

마이크로캡슐을 활용한 분전반 소화용구 개발에 관한 연구

이영삼^{1*}, 백수호²

¹오산대학교 소방안전관리과, ²스페이스파워(주)

A Study on the Development of Fire Extinguisher Using Microcapsule for Electric Distribution Board

Young-Sam Lee^{1*}, Soo-Ho Baek²

¹Osan University, ²Space Power Company

요약 대한민국 소방청 화재통계자료(2015~19년)를 원인별로 분석해보면, 전기로 인한 화재가 47,135건, 기계적 원인에 의한 화재가 22,852건, 가스누출에 의한 화재가 871건순으로 나타났다. 그래서 주요 화재의 원인이 전기화재로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 전기화재 중 소화설비의 적용 및 시공이 어려운 분전반 등의 소공간 화재를 대상으로 마이크로캡슐 소화약제의 KFI기준 충족 유·무 및 제품을 제작 후 현장에 적용하여 화재 적응성을 3회 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 재발화 되지 아닐 것” 기준을 충족하였다. 그리고 용도별로 제품을 제작한 소화용구를 현장에 적용하여 실험한 결과, 제품에 화염접촉 후 평균 1.87초에 토치의 연소화염이 소화되었다. 또한 본 소화용구는 기존 실린더 타입의 부피 문제점을 획기적으로 개선하였다. 하지만 본 소화약제 및 용구에 대한 국가화재안전기준(NFSC) 등이 없는 실정이다. 그러므로 소방청 및 소방관련 전문기관에서는 본 소화약제 및 제품에 대한 검증을 통하여 성능검증기준, 형식승인기준, 현장적용기준 등의 제정에 대해 검토가 필요하다고 판단된다.

Abstract According to an analysis of the fire statistics of the nation's fire department (2015~19), 47,135 fires were caused by electricity, 22,852 by mechanical causes, and 871 by gas leakage. Hence, the most common cause of fires is electric fire. Therefore, in this study, the fire adaptability of microencapsulated fire extinguishing agents was tested by applying the KFI to determine agent performance and field application against small space fires, such as electric distribution boards in which fire extinguishing equipment is difficult to apply and construct. Tests showed that the fire extinguishing agent inside the capsule was released after fire contact, and an n-heptane fire 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 seconds after the end of preliminary combustion. In addition, after experimenting with the field application of the product for each purpose, the burning flame of the torch was extinguished within 1.87 seconds on average. This fire extinguisher (agent) dramatically improved the volume problem of existing cylinder-type fire extinguishers for small spaces. On the other hand, there is no National Fire Safety Code (NFSC) for this agent and extinguisher. Therefore, it is necessary to enact standards for field application. Furthermore, the National Fire Agency and fire-related specialized agencies need to review the enactment of performance verification standards, type approval standards, and field application standards by verifying the fire extinguishing agent and products.

Keywords : Electric Fire, Small Space, Fire Extinguishing Agent, Fire Extinguisher, National Fire Safety Code

*Corresponding Author : Young-Sam Lee(Osan Univ.)

email: win203203@osan.ac.kr

Received April 1, 2021

Revised May 13, 2021

Accepted July 2, 2021

Published July 31, 2021

1. 서론

우리나라의 경제는 세계가 놀랄 정도로 빠르게 성장하여 현재는 세계 10위권 내·외의 국가가 되었다. 하지만 성장과 더불어 도시화와 산업화가 급격히 진행되면서 건물의 규모가 커지고 고층화로 인해 화재가 발생 시 대규모 인명과 재산피해로 이어지고 있다. 소방청의 화재통계 자료를 Table 1[1]과 같이 화재를 원인별로 분석해보면, 2015~ 19년도에 발생한 총 214,467건의 화재 중 전기적 원인으로 발생한 화재가 47,135건, 기계적 원인으로 발생한 화재가 22,852건, 가스누출로 인한 화재가 871건순으로 발생하였다. 본 통계에서 보듯이 화재는 전기적 원인에 의한 화재가 가장 많은 것으로 나타났다. 이러한 전기화재를 줄이기 위해 퓨즈, 배선용차단기, 누전차단기 등을 설치하여 사용되고 있지만 화재는 지속적으로 발생되고 있다.

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

본 연구에서는 전기화재 중 Fig. 1과 같이 분전반에서 발생하는 화재, 즉 누전차단기 또는 전기설비적 결함, 트래킹, 전기과부하 등에 의한 화재[2-4]를 진압할 수 있는

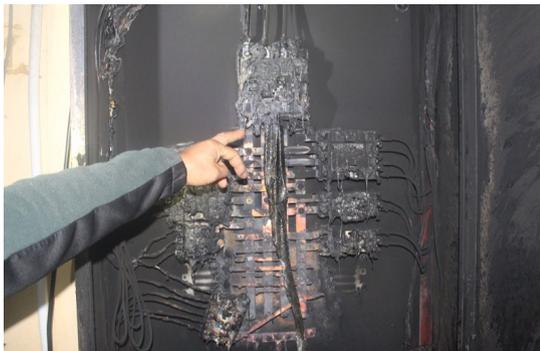


Fig. 1. Switchboard fire

소화용구를 제작(마이크로캡슐 타입의 자동소화약제를 활용)하여 분전반 내부 전기장치 등에서 발생한 화재를 초기에 진압할 수 있는 소화장치의 화재진압 적응성을 검증하는 데 목적이 있다.

2. 연구의 이론 및 성능검증

2.1 연구의 이론

2.1.1 자동소화약제의 시험기준

마이크로캡슐을 활용한 소화용구에 대한 정확한 제품 승인 및 화재안전에 대한 기준이 없으나 소방법에서 분전반화재는 소공간화재로 분류하고 있다. 그래서 한국소방산업기술원(KFI)의 소공간용 소화용구에 인정기준[5] 등을 검토 및 참조 하였다.

이 기준은 소공간(체적 0.36 m³ 미만인 경우에 한함)의 분전반, 배전반 등의 화재를 자동으로 소화하는 간이형 소화용구(포소화약제 또는 액체계 소화약제를 사용하는 것은 제외한다)에 대하여 적용한다.

2.1.2 절연전선의 열화 및 화재발생 과정

전선 접속부에서 접촉 불량에 발생한 상태에서 외부의 기계적 진동이 인가되면 전선 도체는 아크(스파크)에 의해 산화되고, 아크에 의해 발생한 열에 의해 피복은 용융, 탄화하게 된다. 축적된 열에 의해 피복은 착화하게 되며, 주위에 가연물이 있게 되면 화재를 확대시킬 수도 있다. 시간이 경과한 후에는 아크에 의한 전선 도체의 산화가 지속되어 접촉면에서는 산화동이 생성되고 점차 성장하게 된다. 또한 수백도 이상의 고온으로 적열하여 화재의 위험성이 있다[6].

Fig. 2는 전선이 아크에 의한 열화진행 메커니즘을 나타낸 것이다.

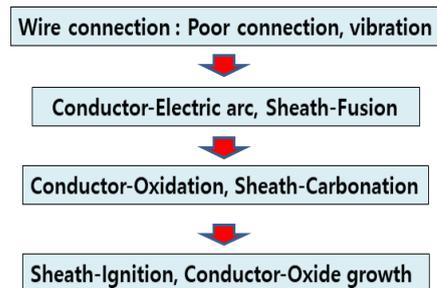


Fig. 2. Deterioration mechanism of wires by series arcs

2.2 소화약제의 물적특성 및 성능검증

2.2.1 마이크로캡슐의 소화약제의 물적특성

Table 2[7]는 마이크로캡슐 소화약제의 성분을 나타낸 것이다.

Table 2. Composition/information on ingredient

Ingredient	Weight	CAS. Number
Fire extinguishing agent - perfluoro (2-methyl-3-penta-none) C6F12O	55%	CAS. No. 756-13-8
Photographic gelatine	3%	
Formalin	1%	
The polymeric binder - polyvinyl acetate $[-CH_2-CH(OCOCH_3)-]_n$	1%	CAS. No. 9002-89-5
Silicone matrix	40%	

본 약제[8]는 노벡(Novec) 1230 제품을 기초로 하고 있다. 주요성분은 퍼플루오로(2-메틸-3-펜탄온)가 55%로 가장 많이 함유하고 있으며, 화학식은 C₆F₁₂O이고, 분자량은 316.04444 g/mol이다. 두 번째로 많이 포함되어 있는 성분은 실리콘 모체(40%)이다. 그리고 기타 성분으로 포토그래픽 젤라틴(3%), 포르말린(1%), 중합체 바인더 - 폴리비닐 아세테이트(1%)로 구성되어 있다.

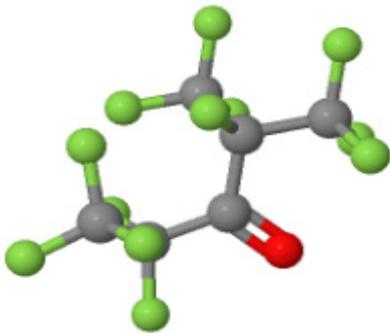


Fig. 3. Three-dimensional structure of perfluoro (2-methyl-3-pentanone)

Fig. 3은 본 약제의 주요 성분인 퍼플루오로(2-메틸-3-펜탄온)의 3차원 분자구조 그림이다. 먼저 분자의 화학적 구조는 퍼플루오로(2-메틸-3-펜탄온), 분자는 6개의 탄소 원자, 1개의 산소 원자, 그리고 12개의 불소 원자로 구성되어 총 19개의 원자로 형성되어 있다[9].

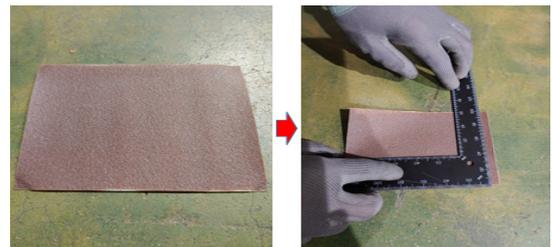
Fig. 4는 마이크로캡슐 소화약제 미립자 1개를 20배로 확대한 그림이다. 화재 진압의 원리는 마이크로캡슐 안에 내용물인 소화약제(3M 노벡 1230)가 불에 접촉이 되면 캡슐코팅이 녹으면서 내용물이 기체화 되어 화재를 진압(질식작용 등)하는 것이다.



Fig. 4. 20 times magnification of microcapsule fire extinguishing agent

2.2.2 마이크로캡슐 소화약제의 성능검증

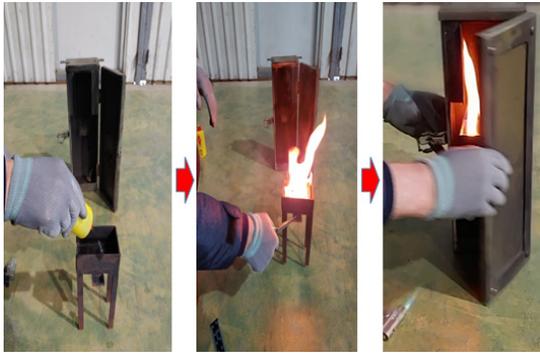
본 약제에 대한 정확한 성능검증기준이 없어, 소화실험은 한국소방산업기술원의 소공간 B급 소화시험기준을 적용하여 3회 반복 실험을 하였다.



a) Preparation of test sample.



b) Sample setting in the fire schematic diagram test room.



c) Combustible test of sample.

Fig. 5. Combustible test in the schematic diagram room.

소화시험장치의 세부사양을 간단히 설명하면, 소화시험실크기가 0.14 × 0.12 × 0.4 m이고, 개구부면적이 Ø 32 mm 2개이다. Fig. 5는 시료의 제단과 소화시험을 나타낸 것이다. 시험에 사용된 시료에 세부사항의 경우 중량이 27g, 제품크기는 138 × 100 × 1.5 mm이다.

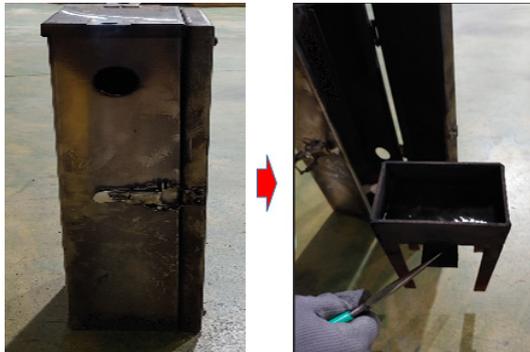


Fig. 6. Result of combustibility test in the schematic diagram room.

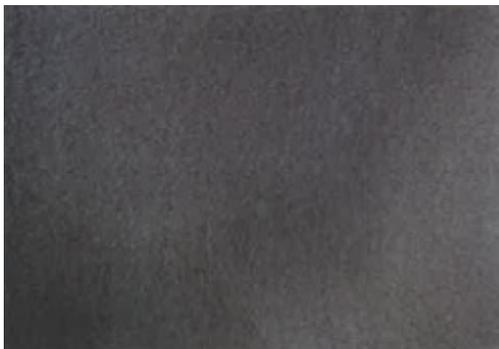


Fig. 7. Sample condition after combustibility test in the schematic diagram room.

Fig. 6은 마이크로캡슐 소화약제가 방사되어 화재가 진압된 그림이다. 그리고 Fig. 7은 마이크로캡슐 소화약제가 방사된 이후에 표면을 나타낸 그림이다. 그림과 같이 모든 마이크로캡슐 소화약제 미립자가 방사되어 소화용구표면이 매끄러워진 것을 알 수 있다.

Table 3. 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

실험결과, Fig. 6 - Fig. 7과 같이 화재와 접촉 이후 마이크로캡슐 내부에 있던 소화약제(노백1230)가 방사되어 화재가 진압되었고, 그리고 Table 3과 같이 평균시간이 4.48초에 노르말헵탄(n-heptane) 화재가 진압되는 것을 확인할 수 있었다. 그래서 KFI 소공간 B급 소화시험의 “예비연소 종료 후 90초 이내에 소화되고 재 발화되지 아니할 것”기준을 충족하였다.

따라서 현재 주로 사용되고 있는 실린더타입 화재진압용구(고체에어로졸과 HFC-125 등의 약제 사용)의 단점인 부피의 문제점을 획기적으로 개선하였고, 또한 비용적인 측면에서도 많이 저렴하여 산업현장에 널리 사용하는데 기여 할 것으로 판단된다.

3. 소화용구 제조방법 및 개발

3.1 마이크로캡슐 타입의 소화용구 제조방법

3.1.1 자동소화약제의 시험기준

본 약제 제조는 3M의 노백 1230의 약제를 마이크로 사이즈(0.2 ~ 0.3 mm)로 코팅(실리콘 등)하는 기술이고, 또한 본 기술은 제조사의 영업비밀로 되어 있어 설명에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 노백 1230의 원천기술을 보유하고 있는 3M과 노백 1230 약제의 코팅 기술(특허 등)을 가지고 있는 러신텍 LLC의 기술(약제)을 사용하였고, 또한 특허출원번호인 10-2011-0046470 (발명의 명칭 : 자립형 소화장치)과 10-2018- 0035875 (초기 진화용 자동소화약제, 제조방법 및 성형체) 활용하여 제품을 만들었다.

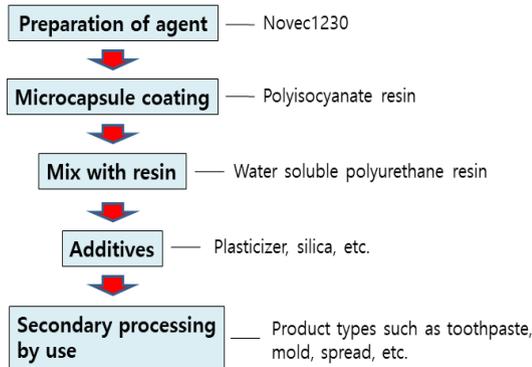


Fig. 8. Component structure and manufacturing method of microcapsule fire extinguisher

Fig. 8은 제품의 성분 구조 및 제조방법을 나타낸 그림이다. 그에 세부적인 제조방법의 경우 먼저 인체에 저독성, 친환경, 질식작용 등의 성능을 가지고 있는 소화약제인 Novac 1230을 준비하고, 소화약제를 안정적으로 보관, 즉 내열성, 내수성, 절연성이 있도록 폴리소시아네이트 수지로 마이크로캡슐 형태의 크기(0.2 ~ 0.3 mm)로 코팅을 한다. 그 다음 인장력, 굴곡성, 접착성, 절연성이 뛰어난 친환경수지인 수용성 폴리우레탄을 겔 타입으로 믹스를 하고, 그 다음 알루미늄 나노 분말, 예로실 등의 가소제, 실리카 등을 첨가하여 겔 타입 수지화를 통해 용도별(치약, 로프, 스티커, 롤테이프 타입 등)로 2차 가공을 하여 최종 제품화를 한다. Fig. 9는 스티커 타입 제품의 입자 모양과 크기를 간략히 나타낸 그림이다.

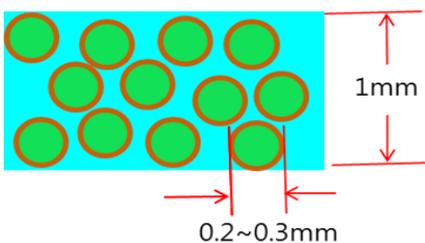


Fig. 9. Product of sticker type microcapsule fire extinguisher

3.2 용도별 마이크로캡슐 소화용구 제품개발 및 적용

3.2.1 용도별 제품제작

마이크로캡슐 소화용구를 타입(용도별)별로 분류하면 튜브식(치약타입), 성형체(로프타입), 도포식(스티커타입)으로 크게 나눌 수 있다. 또한 기타로 롤 테이프 타입도 있으나 차기 연구에서 다룰 예정이므로 본 논문에서는

생략한다.

타입별 제품의 제조공정은 소화약제, 마이크로캡슐화, 겔 타입 믹스, 첨가제 혼합까지는 공통적이고 나머지 겔 타입 수지화와 용도별 2차 가공 공정이 다르게 진행된다.

Fig. 10은 튜브식 타입의 소화용구 제품을 나타낸 것이다. 튜브식 타입의 경우 치약형태로 제작을 한 것이고, 소화장치가 내장되지 않은 기존 또는 신설 분전반의 기기장치들에 사용자가 직접 원하는 형태(폭, 두께, 길이 등)로 시공이 가능하기 때문에 현장 적용성이 매우 좋은 제품이라고 할 수 있다.



Fig. 10. Toothpaste type product

Fig. 11은 성형체 타입의 소화용구 제품을 나타낸 것이다. 본 타입의 경우 대량 생산 및 간편한 조립을 위해 부품 형태의 형상으로 성형가공한 제품을 말한다. 제조방법은 상위공정은 공통적이고 나머지 겔 타입 수지화와 용도별 2차 가공 공정이 다르게 진행된다. 즉 후단 공정에서 금형을 활용하여 원하는 용도별 사이즈와 형태로 제작할 수 있다.

Fig. 12는 도포 타입의 소화용구 제품을 나타낸 것이다. 본 타입의 경우 고압 폐쇄배전반, 내아크 배전반용 등에 도포하여 화재를 자동소화 할 수 있다. 또한 공업용 사포(Sandpaper)처럼 평평한 판에 도포하여 제품을 제조 및 벽면 등에 부착할 수 있다.

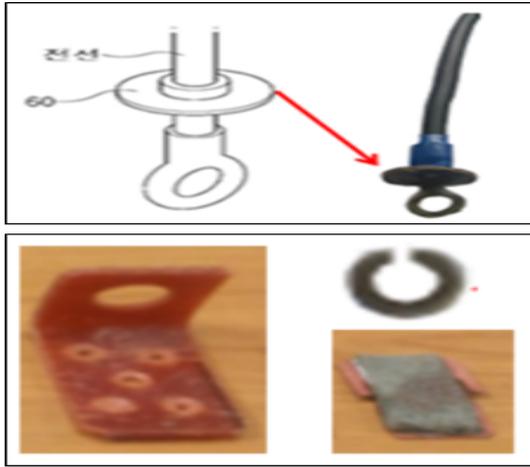


Fig. 11. Mold type product

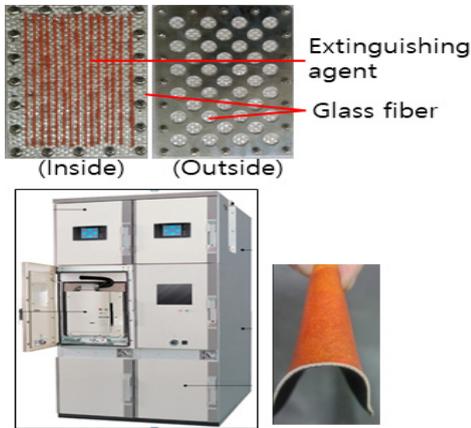


Fig. 12. Spread type product

3.2.2 개발 제품에 대한 현장적용 및 성능검증

Fig. 13은 마이크로캡슐 타입 소화용구의 현장적용 및 성능검증을 나타낸 그림이다.

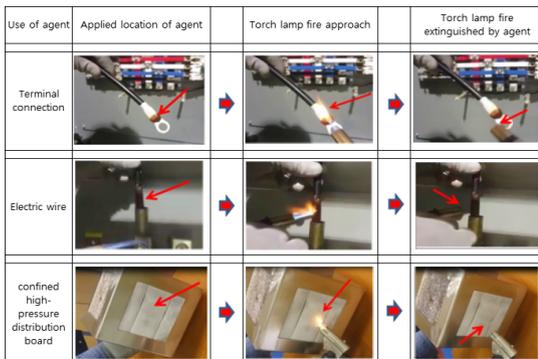


Fig. 13. Applied location and test of fire extinguisher

제품의 현장적용에 경우 단자 연결부, 전선부, 고압페쇄배전반에 적용을 하였다. 그리고 각 기기별 마이크로캡슐 소화용구가 적용되어진 부위에 토치램프로 화염을 접촉시켰고, 테스트의 신뢰성을 위해 3회 반복 실시하였다.

Table 4와 같이 테스트결과, 제품이 적용되어진 모든 부분에서 화염접촉 후 평균 1.87초에 토치의 연소화염이 소화되었다.

Table 4. Result of the fire test (Unit : second)

Test number	One time	Second time	Third time	Average
Test result of terminal connection	1.75	2	1.85	1.87
Test result of electric wire	2	1.80	1.90	1.90
Test result of confined high-pressure distribution board	1.75	1.80	1.95	1.83

따라서 본 제품은 KFI의 소공간화재의 인증기준 시험에서 법적기준을 충족하였고, 또한 현장적용 시에도 동일한 화재진압 성능이 있는 것으로 나타났다. 그러므로 본 소화용구는 기존 소공간용 실린더 타입 소화용구의 부피 문제점을 획기적으로 개선하였다.

4. 결론

본 연구는 마이크로캡슐 소화약제를 활용한 전기 분전반 또는 소형 전기판넬 소공간(체적 0.36 m³ 미만) 내부화재를 초기에 진압할 수 있는 소화용구를 개발과 현장적용에 대한 적응성 실험 및 분석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 소화약제에 대한 성능검증 실험은 한국소방산업기술원의 소공간용 소화용구의 KFI 인정기준 중 B급(유류 소화시험)을 적용하였다. KFI 기준에 맞게 제작한 소형시험모형(크기 : 0.14 × 0.12 × 0.4 m)에서 3회 실험결과, 화재접촉 이후 캡슐 안에 있던 소화약제가 방사되어, 1회 시험에서 5초, 2회 시험에서 4.45초, 3회 시험에서 4초에 소화, 그래서 평균 4.48초에 노르말헵탄(n- heptane) 화재가 진압되었다. 따라서 KFI 소공간 B급 소화시험의 “예비연소 종료 후 90초 이내에 소화 되고 재발

화 되지 아닐 것”기준을 충족하였다.

2. 마이크로캡슐 소화용구를 현장에 맞게 용도별로 제품을 제작 및 그 일부를 단자 연결부, 전선부, 고압 폐쇄배전반 등에 적용을 하고, 소화성능시험을 3회 실시한 결과, 단자 연결부에서 평균 1.87초, 전선부에서 평균 1.9초, 고압폐쇄배전반에서 평균 1.83초에 소화, 그래서 제품이 적용되어진 모든 부분에서 화염접촉 후 평균 1.87초에 토치의 연소화염이 소화되었다. 따라서 본 약제로 만든 소화용구가 KFI 인증 소공간 화재 시험기준을 충족과 현장적용 시 에도 동등 이상에 소화성능이 있는 것으로 나타났다. 하지만 본 약제에 대한 국가화재안전기준(NFSC)이 없는 실정이다.

그래서 본 연구결과를 토대로 다음과 같이 제언을 하고자 한다. 현재 국내에서 본 소화약제를 사용하여 제품화를 희망하는 업체가 많이 생겨나고 있다. 그러므로 소방청 및 소방관련 전문기관에서 본 소화약제 및 제품에 대한 정확한 검증을 통하여 성능검증기준, 형식승인기준, 현장적용기준 등에 대한 제정의 필요성을 제언한다.

References

- [1] M. H. Jung, "Fire Statistical Yearbook 2019", National Fire Service 119, 2020, pp.23-27.
- [2] S. G. Choi, S. K. Kim, "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, 2017. DOI: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2017.31.6.091>
- [3] S. G. Choi, K. M. Shong, D. W. Shong, "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, 2003.
- [4] S. M. Park, S. K. Kim, "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, 2017. DOI : <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2017.31.4.111>
- [5] "Small Space Fire Extinguishing Equipment Code", Korea Fire Institute, 2019. pp.2-16.
- [6] H. K. Kim, C. S. Choi, D. O. Kim, H. S. Choi, "Copper Oxide Growing Characteristics of PVC Insulated Wire and Application to the Fire Investigation", *The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 56, No. 1, pp.37-44, 2007.
- [7] "Material Safety Data Sheet of microcapsule

extinguishing agent", RUSINTECH LLC, 2016.

- [8] "Material Safety Data Sheet of Novec 1230 agent", 3M Co., 2018.
- [9] "Mol-Instincts' chemical material database", Chemical material structure dictionary, 2019. URL: <https://terms.naver.com/entry.naver?docid=4505302&cid=60228&categoryId=60228>

이 영 삼(Young-Sam Lee)

[정회원]



- 2004년 8월 : 동국대학교 대학원 산업과학과 (공학석사)
- 2014년 8월 : 인천대학교 대학원 안전공학과 (공학박사)
- 2016년 3월 ~ 2018년 2월 : 안전 과학연구소 겸임교수
- 2020년 3월 ~ 현재 : 오산대학교 소방안전관리과 교수

<관심분야>

소방안전, 산업안전, 산업보건, 기술이전 및 사업화

백 수 호(Soo-Ho Baek)

[정회원]



- 1977년 2월 : 동아대학교 공과대학 화공학과 졸업
- 1988년 8월 ~ 1999년 9월 : 미광 산업사 대표
- 1999년 10월 ~ 2010년 12월 미 광타이 대표이사
- 2019년 9월 ~ 현재 : 스페이스파 워(주) 대표이사

<관심분야>

소방안전, 산업안전, 안전배전반, 소방방재분야 기술사업화