

# 예비천연건조가 잣나무 중목구조부재의 고온저습건조 특성에 미치는 영향<sup>\*1</sup>

이 창 진<sup>\*2</sup> · 이 남 호<sup>\*2†</sup> · 박 문 재<sup>\*3</sup> · 박 주 생<sup>\*3</sup> · 엄 창 득<sup>\*3</sup>

## Effect of Reserve Air-Drying of Korean Pine Heavy Timbers on High-temperature and Low-humidity Drying Characteristics<sup>\*1</sup>

Chang-Jin Lee<sup>\*2</sup> · Nam-Ho LEE<sup>\*2†</sup> · Moon-Jae Park<sup>\*3</sup> · Joo-saeng Park<sup>\*3</sup> · Chang-Deuk Eom<sup>\*3</sup>

### 요 약

최종함수율은 예비천연건조를 수행한 시험재에서 더 균일하게 건조가 가능하였으며, 예비천연건조 후 고온저습건조 시 최종함수율은 초기함수율에 영향을 받는 것으로 사료된다. 재면할렬 억제 효과는 예비천연건조를 수행한 시험재에서 더 효과적인 것으로 조사되었으나, 예비천연건조 중 발생된 재면할렬에 의한 영향이 크기 때문에 예비천연건조 중 할렬발생 억제가 중요할 것으로 판단된다. 부분엔드코팅은 내부할렬, 표면경화율, 비틀림, 수축율에 미치는 영향이 없는 것으로 조사되었다. 예비천연건조는 고온저습건조 중 내층에 발생하는 인장응력을 감소시켜 내부할렬의 발생을 매우 효과적으로 억제하고 표면경화율을 감소시키는 것으로 조사되었다. 비틀림의 경우 함수율감소에 따른 수축으로 인하여 비틀림의 정도가 증가되었다.

### ABSTRACT

The pre-air-drying of Korean pine before the high-temperature and low-humidity drying was shown to be effective in uniform moisture content distribution and prevention of surface check. Our results suggest that initial moisture content of the timber also plays important role in high-temperature and low-humidity drying method. The pre-air-drying also helps in the reduction of surface checks in Korean pine when compared to the Korean pine dried by only high-temperature and low-humidity. End-coating was not effective in the prevention of twist, shrinkage, case hardening and internal checks. The pre-air-drying reduces the internal tension stresses which occur during high-temperature and low-humidity

\*1 접수 2013년 10월 25일, 채택 2014년 1월 6일

본 연구는 국립산림과학원의 지원에 의하여 수행되었음.

\*2 전북대학교 농업생명과학대학(농업과학기술연구소). College of Agriculture & Life Sciences(Institute of Agricultural Science & Technology), Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea

\*3 국립산림과학원 녹색자원이용부 탄소순환재료과. Division of Wood Engineering, Department of Forest Resources Utilization, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

† 교신저자(corresponding author) : 이남호(e-mail: enamho@jbnu.ac.kr)

drying thus decreasing case hardening and also preventing internal checks. The pre-air-drying decreases the moisture content and causes shrinkage which leads to increased twist in the Korean pine.

**Keywords :** High-temperature and low-humidity(HTLH), High temperature drying(HD), Air-drying, Internal check, Final moisture contents, Heavy timber

## 1. 서 론

천연건조는 인공건조와 비교하여 경제적 측면에서 여러 장점을 가지고 있지만, 건조속도가 느리고 계절에 따른 외기적요인의 영향이 크다는 단점이 있다. 정 등(2003)은 횡단면 변장 14.0 cm와 16.5 cm의 정각재를 규격함수율 18% 수준까지 천연 건조하는데 걸리는 기간은 소나무의 경우 각각 26주와 32주, 일본잎갈나무의 경우 각각 32주와 48주가 소요되었으며, 두 수종 모두 변장의 크기가 재장과 두께 방향 수분경사에 영향을 미친다고 하였다. 또한 섬유포화점 이후의 건조속도가 현저히 감소하였다고 보고하였다.

고온건조방법은 관행열기건조방법보다 건조가 빠른 반면, 내부할렬 및 재면할렬과 같은 결함이 발생되면 그 정도가 심하게 나타나는 단점이 있다(Wengert 1974). 내부할렬은 목재내부의 함수율이 감소되고 수축이 시작되면서 내부에 발생한 인장응력이 원인으로 주로 목재내부의 함수율이 높은 상태에서 고온으로 장시간 건조할 때 발생한다. 吉田 등(2004)은 고온저습건조가 표면에 인장세트를 형성시킴으로서 재면할렬 예방효과는 탁월하지만 고온저습처리 후 고온건조 단계에서 내부할렬이 발생하는 문제점을 지적하고, 내부할렬의 발생을 억제하기 위해서는 고온저습처리 후 건구온도를 100°C 이하로 낮출 것을 제안하였다.

고온저습처리는 건조초기 표층과 인접한 내부인접층간의 수분경사를 크게 형성시켜 표층에 상당한 인장응력이 작용하게 되어 재면에 미세한 할렬들을 발생시킨다. 그리고 건조중기 이후 응력이 역전되어 건조초기 표층에 발생한 인장응력과 상응한 크기의 압축응력이 형성되어 고온저습처리 중에 발생하였던 미세한 재면할렬이 닫히게 됨으로서 재면할렬 억제

효과가 탁월하다(吉田 등 2000; 豆田과 藤本 2001).

관행열기건조스케줄은 건조가 진행됨에 따라 건구온도는 증가시키고 상대습도를 감소시키는 것이 일반적이며, 이러한 조건에서 인장세트는 내부의 함수율이 섬유포화점 이하로 감소하게 되면서 형성된다. 그러나 고온저습건조는 증자처리와 냉각 단계를 제외한 모든 건조단계(즉, 건조스케줄에서 목재의 함수율이 감소되는 구간)의 평형함수율이 5% 이하(또는 미만)의 낮은 습도조건에서 건조가 진행된다. 또한, 건조초기 100°C 이상의 고온에서 고온저습처리를 수행한 이후 건구온도를 감소시키고 상대습도는 증가되도록 하여 표층에 작용하는 인장응력을 감소시키고, 표층과 인접한 내부인접층 간의 인장세트가 빠르게 형성된다(이 등 2013;이 2013;이 와 이 2013).

이 등(2013)은 국산 소나무와 잣나무를 대상으로 부분엔드코팅 후 고온저습건조를 수행한 결과 소나무의 경우 수분경사가 거의 존재하지 않으면서 최종함수율이 10% 전후로 균일한 함수율분포를 나타내었다. 그러나 잣나무의 경우 12.8~22.0% 범위로 소나무와 비교하여 높은 최종함수율을 나타내었으며, 최종함수율의 분포에서 함수율 100% 이상인 부위가 내부에 존재하였다고 보고하였다.

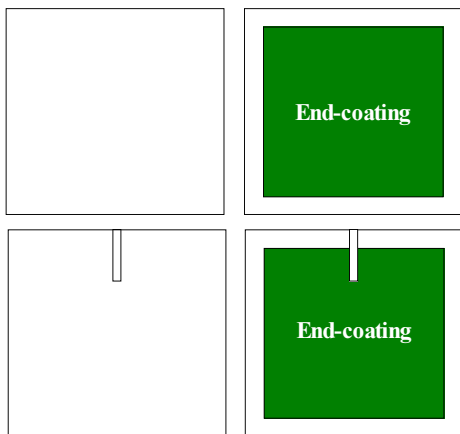
김(1995)은 잣나무의 생재함수율은 변재 170.6%, 심재 59.5%로 약 110%의 차이를 나타내었으며, 수로 갈수록 벽공의 분포가 감소하는 특징이 있다고 보고하였다. Taylor(1991)는 원주기동재를 고온건조할 때 몇몇 경우에 있어서는 수분이 표면을 향해서 이동할 뿐만 아니라 중심을 향해서 이동하기도 한다고 보고하였다.

이에 이 등(2013)은 건조종료 후 100% 이상의 고함수율부위가 내층에 존재하게된 것의 원인이 잣나무 중목구조부재가 고온저습건조 중 심·변재 간의 큰 생재함수율 차이로 인하여 변재의 수분이 중심으

**Table 1.** The quantity for each treatment

Treatment	Quantity (pieces)
N-C	5
N-E	5
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>	
K-C	5
K-E	5
Total	20

N-C, non-kerfed and control; N-E, non-kerfed and end-coating; K-C, kerfed and control; K-E, kerfed and end-coating



**Fig. 1.** Shape of longitudinal kerfing and end-coating treatment.

로 이동하게 되고, 건조가 진행됨에 따라 벽공 주변에 추출물이 쌓이거나 벽공구가 폐쇄되어 수분이동을 방해하였기 때문이라고 보고하였다.

따라서 고온저습건조를 수행하기에 앞서 예비천연건조를 수행한다면 변재의 함수율을 감소시켜 건조중 중심을 향한 수분의 이동을 예방함으로써 표층과 내층의 수분경사를 감소시키고 균일한 최종함수율을 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

이 등(2013)은 중심부분 엔드코팅이 최종함수율과 건조결합의 예방에 큰 효과가 없다고 보고하였으나, 예비천연건조의 수행여부에 따른 차이를 비교함에 있어 보다 정확한 분석을 위해서는 실험조건을 동일하게 적용하여야 할 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 횡단면 변장 22 cm로 가공된

**Table 2.** Moisture contents of the square timbers after pre-air-drying

Treatment	Moisture contents (%)			
	Min.*		Avg.*	Max.*
N-C	17.1	~	27.5	~ 53.9
N-E	16.8	~	31.7	~ 76.0
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>				
K-C	14.4	~	22.1	~ 47.2
K-E	16.7	~	27.0	~ 80.5

Min, minimum; Avg, average; Max, maximum

국산 잣나무 정각기동재를 대상으로 배할가공처리 후 예비천연건조를 수행하였다. 이 후 횡단면 외주부 1.5 cm 범위를 제외한 중심부분에 엔드코팅처리를 실시하고, 예비천연건조가 잣나무 증목구조부재의 고온저습건조 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 공시시험재 및 건조 전처리

본 연구에서는 국산 잣나무(*Pinus koraiensis* S. et Z.)를 공시수종으로 선정하여 횡단면 22 cm × 22 cm, 길이 360 cm 크기로 절삭한 20本の 시험재를 준비하고, 이 중 10本에 등근톱을 사용하여 폭 3 mm, 깊이 6 cm로 배할을 가공하였다(Table 1).

부분엔드코팅은 예비천연건조가 끝난 후 횡단면의 외주부 1.5 cm를 제외한 중심부위에 에폭시 페인트를 사용하여 Fig. 1과 같이 코팅처리 하였다.

### 2.2. 예비천연건조

예비천연건조는 통풍이 잘되는 창고 안에서 두께 2 cm의 잔목으로 잔적된 상태에서 진행되었다. 예비천연건조 후 각 처리에 따른 대표 시험재의 함수율은 Table 2에 나타내었다.

**Table 3.** Drying schedule of the HTLH-HD drying test for the pre-air-dried square timbers of Korean Pine

Stage	DBT* (°C)	WBT* (°C)	Time (hours)
Steaming	95	95	12
<b>HTLH*</b>	120	88	64
<b>HD*</b>	90	68	168
Cooling	-	-	24
Total time			268

HTLH, high temperature and low humidity; HD, high temperature drying; DBT, dry bulb temperature; WBT, wet bulb temperature

### 2.3. 고온저습건조시험

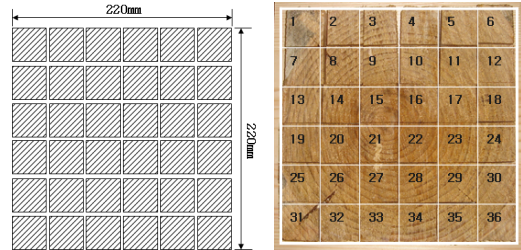
고온저습건조시험은 최고 150°C까지 온도상승이 가능하며, 최대 36 m<sup>3</sup>까지 적재가 가능한 고온열기 건조기(Shinshiba社, SKD-90HPT)를 이용하였다. 팬의 최대속도는 12.6 m/s 이며, 풍향은 57분 가동 3분 정지의 간격으로 정회전과 역회전이 전환된다.

이 등(2013)의 연구결과 내부에 함수율 20% 이상인 부위가 상당히 존재하여 열기건조 시간을 더 길게 하여야 할 필요가 있으나 예비천연건조에 의한 차이를 비교하기 위하여 동일하게 168시간을 적용하였다. 예비천연건조를 수행한 잣나무 중목구조부재의 고온저습건조 스케줄은 Table 3과 같다.

잔적에는 횡단면 3 cm × 3 cm, 길이 100 cm 크기의 건조된 잔목을 사용하여 시험재 간 간격을 3 cm로 하여 잔적하였다. 잔적이 끝난 후 180 cm × 180 cm × 20 cm 크기의 콘크리트 구조물을 사용하여 상단하중을 가하였다.

### 2.4. 최종함수율과 분포 조사

고온저습건조시험 종료 후 각각의 처리별로 시험재를 1본씩 선정하여 횡단면으로부터 60 cm, 120 cm, 180 cm 떨어진 부위에서 각각 두께 2 cm 시험편을 1매씩 채취한 후 Fig. 2와 같이 36개로 분할하여 최종함수율과 그 분포를 전건법으로 조사하였다.



**Fig. 2.** Sawing diagram of the specimens to survey a distribution of final moisture content.

### 2.5. 재면할렬 및 배할흠 확장을 조사

예비천연건조 후 잣나무 정각기둥재의 재면에는 할렬폭 2 mm 이하의 미세할렬들이 상당수 발생되었는데, 예비천연건조 후 발생한 재면할렬들이 고온저습건조 후 할렬발생에 미치는 영향을 확인하기 위하여 모든 할렬들의 길이를 조사하였다.

고온저습건조 후 발생한 할렬들은 폭 2 mm 이상인 할렬들을 기준으로 하여 폭과 길이를 측정하였다. 고온저습건조 후 폭 2 mm 이상의 할렬들만을 조사하는 이유는 부재를 사용하기 위하여 가공하는 과정에서 폭 2 mm 미만의 할렬들은 없어지기 때문이다.

배할흠은 횡단면으로부터 180 cm 떨어진 부위에서 건조 전·후 변화를 조사하였다.

### 2.6. 표면경화율 및 내부할렬 조사

표면경화율은 선정된 대표 시험재의 횡단면으로부터 60 cm, 120 cm, 180 cm 떨어진 부위에서 각각 두께 2 cm 시험편 1매씩을 채취하여 측정하고, 각각의 절단면에서 육안으로 확인되는 내부할렬의 수와 길이를 조사하였다.

### 2.7. 비틀림과 건조수축을 조사

비틀림의 측정은 건조종료 후 모든 시험재의 양 횡단면에서 4재면 모두 측정(1본당 8지점)하고, 압축 방향에 따라 직각을 형성하는 단면(⊥)과 평형을 형성하는 단면(∥)을 구분하여 조사하였다.

건조수축율은 압축방향에 직각을 형성하는 단면(⊥)과 평행을 이루는 단면(∥)을 구분하여 횡단면으로부터 180 cm 떨어진 위치의 네 재면에서 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 최종함수율과 분포

예비천연건조한 잣나무 정각기둥재의 건조에는 증자처리 12시간, 고온저습처리 64시간, 열기건조 168시간, 냉각처리 24시간을 포함하여 총 268시간이 소요되었다. 건조 종료 후 최종함수율은 무배할-무처리(N-C) 11.7%, 무배할-코팅처리(N-E) 14.2%, 배할-무처리(K-C) 10.0%, 배할-코팅처리(K-E) 11.8%이었으며, 모든 시험재의 횡단면으로부터 거리에 따른 최종함수율의 분포에서도 15% 이하를 나타내었다(Table 4).

예비천연건조 후 조사된 함수율은 N-C 27.5%, N-E 31.7%, K-C 22.1%, K-E 27.0%로 고온저습건조 전 함수율의 차이는 N-E, N-C와 K-E, K-C 순으로 조사되었다. 시험재에 따른 함수율의 차이는 고온저습건조가 종료된 후 조사한 최종함수율에서도 예비천연건조 후 조사된 함수율과 유사한 분포를 나타내었다. 고온건조의 경우 건조가 빠르게 진행되기 때문에 최종함수율의 변이가 존재하며, 이는 건조실 내부의 조건, 투과성, 초기함수율 등의 요인들에 의해서도 영향을 받기 때문이다(정 등 2005). 건조 전 함수율이 가장 높은 것으로 조사된 N-E 시험재는 건조종료 후에도 가장 높은 최종함수율을 나타내었다. N-C와 K-E 시험재들의 경우 건조 전 조사된 함수율은 각각 27.5%, 27.0%였으며, 고온저습건조 후에도 N-C 11.7%, K-E 11.8%로 매우 유사한 최종함수율을 나타내고 있었다. 건조 전 함수율이 가장 낮았던 K-C 시험재는 건조 종료 후에도 가장 낮은 함수율을 나타내었다. 중심부분 엔드코팅처리가 횡단면을 통한 수분이동을 억제하는데 영향을 줄 수 있었던 부분도 고려하지 않을 수는 없으나, 고온저습건조 전·후 조사된 함수율의 분포와 처리조건에 따른 최종함수율 분포 차이 등을 고려하여 유추한 결과 초기함

**Table 4.** Final moisture contents(%) according to distance from the end surface of the HTLH-HD dried square timbers

Treatment	Distance from end surface of specimen			Average
	60 cm	120 cm	180 cm	
N-C	11.9	11.9	11.4	11.7
N-E	14.2	14.8	13.7	14.2
K-C	10.1	10.1	9.8	10.0
K-E	11.5	12.3	11.5	11.8

수율에 의한 영향이 가장 큰 요인이었던 것으로 판단된다.

Fig. 3에 나타난 횡단면의 거리에 따른 횡단방향 함수율 분포에서는 배할 무처리재를 제외한 모든 시험재들의 내층 함수율이 20% 이상인 부위가 존재하였다. 내층의 함수율이 20% 이상을 나타내고 있는 부분의 면적을 실용적으로 환산하면, N-C-60 8.3%, N-E-60 5.6%, N-E-120 22.2%, N-E-180 16.7%, K-E-60 2.8%, K-E-120 5.6%, K-E-180 5.6%로 조사되었다. 내층의 함수율이 20% 이상을 나타내고 있는 부분의 실용적율과 최종함수율의 분포로 보아 함수율 20% 이상인 부위가 시간이 경과함에 따라 평형상태에 도달하였을 때 함수율과 결함의 발생에 영향을 미칠 수 있을 정도의 수준은 아닌 것으로 판단된다.

#### 3.2. 재면할렬 및 배할홀 확장율

예비천연건조 후 조사된 모든 할렬은 폭 2 mm 이하의 미세할렬이었으며, 배할가공을 수행한 시험재보다 배할가공을 하지 않은 시험재의 평균 할렬길이가 334 cm 더 발생하여 예비천연건조 중에도 배할가공에 의한 할렬발생 억제효과를 확인할 수 있었다.

고온저습건조 후 재면에 발생한 할렬들을 조사하는 과정에서 확인된 바로는 예비천연건조 후 발생하였던 할렬들의 폭이 확장하거나 수축한 것이 대부분이었으며, 고온저습건조 중 새롭게 발생된 할렬들은 거의 존재하지 않는 것으로 조사되었다. 고온저습건

Treatment	Distance from end surface of specimen (cm)																	
	60						120						180					
N-C	9.0	10.6	10.9	11.3	7.3	7.5	9.7	10.8	10.2	9.9	9.5	8.9	9.0	9.8	9.7	9.6	9.0	8.8
	9.2	13.3	16.5	16.1	14.5	11.3	10.2	15.5	15.9	13.1	11.7	9.6	9.7	13.3	14.1	13.7	11.2	8.6
	10.0	14.0	20.7	22.1	18.3	11.2	10.1	15.6	19.5	17.7	13.9	9.6	9.9	15.2	18.2	17.5	12.6	8.9
	9.3	11.9	19.8	22.4	17.1	10.5	9.8	14.1	19.2	18.6	13.1	9.3	9.7	14.9	18.1	17.3	12.7	9.4
	6.5	10.8	13.8	15.0	14.1	10.4	9.4	13.1	15.1	13.7	11.1	9.1	9.4	12.6	13.5	12.4	10.9	8.7
	8.3	9.1	9.9	10.4	6.5	8.7	9.0	10.1	10.2	9.2	8.9	8.8	8.7	9.3	9.0	8.9	8.7	8.3
N-E	12.0	10.7	11.2	10.6	10.3	9.9	9.5	10.2	11.3	11.7	10.6	9.4	6.3	9.4	10.5	10.8	10.4	9.8
	10.6	14.5	18.4	15.7	13.3	10.1	10.6	12.1	18.9	20.5	15.6	10.4	9.4	13.2	18.6	20.0	17.1	11.2
	10.3	18.0	24.3	17.0	18.7	10.8	10.9	17.0	24.6	25.8	19.6	11.5	10.3	17.3	25.3	26.2	20.3	10.6
	11.2	19.5	13.7	24.1	19.4	10.9	10.7	18.8	27.0	26.6	21.1	11.5	10.2	17.2	26.0	25.7	16.2	9.1
	10.7	15.5	19.3	18.6	15.2	10.5	10.2	14.7	20.5	22.6	17.1	10.5	9.7	12.7	16.6	17.4	13.5	9.9
	9.8	10.0	10.8	11.0	10.4	9.5	9.8	10.1	11.5	11.9	10.4	9.5	9.5	9.7	10.3	10.6	9.9	9.5
K-C	8.7	8.3	8.9	8.5	8.1	9.1	8.4	8.1	8.0	7.8	7.7	8.7	8.1	7.8	8.3	8.5	7.8	8.1
	8.5	10.5	10.8	8.8	8.7	7.7	8.2	10.9	10.7	8.6	8.5	7.7	8.2	11.0	13.0	12.4	9.6	7.1
	9.0	14.4	17.0	13.5	10.7	8.3	8.8	14.1	16.9	13.8	10.5	8.0	9.0	13.8	15.2	14.2	11.0	8.1
	8.8	13.6	17.5	14.9	11.0	8.1	8.7	14.3	17.2	15.7	12.6	8.4	9.1	14.1	15.2	12.6	10.7	8.2
	8.1	10.3	12.4	11.3	8.6	8.0	8.0	10.3	12.4	12.9	10.4	7.8	8.6	11.3	10.7	8.6	8.8	7.7
	8.9	8.1	7.9	8.0	7.6	9.0	8.3	7.6	7.8	7.9	7.6	8.2	8.1	8.1	8.3	7.6	7.5	7.9
K-E	9.3	8.7	8.3	9.2	8.9	9.2	9.5	10.0	10.5	10.2	9.1	9.3	9.1	8.4	7.9	8.1	8.0	8.9
	9.3	10.5	10.6	10.7	10.4	8.9	9.8	14.8	17.8	15.7	11.2	8.1	8.5	9.8	10.7	10.4	10.6	8.5
	10.2	13.8	17.0	16.6	13.5	9.4	10.4	18.8	23.2	18.4	10.4	9.0	8.8	12.4	17.5	18.4	15.2	9.6
	9.9	16.0	20.5	19.9	15.5	10.2	10.8	19.0	22.7	17.9	10.9	8.8	8.8	14.7	20.5	21.6	17.5	10.5
	9.9	13.5	16.5	16.0	13.0	9.4	9.8	14.9	16.6	14.4	10.6	8.2	8.9	13.0	16.4	16.3	13.7	8.9
	9.6	9.5	10.1	10.2	9.4	8.7	9.4	9.4	9.9	9.5	8.8	9.0	8.7	8.3	8.3	9.0	8.7	8.7


 : Region of above 20% MC on the each cross section

Fig. 3. Longitudinal MC distribution of Korean Pine after HTLH-HD drying test.

조 전·후 할렬발생 길이의 변화는 Fig. 4에 나타내었다. 고온저습건조 후 할렬길이는 무배할 무처리 12.7%, 무배할 코팅처리 22.7%, 배할 무처리 55.1%, 배할 코팅처리 63.9% 감소하였다. 할렬길이 감소율에서 무처리와 코팅처리재 간의 차이는 각각의 처리에 따른 예비천연건조 후 발생된 할렬과 고온저습건조 후 발생한 할렬의 차이에서 매우 유사한 추이를 나타내고 있는 것으로 보아 중심부분 엔드코팅처리에 의한 영향이 아닌 고온저습건조 전 발생된 할렬길

이의 차가 원인인 것으로 사료된다. 반면 무배할재와 배할처리재의 경우 감소율의 차이가 명확하여 배할 가공에 의한 할렬발생 억제효과를 확인할 수 있었다.

Fig. 5는 고온저습건조 후 조사된 할렬의 폭에 따른 발생 길이를 나타내었으며, 건조 중 표층에 발생한 인장응력과 압축응력에 의해 고온저습건조 전·후의 할렬폭 변화에 차이가 있는 것을 확인할 수 있었다. 무배할재의 경우 폭 2~4 mm인 할렬들의 발생비율을 보면 N-C 85.9%, N-E 85.6%로 예비천연건조

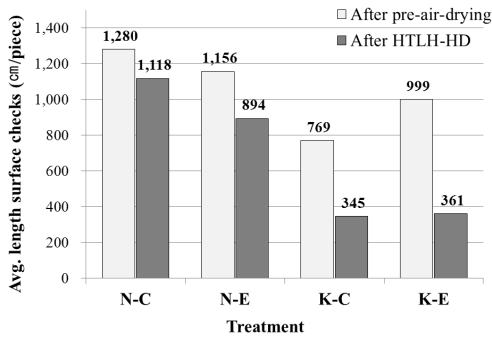


Fig. 4. Length of surface checks after pre-air-drying and length of surface checks after HTLH-HD drying test.

Table 5. Kerf widening rate for the HTLH-HD dried squared timbers of Korean Pine

Treatment	Kerf widening rate (%)
K-C	196.1
K-E	225.2

후 발생하였던 할렬들의 대부분이 고온저습건조 중 표층에 발생한 인장응력에 의해 할렬폭이 확장된 것을 확인할 수 있었다. 반면 배할재의 경우 폭 2 mm 인 할렬들의 비율이 K-C 96.4%, K-E 85.1%로 고온저습건조 중 표층의 인장응력에 의해 할렬폭이 확장되는 것이 억제된 것을 확인할 수 있었다.

요약하면 고온저습건조 중 코팅처리에 의한 재면 할렬 발생의 억제효과는 확인할 수 없었으나 배할가공에 의한 효과가 고온저습건조 중에도 크게 작용하여 예비천연건조 후 발생한 할렬의 진행을 억제한 것으로 확인되었다. 따라서 예비천연건조 후 고온저습건조를 수행할 경우 예비천연건조 중 발생한 할렬이 고온저습건조 후 할렬발생에 큰 영향을 주기 때문에 예비천연건조 중 할렬발생을 억제하는 것이 매우 중요한 것으로 판단된다.

Table 5는 고온저습건조 후 배할홈 확장율을 나타낸 것이다. 배할홈 확장율은 K-C 196.1%, K-E 225.2%로 큰 차이를 나타내지는 않아 코팅처리에 의한 배할홈 확장율의 차이는 없었던 것으로 사료된다.

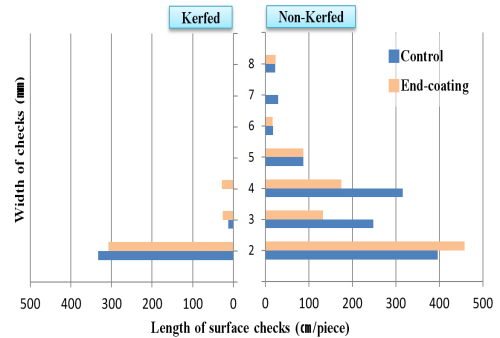


Fig. 5. Length of surface checks for each width of checks occurred on the squared timbers during the HTLH-HD drying test.

### 3.3. 내부할렬 및 표면경화율

고온건조방법은 관형열기건조방법보다 건조가 빠르다는 장점을 가지고 있다. 하지만 수와 미성숙재를 포함하고 있는 중목구조부재에 적용할 경우 건조 초기 표층과 내층의 수분경사가 크게 형성되고, 건조 중기 이후에는 내부의 함수율이 섬유포화점 이하로 감소됨과 동시에 수축이 진행되어 목재내부에 인장응력이 발생하기 때문에 내부할렬이 발생하게 된다. 따라서 내부할렬을 방지하기 위해서는 목재 내부의 함수율이 섬유포화점 이하로 건조될 때까지 고온에 노출되지 않도록 조절해야 한다.

예비천연건조 후 모든 시험재의 내층 함수율이 섬유포화점 이상을 나타내고 있었으나 N-C 시험재의 횡단면으로부터 120 cm 떨어진 위치에서 한 개의 내부할렬만 관찰되었다(Table 6). 고온저습건조는 수분이 빠르게 제거되면서 건조 중기 이후 내층에 상당한 크기의 인장응력이 발생하여 내부할렬이 발생하지만, 본 연구에서는 예비천연건조를 수행하였기 때문에 생재를 바로 건조하였을 때보다 내층에 발생한 인장응력이 작아 내부할렬의 발생이 억제된 것으로 사료된다.

예비천연건조와 고온저습건조를 수행한 시험재의 표면경화율은 Table 7에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 전처리 및 횡단면의 거리에 관계없이 모든 시험재의 표면경화율은 5% 미만으로 매우 경미한

**Table 6.** Formation of internal check (mm) for the HTLH-HD dried squared timbers of Korean Pine

Treatment	Distance from end surface of specimen		
	60 cm	120 cm	180 cm
N-C	None	41	None
N-E	None	None	None
K-C	None	None	None
K-E	None	None	None

**Table 7.** Average case hardening(%) for the HTLH-HD dried squared timbers of Korean Pine

Treatment	Distance from end surface of specimen		
	60 cm	120 cm	180 cm
N-C	2.3	3.3	4.1
N-E	3.3	1.1	3.1
K-C	1.6	4.2	2.4
K-E	3.7	2.9	2.7

수준인 것으로 나타났다.

### 3.4. 비틀림과 수축율

예비천연건조 후 고온저습건조를 수행한 잣나무 중목구조부재의 비틀림과 수축율은 Table 8에 나타내었다. 비틀림의 경우 상단하중에 의한 차이는 없는 것으로 조사되었으나, 배할처리한 시험재의 비틀림이 더 큰 것으로 조사되었다. 비틀림의 발생은 건조 중 방향별 수축이방성과 성장응력에 의해 결정된다. 따라서 배할처리한 시험재의 비틀림이 더 발생한 것은 수축율 변이에 기인한 것으로 판단된다.

수축율의 경우 상단하중이 가해지는 방향과 평행을 형성하는 단면(∥)이 더 수축한 것으로 조사되었으며, 배할처리한 시험재가 더 수축한 것으로 조사되었다. 황과 박(2009)은 대단면재의 수축율은 단면을 구성하는 심·변재의 비율과 방사방향과 접선방향의 구분을 고려하여 추정하여야 한다고 보고하였다. 따

**Table 8.** Twist and drying shrinkages for the HTLH-HD dried squared timbers of Korean Pine

Treatment	Drying shrinkage (%)		Twist (mm)	
	⊥*	∥*	⊥	∥
	N-C	0.9	1.2	17
N-E	0.6	1.2	17	17
K-C	0.6	1.4	25	28
K-E	0.5	1.6	25	23

⊥, surface of perpendicular to pressure; ∥, surface of parallel to pressure

라서 수축율과 비틀림의 차이가 배할가공에 의한 것 인지에 대한 분석에는 신중을 기할 필요가 있을 것으로 사료된다.

## 4. 결 론

1. 건조 종료 후 최종함수율은 N-C 11.7%, N-E 14.2%, K-C 10.0%, K-E 11.8%로 조사되었으며, 건조에는 총 268시간이 소요되었다. 최종함수율은 전처리와 횡단면의 거리에 관계없이 모든 시험재에서 15% 이하를 나타내었으며, 초기함수율이 예비천연 건조 후 고온저습건조 시 최종함수율의 분포에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 조사되었다.

2. 예비천연건조 후 고온저습건조를 수행할 경우 예비천연건조 중 할렬발생을 억제하는 것이 매우 중요할 것으로 판단된다. 각각의 건조전처리가 할렬발생에 미치는 영향은 배할가공에 의한 억제 효과는 탁월하였으나, 코팅처리에 의한 영향은 없는 것으로 조사되었다.

3. 예비천연건조는 고온저습건조 중 내층에 발생하는 인장응력을 감소시켜 내부할렬의 발생을 억제하는 것으로 나타났다.

4. 모든 시험재의 표면경화율은 5% 미만으로 매우 경미한 수준이었다.

5. 수축율의 경우 상단하중이 가해지는 방향과 평행을 형성하는 단면(∥)이 더 수축하였으며, 배할처



리 시험재가 더 수축한 것으로 조사되었다.

6. 상단하중의 적용이 비틀림 발생에 미치는 영향은 없는 것으로 나타났다. 배할처리한 시험재의 비틀림이 더 발생한 것은 수축률 변이에 기인한 것으로 조사되었다.

## 참 고 문 헌

1. Taylor, F. 1991. Moisture Gradients in Poles Dried at High Temperatures. *Forest Prod. J.* 41(5): 36~38.
2. Wengert, E. M. 1974. Maximum Initial Moisture Contents for Kiln Drying 4/4 Hardwood at High Temperature. *Forest Prod. J.* 24(8): 54~56.
3. 김병로. 1995. 잣나무 수간내 재질변동에 관한 연구(I)-심재와 변재의 생재함수율과 수축률 차이-. *목재공학* 23(1): 28~34.
4. 豆田俊治, 藤本登留. 2001. スギ心持ち材の高温蒸気処理による表面割れ抑制効果について. *日林九支研論文集* 54: 195~196.
5. 吉田孝久, 橋爪丈夫, 藤本登留. 2000. カラマツ及びスギ心持ち正角材の高温乾燥特性－高温低湿乾燥条件が乾燥特性に及ぼす影響－. *木材工業* 55: 357~362.
6. 吉田孝久, 伊東嘉文, 橋爪丈夫. 2004. 接着重ね梁の開発. *Bulletin of the Nagano Prefectural Forestry Research Institute No.18*: 111-123 (in Japanese).
7. 이남호, 이창진. 2013. 인사이징처리가 Douglas-fir 중목구조부재의 고온저습건조 특성에 미치는 영향. *목재공학 학술발표논문집*: 48~49.
8. 이창진. 2013. 국산 소나무와 잣나무 중목구조부재의 고온저습건조 특성. 석사학위논문.
9. 이창진, 이남호, 엄창득, 신익현, 박문재, 박주생. 2013. 중심부분 엔드코팅처리가 국산 소나무와 잣나무중목구조부재의 고온저습건조 특성에 미치는 영향. *목재공학* 41(3): 221~233.
10. 정희석, 강호양, 방정환, 이남호, 이형우, 강춘원, 여환명. 2005. 최신 목재건조학. 서울대학교출판부.
11. 정희석, 이철현, 강옥, 엄창득. 2003. 침엽수 구조용 정각재의 천연건조곡선과 함수율분포. *목재공학* 31(1): 27~31.
12. 황권환, 박병수. 2009. 소나무재의 단면치수에 따른 수축률 특성. *목재공학* 37(3): 231~238.