

리기다소나무 고온건조*1

여 환 명*2 · 심 상 로*2†

High Temperature Drying of Pitch Pine Lumber*1

Hwan-Myeong Yeo*2 · Sang-Ro Shim*2†

요 약

본 연구에서는 국산 리기다소나무의 대량 수요 창출과 이용기술 개발, 특히 구조용집성재 라미나로서의 이용 가능성 구명을 위해 고온에서 건조된 판재의 변형량과 변색정도를 조사 평가하였다. 함수율 분포시험을 통해 평가된 고온건조판재 내 적은 함수율 경사, 프룽테스트를 통해 확인된 적은 내부 잔류응력, 집성가공 가능한 적은 변형량 등은 본 연구에서 적용된 고온건조스케줄이 구조용집성재용 라미나 건조조건으로 사용 가능성이 높다는 결과를 보여주었다. 예비실험을 통해 송진에 의한 접착장애는 발생하지 않는 것으로 확인 되었으나, 잔류수지에 의한 구조용집성재의 접착내구성 및 도장성능 감소현상 구명을 위한 수지정량 분석시험이 추후 요구되었다. 또한 최종 함수율이 집성재 라미나로서 이용 가능한 함수율보다 상당히 낮은 수준으로 건조되었으며 저온열기건조 판재에 비해 변색이 심하므로 함수율 제어 및 변색 억제를 위한 최적의 건조조건 구명에 대한 연구가 좀더 필요 할 것으로 사료된다.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the applicability of high temperature drying to pitch pine (*Pinus rigida*) lumber, especially intended for use as lamina of structural glued laminated timber (glulam), to enhance the efficient utilization and provide added-value to that species. The high temperature schedule and drying procedures utilized were shown to be reasonable for drying glulam lamina due to the occurrence of small moisture gradients, minimal residual drying stress, and low warpage. Through preliminary tests, it was confirmed that residual resin at lamina surfaces did not adversely affect the gluing process. However, quantitative analysis of resin is required for developing a

* 1 접수 2004년 1월 12일, 채택 2004년 4월 16일

* 2 국립산림과학원 임산공학부

† 주저자(corresponding author) : 심상로(e-mail: srshim@foa.go.kr)

method to constrain the occurrence of pitch trouble with respect to decreasing long-term adhesive and finish durability of glulam in use after manufacturing. The final moisture content of high temperature dried lamina was much lower than target moisture content and discoloration was more severe than anticipated. In a further study, it will be necessary to determine the optimal drying conditions, such as temperature, humidity, drying time, and top load restraint level, which could best control discoloration, warpage, and moisture content of the lamina, while minimizing fuel expense.

Keywords: Pitch pine, high temperature drying, moisture gradient, residual drying stress, warpage, pitch trouble, structural glued laminated timber, lamina

1. 서 론

리기다소나무(*Pinus rigida*)는 척박한 산지에 조림 하여도 활착이 잘 되기에 우리나라 전역에 낙엽송 다음으로 많은 양이 조림되어 치산녹화 성공을 이루는데 크게 기여한 수종이다. 소기의 목적을 달성하고 경제수종으로 대체조림이 요구되는 리기다소나무의 용도개발과 이용확대가 시급한 실정이다. 다량의 송진 함유, 높은 잔용이 균집성, 청변에 의한 높은 피해 발생률, 음지건조성 불량, 높은 틀어짐 발생률 등 제재목으로 이용시 장애가 되는 많은 결점을 지니기에 비교적 경제적 가치가 낮은 수종이기는 하지만 본 수종은 전국 각지에 48만여 ha가 조림되어져 있으며 벌기령에 도달한 영급의 리기다소나무가 상당량 있을 것으로 추정되는 바 현시점에서 리기다소나무의 합리적 이용방안 마련에 대한 연구수행은 필연적인 것으로 생각된다.

현재 목재산업 현장에서는 펄프제에 비해 고부가가치화와 대량수요처 개발 가능성이 높은 제재목의 필수 가공공정인 건조공정상의 건조결함 발생 억제와 에너지 절감 및 건조시간 단축 등에 관한 기술개발을 요구하고 있다. 리기다소나무 특유의 송진이 발생과 가지치기 작업 등 육림작업의 미실시에 의해 제재목에선 크고 균집된 송이를 쉽게 발견할 수 있다. 이 크고 다량의 송이에 의해 유도되는 심한 섬유경사 변이는 결국 건조 중 제재목의 틀어짐 발생을 심화시킨다. 그리고 리기다소나무 내부에 다량 함유된 송진은 건조 중 건조기 내 온습도 센서와 기타 시설물을 오염시키기 쉬우며, 관행열기건조에 의해서는 목재 내부의

송진이 충분히 제거되지 않아 건조목의 접착 또는 도장성능을 저해하는 주된 요인이 되기도 한다. 또한 벌채 후 건조시기를 놓쳤을 경우 청변에 의한 피해를 크게 입는 등 건조 시 주의를 요할 필요가 있는 수종이다. 국산 리기다소나무 건조에 대한 연구는 천연건조, 열기건조, 고온건조, 열판건조 등에 대한 연구가 간헐적으로 진행되어 왔는데, 천연건조에 관해서는 리기다소나무 조재목의 천연건조에 미치는 박피처리 효과(이필우 1967), 기상인자와 관련한 천연건조 함수율 감량 추정(정희석 등 1986) 등이 있고, 관행열기건조와 고온건조에 관해서는 평소각재의 고온건조(박문재, 정희석 1987)와 건조저항을 이용한 건조스케줄 개량(이경섭, 정희석 1988) 등이 있으며, 열판건조에 관해서는 인공조림 침엽수재의 열판건조(정희석 등 1993) 등이 있다.

본 연구에서는 리기다소나무의 대량 수요처 개발과 이용기술 개발, 특히 구조용집성재용 라미나로서의 이용가능성 타진을 위해 고온 고습 압제 조건하에서 건조된 판재의 변색정도와 변형량을 조사 평가하였으며, 앞으로의 건조기술 개발방향에 대해 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

1967년 경기도 양평군 지체면 일신리 지역의 산에 조림된 리기다소나무(*Pinus rigida*) 임분 내 흉고직경이 28 cm 이상으로 비교적 통직한 나무 52본을 선정, 벌채하여 두께 33 mm와 길이 3.6 m로 고정하고 3가지 폭(150, 180, 210 mm)별로 3가지 형태의 판재로 제재하였다. 폭 150 mm 판재 145매, 폭 180 mm

Table 1. High temperature schedule and low temperature schedule for drying pitch pine lumber

| High temperature schedule | | | | | Low temperature schedule | | | | |
|---------------------------|---------------|---------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|---------------|--------------------------|-----------------------|
| Time (hr.) | Dry bulb (°C) | Wet bulb (°C) | Wet-bulb depression (°C) | Relative humidity (%) | Moisture content (%) | Dry bulb (°C) | Wet bulb (°C) | Wet-bulb depression (°C) | Relative humidity (%) |
| 0~8 | - | 96 | - | - | > 50 | 50 | 485 | 15 | 91 |
| 8~18 | 120 | 93 | 27 | 38 | 50~40 | 50 | 47 | 3 | 84 |
| 18~20 | 110 | 83 | 27 | 36 | 40~30 | 50 | 445 | 55 | 73 |
| 20~22 | 100 | 73 | 27 | 34 | 30~25 | 55 | 465 | 85 | 62 |
| 22~38 | 95 | 68 | 27 | 32 | 25~20 | 60 | 49 | 11 | 56 |
| 38~54 | 90 | 60 | 30 | 25 | 20~16 | 65 | 47 | 18 | 39 |
| 54~70 | 95 | 93 | 2 | 93 | 16 > | 65 | 43 | 22 | 30 |

판재 124매, 폭 210 mm 판재 96매, 총 365매 약 7.6 m³를 준비하여 전건법에 의해 생재함수율을 측정 한 후, 두께와 폭이 2.4 cm이고 길이가 1.8 m인 잔목을 하나의 잔적 층당 12개씩 삽입하여 잔적 한 후, 건조 중 판재의 틀어짐 억제를 위해 2,000 kg 짜리 상부압체물 2개를 6.5 m²(폭 1.8 m×길이 3.6 m)의 잔적상단부에 올려 약 620 kgf/m²의 압체력이 잔적 상부에 작용하도록 한 후 잔적목을 건조기에 투입하였다. 사용된 고온건조기는 일본 신시바사의 SKD-95HPT형으로 풍속변화가 가능하고, 전기저항식 함수율센서가 장착되어 있었다.

Table 1의 고온건조스케줄을 적용하여 건조한 후 배기 fan을 작동시키며 건조기 내부 온도를 상온에 근접시킨 후 12개의 판재에서 시험편을 채취해 전건법으로 최종함수율을 측정하였다. 또한 판재 폭방향의 횡응력시험을 위해 프롱테스트를 실시하였다. 최종함수율 측정용 판재로부터 횡응력 측정용 시험편을 채취하여 3개의 프롱을 만든 다음 중앙의 것을 제거하고 거단 전과 후의 두께차이를 이용한 표면경화율(정희석 1990)을 측정하였다.

판재를 건조기에서 꺼내 실외에 10일간 야적하여 양생한 후와 대패가공 후 판재의 틀어짐(폭굽음, 길이굽음, 측면굽음, 비틀림)을 측정하기 위해 30 cm×4 m 평면의 작업대를 제작하였다. 폭굽음은 판재의 폭방향 변의 양단을 평면에 밀착시켜 평면으로부터 가장 멀리 떨어진 부위를 선택하여 측정하였으며, 길이굽음과 측면굽음은 판재의 길이방향 변의 양단을 평면에 밀착시켜 평면으로부터 가장 멀리 떨어진 부

위를 선택하여 측정하였고, 비틀림은 판재의 세 꼭지점을 평면에 밀착시켜 나머지 한 꼭지점이 평면으로부터 떨어진 높이 측정을 통해 결정하였다. 이 틀어짐량은 유사한 건조조건에서 건조된 낙엽송 판재의 변형량과 비교되었다. 건조초기 8시간 동안 습구온도를 96°C로 유지시키도록 과열증기를 투입하고, 8시간 후 전열기를 작동시켜 건조기 내부의 건조온도와 습구온도를 스케줄에 따라 조절하였으며, 최종 16시간 동안은 건조온도 95°C에서 93% 상대습도의 고습조건을 적용해 목재 내부 건조응력 완화를 유도하였다(Table 1).

또한 색차계(COLOR READER CR-10, MINOLTA Co., Ltd.)를 이용하여 고온건조판재의 변색정도를 측정하였으며, 이 고온건조 판재의 변색정도와 비교하기 위해 Table 1의 저온열기건조스케줄에 의해 건조된 판재 중 잔적목의 표면색깔을 대표할 수 있다고 판단되는 6개의 판재를 골라 변색정도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 함수율, 잔류 건조응력, 송진제거 효과

건조 전 전건법에 의해 측정된 모든 판재의 평균 초기함수율은 136%였고, 고온건조스케줄을 따라 건조한 후 배기 fan을 작동시키며 건조기 내부온도를 상온에 근접시킨 후 12개의 판재에서 채취한 시험편의 평균 최종함수율은 5.7%였으며, 판재의 내층과 중층, 외층에서 함수율 시험편을 채취하여 전건법으로 함수

Table 2. Initial MC of pitch pine, final MC after high temperature drying, and MC after 10 day piling in the yard

| Classification | Initial MC (%) | Final MC (%) | MC after 10 day piling (%) |
|----------------------|----------------|--------------|----------------------------|
| Mean (Standard dev.) | 136 (17.8) | 5.7 (0.59) | 9.1 (0.55) |

Table 3. Warp of pitch pine lumber after drying and planing

| Lumber width (mm) | After drying | | | | Lumber width (mm) | After planing | | | |
|-------------------|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-------------------|----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | Warp (mm) and its rate (%) | | | | | Warp (mm) and its rate (%) | | | |
| | Cup | Bow | Crook | Twist | | Cup | Bow | Crook | Twist |
| 150 | 0.3 (0.2) ^{*1} | 5.3 (0.2) | 6.4 (0.2) | 8.6 (0.2) | 140 | 0.1(0.04) | 3.0 (0.1) | 5.2 (0.2) | 2.9 (0.1) |
| 180 | 0.6 (0.3) | 6.1 (0.2) | 6.4 (0.2) | 12.2(0.3) | 170 | 0.02(0.1) | 3.0 (0.1) | 4.6 (0.1) | 3.4 (0.1) |
| 210 | 0.6 (0.3) | 5.3 (0.2) | 7.8 (0.2) | 11.6(0.3) | 200 | 0 (0) | 2.3 (0.1) | 6.2 (0.2) | 2.6 (0.1) |
| Mean | 0.5 (0.3) | 5.6 (0.2) | 6.9 (0.2) | 10.8(0.3) | Mean | 0.04(0.05) | 2.8 (0.1) | 5.3 (0.2) | 3.0 (0.1) |

*1: in the case of cup: warp/width x100, in the case of bow, crook, and twist: warp/length x100

을 분포를 조사해 본 결과 내층 5.8%, 중층 5.5%, 외층 5.8%로 내외층 간의 함수율경사가 적었다. 고온건조 중 건조기 내부 출입을 통한 시험편 채취가 곤란하여 전건법에 의해서는 함수율을 측정하지 못했으나, 건조기를 작동하기 전 목재 내부에 함수율 측정용 핀을 삽입시켜 전기저항식 함수율 측정기로 모니터링한 결과에 따르면 건조스케줄 마지막 단계에서의 함수율은 약 10%였다. 판재를 건조기에서 꺼내 전건법으로 최종함수율을 측정하기 전 배기 fan을 작동시킨 상태에서 건조기 내부온도를 상온으로 떨어뜨리는 과정에서 목재는 흡습한 수분 중 일부를 공기 중으로 방출한 것으로 보인다. 건조판재를 실외에 10일간 야적하여 양생한 후 모든 건조판재의 함수율을 측정한 결과 평균함수율은 9.1%(최소 7.8%, 최대 10.3%)이었다 (Table 2).

표면경화율이 0~33%이면 경미, 33~67%이면 보통, 67~100%이면 심함, 0% 이하이면 역표면경화라는 표면경화율 기준(정희석 1990)을 적용하였을 경우, 본 실험에서 프롱테스트를 통해 측정된 평균 표면경화율은 16.3%(표준편차 5.3%)로 경미한 수준이었다. 이와 같이 무시되어질 수 있을 정도로 적게 발생한 내외층 간의 함수율경사와 잔류용력은 본 연구에서 적용된 고온건조스케줄의 실용가능성을 보여준다. 하지만 고온건조의 경우 건조기 내부온도가 높아 기내 출입이 용이치 않고, 실제함수율 측정을 위한 건조

중단은 열효율을 크게 감소시켜 건조 중 함수율 평가 시 주의를 요한다. 건조 후 최종함수율은 5.7%로 구조용집성재 라미나로 이용 가능한 함수율(15% 이하)에 비해 상당히 낮은 수준까지 건조되었다. 건조 전 판재의 함수율별 선별 잔적 방법과 적절한 함수율 센서 개발과 함께 건조 중 함수율 변화 예측을 위한 모델 개발에 대한 연구가 병행되어야 할 것으로 사료된다.

고온건조 판재표면에서는 잔류수지에 의한 끈적거림을 느낄 수 없었다. 반면 최고 온도 65℃를 적용한 열기건조 판재는 표면에 잔류하는 수지에 의해 끈적거림이 느껴졌다. 추후 수지정량 시험과 더불어 잔류수지량과 접착성능간의 관계에 대한 연구가 요구되는 하나, 예비실험으로 고온건조판재에 300 g/m²의 레조시놀수지를 도포하여 구조용집성재를 제조하여 접착성능을 측정된 결과 접착력의 저하는 발견되지 않았다.

3.2. 변형

건조기로부터 건조목을 꺼내 실외에 10일간 야적하여 양생한 후와 대패가공 후 고온건조판재의 폭굽음, 길이굽음, 측면굽음, 비틀림 등 건조판재의 틀어짐을 측정된 결과는 Table 3과 같다. 본 연구에서 사용된 상부압체물은 잔적면 상부에 약 620 kgf/m²이 작용하

Table 4. Lateral surface L*a*b* color values of earlywood and latewood of high-temperature and low-temperature dried pitch pine lumber

| Section | High temperature drying | | | | | | Low temperature drying | | | | | |
|---------------|-------------------------|--------|--------|----------|--------|--------|------------------------|--------|--------|----------|--------|--------|
| | Earlywood | | | Latewood | | | Earlywood | | | Latewood | | |
| Color | L* | a* | b* | L* | a* | b* | L* | a* | b* | L* | a* | b* |
| Mean | 78.1 | 6.9 | 25.7 | 66.6 | 12.9 | 31.2 | 85.0 | 3.8 | 22.2 | 75.4 | 11.0 | 30.4 |
| Standard dev. | (1.79) | (0.99) | (0.94) | (3.76) | (1.72) | (1.12) | (0.66) | (0.39) | (0.74) | (1.49) | (1.33) | (1.78) |

며, 한 잔적 층당 12개가 삽입되어 있는 두께와 폭이 모두 2.4 cm이고 길이 1.8 m인 잔목 위에 전달되는 압체력을 계산해 보면 0.8 kgf/cm²의 압체효과가 있는 것으로 평가된다. 건조 후 대패가공을 필수적으로 요구하는 집성재 제조시 수율감소의 주원인인 폭굽음의 경우 평균 0.5 mm로 크게 문제가 되는 수준이 아니었다. 비틀림의 경우 10.8 mm로 구조용집성재 라미나 건조를 위해서는 만족스런 수준이나 벽판재 등의 내장용재료의 사용시에는 주의할 필요가 있었다. 하지만 목표치수를 두께는 27 mm으로 고정하고 폭은 140, 170, 200 mm로 분류하여 대패가공한 후 틀어짐을 조사해 본 결과 폭굽음은 거의 발견되지 않았으며, 길이굽음과 비틀림 역시 많이 보완되어 2.8 mm와 3.0 mm로 낮은 수준이었다.

본 연구에서 측정된 리기다소나무 건조판재의 변형을 평균 초기함수율 50.4%, 두께 50 mm, 폭 250 mm, 길이 1.8 m 낙엽송 판재 43개를 건조온도 120°C에서 잔목 위에 압력 1.2 kgf/cm²이 가해지는 압체 조건에서 최종함수율 6.5%로 고온건조한 경우 폭굽음과 비틀림을 측정된 연구자료(임업연구원 1996)와 비교하여 보았다. 낙엽송의 폭굽음과 비틀림은 평균 1.1 mm와 7.2 mm으로서, 폭굽음률과 비틀림률은 모두 약 0.4%였다. 본 연구에서 조사된 리기다소나무의 폭굽음률과 비틀림률인 0.3%는 낙엽송의 값에 비해 약간 낮다. 물론 두께, 폭, 길이가 다른 크기의 시험체를 사용하여 얻은 결과로 단정짓기는 어려우나, 리기다소나무에 적용된 상부압체력(0.8 kgf/cm²)이 낙엽송에 적용된 압체력(1.2 kgf/cm²)보다 낮음에도 불구하고 변형률이 약간 낮은 점으로 미루어 보아 리기다소나무는 낙엽송에 비해 폭굽음과 비틀림 발생이 약간 적은 수준으로 판단된다. 내장용 벽판재 건조시에는 좀 더 높은 압체력을 적용하면 비틀림을 비롯한 기타 변

형억제에 효과적일 것으로 판단된다.

3.3. 변색

소나무류의 갈변은 변재 내 당류와 아미노산간의 메일라드반응(Maillard reaction)에 의해 발생한다고 알려져있으며(McDonald 2000), 소나무 갈변재 표면에서의 질소 함량과 당류의 잔존률이 내부에 비해 높다고 보고한 몇몇 연구결과들(Boutelje 1990, Terziev 1995)이 위 설명을 뒷받침한다. 본 연구에서 고온건조판재 표면은 저온건조판재에 비해 어둡고 진한 색을 보여주었는데 건조판재 표면의 색깔을 색차계로 분석해본 결과 고온건조판재는 명도를 나타내는 lightness (L*)의 경우 춘재는 8%, 추재는 12% 정도 저온에서 건조된 판재에 비해 낮았으며, redness (a*)와 yellowness (b*)의 경우 춘재와 추재 모두 저온열기건조판재에 비해 높은 채도를 나타내어 고온건조판재와 저온건조판재 간의 색차(dE*)는 춘재의 경우 8.3 추재의 경우 9.1로 평가되었다.

4. 결론

함수율 분포시험을 통해 평가된 고온건조판재 내 적은 함수율 경사, 프롱테스트를 통해 확인된 적은 내부 잔류응력, 집성가공 가능한 적은 변형량 등은 본 연구에서 적용된 고온건조스케줄이 구조용집성재용 라미나 건조조건으로 사용 가능성이 높다는 결과를 보여주었다. 예비실험을 통해 송진에 의한 접착장애는 발생하지 않는 것으로 확인 되었으나, 내부 잔류수지에 의한 구조용집성재의 접착내구성 및 도장성능 감소현상 구명을 위한 수지정량 분석시험이 추후 요

구된다. 또한 최종 함수율이 집성재 라미나로서 이용 가능한 함수율보다 상당히 낮은 수준으로 건조되었으며 저온열기건조 판재에 비해 변색이 심하므로 함수율 제어 및 변색 억제를 위한 최적의 건조조건 구명에 대한 연구가 좀더 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 박문재, 정희석. 1987. 소나무와 리기다소나무 평소각재의 고온건조, 목재공학 15(2): 53~66.
2. 이경섭, 장희석. 1988. 리기다소나무의 건조저항을 이용한 건조스케줄 개량, 목재공학 16(2): 69~78.
3. 이필우. 1967. 리기다소나무 조재목의 천연건조에 미치는 박피처리 효과, 한국임학회지 (6): 37~42.
4. 임업연구원. 1996. 구조용 국산 침엽수재의 건조기술개발, 1996 임업연구보고서 4-II: 121~130.
5. 임업연구원. 1997. 구조용 국산 침엽수재의 건조기술개발, 1997 임업연구보고서 4-II: 116~125.
6. 정희석. 1990. 목재건조, 선진문화사, 서울 p. 331.
7. 정희석, 이남호, 여환명. 1993. 인공조립 침엽수재의 열판건조, 목재공학 21(3): 61~66.
8. 정희석, 한규성, 이남호. 1986. 기상인자와 관련한 소나무와 리기다소나무재의 천연건조 함수율감량 추정, 목재공학 14(6): 7~13.
9. Boutelje, J. B. 1990. Increase in the content of nitrogenous compounds at lumber surfaces during drying and possible biological effects, Wood Science and Technology 24: 191~200.
10. McDonald, A. G., M. Fernandez, B. Kreber, and F. Laytner. 2000. The chemical nature of kiln brown stain in radiata pine. Holzforschung 54: 12~22.
11. Terziev, N. 1995. Migration of low-molecular sugars and nitrogenous compounds in *Pinus sylvestris* L. during kiln and air drying, Holzforschung 49: 565~574.