마이크로캡슐을 활용한 초기 화재용 자동소화약제에 관한 연구

Automatic Fire Extinguishing Agent Using Microcapsule for Early Fires

이영삼* · 백수호**

Lee, Youngsam*, and Baek, Sooho**

Abstract

According to fire statistics analysis of the nation's fire department between 2015–2019, the most common cause of fire was electrical fire. As reported, 47,135 fires were caused by electricity, 22,852 were caused by mechanical causes, and 871 were caused by gas leakages. In this study, the fire adaptability of microcapsulated fire extinguishing agents was tested against small space electrical fires, such as electrical distribution boards. The tests showed that the fire extinguishing agent inside the capsule was released after initial fire contact and the fire of n-heptane was extinguished within 4.48 seconds (on average). Therefore, the KFI small space B-level fire extinguishing test by the Korea Institute of Fire and Industry met the criteria that the fire was extinguished and did not reoccur within 90 s after the end of the preliminary combustion. In addition, this fire extinguisher (agent) dramatically improved the volume of existing cylinder-type fire extinguishers for small spaces. However, there are no national fire safety codes (NFSCs) for this agent. Therefore, it is necessary to enact fire safety standards for this agent for smooth-field applications.

Key words : Electric Fire, Electric Distribution Board, Small Space, Extinguishing Agent, Fire Extinguishing Test

요 지

우리나라 소방청 화재통계자료(2015~19년)를 원인별로 분석해보면, 전기로 인한 화재가 47,135건, 기계적 원인에 의한 화재가 22,852건, 가스누출에 의한 화재가 871건순으로 나타났다. 그래서 가장 많은 화재의 원인이 전기화재라는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 전기화재 중 전기 분전반 등 소공간 화재를 대상으로 마이크로캡슐 소화약제의 화재 적응성을 실험하였다. 실험결과, 화재접촉 이후 캡슐 안에 있던 소화약제가 방사되어 평균 4.48초에 노르말헵탄(n-heptane)의 화재가 진압되었다. 따라서 한국소방산업기술원 KFI 소공간 B급 소화시험의 “예비연소 종료 후 90초 이내에 소화되고 재발화되지 아니할 것” 기준을 충족하였다. 또한 본 소화용구(약제)는 기존 소공간용 실린더 타입 소화용구의 부피 문제점을 획기적으로 개선하였다. 하지만 아직 본 약제에 대한 국가화재안전기준(NFSC)은 없는 실정이다. 따라서 원활한 현장 적용을 위해 본 약제에 대한 화재안전기준 제정이 필요하다고 판단된다.

핵심용어 : 전기화재, 분전반, 소공간, 소화약제, 소화시험

1. 서 론

오늘날 경제가 발전하면서 산업 및 건물시설의 대형화, 복잡화, 대용량화에 의한 화재 피해가 더욱 커지고 복잡화되고 있다(Lee et al., 2008). Table 1 (National Fire Service 119, 2020)과 같이 소방청 홈페이지 자료실에 최신 화재통계

자료를 원인별로 분석해보면, 2015~19년도에 총 화재 214,467건 중 전기로 인한 화재가 47,135건, 기계적 원인에 의한 화재가 22,852건, 가스누출에 의한 화재가 871건순으로 나타났다. 그래서 우리나라에 가장 많은 화재의 원인이 전기화재라는 것을 알 수 있다. 또한 Table 2 (Korea Electrical Safety Corporation, 2020)와 같이 전기화재를 발화형태별로

*교신저자, 정회원, 오산대학교 소방안전관리과 교수(Tel: +82-31-370-2773, Fax: +82-31-371-7439, E-mail: win203203@naver.com)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Fire Safety Management, Osan University

**스페이스파워(주) 대표이사
CEO of Space Power Co., Ltd.

Table 1. Current Status of Total Fire

(Unit: number)

Classification	Sum	Elec. cause	Mech. cause	Gas leak	Others
2019 year	40,103	9,459	4,046	162	26,436
2018 year	42,338	10,471	4,619	211	27,037
2017 year	44,178	9,264	4,489	175	30,250
2016 year	43,413	8,962	5,187	177	29,087
2015 year	44,435	8,979	4,511	146	30,799

Table 2. Analysis of Each Fire form in Electric Fire

Classification	Sum	Short circuit due to insulat. deterioration	Unidentified short circuit	Short circuit due to tracking	Others
2019 year	9,459	2,238	2,512	1,068	3,641
2018 year	10,471	2,617	2,551	1,168	4,135
2017 year	9,264	2,362	2,455	894	3,553
2016 year	8,962	2,334	2,091	923	3,614
2015 year	8,979	2,290	2,170	799	3,720

Table 3. Analysis of Fire in Each Electric Equipment

Classification	Sum	Cabinet panel	Integrat. wattmet.	Photovoltaic	Others
2019 year	1,390	498	204	62	626
2018 year	1,595	620	239	80	656
2017 year	1,488	604	232	45	607
2016 year	1,671	674	241	79	677
2015 year	1,040	401	152	63	424

5년간 분석하였다. 분석결과 전기적 원인에 의한 화재 중 절연연화에 의한 단락화재가 총 11,841건으로 가장 많았으며, 다음으로 미확인단락의 화재가 11,779건 순으로 발생한 것으로 나타났다. 그리고 Table 3과 같이 전기설비별 화재를 5년간 분석할 경우 분전반(배전반 포함)에서 발화한 화재가 총 2,797건으로 가장 많이 발생하였다. 이러한 전기화재에 대응하기 위한 전기설비 보호기기로 배선용차단기(MCCB)와 충전부에 인체접촉에 의한 감전사고와 전기화재 및 지락에 의한 전기설비 사고방지 등을 목적으로 누전차단기를 설치 사용하고 있다.

따라서 본 연구에서는 전기화재 중 Fig. 1과 같이 분전반에서 발생하는 화재(Gyeongsangbukdo Chilgok Fire Station (119) and Break News Daegu Gyeongbuk, 2019), 즉 트래킹과 누전차단기 또는 전기설비적 결함, 전기과부하 등에 의한 화재(Choi et al., 2003; Choi and Kim, 2017; Park and Kim, 2017)를 진압할 수 있는 소화약제(마이크로캡슐 입자를 혼합하여 치약, 로프, 스티커타입, 롤 테이프타입 등으로 제품화)를 분전반 내부에 설치하여 진압할 수 있는 장치, 즉 마이크로캡슐 타입 자동소화약제의 화재진압 적응성을 검증하는 데 목적이 있다.

Fig. 1. Switchboard Fire

2. 연구의 이론 및 실험방법

2.1 연구의 이론

마이크로캡슐을 활용한 자동소화약제에 대한 정확한 화재안전 및 승인기준이 없어, 국가화재안전기준인 소화기구

및 자동소화장치의 화재안전기준(NFSC 101, 2018), 한국소방산업기술원의 소공간용 소화용구의 인정기준(KFI, 2019) 등을 검토 및 참조하였다.

2.1.1 자동소화장치

자동소화장치란 소화약제를 자동으로 방사하는 고정된 소화장치로서 법 제 36조에 따라 형식승인 받은 유효설치범위(설계방호체적, 최대설치높이, 방호면적 등을 말한다) 이내에 설치하여 소화하는 다음 각 목의 것을 말한다.

- 가. 주방용자동소화장치란 가연성가스 등의 누출을 자동으로 차단하며, 소화약제를 방사하여 소화하는 소화장치를 말한다.
- 나. 캐비닛형자동소화장치란 열, 연기 또는 불꽃 등을 감지하여 소화약제를 방사하여 소화는 캐비닛형태의 소화장치를 말한다.
- 다. 가스식자동소화장치란 열, 연기 또는 불꽃 등을 감지하여 분말의 소화약제를 방사하여 소화하는 소화장치를 말한다.
- 라. 분말식자동소화장치란 열, 연기 또는 불꽃 등을 감지하여 분말의 소화약제를 방사하여 소화하는 소화장치를 말한다.
- 마. 고체에어로졸자동소화장치란 열, 연기 또는 불꽃 등을 에어로졸의 소화약제를 방사하여 소화하는 소화장치를 말한다.
- 바. 자동화산소소화장치란 화재 시 화염이나 열에 따라 소화약제가 확산하여 국소적으로 소화하는 소화장치를 말한다.

2.1.2 소공간용 소화용구의 KFI 인정기준

이 기준은 분전반, 배전반 등 소공간(체적 0.36 m^3 미만인 경우에 한함)의 화재를 자동으로 소화하는 간이형 소화용구(포소화약제 또는 액체제 소화약제를 사용하는 것은 제외한다)에 대하여 적용한다.

- 가. “소공간용소화용구(이하 소화용구라 한다)”란 소공간의 화재를 자동으로 감지하여 소화하는 간이형 소공간소화용구를 말한다.
- 나. “소공간용소화용구화합물(이하 소화용구화합물이라 한다)”이란 방염성물질, 수지 등의 혼합물로서 화재를 소화하는 가스 또는 물질을 방출하는 물질을 말한다.
- 다. 소화용구의 구조는 다음 각 호에 적합하여야 한다. 첫째, 소화용구는 작동이 확실하고 취급점검 및 정비가 용이하여야 하며, 내구성이 있어야 한다. 둘째, 소화용구의 고정장치는 쉽게 떨어지지 않고 견고하게 고정할 수 있어야 한다. 셋째, 소화용구는 최소한 $0^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ 범위 이상의 사용온도범위를 가지도록 설계하여야 한다. 이 경우 사용온도범위는 5°C 의 간격을 두어 확대하여 설계할 수 있다. 넷째, 소화용구의 중량은 설계값의 $-2 \text{ wt}\% \sim 5 \text{ wt}\%$ 이내이어야 한다.

2.2 시료의 특성 및 실험방법

2.2.1 마이크로캡슐의 소화약제의 물적특성

Table 4 (RL; RUSINTECH LLC, 2016)와 같이 마이크로캡슐 소화약제의 주요성분은 퍼플루오로(2-메틸-3-펜탄온)이다. 본 성분은 3M의 노벡(Novec) 1230 성분을 기초로 하고 있다(3M, 2018). 화학식은 $\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}$ 이고, 분자량은 316.04444 g/mol 이다. 두 번째로 많은 성분이 실리콘 모체(40%)이다. 그리고 기타 성분으로 포토그래픽 젤라틴(3%), 포르말린(1%), 중합체 바인더 - 폴리비닐 아세테이트(1%)로 구성되어 있다.

그리고 Figs. 2 and 3은 본 약제의 주성분인 퍼플루오로(2-메틸-3-펜탄온)의 분자구조이다. 먼저 분자의 화학적 구조는 원자의 배열과 각 해당 원자들 간의 화학결합으로 결정된다. 퍼플루오로(2-메틸-3-펜탄온) 분자는 6개의 탄소 원자, 1개의 산소 원자 그리고 12개의 불소 원자로 구성되어 총 19개의 원자로 형성된다. 퍼플루오로(2-메틸-3-펜탄온) 분자에는 총 18개의 화학결합이 있으며, 이는 18개의 비수소결합, 1개의 다중결합, 2개의 단일결합, 1개의 이중결합 그리고

Table 4. Composition/Information on Ingredient

Ingredient	Weight	CAS. Number
Fire extinguishing agent - perfluoro (2-methyl-3-penta-none) $\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}$	55%	CAS. No. 756-13-8
Photographic gelatine	3%	
Formalin	1%	
The polymeric binder - polyvinyl acetate $[-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{OCOCH}_3)-]_n$	1%	CAS. No. 9002-89-5
Silicone matrix	40%

Fig. 2. Two-Dimensional Structure of Perfluoro (2-methyl-3-pentanone)

Fig. 3. Three-dimensional Structure of Perfluoro (2-methyl-3-pentanone)

1개의 케톤(지방족)로 구성되어 있다(Mol-Instincts, 2019). 화재 진압의 원리는 마이크로캡슐 안에 내용물인 소화약제(3M 노백 1230)가 불에 접촉이 되면 캡슐코팅이 녹으면서 내용물이 기체화 되어 화재를 진압(질식작용 등)하는 것이다.

2.2.2 마이크로캡슐 소화약제의 제조방법

본 약제 제조는 3M의 노백 1230의 약제를 마이크로 사이즈($0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$)로 코팅(실리콘 등)하는 기술이고, 또한 본 기술은 제조사의 영업비밀로 되어 있어 설명에 한계가 있다. 하지만 일반적인 코팅방법은 심물질계면에 벽재 물질의 퇴적을 이용하는 경우와 계면으로의 반응을 이용해 피막을 형성시키는 경우로 크게 나눌 수 있다. 주요한 방법을 열거하면 먼저 상분리법, 액중 건조법, 용해분산 냉각법, 스프레이드라이빙법, 팽 코팅법, 계면중합법, In Situ 중합법, 액중경화 피복법 등이 사용된다. 따라서 본 연구에서는 노백 1230의 원천기술(특허 등)을 보유하고 있는 3M과 노백 1230 약제의 코팅기술(특허 등)을 가지고 있는 러신텍 LLC의 기술(약제)를 활용하여 제품을 만들고, 그 제품이 화재진압에 적용성이 있는지를 검증하는 것으로 한정하여 연구를 하였다.

2.2.3 실험방법

2.2.3.1 실험기준 및 소화시험(실험)모형제작

본 실험은 소방산업기술원의 KFI 인정기준 중 소공간 소화용 소화시험기준을 사용하였다. 그 이유는 전기분전반 화재는 소방법에서 소공간 화재로 분류하기 때문이다. 소화시험기준의 경우 크게 A급 소화시험(목재 소화시험: 예비연소 종료 후 600초 이내에 소화되고 잔염이 없어야 하며, 재발화되지 아니할 것)과 B급 소화시험(유류 소화시험: 예비연소 종료 후 90초 이내에 소화되고 재발화되지 아니할 것) 있는데, 그 중 본 실험에서는 B급 소화시험을 적용하였다.

Fig. 4. Class B (Petrol) Fire Extinguishing Test Model (Unit: mm)

Fig. 4는 KFI 인정기준에서 요구하는 B급(유류화재) 소화 시험모형이다. 세부사항으로는 세로(L_1), 가로(L_2), 두께 3 mm 이다.

Fig. 5는 KFI 인정기준에서 요구하는 B급(유류화재) 시험실의 구성도 및 최대 개구부 면적이다.

세부기준내용으로는 첫 번째, 측면의 상단과 하단에서 50 mm 이내에 동일 면적 및 형태의 개구부를 2개 이상 설치한다. 두 번째, 소화모형은 시험실의 중앙에 설치한다. 세 번째, 소화용구는 사용매뉴얼을 고려하여 설치한다. 네 번째, 소화약제량은 소화농도(밀도)를 적용한다. 다섯 번째, 개구부의 면적(A)은 동일해야 하며 개구부의 개수(n)는 2개 이상이어야 한다. 그리고 그림의 치수 등을 설명하면 1은 개구부(mm^2), a 는 시험실의 장변(mm), b 는 시험실의 단변(mm), c 는 이격거리(mm , 50 mm 이내), H 는 시험실의 높이(mm), A 는 개구부의 면적(mm^2), V 는 시험실의 체적(mm^3 , $a \times b \times H$), A_{max} 는 최대개구부면적(mm^2), n 은 개구부의 개수이다.

Fig. 5. Schematic Diagram of the Test Room

Fig. 6. Fire Schematic Diagram Making Based on KFI Code

Fig. 6은 KFI 인정기준에 따라 실험장치를 제작하였다. 실험장치의 세부사양은 소화시험실크기가 $0.14 \times 0.12 \times 0.4$ m이고, 개구부면적이 $\varnothing 32$ mm 2개이다.

2.2.3.2 실험방법

소공간 소화실험(시험)은 KFI 인정기준에 따라 진행하였다. 세부실험방법으로는 B급 소화시험모형에 노르말헵탄(n-heptane)을 넣고 소화시험실 바닥으로부터 50 mm 이상 이격하여 소화시험실 중앙에 위치시킨다. 그리고 소화시험모형의 노르말헵탄(n-heptane)에 점화하여 30초간 예비연소 후 문을 닫고 시험한다. 다만, 예비연소는 소화시험모형 밖에서 실시하고 예비연소 종료 15초전부터 소화설비 작동 전까지의 사이에 소화시험모형 중앙에 위치하도록 넣어 시험한다. 그리고 데이터의 신뢰성을 위해 실험을 3회 반복하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시료제작/세팅 및 실험준비

시료는 구슬타입의 마이크로캡슐 소화약제 알갱이들(크기: $0.2 \sim 0.3$ mm)을 스티커 형태(일반 산업용 사포처럼 알갱이 미립자들을 스티커에 부착)로 성형가공하여 소화용구를 제작하였다.

Fig 7은 실제 시료의 모습과 시료를 규격에 맞도록 재단하는 그림이다. 시료에 세부사항의 경우 중량이 27 g 제품크기는 $138 \times 100 \times 1.5$ mm이다.

Fig. 8은 소화시험모형 밖에서 시험규격에 맞게 재단하고 그 시료를 소화시험용 시료틀에 넣어 고정시킨 후 소화시험모형의 천장에 시료틀을 고정시키는 그림이다.

Fig. 7. Preparation of Test Sample

Fig. 8. Sample Setting in the Fire Schematic Diagram Test Room

3.2 실험 및 결과 고찰

소화실험은 국내에 마이크로캡슐 소화성능시험 기준이 없어, 한국소방산업기술원의 기준인 소공간용 소화용구의 KFI인정기준에 따라 3회 반복 실험을 하였다. 실험은 Fig. 9와 같이 실시하였다. 먼저 예비연소의 경우 소화시험모형 밖에서 노르말헵탄(n-heptane)을 가열도구인 연료받이용 틀에 넣고 토치로 점화를 실시하고, 30초간 예비연소를 실시한 후 종료 15초전부터 소화설비 작동 전까지의 사이에 소화시험모형 중앙에 위치하도록 넣었다. 그리고 소화시험실 바닥으로부터 50 mm 이상 이격하여 소화시험실 중앙에 위치 후 실험을 하였다.

Fig. 10은 마이크로캡슐 소화약제가 방사되어 화재가 진압된 그림이다. 그리고 Table 5와 같이 실험결과, 제작된 마이크로캡슐 소화용구(약제)에 화재접촉 이후 캡슐 안에 있던 소화약제가 방사되어 평균 4.48초에 노르말헵탄(n-heptane) 화재가 진압되었다. 그래서 KFI 소공간 B급 소화시험의 “예비연

Table 5. Result of the Fire Schematic Diagram Test

(Unit: second)				
Test number	One time	Second time	Third time	Average
Test result	5	4.45	4	4.48

Fig. 9. Combustible Test in the Schematic Diagram Room

Fig. 10. Result of Combustible Test in the Schematic Diagram Room

소 종료 후 90초 이내에 소화되고 재발화되지 아니할 것"기준을 충족하였다.

그리고 Fig. 11은 마이크로캡슐 소화약제가 방사된 이후에 표면을 나타낸 그림이다. 그림과 같이 모든 마이크로캡슐 소화약제 미립자가 방사되어 소화용구표면이 매끄러워진 것을 알 수 있다.

Fig. 11. Sample Condition After Combustible Test in the Schematic Diagram Room

따라서 마이크로캡슐 소화약제는 현재 널리 사용되고 있는 가스계 HFC-125, 고체에어로졸 등의 소공간용 소화용구의 단점인 약제 용기(실린더)와 관련 부수장치의 부피로 인해 중·소형 분전반에 적용하기 어려운 점을 획기적으로 개선한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 전기 분전반 또는 소형 전기패널 등의 소공간(체적 0.36 m^3 미만) 내부의 화재를 초기에 진압할 수 있는 친환경 전기화재용 마이크로캡슐 소화약제에 대한 화재진압의 적응성 실험 및 분석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 실험은 한국소방산업기술원의 소공간용 소화용구의 KFI 인정기준 중 B급(유류 소화시험)을 적용하였다. 실험은 마이크로캡슐 미립자들(크기: $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$)을 얇은 판에 부착, 즉 스티커타입으로 제작(크기: $138 \times 100 \times 1.5 \text{ mm}$, 중량: 27 g)하였다. 소형시험 모형에서 소화실험 결과, 화재접촉 이후 캡슐 안에 있던 소화약제가 방사되어 평균 4.48초에 노르말헵탄(n-heptane) 화재가 진압되었다. 따라서 KFI 소공간 B급 소화시험의 “예비연소 종료 후 90초 이내에 소화되고 재발화되지 아니할 것” 기준을 충족하였다.
- (2) 마이크로캡슐 소화약제는 소화성능이 매우 우수한 것 뿐만 아니라 소공간용 용기타입 소화설비의 단점(부피 등)을 최소화 할 수 있는 것으로 나타났다. 하지만 아직 본 약제에 대한 국가화재안전기준(NFSC)이 없는 실정이다. 따라서 원활한 현장 적용을 위해 본 약제에 대한 화재안전기준 제정이 필요하다고 판단된다.

References

- Choi, S.G., and Kim, S.K. (2017). Study on the tracking characteristics depending on accelerated degradation of PVC insulation material. *Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 31, No. 6, pp. 91-98.
- Choi, S.G., Shong, K.M., and Kim, D.W. (2003). The analysis of the carbonization properties between RCD source terminals deteriorated by Tracking. *Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 13-19.
- Gyeongsangbukdo Chilgok Fire Station (119) and Break News Daegu Gyeongbuk. (2019). *Fire accident case*.
- Korea Electrical Safety Corporation. (2020). *A statistical analysis on the electrical accident*.
- Korea Fire Institute (KFI). (2019). *For small space fire extinguishing equipment*.

- Lee, C.H., Ok, K.J., Kim, S.K., and Jee, S.W. (2008). A study on the tracking characteristics of contaminated insulating materials of RCD. *Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 22, No. 5, pp. 67-71.
- Mol-Instincts. (2019). *Chemical material structure dictionary*. Mol-Instincts' chemical material database.
- National Fire Service 119. (2020). *Fire statistical yearbook*. NFSC 101. (2018). *Fire extinguishers and automatic fire extinguishers*.
- Park, S.M., and Kim, S.K. (2017). Study on the risk analysis of complex electrical fire by the partial disconnection and tracking. *Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 31, No. 4, pp. 111-118.
- RUSINTECH LLC. (2016). *Material safety data sheet for microcapsule extinguishing agent*.
- 3M. (2018). *Material safety data sheet for novac 1230*.

Received	October 9, 2020
Revised	October 12, 2020
Accepted	February 17, 2021