

타올에 흡착된 반건성유인 옥수수유의 자연발화에 대한 실험적 연구

Experimental Study on the Spontaneous Ignition of Corn Oil Adsorbed on Towels

김경수¹ · 최유정² · 유삼열³ · 정필훈⁴ · 최재욱^{5*}Kyoung-Su Kim¹, Yu-Jung Choi², Sam-Yeol Yoo³, Phil-Hoon Jeong⁴, Jae-Wook Choi^{5*}¹Graduate Student, Department of Fire Protection Engineering, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea²Lecturer, Department of Fire Protection Engineering, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea³Graduate Student, Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea⁴Professor, Department of Industrial Safety Engineering, Korea Soongsil Cyber University, Seoul, Republic of Korea⁵Professor, Department of Fire Protection Engineering, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea

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

ABSTRACT

Purpose: As corn oil is semi-drying oil, it has more double bonds than non-drying oil and is easier to combine with oxygen. In addition, among the causes of spontaneous ignition, accidents caused by oil-soaked cloths due to oxidative heat are gradually increasing. Therefore, the purpose of this study is to understand the characteristics of spontaneous combustion according to the number of towels and the amount of corn oil at 65°C. **Method:** After setting the test temperature to 65°C, 25ml, 50ml, 75ml of corn oil per towel was sprayed. The central temperature of the sample rises above the set temperature. It was determined, and when the central temperature of the sample became similar to the set temperature, it was determined as non-igniting. **Result:** After evenly distributing 25ml of corn oil per towel, as a result of the experiment, 5 towels did not ignite, and 10 and 15 towels ignited. Also, as a result of an experiment using 50ml and 75ml of corn oil per towel, spontaneous ignition occurred when the number of towels was 5, 10, or 15 sheets. **Conclusion:** Even a small amount can cause a fire if the conditions for spontaneous ignition are met.

Keywords: Spontaneous Ignition, Corn Oil, Semidrying Oil, Towel, Heat of Oxidation

요약

연구목적: 옥수수유는 반건성유로서 불건성유보다 이중결합의 수가 많고 산소와 결합하기 쉬우므로 자연발화의 조건이 충족되면 적은 양으로도 가연성 물질에 흡착될 경우에는 자연발화가 쉽게 발생된다. 또한 최근 자연발화의 원인 중 산화열에 의해 기름이 묻은 헝겊 등에 의한 사고가 늘어나고 있다. 그러므로 65°C에서 타올의 매수와 옥수수유의 양에 따른 자연발화의 특성을 파악하고자 한다. **연구방법:** 실험 온도를 65°C로 설정한 후 타올 한 장당 25ml, 50ml, 75ml에 해당하는 옥수수유를 분사시킨 후 시료의 중심 온도가 설정된 온도보다 상승하고, 타올이 연소로 인해 탈 경우에는 발화로 판정하였으며, 시료의 중심 온도가 설정된 온도와 유사할 경우에는 비발화로 판정하였다. **연구결과:** 옥수수유를 타올 한 장당 25ml씩 골고루 분포시킨 후 실험을 한 결과 타올이 5장 일 때는 비발화되었으며, 타올이 10장, 15장일 때는 발화되었다. 또한 옥수수유를 타올 한 장당 50ml, 75ml씩 사용하여 실험한 결과 타올이 5장, 10장, 15장일 때 자연발화가 발생되었다. **결론:** 옥수수유가 적은 양으로도 자연발화의 조건을 충족하면 화재가 발생할 수 있다.

핵심용어: 자연발화, 옥수수유, 반건성유, 타올, 산화열

Received | 12 August, 2022

Revised | 6 September, 2022

Accepted | 13 September, 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

의식주(衣食住)는 인간의 기본적인 생활을 위해 필요한 요소로서 삶의 질을 높이기 위해 효율과 편의성에 대한 제품이 개발되고 있다(Lee, 2020). 세탁기와 건조기는 의생활 향상을 위한 제품으로 일상생활에 자리하고 있으나, 빨랫감의 수분을 제거하기 위해 온도를 높여 사용하는 건조기는 화재로 인한 피해가 발생할 수 있어 주의가 필요하다.

2021년 1월 경기도 OO시에서 세탁물에 남은 잔여 오일류로 인해 건조기를 사용하여 건조를 하는 과정에서 화재가 발생하였으며(Incheonilbo, 2021), 2021년 12월 경기도 OO시의 산후조리원에서 천연오일이 묻은 세탁물을 고온의 건조기에서 건조 후 열을 식히지 않고 바로 세탁 바구니에 놓아 두면서 높은 온·습도에 의해 유증기가 발생되고 자연발화로 인하여 화재가 발생하였다(KFPA, 2021).

자연발화는 점화원이 없는 상태에서 물질이 공기 중 상온에서 스스로 발열하여, 계에 열이 축적되어 발화점에 도달한 순간 발화되는 현상이다. 자연발화는 적절한 수분이 존재하거나, 연료의 양이 많을수록 또는 계의 축열속도가 방열속도보다 클수록 자연발화가 용이하며, 산화열, 흡착열, 분해열, 중합열, 발효열 등의 다양한 원인에 의해서 자연발화는 발생하게 된다(Lee et al., 2018).

오일류는 『위험물 안전관리법』의 제 4류 위험물인 인화성 액체 중 동식물유류에 속하며, 요오드가에 따라 건성유, 반건성유, 불건성유로 구분된다. 건성유는 요오드가가 130 이상인 경우에 해당되며, 대표적으로 아마씨유, 해바라기유, 들기름 등이 있으며, 반건성유는 요오드가가 100 이상~130 미만일 경우로 정의하며, 옥수수유, 참기름, 채종유 등이 있다. 불건성유는 요오드가가 100 미만일 경우에 해당되며, 올리브유, 낙화생유, 피마자유 등이 있다. 동식물유는 요오드가에 따라서 분류하며, 요오드가가 높을수록 반응할 수 있는 이중결합의 수가 많아지게 되고, 산화열의 축적이 용이해진다. 따라서 건성유는 불건성유보다 화재 위험성이 증가하게 된다(Ryu, 2013).

자연발화에 관한 연구로는 국내에서 Choi et al.(2017)은 우드펠릿과 분말의 표면적에 따른 자연발화 특성을 파악하였으며, Kim et al.(2022)은 건성유인 아마인유와 불건성유인 올리브유가 흡착된 면 타올에서 자연발화가 발생하는 현상을 실험적 연구를 통해 규명하였다. 또한 Byun et al.(2021)은 들깨묵의 자연발화 및 활성화에너지를 통한 위험성 평가에 관한 연구를 진행하였다. 국외에서는 Yang et al.(2021)은 모래에 원유가 함유된 상태에서 자연발화가 발생하는 것에 대한 실험적 연구를 진행하였으며, Font(2022)는 전기로를 이용하여 잔디의 화학적 산화가 자연발화에 미치는 영향에 대해 파악하였다. 또한 Chavan et al.(2022)은 쓰레기 매립지에서 발생하는 폐기물의 자연발화 시간을 추정하여 화재를 예방하는 연구를 진행하였다.

본 연구는 세탁물에 남은 오일류의 건조 과정에서 발생할 수 있는 화재의 위험성을 밝히기 위하여 반건성유인 옥수수유를 흡착한 타올을 활용하여 실험적으로 자연발화되는 위험성을 파악하고자 하였다.

실험은 대표적인 건조기 사용온도인 65°C에서 실시하였다.

이론적 배경

열 발화 이론

열 발화 이론은 고체에 대한 자연발화의 경우에는 Frank-Kamenetskii의 열 발화 이론을 적용하며, 액체에 대한 자연발화의 경우에는 Semenov의 열발화 이론을 적용한다.

Frank-Kamenetskii의 열발화 이론에서는 산소의 영향으로 인해 확산을 고려하여야 하나, 발화한계온도 부근까지는 산소의 영향이 적으므로 고체와 기체 간의 열전달과 산소의 확산은 고려하지 않고 계 내부에서의 온도 분포를 고려해야 한다는 이론이다.

Semenov의 열발화 이론은 Arrhenius 방정식과 Newton의 냉각법칙을 적용하여 물질의 발열속도와 열의 방산속도 사이의 평형 관계에 관한 이론으로서 자연발화의 관계를 Fig. 1에 나타내었다(Choi et al., 2018).

가열온도가 T_a^I 과 같이 낮은 온도의 경우에는 곡선과 직선은 A점에서 교차하게 되고 계 내의 온도가 일정하게 유지되어 비발화가 일어나게 된다. 또한 가열온도가 T_a^{II} 의 온도에서는 직선과 곡선이 만나는 C점에서는 임계온도로서 발화와 비발화의 경계이며, 가열온도가 T_a^{III} 와 같이 높은 온도에서는 발열속도가 방열속도보다 빠르기 때문에 자연발화가 반드시 발생하게 된다.

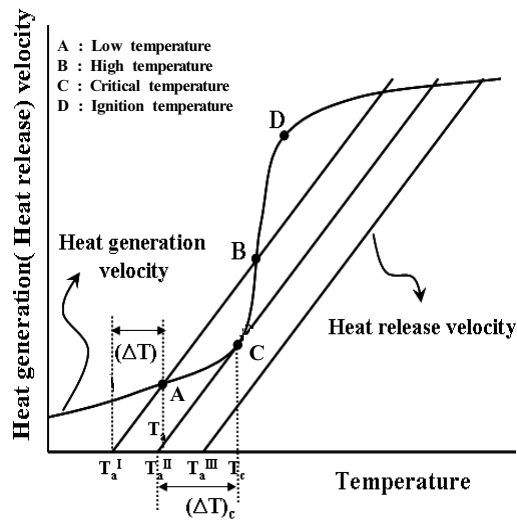


Fig. 1. Relation between heat generation and temperature in spontaneous ignition

실험 장치 및 실험 방법

실험 시료

본 연구에 사용된 시료는 주) S타올에서 제조되고, 크기가 가로 40cm, 세로 75cm(108.5g)인 흰색 타올을 사용하였다. 오일의 경우에는 주)H에서 제조된 요오드가 103 이상 125 이하인 반건성유로 분류되는 옥수수유를 사용하였다.

실험 장치

타올에 흡착된 옥수수유에 의한 자연발화 실험을 위하여 건조기, 분사기, 온도제어장치, 열전대, 시료용기 및 기록계를 사용하였으며, 본 실험에 사용된 실험 장치는 Fig. 2와 같다.

건조기는 온도를 250°C까지 상승시킬 수 있고, 내용적이 91.125L(L 45cm × H 45cm × W 45cm)인 SFCN & SDON에서 제조된 건조기를 사용하였으며, 내부 온도 분포를 일정하게 유지할 수 있는 열풍 순환식 건조기를 사용하였다. 옥수수유를

타올에 골고루 분포시키기 위하여 분사기기는 Hitachi Ltd.사에서 제조되고 게이지 압력이 5kgf/cm^2 .G인 Air cpmpressure을 사용하였다. 스프레이 건의 경우에는 De Vibiss에서 제조된 No. 243을 사용하였다. 온도제어장치는 Konics에서 제조된 모델 EC-5600을 사용하여 냉접점을 거친 보정된 주위 온도를 제어하도록 하였다. 열전대는 주위의 온도를 측정할 수 있는 열전대와 중심 온도를 측정할 수 있는 직경 0.35mm인 Chromel-Alumel 열전대 2개를 사용하였다. 주위 온도를 측정할 수 있는 열전대는 시료용기와 건조기의 벽면 중심에 설치하였으며, 중심 온도를 측정할 수 있는 열전대의 경우에는 시료용기 중심에 설치하여 온도 변화를 관찰하였다. 시료용기의 경우에는 가로, 세로, 폭이 각각 10cm, 20cm, 30cm인 3가지 종류의 용기로서 다공판의 스테인리스로 제작하였다. 기록계는 Yoko gawa에서 제조된 4151을 사용하였으며, 설정온도와 시료의 중심온도를 기록할 수 있도록 하였다.

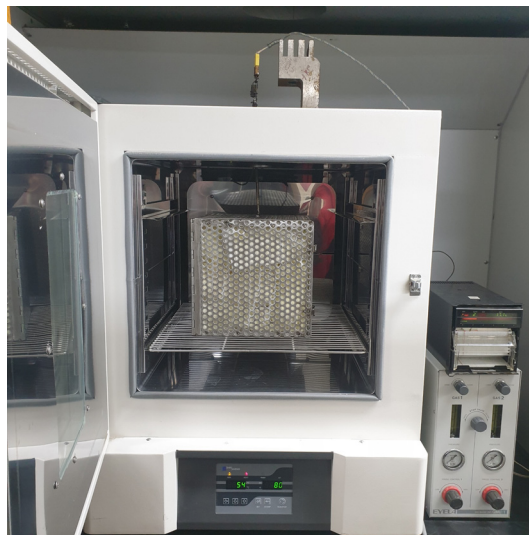


Fig. 2. Experimental apparatus for spontaneous ignition

실험 방법

대표적으로 건조기의 사용 온도인 65°C 로 설정한 후 실험시료인 타올을 5장, 10장, 15장으로 각각 25ml, 50ml, 75ml에 해당하는 옥수수유를 분사기로 골고루 분사시킨 후 용기의 크기에 맞추어 사각으로 접어 시료용기에 넣고, 건조기 중심 온도와 주위 온도를 측정할 수 있는 열전대를 설치한다.

시료의 중심 온도가 설정된 온도보다 상승하고, 타올이 연소로 인해 탈 경우에는 발화로 판정하였으며, 시료의 중심 온도가 설정된 온도와 유사할 경우에는 비발화로 판정하고 1회의 실험을 종료하였다.

결과 및 고찰

옥수수유 양이 25ml일 때

Fig. 3은 타올 한 장에 반건성유인 옥수수유 25ml를 스프레이 건을 이용하여 도포시킨 후 타올 5장, 10장, 15장을 실험한 결과를 나타내었다. 타올이 5장인 경우에는 49시간 12분에 설정온도에 도달하여 최고온도 72시간 54분까지 도달하였으나

비발화되었다.

타올이 10장일 경우에는 57시간 48분에 설정온도인 65°C에 도달하였으며, 시간이 지남에 따라 온도가 서서히 상승하여 65시간 6분에 최고온도인 579°C를 기록하였다. 또한 주위온도는 61시간 30분에 설정온도보다 높아졌으며, 이는 발화로 인하여 시료용기 내부의 온도가 높아져 건조기의 주위온도도 상승된 것으로 판단된다.

타올이 15장일 경우에는 실험이 시작된 후 온도가 서서히 상승하여 70시간 48분에 설정온도에 도달하였으며, 75시간 24분에 최고온도인 420°C를 기록하였다. 또한 발화로 인하여 주위온도의 경우에도 237°C까지 상승하였으며, 타올에 흡착된 옥수수유가 연소된 후 온도가 서서히 낮아지는 것을 확인하였다.

옥수수유를 25ml 사용하였을 때 타올의 수가 5장은 비발화, 10장 및 15장의 경우에는 발화되었다. 이는 동일한 온도에서 동일한 시료의 양을 사용하더라도 타올의 매수가 5장, 10장, 15장으로 증가할수록 열의 축적이 용이하여 자연발화가 발생할 가능성이 높아지는 것으로 판단된다. 또한 옥수수유의 경우에는 제 4류위험물 중 식물유에 속하며, 불포화도가 불건성유에 비하여 높기 때문에 공기 중 산소와 쉽게 결합되어 불건성유 보다 적은 양의 옥수수유가 흡착되어도 발화가 일어난다. 또한 시료의 매수가 많아질수록 열의 축적이 용이함으로 자연발화의 발생 가능성이 높아지는 것으로 판단된다.

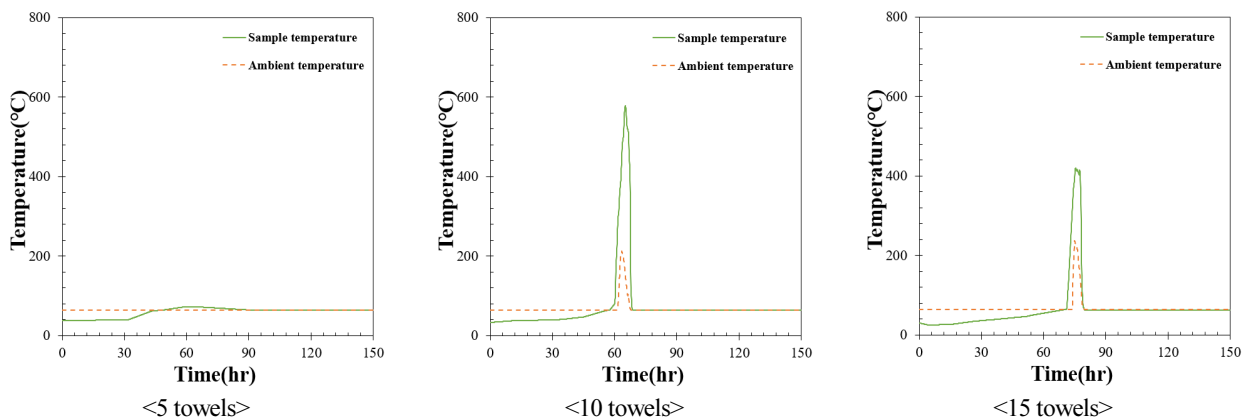


Fig. 3. Relationship between temperature and time when the amount of corn oil is 25ml

옥수수유 양이 50ml일 때

건조기의 온도를 65°C로 설정한 후 옥수수유를 50ml로 5장, 10장, 15장에 각각 분포하여 자연발화에 대한 실험 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 타올이 5장일 경우에 온도가 서서히 상승하여 설정온도인 65°C에 도달된 시간은 48시간 24분이었으며, 52시간 48분에 최고온도인 624.3°C를 기록하였다가 온도가 급격히 하강하였다. 또한 주위온도의 경우에는 발화로 인하여 50시간 12분부터 설정온도보다 온도가 서서히 상승하기 시작하였다. 이것은 타올이 연소하여 시료 용기의 외부로 열전달이 됨으로서 온도가 상승되는 것으로 사료된다.

타올이 10장일 경우에는 56시간 30분에 설정온도에 도달하였으며, 시간이 경과한 후 66시간 24분에 최고온도인 640°C를 기록하였다. 또한 타올이 15장일 경우에는 70시간 54분이 경과되었을 때 최고온도인 650°C를 기록하여 발화되었다.

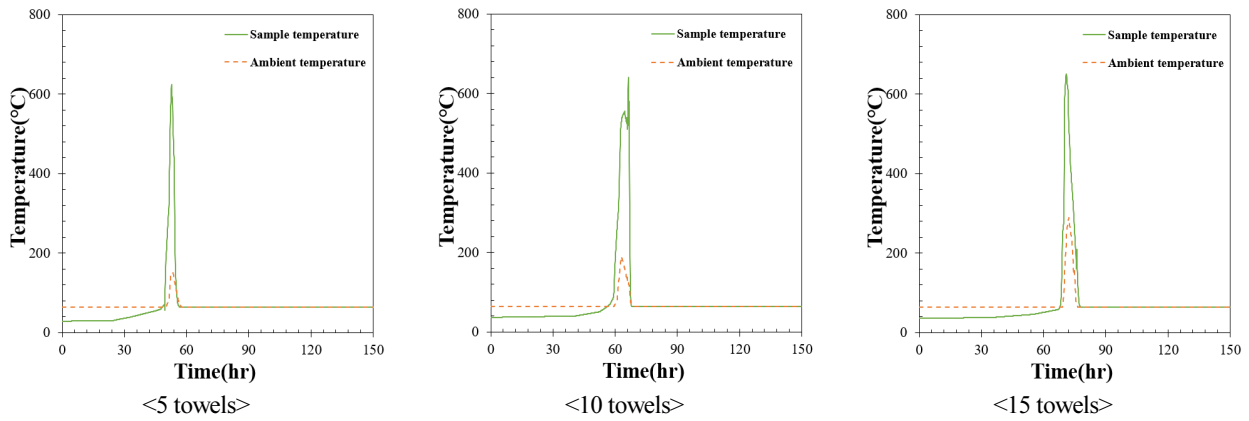


Fig. 4. Relationship between temperature and time when the amount of corn oil is 50ml

옥수수유 양이 75ml일 때

Fig. 5에는 타올 한 장당 옥수수유를 75ml를 분사시킨 후 5장, 10장, 15장을 실험한 결과를 나타내었다. 타올이 5장일 때 건조기의 주위온도를 65°C로 설정한 후 시간이 지남에 따라 온도가 서서히 상승하여 37시간에서 설정온도에 도달하였으며, 40시간 54분에 최고온도인 580°C를 기록하고 온도가 급격히 하강하였다.

타올이 10장일 경우에는 55시간이 경과할 때 설정온도에 도달하였으며, 63시간 12분에 최고온도인 650°C를 기록하여 발화되었다. 또한 타올이 15장일 경우에는 71시간에 65°C에 도달하였으며, 74시간 24분에 634°C인 최고온도를 기록하였다.

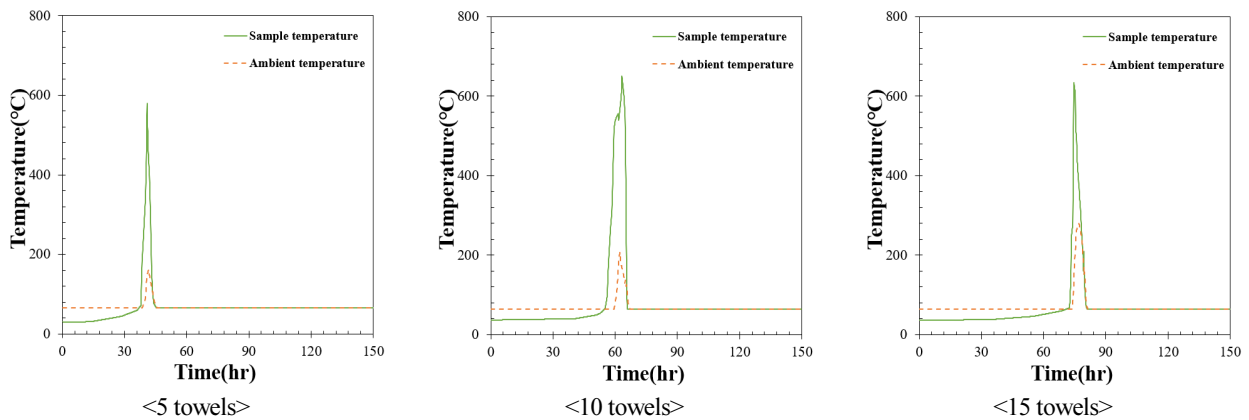


Fig. 5. Relationship between temperature and time when the amount of corn oil is 75ml

결론

자연발화의 다양한 원인 중 기름이 묻은 헝겊 등 산화열에 의한 자연발화에 관한 위험성을 판단하기 위하여 많이 사용되는 건조기의 사용온도인 65°C에서 반건성유인 옥수수유를 사용하여 타올의 매수에 따른 자연발화 현상을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 옥수수유를 타올 한 장당 25ml씩 골고루 분포시킨 후 타올 5장에 관한 자연발화 실험을 한 결과 49시간 12분이 경과 하였을 때 설정온도에 도달하였으며, 설정온도보다 8°C 정도 상승하였지만 비발화 되었다. 타올이 10장일 때 57시간 48분일 때 설정온도에 도달하였으며, 최고온도 65시간 6분에 579°C를 기록하였다. 또한 타올이 15장일 때에는 70시간 48분에 설정온도에 도달하였으며, 최고온도는 75시간 24분에 420°C를 기록하였다.
- (2) 옥수수유를 타올 한 장당 50ml씩 골고루 분포시킨 후 타올 5장에 관한 자연발화 실험을 한 결과 49시간 12분이 경과 하였을 때 설정온도에 도달하였으며, 52시간 48분에 최고온도인 624.3°C를 기록하였다. 타올이 10장일 때 56시간 30분일 때 설정온도에 도달하였으며, 타올이 15장일 때에는 70시간 54분에 설정온도에 도달하였다.
- (3) 옥수수유를 타올 한 장당 75ml씩 골고루 분포시킨 후 실험을 한 결과 타올이 5장, 10장, 15장일 때 모두 발화되었으며, 타올의 양이 증가할수록 설정온도에 도달하는 시간이 길어졌다.
- (4) 주위온도가 설정온도보다 높게 상승하는 것은 발화로 인하여 타올이 연소됨으로서 시료용기의 온도가 외부로 열전달이 발생되어 약 200~300°C 높게 기록되어 졌다.
- (5) 반건성유인 옥수수유는 불건성유보다 탄소의 이중결합 수가 많고 공기 중의 산소와 결합하기 쉽기 때문에 불건성유보다 쉽게 발화가 발생할 수 있다.

References

- [1] Byun, S.H., Choi, Y.J., Jeong, J.H., Choi, J.W. (2021). "Study on the risk assessment of spontaneous ignition and of perilla oil cakes associated activation energy." *Journal of Fire Science and Engineering*, Vol. 35, No. 2, pp. 1-8.
- [2] Chavan, D., Manjunatha, G.S., Periyaswami, L., Kumar, S., Kumar, R. (2022). "Estimation of spontaneous waste ignition time for prevention and control of landfill fire." *Journal of Waste Management*, Vol. 139, pp. 258-268.
- [3] Choi, J.W., Jeon, S.G. (2018). *Fire Protection Safety Engineering*, HwaSuMok, Seoul.
- [4] Choi, Y.J., Kim, J.H., Choi, J.W. (2017). "A study on the spontaneous ignition characteristics and fire risk of commercial wood pellets." *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 55, No. 5, pp. 623-628.
- [5] Font, R. (2022). "Analysis of spontaneous ignition of grass: Chemical oxidation and water vapor sorption." *Journal of Fire Technology*, Vol. 58, pp. 1363-1390.
- [6] Incheonilbo, <http://www.incheonilbo.com/news/articleView.html?idxno=1075164>.
- [7] Kim, K.S., Choi Y.J., Choi J.W. (2022). "An experimental study on the spontaneous ignition of flaxseed oil and olive oil adsorbed on towels." *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 18, No. 2, pp. 324-332.
- [8] Korean Fire Protection Association, <https://www.kfpa.or.kr>.
- [9] Lee, H.P., Park, Y.J. (2018). *Combustion Engineering*, HwaSuMok, Seoul.
- [10] Lee, K.J. (2020). "A strategy of smart city growth through social and living lab." *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 16, No. 2, pp. 291-298.
- [11] Ryu, J.W., Choi, J.W. (2013). *Chemistry of Hazardous Materials*, Vision Communication, Jeollabuk-do.
- [12] Yang, L., Sheng, J. (2019). "Feasibility of using the frank - Kamenetskii theory to predict the spontaneous ignition of the crude oil - Sand mixture." *Journal of Energy & Fuel*, Vol. 33, No. 6, pp. 4816-4825.