

집성재 라미나용 낙엽송 재내 잔류 건조응력 변화 분석*¹

한 연 중*² · 장 윤 성*² · 박 용 건*² · 정 기 영*³ · 홍 정 표*⁴ · 이 전 제*^{2,5} · 여 환 명*^{2,5†}

Analysis of residual drying stress in *Larix Kaempferi* wood used as glulam laminar*¹

Yeonjung Han*² · Yoon-Seong Chang*² · Yonggun Park*² · Gi-Young Jeong*³ · Jung-Pyo Hong*⁴ · Jun-Jae Lee*^{2,5} · Hwanmyeong Yeo*^{2,5†}

요 약

본 연구에서 국산 낙엽송재의 공학목재로의 이용가능성, 특히 교호집성재 라미나로서의 이용가능성을 확인하기 위하여 열기건조 중과 건조 후 판재 내 잔류응력을 분석하였다. 연구결과를 통해 이쿼라이징 처리에 의한 함수율 동일화 효과가 증명되었고, 컨디셔닝 처리에 의한 잔류응력의 감소효과가 정량화되었다. 건조 중 목재 내 잔류응력 분석을 위하여 프롱법과 슬라이스법을 실시하였다. 프롱 제작 후 표면경화율을 측정하였고, 슬라이스의 절단 후 탄성변형률을 기준으로 표면으로부터 약 10 mm 깊이까지의 건조응력을 정량적으로 분석하였다. T10-C4와 T12-D5 열기건조 스케줄 적용 시 열기건조 중 판재 표면의 인장응력과 압축응력은 모두 2.2 MPa를 넘지 않음을 확인하였다. 낙엽송의 횡단방향 인장강도와 압축강도가 평균 2.65 MPa, 4.60 MPa인 점을 고려하면, 더욱 강한 건조스케줄 적용이 추천된다. 건조 후처리에 의해 폭굽음과 비틀림을 약 40% 줄일 수 있었다.

ABSTRACT

The objective of this study was to analyse the residual stress in *Larix kaempferi* board during and after kiln-drying. The boards were primarily intended for using as laminar of cross laminated

*¹ 접수 2013년 7월 3일, 채택 2013년 10월 15일

*² 서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부 Department of Forest Sciences, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

*³ 전남대학교 농업생명과학대학 산림자원학부 Division of Forest Resources, College of Agriculture and Life Sciences, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

*⁴ SK임업 SK Forest, Hwaseong-si, Gyeonggi-do 445-972, Korea

*⁵ 서울대학교 농업생명과학연구원 Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

† 교신저자(corresponding author) : 여환명(e-mail: hyeo@snu.ac.kr)

timber (CLT). In this study, the equivalence of moisture content by equalizing treatment was proved and reduction of residual stress by conditioning treatment was quantified. Prong test and slice test were carried out to analyse the residual stress in wood during drying. Transverse casehardening was measured immediately after making prong sample. Residual stress of four parts in wood from surface to center was analyzed quantitatively based on elastic deformation after just cutting slices from board. Tensile stress and compressive stress on the surface of board during drying did not exceed 2.2 MPa when boards were dried by kiln-drying schedule of T10-C4 and T12-D5. Because the tensile strength and compressive strength of transverse direction of *Larix kaempferi* lumber are 2.65 MPa and 4.60 MPa, application of more severe drying schedule can be recommended. Cup and twist were reduced by about 40% by equalizing and conditioning treatments after drying.

Key words: kiln-drying, larch, moisture gradient, residual drying stress, warpage, equalizing, conditioning

1. 서 론

목재의 평형함수율은 계절에 따라 차이를 보인다. 또한 접착제의 접착성능은 목재의 함수율 변화에 따라 달라진다. 심 등(2004)은 레조시놀 접착제로 접착된 낙엽송 집성재의 전단접착력을 측정된 결과, 목재의 함수율이 11.6% 이하일 때, KS규격의 전단강도를 상회한다고 보고하였다. 교호집성재 제조용 판재는 일반적으로 $12 \pm 2\%$ 를 목표함수율로 건조되고 있으며, 각 판재의 함수율 차이는 5%를 넘지 않도록 하고 있다(Yeh et al. 2011). 판재의 함수율 변이는 접착성능을 불균일하게 만들고, 교호집성재와 교호집성재를 구성하는 각 판재의 변형에 영향을 미치기 때문이다.

열기건조공정에서 목재의 실제 수축률은 수분경사로 발생한 응력에 의해 억제되고, 건조 중 목재의 3방향(접선, 방사, 섬유방향)으로 각각 서로 다른 수축을 하기 때문에, 비틀림 등의 건조결함이 발생하는데, 건조 중 발생하는 건조응력과 실제 수축률을 알아내기 위한 연구가 오래 전부터 진행되어 오고 있다(Bodig et al. 1982, Dahiblom et al. 1996, Perré 1996).

열기건조 중 목재의 건조는 표층으로부터 시작된다. 생재를 건조시키면 건조 초기에 표층은 수분의 증발로 섬유포화점 이하의 함수율에 도달하여도 내

층은 아직 섬유포화점에 이르지 않고 있으므로 목재의 표층과 내층 간에 수분경사가 만들어진다. 따라서 표면은 수축을 하려고 해도 내부는 아직 수축단계에 도달하지 않은 상태이므로 인접한 표층의 수축을 억제하는 작용을 하기 때문에 결국 표층은 정상적인 수축량만큼 수축하지 못한다. 이때, 표면은 인장응력을 나타내고, 내부는 압축응력을 나타낸다. 표면의 응력은 크지 않지만 장기간 작용하고 있으므로 크리프와 같은 상태가 되어 시간이 지남에 따라 영구변형이 발생하게 된다. 이 상태에서 다시 건조가 진행되어 건조 후기가 되면 내층도 섬유포화점 이하로 건조되어 수축이 개시되나 이미 건조되어 수축된 표층의 제약을 받게 된다. 이때의 응력은 건조 초기와 전환되어 표면은 압축응력을 나타내고, 내부는 인장응력을 나타내게 된다(Simpson 1991). 건조응력 발생 메커니즘은 이와 같이 설명되고 있으나, 국산 목재 건조 중 목재 내부에 발생하는 건조응력을 실제로 정량화한 예는 드물다. 해외의 연구사례는 관행열기건조 중 낙엽송(*Larix gmelinii*) 판재의 응력과 크리프 거동을 분석한 것이 있으며(Zhan et al. 2009), 건조응력의 정량화를 위해 두께방향으로 슬라이스를 제작하여 응력을 추산한 연구들이 있다(Rice et al. 1990, Li et al. 1999, Pang 2000).

교호집성재의 제조 시 발생하는 라미나 간의 접착 불량과 사용 시 발생하는 변형을 억제하기 위하여

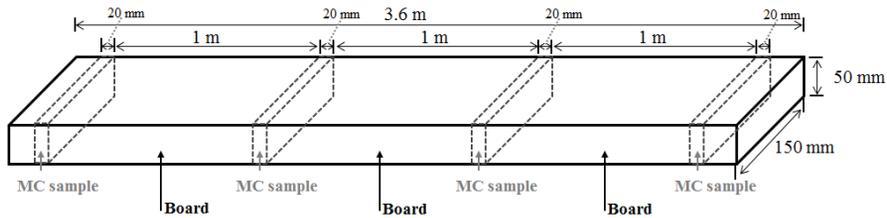


Fig. 1. Schematic of the specimen preparation.

Table 1. Kiln-drying schedule for 50 mm thick *Larix kaempferi* lumber

Step	1st drying schedule (T10-C4)					2nd drying schedule (T12-D5)				
	Moisture content (%)	Dry bulb (°C)	Wet bulb (°C)	Equilibrium MC (%)	Relative Humidity (%)	Moisture content (%)	Dry bulb (°C)	Wet bulb (°C)	Equilibrium MC (%)	Relative Humidity (%)
1	> 40	600	560	14.2	82	> 50	71.0	655	11.6	77
2	40~35	600	545	12.0	75	50~40	71.0	635	9.7	69
3	35~30	600	515	9.6	64	40~35	71.0	600	7.9	59
4	30~25	655	545	8.0	57	35~30	71.0	570	6.8	51
5	25~20	710	570	6.8	51	30~25	765	600	5.7	45
6	20~15	765	600	5.7	45	25~20	765	570	5.1	39
7	15 >	820	545	3.5	26	20~15	820	625	5.0	41
8						15 >	820	545	3.5	26

잔류 응력이 적은 라미나의 생산이 필수적이다. 잔류응력을 라미나 제조와 제조 후 제어하는 방법을 개발하기 위하여 본 연구에서는 건조 중인 판재의 잔류응력을 프룸법과 슬라이스법을 통하여 분석하여 보았다. 또한 건조 후처리인 이쿼라이징 처리와 컨디셔닝 처리를 한 목재와 열기건조만 실시한 목재 내의 잔류응력과 연구변형량의 변화를 비교하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 열기건조스케줄, 함수율과 수축률

산림조합중앙회 중부목재유통센터로부터 폭 150 mm, 두께 50 mm, 재장 3.6 m의 낙엽송(*Larix kaempferi*) 판재 20개를 구입하였다. Fig. 1에 제시된 것과 같이 재장 3.6 m의 판재에서 길이 1 m의 건조시험체를 3개씩 제작하였다. 시험체 제작 중 건조시험체의 사

이에서 길이방향 20 mm의 함수율시험편을 4개씩 채취하여 전건법을 이용하여 초기함수율을 측정하였다. 두께 20 mm의 스테인리스 재질의 천공잔목을 이용하여 1차와 2차 건조실험 시 각각 건조기 내에 총 25개의 판재(0.19 m³)를 잔적하였다. 건조기내 풍속은 2.5 m/s로 유지하였다. Table 1에 제시된 미국 임산물연구소(Forest Products Laboratory, FPL)의 낙엽송의 열기건조스케줄(T10-C4)을 이용하여 1차 건조를 수행하였고, 2차 건조는 건조속도 향상을 위하여 보다 강한 스케줄(T12-D5)을 이용하였다(Boone *et al.* 1988). 실제 시험체의 초기함수율을 고려해서 1차 건조는 건조스케줄의 3단계부터 수행하였고, 2차 건조는 4단계부터 수행을 하였다.

1차 건조에 이용된 판재의 초기함수율은 29.5~35.6%의 범위이고(평균함수율 31.34% ± 2.19), 2차 건조에 이용된 판재의 초기함수율은 25.9~37.8%의 범위로 측정되었다(평균함수율 32.91% ± 3.25). 전

건비중은 0.475(± 0.046)이다. 각각의 건조 중 시험재 4개를 선정하여 폭방향과 두께방향의 수축률을 측정하였다.

2.2. 건조 후처리

건조 후처리 중 함수율균일화 처리인 이쿼라이징 처리는 건구온도를 건조응력완화 처리인 컨디셔닝 처리보다 6°C 높게 설정하거나, 원하는 평형함수율을 맞출 수 있는 최고온도로 설정하는 2가지의 방법이 있다(정 등 2008). 이 중 1차 건조에서는 후자의 방법을 사용하여 건조스케줄의 최종단계를 최습시험재가 목표함수율에 도달할 때까지 실시하였고(건구온도 82°C, 상대습도 26%), 2차 건조에서는 전자의 방법을 사용하여 건구온도 65.5°C, 상대습도 20%를 적용하였다. 컨디셔닝 처리는 1차 건조에서는 건구온도 65.5°C, 상대습도 68%를 적용하였고, 2차 건조에서는 건구온도 71.1°C, 상대습도 71%를 적용하였다.

건조 후처리에 따른 영구변형의 감소를 확인하기 위하여 열기건조를 마친 시험재와 건조 후처리를 마친 시험재를 각각 건조기에서 꺼내 실외에서 72시간 야적한 후와 대패가공 후 시험편의 틀어짐(폭굽음, 길이굽음, 측면굽음, 비틀림)을 측정하였다. Fig. 2에 제시된 것과 같이 폭굽음(Cup)은 판재의 폭방향 변의 양단을 평면에 밀착시켜 평면으로부터 가장 멀리 떨어진 부위를 선택하여 측정하였으며, 길이굽음(Bow)과 측면굽음(Crook)은 판재의 길이방향 변의 양단을 평면에 밀착시켜 평면으로부터 가장 멀리 떨어진 부위를 선택하여 측정하였고, 비틀림(Twist)은 판재의 세 꼭지점을 평면에 밀착시킨 상태에서 나머지 한 꼭지점이 평면으로부터 떨어진 높이의 측정을 통해 결정하였다. 대패가공은 1면 대패기를 이용하였다.

2.3. 프롱법과 슬라이스법을 통한 열기 건조 중과 건조 후 건조응력 측정

Table 1의 열기건조스케줄을 적용하여 건조 중 각

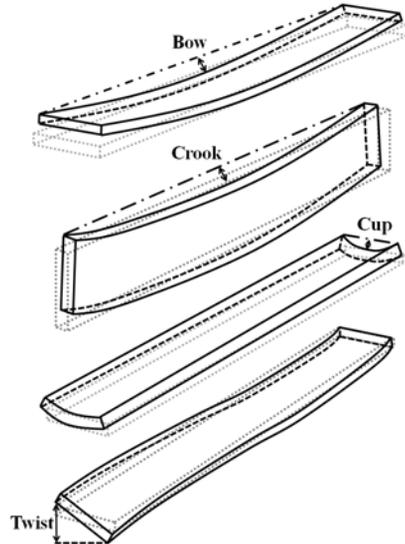


Fig. 2. Types of distortion after kiln-drying.

각의 스케줄 단계를 변화시킬 때마다 건조시험편의 폭방향의 횡응력평가를 위해 프롱시험(1·2차 건조)과 슬라이스시험(2차 건조)을 실시하였다. 1·2차 건조 중 1 m 길이의 건조시험재에서 길이방향의 끝에서 0.2 m, 0.35 m, 0.45 m 떨어진 부분에서 횡응력 측정용 프롱시험편을 채취하고, 프롱테스트를 실시하여 표면경화율을 측정하고, 건조응력을 정성적으로 분석하였다. 2차 건조 중 프롱시험편과 함께 슬라이스시험편을 채취하여 건조응력을 정량적으로 분석하였다. 슬라이스 시험편은 판목으로 제재된 건조시험재를 이용하였으며, 판목의 표면으로부터 두께 2 mm의 슬라이스를 4층을 절단한 후 절단 시 각 층의 슬라이스의 탄성변형률을 측정하여 건조응력을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 열기건조와 건조 후처리 중 함수율과 수축률

건조 전 전건법에 의해 측정된 1차 건조용과 2차 건조용 판재의 평균 초기함수율은 각각 31.34%,

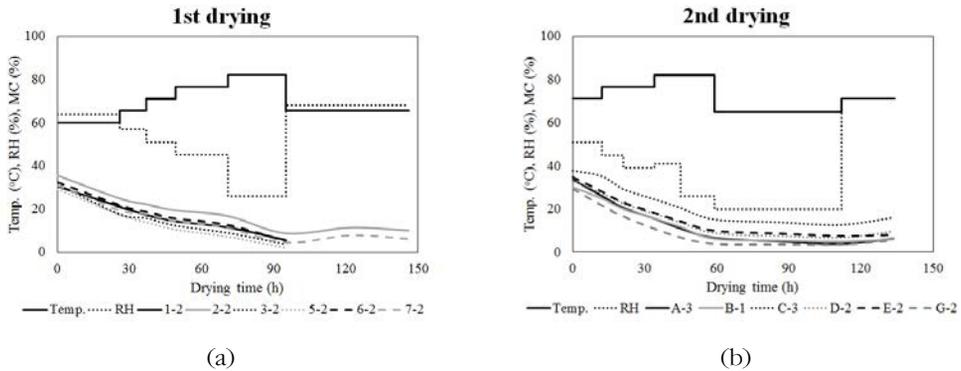


Fig. 3. Moisture content change during kiln drying, equalizing and conditioning treatments.

32.91%이었다. 건조시간은 이쿼라이징 처리시간을 포함하여 1차 건조에서 95시간(최종단계에 이쿼라이징 포함), 2차 건조에서 112시간(이쿼라이징 52시간)이 소요되었다. 열기건조 스케줄에 따라 건조한 후에 측정된 최종함수율은 Fig. 3-a에서 제시한 것과 같이 1차 건조에서 최습시험재(2-2)의 최종함수율이 8.7%인 것을 제외하고, 다른 함수율 시험편은 목표함수율인 6%에 도달하였다. 96시간의 열기건조 중 평균 건조속도는 0.286 %/hr (\pm 0.004)이었다. 96시간의 1차 건조 이후에는 컨디셔닝 처리(65.5°C, 68 %RH)를 51시간 동안 수행하였다. 열기건조 후 진행된 컨디셔닝 처리로 함수율은 건조 후보다 약 2% 증가하여 2-2와 7-2시험재의 최종함수율은 각각 10.05, 6.13%로 측정되었다.

2차 건조에서 59시간 경과 후 최건시험재(G-2)의 함수율이 3.3%로 측정되어 열기건조를 종료하고 이쿼라이징 처리를 실시하였다(Fig. 3-b). 이때, 다른 함수율시험재는 대부분 목표함수율에 도달하지 못하였으며, 59시간의 열기건조 중 평균 건조속도는 0.419 %/hr (\pm 0.030)이었다. 그러나 1차 건조에서는 건조스케줄의 최종단계(82°C, 26 %RH)를 이쿼라이징 처리로 이용한 것과 달리 2차 건조에서는 별도로 설정된 이쿼라이징 조건(65.5°C, 20 %RH)을 이용하였다. 이로 인하여 낮은 온도를 적용함에 따라 건조속도가 느려져 이쿼라이징 처리(53시간)를 포함한 건조속도는 0.242 %/hr (\pm 0.019)로 2차 건조에서 1차 건조에 비하여 강한 스케줄을 적용하였

음에도 이쿼라이징 처리를 포함할 경우 오히려 건조속도가 감소하였다. 112시간의 2차 건조와 이쿼라이징 처리 이후에 컨디셔닝 처리(71.1°C, 71 %RH)를 22시간 동안 수행하였다. 이쿼라이징 처리 후 시험재의 함수율은 6.2%로 측정되었으며, 컨디셔닝 처리 후 시험재의 평균 최종함수율은 8.3%로 약 2.1% 증가하였다.

Fig. 3에서 표현된 시험재의 기호(예: 1-2 또는 A-3) 중 앞 기호는 길이 3.6 m 판재의 기호이고, 뒷번호는 3.6 m의 판재에서 채취한 3개의 재장 1 m의 시험재 중 실제 열기건조에 이용된 시험재의 번호이다.

건조 중 각각 4개의 시험재를 선택하여 측정된 건조 중 폭방향의 수축률은 1차 건조에서 3.741% (\pm 0.541), 2차 건조에서 3.674% (\pm 0.656)이고, 두께방향의 수축률은 1차 건조에서 4.136% (\pm 0.404), 2차 건조에서 3.377% (\pm 1.261)로 측정되었다. 본 연구의 수축률 측정에 이용된 시험재는 정목판재와 판목판재를 구분하지 않고, 건조 대상 목재의 폭과 두께의 수축률을 측정된 결과이다.

3.2. 건조 후처리의 효과

건조 후 처리가 목재의 변형에 미치는 영향을 파악하기 위하여 열기건조를 마친 시험재와 건조 후 처리를 마친 시험재의 폭굽음, 길이굽음, 측면굽음, 비틀림 등의 틀어짐을 측정하였다(Table 2).

Table 2. Warp of *Larix kaempferi* lumber after kiln-drying, conditioning, and planing

Warp* (mm) and its rate (%)							
After final step of drying schedule (T10-C4)				After planing after final step of T10-C4			
Cup	Bow	Crook	Twist	Cup	Bow	Crook	Twist
4.118 (2840)**	2058 (0.206)	1042 (0.104)	9.099 (0.910)	0 (0)	1950 (0.195)	0.743 (0.074)	6.644 (0.664)
After conditioning				After planing after conditioning			
Cup	Bow	Crook	Twist	Cup	Bow	Crook	Twist
2573 (1.774)	3,060 (0.316)	1,750 (0.175)	4,786 (0.479)	0 (0)	2,999 (0.300)	1,736 (0.174)	2,917 (0.292)

* warp, distance between surface of lumber and surface of plate

** the rate in the case of cup : warp / width 100

the rate in the case of bow, crook, and twist : warp / length 100

Table 2에 제시된 것과 같이 1차 건조 후 폭굽음은 평균 4.118 mm, 비틀림은 평균 9.009 mm로 비교적 큰 값으로 측정되었다. 교호집성재 라미나로 사용될 본 시험재의 최종 가공 가공 후 구조용 제재목의 규격치수인 두께 38 mm로 고정하여 대패가공하고, 폭은 140 mm를 기준으로 대패가공한 후 틀어짐을 측정하였다. 대패가공 후 폭굽음은 많이 보완되어 거의 발견되지 않았으나, 비틀림은 약 6.644 mm로 측정되었다. 교호집성재의 라미나로 이용시 문제점을 야기할 만한 수준이었다. 폭굽음과 비틀림은 대패가공을 필수적으로 요구하는 집성재 또는 교호집성재의 제조시 수율감소의 주원인이며, 또한 라미나 간의 접착을 방해하는 요인이다. 그러므로 교호집성재의 제조를 위한 라미나를 열기건조하는 경우, 영구변형을 억제할 수 있는 압체압력의 적용 필요성이 부각되었다. 컨디셔닝 처리를 실시한 후의 폭굽음은 4.118 mm에서 약 40%감소하였으며, 비틀림은 9.099 mm에서 약 40% 감소하였다. 반면, 판재의 길이방향의 결합인 길이굽음과 측면굽음은 건조 후 처리에 의한 효과를 찾기 어려웠다. 이는 폭굽음과 비틀림을 발생시키는 건조응력을 고온고습의 컨디셔닝 처리로 완화시켜 틀어짐의 크기를 줄이고, 영구변형을 줄이는 효과가 있기 때문으로 사료된다.

3.3. 열기건조 중 건조응력 분석

3.3.1. 1차 건조 중 프롬법을 이용한 건조응력 분석

Fig. 4에 1차 건조 중 열기건조 스케줄 단계를 변경할 때, 시험재를 1개씩 선정하여 프롬법을 실시한 결과를 제시하였다.

T10-C4의 열기건조스케줄 3단계(26시간)를 마친 후 초기함수율이 30.5%인 시험재(1-3)의 평균함수율은 26.1%로 측정되었다. 판재의 내층, 중층, 외층에서 함수율 시험편을 채취하여 전건법으로 함수율 분포를 측정한 결과는 내층 22.3%, 중층 29.0%, 외층 22.1%로 함수율 경사는 약 7%로 높은 편이었으며, 역표면경화가 발생하였다. 4단계(11시간)를 마친 후 초기함수율이 29.8%인 시험재(7-1)의 평균함수율은 19.4%이고, 내층 16.5%, 중층 22.8%, 외층 17.1%로 함수율 경사는 약 6%이고, 표면경화는 발생하지 않았다. 5단계(12시간)를 마친 후 초기함수율이 30.3%인 시험재(5-1)의 평균함수율은 15.6%이고, 내층 14.5%, 중층 18.6%, 외층 14.1%로 함수율 경사는 약 4%이고, 약한 표면경화가 발생하기 시작하였다. 6단계(22시간)를 마친 후 초기함수율이 29.7%인 시험재(1-1)의 평균함수율은 11.4%이고, 내층 10.5%, 중층 13.6%, 외층 9.4%로 내외층 간의 함수율 경사는 약 4%이고, 표면경화가 많이 발생하

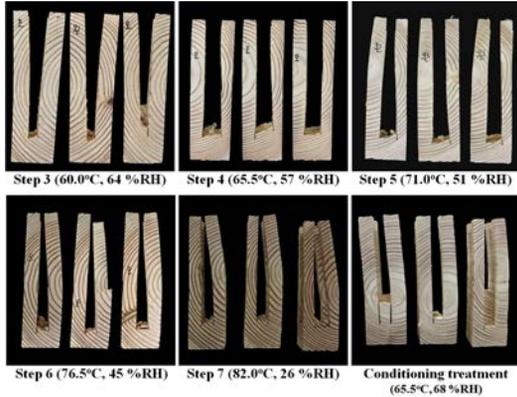


Fig. 4. Prongs' shape immediately after cutting during kiln-drying with T10-C4.

였다. 7단계(24시간)를 마친 후 초기함수율이 29.3%인 시험재(4-1)의 평균함수율은 5.6%로 목표함수율에 도달하였음을 확인하였다. 또한 내층 5.6%, 중층 7.0%, 외층 5.2%로 내외층 간의 함수율 경사는 약 1.5%이며, 표면경화가 더 커짐을 확인할 수 있다. 표면경화율이 0~33 %이면 경미, 33~67%이면 보통, 67~100%이면 심함, 0% 이하이면 역표면경화라는 표면경화율 기준(정 등 2008)을 적용하였을 경우, 본 연구에서 목표함수율에 도달한 시험편의 평균 표면경화율은 36.0% (± 2.3)로 보통 수준이었다.

열기건조 이후 27시간 동안 컨디셔닝 처리한 시험재의 평균 함수율은 7.1%이고, 약한 표면경화가 발생하여, 그 후 24시간을 추가로 컨디셔닝 처리한 시험재(3-3)의 평균 함수율은 8.4%이고, 폭굽음에 의한 영구변형이 발견되었으나, 표면경화는 발생하지 않았다. 함수율 경사는 내층 6.3%, 중층 6.6%, 외층 6.3%로 약 0.3%의 수준을 보였다. 프롱법은 목재산업계에서 열기건조 후 건조재의 잔류응력을 육안적으로 인식하기 위한 방법으로 적합하다고 판단되며, 적극 사용될 것을 기대한다.

3.3.2. 2차 건조 중 슬라이스법을 이용한 건조 응력 분석

프롱법은 열기건조 중 목재의 잔류응력을 직관적으로 파악할 수 있는 장점이 있는 반면, 표면과 내부

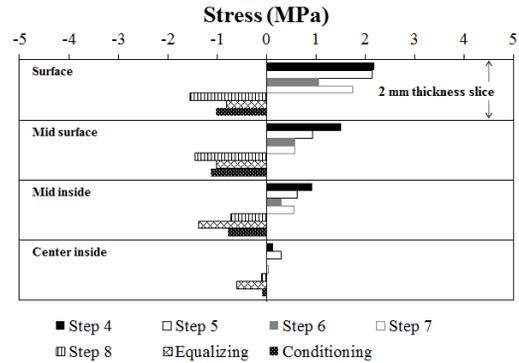


Fig. 5. Change of drying stress during 2nd drying.

에 작용하는 건조응력을 정량적으로 분석할 수 없다는 단점이 있다. Fig. 5에 2차 건조 중 슬라이스 절단시의 탄성변형량과 목재의 함수율 변화에 따른 탄성계수를 이용하여 표면에서 두께방향으로 약 10 mm까지의 응력을 제시하였다.

T12-D5의 열기건조스케줄 4단계(12시간)를 마친 후 초기함수율이 34.0%인 시험재(F-2)의 평균함수율은 28.4%로 측정되었다. 판재의 내층은 24.2%, 중층은 33.9%, 외층은 25.2%로 내외층 간의 함수율 경사는 약 7%였다. 표면은 약 2.2 MPa의 인장응력이 발생하고 있으며, 이 인장응력은 깊이 10 mm까지 발생하고 있다. 더 내부의 경우 압축응력이 발생한 것으로 예측할 수 있다. 5단계(9시간)를 마친 후 초기함수율이 32.8%인 시험재(E-3)의 평균함수율은 23.6%이고, 내층 21.2%, 중층 31.9%, 외층 19.6%로 함수율 경사는 약 10%로 높은 편이었다. 표면에서 약 2.1 MPa의 인장응력이 발생하고 있으며, 4단계와 마찬가지로 약 10 mm의 깊이보다 더 내부의 경우는 압축응력이 발생한 것으로 예측할 수 있다. 6단계(13시간)를 마친 후 초기함수율이 31.3%인 시험재(D-3)의 평균함수율은 19.4%이고, 내층 17.3%, 중층 26.4%, 외층 16.4%로 함수율 경사는 약 10%이었다. 표면의 인장응력은 약 1.0 MPa이고, 4·5단계에 비하여 표면의 인장응력이 완화되고 있음을 확인할 수 있었다. 7단계(11시간)를 마친 후 초기함수율이 40.4%인 시험재(C-3)의 평균함수율은 24.4%이고, 내층 18.1%, 중층 28.2%, 외층 20.2%로 함수

을 경사는 약 10%이었다. 표면의 인장응력은 약 1.7 MPa이다. 6단계에서 표면의 인장응력이 완화되고 있는 것을 확인할 수 있었으나 상대적으로 7단계 후 건조응력을 측정할 시험재의 경우, 다른 건조 시험재에 비하여 높은 함수율로 아직 표면의 인장응력이 큰 값으로 존재하고 있다. 마지막 8단계(14시간)에서 초기함수율이 30.7%인 시험재(B-3)의 평균함수율은 6.8%이고, 내층 5.9%, 중층 9.0%, 표층 6.6%로 함수율 경사는 약 3%이다. 응력의 역전이 발생하여 표면은 약 1.5 MPa의 압축응력을 받고 있는 상태이다.

열기건조 후 이쿼라이징과 컨디셔닝 처리를 실시한 시험재(E-1)의 초기함수율은 34.6%이고, 최종함수율은 9.2%이다. 내층 9.1%, 중층 10.0%, 표층 8.6%로 함수율 경사는 약 1%이다. 표면에서 10 mm의 깊이까지 1 MPa 이하의 압축응력이 작용하고 있다.

위와 같은 연구결과는 표면의 인장응력과 압축응력이 건조 중 최대 2.2 MPa를 초과하지 않고 있음을 제시한다. 낙엽송의 횡단방향 인장강도가 생재상태에서 2.3 MPa, 함수율 12%에서 3.0 MPa이고, 압축강도가 생재상태에서 2.8 MPa, 함수율 12%에서 6.4 MPa인 것을 고려하면(Kretschmann 2010), 건조응력이 조금 더 발생할 수 있는 강한 조건의 건조가 가능하다. 본 연구결과는 건조 중 발생한 표면의 탄성변형과 탄성계수를 이용한 결과로 추후 점탄성변형과 점성변형을 측정하여 보다 정밀한 건조응력을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

교호집성재의 제조 시 발생하는 라미나 간의 접촉 불량과 사용 시 발생하는 변형을 억제하기 위해서 잔류응력이 적은 라미나의 생산이 필수적이다. 잔류응력을 라미나 제조 시와 제조 후 제어하는 방법을 개발하기 위하여 본 연구에서는 미국 임산물 연구소(FPL)의 낙엽송 열기건조스케줄(T10-C4)과 보다 강한 스케줄(T12-D5)을 이용한 열기건조와 건조 후 처리를 수행하여 건조 중과 건조 후 낙엽송 판재의 잔류응력을 평가하였다. 3단계부터 적용한 T10-C4 스케줄의 건조속도는 0.286 %/hr, 4단계부터 적용

한 T12-D5의 건조속도는 0.419 %/hr로 측정되었으며, 건조 후처리인 이쿼라이징, 컨디셔닝 처리를 통하여 함수율의 균일화 및 건조응력의 완화효과를 확인할 수 있었다.

건조응력의 정성적·정량적 평가를 위해 프룽법과 슬라이스법을 적용하였다. 열기건조 표면에서 발생하는 건조응력은 최대 2.2 MPa를 초과하지 않았으며, 이 값은 낙엽송의 횡단방향 인장강도 평균 2.65 MPa보다 작은 값으로 표면할렬이 발생하지 않은 이유를 확인할 수 있었다. 본 연구결과를 토대로 점탄성변형과 점성변형량에 대한 분석을 추가하여 보다 정밀한 건조응력을 예측할 수 있으리라 기대된다.

사 사

본 연구는 산림청 임업특정연구(기획연구과제) 『국산재를 이용한 교호집성재 개발 및 상업화를 위한 연구』(과제번호 : S111213L100120)의 연구과제 지원에 의하여 이루어진 것임.

참 고 문 헌

1. 심상로, 여환명, 심국보. 2005. 이수종 구조용집성재의 전단접착력 및 접착내구성 평가. 목재공학 33(1): 87~96.
2. 정희석, 강호양, 박정환, 이남호, 이형우, 강춘원, 여환명. 2008. 새로 쓴 목재건조학. 서울대학교출판부. 서울. p. 511.
3. Bodig, J. and B. A. Jayne. 1982. Mechanics of Wood and Wood Composites. Van Nostrand Reinhold Company. New York. NY. USA. p. 714.
4. Boone, R. S., C. J. Kozlik, P. J. Bois, and E. M. Wengert. 1988. Dry Kiln Schedules for Commercial Woods-Temperate and Tropical. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-57. Madison. WI. USA. p. 158.
5. Dahiblom, O., S. Ormarsson, and H. Petersson. 1996. Prediction of deformation in wood during by an extended two-dimensional formulation. Paper presented at the 5th IUFRO International Wood Drying Conference. Quebec City. Canada. 67~76.
6. Kretschmann, D. E. 2010. Mechanical Properties of wood. In : Chapter 5. Wood Handbook: Wood

- as an Engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-190. Madison. WI. USA. p. 508.
7. Li, D. G. and L. B. Gu. 1999. The mechano-sorptive behavior of poplar during high temperature drying. *Drying Technol.* 17(9): 1947~1958.
 8. Pang, S. 2000. Modeling of stress development during drying and relief during steaming in *Pinus radiata* lumber. *Drying Technol.* 18(8): 1677~1696.
 9. Perré, P. 1996. The numerical modelling of physical and mechanical phenomena involved in wood drying. Paper presented at the 5th IUFRO International Wood Drying Conference. Quebec City, Canada. 11~38.
 10. Rice, R. W. and R. L. Youngs. 1990. The mechanism and development of creep during drying of red oak. *Holz Roh-Werkst* 48(1): 73~79.
 11. Simpson, W. T. 1991. Dry Kiln Operator's Manual. Agriculture Handbook No. 188. Madison. WI. USA. p. 274.
 12. Yeh, B., D. Kretschmann, and B. Wang. 2011. Manufacturing Cross-laminated timber manufacturing. In: Chapter 2 CLT Handbook. FPInnovations. Quebec. Quebec. Canada.
 13. Zhan, J. F., J. Y. Gu, and S. Q. Shi. 2009. Rheological behavior of Larch timber during conventional drying. *Drying Technol.* 27(10): 1041~1050.