

부피팽창률을 이용한 활엽수 열처리 목재의 섬유포화점 측정

이 승 진¹, 강 석 구¹, 강 춘 원², 강 호 양^{†,1}

¹충남대학교 환경소재공학과, ²전북대학교 주거환경학과

FSP Measurement of Heat-treated Hardwoods Using Volumetric Swelling Method

Seung-Jin Lee¹, Seog-Goo Kang¹, Chun-Won Kang², Ho-Yang Kang^{†,1}

¹Department of Bio-based Materials, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

²Department of Housing Environmental Design, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

Abstract: Specimens of seven hardwood species were heat-treated at three temperature levels of 170, 190 and 210°C. Their FSP's were measured by the volumetric swelling method and compared with the control's. Within a species the FSP decreases as the temperature of heat treatment increases. The FSP's of the controls range from 26.1 to 29.6%, while those of the specimens heat-treated at 210°C from 16.9 to 21.8%. There were no difference of basic density between the heat-treated and control specimens. The color indexes of ash and beech specimens were measured using a colorimeter. It was revealed that the temperature of heat treatment affected on the color more than the treatment time.

Keywords: hardwood, heat treatment, volumetric swelling method, FSP, colorimeter, basic density

1. 서 론

목재는 습윤성재료로 섬유포화점을 기준으로 물성이 달라진다. 섬유포화점 이상에서 목재의 기계적 성질과 치수는 함수율에 무관하게 일정하다. 그러나 섬유포화점 이하가 되면 목재는 함수율이 낮아질수록 수축하고 강도는 증가한다. 이같이 섬유포화점은 목재의 성질을 이해하는데 매우 중요하다.

상온에서 목재의 섬유포화점은 함수율 25~35% 범위인데 목재 온도가 증가할수록 감소한다. 목재 온도가 상승하면 물분자의 활동력이 증가하고 반대로 흡착점의 인력이 감소하기 때문에 흡착점에 붙어 있는 물분자의 수가 감소하기 때문이다.

목재의 섬유포화점은 건조 횟수와 방법에 따라 서로 달라진다. 이를 이력현상이라고 하는데, 목재 건조가 여러 번 반복되거나 고온에서 건조되면 손실된 흡착점 수가 늘어나서 섬유포화점이 낮아진다. 이러한 효과를 이용하여 목재의 치수안정성을 높이는 기술이 개발되었다. 건조목을 160°C 이상에서 열처리하면 목재의 열가수분해가 일어나 헤미셀룰로오스가 분해되고 셀룰로오스와 리그닌의 변형이 일어난다(Garrote et al. 1999). 그 결과 생장응력이 줄고, 셀룰로오스의 결정화도가 증가하고, 흡습성이 현저히 감소한다(Tejada et al. 1997, Bhuiyan et al. 2000, Obataya et al. 2000). 열처리목의 흡습성 감소에는 헤미셀룰로오스의 분해에 의한 흡착점 손실 뿐만 아니라 리그닌의 화학적, 구조적 변화도 역할을 한다는 보고가 있다(Repellin 와 Guyonnet 2005, 김과 강 2005).

2012년 2월 15일 접수; 2012년 3월 30일 수정; 2012년 4월 2일 게재확정

[†] 교신저자 : 강 호 양 (hykang@cnu.ac.kr)

목재의 섬유포화점을 측정하는 방법은 여러 가지가 있으나 일반적으로 간편하게 사용되는 방법은 포화염용액을 이용한 데시케이터법이다. 상대습도 100%에 가까운 포화염용액이 담긴 데시케이터에 목재시편을 넣고 오랜 시간 두어 평형에 도달한 후 함수율을 측정한다. 그러나 이 방법은 높은 상대습도 때문에 데시케이터 내부와 목재에 곰팡이가 쉽게 발생한다.

목재는 섬유포화점 이상에서는 치수변화가 없으며 섬유포화점 이하부터 전건까지 직선적으로 감소한다는 원리를 이용하여 섬유포화점을 찾을 수 있다. Repellin와 Guyonnet (2005)는 부피팽창률법으로 구한 섬유포화점과 DSC (Differential Scanning calorimetry)법으로 구한 섬유포화점이 정비례관계를 가진다고 보고하였다. 본 연구에서는 부피팽창률법을 이용하여 여러 수종의 열처리 후 섬유포화점의 변화를 조사하였다. 열처리 조건에 따른 섬유포화점 차이를 비교하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시수종

오랫동안 상온에 보관하고 있던 판재 중에 가구 재료 많이 사용되고 있는 온대산 활엽수재 7수종을 선별하여 공시수종으로 사용하였다. 물푸레나무(*Fraxinus excelsior*), 너도밤나무(*Fagus sylvatica*), 적참나무(*Quercus rubra*), 졸참나무(*Quercus errata*), 단풍나무(*Acer saccharum*), 오리나무(*alnus glutinosa*), 플라타너스(*Platanus occidentalis*)의 7수종이다. 졸참나무와 플라타너스를 제외한 5수종은 북미산 수입재이다. 졸참나무는 국내 산지에, 플라타너스는 가로수로 식재된 원목에서 얻었다. 판재의 폭은 다양하였으나 두께는 30 mm 내외의 것을 사용하였다.

2.2 공시판재의 열처리

공시판재를 실험용 건조기에서 170, 190, 210 °C의 3가지 온도조건을 적용하여 열처리하였다. 건조기 내부가 목표온도에 도달한 후에 공시판재를 넣고 정해진 처리시간 동안 열처리하였다. 170

와 190°C 온도조건에서는 10시간, 210°C에서는 5시간으로 정하였다. 경험적으로 210°C에서 10시간을 두면 화재가능성이 높기 때문에 다른 처리온도보다 처리시간을 짧게 잡았다.

무처리 시편용 공시판재는 103 ± 2°C 오븐에 넣고 전건시켰다. 열처리된 목재의 함수율은 0%라고 볼 수 있으므로 모든 공시판재는 전건되었다고 볼 수 있다.

2.3 시편제작

열처리된 공시판재와 전건된 무처리시편용 공시판재에서 각각 5개의 시편을 떼어냈다. 시편은 가로, 세로, 높이가 각각 20~30 mm 범위에서 정육면체가 되도록 슬라이딩 테이블톱을 사용하여 가공하였다. 즉시 정도 0.01 g의 디지털 저울로 중량을 측정하였다.

모든 시편은 물에 넣어 4주간 함침시켰다. 포수시키는 것이 목표였으나 활엽수재를 완전히 포수시키려면 오랜 시간이 걸리므로 섬유포화점보다 충분히 높은 함수율에 도달했을 때 시편을 모두 꺼내 비닐주머니에 넣고 밀폐하여 보관하였다.

2.4 기본밀도 및 평형함수율 계산

함침 시편을 비닐주머니에서 꺼내 정도 0.01 g의 디지털 저울로 중량을 잰 후 버니어캘리퍼스로 가로, 세로, 높이를 측정하였다. 가로, 세로, 높이를 곱하여 부피를 계산하였다. 모든 시편을 실내에 노출하여 천천히 건조하면서 반복하여 같은 방법으로 중량과 치수를 측정하였다. 처음에는 2~3일간격으로 후에는 매일 측정하여 약 1달간 진행하였다.

모든 시편이 충분히 평형에 도달하였다고 생각될 때 모든 시편을 103 ± 2°C 오븐에 넣고 전건하였다. 모든 중량 측정치를 식 [1]을 이용하여 함수율로 변환하였다.

$$M = \frac{W - W_{od}}{W_{od}} \times 100\% \quad [1]$$

여기서 M 는 함수율(%), W 는 함수율 $M\%$ 때 중

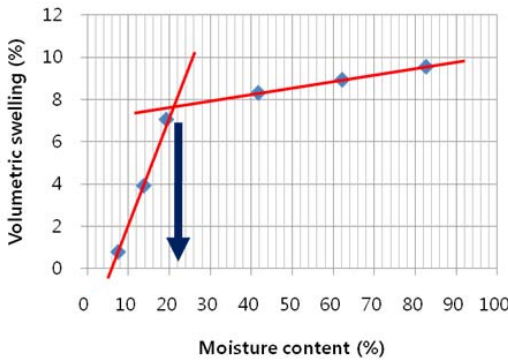


Fig. 1. Measurement of the FSP by the volumetric swelling method.

량(g), W_{od} 는 전건중량(g)이다.

기준밀도(ρ_g)는 함침부피(V_g)와 전건중량(W_{od})을 기준으로 식 [2]를 이용하여 구하였다.

$$\rho_g = \frac{W_{od}}{V_g} \quad [2]$$

여기서 ρ_g 는 기준밀도(g/cm^3), V_g 는 함침부피(cm^3)이다.

부피팽창률은 전건부피(V_{od})를 기준으로 식 [3]을 이용하여 계산하였다.

$$\alpha_V = \frac{V_m - V_{od}}{V_{od}} \times 100\% \quad [3]$$

여기서 α_V 는 부피팽창률(%), V_m 은 함수율 $M\%$ 때 부피(cm^3), V_{od} 는 전건부피(cm^3)이다.

평형함수율은 함수율에 따른 부피팽창률 그래프

을 이용하여 구했다(Fig. 1). 이론적으로 목재는 섬유포화점 이하에서만 수축 또는 팽창하고 그 이상에서는 변화가 없다. 그래프 상에 함수율 30% 주위로 두 개의 직선회귀선을 그어 교차하는 지점의 함수율값이 평형함수율이 된다.

2.5. 재색측정

시편의 재색은 HunterLab MiniScan XE Plus 를 사용하여 측정하였는데 광원은 Xenon flash lamp로 파장 범위는 400~700 nm이었다. 할렬과 용이 등 결함을 피해 시편 표면의 3지점을 무작위로 선정하여 측정하였다. 재색은 물푸레나무와 너도밤나무를 대표로 선정하여 측정하였다.

색차 ΔE^* 는 아래 식을 이용하여 구하였다.

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^*_2 - L^*_1)^2 + (a^*_2 - a^*_1)^2 + (b^*_2 - b^*_1)^2} \quad [4]$$

ΔE^* : 색차(color difference)

L^* : 명도(lightness)

a^* : 적색도(redness)

b^* : 황색도(yellowness)

3. 결과 및 고찰

3.1. 함침함수율

오랜기간 함침한 후에 측정된 시편들의 평균 함수율은 Table 1과 같다. 무처리목재의 함수율을 보면, 목재의 평균 섬유포화점인 30%보다 훨씬 높은 67%에서 130%를 나타냈다. 모든 시편이 충분히 함침되었음을 알 수 있다.

Table 1. Moisture contents of the specimens after soaking in water for four weeks

Temp. of heat treatments	Ash	Beech	Red oak	White oak	Hard maple	Red alder	Sycamore
Con	74.2 (7.2)*	67.3 (2.0)	102.1 (1.1)	67.9 (0.4)	83.1 (0.7)	129.4 (3.4)	116.0 (3.9)
170°C	70.8 (5.3)	61.4 (1.1)	91.9 (0.8)	65.9 (0.7)	83.3 (0.8)	138.6 (1.8)	116.2 (5.7)
190°C	58.5 (0.7)	57.5 (1.9)	79.6 (2.5)	56.6 (0.7)	76.2 (0.9)	124.9 (3.9)	113.0 (4.6)
210°C	55.0 (1.8)	57.5 (1.8)	69.4 (2.8)	NA	71.7 (6.5)	126.9 (2.9)	103.3 (1.5)

* Standard deviation

Table 2. Comparison of the basic densities between the heat-treated and control specimens

Temp. of heat treatments	Ash	Beech	Red oak	White oak	Hard maple	Red alder	Sycamore
Con	0.593 (0.008)*	0.568 (0.006)	0.553 (0.004)	0.696 (0.004)	0.582 (0.003)	0.395 (0.019)	0.486 (0.006)
170°C	0.610 (0.024)	0.576 (0.008)	0.553 (0.004)	0.709 (0.008)	0.573 (0.006)	0.376 (0.006)	0.493 (0.003)
190°C	0.596 (0.007)	0.588 (0.004)	0.559 (0.002)	0.707 (0.003)	0.588 (0.004)	0.393 (0.005)	0.490 (0.006)
210°C	0.602 (0.006)	0.58 (0.008)	0.553 (0.008)	NA	0.587 (0.023)	0.388 (0.006)	0.494 (0.007)
P-value	0.231	0.153	0.236	0.100	0.234	0.054	0.121

* Standard deviation

Table 1에서 보이는 바와 같이 모든 수종은 동일한 기간 함침하더라도 열처리 온도가 높을수록 낮은 함수율을 나타낸다. 열처리 시간은 210°C 온도조건에서 5시간으로 170와 190°C 온도조건의 10시간보다 적었지만 제일 낮은 함수율을 나타냈다. 이는 처리시간보다 온도가 목재의 물성변화에 더 영향한다는 연구결과(Kang 2009)를 뒷받침한다.

3.2. 기본밀도

열처리온도에 따른 수종별 평균 기본밀도(ρ_g)와 표준편차를 Table 2에 비교하였다. 분산분석결과, 한 수종 내에서 열처리온도 간에는 5%수준에서 모든 수종에서 유의차가 없었다.

기본밀도와 함침함수율의 관계를 알기 위해 모든 시편의 두 함수를 Fig. 2에 나타냈다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 두 함수는 부의 직선회귀 관계를 가지고 있으며 $R^2 = 0.76$ 을 보였다. 즉 기본밀도가 감소할수록 높은 함침함수율을 가진다는 것을 알 수 있었다.

열처리 시편과 무처리가 다른 경향을 보이는지를 알기 위해 무처리와 열처리온도별로 회귀식을 구하였다. 직선회귀식의 기울기와 절편은 Table 3과 같다. 흥미로운 점은 열처리온도가 증가할수록 기울기가 약간씩 낮아지며, 절편 또한 적어진다는 사실이다. 다시 말해 높은 온도에서 열처리된 목재는 함침함수율에 대한 밀도의 영향이 적어진다고 말할 수 있다. 목재의 밀도는 목질 양과 관련있고, 나아가 결합수양과 관련이 있다. 열처리온도가 높을수록 흡착력이 떨어져 흡착할 수 있는 결합수

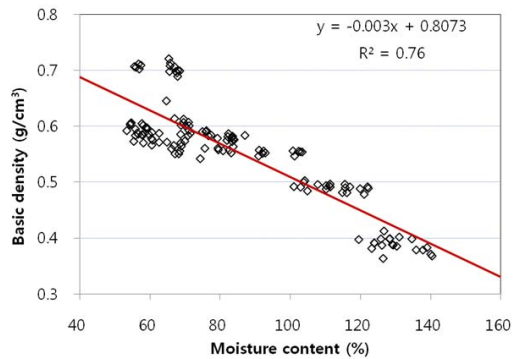


Fig. 2. A plot of the basic density and soaking MC of the heat-treated specimens and a linear regression.

Table 3. The slopes and interceptions of the linear regressions for the plots of the basic density and soaking MC of the heat-treated specimens and a linear regression.

Temp. of heat treatments	Slope	Interception
Con	-0.0033	0.8560
170	-0.0032	0.8463
190	-0.0032	0.8162
210	-0.0027	0.7552

양이 적어지기 때문으로 설명할 수 있다. 열처리온도가 높아질수록 함침함수율 중 결합수가 차지하는 비율이 적어지므로 밀도와 무관해진다.

3.3. 건조그래프

실내에서 건조하는 동안 시편들의 함수율 변화

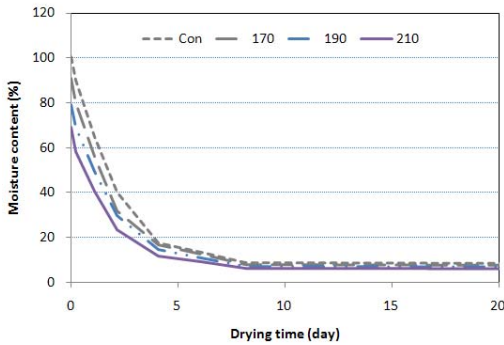


Fig. 3. Typical drying curves of the heat-treated and control specimens.

는 Fig. 3과 같다. Fig. 3은 여러 수종의 건조그래프 중 대표적인 적참나무 시편을 표시한 것이다. 앞에서 설명한 바와 같이 열처리온도에 따라 함침함수율이 달랐으므로 초기함수율은 열처리 온도에 따라 차이를 나타냈다. 그러나 5일이 경과한 후에는 모든 시편이 거의 같은 함수율을 나타내고 있다. 이러한 건조경과는 모든 수종에서 거의 일치한다.

3.4. 평형함수율

부피팽창률을 이용하여 구한 섬유포화점은 Table 4와 같다. 수종에 따라 차이가 있으나 무처리재의 평형함수율은 26.1%에서 29.6%까지 분포하였다. 같은 수종 내에서 열처리 온도가 증가할수록 평형함수율은 감소함을 보였다. 가장 높은 온도인 210°C에서는 16.9%에서 21.8%의 분포를 보였다.

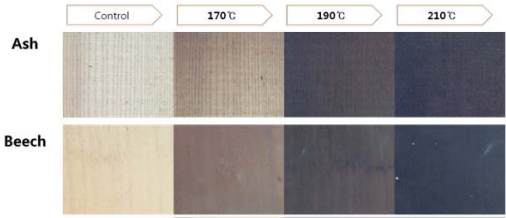


Fig. 4. Photos of the surfaces of the heat-treated and control specimens.

3.4. 색차

열처리 시편과 무처리 시편의 표면을 1 mm 정도 수압대패로 절삭한 후 재색을 사진으로 찍어 비교하였다(Fig. 4). 열처리 온도가 증가할수록 재색이 짙어졌다. 이 시편들의 재색을 색차계로 측정하여 결과를 Table 5에 나타냈다. 무처리 시편의 재색과 비교한 색차값 ΔE^* 은 170°C에서 물푸레나무가 26.35, 너도밤나무가 28.81로 짙어졌다. 열처리 온도가 증가할수록 색상이 짙어진 정도를 증가한 색차값으로 비교할 수 있다. 210°C는 170, 190°C보다 처리시간이 짧았음에도 불구하고 제일 짙은 재색을 나타냈다. 이는 처리온도가 처리시간보다 재색변화에 더 민감함을 의미한다.

4. 결론

활엽수 7수종을 3개의 온도조건으로 열처리하

Table 4. The FSP's by the volumetric swelling method

Species	Temperature of Heat treatment			
	Con	170	190	210
Ash	25.5 (0.9)*	24.5 (2.0)	22.2 (1.2)	21.8 (2.4)
Beech	26.1 (2.0)	23.7 (1.9)	21.9 (1.6)	19.8 (1.0)
Red oak	29.6 (1.8)	20.7 (1.5)	18.3 (1.8)	17.6 (2.8)
White oak	26.5 (1.9)	23.5 (1.8)	18.7 (1.0)	NA
Hard maple	27.1 (1.9)	25.6 (1.0)	19.7 (0.7)	19.3 (1.7)
Red alder	27.5 (1.4)	25.4 (2.7)	17.4 (2.5)	16.9 (1.9)
Sycamore	28.9 (2.0)	28.5 (1.6)	24.5 (1.0)	21.6 (2.1)

* Standard deviation

Table 5. Color indexes of the heat-treated and control specimens

Species	Temp. of Heat treatment	Color index			
		L^*	a^*	b^*	ΔE^*
Ash	Con	54.57	13.65	32.35	---
	170	33.69	10.95	16.51	26.35
	190	27.90	5.16	8.17	36.99
	210	25.16	3.03	4.45	41.91
Beech	Con	58.45	14.0	34.31	---
	170	34.56	12.65	18.27	28.81
	190	27.39	7.16	9.90	40.09
	210	24.53	3.76	5.22	45.84

였다. 이들의 섬유포화점을 부피팽창율법으로 구하여 비교하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 동일한 기간 함침하더라도 열처리 온도가 높을수록 낮은 함수율을 나타낸다. 열처리 시간은 210°C 온도조건에서 5시간으로 170와 190°C 온도조건의 10시간보다 적었지만 제일 낮은 함수율을 나타냈다.

2) 한 수종 내에서 열처리 온도 간 기본밀도의 차이는 없었다.

3) 모든 시편에서 기본밀도가 감소할수록 높은 함침함수율을 나타냈으나, 열처리 온도가 높을수록 함침함수율에 대한 밀도의 영향이 적어졌다.

4) 같은 수종 내에서 열처리 온도가 증가할수록 평형함수율은 감소함을 보였다. 무처리재의 평형함수율은 26.1%에서 29.6%, 가장 높은 온도인 210°C에서는 16.9%에서 21.8%의 분포를 보였다.

5) 물푸레나무와 너도밤나무의 재색을 측정할 결과, 210°C는 170°C, 190°C보다 처리시간이 짧았음에도 불구하고 제일 짙은 재색을 나타냈다. 이는 처리온도가 처리시간보다 재색변화에 더 영향하였음을 뜻한다.

사 사

본 연구는 산림청 '2009년 임업기술연구개발사업'의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

참 고 문 헌

- Bhuiyan, M. T. R., N. Hirai, and N. Sobue. 2000. Changes of crystallinity in wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions. *Journal of Wood Science* 46(6): 431-436.
- Garrote, G., H. Dominguez, and J. C. Parajo. 1999. Hydrothermal processing of lignocellulosic materials. *Holz als Roh- und Werkstoff* 57(3): 191-202.
- Kang, H.-Y. 2009. Improving the Dimensional Stability of Spruce and Birch Boards by Heat-Treatment at 190 and 210°C. *한국가구학회지* 20(6): 560-565.
- Obataya, E., F. Tanaka, M. Norimoto, and B. Tomita. 2000. Hygroscopicity of heat-treated wood I: Effects of after-treatments on the hygroscopicity of heat-treated wood. *Mokuzai Gakkaishi* 46(2): 77-87.
- Repellin, V. and R. Guyonnet. 2005. Evaluation of heat-treated wood swelling by differential scanning calorimetry in relation to chemical composition. *Holzforchung* 59(1): 28-34.
- Tejada, A., T. Okuyama, H. Yamamoto, and M. Yoshida. 1997. Reduction of growth stress in logs by direct heat treatment: Assessment of a commercial-scale operation. *Forest Products Journal* 47(9): 86-93.
- 김수원, 강호양. 2005. 열처리 및 증기처리 라디에타 파인 유령목의 잔류수지율 및 재색변화. *목재공학* 33(4): 30-37.