

타올에 흡착된 아마인유와 올리브유의 자연발화에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on the Spontaneous Ignition of Flaxseed Oil and Olive Oil Adsorbed on Towels

김경수¹ · 최유정² · 최재욱^{3*}Kyoung-Su Kim¹, Yu-Jung Choi², Jae-Wook Choi^{3*}¹Graduate Student, Department of Fire Protection Engineering, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea²Researcher, Department of Fire Protection Engineering, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea³Professor, Department of Fire Protection Engineering, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea

*Corresponding author: Jae-Wook, Choi, jwchoi@pknu.ac.kr

ABSTRACT

Purpose: In order to conduct a spontaneous ignition test in which a fire occurs in the absence of an ignition source due to the oil adsorbed on the towel. A phenomenon in which spontaneous ignition occurs when adsorbed to fibers using flaxseed oil, which is drying oil and olive oil, which is non-drying oil, is tested through an experiment. **Method:** After placing the sample container in the experimental device, observe the change in the central temperature of the sample, and when the central temperature rises above the set temperature and a fire occurs, it is judged as “ignition”, and the experiment is stopped after checking the maximum value of the central temperature of the sample, When the central temperature of the sample was maintained similar to the set temperature, it was judged as “non-ignition” and the experiment was stopped. **Result:** In the towels with adsorbed flaxseed oil, the temperature in the sample container increased rapidly and combustion occurred in sheets 5, 10, and 15. Olive oil is a non-drying oil, does not ignite because it is difficult to dry because carbon is a single bond and it is difficult to bond with oxygen. **Conclusion:** It was confirmed that the more the amount of towel adsorbed to the drying oil, flaxseed oil, the longer the time to reach the set temperature and the occurrence of ignition.

Keywords: Auto-ignition, Drying oil, Flaxseed oil, Non-drying oil, Olive oil, Single bond, Double bond

요약

연구목적: 타올에 흡착된 기름에 의하여 점화원이 없는 상태에서 화재가 발생하는 자연발화 실험을 하기 위하여 건성유인 아마인유와 불건성유인 올리브유를 사용하여 섬유에 흡착되었을 때 자연발화가 발생하는 현상을 실험을 통하여 화재가 발생하는 현상을 확인하였다. **연구방법:** 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. **연구결과:** 아마인유가 흡착된 타올은 5장, 10장, 15장에서 모두 시료용기 내의 온도가 급상승되고 연소가 발생되었으나, 불건성유인 올리브유는 탄소가 단일결합으로 되어 있어 건조가 어렵고 산소와의 결합이 어렵기 때문에 발화가 되지 않았다. **결론:** 건성유인 아마인유가 흡착된 타올의 양이 많을수록 설정온도에 도달되는 시간이 길어지는 현상으로 발화가 발생하는 것을 확인하였다.

핵심용어: 자연발화, 건성유, 아마인유, 불건성유, 올리브유, 단일결합, 이중결합

Received | 27 April, 2022

Revised | 8 June, 2022

Accepted | 14 June, 2022

 OPEN ACCESS

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

서론

공업화 및 산업화의 발달로 인하여 가스 및 화학물질 등 에너지의 사용이 다양해지고, 각종 위험물질의 사용 증가에 따른 화재의 발생 위험성이 높아지고, 화재가 발생된 양상도 원인과 패턴을 파악하기 힘들 정도로 점점 복잡해지고 있다. 특히 가연성 물질을 대량으로 수송 및 저장하는 기회가 날로 증가함에 따라 가연성 물질에 의한 자연발화로 인해 화재 및 폭발이 발생하는 사고가 빈번히 발생하고 있다(Choi, 1994; Choi et al., 2018).

자연발화에 의한 화재는 국가화재정보시스템(NFDS: National Fire Data System)에서 제시하는 통계에는 화학적 요인에 의한 화재가 높은 비중을 차지하고 있으며, 화재의 발생 빈도가 점점 더 증가하고 있는 추세이다(NFDS, 2011~2017).

특히, 고형 또는 분체 형태의 시료는 점화원이 없는 상황에서 시료의 퇴적 상태에 따라 내부에 축적되는 열이 발생하는 속도가 방열속도보다 클 경우에는 내부의 축열에 의해 자연발화를 할 잠재적 위험성이 있을 뿐만 아니라, 자연발화로 인해 화재가 발생한 후에도 화재 원인을 규명하기 어려운 경우가 있다(Choi et al., 2001; Choi, 2017).

이러한 고체의 자연발화에 대한 연구로 국내에서는 Choi et al.(1993)은 활성탄의 자연발화와 관련하여 발화유도시간과 온도분포에 관한 연구를 하였고, Mok et al.(2001)은 MBS 공중합물의 자연발화에 대한 연구를 하였다. 또한 Kim et al.(2010)은 저탄장에 저장된 물질의 자연발화 현상에 대한 수치 해석적 연구를 하였으며, Lim et al.(2008)은 RPF의 열적 안정성과 한계발화온도에 관한 연구를 하였다.

국외에서는 Bowes et al.(1966)은 산소농도의 변화에 따른 톱밥의 자연발화에 관한 연구를 하였고, Cameron et al.(1972)은 기온변화에 따른 활성탄의 자연발화에 관한 연구를 하였다.

더욱이 여름철과 같이 폭염으로 인해 주위온도가 높으며 충분한 습기가 존재할 경우에 고체물질은 자연발화로 인한 화재가 다수 발생하고 있다. 산업현장에서 많이 사용되는 4류 위험물인 동식물류의 요오드값(옥소값)은 불포화결합의 정도를 나타내는 척도로 사용되며, 유지 100g에 부가되는 요오드의 g수로 나타낸다. 일반적으로 요오드값이 크다는 것은 탄소 간에 이중결합이 많고 불포화도가 크다는 것을 의미한다. 동식물류는 요오드값을 기준으로 건성유, 반건성유, 불건성유로 분류되고, 불포화도가 높은 건성유는 산화 안정성이 약해 자연발화의 위험성이 높다(Ministry of food and Drug, 2022; Ryu et al, 2013).

따라서, 동식물류인 건성유와 불건성유가 섬유에 흡착되었을 때 자연발화가 발생하는 현상을 실험을 통하여 규명하고자 한다.

본론

열 발화 이론(Safe Engineering Association, 1983)

열 발화(Thermal ignition) 이론은 가연물이 자연발화 되는 현상을 계(System) 내부에서의 발열과 계 외부로의 방열 관계로 설명한 이론이다.

자연발화는 축열과정에 있는 것으로 계 내부에서의 발열속도와 계 외부로의 방열속도에 대한 균형의 문제로 발생하는 것이다. 즉, 가연성 물질이 지속해서 열을 받거나 산화, 분해 등으로 발열을 일으키는 과정을 거치면서 열이 생성되거나 축적되는 과정에서 발열속도가 전도, 대류 또는 복사에 의해서 계 외부로 발산되는 속도가 방열속도 보다 큰 경우에 화재가 발생하

게 되며, 이러한 발열과 방열의 관계에서 자연발화가 이루어지는 관계를 도식적으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

여기서, 가열 온도가 T_a^I 와 같이 낮을 경우에는 직선과 곡선은 A점에서 교차하고 계의 내부온도가 점차 일정한 값으로 수렴한다. 이와 비교하여 가열 온도가 T_a^{III} 와 같이 높을 경우 발열속도는 온도와 관계없이 방열속도보다 빠르기 때문에 반드시 발화가 일어난다. 따라서 곡선과 직선이 접하는 가열 온도 T_a^{II} 는 발화가 발생하는 한계이며, C점이 정상상태가 되는 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 자연발화는 온도분포를 고려한 Frank-Kamenetskii 이론으로, 계의 형상인 무한평판형상, 실린더형상, 구형상 등을 적용하고 있으며, 미국의 표준인 ASTM E0659-15 Standard Test Method for Autoignition Temperature of Chemical 시험방법을 사용하고 있으며, 미국 표준에 근거한 계량형 Wire Basket Autoignition Test로 시행하였다(ASTM, 2016).

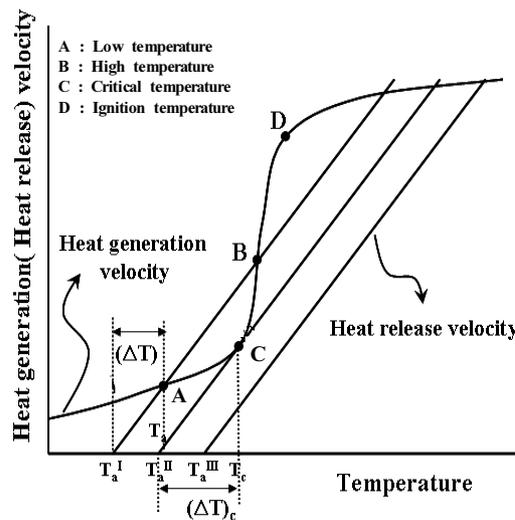


Fig. 1. Relation between heat generation and heat release in auto ignition

실험시료

타올에 흡착된 기름에 의하여 화재가 발생할 수 있는 자연발화 실험을 하기 위하여 주)송월타올에서 공급한 백색타올 (40cm × 75cm)을 사용하였으며, 오염물질은 건성유인 아마인유와 불건성유인 올리브유를 사용하였다. 아마인유는 캐나다 산을 압착한 기타 식용유지로서 100% 아마인유를 사용하였으며, 올리브유는 스페인산인 100% 올리브유를 사용하였다.

오염물질로 사용된 2종의 식물유를 타올에 고르게 분포하기 위하여 분사기기는 일본 Hitachi Ltd.사의 Air compressure (5kgf/cm².g)와 일본 De Vilbiss(No.243)의 스프레이 건을 사용하여 타올 한 장에 3분 가량의 속도로서 고르게 분포하였다.

실험장치

자연발화 실험에 사용한 장치는 Fig. 2와 같으며, 건조기, 열전대, 온도제어장치, 기록계 및 시료용기로 구성되어 있다.

건조기는 내용적 91.125 l (45cm × 45cm × 45cm)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 0.35mm이고, 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 30cm, 세로 30cm, 폭이 30cm의 크기로 형상을 입방체로 하여 무한평판에 접근하도록 하였으며, 이 용기는 다공판의 스테인리스 통으로 제작하여 6면 방향으로 열전달이 고르게 이루어지도록 하였다.

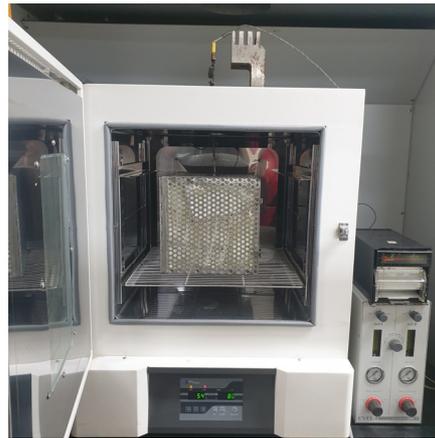


Fig. 2. Experimental apparatus for spontaneous ignition

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.

결과 및 고찰

건성유인 아마인유의 발화현상

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 제

조하는 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 경계 온도를 구할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 무한평판이라고 가정할 수 있는 퇴적 상태로 만들기 위해 직육면체의 시료 용기를 제작하였으며, 시료용기는 가로 30cm, 세로 30cm, 폭이 30cm의 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 것이다. 물론 이러한 실험장치는 이론과 실험장치에서 소개된 바와 같이 많은 이론적 근거를 바탕으로 제작되어진 것이다.

건조기의 온도를 65°C로 한 것은 국내에서 사용되는 설비의 온도와 동일하게 설정하였다.

시료로 사용된 건성유인 아마인유는 요오드화 값이 130이상으로서, 타올 한 장에 건성유인 아마인유 25ml을 스프레이 건을 사용하여 도포한 타올 5장으로 실험하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

건조기의 설정된 온도인 65°C에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였다. 실험 시작 후 약 25.1시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었을 때 시료용기 내의 온도가 상승되고 연소가 지속되면서 27.7시간에서 약 209°C의 최고 상승온도를 기록하였으며, 가연물이 연소가 된 후 서서히 온도가 낮아지는 것을 확인하였다.

Fig. 4에는 시료로 사용된 타올 한 장에 건성유인 아마인유 25ml을 스프레이건을 통하여 도포한 타올 10장으로 실험한 결과를 나타낸 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65°C에서 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°C의 최고 상승온도를 기록하였고, 가연물이 연소가 된 후 서서히 온도가 낮아지는 것을 확인하였다.

또한 시료로 사용된 타올 한 장에 건성유인 아마인유 25ml을 스프레이건을 통하여 도포한 타올 15장으로 실험한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

건조기의 온도가 65°C일 경우에 발화(화재)가 발생된 것을 확인한 것으로서, 건조기의 주위 온도가 65°C에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 62시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었다. 이후 시료용기 내의 온도가 급격하게 상승되고 연소가 지속되면서 71.1시간이 경과되었을 때 약 539°C의 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°C 까지 상승되었다. 이것은 시료인 타올의 매수가 많아 연소되면서 내부의 열이 실험장치로 열이 전달된 것으로 판단된다. 따라서 섬유의 오염물질로 묻은 건성유인 아마인유를 세탁하여 건조시킬 경우 설비의 설정온도가 65°C에서 25ml의 유지가 분포되어 있을 경우 발화되어 화재가 발생할 수 있는 것을 확인하였다.

이것은 탄소의 이중결합이 많아 불포화도가 높기 때문에, 반응속도가 빠르고, 공기 중의 산소와 결합되어 쉽게 건조되는 성질을 갖고 있다. 또한 기름도막의 형성이 쉽고, 유분의 함량이 30~40%를 함유하고 있기 때문에 적은 양의 아마인유가 흡착되어 있어도 발화(화재)가 발생할 수 있는 것으로 사료된다.

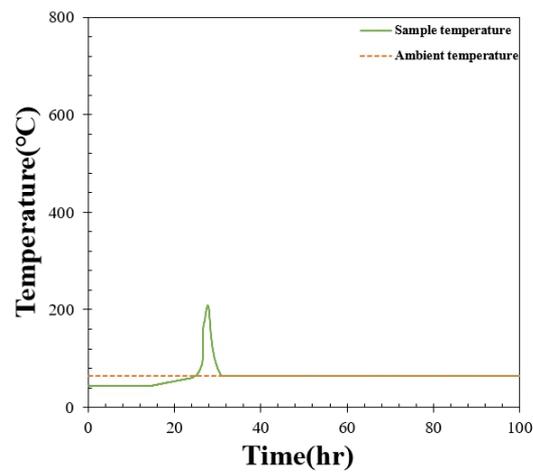


Fig. 3. Variation of temperature with time for number of towels 5, ambient temperature 65°C

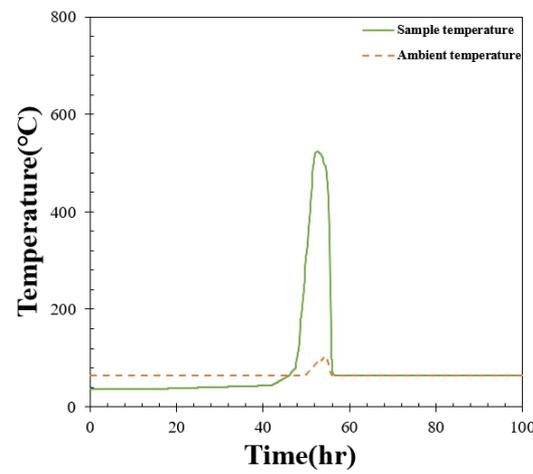


Fig. 4. Variation of temperature with time for number of towels 10, ambient temperature 65°C

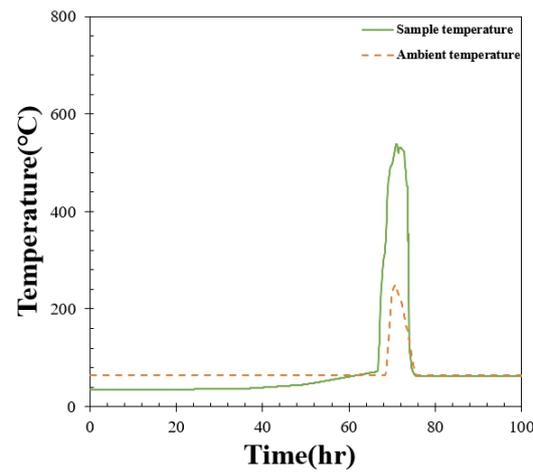


Fig. 5. Variation of temperature with time for number of towels 15, ambient temperature 65°C

불건성유인 올리브유의 발화현상

불건성유인 올리브유는 요오드화 값이 100이하로서, 탄소가 단일결합되어 있어 이미 포화되어 있다. 즉, 공기 중에서 증발하지 않고 피막을 만들지 않으며, 상온에서도 쉽게 굳어지지 않는 성질을 갖고 있다.

불건성유인 올리브유의 발화현상을 파악하기 위하여, 건조기의 온도를 65°C로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 불건성유인 올리브유 25ml을 스프레이 건을 사용하여 도포한 타올 5장으로 실험한 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

건조기의 설정온도에서 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 57시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었으나, 시료용기 내의 온도가 더 상승되지 않았으며 약 64.3시간에서 설정온도보다 약 7°C의 온도가 상승된 후 설정온도로 수렴되고 발화되지 않는 것을 확인하였다.

Fig. 7에는 건조기의 온도를 65°C로 하고, 시료로 사용된 타올 한 장에 불건성유인 올리브유 25ml을 동일하게 스프레이 건을 사용하여 도포한 타올 10장으로 실험한 결과를 나타내었다.

건조기의 설정온도 65°C에서 발화(화재)가 발생하는 것을 확인한 결과, 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 58시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었으나, 시료용기 내의 온도가 상승되지 않았으며 약 66.4시간에서 설정온도보다 약 5°C의 온도가 상승된 후 설정온도로 수렴되고 발화되지 않는 것을 확인하였다.

Fig. 8에서도 타올 한 장에 불건성유인 올리브유 25ml를 동일하게 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 15장으로 실험한 결과를 나타내었다.

설정된 온도에서 건조기의 주위 온도 65°C까지 시간이 경과됨에 따라 온도가 서서히 상승하였으며, 실험 시작 후 약 61.6시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었으나, 시료용기 내의 온도가 상승되지 않았으며 약 71.9시간에서 설정온도보다 약 3.1°C의 온도가 상승된 후 설정온도로 수렴되고 발화되지 않는 것을 확인하였다. 일반적으로 자연발화는 시료의 두께가 두꺼울수록(량이 많을수록) 발화가 용이하고 위험성이 높다. 따라서, 섬유 오염물질로 묻은 불건성유인 올리브를 세탁하여 건조시킬 경우 설비의 설정온도가 65°C에서 25ml의 유지가 분포되어 있을 경우 설정온도 보다 약간 높게 열의 축적은 발생되나 발화되어 화재가 발생되지는 않는 것으로 확인하였다.

이것은 탄소의 이중결합이 많고 반응속도가 빨라 공기 중의 산소와 결합되기 쉬운 건성유와 달리, 탄소가 단일결합되어 있어 건조가 어렵고 산소와의 결합이 어렵기 때문에 발화가 되지 않는 것으로 사료된다.

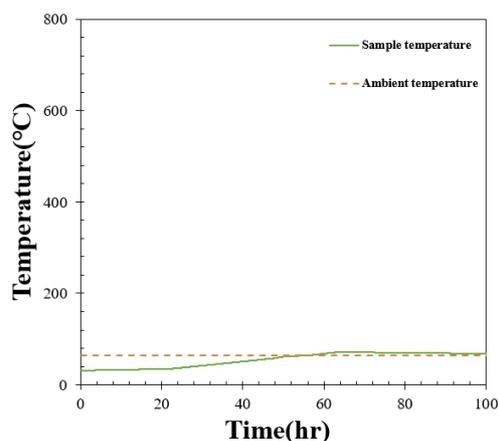


Fig. 6. Variation of temperature with time for number of towels 5, ambient temperature 65°C

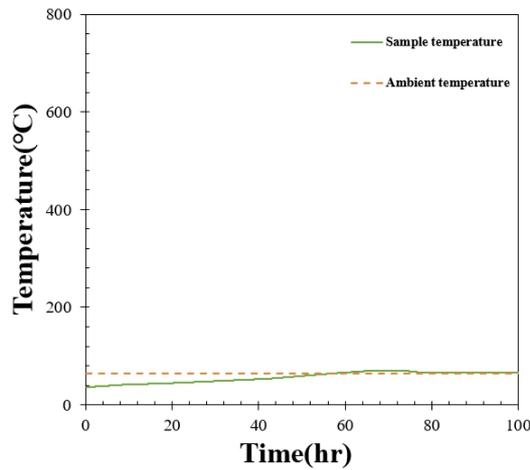


Fig. 7. Variation of temperature with time for number of towels 10, ambient temperature 65°C

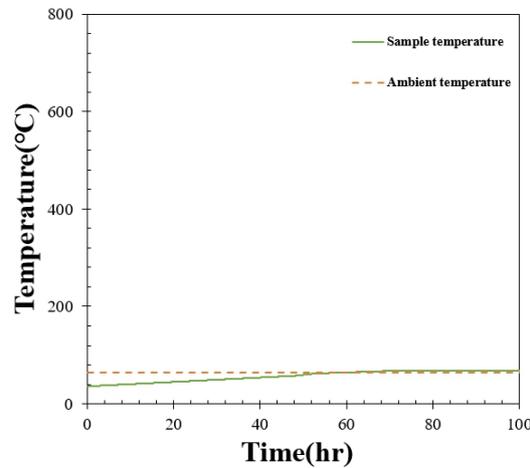


Fig. 8. Variation of temperature with time for number of towels 15, ambient temperature 65°C

결론

타올에 흡착된 기름에 의하여 점화원이 없는 상태에서 화재가 발생하는 자연발화 실험을 하기 위하여 건성유인 아마인유와 불건성유인 올리브유를 사용하여 섬유에 흡착되었을 때 자연발화가 발생하는 현상을 실험을 통하여 규명한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 아마인유를 도포한 실험용 타올을 5장으로 하고, 약 25.1시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도에 도달되었으며, 시료용기 내의 온도가 상승되고 연소가 지속되면서 27.7시간에서 약 209°C의 최고 상승온도를 기록하였다.
- (2) 아마인유 25ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 10장일 경우, 약 46시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도에서 시료용기 내의 온도가 급격하게 상승되고 연소가 지속되면서 52.6시간에서 약 524.2°C의 최고 상승온도를 기록하였다.

- (3) 시료로 사용된 타올 한 장에 건성유인 아마인유 25ml을 스프레이 건을 통하여 도포한 타올 15장으로 실험한 결과, 약 62시간이 경과했을 때 설정온도와 동일한 온도가 되었으며, 71.1시간이 경과되었을 때 약 539°C의 최고온도를 구하였다.
- (4) 불건성유인 올리브유는 설정온도보다 약간 상회는 하였으나, 탄소의 이중결합이 많고 반응속도가 빨라 공기 중의 산소와 결합되기 쉬운 건성유와 달리, 탄소가 단일결합되어 있어 건조가 어렵고 산소와의 결합이 어렵기 때문에 발화가 되지 않았다.

Acknowledgement

본 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비 CD20210689(21년도)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] ASTM E0659-15 (2016). American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Autoignition Temperature of Chemical.
- [2] Bowes, P.C., Thomas, P.H. (1966). "Ignition and extinction phenomena accompanying oxygen dependent self-heating of porous bodies." *Combustion and Flame*, Vol. 10, No. 3, pp. 221-230.
- [3] Cameron, A., MacDowall, D. (1972). "The self heating of commercial powdered activated carbons." *Journal of Applied Chemistry and Biotechnology Banner*, Vol. 22, No. 9, pp. 1007-1018.
- [4] Choi, J.W., Mok, Y.S., Ha, D.M. (2001). "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.
- [5] Choi, J.W., Jun, S.G. (2018). *Fire Safety Engineering*. Hwa Su Mog, pp. 92-93.
- [6] Choi, J.W., Kim, S.Y., Lee S.R., Choi, K.J. (1993). "A study on the ignition induction time and temperature distribution at spontaneous ignition of activated carbon." *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 8, No. 3, pp. 44-49.
- [7] Choi, J.W., Mok, Y.S., Ha, D.M. (2001). "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.
- [8] Choi, Y.J. (2017). *A Study on the Spontaneous Ignition Characteristics of Wood Pellets and Powders Used as Mixtures in Thermal Power Plants*, Ph.D. Dissertation, Pukyong National University Graduate School, pp. 1-3.
- [9] Fire Department (2011~2017). *Fire Status Statistics*. National Fire Information System. (NFDS; National Fire Data System), https://www.nfds.go.kr/fr_scls_0201.jsf.
- [10] Kim, C.J., Park I.S., Sohn, C.H. (2010). "Numerical study on the phenomenon of spontaneous ignition of coal stockpile." *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 34, No. 7, pp. 721-727.
- [11] Lim, W.S., Choi, J.W. (2008). "Thermal stability and critical ignition temperature of RPF." *Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering*, Vol. 22, No. 1, pp. 99-104.
- [12] Ministry of Food and Drug Safety (2022). *Standards and Specifications by Food, Food and Food Additives Code*. https://www.foodsafetykorea.go.kr/foodcode/03_02.jsp?idx=28.
- [13] Mok, Y.S., Choi, J.W. (2001). "A study on autoignition characteristics of methylmethacrylate-butadiene-styrene copolymer." *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 16, No. 3, pp. 83-88.
- [14] Ryu, J.W., Choi, J.W. (2013). *New Hazardous Materials Theory*, Vision Communication, pp. 249-374.
- [15] Safety Engineering Association (1983). *Fire*. Haemundang, Japan, pp. 23-26.