

## 계면활성제 첨가에 따른 함수율에 관한 실험적 연구

김남균 · 이동호\*<sup>†</sup>

인천대학교 대학원, \*인천대학교 소방방재연구소

## Experimental Study on Moisture Content According to Addition of Surfactants

Nam-Kyun Kim · Dong-Ho Rie\*<sup>†</sup>

Graduate School, Incheon National University

\*Fire Disaster Prevention Research Center, Incheon National University

(Received February 4, 2015; Revised April 13, 2015; Accepted April 14, 2015)

### 요 약

화재사고는 그 충격과 영향이 업무중단 및 기업의 존폐를 좌우 할 수 있는 대표적인 재난 유형이다. 따라서 사전 예방, 대비는 물론 재난 발생 시 신속한 초기대응이 매우 중요하다. 현재 운용되고 있는 저탄장 및 합판 가공 산업 분야 등에서는 다공성 가연물의 저장이 불가피하다. 다공성 가연물 저장 공간의 화재는 그 특성상 발화시점의 파악 및 초기 진압이 어려우며, 초동 대처에 실패할 경우 표면화재에서 심부화재로 이어져 2차 화재피해가 발생할 가능성이 높다. 또한 심부화재는 다량의 독성가스발생과 재발화로 인해 인적·물적 피해를 야기할 수 있으므로 다공성 가연물을 취급하는 저장공간을 중심으로 피해경감 대책이 요구된다. 본 연구는 침윤소화약제 사용 시 다공성 물질의 심부화재 소화 효율 증대에 관한 기초 연구로서, 계면활성제의 농도에 따른 침투성능의 향상에 관한 연구를 수행하였다. 실험에 사용된 다공성 물질은 국내 사용 목재의 75%를 점유하고 있는 뉴질랜드산 소나무의 원목 목분을 사용하였다. 소화용수는 침윤소화약제에 사용되고 있는 Butyl Di Glycol (BDG)을 선택하여 농도에 따른 표면장력별 표준시료를 제작하여 실험을 수행하였다. 실험은 NFPA 18의 Deep-Seated Fire Test를 기초로 수행하였으며, 살수량과 다공성 물질 내부로의 침투량, 다공성 물질 외부로의 배출량 측정 실험을 실시하였다. 실험결과 계면활성제 농도에 따른 표면장력이 감소함에 따라 거시적 침투속도는 감소하나 다공성 물질 내부로의 침투량은 증대되는 특성을 확인하였다.

### ABSTRACT

The fire accident is a representative type of disaster that can largely impact on business. Therefore, precautionary measures and rapid initial response is very important when a disaster occurs. The storage of porous combustibles is inevitable in coal yard, plywood processing industry, and others that are currently operating. Initial fire fighting of fire and identifying the ignition point in such a porous combustible storage space are so difficult that if the initial response is failed, being led to deep-seated fire, surface fire is likely to result in secondary damage. In addition, deep-seated fire can cause personal injuries and property damage due to a large amount of toxic gases and reignition. Therefore damage reduction measures is required around the storage space to handle a porous flammable. Improving the penetration performance of the concentration of the surfactant is carried out as underlying study, which is about an deep-seated fire extinguishing efficiency augmentation when using wetting agents. The porous materials used in the experiments is radiata pine wood flour, which occupies more than 75% of the domestic wood market. Fire fighting water is selected as Butyl Di Glycol (BDG), which is being used for infiltration extinguishing agent, and the experiment was carried out by producing a standard solution. The experiment was carried out on the basis of the Deep-Seated Fire Test of NFPA 18. The amount of watering, porous material to the internal amount of penetration, and runoff measurement out of the porous material was conducted. According to experimental results, as the surface tension is reduced, the surfactant concentration macroscopic penetration rate decreases, but infiltration to a porous material is shown to have growth characteristics.

**Keywords :** Deep-seated fire, Wetting agent, Surfactant, Penetration performance, Moisture content

<sup>†</sup>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.2015.29.2.079>

## 1. 서 론

지난 2013년을 기준으로 화재는 40,932건이 발생하여 2,184명의 사상자와 4,344억원의 재산 피해가 발생하였다. 이 중 사망자 5명 이상, 사상자 10명 이상, 50억원 이상의 경제적 피해가 발생한 대형화재는 2012년 13건에서 2013년 8건으로 전년대비 5건이 감소하였으며 피해액은 약 33 억원에서 약 1,000억원으로 급격한 상승을 나타냈다<sup>(1)</sup>. 화재에 의한 인적·물적 피해는 기업에 막대한 피해를 초래하므로 이에 대한 예방과 발생 시 초동 대처가 매우 중요하다. 이러한 초동 대처가 빠르고 정확하게 수행되지 못할 경우 사업연속성의 저해가 발생하며, 큰 경제적 피해로 이어지게 된다. 사업연속성관리란 기업이 재해 발생 시에도 핵심 업무 기능을 증대한 변경 없이 지속할 수 있도록 정책 및 절차를 수립하여 이행하는 것을 의미한다. 화재는 사업연속을 저해하는 중대 리스크이며, 화재위험성의 정량적 평가로부터 재난 예방계획 수립 및 발생 시 신속한 계획의 사전 구축을 토대로 한 재해경감활동 계획 수립이 요구된다.

2003년 12월 17일 발생한 청도 대흥농산 화재사건은 용접 불티에 의해 발생하였다. 공장 내에는 버섯 재배 공장의 특성 상 다량의 목분과 쌀겨가 적재되어 있었다. 목분에 1차 표면화재가 발생하고 화재가 확산되었으며, 목분과 쌀겨 내부로의 열전달이 발생하여 2차 심부화재가 발생하였다. 소화를 위해 살수한 소화용수가 내부로 침투되지 못하면서 화재는 3일 만에 진화되었으며, 심부 혼소로 발생한 독성가스로 인해 12명의 희생자가 발생하였다<sup>(2)</sup>. 심부화재는 청도 대흥농산의 화재사태와 같이 다공성 물질의 심부까지 고온이 전도되어 연소분위기가 형성되지만 산소의 접촉이 제한되어 화염연소는 발생하지 않는 혼소상태를 의미한다<sup>(3,4)</sup>. 해당 사고의 경우 사고 발생 시 대처에서 빠른 진화가 이루어지지 않음으로써 사고의 규모가 크게 증가하였다. 기존의 소화용수(물)를 사용하여 이와 같은 심부화재를 진압하는 경우 소화용수가 침투되기 어려운 다공성 물질의 심부는 잠재적 위험요인으로 작용하며, 외력으로 인한 산소와 접촉 시 재발화의 위험성을 내포하고 있다<sup>(5)</sup>. 심부화재는 그 특성 상 고온의 다공성 물질이 서서히 냉각 되므로 소화용수의 침투성이 우수해야 하며, 소화용수의 내부 잔존시간이 길게 유지되어야 한다<sup>(6)</sup>. 따라서 소화의 효율성을 증대시키기 위해 침윤소화약제를 첨가함으로써 소화용수의 물리·화학적 성상을 변화시켜 화재진압에 효율적으로 대처하는 것이 중요하다.

Torero의 연구와 Palmer의 연구, 김진수의 연구 등 선행 연구 또한 심부화재 구현과 심부화재의 전이 속도 등을 중점적으로 다루었으며, 이에 대한 소화에 관한 연구는 진행이 미미한 상태이다<sup>(7-9)</sup>. 또한 본 실험에 사용된 축소모형 실험장치의 설계 및 실험결과에 대한 신뢰도에 관한 연구와 기존 약제의 성능 평가에 관한 연구가 선행연구로써 수행되

었으나 약제를 이루는 주요 첨가제에 의한 성능 향상도에 관한 연구가 부족한 실정이다<sup>(10,11)</sup>. 이에 침윤소화약제를 구성하는 첨가제에 의한 침투 및 소화능력의 향상도 연구가 수행되었다.

본 연구에서는 계면활성제만을 첨가시킨 표준시료를 제작하여 동일 다공성 물질을 대상으로 실험을 진행하였으며, 이에 따른 침투 및 소화특성을 규명하였다. 실험은 축소모형 실험장치로 심부화재 소화실험을 진행하였으며, 침투량과 배출량을 측정함으로써 다공성 물질 내부 함수율을 도출하여 계면활성제의 첨가율에 따른 침투성능의 향상도를 확인하였다. 이를 바탕으로 심부화재의 조기진압을 위한 침윤소화약제의 연구 개발의 기초자료로 활용하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 축소 실험 장치 구축

심부화재를 대상으로 계면활성제 첨가에 따른 침투성능 평가를 위한 실험장치는 Figure 1에 나타내었다<sup>(10)</sup>. 실험장치는 ① 압력탱크의 내부압 및 살수압을 표시하는 압력계와 ② 분사노즐, ③ 소화용수를 저장하고 가압하는 압력탱크, ④ 시료를 충전시켜 연소공간으로 활용되는 홀더, ⑤ 소화용수의 유량을 조절하는 유량 조절 밸브, ⑥ 시료 홀더 및 압력탱크의 무게를 지탱하는 지지용 다리, ⑦ 실험 데이터를 실시간으로 저장하고 표시하는 데이터로거 및 디스플레이, ⑧ 시료를 투과하여 홀더 외부로 배출된 배출량을 수집하고 측정하기 위한 팬을 포함한 저울, ⑨ 홀더의 중량변화를 측정하여 침투량을 측정하기 위한 저울, ⑩ 살수량을 측정하기 위한 저울로 구성되었다.

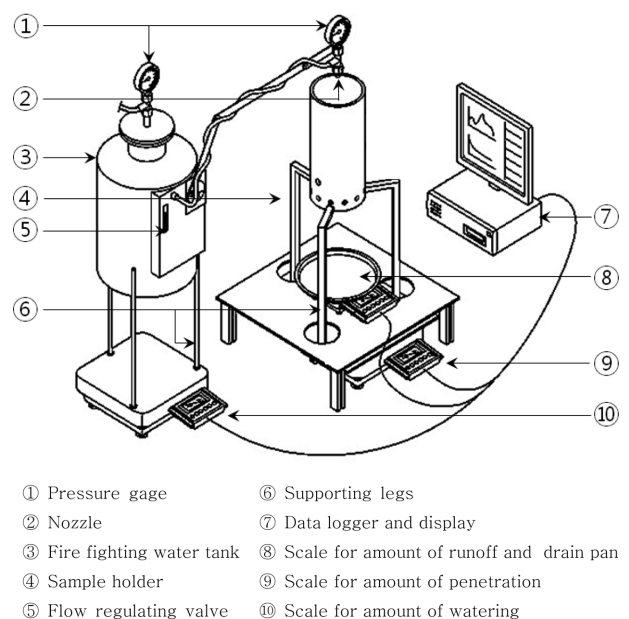


Figure 1. The composition of measurement system.

본 연구에서는 BDG 농도에 따른 표면장력에 의해 구현되는 침투성을 분석하기 위하여 약제탱크에서 분사노즐을 통해 다공성물질 홀더로 표준시료를 살수시켜 살수량, 배출량, 침투량을 측정하고 침투성을 분석하였다.

2.2 실험 재료 및 약제

2.2.1 시료 조건

실험에 사용된 목분은 국내 사용 목재의 75%를 점유하고 있는 라디에타 파인(radiata pine)의 원목 목분을 사용하였으며<sup>(12)</sup>, Sieve Shaker(청계상공사, CG-211-8)를 통해 체가름하여 1,000~2,000 μm의 균일입도 조건으로 실험하였다.

실험 시료는 일정한 함수율 유지를 위해 80°C 조건의 건조기에서 62시간 건조 후 4시간 간격으로 반복 측정하여 시료의 질량 변화가 ± 1 g이 되는 시점까지 건조시켰으며, 식(1)에 따라 함수율을 계산한 결과 실험에 사용된 목분의 함수율은 10.6%이다<sup>(9,13)</sup>.

$$MC = \frac{W_m - W_d}{W_d} \times 100 \tag{1}$$

MC: Moisture content [%]

W<sub>m</sub>: Weight of sample before overdry [g]

W<sub>d</sub>: Weight of sample after overdry [g]

2.2.2 약제의 선정

본 연구에서는 기초실험에서 사용된 국내·외 시판되는 약제들의 주요 계면활성제로 사용되는 Butyl Di-Glycol (BDG)를 농도에 따른 표면장력별 표준시료를 제작하여 사용하였다. Table 1은 해당 표준시료의 물리적 특성을 나타낸다.

2.3 실험방법

Figure 2는 실험방법에 대한 흐름도를 나타낸다. 본 실험은 NFPA 18의 Deep-seated fire test를 기반으로 수행하였으며<sup>(14)</sup>, 침투성을 분석하기 위하여 약제탱크에서 분사노즐을 통해 다공성물질 홀더로 소화용수를 살수시켜 살수량(Scale 1), 배출량(Scale 2), 침투량(Scale 3)을 측정하여 침윤소화약제의 침투성을 분석하였다.

축소모형 실험 장치를 사용한 침윤소화약제 침투성능평가실험에 사용된 홀더의 직경은 20 cm이며 목분 밀도는

Table 1. Physical Properties of the Standard Solution

BDG concentration [%]	20	5	1.5	0.5	0
Surface tension [mN/m]	33	40	50	60	73
Viscosity [cP]	1.460	1.103	1.034	1.014	1.005

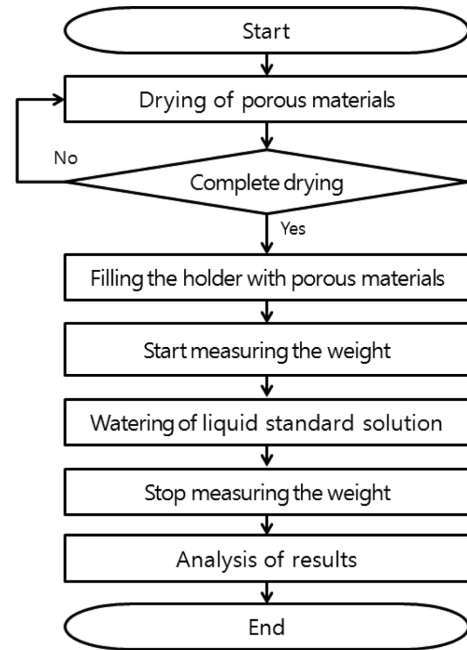


Figure 2. The flow chart of the scale model experiment.

0.098 g/cm<sup>3</sup>를 유지하였고, 소화용수는 유량 0.5 L/min으로 1 L를 살수하여 실험을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

Figure 3은 표면장력별 표준시료의 배출량 측정 결과를 나타낸다. 실험결과를 통하여 살수된 표준시료가 홀더 외부로 배출되기 시작하는 최초 배출량 발생 시점과 실험 종료 후 측정되는 배출량의 계산이 가능하다.

실험결과 33 mN/m 표준시료가 살수 후 135초부터 배출이 발생함으로써 가장 늦은 최초 배출 발생시점을 나타냈으며, 물의 경우 살수 후 12초 만에 배출이 발생함으로써 가장 빠른 최초 배출 발생시점을 나타냈다. 40 mN/m 표준

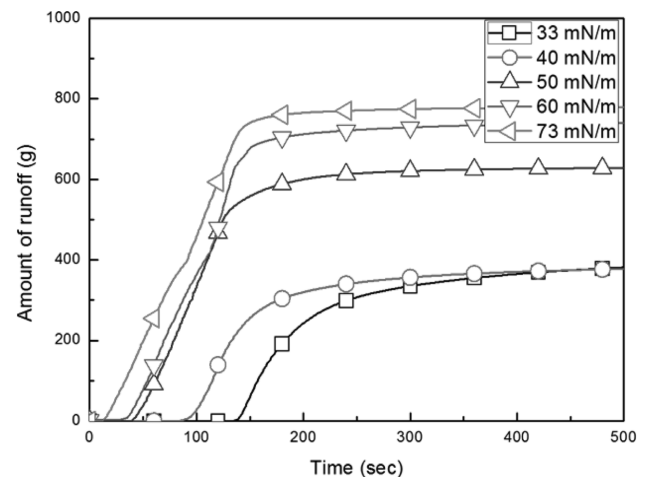


Figure 3. The experimental result of runoff.

시료는 84초, 50 mN/m 표준시료는 39초, 60 mN/m 표준시료는 27초로 표면장력의 감소에 따라 최초 배출 발생시점이 늦어지는 것을 확인하였다. 배출량의 경우 33 mN/m 표준시료가 377.7 g 배출됨으로써 가장 적은 배출량을 나타냈으며, 물의 경우 배출량은 779.2 g으로 가장 많은 배출량을 나타냈다. 40 mN/m 표준시료는 381.8 g, 50 mN/m 표준시료는 628.1 g, 60 mN/m 표준시료는 739.9 g으로 표면장력의 감소에 따라 배출량이 감소하는 경향을 확인하였다.

Figure 4는 농도에 따른 표면장력별 표준시료의 최초 배출 발생시점과 해당 시간과 시료의 높이로 산출된 침투속도를 나타낸다. 침투속도는 표면장력이 증가함에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 벽면현상과 다공성 물질 입자 사이에 형성된 모세관을 통한 배출이 표면장력이 높을수록 늦게 나타나기 때문으로 판단된다.

Figure 5는 농도에 따른 표면장력별 표준시료의 실험 종료시점의 배출량과 침투량을 나타낸다. 화재의 소화는 물

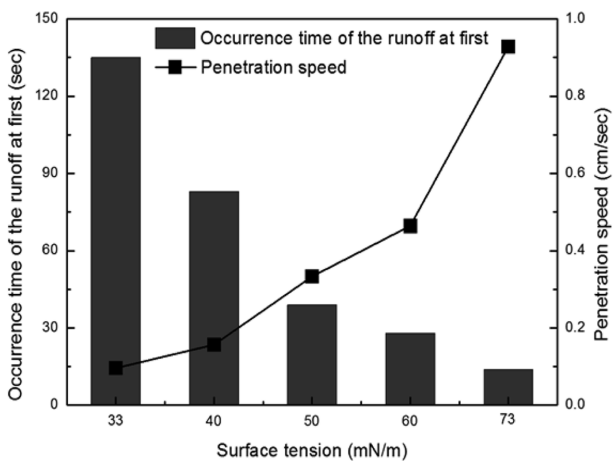


Figure 4. Occurrence time of the runoff at first and penetration speed of standard solutions.

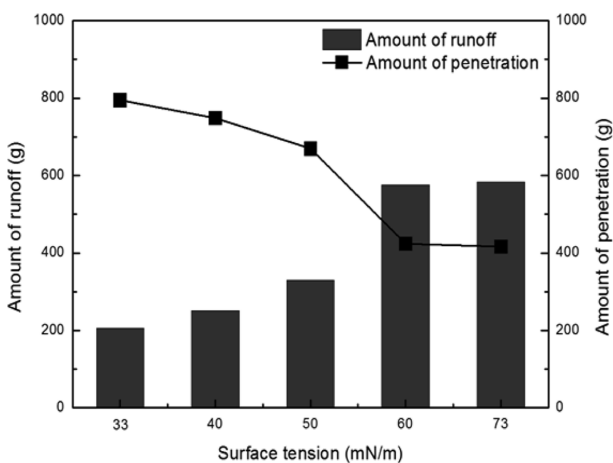


Figure 5. Amount of runoff and amount of penetration of standard solutions.

에 의한 화원에 직접적인 냉각효과에 의해서 좌우되므로, 본 연구에서 첨가된 계면활성제가 침투에만 영향을 미친다고 가정하였을 때, 소화에 영향을 미치는 요소는 다공성 물질 외부로 배출되지 않고 내부에 침투된 물의 양이라 할 수 있다. Figure 5에서 나타난 표준시료 별 침투량에서 다공성 물질 내부로 침투된 물의 양은 식(2)에 따라 산출된다.

$$P_W = P_S \times \left(1 - \frac{C_{BDG}}{100}\right) \quad (2)$$

$P_W$  = Amount of penetrated water

$P_S$  = Amount of penetrated standard solution

$C_{BDG}$  = BDG concentration

Table 2는 식(2)에 의해 산출된 물의 양을 나타내며, Figure 6은 산출된 물의 양을 통해 식(1)에 의거하여 함수율을 산출한 결과를 나타낸다. 함수율 산출결과 40 mN/m 표준시료는 207.2%의 함수율을 나타냄으로써 물 대비 64.8% 향상된 값을 나타내었다. 50 mN/m 표준시료의 경우 함수율은 193.0%, 33 mN/m 표준시료의 경우 186.4%, 60 mN/m 표준시료의 경우 127.2%, 물은 125.8%의 함수율을 나타내었다.

침투량은 33 mN/m 표준시료가 가장 많았으나, 표준시료에 포함된 물의 양을 기준으로 함수율을 산출한 결과 40 mN/m 표준시료가 가장 높은 함수율 가짐을 확인함으로써 40 mN/m 표준시료가 심부화재 시 다공성 물질 내부

Table 2. The Amount of Water Penetrating into the Porous Material

Surface tension [mN/m]	33	40	50	60	73
BDG concentration [%]	20	5	1.5	0.5	0
Amount of water [g]	635.9	711.2	659.8	421.8	416.5

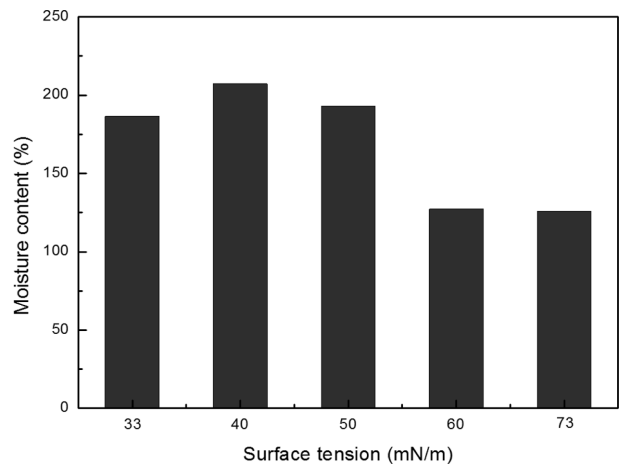


Figure 6. Moisture content of standard solutions.

함수율을 극대화 할 수 있음을 확인하였다.

## 5. 결 론

본 연구를 통해 계면활성제 농도에 따른 표면장력 변화에 의해 발생하는 침투 및 소화성능의 차이를 명확히 확인할 수 있었으며 이를 통해 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 침투 속도의 경우 물은 33 mN/m 표준시료에 비해 9.6배가 빠름을 확인하였으며 침투량의 경우 33 mN/m 표준시료는 물에 비해 1.91배 많음을 확인하였다.

(2) 계면활성제가 첨가된 표준시료의 침투속도가 시료홀더를 계(System)로 정의하는 관점에서는 느린 것으로 판단할 수 있으나, 목분 입자를 하나의 계로 정의하는 관점에서는 물보다 빠름을 실험적으로 규명하였다.

(3) 40 mN/m 표준시료가 물 대비 64.8% 향상된 207.2%의 가장 높은 함수율을 나타냄으로써 다공성물질 내부 함수율을 극대화 할 수 있음을 확인하였다.

(4) 본 연구를 결과를 바탕으로 계면활성제 첨가가 다공성 물질 내부 함수율을 증가시킴으로써 심부화재 발생 시 이에 대한 소화성능 향상에 효과적일 수 있음을 밝혔다.

## 후 기

본 연구는 2014년 국민안전처 “기업 재난관리 특성화 대학원 지원 사업”에 의해 수행되었고, 이에 감사드립니다.

## References

1. National Emergency Management Agency, “Fire Statistical Yearbook”, Korea (2013).
2. S. C. Sin, B. W. Chun, Y. J. Kim, K. S. Kim, D. H. Choi and K. H. Kim, “Efficient Identification of Victim by Genotyping of Personal Articles from Chungdo Fire Accident”, Korean Journal of Forensic Science, Vol. 5, No. 3, pp. 186-192 (2004).
3. Fire Prevention Division of National Emergency Management Agency, “Carbon Dioxide Extinguishing of Safety Standards (NFSC 106)”, NEMA Notice No. 2012-122 (2012).
4. I. C. Kong, I. K. Park, K. B. Lim and D. H. Rie. “A Study for Characteristics of Water that Penetrates Wood Flour due to Changes of concentration of BDG”, Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 28, No. 3, pp. 74-79 (2013).
5. 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).
6. National Fire Protection Association, NFPA 12, “Standard on Carbon Dioxide Extinguishing Systems” (2005).
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. J. S. Kim and D. H. Rie, “Downward Smoldering Fire Characteristics of Wood Chips and Wood Flour”, Journal of KOSHAM, Vol. 13, No. 1, pp. 269-274 (2013).
10. N. K. Kim, K. B. Lim and D. H. Rie, “Validity Analysis of Scale Model Experiment for Wetting Agent Performance Evaluation”, Fire Science and Engineering, Vol. 28, No. 2, pp. 14-19 (2014).
11. N. K. Kim, K. B. Lim and D. H. Rie, “Wetting Agent Performance Evaluation Using Scale Model”, Fire Science and Engineering, Vol. 28, No. 2, pp. 20-25 (2014).
12. 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).
13. 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).
14. National Fire Protection Association, NFPA 18, “Standard on Wetting Agents” (2011).