

미송 대단면재의 가열법에 따른 진공건조 특성*1

정희석*2† · 엄창득*2 · 소범준*2

Vacuum Drying Characteristics Using Different Heating Methods for Douglas-fir Timber*1

Hee-Suk Jung*2† · Chang-Deuk Eom*2 · Bum-Joon So*2

요 약

변장 14 cm 재장 2.4 m인 대단면재의 전도가열, 고주파가열 및 복합가열에 의한 진공건조특성을 조사하였다. 건조속도는 복합가열에서 가장 컸고, 고주파가열에서 가장 적었다. 비에너지는 고주파가열에서 가장 컸고, 전도가열에서 가장 적었다. 진공건조목재의 횡단방향 함수율분포는 전도가열과 복합가열의 경우 볼록한 형태를 나타냈으나, 고주파가열의 경우는 한쪽 표층에서 반대쪽 표층으로 향해 증가하는 경향을 나타내었다. 건조목재의 재장방향 함수율은 전도가열과 복합가열의 경우 횡단면이 중심부위보다 낮았고 고주파가열의 경우 횡단면이 중심보다 높았다. 표면할률과 횡단면할률은 전도가열진공건조에서 가장 심하였다. 내부할률은 어떠한 가열방법에 의한 건조에서도 발생하지 않았다. 복합가열 진공건조 특성은 전도가열과 고주파가열간의 절충된 중간적 경향을 나타냈다.

ABSTRACT

Timbers of 14 by 14 cm, 2.4 m long, were dried in a vacuum kiln to investigate vacuum drying characteristics using three types of heating methods, conduction heating with hot plate, the radio frequency (RF) heating and the combination of both (hybrid heating).

Average drying rate is the highest for the hybrid heating and the lowest for the RF heating. Average specific energy is the highest for the RF heating and the lowest for conduction heating. Transverse moisture content distribution of dried timber revealed the convex profile for both conduction and the

* 1 접수 2003년 12월 18일, 채택 2004년 3월 2일

* 2 서울대학교 농업생명과학대학 College of Agriculture & Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

† 주저자(corresponding author) : 정희석(e-mail: heesjung@snu.ac.kr)

hybrid heating and moisture content increased from one face to the opposite face for the RF heating. Moisture content distribution along the length of timber increased from the end to the middle of timber length for conduction and the hybrid heating and decreased from the end to the middle of timber length for the RF heating. End- and surface checks for conduction heating were severer than the other heating methods. No internal check occurred in any heating methods. Drying characteristics of conduction heating showed in-between trend of the RF and the hybrid heating.

Keywords: conduction heating, drying rate, hybrid heating, internal check, moisture content distribution, RF heating, specific energy, surface check

1. 서 론

물의 비점은 저압력일수록 낮아지기 때문에 진공건조는 상압 건조에 비하여 저온 적용에 의해서도 고온 건조의 효과가 있다. 따라서 진공건조는 투과성이 낮거나 대단면재 등 난건조목재 건조에서 건조속도의 촉진, 건조결합의 방지 및 에너지를 절약할 수 있는 적절한 건조방법이다.

목재의 진공건조에서 적용하는 가열방식은 열수 또는 증기에 의한 가열판을 목재에 직접 접촉시켜 가열하는 접촉식(전도식), 라디오파와 마이크로파에 의한 유전가열(dielectric heating), 열기 또는 과열증기(superheated steam)에 의한 대류식 가열 등이 있다. 목재의 열전달 속도는 가열방식에 따라 차이가 있다. 즉 대류식 가열에 의한 열전달은 전도가열과 유전가열의 것보다 더 느리다. 전도가열은 가열판이 목재와 직접 접촉하기 때문에 목재의 표면부터 먼저 가열되어 열전도속도는 빠르나 두꺼운 목재일수록 중심층까지 열확산은 느리다. 고주파에 의한 유전가열은 함수율이 높은 중심층을 더 가열한다. 이와 같이 각 가열방식은 장점과 제약점을 갖고 있다. 따라서 가열방식에 따라 건조기구가 서로 상이하게 되고, 건조기구에 따라 건조속도, 함수율분포, 건조결합 등 건조특성이 달라진다.

Lamb 등(1993)에 의하면 고주파진공건조는 개개의 건조목재 뿐만 아니라 동일 건조목재에서 부위에 따라라도 함수율 변이가 심함을 보고하였고, Perré 등(1995)은 참나무와 너도밤나무 제재목의 대류식 진공건조와 전도가열진공건조에 소요되는 비에너지를

비교 보고하였다. 이 등(1998)은 일본잎갈나무 수심재의 저압증기폭쇄처리가 고주파진공건조 특성에 미치는 영향에 대하여 보고하였다. 정 등(1998)은 웨스턴 레드시더(western redcedar)의 라디오파 진공건조에서 건조속도, 목재내부의 온도경사와 압력경사에 대하여 보고하였다. Resch (2003)는 고주파진공건조에서 수분이동은 목재의 투과성과 내부증기압 경사에 의해 좌우됨을 보고하였다. Cividini (1995)는 가열판에 의한 전도가열진공건조에서 가문비나무의 틀어짐에 대하여 보고하였으며, 정 등(2000)은 소나무 제재목의 가열판에 의한 전도가열진공건조에서 내부온도의 변화, 건조곡선, 비에너지, 함수율 분포 및 할렬 등에 대하여 보고하였고, 정 등(2002)은 소나무 대단면재의 가열판 접촉과 고주파진공건조에서 건조곡선, 비에너지 곡선 및 함수율 분포 등을 보고하였으며, 또한 Jung *et al.* (2003a)은 라디에타소나무의 가열방법에 따른 건조특성을 보고하였다. 이상과 같이 진공건조에 관한 보고는 대부분 활엽수 난건조 수종과 침엽수 구조용재를 대상으로 하여 주로 단일 가열방법에 의한 진공건조 연구가 수행되었고, 미송에 대해 가열방법에 따른 진공건조에 관한 연구는 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 변장 14 cm인 미송 대단면재에 대하여 3가지 가열방법, 즉 가열판 전도가열, 고주파가열, 가열판과 고주파를 동시에 적용한 복합가열진공건조에서 건조속도, 비에너지, 재장방향과 횡단방향의 함수율분포, 건조목재의 할렬 발생 정도 등을 조사 비교하였다.

Table 1. Average specific gravity, initial and final MC of the Douglas-fir timber

Heating method	Specific gravity*	Initial MC (%)	Final MC (%)
Conduction heating	0.47	36.5	12.0
RF heating	0.46	32.9	14.3
Hybrid heating	0.48	39.5	10.9

* Based on oven-dry weight and green volume.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시목의 수량과 잔적

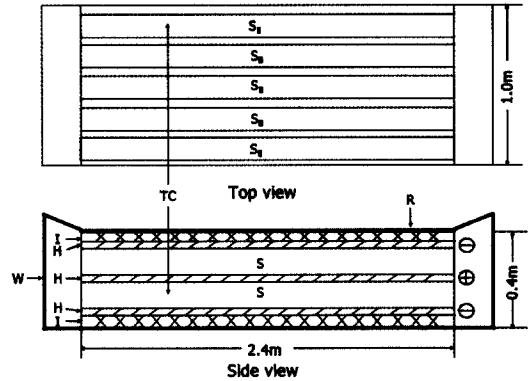
공시목의 크기는 변장 14 cm, 재장 2.4 m인 정각재이고, 가열방법별 공시목의 생재비중은 0.46~0.48 범위이고, 초기함수율은 가열판 전도가열은 36.5%, 고주파 가열 32.9%, 가열판과 고주파에 의한 복합가열 39.5%로서 약간의 차이가 있다(Table. 1). 공시목을 잔적할 때 공시목의 상하에 알루미늄 가열판을 배치하였다. 공시목의 수량은 가열방법별로 각각 한 층에 5본씩 2층으로 잔적하고 모두 10본을 공시하였다(Fig. 1).

2.2. 건조 조건

진공건조기의 건조 중 내부압력은 120 mmHg 수준을 유지하였고, 공시목에 수직으로 작용하는 압체력은 $9.807 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 이며, 고주파 발전기의 최대 출력은 17 kW이고 주파수는 13.56 MHz이다. 가열방법별 건조온도는 모두 2단계 온도 스케줄을 적용하였는데, 건조초기부터 건조중기까지 공시목의 온도는 가열판 접촉에 의한 전도가열진공건조의 경우 표면온도 68℃이고, 고주파진공건조의 경우 코아온도(core temperature) 68℃이며, 복합가열진공건조의 경우 표면온도 68℃와 코아온도 64℃를 적용하였다. 그리고 건조중기부터 말기까지 온도는 1단계 표면온도와 코아온도를 각각 3℃씩 상승시켰다.

2.3. 건조곡선과 건조속도

건조개시부터 목표함수율(12% 수준)에 도달할 때



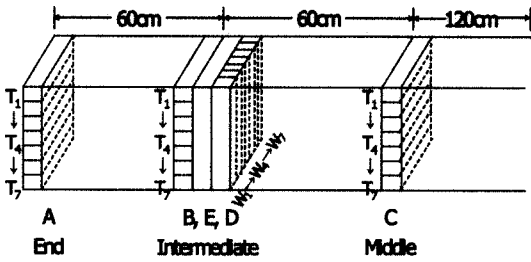
R : Rubber sheet, W : Dryer wall,
I : Insulation plates, TC : Thermocouple,
H : Aluminum heating plates, ⊕ : Electrode,
S : Timber, ⊖ : Electrode.

Fig. 1. Schematic of vacuum-press kiln under vacuum pressing.

까지 1일 간격으로 시험재 5본(공시목의 절반 수량)의 무게를 측정하였다. 건조종료 후 횡단면에서 60 cm 되는 부위에서 함수율 시험편을 절취하여 최종함수율을 구하였다. 이 함수율을 이용하여 시험재의 전건무게를 구하여 건조시간별로 건조속도의 계산과 건조곡선을 작성하였다. 건조속도(%/日)는 건조일수별로 제거된 함수율로 나타내었다.

2.4. 비에너지

목재의 증발수분 1 kg 당 소요되는 에너지인 비에너지(specific energy)는 건조개시부터 1일 간격으로 시험재의 증발수분량의 무게와 가열판의 가열, 진공 펌프와 고주파 발전기 작동에 소요되는 전기 에너지를 전력량 측정계로 측정하였다. 함수율 감소와 비에



T₁~T₂ are MC distribution sections across the thickness at the end (A), the intermediate (B) and the middle (C) of timber length.

W₁~W₇ are MC distribution sections across the width of the timber (D).

E is moisture section for average MC.

Fig. 2. Specimen sectioning pattern for measuring MC and MC distribution.

너지(kWh/kg)와 관계곡선과 평균 비에너지를 구하였다.

2.5. 건조목재의 함수율 분포

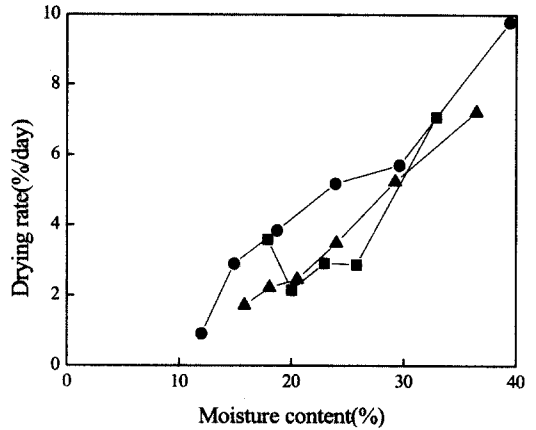
건조가 종료된 후 시험재의 횡단면 부위, 횡단면에서 60 cm 되는 재장의 중간부위, 횡단면에서 120 cm 되는 재장의 중심부위에서 두께방향(잔적의 수직방향)을 향해 7개의 스트리프(strip)를 절취하여 두께방향 함수율분포를 측정하였다.

폭방향 함수율분포는 재장의 중간부위에서 폭방향(잔적의 수평방향)을 향해 7개의 스트리프를 절취하여 측정하였다(Fig. 2).

재장방향 함수율분포는 횡단면, 중간부위 및 중심부위의 두께방향 함수율로부터 계산하였다. 모든 함수율은 전건법에 의해 측정하였다.

2.6. 건조목재의 할렬

가열 방법별 건조목재의 횡단면할렬, 표면할렬과 내부할렬을 측정하였다. 모든 정각재의 1재면에서 4재면까지 재면별 표면할렬이 발생한 본 수와 발생하지 않은 본 수를 조사하여 표면할렬 발생 본 수 비율을 구하였다. 횡단면할렬은 양 횡단면에서 발생한 할



▲ - ▲ : Conduction heating, ■ - ■ : RF heating, ● - ● : Hybrid heating.

Fig. 3. Vacuum drying curves for Douglas-fir timber by heating methods.

렬의 폭과 길이를 측정하고, 평균치를 구하였다. 표면할렬은 각 정각재의 4재면에서 발생한 할렬의 폭과 길이를 측정하여 평균치를 구하였다. 내부할렬은 재장의 3부위(횡단면부위, 재장의 중간부위와 중심부위)에서 절단하여 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 건조곡선과 건조속도

전도가열, 고주파가열 및 복합가열 방법별 진공건조곡선은 Fig. 3과 같다. 전도가열과 복합가열 진공건조속도는 건조초기에 컷고 건조말기로 향하면서 거의 직선적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 고주파진공건조의 경우는 감소와 증가를 반복하는 불규칙한 변화곡선을 나타내었다. 가열 방법별 평균 건조속도는 전도가열진공건조의 경우 4.08 %/日이고, 고주파가열진공건조의 경우 3.72 %/日이며, 복합가열진공건조의 경우는 4.77 %/日로서 복합가열 진공건조속도가 가장 컷었다.

본 연구의 결과는 동일 건조조건에서 진공건조한 라디에타소나무의 건조속도와 비교해 보면, 전도가열

Table 2. Water removal and electrical energy consumption during vacuum drying of Douglas-fir timber

Heating method	Energy consumption(kWh) / Water removal(kg)						Specific energy (kWh/kg)	
	1 st day	2 nd day	3 rd day	4 th day	5 th day	6 th day		
Conduction heating	0.858 /1652	0.795 /1190	0.729 /0.792	0.682 /0.556	0.725 /0.504	0.696 /0.390	4.485 /5.084	0.882
RF heating	0.794 /0.626	0.735 /0.678	0.667 /0.674	0.681 /0.496	0.792 /0.842	-	3.669 /3.316	1.106
Hybrid heating	0.129 /2.072	0.949 /1.380	0.944 /1.242	0.949 /0.940	0.995 /0.700	0.911 /0.474	6.004 /6.808	0.887

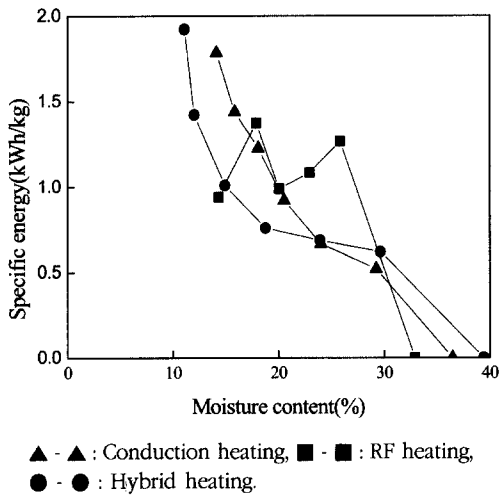


Fig. 4. Relationship between specific energy and moisture content for Douglas-fir timber by heating methods.

에서 11.7 %/日, 고주파가열에서 10.37 %/日, 복합가열에서 12.23 %/日보다 훨씬 적었으나, 3가지 가열방법별 건조속도의 크기는 같은 경향을 나타내었다 (Jung et al. 2003a). 라디에타소나무는 미송보다 비중은 적고 초기와 최종 함수율은 높고 투과성이 크기 때문에 건조속도가 증가된 것으로 여겨진다. 동일 건조조건에서 수중간 건조속도의 차이는 일반적으로 목재의 투과성과 함수율 차이에 좌우되고 있다.

3.2. 비에너지

가열방법별 함수율 감소와 비에너지의 관계 곡선은

Fig. 4와 같다. 전도가열과 복합가열의 경우 비에너지는 함수율 감소에 따라 계속 상승하였고, 고주파 가열의 경우는 처음에 감소하였다가 증가하고 다시 감소하는 등 불규칙한 관계를 나타내었다.

전건조기간의 평균 비에너지는 전도가열의 경우 0.882 kWh/kg 이고, 고주파가열의 경우 1.106 kWh/kg 이며, 복합가열의 경우 0.887 kWh/kg로서 고주파 가열의 비에너지가 가장 컸었고, 전도가열의 경우는 가장 적었으나 복합가열과는 별 차이가 없었다.

본 연구의 평균 비에너지는 정 등(2003a)이 보고한 동일조건인 건조에서 라디에타소나무의 것보다 컸었고, 가열방법별 비에너지의 크기는 라디에타소나무 건조의 경우와 마찬가지로 동일한 경향을 나타내었다. 본 연구에서 전도가열과 복합가열건조조건인 비에너지는 함수율 감소에 따라 증가하는 일반적인 경향과 일치하였으나 고주파가열의 경우는 일치하지 않았다. Avramidis 등(1997)에 의하면 두께 101 mm 침엽수 제재목의 생재함수율부터 최종함수율 15%까지 건조하는 실험에서 고주파 전환효율(RF conversion efficiency) 70% 조건에서 진공건조의 비에너지는 1.29 kWh/kg이고 섬유포화점 이하에서 함수율이 감소함에 따라 급속하게 증가됨을 보고하였고, Simpson (1991)은 함수율 20%부터 0%까지 감소함에 따라 흡착열은 지수곡선적으로 증가한다고 보고하였다. Resch (2003)는 에너지 소비량은 주로 목재밀도, 투과능과 함수율에 의존한다고 보고하였다.

본 연구에서 미송의 비에너지는 미송이 라디에타소나무보다 비중은 크고 투과성은 적으며, 초기함수율과 최종함수율이 낮기 때문에 더 크게 나타난 것으로

사료된다. 일반적으로 건조의 난이도에 따라 수중간에 소요되는 에너지는 차이를 나타내게 된다. 또한 목재의 함수율과 비중 등 목재조건 뿐만 아니라, 가열방법에 따라 에너지 효율과 건조기구가 달라짐으로 인하여 건조속도도 변하고 아울러 에너지 소요도 달라지게 된다.

3.3. 함수율 분포

3.3.1. 두께방향 함수율분포

두가지 가열 방법에서 재장부위별 진공건조목재의 두께방향(잔적의 수직방향)의 함수율분포는 Fig. 5와 같다.

전도가열 진공건조재의 함수율은 양쪽 표층(T₁과 T₂)에서 낮고 코아(T₄)에서 매우 높은 블록 포물선 형태를 나타내었다. 수분경사는 횡단면에서 매우 완만하였고, 재장의 중간부위와 중심부위에서 거의 같았다.

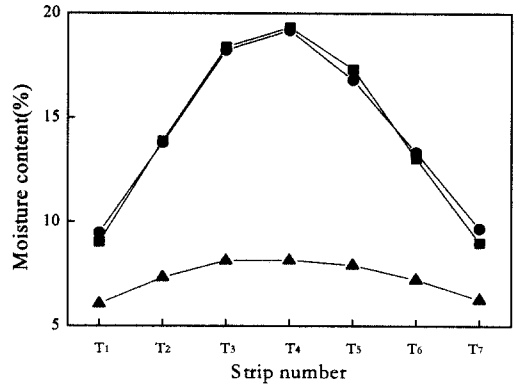
고주파가열 진공건조재의 횡단면, 재장의 중간과 중심부위의 함수율은 한쪽 표층(T₁)에서 다른쪽 표층(T₇)을 향해 서서히 증가하는 경향을 나타내었다. 재장의 3부위간의 함수율분포 형태와 수분경사는 서로 거의 비슷하였다.

복합가열 진공건조재의 함수율은, 양쪽 표층(T₁과 T₂)은 모두 낮고 코아부위가 약간 높은 블록 형태를 나타내었다. 수분경사는 횡단면, 재장의 중간과 중심부위 모두 완만하였고 서로 비슷한 경향을 나타내었다.

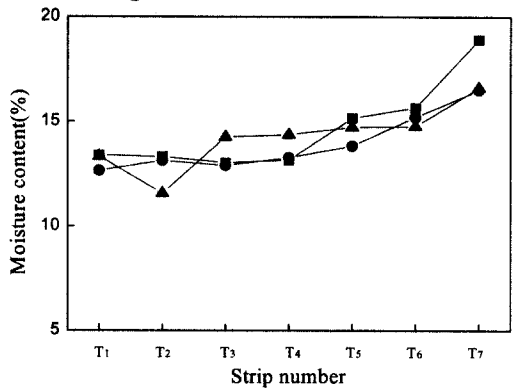
가열 방법에 따른 건조목재의 수분경사는 전도가열에서 가장 컸고, 고주파가열과 복합가열의 경우는 완만하였다. 복합가열 건조목재의 함수율분포 모형은 전도가열과 고주파가열 건조목재간에 절충된 중간적 형태를 나타내고 있음을 알 수 있었다.

Jung 등(2002)은 소나무 변장 14 cm 정각재의 가열방법별 진공건조에서 두께방향 함수율분포는 전도가열의 경우 블록 형태, 고주파가열의 경우 다소 오목 형태를 나타내고 있음을 보고하였다. Kanagawa 등(1993)은 두께 12 cm 미송 제재목의 고주파 진공건조재의 두께방향 함수율분포는 코아의 함수율이 표층의

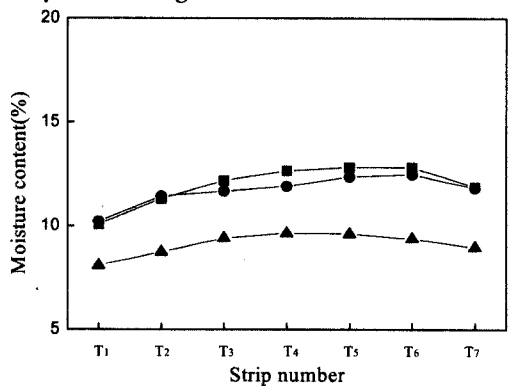
1) Conduction heating



2) RF heating



3) Hybrid heating



▲ - ▲ : Timber end, ■ - ■ : Intermediate, ● - ● : Middle.

Fig. 5. MC distribution across the thickness at three longitudinal positions of Douglas-fir timber dried by three drying methods.

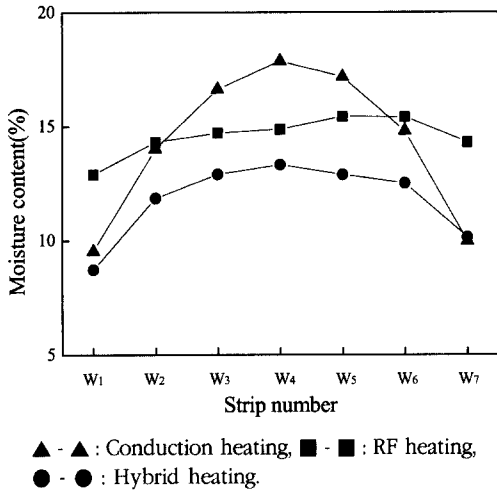


Fig. 6. MC distribution across the width at the intermediate position of Douglas-fir timber dried by three drying methods.

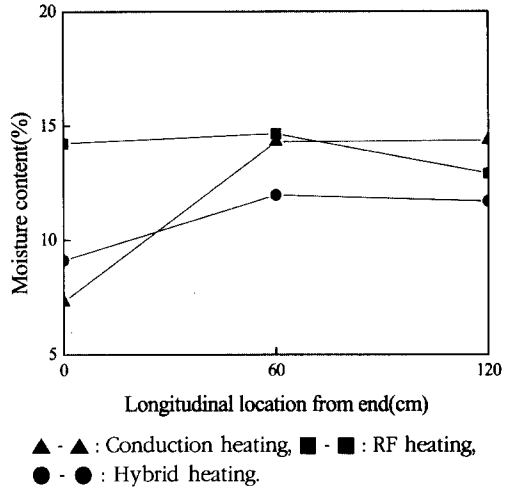


Fig. 7. Longitudinal MC distribution of Douglas-fir timber dried by three drying methods.

것보다 낮은 오목 형태를 나타내고 있음을 보고하였고, Harris 등(1984)은 두께 2인치 레드오크(red oak)의 고주파 진공건조목재의 횡단방향 함수율분포는 표층의 함수율이 코아의 것보다 낮은 볼록 형태임을 보고 하였다. 이들 보고자간에 상이한 결과가 보고되고 있다. 함수율분포는 가열방법 뿐만 아니라 목재의 투과성에 의해 분포형태가 달라지고 있음을 알 수 있다.

3.3.2. 폭방향 함수율분포

가열방법별 건조목재의 재장의 중간부위에서 폭방향 함수율분포는 Fig. 6과 같다. 모든 가열 방법에서 함수율은 양쪽 표층(W₁과 W₇)에서 낮았고 코아(W₄)에서 높은 분포 형태를 나타내었다. 수분경사는 전도가열에서 가장 컸고 고주파가열에서 가장 적었다.

Jung et al.(2003b)은 소나무 대단면재의 가열방법별 진공건조목재의 폭방향 함수율분포는 전도가열과 복합가열의 경우 볼록 형태를, 그리고 고주파진공건조에서 평평한 형태를 나타냄을 보고하였다. 그리고 동일한 재장부위에서 폭방향 함수율분포는 두께방향 것과 비교하면 약간의 차이를 나타내고 있었다. 즉, 전도가열의 경우 두께방향과 폭방향의 함수율분포는

모두 볼록 형태를 나타내고 있으나, 폭 방향의 수분경사는 두께방향의 것보다 더 적었다. 고주파가열의 경우 폭방향의 함수율분포는 완만한 볼록 형태를 나타내고 있으나 두께방향의 함수율은 한쪽 표층에서 다른쪽 표층으로 향해 증가하는 형태를 나타내었다. 복합가열의 경우 두께방향과 폭방향의 함수율분포가 모두 볼록 형태를 나타내고 있으나, 폭방향의 수분경사가 두께방향의 것보다 약간 컸었다. 복합가열 건조목재의 함수율 분포 모형은 전도가열과 고주파가열 건조목재간의 절충된 중간적 형태를 나타내었다.

3.3.3. 재장방향 함수율 분포

가열방법별 건조목재의 재장방향 함수율분포는 Fig. 7과 같다. 전도가열진공건조재의 함수율은 횡단면에서 중간부위로 향해 급격히 증가한 후 중심부위까지 거의 일정하였다. 고주파진공건조재의 경우는 횡단면에서 중간부위까지 거의 같고 중심부위로 향해 감소하였다. 복합가열의 경우는 횡단면에서 재장의 중간부위로 향해 증가한 후 중심부위로 향해 약간 감소하였다. 복합가열의 진공목재의 함수율 분포 모형은 전도가열과 고주파가열 건조목재간의 절충된 중간적 형태를 나타내었다.

Table 3. Percentage of faces that were surface-checked for Douglas-fir timber

Heating method	One face	Two faces	Three faces	All faces	Total
Conduction heating	40	10	20	20	90
RF heating	10	10	10	0	30
Hybrid heating	30	0	10	10	40

Table 4. Average size of the checks occurred among both ends or four faces of dried timber

Heating method	Surface checks		End checks	
	Width (mm)	Length (cm)	Width (mm)	Length (cm)
Conduction heating	1.8±2.4*	30±5	0.8±0.9	2.9±3.7
RF heating	0.8±1.9	29±4.9	-	-
Hybrid heating	0.9±1.5	21±4.9	-	-

* Average±standard deviation

3.4. 건조목재의 할렬

건조목재의 1재면에서 4재면까지 각 재면별 표면할렬이 발생한 본수 비율은 Table 3과 같고, 횡단면할렬과 표면할렬의 평균 폭과 길이는 Table 4와 같다. 내부할렬은 어떤 가열 방법에서도 발생하지 않았다. 횡단면할렬은 전도가열 경우에만 나타났고, 폭과 길이는 경미하였다. 고주파가열과 복합가열의 경우에는 발생치 않았다.

표면할렬은 4재면 중에서 한 재면에서만 발생율이 가장 많았고, 2재면에서 발생율은 가장 적었다. 표면할렬이 발생한 본수 비율은 전도가열에서 90%, 복합가열 40%, 고주파가열에서 30%이다. 표면할렬의 평균 폭은 전도가열진공건조에서 가장 컸었고, 고주파가열과 복합가열의 경우는 적었으며 서로 비슷하였다. 표면할렬의 길이는 전도가열과 고주파가열건조에서 컸었고 복합가열건조에서 작았다.

본 연구에서 전도가열진공건조에서 할렬 발생이 가장 컸었는 바, 이는 건조목재의 수분경사의 크기와 관계된다. 두께방향과 폭방향의 수분경사는 전도가열에서 가장 컸었고, 고주파가열에서 가장 적었는 바, 수분경사의 크기가 할렬 발생의 주 요인으로 작용한 것으로 여겨진다. Resch (2003)는 고주파가열진공건조는 표면과 내부의 수분경사를 줄여주고, 건조응력이 적거나 또는 존재하지 않기 때문에 할렬 발생을 최소

화하거나 방지할 수 있다고 보고하였다.

본 연구에서도 전도가열건조목재의 표면할렬이 발생한 본수 비율과 할렬의 크기가 고주파가열과 복합가열에 의한 건조목재보다 크게 나타난 결과는 전도가열 건조목재의 두께방향과 폭방향의 수분경사가 큰 것과 밀접한 관계가 있는 것으로 여겨진다.

4. 결론

미송 대단면재의 전도가열, 고주파가열 및 복합가열에 의한 진공건조에서 건조속도는 복합가열진공건조에서 가장 컸었고 고주파진공건조에서 가장 적었다. 비에너지는 고주파진공건조에서 가장 컸고 전도가열과 복합가열에서는 서로 비슷하였다. 전도가열과 복합가열 진공건조목재의 두께방향 함수율분포는 불룩 형태를 나타내었으나, 고주파진공건조의 경우는 불규칙한 형태를 나타냈다. 모든 가열방법에서 폭과 두께 방향간의 함수율 분포는 상이하였다. 재장방향의 함수율분포는 전도가열과 복합가열 진공건조재의 경우 횡단면에서 낮고, 재장의 중간과 중심 부위에서 높았다. 그러나 고주파 진공건조목재는 횡단면의 함수율이 중심 부위것보다 더 높았다. 수분경사는 전도가열에서 가장 컸고 고주파진공건조에서 가장 적었다. 할렬 발생은 전도가열에서 가장 심하였고, 고주파가열에서 가장 적었다. 내부할렬은 어떠한 가열건조

법에서도 발생치 않았다. 복합가열건조의 결과는 전도가열과 고주파 가열간의 절충된 중간적 특성을 나타냈다. 전체적으로 보면 복합가열건조공조의 효과가 가장 우수하였다.

사 사

“이 논문을 수행함에 있어서 엄창득과 소범준은 2004년도 두뇌한국21사업에 의한 장학지원을 받아 수행하였음.”

참 고 문 헌

1. Avramidis, S. and R. L. Zwick. 1997. Commercial-Scale RF/V Drying of Softwood Lumber. Part 3. Energy Consumption and Economics. *Forest Prod. J.* 47(1): 48~56.
2. Cividini, R. 1995. Timber straightening and shrinkage tests in vacuum-press plus dryer. *Proc. of Intl Conference on Wood Drying '95*. High Tatras, Slovak Republic. : 231~236.
3. Harris, R. A. and M. A. Taras. 1984. Comparison of moisture content distribution, stress distribution, and shrinkage of red oak lumber dried by a radio-frequency/vacuum drying process and a conventional kiln. *Forest Prod. J.* 34(1): 44~54
4. Jung, H. S., B. J. SO, and C. D. Eom. 2003a. Comparison of Vacuum Drying Characteristics of Radiata Pine Square Timber Using Different Heating Methods. *Abstracts of 53rd Canadian Chemical Engineering Conference*, October 26~29. Hamilton, ON, Canada : No 354.
5. Jung, H. S., J. H. Lee, and N. H. Lee. 2000. Vacuum-press Drying of Thick Softwood Lumber. *Drying Technology*. 18(8): 1921~1933.
6. Jung, H. S., S. Avramidis, and L. Cai. 1998. Drying Characteristics of Large Western Redcedar Timber During Radio Frequency/Vacuum Drying. *Mokchae Konghak* 26(3): 1~8.
7. Jung, H. S., W. Kang, C. D. Eom, and B. J. So. 2003b. Comparison of Vacuum Drying Characteristics of Red Pine Square Timber Using Different Heating Methods. *Proc. 8th International IUFRO Wood Drying Conference*. Brasov, Romania: 135~140.
8. Jung, H. S., W. Kang, and C. H. Lee. 2002. Comparison of Drying Characteristics of Square Timber by Heated Platen and Radio-Frequency/Vacuum Drying. *J. Wood Science and Technology* 30(2): 108~114
9. Kanagawa, Y. and M. Yasuzima. 1993. Effect of Heat Sources on Drying of Wood. *Proc. Vacuum Drying of Wood '93*. High Tatras, Slovakia. : 215~224
10. Lamb, F. M. and E. M. Wengert. 1993. Comparison of Lumber Drying Quality between Two Vacuum Drying System and A conventional Predryer and Dry Kiln System. *Proc. Vacuum Drying of Wood '93*. High Tatras, Slovak Republic. : 251~256.
11. Lee, N. H., H. S. Jung, and C. W. Kang. 1998. Improvement of Dryability of Korean Larch Pillar in a Radio-Frequency/Vacuum Dryer by Low Pressure Steam Explosion Treatment, *한국가공학회지* 9(2): 55~63.
12. Perré, P., P. Joyet, and D. Aleon. 1995. Vacuum Drying: Physical Requirements and Practical Solution. *Proc. Vacuum Drying of Wood '95*. High Tatras, Slovak Republic. : 7~33.
13. Resch, H. 2003. High-Frequency Heating Combined with Vacuum Drying of Wood. *Proc. 8th International IUFRO Wood Drying Conference*. Brasov, Romania. : 127~132.
14. Simpson, W. T. 1991. *Dry Kiln Operation's Manual*. USDA Forest Service, Agric. Handbook No. 188, US Government Printing Office: Washington DC.