

목분의 밀도변화에 따른 온도전이에 관한 실험적 연구

김진수 · 이동호*[†]

인천대학교 대학원, *인천대학교 소방방재연구센터

Study on the Deep Stead Fire Spread Temperature by the Change of the Wood Flour Density

Jin Su Kim · Dong Ho Rie*[†]

Graduate School, Incheon National Univ.

*Fire Disaster Prevention Research Center Incheon National Univ.

(Received April 10, 2012; Revised June 10, 2012; Accepted July 10, 2012)

요 약

산업의 발달과 소득의 증가로 인해 목재와 같은 다공성 물질의 수요 및 생산은 지속적으로 증가하고 있다. 축산 농가를 비롯한 가공 산업 분야에서 목분의 활용이 증대됨에 따라 화재 위험도 높아지고 있다. 화재 발생시 목분은 깊이 방향으로 연소의 전이가 발생하며 내부 산화제의 소멸에 따라 화염이 없는 훈소로 진행되기도 한다. 훈소로 진행되는 경우는 화원의 위치 파악 곤란으로 초동진화에 실패하여 2차 피해를 키우는 직접적 원인으로 작용한다. 본 연구에서는 국·내외적으로 수요가 높은 뉴질랜드산 목분을 대상으로 자연대류 상태의 하향식 심부화재를 모사하였다. 본 실험에서는 실험 용기 내의 목분의 체적 밀도(3%, 5%, 10%, 15%)를 변화시켜 깊이방향으로 전파되는 심부의 온도를 측정하여, 화원의 전이 속도를 실험적으로 규명하였다. 본 실험의 결과로 목분의 체적 밀도가 증가함에 따라 내부 온도는 감소하는 경향을 확인하였다. 그러나 목분 밀도체적 0.2140 g/cm^3 (5%) 이상의 조건에서는 온도의 감소가 발생하지 않음을 실험적으로 규명하였으며 본 실험을 통하여 뉴질랜드산 소나무 목분의 온도 전이속도는 평균 0.249 mm/min 의 속도 값을 가짐을 밝혔다.

ABSTRACT

The productivity and demand of porous material has been increasing by development of industry and increasing income. In particular, the fire caused by using wood flour risks wood processing industry and stock farm. The heat transfer of wood flour is carried into the depth direction by effect of oxidizer around flame, flame sometimes is progressed as smoldering. In the case of progressing as combustion fire, identifying the location of fire is difficult, and it leads to failing fire aid fire fighting. Therefore potential cause is acted as raising additional damage. This paper conducts experiments of downward deep seated fire of natural convection conditions. The samples is New Zealand wood flour that is demanded much in the domestic and oversea market. In this experiment, temperature of deep seated side is measure by changing wood flour density in holder The densities used in experiment are 3%, 5%, 10%, 15%. As a result, the tendency of temperature inside decreases as wood flour density increases. But, in the case of density which is above 0.2140 g/cm^3 (5%), the phenomenon, decreasing temperature, is not shown. The result of measurement show that average flame spread speed of wood flour is 0.249 mm/min .

Keywords : Wood flour, Deep seated fire, Spread speed, Combustion, Flame spread speed

1. 서 론

국내 화재 발생 건수는 해마다 감소하여 최근 5년 간 (2008~2013) 평균 3.4% 감소하였고 화재로 인한 인명 피해자 수도 1.6%로 감소하였다. 그러나 재산피해액은 지난 5년 동안 평균 16.2% 증가하였고, 대형화재로 분류되는 사망자 5명 이상, 사상자 10명 이상, 50억 원 이상의 대형

화재 사고는 해마다 늘어나고 있는 추세이다. 화재 사고 중 종이, 목재, 건초 등으로 인한 발화는 2013년 한 해에 만 9,658건으로 전체 최초착화물 화재 비율 중 23.5%를 차지하였으며 이로 인한 재산피해액은 350억 원을 초과하였다⁽¹⁾. 한편 종이, 목재와 같은 다공성 물질에 대한 수요 및 생산은 경제발전과 소득의 증가로 지속적인 증가 추세를 보이고 있다. 특히 국내 목재수요량은 목제품의 수요

[†]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.2015.29.3.001>

증가로 인해 매년 상승하여 2013년 27,819천 m^3 을 기록하였고, 목분의 생산량은 가공 산업의 발달로 인해 최근 5년간 평균 5.6% 증가하였다⁽²⁾. 이처럼 축산 농가와 가공 산업을 중심으로 목분의 활용이 다양화, 대형화됨에 따라 심부화재 사고로의 잠재적 위험성 또한 증대되고 있다.

일반적인 목재는 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌을 주성분으로 가하며 회분과 추출물을 부성분으로 가진다⁽³⁾. 목분은 목재를 셰이빙(Shaving) 하여 만들어지며 산화제와 접촉하는 면적이 목재보다 넓어 혼소가 발생하기 쉽다⁽⁴⁾. 나무는 50% 이상이 셀룰로오스로 이루어져 있고, 셀룰로오스의 절반가량은 산소로 구성되어 있어 심부화재를 발생시킬 수 있다. C, H는 그 자체만으로도 연소가 잘 이루어지는 물질이며, 셀룰로오스의 열분해 시 발생하는 O는 대기중의 산소 농도가 16% 이하로 낮아지더라도 C와 H의 연소를 도와 지속적으로 연소가 이루어질 수 있다⁽⁵⁾. 혼소는 심부화재의 전 단계로 다공성 물질을 통과하며, 다공성 물질의 연료 표면에서 반응하여 전파되는 연소의 한 형태로 정의된다. 심부화재는 연소시 반응구역 내에 산소가 충분하지 못하므로 일반적인 화재와 같이 정상적으로 화염이 성장하지 못하고 화염 없는 화학반응(혼소)이 계속된다. 혼소 연소반응은 공기기공을 포함하고 있는 다공성 물질에서 주로 발생하므로, 연소과정이 대류 열전달이나 지속된 산화제의 공급 없이 전파될 수 있으며, 외부로 공기 유입이 차단된 조건에서도 혼소가 발생할 수 있다^(6,7). 다공성 물질에서는 각각의 공극에 산화제가 존재하여 연소반응이 외부로부터 산화제 공급이 없이도 스스로 전파되고, 연료의 내부에서 발열반응이 일어나므로 일단 반응이 시작되면 화재를 발견하거나 소멸시키기 어렵다. 따라서 혼소 연소반응은 주로 공극이 있고, 산화제의 공급이 제한된 지역이나 외부에서 유입되는 미량의 산화제로 연소되는 환경에서 발생할 가능성이 높다⁽⁸⁾. 목분은 대표적인 다공성 물질로써 심부화재가 발생하기에 용이하며, 2003년 경상북도 청도군 팽이버섯 생산 공장에서 버섯재배를 위해 쌓아두었던 목분 더미에 화재가 발생하여 화재진압 이후에도 3일 동안 잔불 정리가 지속된 사례보고가 있다.

선행연구로 Ohlemiller⁽⁹⁾는 투기성 연료 층의 정방향 및 역방향 혼소 전이를 비교 실험한 바 있고, Ilan⁽¹⁰⁾ 등은 폴리우레탄 폼(Polyurethane foam)을 대상으로 시간에 따른 탄화 면적을 비교 실험하였다. Madrigal⁽¹¹⁾ 등은 산에서 채집한 지표화 연료를 대상으로 발열량 측정 및 질량 감소 측정 실험을 하였으며 Elsayed⁽¹²⁾ 등은 왕겨 분진의 입도별 연소특성을 실험적으로 연구하였다. 이처럼 물질별로 심부의 화원을 테마로 한 연구는 지속적으로 진행되어 있어왔으며, 종이, 섬유, 목분, 등과 같은 다공성 물질을 대상으로한 실험 연구는 미미한 실정이다.

이에 본 연구에서는 목분을 대상으로 밀도변화에 대한 자연대류 상태의 하향식 심부화재를 모사하여, 깊이방향으

로 전파되는 심부화재의 온도를 측정함으로써 심부화재 전이 속도계측과 이에 따른 전파특성에 대해서 실험적으로 연구하였다.

2. 실험방법

2.1 시료의 선정

본 실험에서는 실험 시료로 국내외적으로 수요가 높은 뉴질랜드산 소나무 목분을 선정하였다. 뉴질랜드산 소나무 목분은 합성목재(WPC: Wood Plastic Composites)의 재료로 사용되고 있다. 실험에 사용된 목분의 입도는 0.1 mm~0.2 mm로 체가름 하여 실험하였다. 목분을 제조하는 과정에서의 첨가물은 없으며 실험 시료의 재료적 일치성을 고려하여 동일한 공정과정에서 제조된 목분을 사용하였다. 목분의 조성분은 X선 형광분석시험법(X-ray Fluorescence, XRF)⁽¹³⁾을 통하여 분석하였으며 그 결과는 Table 1에 나타내었다. 99% 이상이 C(탄소)와 H(수소)로 이루어져 있으며 기타 O(산소), N(질소), 무기질인 회분 등이 1% 이하를 접하는 것을 알 수 있다.

Table 1. Chemical Composition of Wood Flour

Element Component	Concentration [%]	Element Component	Concentration [%]
CH ₂	99.5	MgO	0.0603
CaO	0.172	Na ₂ O	0.0409
K ₂ O	0.0837	SO ₃	0.0321

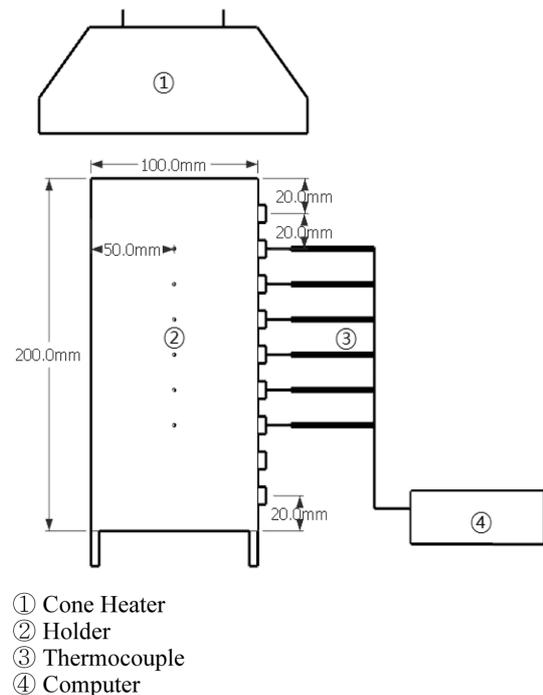


Figure 1. Schematic diagram.

2.2 심부화재 전이 속도 측정 실험

Figure 1은 실험에 사용된 장치의 개략도를 나타낸 것이다. ①은 콘 히터로써 목분의 착화를 위한 열원으로 적용하였으며 25 mm 하단에 위치한 실험 용기 상단의 시료가 접화될 때까지 가열 한다. ②의 홀더는 직경 100 mm 높이 200 mm의 원형 스테인리스로 제작하였고 상·하부가 개방된 구조에 0.3 mm(선격) × 1 mm(간격)의 메쉬(Mesh)망을 설치하였다. 또한 ③과 같이 열전대(Thermocouple) (type K, 1.6 mm diameter)를 실험 용기 측면에 20 mm 간격으로 총 6개 설치하였으며 하향으로 환소가 전이되는 동안 용기 내부 중앙부분의 온도를 측정하였다. 열전대로 측정된 온도는 ④의 컴퓨터로 시간에 따른 온도 함수로 저장되고 열전대 위치의 최고 온도 지점을 화원의 위치로 설정하여 전이속도를 산출하였다.

가열은 복사열량(Heat Flux)이 시편에 일정하게 조사될 수 있는 콘 칼로리미터(Cone Calorimeter)의 콘 히터(Cone Heater)를 사용하였으며, 복사열량은 50 kW/m²으로 하였다. 콘 히터는 시료에 접화 개시 이후 차단하여 접화 이후 추가적으로 시료에 가해지는 열의 영향이 없도록 하였으며 자연대류 조건에서 실험하였다.

실험실 조건은 항온·항습기(Incubator)에 의해 온도 24 °C 습도 50%가 유지되는 실내에서 진행하였으며 실험 대상 물질인 뉴질랜드산 소나무 목분의 건조는 80 °C의 건조기에서 질량 변화가 없을 때까지 4시간 마다 반복 측정하여 제작 실험하였다⁽¹⁴⁾. 목분의 함수율은 식(1)⁽¹⁵⁾을 이용하여 계산하였고, 이에 따른 목분의 함수율은 10.8%로 나타났다.

$$FMC [\%] = (W_m - W_d)W_d \times 100 \quad (1)$$

여기서, FMC = Moisture content [%]

W_m = Weight of sample before overdry

W_d = Weight of sample after overdry이다.

실험 대상인 목분의 밀도는 Table 2와 같다. Case 1의 밀도 0.2038 g/cm³은 본 실험에 있어서 기준이 되는 밀도로서 외부적인 힘을 가하지 않고 중력 하중에 의해 목분을 실험 용기에 담았을 때의 밀도이다. 기준 밀도로부터 목분 질량을 3%, 5%, 10%, 15% 증가시키며 실험하였고, 실험의 오차를 줄이기 위한 방법으로 총 3회 반복 실험하여 평균값을 구하였다.

Table 2. The Experimental Conditions

	Mass (g)	The rate of increase (%)	Density (g/cm ³)
Case 1	320.0	0(Standard)	0.2038
Case 2	328.0	+3	0.2089
Case 3	336.0	+5	0.2140
Case 4	352.0	+10	0.2242
Case 5	368.0	+15	0.2343

Table 3. Temperature in Wood Flour by Case

Case	Temperature (°C)					
	1	2	3	4	5	6
1	406.5	327.8	251.9	173.2	115.5	89.0
2	338.5	292.0	204.32	144.6	89.6	65.7
3	306.2	230.9	142.2	108.8	64.9	57.3
4	285.4	231.8	143.8	93.3	62.7	56.4
5	324.2	230.3	148.5	87.7	65.3	59.1

3. 실험결과

3.1 온도 변화

Table 3은 체적밀도별로 위치에 따른 열전대의 최고 온도를 나타낸 것이다. Case 1의 T/C 1 온도는 406.5 °C로 실험 대상 조건 중 가장 높게 나타났고, Case 2의 T/C 1 온도는 Case 1보다 약 68 °C 낮은 338.5 °C로 나타났다. Case 3, Case 4, Case 5의 전이 온도는 T/C 위치에 따라 차이가 발생하여 Figure 2와 같은 시간에 대한 온도 변화 곡선을 나타내었다. 밀도 증가함에 따라 온도는 낮아져 평균 T/C 간 온도 감소가 Case 1의 경우에는 63.5 °C Case 2는 54.56 °C, Case 3은 49.78 °C, Case 4는 45.8 °C 감소하는 것으로 나타났다. 본 실험의 대상인 목분의 경우 중력 이외의 다짐을 하지 않은 경우와 강제 다짐을 한 모든 Case에서 재발화가 발생하지 않았으나, 강제 다짐을 하지 않은 Case 1의 경우에는 기준점으로부터 4 mm 이하까지 목분의 발열개시온도를 상회하는 결과가 나타났다.

3.2 전이 속도

본 실험에서는 위치에 따른 열원의 이동 시간을 추정하였다. 이동 시간 산출은 열전대의 최대온도 지점을 화원의 위치로 가정하여 계산하였으며 T/C 1에서 T/C 4까지 도달하는 속도를 Figure 3에 나타내었다. 초기 T/C 1의 위치까지 전이 되는 시간의 차이는 발생하였으나, Case 1과 Case 5를 비교했을 때 T/C 4 까지 전이 되는 단위분당 이동거리의 차이는 0.023 mm/min로 나타났다.

Table 4는 실험 조건 별 화원의 평균 전이 속도를 나타낸다. 본 실험에서 밀도가 가장 작은 Case 1 조건의 경우 분당 0.258 mm의 거리를 이동하는 것으로 나타났고 Case 2에서 Case 5의 이동거리는 분당 0.235~0.255 mm의 범위에 있는 것으로 나타났다. 이는 목분의 밀도에 따른 심부화재 전이속도에 차이가 크지 않은 것으로 목분의 체적밀도 변수가 심부열원의 전이 속도에 미치는 영향은 적은 것으로 나타났다.

3.3 질량 변화

실험 조건에 따른 질량 감소율을 식(2)으로 구하였으며 이를 통해 구해진 값은 Table 5에 나타내었다.

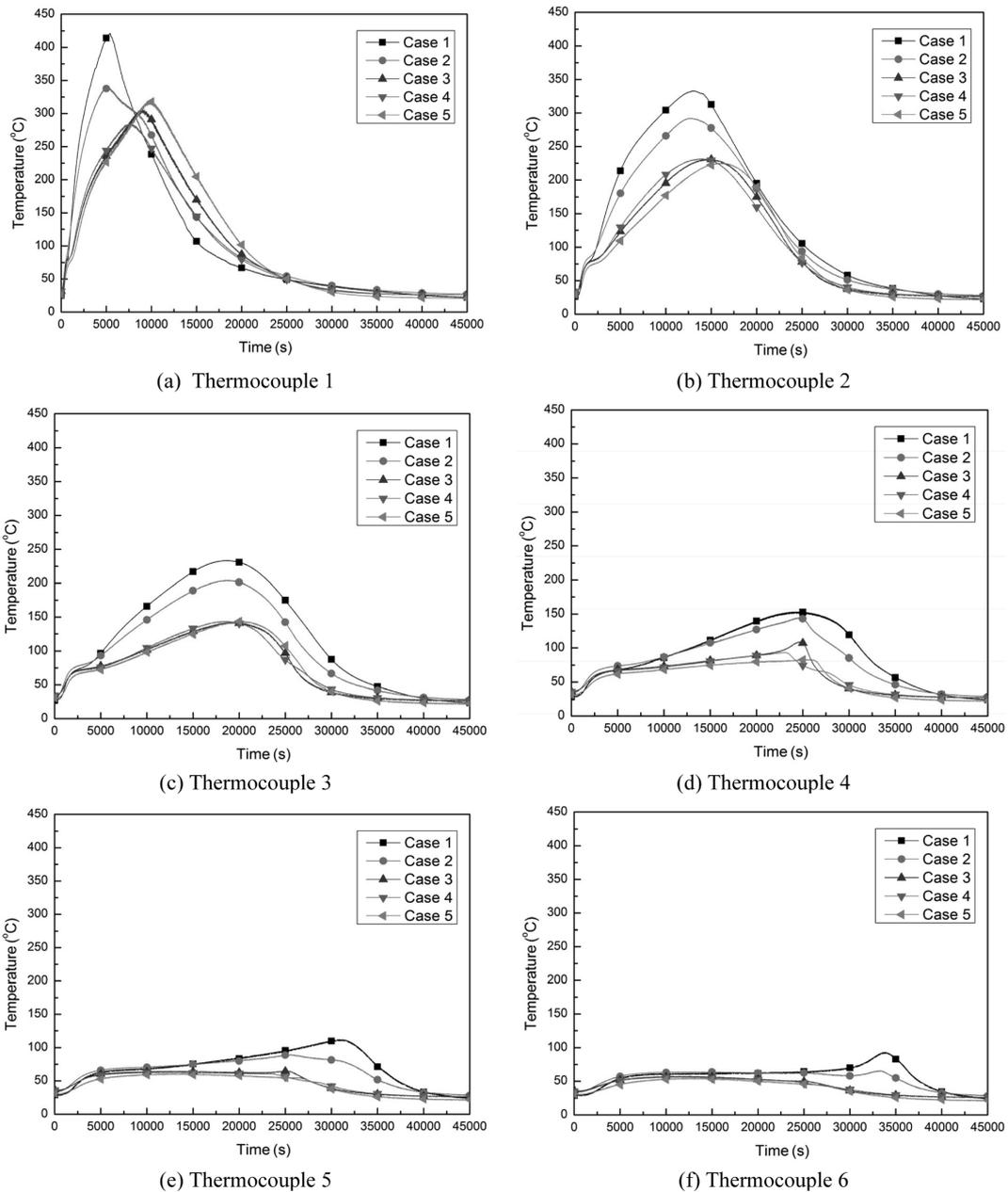


Figure 2. Thermocouple temperature according to the position.

$$\frac{M_b - M_a}{M_a} \times 100 \quad (2)$$

여기서, M_a 는 초기질량(g), M_b 는 나중질량(g)

Case 1은 실험 전 320 g에서 실험 후 239.24 g으로 35.64% 감소하였고, Case 2는 실험 전 328 g에서 실험 후 262.46 g으로 24.97% 감소하였다. Case 3~5의 질량 감소율은 각각 21.46%, 20.75%, 20.64%로, 목분의 체적 밀도가 증가할수록 목분의 질량감소 폭이 작아지는 경향을 나타냈다. Case 1에 비해 Case 2~Case 4의 질량 감소율이 적은 것은 목분 내부의 온도가 열분해를 가능케 하는 온도에 미치지 못했기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 뉴질랜드산 소나무 목분의 체적 밀도가 증가 될 때의 심부열 전과 특성을 규명하기 위하여 K-Type 열전대를 이용한 내부 온도 측정 실험을 하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 목분의 체적 밀도에 따른 온도변화의 차이는 체적 밀도 0.2038~0.2089 g/cm³ 구간에서 존재하였고, 이때의 실험 용기 내부 중앙부 최고온도는 각각 406.5 °C과 338.5 °C로 나타났다.

2) 체적 밀도 0.2140 g/cm³, 0.2242 g/cm³, 0.2343 g/cm³에서는 일부 구간을 제외한 전의 온도의 차이가 5% 미만

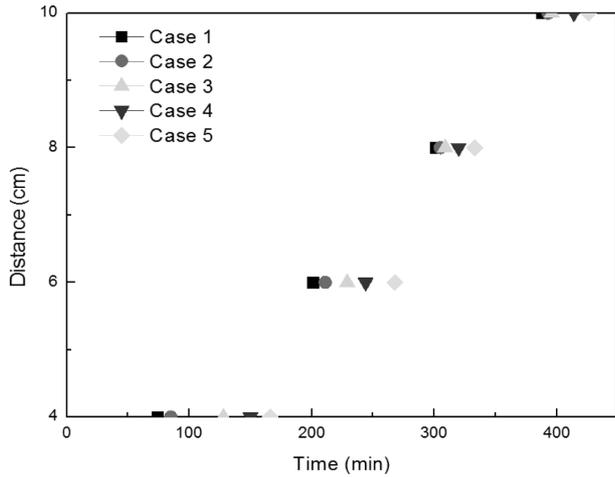


Figure 3. Spread speed by wood flour.

Table 4. Deep-seated Fire Spread Speed

	Average spread speed (mm/min)
Case 1	0.258
Case 2	0.255
Case 3	0.252
Case 4	0.242
Case 5	0.235

Table 5. Mass Rate of Change of Before and After

	Before (g)	After (g)	Mass loss rate (%)
Case 1	320	239.24	33.76
Case 2	328	262.46	24.97
Case 3	336	276.63	21.46
Case 4	352	291.50	20.75
Case 5	368	305.05	20.64

으로 나타났다.

3) 실험 용기 내부 중앙부의 온도는 체적 밀도가 커질수록 낮아지나, 0.2140 g/cm³ 이상의 밀도에서는 이러한 경향이 일치하지 않음을 밝혔다.

4) 체적 밀도 0.2038 g/m³ 조건에서 목분의 전이 속도는 0.258 mm/min로 나타났으며 체적 밀도 0.2089 g/cm³, 0.2140 g/cm³, 0.2242 g/cm³, 0.2343 g/cm³ 조건에서의 심부화재 평균 전이 속도가 됨을 밝혔다.

5) 체적 밀도가 증가할수록 하향으로 전이되는 속도는 느려졌으나 그 차이는 10% 이내로 크지 않은 것으로 나타났다.

6) 질량감소율은 Case 1에서 5까지 각각 33.76%, 24.97%, 21.46%, 20.75%, 20.64%로 목분의 체적 밀도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈다.

References

1. National Emergency Management Agency, "Fire Statistical Yearbook", Korea (2013).
2. Statistics Korea, "Forestry Statistics Annual Report", Korea (2013).
3. Korea Forest Service, "Forest Forestry Technology", Vol. 4, Korea, pp. 17-438 (2000).
4. Korea Forest Research Institute, "Wood plastic composites", Korea, pp. 3-108 (2012).
5. S. H. Lee, "Fire Investigation theory and Practice", Donghwae Technology, Korea, pp. 23-86 (2009).
6. T. J. Ohlemiller, "Modeling of Smoldering Combustion Propagation", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 11, pp. 277-310 (1985).
7. Y. S. Kim, Y. C. Byun and J. H. Hwang, "Investigation and Theoretical Analysis of a Fire Accident Caused by Smoldering Combustion", Fire Science and Engineering, Vol. 13, No. 3, pp. 3-17 (1999).
8. S. S. Dosanjh, P. J. Pagni and A. C. Fernandez-pello, "Foreced Cocurrent Smoldering Combustion", Combust. Flame, Vol. 68, pp. 131-142 (1987).
9. T. J. Ohlemiller, "An Experimental Comparison of Forward and Reverse Smolder Propagation in Permeable Fuel Deds", Combustion and Flame, Vol. 54, pp. 131-147 (1984).
10. Bar Ilan, O. M. Putzeys, G. Rein, A. C. Fernandez and D. L. Urban, "Transition From Forward Smoldering to Flaming in Small Polyurethane Foam Samples", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 30 pp. 2295-2302 (2005).
11. J. Madrigal, M. Guijarro, C. Hernando, C. Diez and E. Marino, "Effective Heat of Combustion for Flaming Combustion of Mediterranean Forest Fuels", Fire Technology, Vol. 47, pp. 461-474 (2011).
12. S. A. El-Sayed and T. M. Khass, "Smoldering Combustion of Rice Husk Dusts on a Hot Surface", Combustion, Explosion and Shock Waves, Vol. 49, No. 2, pp. 159-166 (2013).
13. ISO 12677, "Chemical Analysis of Refractory Products by X-Ray Fluorescence (XRF) - Fused Cast-bead Method" (2011).
14. J. H. Kim, E. S. Kim, H. J. Park, M. B. Lee and D. H. Kim, "A Study of Calrory Analysis Methods about Surface Fire Fuel", Fire Science and Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 225-264 (2008).
15. 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, pp. 1-21 (1987).