

## 침·활엽수재의 Microwave 건조곡선예측<sup>\*1</sup>

姜 琥 陽<sup>\*2</sup>

## Prediction of Microwave Drying Curves for Various Hardwoods and Softwoods<sup>\*1</sup>

Ho-Yang Kang<sup>\*2</sup>

### ABSTRACT

Three hardwood (ash, alder and black locust) and three softwood (Japanese red pine, radiata pine and Western hemlock) specimens were dried in microwave(M/W) oven and their drying rates were obtained. Their specific permeabilities were also measured by using a modified liquid permeability measuring device. The correlation between the M/W drying rates and permeabilities of six species were statistically analyzed. It was revealed that within a species there is a logarithmic relationship between the M/W drying rates and average moisture contents and that among species there is a linear relationship between the M/W maximum drying rates and the average specific permeabilities. A exception was Western hemlock, which was of low permeability and of high drying rate. A MC-time equation, which showed a good agreement with the actual data, was derived. Thus using this equation the moisture contents of wood and the drying end points of M/W drying could be predicted. Infrared images of the thermal distribution in wood were illustrated.

**Keywords :** microwave drying, permeability, thermal distribution, drying end point, ash, alder, black locust, Japanese red pine, radiata pine, Western hemlock

### 1. 서 론

보일러에 대한 엄격한 환경규제는 국내외의 증기건조업체의 운영을 어렵게 하였으며 그 결과 목재를 적기에 건조하기 어렵게 되었다. microwave (M/W) 건조는 전기를 사용하기 때문에 환경오염의 문제가

전혀 없으며 열전달 매체를 통하지 않고 목재를 직접 가열하기 때문에 건조기간이 증기건조에 비해 매우 짧으며 에너지 효율이 매우 높다 (강, 1995a; 1995 b). 또 M/W건조는 핵수율이 높은 부분에 에너지 흡수가 더 많이 일어나므로 선택적인 건조가 가능하며 내충부터 건조되므로 표면활열을 예방할 수

\*1 접수 1998년 8월 17일 Received Aug. 17 1998

이 논문은 농림부 농림기술개발사업의 연구개발 결과임.

\*2 충남대학교 농과대학 College of Agriculture, Chung-Nam National University, Dae-Jeon 305-764, Korea

## 침·활엽수재의 Microwave 건조곡선예측

있다 (Resch, 1968). 두꺼운 목재의 건조에 효과적이며 수축률이 적기 때문에 가공품 건조에 사용될 수 있다. 이에 반해 단점으로 수용재적이 적어 한번에 많은 양을 건조할 수는 없지만 증기건조에 비해 건조시간이 매우 짧기 때문에 회전수를 높일 수 있다.

M/W를 목재건조에 사용하려는 노력은 1960년대부터 시작되어 미국의 Resch (1967, 1968)와 McAlister (1971), Voss (1966) 등에 의해 집중적으로 연구되었다. 최근에는 Antti가 M/W오븐내에서 내부증기압과 온도분포, 건조속도를 연속적으로 조사하는 방법을 개발하여 물푸레, 너도밤나무, 참나무를 서로 비교하였으며(1992), 또 0.8 x 1.1 x 1.8 m의 대형 M/W 건조기를 이용하여 두께 40과 50mm의 pine과 spruce의 최적 건조조건을 찾아내었다 (1995). Zielonka 등(1997)은 M/W건조 중 목재내 온도분포모델을 Fourier식을 이용하여 만들어 실현치와 잘 일치함을 보였다.

Microwave 건조는 매우 급격히 진행되기 때문에 건조를 적당한 시점에 종료하는 것이 매우 중요하다. 만일 그렇지 못했을 경우 과건조되어 내부탄화가 일어나며 화재가 발생하는 경우가 종종 있다. Microwave 건조에서는 목재가 전자기장 내에 놓여있기 때문에 증기건조에 사용하는 전기적인 방법으로 건

조로내 목재의 함수율을 측정할 수 없다.

지금까지 예비실험결과에 의하면 Microwave 건조속도는 건조초기 최대점까지 상승했다가 함수율에 따라 점차 감소하기 때문에 어느 시점의 건조속도, 즉 미분건조속도를 알면 그 시점의 목재 함수율을 예측할 수 있다.

본 연구에서는 6종의 침·활엽수재의 미분건조속도와 함수율의 관계를 조사하여 각 수종의 Microwave 건조곡선모델식을 만들었으며, 목재의 비투과율과 Microwave 건조속도의 관계를 조사하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 공시재료 및 시편

사용된 수종이 다양한 만큼 공시재료를 여러 경로를 통해 구입 또는 취득하였다. 물푸레나무(*Fraxinus rhynchophylla*)와 오리나무(*Alnus japonica*)는 전북 남원에 있는 어현동 목공예 단지에서 강원도에서 벌채하여 제기용으로 사용되는 길이 10cm 정도의 통나무를 생재상태로 구입하였다. 아까시나무(*Robinia pseudoacacia*)는 대전 인근 야산에서 벌채된 지 한 달이 못되는 원목을 구하였다. 소나무(*Pinus den-*

**Table 1.** Average green moisture contents and green densities of various hardwoods and softwoods used in this study

	Species	Average	Average green density
		green MC (%)	(g/cm <sup>3</sup> )
ash	heartwood	55	0.64 ± 0.01
	sapwood	55	0.64 ± 0.02
alder	heartwood	51	0.54 ± 0.05
	sapwood	53	0.55 ± 0.06
black locust	heartwood	45	0.71 ± 0.01
Japanese red pine	heartwood	48	0.46 ± 0.04
	sapwood	164	0.39 ± 0.02
radiata pine	heartwood	51	0.32 ± 0.01
	sapwood	129	0.37 ± 0.03
Western hemlock	heartwood	58	0.43 ± 0.01
	sapwood	79	0.38 ± 0.02

## 장 호 양

*siflora*)는 지리산에서 벌채된 원목을 3cm 두께로 판목 제재하여 구입하였으며 radiata pine(*Pinus radiata*)과 W. hemlock(*Tsuga heterophylla*)은 인근 제재소에서 두께 3cm 판재를 생재상태로 구입하였다.

### 2.2 생재함수율 및 생재밀도 측정

생재 공시재료에서 3 x 3 x 3cm 시편을 수종별, 심·변재별로 10-20개씩 준비하여 생재함수율은 전건법으로, 생재밀도는 水置換法으로 각각 구하였다. 생재밀도는 생재부피-전건무게를 기준으로 계산하였다.

### 2.3 M/W 건조와 오븐 건조의 수축률 비교

생재 공시재료에서 3 x 3 x 3cm 시편을 수종별, 심·변재별로 10개씩 잘라 무게를 재고, 水置換法으로 생재 부피를 구한 후 5개 시편은 60°C 오븐에서, 나머지 5개 시편은 M/W오븐에서 무게변화가 매우 적을 때까지 건조한 다음 모두 꺼내어 103±2°C 오븐에 넣고 전건시켜 무게를 측정하였다. 전건시편의 부피는 파라핀왁스 도포 후 水置換法으로 측정하였다. 파라핀왁스에 의해 증가한 부피는 아래와 같이 계산하여 보정하였다.

$$\Delta V_p = \frac{W_p - W_{od}}{\rho_p} \quad [1]$$

여기서,

$\Delta V_p$ : 파라핀왁스 부피

$W_p$  : 파라핀왁스 도포후 목재무게 (g)

$W_{od}$  : 목재 전건무게 (g)

$\rho_p$ : 파라핀왁스의 밀도 ( $=0.9 \text{ g/cm}^3$ )

### 2.4 액체투과율 측정

액체투과율은 전보(허와 강, 1997)에서 사용하였던 간이 투과율 측정장치를 사용하였으며 본 연구에서는 reservoir의 압력을 진공 60cmHg로 맞추어 사용하였다.

투과율시편은 공시통나무 또는 공시판재의 수부터 수피 근처까지 일정한 간격으로 마이크로톱을 사용하여 섬유방향으로 쪼개었다. 시편의 평균 단면적은  $14.5\text{mm}^2$ 로 최소 1개 이상의 나이테를 포함하도록 하였으며, 정확한 시편의 단면적은 투과율 실험 후 시편의 횡단면을 image analyzer로 확대하여  $1\text{mm}^2$

당 화소수로 계산하였다.

비투과율(K)은 Darcy의 법칙을 이용하여 아래 식으로 계산하였다.

$$K = 1.013 * 10^8 k \eta \quad [2]$$

$$k = \frac{Q/A}{\Delta P/L}$$

여기서,

$K$  = 비투과율 (darcy)

$k$  = 투과율 ( $\text{cm}^4 / \text{dyne s}$ )

$\eta$  = 물의 점성계수 ( $=0.01 \text{ dyne sec} / \text{cm}^2$ )

$Q$  = 유동속도 ( $\text{cm}^3 / \text{s}$ )

$A$  = 단면적 ( $\text{cm}^2$ )

$\Delta P$  = 시편 양단의 압력차 ( $\text{dyne/cm}^2$ )  
( $1\text{atm}=1.013*10^6 \text{ dyne/cm}^2$ )

$L$  = 시편의 길이 (cm)

### 2.5 목재 내부의 온도분포 측정

적외선 열화상 촬영장치를 사용하여 목재 내부의 온도 분포를 일정한 시간 간격으로 촬영하여 열이 목재 내부에서 어떻게 확산되고 어느 곳에 'hot spot'이 발생하는지 관찰하였다. 사용된 적외선 열화상 촬영장치는 Inframetric사의 Model 760으로 Detector type은 HgCdTe, 파장대역은 8-12  $\mu\text{m}$ 이다.

사용 수종은 radiata pine 변재와 Western hemlock 심재로 폭과 두께가 각각 10cm, 4.5cm 인 생재 판재를 횡단면 시편은 길이 35cm, 종단면 시편은 길이 20cm로 절단하였다. M/W오븐의 출력은 200W로 고정하였다. 처음 시편은 내부가 탈 때까지 가열하여 이 때 걸리는 시간을 알아 본 후, 두 번째 시편은 이 시간보다 약간 짧게 가열하고, 그 다음 시편은 더 짧게 가열하는 방식으로 가열시간을 균등하게 배치하였다. 가열된 시편은 M/W오븐에서 신속히 꺼내어 횡단면 시편은 시편 중앙을 횡단방향으로, 종단면 시편은 시편 중앙을 길이 방향으로 절단한 후 시편이 냉각되는 것을 막기 위해 가능한 한 신속히 촬영하였다.

### 2.6 수종별 M/W 건조속도 측정

M/W오븐 내 시편의 무게변화를 오븐 상부에 위치한 전자저울로 측정하였다. M/W오븐 천장에 직경 1cm의 구멍을 뚫어 저울과 시편을 M/W의

## 침·활엽수재의 Microwave 건조곡선예측

영향을 받지 않은 비닐 줄로 연결하였다. 시편의 건조속도는 전자저울의 RS232c Interface를 통해 PC에 10분 간격으로 자동 기록 되도록 프로그램을 만들었다. M.W건조속도는 목재의 양에 영향을 받으므로 수종마다 비슷한 무게의 시편을 넣고 건조를 시작하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 M/W건조와 오븐건조의 수축률 비교

M/W건조시편과 60°C 오븐건조시편의 수축률을 표2에 비교하였다. M/W건조는 목재내부부터 건조가 일어나기 때문에 열기건조에 비해 부피 수축률이 작다고 알려져 왔다(Avramidis et al., 1994). M/W건조는 표층보다 내층이 먼저 건조되므로 인장수축의 형태를 취하게 되어 수축률이 중기건조보다 작다. 그러나 본 실험 결과, 두 건조방법간 수축률 차이가 나타나지 않았다. 그 이유는 사용된 시편의 규격이 3 x 3 x 3cm로 작아 표층의 수축저항 효과가 감소되었기 때문인 것 같다. 미발표된 저자의 전처리방법과 건조방법에 따른 수축률 비교실험에서도 동일한 결과를 얻었다.

#### 3.2 수종별 투과율

투과율 시편의 단면적 및 길이와 비투과율의 평균, 최대·최소값을 수종별로 표3에 나타냈다. radiata pine을 제외하고 심재와 변재의 구분이 뚜렷하지 않았기 때문에 심재와 변재를 모두 포함하여 평균, 최대·최소값을 구하였다. 평균 비투과율은 radiata pine 변재가 0.68 darcy로 가장 높았으며, 그 다음으로 소나무, 물푸레나무, radiata pine 심재, 오리나무, W. hemlock 순이며 아까시나무가 0.01 darcy로 가장 낮았다. 최대 투과율은 소나무가 2.82 darcy로 radiata pine 변재 1.21 darcy 보다 높았으나 전자의 최저 투과율은 0.005 darcy로 후자의 최저투과율 0.12 darcy에 비해 1/20에도 미치지 못하였다. 따라서 소나무의 투과율은 매우 변이가 큼을 알 수 있다. 즉 표준편차는 0.66 darcy로 소나무의 평균 비투과율 0.45 darcy보다 크다.

활엽수 비투과율의 크기는 물푸레나무, 오리나무, 아까시나무 순이다. 아까시나무의 낮은 투과율은 도관의 타이로시스가 수분의 이동을 막고 있기 때문인 것으로 이해할 수 있으며, 이 때문에 건조가 매우 어려운 수종으로 알려져 있다.

침엽수의 투과율은 활엽수보다 비교적 높았으나 W. hemlock의 비투과율은 0.03 darcy로 훨씬 낮았

Table 2. Comparison of volumetric shrinkages between oven- and microwave-dried hardwoods and softwoods

Species	Average volumetric shrinkage (%)		
	Oven dry	M/W dry	Difference
ash	heartwood	12.8	13.7
	sapwood	11.6	.5
alder	heartwood	10.3	-1.1
	sapwood	11.5	.9
black locust	heartwood	16.9	1.4
Japanese red pine	heartwood	11.1	-3
	sapwood	9.2	-.1
radiata pine	heartwood	7.6	-.1
	sapwood	9.3	-.1
Western hemlock	heartwood	8.3	-.5
	sapwood	10.9	-.2

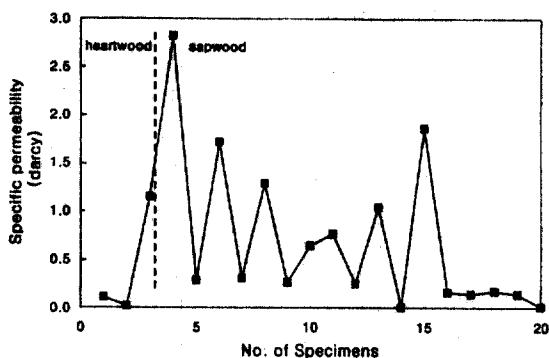


Fig. 1. A typical permeability distribution in radial direction of Japanese red pine.

다. 이는 W. hemlock 시편의 대부분이 심재였던 때  
문에도 일부 기인하지만 먼저 연구결과에서도 W.  
hemlock의 투과율은 다른 침엽수보다 매우 낮게 나  
타났다 (허와 강, 1997).

### 3.3 비투과율의 방사방향 분포

비투과율의 방사방향 분포는 그림1의 소나무 비  
투과율 분포에서 보듯이 심재의 수 부위에서 제일  
낮았다가 심재와 변재의 천이 영역에서 제일 높아지  
나, 변재 영역에서는 수피 쪽으로 갈수록 다시 낮아  
지는 경향을 보였다. 이러한 경향은 모든 수종에서

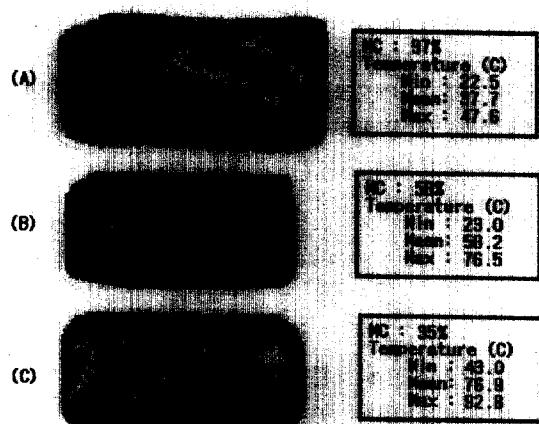


Fig. 2. IR thermo images of Western hemlock cross section, heated by microwave.

나타났다.

소나무의 변재에서 비투과율이 일정하게 변하지  
않고 요철을 나타내는 이유는 투과율 시편의 추재  
율이 균일하지 못한 때문이며, 실제로 시편의 추재  
율을 균일하게 만들기는 불가능하였다. 춘재와 추재  
가 차지하는 비율에 따라 투과율이 달라진다고 알  
려졌는데 (Petty, 1970), 본 실험 결과도 이를 입증  
하였다.

Table 3. Average specimen dimensions and average specific liquid permeabilities of some hardwoods and softwoods

Species	Specimen dimension		Specific permeability (darcy)		
	Cross section area ( $\text{cm}^2$ )	Average length (cm)	Average	Max	Min
ash	1.59	4.9	$0.40 \pm 0.33$	1.14	0.04
alder	1.39	3.2	$0.14 \pm 0.10$	0.34	0.03
black locust	1.94	2.0	$0.01 \pm 0.01$	0.04	0.002
Japanese red pine	1.28	5.1	$0.45 \pm 0.66$	2.82	0.005
radiata pine	heartwood	1.33	$0.20 \pm 0.21$	0.48	0.003
	sapwood	1.41	$0.68 \pm 0.59$	1.21	0.12
W. hemlock	1.23	3.1	$0.03 \pm 0.03$	0.08	0.003

### 침·활엽수재의 Microwave 건조곡선예측

#### 3.4 M/W건조 중 내부온도 분포

Western hemlock 횡단면의 온도분포 사진을 그림 2에 나타냈다. 평균함수율 97%, 56%, 35%에서의 최대온도는 각각 47.6°C, 76.5°C 그리고 92.8°C였으며 이 온도에 도달하는 데 각각 4분, 14분, 25분 걸렸다. 평균함수율이 97%로 매우 높을 때에도 내부온도가 불균일한 분포를 나타낼 뿐만 아니라 평균함수율이 35%로 낮아졌을 때에는 더욱 불균일하여 몇 군데 'hot spot'이 발생하였다. 이 같은 현상은 Western hemlock의 매우 낮은 투과율(표 3)에 의해 열확산이 잘 일어나지 못한 때문으로 해석된다. Western hemlock은 35분 건조 후 내부가 완전히 타 버렸다.

이에 반해 radiata pine에서는 내층의 열이 표층으로 잘 이동하기 때문에 횡단면의 온도분포가 균일하였다. radiata pine의 열확산 모습은 횡단면 사진 보다 섬유단면 사진에 잘 나타나고 있다 (그림 3). 실험결과 radiata pine은 100분까지 오래 건조하여 함수율이 6%로 떨어지더라도 탄화가 일어나지 않고

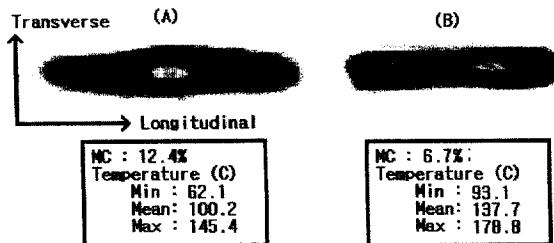


Fig. 3. IR thermo images of radiata pine radial section, heated by microwave. It shows that heat propagates along longitudinal direction.

Table 4. Initial MC's, maximum drying rates and the logarithmic regressions for drying rate plots of some hardwoods and softwoods.

Species	Initial MC (%)	Max. drying rate (%MC/hr)	Regression equation	R <sup>2</sup>
ash	37.5	3.5	0.9672 ln(x) + 0.2211	0.94
alder	38.8	2.4	0.8813 ln(x) - 0.5573	0.89
black locust	53.0	2.1	0.5472 ln(x) + 0.3152	0.83
Japanese red pine	62.9	5.1	1.2389 ln(x) - 0.2867	0.96
radiata pine	87.2	6.3	1.8010 ln(x) - 1.4956	0.99
Western hemlock	127.9	7.1	1.5701 ln(x) - 1.1896	0.93

건조가 잘 되었다. 따라서 M/W 건조의 성공여부는 투과율에 달려있다는 것이 증명되었다.

#### 3.5 수종별 M/W 건조속도

모든 수종의 건조속도 변화는 일정한 패턴을 보였다. 건조 초기 가열기간에는 건조속도가 점차 상승하다가 최고점에 도달한 후에 완만하게 직선적으로 감소하다가 함수율 13-14% 지점부터 모든 수종이 대수적으로 급격히 감소하고 있다. 이러한 건조속도와 평균함수율의 관계를 가열기간을 제외하고 대수회귀로 표시한 결과 잘 일치하였다. 그림 4에는 활엽수와 침엽수를 대표하여 물푸레나무와 radiata pine의 건조속도 그래프를 상승기간을 제외하고 그래프에 나타냈는데 절대상관계수 R<sup>2</sup>가 각각 0.94와 0.99로 매우 잘 일치하고 있다.

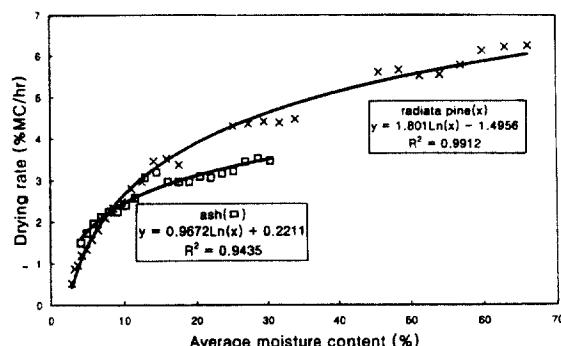


Fig. 4. Typical plots of drying rates vs. average MS's for M/W drying. Logarithmic regressions show good agreements with plots.

강호암

표 4의 최대 건조속도와 대수회귀식의 기울기를 비교하면, 활엽수는 정의 상관을 나타내고 있다. 즉 두 변수 모두 물푸레나무가 가장 크고, 오리나무, 아ка시나무 순이다. 이 순서는 표 2의 비투과율의 순서와 매우 잘 일치하고 있다. 그러나 침엽수의 경우 최대 건조속도는 Western hemlock이 제일 빠르고, radiata pine, 소나무 순이나 대수회귀식의 기울기는 radiata pine, W. hemlock, 소나무 순이다. 이러한 불일치는 W. hemlock 때문에 발생하는 것으로 W. hemlock의 초기함수율은 127.9%로 소나무 62.9%, radiata pine 87.2% 보다 월등히 높기 때문인 것으로 추측된다. 침엽수의 비투과율은 radiata pine이 가장 높고, 소나무, W. hemlock 순으로 W. hemlock의 비투과율은 radiata pine의 1/20에 지나지 않았다(표 3).

모든 수종의 최대 건조속도에 대한 대수회귀식의  
기울기의 관계식은 다음 직선회귀로 나타낼 수 있다.

(R<sup>2</sup> = 0.8842)

x : 최대 건조속도 (%MC/hr)

$b_1$  : 대수회귀식의 기울기 (%MC/hr)

따라서 최대 건조속도와 그 때의 평균함수율을 이용하여 대수회귀식의 기울기와 절편을 구할 수 있다. 따라서 평균함수율에 따른 건조속도의 변화를 예측할 수 있을 뿐만 아니라 건조속도를 측정할 수 있다면 현재 함수율을 알 수 있다.

대수회귀식을 다음과 같이 유도하여 함수율-건조 시간 식을 만들었다.

$$\frac{\Delta M}{At} = b_1 \ln(M_1) - b_0 \dots [5]$$

$$\frac{M_2 - M_1}{t_2 - t_1} = b_1 \ln(M_1) - b_0 \dots [6]$$

$$M_2 = M_1 + (-b_1 \ln(M_1) - b_0)(t_2 - t_1) \quad \dots \dots \dots [7]$$

$M_1, M_2$  : 합수율 (%) ( $M_1 > M_2$ )

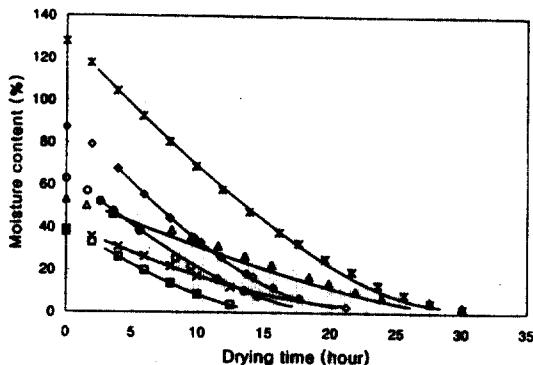
$t_1, t_2$  : 함수율  $M_1, M_2$  때의 전조시간

$b_1$  : 대수회귀식의 기울기

$b_0$  : 대수회귀식의 절편

식[7]을 이용하면 최대값조속도 때의 함수을부터

전전까지 일정시간 경과 후의 함수율을 예측할 수 있다. 그럼 5에 나타난 바와 같이 모든 수종의 함수율-전조시간 식이 실제데이터와 잘 일치하고 있다. 따라서 이 함수율-전조시간 식을 이용하면 M/W전조 중 함수율 변화를 예측하여 전조종료시점을 정확히 찾아낼 수 있다. 그러나 본 함수율-전조시간 식은 전조초기 가열기간을 예측할 수 없는 단점을 가지고 있어 이에 대한 보완이 필요하다.



**Fig. 5.** Regression curves showing good agreements with the plots of MC vs. time for six species. The early stages of drying were not well fitted by the regression models. Symbols represent ash(□), alder(x), black locust(△), Japanese red pine(○), radiata pine(◇) and Western hemlock(\*).

### 3.6 비투과율과 건조속도

너무 낮은 비투과율을 보이는 W. hemlock을 제외하면 최대 전조속도와 대수회귀식의 기울기 모두 비투과율과 매우 높은 직선상관 관계를 보이고 있다. 이들의 직선회귀식은 다음과 같다.

$$U_{\max} = 0.1415 \ K - 0.2129 \quad \dots \dots \dots [5]$$

(R<sup>2</sup> = 0.9179)

$$b_1 = 0.5353 \ K - 0.2459 \dots [6]$$

(R<sup>2</sup> = 0.9011)

$K$  : 비투과율 (darcy)

$U_{\max}$  : 최대 전조속도 (%MC/hr)

$b_1$  : 대수회귀식의 기울기 (%MC/hr)

## 침·활엽수재의 Microwave 건조속도 예측

따라서 비투과율을 측정하므로 건조속도를 예측할 수 있다.

### 3.7 건조결합

본 연구에서는 M/W건조속도 측정만을 목표하였기 때문에 건조결합을 자세히 조사하지 않았다. 다만 가능한 한 건조결합을 줄이기 위해 M/W오븐의 출력을 70W로 매우 낮게 설정하여 건조하였다. M/W 건조 시 건조결합을 줄이기 위해서는 가열과 냉각을 적절히 조화시켜 목재내부의 온도가 너무 상승하지 않도록 실시하여야 하나 본 실험에서는 냉각기간을 두지 않고 연속적으로 건조하였다. 함수율 10%이하로 건조하여 육안으로 관찰한 결과 침엽수는 전혀 결함이 없었나 활엽수 원목은 모두 큰 활열이 발생하였다. 따라서 활엽수재를 M/W건조할 때는 깊은 주의가 요구된다.

## 4. 결 론

M/W오븐과 간이투과율 측정장치를 이용하여 활엽수 3수종 (물푸레나무, 오리나무, 아까시나무)과 침엽수 3수종 (소나무, radiata pine, Western hemlock)의 건조속도와 비투과율을 측정하였다. 건조속도와 평균함수율의 상관관계를 조사하여 회귀식을 만들고 이 회귀식을 이용하여 M/W 건조 중 목재의 함수율을 예측할 수 있는 함수율-건조속도 식을 유도하였다. 비투과율과 최대건조속도의 관계를 조사하였으며 적외선 열화상 처리장치를 이용하여 M/W건조 중 목재내부의 열 분포를 조사하였다.

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. M/W건조와 오븐건조의 수축률은 유의 차가 없음이 밝혀졌다.
2. 수종 내 비투과율은 수 부위에서 제일 낮았다가 점차 증가하여 심재와 변재의 천이 영역에서 제일 높았거나, 다시 수피 쪽으로 갈수록 낮아지는 경향을 모든 수종에서 보였다.
3. radiata pine과 W. hemlock의 적외선 열화상을 비교하여 투과율이 높을수록 열확산이 잘 일어남을 확인할 수 있었다.
4. 건조속도와 평균함수율의 관계는 대수회귀식과

잘 일치하였다.

5. 건조속도에 비해 비투과율이 너무 낮은 W. hemlock을 제외하면 최대 건조속도와 대수회귀식의 기울기 모두 비투과율과 매우 높은 직선 상관관계를 보였다.

6. 본 연구에서 유도한 함수율-건조속도 식은 M/W건조 중 목재의 함수율 변화를 예측하여 건조종료시점을 정확히 찾는 데 유용하게 사용될 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. 강호양. 1995a. Golf Club Head용 감나무재의 Microwave 건조(I) - 30mm 판재의 건조경과와 온도변화. 목재공학 23(1):35-41
2. 강호양. 1995b. Golf Club Head용 감나무재의 Microwave 건조(II) - 감나무 블럭의 건조경과와 온도변화. 목재공학 23(3):28-32
3. 허종윤, 강호양. 1997. Pressure Bomb법을 이용한 섬유방향 액체투과성 측정. 목재공학 25(3): 66-74
4. Antti, A.L. 1992. Microwave drying of hardwood: simultaneous measurements of pressure, temperature, and weight reduction. Forest Products Journal 42(6):49-54
5. Antti, A.L. 1995. Microwave drying of pine and spruce. Holz als Roh- und Werkstoff 53:333-338
6. 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
7. 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.
8. Petty, J.A. 1970. Permeability and structure of the wood of Sitka spruce. Proc. Roy. Soc. Lond. B 175:149-166
9. Resch, H. 1967. Drying of incense cedar pencil slats by microwave power. J. Microwave Power 2(2):45-49.
10. Resch, Helmuth. 1968. Microwave for the drying

### 강 호 양

- of wood products. Holz als Roh- und Werkstoff 26(9):317-324
11. 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
12. 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