

아마인유 함유 면장갑의 자기발열 및 열폭주 임계조건에 관한 실험적 연구

남기훈*, 윤지원**, HEETHAWAKAGE SASANKA KAVINDA SERAM***

*인제대학교 소방방재학과

**창신대학교 카리스교양대학

***창신대학교 일반대학원 소방방재공학과

e-mail:jwyoony@cs.ac.kr

Experimental Study on Self-Heating and Critical Conditions of Linseed Oil-Soaked Cotton Gloves

Ki-Hun Nam*, Ji-Won Yoon**, HEETHAWAKAGE SASANKA KAVINDA SERAM***

*Dept. of Fire & Disaster Prevention, Inje University

**CHARIS of College of Liberal Arts, Changshin University

***Dept. of Fire & Disaster Prevention Engineering, Changshin University

요약

본 연구에서는 아마인유가 함유된 면장갑의 자기발열 특성을 평가하기 위하여 자기발열성 실험장치를 이용한 실험을 수행하였다. 아마인유(linseed oil)는 대표적인 건성유로서 산소와의 산화반응을 통해 경화되는 특성을 가지며 주로 목재 마감재, 도료, 오일 스테인 및 산업용 코팅 재료 등에 널리 사용된다. 그러나 이러한 산화반응은 발열을 수반하므로 면과 같은 다공성 물질에 흡착된 상태에서는 열이 내부에 축적되어 자연발화의 원인이 될 수 있다. 따라서 본 연구의 목적은 아마인유 함유 면장갑의 온도 조건에 따른 자기발열 발생 여부를 실험적으로 규명하고 임계조건 및 화재 위험성을 정량적으로 평가하는 데 있다. 실험은 설정온도 100°C, 120°C, 140°C 조건에서 수행하였으며 아마인유(5g, 10g, 15g)를 면장갑에 도포하여 실험을 진행하였다. 온도는 아마인유가 도포된 면장갑 내부온도($T_1 \sim T_3$)와 표면온도(T_4)를 측정하였다. 실험방법과 자기발열성 평가는 GHS(Globally Harmonized System)의 UN Test N.4 시험 기준으로 하여 설정온도 대비 60°C 이상의 온도 상승($\Delta T \geq 60^\circ\text{C}$)이 발생한 경우 자기발열성이 나타난 것으로 판단하였다. 실험 결과, 100°C 및 120°C 조건에서는 모든 시료에서 $\Delta T \geq 60^\circ\text{C}$ 조건을 만족하지 않아 자기발열성이 나타나지 않았다. 반면 140°C 조건에서는 모든 시료에서 설정온도 대비 60°C 이상의 온도 상승이 발생하였다. 또한 온도 증가에 따라 최고온도 도달 시간이 감소하는 경향을 보였으며 이는 Arrhenius 반응속도 이론에 따른 온도 의존성과 일치한다. 이러한 결과를 바탕으로 본 실험 조건에서 아마인유 함유 면장갑의 자기발열 임계온도는 120°C와 140°C 사이에 존재하는 것으로 판단된다. 본 연구는 건성유 함유 물질의 산화발열에 의한 화재 발생 메커니즘을 실험적으로 규명하고, 저장 및 취급 과정에서의 화재 예방을 위한 기초자료를 제공한다.

1. 서론

건성유는 산소와의 산화반응을 통해 경화되는 과정에서 발열을 수반하며, 아마인유는 대표적인 건성유로서 목재 마감재, 도료 및 코팅 재료 등에 널리 사용된다. 그러나 이러한 산화반응은 면이나 헝겊과 같은 다공성 물질에 흡착된 경우 열이 내부에 축적되어 자기발열(self-heating)을 유발하고, 자연발화로 이어질 수 있다. 실제로 건성유가 흡착된 작업용 천이나 폐기물에서 화재가 발생하는 사례가 보고되고 있어 이에 대한 정량적 위험성 평가가 요구된다.

자기발열 현상은 화학반응 속도와 열전달 간의 상호작용에

의해 결정되는 비선형 현상으로, 일정 온도 이상에서 급격한 온도 상승이 나타나는 임계적 특성을 가진다. 이를 설명하기 위해 Arrhenius 반응속도 이론과 Frank-Kamenetskii(FK) 이론이 활용되며, 각각 반응속도의 온도 의존성과 발열·열손실 간의 균형을 기반으로 자기발열 거동을 해석할 수 있다. 본 연구에서는 아마인유가 함유된 면장갑을 대상으로 설정온도 100°C, 120°C, 140°C 조건에서 자기발열 실험을 수행하고 시료 질량(5 g, 10 g, 15 g)에 따른 온도 변화를 분석하였다. 또한 내부온도($T_1 \sim T_2$) 및 표면온도(T_4)를 측정하여 자기발열 거동을 평가하고 Arrhenius 및 FK 이론을 적용하여 자기발열 임계조건을 도출하고자 하였다.

2. 이론적 배경

자기발열 현상은 시료 내부에서 발생하는 산화반응과 같은 발열 반응에 의해 지배되며 반응속도는 온도에 매우 민감하게 의존한다. Arrhenius 반응속도 이론은 반응속도와 온도의 관계를 정량적으로 설명하는 모델로 반응속도 상수는 온도가 증가할수록 지수적으로 증가한다. 이러한 특성으로 인해 자기발열 시스템에서는 반응속도 증가가 발열량 증가로 이어지고, 이는 다시 온도를 상승시키는 양의 피드백을 형성하여 일정 조건에서 열폭주로 발전할 수 있다. 또한 유도시간(t_{ind})은 반응속도와 반비례 관계를 가지며, $\ln(t_{ind})$ 와 $1/T$ 사이의 선형 관계를 통해 반응의 온도 의존성을 분석할 수 있다.

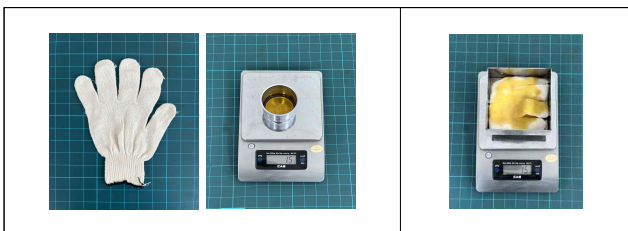
자기발열 시스템의 열적 안정성은 발열과 열손실 간의 균형에 의해 결정되며, FK 이론은 이를 무차원 파라미터(δ)로 정의하여 평가한다. δ 값은 온도 및 시료 크기에 따라 증가하며, 임계값(δ_{cr})을 기준으로 안정 상태, 임계 상태, 불안정 상태로 구분된다. 특히 δ 가 임계값을 초과할 경우 급격한 온도 상승과 함께 열폭주가 발생한다.

자기발열성 물질의 위험성 평가는 GHS(Class 4.2)의 기준에 따라 수행되며 UN Test N.4 시험 방법을 통해 온도 상승 여부를 판단한다. 본 연구에서는 이를 참고하여 설정온도 대비 60°C 이상의 온도 상승($\Delta T \geq 60^\circ\text{C}$)이 발생한 경우 자기발열성이 나타난 것으로 정의하였다.

3. 연구방법

3.1 실험재료

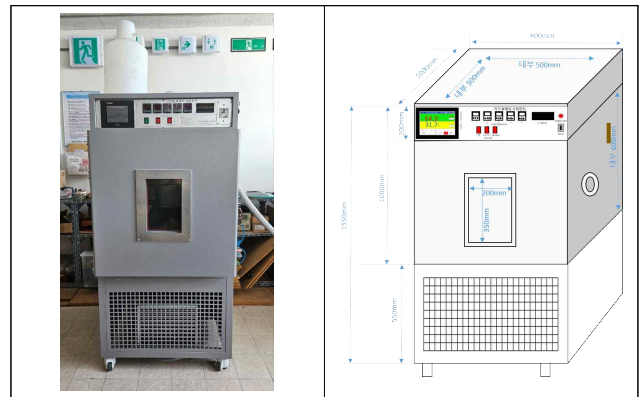
본 연구에서는 건성유의 대표 물질인 아마인유(linseed oil)와 면장갑(cotton glove)을 실험재료로 사용하였다. 아마인유는 공기 중 산소와 반응하여 산화·중합 반응을 일으키며 발열을 수반하는 특성을 가지는 물질로, 자기발열 및 자연발화 위험성이 높은 것으로 알려져 있다. 면장갑(15g)은 다공성 구조를 가지며 아마인유를 흡착·보유할 수 있어 실제 화재 발생 조건을 모사하기에 적합한 재료이다. 시료는 면장갑에 일정량의 아마인유를 균일하게 함침시킨 후 사용하였으며 실험 변수로 시료 질량을 5g, 10g, 15g으로 설정하였다. 각 시료는 동일한 조건에서 제작하여 실험 간 재현성을 확보하였다.



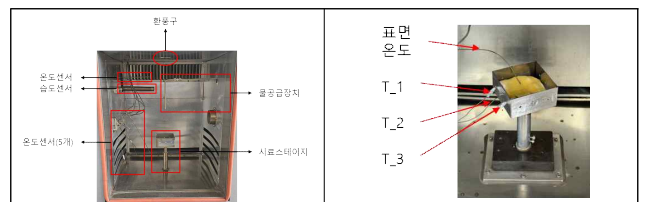
[그림 1] 실험재료

3.2 실험방법

자기발열 특성 평가는 자기발열성 실험장치를 이용하여 수행하였다. 실험은 항온 조건에서 진행되었으며 설정온도는 100°C, 120°C, 140°C로 설정하였다. 시료는 실험장치 내부에 설치된 반응 용기에 배치하였으며 외부 환경의 영향을 최소화하기 위하여 일정한 온도 조건을 유지하였다. 온도 측정은 시료 내부에 설치된 온도센서(T_1, T_2, T_3)를 통해 내부 온도를 측정하고, 시료 표면에 부착된 센서(T_4)를 통해 표면 온도를 측정하였다. 자기발열성의 판단 기준은 GHS (Globally Harmonized System)의 UN Test N.4 시험 방법을 참고하여 설정하였으며 설정온도 대비 60°C 이상의 온도 상승($\Delta T \geq 60^\circ\text{C}$)이 발생한 경우 자기발열성이 나타난 것으로 판단하였다. 또한 온도 상승 곡선을 기반으로 최고온도 및 유도시간을 도출하여 자기발열 거동을 정량적으로 분석하였다.



[그림 2] 자기발열성 재현 실험장치



[그림 3] 실험장치 내부 및 온도센서

4. 연구결과 및 고찰

각 온도 조건(100°C, 120°C, 140°C)에서 시료의 온도 변화를 분석한 결과, 설정온도에 따라 자기발열 거동이 명확히 구분되었다. 100°C 조건에서는 모든 질량에서 내부온도(T_1~T_3)와 표면온도(T_4)가 설정온도에 수렴하였으며 추가적인 온도 상승은 나타나지 않았다. 이는 발열과 열손실이 균형을 이루는 안정 상태로, 자기발열이 발생하지 않은 것으로 판단된다.

120°C 조건에서도 일부 온도 상승은 관찰되었으나 설정온도 대비 60°C 이상의 상승($\Delta T \geq 60^\circ\text{C}$)은 발생하지 않았으

참고문헌

- [1] United Nations, Recommendations on the Transport of Dangerous Goods: Manual of Tests and Criteria, 7th Rev. ed., United Nations, 2019. (UN Test N.4)
- [2] European Chemicals Agency (ECHA), Guidance on the Application of the CLP Criteria, Version 5.0, 2017.
- [3] Juita, Bogdan Z., Eric M. Kennedy, John C. Mackie, and Bogdan Z. Dlugogorski, "Linseed oil and its tendency to self-heat," Fire Safety Science- Proceedings of the Tenth International Symposium, pp. 389-400, 2011.
- [4] Pushp, Mohit, Anders Lönnermark, Mikael Hedenqvist, and Peter Vikegard, "Heat production in municipal and industrial waste as revealed by isothermal microcalorimetry," Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 147, pp. 8271-8278, 2022.

며 급격한 온도 증가 없이 열적 평형 상태가 유지되었다. 반면 140°C 조건에서는 모든 시료에서 $\Delta T \geq 60^\circ\text{C}$ 이상의 온도 상승이 나타났으며, 초기 완만한 증가 이후 급격한 상승을 보이는 전형적인 자기발열 특성이 관찰되었다. 이는 발열 반응이 열손실을 초과하여 열폭주 상태에 도달한 것으로 해석된다.

최고온도는 온도가 증가할수록 비선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 120°C에서는 약 150~170°C, 140°C에서는 200°C 이상의 온도가 나타났다. 또한 온도 증가에 따라 유도 시간은 감소하였으며, 120°C에서 약 1.4~1.6 hr, 140°C에서 약 0.7~0.9 hr로 나타났다. 이러한 결과는 Arrhenius 반응속도 이론과 일치하며 본 시스템이 열활성화 반응에 의해 지배됨을 나타낸다. FK 이론에 따르면 100°C는 안정 상태($\delta < \delta_{cr}$), 120°C는 임계 근접 상태($\delta \approx \delta_{cr}$), 140°C는 불안정 상태($\delta > \delta_{cr}$)로 해석되며, 자기발열 임계온도는 120°C와 140°C 사이에 존재하는 것으로 판단된다. 또한 GHS 기준($\Delta T \geq 60^\circ\text{C}$)을 적용한 결과, 100°C와 120°C에서는 자기발열이 나타나지 않았고, 140°C에서만 자기발열이 발생하여 실험 결과와 이론적 해석이 일치함을 확인하였다.

[표 1] 실험물질에 따른 자기발열성 발생 결과

No.	아마인유 양 (g)	설정온도 (°C)	자기발열성 여부
1	5	100	X
2	10	100	X
3	15	100	X
4	5	120	X
5	10	120	X
6	15	120	X
7	5	140	O
8	10	140	O
9	15	140	O

4. 연구결과 및 고찰

본 연구에서는 아마인유가 함유된 면장갑의 자기발열 특성을 실험적으로 분석하고, Arrhenius 반응속도 이론, FK 이론 및 GHS 기준을 기반으로 임계조건을 평가하였다. 실험 결과, 100°C 및 120°C 조건에서는 설정온도 대비 60°C 이상의 온도 상승이 나타나지 않아 자기발열이 발생하지 않았으며, 140°C 조건에서는 모든 시료에서 $\Delta T \geq 60^\circ\text{C}$ 를 만족하는 온도 상승이 발생하여 열폭주 특성이 확인되었다. 또한 온도 증가에 따라 유도시간이 감소하는 경향이 나타났으며, 이는 Arrhenius 이론과 일치하였다. FK 이론을 통해 해석한 결과, 본 실험 조건에서의 자기발열 임계온도는 120°C와 140°C 사이에 존재하는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구 결과는 건성유 함유 물질의 자기발열 및 화재 위험성 평가를 위한 기초자료로 활용될 수 있다.