

Polyethylene Glycol 주입방법과 건조방법이 목재 부피수축률에 미치는 효과

이 원 희¹, 강 춘 원², 홍 승 현³, 강 호 양^{†,3}

¹경북대학교 임산공학과, ²전북대학교 주거환경학과, ³충남대학교 환경소재공학과

Effects of the Methods of Polyethylene Glycol Impregnation and Drying on the Volumetric Shrinkage of Wood

Won-Hee Lee¹, Chun-Won Kang², Seung-Hyun Hong³, Ho-Yang Kang^{†,3}

¹Department of Wood Science and Technology, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

²Department of Housing Environmental Design, Chonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

³Department of Bio-based Materials, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

Abstract: PEG (Polyethylene glycol) impregnation in wood reduces the occurrence of checking during kiln drying. The volumetric shrinkages of wood PEG impregnated by pressure (PEG-P) or soaking (PEG-S) methods, and oven-dried by vent (VD) or air-tight (AD) methods were measured and compared with the controls. The average oven-dry weight of PEG impregnated specimens was larger than that of the controls by 3.6 g, but was not influenced by the drying methods. The average of the total volumetric shrinkage of PEG-P-VD specimens was the least (2.3%), while that of CON-S-AD specimens was the largest (28.9%). Within a drying method the total volumetric shrinkage of the control was the largest followed by PEG-S and PEG-P specimens, which implied that residual PEG in wood restrained its shrinkage during drying.

Keywords: *Quercus variabilis Blume, Polyethylene glycol, Pressure impregnation, Air-tight drying, Volumetric shrinkage*

1. 서 론

Polyethylene glycol (PEG)은 목재의 세포벽에 침투하여 건조 중 목재가 수축하는 것을 억제하기 때문에 목재의 천연건조나 인공건조 중에 발생하는 건조결함을 줄이는 방법으로 사용되어 왔다 (Stamm 1959; Mackay 1972; Alma et al. 1996; Hoadley 2000). PEG는 수용성 비이온 계면활성제로 에테르기의 산소가 목재 세포벽에 있는 셀룰

로오스의 수산기와 쉽게 결합하여 물 분자를 밀어내고 건조 중 세포가 수축하는 것을 방해하여 균열이 발생하지 않도록 한다(Ralph 2006).

할렬을 방지하기 위해서는 PEG의 침투율을 높이는 것이 중요하다. PEG는 수용성이기 때문에 목재 속에 이미 자유수가 있어야 PEG 용액과 상호교류기작이 일어나 침투가 잘 일어난다(Loughborough 1948). PEG 침투율은 목재비중의 영향을 받으며(Ralph and Edwards 2004; Hong et al. 2013) 온도가 높을수록 목재에 잘 침투된다(Yamaguchi et al. 1999)고 밝혀졌다. 여러 가지 분자량의 PEG를 처리했을 때 목재의 세포벽은 낮은 분자량을 선택적

2015년 12월 11일 접수; 2016년 1월 19일 수정; 2016년 1월 20일 게재확정

[†] 교신저자 : 강 호 양 (hykang@cnu.ac.kr)

으로 투과시킨다는 보고도 있다(Jeremic and Cooper 2009). Wallstrom and Lindberg (1995)은 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. Hoadley (2000)는 목재의 할렬방지 건조를 위해서는 분자량 1,000이 가장 적합하다고 밝혔다.

Hong 등(2013)은 PEG-1000을 국내에서 사용되는 3가지 대표적인 침엽수재에 주입하여 평균 기본밀도가 소나무는 14.9%, Douglas-fir는 5.6%, western hemlock는 16.8% 증가하였다고 발표하였다. Lee 등(2015)은 5 cm 두께 소나무 원판 내 잔류PEG율을 높이려면 열기건조하는 것이 천연건조보다 유리하며 이 효과는 투과성이 좋은 변재가 투과성이 나쁜 심재보다 더 크게 나타난다고 밝혔다.

목재의 건조할렬은 목재의 수축 때문에 발생하는데 목재에 주입된 PEG는 목재의 수축을 억제하기 때문에 건조할렬을 방지한다. PEG의 수축억제 효과를 비교하기 위해 먼저 목재의 최대 수축률을 얻는 것이 필요하다. 목재가 비정상적으로 많이 수축하였을 때 찌그러짐(collapse)이 일어났다고 하는데 높은 온도와 습도 상태에서 목재 함수율이 높을 때 잘 일어난다(Rasmussen 1961; Bariska 1992; Chafe 1995). 이러한 조건을 만들어 주면 최대 수축률을 얻을 수 있다. 이것을 준정적건조(Quasi-equilibrium drying) 또는 밀폐건조(Air-tight drying)라고 부른다. 스텐레스 실린더에 젖은 목재 시편을 넣고 양 마구리를 목재 마개로 막아 시편에서 증발된 수분과 가스가 목재 마개를 통해서만 외부로 천천히 확산되도록 하면 준정적건조 조건을 만들 수 있다. 밀폐건조를 통해 참나무 시편(30 × 30 × 30 mm)의 부피수축률을 38.2%까지 얻었다(Kang and Lee 2008).

본 연구는 PEG-1000 용액의 주입방법과 건조방법이 목재의 부피수축률에 어떤 영향을 미치는가를 조사하였다. 최대 부피수축률을 얻기 위해 밀폐건조방법을 사용하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시시편 제작

충남 공주지역에서 수확한 수령 50-60년생 굴참나무(*Quercus variabilis* Blume)원목을 구입하여 제재소에서 35 mm 판재로 제재하였다. 공시판재의 변재부위에서 30 × 30 × 30 mm의 공시시편 60개를 만들었다. 변재부위가 넓지 않기 때문에 대부분의 공시시편이 추정목이었다. 목재의 PEG 주입은 생재상태에서 실시하기 때문에 공시시편을 생재상태로 만들어야 할 필요가 있다. 공시시편을 물속에 한 달간 함침시켰다.

함침 공시시편의 중량을 디지털저울(± 0.01 g 정도)로 측정하고 다음 침지법으로 부피를 측정하였다. 공시시편 60개 중 무처리 20개는 다른 공시시편의 PEG 주입 실험이 끝날 때까지 비닐주머니에 넣어 보관하였다. 나머지 40개는 PEG 주입방법에 따라 20개씩 나누었다.

PEG 처리방법, 건조방법에 따른 실험계획은 Fig. 1과 같다. 따라서 각 처리별 10개의 공시시편이 사용되었다.

2.2. PEG 용액 제조 및 주입

PEG-1000과 물의 중량비를 1 : 2로 하여 PEG 용액을 만들었다. 공시시편에 PEG 용액을 두 가지 방법으로 주입하였다. ① 공시시편을 상온 상압에서 PEG 용액에 2주간 함침한다. ② 가압실린더에 PEG 용액과 공시시편을 넣고 1시간 가압주입한다. 가압주입 시 내부압력은 최하 15기압, 최고 18기압에 맞추었다.

함침 공시시편은 포수시편을 그대로 사용했으나, 가압주입 공시시편은 PEG 용액이 들어갈 수 있는 공간을 만들어주기 위해 NaBr 포화염용액(20°C에서 상대습도 58.0%)(Hardley 2000) 테시케이터에 넣고 상온에서 2달간 조습 건조하였다.

2.3. 일반건조(Vent-drying)와 밀폐건조(Air-tight drying)

일반건조와 밀폐건조 모두 103 ± 2°C 오븐에서 실시하였다. 밀폐건조 중 목재는 매우 천천히 건조되기 때문에 초기함수율이 높더라도 할렬이 일어

날 가능성이 적으나 일반건조 중 목재는 급속히 건조되기 때문에 할렬이 일어날 가능성이 높다. 그래서 일반건조 공시시편은 NaBr 포화염용액 데시케이터에서 60일간 조습하여 함수율을 섬유포화점 이하로 떨어뜨린 후에 실시하였다.

밀폐건조는 공시시편을 실린더에 넣어 실시했다. 실린더는 직경 75 mm, 길이 200 mm의 스텐레스 원통으로 만들었다. 실린더 속에 공시시편을 넣고 양단을 10 mm 두께 소나무재를 원형으로 잘라 막았다. 틈새는 실리콘으로 메꾸어 실린더 내 수분을 실린더 양단의 소나무재를 통해 만 외부로 배출되도록 하였다. 즉 목재를 통한 확산에 의해서만 수분이 이동하기 때문에 건조가 매우 느리게 진행된다. 무처리, PEG 함침, PEG 가압주입 시편들이 서로 섞이지 않도록 다른 실린더에 넣고 건조하였다.

일반건조와 밀폐건조 모두 공시시편이 항량에 도달하면 중단하였다. 일반건조 중에는 시편의 중량을 직접 측정하였으나 밀폐건조 중에는 실린더 전체의 중량을 측정하였다.

2.4. 부피측정

공시시편의 부피는 아르키메데스의 원리를 이용한 침지법으로 측정하였다. 함침 공시시편은 물에서 꺼낸 후에 표면의 수분을 깨끗한 헝겊으로 제거하고 측정하였다. 전건 공시시편은 열로 녹인 파라핀 왁스로 표면을 도포하여 목재가 물을 흡수하지 않도록 한 후에 같은 방법으로 측정하였다. 공시시편에 도포된 파라핀 왁스만큼 공시시편의 부피가 더 크게 측정되므로 아래 식 (1)을 이용하여 공시시편의 보정부피를 계산하였다.

$$V_{cv} = V_{wax} - \frac{(W_{wax} - W_{con})}{\rho_{wax}} \quad (1)$$

여기서 V_{cv} = 공시시편의 보정부피(cm^3), V_{wax} = 파라핀 왁스 도포된 공시시편의 부피(cm^3), W_{wax} = 파라핀 왁스 도포된 공시시편의 중량(g), W_{con} = 파라핀 왁스 도포 전 공시시편의 중량(g), ρ_{wax} = 파라핀 왁스의 밀도(= 1.0 g/cm^3)

3. 결과 및 고찰

3.1. 흡수함수율과 기본밀도

공시시편을 한 달간 함침시켰어도 포수되었다고 할 수 없다. 포수함수율이란 말 대신 흡수함수율이라고 쓰는 것이 맞다. 흡수함수율을 식 (2)를 이용하여 구하였다. 무처리 공시시편의 중량으로 계산한 평균 흡수함수율은 80.5 ± 4.0%이었다. 한편 같은 방법으로 계산한 함침 전 공시시편의 평균함수율은 20.1 ± 4.0%이었다. 함수율 80.5%는 일반적인 목재 섬유포화점 30%를 훨씬 상회하기 때문에 파라핀 왁스 도포없이 침지법을 사용하여 공시시편의 부피를 측정하여도 문제가 없는 것으로 판단되었다. 이후 실험에서 이렇게 측정된 부피를 생재부피로 사용하였다.

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

여기서 MC = 함수율(%), W_m = 공시시편의 중량(g), W_{od} = 공시시편의 전건중량(g)

생재비중은 아래 식 (3)과 같이 전건중량-생재부피를 기준으로 구하므로 전건 후에 시편 내 잔류한 PEG로 인해 전건중량이 달라지는 PEG 함침, PEG 가압주입 시편을 제외하고 무처리 시편의 데이터만을 이용하여 구하였다. 무처리 시편 중에도 일반건조와 밀폐건조 시편의 전건중량의 유의성이 있는지를 알기 위해 통계분석(t-test)한 결과 유의차가 없었다. 이렇게 구한 굴참나무 시편의 생재비중은 0.68 ± 0.02이었다.

$$S_g = \frac{\frac{W_{od}}{V_g}}{\rho_{water}} \quad (3)$$

여기서 S_g = 생재비중, W_{od} = 공시시편의 전건중량(g), V_g = 공시시편의 생재부피(cm^3), ρ_{water} = 물의 밀도(= 1.0 g/cm^3)

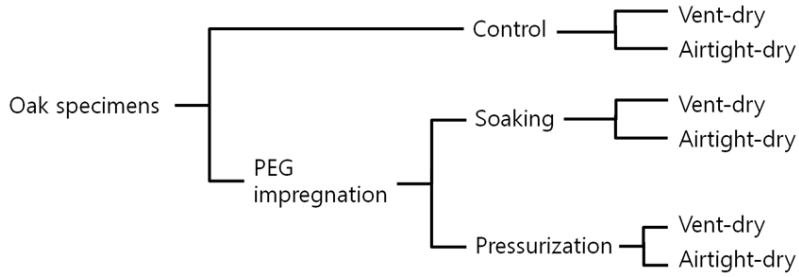


Fig. 1. An experimental plan.

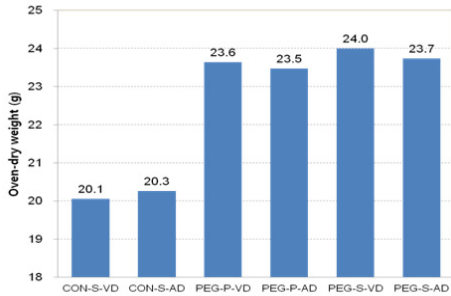


Fig. 2. The oven-dry weights of oak specimens.

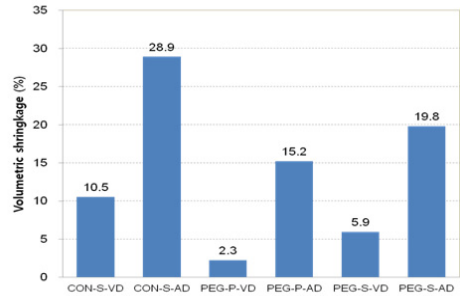


Fig. 3. The volumetric shrinkages of oak specimens measured by the water-replacement method.

3.2. PEG 주입방법에 따른 중량증가율

공시시편을 함침한 직후에 측정된 중량을 기준으로 PEG 주입에 의해 중량이 어떻게 변했는가를 조사하였다. PEG 함침 공시시편의 중량은 모두 증가하였으나, PEG 가압주입 공시시편의 중량은 모두 감소하였다. 전자는 평균 0.5 ± 0.4 g 증가한 반면 후자는 평균 3.0 ± 2.0 g 감소하였다. PEG 함침 공시시편의 중량증가는 1.0 g 이하의 적은 양이지만 모든 시편이 증가하였다. PEG 가압주입 공시시편의 중량이 감소한 이유는 가압주입 전에 시편에 PEG 용액이 들어갈 수 있는 공간을 만들기 위해 2달간 조습 건조하였기 때문으로 생각된다. 가압주입을 하더라도 시간이 짧기 때문에 PEG 용액이 모든 공극을 채우지 못한다고 볼 수 있다.

3.3. 전건중량

공시시편의 건조는 향량에 도달할 때까지 실시하였는데 일반건조와 밀폐건조가 각각 2일과 37일 걸렸다. 전건 후에 측정된 PEG 주입 방법과 건조 방법에 따른 공시시편의 평균 전건중량은 Fig. 2와 같다. PEG 주입 공시시편의 평균 중량은 23.7 g

으로 무처리 20.1 g보다 평균 3.6 g 정도 높다. 이는 전건 후에도 공시시편 내 PEG가 잔류하고 있다는 것으로 볼 수 있다. 무처리나 PEG 주입 공시시편의 건조 방법에 따른 전건중량은 통계분석 결과 유의차가 없는 것으로 나타났다.

3.4. 전부피수축률

전부피수축률은 아래 식 (4)와 같이 생재부피와 전건부피(보정부피)의 차이를 생재부피로 나눈 백분율로 구하였다.

$$\alpha_v = \frac{V_g - V_{cv}}{V_g} \times 100\% \tag{4}$$

여기서 α_v = 전 부피수축률(%), V_g = 공시시편의 생재부피(cm^3), V_{cv} = 공시시편의 보정부피

공시시편의 평균 전부피수축률은 Fig. 3과 같다. PEG 가압주입-일반건조(PEG-PVD)이 2.3%로 가장 적고 무처리-밀폐건조(CON-S-AD)가 28.9%로

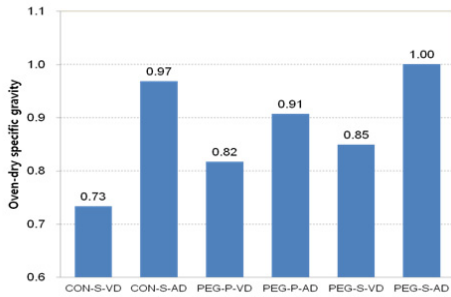


Fig. 4. The oven-dry specific gravities of oak specimens based on oven-dry weight and volume.

가장 컸다. 건조방법 간 비교하면 밀폐건조가 일반 건조보다 더 많이 수축하였는데 무처리는 2.7배, PEG 가압주입은 6.7배, PEG 함침은 3.3배 차이를 보였다. 밀폐건조와 일반건조의 수축률차이는 세포의 찌그러짐(collapse)에 의한 비정상적인 수축 때문이라고 볼 수 있다(Kang and Lee 2008).

동일한 건조방법일 때 공시시편의 전부피수축률은 무처리가 제일 크고 PEG 함침, PEG 가압주입 순이다. 이는 공시시편 내 잔류 PEG가 수축을 억제하는 것으로 볼 수 있다. PEG처리 공시시편의 전건중량이 주입방법과 무관하게 일정함(Fig. 2)에도 불구하고 PEG 가압주입 공시시편이 PEG 함침 공시시편보다 덜 수축한 것은 잔류PEG가 세포벽에 더 많이 분포되어 있기 때문이라고 추측할 수 있다. 가압주입이 함침보다 PEG 용액이 세포벽까지 더 깊이 들어간다고 할 수 있다.

무처리-일반건조 공시시편의 부피수축률이 정상적인 수축률이라고 보면, 무처리-밀폐건조 공시시편은 18.4%, PEG 가압주입-밀폐건조 공시시편은 4.7%, PEG 함침-밀폐건조 공시시편은 9.3% 더 많이 줄어들었다. 한편 PEG 가압주입-일반건조 공시시편은 8.2%, PEG 함침-일반건조 공시시편은 4.6% 덜 줄어들었다. 따라서 부피수축률이 적을수록 수축에 따른 건조결함이 적게 나타난다고 할 때 목재에 PEG를 가압주입한 후에 일반건조하는 것이 가장 건조결함을 예방할 수 있는 방법이다.

3.5. 전건비중

전건비중은 식 (3)에서 공시시편의 생재부피 대신 전건부피를 넣어 계산하였다. Fig. 4에 보인 바

와 같이 밀폐건조된 공시시편의 전건비중은 일반 건조 공시시편보다 크며 거의 1.0에 가깝다. 이는 밀폐건조에 의한 부피수축률이 증가한 것에 기인한다. 즉 부피가 더 많이 줄었기 때문에 비중은 더 많이 증가하였다.

동일한 건조방법일 때 전건비중은 PEG 가압주입 공시시편이 PEG 함침 공시시편보다 낮다. 앞에서 언급한 대로 전건중량 차이가 없으므로 전건 부피 차이 때문이라고 할 수 있다. PEG 가압주입 공시시편의 부피수축률이 PEG 함침 공시시편보다 적기 때문에 전건비중이 낮아졌다.

4. 결 론

굴참나무 시편을 이용하여 PEG-1000 용액의 주입방법과 건조방법이 목재의 부피수축률에 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구를 통해 다음의 결론을 도출하였다.

1) PEG 주입 공시시편의 평균 전건중량은 23.7 g으로 무처리 20.1 g보다 평균 3.6 g 정도 높으나 PEG 주입 공시시편 간 건조 방법에 따른 전건중량의 유의차는 없는 것으로 나타났다.

2) 전부피수축률은 PEG 가압주입-일반건조(PEG-P-VD)가 2.3%로 가장 적고 무처리-밀폐건조(CON-S-AD)가 28.9%로 가장 컸다.

3) 밀폐건조의 전부피수축률은 일반건조보다 매우 큰데, 무처리는 2.7배, PEG 가압주입은 6.7배, PEG 함침은 3.3배였다.

4) 동일한 건조방법일 때 공시시편의 전부피수축률은 무처리가 제일 크고 PEG 함침, PEG 가압주입 순이다. 따라서 공시시편 내 잔류 PEG가 수축을 억제하는 것으로 볼 수 있다.

5) 밀폐건조된 공시시편의 전건비중은 일반건조 공시시편보다 크며 거의 1.0에 가까우며, 동일한 건조방법일 때 전건비중은 PEG 가압주입 공시시편이 PEG 함침 공시시편보다 낮다.

6) PEG를 가압주입한 후에 일반건조하면 무처리-일반건조보다 4.6% 정도 전부피수축률을 줄일 수 있으며 따라서 그만큼 건조결함의 발생가능성이 줄어든다.

사 사

본 연구는 산림청 ‘임업기술연구개발사업(과제 번호 : S121414L060120)’의 지원에 의해서 이루어진 것입니다.

참 고 문 헌

- Alma, M. H., H. Hafizoglu and D. Maldas. 1996. Dimensional stability of several wood species treated with vinyl monomers and polyethylene glycol-1000. *International Journal of Polymer Material* 32: 93-99.
- Bariska, M. 1992. Collapse phenomena in eucalypts. *Wood Science and Technology* 26: 165-179.
- Chafe, S. C. 1995. Preheating and continuous and intermittent drying in boards of *Eucalyptus regnans*: F. Muell. I. Effect on internal checking, shrinkage and collapse. *Holzforschung* 49: 227-233.
- Hoadley, R. B. 2000. *Understanding Wood*. The Taunton Press, Inc., CT, USA: 288pp.
- Hong, S.-H., C-H. Kim, H.-M. Lim and H.-Y. Kang. 2013. Measuring PEG retentions and EMCs of PEG impregnated softwood specimens after heat-treatment. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 41(3): 173-180.
- Jeremic, D. and P. Cooper. 2009. PEG quantification and examination of molecular weight distribution in wood cell walls. *Wood Science and Technology* 43(3-4): 317-329.
- Kang, H.-Y. and M.-G. Lee. 2008. Effect of Pretreatments and Drying Methods on Abnormal Shrinkage of Wood. *Journal of Korea Furniture Society* 19(4): 294-299.
- Lee, W.-H., S.-H. Hong and H.-Y. Kang. 2015. Effects of drying temperature and acetylation on the retention of polyethylene glycol in red pine wood disks. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 43(6): 784-791.
- Loughborough, W. K. 1948. Chemical seasoning: Its effectiveness and present status. U.S. Forest services Forest Products Laboratory Report, D1721.
- Mackay, J. F. G. 1972. The occurrence, development and control of checking in Tasmanian *Eucalyptus obliqua*, *Holzforhung* 26(4): 121-124.
- Ralph, J. 2006. PEG penetration and the effects of PEG pretreatment in air-dried *Eucalyptus regnans*. *Wood and Fiber Science* 38(1): 139-143.
- Ralph, J. and S. J. Edwards. 2004. PEG penetration in three commercially important Tasmanian *Eucalypts*. *Wood and Fiber Science* 36(4): 611-619.
- Rasmussen, E. F. 1961. *Dry Kiln-Operator's Manual*. Forest Products Lab, Forest Service, USDA. 197pp.
- Stamm, A. J. 1964. *Wood and Cellulose Science*. The Ronald Press Company, New York.
- Wallstrom, L. and K. A. H. Lindberg. 1995. Wood surface stabilization with polyethyleneglycol, PEG. *Wood Science and Technology* 29: 109-120.
- 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.