

물유리와 이산화탄소로 가압함침한 가문비 나무의 연소특성

박형주[†] · 이세명^{*}

호원대학교 소방행정학과, *주식회사 페스텍 화재시험연구소

Combustion Characteristics of Spruce Wood by Pressure Impregnation with Waterglass and Carbon Dioxide

Hyung-Ju Park[†] · Se-Myeoung Lee^{*}

Dept. of Fire Service Administration, Howon Univ.

*Fire Research Division, Festec International Co., Ltd.

(Received May 9, 2012; Revised July 4, 2012; Accepted August 13, 2012)

요 약

이산화탄소 주조법에서 사용되고 있는 방법을 응용하여 목질내에 규산겔과 탄산소다, 이산화규소가 석출된 목재를 제조한 후 외부 복사열원(20, 25, 35 및 50 kW/m²)에 따른 점화시간, 점화온도, 질량감소속도, 임계열유속을 측정하였다. 연구결과, 물유리와 이산화탄소를 이용한 가압함침 처리된 목재는 Pre-Flashover 단계에서의 복사열원(20 kW/m² 이하)에서 난연성능이 있음을 확인할 수 있었다. 향후 지속적인 연구를 통해 우수한 배합비율을 찾는다면 난연목재로서의 활용 가능성이 있다고 판단된다.

ABSTRACT

After produce the extracted wood to silicic acid gel, sodium carbonate and silicon dioxide with application of the making method for carbon dioxide, ignition time, ignition temperature, mass loss rate and critical heat flux are measured according to external radiation source (20, 25, 35 and 50 kW/m²). From the results, pressure impregnation wood to use with water glass and carbon dioxide has fire retardant performance at heat flux (less than 20 kW/m²) of Pre-Flashover fires. If we find out the excellent maxing ratio through continuously study, it might be decided to be able to be utilized as fire-retardant wood.

Keywords : Waterglass, Carbon dioxide, Pressure impregnation, Ignition time, Critical heat flux

1. 서 론

목재는 안락한 느낌과 따뜻한 질감, 음향 등에 대한 반사나 잔향이 작고 물리·화학적 특성이 우수하기 때문에 최근 일반 가정주택에서부터 주거용 중형 건축물에 이르기까지 건축물 내의 가구재, 장식재, 구조재 등으로 널리 사용되고 있다. 그러나 목재는 다른 건축 재료들에 비해 화재시 열과 고온의 공기에 노출되었을 때 연소함으로써 화재안전적 측면에서 많은 취약성을 가질 뿐만아니라 건축물의 붕괴 및 도괴 등의 위험성을 항상 내포하고 있다. 따라서 이와 같은 단점과 위험성을 개선시키기 위하여 다양한 목재의 난연처리 방법이 연구되어 왔다.

최근 목재의 난연처리 방법의 하나로 목재 자체를 무기화하는 방법과 무기물과 복합화하는 방법 등을 사용하고

있다. 무기질 복합화에 관한 연구를 살펴보면 국외의 경우, Furuno 등⁽¹⁻⁴⁾은 규산나트륨(water glass)을 목재내에 함침시킨 후 황산알루미늄 및 염화칼슘, 염화바륨, 붕산 및 붕사, 붕산, 붕사, 붕산칼륨, 붕산암모니아, 황산알루미늄 및 삼산화붕소 등의 반응물로 무기질 복합화 목재를 제조하고 목재중에 생성된 반응 생성물, 흡수성, 내화성, 내부후성, 휨강도 등을 연구하였고, Saka 등^(5,6)은 SiO₂-P₂O₅-B₂O₃ 목재-무기질 복합재와 SiO₂-P₂O₅ 및 SiO₂-B₂O₃ 목재-무기질 복합재를 제조한 후 내화성 등을 연구하였다. 또한, Mai 등^(7,8)은 무기 실리콘 복합물과 Sol-gel 시스템을 이용하여 목재의 난연화 방법 등을 연구하였다.

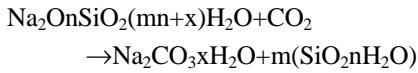
국내의 경우, 김건형 등⁽⁹⁾은 잣나무에 규산나트륨과 인산을 이용하여 목재를 무기물처리 한 후 수축률 및 흡수성, 강도 및 내열성 등을 연구하였으며, 도금현 등^(10,11)은 규산

[†]Corresponding Author, E-Mail: sandelf@howon.ac.kr
TEL: +82-63-450-7282, FAX: +82-63-450-7289

ISSN: 1738-7167
DOI: http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2012.26.4.018

나트륨 수용액과 붕사, 붕산암모늄, 인산수소2암모늄을 사용한 무기혼합액, 규산나트륨 수용액과 붕사 및 인산수소2 암모늄의 포화수용액을 혼합액을 주입시킨 무기질 목재와 합판을 제조하여 내화성능과 난연성능에 대해 보고하였다. 또한 윤선미 등⁽¹²⁾은 탄산칼륨 포화용액을 목재내에 감압 주입한 후 염화칼륨 포화용액으로 확산처리한 무기질 복합화 목재의 무기염의 생성상태와 구성성분 및 이들 무기염이 생성된 목재의 방부성능을 확인한 바 있다.

본 연구에서는 이산화탄소 주조법에서 사용되고 있는 방법을 응용하여 아래와 같은 물유리와 이산화탄소의 화학반응에 의해 목질내에 규산겔과 탄산소다, 이산화규소가 석출된 목재를 제조한 후 외부 복사열원에 따른 점화시간, 점화온도, 질량감소속도, 임계열유속 등을 측정하여 난연 목재로서의 활용가능성을 확인하고자 하였다.



여기서, m : 규산겔의 함수량

n : 규산나트륨 몰비

x : 탄산나트륨의 결정수의 몰수이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험재료

본 실험에 사용된 실험재료는 상록침엽교목으로 연질목재인 가문비나무(spruce)로 판재를 100×100×18.5 mm의 크기로 절단 후 사용하였으며, 함침 약제는 Table 1에 나타낸 바와 같이 KS-3종 규산나트륨(sodium silicate, 물유리, (주)영일화성)으로 규산나트륨 75 %와 물 25 %를 혼합한 수용액을 사용하였으며, 반응제로는 순도 99.99 %의 이산화탄소 가스를 이용하였다.

2.2 실험장치

본 실험에서는 사용된 실험장치는 Figure 1과 2에 나타난 바와 같이 점화시간, 점화온도 및 질량감소속도를 측정할 수 있는 ISO 13927 Mass loss calorimeter((주)페스텍,

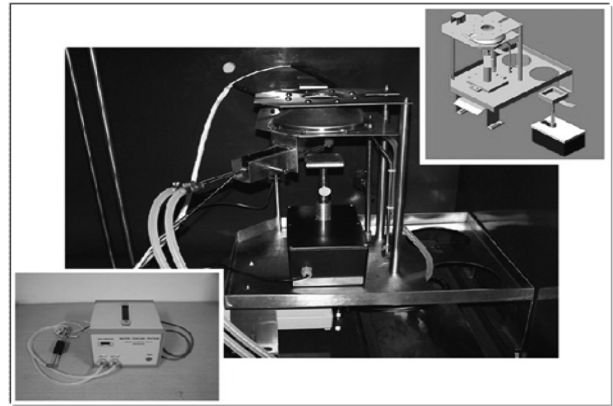


Figure 1. ISO 13927 Mass loss calorimeter.

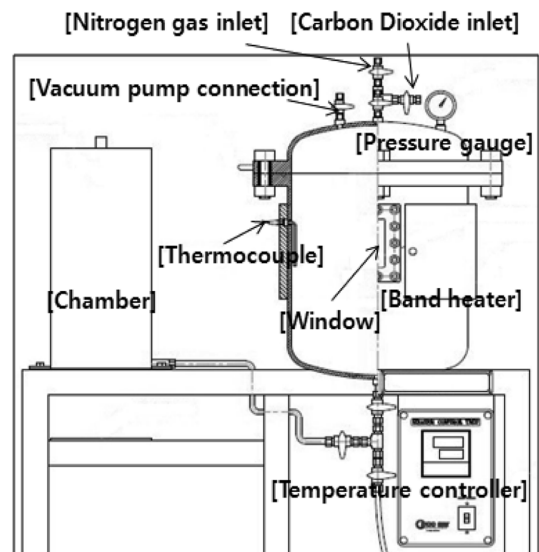


Figure 2. Vacuum-pressure impregnation equipment.

대한민국)와 압력범위 - 1~15 bar, 온도범위 Max. 100 °C 를 만족하는 Φ 340 mm×412 mm(H) 크기의 기압함침챔버를 사용하였다.

목재에 대한 감압은 Vacuum pump를 이용하였으며, 규산나트륨의 가압 함침은 질소가스(10 kg/cm²)를 이용하였다.

2.3 실험방법

2.1항의 실험재료를 이용한 난연목재의 제조과정과 연소특성 실험은 Figure 3의 절차에 따라 실시하였으며, 각 단계별 온도, 압력, 시간 조건은 Table 2에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 함침전후 밀도변화

2.3 실험방법에 의한 함침전후의 밀도 변화는 Table 3에 나타내었다. 물유리와 이산화탄소로 가압함침한 목재인 FRW의 경우 평균 42.8 kg/m³의 밀도 증가가 나타났다.

Table 1. Physical and Chemical Properties of Waterglass⁽¹³⁾

Properties	Water glass
pH	12~13
Specific gravity (20 °C)	1.380 and over
Water insoluble matter (%)	0.2 and under
Na ₂ O, K ₂ O, Li ₂ O (%)	9~10
SiO ₂ (%)	28~30
Fe ₂ O ₃ (%)	0.03 and under
Mole fraction	3.10~3.40
Viscosity	200 and over

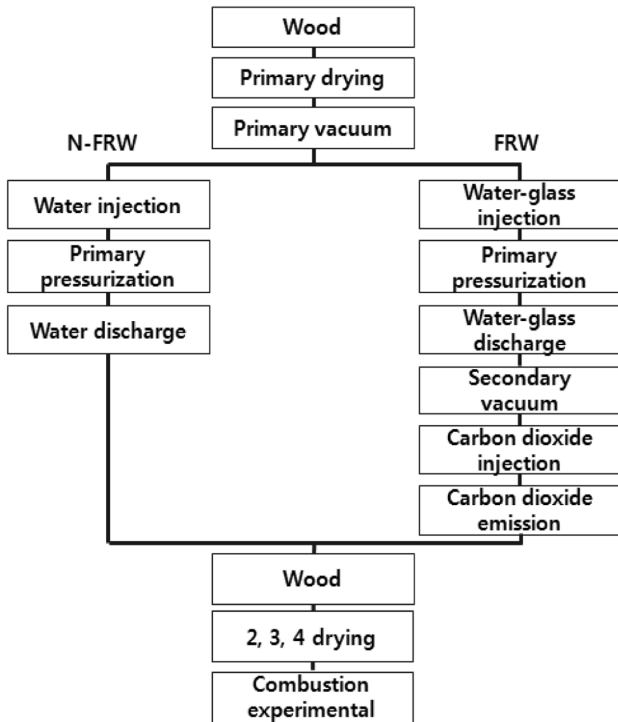


Figure 3. Experimental procedure.

Table 2. Conditions for Experimental Procedure

Steps of experimental procedure	Conditions
Wood samples	100 mm×100 mm×18.5 mm
Primary, secondary, quartic drying	25 °C, 24 hr
Primary, secondary vacuum	5×10 ⁻⁴ torr, 1 hr
Water-glass saturated specimen	Water-glass 75 %, water 25 %
Primary pressurization	Nitrogen, 10 kg/cm ² , 4 hr
Carbon dioxide injection	5 kg/cm ² , 1 hr
tertiary drying	55 °C, 168 hr
Combustion experimental	Heat flux: 20, 25, 35 and 50 kW/m ²

3.2 점화시간

2.3 실험방법에 의해 제조된 목재인 FRW와 N-FRW를 Figure 1의 실험장치를 이용하여 외부 복사열원(20, 25, 35 및 50 kW/m²)에서 10분간 노출시켰을 때의 점화시간은 Table 4와 Figure 4에 나타내었다. 점화시간은 각 외부 복사열원의 단계에서 점화스파크에 의해 시료의 표면에 유염착화가 발생할 때까지의 시간으로 3회의 측정 결과에 대한 평균값을 사용하였다. Table 4에서 알 수 있듯이 상대적으로 낮은 외부 복사열원(20 kW/m²)에 있어서는 FRW가 N-FRW의 점화시간보다 1.64배 길게 측정된 반면에, 높은 외부 복사열원(50 kW/m²)에 있어서는 1.28배로

Table 3. Variation of Density in Before and After Impregnation

Specimen	Heat flux [kW/m ²]	Impregnation		Variation
		Before	After	
N-FRW	20	415.4	-	-
	25	457.5	-	-
	35	442.8	-	-
	50	436.8	-	-
FRW	20	400.0	443.9	43.9
	25	438.4	483.4	45.0
	35	429.3	473.8	44.5
	50	438.6	476.4	37.8

Table 4. Ignition Time of N-FRW and FRW

Specimen	Heat flux [kW/m ²]	Ignition time [sec]	1/sqrt (t _{ig})
N-FRW	20	225.8	0.0665
	25	82.3	0.1102
	35	25.1	0.1996
	50	11.9	0.2899
FRW	20	370.7	0.0519
	25	129.7	0.0878
	35	23.5	0.2063
	50	15.2	0.2565

큰 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용된 물유리와 이산화탄소로 가압함침한 목재인 FRW의 경우 화재초기에 있어 N-FRW보다 최대 64%의 점화 지연 효과를 나타냄을 알 수 있었다.

3.3 임계열유속

Figure 4는 외부 복사열원의 변화와 측정된 점화시간과의 관계를 나타낸 그래프로 점화시간은 외부 복사열이 임계열유속에 가까워질수록 무한대로 접근하고, 외부 복사열원이 임계열유속보다 무한히 커질 경우 0으로 접근함을 알 수 있다. 측정된 data로부터 점화시간을 600초로 기준 하였을 경우 임계열유속은 N-FRW는 15.89 kW/m², FRW의 경우 18.05 kW/m²로 예측되었다.

임계열유속은 외부 복사열원에 노출된 시료가 유염착화하는데 필요한 최소의 복사열을 의미하며, 착화될 때의 가장 낮은 복사열과 착화되지 않는 가장 높은 복사열의 사이에서 실험적으로 얻을 수 있다. 또한 각 외부 복사열원에 따른 점화시간의 그래프에서 직선의 절편으로부터 예측할 수도 있다. 결국, 본 연구에서는 임계열유속을 식(1)로부터 유도된 식(4)와 점화시간으로부터 예측하였다.⁽¹⁴⁾

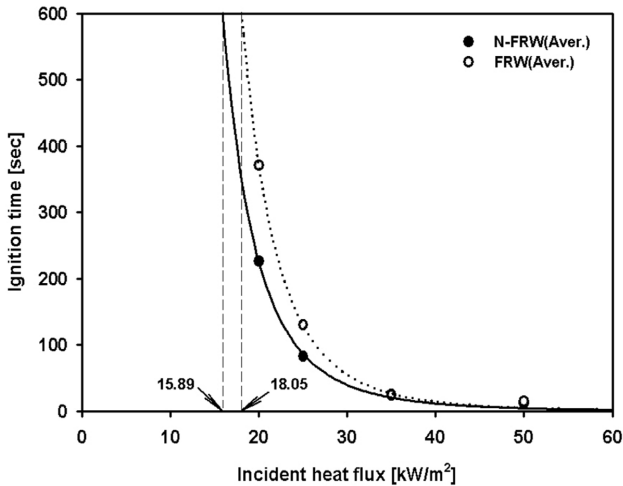


Figure 4. Ignition time vs. incident heat flux for N-FRW and FRW.

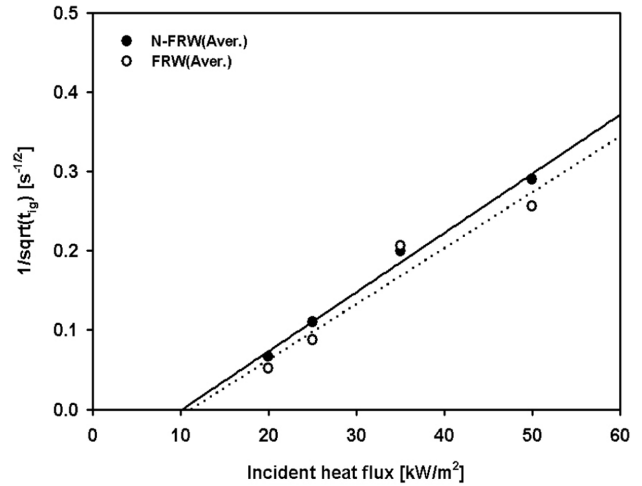


Figure 5. Linear regression analysis of ignition time according to incident heat flux.

$$t_{ig} = \frac{4}{3} k \rho c \left[\frac{1 - \beta_{ig}}{2 - \beta_{ig}} \right] \frac{(T_{ig} - T_0)^2}{[\dot{q}''(t_{ig})]^2} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\sqrt{t_{ig}}} = (\dot{q}_i'' - \dot{q}_{cr}'') \frac{1}{\sqrt{\frac{4}{3} k \rho c \left[\frac{1 - \beta_{ig}}{2 - \beta_{ig}} \right] (T_{ig} - T_0)}} \quad (2)$$

$$\text{slop} = \frac{1}{\sqrt{\frac{4}{3} k \rho c \left[\frac{1 - \beta_{ig}}{2 - \beta_{ig}} \right] (T_{ig} - T_0)}} \quad (3)$$

$$\text{intercept} = -\text{slop}(\dot{q}_{cr}'') \quad (4)$$

여기서,

- t_{ig} : Ignition time [s]
- k : Thermal conductivity [W/mK]
- ρ : Density [kg/m³]
- c : Specific heat [J/kg · K]
- β : Ratio of convective grain and radiative loss with incident heat flux [-]
- \dot{q}_i'' : Incident heat flux [W/m²]
- \dot{q}_{cr}'' : Critical heat flux [W/m²]
- T_{ig} : Ignition temperature [°C]
- T_0 : Ambient temperature [°C]

Figure 5는 모든 외부 복사열원을 통한 직선의 회귀선을 갖는 N-FRW와 FRW에 대한 외부 복사열원의 변화에 따른 $1/\sqrt{t_{ig}}$ 을 나타낸 것으로 각 직선의 절편 즉, 직선과 x 축이 만나는 점이 각 시료에 있어서의 임계열유속이 된다. 식(4)와 Figure 5로부터 예측된 임계열유속은 Table 5에 나타내었다.

3.4 점화온도

점화온도는 주어진 외부 복사열원에서 시험 시료의 노

Table 5. Critical Heat Flux of N-FRW and FRW

Specimen	Critical heat flux [kW/m ²]	Equation	R	Rsqr
N-FRW	10.10	Y=0.0075x-0.0758	0.9948	0.9896
FRW	11.20	Y=0.0070x-0.0783	0.9643	0.9298

Table 6. Ignition Temperatures of N-FRW and FRW

Specimen	Heat flux [kW/m ²]	Ignition temperature [°C]
N-FRW	20	406.5
	25	368.5
	35	354.8
	50	333.4
FRW	20	413.8
	25	408.7
	35	345.7
	50	343.1

출된 표면 위에 위치한 K-type 열전대(Φ 1.0 mm)를 이용하여 유염착화가 되는 순간의 온도를 측정된 것으로 Table 6에 나타낸 시험 시료의 점화온도는 각 외부 복사열원의 단계에서 점화스파크에 의해 시료 표면에서 유염착화가 발생할 때 열전대에 의해 측정된 온도로 3회의 측정 결과에 대한 평균값을 사용하였다. Table 6에 나타낸바와 같이 모든 시료에서 외부 복사열원이 증가할수록 평균점화온도가 낮아짐을 알 수 있는데 이는 외부 복사열원이 증가함에 따라 시료의 표면에서 발생하는 열분해 가스의 발생량이 증가하고 빠른 시간내에서 가연성혼합기가 형성되어 점화스파크에 의해 착화가 발생되었기 때문이라고 판단된다.

각 외부 복사열원에서의 평균점화온도는 물유리와 이산화탄소로 가압함침한 목재인 FRW가 N-FRW보다 35 kW/

m²을 제외하고는 1.03~1.11배 높게 측정되었다. 이는 FRW의 점화시간이 상대적으로 길어짐에 따라 표면온도가 상승한 것으로 판단된다.

3.5 질량감소속도

N-FRW와 FRW에 대해 Figure 1의 ISO 13927 mass loss calorimeter를 이용하여 20, 25, 35 및 50 kW/m²의 외부 복사열원에서 600초 동안 노출시켰을 때 매 1초 간격으로 측정된 증량변화를 ISO 5660-1:2002(E)의 mass loss rate를 구하는 식⁽¹⁵⁾을 이용하여 계산하였다.

Table 7은 외부 복사열원에 따른 평균질량감소속도와 최대질량감소속도를 나타낸 것으로 F-FRW에 비해 FRW에서 상대적으로 질량감소속도가 낮음을 알 수 있다.

Figure 6과 7은 외부 복사열원의 변화에 따른 N-FRW와 FRW에 대한 시간변화에 따른 질량감소 곡선을 나타내었다.

Figure 6은 20 kW/m²의 외부 복사열원에서의 질량감소속도 곡선을 나타낸 것으로 연소초기 점화지연로 열분해

Table 7. Average and Maximum Mass Loss Rate of N-FRW and FRW

Specimen	Heat flux [kW/m ²]	Mass loss rate [g/m ² · s]	
		Aver.	Max.
N-FRW	20	4.38	12.95
	25	5.73	17.63
	35	7.11	17.55
	50	8.19	17.67
FRW	20	2.99	7.70
	25	4.83	10.52
	35	5.81	12.55
	50	7.42	16.19

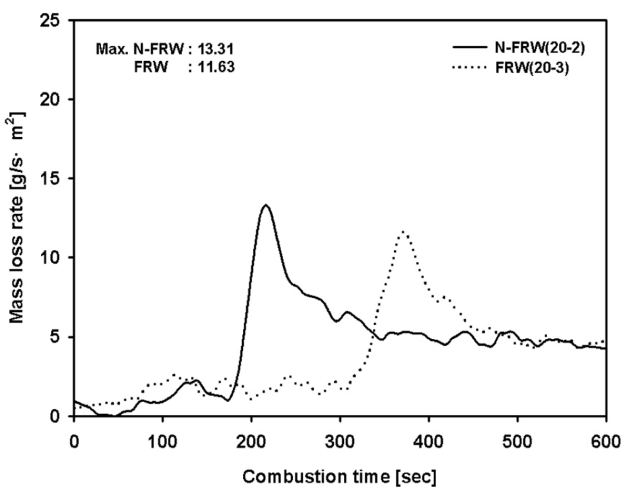


Figure 6. Variations of mass loss rate for N-FRW and FRW in 20 kW/m².

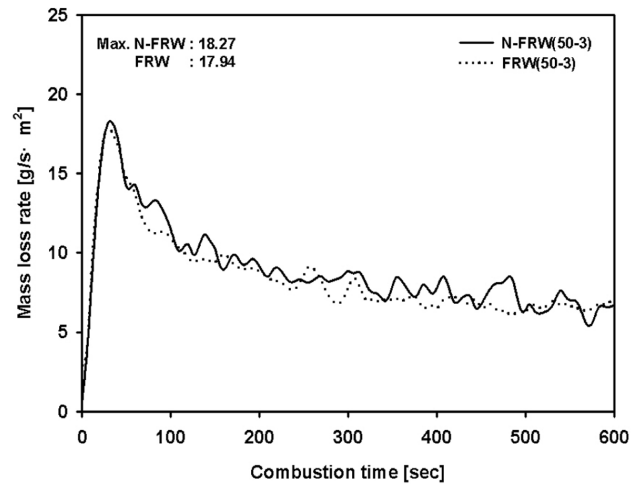


Figure 7. Variations of mass loss rate for N-FRW and FRW in 50 kW/m².

과정을 통해 질량감소속도가 낮은 반면에 점화스파크에 의한 시료 표면에 유염착화가 발생한 후 급격한 질량감소속도를 보이다가 화염이 안정화 되면서 감소하는 경향을 나타내고 있으며, N-FRW와 FRW의 경우 전형적인 목재의 질량감소 곡선을 나타냄을 알 수 있다. N-FRW의 경우 평균 4.54 g/m² · s, 최대 13.31 g/m² · s의 질량감소속도를 나타낸 반면, FRW의 경우 평균 3.84 g/m² · s, 최대 11.63 g/m² · s의 질량감소속도를 나타내었다.

Figure 7은 상대적으로 높은 외부 복사열원인 50 kW/m²에서의 질량감소속도 곡선을 나타낸 것으로 Table 4에서 알 수 있듯이 N-FRW와 FRW의 점화시간의 차이가 작은 관계로 두 시료 모두에서 연소초기 급격한 질량감소속도를 보이다가 감소하는 경향을 나타내었다. N-FRW의 경우 평균 9.05 g/m² · s, 최대 18.27 g/m² · s의 질량감소속도를 나타낸 반면, FRW의 경우 평균 8.53 g/m² · s, 최대 17.94 g/m² · s의 질량감소속도를 나타내었다. 결과적으로 외부 복사열원이 낮은 경우에 있어서는 두 시료간의 질량감소속도가 큰 반면에, 상대적으로 큰 외부복사열원에서는 큰 차이가 발생하지 않았다.

따라서 본 연구 결과로부터 물유리와 이산화탄소를 이용하여 가압함침한 시료인 FRW의 경우 N-FRW에 비해 화재초기의 상대적으로 낮은 외부 복사열원에 있어서는 난연성능을 나타냄을 알 수 있었다. 이는 Flashover 이전 단계인 Pre-Flashover fires에서의 화재성장속도를 낮추어 일반적인 Flashover의 발생조건인 바닥부분의 복사 수열량인 20 kW/m²⁽¹⁶⁾에서의 점화지연에 따라 Flashover 발생시점을 지연시킴으로서 인명 및 재산피해를 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

물유리와 이산화탄소를 이용하여 가압함침한 목재에 대

한 점화시간, 임계열유속, 점화온도 및 질량감소속도를 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) FRW의 점화시간을 N-FRW의 점화시간과 비교해 보았을 때, 외부 복사열원이 20 kW/m²일 경우 144.9초 그리고 25 kW/m²일 경우 47.4초 지연됨을 확인할 수 있었으나 그 이상의 외부 복사 열원에서는 큰 차이가 없었다.
- 2) 외부 복사열원과 점화시간의 제곱근의 역수와 회귀분석결과 임계열유속은 N-FRW의 경우 10.10 kW/m², FRW의 경우 11.20 kW/m²로 FRW에서 1.10 kW/m² 정도 높게 측정되었다.
- 3) 각 외부 복사열원에서의 평균점화온도는 물유리와 이산화탄소로 가압함침한 목재인 FRW가 N-FRW보다 35 kW/m²을 제외하고는 1.03~1.11배 높게 측정되었다.
- 4) 질량감소속도는 N-FRW의 경우 평균 9.05 g/m²·s, 최대 18.27 g/m²·s의 질량감소속도를 나타낸 반면, FRW의 경우 평균 8.53 g/m²·s, 최대 17.94 g/m²·s의 질량감소속도를 나타내었다.
- 5) 본 실험결과 물유리와 이산화탄소로 가압함침한 목재는 20~25 kW/m²의 복사열원에서 기존의 목재보다 점화시간 및 질량감소속도 등에서 난연성능이 개선되었음을 확인할 수 있었다.
- 6) 향후 지속적인 연구를 통해 보다 우수한 배합비율을 찾는다면 Pre-Flashover 단계 뿐만 아니라 Post-Flashover (최성기) 단계에서도 난연성능을 갖춘 목재를 개발할 수 있을 것으로 판단이 된다.

후 기

본 연구는 2012년 호원대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

참고문헌

1. T. Furuno, T. Uehara and S. Jodai, "Combustion of Wood and Silicate I. Impregnation by Water Glass and Applications of Aluminum Sulfate and Calcium Chloride as Reactants", Mokuzaï Gakkaishi, Vol. 37, No. 5, pp. 462-472 (1991).
2. T. Furuno, K. Shimada, T. Uehara and S. Jodai, "Combustion of Wood and Silicate II. Wood-mineral Composites using Water Glass and Reactants of Barium Chloride, Boric Acid, and Borax, and their Properties", Mokuzaï Gakkaishi, Vol. 38, No. 5, pp. 448-457 (1992).
3. T. Furuno, T. Uehara and S. Jodai, "Combustion of Wood and Silicate III. Some Properties of Wood-mineral Composites using the Eater Glass-boron Compound System", Mokuzaï Gakkaishi, Vol. 39, No. 5, pp. 561-570 (1993).
4. T. Furuno and Y. Imamura, "Combinations of Wood and Silicate Part 6. Biological Resistances of Wood-mineral Composites using Water Glass-boron Compound System", Wood Science and Technology, Vol. 32, No. 3, pp. 161-170 (1998).
5. Shiro Saka and Fumie Tanno, "Wood-Inorganic Composites Prepared by the Sol-Gel Process VI. Effects of a Property-enhancer on Fire-resistance in SiO₂-P₂O₅ and SiO₂-B₂O₃ Wood-inorganic Composites", Mokuzaï Gakkaishi, Vol. 42, No. 1, pp. 81-86 (1996).
6. Hisashi Miyafuji and Shiro Saka, "Wood-Inorganic Composites Prepared by the Sol-Gel Process V. Fire-resisting Properties of the SiO₂-P₂O₅-B₂O₃ Wood-inorganic Composites", Mokuzaï Gakkaishi, Vol. 42, No. 1, pp. 74-80 (1996).
7. Carsten Mai and Holger Militz, "Modification of Wood with Silicon Compounds. Inorganic Silicon Compounds and Sol-gel System : A Review", Wood Science and Technology, Vol. 37, No. 5, pp. 339-348 (2004).
8. Carsten Mai and Holger Militz, "Modification of Wood with Silicon Compounds. Treatment Systems Based on Organic Silicon Compounds - A Review", Wood Science and Technology, Vol. 37, No. 6, pp. 453-461 (2004).
9. G. H. Kim, T. K. Oh and W. H. Lee, "A Study on the Basic Properties of Wood Impregnated with Inorganic Compounds", Mokchae Konghak, Vol. 34, No. 4, pp. 15-21 (2006).
10. G. H. Doh, Y. T. Kong, I. H. Kang and E. C. Kang, "Characteristics of Mineral Treated Woods, Manufacture of Plywood - Mineral Composites and Their Fire Resistance Properties", Journal of Forest Science, Korea Forest Research Institute, Vol. 59, pp. 36-44 (1998).
11. G. H. Doh, I. H. Kang and B. S. Park, "Preparation and Fireproof Characteristics of Particleboard with Inorganic Substances", Journal of Forest Science, Korea Forest Research Institute, Vol. 65, pp. 80-86 (2002).
12. S. M. Yoon and J. S. Lee, "Formation and Preservative Effectiveness of Inorganic Substances in Wood Treated with Potassium Carbonate and Calcium Chloride", Mokchae Konghak, Vol. 29, No. 2, pp. 126-132 (2001).
13. KS M 1415, "Sodium silicate liquid; K-3", Korean Industrial Standards (KS) (2002).
14. H. J. Park, "A Study on the Combustion Characteristics of Phenol Foam", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 24, No. 1, pp. 122-127 (2010).
15. ISO 5660-1:2002(E) "Reaction-to-fire test - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1 : Heat release rate (cone calorimeter method)", 12.5 mass loss rate (2002).
16. K. H. Oh, D. L. Kim, W. H. Kim, Y. S. Kim, I. S. Oh, S. C. Woo, S. K. Lee, S. J. In and D. M. Choi, "Principles of Fire Behavior", Dong-Hwa Technology, Korea (2004).