

[Research Paper]

표준화재에 노출된 방염처리 목재의 내부온도에 관한 연구

김황진

초당대학교 소방행정학과

Study on the Internal Temperature of Flame Resistant Treated Wood Exposed to a Standard Fire

Hwang-Jin Kim

Department of Fire Service Administration, Chodang University

(Received May 24, 2018; Revised June 7, 2018; Accepted June 7, 2018)

요 약

건축 재료로 사용되는 목재의 내화성능에 관한 기존 연구들은 목재에 난연 또는 방염 처리하였을 경우 연소특성을 확인하는 것에 집중되어 졌다. 본 논문에서는 화염에 노출된 목재의 열분해와 밀접한 관련이 있는 내부 온도 변화를 확인하기 위하여 건축용 구조재로 널리 사용되는 미송(Douglas-fir)에 방염액 및 방염도료를 처리 후 표준 가열 온도 곡선에 따라 수평가열로에서 가열실험을 실시하였다. 실험결과 방염액을 처리하였을 때 목재내부의 열확산이 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있었으며 방염도료를 처리한 시료의 경우 고온에 노출 되었을 때 도막이 박리되어 방염효과를 기대할 수 없었다. 따라서 두꺼운 목재에 방염효과를 높이기 위해서는 목재표면에 도막을 형성시키는 방염도료보다는 목재내부로 침투하는 방염액을 사용하는 것이 방화효과가 클 것으로 판단된다.

ABSTRACT

The earlier studies on the fire resistance performance of woods used as building materials have focused on confirming combustion characteristics of fire retardant or flame resistant treated wood. In this paper, to confirm internal temperature changes closely related to pyrolysis of woods exposed to the flame, heating experiments were conducted in a heating furnace according to the standard heating temperature curves after Douglas-fir, which is widely used as structural materials, was treated with a flame resistant solution and flame retardant paint. As a result of the experiment, it was confirmed that the thermal diffusion inside the wood has decreased when the wood was treated with the flame resistant solution. However, in high temperature, the flame resistant effect could not be expected due to the peeling of the coating in the case of the flame resistant paint treated wood. Therefore, it can be considered that it is more effective to use the flame resistant solution which penetrates in to the inside of the wood than flame resistant paint which forms the coating on the surface of the wood in order to enhance the flame resistance effect on the thick wood.

Keywords : Flame resistant paint, Flame resistant solution, Standard temperature time curve, Douglas-fir

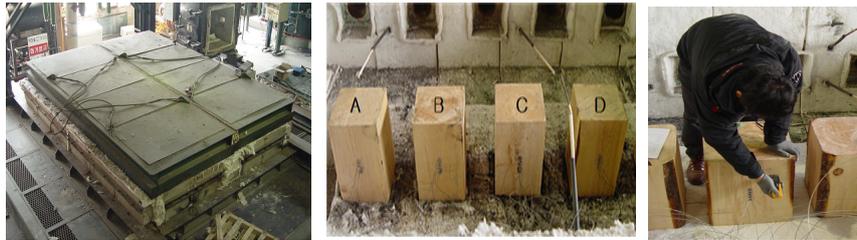
1. 서 론

친환경 주택에 대한 관심이 늘어나면서 목조주택이 인기를 얻고 있다. 특히 유해환경 노출에 의한 아토피와 같은 피부질환이 급증하면서 단독형 목조건축물 뿐만 아니라 아파트 내에 한옥인테리어에 대한 관심도 증가하고 있다. 국립산림과학원의 연구결과에 따르면 목재자체는 단열능력이 우수할 뿐만 아니라 다른 건축물보다 전체 하중이 가볍고 수평하중의 크기가 작기 때문에 지진에도 강한 것으로

알려져 있다. 다만 목재는 대표적인 분해연소를 하는 가연물로서 외부의 온도가 상승할 경우 1차적으로 목재내부의 수분 및 불순물 등이 증발하고 약 200 °C 이상 온도가 되면 목재에 함유된 주요성분인 셀룰로오스(240~350 °C), 헤미셀룰로오스(200~260 °C), 리그닌(280~500 °C)이 열분해되어 증발하기 시작한다⁽¹⁾. 특히 목재내부 온도가 300 °C 이상이 되어 형성되는 탄화층은 하중지지력이 거의 없기 때문에 탄화층은 내화성능평가에 있어 매우 중요하다⁽²⁾. 이와 같은 이론적 배경은 근거로 Kwark (2011)⁽³⁾ 등은 한옥에 사

Table 1. The Characteristic of Specimen which Used in Experiment

Specimen	Characteristic	Principal Component	Moisture Content (%)	
			30 min	60 min
A	Non-treated	-	10.1	9.9
B	Flame Resistant Solution	Mineral & Phosphorus Compounds	18.3	18.1
C	Solvent Soluble Flame Resistant Paint	Urethane Resin	9.2	9.6
D	Water Soluble Flame Resistant Paint	Acrylic Resin	9.5	9.4

**Figure 1.** Photograph of specimen in horizontal furnace.

용되는 목재의 사용용도에 따라 세분화된 난연 성능평가 방법 안을 제시하였다. 또한 국내외적으로 목재의 방화(防火) 성능을 향상시키기 위해 목재에 난연제를 침투시키거나 방염처리를 하여 착화지연효과를 분석하기 위한 연구는 매우 활발히 진행되고 있다. Ellis (1989)⁽⁴⁾는 디이소시아네이트와 인산염을 목재에 첨가하였을 때 탄화층 생성이 촉진되어 목재 내부의 열분해속도가 감소되는 것을 열중량 분석 실험을 통해 분석하였으며, Park (2007)⁽⁵⁾, E. Baysal (2007)⁽⁶⁾, Chung (2015)⁽⁷⁾, Seo (2017)⁽⁸⁾ 등은 콘 칼로리미터 실험을 통해 난연 처리 목재의 연소특성에 대해 비교 분석하였다. 또한 다중이용시설에 사용되는 목재 및 합판을 이용한 실내장식재와 목조문화재의 경우 초기 착화지연을 위해 현장방염처리를 실시하고 있으며 Oh (2009)⁽⁹⁾ 등은 콘 히터 실험을 통해 15, 20, 25, 30 kW/m²의 복사열에 노출된 방염처리 시료의 화재지연효과에 대해 분석한 결과 30 kW/m² 이상의 복사열 또는 400 °C 이상의 온도조건에서 화염에 직접 접촉하는 경우 방염에 의한 화재지연효과를 기대하기 어려울 것으로 분석하였다. Kim (2015)⁽¹⁰⁾는 방염 처리합판으로 구획된 고시원의 Full Scale 화재실험을 통해 방염 처리 시 화재실 내부 최고온도 도달시간이 방염처리를 하지 않았을 경우 보다 약 2배 정도 증가하여 방염효과가 초기 착화지연에만 국한되는 것이 아니라 화염확산에도 영향을 미치는 것을 실험적으로 검증한 바 있다. 이와 같이 기존 관련 연구들은 목재에 난연 또는 방염 처리하였을 경우 연소특성을 확인하는 것에 집중되어졌다. 고온에 노출된 목재의 열분해속도를 늦추기 위해서는 목재내부로의 열확산을 차단시키는 것이 중요하며 화재에 노출된 목재 내부온도변화는 난연 및 방염처리효과를 분석하기 위해 중요하다. 따라서 본 논문에서는 구조용 목재로 사용되는 미송(Douglas-Fir)에 방염처리를 하여 표준 가열 온도 곡선에 따라 가열시 방염처리 유·무에 따른 목재의 내부 온도변화

를 비교 분석하고자 하였다.

2. 실험

2.1 실험시료

방염처리 방법 및 방염처리 유·무에 따른 목재 내부 온도를 측정하기 위하여 건축용 구조재로 많이 사용되는 미송을 모재로 한 Table 1과 같은 조건의 실험 시료를 준비하였다. KS F 1611-3 (건축구조부재의 내화성능표준-제3부: 구조용 집성재 보 및 기둥)에 따르면 통상적으로 구조부재로 쓰이는 두꺼운 목재의 경우 약 0.60 mm/min 정도의 속도로 탄화되는 것으로 알려져 있으며 60분 표준화재 노출시 약 36 mm 정도의 탄화층이 형성되는 것을 예측할 수 있다. 따라서 구조설계에 의하여 결정되는 목재의 제조치수 두께에 약 40 mm를 추가하여 사용할 경우 60분 내화성능이 확보되는 것으로 판단하고 구조설계하고 있다. 본 연구에서 사용한 시료는 30분, 60분 가열 실험 시 방염처리 유·무에 따른 목재 내부 온도의 비교 분석을 위해 크기는 가로×세로×높이(300×300×500) mm로 하였다. Table 1에서와 같이 시료 A는 방염처리하지 않은 미송, 시료 B는 무기 인계화합물이 주성분인 방염액을 시방서에 따라 처리한 미송, 시료 C와 D는 각각 유성 우레탄 수지 및 수성 아크릴 수지를 주성분으로 한 방염도료를 시방서에 따라 각 4회씩 붓 칠하여 목재표면에 도막을 형성시킨 미송을 제작하여 실험에 사용하였다.

2.2 실험장치 및 방법

KS F 2257-1(2014) (건축부재의 내화시험방법-일반요구사항)에 의거하여 목재시료를 표준 가열 온도 곡선에 따른 고온에 노출시키기 위해 Figure 1과 같이 수평내화실험 가열로를 이용하였다. 목재의 내부온도를 측정하기 위해

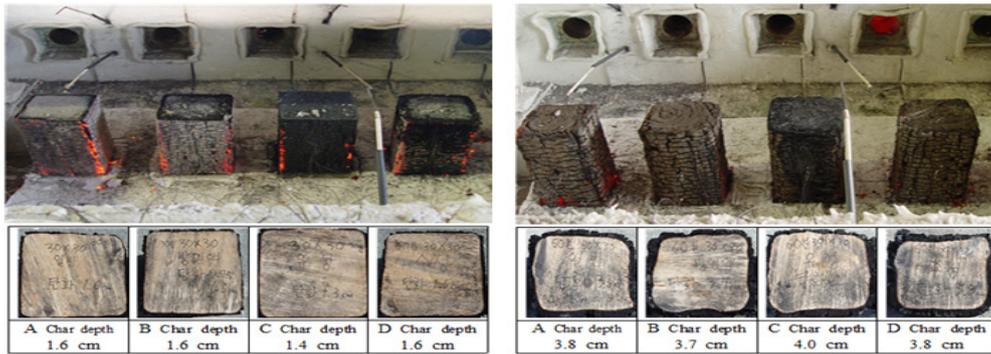


Figure 2. Photograph of specimen after heating experiment (Left : 30 min, Right : 60 min).

Table 2. Comparison of Charring Rate and Mass Loss Rate in each Specimen

Specimen	Charring Rate (mm/min)		Mass Loss Rate (g/s)	
	30 min	60 min	30 min	60 min
A	0.53	0.63	2.3	3.1
B	0.53	0.62	1.3	2.2
C	0.46	0.67	1.8	2.7
D	0.53	0.63	1.9	2.7

Table 3. Comparison of Maximum Heated Temperature in each Specimen (unit : °C)

	2 cm		3 cm		4 cm		5 cm		6 cm	
	30 min	60 min	30 min	60 min	30 min	60 min	30 min	60 min	30 min	60 min
A	627.2	934.9	433.5	863.2	131.6	780.4	98.5	395.6	67.8	109.9
B	171.1	884.0	99.8	424.0	66	161.4	46	99.0	30	102
C	400.5	1012.1	232.9	1037.1	116.2	586.0	75.5	301.2	40.4	100.3
D	431.8	971.5	243.9	684.5	136.5	542.5	96.5	348.3	39.5	104.8

k-type 열전대를 설치하였으며 표준 가열 온도 곡선에 따른 60분 가열 예비실험결과 목재깊이 6 cm 이후부터는 내부 온도변화가 거의 일어나지 않았으며 시료의 종류에 따른 변화가 없었기 때문에 열전대 설치위치는 목재 표면 2 cm 에서부터 1 cm 간격으로 내부 6 cm까지 시료 당 5개씩 설치하였다. 실험시간은 가열시간을 30분, 60분으로 하여 내부온도변화를 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Figure 2는 표준 가열 온도 곡선에 따라 30분, 60분간 가열실험을 실시한 후 탄화된 각 시료의 사진이다. 목재의 연소 시 표면에 형성된 탄화층은 외부의 열을 차단함으로써 목재의 열분해속도를 늦추어 주는 역할을 한다. 본 실험에서 시료를 절단 후 탄화깊이를 측정된 결과 방염처리 유무에 따른 목재의 탄화깊이 차이는 크게 나타나지 않았다.

Table 2는 가열실험 후 시료의 탄화율과 질량 감소율을 비교한 표이다. KS F 1611-3 및 Eurocode 5에서는 미송이 속하는 수종의 탄화율은 약 0.60~0.70 mm/min (국내규격

0.60 mm/min , Eurocode 0.65~0.70 mm/min)으로 제시되어 있다. 방염처리를 할 경우 탄화층 형성을 촉진시켜 내부 열 확산 속도를 감소시킬 수는 있으나 동일한 모재를 사용했을 경우 방염처리 유무에 따른 탄화율의 차이는 크지 않았다. 질량 감소율을 분석한 결과 방염액을 처리한 B 시료가 가장 낮게 나타났다. 인계화합물의 경우 탈수반응에 의해 목재표면에 탄화층 형성을 촉진시켜 외부로부터 발생하는 열을 차단시키고 무기염류는 흡열반응을 통해 가연물 내부의 온도를 상대적으로 냉각시키는 작용을 하는 것으로 알려져 있어 이러한 효과에 의해 무기인계화합물을 주성분으로 한 방염액을 처리한 B시료는 목재내부의 열분해가 지연되어 질량 감소율이 가장 낮게 측정된 것으로 판단된다.

Table 3은 가열실험 후 각 시료의 내부 깊이별 최고 온도를 나타낸 표이다. 30분, 60분 가열실험에서 모두 방염액을 처리한 시료B의 내부온도가 가장 낮은 것으로 나타났다. 방염도료를 처리한 시료 C, D의 경우 방염도료의 특성상 목재의 표면에 일정 두께의 도막이 형성되어 있기 때문에 외부로의 열을 일정부분 차단시켜 주지만 이러한 도막은 고온에 장시간 노출 시 목재표면에서 박리되기 때문에 상대적으로

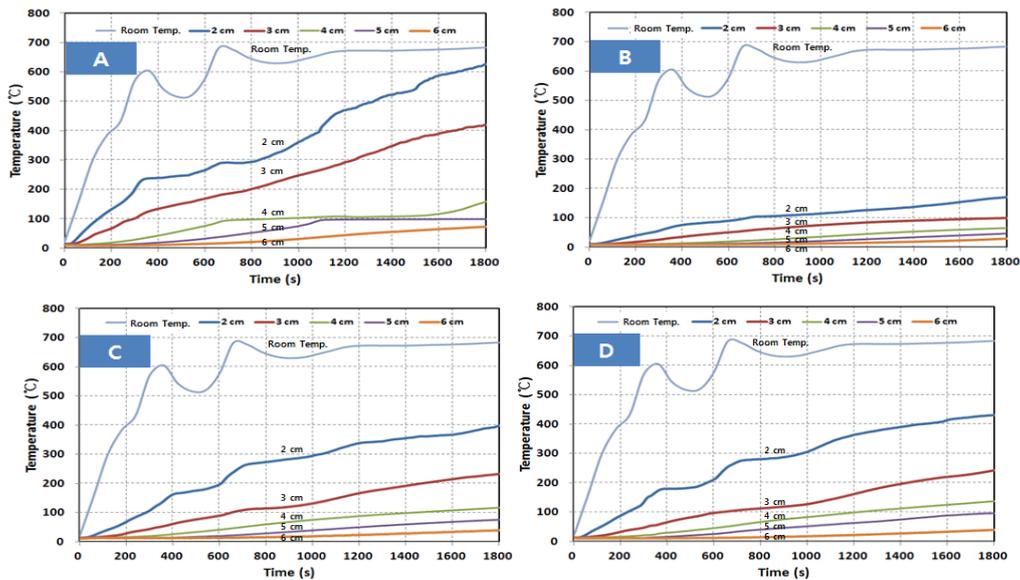


Figure 3. Internal temperature curve of each specimen (at 30 min heated).

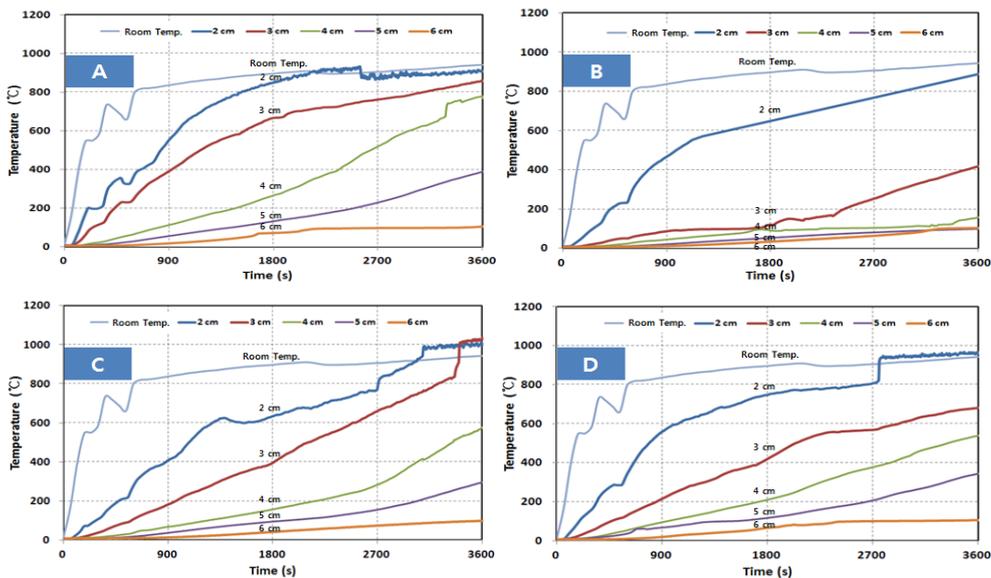


Figure 4. Internal temperature curve of each specimen (at 60 min heated).

내부로의 열 차단 효과가 크지 않은 것으로 판단된다.

Figure 3은 30분간 가열 실험 시 내부온도변화를 나타낸 그래프이다. 방염처리를 하지 않은 A시료의 경우 목재 내부 2 cm 지점에서 350초까지 급격히 온도가 상승하다가 기울기가 완만해지는 경향을 나타내는데 이는 목재가 착화되었다가 탄화층 형성에 의해 소멸되는 시점과 일치한다. 목재의 소멸시점은 가열로 내부 온도곡선의 1차 변곡점을 통해 확인할 수 있다. 방염액을 처리한 시료 B의 경우 상대적으로 매우 완만한 온도상승을 보이고 있으며 2 cm 지점의 최고온도도 171 °C 정도로 미 방염 목재와 같은 지점에서 약 456 °C의 온도 차이를 보인다. 또한 최고온도인 171 °C까지 온도가 상승하는데 1800초가 소요되었지만 미방염 목재에

서는 약 270초가 소요됨으로써 열확산속도가 6배 이상 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 방염도료를 처리한 시료 C,D와 비교 시에도 방염액을 처리한 시료 B의 열 차단 효과가 뛰어난 것으로 나타났다.

Figure 4는 60분간 가열 실험 시 내부온도변화를 나타낸 그래프이다. 30분 가열실험에서와 마찬가지로 방염액을 처리한 B시료의 열 차단 효과가 가장 우수한 것으로 나타났다. 각 그래프에서 온도가 수직상승하여 외기온도와 같아지는 시점은 탄화층의 박리에 의한 열전대의 이탈에 기인한 것으로 판단된다. 고온에 의해 탄화층이 박리될 경우 탄화층 형성에 의한 열 차단효과는 더 이상 기대할 수 없으며 방염도료를 처리한 시료의 경우 고온 노출 시 목재표면

에 처리된 방염도막이 박리되는 순간 방염효과는 더 이상 나타나지 않았다. 반면에 방염액을 처리한 B시료의 경우 무기인계화합물 방염액의 특성상 탈수작용에 의해 탄화층 형성을 촉진하고 열에 의해 H₂O 가 형성되어 내부 흡열반응에 의해 고온에 노출 시에도 내부 온도변화가 상대적으로 크게 상승하지 않는 것으로 판단된다. 문헌상 목재는 수중에 따라 차이가 있을 수 있지만 약 300 °C 이상의 온도에서 열분해 후 탄화층이 형성되는 것으로 알려져 있다. 본 실험에서 방염액을 처리한 B시료의 경우 목재 내부 3 cm 지점의 최고온도가 424 °C이며 4 cm 지점의 최고온도는 161.4 °C, 5 cm 지점의 최고온도는 99 °C로 측정된 반면 방염처리하지 않은 A시료와 방염도료를 처리한 C,D 시료의 경우 목재 내부 5 cm 지점까지 모두 300 °C가 넘는 내부온도를 나타냈다. 목재가 화염에 노출 시 질량감소속도는 내부 열확산에 따른 열분해 속도와 밀접한 연관이 있으며 본 실험에서도 질량감소속도가 3.1 g/s인 A시료의 내부온도와 질량감소속도가 2.2 g/s인 방염액을 처리한 B시료의 내부온도는 큰 차이를 나타내고 있다.

4. 결 론

건축용 구조재로 사용되는 목재의 방염처리 효과를 분석하기 위해 방염 미처리 시료, 방염액 처리 시료, 방염도료 처리 시료를 표준 가열 온도 곡선에 따라 수평가열로 내에서 30분, 60분씩 노출시켜 시료의 내부온도를 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 30분 가열시 시료별 내부온도 차이가 가장 큰 목재 내부 2 cm 지점에서 방염액을 처리한 목재의 최고온도는 171.1 °C로 측정 되어 방염처리하지 않은 목재의 최고온도 627.2 °C의 약 27.3%, 방염도료를 처리한 목재의 내부온도 400.5 °C, 431.8 °C의 약 42.7%, 39.6% 수준으로 나타났다. 방염처리 유·무에 따른 온도차이가 가장 적게 나타난 목재 내부 6 cm 지점에서도 방염처리하지 않은 목재 최고온도의 44.2%, 방염도료를 처리한 목재 최고온도의 74.3%, 75.9% 수준으로 나타났다.

(2) 60분 가열시 모든 시료에서 탄화층의 박리현상이 나타나 2 cm 지점의 내부온도 차이는 크지 않았으며 목재 깊이 6 cm 지점에서는 방염처리 유·무에 관계없이 비슷한 온도를 나타냈다. 시료별 내부온도 차이가 가장 크게 나타난 목재 내부 4 cm 지점에서 방염액을 처리한 목재의 최고온도는 161.4 °C로 방염처리하지 않은 목재의 최고온도 780.4 °C의 약 20.7%, 방염도료를 처리한 목재의 내부온도 586.0 °C, 542.5 °C의 약 27.5%, 29.8% 수준으로 나타나 방염액을 처리한 목재의 내부 열 차단 효과가 가장 우수한 것으로 분석된다.

(3) 기존 선행연구에서 45도 연소실험 및 콘 칼로리미터 실험을 통해 두께가 얇은 합판의 방염처리 효과를 분석한 경우 방염도료와 방염액의 방염성능은 큰 차이가 나타나지

않았지만 본 연구에서 구조재로 사용되는 두꺼운 목재를 표준 화재에 노출시킨 경우에는 방염도료와 방염액의 방염성능은 큰 차이를 나타냈다. 방염도료는 방염 처리된 도막이 고온에 장시간 노출되었을 때 표면에서 박리되어 더 이상 방염효과를 기대할 수 없었지만 방염액의 경우에는 모든 실험조건에서 방염도료를 처리한 시료보다 내부 열 차단효과가 우수하게 나타났다. 따라서 구조용 목재와 같이 두꺼운 목재의 방염처리는 목재 내부로 침투하는 방염액을 사용하는 것이 열 차단 효과가 더 큰 것으로 확인되었다.

References

1. H. J. Park and H. Kim, "A Study on Charring Rate of Wood Exposed to a Constant Incident Radiation Heat Flux", *Transaction of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 18, No. 4, pp. 86-92 (2004).
2. NFPA, "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 3rd Ed. (2002).
3. J. H. Kwark, J. M. Choi and J. H. Ku, "A Study on Evaluation Methods for the Fire-retardant Performance of Hanok Components", *Journal of Korean Institute Fire Science & Engineering*, Vol. 25, No. 5, pp. 1-7 (2011).
4. W. D. Ellis and R. M. Rowell, "Flame-retardant Treatment of Wood with a Diisocyanate and an Oligomerphosphate", *Wood and Fiber Science* 21, pp. 367-375 (1989).
5. H. J. Park, "A Study on the Burning Rate of Fire Retardant Treated Wood", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 22, No. 6, pp. 46-54 (2007).
6. E. Baysal, M. Altinok, M. Colak, S. K. Ozaki and H. Toker "Fire Resistance of Douglas Fir Treated with Borates and Natural Extractive", *Bioresource Technology*, Vol. 98, Issue 5, pp. 1101-1105 (2007).
7. Y. J. Chung, "Combustion Characteristics of Pinus rigida Specimens Treated with Phosphorus-Nitrogen Additives", *Fire Science and Engineering*, Vol. 29, No. 6, pp. 13-19 (2015).
8. H. J. Seo, N. K. Kim, J. M. Jo and M. C. Lee, "An Experimental Study on the Development of Fire-retardant Treated Wood for Construction", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 32, No. 5, pp. 149-156 (2017).
9. K. H. Oh, H. J. Kim and S. E. Lee, "A Study on the Ignition Delay Effect by Flame-Resistant Paint Treatment", *Journal of Korean Institute Fire Science & Engineering*, Vol. 23, No. 2, pp. 111-116 (2009).
10. H. J. Kim and S. E. Lee, "An Experimental Study on the Effect of Flame Resistance Treated in Gosiwon Fire", *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 14, No. 6, pp. 259-265 (2014).