목재공학 29(4): 25~32, 2001
Mokchae Konghak 29(4): 25~32, 2001

단척 통나무와 선반가공목의 마이크로웨이브-진공 건조*1

姜 琥 陽*2

Microwave-Vacuum Drying of Short Roundwoods and Wood Turneries*1

Ho-Yang Kang*2

요 약

관행열기건조방식으로는 결함없이 건조가 불가능한 목공예용 단척 통나무를 건조할 수 있는 마이크로파-진공 건조기를 개발하였다. 이 건조기는 크게 출력 1.5 kW와 주파수 2,450 MHz인 마그네트론 3개와 600리터/분 진공펌프, 100 kg 로드셀, 그리고 폭과 높이가 각각 580 mm, 길이가 1,360 mm인 cavity로 구성되어 있다. 목재건조속도는 마그네트론 주사시간과 정지시간의 비율에 따라 결정되도록 되어 있다. 건조기의 성능을 실험하기 위해 직경 12.5~25 cm, 길이 25~50 cm의 리기다소나무, 은사시나무, 그리고 자작나무 통나무를 건조하였다. 건조결과 약간의 건조결함이 있었으나 비교적 양호하였으며 매우 짧은 시간에 건조할 수 있었다. 또 오리나무와 물푸레나무 생재로 된 제기용 선반가공목은 함수율 4%까지 결함없이 건조할 수 있었다. 통나무길이에 따른 마이크로파-진공 건조의 속도도 은사시나무를 이용하여 비교하였다.

ABSTRACT

A microwave vacuum (MW/V) dryer was developed for drying short roundwoods, from which woodcraft souvenirs in Korean market are mostly made, and which were hardly dried without defects in a conventional kiln. It consisted of three 1.5 kW magnetrons of 2,450 MHz, a vacuum pump, a load cell of 100 kg and a cavity of 580×580×1,360 mm^3. A computer program was developed to switch on or off the magnetrons according to drying schedules, those were based on microwave injection time or the average of wood temperatures. To evaluate the new MW/V dryer the roundwood specimens of rigida pine, poplar and birch were dried. Their log diameters and lengths ranged from 12.5 to 25 cm and from 25 to 50 cm,

* 1 접수 2001년 4월 26일, 채택 2001년 7월 23일
이 논문은 농림부 농림기술개발사업의 연구개발 결과임.
* 2 충남대학교 농과대학 College of Agriculture, Chungnam National University, Dae-Jeon 305-764, Korea.

respectively. In spite of the presence of minor drying defects, the MW/V drying is found to be an effective method for drying short roundwoods. Wooden turneries made of red alder and ash logs were also MW/V dried from green to 4%MC without any degradation. The rates of the MW/V drying were examined for three different lengths of poplar logs.

Keywords: microwave vacuum drying, magnetron, monitoring system, roundwood, wood turnery

1. 서 론

국내에 유통되고 있는 제기를 포함한 목공예 제품의 대부분은 단척의 통나무를 선반가공한 것들이다. 선반가공 공장에서는 박피하지 않은 원목을 장기간 야외보관하여 함수율을 어느 정도 떨어뜨린 후에 절단하여 선반가공한 다음 톱밥 속에 넣어 천천히 건조한다. 원목을 야외에 장기보관하면 환경변화로 V형 크랙과 횡단면할열이 많이 발생할 뿐만 아니라 변색균과 곰팡이가 침투하여 손실이 많다.

통나무나 선반가공목은 생장응력을 가지고 있을 뿐만 아니라 목재의 이방성으로 인해 V형크랙과 횡단면 할열이 쉽게 발생하기 때문에 관행열기건조로 결함없이 건조하는 것은 거의 불가능하다. 이 같은 결함을 발생시키는 원인인 접선방향 인장응력 집중을 막기 위해 통나무에 배할가공처리(logitudinal kerfing)(Hsu and Tang, 1984; 정 등, 1997)를 하기도 하는데 이렇게 처리된 목재는 건축부재로 사용할 수는 있으나 목공예품이나 제기 등을 만드는데 사용할 수 없다.

목재에 고주파를 조사하면 목재 내층이 표층보다 먼저 가열되고, 내층수분이 표층으로 이동하기 때문에 표층의 함수율이 내층보다 높다. 따라서 표층이 받는 인장응력이 일반 건조보다 작기 때문에 표층의 접선방향 인장응력 집중으로 인한 V형크랙이나 횡단면할열, 표면할열을 예방할 수 있다(Resch, 1968).

목재의 Microwave(MW)건조에 대한 연구로 최근 Antti(1992, 1995)는 MW오븐 내에서 내부증기압과 온도분포, 건조속도를 연속적으로 조사하는 방법을 개발하여 물푸레, 너도밤나무, 참나무를 서로 비교하였으며, 대형 MW건조기를 이용하여 pine과 spruce 판재의 최적 건조조건을 찾아냈다. Zielonka 등 (1997)은 MW건조 중 목재내 온도분포모델을 Fourier 식을 이용하여 만들어 실험치와 잘 일치함을 보였다. 강(1998)은 침엽수와 활엽수 6수종의 MW 건조를 통해 최대건조속도와 투과율이 직선적인 관계에 있음을 보였다.

초고주파인 Microwave(MW) 파를 이용한 목재 건조 기술은 1960년대부터 미국, 러시아 등 선진국에서 꾸준히 연구 발전되어 왔는데(Resch, 1967, 1968; McAlister and Resch, 1971; Voss, 1966) 최근 들어 가정용 전자렌지의 급격한 수요 증가에 따른 생산기술의 발전으로 마그네트론 가격이 낮아지고 안정성이 높아져 국내 목공예산업과 같이 소규모 업체에서 사용하기 적당한 건조기를 개발할 수 있게 되었다.

통나무를 MW/V건조할 때 단점은 낮은 함수율까지 건조가 어렵다는 것이다(강, 1999). 통나무는 침투깊이가 깊어 마이크로파가 고르게 침투하지 못한다. 따라서 목공예용 통나무를 MW/V건조할 때는 생재를 선반가공하여 건조하던가, 통나무를 20~30%까지 MW/V건조한 후에 선반가공하여 열기건조하는 것이 좋다. 전자의 경우 선반가공 후에는 목재두께가 얇기 때문에 마이크로파 침투가 용이하며, 후자의 경우 목표함수율까지 건조하여 선반가공하는 것보다 가공이 수월하며 함수율이 섬유포화점 이하이며 표층이 내층보다 함수율이 높기 때문에 결함없이 열기건조할 수 있다.

본 연구에서는 목공예품 공장 또는 제기 공장 등 국내 소규모 목재산업체에서 사용할 수 있는 목재용 MW진공건조기를 설계 제작하였으며 여러 수종의 단척 통나무와 생재상태의 제기용 선반가공목을 건조하여 건조기의 성능을 시험하였다.

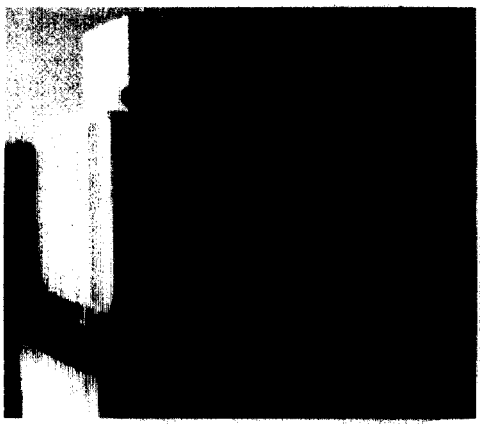

Fig. 1. A photograph of the microwave vacuum dryer used for this study.

2. 재료 및 방법

2.1 목재용 MW진공건조기의 제작

본 연구에 사용된 목재용 MW진공건조기(Fig. 1)는 고주파기기 전문업체에 주문제작하였다. 건조기는 크게 하부 PCL control box와 상부 cavity로 구성되었다. Cavity의 내부크기는 폭 580 mm, 높이 580 mm, 길이 1,360 mm로 cavity 상부에 1.5 kW, 2,450 MHz 마그네트론 3개가 설치되어 있으며 마그네트론 바로 밑에 전자파를 고르게 분산시키기 위해 stirrer가 2개 매달려 있다. cavity는 진공에서 변형이 생기지 않도록 20 mm 스테인레스 철판으로 만들었으며 취약한 곳은 날개를 달아 보강하였다. 문에는 실리콘 O링을 끼워 기밀을 보강 하였으며 cavity의 내부와 외부를 에폭시로 도장하여 목재가스에 의한 부식을 방지하였다.

PCL control box 옆에 5 kW 열풍기를 부착하여 MW건조와 열기건조를 병행할 수 있도록 만들었다. 그러나 진공조건에서는 열풍기 통로를 밀폐하여야만 하기 때문에 열풍기를 사용할 수 없었다. 만일 열풍기 대신 전기가열기를 cavity 내에 설치하였다면, 필요한 경우 진공에서도 가열할 수 있었을 것으로 생각된다.

PCL control box에서 마그네트론의 ON/OFF 시간을 분단위로 설정할 수 있으나 본 연구에서는 릴레이를 이용하여 PC에서 마그네트론 조사시간을 직접 조절할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 건조 중 마그네트론의 조사시간(Magnetron Operation Time)은 자동적으로 PC에 기록되었다.

Cavity내 습한 공기는 진공펌프에 의해 외부로 배출되나 응축수는 cavity 바닥에 고이게 된다. 이 응축수를 배출하기 위해 바닥에 배수구를 만들었다. 이 배수구는 건조 중에는 진공이 새지 않도록 닫아 두었다가 건조를 마친 후에 열어서 응축수를 제거하도록 하였다.

안전을 위해 문에는 리미트스위치를 부착하여 완전히 밀폐되지 않으면 마그네트론이 작동하지 않도록 하였으며 건조를 시작할 때마다 MW탐지기로 누출여부를 꼭 검사하였다. cavity내부 허용온도를 PCL control box에서 설정할 수 있도록 하여 내부온도가 허용온도를 초과하면 전원이 자동적으로 차단되도록 하였다.

2.2 탐지장치

건조 중 목재의 무게를 탐지하기 위해 목재의 하부에 최대용량 100 kg, 정도 0.05 kg의 디지털저울을 설치하였다(Fig. 2). 이 디지털 저울은 몸체와 액정표시기가 분리되므로 몸체는 cavity안에, 액정표시기는 cavity밖에 두었다. 액정표시기의 디지털 데이터는 RS232를 통해 PC로 전송된다.

목재내부의 온도는 T-type(구리-콘스탄탄) 열전쌍을 이용하여 측정하였다. 목재 시편에 심긴 열전쌍은 데이터로거를 거쳐 RS232로 PC에 연결되었다.

Cavity내부 압력은 cavity 상부에 설치된 Bourden 압력계로 측정하였다. 이 압력계는 최대진공압과 최저진공압를 정할 수 있도록 되어 있어 최저진공압에 도달하면 진공펌프가 작동하고 최대진공압에 도달하면 진공펌프의 작동이 멈추도록 하므로써 에너지를 절약할 수 있다. 본 실험에서는 최저진공압 400 mmHg, 최대진공압 600 mmHg을 사용하였다.

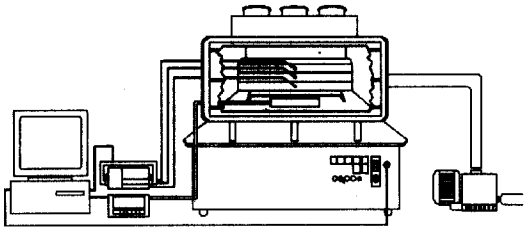

Fig. 2. Diagram of the microwave vacuum dryer and monitoring system.

2.3 건조스케쥴 프로그램

온도과 시간의 두 가지 건조스케쥴 컴퓨터프로그램을 개발하였다(Fig. 3). 온도스케쥴은 건조 중 목재온도를 탐지하여 일정하게 유지할 수 있도록 마그네트론 조사시간을 조절하도록 만든 것이며, 시간스케쥴은 마그네트론 조사시간과 정지시간을 건조경과에 따라 미리 정해 놓은 것이다. 시간스케쥴은 경험에 의해 작성되었다.

2.4 공시원목

리기다소나무(*Pinus rigida*)와 은사시나무(*Populus tomentiglandulosa*)는 충남대학교 교정에서, 자작나무(*Betula platyphylla var. japonica*)는 충남대학교 중원연습림(충청북도 소재)의 조림지에서 벌채한 통나무를 공시원목으로 사용하였다. 리기다소나무의 흉고직경은 약 25 cm, 은사시사무는 20~25 cm, 자작나무는 21 cm였다.

2.5 공시시험편 제작

리기다소나무 통나무를 길이 45 cm로 잘라 3개의 공시시험편을 만들었다. 매회 1개 시험편을 넣고, 온도스케쥴 1회, 시간스케쥴 2회 건조하였다. 각 스케쥴은 Table 1과 같다. 온도스케쥴을 사용하여 건조한 다음 건조결과를 분석하여 시간스케쥴을 작성하였다.

은사시나무는 직경 20 cm, 길이 50 cm 통나무 1개

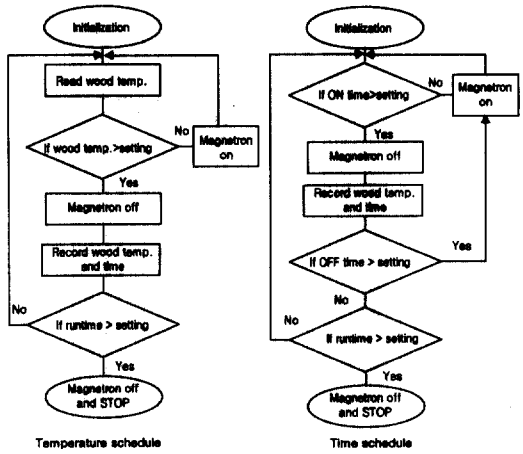

Fig. 3. Flow charts of the temperature and time schedules for MW/V drying.

를 3단계 온도스케쥴로 건조하였다. 목재온도를 초기 10시간은 60℃, 중기 10시간은 70℃, 말기 5시간은 80℃로 맞추었다.

자작나무는 원목을 길이 25 cm로 잘라 1회에 6개를 동시에 넣고 건조하였다. 생재 평균함수율은 89.2%였으며 비교적 순한 온도스케쥴을 사용하였다. 초기에 온도 60 ℃를 33시간 유지하였으며, 그후 70℃를 10시간, 75℃를 5시간 거쳐 총 48시간 건조하였다.

선반가공목은 남원지방에서 제기용으로 사용하는 오리나무(*Alnus japonica*)와 물푸레나무(*Fraxinus rhynchophylla*) 원목을 구입하여 사용하였다. 일반적으로 제기가공 공장에서는 생재를 선반가공하지 않으나 실험을 위하여 생재를 선반가공하였다. 선반가공시험편의 평균 생재함수율은 물푸레나무가 40%, 오리나무가 43.5%였으며 직경은 15~20 cm, 길이는 7.5 cm였다.

2.6 MW진공건조

통나무 건조는 다음과 같이 실시하였다. Cavity내 저울 위에 통나무 시험편을 얹고 통나무 측면에 직경 3 mm, 길이 5 cm 열전쌍 구멍을 전동드릴로 뚫었다. 구멍에 열전쌍을 넣은 후에 실리콘실런트로 메웠

Table 1. MW Drying schedules used for drying 45cm long rigida pine logs.

Drying schedules		Steps	1	2	3	4	5	6	7	Total
Temperature schedule		Temperature (℃)	40	50	60	65	70	75	80	
		Duration (hr)	0.5	0.5	9.0	5.0	5.0	5.0	5.0	30
Time schedule	I	on/off time	4/1	2/8	3/7	4/6				
		Duration (hr)	2.0	18.0	10.0	10.0				40
	II	on/off time	4/1	2/8	4/1	2/8	4/6			
		Duration (hr)	2.0	18.0	0.5	2.3	7.0			29.8

다. 큰 통나무 하나를 건조할 때는 2~3개 열전쌍을, 작은 것 여러 개를 동시에 건조할 때는 매 통나무에 구멍을 하나씩 만들어 열전쌍을 6개까지 심었다. 통나무 밖에 노출된 열전쌍선은 알루미늄테이프로 밀봉하여 전자기장내 전선이 노출되지 않도록 하였다. 열전쌍 설치가 끝나면 cavity 문을 닫고 컴퓨터 프로그램을 작동하여 마그네트론과 진공펌프를 동작시켰다. 초기에는 마그네트론 조사시간이 길므로 이 기간 동안 MW탐지기로 누출여부를 조사하였다.

건조기가 가동하는 동안 컴퓨터 화면에 건조시간, 목재온도, 마그네트론 누적조사시간, 그리고 건조시간에 따른 목재무게 그래프가 나타난다. 건조가 끝나면 마그네트론이 완전히 꺼졌는가를 확인하고 배기밸브를 열어 응축수를 뺀 후에 cavity 문을 열고 통나무를 꺼내 열전쌍을 빼고 무게를 측정하였다. 건조 중 진공상태에서 측정된 통나무 무게는 건조 전·후 실제무게와 차이를 측정하여 보정하였다. 건조 후 통나무에서 섬유방향 길이 50 mm의 함수율시편을 3~5개 절단하여 오븐에서 전건하여 통나무의 전건무게를 계산하였다. 모든 통나무 시험편은 수피를 제거하지 않고 건조하여 통나무의 접선단면 상에 할열이 발생하는 것을 예방하였다.

선반가공목도 통나무와 같은 방법으로 건조하였다. 다만 목재에 구멍을 내지 않고 열전쌍을 선반가공목의 cavity 바닥을 향한 면 중앙에 알루미늄테이프로 접착하였다. 건조를 마친 후 모든 선반가공목의 무게를 측정하고 오븐 전건법으로 전건무게를 구하였다.

2.7 통나무길이에 따른 건조속도 측정

MW진공건조 중 수분은 섬유방향으로 이동하여 마구리를 통해 밖으로 나온다. 수피를 제거하지 않은 통나무는 통나무 길이에 따라 수분 이동거리가 결정되기 때문에 길수록 건조속도가 떨어질 것으로 예상된다.

직경 9~13 cm, 길이 240 cm의 은사시나무 통나무 3개를 각각 2, 4, 8토막으로 잘라서 120, 60, 30 cm의 시편으로 만들었다. 같은 길이 시편별로 따로 건조하면서 시편의 내부온도와 무게변화를 측정하였다. 건조스케쥴은 3.3시간 동안 3분ON~2분OFF 후에 12시간 2분ON ~5분OFF의 시간스케쥴을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 통나무의 MW진공건조

리기다소나무를 온도스케쥴을 사용하여 건조한 결과 초기함수율 115%를 30%까지 떨어뜨리는데 30시간이 걸렸다. MW진공건조를 처음 시행하기 때문에 목재내부의 탄화를 염려하여 30시간 이상 건조하지 않았다.

온도스케쥴을 분석하여 Table 1의 시간스케쥴I을 작성하였다. 초기에 목재를 가열하기 위해 2시간 동안 마그네트론을 4분ON~1분OFF시켰으며 이후 일

정한 온도를 유지하기 위해 2분ON~8분OFF로 바꾸었다. 시간스케쥴I로 건조한 결과, 생재에서 함수율 24%까지 떨어뜨리는데 40시간이 걸렸다. 시간스케쥴 I이 온도스케쥴보다 최종함수율은 낮았지만 건조시간이 더 걸렸다. 이를 보완한 것이 시간스케쥴II이다. 그 결과 생재에서 함수율 24%까지 건조하는데 29.8시간 걸렸다.

시간스케쥴II의 건조곡선과 목재내부온도는 그림 4과 같다. 목재내부의 온도는 평균 70℃를 유지하였다. 목재의 함수율은 건조초기에 급격히 감소하다가 2시간부터 20시간까지 완만하게 감소하였으면 이후 감소속도가 증가하였다. 이러한 함수율 변화는 입력된 건조스케쥴에 따른 것이지만, MW진공건조에 적당한 스케쥴로 생각된다. Table 1의 온도스케쥴과 시간스케쥴I도 같은 형태의 건조곡선을 나타냈다.

리기다소나무 건조결과, 세 스케쥴 모두 마구리에 잔할열만 나타났을 뿐 내부할열, 스프리트, V형크랙 등은 없었다. 적산전력계로 측정한 건조소비에너지는 온도스케쥴, 시간스케쥴I과 II이 각각 57, 60, 그리고 54 kWh였는데 이를 함수율 1%건조하는데 소요된 에너지로 환산하면 순서대로 0.671, 0.674, 0.667 kWh/%MC가 된다. 따라서 시간스케쥴II의 소비에너지가 다른 스케쥴에 비해 약간 적으나 큰 차이가 없이 평균적으로 0.67 kWh/%MC, 즉 함수율 1% 감소에 576kcal가 소비되었다. 불행히도 리기다소나무 이외의 다른 수종의 소비에너지를 측정하지 않아서 수종간 비교가 불가능하였다.

은사시나무 통나무는 초기함수율 107.8%에서 최종함수율 21.5%로 떨어뜨리는데 25시간 걸렸다. 건조 후에 마구리에 깊지 않은 잔할열이 발견되었으나 내부할열, 스프리트, V형크랙 등은 없었다.

자작나무 통나무의 평균함수율은 초기에 89.2%였으며 건조 후에는 11.6%가 되었다. 60℃건조를 마친 후에 시편을 꺼내 평균함수율와 할열유무을 조사하였더니 평균함수율은 34~42%였으며, 대부분 시편에 마구리할열이 발생하였으나 깊이는 2 cm를 넘지 않았다. 그러나 수에 발생한 할열은 깊이 6 cm까지 발전하였다. 이후 할열은 건조를 마칠 때까지 더 이상 깊어지지 않았다. 표면할열과 내부할열은 없었다.

3.2 제기용 선반가공목 건조

물푸레나무와 오리나무 제기를 4회에 걸쳐 여러가지 스케쥴로 건조하였다. 매회 10개의 제기를 건조하였다. 수종별로 가장 적절하다고 생각되는 건조스케쥴과 제기의 초기함수율과 최종함수율은 Table 2와 같다. 경험으로 볼 때 오리나무는 비중이 높아 물푸레나무보다 건조하기 어렵고 결함이 발생할 확율이 높기 때문에 낮은 건조스케쥴을 적용하였다. 건조시간은 물푸레나무는 22시간, 오리나무는 39시간 걸렸다. 이러한 건조시간은 열기건조시간과는 비교도 안될 만큼 짧은 시간이지만 더 중요한 것은 열기건조로는 할열없는 건조가 불가능하다는 것이다. 실제로 제기공장에서는 선반가공된 제기를 톱밥에 넣어 6개월 정도 응달에서 말린다.

건조 후 육안으로 관찰한 결과 횡단면에 미세한 할열이 있었으나 무시할 만큼 작았으며 가벼운 샌딩으로도 완전히 없어졌다. 이것을 제외하면 전혀 건조결함이 없었다. 열기건조에서는 표층이 먼저 건조되기 때문에 갈라질 수밖에 없으나 MW진공건조에서는 내부가 먼저 건조되기 때문에 표층의 갈라짐을 예방할 수 있다. 따라서 본 실험 결과에 의하면 제기와 같은 선반가공목 건조에는 MW진공건조와 같은 고주파 건조가 좋은 효과를 나타낸다고 할 수 있다. 건조 후 잔류응력 실험을 하지 않았기 때문에 어느 정도의 내

Table 2. MW/V drying schedules for ash and alder turneries.

Species	Drying schedule			Moisture content (%)	
	Steps	Temperature (℃)	Drying time (hr)	Initial	Final
Ash	1	60	6	40.0	4.0
	2	80	16		
	Total		22		
Alder	1	60	18	43.5	6.6
	2	65	13		
	3	70	8		
	Total		39		

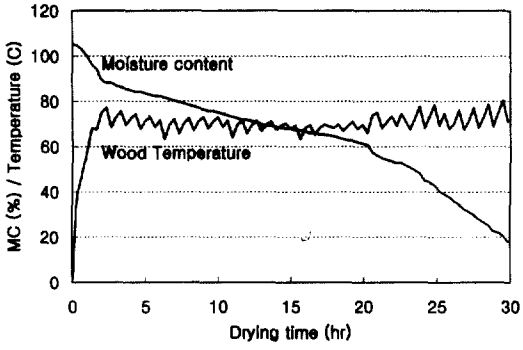

Fig. 4. Moisture content and wood temperature curves of a 45 cm long rigida pine log dried in a MW/V dryer.

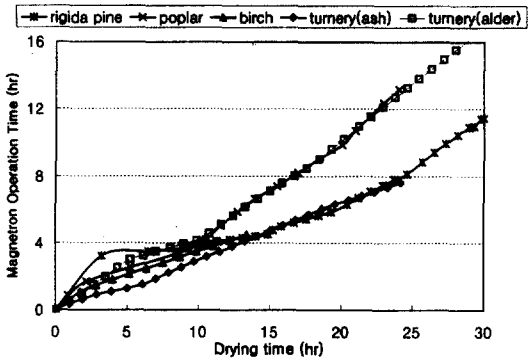

Fig. 5. Plots of Magnetron Operation Time vs. drying time for MW/V drying roundwoods and wood turneries.

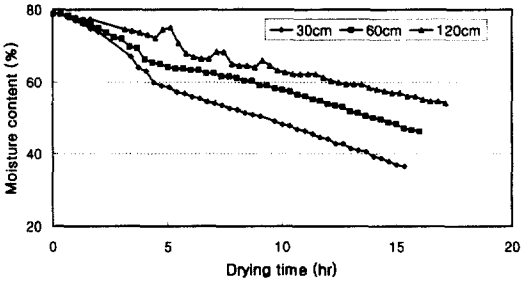

Fig. 6. MW/V drying curves of poplar logs with three different lengths.

부응력이 존재하는 지는 알 수 없으나 MW진공건조 후에도 conditioning 처리가 필요할 것으로 생각된다. 이에 관한 연구는 추후과제로 남아있다.

3.3 수종별 마그네트론 조사시간

건조시간에 따른 마그네트론 누적조사시간은 그림 5와 같다. 수종별로 대표적인 것을 하나씩만 표시하였다. 모두 온도스케쥴을 사용한 것이다. 건조초기에 마그네트론 조사시간은 약간 불균일 하지만 대체적으로 10시간 후에는 거의 균일한, 즉 직선적인 누적조사시간 증가를 나타내고 있다. 5개 수종 중 은사시나무 통나무와 오리나무 선반가공목이 건조시간 대비 약 55~60%의 마그네트론 조사시간 비율을 나타냈으며 다른 수종들은 31~38%를 보였다. 목재를 많이 넣고 건조할 때, 목재의 초기함수율이 매우 높을 때 그리고 목재의 비중이 클 때 마그네트론 조사시간 비율이 높아진다. 세 가지 경우 모두 일정한 온도를 유지하기 위해서는 더 많은 열량이 필요하기 때문이다. 본 실험에서 은사시나무 통나무는 첫 번 경우에, 오리나무 선반가공목은 세 번째 경우에 해당한다고 볼 수 있다.

3.4 통나무길이에 따른 건조속도

통나무 길이별 15시간의 건조곡선은 Fig. 6과 같다. 통나무 길이가 짧을수록 건조속도가 빨라 120 cm 시편의 건조속도는 1.4%MC/hr, 60 cm 시편은 2.0%MC/hr, 30 cm 시편은 2.8%MC/hr였다. 목재내부의 온도는 5시간 후에 평형에 도달하였는데 이때 목재내부의 평균온도는 60 cm시편과 120 cm시편이 각각 64.2℃와 62.3℃로 비슷한 반면 30 cm시편은 54.0℃를 나타냈다. 30 cm시편은 수분이동거리가 짧기 때문에 증발된 내부수분이 즉시 외부로 배출되어 내부온도가 낮아진 때문으로 설명할 수 있다.

4. 결 론

목공예품 공장 또는 제기 공장 등 국내 소규모 목재산업체에서 사용할 수 있는 목재용 MW진공건조기를 설계 제작하였으며 여러 수종의 단척 통나무와 미

건조된 제기 등을 건조하여 건조기의 성능을 시험하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구를 위해 개발한 MW진공건조기(4.5 kW, 2,450 MHz)와 온도·무게 탐지장치는 단척 통나무 건조에 매우 효과적이었다.

2. 리기다 소나무, 은수원사시, 자작나무 원목을 생재상태에서 함수율 20% 정도까지 48시간 이내로 건조할 수 있었다.

3. 물푸레나무와 오리나무 원목으로 가공한 제기를 함수율 40% 내외에서 5% 내외까지 특별한 결함 없이 건조하는데 물푸레나무는 22시간, 오리나무는 39시간 걸렸다.

4. 통나무 길이가 짧아짐에 따라 건조속도는 매우 증가하였다. 따라서 MW 진공건조 시 목재 내 수분은 대부분 섬유방향으로 이동함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Antti, A. L. 1992. Microwave drying of hardwood: simultaneous measurements of pressure, temperature, and weight reduction. Forest Products Journal 42(6): 49-54.
2. Antti, A. L. 1995. Microwave drying of pine and spruce. Holz als Roh- und Werkstoff 53: 333-338.
3. Avramidis, S. et al. 1994. Radio-frequency/vacuum drying of softwood: drying of thick western redcedar with constant electrode voltage. Forest Products Journal 44(1): 41.
4. Hsu, N. and R. Tang. 1984. Internal stresses in wood logs due to anisotropic shrinkage. Wood Science 7(1): 43-51.
5. McAlister, W. R. and H. Resch. 1971. Drying 1-inch ponderosa pine lumber with a combination of microwave power and hot air. Forest Products Journal 2(3): 26-34.
6. Petty, J. A. 1970. Permeability and structure of the wood of Sitka spruce. Proc. Roy. Soc. Lond. B 175: 149-166.
7. Resch, Helmuth. 1967. Drying of incense cedar pencil slats by microwave power. J. Microwave Power 2(2): 45-49.
8. Resch, Helmuth. 1968. Microwave for the drying of wood products. Holz als Roh- und Werkstoff 26(9): 317-324.
9. Voss, W. A. G. 1966. Factors affecting the operation of high power microwave heating systems for lumber processing. IEEE Trans. IEA 2(3): 234-243.
10. Zielonka, P. et al. 1997. The comparison of experimental and theoretical temperature distribution during microwave wood heating. Holz als Roh- und Werkstoff 55: 395-398.
11. 강호양. 1998. 침·활엽수재의 Microwave 건조곡선예측. 목재공학 26(4): 34-42.
12. 강호양. 1999. 목재용 Microwave 진공 건조기 및 응용기술 개발. 농림부 농림특정연구사업 보고서.
13. 정희석, 이남호, 박정환. 1997. 잣나무 간벌통나무와 수심재의 가열판식 진공건조 특성. 목재공학 25(4): 51-60.