

웨스턴 레드시더 큰 正角材의 고주파 진공 건조 특성^{*1}

정 희 석^{*2} · 스티브로스 아브라미디스^{*3} · 리핑 카이^{*3}

Drying Characteristics of Large Western Redcedar Timber During Radio Frequency/Vacuum Drying^{*1}

Hee-Suk Jung^{*2} · Stavros Avramidis^{*3} · Liping Cai^{*3}

ABSTRACT

Western redcedar timber, 26 by 26cm in cross section and by 200cm long, was dried in a laboratory radio-frequency/vacuum kiln under 65torr of ambient pressure and a fixed frequency of 6.78MHz for the potential rapidly dry large timber. All process data were collected and saved in a computer through a data acquisition system. The temperature in the middle of timber was higher than temperature at the quarter point of timber length and thickness. Temperature gradients developed in the longitudinal and transverse direction of timber. The pressure in the middle of timber was higher than pressure at the quarter point of timber length. The pressure in the middle of timber was lower in the early stage of drying, and higher in the latter stage of drying than pressure at the quarter point of timber thickness. Power density was very highest during heating period and then gradually decreased. The drying curve was approximately linear and the total drying time was 27 hours from an initial moisture content(MC) of 48.6 percent to a final MC of 19.2 percent with only a few mild internal checks in the middle location of timber.

Keywords : radio-frequency, vacuum drying, temperature gradients, power density, drying curve

1. 서 론

주파수 범위가 50kHz~10GHz인 고주파(radio-frequency) 가열은 산업적으로 제과, 유리섬유 제조,

섬유와 종이의 건조 및 수용성 접착제의 경화를 위한 가열 등에 이용되어 왔다. 그러나 근년에 이르러 목재건조 분야에서도 고주파의 적용이 관심의 대상이 되고 있다. 특히 관행 열기건조법으로 건조가 불가능한 기동용의 큰 角材와 圓柱의 건조에 적용 가능

^{*1} 접수 1998년 3월 25일 Received March 25, 1998.

이 논문은 한국과학재단의 1997년 전반기 외국방문연구지원 사업(과제번호 97-1-06-13)에 의하여 연구되었음.

^{*2} 서울대학교 농업생명과학대학 College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea.

^{*3} 브리티시 컬럼비아 대학교 목재과학과 부교수 및 박사 후 연구원. Department of Wood Science, University of British Columbia, Vancouver, B. C., V6T 1Z4 Canada.

성 여부가 대상이 되고 있다. 큰 角材일수록 내부수분의 이동거리가 길어지고 건조결합이 유발되기 쉽기 때문에 얇은 목재에 비하여 상대적으로 저온과 고습을 적용함으로써 장시간이 소요될 뿐만아니라 건조 초기에 변색 될 가능성이 매우 크다. 따라서 일반적으로 두께 4인치 이상의 목재는 두꺼울수록 열기건조의 효율은 크게 저하되므로 큰 角材는 장기간에 걸쳐 음건을 하거나 생재 상태로 이용함으로써 할렬이 발생하고 미관이 크게 훼손되어지기 때문에 큰 각재의 효율적인 건조법의 개발이 요청되어 왔었다. 큰 각재의 경우 내부수분 이동 촉진인 건조의 요체가 되는 바, 고주파 가열과 진공 조건에서 그 가능성을 탐색중이다. 목재를 교류 전기장에 두면 세포내강과 세포벽에 존재하는 물 쌍극자가 전기장의 방향에 따라 진동하고 그 결과에 의해 목재내부에서 발열되며, 저압 조건에서 가열될 때 물의 비점이 저하되기 때문에, 고주파 가열이 진공조건에서 이루어진다면 증발속도는 현저하게 증가되어질 수밖에 없다. 고주파 진공 건조(RF/V drying)중에 목재내부에서 온도 경사와 압력 경사가 발생하고, 이 압력 경사는 목재 수분을 액체와 기체 형태로 이동을 촉진시킨다. 수분 이동 속도는 목재 내부의 온도와 압력 경사의 크기 및 외주압력에 의해 크게 영향을 받게 된다. 이러한 진공 건조법은 신속한 건조, 에너지 절약 및 건조실내 공기를 환기하지 않고 증발수분을 응축수로 제거하는 등 환경 친화형 건조(green drying)로 불리면서 각광을 받기 시작하였다.

Wengert와 Lamb(1982)는 활엽수재의 고주파 진공 건조재와 열기 건조재간에 경도와 인성의 차이가 없음을 보고하였고, Lee와 Harris(1984)는 두께 3.2cm인 red oak 제제품의 고주파 진공건조재와 제습건조재의 물리적 성질과 기계적 성질을 비교 보고하였으며, Harris와 Taras(1984)는 두께 5.08cm인 red oak 제제품의 고주파 진공건조와 관행열기건조간의 함수율과 건조용력 분포 및 수축률의 비교에서 재장과 두께 방향에서 수분경사와 내부용력 등의 유형은 유사하나, 고주파 진공 건조시간은 열기건조의 1/17에 불과함을 보고하였다. Lee와 Hayashi 등(1995)은 호도나무 원판의 고주파 가열 압체식 진공 건조에서 심재 할렬과 V형 크랙(crack)의 예방 효과가 있음을 보고하였다. 활엽수재의 건조에 이어 최근에 침엽수재의 고주파 진공건조가 집중적으로 이루어지고 있는데, Avramidis와 Zwick(1992)는 캐

나다 웨스턴 햄록(western hemlock) 등 3 침엽수종의 두께 4.4~15.2cm 범위의 제제품에 대한 건조결합과 건조효율 등을 보고하였고, Avramidis와 Liu 등(1994)은 변장 9.1×9.1cm인 실험용 고주파 진공 건조실에서 고정 전압을 적용하여 건조속도, 목재 내부온도와 압력 등의 건조특성을 보고하였다. Liu와 Avramidis 등(1994)은 웨스턴 햄록의 두꺼운 제제품을 실험용 고주파 진공 건조실에서 고정과 가변 전극전압조건으로 건조특성을 비교하여 매우 괄목할 만한 연구 결과를 얻었다. 그 이후 Avramidis와 Zwick 등(1996, 1996, 1997)은 산업용 고주파 진공 건조실을 이용하여 건조특성과 손상, 에너지 소비량과 경제성 및 건조실 디자인에 대해 보고하였다. Hayashi와 Kanaga (1993), Hayashi와 Nagase (1995) 등은 삼나무 심재의 고주파 진공건조에서 증기 폭쇄처리에 의해 투과성을 제고할 수 있음을 보고하였다. 이상의 고주파 진공건조에 대한 보고는 활엽수재의 경우 일부 수종의 두께 5.0cm 이하인 건조 곤란 목재를 대상으로 하였고, 침엽수재의 경우는 두께 15.0cm 이하인 제제품을 대상으로 하였다.

따라서 본 연구는 매우 큰 정각재의 건조를 위하여 고주파 진공 건조법의 적용시 건조특성을 파악하고자 변장 26×26cm인 캐나다산 웨스턴 레드시더의 구조용 큰 정각재를 공시하여, 건조시간 20분 간격으로 건조 중 목재 내부 부위별과 외주의 온도와 압력, power density 및 건조속도 등을 조사하였다.

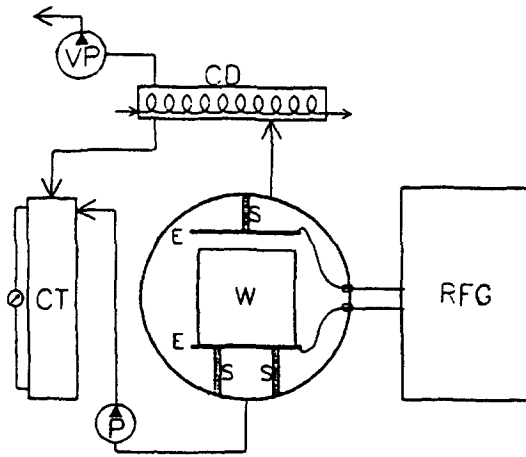
2. 재료 및 방법

2.1 시험재

공시수종은 캐나다산 웨스턴 레드시더(western redceder)이고, 시험재는 횡단면 치수가 26cm×26cm이고, 재장이 200cm인 큰 정각재로서 생재비중이 0.45이고 초기함수율은 48.6%인 것을 사용하였다.

2.2 고주파 진공건조기

본 연구에 사용한 고주파 진공건조기의 개략도는 그림 1과 같고, 건조실은 직경과 길이가 각각 76cm와 275cm인 탄소강 실린더로서 내부에 두께 1.27cm, 폭 30cm, 길이 224cm 크기의 알미늄제 전극판이 상하에 한 개씩 배치되어 있고, 폴리에틸렌 볼트에 의해 수평으로 지지되어 있다. 고주파 발전기는 최대 전극전압 5kV에서 최대출력 10kW 용량



VP : Vacuum pump, S : Support,
 CD : copper coil, E : Electrode plate,
 CT : Collected tank, W : Timber load,
 P : Pump, RFG : Radio-frequency
 generator.

Fig. 1. Cross-section view of the RF/V kiln.

을 갖추었으나 전압 범위는 0.15~0.45kV를 적용하였다. 건조중의 증발수분은 열교환기에 의해 응축되고, 응축수의 양을 측정할 수 있는 수집 탱크로 집수된다. 건조기는 집수된 수위가 예정 최종함수율에 도달되면 자동으로 정지되도록 설계되어 있다. 건조중의 측정부위별 온도와 압력은 fiberoptic sensor와 pressure transducer에 의해 탐지되고, 모든 공정자료는 20분 간격으로 수집되면서 data acquisition 시스템을 통해 컴퓨터에 입력되는 등 완전 자동화 시스템을 갖춘 실험용 건조기를 사용하였다.

2.3 건조방법

2.3.1 잔적

시험재의 양단으로부터 30cm 떨어진 부위에서 길이 2.54cm의 함수율 시험편을 채취하여 전건법에 의해 초기함수율을 측정하였다. 시험재 내부의 온도와 압력 측정 부위별로 깊이 6.5cm와 13cm까지 미리 천공한 후 온도와 압력 측정용 센서를 접합관을 통해 삽입한 후 온도용 접합관의 외부쪽은 실리콘으로 봉입하고, 압력용 접합관의 내부쪽은 고압용 그리스(grease)로 봉입한 후 시험재 1본을 상하 전극판 사이에 잔적하였다.

2.3.2 온도와 압력 측정 위치

목재 내부의 온도와 압력의 측정부위는 그림 2와 같이, 재장의 1/4과 두께의 1/2 부위의 온도(T_1)와 압력(P_1), 재장의 1/2과 두께의 1/2 부위의 온도(T_2)와 압력(P_2), 재장의 1/2과 두께의 1/4 부위의 온도(T_3)와 압력(P_3)을 측정하였는데 온도와 압력 측정 부위간에는 5cm 간격을 두었다. 그리고 실린더의 외주 온도(T_4)와 압력(P_4) 등, 모두 4부위에서 측정하였다.

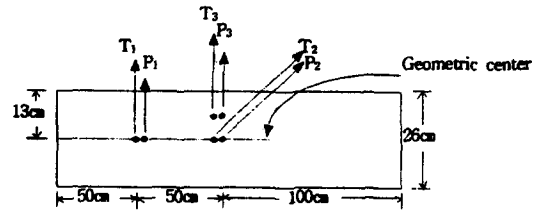


Fig. 2. Location of temperature and pressure sensors in timber.

2.3.3 건조 조건

예열기간과 건조기간 중 건조실의 목표 외주 압력은 65torr 수준으로 감압시키고, 주파수는 6.78MHz를 적용하였다. 고주파 가열을 23시간 동안 적용한 후 4시간 동안 전력을 차단하고 냉각시켰다.

2.3.4 최종함수율, 건조결함 및 power density

최종함수율은 건조가 종료된 다음 재장의 양형단면 두 부위, 양형단면으로부터 재장의 50cm 되는 두 중간 부위와 재장의 100cm되는 중앙의 한 부위 등 모두 5 부위에서 최종함수율 시험편을 채취하여 전건법에 의해 측정하였고, 내부할렬은 절단된 5 부위에서 관찰하였다. 목재내부에서 열발생의 척도인 power density (kW/m^3)는 건조시간 20분 간격별로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 목재내부와 외주의 온도변화

건조개시 전 목재내부의 부위별 초기온도 T_1 , T_2 와 T_3 는 각각 20.2, 21.6과 20.5 $^{\circ}\text{C}$ 이고, 외주 초기온도(T_4)는 13.3 $^{\circ}\text{C}$ 로부터 개시된 전 건조기간의 부위별 온도변화는 그림 3과 같이 외주 온도는 12.3~21.9 $^{\circ}\text{C}$ 범위로서 큰 변화를 나타내지 않았으나, 재장 방향과

두께 방향의 온도분포는 부위별로 차이를 나타내었다.

예열기간은 부위별로 따라 약간의 차이가 나타났는데, T₂의 예열기간은 5시간 정도 소요되었으나 T₁과 T₃의 것은 그보다 약간 짧았다. 예열기간 이후 모든 부위의 온도는 서서히 계속 상승하는 경향을 나타내었으며, T₁, T₂와 T₃의 최고온도는 각각 62.3, 69.9와 62.0°C이었다. 재장 방향의 부위별 온

도 비교에서 T₂는 T₁보다 높았고, 두께 방향의 부위별 온도 비교에서도 T₂는 T₃보다 높았다. 따라서 재장 방향과 두께 방향에서 중심 온도 T₂는 다른 부위의 온도 T₁과 T₃보다 높았으며, 재장과 두께 방향에서 온도경사를 나타내고 있음을 알 수 있었다. 건조기간 중 T₁과 T₂는 계속하여 상승하였고, T₃는 건조시간 16.67시간까지는 상승하였다가 그 후로는 완만하게 하강하는 추세를 보였다. 전력이 차단된

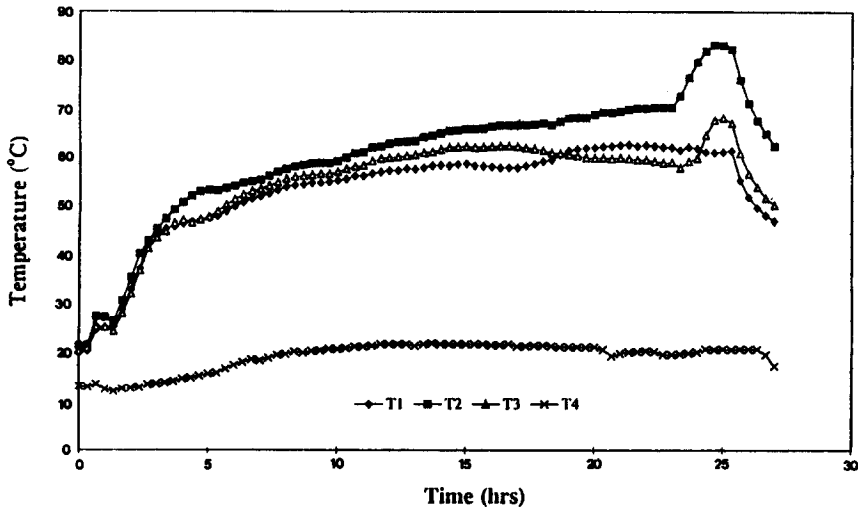


Fig. 3. Ambient and timber temperature variation for western redcedar timber with drying time.

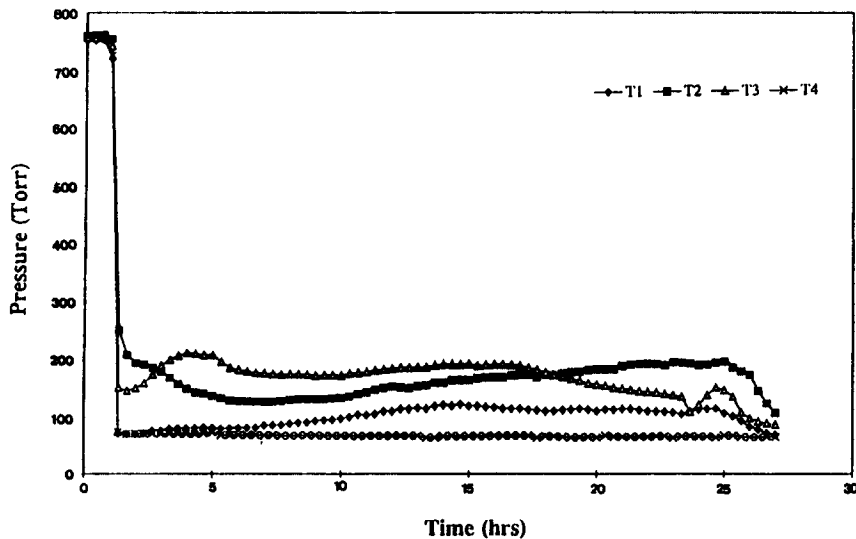


Fig. 4. Ambient and timber pressure variation for western redcedar timber with drying time.

23시간 이후 냉각기간의 부위별 온도 T_2 와 T_3 의 경우는 급격히 상승하였다가 다시 하강하였으나, T_1 은 거의 일정하게 유지하다가 하강하였는데, 재장의 중앙일수록 전력 차단에 의한 온도 변화가 더 큼을 알 수 있었다.

두께 방향의 온도 분포에 대한 본 연구결과와 Chen과 Lamb(1995)가 보고한 목재내부 온도는 두께의 중앙부위 온도가 가장 높다고 보고한 내용과 부합되고 있으나, 건조 시간이 경과함에 따라 온도가 하강하고 온도 차이가 감소한다는 보고 내용과는 달리 온도차이가 증가하고 중앙부위의 온도가 상승하는 것이 상이하였다. 현재까지 보고된 내용은 본 연구에서와 같이 큰 정각재의 건조에 대해서 전혀 보고되어있지 않기 때문에 더 이상 비교 검토가 불가하다.

3.2 목재내부와 외주의 압력변화

건조개시 전 목재내부 부위별 초기 압력 P_1 , P_2 와 P_3 는 각각 751.9, 760.0과 756.7torr로서 약간의 차이가 있었고, 건조실의 외주 초기압력(P_4)는 758.0torr이며, 모든 부위의 압력이 거의 상압 수준에서 개시된 전 건조기간의 부위별 압력 변화는 그림 4와 같다. 모든 부위의 압력은 건조시간 80분 동안 급속히 감소하였다. 이 때 각 부위의 압력 P_1 , P_2 , P_3 와 P_4 의 최소 압력은 각각 71.4, 252.4, 150.8과 73.4torr 수준까지 감소하였다. 그 후 압력 P_1 과 P_3 는 서서히

증가하다가 다시 감소하였으나, P_2 는 서서히 감소하다가 다시 증가하는 추세를 나타내었다. 재장 방향에서 압력은 P_2 가 P_1 보다 컸으나, 두께 방향에서 P_2 는 P_3 보다 건조 전기에는 낮았으나 건조 후기에는 오히려 반대로 증가하였다. 그러나 외주 압력 P_4 는 전 건조기간을 통해 매우 완만하게 감소하는 경향을 나타내었다. 전력 차단 후 냉각기간 동안 목재내부 부위별 압력은 온도 변화 경우와는 달리 약간 상승한 다음 감소하면서 외주 압력에 접근하는 추세를 나타내었다. 건조기간 중 목재 내부 부위별 압력의 경사는 수증기 이동을 가속시키는 요인이 되고 있는바, 압력 P_1 은 P_2 와 P_3 보다 낮기 때문에 수증기 유동은 종축방향으로 주도 되는 것으로 여겨지며, 또한 건조후기에는 압력 P_2 가 P_1 과 P_3 보다 높기 때문에 수증기 유동이 종축방향 뿐만아니라 횡단방향으로도 이루어짐을 알 수 있었다.

본 연구결과와 Neumann과 Mielke 등(1992)은 진공건조가 시작되면 표면층의 압력은 급속히 감소하고 길이방향 뿐만 아니라 두께 방향에서도 압력 경사가 나타난다는 보고 내용과 부합하였다. 그러나 Sasaki와 Kawabe 등(1987)의 목재내부 압력은 건조 초기 단계에서 급속하게 감소하고, 제 2단계는 거의 일정하게 유지하며, 제 3단계는 섬유포화점 이하에서 점차 감소하다가 외주 압력에 접근한다는 보고 내용과 비교하면 본 연구의 내부 중심온도 P_2 가 섬유포화점 이하에서도 서서히 상승하였다는 점만 제외한

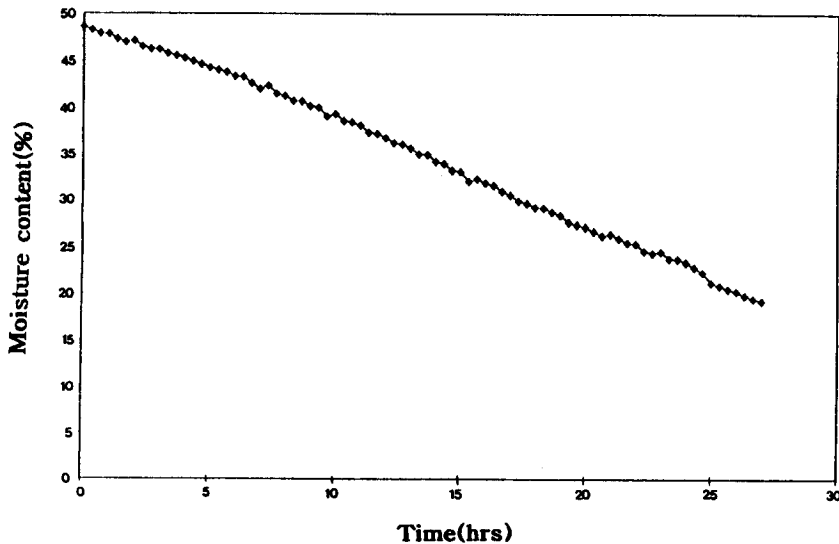


Fig. 5. Drying curve for western redcedar timber

다른 대부분 내용은 부합되고 있다. 목재 내부간의 압력 차이가 존재하고 또한 목재내부의 압력은 외주의 압력보다 높기 때문에 수분이동의 요인으로 크게 작용하여 건조가 촉진되어짐을 알 수 있었다.

3.3 건조속도와 건조결함

건조 중 함수율의 감소 곡선은 그림 5와 같이 초기함수율 48.6%부터 건조 종료시까지 거의 직선적으로 감소하였고, 최종함수율은 19.2%에 도달하였으며, 전 건조기간의 건조속도는 1.09%/hr로서 매우 높았는데, 건조속도를 가열기간과 냉각기간으로 구분하여 비교할 때 가열기간(23시간) 후의 함수율은 24.5%로서 건조속도는 1.05%/hr이었으나, 냉각기간(4시간)의 건조속도는 1.33%/hr로 나타나 냉각기간 중에도 상당한 건조가 이루어짐을 알 수 있었다. 이와 같은 현저한 고주파 진공 건조속도는 진공하에 물의 비점 저하와 아울러 외주 압력의 감소로 인하여 수분 증발과 아울러 수증기 유동이 촉진되기 때문이다. 냉각기간중에 건조속도가 높게 나타났는바, 이는 목재의 냉각이 개시됨에 따라 표층이 내층보다 먼저 급속히 냉각되고 공기의 수축으로 인해 표층의 압력이 급속히 저하되어진다. 따라서 압력 경사가 순간적으로 증가되어 내층에 있는 수증기가 외부로 향한 이동이 더욱 촉진되어진 것으로 생각된다. 표면할렬은 발생하지 않았고 내부할렬은 재장의 중앙부위에서만 길

이 4~6cm 정도의 것이 4개 발생하였다.

본 연구결과는 Avramidis와 Zhang 등(1996.)의 변장 9.1cm인 웨스턴 햄록과 웨스턴 레드시더의 건조 시간 경과에 따라 함수율 감소 곡선이 지수함수적으로 감소한 내용과는 약간 달리 거의 직선적으로 감소하였으며, 건조속도는 상대적으로 건조 초기에 약간 느렸고 건조 후기에 빠른 결과를 나타내는 등 차이가 있었다. 건조시간은 현행 다른 건조법에 비교할 때 상상할 수 없을 정도로 단축되었으며 건조결함의 발생도 경미하였는 바, 웨스턴 레드시더의 큰 정각재에 대한 고주파 진공 건조가 가능함을 알 수 있었다.

3.4 power density

고주파 가열 건조기간 동안 건조시간에 따른 power density 변화는 그림 6과 같이 보여지는데, 건조개시 즉시 power density는 3.85kW/m³에서 건조 1시간 이후부터 급속히 상승한 후 2시간 동안 매우 서서히 상승하였다. 그 이후 4.55kW/m³ 수준까지 급격히 감소한 다음 잔여 가열기간동안 매우 완만하게 감소하는 추세를 나타내었다. 이와 같은 power density 변화에서 보면 건조 초기는 재온 가열과 더불어 내부 수분 증발에 소요되는 열량 때문에 전력이 다량 소요되었으나, 가열 기간이 지난 후에는 거의 항울건조가 이루어졌고, 건조 후기로 갈

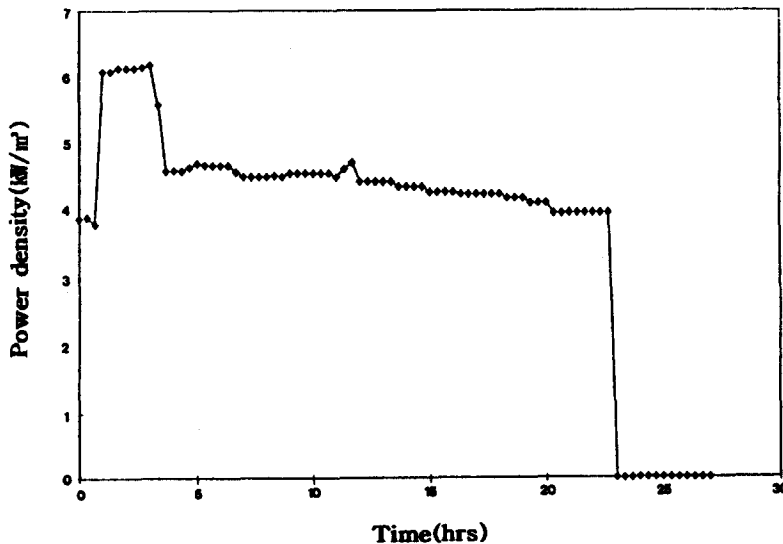


Fig. 6. Power density variation for western redcedar timber with drying time.

수목 중심층의 수분 증발보다 오히려 외층 수분의 증발이 이루어지기 때문에 power density도 점차 감소되는 것으로 여겨진다.

4. 결 론

웨스턴 레드시더의 초기함수율 48.6%인 큰 정각재의 함수율 감소 곡선은 거의 직선적이었으며, 건조 27시간 이후 최종함수율은 19.2%이었다. 고주파 가열 건조기간, 냉각기간 및 전 건조기간의 건조속도는 각각 1.05%/hr, 1.33%/hr 및 1.09%/hr로서 매우 컸었다. 고주파 가열기간 중 목재 내부의 온도는 재장과 두께 방향에서 중앙 부위가 높았고, 온도 경사를 나타내었다. 목재내부의 압력은 재장 방향에서 중앙 부위가 높았고 압력 경사를 나타내었다. 두께 방향에서 중앙 부위의 압력은 두께 1/4부위의 압력보다 건조 초기에 적었으나 건조 후기에 크게 나타났다. power density는 예열기간 중에 매우 컸었고 그 이후 급속히 감소한 다음 서서히 감소하는 추세를 나타내었다. 웨스턴 레드시더의 큰 정각재는 고주파 진공건조에 의해 경미한 내부할열이 발생하였으나 매우 신속하게 건조할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Avramidis, S., F. Liu. and B. J. Neilson. 1994. Radio-frequency/vacuum drying of softwoods : drying of thick western redcedar with constant electrode voltage. *Forest Prod. J.* 44(1) : 41~47.
2. _____ and R. L. Zwick. 1992. Exploratory radio frequency/vacuum drying of three B.C. coastal softwoods. *Forest Prod. J.* 42(7/8) : 17~24.
3. _____ and _____ 1996a. Commercial scale RF/V drying of softwood lumber. Part II. Drying characteristics and degrade. *Forest Prod. J.* 46(6) : 27~36.
4. _____ and _____ 1997. Commercial scale RF/V drying of softwood lumber. Part III. Energy consumption and economics. *Forest Prod. J.* 47(1) : 48~56.
5. _____, _____ and J. B. Neilson. 1996b. Commercial scale RF/V drying of softwood lumber. Part I. Basic Kiln design considerations. *Forest Prod. J.* 46(5) : 44~51.
6. _____, L. Zhang and S. G. Hatzikiriakos. 1996c. Moisture transfer characteristics in wood during radio frequency/vacuum drying. Proceedings of 5th International IUFRO Wood Drying Conference, Quebec. City : 125~133.
7. Chen, Z. and F. M. Lamb. 1995. The concept of boiling front in vacuum drying. Proceedings of the International Conference on Wood Drying. High Tatras, Slovakia Republic : 110~117.
8. 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.
9. Hayashi, K., Y. Kanagawa and M. Yasujima. 1993. Change of dryability under vacuum drying by improvement of permeability of wood. Proceedings of the International Conference on Wood Drying. High Tatras, Slovakia Republic : 112~118.
10. _____, Nagase, Y. and Kanagawa, Y. 1995. Experimental evidence of an importance of permeability in the RF/vacuum drying. Proceedings of the International Conference on Wood Drying. High Tatras, Slovakia Republic : 261~269.
11. Lee, A. W. C. and R. A. Harris. 1984. Properties of red oak lumber dried by radio-frequency/vacuum process and dehumidification process. *Forest Prod. J.* 34(5) : 56~58.
12. Lee, N. H., K. Hayashi and H. S. Jung. 1995. Possibility of drying of walnut disk for wooden arts in radio-frequency/vacuum dryer with mechanical pressure system. Proceedings of International Conference on Wood Drying. High Tatras, Slovakia Republic : 270~279.
13. Liu, F., S. Avramidis, and R. L. Zwick. 1994. Drying thick western hemlock in a laboratory radio frequency vacuum dryer with constant and variable electrode voltage. *Forest Prod. J.* 44(6) : 71~75.

14. Neumann, R., A. Mielke, and G. Bohner. 1992. Comparison of conventional and convective vacuum drying of beech. Proceedings of 3rd IUFRO International Wood Drying Conference. Vienna, Austria : 222~226.
15. Sasaki, K., J. Kawabe, and M. Mori. 1987. Vacuum drying of wood with high frequency heating(II). The pressure within lumber during evacuation and drying. Bulletin of the Kyushu Univ. Forests 57 : 245~265.
16. Wengert, E. M. and F. M. Lamb. 1982. Hardwood drying test evaluates new methods. *Forest Industries*. 109(13) : 21~23.