



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學博士 學位論文

타올에 흡착된 식물성 기름의 자연발화에
대한 연구



2023年 2月

釜慶大學校 大學院

消防工學科

金敬洙

工學博士 學位論文

타올에 흡착된 식물성 기름의 자연발화에
대한 연구

指導教授：崔 載 旭

이 論文을 工學博士 學位論文으로 提出함

2023年 2月

釜慶大學校 大學院

消防工學科


金 敬 洙


金敬洙의 工學博士 學位論文을 認准함


2023年 2月 17日

委員長 工學博士 崔 日 坤 

委 員 工學博士 具 玟 成 

委 員 工學博士 崔 俊 鎬 

委 員 工學博士 鄭 斗 均 

委 員 工學博士 崔 載 旭 

목 차

1. 서 론	1
2. 이론적 배경	4
2-1. 열발화 이론	4
2-1-1. Semenov 이론	7
2-1-2. Frank-Kamenetskii 이론	11
2-2. 자연발화 이론	13
2-2-1. 자연발화의 정의 및 메커니즘	13
2-2-2. 자연발화에 영향을 주는 인자	17
2-3. 활성화 에너지	18
3. 유지류가 흡착된 가연물의 자연발화 사고사례	20
3-1. 화재발생 개요	20
3-2. 화재건물 현황 및 주변여건	21
3-3. 기상상황	22
3-4. 발화지점	23
3-4-1. 관계자 진술	23
3-4-2. CCTV 분석	24
3-4-3. 연소진행 상황	26

3-4-4. 발화지점 판정	29
3-5. 화재원인	31
3-6. 화재조사 결과	33
4. 실험장치 및 방법	34
4-1. 실험장치	34
4-2. 실험방법	36
5. 실험 시료	37
6. 실험결과 및 고찰	42
6-1. 자연발화 했을 경우 용기내의 탄화된 형상	42
6-2. 건성유인 아마씨유의 발화실험	47
6-2-1. 아마씨유 75 ml 도포	47
6-2-2. 아마씨유 50 ml 도포	53
6-2-3. 아마씨유 25 ml 도포	59
6-3. 반건성유인 옥수수유의 발화실험	65
6-3-1. 옥수수유 75 ml 도포	65
6-3-2. 옥수수유 50 ml 도포	71
6-3-3. 옥수수유 25 ml 도포	77
6-4. 불건성유인 올리브유의 발화실험	83

6-4-1. 올리브유 75 ml 도포	83
6-4-2. 올리브유 50 ml 도포	89
6-4-3. 올리브유 25 ml 도포	95
6-5. 아마씨유의 80℃에서 발화실험	101
7. 결론	103
Nomenclature	107
Greek Letters	108
참고 문헌	109
Abstract	113



List of Photos

Photo 1. Textiles being dried outdoors.	25
Photo 2. Inside view of the building before the fire.	28
Photo 3. Fire origin at CCTV.	30
Photo 4. Experimental apparatus for spontaneous ignition.	35
Photo 5. Olive oil used in the experiment.	38
Photo 6. Corn oil used in the experiment.	39
Photo 7. Flaxseed oil used in the experiment.	40
Photo 8. Oil sprayed onto the towel for experimentation.	41
Photo 9. When spontaneously ignited, the carbonized shape in the container.	44
Photo 10. Residue shape of towel burnt in filling container.	45
Photo 11. Residue of carbonized towels.	46

List of Figures

Fig. 1. Relation between heat generation and heat release in auto ignition.	6
Fig. 2. Relation between ambient temperature and sample inner temperature.	16
Fig. 3. Relation between reaction coordinate and energy in exothermic reaction.	19
Fig. 4. Variation of temperature with time for number of towels 5, ambient temperature 65°C.	48
Fig. 5. Variation of temperature with time for number of towels 10, ambient temperature 65°C.	50
Fig. 6. Variation of temperature with time for number of towels 15, ambient temperature 65°C.	52
Fig. 7. Variation of temperature with time for number of towels 5, ambient temperature 65°C.	54
Fig. 8. Variation of temperature with time for number of towels 10, ambient temperature 65°C.	56
Fig. 9. Variation of temperature with time for number of towels 15, ambient	

temperature 65°C.	58
Fig. 10. Variation of temperature with time for number of towels 5, ambient temperature 65°C.	60
Fig. 11. Variation of temperature with time for number of towels 10, ambient temperature 65°C.	62
Fig. 12. Variation of temperature with time for number of towels 15, ambient temperature 65°C.	64
Fig. 13. Variation of temperature with time for number of towels 5, ambient temperature 65°C.	66
Fig. 14. Variation of temperature with time for number of towels 10, ambient temperature 65°C.	68
Fig. 15. Variation of temperature with time for number of towels 15, ambient temperature 65°C.	70
Fig. 16. Variation of temperature with time for number of towels 5, ambient temperature 65°C.	72
Fig. 17. Variation of temperature with time for number of towels 10, ambient temperature 65°C.	74
Fig. 18. Variation of temperature with time for number of towels 15, ambient	

temperature 65°C.	76
Fig. 19. Variation of temperature with time for number of towels 5, ambient temperature 65°C.	78
Fig. 20. Variation of temperature with time for number of towels 10, ambient temperature 65°C.	80
Fig. 21. Variation of temperature with time for number of towels 15, ambient temperature 65°C.	82
Fig. 22. Variation of temperature with time for number of towels 5, ambient temperature 65°C.	84
Fig. 23. Variation of temperature with time for number of towels 10, ambient temperature 65°C.	86
Fig. 24. Variation of temperature with time for number of towels 15, ambient temperature 65°C.	88
Fig. 25. Variation of temperature with time for number of towels 5, ambient temperature 65°C.	90
Fig. 26. Variation of temperature with time for number of towels 10, ambient temperature 65°C.	94
Fig. 27. Variation of temperature with time for number of towels 15, ambient	

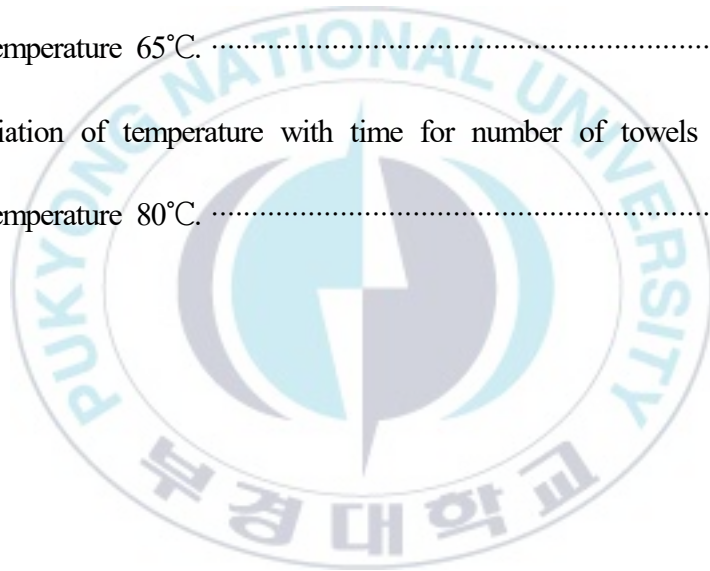
temperature 65°C. 94

Fig. 28. Variation of temperature with time for number of towels 5, ambient temperature 65°C. 96

Fig. 29. Variation of temperature with time for number of towels 10, ambient temperature 65°C. 98

Fig. 30. Variation of temperature with time for number of towels 15, ambient temperature 65°C. 100

Fig. 31. Variation of temperature with time for number of towels 20, ambient temperature 80°C. 102



1. 서론

현대사회는 공업화 및 산업화가 발달함에 따라 가스 및 화학물질 등 에너지의 사용이 다양해지고, 각종 위험물질 사용의 증가로 화재의 발생 위험성이 높아져 화재의 양상도 원인과 패턴을 파악하기 힘들 정도로 점점 복잡해지고 있다. 특히 가연성 물질을 대량으로 수송 및 저장하는 기회가 많아짐에 따라 자연발화로 인해 화재 및 폭발을 일으키는 사고가 빈번히 발생하고 있다¹⁻²⁾.

자연발화에 의한 화재는 국가화재정보시스템(NFDS: National Fire Data System)이 제시하는 통계에서 화학적 요인에 의한 화재 중 높은 비중을 차지하고 있으며, 화재의 발생 횟수가 점점 더 증가하고 있는 추세이다³⁾.

고형 또는 분체 형태의 시료는 점화원이 존재하지 않는 상황에서 시료의 퇴적 상태에 따라 방열속도가 발열속도 보다 장시간 낮은 상태에 놓이면 내부의 축열에 의해 자연발화를 할 잠재적 위험성이 있을 뿐만 아니라, 자연발화로 인해 화재가 발생한 후에도 화재 원인을 규명하기 어려운 경우가 있다⁴⁻⁵⁾.

이러한 고체의 자연발화에 대한 연구로 국내에서는 Choi 등⁶⁾이 활성

탄의 자연발화와 관련하여 발화유도시간과 온도분포에 관한 연구를 하였고, Mok 등⁷⁾은 MBS 공중합물의 자연발화 특성과 관련하여 연구를 하였다. 또한 Kim 등⁸⁾은 저탄장 자연발화 현상에 대한 수치 해석적 연구를 하였으며, Lim 등⁹⁾은 RPF의 열적 안정성과 한계발화온도에 관한 연구를 하였다. 국외에서는 Bowes 등¹⁰⁾이 산소농도 변화에 따른 톱밥의 자연발화에 관한 연구를 하였고, Cameron 등¹¹⁾은 기온변화에 따른 활성탄의 자연발화에 대하여 연구를 하였다.

4류 위험물인 동식물류의 요오드값(옥소값)은 불포화결합의 정도를 나타내는 척도로 사용되며, 유지 100 g에 부가되는 요오드의 g수로 나타낸다. 일반적으로 요오드값이 크다는 것은 탄소 간에 이중결합이 많고 불포화도가 크다는 것을 의미한다. 요오드값을 기준으로 건성유, 반건성유, 불건성유로 분류되고, 불포화도가 높은 건성유는 산화 안정성이 약해 자연발화의 위험성이 높다¹²⁻¹⁷⁾.

더욱이 여름철과 같이 폭염으로 인해 주위온도가 높으며 충분한 습기가 존재할 경우에 고체물질은 자연발화로 인한 화재가 다수 발생하고 있다.

따라서 본 연구에서는 타올에 식물성 기름이 흡착되었을 경우 건조과정에서 화재가 발생할 수 있는 사항을 판단하기 위하여 건성유인 아마

씨유, 반건성유인 옥수수유 및 불건성유인 올리브유의 양의 변화와 타
올의 량에 따른 발화의 원인을 규명하고자 한다.



2. 이론적 배경

2-1. 열발화 이론¹⁸⁾

열발화(Thermal ignition) 이론은 가연물의 자연발화 현상을 계(System) 내부에서의 발열과 계 외부로의 방열 관계로 설명한 이론이다.

자연발화는 축열과정에 있는 것으로 내부에서의 발열속도와 외부로의 방열속도 간의 균형문제로 발생하는 것이다. 즉, 가연물이 지속해서 열을 받거나 산화, 분해 등의 발열을 일으키는 과정을 거치면서 생성 및 축적되는 발열속도가 전도, 대류 또는 복사에 의해서 계 외부로 발산되는 방열속도 보다 큰 경우에 발생하게 되며, 이러한 발열과 방열의 관계에서 자연발화가 이루어지는 관계를 도식적으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

가열 온도가 T_a^I 과 같이 낮을 경우에는 직선과 곡선은 A점에서 교차하여 계의 내부온도가 점차 일정한 값으로 수렴한다. 이와 비교하여 가열 온도가 T_a^{III} 와 같이 높으면 발열속도는 온도와 관계없이 방열속도보다 빠르기 때문에 반드시 발화가 일어난다. 따라서 곡선과 직선이 접하는 가열 온도 T_a^{II} 가 발화가 발생하는 한계이며, C점이 정상상태가 되

는 최대치이다.

이 외에 발열곡선의 변곡점 이상에서 교차하는 점 B와 D는 물리적으로 실현되지 않거나 무의미한 고온의 범위에 해당하므로 자연발화를 해석하기 위한 열 발화 이론에서는 고려하지 않는다.

이러한 자연발화의 조건을 설명하는 열발화 이론은 크게 두 가지로 분류된다. 첫 번째는 발열과 방열의 관계를 정상상태로 가정하여 발화 한계를 설명한 Semenov 이론이고, 다른 하나는 이것을 보완하기 위해 계의 형상과 온도분포를 추가로 고려한 Frank-Kamenetskii 이론으로, 이 이론은 고체의 자연발화에도 적용할 수 있다.



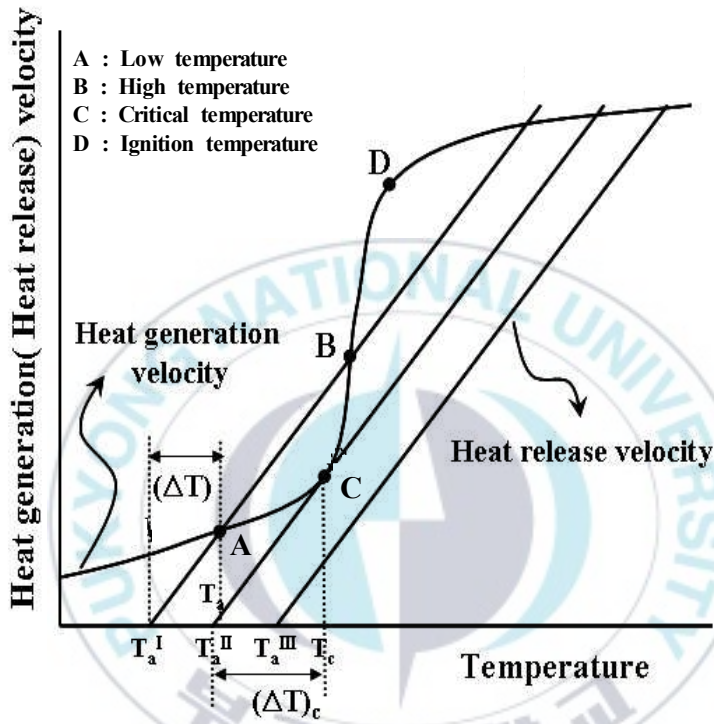


Fig. 1. Relation between heat generation and heat release in auto ignition.

2-1-1. Semenov 이론¹⁸⁻²⁰⁾

Semenov 이론은 발화 현상을 계 내부에서의 발열속도와 계 외부로의 방열속도와의 평형의 문제로 생각하여 발화가 일어나는 한계 조건을 수학적으로 도입한 것이다. 발화가 일어날 때까지의 유도기간 내에서 연료의 소모는 영향을 주지 않는다고 가정하여 이것을 무시하며, 발열량이 큰 계의 내부는 0차 반응으로써 반응물이 모두 소비될 때까지 계의 온도는 T 로 일정하게 유지된다고 가정한다. 또한 반응속도의 온도의존성은 Arrhenius 형을 따르고 계 외부로의 방열속도는 계의 온도 T 와 주위온도 T_a 와의 차이에 비례하는 Newton의 냉각법칙을 따르는 것으로 가정하면 식 (1)과 같은 에너지 방정식이 성립한다.

$$C_{PP}V(dT/dt) = Q_fVC_0^m A_0 \exp(-E/RT) - hS(T - T_a) \quad (1)$$

여기서 계의 온도가 균일하다는 가정은 현상학적으로 반응하는 유체가 충분히 교반 되어있고, 용기 벽으로의 방열이 대류에 의해 발생하는 경우에 해당한다.

Fig. 1에서 곡선과 직선이 접하는 경우가 발화가 일어나는 한계이며, 이때 계의 내부 온도는 $(\Delta T)_c = T_c - T_a$ 만큼 상승하여 멈춘다. 결

과적으로 정상상태가 되는 최대치로서 접선의 조건을 식 (1)의 방정식에 적용하면 식 (2)와 (3)과 같이 된다.

$$[Q_f V C_0^n A_0 \exp(-E/RT)]_c = [hS(T - T_a)]_c \quad (2)$$

$$[d\{Q_f V C_0^n A_0 \exp(-E/RT)\}/dT]_c = [d\{hS(T - T_a)\}/dT]_c \quad (3)$$

0차 반응의 경우 반응물질의 농도 C_0^n 이 일정하므로 식 (3)에서 hS , $Q_f V C_0^n A_0$ 는 상수가 되며, 양변에 자연로그를 취하면 식 (4)가 된다.

$$\left[\frac{d}{dT} \{ \ln(Q_f V C_0^n A_0) + \ln(\exp(-E/RT)) \} \right]_c = \left[\frac{d}{dT} \{ \ln(hS) + \ln(T - T_a) \} \right]_c \quad (4)$$

상수항은 미분할 경우 0이 되므로, 이를 소거하여 정리하면 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\left[\frac{d}{dT} \left\{ \left(-\frac{E}{R} \right) \cdot T^{-1} \right\} \right]_c = \left[\frac{d}{dT} \{ \ln(T - T_a) \} \right]_c \quad (5)$$

로그함수의 미분공식을 적용하여 식 (5)를 정리하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left[\left(\frac{E}{R} \right) \cdot \left(\frac{1}{T^2} \right) \right]_c = \left[\frac{1}{T - T_a} \right]_c \quad (6)$$

식 (6)의 양변에 $T^2(T - T_a)$ 를 곱한 후 경계조건인 $T = T_c$ 를 대입하면 $(E/R)(T_c - T_a) = T_c^2$ 이 되고, 이를 정리하면 식 (7)의 2차 방정식이 되므로 그 근을 구하면 식 (8)과 같다.

$$T_c^2 - (E/R)T_c + (E/R)T_a = 0 \quad (7)$$

$$T_c = (E/2R) \{ 1 \pm (1 - 4RT_a/E)^{1/2} \} \simeq T_a + RT_a^2/E \quad (8)$$

따라서 발화가 발생하지 않는 최대의 온도 상승 $(\Delta T)_c$ 는 식 (9)로 표현할 수 있다.

$$(\Delta T)_c \equiv T_c - T_a \simeq (RT_a^2/E) \quad (9)$$

위 식으로부터 Semenov 이론에 따라 발화가 일어나지 않는 최대의 온도 상승은 약 RT_a^2/E 이 되는 것을 알 수 있다. 그러나 Semenov 이론은 0차 반응 또는 발화가 일어날 때까지 소모되는 물질량이 처음의 물질량에 비하여 무시할 수 있을 정도로 매우 작은 경우에만 적용할 수 있다.



2-1-2. Frank-Kamenetskii 이론²¹⁻²²⁾

가연성 고체 물질의 자연발화는 산소가 필요하므로 산소의 확산을 고려할 필요가 있지만, 확산의 영향은 발화한계온도 부근까지는 크지 않기 때문에 산소의 확산 및 그에 따른 기체-고체 간의 열전달을 고려하지 않고, 계 내부의 온도 분포를 고려한 Frank-Kamenetskii의 열 발화 이론을 적용할 수 있다²³⁾.

따라서 Fourier의 열전도식에 Arrhenius형의 반응식을 조합하고, 축 대칭 1차원의 형상을 고려하여 열전도율이 온도 및 장소에 영향을 받지 않는다고 가정하며, 0차 반응으로 볼 경우에 에너지 방정식은 식 (10)이 된다.

$$C_p \rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{J}{X} \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \sigma Q_s A_0 \exp^{-E/RT} \quad (10)$$

여기서 J 는 용기의 형상을 나타내는 파라미터로서 무한 평판일 경우 $J = 0$, 무한 원통일 경우 $J = 1$, 구일 경우 $J = 2$ 이다.

무차원 변환을 이용하여 식 (10)을 해석하기 위해 무차원 온도 θ , 무차원 좌표 ξ , 무차원 시간 τ_d 를 도입한다.

$$\theta \equiv \frac{E}{RT_a^2} (T - T_a) \quad (11)$$

$$\xi \equiv \frac{X}{a} \quad (0 \leq \xi \leq 1) \quad (12)$$

$$\tau_d = \frac{Kt}{C_p \rho a^2} \quad (13)$$

식 (11) ~ (13)을 이용하여 식 (10)을 풀면 식 (14)와 같이 된다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau_d} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \frac{J}{\xi} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} + \delta \exp(-\theta) \quad (14)$$

여기서 δ 는 식 (10)을 푸는 과정에서 발열속도 항에 도입되어야 하는 무차원 반응속도로서 Frank-Kamenetskii 파라미터라 하며 식 (15)와 같다.

$$\delta = \frac{E Q_s a^2 \sigma A_0 \exp^{-E/RT_a}}{KRT_a^2} \quad (15)$$

2-2. 자연발화 이론²⁴⁾

2-2-1. 자연발화의 정의 및 메커니즘

자연발화는 외부로부터 화염 · 전기불꽃 등의 아무런 점화원이 없는 상태에서 물질 자체가 대기 중의 상온에서 스스로 발열하고, 장기간 그 열이 축적되어 발화점에 도달하면서 연소를 일으키는 현상이다. 또한 외부에서 화염 · 전기불꽃 등의 점화원을 주지 않고, 물질을 공기 중에서 가열하였을 때 발화점에 도달하는 주요 과정이 반응열의 축적에 의한 경우도 자연발화에 포함한다.

이와 같은 자연발화가 발생하기 위해서는 다음과 같은 3가지 과정을 거쳐야 한다.

- (1) 물질의 화학반응에 의해 열이 발생한다.
- (2) 발생한 열이 물질의 내부에 축적된다.
- (3) 축열에 의해 물질의 온도가 발화온도를 넘어선다.

(1)과 (3)의 조건은 물질의 고유한 성질 및 양과 관계가 있는 조건이라고 할 수 있지만, 여기에서 주목할 것은 (2)의 조건이다. 열의 축적은 대부분 반응열의 대·소라고 하는 물질의 고유한 성질보다는 물질이 존재하는 환경 조건의 지배를 받는다.

즉, 방열되기 쉬운 상태에 있으면 방열속도가 빨라 열이 축적되기 어

려운 반면에, 방열되기 어려운 상태에 있으면 발열속도가 느려도 충분히 열이 축적될 수 있다. 따라서 자연발화의 특징은 열이 축적되는 과정에 있으며, 환경과 관련한 조건에 깊은 연관이 있는 현상이라 할 수 있다.

자연발화의 특징은 장시간 열의 축적을 필요로 하는 발화를 좁은 의미에서 자연발화 또는 저온출화(低溫出火) 등으로 부르기도 한다.

자연발화는 가열온도나 발화에 이르는 시간경과의 고저, 장단에는 관계가 없는 것으로서, 이 두 가지 형식의 차이는 발화시의 계 내의 온도 분포의 차이일 뿐이다. 즉, 가열온도가 낮은 경우 온도분포의 최대치는 중심에서 발생하고, 가열온도가 높은 경우 외부에 가까운 부분에서 순차 적으로 일어난다.

Fig. 2에는 저온가열 상태와 고온에서 가열될 경우를 나타낸 것으로서, 시간의 변화에 따른 내부에서 열이 축적되어 최초 발화가 발생하는 과정을 나타낸 것이다.

저온상태에서는 외부에서 가열이 될 경우에 외측의 낮은 온도에서 시간이 경과됨에 따라 용기내의 온도가 서서히 증가하게 되고, 용기의 중심에서 온도가 최대가 됨으로서 최초발화는 용기의 중심에서 발생하게 된다.

고온으로 가열될 경우에는 외측의 낮은 온도에서 시간이 경과함에 따라 용기내의 온도가 빠르게 증가하게 되고, 용기의 외측과 용기 중심으로부터 1/2의 지점에서 최초 발화가 발생하게 된다.



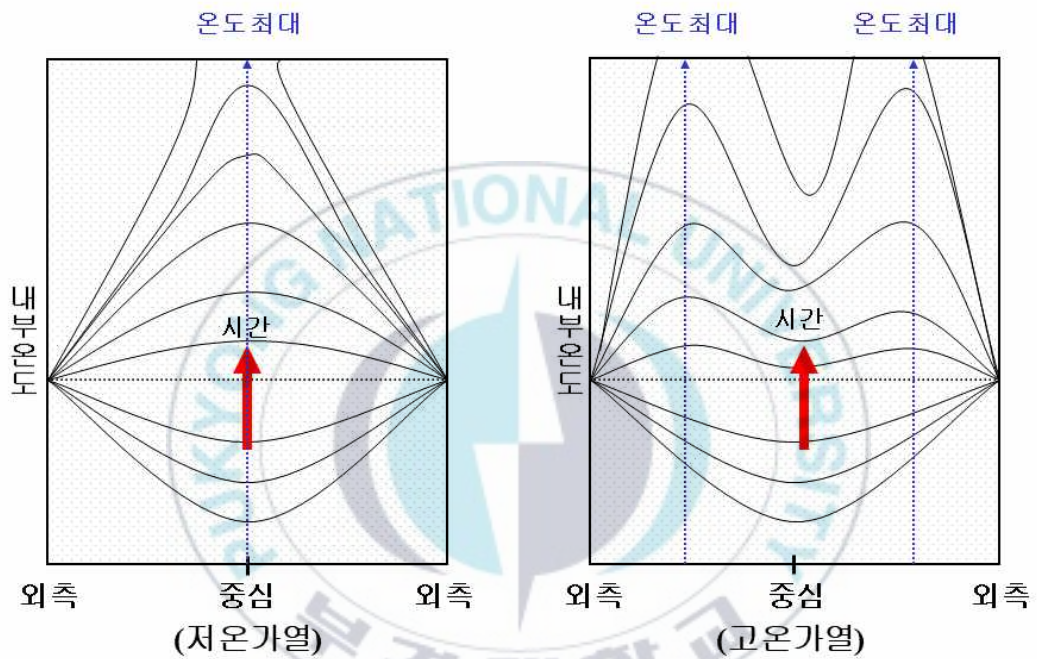


Fig. 2. Relation between ambient temperature and sample inner temperature.

2-2-2. 자연발화에 영향을 주는 인자

자연발화(Auto Ignition)는 물질이 자연 발열하는 속도와 열을 발산하는 속도와의 평형이 깨지면서 열이 축적되어 발생하는 것이므로 열의 발산을 방해하는 인자는 자연발화를 촉진하는 요인이 된다²⁵⁻²⁶⁾.

반응으로 발생하는 열이 축적되면 온도가 상승하고, 반응을 가속한다. 만약 열의 축적 환경이 적절하지 않아 발생하는 반응열보다 열의 손실이 크면 자연발화가 일어날 수 없다.

따라서 주위온도가 높을 경우 반응속도가 빨라지며, 열의 발생이 증가하므로 자연발화가 잘 일어난다.

또한 산소와 접하는 표면적이 크고, 분말이나 액체가 종이 및 포 등 다공성 물질에 스며들면 반응이 쉽게 일어나므로 자연발화하기가 쉬워지며, 산화반응의 속도는 산소의 양에 비례하므로 산소를 함유한 물질이 많을수록 자연발화의 가능성은 커진다.

가연성 물질이 발화점에 도달할 때까지 반응을 유지할 수 있는 충분한 반응물질의 양이 필요하며, 정축매의 존재나 적당한 수분은 열의 발생과 축적을 쉽게 함으로써 자연발화의 발생을 용이하게 한다²⁷⁾.

2-3. 활성화 에너지²⁸⁻²⁹⁾

가연물이 대기 중의 산소에 노출되었을 때 갑자기 발화를 개시하지는 않지만, 특정 수준의 에너지를 공급받으면 발화를 하게 되는 것처럼 어떠한 물질이 자발적인 화학반응을 일으키기 위해서는 반응 전에 최소한의 에너지를 공급받아야 한다. 이처럼 물질의 화학반응을 일으키기 위하여 반응물질에 공급해야 할 최소한의 에너지를 활성화 에너지라고 한다.

Fig. 3은 반응 좌표 및 에너지와의 관계로써 발열반응을 나타낸 것으로, 반응물질에 E만큼의 활성화 에너지가 공급되면 화학반응을 시작할 수 있는 활성화물로 변하며, 이후 연소열 ΔH 를 방출하며 생성물로 전이된다. 발열반응으로부터 활성화 에너지는 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = W - H \quad (16)$$

여기서 E는 활성화 에너지, W는 반응에너지, H는 연소열이다. 그 밖의 다른 방식으로는 (15)를 정리하여 실험을 통해 구한 측정값들을 대입한 후, 최소자승법을 이용하면 그래프의 기울기로부터 걸보기 활성화 에너지를 구할 수 있다.

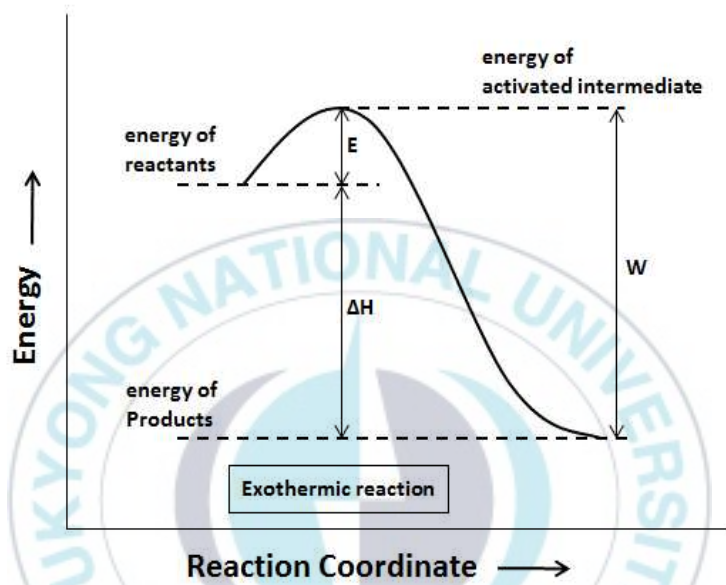


Fig. 3. Relation between reaction coordinate and energy in exothermic reaction.

3. 유지류가 흡착된 가연물의 자연발화 사고사례³⁰⁾

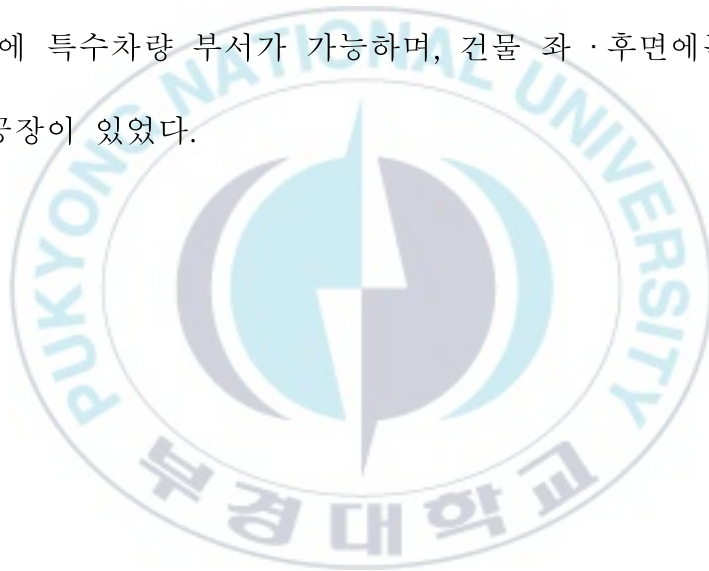
3-1. 화재발생 개요

2020년 4월 부산광역시 강서구 S공장에서 유지류가 흡착된 상태에서 자연발화로 추측되는 원인에 의하여 화재가 발생되었다. 이 화재로 인하여 부동산 3,500 만원, 동산 3,500 만원으로 총 7,000 만원의 재산피해가 발생하였다.

S공장은 콩, 깨, 쌀 등 곡물류를 가공하는 공장으로서, 화재가 발생된 전일 근무자가 기름성분의 이물질이 흡착된 장갑 및 섬유를 세탁하여 자연건조 한 후 창고 내의 박스에 보관하였으며, 묻어있던 기름성분이 완전하게 제거되지 않은 상태에서 태양의 건조과정에서 온도가 상승되어 있던 가연물이 보관되면서 섬유 내부의 온도가 상승하면서 열이 축적되어 발화가 발생된 것으로 사료된다.

3-2. 화재건물 현황 및 주변여건

화재가 발생한 건물은 철골구조 샌드위치판넬 1동(1/0층)이며, 연면적은 약 500㎡, 용도는 공장으로 2013년도에 사용 승인되어 운영하고 있던 회사로서, 비상경보설비가 설치되어 있었으며, 수동식 소화기가 배치되어 있었다. 화재건물은 K소방서에서 약 10km, 최단거리 H 119안전센터에서 약 4km 거리에 위치하고 있으며, 건물 진입로는 협소하나 건물 앞 공터에 특수차량 부서가 가능하며, 건물 좌·후면에는 H스틸 및 S회사 제2공장이 있었다.



3-3. 기상상황

화재발생 당일 해당지역 기상상황을 확인한 결과, 날씨는 맑고, 온도 8.3℃, 습도 80%, 바람은 북서쪽으로 불었다.

풍속은 0~4m/s로 불었으나, 그 외의 특보 사항은 없었다.



3-4. 발화지점

3-4-1. 관계자 진술

화재가 발생한 건물 관계자의 진술은 다음과 같다.

(1) S공장 관계자 A씨의 진술에 의하면 화재발생 전일에 회사 직원 B씨와 함께 곡물을 가공하는 작업(보리볶음 및 고추 분쇄 등)을 하였다고 진술하였다.

(2) S공장 관계자 C씨의 진술에 의하면 화재발생 2일전 오전 8시부터 9시까지 전동 지게차를 운행하였고, 전동 지게차에서 충전기 전원 코드를 분리한 후 화재가 발생한 당일까지 전동 지게차 운행은 없었다고 진술하였다.

3-4-2. CCTV 분석

화재가 발생한 건물의 내부 CCTV를 분석한 결과 다음과 같다.

(1) S공장 내부 CCTV 확인한 바 화재발생 전일 09:45분경 관계자 A씨가 출입 문의 옆 야외 바닥면에서 세탁된 목장갑 및 섬유 등을 펼쳐서 자연건조 시키는 장면이 확인된 것을 Photo 1에 나타내었다.

(2) CCTV의 영상에서 화재발생 전일 관계자 A씨가 섬유를 박스에 올려놓는 장면을 살펴보면, 섬유의 상태가 오염물질(들기름 등 기름성분의 이물질)이 흡착된 상태인 것으로 식별되는 바 세탁과정에서 섬유에 묻어있던 이물질이 완전하게 제거되지 않은 상태로 자연건조(직사광선) 한 후 창고 내의 보관 박스 위에 올려놓은 것으로 확인되었다.

(3) CCTV의 영상을 확인한 결과, 화재발생 당일 04:50분경 섬유를 보관하는 박스의 부위에서 소량의 검은 연기 및 화염이 관찰되었으며, 04:59분경에는 육안으로 쉽게 확인 될 정도의 화염이 관찰되었다. 또한 05:01분경 부터는 섬유를 보관하는 박스의 옆에 보관 중이던 감자전분 등으로 연소가 확대 되면서 순간적으로 폭발하는 영상도 확인되었다.



Photo 1. Textiles being dried outdoors.

3-4-3. 연소진행 상황

화재발생 연소 진행 상황은 아래와 같다.

(1) 현장 도착 당시 공장 내부는 최성기로 검은연기 및 화염이 분출하면서 급격히 연소가 진행되는 상황으로 샌드위치 패널 건물의 외부벽체와 지붕까지 소손된 상태이고, 공장 내부의 곡물 가공설비 및 냉장창고에 보관되어 있던 쌀, 콩 및 깨 등 곡물류와 포장박스, 유리병 등이 전소되었다.

(2) 화재 장소는 H빔 골조의 샌드위치 패널 벽체와 지붕으로 된 단층 공장 건물로서 출입구 좌측 바닥에는 전동 지게차 충전기와 곡물류 가루 및 들기름 등을 담은 섬유 보관 박스와 감자전분 마대가 쌓여있었고, 포장비닐 및 포장박스 상당량 등 연소가 쉬운 가연물이 보관되어 있는 상태였으며, 화재가 발생되기 전의 건물 내부를 Photo 2에 나타내었다.

(3) 공장 내부 칸막이 안쪽 부위는 곡물 가공설비보다 천장과 벽면이 더 심하게 수열을 받아 백화현상 및 열적 변형이 관찰되는 것으로 보아 천장에서 화염이 타고 내려온 것으로 추정되며, 세척대 우측에 설치되

어 있던 볶음 기계 연통의 상부가 더 심하게 소손된 것으로 보아 천장면에서 아래로 화염이 진행된 것으로 추정되었다.

(4) 세척대와 곡물 분쇄기 등도 상부가 더 심하게 소훼된 것으로 보아 공장 칸막이 앞쪽(출입구) 부위에서 천장면을 따라 연소가 진행된 것으로 추정되었다.

(5) 공장 출입문 인근 섬유 보관박스를 중심으로 주변 적재물(감자전분 마대 및 포장비닐 등)이 쌓여있던 부위가 심부까지 심하게 탄화되면서 바닥면까지 소손된 것이 관찰되었다.

(6) CCTV의 영상에서도 섬유가 보관된 박스부위에서 주변 가연물로 연소 진행된 것으로 확인되었다.

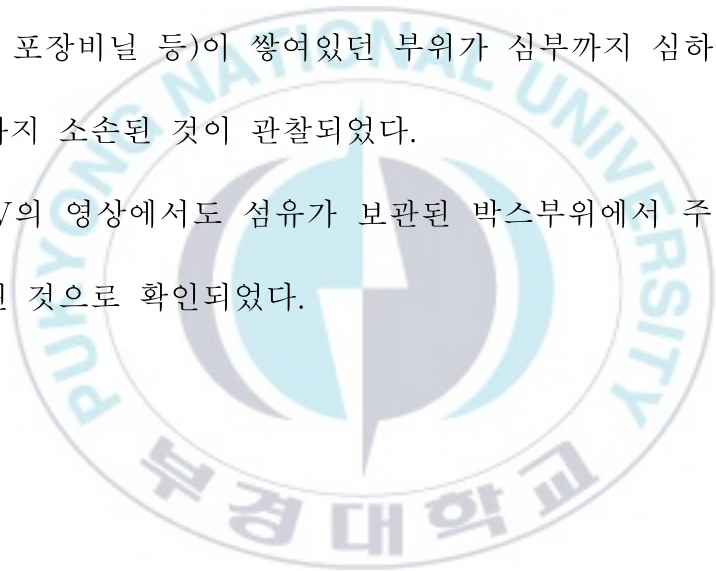




Photo 2. Inside view of the building before the fire.

3-4-4. 발화지점 판정

관계자의 진술과 CCTV를 확인한 결과, 가연물의 배치 및 연소의 형태 등을 종합하여 불 때 공장 출입문 좌측에 놓여있던 섬유를 보관하는 박스에서 최초 발화하여 주변 가연물을 연소가 진행되어 공장 내부의 전체로 화염이 확산된 것으로 판단되며, Photo 3에는 최초 화재가 발생된 지점을 점선의 원으로 표시하였다.





Photo 3. Fire origin at CCTV.

3-5. 화재원인

화재가 발생한 원인은 화학적 요인으로서 다음과 같이 진행된 것으로 판단된다.

(1) 최초 발화지점 부위에는 섬유를 보관하는 박스와 감자전분의 마대, 포장비닐 및 포장박스 등 연소가 용이한 일반 가연물이 많이 있었다.

(2) 섬유를 보관하는 박스는 심부까지 심하게 탄화되어 바닥면에서 탄화흔이 관찰되었다.

(3) 내부 CCTV의 영상을 살펴보면, 화재발생 전일 09:45분경 관계자 A씨가 출입문의 옆 야외 바닥면에 세탁된 목장갑 및 섬유 등을 펼쳐서 자연건조시키는 장면이 확인되었다.

(4) 화재발생 전일 17:37분경에 섬유를 보관하는 박스에 올려놓는 장면에서 섬유의 상태가 오염물(들기름 등 기름성분의 이물질)이 흡착된 상태인 것으로 식별되는 바 세탁과정에서 섬유에 묻어있던 이물질이 완

전하게 제거되지 않은 상태로 자연건조 한 후 보관하는 박스 위에 올려 놓은 것으로 판단된다.

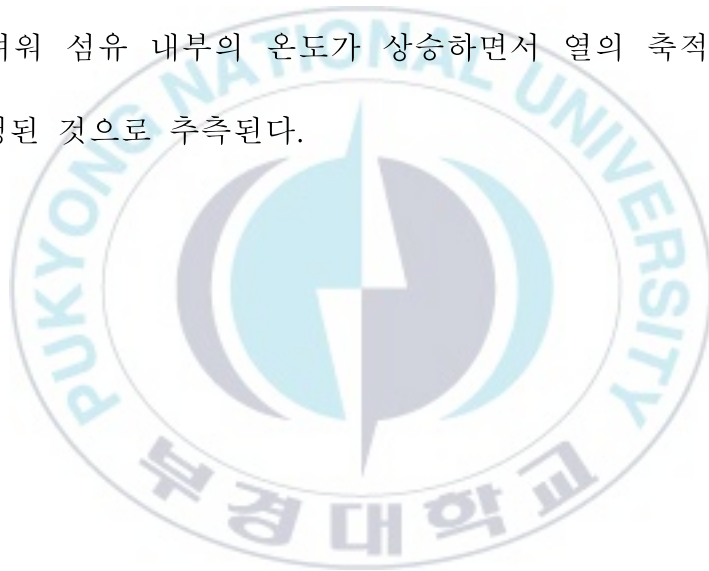
(5) 기상청에서 화재발생 당일 날씨를 확인한 결과 낮 최고온도가 19.1℃로 야외 바닥면에서 약 6시간 동안 장갑 및 섬유를 자연건조 하였다. 이는 섬유에 흡착된 오염물에 의하여 내부의 온도가 상승하면서 열의 축적이 발생될 가능성이 높은 것으로 판단된다.

(6) 자연건조 과정에서 직사광선에 장시간 노출된 가연성 섬유 더미를 모아서 공장 내부의 보관박스에 올려놓음으로써 산화 시 발생하는 열의 방출이 어려워서 섬유 뭉치 내부의 온도가 상승하면서 축열되어 자연발화가 발생된 것으로 판단된다.

(7) 공장 내부 CCTV의 영상에서도 공장 출입문 인근 섬유 보관박스의 부위에서 최초 연기가 발생하는 것이 확인되었고, 약 5분 이상 무염 연소가 지속되었으며, 불꽃과 함께 주변가연물로 화염이 급격하게 확산 되는 것을 확인하였다.

3-6. 화재조사 결과

화재가 발생한 원인을 판단하기 위하여 관계자 진술 및 공장 내부의 가연물의 배치, CCTV의 영상분석 및 연소형태 등을 종합하여 불 때 세탁과정에서 섬유에 묻어있던 이물질(들기름 등 기름성분)이 완전하게 제거되지 않은 상태로 장시간 자연건조한 후 가연성 물질인 섬유더미를 모아서 공장 내부의 보관박스에 올려놓음으로써 산화 시 발생하는 열의 방출이 어려워 섬유 내부의 온도가 상승하면서 열의 축적이 발생되어 화재가 발생된 것으로 추측된다.



4. 실험장치 및 방법

4-1. 실험장치

자연발화 실험에 사용한 장치는 Photo 4와 같으며, 건조기, 열전대, 온도제어장치, 기록계와 시료용기로 구성되어 있다.

건조기는 내용적 91.125 ℓ (45 cm × 45 cm × 45 cm)의 열풍 순환식 건조기로 내부의 온도분포를 일정하게 유지하였으며, 건조기의 가열히터는 300℃까지 온도를 상승시킬 수 있으며, PID조절에 의하여 전류값을 변화시켜 내부의 온도를 조절하게 된다. 온도측정용 열전대는 주위 온도의 제어 및 측정용과 시료의 중심온도 측정용인 Chromel-Alumel 열전대 2개로서 직경은 0.35 mm이고, 주위온도의 제어 및 측정용과 시료의 중심온도 측정용으로 사용하였으며, 전자는 시료용기와 건조기의 벽면중심에 설치하고, 후자는 시료용기의 중심에 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 전류치를 제어하도록 하였다. 온도기록장치(제조사: Yoko gawa, model 4151)는 펜형 기록계로서 설정온도 및 시료중심 온도를 연속적으로 기록하도록 되어 있다.

시료용기는 가로 30 cm, 세로 30 cm, 폭이 30 cm의 크기로 형상을 입방체로 하여 무한평판에 접근하도록 하였으며, 이 용기는 다공판의 스테인리스 통으로 제작하여 6면 방향으로 열전달이 고르게 이루어지도록 하였다.

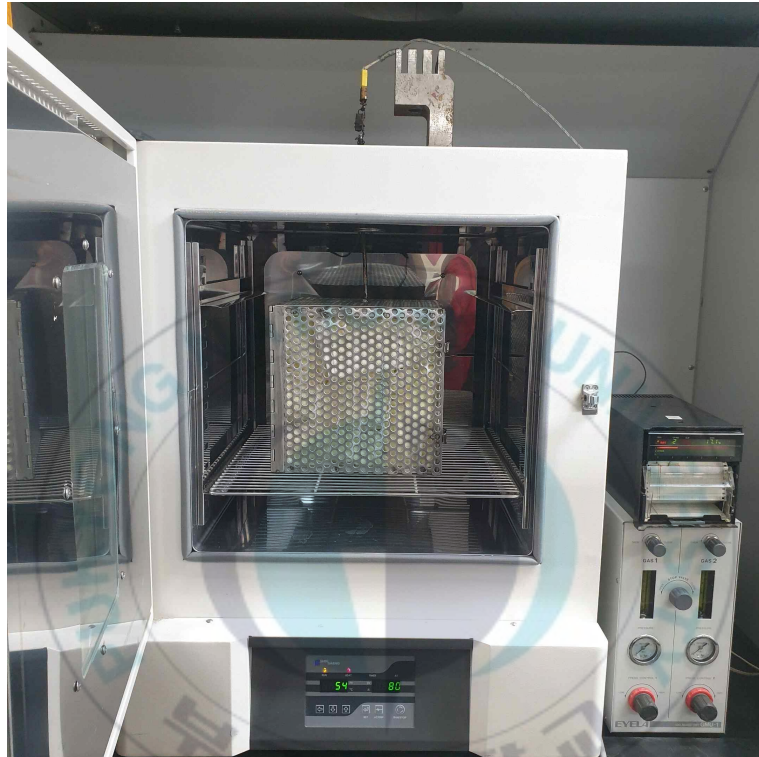
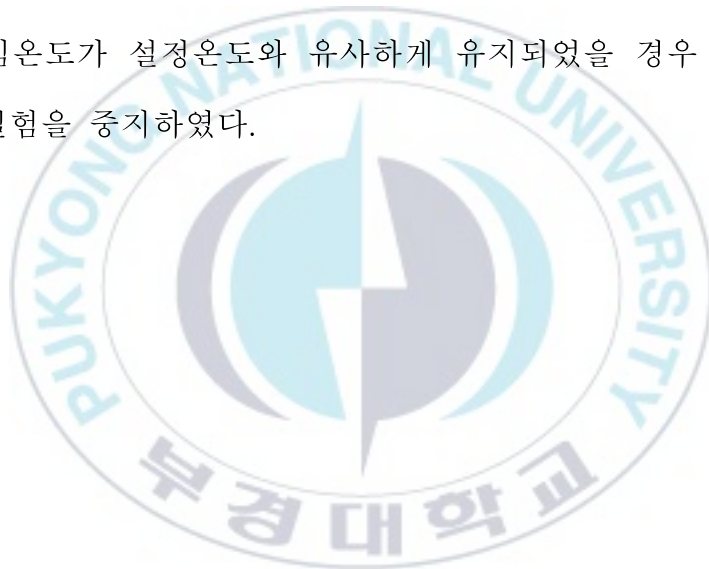


Photo 4. Experimental apparatus for spontaneous ignition.

4-2. 실험방법

실험은 온도제어 장치의 프로그램을 미리 설정하여 소정의 온도로 가열된 건조기의 중심에 시료용기를 넣고, 열전대를 시료용기의 중심부, 시료용기와 벽면과의 공간 중앙부에 같은 높이가 되도록 설치하였다.

시료용기를 실험장치에 넣은 후 시료의 중심온도 변화를 관찰하여 중심온도가 설정온도 보다 상승하고 화재가 발생하였을 때를 「발화」로 판정하여, 시료의 중심온도 최대치를 확인한 후 실험을 중지하였으며, 시료의 중심온도가 설정온도와 유사하게 유지되었을 경우 「비발화」로 판정하고 실험을 중지하였다.



5. 실험 시료

타올의 자연발화 실험을 하기 위하여 (주)스타올에서 공급한 OO전자의 실험용으로 사용되는 동일한 재료의 백색타올(40 cm × 75 cm)을 사용하였으며, 오염물질은 건성유인 아마씨유, 반건성유인 옥수수유 및 불건성유인 올리브유를 사용하였으며 각 성상을 Photo 5~7에 나타내었다.

오염물질로 사용된 3종의 식물유를 타올에 고르게 분포하기 위하여 분사 기기는 일본 Hitachi사의 Air compressure(5 kgf/cm²·g)와 일본 De Vilbiss(No.243)의 스프레이 건을 사용하여 타올 한 장에 7분(75 ml) 가량의 속도로서 고르게 분포하였으며, 실제 작업하는 모습을 Photo 8에 나타내었다.



Photo 5. Olive oil used in the experiment.

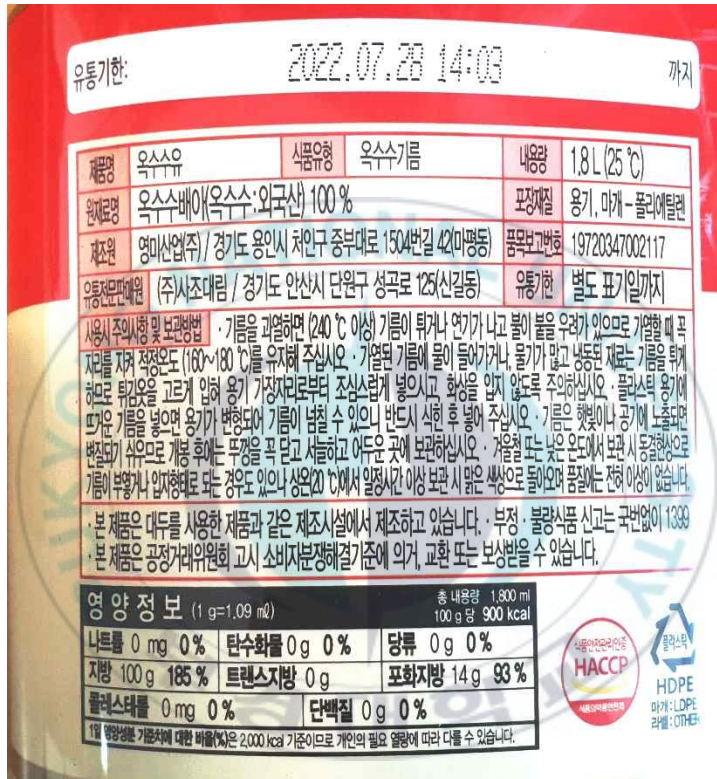


Photo 6. Corn oil used in the experiment.

FLAXSEED OIL

... 아마씨유 ...

웰빙시대에는
기름도 건강을 생각합니다.
필수 지방산인 **오메가-3** 지방산을
일반 식생활에 접목시킨
웰빙유입니다.

[제품명] 아마씨유
[식품유형] 기타식용유지(압착)
[원재료명 및 함량]
아마씨 100%(캐나다)
[용량] 별도표기(제품 표기)
[포장재질] 유리병, 폴리에틸렌
[보관방법] 개봉후 냉장보관
[제조원] 씨농샘골
서울시 성북구 종암동 8-77
[판매원] 신영허브
서울특별시 동대문구 제기동 1115-1
[소비자 상담] 02-963-9255
[반품 및 교환장소] 구입처

Photo 7. Flaxseed oil used in the experiment.

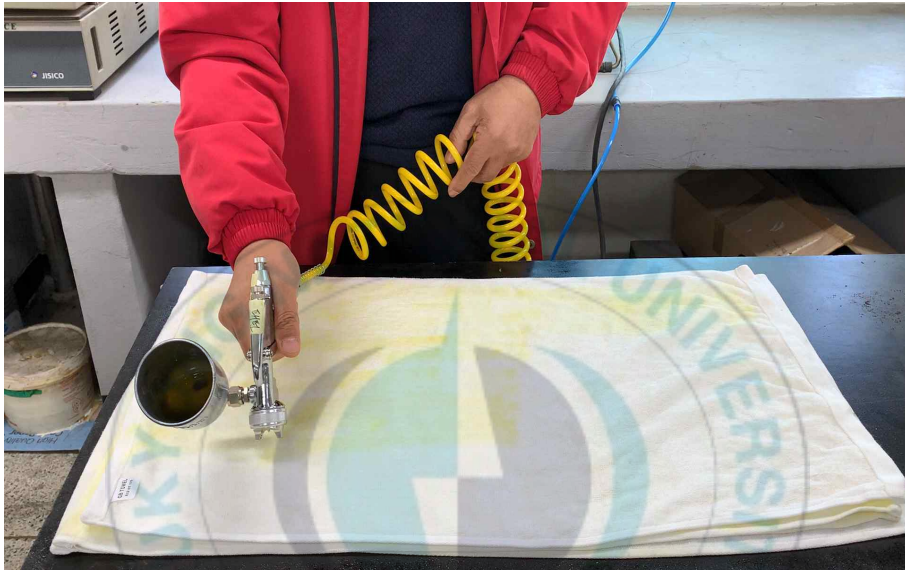


Photo 8. Oil sprayed onto the towel for experimentation.

6. 실험결과 및 고찰

6-1. 자연발화 했을 경우 용기 내의 탄화된 형상

자연발화는 열의 축적과정에서 생기는 발화현상으로 직접적인 착화원이 없다는 것이 큰 특징으로서, 실제 생산 현장에서 시료를 저장하는 공정의 저장탱크에서 분체가 발화하여 화재를 일으킨 사고가 종종 발생하고 있으며, 이러한 사고를 예방하기 위해서는 직접적인 실험을 통해서 얼마의 적층 두께에서 발화하는 가를 알아야만 한다. 또한 2019년 부산의 참기름을 제조하는 사업장에서 참기름이 묻은 빨래한 장갑 등을 창고에 보관 중에 화재가 발생한 예도 자연발화로 인하여 발생된 것으로 파악되었다.

어떤 물질이 자연발화 되어 화재가 발생하는 온도를 구하는 것은 대단히 어렵지만, 임의의 온도에서 실험을 행하여 발화의 유무를 확인한 후, 발화가 되면 온도를 낮추고, 발화가 되지 않으면 온도를 상승시켜 발화되는 온도와 발화되지 않는 경계온도를 구할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 무한평판이라고 가정할 수 있는 퇴적 상태로 만들기 위해 직육면체의 시료 용기를 제작하였으며, 시료용기는 가로 30 cm, 세로 30 cm, 폭이 30 cm의 크기로 형상을 입방체로 하여 무한평판에 접근하도록 하였으며, 이 용기는 다공판의 스테인리스 통으로 제작하여 6면 방향으로 열전달이 고르게 이루어지도록 하였다. 이것은 외부의 온도에 대한 열의 이동으로 축적현상을 관찰하기 위해 고안된 것이

다. 물론 이러한 실험장치는 이론과 실험장치에서 소개된 바와 같이 많은 이론적 근거를 바탕으로 제작되어진 것이다.

건조기의 온도를 70℃로 하고, 시료 용기내의 타올을 20장으로 했을 경우에 화재가 발생된 형상을 Photo 9~11에 나타내었다.

건조기의 내부에 설치된 용기를 보면 화재로 발생된 열로 인하여 스텐레스의 색상이 회색에서 연한 황금색상으로 변한 것을 볼 수 있다. 또한 용기의 하부에는 타올의 잔사가 하부로 떨어져 있는 것을 볼 수 있었다.

시료 용기를 개방한 결과 타올 20장은 전부 연소되었으며, 탄화된 Ash가 있는 것을 확인하고, 외부 용기로 옮겨 사진을 촬영한 것을 동시에 나타내었다.

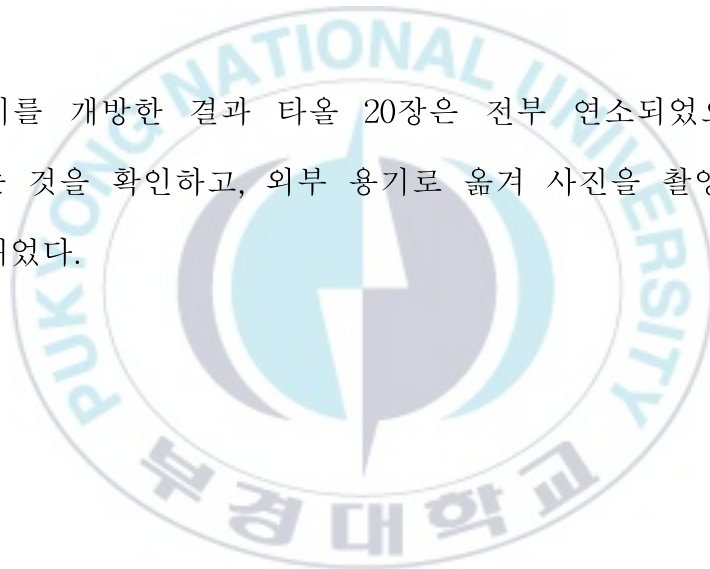




Photo 9. When spontaneously ignited, the carbonized shape in the container.



Photo 10. Residue shape of towel burnt in filling container.



Photo 11. Residue of carbonized towels.

6-2. 건성유인 아마씨유의 발화 실험

6-2-1. 아마씨유 75 ml 도포

6-2-1-1. 타올 5장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 건성유인 아마씨유 75 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 5장으로 실험한 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 37시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었으며, 설정온도가 지남에 따라 급격하게 시료용기 내의 온도가 상승되고 연소가 지속되면서 약 540℃를 상회하고 가연물이 연소가 된 후 서서히 온도가 낮아지는 것을 확인하였다. 또한 발화로 인하여 시료용기 내의 화염에 의한 열의 분출로 인하여 건조기 내부의 온도도 상승되어 약 140℃로 열이 전달 되는 것을 볼 수 있다.

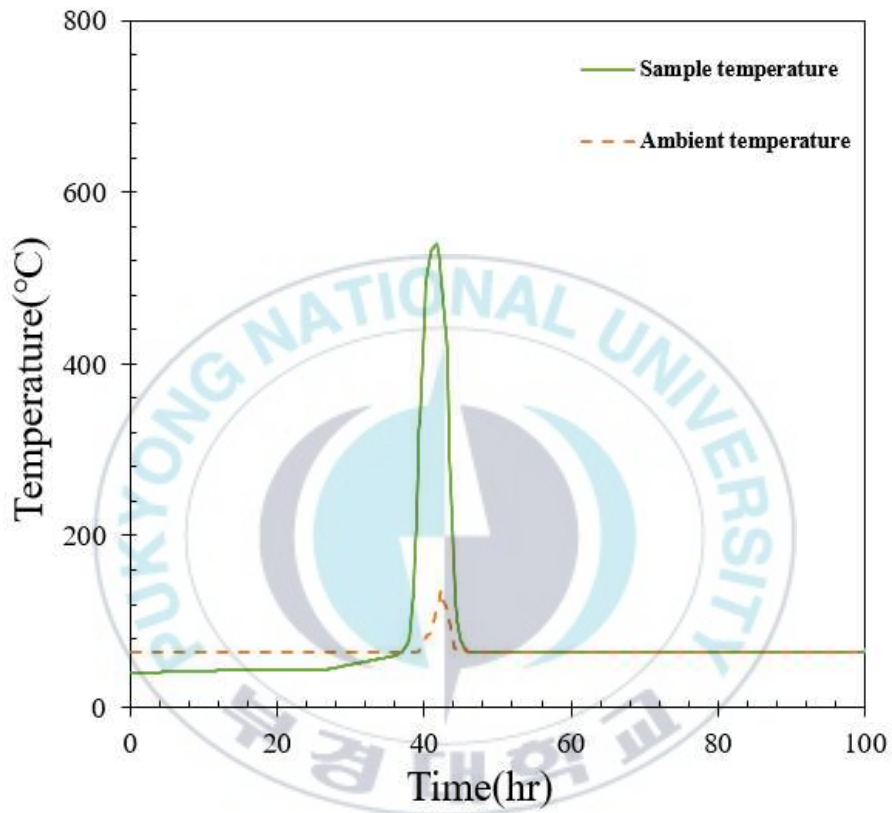


Fig. 4. Variation of temperature with time for number of towels 5, ambient temperature 65°C.

6-2-1-2. 타올 10장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 건성유인 아마씨유 75 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 10장으로 실험한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 48시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었으며, 약 50시간이 지남에 따라 급격하게 시료용기 내의 온도가 상승되고 연소가 지속되면서 약 560℃를 상회하고 가연물이 연소가 된 후 서서히 온도가 낮아지는 것을 확인하였다. 또한 발화로 인하여 시료용기 내의 화염에 의한 열의 분출로 인하여 건조기 내부의 온도도 상승되는 것을 볼 수 있다.

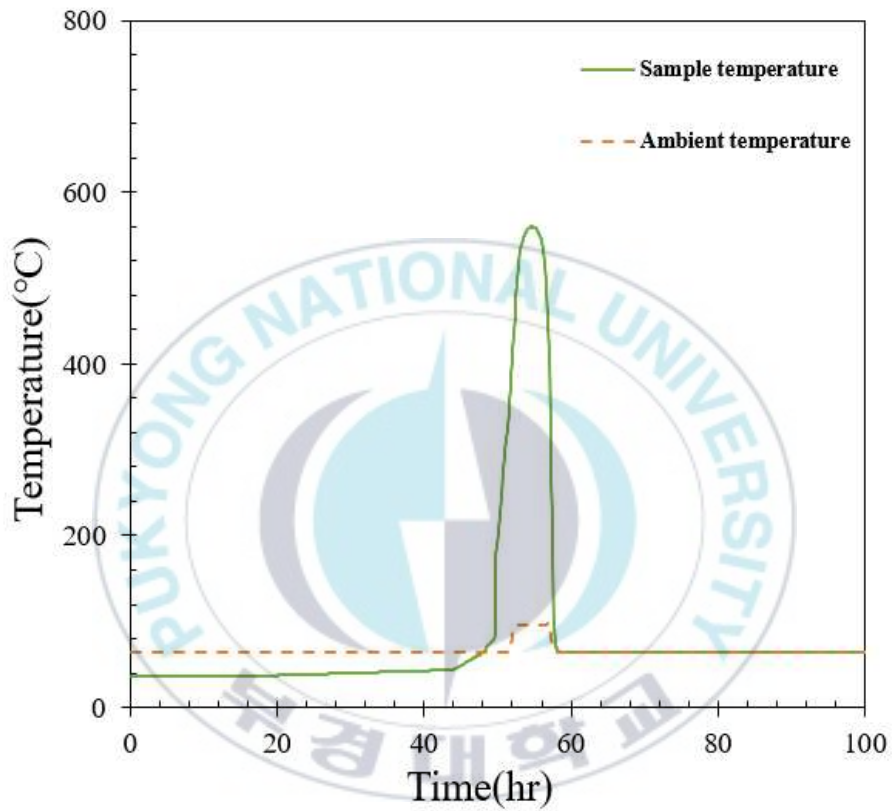


Fig. 5. Variation of temperature with time for number of towels 10, ambient temperature 65°C.

6-2-1-3. 타올 15장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 건성유인 아마씨유 75 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 15장으로 실험한 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 56시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었을 때 시료용기 내의 온도가 급격하게 상승되고 연소가 지속되면서 약 524℃를 상회하고 가연물이 연소가 된 후 서서히 온도가 낮아지는 것을 확인하였다. 또한 발화로 인하여 시료용기 내의 화염에 의한 열의 분출로 인하여 건조기 내부의 온도도 약 285℃상승되었다. 이것은 시료인 타올의 매수가 많아 연소되면서 내부의 열이 실험 장치로 열이 전달 되는 것으로 판단된다.

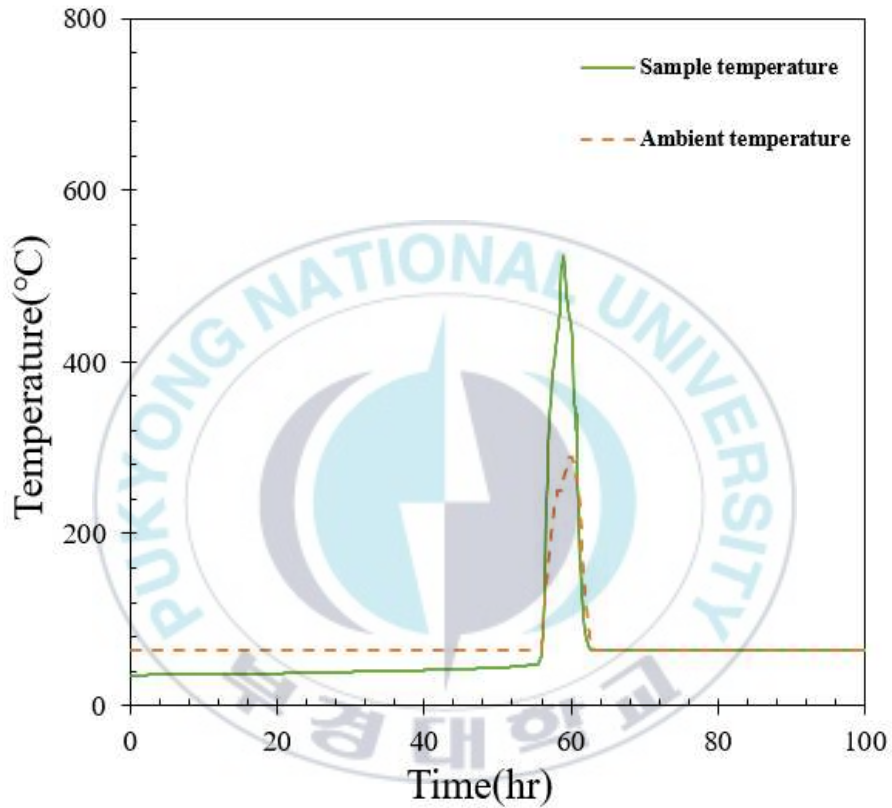


Fig. 6. Variation of temperature with time for number of towels 15, ambient temperature 65°C.

6-2-2. 아마씨유 50 ml 도포

6-2-2-1. 타올 5장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 건성유인 아마씨유 50 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 5장으로 실험한 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 32시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었을 때 시료용기 내의 온도가 급격하게 상승되고 최고온도에 도달하는 시간이 36.5시간에서 약 480℃를 상회하고 가연물이 연소가 된 후 서서히 온도가 낮아지는 것을 확인하였다.

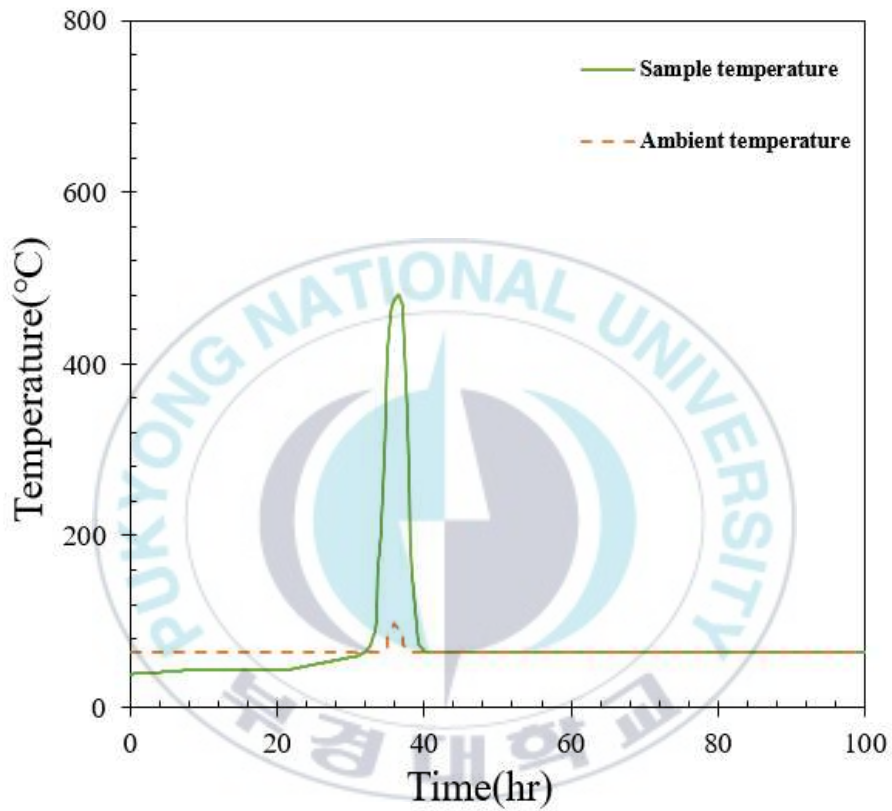
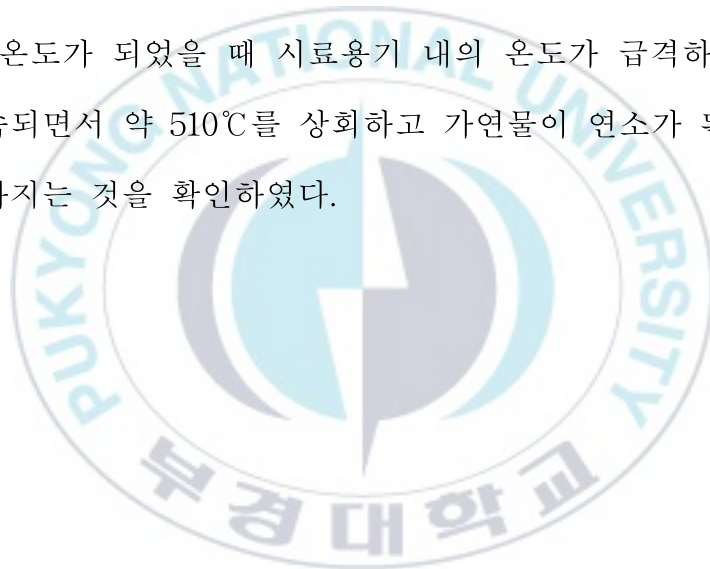


Fig. 7. Variation of temperature with time for number of towels 5, ambient temperature 65°C.

6-2-2-2. 타올 10장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 건성유인 아마씨유 50 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 10장으로 실험한 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 50시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었을 때 시료용기 내의 온도가 급격하게 상승되고 연소가 지속되면서 약 510℃를 상회하고 가연물이 연소가 된 후 서서히 온도가 낮아지는 것을 확인하였다.



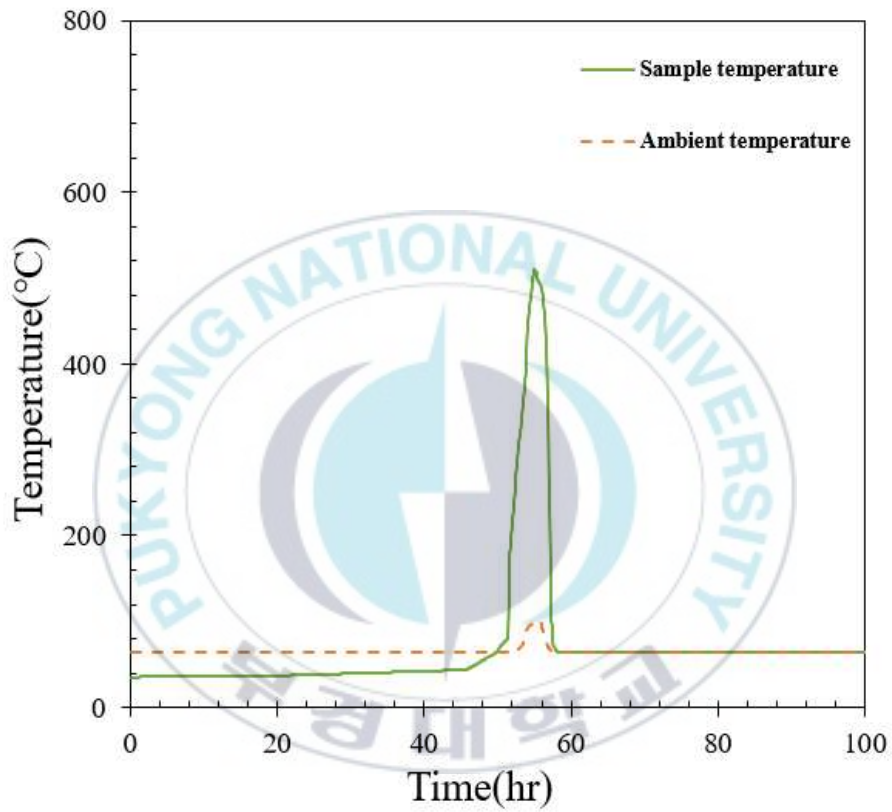


Fig. 8. Variation of temperature with time for number of towels 10, ambient temperature 65°C.

6-2-2-3. 타올 15장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 건성유인 아마씨유 50 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 15장으로 실험한 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 63.5시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었을 때 시료용기 내의 온도가 급격하게 상승되고 연소가 지속되면서 약 685℃를 상회하고 가연물이 연소가 된 후 서서히 온도가 낮아지는 것을 확인하였다. 또한 발화로 인하여 시료용기 내의 화염에 의한 열의 분출로 인하여 건조기 내부의 온도도 약 250℃ 상승되었다. 이것은 시료인 타올의 매수가 많아 연소되면서 내부의 열이 실험장치로 열이 전달 되는 것으로 판단된다.

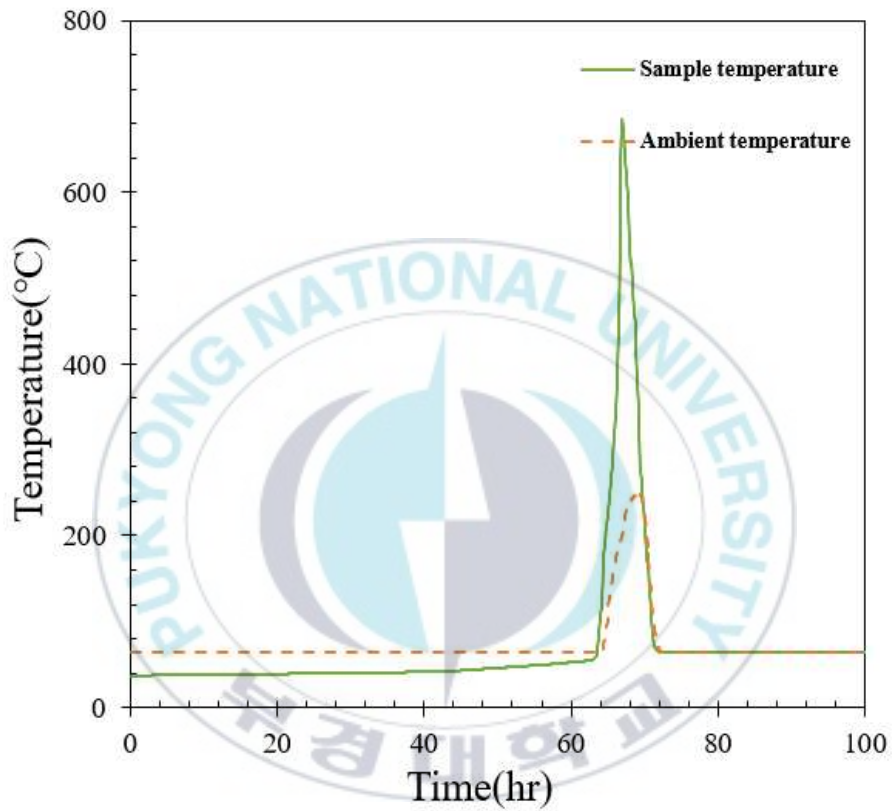


Fig. 9. Variation of temperature with time for number of towels 15, ambient temperature 65°C.

6-2-3. 아마씨유 25 ml 도포

6-2-3-1. 타올 5장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 건성유인 아마씨유 25 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 5장으로 실험한 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 25.1시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었을 때 시료용기 내의 온도가 상승되고 연소가 지속되면서 27.7시간에서 약 209℃의 최고 상승온도를 기록하였으며, 가연물이 연소가 된 후 서서히 온도가 낮아지는 것을 확인하였다.

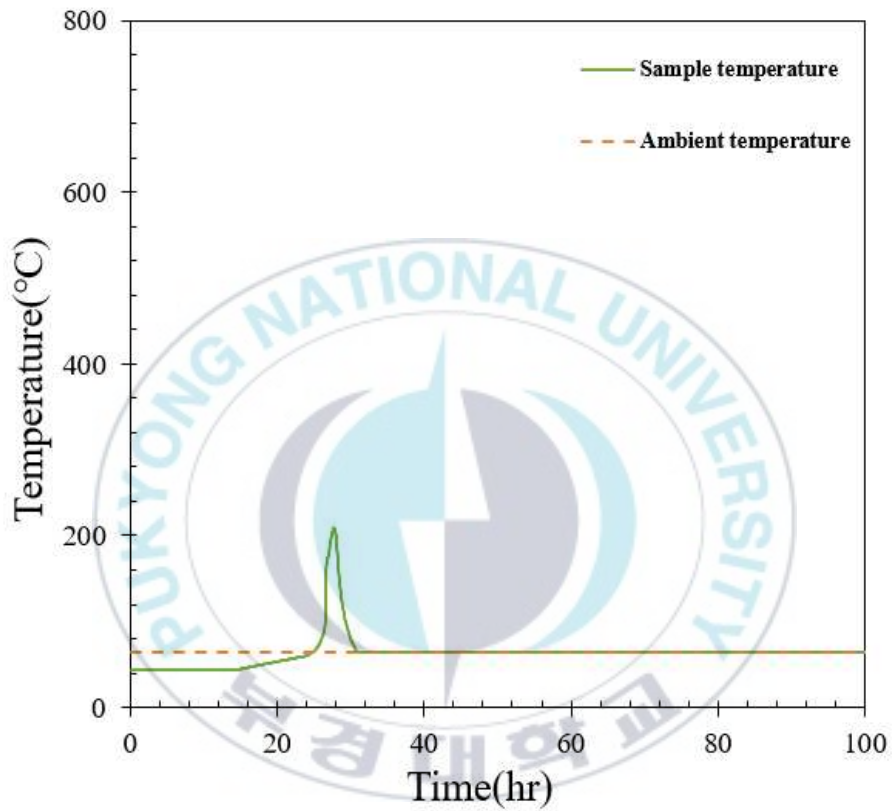
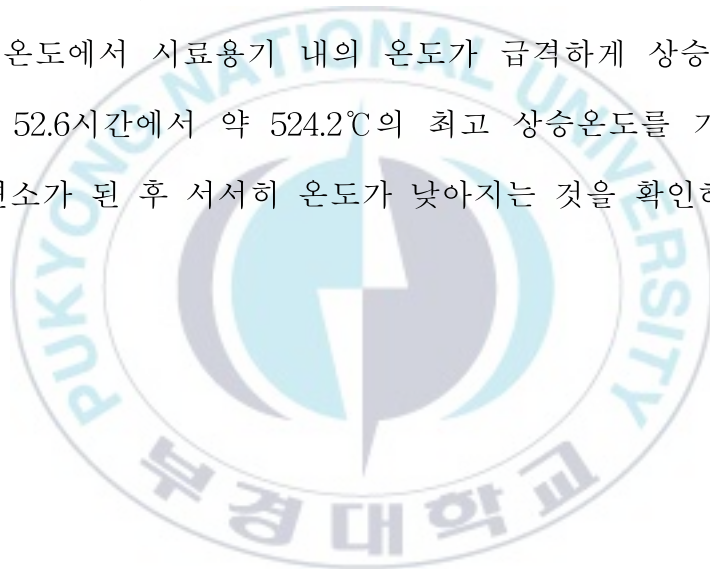


Fig. 10. Variation of temperature with time for number of towels 5, ambient temperature 65°C.

6-2-3-2. 타올 10장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 건성유인 아마씨유 25 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 10장으로 실험한 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 46시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도에서 시료용기 내의 온도가 급격하게 상승되고 연소가 지속되면서 52.6시간에서 약 524.2℃의 최고 상승온도를 기록하였으며, 가연물이 연소가 된 후 서서히 온도가 낮아지는 것을 확인하였다.



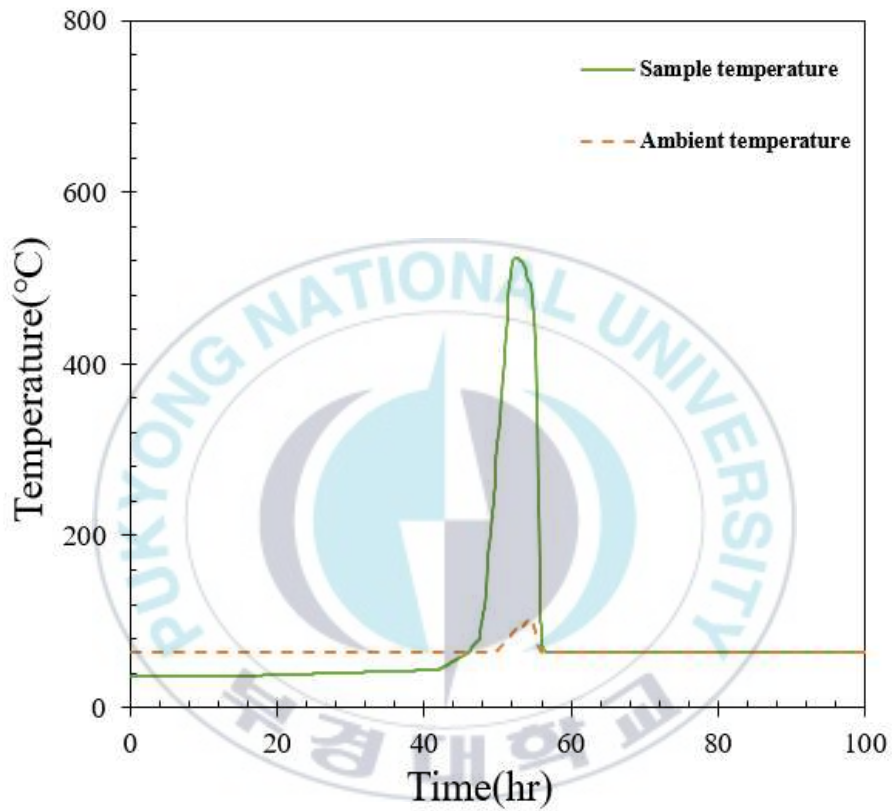


Fig. 11. Variation of temperature with time for number of towels 10, ambient temperature 65°C.

6-2-3-3. 타올 15장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 건성유인 아마씨유 25 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 15장으로 실험한 결과를 Fig. 12에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 62시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었으며, 시료용기 내의 온도가 급격하게 상승되고 연소가 지속되면서 71.1시간이 경과되었을 때 약 539℃의 최고온도를 기록하였으며, 가연물이 연소가 된 후 서서히 온도가 낮아지는 것을 확인하였다. 또한 발화로 인하여 시료용기 내의 화염에 의한 열의 분출로 인하여 건조기 내부의 온도도 약 250℃ 까지 상승되었다. 이것은 시료인 타올의 매수가 많아 연소되면서 내부의 열이 실험장치로 열이 전달되는 것으로 판단된다.

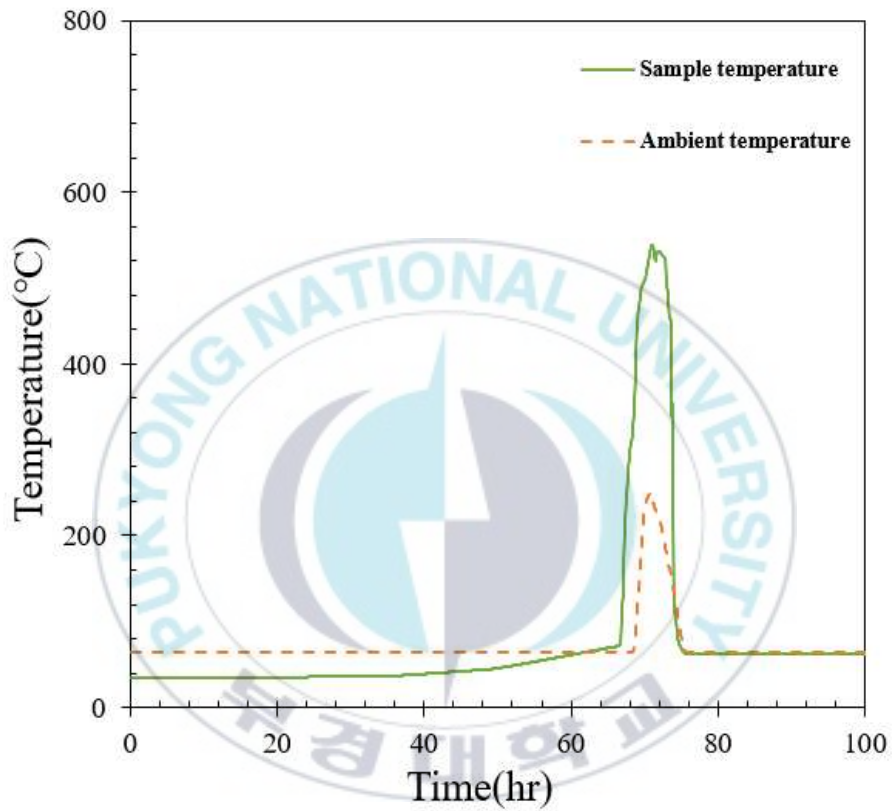


Fig. 12. Variation of temperature with time for number of towels 15, ambient temperature 65°C.

6-3. 반건성유인 옥수수유의 발화 실험

6-3-1. 옥수수유 75 ml 도포

6-3-1-1. 타올 5장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 반건성유인 옥수수유 75 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 5장으로 실험한 결과를 Fig. 13에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 37시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었으며, 시료용기 내의 온도가 급격하게 상승되고 연소가 지속되면서 40.9시간에서 약 580℃의 최고 상승온도를 기록하였으며, 가연물이 연소가 된 후 서서히 온도가 낮아지는 것을 확인하였다.

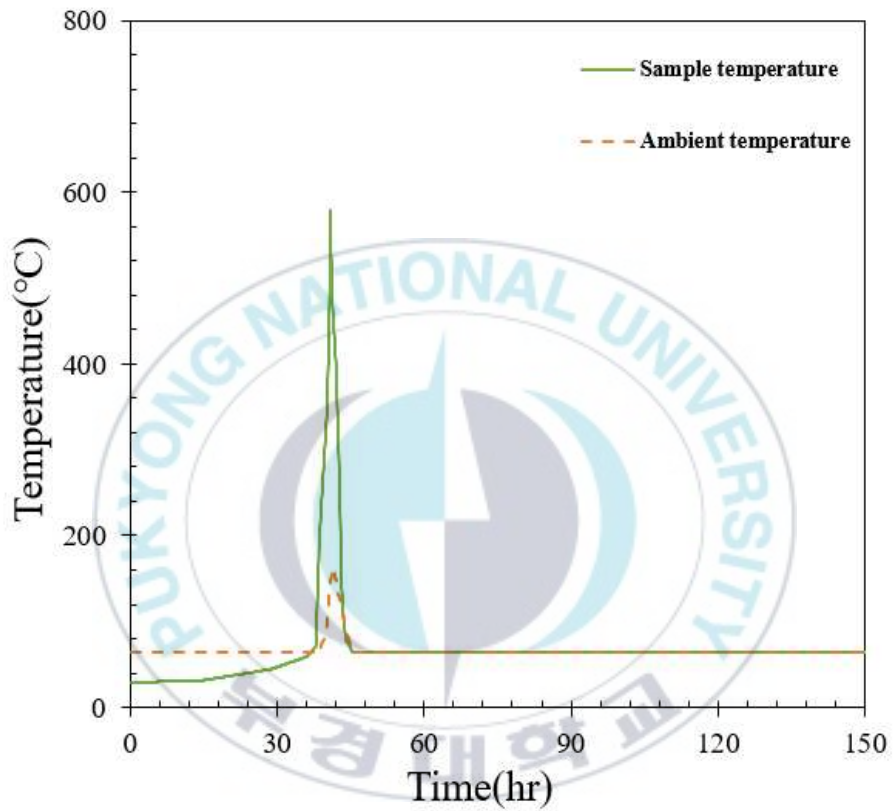
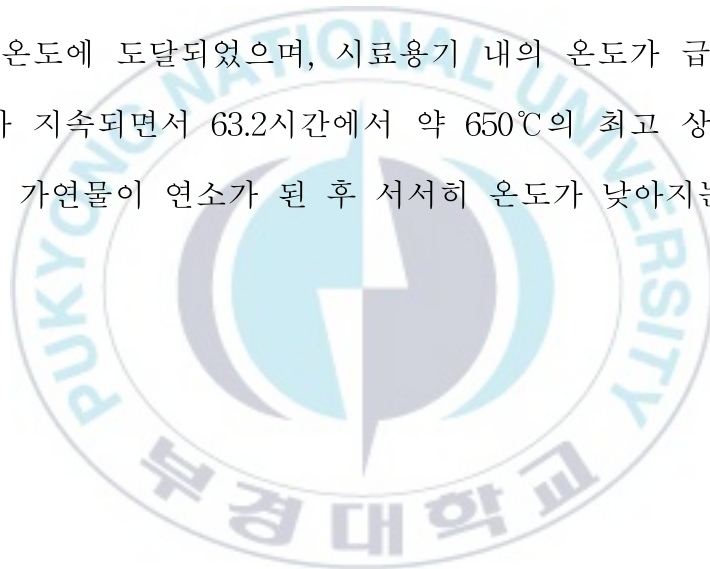


Fig. 13. Variation of temperature with time for number of towels 5, ambient temperature 65°C.

6-3-1-2. 타올 10장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 반건성유인 옥수수유 75 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 10장으로 실험한 결과를 Fig. 14에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 55시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도에 도달되었으며, 시료용기 내의 온도가 급격하게 상승되고 연소가 지속되면서 63.2시간에서 약 650℃의 최고 상승온도를 기록하였으며, 가연물이 연소가 된 후 서서히 온도가 낮아지는 것을 확인하였다.



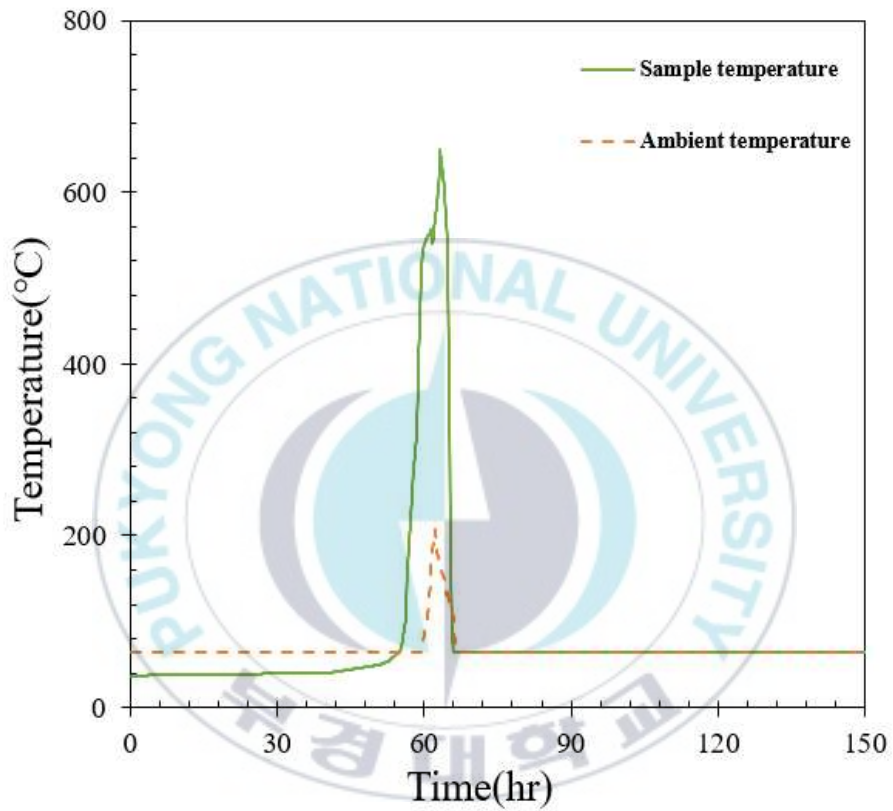


Fig. 14. Variation of temperature with time for number of towels 10, ambient temperature 65°C.

6-3-1-3 타올 15장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 반건성유인 옥수수유 75 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 15장으로 실험한 결과를 Fig. 15에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 71시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었으며, 시료용기 내의 온도가 급격하게 상승되고 연소가 지속되면서 74.6시간이 경과되었을 때 약 634℃의 최고온도를 기록하였으며, 가연물이 연소가 된 후 서서히 온도가 낮아지는 것을 확인하였다. 또한 발화로 인하여 시료용기 내의 화염에 의한 열의 분출로 인하여 건조기 내부의 온도도 약 280℃ 까지 상승되었다. 이것은 시료인 타올의 매수가 많아 연소되면서 내부의 열이 실험장치로 열이 전달되는 것으로 판단된다.

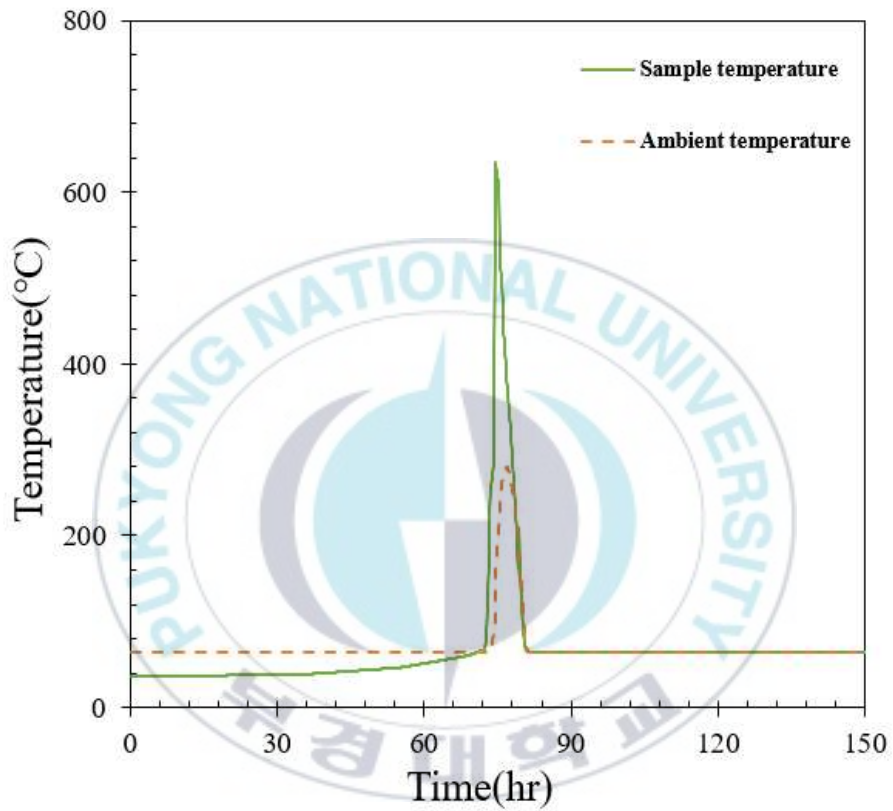


Fig. 15. Variation of temperature with time for number of towels 15, ambient temperature 65°C.

6-3-2. 옥수수유 50 ml 도포

6-3-2-1. 타올 5장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 반건성유인 옥수수유 50 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 5장으로 실험한 결과를 Fig. 16에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 49.2시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었으며, 시료용기 내의 온도가 상승되고 연소가 지속되면서 52.8시간에서 약 624.3℃의 최고 상승온도를 기록하였으며, 가연물이 연소가 된 후 서서히 온도가 낮아지는 것을 확인하였다.

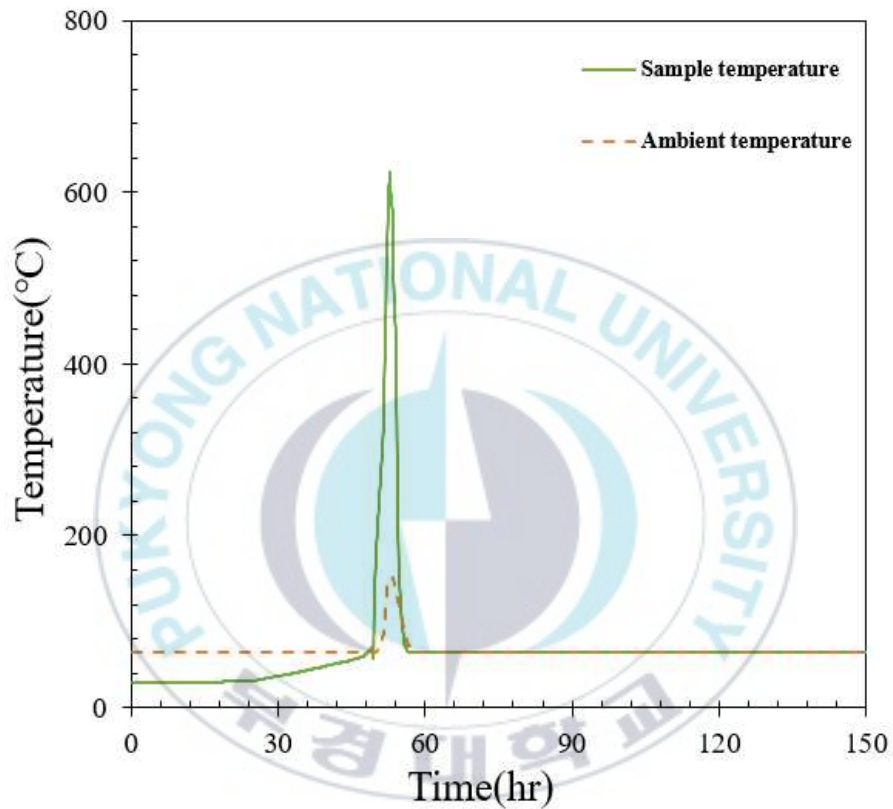
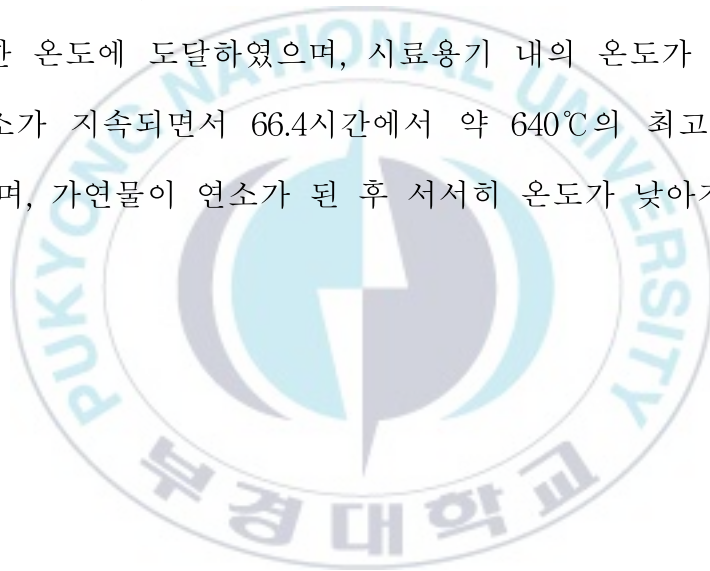


Fig. 16. Variation of temperature with time for number of towels 5, ambient temperature 65°C.

6-3-2-2. 타올 10장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 반건성유인 옥수수유 50 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 10장으로 실험한 결과를 Fig. 17에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 56.5시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도에 도달하였으며, 시료용기 내의 온도가 급격하게 상승되고 연소가 지속되면서 66.4시간에서 약 640℃의 최고 상승온도를 기록하였으며, 가연물이 연소가 된 후 서서히 온도가 낮아지는 것을 확인하였다.



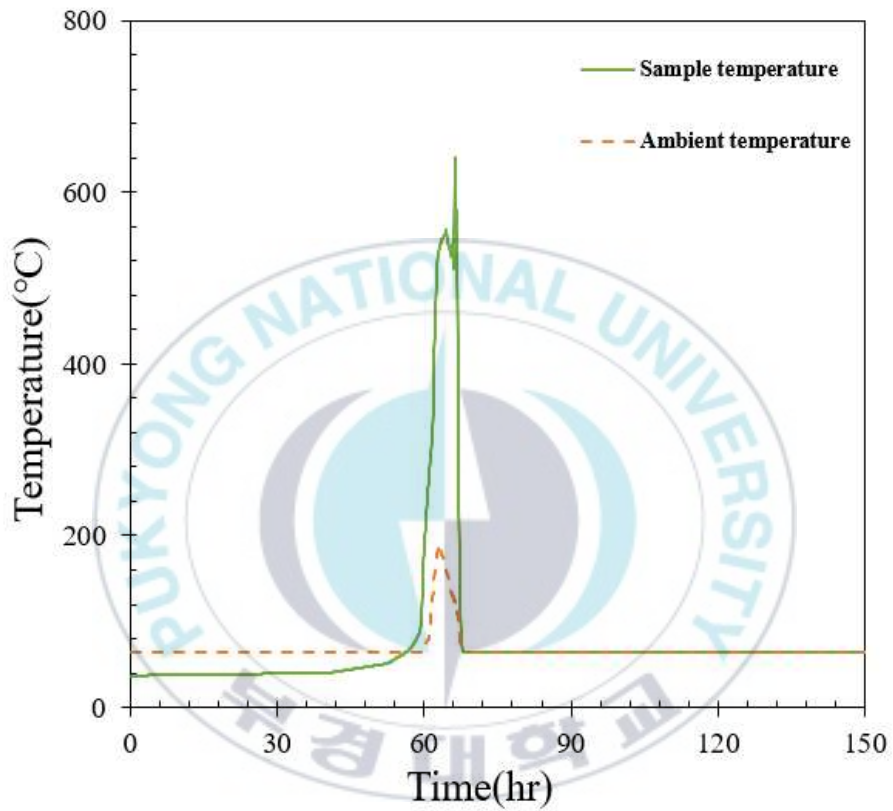


Fig. 17. Variation of temperature with time for number of towels 10, ambient temperature 65°C.

6-3-2-3. 타올 15장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 반건성유인 옥수수유 50 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 15장으로 실험한 결과를 Fig. 18에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 68시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었으며, 시료용기 내의 온도가 급격하게 상승되고 연소가 지속되면서 70.9시간이 경과되었을 때 약 650℃의 최고온도를 기록하였으며, 가연물이 연소가 된 후 서서히 온도가 낮아지는 것을 확인하였다. 또한 발화로 인하여 시료용기 내의 화염에 의한 열의 분출로 인하여 건조기 내부의 온도도 약 285℃ 까지 상승되었다. 이것은 시료인 타올의 매수가 많아 연소되면서 내부의 열이 실험장치로 열이 전달되는 것으로 판단된다.

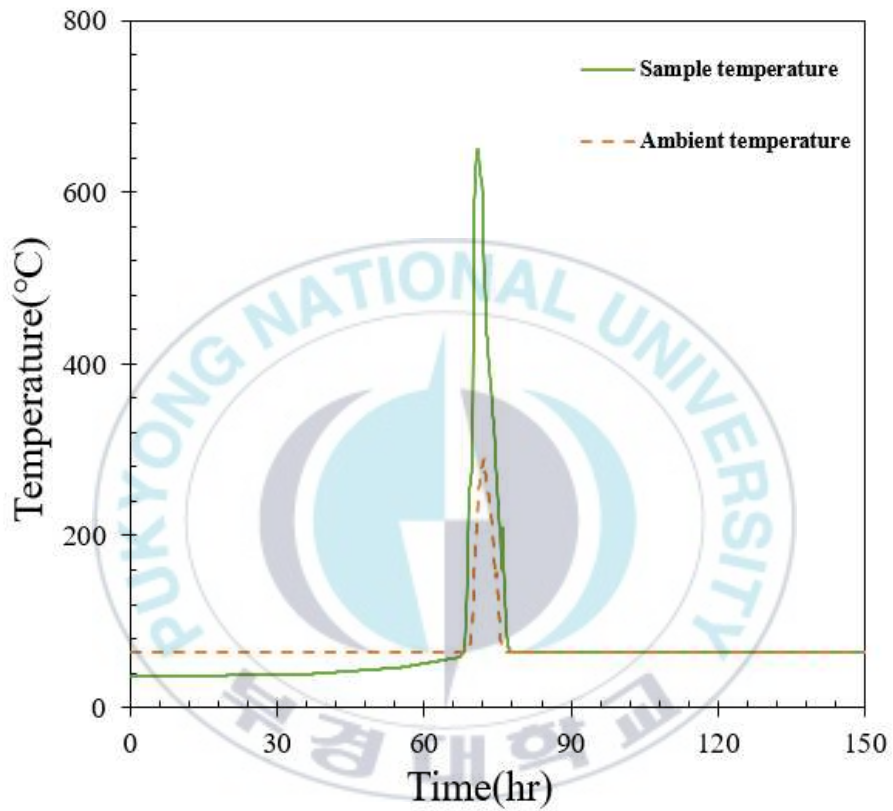


Fig. 18. Variation of temperature with time for number of towels 15, ambient temperature 65°C.

6-3-3. 옥수수유 25 ml 도포

6-3-3-1. 타올 5장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 반건성유인 옥수수 25 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 5장으로 실험한 결과를 Fig. 19에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생하는 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 49.2시간이 경과했을 때 설정 온도와 동일한 온도가 되었으나, 시료용기 내의 온도가 상승되지 않았으며 약 59.3시간에서 설정온도보다 약 8℃의 온도가 상승된 후 설정온도로 수렴되고 발화되지 않는 것을 확인하였다.

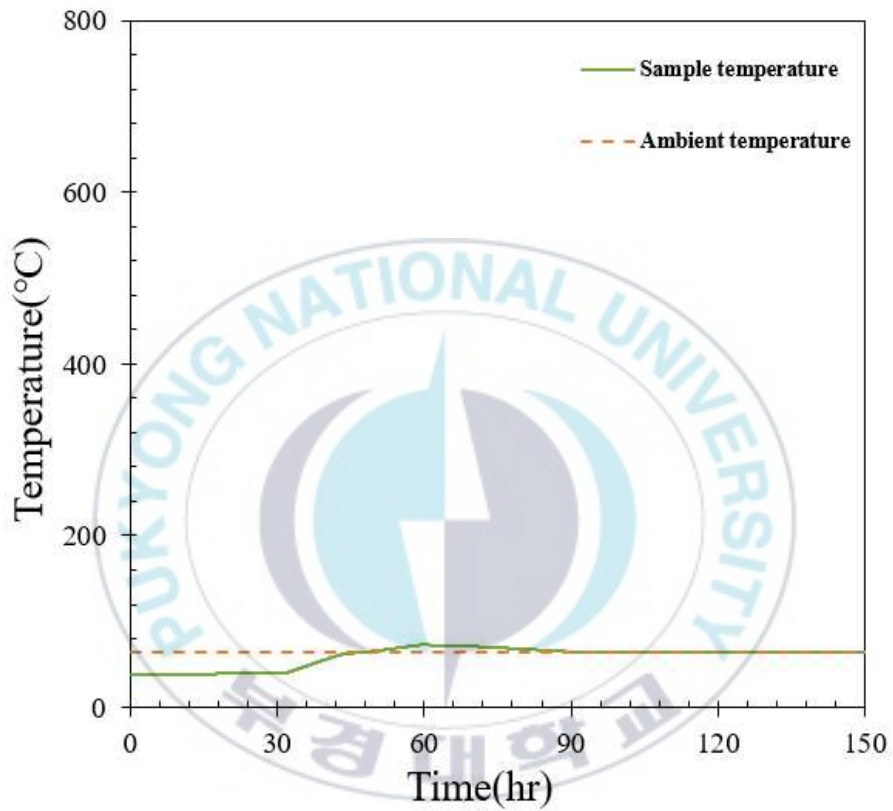
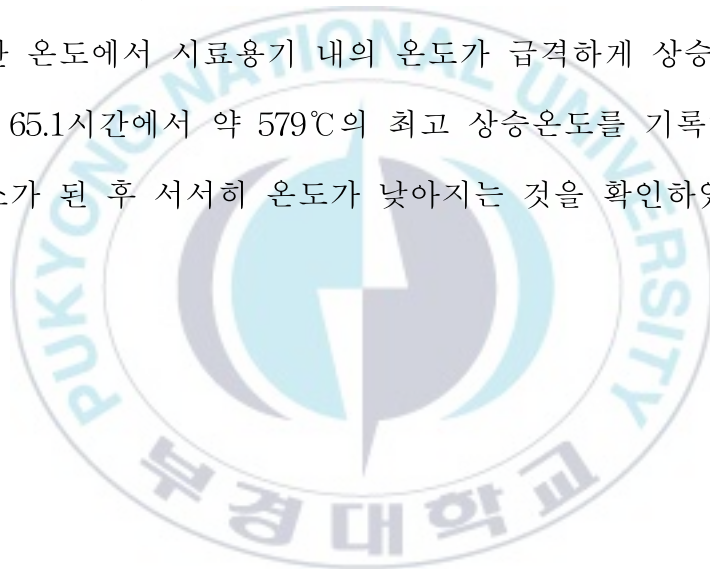


Fig. 19. Variation of temperature with time for number of towels 5, ambient temperature 65°C.

6-3-3-2. 타올 10장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 반건성유인 옥수수유 25 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 10장으로 실험한 결과를 Fig. 20에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 57.8시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도에서 시료용기 내의 온도가 급격하게 상승되고 연소가 지속되면서 65.1시간에서 약 579℃의 최고 상승온도를 기록하였으며, 가연물이 연소가 된 후 서서히 온도가 낮아지는 것을 확인하였다.



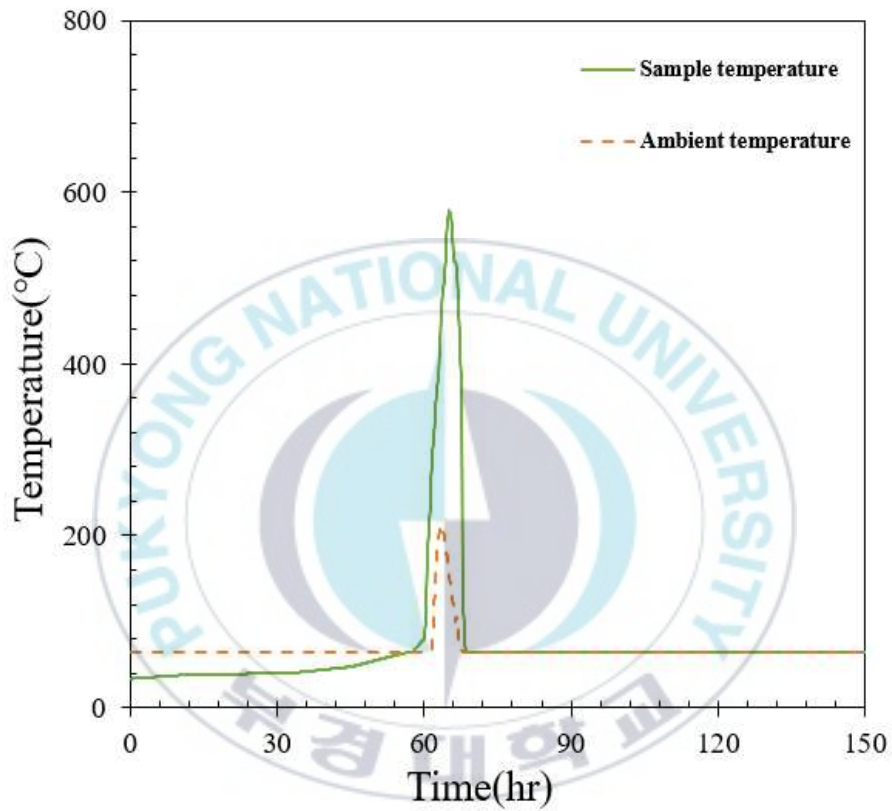


Fig. 20. Variation of temperature with time for number of towels 10, ambient temperature 65°C.

6-3-3-3. 타올 15장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 반건성유인 옥수수유 25 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 15장으로 실험한 결과를 Fig. 21에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 70.8시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었으며, 시료용기 내의 온도가 급격하게 상승되고 연소가 지속되면서 75.4시간이 경과되었을 때 약 420℃의 최고온도를 기록하였으며, 가연물이 연소가 된 후 서서히 온도가 낮아지는 것을 확인하였다. 또한 발화로 인하여 시료용기 내의 화염에 의한 열의 분출로 인하여 건조기 내부의 온도도 약 240℃ 까지 상승되었다. 이것은 시료인 타올의 매수가 많아 연소되면서 내부의 열이 실험장치로 열이 전달 되는 것으로 판단된다.

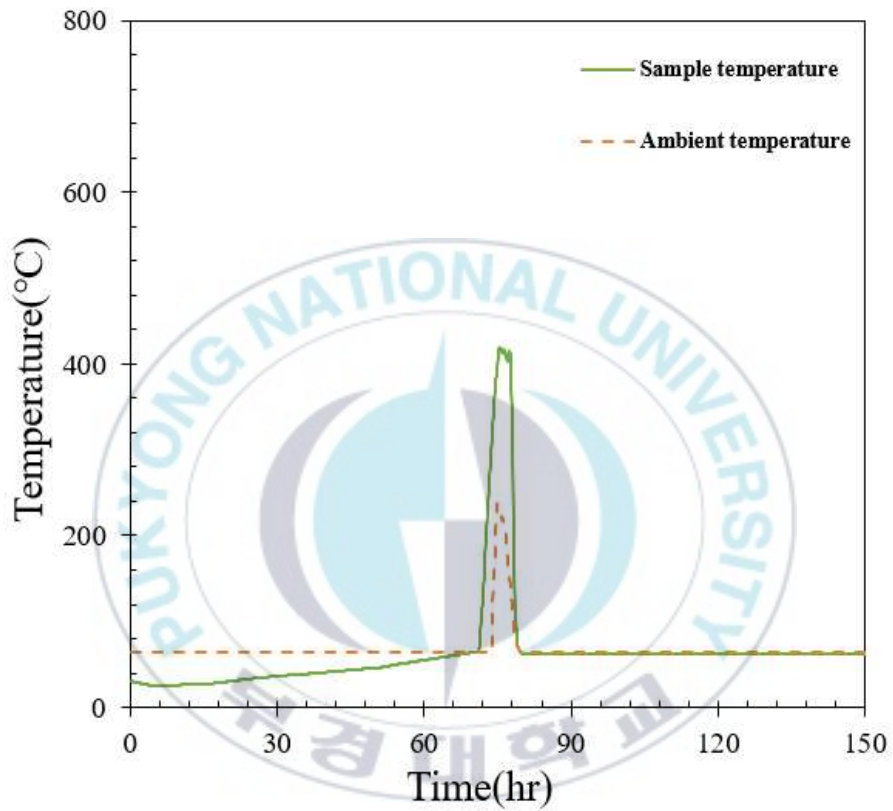


Fig. 21. Variation of temperature with time for number of towels 15, ambient temperature 65°C.

6-4. 불건성유인 올리브유의 발화 실험

6-4-1. 올리브유 75 ml 도포

6-4-1-1. 타올 5장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 불건성유인 올리브유 75 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 5장으로 실험한 결과를 Fig. 22에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생하는 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 35.5시간이 경과했을 때 설정 온도와 동일한 온도가 되었으나, 시료용기 내의 온도가 상승되지 않았으며 약 47.3시간에서 설정온도보다 약 13℃의 온도가 상승된 후 설정 온도로 수렴되고 발화되지 않는 것을 확인하였다.

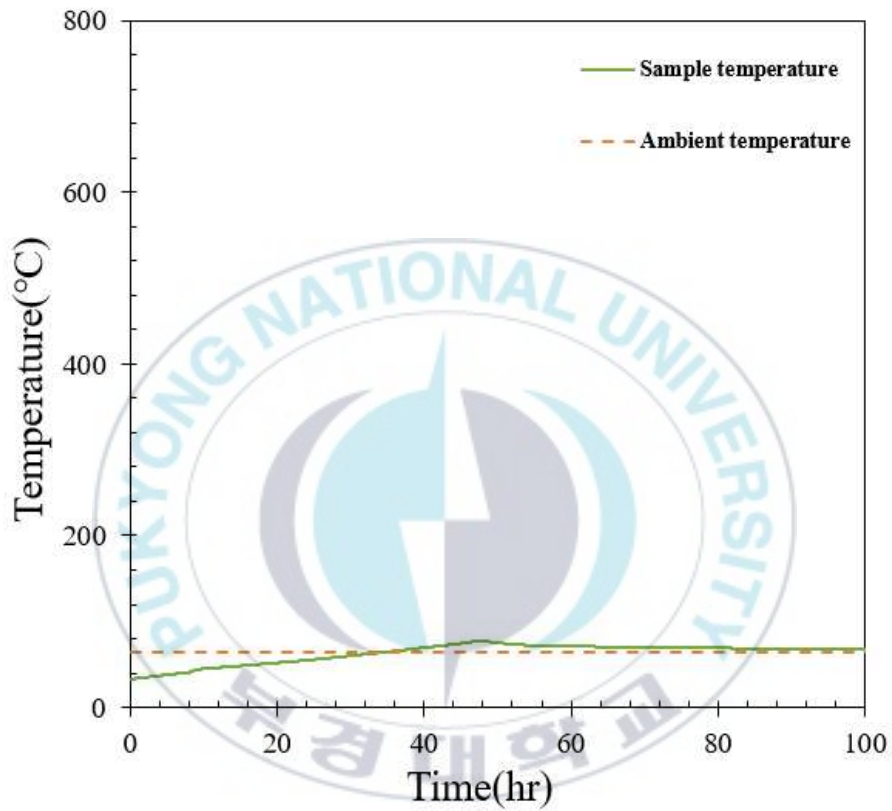


Fig. 22. Variation of temperature with time for number of towels 5, ambient temperature 65°C.

6-4-1-2. 타올 10장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 불건성유인 올리브유 75 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 10장으로 실험한 결과를 Fig. 23에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 46.3시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도에서 시료용기 내의 온도가 급격하게 상승되고 연소가 지속되면서 72.7시간에서 약 596℃의 최고 상승온도를 기록하였으며, 연소가 지속되는 시간이 건성유인 아마씨유와 반건성유인 옥수수유 보다 연소시간이 훨씬 긴 것으로 확인되었다.

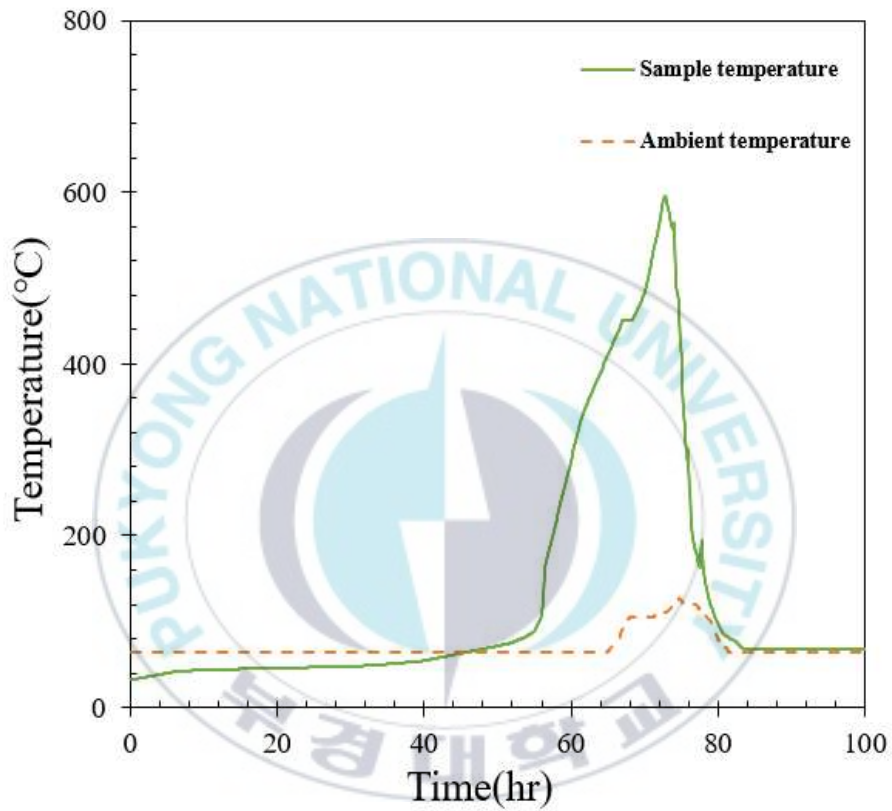


Fig. 23. Variation of temperature with time for number of towels 10, ambient temperature 65°C.

6-4-1-3. 타올 15장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 불건성유인 올리브유 75 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 15장으로 실험한 결과를 Fig. 24에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 61시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었으며, 시료용기 내의 온도가 급격하게 상승되고 연소가 지속되면서 69.9시간이 경과되었을 때 약 613℃의 최고온도를 기록하였으며, 연소가 지속되는 시간이 건성유인 아마씨유와 반건성유인 옥수수유 보다 연소시간이 훨씬 긴 것으로 확인되었다.

가연물이 연소가 된 후 서서히 온도가 낮아지는 것을 확인하였으며, 또한 발화로 인하여 시료용기 내의 화염에 의한 열의 분출로 인하여 건조기 내부의 온도도 약 200℃ 까지 상승되었다.

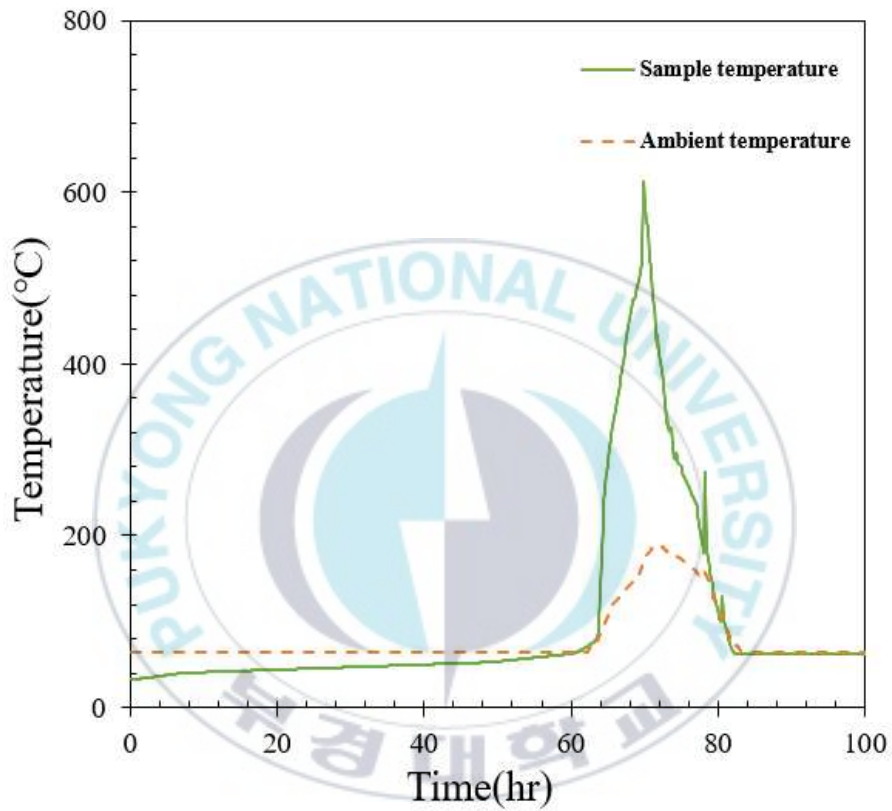


Fig. 24. Variation of temperature with time for number of towels 15, ambient temperature 65°C.

6-4-2. 올리브유 50 ml 도포

6-4-2-1. 타올 5장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 불건성유인 올리브유 50 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 5장으로 실험한 결과를 Fig. 25에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생하는 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 55시간이 경과했을 때 설정 온도와 동일한 온도가 되었으나, 시료용기 내의 온도가 상승되지 않았으며 약 62.3시간에서 설정온도보다 약 7℃의 온도가 상승된 후 설정온도로 수렴되고 발화되지 않는 것을 확인하였다.

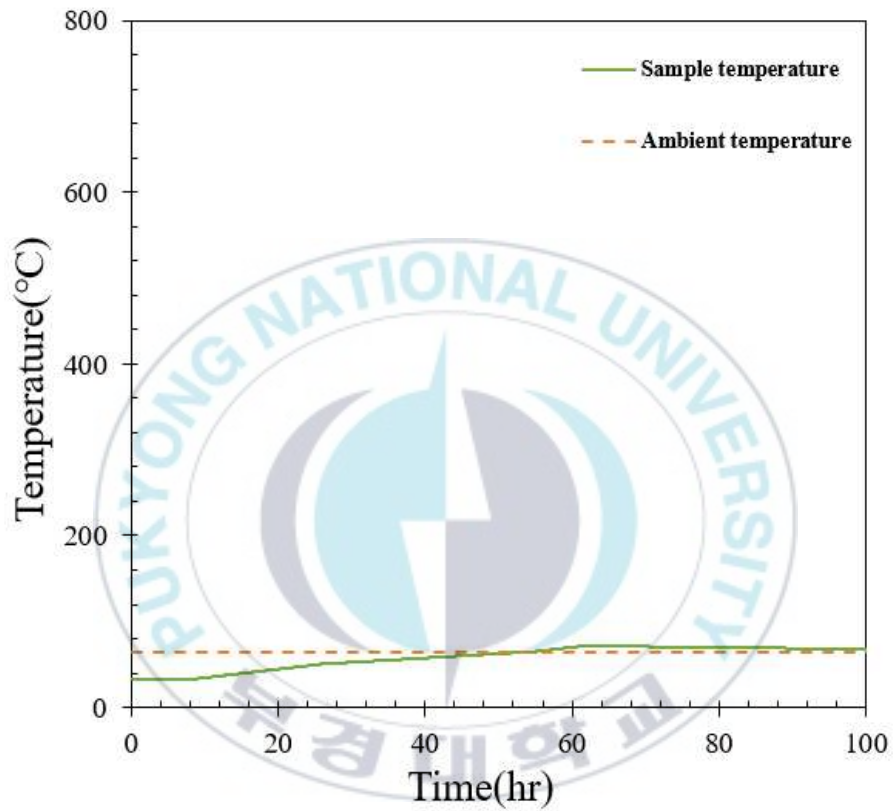
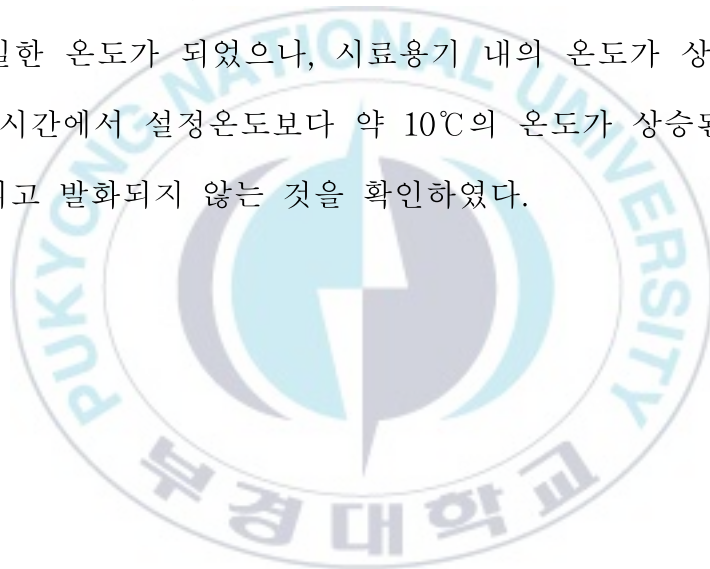


Fig. 25. Variation of temperature with time for number of towels 5, ambient temperature 65°C.

6-4-2-2. 타올 10장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 불건성유인 올리브유 50 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 10장으로 실험한 결과를 Fig. 26에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생하는 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 61시간이 경과했을 때 설정 온도와 동일한 온도가 되었으나, 시료용기 내의 온도가 상승되지 않았으며 약 81시간에서 설정온도보다 약 10℃의 온도가 상승된 후 설정온도로 수렴되고 발화되지 않는 것을 확인하였다.



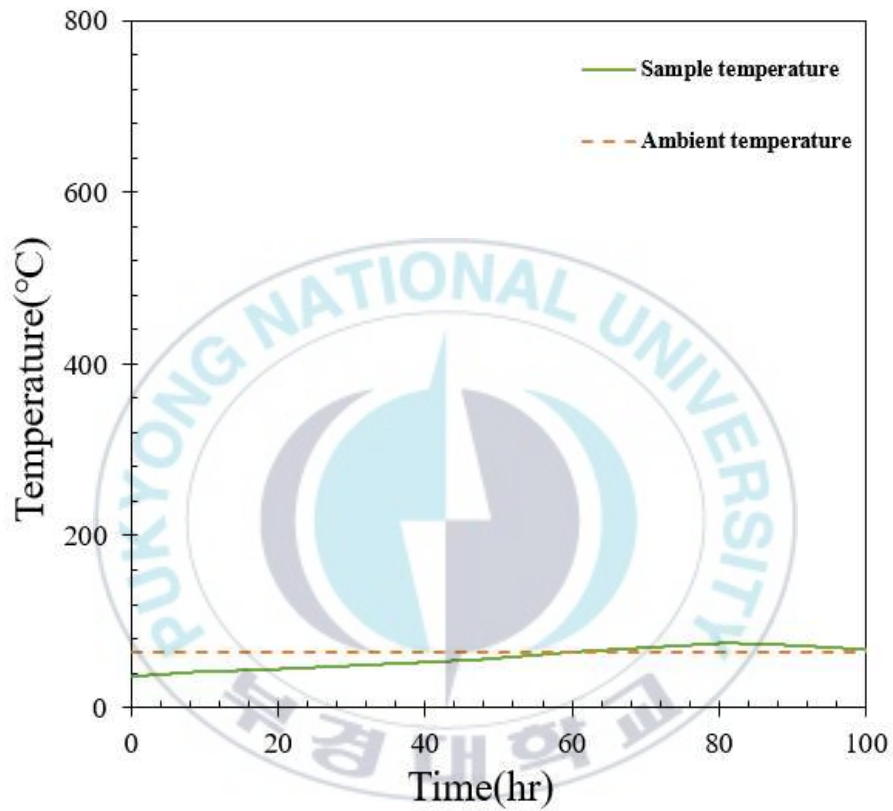
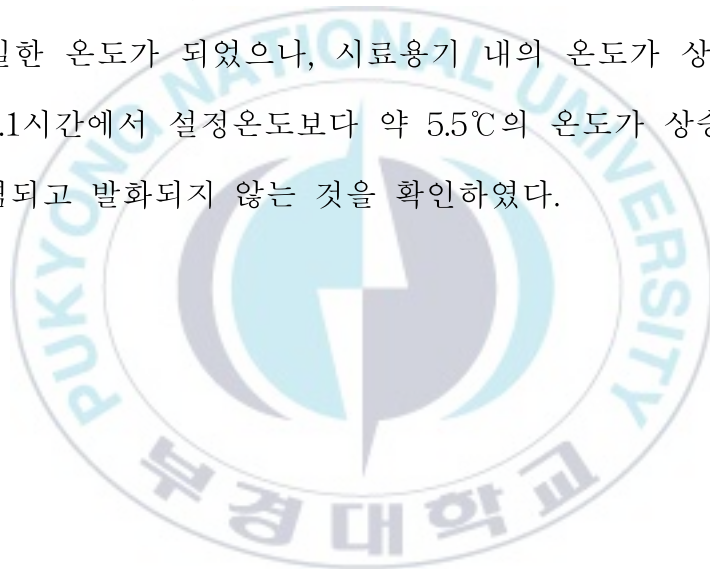


Fig. 26. Variation of temperature with time for number of towels 10, ambient temperature 65°C.

6-4-2-3. 타올 15장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 불건성유인 올리브유 50 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 15장으로 실험한 결과를 Fig. 27에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생하는 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 67시간이 경과했을 때 설정 온도와 동일한 온도가 되었으나, 시료용기 내의 온도가 상승되지 않았으며 약 79.1시간에서 설정온도보다 약 5.5℃의 온도가 상승된 후 설정 온도로 수렴되고 발화되지 않는 것을 확인하였다.



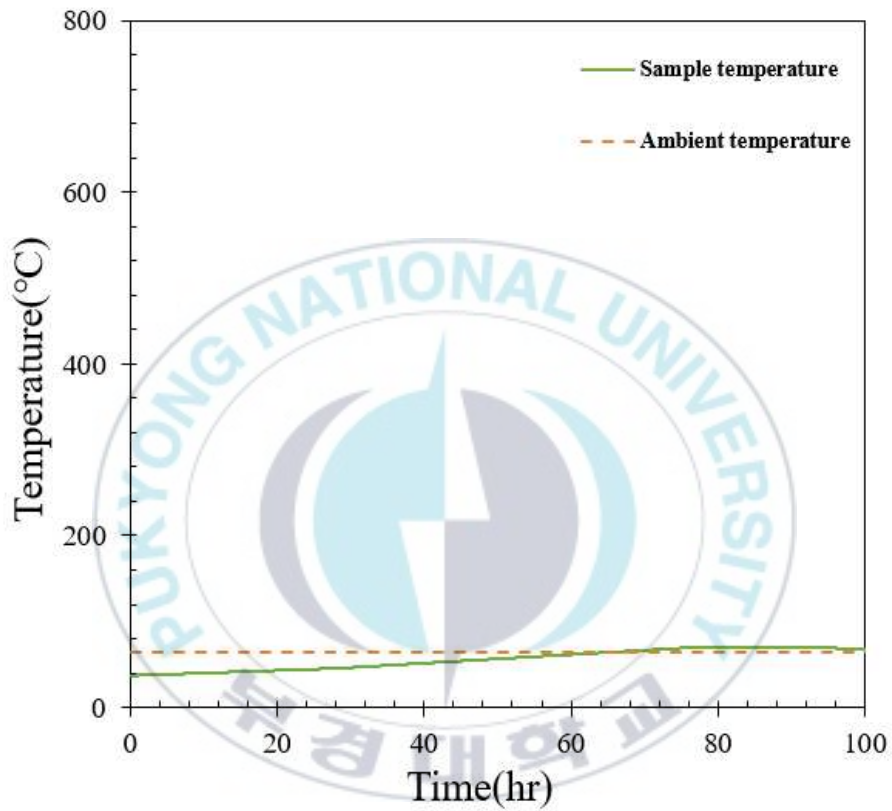


Fig. 27. Variation of temperature with time for number of towels 15, ambient temperature 65°C.

6-4-3. 올리브유 25 ml 도포

6-4-3-1. 타올 5장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 불건성유인 올리브유 25 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 5장으로 실험한 결과를 Fig. 28에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생하는 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 57시간이 경과했을 때 설정 온도와 동일한 온도가 되었으나, 시료용기 내의 온도가 상승되지 않았으며 약 64.3시간에서 설정온도보다 약 7℃의 온도가 상승된 후 설정온도로 수렴되고 발화되지 않는 것을 확인하였다.

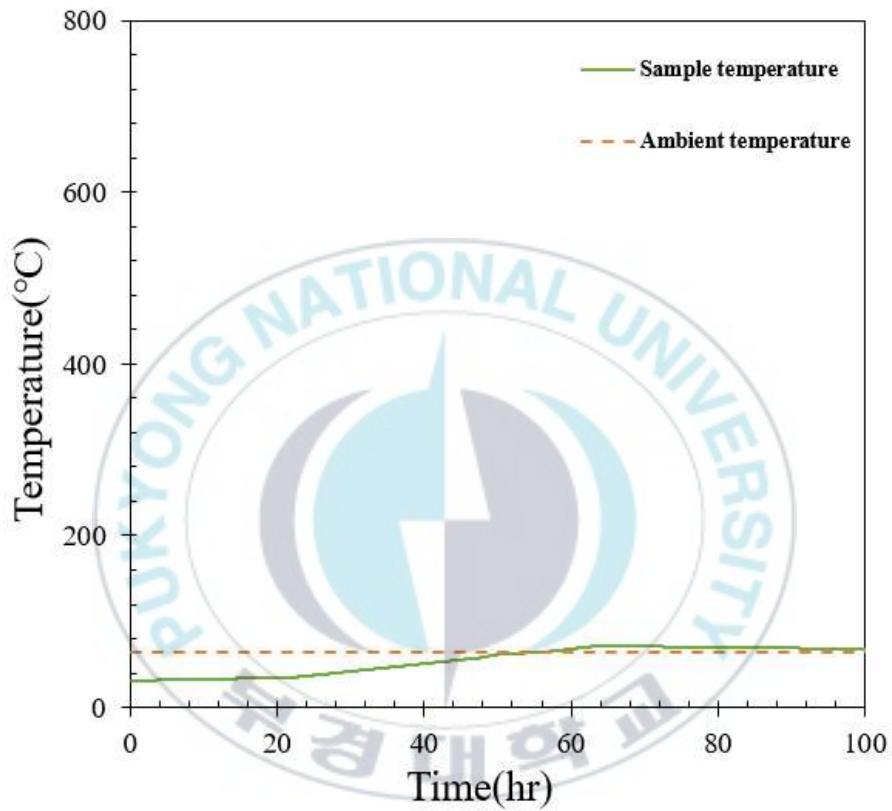
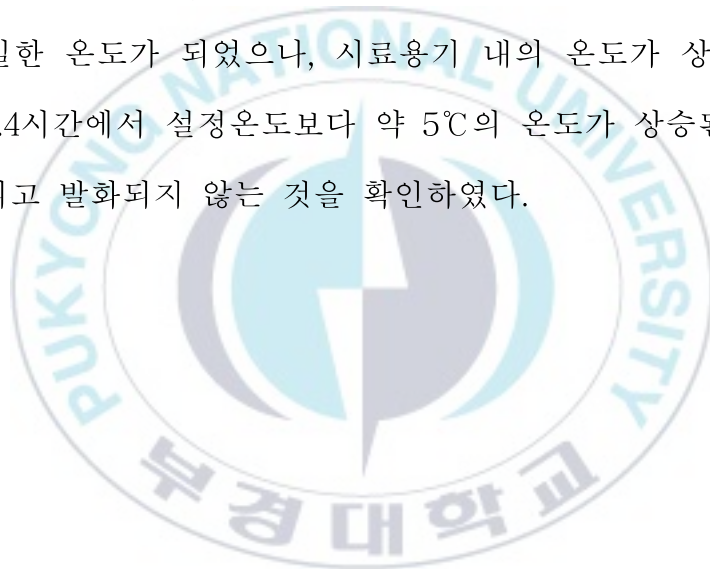


Fig. 28. Variation of temperature with time for number of towels 5, ambient temperature 65°C.

6-4-3-2. 타올 10장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 불건성유인 올리브유 25 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 10장으로 실험한 결과를 Fig. 29에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생하는 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 58시간이 경과했을 때 설정 온도와 동일한 온도가 되었으나, 시료용기 내의 온도가 상승되지 않았으며 약 66.4시간에서 설정온도보다 약 5℃의 온도가 상승된 후 설정온도로 수렴되고 발화되지 않는 것을 확인하였다.



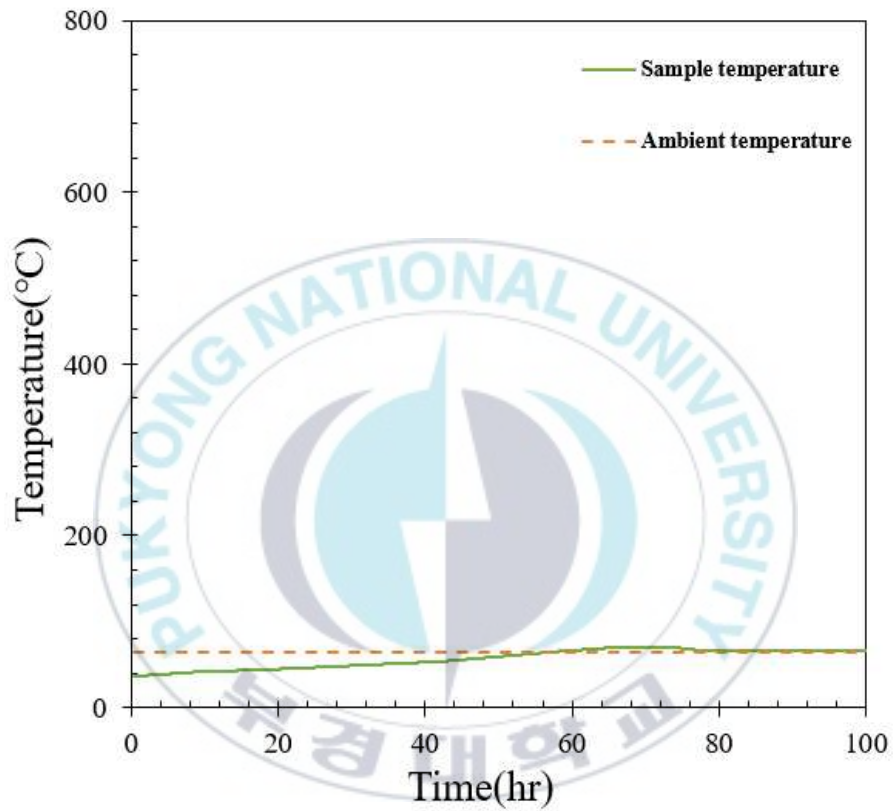
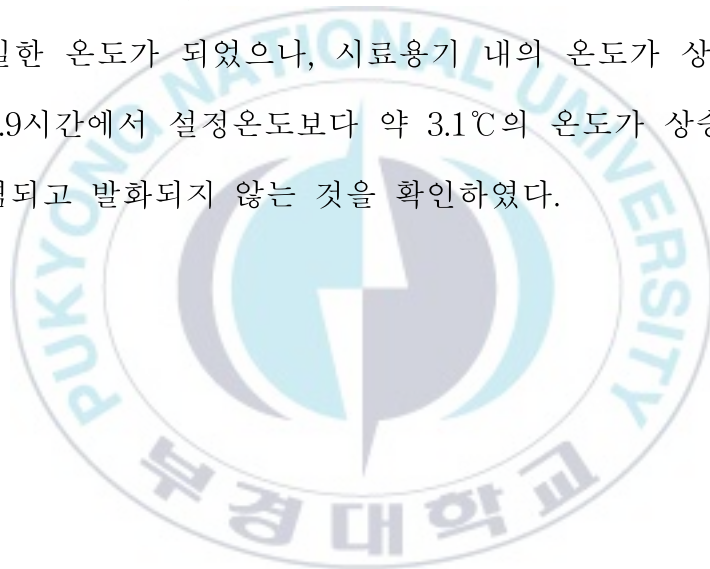


Fig. 29. Variation of temperature with time for number of towels 10, ambient temperature 65°C.

6-4-3-3. 타올 15장일 경우

건조기의 온도를 65℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 불건성유인 올리브유 25 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 15장으로 실험한 결과를 Fig. 30에 나타내었다.

건조기의 온도가 65℃일 경우에 발화(화재)가 발생하는 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 61.6시간이 경과했을 때 설정 온도와 동일한 온도가 되었으나, 시료용기 내의 온도가 상승되지 않았으며 약 71.9시간에서 설정온도보다 약 3.1℃의 온도가 상승된 후 설정 온도로 수렴되고 발화되지 않는 것을 확인하였다.



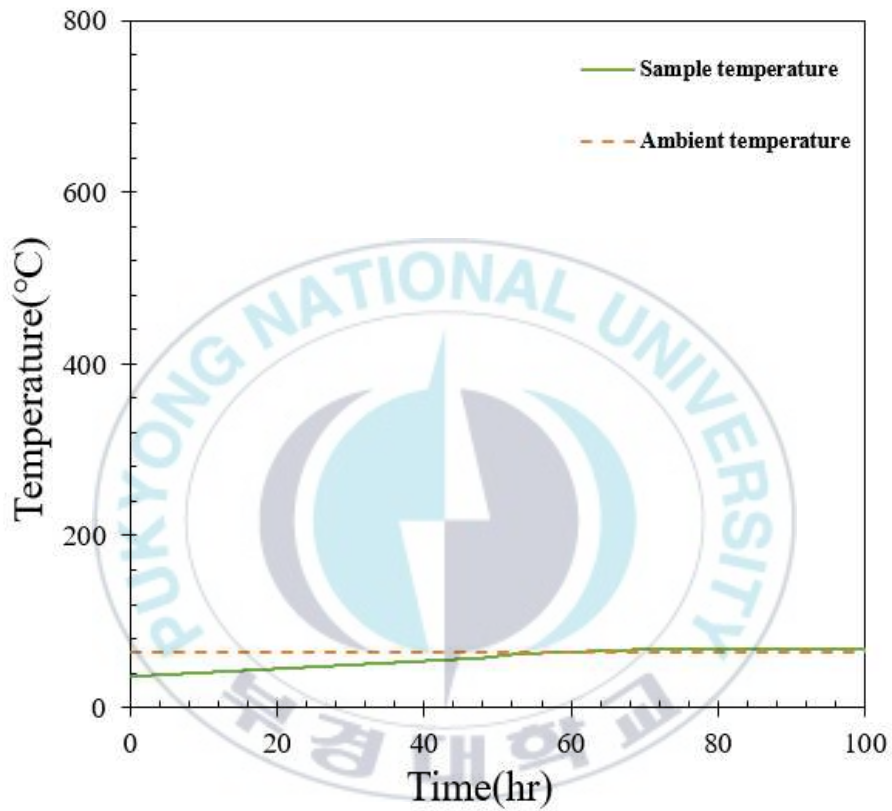


Fig. 30. Variation of temperature with time for number of towels 15, ambient temperature 65°C.

6-5. 아마씨유의 80℃에서 발화실험

건조기의 온도를 80℃로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 건성유인 아마씨유 75 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 20장으로 실험한 결과를 Fig. 31에 나타내었다.

건조기의 온도가 80℃일 경우에 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 80℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 17.6시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었으며, 시료용기 내의 온도가 급격하게 상승되고 연소가 지속되면서 27.1시간이 경과되었을 때 약 640℃의 최고온도를 기록하였으며, 가연물이 연소가 된 후 서서히 온도가 낮아지는 것을 확인하였다. 또한 발화로 인하여 시료용기 내의 화염에 의한 열의 분출로 인하여 건조기 내부의 온도도 약 260℃ 까지 상승되었다. 이것은 시료인 타올의 매수가 많아 연소되면서 내부의 열이 실험장치로 열이 전달 되는 것으로 판단된다.

아마씨유 75 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 20장으로 실험한 결과, 동일한 아마씨유와 비교하면 건조기의 온도를 65℃일 경우 보다 15℃ 높은 80℃에서는 건조기의 주위온도로 부터 시료용기의 중심온도에 도달하는 시간이 약 3배정도 빠르게 열전이가 되는 것으로 확인되었다.

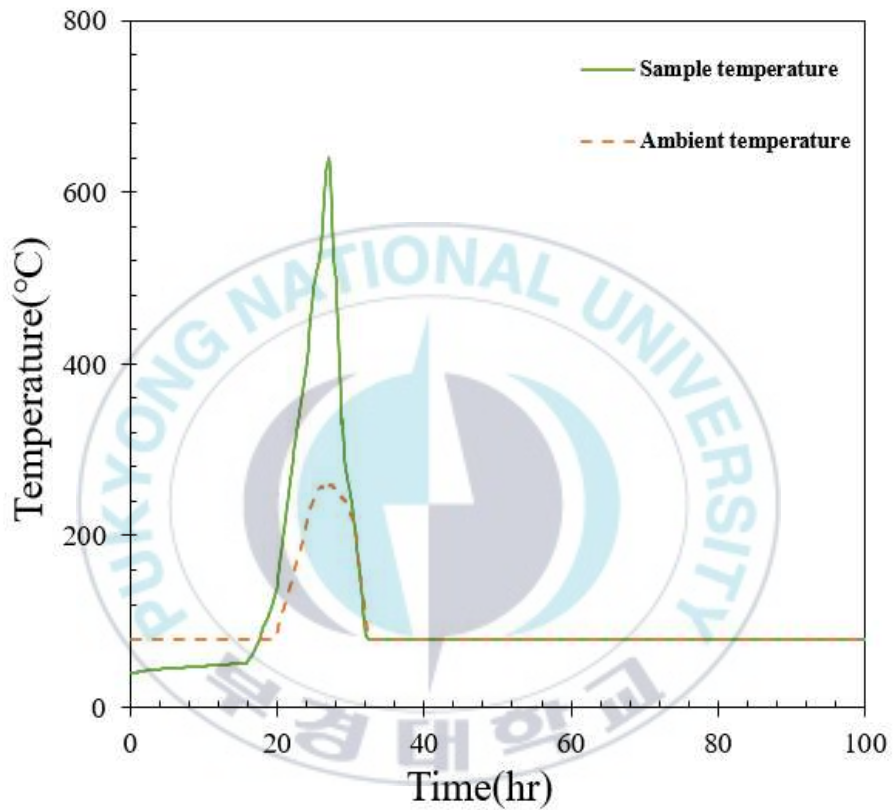


Fig. 31. Variation of temperature with time for number of towels 20, ambient temperature 80°C.

7. 결 론

건조기 내의 오염물에 의한 자연발화의 원인을 규명하기 위하여 건성유인 아마씨유, 반건성유인 옥수수유 및 불건성유인 올리브유를 가연성 물질인 타올에 25 ml, 50 ml, 75 ml을 분사하여 65℃의 상태에서 실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 타올 한 장에 건성유인 아마씨유를 스프레이 건을 통하여 도포하여 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 결과, 가연성 물질인 타올에 25 ml, 50 ml, 75 ml을 분사하여 타올의 량을 5장, 10장, 15장을 변화시켜 실험을 하였으며, 모두 발화가 되는 것으로 확인되었다.
- 2) 아마씨유 75 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 5장에서 건조기의 주위 온도가 65℃에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 37시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었으며, 설정온도가 지남에 따라 급격하게 시료용기 내의 온도가 상승되고 연소가 지속되면서 약 540℃를 상회하고 가연물이 연소가 된 후 서서히 온도가 낮아졌다.

- 3) 아마씨유 75 ml, 타올 10장의 경우에는 실험 시작 후 약 48시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었으며, 약 50시간이 지남에 따라 급격하게 시료용기 내의 온도가 상승되고 연소가 지속되면서 약 560°C를 상회하였다.
- 4) 아마씨유 75 ml을 타올 15장으로 실험한 결과, 실험 시작 후 약 56시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었으며, 연소가 지속되면서 524°C의 최고 상승온도를 기록하였다.
- 5) 아마씨유 50 ml, 타올 5장의 경우에는 실험 시작 후 약 32시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었으며, 약 36.5시간이 지남에 따라 약 480°C를 상회하였다.
- 6) 아마씨유 50 ml, 타올 타올 10장에서는 실험 시작 후 약 50시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었으며, 최고온도는 약 510°C가 되었다.
- 7) 아마씨유 50 ml을 타올 15장으로 실험한 결과, 실험 시작 후 약 63.5시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었으며, 연소가 지속되면서 약 685°C의 최고 상승온도를 기록하였다.
- 8) 아마씨유 25 ml, 타올 5장의 경우에는 실험 시작 후 약 25.1시간

이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었으며, 약 27.7시간이 지남에 따라 약 209℃의 최고온도가 되었다.

9) 아마씨유 25 ml, 타올 타올 10장에서는 실험 시작 후 약 46시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었으며, 연소가 지속되면서 52.6시간에서 최고온도는 약 524.2℃를 구하였다.

10) 아마씨유 25 ml, 타올 타올 15장에서는 실험 시작 후 약 62시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었으며, 최고온도는 약 539℃가 되었다.

11) 타올 한 장에 반건성유인 옥수수유를 스프레이 건을 통하여 도포하여 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 결과, 가연성 물질인 타올에 25 ml, 50 ml, 75 ml을 분사하여 타올의 양을 5장, 10장, 15장을 변화시켜 실험을 한 결과, 옥수수유 25 ml에서 타올 5장은 발화가 되지 않았으나, 그 외의 조건에서는 모두 발화가 발생되었다.

12) 타올 한 장에 불건성유인 올리브유를 스프레이 건을 통하여 도포하여 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 결과, 가연성 물질인 타올에 75 ml을 분사하여 타올의 양을 10장, 15장을 변화시켜 실험을 행한 결과에서 발화가 발생되었으나, 그 외의 올리브 75 ml, 타올 5장에서는 발화가 발생되지 않았다. 또한 올리브의 양이 25 ml, 50

ml에서는 타올의 양을 5장, 10장, 15장 모두 발화가 발생되지 않았다.

- 13) 아마씨유 75 ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 20장으로
서 온도 80℃를 설정하고 실험한 결과, 동일한 아마씨유와 비교하
면 건조기의 온도를 65℃일 경우 보다 15℃ 높은 80℃에서는 건조
기의 주위온도로 부터 시료용기의 중심온도에 도달하는 시간이 약
3배정도 빠른 17.6시간으로 열전이가 되는 것으로 확인되었다.



Nomenclature

a	: Half thickness of sample vessel	[m]
A_0	: Pre-exponential factor of Arrhenius equation	[1/s]
C_0	: Concentration of reactant	[mol/m ³]
C_p	: Specific heat	[J/mol·K]
E	: Activation energy of reaction	[J/mol]
h	: Convective heat transfer coefficient	[W/m ² ·K]
j	: Shape parameter	[-]
K	: Thermal conductivity of body	[W/m·K]
Q_f	: Heat of reaction per unit mole	[J/mol]
Q_s	: Heat of reaction per unit mass	[J/kg]
R	: Universal gas constant	[J/mol·K]
r^2	: Coefficient of determination	[-]
S	: Surface area	[m ²]
t	: Time	[sec]
T	: Mean temperature of internal system	[K]
T_a	: Ambient temperature	[K]
T_c	: Critical auto ignition temperature	[K]
V	: Volume of system	[m ³]
X	: Coordinate	[-]

Greek Letters

δ	: Dimensionless reaction rate	[-]
ξ	: Dimensionless distance	[-]
θ	: Dimensionless temperature	[-]
ρ	: Density of mixture system	[mol/m ³]
σ	: Density of sample	[kg/m ³]
τ_d	: Dimensionless time	[-]



참고 문헌

- (1) 박정주, “OIL-CAKES 발화 메커니즘 규명에 관한 연구”, 인천대학교 공학대학원 석사학위논문, pp. 1-2, 2013.
- (2) 최재욱, “有機溶劑와 粒狀活性炭의 自然發火 特性에 관한 研究”, 동아대학교 대학원 박사학위논문, pp. 3-6, 1994.
- (3) 소방청, “2011년~2017년 화재현황통계”, 국가화재정보시스템(NFDS; National Fire Data System), https://www.nfds.go.kr/fr_scls_0201.jsf.
- (4) J. W. Choi, Y. S. Mok and D. M. Ha, “A Study on Spontaneous Ignition of Hydroxy Propyl Methyl Cellulose”, Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering, Vol. 15, No. 4, pp. 34-40, 2001.
- (5) 최유정, “화력발전소의 혼합물질로 사용되는 우드펠릿과 분말의 자연발화 특성에 관한 연구”, 부경대학교 대학원 석사학위논문, pp. 1-3, 2017.
- (6) J. W. Choi, S. Y. Kim, S. R. Lee and K. J. Choi, “A Study on the Ignition Induction Time and Temperature Distribution at Spontaneous Ignition of Activated Carbon”, Journal of KIIS, Vol. 8, No. 3, pp. 44-49, 1993.
- (7) Y. S. Mok and J. W. Choi, “A Study on Autoignition Characteristics of Methylmethacrylate-butadiene-styrene Copolymer”, Journal of KIIS, Vol. 16, No. 3, pp. 83-88, 2001.
- (8) C. J. Kim, I. S. Park and C. H. Sohn, “Numerical Study on the Phenomenon of Spontaneous Ignition of Coal Stockpile”, The

- Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 34, No. 7, pp. 721-727, 2010.
- (9) W. S. Lim and J. W. Choi, "Thermal Stability and Critical Ignition Temperature of RPF", Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering, Vol. 22, No. 1, pp. 99-104, 2008.
- (10) P. C. Bowes and P. H. Thomas, "Ignition and Extinction Phenomena Accompanying Oxygen Dependent Self-Heating of Porous Bodies", Combustion and Flame, Vol. 10, No. 3, pp. 221-230, 1966.
- (11) A. Cameron and D. MacDowall, "The Self Heating of Commercial Powdered Activated Carbons", Journal of Applied Chemistry and Biotechnology banner, Vol. 22, No. 9, pp. 1007-1018, 1972.
- (12) 식품의약품안전처, 식품별 기준 및 규격, 식품 및 식품첨가물공전, https://www.foodsafetykorea.go.kr/foodcode/03_02.jsp?idx=28.
- (13) 류중우, 최재욱, "최신 위험물질론", 비전 커뮤니케이션, pp. 249-374, 2013.
- (14) 오백균, 김정호, 송영호, 인세진, 전경수, 최돈묵, "위험물안전관리", 동화기술, pp. 399-480, 2014.
- (15) S. Y. Wang, H. S. Hwang, S. H. Yoon and E. O. Choe, "Temperature Dependence of Autoxidation of Perilla Oil and Tocopherol Degradation", Journal of Food Science, Vol. 75, No. 6, pp. 498-505, 2010.
- (16) S. Y. Wang and E. O. Choe, "Lipid Oxidation and Antioxidant

- Changes in Perilla Seeds during Heating”, Korean Society of Food Science and Technology, Vol. 43, No. 6, pp. 711-718, 2011.
- (17) C. Severini, S. Romani, G. Dall’Aglio, P. Rovere, L. Conte and C. R. Lerici, “High Pressure Effects on Lipid Oxidation of Extra Virgin Olive Oils and Seed Oils”, The Journal of Food Technology in Africa, Vol. 4, No. 2, pp. 65-68. 1999.
- (18) 安全工學協會, “火災”, 海文堂, pp. 23-26, 1983.
- (19) I. Glassma and R. A. Yetter, “Combustion”, Fourth Edition, London, UK, pp. 382-395, 2008.
- (20) 김원길, “옥탄가 변화에 따른 가솔린의 폭발특성과 자연발화에 관한 연구”, 부경대학교 대학원 박사학위논문, pp. 9-12, 2018.
- (21) D. A. Frank-Kamenetskii, “Diffusion and Heat Exchange in Chemical Kinetics”, Princeton University Press, NJ, USA, pp. 202-266, 1955.
- (22) D. A. Frank-Kamenetskii, “Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetics”, 2nd, Trans by Appleton, Pleum Press, pp. 5-36, 1969.
- (23) 武田久弘, 秋田一雄, “炭素粉末の 自然發火に關する 研究”, 安全工學, Vol. 14, No. 3, pp. 131-135, 1975.
- (24) Y. S. Mok, J. W. Choi, S. Y. Kim and K. J. Choi, “A Study on Spontaneous Ignition of Granulated Activated Carbon”, Journal of KIIS, Vol. 6, No. 4, pp. 66-72, 1991.
- (25) 최재욱, 전성균, “소방안전공학”, 화수목, pp. 92-93, 2018.

- (26) 현성호, 차정민, “위험물질론 이론과 실습”, 동화기술, pp. 90-94, 2015.
- (27) R. Buggeln and R. Rynk, “Self-Heating In Yard Trimmings: Conditions Leading to Spontaneous Combustion”, Journal of Compost Science and Utilization, Vol. 10, No. 2, pp. 162-182, 2002.
- (28) 坂口義孝, “環境溫度 變動の 自然發火 條件に 及ぼす影響”, 日本 横浜國立大學 大學院 碩士 學位論文, pp. 47-49, 1987.
- (29) S. K. Lee and R. G. Choi, “New Combustion Engineering”, Donghwa T. P. Co., Paju, Korea, pp. 50-51, 2009.
- (30) 변성호, “참깨묵의 자연발화온도와 활성화 에너지를 통한 화재 및 폭발의 위험성 평가에 관한 연구”, 부경대학교 대학원 박사학위논문, pp. 24-34, 2021.

A Study on Spontaneous Combustion of Vegetable Oil Adsorbed on Towels

Kyoung-Su Kim

*Dept. of Fire Protection Engineering Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

In order to identify the cause of spontaneous ignition due to contaminants in the dryer 25 ml, 50 ml, and 75 ml of drying oil (linseed oil, semi-drying oil, corn oil) and non-drying oil (olive oil) were sprayed on a towel which is a combustible material and dried at 65°C. As a result of the experiment, the following conclusions were obtained.

- 1) As a result of confirming that fire occurred by applying linseed oil which is drying oil to one towel through a spray gun (25 ml, 50 ml, and

75 ml were sprayed on the towel which is a combustible material and the amount of towels was 5, 10 and 15 were changed and experiments were conducted and it was confirmed that all were fire.

2) On the 5 towels to which 75 ml of flaxseed oil was applied through a spray gun the ambient temperature of the dryer gradually increased over time at 65°C and when about 37 hours elapsed after the start of the experiment the same temperature. As the set temperature passed the temperature in the sample container rose rapidly and combustion continued exceeding about 540°C. After combustibles burned the temperature gradually decreased.

3) In the case of 75 ml of flaxseed oil and 10 towels the temperature reached the same as the set temperature after about 48 hours from the start of the experiment and as about 50 hours elapsed the temperature in the sample container rose rapidly and combustion continued reaching about 560°C was exceeded.

4) As a result of actually using 75 ml of flaxseed oil with 15 towels the temperature reached the same temperature as the set temperature after about 56 hours from the start of the experiment and the highest temperature rise of 524°C was recorded while combustion continued.

5) In the case of 50 ml of linseed oil and 5 towels the temperature became the same as the set temperature when about 32 hours elapsed after the start of the experiment and it exceeded about 480°C after about 36.5 hours.

6) In 50 ml of linseed oil and 10 towels the temperature became the same as the set temperature when about 50 hours elapsed after the start of the experiment and the maximum temperature was about 510°C.

7) As a result of testing 50 ml of flaxseed oil with 15 towels the temperature reached the same as the set temperature after about 63.5 hours after the start of the experiment and the highest temperature of about 685°C was recorded as the combustion continued.

8) In the case of 25 ml of linseed oil and 5 towels the temperature reached the same as the set temperature after about 25.1 hours after the start of the experiment and reached the maximum temperature of about 209°C after about 27.7 hours.

9) In 25 ml of linseed oil and 10 towels the temperature was the same as the set temperature when about 46 hours had elapsed after the start of the experiment, and as the combustion continued the maximum temperature was about 524.2°C at 52.6 hours.

10) In 25 ml of linseed oil and 15 towels the temperature was the same as the set temperature when about 62 hours elapsed after the start of the experiment and the maximum temperature was about 539°C.

11) Corn oil, semi-drying oil was applied to a towel through a spray gun to confirm that fire had occurred. As a result of the experiment by changing sheets 5, 10 and 15 towels did not fire in 25 ml of corn oil but fire occurred in all other conditions.

12) As a result of confirming that fire occurred by applying olive oil which is non-drying oil to one towel through a spray gun 75 ml of it was sprayed on a towel which is a combustible material and the amount of towels was changed to 10 or 15 sheets and the experiment was conducted. As a result fire occurred but fire did not occur in 75 ml of other olives and 5 towels. In addition when the amount of olives was 25 ml and 50 ml fire did not occur for 5, 10, and 15 towels.

13) 20 towels coated with 75 ml of flaxseed oil through a spray gun were tested at a temperature of 80°C. As a result of the experiment the ambient temperature of the dryer at 80°C which is 15°C higher than that of the case of 65°C compared to the same flaxseed oil. It was confirmed that the time to reach the center temperature of the sample container was 17.6 hours about 3 times faster than the heat transfer.

감사의 글

먼저, 만물의 근원이신 하나님께 이 영광을 바칩니다.

2009년 국립서울과학기술대학교 안전공학과에 석사과정을 마치고, 연달아 박사과정에 도전하지 못한 한스러움을 안고 7여년이 지난 2016년 9월 국립부경대학교 소방공학과에 박사과정을 신청하게 되었습니다. 너무 오랫동안 학업이 중단되었고 원거리 통학을 걱정하시던 지도교수님께 ‘무조건 할 수 있습니다’라는 억척으로 욕심을 내었고 천신만고 끝에 비로소 학위를 마치게 되었습니다.

이제 저의 논문을 마무리 하는 즈음, 여러 고마운 분들이 생각납니다. 만학의 부족한 제자를 받아들여 자상하게 가르쳐 주시고 학위를 받을 수 있도록 격려해 주신 지도교수 최재욱 교수님을 비롯하여 바쁘신 중에도 저의 논문 심사를 맡아주신 최일곤 교수님, 구민성 교수님, 최준호 교수님, 정두균 교수님께 깊은 감사를 드리며, 심사 절차에 전반적인 도움을 준 김성준 조교 이하 여러 후배님들에게도 무한한 감사를 드립니다.

또한 제가 학창시절 방황으로 공부를 중도포기하는 바람에 가슴 찢어지는 고통을 당하셨던 부모님께 다시금 아들의 저력을 보여드릴 수 있어서 뿌듯하고 체계 식지않는 심장을 주신점에 대해 엇드려 감사의 뜻을

전합니다. 사업과 병행하는 학업에 행여 건강을 해치지 않을까 걱정해 주신 장인어른과 장모님, 이제 사위가 공학박사 됐으니 교회가셔서 큰소리로 자랑하셔도 되겠습니다. 그리고 항상 부족한 제게 응원을 아끼 않았던 큰여동생 부부 그리고 막내여동생, 철없는 오빠 항상 인정해줘서 고맙고 또한 항상 내편인 우리 처제, 든든한 대기업 차장 우리 황서방, 그리고 막내지만 어른 같은 양씨 집안의 대들보 우리 처남 부부, 항상 함께 할 수 있어서 정말 감사합니다.

그리고 무엇보다도 나의 제일 가까이에서 항상 이해해주고 항상 용기를 심어 주었던 사랑하는 나의 아내 양은경과 소중한 두아들 원준, 성주와 이 기쁨을 함께 나누고 싶습니다.

저의 오늘이 있기까지 물심양면 도움 주신분들께 모두 감사드리며 보답하는 마음으로 살아가겠습니다. 또한 이 모든 격려를 통해 학위 받은것에 머물지 않고 항상 연구하는 자세로 더 높이 비상하는 도약의 발판으로 삼겠습니다.