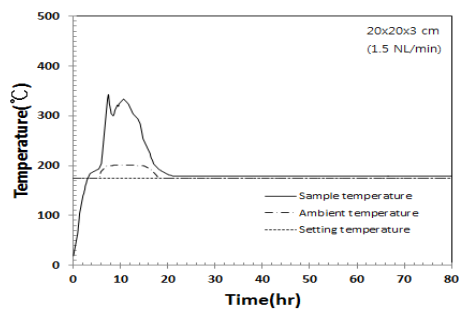


Figure 5. The relationship between the temperature and time of wood pellets with a 3 cm vessel at 175 °C when the flow rate was 1.5 NL/min.

유량이 0 NL/min일 때는 178 °C에서 발화하였으며, 비발화와 발화의 평균온도인 177.5 °C의 발화한계온도를 구하였다. 0.5 NL/min일 경우에는 177 °C에서 발화가 일어났으며, 발화한계온도는 176.5 °C를 구하였다. 또한 유량이 1.0 NL/min일 때는 176 °C에서 발화하였으며, 발화한계온도는 175.5 °C를 구하였으며, 1.5 NL/min일 때는 175 °C에서 발화하였으며, 발화한계온도는 174.5 °C를 구하였다.

**4.2 시료용기의 두께가 5 cm일 경우 자연발화온도**

Figure 6, 7, 8, 9는 각각 시료용기의 두께가 5 cm일 때 유량을 0 NL/min, 0.5 NL/min, 1.0 NL/min, 1.5 NL/min으로 변화시켜 자연발화에 대한 결과를 나타내었다. 유량이 0 NL/min에서 실험을 행하였을 때 171 °C에서 발화되었으며, 발화한계온도는 170.5 °C를 구하였다. 0.5 NL/min일 때는 168 °C에서 발화되었으며, 발화한계온도는 167.5 °C를 구하였다. 또한 유량이 1.0 NL/min일 때는 167 °C에서 발화되었으며, 발화한계온도는 166.5 °C를 구하였고, 1.5 NL/min일 경우에는 167 °C에서 발화하였으며, 발화한계온도는 166.5 °C를 구하였다.

주위온도가 상승하는 이유는 발화의 영향으로 시료용기 내 온도가 높아져 항온조 주위온도의 상승을 나타내며, 시료용기의 내부온도와 설정온도가 동일하게 나타나는 것은 시료용기의 내부에서 시료가 연소함으로써 열의 축적이 되지 않기 때문으로 사료된다.

**4.3 시료용기 두께가 7 cm일 경우 자연발화온도**

Figure 10, 11, 12, 13은 각각 시료용기의 두께가 7 cm일 때 유량을 0 NL/min, 0.5 NL/min, 1.0 NL/min, 1.5 NL/min으로 변화시켜 자연발화에 대한 결과를 나타내었다. 유량이 0 NL/min에서 실험을 행한 결과 163 °C에서 발화되었으며, 발화한계온도는 162.5 °C를 구하였다, 0.5 NL/min일 때는 162 °C에서 발화되었으며, 발화한계온도는 161.5 °C를 구하였으며, 또한 유량이 1.0 NL/min일 때는 162 °C에서 발화되었으며, 발화한계온도는 161.5 °C를 구하였으며, 1.5 NL/min일 경우에는 160 °C에서 발화되었으며, 발화한계온도는 159.5 °C를 구하였다.

시료용기 내 온도가 상승한 후 낮아졌다 다시 상승하는 것은 시료용기 중심에 삽입된 열전대 부근의 시료가 발화 후 산소 부족으로 인해 연소가 소강상태가 되어 온도가 하강하다가 인접한 시료에서 재발화되어 다시 온도가 상승하는 것으로 예측된다<sup>(15)</sup>.

**4.4 시료용기별 유량의 변화에 따른 발화유도시간**

Figure 14는 용기 내부에 들어있는 시료의 두께가 3 cm, 5 cm 및 7 cm에 대한 유량의 변화에 따른 발화유도시간을 나타낸 결과이다. 시료용기가 커질수록 발화유도시간이 길어지는데 이는 시료용기의 두께가 증가할수록 시료층의 두

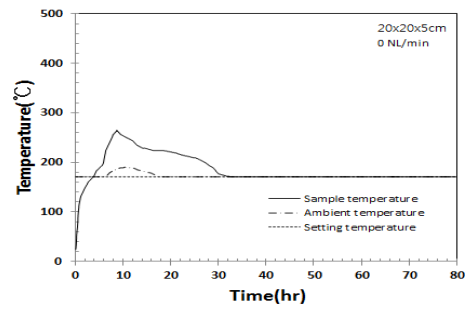


Figure 6. The relationship between the temperature and time of wood pellets with a 5 cm vessel at 171 °C when the flow rate was 0 NL/min.

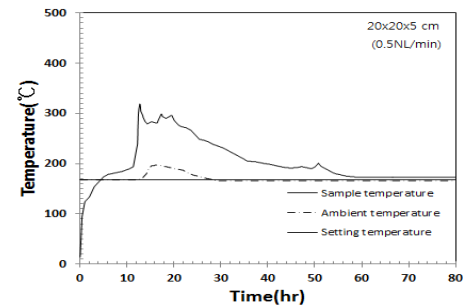


Figure 7. The relationship between the temperature and time of wood pellets with a 5 cm vessel at 168 °C when the flow rate was 0.5 NL/min.

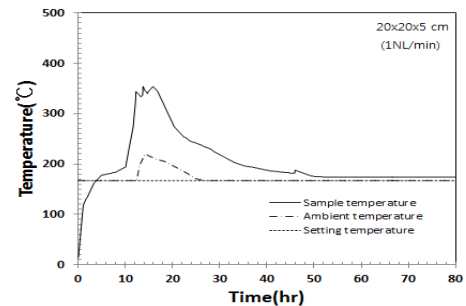


Figure 8. The relationship between the temperature and time of wood pellets with a 5 cm vessel at 167 °C when the flow rate was 1.0 NL/min.

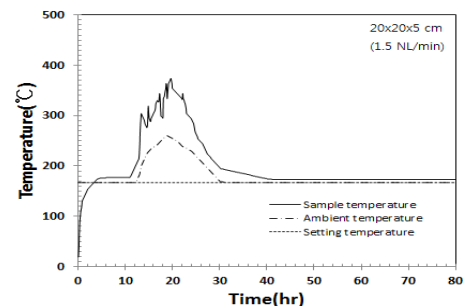


Figure 9. The relationship between the temperature and time of wood pellets with a 5 cm vessel at 167 °C when the flow rate was 1.5 NL/min.

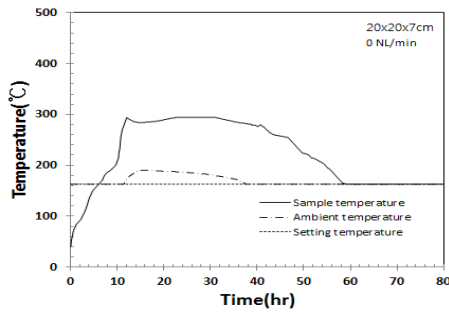


Figure 10. The relationship between the temperature and time of wood pellets with a 7 cm vessel at 163 °C when the flow rate was 0 NL/min.

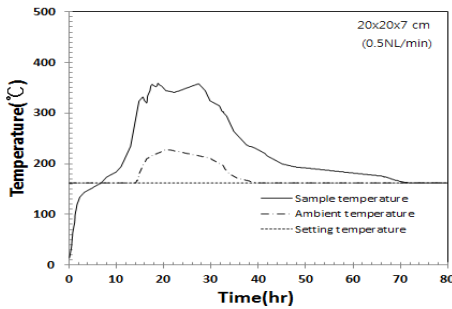


Figure 11. The relationship between the temperature and time of wood pellets with a 7 cm vessel at 162 °C when the flow rate was 0.5 NL/min.

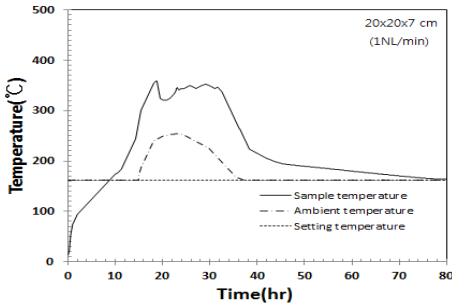


Figure 12. The relationship between the temperature and time of wood pellets with a 7 cm vessel at 162 °C when the flow rate was 1.0 NL/min.

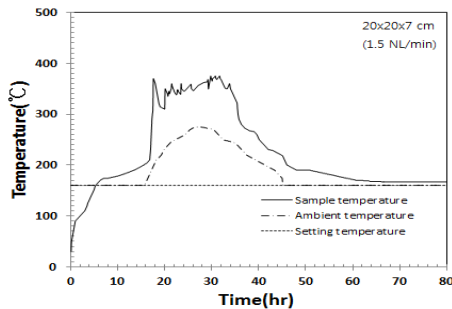


Figure 13. The relationship between the temperature and time of wood pellets with a 7 cm vessel at 160 °C when the flow rate was 1.5 NL/min.

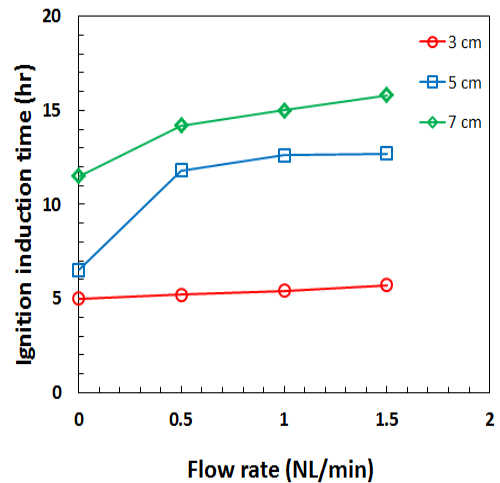


Figure 14. Relation between flow rate and ignition induction time.

께가 두꺼워져 시료 표면에서부터 중심까지 열전달이 어렵기 때문에 발화유도시간이 길어지는 것으로 판단된다.

#### 4.5 겉보기 활성화 에너지

발화온도와 비발화로 판정되는 평균온도를 발화한계온도로 정의한다. 자연발화의 발생 가능성을 검토하기 위해 각 시료 용기에 있어 발화한계온도를 구한 값으로 Frank-kamenetskii의 Parameter 식 (6)으로부터 겉보기 활성화 에너지를 구할 수 있다.

$$\delta = \frac{E Q_s a^2 \sigma A_0 \exp^{-E/RT_a}}{KRT_a^2} \tag{6}$$

식 (6)을 정리하게 되면 식 (7)이 된다.

$$\ln \frac{\delta_c T_c^2}{a^2 \sigma} = -\frac{E}{R} \frac{1}{T_c} + \ln \frac{Q_s A_0 E}{KR} \tag{7}$$

크기가 다른 시료용기에서 얻은 실험 결과로 얻은 발화한계온도를 Table 2에 나타냈다.

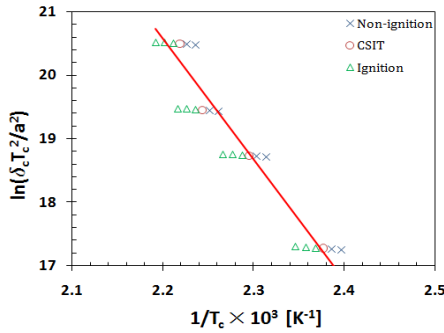
겉보기 활성화 에너지를 예측하기 위해 식 (7)에서  $\ln \frac{Q_s A_0 E}{KR}$ 와  $\frac{E}{R}$ 는 언제나 상수가 되므로,  $\ln \frac{\delta_c T_c^2}{a^2 \sigma}$ 을  $\frac{1}{T_c}$ 에 대해 도시화하면 Figure 15와 같이 직선이 얻어진다. 이 결과를 최소자승법으로 정리하게 되면 다음과 같은 식 (8)을 구할 수 있다.

$$\ln \frac{\delta_c T_c^2}{a^2 \sigma} = 71.19 - 22.88 \times 10^3 \times \frac{1}{T_c} \tag{8}$$

식 (8)을 이용하여 겉보기 활성화 에너지를 구하면

**Table 2.** Relation Between Critical Spontaneous Ignition temperature and Thickness in Each Sample Vessel for Wood Pellet

a[m]	$T_c$ [K]	$\delta_c$	$\ln \frac{\delta_c T_c^2}{a^2}$	$\frac{1}{T_c} \times 10^3 [K^{-1}]$
$1.5 \times 10^{-2}$	450.66	0.878	20.4907	2.2190
$2.5 \times 10^{-2}$	443.66		19.4378	2.2540
$3.5 \times 10^{-2}$	435.66		18.7284	2.2954



**Figure 15.** Determination of activation energy for wood pellet.

$$\frac{E}{R} = 22.88 \times 10^3 \text{ K} \quad (9)$$

식 (9)로 표현할 수 있고, 식 (10)으로 걸보기 활성화 에너지를 구할 수 있다.

$$E = 190.224 \text{ kJ/mol} \quad (10)$$

### 5. 결 론

H 화력발전소에서 사용되는 우드펠릿을 이용하여 용기의 저장량에 따른 유량의 변화에 대한 자연발화온도와 걸보기 활성화 에너지를 구하여 물질의 위험성을 파악하여 다음과 같은 결론을 구하였다.

1) 시료 용기의 두께가 3 cm인 경우 유량이 0 NL/min일 때 178 °C, 0.5 NL/min일 때 177 °C, 1.0 NL/min일 때 176 °C, 1.5 NL/min일 때 175 °C에서 발화되었으며, 자연발화한계 온도는 각각 177.5 °C, 176.5 °C, 175.5 °C 및 174.5 °C를 구한 결과, 공기의 유량이 증가할수록 발화한계온도가 낮아지는 경향을 나타내었다.

2) 시료 용기의 두께가 5 cm인 경우 유량이 0~1.5 NL/min로 증가할수록 발화한계온도는 170.5 °C에서 166.5 °C로 낮아졌으며, 항온조 내의 온도가 상승하는 것은 시료용기 내의 시료가 연소됨으로 인하여 용기로부터 외부로 열의 확산에 의하여 발생되는 것으로 판단된다.

3) 시료 용기의 두께가 7 cm인 경우에도 유량이 0 NL/min일 때 162.5 °C, 0.5 NL/min일 때 161.5 °C, 1.0 NL/min일 때 161.5 °C, 1.5 NL/min일 때 159.5 °C의 발화한계온도를 구하였다.

4) 발화유도시간은 시료량의 두께가 3 cm에서 7 cm로 두꺼워질수록 시료 표면에서 중심까지의 열전달이 어려워 발화에 필요한 시간이 긴 것으로 나타났다.

5) 발화와 비발화의 평균온도인 발화한계온도로부터 걸보기 활성화 에너지를 구한 결과 190.224 kJ/mol을 구하였다.

### References

1. D. Thran, D. Peetz and K. Schaubach, "Global Wood Pellet Industry and Trade Study 2017", IEA Bioenergy Task 40, p. 8 (2017).
2. G. S. Oh, "A Study on the Application of Ash-free Coals from Various Kinds of Biomass to DCFC", Dept. of Power Generation Combustion Engineering, Graduate School, Busan National University, pp. 1-2 (2016).
3. J. H. Kim, S. H. Heo, H. C. Kim, M. R. Jo, S. O. Lim, S. B. Lee and D. I. Kang, "A Study on Emission Characteristics of Air Pollutants from the use of Solid Fuel", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 33, No. 2, pp. 77-86 (2017).
4. J. W. Choi and S. K. Jeon, "Fire Protection Safety Engineering", Hwasumok, p. 40 (2018).
5. J. W. Choi, Y. S. Mok and D. M. Ha, "A Study on Spontaneous Ignition of Hydroxy Propyl Methyl Cellulose", Transaction of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 15, No. 4, pp. 34-40 (2001).
6. E. J. Lee, "Numerical Study on Auto-ignition and Combustion Emissions Using Gasoline/Ethanol Surrogates", Fire Science and Engineering, Vol. 30, No. 3, pp. 1-6 (2016).
7. J. S. Koh and M. J. Jang, "A Study on Replay Experiments and Thermal Analysis for Autoignition Phenomenon of Shredded Waste Tire", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 26, No. 6, pp. 99-108 (2012).
8. C. J. Hilado and S. W. Clark, "Autoignition Temperature of Organic Chemicals", Chemical Engineering, Vol. 4, pp. 75-80 (1972).
9. B. E. Mitchell and P. C. Jurs, "Prediction of Autoignition Temperature of Organic Compounds from Molecular", J. Chem. Inf. Comput. Sci, pp. 538-547 (1997).
10. D. A. Frank-kamenetskii, "Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetises", 2nd ed., Trans by Apleton, Pleum Press, pp. 5-36 (1969).
11. Y. R. Kim and S. R. Lee, "Test Report for Wood Pellet", KOTITI Testing & Research Institute.
12. Korea Forest Research Institute, "Standards and Quality Standards of Wood Products" (2015).
13. J. J. Choi, "Hazard Estimate of Flour Evaluated from its characteristics of Heat Decomposition and Spontaneous

- Ignition”, Dept. of Mechanical System Engineering, Graduate School Industry, Chungnam National University Daejeon, pp. 20-21 (2010).
14. W. S. Lim, “A Study on the Explosion Characteristics of Hydroxy Propyl Methyl Cellulose dust”, Dept. of Safety Engineering, Graduate School, Pukyong National University, pp. 26-31 (2005).
15. Y. J. Choi, “A Study on the Spontaneous Ignition Characteristics of Wood Pellet and Powder used in Mixtures of Thermal Power Plant”, Dept. of Fire Protection Engineering, Graduate School, Pukyong National University, p. 38 (2017).