

축소모형 실험을 통한 침윤소화약제 소화성능 평가

김남균 · 임경범* · 이동호**†

인천대학교 대학원, *해천대학교 소방안전관리과, **인천대학교 소방방재연구소

Wetting Agent Performance Evaluation Using Scale Model

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 11, 2013; Revised March 18, 2014; Accepted April 17, 2014)

요 약

본 연구는 자체제작 축소모형 실험 장치를 이용하여 목재를 대상으로 침윤소화약제의 소화성능평가를 수행하였다. 축소모형실험의 최적조건 확인을 위해 소화용수의 양과 목재의 수를 변화시켜 조건설정 실험을 진행한 결과 20 pieces의 목재를 적충한 후 물과 소화용수 100 mL를 살수한 경우에 한하여 소화성능의 변별력을 확인하였다. 따라서 해당 조건에서 현재 사용되고 있는 국내의 침윤소화약제를 대상으로 소화성능을 평가한 결과, 물의 경우에서만 재 발화가 발생하는 것을 확인하였다. 또한 살수 시간에 따른 온도분포를 통해 소화능력의 변별력을 판단할 수 있었다. 본 실험 결과를 바탕으로 추후 최적화 침윤소화약제 성능평가 방법을 제시하는데 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

ABSTRACT

In this study, the extinguishing performance evaluation of wetting agent for wood crib was conducted by using a scale model equipment that we designed. To confirm the optimal conditions of the experiment, a test was changed amount of fire extinguishing water and the number of timber. As a result, the discrimination of the fire extinguishing performance was seen only when 20 pieces of wood and the extinguishing water of 100 mL were used. After evaluating the extinguishing performance of domestic and foreign wetting extinguishing agents under these conditions, a reignition was occurred in only when we used water. In addition, the discrimination of extinguishing performance was seen through the temperature distribution according to the time of watering. Based on the results of this experiment, this study is expected to be able to use as a basis on presenting a method of optimized performance evaluation of wetting extinguishing agent.

Keywords : Deep-seated fire, Wetting agent, Self-designed experiment equipment, Scale model, Wood crib

1. 서 론

우리나라는 국토 면적의 65%가 산림으로, 최근 10년간 (2003~2012년) 산불 발생 건수는 3,869건, 피해면적은 7,338 ha, 피해액은 530억원에 이른다⁽¹⁾. 문제는 산불 발생 후 진화작업을 완료하였음에도 불구하고 재발화가 발생하여 더 큰 피해를 입는 경우가 발생하는 것이다. 2005년 4월 발생한 양양 산불은 산불 진화 후 남아있던 불씨의 재 발화로 인해 보물 479호인 동종을 비롯한 낙산사 대부분의 전각을 불태우고 산림 150 ha와 인근 가옥 41채가 불에 타는 대형 산불로 번졌다⁽²⁾. 이와 같이 기존의 소화용수(물)를 사용하여 다량의 다공성 물질이 적재되어 있는 공간에

서 발생한 화재를 진압하는 경우, 물질의 심부에서 진행되는 연소(이하 심부화재)에 대한 소화 한계성을 가지며 재 발화의 위험성이 존재한다.

심부화재는 목조건물 및 다공성 물질의 화재 시 심부까지 고온이 전도되어 연소분위기가 형성되지만 산소의 접촉이 제한되어 점화되지 않는 훈소상태를 의미한다⁽³⁾. 소화용수가 침투되기 어려운 심부는 잠재적 위험요인으로 작용하여, 이후 산소와 접촉 시 재발화의 위험을 가지고 있다⁽⁴⁾. 그러므로 심부화재의 경우 고온의 물질이 천천히 냉각 되므로 소화용수의 침투성이 우수해야 하며, 내부 잔존이 긴 시간동안 유지되어야 한다⁽⁵⁾.

심부화재 진압용 침윤소화약제는 현재 국내를 비롯하여

†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.2014.28.2.020

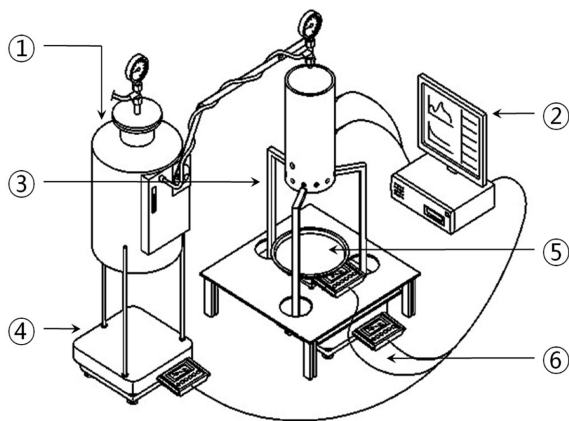
많은 국외 기업에서 생산·판매하고 있다. 하지만 현재 국내에서는 침윤소화약제의 기준 평가에 있어 구체적 침투 및 소화 성능에 관한 기준은 심부화재 진압용 침윤소화약제의 기술기준인 ‘소화약제의 형식승인 및 제품검사의 기술기준 고시(2012-57호)’에서 물리적 기술기준인 표면장력과 실규모의 A급 목재 실험만을 제시하고 있으며⁽⁶⁾, NFPA 18에 침윤소화약제의 성능에 대한 시험법이 명시되어 있으나 강제성이 적용되지 않아 사실상 판매되고 있는 침윤소화약제의 성능평가는 어려운 실정이다. Torero, J. L. 와 Fernandez-Pello, A. C.의 연구와 K.N. Palmer의 연구 등 선행 연구 또한 심부화재 구현에 치중하며 소화에 관한 연구는 진행이 미미한 상태이다^(7,8). 이에 침윤소화약제에 대한 침투 및 소화능력의 명확한 변별력을 가지는 축소모형 실험 기법 연구 및 확립의 필요성이 있다.

본 연구에서는 침윤소화약제의 성능평가를 위한 실험 장치를 자체 제작하였으며, 물과 침윤소화약제의 소화능력의 변별력을 확인하고자 하였다. 이를 위하여 현재 사용하고 있는 침윤소화약제 소화성능 기준 재료인 A급 목재를 사용한 축소모형 실험으로 실험조건의 설정 및 약제별 실험을 통해 침윤소화약제의 소화성능 및 침투성능에 관한 결론을 도출 하였으며, 이를 바탕으로 심부화재 피해 저감을 위한 침윤소화약제 성능평가 기법 연구의 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 축소 실험 장치 구축

Figure 1은 자체 제작한 축소모형 실험 장치로 심부화



- ① Fire fighting water tank and nozzle
- ② Computer for real time result display
- ③ Sample holder
- ④ Scale 1 for amount of watering
- ⑤ Scale 2 for amount of runoff
- ⑥ Scale 3 for amount of penetration

Figure 1. The composition of measurement system.

재에 대한 침윤소화약제의 소화성능평가를 위하여 제작되었다.

자체 제작한 축소모형 실험 장치는 시료를 충전시켜 연소공간으로 활용되는 홀더와 홀더 내부의 온도를 측정하기 위한 열전대(Thermocouple, K Type, 이하, T/C로 표기), 소화실험 시 사용될 소화용수를 저장하고 가압 분사할 수 있는 약제탱크와 노즐, 살수량, 배출량, 침투량 측정을 위한 3개의 저울로 구성함으로써 보다 명확한 결과를 도출할 수 있도록 설계하였다. 시료홀더는 직경 20 cm의 원통형으로써 높이는 40 cm이며, 노즐은 구경 1 mm 기성 노즐을 사용하였다. T/C의 최대 측정 온도는 900 °C이며, 저울의 최소 측정 단위는 0.1 g이다.

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 cm 간격으로 설치하였으며, 이를 통해 내부 온도변화를 측정하여 소화성능을 판단하였다.

2.2 축소 실험 재료 및 약제

2.2.1 목재 조건

본 축소실험을 수행하기 위해 선정된 목재는 기존 A급 소화시험에 사용되는 소나무로, 이는 추후 축소실험과 소화재 실험의 비교분석 실험에 있어 동일 재료에 대한 재료의 타당성을 확보하기 위하여 선정하였다.

목재 연소의 특징은 표면 탄화가 진행됨에 따라 내부 온도 상승억제효과를 가져온다⁽⁹⁾. 이는 일정 두께 이상의 목재에서 나타나는 현상으로 실 화재실험에 사용되는 목재를 일정배율로 축소하여 사용하게 될 경우 열원에 접하는 표면적의 급격한 상승과 목재 두께 감소로 인해 위와 같은 현상이 매우 빠른 속도로 진행되며 급격한 목재의 붕괴가 발생한다. 이에 본 연구에서는 축소모형 실험에서의 목재 붕괴를 방지하기 위해 목재를 1.5 × 1.5 × 15 cm로 축소하여 실험을 진행하였다. 축소목재를 총 6단으로 적재하여 실험을 지행 하였으며, 축소모형의 부피는 2,025 cm³으로 소화재 실험 목재 부피의 1/185에 해당한다.

또한 사용되는 목재의 함수율을 일정하게 유지시키기 위해 건조기에서 온도 105 °C 조건하에 24시간 건조 후 실험을 진행하였으며, 건조 전 무게와 건조 후 무게를 통해 실험에 사용된 목재의 함수율을 산출한 결과 해당 목재의 함수율은 15%였다^(10,11).

2.2.2 약제의 선정

본 연구에서는 기초실험에서 사용 된 국내·외 시판되는 약제 중 표면장력, 기초 흡수도 실험에서 평균 성능을 나타내며 BDG(Butyl Di-Glycol)를 주 계면활성제로 사용하

는 침윤소화약제인 Bio-ex를 사용하였다. 실험농도는 사용권장농도의 중간 값인 0.35%인 약제로, 해당 농도의 점도는 1,020 N · s/m², 표면장력 25 mN/m이다.

2.3 조건 설정 실험방법

목재를 사용한 침윤소화약제의 소화능력을 확인하기 위한 축소모형 실험을 수행하였다. 실험조건은 물과 침윤소화약제의 변별력을 확인하기 위한 최적 조건을 설정하기 위한 실험으로, 물을 활용한 실험에서는 소화가 진행되지 않으나 침윤소화약제를 활용한 실험에서는 소화가 진행되는 조건을 찾기 위하여 수행하였다.

목재의 적재는 ‘수동식소화기의 형식승인 및 검정기술 기준 고시 제 2011-3호’에 명시되어 있는 A급 소화능력시험의 목재 적재 방법에 근거하여 엇갈려 적재하였으며⁽¹²⁾, 최하단부부터 3 pieces, 2 pieces, 3 pieces를 2층씩 적재하여 총 16 pieces의 목재를 사용한 Case 1과, 3 pieces, 4 pieces, 3 pieces를 2층씩 적재하여 총 20 pieces의 목재를 사용한 Case 2를 각각 물 75, 100, 125 mL를 사용하여 소화하였다. 실험방법과 실험조건을 Figure 2와 Table 1에 나타낸다.

2.4 소화성능평가 실험방법

약제별 성능평가 실험은 선행 실험에서 확인한 조건에 준하여 목재를 Case 2(3 pieces, 4 pieces, 3 pieces. 2층 적재. 총 20 pieces)의 기준으로 적재한 후 소화용수 100 mL를 살수하여 소화성능평가를 진행하였으며, 국내 · 외

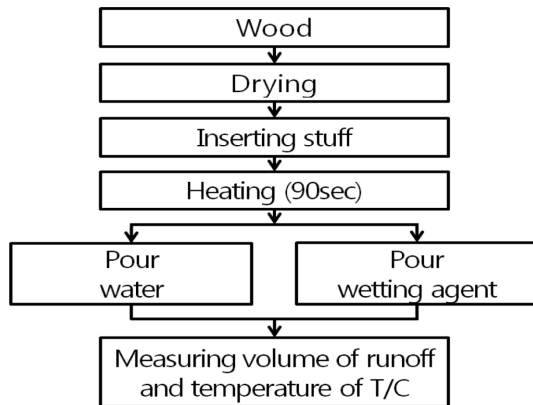


Figure 2. Process of condition setting experiment.

Table 1. Experiment Condition

| | |
|---------------------------------|---------------------------|
| Temperature/Humidity | 20 °C/50% |
| Flow rate of fire water | 0.5 L/min |
| Position of fire water injected | 25 cm over the top |
| Position of thermocouples | 2/5/8 cm under the bottom |
| Position of methane burner | 10 cm under the bottom |
| Heating time | 90 s |

Table 2. Condition of Wetting Agent

| Name of wetting agent | Recommended concentration (%) | Used concentration (%) | Surface tension (mN/m) |
|-----------------------|-------------------------------|------------------------|------------------------|
| Bio-ex | 0.2~0.5 | 0.35 | 25 |
| Class A foam | 0.1~1 | 0.55 | 25 |
| Ecofoam 936 | 3 | 3 | 25 |
| Ecofoam HP5 | 1 | 1 | 26 |
| F500 | 0.5~1 | 0.75 | 32 |
| First Class | 0.1~1 | 0.55 | 35 |
| Forexpan-s | 0.1~1 | 0.55 | 26 |

침윤소화약제를 대상으로 특성분석을 수행하였다.

Table 2는 각 약제의 실험 조건을 나타낸 것이다.

Table 2에서 침윤소화약제의 표면장력의 측정은 KS M ISO 304 규격에 의거 ITOH사(社)의 Tensionmeter로 측정하였으며, 측정 장비의 최소 측정단위는 0.1 mN/m이다⁽¹³⁾. 측정결과 First Class에서만 ‘소화약제의 형식승인 및 제품 검사의 기술기준 고시(2012-57호)’에서 명시하고 있는 침윤소화약제의 표면장력 33 mN/m을 상회하는 35 mN/m의 결과 값을 나타내었다⁽⁶⁾.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 조건 설정 실험결과

실험 결과는 목재의 가장 중심부에 T/C를 삽입하여 실시간 데이터 비교 분석을 통해 심부의 화재 소화 여부를 판별하였다. Figure 3은 각 실험의 T/C 온도 변화를 나타낸다.

목재의 수가 적은 Case 1 (16 pieces)의 결과가 Case 2 (20 pieces)의 결과에 비해 평균 소화진행속도가 약 20초

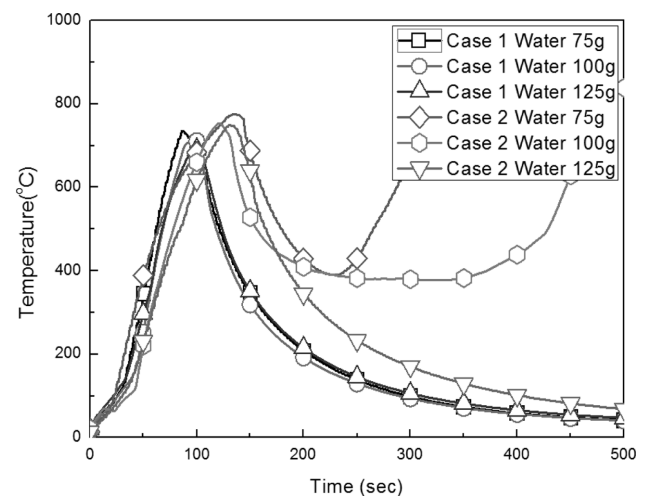


Figure 3. Changes in the temperature of T/C (Water).

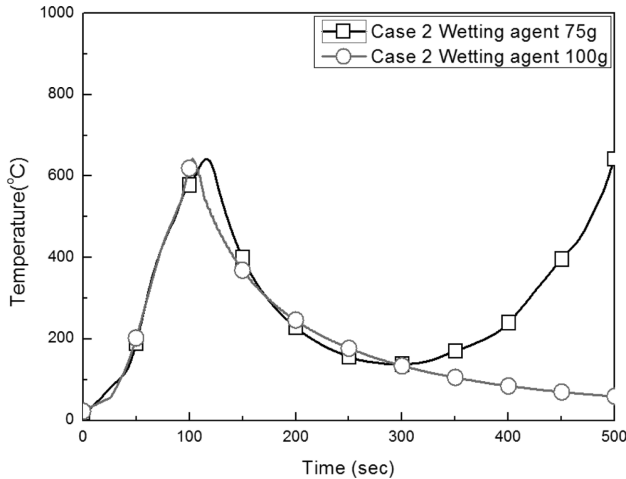


Figure 4. Changes in the temperature of T/C (Wetting agent).

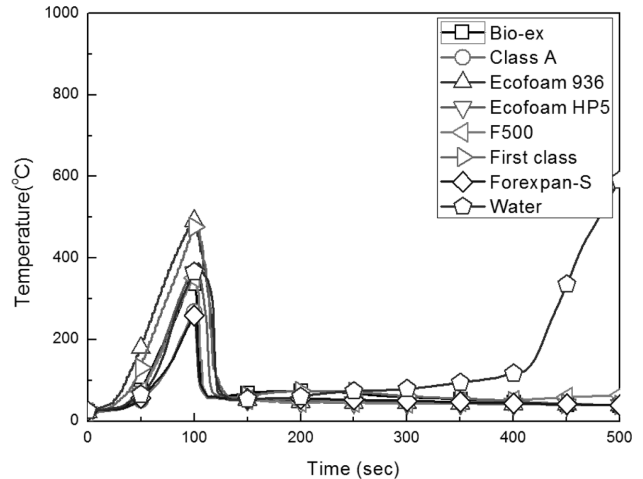


Figure 5. Changes in the temperature of T/C 1.

Table 3. Result of Condition Setting Experiment

| Case | Amount of fire water | Water | Wetting agent |
|--------|----------------------|---------------|---------------|
| Case 1 | 75 mL | Extinguishing | Extinguishing |
| | 100 mL | Extinguishing | Extinguishing |
| | 125 mL | Extinguishing | Extinguishing |
| Case 2 | 75 mL | Reignition | Reignition |
| | 100 mL | Reignition | Extinguishing |
| | 125 mL | Extinguishing | Extinguishing |

빠르게 나타났으며, 이는 목재 수에 따른 발열량의 차이에 근거하는 것으로 판단된다. 또한 Case 2의 물 75 mL, 100 mL 실험에서 소화가 진행되지 않음으로써 동일 조건하에 침윤소화약제를 사용한 소화 실험을 진행하였다.

Figure 4는 Case 2 조건하에서 침윤소화약제 실험의 T/C 2 온도 변화를 나타낸다. Figure 4의 실험 결과 75 mL의 침윤소화약제를 사용한 경우 재발화가 발생하여 물의 경우와 비교가 불가능 하였으며, 100 mL의 침윤소화약제를 사용한 경우 소화가 진행됨으로써 명확한 변별력을 나타내었다.

조건설정 실험의 결과는 Table 3을 통해 재발화 발생 여부를 나타내었으며, Case 2의 목재 조건에서 100 mL의 소화용수를 사용할 경우 명확한 변별력을 나타냄을 확인하였다.

3.2 소화성능평가 실험결과

약제별 소화실험 결과 다음과 같은 결과를 도출하였다.

Figure 5는 약제별 실험 및 물 실험의 T/C 중 열원과 가장 멀리 떨어진, 최상단의 T/C 1 온도 변화를 나타낸 것이다. 해당 결과에서 물의 경우 150초 이후 완만한 온도상승을 보이며 약 400초 이후 급격한 온도 상승이 나타나는 것을 확인하였다.

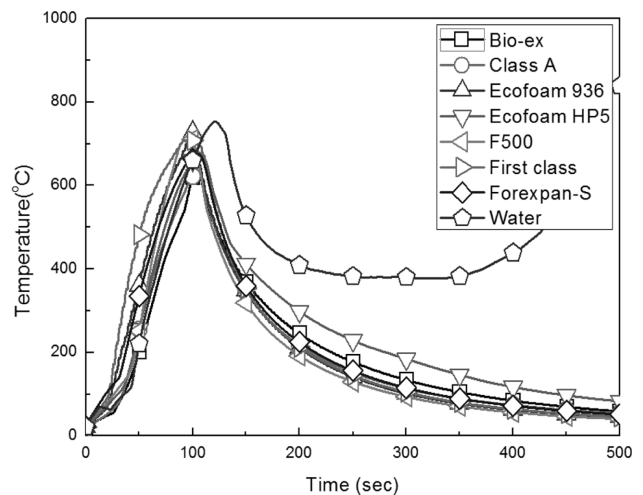


Figure 6. Changes in the temperature of T/C 2.

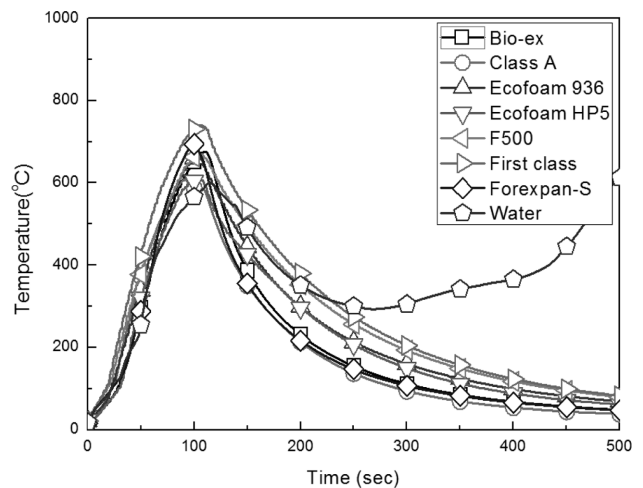


Figure 7. Changes in the temperature of T/C 3.

Figure 6은 약제별 실험 및 물 실험의 T/C 중 다공성 물질의 중앙부에 위치한 T/C 2의 온도 변화를 나타낸다. 이

때 물의 경우 252초부터 348초까지 약 100여 초간 380 °C로 온도가 유지되며 이후부터 다시 급격한 온도 상승이 나타나는 것을 확인하였다.

Figure 7은 약제별 실험 및 물 실험의 T/C 중 열원과 가장 가까운, 최하단의 T/C 3 온도 변화를 나타낸다. 물의 경우 269초의 293 °C를 기점으로 온도가 재 상승하는 모습을 보이며 약 430초 이후 급격한 온도 상승이 나타나는 것을 확인 하였다.

Figure 5, 6, 7의 물 그래프에서 발생하는 두번째 변곡점 이후의 완만한 온도 상승은 목재 내부의 화염이 소화되지 않은 상태에서 물의 살수가 종료되어 내부에 존재하는 심부화재가 살수된 물을 증발시키는 과정에서 발생하는 것이며 이러한 심부화재에 의해 재발화가 발생하는 것으로 판단된다.

본 실험은 살수 시점 이전까지의 데이터의 경우 동일 조건하에 이루어지므로 이론상 동일한 온도변화가 나타나야 하나 목재의 밀도, 홀더 내부 기류의 발생 및 열전달 등에서 변수가 발생하여 실제로는 Figure 5, 6, 7에서 확인할 수 있듯이 모두 다른 결과를 나타낸다. 이에 각 T/C의 살수 직전 온도를 확인해 본 결과 T/C 1의 경우 살수 직전의 온도가 Forexpan-S가 213.3 °C, Ecofoam 936이 456.6 °C로 약 2배 이상의 온도 차이가 나타났으며, T/C 2는 Bio-ex의 경우 611.3 °C, Ecofoam 936이 719.9 °C로 약 100 °C의 온도 차이가 나타나는 것을 확인하였다. T/C 3의 경우 Class A foam이 588.5 °C, First class가 740.1 °C로 약 150 °C의 온도 차이가 나타나는 것을 확인하였다. 살수 직전 온도들의 표준편차는 T/C 1이 78.8, T/C 2가 40.3, T/C 3가 46.4로 T/C 2에서 가장 뛰어난 온도 재현성을 나타내었다. 또한 3회 반복실험의 약제별 표준 편차의 평균은 T/C 1이 49.7, T/C 2가 23.3, T/C 3이 27.6을 나타냄으로써 T/C 2의 데이터를 기준으로 소화능력의 변별력을 판단하는 것이 가장 명확할 것으로 판단된다.

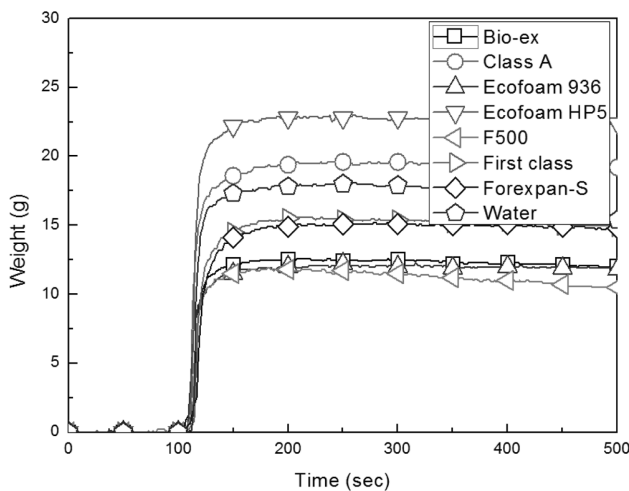


Figure 8. Changes in the mass of runoff.

Figure 8에 각 실험에서 발생한 배출량을 나타낸 결과로 약제의 평균 배출량이 15.6 g이며, 물의 배출량은 18 g을 나타냄으로써 3 g의 차이를 나타내었다. 이는 침윤소화약제들의 표준 편차가 3.93임을 고려할 때 약제들의 표준편차에 포함되는 값이므로 목재실험을 통한 침윤소화약제의 침투성능 평가는 다소 어려울 것으로 판단된다.

5. 결 론

자체제작 축소모형 실험 장치를 활용하여 목재를 대상으로 침윤소화약제의 소화성능평가를 진행하여 T/C 온도 변화 및 배출량을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 조건설정 실험 결과 3 pieces, 4 pieces, 3 pieces를 2층씩 적재하여 총 20 pieces의 목재를 사용하고 소화용수 100 mL를 사용하여 소화를 진행할 시 명확한 소화성능의 변별력을 나타내었다.

(2) 조건설정 실험에서 확인한 조건 하에서 약제별 소화 실험을 진행한 결과 침윤소화약제들은 유사한 온도변화 패턴을 나타내었으며, 물의 경우에서만 재 발화가 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 동일한 소화용수의 양을 사용하더라도 침윤소화약제가 물에 비해 확실한 소화성능 향상을 가져온다는 점을 확인하였다.

(3) 살수 직전 온도들의 표준편차는 T/C 1이 78.8, T/C 2가 40.3, T/C 3가 46.4로 T/C 2에서 가장 뛰어난 온도 재현성을 나타내었다. 따라서 T/C 2의 데이터를 기준으로 소화능력의 변별력을 판단하는 것이 가장 명확할 것으로 판단된다.

(4) 시료 홀더를 통과하여 홀더 외부로 배출되는 배출량의 침윤소화약제별 데이터 확인 결과, 물의 배출량과의 차이가 침윤소화약제들의 표준편차 범위에 포함됨으로써 다공성 물질로써 목재를 활용한 경우 침윤소화약제 사용에 의한 표면장력 저하에 따른 침투성능 확인은 다소 어려울 것으로 판단된다.

(5) 침윤소화약제의 침투성 분석을 위해 추후 목재가 아닌 타 다공성 물질(목분, 섬유, 쌀겨 등)을 대상으로 한 침윤소화약제 성능평가 실험 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

본 실험 결과를 바탕으로 추후 최적화 침윤소화약제 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. Korea Forest Service, "Statistics of Forest Fire" (2012).
2. S. M. Hong, "A Study on Properties of Smoldering Ground Fire in Litter-layer", Master's Thesis of Hoseo University (2011).
3. National Fire Protection Association, NFPA 18, "Standard on Wetting Agents" (2011).
4. 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).
5. National Fire Protection Association, NFPA 12, "Standard on Carbon Dioxide Extinguishing Systems" (2005).
6. National Emergency Management, "Type Approval of the Extinguishing Agent and Technical Standards of Product Inspection", National Emergency Management Affairs Act 2012-57 (2012).
7. J. L. Torero and A. C. Fernandez-Pello, "Natural Convection Smolder of Polyurethane Foam, Upward Propagation", Fire Safety Journal, Vol. 24, No. 1, pp. 35-52 (1995).
8. K. N. Palmer, "Smouldering Combustion in Dusts and Fibrous Materials", Combustion and Flame, Vol. 1, No. 2, pp. 139-154 (1957).
9. I. H. Yeo, M. O. Yoon and J. B. Yoon, "Burning Behavior of Heavy Timber Subjected to Standard Fire", Proceedings of 2013 Spring Annual Conference, Journal of The Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol. 25, No. 2, pp. 123-132 (2009).
10. A. Chattaway, G. G. Cox, S. R. Preece and D. J. Spring, "The Development of a Small Scale Class A Fire Test", Halon Options Technical Working Conference, pp. 498-508 (1997).
11. M. H. Kim, "Effects of Additives on the Low Pressure Water Mist for Extinguishing Wood Cribs Fire", Master's Thesis of Chungbuk National University (2013).
12. National Emergency Management, "Type Approval of the Manual System Fire Extinguisher and Technical Standards of Test", National Emergency Management Affairs Act 2011-3 (2011).
13. Korea Standards Association, KS M ISO 304 "Surface Active Agents - Determination of Surface Tension by Drawing up Liquid Films" (2003).