

열기건조 중 소나무 특대재의 내부 수분 이동 방향 제어와 전처리가 함수율 분포 및 건조결함에 미치는 영향

Effect of Pretreatment for Controlling Internal Water Transport Direction on Moisture Content Profile and Drying Defects in Large-Cross-Section Red Pine Round Timber during Kiln Drying

Bat-Uchral BATJARGAL^{1,2,3} · Taekyeong LEE¹ · Myungsik CHO⁴ · Chang-Jin LEE⁵ · Hwanmyeong YEO^{1,2,4,†}

¹Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

²Department of Agriculture, Forestry and Bioresources, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

³Training and Research Institute of Forestry and Wood Industry, Mongolian University of Science Technology, Ulaanbaatar 14191, Mongolia

⁴Department of Forest Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

⁵Department of Wood Science and Technology, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

초록 : 지름 450 mm, 길이 4.2 m인 red pine (*Pinus densiflora* S. et. Z) 대단면 원주목으로부터 절단된, 길이 600 mm 원주재들을 열기건조 대상목으로 준비하였다. 이 피건조재에 횡단면실링(end sealing), 횡단면실링-배할처리(end sealing-kerfing), 측재면실링-횡단면실링-중공처리(lateral sealing-end sealing-boring), 측재면실링-부분횡단면실링(lateral sealing-partial end sealing) 처리를 한 후, 이 처리들이 건조결함 발생에 미치는 영향을 조사했다. 측재면이 노출되고 횡단면이 실링된 피건조재는 병충해 사멸 공시 온도인 56℃를 초과하는 온도인 65℃를 초기온도로 설정하여 증자처리한 후, 열기건조를 진행하여 최종단계엔 75℃ 온도를 적용하였다. 반면, 측재면이 실링된 피건조재는 측재면으로부터의 수분 증발이 억제되어 초기 재면할열 발생의 위험이 없으므로 처음부터 관행열기건조의 최고온도에 육박하는 90℃를 적용하여 건조하고 최종단계에서는 약 100℃를 적용하였다. 초기함수율이 70%~80%인 피건조재들이 목표함수율 19%에 도달하는데 소요된 건조시간은 처리별로 상이하였다. 횡단면이 실링된 목재와 측재면이 실링된 목재가 최종함수율에 도달하는 데까지 각각 1,146시간(약48일)과 745시간(약 31일) 소요되었다. 무처리와 횡단면실링의 경우 재면할열 발생을 억제할 수 없었으나, 측재면실링-횡단면실링-중공처리와 측재면실링-부분횡단면실링 처리는 재면할열 발생 예방 효과를 분명히 보였다.

1. 서론

궁궐과 사찰 건축과 문화재 복원 사업 등에 사용되는 대단면 목재를 할열 없이 건조하는 방법에 대한 연구가 지속되어 왔으나, 적절한 해결책을 찾지 못하고 있다(Lee *et al.*, 2023; Park *et al.*, 2020). 실제 사업 현장에서는 수년 동안 외기에 노출되어야 건축 부재로 사용될 수 있는 함수율에 다다른 천연건조재가 건축자재로 활용되고 있다.

하지만, 목재 내 수분의 이동 거리가 긴 대단면재를 천연건조시키는 경우에는, 인위적으로 제어가 가능하지 않은 기상조건에 노출시켜야 하기 때문에, 수요자가 원하는 이용함수율에 도달하기까지 오랜 시간이 걸리고, 균에 의한 변색과 부후와 같은 생물학적 결함이 발생하기 쉽고, 재면할열과 같은 건조결함이 발생하는 경우가 많다. 이용함수율에 도달하지 않은 천연건조재를 사업 현장에 투입하여 건축하게 되는 경우는 착공 후 부재의 수축과 할열 발생으로 인해 건축물 전체가 변형되기도 한다. 미건조는 시공 후 건축물의 안정성에 큰 영향을 미치기 때문에 시공 전에 이용함수율 이하로 할열이 발생하지 않도록 건조해야 할 필요가 있다. 따라서 대단면 목재의 효율적인 건조는 중요한 과제로 인식되고 있으며, 이에 대한 연구가

본 문서는 출판된 영문논문의 국문서입니다. 출판된 영문논문은 아래의 DOI를 통해서 확인하실 수 있습니다.

Journal of The Korean Wood Science and Technology 51(6): 493-508. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2023.51.6.493>

계속되고 있다(Jiang *et al.*, 2023).

열기 건조 중 목재로부터 수분이 제거되는 과정에서 표층은 내층의 함수율보다 낮아, 상대적인 수축량이 많아지고, 이 많아진 수축량은 표층에 인장응력을 발생시킨다고 알려져 있다. 이 표층에 형성되는 인장응력이 표층세포들 간의 결합력을 초과하면 재면할열이 발현된다고 알려져 있다. 재면에 존재하는 이 할열들은 건조재의 품질을 저하시키게 된다(Kim *et al.*, 2017; Lee, 2020). 재면할열 발생을 방지하기 위한 배할가공은 건조 중에 발생하는 접선방향 건조응력을 감소시켜 배할 부위 이외의 재면에서는 할열 발생이 억제된다(Jung *et al.*, 2022). 섬유방향 배할가공은 무처리재와 비교하여 봤을 때, 건조 속도에 큰 영향을 미치지 않지만, 최종 함수율 분포에 영향을 줄 수 있다(Lee *et al.*, 2017).

Lee *et al.*(2017)은 red pine(소나무)과 Korean pine(잣나무)를 대상으로 부분엔드코팅한 후 고온저습 건조를 수행한 결과, red pine의 경우 수분경사가 적게 형성된 상태로 최종 함수율 10% 전후에 도달되었고, 목재 내부에는 균일한 함수율 분포가 나타났다고 보고하였다.

일반적으로 재면할열은 내층에서 표층으로 이동한 수분이 외부로 증발함에 따라 외표면에 형성되는 인장응력에 의해 발생한다고 알려져 있다(Diawanich *et al.*, 2012). Park *et al.*(2014)은 목재중심부를 길이방향으로 천공하여 증공재를 만든 후, 이 증공재의 외표면을 실링하여 건조함으로써 수분 이동 방향을 외표면에서 내표면으로 변경하여 내표면에 인장응력을 발생시키고 외표면에 압축응력을 유도하였고, 이를 통해 재면할열의 발생을 억제한 바 있다. 목재 내 수분이동 속도는 방향 별로도 다르고 수종별로도 상이하므로 각 상황에 맞추어 평가되어야 한다(Hwang *et al.*, 2022; Kim, 2020; Sutapa *et al.*, 2023).

잔류응력의 크기와 분포 패턴은 건조결합의 정도를 조절하는 데 중요한 역할을 한다(Yamamoto *et al.*, 2021). 또한, 고온에서 전처리를 수행하면 수분 구배 및 수축 이방성에 의한 응력을 완화하여 건조결합을 줄일 수 있다(Moya *et al.*, 2022; Roger *et al.*, 2021).

열기 건조는 목재의 수분을 제거를 위한 전통적이고 검증된 기술로, kiln에서 목재를 적절히 처리하면 수분제거뿐만 아니라 건조 목재 내의 잔류 응력을 감소시킬 수 있다(Jiang *et al.*, 2023).

이 열기 건조과정 중 건조응력 완화를 위해 step steam 적용한 연구들도 있다(Matsuo-Ueda *et al.*, 2022). Toba *et al.*(2023)은 100 × 100 mm 제재목의 건조 전처리로 행하는 증자 처리 중 재면 치수 변화들과 건조응력을 측정하여 증자처리가 건조결합 발생에 미치는 영향을 보고하였다.

소나무는 대한민국 내에서 과거부터 현재까지 건축용 부재와 생필용재로 자주 사용되어 오고 있는 수종이다(Jang, 2022; Jung *et al.*, 2022; Lee *et al.*, 2021a, 2021b, 2022; Nam and Kim, 2021).

본 연구에서는 소나무를 대상으로 목재를 부위별로 실링 처리하고, 배할 또는 증공 처리한 후 건조함으로써, 목재내부의 수분이동 방향과 속도를 변화시키고, 건조응력의 작용방향을 변화시켜 할열없이 신속하게 건조시키는 전처리 방법을 찾아 보고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

대한민국 강원도 산림에서 벌채한 직경 450 mm, 길이 4.2 m인 소나무 red pine(*Pinus densiflora* S, et. Z) 원주재를 준비하였다. 원주재를 Fig. 1과 같이 절단하여 길이 600 mm인 대단면 원주재 5개를 채취하였다. 또한, 대단면재 양단부에서 두께 20 mm인 초기함수율 측정용 시험편과 목재밀도 시험편을 채취하였다.

2.2. 건조 중 수분이동 방향 제어를 위한 전처리(횡단면실링, 배할가공, 재면실링, 증공가공)

건조 중 수분이동 방향을 제어하기 위하여 건조 전에 다음과 같이 전처리하였다(Fig. 1).

2.2.1. 무처리(control, C)

횡단면과 측재면을 외기에 노출시킨 후 건조한 원주재를 무처리재로 표현하였다.

2.2.2. 횡단면실링(end sealing, ES)

횡단면으로의 급속한 수분증발을 억제하여 횡단면할열 발생을 최소화하고, 횡단면 결합의 재면으로의 확대를 줄이기 위하여 시험재의 횡단면을 플라스틱랩(polyethylene wrap)으로 실링(sealing) 처리하였다(ES).

2.2.3. 횡단면실링-배합처리(end sealing and kerfing, ES-K)

건조 전 체인톱을 이용하여 폭 약 10 mm(8.2~12 mm), 깊이 150 mm로 배합 가공하고, 횡단면을 플라스틱랩으로 실링 처리하였다(ES-K).

2.2.4. 측재면실링-횡단면실링된-중공처리(lateral sealing-end sealing-boring, LS-ES-B)

횡단면 상에서 반지름의 절반이 되는 위치에 직경 30 mm인 구멍을 원주재의 길이방향으로 뚫어 관통시켰다. 횡단면 상에서 관찰 보았을 때, 이 구멍으로부터 90도, 180도, 270도 회전시킨 위치에 두번째, 세번째, 네번째 구멍을 뚫어 관통시켰다. 이 횡단면 상 위치한 직경 30 mm인 4개 구멍에서만 수분이 증발될 수 있도록, 4개 구멍을 제외한 횡단면과 모든 재면을 플라스틱랩(polyethylene wrap)으로 실링 처리하였다(LS-ES-B).

2.2.5. 측재면실링-부분횡단면 실링처리(lateral sealing-partial end sealing, LS-PES)

건조 중 재면의 표층과 내층의 수분경사를 감소시킬 목적으로 측재면을 플라스틱랩으로 실링하고, 횡단면은 내주부 반지름 300 mm를 제외한 외주부 부위를 플라스틱랩으로 실링 처리하였다(LS-PES).

2.3. 열기건조 스케줄

섭씨 100℃ 이하에서 온습도 제어가 가능한 열기건조기(Hanbeak HB-503LF-0)를 이용하였다. 목표함수율은 19%로 설정하고 Table 1의 온습도 조건에 따라 건조하였다.

2.4. 건조 전 부위별 함수율 분포 조사

건조시험에 사용되는 길이가 600 mm인 5개의 원주재 각각의 양 옆에서 두께 20 mm 디스크 형태의 함수율 시험편이 채취되었다. 초기함수율 측정용 디스크형 시험편은 6개 채취되었다. 함수율 측정용 디스크들을 대상으로 아홉개의 열(9열) 절삭이 동시에 가능하도록 제작된 소형시험편 채취용 톱을 사용하여 Fig. 2와 같이 절삭하여 부위별 함수율 분포를 분석하였다.

2.5. 건조 전 목재밀도 조사

건조시험에 사용되는 길이가 600 mm인 5개의 원주재 각각의 양 횡단면의 바깥쪽 부위에서 두께 20 mm 디스크 형태의 목재밀도 시험편이 총 6개 채취되었다.

$$\rho_{(disk)} = \frac{W_{od(disk)}}{V_{(disk)}} \quad (1)$$

여기서, $\rho_{(disk)}$: 디스크형태 시험편의 목재밀도(kg/m³), $W_{od(disk)}$: 디스크형태 시험편의 전건중량(kg), $V_{(disk)}$: 디스크 시험편의 부피(m³).

2.6. 건조 중 원주재의 함수율 측정

원주재 양횡단면 바깥쪽에서 채취된 디스크의 목재밀도와 길이 600 mm 원주재의 부피를 이용하여 원주재의 추정전건무게를 산출하였고, 이 추정전건무게와 건조 중 측정되는 길이 600 mm 원주재의 무게를 이용하여 건조 중인 원주재의 함수율을 구하였다. 디스크의 중량은 0.01 g까지 측정가능한 디지털 저울로 측정하였고, 디스크의 부피는 물에 담귀 물의 비체적으로 부피를 구하는 부유법을 활용하여 측정하였다. 길이 600 mm 원주재의 중량은 0.01 kg까지 측정가능한 디지털 저울을 사용하여 측정하였다. 원주재 양단면 디스크형 시험편의 목재 밀도를 근거로 원주재의 추정전건무게를 식 (2)로 계산한 후, 이 추정전건무게와 건조 중 측정되는 원주재의 무게를 이용하여 시간에 따른 함수율 변화를 식 (3)과 같이 평가하였다.

$$W_{od(timber)} = V_{(timber)} \times \rho_{(disk)} \quad (2)$$

$$MC_{(timber)}(\%) = \frac{W_{g(timber)} - W_{od(timber)}}{W_{od(timber)}} \times 100 \quad (3)$$

여기서, $W_{od(timber)}$: 길이 600 mm 시험재의 추정 전건무게(kg), $V_{(timber)}$: 길이 600 mm 시험재의 부피(m^3), $\rho_{(disk)}$: 길이 600 mm 시험재의 양단에서 채취한 두께 20 mm 디스크 시편의 평균 목재밀도(kg/m^3), $MC_{(timber)}$: 길이 600 mm 시험재의 함수율, $W_{g(timber)}$: 길이 600 mm 시험재 생재무게(kg)

2.7. 건조 중 목재내부 온도와 습도 측정(thermocouple, iButton) 및 평형함수율 계산

건조 중 목재 내부온도 측정을 위하여 재면으로부터 20 mm와 80 mm 깊이에 K-type 열전대를 삽입하고, 측정된 내부온도를 온도 자료수집장치 datalogger(CR1000X, Campbell Scientific)에 30초 간격으로 집적하였다. 또한 길이 600 mm 시험재의 중간과 끝에 소형 온습도 센서(iButton)를 80 mm 깊이에 삽입하여 건조기간 동안의 온습도 변화를 기록하였다. 측정된 온습도 데이터를 사용하여 Hailwood-Horrobin 방정식을 적용하여 시험재의 평형함수율(EMC)을 식 (4)로 계산하였으며, 건조중 목재평형함수율의 변화 추이를 조사하였다(Ra, 2014).

$$EMC = \frac{RH}{A + B \cdot RH - C \cdot RH^2} \quad (4)$$

$$A = \frac{W}{0.018} \cdot \left[\frac{1}{K_2 \cdot (K_1 + 1)} \right]$$

$$B = \frac{W}{1.8} \cdot \left[\frac{K_1 - 1}{K_1 + 1} \right]$$

$$C = \frac{W \cdot K_1 \cdot K_2}{180 \cdot (K_1 + 1)}$$

$$W = 0.2234 + 0.0007 \cdot T - 0.000019 \cdot T^2$$

$$K_1 = 4.73 + 0.048 \cdot T - 0.0005 \cdot T^2$$

$$K_2 = 0.706 + 0.0017 \cdot T - 0.000006 \cdot T^2$$

여기서, EMC = 목재평형함수율(%), RH = 목재내부 상대습도(%), W, K1, K2은 Hailwood-Horrobin이 개발한 흡착 모델의 계수

2.8. 건조 후 재면할렬 및 배할홈 확장을 조사

건조가 종료된 모든 시험재에서 할렬폭이 1 mm 이상인 할렬의 길이와 폭을 버니어캘리퍼스를 사용하여 측정하고 전처리에 따른 재면 할렬의 발생면적을 계산하였다. 또한, 원주재의 가운데에서 채취한 20 mm 두께 시편에서 내부할렬의 수와 길이를 육안으로 확인하였다. 건조 중에는 외표면 할렬 발생을 관찰하고 사진을 찍어 기록하였다.

배할홈 확장율(kerf widening rate)은 다음 식 (5)와 같이 계산하였다(Lee, 2020).

$$Kerf\ widening\ rate(\%) = \frac{Width_{after} - Width_{before}}{Width_{before}} \times 100 \quad (5)$$

여기서 $Width_{before}$: 건조 전 배할가공된 홈의 폭 (mm), $Width_{after}$: 건조 후 배할 폭(mm)

2.9. 시험재의 부피수축율

건조 부피수축율을 산출하기 위해 Fig. 3과 같이 위치를 표시하고 건조 전후에 동일한 위치에서 캘리퍼스(CD-30PSX, Mitutoyo)와 파이줄자를 활용하여 길이들을 측정하였다. 횡단면의 가로와 세로 길이를 측정하고, 3개의 위치에서 원둘레를 측정하였다. 이 측정값들의 평균값으로 시험재의 부피를 산출하였다. 또한, 건조 전 부피는 시험재를 물에 침지시켜 물의 비체적을 활용한 부유법으로도 측정하였으며, 3D 스캐너(Leica C10)를 활용하여서도 측정하였다.

길이 600 mm 시험재 부피수축율은 식 (6)으로 구하였다.

$$\alpha_v(\%) = \frac{V_g - V_{after}}{V_g} \times 100 \quad (6)$$

여기서 α_v : 부피수축율(%), V_g : 생재부피(m^3), V_{after} : 건조 후 부피(m^3)

3. 결과 및 고찰

3.1. 건조 전 목재내부 초기 함수율 분포

4.2 m 원주재 내부의 부위별 초기 함수율을 전진법을 이용하여 측정하였다. 재료 및 방법에서 설명한 바와 같이 4.2 m 원주재의 중간 부위에서 6개의 함수율 측정용 디스크가 채취되었고 디스크들 사이사이에서 길이 600 mm 시험재 5개가 채취되었다. 길이 600 mm 시험재의 횡단면의 위치를 원점으로 설정하여 600 mm 길이 마다 측정된 함수율 분포는 Fig. 4와 같다. 소나무의 생재함수율을 조사해본 결과 변재함수율은 150%, 심재함수율은 30%로 둘 간에 약 120.0%의 차이를 나타내었다.

3.2. 디스크형 시편으로부터 구한 원주재 길이방향 위치별 목재밀도와 함수율

원주형 특대재의 길이방향으로 600 mm 씩 떨어진 위치, 즉, 600 mm 열기건조 시험재의 양 횡단면 근처에서 채취한 디스크 형태 시편으로 목재밀도(wood density, WD)들을 구하였다. 6개의 디스크를 부유법을 이용하여 부피를 구하고 빠르게 전진하여 전진무게를 구하여 목재밀도를 산출하였다. 특대재 길이방향으로 위치별 목재밀도 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 목재의 원구로부터 말구까지 목재 밀도가 감소하는 경향을 확인할 수 있다.

또한 Fig. 4에서 보여준, 함수율 분포 측정시 사용된 각 디스크로부터 채취된 77개의 소형시험편의 총 생재무게와 전진무게를 이용하여 디스크의 초기함수율을 산출하였다. 특대재 길이방향으로 위치별 함수율 결과는 Fig. 5와 같다.

특대재 내 길이방향 위치별 함수율은 특정 위치에 따라 달랐다. 또한 별채 후 저목시간에 따라 횡단면으로부터의 수분이동이 발생하므로 길이방향으로 양끝 부위의 함수율과 중심부의 차이가 점점 커진다.

반면에 길이방향 위치별 목재밀도의 변이는 함수율에 비해 적었다. 또한 별채 후 저목시간이 변하여도 목재밀도는 크게 변하지 않는다. 저목 중 발생하는 횡단면에서의 수분증발에 의한 길이방향 양끝부위의 부피수축량은 양끝부위의 수분변화량에 비해 상대적으로 매우 적다. 따라서 길이방향의 위치별 목재밀도 변이는 위치별 함수율 변이에 비하여 적다.

3.3. 건조 중 목재함수율 변화

무처리, 횡단면실링, 횡단면실링-배할처리 시험재의 건조 중 함수율 변화는 Fig. 6(a)와 같았다. 이 그래프는 1,146시간 동안의 외기 온도와 외기 습도, 그리고 목재 함수율 변화를 보여주고 있다. 측재면[lateral surface(section)]이 외기에 노출되고 횡단면[cross surface(section)]이 밀폐된 상태에서는 재면 표층의 함수율이 섬유포화점 아래로 떨어지면 재면에 접선방향으로 인장응력이 발생하게 된다. 이 인장응력이 목재의 접선방향 인장강도보다 크게 되면 재면에 할렬이 발생하게 되는데, 목재는 접선방향 인장강도가 작기 때문에, 횡단면만이 밀폐되고 재면이 노출될 경우 재면할렬이 쉽게 발생된다. 따라서 횡단면이 밀폐되어 목재내에서 수분이 횡단방향으로 이동하는 경우에는, 표층과 내층 간의 함수율 경사를 줄이고 건조응력을 줄이기 위해서 낮은 온도와 높은 습도를 적용하였다[Fig. 6(a)].

측재면실링-중공처리, 측재면실링-부분횡단면실링 시험재의 건조 중 함수율 변화는 Fig. 6(b)와 같았다. 그래프는 약 745 시간 동안의 외기 온도와 외기 습도, 그리고 목재 함수율 변화를 보여주고 있다. 횡단면[cross surface(section)]이 외기에 노출되고 측재면[lateral surface (section)]이 밀폐된 상태에서는 재면 표층의 함수율은 섬유포화점을 오랜기간 유지하다가, 전체 목재의 평균함수율이 섬유포화점에 도달한 이후에 섬유포화점 아래로 떨어지게 된다. 따라서 재면의 표층과 내층 간 함수율 경사로 인한 건조응력은 발생하기 어려운 상황이 된다.

한편, 목재 중심부에서 횡단면으로의 섬유방향 수분이동이 빠르게 진행되기 때문에 섬유방향으로의 함수율 경사가 섬유방향으로 건조응력을 발생시키게 된다. 이 건조응력이 목재의 섬유방향 강도보다 크게 되면 재면이나 내부의 섬유가 길이방향으로 절단되는데, 목재는 섬유방향 강도가 매우 커서, 재면에서의 섬유 절단은 쉽게 발생되지 않는다. 따라서 측재면을 밀폐시키고 목재내에서 섬유방향으로 수분이 이동하는 경우에는 재면에서의 할렬발생 위험이 크지 않기 때문에, 높은 온도와 낮은 습도를 적용하였다[Fig. 6(b)].

건조 속도는 Fig. 7과 같다. 무처리 (C)의 경우 건조속도가 시간당 0.13%로, 같은 열기 건조 조건에서 횡단면 실링 전처리 한 시험재들 (ES와 ES-K)에 비하여 약 2배 정도 빨랐다.

반면, 측재면이 실링된 상태에서 상대적으로 높은 온도에서 건조된 두 시험재(LS-ES-B와 LS-PES)를 서로 비교해 본 결과, 측재면실링-부분횡단면 실링처리(LS-PES)의 건조가 상대적으로 빨랐다. 이는 횡단면의 내주부 직경 300 mm의 실링되지 않은 부분을 통해 증발되는 수분이 목재내부에서 수분이동이 빠른 섬유방향으로 이루어졌기 때문으로 사료된다.

측재면실링-횡단면실링-중공처리(LS-ES-B)재는 건조속도가 낮았다. 외표면이 모두 실링되고 중공처리된 부위의 내표면에서만 수분이 증발되기에 중공의 크기가 건조속도를 좌우하게 된다. 본 실험에서 적용된 중공크기로 형성되는 중공내부표면의 크기가 외표면의 총합에 비해 상당히 작기 때문에 나타난 결과로 사료된다. 또한 중공 내표면에서 증발되는 수분의 경우, 목재내부에서는 섬유방향에 비해 느린 횡단방향으로 이동해 오기 때문에 횡단면이 노출된 경우 비해 건조속도가 낮아지는 것으로 판단된다.

3.4. 건조 중 목재 내부 온도 및 상대습도

길이 600 mm 시험재의 길이방향 중간(middle)과 끝(edge)에서 80 mm 깊이로 삽입한 소형 온습도 센서(iButton)에 기록된 온습도 데이터를 이용하여 시험재의 평형함수율(EMC)을 산출한 결과는 Fig 8의 오른쪽과 같다. 이 값의 변화 경향은 열기건조 중에 무게측정으로 구한 600 mm 길이 시험재의 함수율과 유사하였다.

길이 600 mm 시험재의 길이방향 중간(middle)과 끝(edge)에서 재면으로부터 80 mm와 20 mm 깊이의 온도를 thermocouple 로 측정한 결과는 Fig. 8의 왼쪽열에 위치한 그래프와 같다. 건조 실험초기 단계에서, 시험재 중간 부위에서는 재면으로부터 80 mm(M80)와 20 mm(M20) 깊이의 온도들 간의 차이는 상당량 관찰되었으나, 48시간 경과 후에 이 차이가 매우 많이 감소하였다. 시험재의 횡단면 부위에서는 재면으로부터 80 mm(E80)와 20 mm(E20) 깊이의 온도가 시험재의 중간 부분에 비해서 둘 간의 차이가 적은 상태에서 빠르게 상승하였다.

3.5. 건조 후 목재 내부 최종함수율 분포

건조 후 600 mm 시험재 중간 부위를 횡절하여 채취한 디스크의 부위별 소시편을 대상으로 건전법으로 구한 최종함수율 분포는 Fig. 9(a-e)와 같다. 건조 종료 시에는 600 mm 시험재의 최종함수율은 무처리 22.2%, 횡단면실링 처리 21.9%, 횡단면실링-배할처리 17.4%, 재면 실링-중공 처리 18.5%, 재면실링-부분 횡단면 실링처리 21.5%로 조사되었다. 건조 후 표층의 함수율과 내층의 함수율 간의 차이는 10% 이내였다.

3.6. 건조 후 재면할렬 및 배할홈 확장을 조사

목재 표면의 결함을 확인하는 것은 제품의 품질을 평가하고 목재의 품질을 향상시키는 데 도움이 된다(Lee *et al.*, 2017). 건조 후 측정된 재면할렬의 면적은 무처리(C)의 경우 58.6 cm², 횡단면실링 처리(ES)의 경우 42.5 cm², 측재면실링-중공 처리(LS-ES-B)의 경우 0 cm², 측재면 실링-부분횡단면 실링처리(LS-PES)의 경우 27.8 cm²이었다(Fig. 10).

측재면실링-중공 처리(LS-ES-B) 시험재는 내부수분경사가 매우 적고 외표면에 인장응력이 거의 형성되지 않기 때문에 무처리(C)와 횡단면 실링에 비해 재면할렬 발생을 크게 억제할 수 있다.

Fig. 11은 실제 횡단면을 보여주는 사진들이다.

무처리재[Fig. 11(a)]의 횡단면에서는 크고 많은 횡단면 할렬이 관찰된다.

횡단면 실링 처리재들에서는[Fig 11(b) and (c)] 무처리재에 비해 횡단면 할렬이 적게 관찰된다.

횡단면실링-배할처리재(ES-K)[Fig. 11(c)]의 경우, 배할 부위를 제외한 재면에서는 할렬이 발생하지 않았다. 재면에 할렬이 발생하는 대신에, 폭 10 mm로 전처리된 배할의 폭은 40 mm로 증가하여 300% 확장되었다. Jung *et al.*(2023)의 연구도 이 이와 유사한 결과를 보인다.

측재면실링-중공처리(LS-ES-B) 경우, 측재면에 할렬이 발생하지 않았다.

측재면실링-부분횡단면 실링처리의 경우, 측재면으로부터의 수분증발을 막고 횡단면으로만 수분을 이동할 수 있게 처리함으로써 외표면에서의 할렬 발생을 거의 모두 막을 수 있었다. 이와 같이 측재면실링-부분횡단면 실링 처리를 통해 재면과 횡단면에서의 할렬발생을 줄일 수 있다는 것을 확인하였다[Fig. 11(d) and (e)].

3.7. 시험재의 부피 측정과 부피 수축률

특대재의 부피를 세가지 방법으로 측정하였다. 3D scan, 부유법, 그리고 측장법으로 측정한 결과를 Table 2에 나타내었

다. 참값에 가까운 값이라고 평가되는 부유법을 기준으로 2가지 측정법을 비교한 결과, 영상분석을 이용하는 3D 스캔과 물의 비체적을 이용하는 부유법에 의한 부피 측정 편차는 0.68%이었고, 캘리퍼스와 줄자를 이용하는 측장법과 부유법에 의한 부피 측정 편차는 0.89%이었다. 3D 스캔과 측장법 결과 모두 참값과의 유사도가 매우 높았다. 측정시간이 짧고, 준비물이 적은 측장법으로 부피를 측정해도 정확한 값을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

측장법을 이용하여 측정된 부피를 기준으로 결정된 부피수축률은 Table 3과 같다. 측재면이 외기에 노출되고 횡단면이 실링된 상태에서 건조된 시험재들(C, ES, ES-K)의 부피 수축률은 2.5%로 나타났으며, 측재면실링-중공처리(LS-ES-B)의 부피 수축률은 4.7%로 가장 컸다.

4. 결론

본 연구에서는 소나무 특대재를 건조결함 없이 생산할 수 있는 인공 건조기술을 개발하기 위해 5개의 원주재를 대상으로 횡단면실링처리, 배합처리, 측재면실링처리, 중공처리 등으로 전처리한 후, 열기 건조 중 함수율 변화와 건조결함 발생을 관찰하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

원주재 양단에서 채취한 디스크의 목재밀도와 원주재 부피로 원주재 전건무게를 추정하고 건조 중 함수율을 산출할 수 있었다. 목재밀도 기반의 함수율 계산은 특대재의 가공 과정과 최종제품의 함수율 검사에서 재료의 낭비를 최소화하고 실용적으로 함수율을 구할 수 있으리라 기대된다.

측재면실링과 중공가공을 통하여 대단면재의 건조할렬을 매우 크게 줄일 수 있었다. 측재면실링처리는 내부수분경사를 완화시키고 외표면에 인장응력을 발생시키지 않기 때문에 대단면재 건조 시 흔히 발생하는 재면할렬을 억제할 수 있는 효과가 있었다.

배합가공을 통해 배합을 제외한 재면부위에서의 할렬 감소를 확인하였다. 인위적으로 할렬발생 위치를 제어하기 위한 방법으로서 매우 효과적이었다.

본 연구 결과가 대단면재 건조결함예방을 위한 부분실링과 중공처리의 적용 위치와 시점에 대한 데이터베이스로 사용되어 지길 기대한다.