

마이크로파를 이용한 목재의 액상방염약제 침투효과 연구

The Liquid Flame Proofing Agent's Permeating Effect of Wood Using Microwave

박철우 허재원 임남기

Park, Cheul-Woo Her, Jae-Won Lim, Nam-Gi*

Department of Architectural Engineering, Tongmyong University, Nam-Gu, Busan, 608-711, Korea

Abstract

By implementing an analysis on the liquid flame proof agent infiltration of microwave-heated wood under soaking conditions (room temperature soaking, heat soaking), its correlation with wood temperature, and the structure of wood and permeating components after soaking in flame proof agent, which was carried out as basic research in order to improve the fire resistance performance of the wood itself, it is found that the infiltration increases as the microwave heating time increases, while for heat soaking, it is found that high infiltration as well as the stable permeability of flame proof agent is achievable. Also, when the wood temperature is more than 80°C, the infiltration by the flame proof agent increased, and a very even infiltration of flame proof agent was observed, which implies that the liquid flame proof agent has a dependency on temperature change of the wood as a condition to penetrate into the wood. As a result of fine structure analysis, the flame proof agent transfer between cells through pits was considered as a cause to increase the infiltration of flame proof agent, and it is also shown that for heat soaking among the permeating component analysis, as the crystallized flame proof agent around the heartwood and sapwood inner pits increases, the flame proof agent can penetrate into the the heartwood part.

Keywords : microwave, structural wood, liquid flame proof agent, permeability

1. 서론

1.1 연구의 목적

목재는 우리에게 가장 친숙하며 유용하게 사용되는 Green Construction Material로서 최근 들어 본격적으로 목제품이나 목조건물의 수요량 증대와 활용방안에 대한 연구 활동에 따라 관련된 생산 활동이 증가하고 있다. 그 중 경량목조주택 및 한옥의 축조건수 증가와 이에 따른 구조부재의 보강기법·제품, 실내외 마감재료에 대한 연구개발이 많은 건수로 수행되거나 제품화 되고 있지만 인간의 생명과

직결되며 목재의 가장 취약한 부분이라고 인식되고 있는 화재저항성 향상에 대한 연구와 제품의 개발은 매우 부족할 실정이다[1]. 현재까지 목재의 화재저항성 향상 방법은 방염액 등을 목재 표면에 브러쉬 등으로 도포하는 것이 주를 이루어 왔지만 이러한 처리로는 목재 자체의 화재 저항성 향상은 기대할 수 없으며, 처리 시간 및 비용의 증대는 물론 시간경과에 따른 품질유지와 관리 부분에서 취약한 실정이다. 한편 목재자체의 화재저항성을 향상시켜 수년전부터 사용 중인 미국 T사 목재는 규산나트륨(Na_2SiO_3) 등을 강제적으로 주입시켜 난연 성능을 확보한 제품이지만 심재부위 주입 불량으로 전체 난연성능이 떨어지며 외기온 등의 영향으로 내부 충전물 용탈 및 강제주입 등에 따른 구조재로서 결함의 단점과 높은 단가로 인하여 사용상 한계가 있는 실정이다[2].

이에 본 연구에서는 마이크로파로 급속 가열된 목재의 방

Received : February 7, 2011

Revision received : April 27, 2011

Accepted : May 7, 2011

* Corresponding author : Lim, Nam-Gi

[Tel: 82-51-629-2463, E-mail: ing@tu.ac.kr]

©2011 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

염약제 침투효과에 관한 연구를 진행하여 목재 자체의 화재 저항성을 향상시켜 경제적인 무결함 난연급 목재 개발을 위한 기초적 자료를 도출하고자 한다.

1.2 연구방법 및 절차

목재는 주변 온도와 습도의 변화에 따라 많은 영향을 받기 때문에 실험실 내의 영향인자를 최대한 고려하여 Table 1 및 Figure 1에 따라 실험을 진행한다. 시험편을 적정 크기로 가공 후 예비실험을 바탕으로 마이크로파 출력과 가열 시간을 설정하였으며, 방염약제 침지조건을 상온침지와 열기침지로 구분하여 실시한다.

마이크로파 가열 전·후의 질량 및 온도를 측정하여 기록하며 가열 후 방염약제에 침지된 시험편 내부로의 방염약제 침투량에 대한 정량적 판단을 위해 침지 전·후 목재의 질량 변화와 KS F 2199 목재의 함수율 측정법에 의해 내부 수분 함유량을 질량백분율(Moisture Content, 이하 MC)로 비교한다. 침지 조건에 따라 목재 온도 대비 방염약제 침투량과 상관성을 분석하며 방염약제 침투량 증가 여부를 고찰한다. 목재의 변재와 심재 부위에 방염약제의 고른 침투가 이루어진 것을 판단하기 위한 미세구조 촬영과 침투성분을 분석하여 섬유세포 주위의 방염약제 결정상 구분 및 방염약제 성분의 심재 내부 침투 여부를 확인한다.

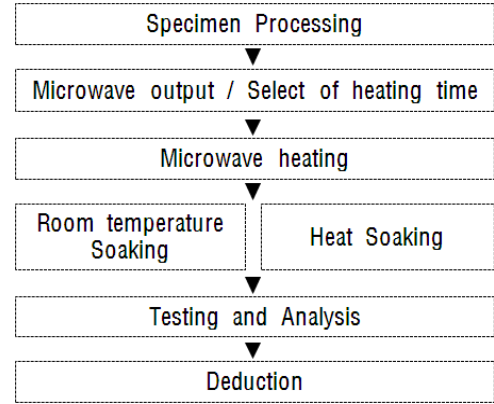


Figure 1. Study Flow

2. 이론적 고찰

2.1 유전물질에서 마이크로파의 효율성

현재 목재 건조를 위해 주로 사용되는 열풍건조 방식은 표면가열에 의해 목재 내부로 열전달이 이루어지며 수중에 따라 내부까지 가열하기 위해 최대 100~200℃이상의 열기가 필요하다. 이러한 고온가열은 목재의 색상 변화와 내외부 온도차에 의한 응력발생으로 균열 발생 확률이 높아지게 된다.

한편 최근 들어 부각되고 있는 마이크로파를 이용한 목재 건조법은 목재 내부로 조사된 마이크로파(Figure 2. 1st : Microwave)가 비대칭 전하를 가진 물 분자와 반응하여 회전운동 에너지와 회전에 의한 분자 간 마찰열 에너지로 전환되는데 착안한 목재의 건조방법이다[3]. 이 때 발생하는 열은 목재 내부의 증기압을 높이므로 내부로부터의 수증기가 표면으로 확산(2nd : Moisture diffusion)되어 외부로 증발(3rd : Water vapor)하기 때문에 마이크로파 가열로 건조되는 목재는 외부보다 내부의 함수율이 낮아지게 되어 열풍건조와는 반대의 함수율 분포를 이루게 되므로 균열 없는 건조목재의 획득이 가능하다. 특히 내외부 온도차가 크지 않으므로 표면 및 내부 균열이 방지되고, 매우 빠른 속도의 건조가 가능하다[4]. 또한 목재의 어느 부분도 100℃이상의 온도로 높일 필요가 없으므로 열풍건조 시 발생하는 결함 발생확률이 매우 낮으며 경제적 이다. 또한 일반적인 제재목의 열풍 건조과정에서 행하여지는 공정과 비교 시 수중 및 부피별로 1/5~1/10 수준으로써 효과적인 공정 단축이 가능하다.

Table 1. Research method

	Before Heating	Mass(g)
Microwave	After Heating	Mass(g), Surface Temperature(°C)
Experiment and Analysis	<ul style="list-style-type: none"> · Liquid flame proof agent wood infiltration(g) · Mass percentage water content(MC, %) · Correlation between wood temperature and permeability · Liquid flame proof agent permeability analysis (SEM, EDS) 	
Room Temperature Soaking	After microwave heating, remove the heat in the room temperature for an hour, then Soak in the liquid flame proof agent for an hour	
Heat Soaking	After microwave heating, Soak in the liquid flame proof agent with the heat reserved for an hour	
Test Specimen	Mean value of 10 test specimens per each heat condition	
Used Tree Species	S.P.F(Sprus, Pine, Fir)	

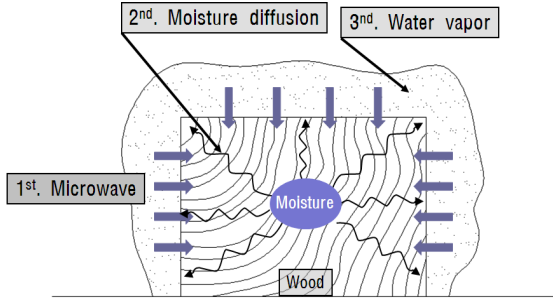


Figure 2. Microwave wood drying system

2.2 마이크로파로 건조된 목재의 액상 침투성

일반적으로 수분이 빠져나간 건조목재를 상온의 액상에 침지해 두면 내부로 침투가 수월하지 못하며 오랜 시간 침지되어야 조금씩 적은 양이 내부로 들어가게 된다. 현재 목재의 액상 주입을 위해 널리 사용되는 방법은 가압 및 감압 처리법처럼 강제적 흡수법이 대부분이다. 하지만 가압 및 감압처리의 경우 목재의 변재부위 주입은 용이한 반면 심재 부위로는 주입이 어려우며 가압되는 압력에 따라 목재의 내력에 손상이 가해질 수 있으므로 목재의 수종 및 내력에 따라 가압 시 주의를 요한다.

한편 목재 전체의 액상 주입성 향상을 위한 방안으로서 가도관 내 수액의 통로가 되며 수액 이동의 조절 밸브 역할을 하게 되는 벽공(壁孔, Pit)을 조절하는 방법은 심재부위의 벽공이 거의 닫힌 상태이므로 여러 추출물 등의 성분이 벽공막에 부착되면서 Figure 3의 a)와 같이 빈틈없이 막혀 버리게 되는 한계가 있다[5]. 이에 벽공을 열어 액상의 주입성을 향상시키려는 연구 중 미생물 이용, 화학적 처리, 측면을 압축하여 세포벽의 미세한 갈라짐을 이용하는 것 등이 수행되었으나 심재의 액상 주입성 개선 효과는 향상되지 않을 뿐 아니라, 강도가 저하되거나 표면이외에는 효과가 없는 것으로 알려져 있다[6].

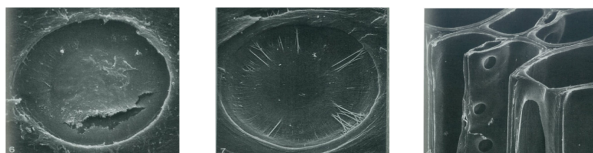


Figure 3. Radiator pine tree pit(a, b= $\times 6,000$ c= $\times 1,250$)

1) Microfibril : 축방향으로 연결된 셀룰로오스 사슬들이 일정한 수만큼 나발모양으로 이루어진 실 모양의 구조체로서 세포벽의 기본 구성단위

한편 이에 대한 개선책으로서 목재에 마이크로파를 조사하여 온도가 상승하면 균일화된 수분과 함께 내부로부터 벽공 및 세포간에 존재하던 추출물 등이 함께 빠져나옴에 따라 이들이 제거됨으로서 효율적인 건조가 가능하고 내부의 액상 침투성에도 효과가 있을 것으로 사료된다.

3. 실험개요

3.1 실험조건 및 순서

사용 수종은 경량목조주택 시공 시 주요 구조부재로 사용되는 S.P.F(Sprus, Pine, Fir)수종이며, 결과 값은 시험편의 각 조건 당 10개의 평균으로 한다. 마이크로파 가열시간은 6, 8, 10, 12, 14, 16분으로 설정하며 출력은 3.5kW로 고정한다. 마이크로파로 급속 가열된 목재는 가열 전후의 질량을 측정·기록하여 질량변화에 따른 MC를 환산하며, 가열 후 온도를 알고자 적외선 온도계로 가열시간에 따른 온도변화를 측정한다. 마이크로파로 가열된 시험편의 방염약제 침지는 상온에서 자연 건조(1시간) 후 침지한 것과 마이크로파 가열 직후 열기를 지닌 상태에서 침지한 것으로 구분하며 침지시간은 1시간으로 한다. 측정된 시험편의 질량변화에 따라 방염약제의 침투량을 파악하며, 침투원인 분석을 위해 목재의 온도와 침지조건에 따른 상관성 및 목재온도상승을 위한 열에너지를 분석한다. 목재 내부로 침투된 방염약제 성분에 따른 미세구조 및 결정상 분석을 위해 각 조건에 따라 침지 후 건조된 시험편의 변재 부위 표면부는 깊이 5mm, 심재 부위는 절단된 면의 중심에서부터 5mm 깊이에서 시험편을 채취한다. 마이크로파 가열 조건과 목재의 질량백분 함수율 및 목재 가열에 소요되는 열에너지는 Table 2 및 Equation 1, 2[7]와 같다.

Table 2. Microwave heating condition

Specimen heating time(min)	6, 8, 10, 12, 14, 16
Water content before heating(%)	11.6(Electrical resistance moisture meter measurement)
Temperature(°C) /Humidity(%)	25 / 65~70
Specimen size(mm)	180×300×38
Microwave output(kW)	3.5

$$MC = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (1)$$

Here, m_1 : Specimen mass before drying(g)
 m_2 : Specimen mass after drying(g)
 MC : Moisture Content(%)

$$H = 1000 W_o c_w (T_0 - T_1) \quad (2)$$

W_o = Volume of wood(m^3) × Specific gravity of the species × 1,000

$$c_w = 0.268 + 0.00055(T_1 + T_0)$$

Here, H : Heat energy consumed for heating wood (cal)

W_o : Complete dry weight of wood (Kg)

c_w : Thermal capacity of wood (cal/g $^{\circ}C$)

T_0 : Temperature of wood before heating ($^{\circ}C$)

T_1 : Initial temperature of wood before heating($^{\circ}C$)

3.2. 실험재료 및 장비

실험에 사용된 S.P.F 수종은 비중 및 수축팽윤률과 역학적 특성이 비슷하여 혼합 그룹으로 구분되며 저가이고 가공이 쉬워 경량목조주택에 있어 가장 많이 사용되며 특성[8]은 Table 3과 같다.

Table 3. S.P.F Physical properties of tree species

Division	Air Dry Density	Shrinkage(%)			Bending strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Shearing strength (MPa)
		Radi al direction	Tange nt direction	Volume shrink age			
Spruce	0.42	3.9	7.1	11.7	70.3	40.1	7.5
Pine	0.47	3.9	6.5	10.5	70.4	40.3	7.4
Fir	0.43	4.1	7.8	11.4	71.4	38.8	8.1
Average	0.44	4.0	7.1	11.2	70.7	39.7	7.7

액상의 인산계 방염약제는 점성이 높은 기존의 유기계 약제와는 달리 상온에서의 물과 같이 투명하며 점성이 낮아 목재 내부 빈 공간으로 침투가 매우 유리하다. 또한 목재 표면에 도포되는 일반약제와는 달리 목재 내부로의 침투로 인해 목재 자체가 화재 저항성을 가질 수 있는 기능의 부여가 가능하다. 인산계 방염약제의 화학적 구성과 형상은 Table 4 및 Figure 4-(a)와 같으며 Microwave 가열 장비는 Figure 4-(b)와 같다.

Table 4. Chemical configuration of phosphate flame proof agent

Components	Chemical Formula
Monobasic Sodium Phosphate	$NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$
Dibasic Ammonium Phosphate	$(NH_4)_2HPO_4$
Borax	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$
Boric acid	H_3BO_3
Water(thinner)	H_2O



(a)Phosphate flame proof agent



(b)Microwave heating /drying machine

Figure 4. Using materials and machine

4. 실험결과 및 고찰

4.1 목재 질량 및 방염약제 침투량

액상 방염약제의 침투량 및 질량변화는 Table 5 및 Figure 5와 같다. 마이크로파로 가열된 시험편의 가열 전과 직후의 평균 질량 감소량은 상온 및 열기 침지 시험편이 각 54.4g, 54.8g의 감소를 나타내었으며 이에 대한 오차는 $\pm 0.4g$ 으로서 마이크로파로 가열된 목재의 질량감소에 대한 편차는 매우 작으며 균일한 건조가 가능한 것으로 나타났다.

Table 5. Flame proof agent permeability after microwave heating and soaking

Heating time (min)	Room Temperature Soaking(g)				Heat Soaking(g)			
	Before Heating	After Heating	After immer sion	Infiltra tion	Before Heating	After Heating	After immer sion	Infiltra tion
6	909.5	888.0	935.2	47.2	803.4	782.6	904.4	121.8
8	878.3	855.3	910.8	55.5	939.7	918.4	1099.8	181.3
10	954.4	913.2	947.4	61.2	797.7	752.0	988.5	236.5
12	895.6	836.2	914.5	78.3	919.1	855.5	1220.7	365.3
14	968.1	887.8	984.7	96.9	1011.5	933.8	1397.7	463.9
16	911.5	810.5	899.8	89.3	938.8	839.0	1239.0	400.0
Average	Mass loss	54.4	Average Infiltration	71.4	Average Mass loss	54.8	Average Infiltration	294.8

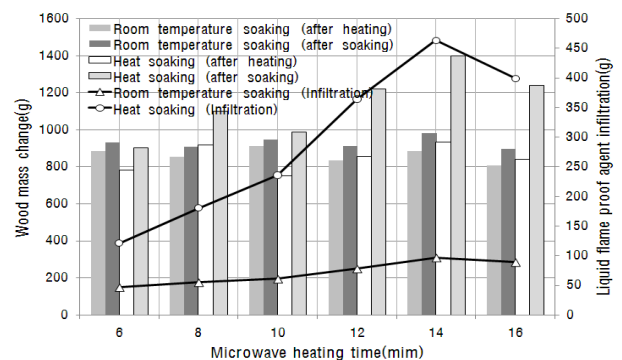


Figure 5. Wood Mass Change and Flame Proof Agent Permeability(g)

방염약제의 평균 침투량은 열기침지의 경우 294.8g으로서 상온침지의 71.4g 대비 4.1배 이상 침투량이 증대되는 것으로 나타났다. 또한 열기침지 시험편 중 상온침지 대비 6분 가열은 2.5배, 14분 가열은 4.7배로서 마이크로파 가열 시간이 높아질수록 침투량에서 큰 차이를 나타내었다. 이는 열기를 가진 시험편이 방염약제 침지 후 내부 수분이 외부로 확산되면서 추출됨과 동시에 기압 차이로 방염약제가 공극으로 대량 침투되는 치환 메커니즘에 의한 것과 시험편 내부 높은 증기압의 확산 및 세포벽 주변 벽공의 영향으로 세포벽 사이 방염약제의 왕래가 수월해짐에 따라 침투량이 증대된 것으로 사료된다. 이와 같은 침투량 증대에 대한 정밀한 분석을 위해 시험편의 세포벽과 벽공 주변 미세구조 촬영을 실시하였으며 결정화된 약제 성분 분석을 실시하였다.

4.2 목재 질량대비 수분과 약제의 변화비율

마이크로파 가열 후 상온 및 열기침지에 따라 변화된 시험편의 수분과 방염약제의 MC 변화는 Table 6 및 Figure 6과 같다.

상온 및 열기 침지된 시험편의 마이크로파 가열 직후 수분 감소 비율은 평균 6.4%인 것으로 나타났다. 하지만 방염약제 침지 후 액상 증대 비율은 상온 및 열기침지 각각 7.8%, 34.4%로서 열기침지가 상온침지 대비 4.4배 이상 높아지는 것으로 나타났다. 이는 전술한 평균 방염약제 침투량(g) 증대치인 4.1배를 감안하면 큰 차이는 없으므로 나타났지만 목재 내부에 포함된 수분 및 방염약제의 정량적 판단을 위해서는 Equation 1을 이용한 함수율 도출이 유익한 방안이라 사료된다.

한편 Figure 6과 같이 마이크로파 가열 후 방염약제 침지에 따른 액상 함수비 증감 분포에서 상온침지가 열기 침지 대비 낮은 값을 가지는 것으로 나타났는데 이와 같은 현상은 마이크로파 가열 후 1시간 자연건조 시 불균등한 온도 저하 및 수분분포에 따라 액상에 침지된 시험편의 방염약제 침투성이 불균일해졌거나 세포벽간 방염약제 자유이동이 제한되었기 때문으로 판단된다. 이에 시험편이 침지되는 온도에 따른 수분 흡수량과의 상관성 분석이 필요한 것으로 판단된다.

Table 6. MC before and after microwave heating and soaking(%)

Heating time (min)	Room Temperature Soaking		Heat Soaking	
	Water Content Reduction After Heating	Liquid Increase After Soaking	Water Content Reduction After Heating	Liquid Increase After immersion
6	2.4	5.3	2.7	15.6
8	2.7	6.3	2.3	19.8
10	4.5	3.7	6.1	31.4
12	7.1	9.4	7.4	42.7
14	9.0	10.9	8.3	49.7
16	12.5	11.0	11.9	47.7
Average	6.4	7.8	6.5	34.5

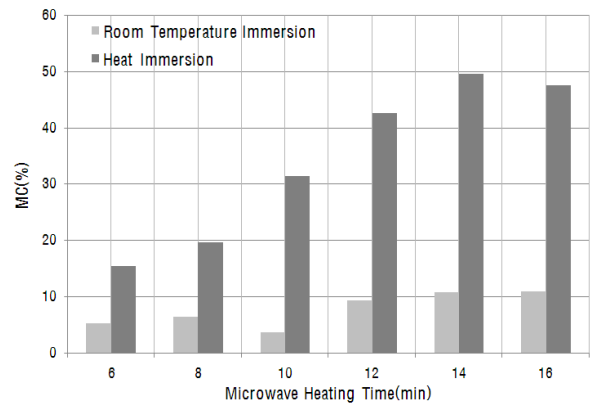


Figure 6. Liquid water content percentage compared to wood mass after soaking(%)

4.3 방염약제의 침투량과 가열 후 온도와의 상관성

상온 및 열기침지 된 시험편의 온도상태에 따른 방염약제 침투량과 단위체적의 목재 가열에 소요되는 열에너지는 Table 7, 8과 같으며 침투량과의 상관성은 Figure 7과 같다.

마이크로파 가열 후 상온침지 전 1시간 자연건조 된 시험편의 온도분포는 평균 34℃정도로 나타났으며 마이크로파 가열 직후인 열기침지 시험편의 경우 평균온도 분포는 97℃로서 상온침지 전 목재 온도 대비 63℃이상의 온도 차이로 나타났다. 이러한 온도차에 따라 목재가 흡수할 수 있는 방염약제의 양적인 변화는 매우 큰 것으로 나타났는데 Figure 7 (a)와 같이 상온침지 직전의 시험편 온도와 침지 후 방염약제의 침투량은 (b)에 비하여 균일하지 못한 분포로 나타난 반면 온도가 높은 상태에서 침지된 시험편은 방염약제의 침투량 증대는 물론 균일하게 침투되는 분포로 나타나 시험편의 온도가 높을수록 안정적인 방염약제 흡수가 가능한 것으로 나타났으며 이와 같은 방염약제의 침투성 및 침투량은 목재의 온도변화에 대한 의존성이 높은 것으로 사료된다.

한편 Table 2 조건에 따라 14분 이상 마이크로파로 가열한 목재의 경우 온도는 높지만 방염약제의 침투량이 떨어지는 것으로 나타나 이에 대한 원인과 목재 체적에 따른 마이크로파 출력 및 가열시간의 적정 범위를 파악하여 관리해야 할 것으로 사료된다.

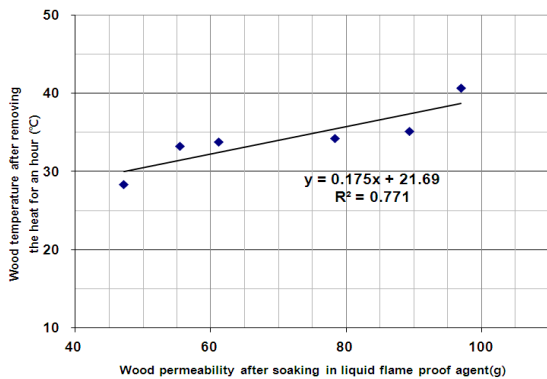
Table 7. Flame proof agent infiltration according to wood temperature

Heating time (min)	Room Temperature Soaking		Heat Soaking	
	Temperature after drying at room temperature for an hour (°C)	Infiltration (g)	Temperature after heating (°C)	Infiltration (g)
6	28.3	47.2	85.8	121.8
8	33.2	55.5	91.5	181.3
10	33.7	61.2	97.0	236.5
12	34.2	78.3	99.5	365.3
14	40.6	96.9	101.5	463.9
16	35.1	89.3	110.6	400.0
Average	34.2	71.4	97.7	294.8

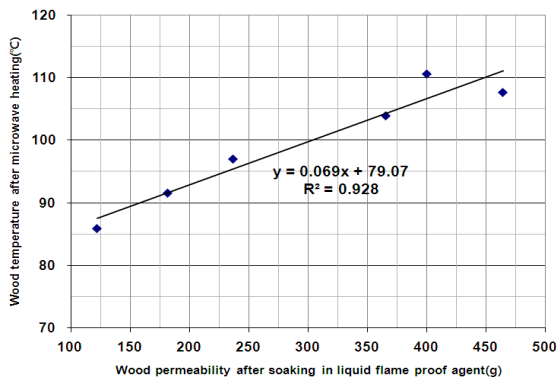
여 보다 명확한 파악을 위한 수단으로 목재 가열에 소요되는 열에너지를 파악하여 침지조건에 따라 Table 8과 같이 비교하였다. 목재의 온도상승을 위해 흡수되어야만 될 열에너지의 양은 가열 전과 후의 온도차이, 시험편의 체적, 열용량(Thermal Capacity)에 따라 전술한 Equation 2와 같이 구할 수 있으며 열에너지는 Table 8과 같이 나타났다.

Table 8. Thermal energy consumed for wood heating (H, cal)

Heating time (min)	Temperature before heating (°C)	W ₀	Room Temperature Soaking		Heat Soaking	
			Temperature after drying for an hour after heating(°C)	H (cal)	Temperature after heating (°C)	H (cal)
6	25	0.985	28.3	966.4	85.8	19699.6
8			33.2	2423.2	91.5	21751.7
10			33.7	2573.3	97.0	23765.3
12			34.2	2723.7	99.5	24691.4
14			40.6	4672.5	101.5	25437.1
16			35.1	2995.0	110.6	28885.0



(a) room temperature soaking



(b) heating soaking

Figure 7. Correlation between wood temperature and flame proof agent infiltration after microwave heating

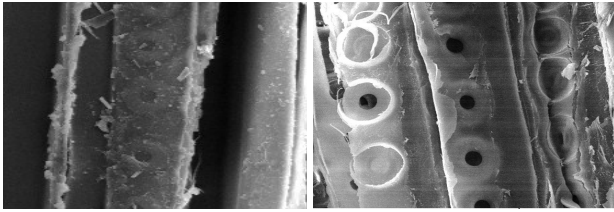
목재의 온도상승에 따른 방염약제의 침투량 상승에 대해

시험편 가열에 소요되는 열에너지는 가열 전·후 온도 변화에 따라 큰 차이가 있는 것으로 나타났다. 이러한 온도조건에 의해 소요되는 열에너지 차이는 목재의 온도상승을 위해 흡수되어야 할 에너지양, 즉 목재 가열에 소요되는 에너지가 높을수록 많은 에너지를 빼앗긴 목재는 그 만큼의 양에 상당하는 에너지를 빨리 되찾아 섬유세포의 내부포화상태 이상 안정화 상태로 되돌아가는 과정에서 많은 양의 방염약제가 흡수된 것으로 사료된다.

한편 상온침지 시험편의 경우 1시간 자연건조를 진행하는 동안 열기가 있는 상태에서 외기의 차가운 공기를 접하면서 목재 단면의 일정하지 않은 습윤 공기층 형성으로 이 수분들이 목재 내부로 돌아가게 되면서 온도분포 저하에 있어 불균일한 분포로 나타난 것으로 사료되며, 방염약제 침투량의 경우 전술한바와 같이 차가운 외기 온도와 접촉으로 인한 섬유세포들의 응축 및 수축 등이 발생되어 방염약제 침지 후 세포간 방염약제의 흡수 및 이동이 제한된 때문으로 판단된다. 따라서 상온 및 열기침지 시의 목재의 미세구조 분석을 통한 방염약제의 세포간 이동 및 결정화 상태의 분석이 필요한 것으로 나타났다.

4.4 방염약제 침지 후 목재 미세구조 및 성분 분석

상온 및 열기침지 시험편의 심재 중심부에 대한 SEM촬영 결과는 Figure 8과 같으며 변재 및 심재 부위 방염약제 침투성분을 분석한 결과는 Figure 9, 10과 같다.



(a)room temperature soaking (b)heat soaking

Figure 8. Pits at heartwood center of wood immersion at room temperature or in heated liquid ($\times 1,600$)

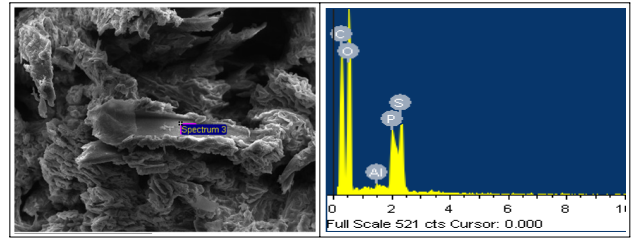
시험편의 심재 중앙부 미세구조를 관찰한 결과 Figure 8 (a)와 같이 세포벽에 배열된 벽공은 대부분 막혀있는 형상으로 타난 반면 (b)는 막혀있는 것과 그렇지 않은 것이 공존하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 (a)의 경우 자연건조 시 목재 외부의 습윤 공기층에서 수분 흡수와 세포간 수축 등으로 내부 침착물 등의 외부로 추출이 어려웠던 것으로 판단된다. (b)의 경우, 전술한 바와 같이 마이크로파로 가열된 시험편 세포 내부 물 분자의 회전운동에 의한 마찰열 발생으로 증기압이 높아져 수분의 확산운동에 의한 벽공에 침착된 추출물 등이 방염약제 침지 시 치환되어 외부로 추출되면서 동시에 제거된 것으로 사료된다.

세포벽을 통한 횡단면 수분확산 중 벽공의 기여도는 온도가 높고 밀도가 클수록 커지는데 온도 120°C 이하, 밀도 $400\sim 800\text{kg}/\text{cm}^3$ 일 경우 수분확산 기여도는 $11.7\sim 24.8\%$ 정도로 나타나는 것으로 보고되고 있다[9]. 따라서 이와 유사한 특성이 있는 본 시험편의 경우 열기침지 시 온도가 높을수록 침투량이 증대되는 원인도 이와 같은 세포벽의 수분 이동 연결 역할을 하는 벽공의 기여도가 높았기 때문으로 판단된다.

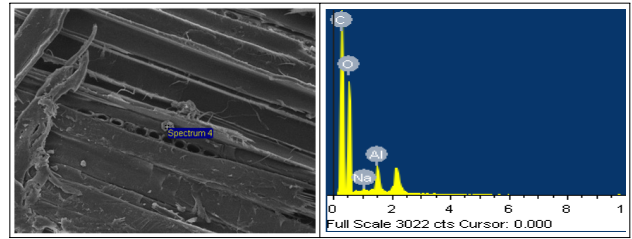
침지조건에 따른 방염약제의 침투성 확인을 위해 침투 후 시험편 부위별로 방염약제 성분을 분석한 결과 Table 4에 나타난 성분들은 목섬유 세포 사이에서 결정화되어 남게 되는 것으로 나타났다. 이는 목재 내부로의 수월한 방염약제 침투를 위한 매개체 역할을 하는 수분이 자연적 증발됨에 따라 순수 약제 성분들만 결정화 되어 잔류한 때문으로 사료된다.

시험편 부위별 방염약제 성분 분석 결과 상온침지 된 시험편의 경우 변재부위 표면부와 심재부위의 중심부 모두 Table 4와 같은 방염약제의 성분이 나타나는 것으로 분석되었으나 실질적인 방염약제의 주성분인 인산성분은 변재부위에서 주로 나타난 반면 심재부에서는 주로 나트륨성분이 나

타나 상온침지 된 시험편의 심재부위로의 방염약제 성분침투는 비교적 어려웠던 것으로 판단된다.

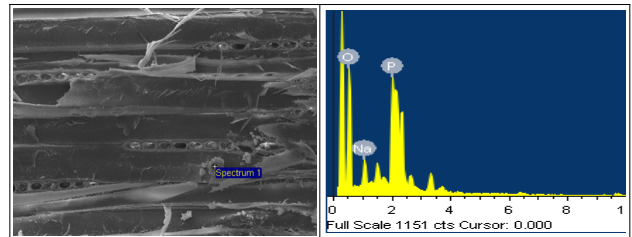


(a) sapwood part (surface)

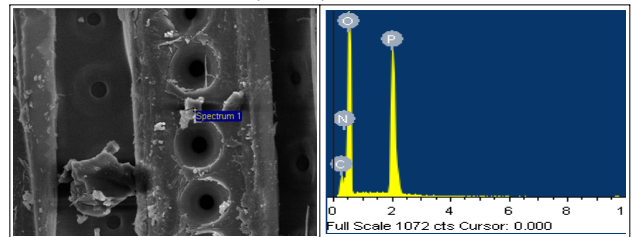


(b) heartwood part (center)

Figure 9. Permeating components of flame proof agent of wood soaked at room temperature



(a) sapwood part (surface)



(b) heartwood part (center)

Figure 10. Permeating components of flame proof agent of wood soaked in heated liquid

한편 열기침지 된 시험편의 경우 변재 및 심재부위에서 높은 방염약제 성분이 분석되었는데 특히 심재 중심부에서는 순수 인산성분이 높게 분석됨에 따라 열기침지 시 방염약제는 목재의 심재부위까지 침투가 가능한 것으로 나타났다. 또한 심재의 벽공 주변에 결정화된 방염약제의 성분도 추출된 것은 전술한바와 같이 열기를 지닌 시험편은 세포벽간의 방염약제 이동이 가능하였던 것으로 사료된다.

5. 결 론

목재 자체의 화재저항성능 향상을 위한 기초연구로 마이크로파로 가열 후 액상의 방염약제가 균등히 침투된 목재의 방염약제 침투량 및 액상 흡수비, 온도와 방염약제 침투성과의 상관성, 방염약제 침투 후 목재의 미세구조와 침투성분 분석을 실시한 결과는 다음과 같다.

- 1) 마이크로파로 가열된 목재의 액상 방염약제 침투조건에 따른 특성을 측정된 결과 열기침지가 상온침지 대비 액상 방염약제의 침투량 증대비가 높았으며 가열시간에 따라 그 양도 함께 변화하는 것으로 나타났다. 이는 열기침지 된 목재가 액상의 방염약제를 안정적으로 균일한 흡수를 하였기 때문으로 판단된다.
- 2) 액상 방염약제의 침투량과 목재 온도와의 상관성을 분석한 결과 액상의 침투효과는 목재의 온도변화에 대한 의존성을 가지는 것으로 판단된다. 또한 마이크로파 가열에 의해 많은 열에너지가 소비된 목재의 열기침지 시 안정화상태로 돌아가기 위한 자연적 수단으로서 많은 양의 액상 방염약제가 흡수된 것으로 판단된다.
- 3) 목재 내부 액상 방염약제의 침투성 분석을 위한 SEM 및 EDS 분석 결과 목재의 가도관, 세포벽 및 벽공 주변에 방염약제가 결정화되어 있는 것으로 나타났으며 상온침지 대비 열기침지 된 시험편의 경우 심재 및 변재 모두 순수 방염약제 성분이 높게 분석됨에 따라 마이크로파로 가열되어 열기를 가진 목재의 액상 방염약제 침지 시 목부 전체 고른 침투가 가능한 것으로 나타났다.

이상 결과와 같이 일반적인 방염제 도포방식이 아닌 목재 자체의 기능성 확보차원에서 마이크로파로 가열된 목재 내부로 대량의 액상 방염약제 침투가 가능한 조건을 제공하여 방염약제의 균일한 침투 메커니즘을 확인하였으며 추후 이와 같은 메커니즘을 통하여 제조된 목재의 난연성 시험이 필요할 것으로 사료된다.

요 약

목재 자체의 화재저항성능 향상을 위한 기초연구로 마이크로파로 가열된 목재의 침지조건별(상온침지, 열기침지)로 액상 방염약제 침투량과 이에 따른 목재 온도와의 상관성,

방염약제 침투 후 목재의 미세구조와 침투성분 분석을 실시한 결과 마이크로파 가열시간이 높아질수록 침투량이 크게 증대되는 것으로 나타났으며 열기침지의 경우 높은 침투량은 물론 안정적인 방염약제 침투가 가능한 것으로 나타났다. 또한 목재의 온도가 80℃ 이상 높은 상태에서는 방염약제 침투량이 증대 되었으며 매우 균일한 방염약제 침투성이 확보되는 것으로 나타나 액상의 방염약제는 목재내부로 침투되기 위한 조건으로서 목재의 온도변화에 대한 의존성을 가지는 것으로 판단된다. 미세구조 분석결과 벽공을 통한 방염약제의 세포간 이동성 향상이 방염약제의 침투량이 증대되는 원인으로 사료되며 침투성분 분석 중 열기침지의 경우 변재 및 심재 내부의 벽공 주변에 결정화된 방염약제 성분이 분석됨에 따라 열기침지 시 방염약제는 목재 심재부위까지 침투가 가능한 것으로 나타났다.

키워드 : 마이크로파, 구조용 목재, 액상 방염약제, 침투성

Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology(No.2010-0012327)

References

1. Lim NG, Her JW, Park CH. [Domestic Architectural Wood Research and Current Situation of Industry and Advanced Wood Material Development Tendency]. Journal of the Korea Institute of Building Construction 2010 Dec;10(6):6-15. Korean.
2. Wood Korea [Internet]. Korea: Flame Retardant Wood; [updated 2008 May 7]. Available from : <http://www.woodkorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=11929>
3. Lee HW, Kim DH. Research on Optimization of Microwave Lumber Drying. Korea Society of Wood Science Technology 2009 Jun;37(4):349-56.
4. Murasaki, 4rd rev. Um YG translator. Industrial

-
- Microwave Application Technology. Seoul (Korea): Gigeon; 1999. p. 114–9. Korean.
5. Butterfield BG, Meylan BA, Um YG. Three Dimensional Structure of Wood, Seoul (Korea): WIT Consulting; 2000. p. 23–4. Korean.
 6. Gyeongdo College Wood Science Research Institute (JA). 3rd rev. Um YG translator. Wood Material Secrets of Wood, Seoul (Korea): Wood Korea Co. Ltd; 2005. p.157–8. Korean.
 7. Jeong HS. Latest Wood Drying Methods, Seoul (Korea): Seoul University Press; 2005. p. 162–8. Korean.
 8. Cho JM. Illustrated world wood. Goyang (Korea): Sunjin–munwhasa; 1998. p. 85–97. Korean.
 9. Jeong HS. Latest Wood Drying Methods, Seoul (Korea): Seoul University Press; 2005. p. 85–6. Korean.