

BDG 농도변화에 따른 용수의 목분 침투특성 연구

공일천 · 박일규 · 임경범* · 이동호[†]

인천대학교 일반대학원 안전공학과 · *해천대학교 소방안전관리과

**인천대학교 소방방재센터

(2013. 2. 4. 접수 / 2013. 6. 11. 채택)

A Study for Characteristics of Water that Penetrates Wood Flour due to Changes of Concentration of BDG

Il-Chean Kong · Il-Gyu Park · Kyung-Bum Lim* · Dong-Ho Rie[†]

Department of Safety Engineering, Graduate School, University of Incheon

*Department of Fire Safety Management, Hyecheon College · **Fire Disaster Protection Research Center, University of Incheon

(Received February 4, 2013 / Accepted June 11, 2013)

Abstract : As the feature of fire, it is hard for deep-seated fire to spread to the deeper site, and it also has danger for being re-ignited cause of recontacting with oxygen after being put off. Now it is ruled in the certification criteria of wetting agent used for extinguishing deep-seated fire that the criteria for surface tension is below 33[mN/m] in Korea. For figuring out how much water for fire-fighting can permeate into combustibles, in this research, the permeating performance is analyzed by measuring the speed of permeating and transmission quantity released after that, by pouring solution whose surface tension is changed by adjusting concentration of surfactant BDG(Butyl Di Glycol) in column. From this result, it is can be determined that transmission quantity becomes less and wet area goes wider as surface tension is lower, and it is also able to be analyzed as quantity of absorbed liquid and wet area is increased because fluid permeates into the core.

Key Words : infiltration of the extinguishing agent, deep-seated fires, surface tension, penetration, wood flour

1. 서론

심부화재란 목재 또는 섬유류와 같은 고체가연물에서 발생하는 화재형태로써 가연물 내부에서 연소하는 화재를 말하고,¹⁾ 화재의 형태는 낙엽층 밑에서 산소의 공급이 차단되어 연기도 적고 불꽃도 없이 연소하는 지중화와 같이 발견하기가 어려우며, 지중화 처럼 지표화로 이어질 수 가 있다.²⁾ 2008년에 방화로 발생한 승례문 화재 사건의 경우, 화재 진압 시 적심하부의 혼소와 연소가 반복적으로 진행되는 심부까지 소화용수의 침투가 이루어지지 않아 결국 문화재가 소실되는 피해가 발생하였다.³⁾ 이와 같이 목재 또는 다공성 가연물 등의 물질 등에 심부화재가 발생하면 화재 진압을 위한 소화성능이 요구되는 기존의 소화약제보다는 연소부분으로의 침투가 용이한 침윤소화약제를 사용하고 있다. 이러한 침윤소화약제는 심부화재 적응을 위한 침투성능을 증대시킨 소화약제로써, 소화용수에 약제를 첨가시켜 소화성능을 향상시키기 위해 표면장력을 감소시키고 젖음성을 향상시켜 소화에 필요한 소화용수의 방수량 저감 및 재발화 방지를 통해 화재 진압의 효율성과 소방대원의 안전성 향상이 요구되고 있다.⁴⁾

일반적으로 화재가 발생하면 소방대원은 보호장비와 소

방호스를 가지고 화재진압에 투입된다. 이때 소방대원이 화재를 진압하는 과정에서 내부 깊숙한 곳까지 침투하는 과정 중 건물이나 여러 잔해들의 붕괴로 퇴로가 차단되는 경우가 발생되고 있다. 이러한 경우 무너진 잔해가 소화용수로 진화된 이후 재발화하여 잔해를 제거하고 다시 후퇴하기도 어려운 상황이 발생하여 소방대원의 인명피해가 발생하는 경우가 일어나고 있다. 이 경우 침윤소화약제를 사용한다면 소화활동에 의해 무너진 잔해를 침윤소화약제가 혼합된 소화용수로 인해 재발화를 방지하여 소방대원의 안전을 향상시키는 효과를 얻을 수 있다. 이렇게 침윤소화약제는 젖음성을 향상시키는 효과 등 많은 장점을 가지고 있지만 현재 국내에서 침윤소화약제에 대한 연구가 미비한 실정이다.

국내의 침윤소화약제의 기준은 「소화약제의 형식승인 및 제품검사의 기술기준 고시 제 2012-57호」의 제 10조를 따르고 있다. 그러나 현 기준에서는 표면장력이 33 mN/m 미만이라는 기준은 있으나 소화성능 평가에 관한 명확한 실험적 근거가 부족한 실정이다.⁵⁾ Szymczyk의 연구에 의하면 고체의 표면장력은 물보다 낮고 이러한 고체의 표면에 물의 확산하기 위해 물의 표면장력을 낮춰야 한다는 연구가 있었다.⁶⁾ 또한 Gray, Blake와 Rhee의 연구에서도 고체를 물에 젖게 하기 위해서는 고체와 비슷한 표면장력으로 물의

[†]Corresponding Author: Dong-Ho Rie, Tel : +82-32-835-8293, E-mail: riedh@incheon.ac.kr
Department of Safety Engineering, University of Incheon, 119, Academy-ro, Yeonsu-Gu, Incheon 406-772, Korea

표면장력을 낮추어 사용하는 것이 액체의 젖음성을 향상 시키는데 효율적이라는 결과를 나타내고 있다.^{7,9)} 그리고 김남균의 연구에서도 계면활성제의 농도 20%(33.2 dyne/cm) 이하인 구간에서 액체의 표면장력을 낮추면 젖음성을 증가 시켜 표면 흡수성이 향상되는 연구 결과를 보였다.¹⁰⁾

소화용수는 일반적으로 물을 사용하고 물의 표면장력은 72.8 mN/m으로 표면장력을 낮추기 위해 침윤소화약제에서는 계면활성제를 사용하고 있다.

따라서 본 연구에서는 침윤소화약제의 소화용수 침투성능은 분석하기 위하여 목재가공 공장, 펄프 공장에서 발생할 수 있는 목분을 대상으로 크로마토그래피 칼럼법을 활용하여 침윤소화약제의 주요한 성능기준인 표면장력에 따른 침투성능을 분석하고자 하였다. 표면장력별 용액을 BDG (Butyl Di Glycol)의 농도를 조절하여 목분에 투여하고 실시간적으로 침투속도를 계측하여 표면장력과 침투특성의 상관관계를 도출함으로써 심부화재용 소화약제 소화성능 평가에 있어 표면장력의 특성이 미치는 영향을 분석하여 심부화재용 소화용수의 기준 평가 및 분석에 필요한 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 계면활성제

Szymczyk, Gray, Blake와 Rhee의 연구에서는 고체의 표면장력과 물의 표면장력 중 고체의 표면장력이 일반적으로 낮다. 이러한 고체의 표면에 물을 확산시키고 젖음성을 증대시키기 위해서는 물의 표면장력을 낮춰야한다.⁶⁻¹⁰⁾

물의 표면장력을 낮추기 위해서는 계면활성제를 이용하게 되는데 계면활성제는 물의 표면장력을 낮추어 고체의 표면에 물이 확산을 쉽게 하여 젖음성을 증가시키는 역할을 한다.⁷⁻⁹⁾

3. BDG 표면장력

국내 침윤소화약제의 기준은 앞서 제시한 「소화약제의 형식승인 및 제품검사의 기술기준 고시 제 2012-57호」에서 볼 수 있듯이 표면장력이 33 mN/m 미만이라는 기준에 대하여 표면장력이 실제 심부화재용 소화약제의 침투성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 계면활성제 농도에 따른 표면장력을 측정하는 기초실험을 수행하였다.

목분의 침투 특성을 분석하기 위한 표준용액은 증류수에 계면활성제를 첨가하여 혼합한 용액으로 계면활성제는 일반적으로 침윤소화약제에 가장 많이 사용되고 있는 BDG (Butyl Di Glycol)와 C2M(Disodium Cocoamphodipropionate) 중 본 실험에서는 BDG를 사용하였다.

본 실험에서는 심부화재 진압용 소화약제의 특성을 고려하여 깊이 방향으로의 침투능력을 향상시키는 데 C2M보다 우월한 성능을 나타내는 BDG를 첨가농도에 따라 표면장력을 측정하여 실험에 사용하였다.

표면장력이 침투 특성에 미치는 영향을 분석하기 위한 표면장력계(ITH社, 514-B2)를 사용하였으며, 측정된 표면장력계의 측정원리는 Du Nouy ring 법을 이용한 것으로

Du Nouy ring 법이란 가는 금속 환을 수평으로 길어서 액체의 표면에 접촉하여 서서히 위로 들어 올리면 액체와 부착되어 있는 금속 환 사이에는 인장력이 생긴다. 계속 들어 올리면 금속환과 수면이 분리되어지는 순간의 힘을 측정하는 방법으로 해당 실험 용액의 표면장력을 측정하는 원리이다.¹¹⁾

실험 결과 Fig. 1과 같이 BDG 농도 10%이하에서는 표면장력의 변화가 급격하게 변화하였다. BDG 농도 20% 이상의 임계농도에서는 표면장력 33 mN/m로 일정한 결과가 나왔다.

4. 실험방법

4.1. 크로마토그래피칼럼에 의한 침투특성 실험

Fig. 2의 크로마토그래피칼럼(직경 50 mm)에 의한 침투 특성을 분석하기 위해 사용된 시료의 양은 Table 1과 같

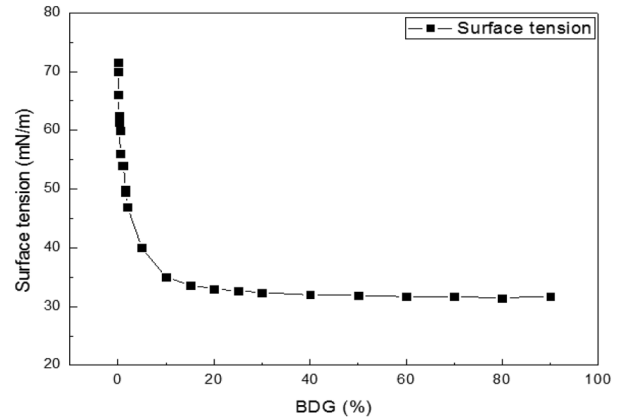


Fig. 1. BDG concentration on the surface tension.

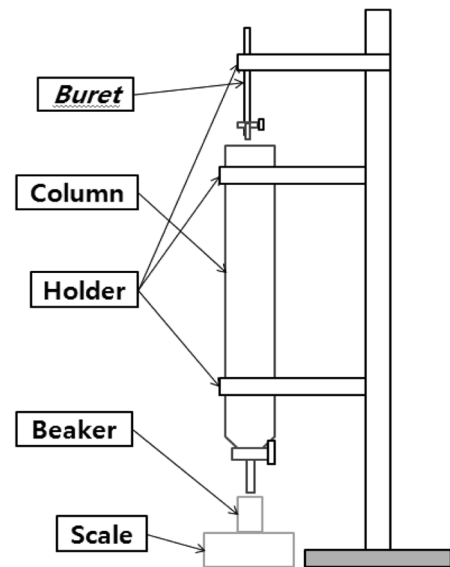


Fig. 2. Experimental instrument.

Table 1. Experimental samples.

	Experimental solution	Wood flour
Volume	100 ml	100 ml
Weight	99 g	16 g

은 양을 사용하여 실험을 진행하였다.

실험에 사용된 목분은 입도 500 μm -1000 μm 를 가진 뉴질랜드 소나무로 Incubator에서 106°C에서 4시간 이상 건조시킨 것을 사용하여 동일한 충전조건으로 실험을 진행하였다.¹²⁻¹³⁾

소화약제의 침투특성 분석을 위해 Fig. 3의 절차에 의해 건조처리된 목분을 시험장치(크로마토그래피칼럼, 축소모형실험장치)에 일정하게 충전한 후 표면장력별로 준비된 실험용액을 시험장치에 투하하여 시간변화에 따른 침투속도 및 침투 후 방출되는 투과량을 3회에 걸쳐 반복측정하여 평균값을 도출하여 목분에서의 침투특성을 분석하였다.

4.2. 축소모형실험장치에 의한 침투특성 실험

Fig 4와 같이 자체 제작된 축소모형 실험장치(직경 100 mm)에 의한 침투특성을 분석하기 위한 시료는 크로마토그래피칼럼 실험에 사용된 목분과 동일한 재료를 Table 2

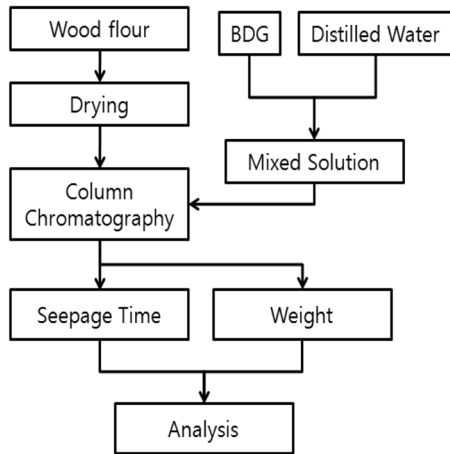


Fig. 3. Experimental procedure.

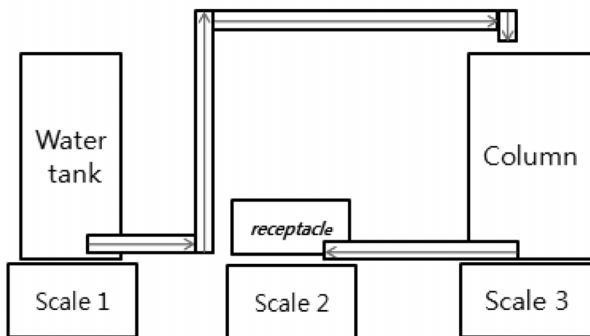


Fig. 4. Labware of schematic diagram.

Table 2. Experimental samples.

	Experimental solution	Wood flour
Volume	1000 ml	1000 ml
Weight	995.15 g	120.13 g

와 같은 양을 사용하여 실험을 진행하였다.

자체 제작된 축소모형 실험장치 칼럼에 건조된 목분을 칼럼에 일정하게 충전하고, 표면장력별로 준비된 실험용액을 노즐을 통해 분당 0.5 ml로 칼럼에 투하하여 시간변화에 따른 침투속도 및 침투 후 방출되는 투과량을 3회에 걸쳐 반복 측정하여 평균값을 도출함으로써 목분에서의 침투특성을 분석하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1. 크로마토그래피칼럼에 의한 침투특성결과

크로마토그래피 칼럼을 사용한 목분에서의 표면장력변화에 따른 침투특성을 측정된 결과를 Fig. 5, Fig. 6에 나타낸다.

Fig. 5의 결과와 같이 70 mN/m에서는 실험용액이 목분을 투과하여 배출되는 시간은 12초로 가장 짧은 시간이 소요되었다. 하지만 누적 투과량은 가장 높게 나타났다. 이는 목분의 실험용액 흡수량이 가장 낮았다는 것을 의미하는 것으로 판단된다. 또한 실험종료 후 크로마토그래피칼럼 내부를 확인한 결과 용액이 충전된 목분의 중심부까지 침투하지 않고 칼럼의 표면을 따라 투과된 것을 확인할 수 있었다.

즉 표면장력이 낮아질수록 침투속도는 느려지나, 용액이 목분의 중심부로 침투하는 젖음면적은 증가하는 경향을 보였다. 표면장력이 낮아지면서 흡수량은 증가하는 경향을 보이고 있으며, 특히 40 mN/m에서는 가장 많은 흡수량을 보였다. 그러나 젖음면적은 33 mN/m에서 가장 넓게 나타났지만, 목분 중심부로 용액이 흡수되기 때문에

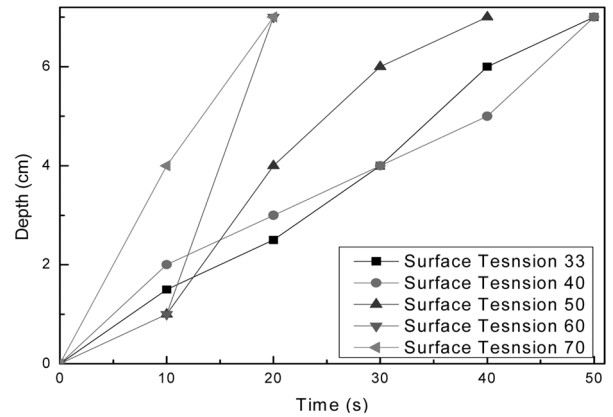


Fig. 5. Penetrated solution depth for the variation of surface tension.

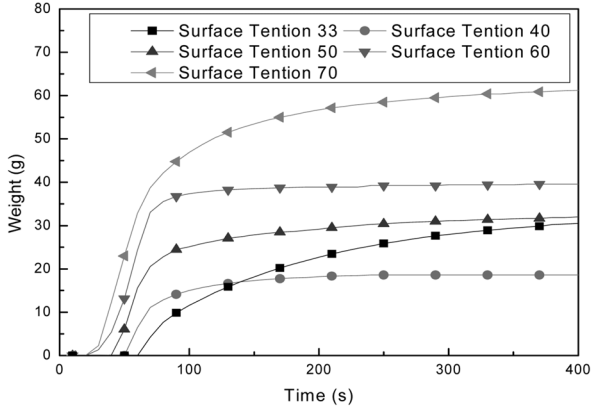


Fig. 6. The cumulative transmission quantity released according to the surface tension.

투과에 걸리는 시간이 오래 걸리는 결과를 나타내었다. 또한 표면장력이 낮아질수록 투과량이 감소하다가 33mN/m에서 다시 투과량이 증가하는 결과가 나왔다. 따라서 40 mN/m과 33 mN/m 세부적인 수치에서 추가적인 실험이 필요한 것으로 사료된다. 또 실험결과를 식 (1)에 의거하여 함수비에 대하여 나타내었다.¹³⁻¹⁴⁾

$$W_{\omega} = \frac{W_t - W_s}{W_s} \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서, W_{ω} : 함수비
 W_t : 습윤목분량
 W_s : 건조목분량

위의 식(1)을 응용하여 습윤목분량을 W_t 으로 하되 무게값 실험 종료 후 목분의 무게값으로 하고 건조목분량을 W_s 로 하여 표면장력에 따른 함수비를 그래프로 정리하여 Fig. 7로 나타내었다.

Fig. 7에서 표면장력이 낮을수록 함수비는 높아지는 사실이 확인된다. 이는 계면활성제로 인한 표면장력의 저하로 젖음면적이 증가하여 표면장력이 높은 실험용액보다

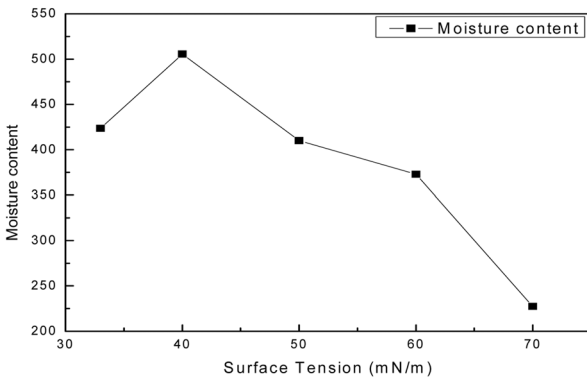


Fig. 7. Water content according to the surface tension.

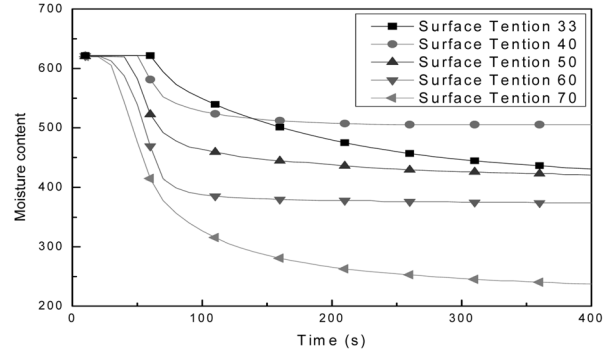


Fig. 8. The time according to the moisture content.

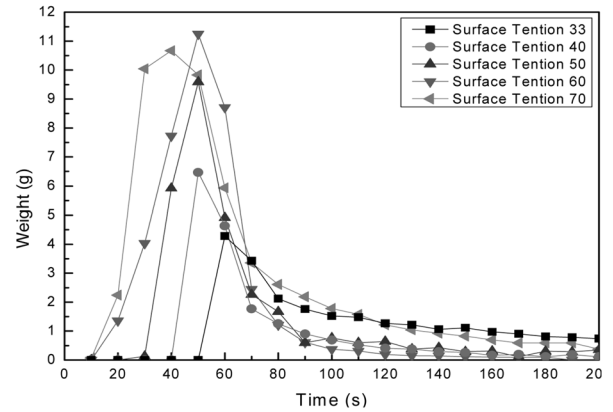


Fig. 9. The throughput according to the surface tension.

Table 3. Cross section of the column.

표면장력[mN/m]	단면	측면
33		
40		
50		
60		
70		

많은 부분이 젖게 되어 그에 따른 함수비가 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 8의 결과처럼 표면장력 별 흡수비를 시간에 따라 정리한 것으로 시간이 지나면 일정한 값으로 흡수비가 낮아졌다. 이러한 결과를 바탕으로 표면장력별로 목분이 흡수할 수 있는 실험용액의 양이 다르다는 것을 확인하였으며, 표면장력이 낮아질수록 목분의 흡수량이 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 9의 결과에서 최초 투과되는 양이 표면장력이 낮을수록 초기 투과량이 감소하는 경향을 보였다. 이는 표면장력이 낮을수록 초기 혼합용액의 투하 시 젖음면적의 증가로 그만큼 침투속도가 감소하여 표면장력이 높은 혼합용액보다 목분을 투과해서 나오는 초기량이 감소하는 것으로 판단된다.

Table 3에서는 실험종료 후 실험용액을 투입부의 단면을 비교하여 나타내었고, 표면적이 높을수록 칼럼 내부의 벽을 따라 흐르는 경향을 보이고 낮을수록 내부까지 젖는 것을 확인할 수 있다.

5.2. 축소모형실험장치에 의한 침투특성결과

축소모형 실험을 통한 목분에서의 표면장력변화에 따른 침투특성을 측정된 결과를 Fig. 10, Fig. 11에 나타낸다.

Fig. 10의 결과와 같이 60 mN/m에서는 실험용액이 목분을 투과하여 나온 시간은 14초로 가장 짧은 시간이 소요되었지만 누적 투과량은 가장 높았다. 따라서 목분의 실험용액 흡수량이 가장 낮았다는 것을 확인할 수 있다.

즉 표면장력이 낮아질수록 침투속도는 느려지나, 용액이 목분의 중심부로 침투하는 젖음면적은 증가하였다. 표

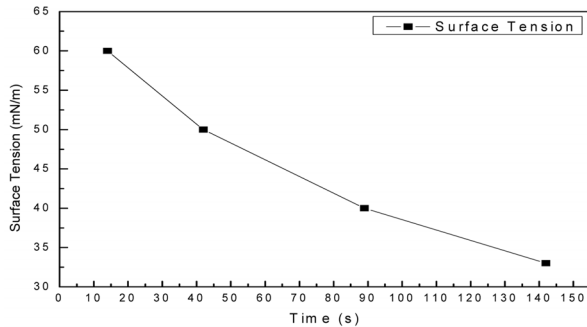


Fig. 10. Time of penetration.

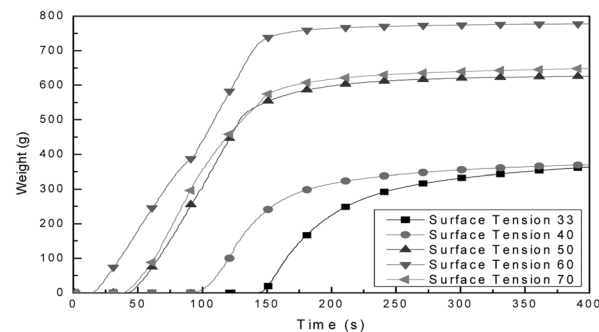


Fig. 11. The cumulative transmission quantity released according to the surface tension.

면장력이 낮아지면서 흡수량은 증가하는 경향을 보이고 있으며, 특히 33 mN/m에서는 가장 많은 흡수량을 보였다 또 실험결과를 식 (1)에 의거하여 흡수비에 대하여 나타내었다.¹³⁻¹⁴⁾

식 (1)을 이용한 그래프는 Fig. 12에서 표면장력이 낮을수록 흡수비는 높아지는 사실이 확인하였다. 이는 계면활성제로 인한 표면장력의 저하로 젖음면적이 증가하여 표면장력이 높은 실험용액보다 많은 부분이 젖게 되어 그에 따른 흡수비 또한 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 13의 결과처럼 표면장력 별 흡수비를 시간에 따라 나타낸 것으로 시간이 지나면 일정 흡수비까지 흡수비가 낮아졌다. 이러한 결과로 표면장력별로 목분이 흡수할 수 있는 실험용액의 양이 다르다는 것을 알았다. 또한 표면장력이 낮아질수록 목분의 흡수량이 증가하는 경향을 보였다.

6. 결론

침윤소화약제의 소화용수 침투성능 파악을 위하여 계면활성제를 첨가하여 표면장력을 변화시켜, 이에 따른 목분에 대한 침투 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 표면장력이 높은 용액은 목분에 흡수되기 보다는 각 경계층을 따라 흐르는 경향을 나타내므로 72.8 mN/m의

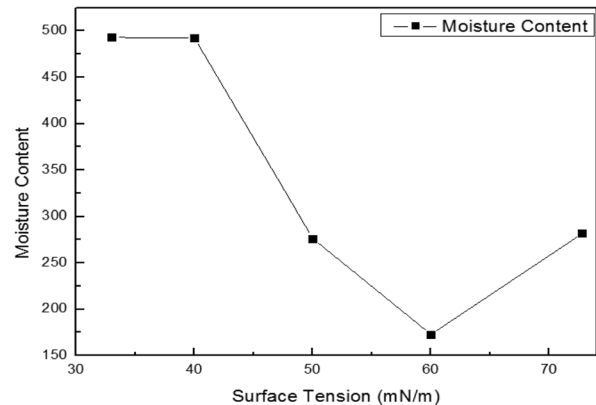


Fig. 12. Water content according to the surface tension.

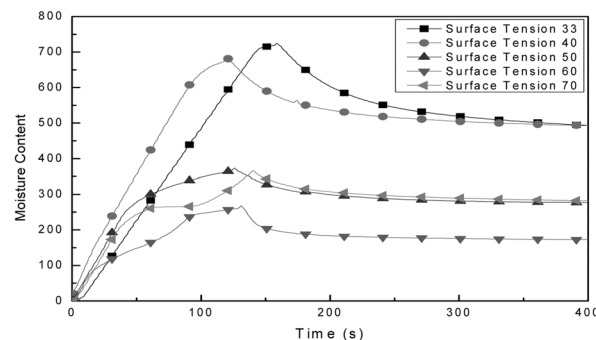


Fig. 13. The time according to the moisture content.

일반용수를 소화에 사용할 경우 심부로의 침투보다 표면으로의 이동현상이 지배적임을 확인할 수 있었다.

2) 표면장력 별로 침투속도와 투과량의 비교실험 결과 40 mN/m 이하에서는 목분의 깊이 방향인 고체-액체 경계층을 중심으로 소화용수의 이동현상이 지배적임을 알 수 있었다.

3) 표면장력이 낮아질수록 목분이 내부까지 젖어 실험용액이 투과되어 떨어지는 시간이 증가하게 되었다. 이는 표면장력이 낮아질수록 젖음성이 증가에 따른 젖음면적의 증가로 그만큼 목분을 통과하는 시간이 증가한다는 결론을 얻었다.

감사의 글: 본 연구는 2012년 소방방재청 차세대 핵심 소방안전기술 개발사업 “심부화재 진압용 소화용수 기준 평가 및 분석”에 대한 연구비 지원에 의한 결과의 일부이며 본 연구를 가능케 한 소방방재청에 감사드립니다.

Reference

- 1) Fire Prevention Division of National Emergency Management Agency, “Carbon Dioxide Extinguishing of Fire Safety Standards(NFSC 106)”, National Emergency Management Agency Notice No. 2012-122, pp. 98-105, 2012.
- 2) Young-Ju Park, “A Study on Application of Combustion Products for Forest Fire Investigation”, Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 26, No. 4, pp. 111-112, 2011.
- 3) Sam-Kew Roh, “A Study on Characteristics of Roof ‘Jucsim’ Structure Combustion Real Scale Fire Test on Wooden Structure Heritage Building”, Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 24, No. 1, pp. 96-98, 2012.
- 4) Sung-Soo Kim, “A Study of Analyzing Performance of Portable Extinguisher of Medium Expansion Foam”, Proceedings of the Korea Institute of Fire Science and Engineering Conference, pp. 105-106, 2012.
- 5) National Emergency Management Agency, “Product Testing of Technical Standards and Type Approval of Extinguishing Agents”, NEMA Notice No. 2012-57, pp. 5-9, 2012.
- 6) Katarzyna Szymczyk, “Wettability, Adhesion, Adsorption and Interface Tension in the Polymer/surfactant Aqueous Solution System I Critical Surface Tension of Polymer Wetting and Its Surface Tension”, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects Volume 402, pp. 132-138, 2012.
- 7) V. R. Gray, “Contact Angles of Mercury on Low-energy Solids, Nature, pp. 608-609, 1966.
- 8) T. D. Blake, Wetting, Th. Tadros(Ed.), Surfactants, Academic Press, Orlando , pp. 221-275, 1984.
- 9) S. K. Rhee, “A Method for Determining Surface Energy of Solids”, Mater Science Engineering, Vol. 11, pp. 311-318, 1973.
- 10) Nam-Kyun Kim, “A Study on Surface Absorption Dynamic Mechanism due to the Addition of a Surfactant in Cellulosic Combustibles”, Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 12, No. 6, pp. 223-229, 2012.
- 11) Sung-Mo Lee, “Development of Loaded Stream Fire Extinguishing System for Underground Transmission Cables”, Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 22, No. 1, pp. 95-96, 2008.
- 12) NFPA 18 Standard on Wetting Agents 2011 Edition, “Chapter 6 Class A Fire Extinguishment Tests” pp. 7-10, 2011.
- 13) Hyung-ju Park, “A Combustion Characteristic of Quercus Variabilis and Pinus Densiflora Fallen Leaves Using Radiation Heat Flux”, Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 21, No. 3, pp. 42-46, 2007.
- 14) W. T. Simpson, “Drying and Control of Moisture Content 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.