

침윤소화약제 성능평가를 위한 축소실험의 타당성 분석

김남균 · 임경범* · 이동호**†

인천대학교 대학원, *해운대학교 소방안전관리과, **인천대학교 소방방재연구소

Validity Analysis of Scale Model Experiment for Wetting Agent Performance Evaluation

Nam-Kyun Kim · Kyung-Bum Lim* · Dong-Ho Rie**†

Graduate School, Incheon National University

*Department of Fire Safety Management, Heychon College

**Fire Disaster Prevention Research Center, Incheon National University

(Received October 7, 2013; Revised March 18, 2014; Accepted April 17, 2014)

요 약

현재 국내의 침윤소화약제 기술기준은 표면장력에 대한 기준만 존재하여 이를 통한 약제의 성능평가는 어려운 실정이다. 따라서 침윤소화약제의 성능평가 기법을 제시하기 위해 축소모형 실험 장치를 통한 최적화된 성능평가 방법을 제시하고자 한다. 본 연구는 해외 기준인 NFPA 18의 실험과 자체 제작된 축소모형 실험 장치를 이용한 실험의 결과 비교 분석을 통해 자체 제작 축소모형 실험 장치실험 결과의 타당성을 규명하고자 한다. 목화솜을 대상으로 침투성능만을 평가하는 NFPA 18 실험과 목분을 대상으로 침투성능과 소화성능을 모두 평가하는 축소모형 실험을 비교분석한 결과 NFPA 18의 실험과 자체 제작 축소모형 실험에서 모두 소화용수의 침투성에 관한 변별력을 확인할 수 있었다. 또한 자체 제작 축소모형 실험에서는 T/C를 통한 내부온도 측정을 통해 보다 명확한 변별력을 나타냄을 확인하였다.

ABSTRACT

A current standard exist only on the surface tension in the current domestic wetting agent technology standards, so it is difficult to the performance evaluation of the wetting agent through the standard. So this study presents the optimized performance evaluation methods by scale model experimental equipment in order to present techniques for performance evaluation of wetting agents. The purpose of this study is to investigate validity of experimental results of the self-designed scale model experiment equipment by a comparative analysis of experimental results of the NFPA 18 experiment and the experiment using the self-designed scale model experiment equipment. As a result of a comparative analysis of experimental results of the NFPA 18 experiment that evaluate only the permeation performance on the cotton and the experiment using the self-designed scale model experiment equipment that evaluate the permeation performance and fire extinguishing performance on wood flour, the discrimination of the permeation performance was confirmed in both the NFPA 18 experiment and the self-designed scale model experiment equipment. And a result of self-designed experiment equipment have clear discriminatory more than NFPA 18 by internal temperature measurement using the thermocouples.

Keywords : Deep-seated fire, Wetting agent, NFPA 18, Self-designed experiment equipment, Scale model

1. 서 론

2005년 영남지역 최대의 섬유시장인 대구 서문시장에서 발생한 화재사건의 경우, 적재되어 있던 섬유들의 심부까지 소화용수가 침투되지 않아 1차 화재 진압 후 재발화가 발생하였다. 이로 인해 2차 화재가 발생하여 35시간 이상 연소가 진행되었으며, 1,060여 개의 점포 중 700여 개의 점포가 소실되는 등 약 179 억원의 피해를 발생시킨 대형화

재로 이어졌다⁽¹⁾. 이와 같이 일반적인 소화용수를 사용하여 다량의 다공성 물질이 적재되어 있는 공간에서 발생한 화재를 진압하는 경우, 물질의 심부에서 진행되는 연소에 대한 소화 한계성을 가지며 재발화의 위험성이 존재한다.

이러한 심부화재는 목조건물 및 다공성 물질의 화재 시 심부까지 고온이 전도되어 연소분위기가 형성되지만 산소의 접촉이 제한되어 점화되지 않는 훈소상태를 의미한다. 소화용수가 침투되기 어려운 심부는 잠재적 위험요인으로

†Corresponding Author, E-Mail: riedh@incheon.ac.kr
TEL: +82-32-835-8293, FAX: +82-32-835-4749

ISSN: 1738-7167
DOI: <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2014.28.2.014>

작용하여, 이후 산소와 접촉 시 재발화의 위험을 가지고 있다⁽²⁾. 이러한 심부화재 진압용 침윤소화약제는 현재 국내를 비롯하여 많은 국외 기업에서 생산·판매하고 있다. 하지만 현재 국내에서는 침윤소화약제의 기준 평가 측면에서 구체적 침투 및 소화 성능에 관한 기준은 심부화재 진압용 침윤소화약제의 기술기준인 ‘소화약제의 형식승인 및 제품검사의 기술기준 고시(2012-57호)’에서 물리적 기술기준인 표면장력과 실규모의 A급 목재 실험만을 제시하고 있다⁽³⁾. 그리고 NFPA 18에서 침윤소화약제의 성능에 대한 시험법이 명시되어 있으나 배출량만을 통한 침윤소화약제의 성능평가를 함으로써 성능평가 변별력의 한계성을 가지며, 강제성을 띠지 않아 사실상 판매되고 있는 침윤소화약제의 성능평가는 어려운 실정이다.

이에 명확한 변별력을 가지는 축소모형 실험 기법 확립을 위해 침윤소화약제의 성능평가를 위한 축소모형 실험 장치를 자체 제작하였으며, 이는 NFPA 18 실험에 비해 내부온도 변수가 추가되어 심부화재 전이 속도 및 소화용수 도달 시점을 통한 침투속도 산정 등 보다 명확한 침윤소화약제 성능평가가 가능하다. 또한 시료홀더의 무게를 측정함으로써 침투량 및 연소감량을 직접 측정하며, 이를 통해 시료 종류에 따른 연소속도 및 열원에 의한 소화용수 증발량 등의 산출이 가능하여 심부화재 발생 시 소화용수의 필요살수량 산정이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 축소모형 시험 장치의 기초 연구로서 NFPA 18에서 제시하고 있는 시험의 재현결과와 자체 제작 축소모형 실험 장치의 실험 결과를 비교 분석하여 보다 명확한 변별력을 나타내는 실험방법을 확인하고자 하였고, 이를 바탕으로 심부화재 진압용 소화용수의 기준평가 및 분석을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 다공성 물질 및 소화약제의 선정

2.1 다공성 물질의 선정

본 연구에서는 NFPA 18의 재현 실험을 구현하기 위해 ‘Cotton’으로 명시되어 있는 다공성 물질로서 목화 100%의 목화솜으로 선정하였다⁽⁴⁾.

축소모형 실험을 위한 목분은 국내 사용 목재의 75% 이상을 점유하고 있는 라디에타 파인(RADIATA PINE)의 원목 목분으로⁽⁵⁾ 선정하였으며, Sieve Shaker(청계상공사, CG-211-8)를 통해 체가름하여 500~1,000 μm의 목분으로 실험하였다. 목분의 일정한 함수율 유지를 위해 80 °C 조건의 건조기에서 62시간 건조 후 4시간 간격으로 반복 측정하여 시료의 질량 변화가 없을 때까지 건조시켰으며, 식(1)에 의거하여 함수율을 계산한 결과 실험에 사용된 목분은 10.6%의 함수율을 가짐을 확인하였다^(6,7).

$$MC = \frac{W_m - W_d}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

Table 1. Characteristics of Wetting Agent

Separation	Characteristics	Separation	Characteristics
Recommended Concentration	0.2~0.5%	Experimental Concentration	0.35%
Viscosity	1.02 cp	Surface tension	25
Biodegradability	92.8%	Major surfactant	BDG

MC: Moisture content [%]

W_m: Weight of sample before overdry [g]

W_d: Weight of sample after overdry [g]

2.2 침윤소화약제의 선정

본 연구에서는 기초실험에서 사용된 국내·외 시판되는 침윤소화약제 중 FT-IR 분석결과 특이성분을 포함하고 있지 않으며 표면장력, 기초 흡수도 실험에서 평균 성능을 나타내는 침윤소화약제를 사용하였으며⁽⁸⁾, Table 1은 해당 약제의 특성을 나타낸다.

3. NFPA 18 실험

3.1 NFPA 18 실험방법

NFPA 18의 6.3에 명시되어 있는 ‘Deep-Seated Fire Test’는 침윤소화약제의 침투성 측정 실험이다. 일반적인 경우 다공성 물질은 발수성이 높아 물이 쉽게 흡수되지 않으며, 실험 시 벽면을 타고 흐르는 벽면현상이 발생한다. 이러한 경우 침윤소화약제와의 침투성 비교 분석에 어려움을 초래하기 때문에 NFPA 18에서는 다공성 물질의 내부에 가열된 스틸로드를 이용하여 침투성이 낮은 물을 다공성 물질의 중심부로 끌어들이므로써 벽면현상을 방지하며, 이를 통해 보다 명확한 실험결과 도출이 가능하다.

NFPA 18 실험에서는 다공성물질의 일관성을 유지하기 위해 NFPA 18 상의 실험 방법과 함께 건조과정을 추가하

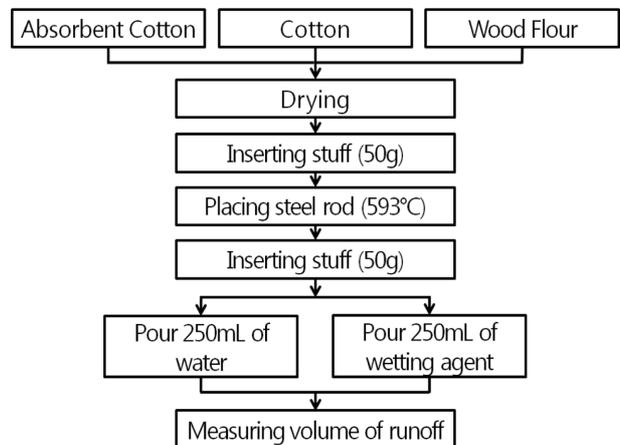


Figure 1. Process of experiment for NFPA 18 experiment.

여 실험을 진행하였다.

Figure 1은 실험방법에 대한 흐름도를 나타낸 것이다. 실험은 시료 건조, 50 g의 시료 1차 투입, 593 °C 스틸로드 투입, 50 g의 시료 2차 투입, 소화용수 살수, 결과 측정 과정으로 진행하였다. 실험은 3회 반복실험을 진행하였으며, 최종 배출량 편차는 평균 7.2%로 실험결과의 일관성 및 유사성을 확인하였다.

3.2 NFPA 18 실험결과

Figure 2와 Figure 3은 목화솜을 사용한 NFPA 18 실험의 실험결과를 나타낸다.

물을 소화용수로 사용한 Figure 2에서는 물 250 mL를 살수한 후 90초부터 용기 외부로 배출되기 시작하였으며 그 후 640초 동안 배출량이 증가하였고, 총 71.2 g의 배출량을 나타내었다. 침윤소화약제를 소화용수로 사용한 Figure 3에서는 살수 종료 후 154초부터 배출량이 나타나기 시작하였으며, 그 후 733초 동안 배출량이 증가하였고, 총 9.6 g

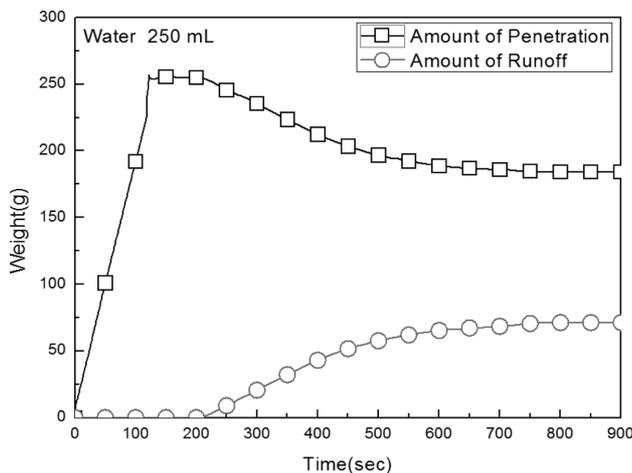


Figure 2. Mass changes in the water of NFPA 18 experiment.

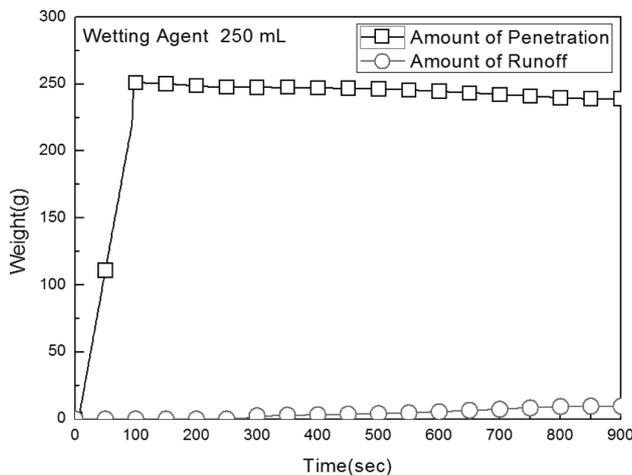


Figure 3. Mass changes in the wetting agent of NFPA 18 experiment.

의 배출량을 나타내었다.

Figure 2와 Figure 3의 결과를 상호 비교분석한 결과 침윤소화약제가 물보다 외부 배출량이 약 7.5배 적게 배출됨을 확인하였다. 이를 통해 물과 침윤소화약제와의 침투성능에 대한 변별력을 확인하였으며, 침윤소화약제가 물보다 침투성능이 우수한 것을 확인하였다.

4. 축소모형 실험

4.1 축소모형 실험 장치 및 실험방법

Figure 4는 자체 제작한 축소모형 실험 장치로 심부화제에 대한 침윤소화약제의 소화성능평가를 위하여 제작되었다.

NFPA 18 실험 장치의 경우 살수 병, 시료홀더, 스틸로드, 소화용수 배출량 측정용 팬으로 구성되어 최종 배출량만을 측정하고 있다. 이에 비해 자체 제작 축소모형 실험 장치는 크게 내측으로 형성된 공간부에 시료를 충전시켜 연소공간으로 활용되는 홀더와 홀더 내부의 온도를 측정하기 위한 Thermocouple (K Type, 이하, T/C로 표기), 소화실험 시 사용될 약제를 저장하고 가압 분사할 수 있는 약제탱크와 노즐, 살수량, 배출량, 침투량 측정을 위한 3개의 저울로 구성함으로써 보다 명확한 결과를 도출할 수 있도록 설계하였다.

침투성능을 분석하기 위하여 약제탱크에서 분사노즐을 통해 다공성물질 홀더로 소화용수를 살수시켜 살수량 (Scale 1), 배출량(Scale 2), 침투량(Scale 3)을 측정하여 침윤소화약제의 침투성능을 분석하였다. 또한 소화성능을 분석하기 위해 다공성물질 홀더에 T/C를 다공성 물질의 하단부로부터 2 cm, 5 cm, 8 cm에 설치하였으며, 이를 통해

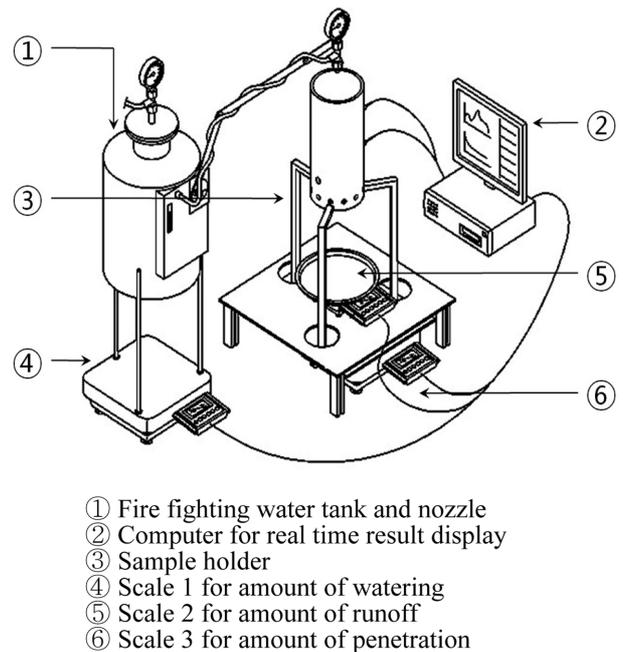


Figure 4. The composition of measurement system.

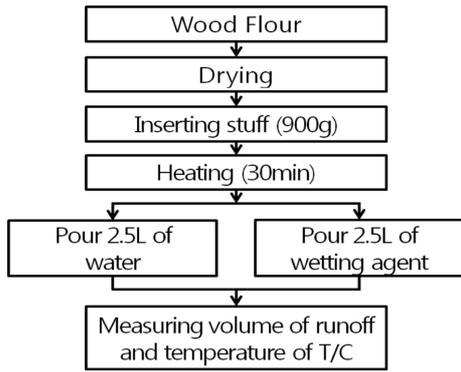


Figure 5. Process of experiment for scale model experiment.

내부 온도변화를 측정하여 소화성능을 판단하였다.

자체 제작 축소모형 실험 장치를 사용한 침윤소화약제 성능평가실험은 NFPA 18 실험과는 달리 목분으로부터 10 cm 하단의 메탄버너를 사용한 가열을 통해 심부화재를 구현하였다. 실험에 사용된 홀더의 직경은 20 cm이며 목분 밀도는 0.17 g/cm³를 유지하였고, 가열 시간은 30분, 소화용수는 2.5 L를 살수하여 실험을 진행하였다.

Figure 5는 실험방법에 대한 흐름도를 나타낸 것이다. 실험은 시료 건조, 900 g의 시료 투입, 메탄버너를 통한 30분 가열, 소화용수 살수, 결과 측정 과정으로 진행하였다. 실험은 3회 반복실험을 진행하였으며, 최종 배출량 편차는 평균 5.3%, 내부온도 기울기의 편차는 평균 6.7%로 실험결과의 일관성 및 유사성을 확인하였다.

4.2 축소모형 실험결과

목분을 사용한 축소모형 실험결과 외부로 배출되는 배출량을 Figure 6과 Figure 7에 나타내었다.

Figure 6은 물의 배출량을 측정한 실험결과를 나타낸 것으로 실험결과 살수 시작 후 92초부터 배출량이 나타나기

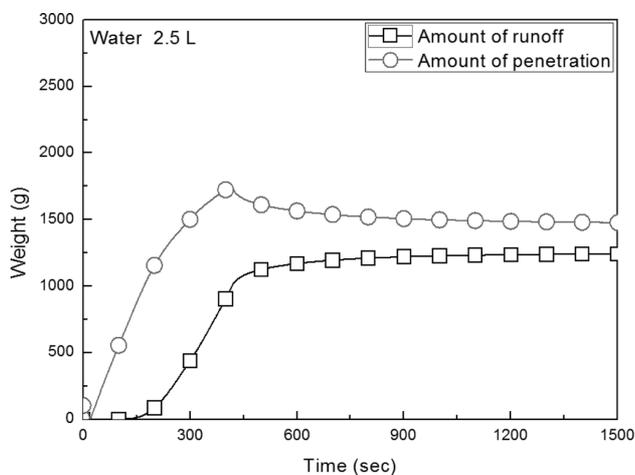


Figure 6. Mass changes in the water of scale model experiment.

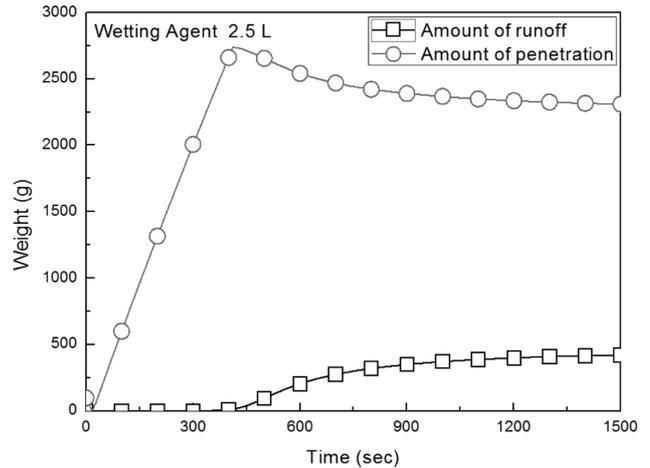


Figure 7. Mass changes in the wetting agent of scale model experiment.

시작하였으며, 그 후 1733초 동안 배출량이 증가하였고, 총 1245.1 g의 배출량을 나타내었다.

Figure 7은 침윤소화약제의 배출량을 측정한 결과로 약제가 살수 시작 후 330초부터 배출량이 나타나기 시작하였으며, 그 후 1990초 동안 배출량이 증가하였고, 총 435.1 g의 배출량을 나타냄으로써 물보다 약 3배의 배출량이 적게 배출되는 것을 확인함으로써 침윤소화약제의 성능에 대한 변별력을 확인하였다.

또한 Figure 8과 Figure 9에 T/C를 통한 내부 온도변화를 측정한 결과를 나타낸 것으로 T/C 1은 다공성 물질 하단으로부터 8 cm에 위치하고 T/C 2는 5 cm, T/C 3은 열원과 가장 근접한 2 cm에 위치한다.

Figure 8은 물을, Figure 9는 침윤소화약제를 살수한 실험 결과를 나타낸 것으로 내부 온도는 최상단에 위치한 T/C 1의 경우 물에서는 완만한 온도 하강을 나타내는 반면, 침윤소화약제에서는 215초를 기점으로 급격한 하강 형태

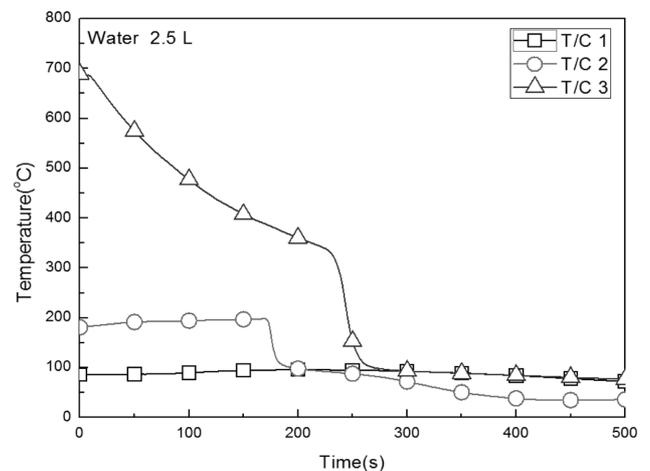


Figure 8. Temperature changes in the water of scale model experiment.

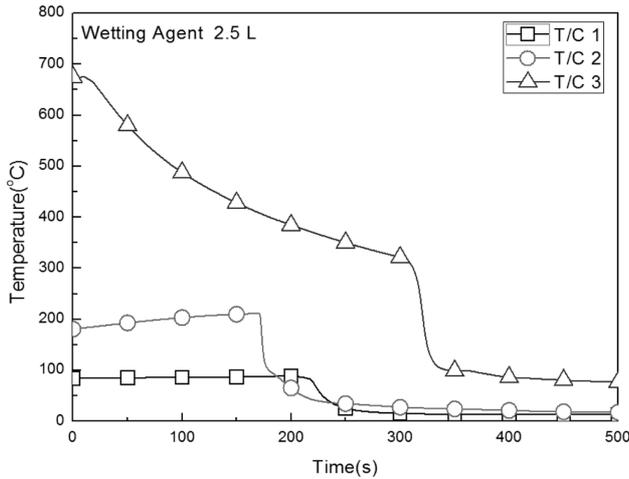


Figure 9. Temperature changes in the wetting agent of scale model experiment.

를 나타낸다. 중앙에 위치한 T/C 2의 경우 물에서는 185초를 기점으로 급격한 하강을 나타내다가 100 °C에서 중간층을 형성하고 서서히 하강하는 반면, 침윤소화약제에서는 비슷한 시기에 기점을 형성하고 급격하게 온도가 하강하여 20 °C까지 하강하는 경향을 나타낸다. 열원에 가장 근접한 T/C 3의 경우 물에서는 250초를 기점으로 하강하며, 침윤소화약제에서는 330초를 기점으로 하강함으로 물의 최하단부 도달 시간이 약제보다 더 빠른 것을 확인하였다.

이를 정량적으로 분석하기 위해 살수 후 500초까지의 결과의 기울기를 각 실선으로 나타내었다. 그 결과 물의 경우 T/C 1의 기울기는 -1.34, T/C 2는 -0.42, T/C 3은 -0.02를 나타내었으며, 침윤소화약제의 경우 T/C 1은 -1.30, T/C 2는 -0.49, T/C 3은 -0.22를 나타내었다. 따라서 깊이방향의 침투 속도는 물에 비해 약제의 경우가 늦는 것으로 확인 되었으나 이는 표면장력이 높아 내부로의 침투가 어려운 물의 벽면현상에 의한 결과로 판단된다. Table 2는 실험의 결과를 도표화한 것이다.

식(2)는 보다 정량적인 평가를 위해 실험결과에 근거한 물 대비 침윤소화약제의 침투 및 소화성능 지수화 식을 나타낸다.

Table 2. Experimental Result of Scale Model Experiment

		Water	Wetting agent	Wetting agent/ Water
Gradient of temperature changes	T/C 1	-1.345	-1.298	0.965
	T/C 2	-0.4233	-0.4913	1.161
	T/C 3	-0.0218	-0.2150	9.838
Amount of runoff (g)		1255.1	475.1	0.379
Amount of penetration (g)		1423.5	2309.4	1.567
Amount of mass loss (g)		228.2	170.9	0.663

$$\frac{\frac{1}{3} \left(\sum_{n=1}^3 T/C_n R_g \right) \times R_p}{R_r \times R_{cm}} \quad (2)$$

- R_g: Ratio of gradient
- R_p: Ratio of penetration
- R_r: Ratio of runoff
- R_{cm}: Ratio of change in the mass

식(2)는 물의 값을 기준으로 하므로 물의 값은 1로 나타나며, 침윤소화약제는 Table 1의 값을 대입하여 산출하면 33.71의 지수 값을 나타내는 것으로 분석되었다.

따라서 물과 비교하여 침윤소화약제가 다공성물질 내부로의 침투성능 및 소화성능이 우수하며 심부화재에 적합한 성능을 가짐을 확인하였다. 내부 온도 변화를 통한 침윤소화약제의 성능에 대한 변별력을 확인하였다.

5. 결 론

최적화된 침윤소화약제 성능평가 기법을 제시하기 위한 축소모형 실험과 기존의 NFPA 18에 명시된 실험의 결과를 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) NFPA 18 실험결과 목화솥에서 물은 71.2 g, 침윤소화약제는 9.6 g의 배출량을 확인함으로써 변별력을 확인하였다.

(2) 축소모형 실험에서 물은 1,245.1 g, 침윤소화약제는 435.1 g의 배출량을 나타내어 NFPA와 같이 침윤소화약제 침투성의 변별력을 확인하였으며, T/C 온도 분석을 통해 소화성의 변별력을 확인하였다.

(3) 축소모형 실험의 결과를 바탕으로 물 대비 침윤소화약제의 성능을 지수화한 결과 33.71의 결과를 나타냄으로써 물에 비해 침윤소화약제의 성능이 월등히 우수함을 확인하였다.

(4) 배출량만으로 침윤소화약제 성능평가를 실시하는 NFPA 18 실험에 비해 축소모형 실험 장치의 경우 온도 변수가 추가되어 보다 명확한 성능평가가 가능하고, 도출되는 결과 또한 충분한 변별력을 가짐을 확인하였다.

본 실험 결과를 바탕으로 자체 제작된 축소모형 실험 장치의 실험 결과에 대한 타당성을 규명하였으며, 심부화재 진압용 소화용수 기준평가 및 분석을 위한 성능평가 방법을 제시하는데 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2012년도 소방방재청 차세대 핵심 소방안전 기술 개발사업 “심부화재 진압용 소화용수 기준 평가 및 분석”에 대한 연구비 지원에 의한 결과의 일부이며 본 연구를 가능케 한 소방방재청에 감사드립니다.

References

1. J. W. Park, M. H. Lee, G. Y. Jeon and W. H. Hong, "A Case Study on the Problem of Fire Safety in Domestic Traditional Market - With a focus of fire at the Seo-Moon Market", Proceedings of 2006 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 182-186 (2006).
2. N. K. Kim, K. B. Lim and D. H. Rie, "A Study on Surface Absorption Dynamic Mechanism due to the Addition of a Surfactant in Cellulosic Combustibles", Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 12, No. 6, pp. 223-229 (2012).
3. National Emergency Management, "Type approval of the Extinguishing Agent and Technical Standards of Product Inspection", National Emergency Management Affairs Act 2012-57 (2012).
4. NFPA 18, "Standard on Wetting Agents", National Fire Protection Association (2011).
5. Y. S. Kim, "A Study on the Explosion Efficiency And Risk Assessment of Combustible Wood Dust by Using the Cone Calorimeter", University of Inchoen of Master's Thesis (2012).
6. J. S. Kim and D. H. Rie, "Downward Smoldering Fire Characteristics of Wood Chip and Wood Flour", Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 13, No. 1, pp. 269-274 (2013).
7. W. T. Simpson, "Drying and Control of Moisture and Dimensional Changes", Wood Handbook - Wood as an Engineering Material, Forest Product Laboratory U.S.D.A forest Service Madison, Wisconsin, Chapter 12, pp. 1-21 (1987).
8. S. S. Kim and D. H. Rie, "Correspondece Analysis of Wetting Agent Using Principal Compnent Analysis", Proceedings of 2013 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 23-24 (2013).