

PEG 주입 침엽수 시편의 열처리 후 PEG 잔류량과 평형함수율 측정*¹

홍 승 현*² · 김 정 호*³ · 임 호 목*² · 강 호 양*^{2†}

Measuring PEG Retentions and EMCs of PEG Impregnated Softwood Specimens after Heat-treatment*¹

Seung-Hyun Hong*² · Chung-Ho Kim*³ · Ho-Mook Lim*² · Ho-Yang Kang*^{2†}

요 약

PEG 주입을 통해 열처리 중 목재의 균열을 방지하기 위한 연구에 필요한 기초자료를 제공하기 위해 본 연구가 수행되었다. 국내에서 사용되는 대표적인 침엽수 세 수종의 소시편을 이용하여 PEG 분자량에 따른 침투 속도와 잔류량, 열처리 후 잔류량, 평형함수율 등을 조사하였다. PEG400의 평균 잔류량은 수종별 기본밀도에 반비례하였으며 다른 분자량 PEG에서도 비슷한 경향을 나타냈다. 한 수종 내에서는 PEG 분자량이 클수록 잔류 PEG 양이 감소하는 경향이 뚜렷하다. PEG 주입에 의해 함수율이 2% 내에서 증가하거나 감소하였으며, 시편의 평균 기본밀도는 최고 16.8%까지 증가하였다. 열처리에 의한 중량감소율은 PEG400 시편이 PEG600, PEG1000 보다 컸다. 낮은 분자량의 PEG가 더 많이 용출되었다고 볼 수 있다. 평형함수율은 상대습도가 낮을 때 (32%RH) 세 수종 모두 PEG 주입 시편과 무처리 시편의 차이가 없었으나, 상대습도가 증가할수록 PEG 주입 시편이 무처리 시편보다 높게 나타났다.

ABSTRACT

This study was carried to provide basic data for the research of the effect of PEG impregnation on preventing wood from cracking during heat treatment. Three popular softwood species were selected for investigating the PEG penetration rate and retention depending on PEG molecular

*¹ 접수 2012년 8월 8일, 채택 2013년 3월 18일

*² 충남대학교 환경소재공학과, Dept. of Bio-based Materials, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

*³ 공주대학교 조형디자인학부, Dept. of Formative Design, Kongju National University, Gongju 314-701, Korea

† 교신저자(corresponding author) : 강호양(e-mail: hykang@cnu.ac.kr)

weight, PEG retention after heat treatment and their EMCs. The average retentions of PEG400 were reversely proportional to the basic densities of three species and those of the other PEGs showed similar behaviour as well. It is obvious that PEG retention decreased as PEG molecular weight increased with a species. PEG impregnation increased or decreased the moisture contents of the specimens within 2%, and increased their basic densities by 16.8% as a maximum. The Weight Percentage Losses of PEG400 during heat treatment were the largest among three PEG levels, which implied that lower molecular weight PEG leached more than the higher. There was less difference in EMC between PEG impregnated and control specimens at low RH, but their difference increased at high RH.

Keywords: polyethylene glycol (PEG), impregnation, heat treatment, sorption isotherm, saturated salt solution method, *Pinus densiflora*, *Pseudotsuga menziesii*, *Tsuga heterophylla*, basic density

1. 서 론

수침고목재의 건조 중 균열을 막기 위해 사용되는 polyethylene glycol (PEG, HO-(CH₂CH₂O)_n-H)는 수용성 비이온 계면활성제로 에테르기의 산소가 목재 세포벽에 있는 셀룰로오스의 수산기와 쉽게 결합한다 (Ralph, 2006). 물 분자를 밀어내고 세포벽에 결합된 PEG 분자는 건조 중 세포가 수축하는 것을 방해하여 균열이 발생하지 않도록 한다.

PEG는 일반목재의 천연건조나 인공건조 중에 발생하는 건조결함을 줄이는 방법으로도 추천되어 왔다 (Stamm, 1959; Mitchell and Wahlgren, 1959; Mackay, 1972; Alma et al., 1996). Ralph (2006)는 난건 조수종인 *Eucalyptus regnans*의 건조결함을 줄이기 위해, Mitchell and Iverson (1961)은 생재 목조각의 균열을 방지하기 위해 PEG를 사용하였다.

일반목재에 PEG를 주입하기 위해서는 침투율을 높이는 것이 제일 필요하다. PEG는 수용성이기 때문에 목재를 미리 물에 함침하여야만 PEG 용액과 자유수의 상호교류기작이 일어나 침투가 잘 일어난다 (Loughborough, 1948). PEG 침투율은 목재비중의 영향을 받으며 (Ralph and Edwards, 2004), 높은 분자량의 PEG (1600-21,700)는 온도가 높을수록 목재에 잘 침투된다 (Yamaguchi et al., 1999)고 밝혀졌다. 그리고 여러 가지 분자량의 PEG를 처리했을 때 목재의 세포벽은 낮은 분자량을 선택적으로 투과시킨다 (Jeremic

and Cooper, 2009)는 보고도 있다. Wallstrom and Lindberg (1995)는 진공-가압 방식으로 PEG-1500을 *Pinus sylvestris* 블록에 주입하는데 블록 중량이 20%나 증가하였지만 세포벽에는 낮은 분자량의 PEG만 약간 들어갔으며 세포벽의 팽창은 거의 감지되지 않았다고 보고하였으며, 세포벽 침투를 위해서는 낮은 분자량의 PEG가 필요하다고 결론지었다.

PEG 주입 목재는 일반목재와 강도차이를 나타낸다. Bjurhager et al. (2010)은 *Quercus robur* L.를 PEG600으로 처리하여 탄성계수를 측정된 결과, 섬유방향 인장탄성계수는 아주 약간 영향을 받는데 반해 방사방향 압축탄성계수는 50%까지 감소하였으며, PEG 농도에 따른 차이는 섬유방향 인장탄성계수는 전혀 없는데 반해 방사방향 압축탄성계수는 큰 차이를 보였다고 보고하였다. 이는 PEG의 농도가 높으면 방사조직에 많이 축적되어 방사방향 강도를 낮추기 때문으로 설명하였다.

최근 개발된 목재의 열처리 기술은 목재의 치수안정성과 내후성을 높이는 장점이 있다 (Kang, 2009; Yilgor and Kartal, 2010; Korkut et al., 2010; Borrega and Karenlampi, 2010; Poncsak et al., 2011). 그러나 목재가 160°C 이상의 고온에 노출되기 때문에 열처리 중 균열이 발생하기도 한다. 열처리 전에 PEG를 주입한다면 균열 발생의 가능성을 낮출 수 있을 것이다.

본 연구는 PEG 주입 목재의 열처리를 위해 필요한

기초자료를 조사하기 위해 진행되었다. 국내에서 사용되는 대표적인 침엽수 세수종의 소시편을 이용하여 PEG 분자량에 따른 침투 속도와 잔류량, 열처리 후 잔류량, 평형함수율 등을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시시편의 제작

공시수종은 국내 건축재에 가장 많이 사용되는 소나무(*Pinus densiflora*), Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*), western hemlock (*Tsuga heterophylla*)의 세 종류로 정하였다. 인천의 제재소에서 제제한 30 mm 두께 판재를 구입하여 즉시 실험장소로 이동하여 폭 30 mm, 길이 50 mm의 시편으로 절단하였다. PEG 4 수준 × 포화염용액 4 수준 × 2 반복을 위한 32개 시편을 수종별로 만들었다. 모든 시편을 동일한 공시판재에서 절단하였다.

2.2. 공시시편의 전건 및 침지

PEG 주입 과정에서 공시시편의 함수율과 PEG 침투량을 정확히 예측하기 위해서는 모든 공시시편의 전건 무게를 먼저 알아야 하므로 모든 공시시편을 $103 \pm 2^\circ\text{C}$ 오븐에서 향량이 도달할 때까지 건조하여 중량을 정도 0.01 g의 디지털저울로 측정하였다.

모든 전건시편을 물에 침지시키고 주기적으로 몇 개의 시편을 꺼내 중량을 측정하여 함수율을 계산하였다. 10일 후에 모든 시편을 꺼내 중량을 측정하였다. 증류수를 사용하여 침지법으로 함침부피를 측정하여 기본밀도(전건중량-생채부피 기준)을 아래 식 (1)로 계산하였다.

$$\rho_g = \frac{W_{od}}{V_g} \quad (1)$$

여기서 ρ_g = 기본밀도(g/cm^3), W_{od} = 전건중량(g), V_g = 생채부피(cm^3)이다.

2.3. PEG 주입

분자량 400, 600, 1000의 3종류 PEG를 사용하였다. 중량비 PEG 1 : 물 2로 섞어 33% 용액을 만들었다. 분자량 400과 600은 액상이나 분자량 1000은 고체이기 때문에 물의 온도를 90°C 로 높여 녹였다. PEG 용액의 이동이 섬유직각방향으로만 일어나도록 횡단면을 핫멜트로 도포하였다.

각 공시시편의 중량증가율과 함수율을 계산할 때는 핫멜트에 의한 중량증가분을 감하였다. 마구리 도포된 공시시편을 PEG 용액에 10일 동안 함침시켰으며 중간에 주기적으로 중량을 측정하였다. 10일 후 모든 공시시편을 꺼내 중량을 측정하고, $103 \pm 2^\circ\text{C}$ 오븐에 넣어 향량에 도달할 때까지 건조하였다.

2.4. 열처리

전건한 PEG 공시시편과 무처리 공시시편을 220°C 까지 온도를 올릴 수 있는 건조기에서 열처리를 하였다. 건조기의 잔적 용적은 폭 700 mm, 깊이 800 mm, 높이 600 mm이다. 재간 풍속은 평균 4 m/s를 유지하였으며 습도는 조절하지 않았다. 열처리 스케줄은 다음과 같다. 상온에서 120°C 까지 1시간 동안, 120°C 에서 190°C 까지 6시간동안 상승시켰으며 이후 190°C 를 2시간 유지한 후에 냉각하였다. 열처리를 마친 모든 공시시편의 함수율은 확인을 위해 $103 \pm 2^\circ\text{C}$ 오븐에서 향량에 도달할 때까지 건조하였다.

2.5. 흡착등온곡선

포화염용액법을 이용하여 여러 상대습도에서 시편들의 평형함수율을 측정한후 이를 이용하여 흡착등온곡선을 구하였다. 열처리 후 전건을 한 시편들을 4종의 포화염용액(Table 1)이 들어있는 데시케이터에 넣고 70일간 실온(20°C)에서 흡습시켰다. 외기의 차단을 위해 데시케이터 뚜껑 모서리에 바세린을 발라 몸체와 밀착되게 하였다. 주기적으로 대표되는 시편의 중량을 측정하면서 모든 시편이 평형에 도달하였다고 생각되었을 때 흡습을 멈추고 모든 시편의 중량을

Table 1. Relative humidities of saturated salt solutions used for this experiment

Saturated salt solution	RH (%) at 20℃
CaCl ₂ · 2H ₂ O	32.0
NaBr	58.0
(NH ₄) ₂ SO ₄	80.5
NaSO ₄	95.0

측정하였다. 중량 측정 후 103 ± 2℃오븐에 넣고 향량에 도달할 때까지 건조하여 전건중량을 측정하였다. 전건중량을 이용하여 모든 공시시편의 평형함수율을 식 (2)을 이용하여 계산하였다.

$$EMC = \frac{W_{eq} - W_{od}}{W_{od}} \times 100\% \quad (2)$$

여기서 EMC = 평형함수율(%), W_{eq} = 흡습 후 중량(g), W_{od} = 전건중량(g) 이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 함침함수율과 기본밀도

10일간 물에 침지한 후에 측정한 공시시편 평균 함수율은 소나무, Douglas-fir, western hemlock이 각각 95.8%, 45.1%, 95.1% 였고, 수침법으로 구한 32개 시편의 평균 기본밀도는 소나무, Douglas-fir, western hemlock이 각각 0.41 ± 0.05 g/cm³, 0.55 ± 0.02 g/cm³, 0.35±0.02 g/cm³였다.

3.2. PEG 주입 중 공시시편의 중량 변화

개별 수종의 PEG 주입 중 중량변화는 PEG 분자량에 상관없이 비슷한 형태를 보였다. 대표적으로 PEG400에 담긴 시편의 중량증가 그래프를 Fig. 1에 나타냈다. 세 수종 모두 초기부터 3-4일까지 중량이 급격하게 증가하였으며 그 후에는 소나무는 조금 감소하였으며, Douglas-fir는 약간 증가하였으며, western hemlock은 거의 정지하였다(Fig. 1). 물에 함침하였던 시편을 PEG에 담갔기 때문에 증가한 중량이 모두 침투한

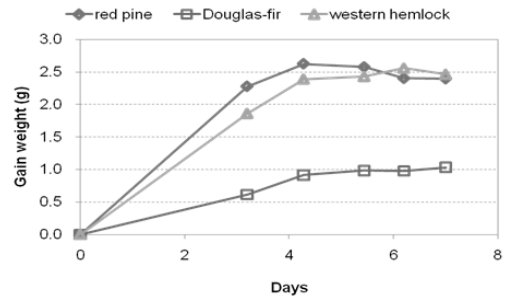


Fig. 1. Gain Weights of the specimens soaked in PEG400 solution.

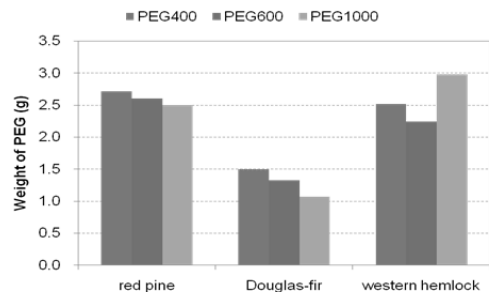


Fig. 2. Weights of PEG retentions in the specimens after oven-drying.

PEG 중량이라고는 볼 수 없다. 삼투압에 의해 일부 수분이 빠져나오거나 PEG용액에 있는 수분이 침투할 수도 있기 때문이다.

3.3. 전건 후 PEG 잔류량

PEG 주입 후 전건시킨 공시시편의 중량에서 최초 전건중량을 제하여 잔류 PEG 중량을 계산하였다. 평균 값을 Fig. 2에 나타냈다. Western hemlock의 PEG1000을 제외하면, 한 수종 안에서 PEG 분자량이 클수록 잔류 PEG 양이 감소하는 경향이 뚜렷하다. Western hemlock PEG1000의 잔류량이 낮은 분자량보다 더 큰 이유는 확실히 밝혀지지 않았으나 세 수종 중에 western hemlock의 투과율이 제일 높다는 것이 한 가지 이유가 될 수 있을 것 같다. 투과율이 좋기 때문에 분자량이 크더라도 침투가 잘되고 분자량이 크기 때문에 일단 잔류하면 중량이 더 많이 증가한다고 예상할 수 있다.

Table 2. Weights of PEG retentions after oven-drying and P-values for the statistical analyses between PEG molecular weights

Species	Treatment	Weight of PEG (g)	P-value
Red pine	PEG400	272 ± 0.15 ^{a)}	0.468
	PEG600	260 ± 0.08	
	PEG1000	250 ± 0.14	
Douglas-fir	PEG400	150 ± 0.32	0.190
	PEG600	133 ± 0.18	
	PEG1000	107 ± 0.11	
Western hemlock	PEG400	251 ± 0.03	0.004 ^{**}
	PEG600	224 ± 0.10	
	PEG1000	298 ± 0.32	

a) sample standard deviation

잔류 PEG 중량을 분산분석한 결과 소나무와 Douglas-fir는 PEG 분자량에 따른 차이가 없는 것으로 나타났으나 western hemlock은 차이가 있는 것으로 나타났다(Table 2). t-검정으로 한 쌍씩 비교한 결과 분자량에 따른 차이가 5% 유의수준에서 모두 있는 것으로 나타났다.

3.4. PEG 주입 중 함수율 변화

PEG 주입 중 목재 내 PEG 증가와 함께 함수율도 증가하는지를 조사하였다. 전체 중량 증가분에서 PEG 증가분을 뺀 값을 함수율로 환산하였다(식 (3)).

$$\Delta MC = \frac{\Delta W_{wood} - W_{PEG}}{W_{od}} \times 100\% \quad (3)$$

여기서 ΔMC = 증가된 함수율, ΔW_{wood} = PEG 주입에 의해 증가한 목재중량, W_{PEG} = 잔류 PEG 중량이다.

PEG 주입에 따른 함수율 변화는 2% 이내로 크지 않지만 수종에 따른 차이는 분명히 나타났다(Fig. 3). 분산분석결과 세 수종이 모두 고도의 유의차를 보였다. PEG 주입 전 소나무, Douglas-fir, western hemlock의 평균함수율이 95.8%, 45.1%, 95.1%였다. 가장 낮은 함수율인 Douglas-fir는 함수율이 감소한데 반해 높은 함수율인 western hemlock은 함수율이 증가하였다.

한 수종 내 PEG 분자량 간 함수율변화를 통계분석

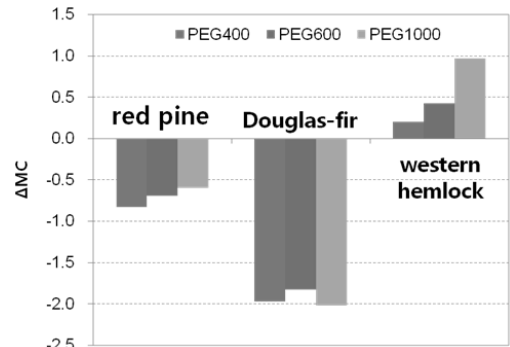


Fig. 3. MC changes of the specimens during soaking in PEG solutions

한 결과 소나무와 Douglas-fir는 유의차가 없었으며, western hemlock은 고도의 유의차를 보였다. 세 수종 중 western hemlock의 투과율이 가장 높고, Douglas-fir가 가장 낮은 것으로 알려졌다.

3.5. PEG 주입 시편의 기본밀도

PEG 주입 시편의 기본밀도를 식 (1)을 이용하여 계산하였다. PEG 주입 시편의 생재부피는 직접구하기 어렵기 때문에 PEG 주입 전 생재부피를 사용하였다. PEG 주입 시편의 기본밀도는 주입 전보다 모두 증가하였다(Fig. 4). 소나무가 평균 14.9%, Douglas-fir가 평균 5.6%, western hemlock이 평균 16.8% 증가하

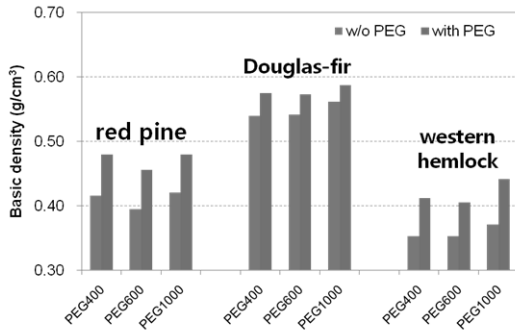


Fig. 4. Basic densities of the specimens before and after PEG pretreatment

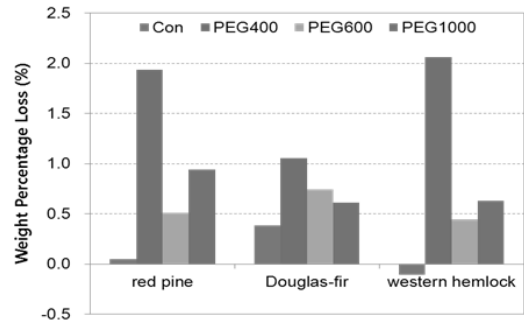


Fig. 5. Weight Percentage Losses of the PEG pretreated specimens after heat treatment

었다. 증가한 순서는 밀도와 반비례하여 밀도가 가장 큰 Douglas-fir가 가장 적게 증가하였다. PEG 분자량과 밀도 증가율은 상관관계를 보이지 않았다.

3.6. 열처리에 의한 중량감소

190℃ 열처리 전후의 중량 감소율을 식 (4)와 같이 계산하였다. PEG 주입 시편의 중량 감소는 Fig. 5에 보이는 바와 같이 모든 수종에서 무처리 시편보다 컸다. 이는 두 가지로 해석할 수 있다. PEG 주입 시편이 무처리보다 열분해가 더 많이 일어났거나, 또는 열처리 과정에서 PEG 용출이 일어났다고 볼 수 있다.

$$Weight\ Percentage\ Loss = \frac{W_{bf,heat} - W_{af,heat}}{W_{od}} \times 100\% \quad (4)$$

여기서 *Weight Percentage Loss* = 중량감소율(%), *W_{bf,heat}* = 열처리 직전 중량(g), *W_{af,heat}* = 열처리 직후 중량(g)이다.

후자의 가능성이 더 높는데, 이는 'PEG 주입 시편의 중량감소는 PEG 분자량에 따라 차이를 보인다(Fig. 5)'는 사실에 의해 뒷받침된다. 모든 수종에서 PEG400 시편의 중량감소가 PEG600, PEG1000보다 크다. 분산분석 결과에 따르면 Douglas-fir는 PEG 분자량 간 유의차가 없으나 다른 두 수종은 고도의 유의차(p-value <<0.01)를 보였다.

3.7. 흡착등온곡선

포화염용액법을 이용하여 측정한 열처리시편들의 흡착등온곡선을 Fig. 6에 비교하였다. Fig. 6의 좌측 상단 그래프에 3수종 무처리재의 흡착등온곡선을 비교하였다. 낮은 평형습수율에서는 수종간 차이가 적었으나 80% 이상 높은 상대습도에서는 western hemlock, 소나무, Douglas-fir 순으로 높은 평형습수율을 나타냈다.

Fig. 6의 나머지 세 그래프는 수종별 PEG 주입 시편과 무처리 시편의 흡착등온곡선을 비교한 것이다. 세 수종 모두 낮은 상대습도(32%RH)에서는 PEG 주입 시편과 무처리 시편의 차이가 없었으나, 상대습도가 증가할수록 PEG 주입 시편의 평형습수율이 무처리 시편보다 증가하였다. 소나무와 western hemlock는 그 차이가 컸으나 Douglas-fir는 비교적 적었다. Douglas-fir의 PEG 침투량과 잔류량이 가장 적었기 때문인 것으로 생각된다. 수종 내 PEG 분자량 간 차이는 거의 없는 것으로 보인다.

4. 결론

PEG 주입 목재의 열처리에 관한 연구에 필요한 기초자료를 조사하기 위해 국내에서 사용되는 대표적인 침엽수 세 수종의 PEG 분자량에 따른 침투 속도와 잔류량, 열처리 후 잔류량, 평형습수율 등을 조사하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

PEG 주입 침엽수 시편의 열처리 후 PEG 잔류량과 평형함수율 측정

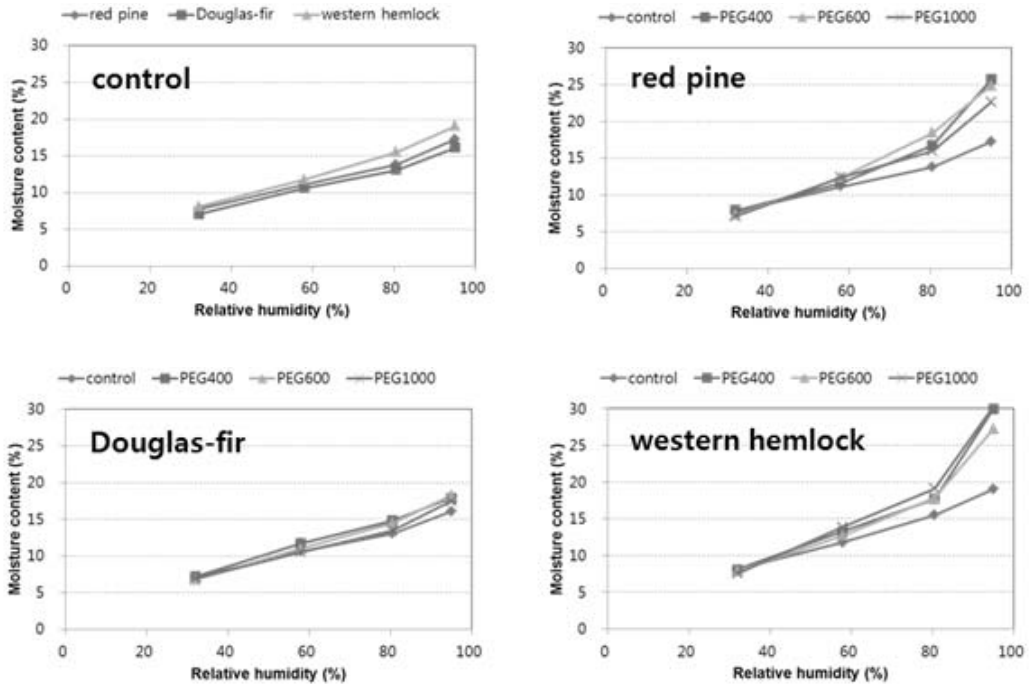


Fig. 6. Adsorption isotherms of the control and PEG pretreated specimens after heat treatment

1) PEG400의 평균 잔류량은 소나무가 2.72g으로 제일 많았으며, western hemlock이 2.51g으로 두 번째였으며, Douglas-fir이 1.50g으로 제일 적었다. 이는 수종별 기본밀도와 역순이다.

2) 한 수종 내에서는 PEG 분자량이 클수록 잔류 PEG 양이 감소하는 경향이 뚜렷하다. western hemlock PEG1000은 잔류 PEG 양이 예외적으로 컸다.

3) PEG 주입 과정에서 western hemlock은 함수율이 증가하였으나, 소나무와 Douglas-fir는 감소하였다. 이 현상은 PEG 분자량에 상관없이 나타났으며 함수율 변화는 2% 이내였다.

4) PEG 주입 시편의 평균 기본밀도는 주입 전에 비해 소나무는 14.9%, Douglas-fir는 5.6%, western hemlock는 16.8% 증가하였다.

5) 열처리에 의한 중량감소율은 2% 이내로 PEG 400이 PEG600, PEG1000 보다 컸다. 낮은 분자량의 PEG가 더 많이 용출되었다고 볼 수 있다.

6) 포화염용액법으로 측정한 평형함수율은 세 수종 모두 낮은 상대습도(32%RH)에서는 PEG 주입 시

편과 무처리 시편의 차이가 없었으나, 상대습도가 증가할수록 PEG 주입 시편이 무처리 시편보다 높게 나타났다.

사 사

“이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2012004392).”

참 고 문 헌

- Alma, M. H., H. Hafizoglu and D. Maldas. 1996. Dimensional stability of several wood species treated with vinyl monimers and polyethylene glycol-1000. International Journal of Polymer Material 32: 93~99.
- Borrega, Marc and P. Karenlampi. 2010. Hygroscopicity of heat-treated Norway spruce (*Picea abies*) wood. Holz als Roh-und Werkstoff 68(2): 233~235.

3. Jeremic, Dragica and Paul Cooper. 2009. PEG quantification and examination of molecular weight distribution in wood cell walls. *Wood Science and Technology* 43(3~4): 317~329.
4. Bjurhager, Ingela, Jonas Ljungdahl and Lennart Wallströ. 2010. Towards improved understanding of PEG-impregnated waterlogged archaeological wood: A model study on recent oak. *Holzforschung* 64(2): 243~250.
5. Kang, H. Y. 2009. Improving the Dimensional Stability of Spruce and Birch Boards by Heat-Treatment at 190 and 210°C. *Journal of Korea Furniture Society* 20(6): 560~565.
6. Korkut, Suleyman, S. Karayilmazlar, S. Hiziroglu, T. Sanli. 2010. Some of the Properties of Heat-Treated Sessile Oak (*Quercus petraea*). *Forest Products Journal* 60(5): 473~480.
7. Loughborough, W. K. 1948. Chemical seasoning: Its effectiveness and present status. U.S. Forest services Forest Products Laboratory Report, D1721.
8. Mackay, J. F. G. 1972. The emergence, development and control of checking in Tasmanian *Eucalyptus obliqua*. *Holzforshung* 26(4): 121~124.
9. Michell, H. L. and H. E. Wahlgren. 1959. New chemical treatment curbs shrink and swell of walnut gunstocks. *Forest Products Journal* 9(12): 437~441.
10. Mitchell, H. L. and E. S. Iversen. 1961. Seasoning green-wood carvings with polyethyleneglycol-1000. *Forest Products Journal* 1: 6~7.
11. Poncsak, S., D. Kocaeffe and R. Younsi. 2011. Improvement of the heat treatment of Jack pine (*Pinus banksiana*) using ThermoWood technology. *Holz als Roh-und Werkstoff* 69(2): 281~286.
12. Ralph, J and S. J. Edwards. 2004. PEG penetration in three commercially important Tasmanian Eucalypts. *Wood and Fiber Science* 36(4): 611~619.
13. Ralph, J. 2006. PEG penetration and the effects of PEG pretreatment in air-dried *Eucalyptus regnans*. *Wood and Fiber Science* 38(1): 139~143.
14. Stamm, A. J. 1959. Effect of polyethylene glycol on the dimensional stabilization of wood. *Forest Products Journal* 9(10): 375~381.
15. Wallstrom, L. and K. A. H. Lindberg 1995. Wood surface stabilization with polyethyleneglycol, PEG. *Wood Science and Technology* 29: 109~120.
16. Yamaguchi, T., Y. Ishimaru and H. Urakami. 1999. Effect of temperature on dimensional stability of wood with polyethylene glycol II: Temperature dependence of PEG adsorption and mechanical properties of treated wood. *Mokuzai Gakkaishi* 45(6): 441~447.
17. Yilgor, Nural and Nami S. Kartal. 2010. Heat Modification of Wood: Chemical Properties and Resistance to Mold and Decay Fungi. *Forest Products Journal* 60(4): 357~361.