

# 마이크로웨이브 오븐을 이용한 급속 함수율 측정법에 관한 연구\*<sup>1</sup>

이 형 우\*<sup>2</sup> · 김 경 용\*<sup>2</sup>

## Rapid Moisture Content Determination Technique Using Microwave Oven\*<sup>1</sup>

Hyoung-Woo Lee\*<sup>2</sup> · Kyung-Yong Kim\*<sup>2</sup>

### 요 약

함수율은 목재의 효율적인 가공을 위한 기본적인 정보 중에서 가장 중요한 것의 하나이다. 그러나 기존의 열풍식 전건법으로는 수 시간에서 수 일이 소요될 정도로 매우 긴 시간이 소요되므로 산업현장에서 적용하기에는 불편하다. 본 연구에서는 가정용 마이크로웨이브 오븐을 응용하여 수 분~수십 분내에 목재 시편의 함수율을 전건법에 의해 측정할 수 있는 기술을 개발하고자 하였다. 국산 3수종에 대하여 마이크로웨이브-전건실험을 수행한 결과 일반 열풍식 전건법에 비하여 전건시간을 1/7~1/10 수준으로 크게 줄일 수 있었고 일반 열풍식 전건법과 비교하여 전건상태에서 0.1~0.2 g 정도의 편차만 나타내어 함수율 및 전건무게를 신속하고 정확하게 얻을 수 있도록 해주므로써 효율적인 목재건조를 수행하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

### ABSTRACT

Conventional hot-air oven-drying method takes at least four hours to determine the moisture content of wood sample and this method is not always acceptable to wood industry. In this study samples of six different specifications from *Paulownia coreana*, *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima* were dried in domestic microwave oven to their oven dry weights to investigate the possibility of rapid moisture content determination technique using microwave-oven drying method. Continuous heating time, cooling time and intermittent heating time were determined by each species and sample specifications. Temperatures of

\* 1 접수 2001년 4월 12일, 채택 2001년 6월 11일

\* 2 전남대학교 농과대학 농업과학기술연구소: Inst. of Ag. Sci. and Tech., College of Agr., Chonnam Nat'l Univ., Gwangju 500-757, Korea.

surface and center of samples were also measured during drying. Oven-drying times were reduced to 1/7~1/10 of conventional hot-air oven-drying method. Therefore microwave heating and drying techniques appear attractive for wood industry as a rapid moisture content determination method.

**Keywords:** moisture content, microwave, microwave-oven, oven-drying method, *Paulownia coreana*, *Pinus densiflora*, *Quercus acutissima*

## 1. 서 론

목재의 효율적인 가공을 위하여 필수적인 선행정보로는 수종, 비중과 함께 함수율을 들 수 있다. 불확실한 함수율 관련 정보는 목재의 제재 이후 이어질 가공정상의 문제점을 야기하므로 정확하고 신속한 함수율의 측정은 효율적인 목재 가공공정 실현에 필수적이라 하겠다. 특히, 목재건조공정에서는 건조개시전 목재의 함수율 파악이 매우 중요하며, 특히 함수율을 기준하여 건조스케줄을 적용한다면 초기함수율의 측정은 필수 불가결한 조건이 된다.

그러나 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 전건법(oven-drying method)은 다른 어떠한 방법에 비해서 가장 정확하지만 시편의 전건을 위하여 수 시간에 수 일이 소요될 정도로 많은 시간이 소요되어 실제 산업현장에서는 적용에 어려움이 따른다. 따라서 대부분의 건조공정에서는 정확한 함수율 파악없이 건조공정이 수행되고 있는 실정이다. 이는 결국 부적절한 건조조건 적용에 따른 목재 손상에 의한 피해, 또는 건조지연에 따른 시간과 에너지의 소모 등 매우 불합리한 피해를 수반하게 된다. 한편, 전기저항식이나 유전율식 함수율계는 함수율 측정범위에 제약이 있을 뿐 아니라 수종과 두께에 따른 보정이 요구되므로 완벽한 해결책이라 할 수는 없다.

이와 같은 요구에 따라 Norum 등(1980)은 가정용 마이크로웨이브 오븐을 응용하여 목질연료(fuel wood)의 함수율을 빠른 시간 내에 측정하는데 성공한 바 있으며, Harris(1982) 역시 같은 방법으로 톱밥이나 수피 및 목재 칩의 함수율을 신속히 측정하는 방법을 제시하기도 하였다. 최근에는 Johnson 등(NA)이 이 방법의 적용 범위를 넓혀 출력 600 W급의 가정용 마이크로웨이브 오븐을 이용, 제재목으로부터 채취한 함

수율 시편에 대한 마이크로웨이브 전건법 적용을 시도한 바 약간의 그을음이나 탄화가 발생하기도 하였으나 비교적 만족할 만한 결과를 보고하기도 하였다.

본 연구에서는 국산 소나무와 상수리나무 및 오동나무를 대상으로 가정용 마이크로웨이브 오븐을 이용, 두께 25~50 mm 범위에서 함수율 시편의 전건법을 고속으로 수행할 수 있는 방법을 모색코자 하였다. 본 연구에 의해 개발된 방법은 목재 산업현장에서 손쉽게 응용이 가능하도록 하였으며, 본 방법의 적용을 통하여 국내 목재산업의 보다 효율적인 가공공정 수행이 이루어질 것으로 기대된다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 공시재료

공시수종으로는 국산 오동나무(*Paulownia coreana*), 소나무(*Pinus densiflora*) 및 상수리나무(*Quercus acutissima*)를 선택하여 비중의 차이를 두었으며, 각 수종별로 6가지 규격(Fig. 1과 Table 1 참조)의 시편을 각 5개씩 생재상태로 제작하였다.

### 2.2. 마이크로웨이브 오븐

시편 전건을 위해 사용한 마이크로웨이브 오븐은 가정용으로 시판되는 국내 D社 제품으로 최대 출력은 680 W급이었으며, 작동시간 수동 조절형을 구입하였다. 오븐 내 바닥에 장착된 접시(tray)는 작동중 회전하므로써 마이크로파를 건조중인 재료에 골고루 분산시키는 역할을 하였으며, 시편과 접시 사이에는 마이크로파에 의한 영향을 받지 않는 플라스틱을 두

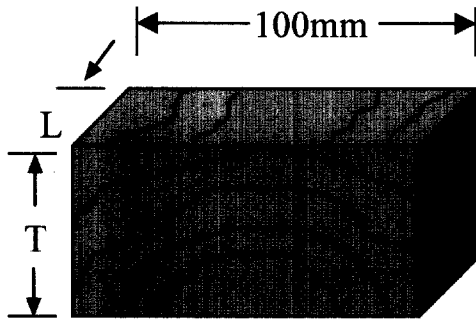


Fig. 1. Preparation of testing sample.

Table 1. Specifications of six-different samples

Sample No.	L (mm)	T (mm)	Volume ( $\times 10^3 \text{m}^3$ )
1-a	10	25	250
1-b	10	50	500
2-a	25	25	625
2-b	25	50	1250
5-a	50	25	1250
5-b	25	50	2500

어 서로 밀착되지 않도록 하였다.

### 2.3. 초기 연속가열시간 결정

마이크로웨이브를 목재에 조사하게 되면 건조초기 고함수율 상태에서는 조사되는 에너지의 대부분이 목재내 포함되어 있는 수분의 가열과 증발에 소요되므로 재온이 100℃ 이상으로 가열되기 어렵지만 함수율이 감소되면 급격히 온도가 상승하게 되고 특히 마이크로파가 집중되는 곳이 발생하여 국부적인 탄화가 일어나게 된다. Antti(1995)는 목재내부의 온도가 110℃를 초과하고, 내부 증기압 역시 20 kPa을 넘지 않도록 해야만 건조중 목재의 손상을 최소화할 수 있다고 보고한 바 있다.

따라서 본 연구에서는 목재의 섬유포화점으로 여겨지는 함수율 20~30%를 기준으로 자유수가 존재할 때까지는 연속적으로 가열하고 그 이후부터는 간헐적인 건조가 이루어지도록 연속가열시간을 설정하였다. 일반적으로 물 1 kg의 증발에는 마이크로웨이브 출력

1 kW(Antti, 1999)가 소요되는 것으로 알려져 있으므로 다음과 같은 방법으로 초기 연속가열 시간을 결정하였다. 우선 시편의 체적을 측정, 조사하고 시편의 생재상태에서의 중량을 측정한 후 생재 체적에 대한 전건무게의 비( $\text{kg-ovendry weight/m}^3\text{-green volume}$ )를 나타내는 수종별 기본비중(basic specific gravity)을 문헌(Forest Products Laboratory, 1999)으로부터 찾아 식 (1)에 대입하면 정확하지는 않지만 대략적인 초기함수율을 추정할 수 있다. 이 식에서  $D \times 1000$ 은 생재 1  $\text{m}^3$ 당 전건무게를 의미하게 된다.

$$M_i = \frac{W - V \times (D \times 1000)}{V \times (D \times 1000)} \quad (1)$$

$M_i$  : estimated initial moisture content (fractional)

$W$  : weight of sample before drying (kg)

$V$  : volume of sample before drying ( $\text{m}^3$ )

$D$  : basic specific gravity

추정된 초기함수율을 이용하여 섬유포화점까지 연속가열을 통해 제거될 수분의 무게를 식 (2)와 같이 계산한다.

$$W_r = (M_i - M_f) \times V \times (D \times 1000) \quad (2)$$

$W_r$  : weight of moisture removed by continuous microwave heating (kg)

$M_f$  : fiber saturation point (fractional, 0.2~0.3)

제거되어야 할 수분의 무게를 시간당 마이크로웨이브 오븐의 출력에 그 효율을 감안한 값으로 나누게 되면 연속가열 시간의 기준을 얻을 수 있다.

$$T_i = \frac{W_r}{P \times \eta} \quad (3)$$

$T_i$  : continuous microwave heating time (hr)

$P$  : output of magnetron or microwave oven (kW)

$\eta$  : energy efficiency of magnetron or microwave oven (fractional, 0.7~0.8)

## 2.4. 건조중 중량 및 온도측정

전술한 바와 같이 섬유포화점이하에서는 마이크로 웨이브의 집중에 따른 그을음이나 탄화의 위험이 있으므로 본 연구에서는 예비실험에서 건조중 정해진 시간에 시편을 꺼내어 중량을 측정 후 즉시 건조중 온도를 측정하기 위하여 Fig. 2와 같이 적외선 온도센서로 목재표면의 온도를, 그리고 시편에 미리 천공해 둔 구멍에 열전대를 삽입하여 목재 내부 온도를 측정하므로써 간헐 가열시간 간격을 결정하고자 하였다. 이때 목재 표면과 내부의 온도가 모두 90℃ 이하로 냉각되었을 때 다시 마이크로웨이브 오븐에 시편을 투입하여 시편의 무게에 거의 변화가 없을 때까지 간헐 가열 및 냉각과정을 계속하였다.

한편, 마이크로웨이브로 급속 건조된 시편을 다시 103℃ 온도를 유지하는 열풍식 오븐에 투입하여 전건법을 실시하므로써 마이크로웨이브 건조에 의해 얻어진 함수율을 비교하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 초기 연속가열 시간과 간헐건조

수종과 시편 규격별 초기 연속가열 시간을 계산하여 예비실험을 수행한 결과 오동나무를 제외한 소나무와 상수리나무 시편 모두 안전한 건조가 가능하였다. 따라서 연속가열시간을 연장, 건조시간을 단축하기 위하여 수차례의 실험을 수행한 결과 Table 2와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

일반적으로 초기함수율이 높을수록, 그리고 시편 규격이 클수록 상대적으로 보다 많은 양의 수분 특히, 자유수가 포함되어 있는 것이므로 연속가열 시간을 연장하여도 비정상적인 온도상승은 피할 수 있었다. 그러나 오동나무의 경우에는 동일한 방법으로 계산된 연속가열 시간을 적용한 결과 60% 이상의 높은 함수율에서도 탄화가 발생하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 현상은 오동나무의 매우 높은 초기함수율(Table 3 참조)과 함께 높은 투과성으로 인한 목재 표면의 급

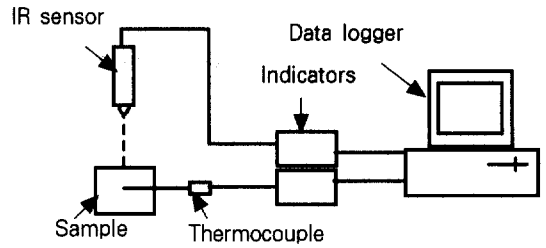


Fig. 2. Schematic diagram of wood temperature measuring system.

Table 2. Continuous heating time in initial drying stage and intermittent heating time for oven-drying of samples of *Paulownia coreana*, *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima* (unit: sec)

Sample No.	<i>Paulownia coreana</i>		<i>Pinus densiflora</i>		<i>Quercus acutissima</i>	
	CHT* <sup>1)</sup>	IHT* <sup>2)</sup>	CHT* <sup>1)</sup>	IHT* <sup>2)</sup>	CHT* <sup>1)</sup>	IHT* <sup>2)</sup>
1-a	130	30	100	30	90	30
1-b	180	30	240	30	180	30
2-a	180	30	180	30	210	30
2-b	180	20	420	30	390	30
5-a	300	20	420	30	400	30
5-b	440	20	720	30	720	30

\*<sup>1)</sup> continuous heating time in the early drying stage.

\*<sup>2)</sup> Intermittent heating time.

속한 건조로 마이크로파가 집중되는 부분이 과열되어 발생하는 것으로 사료된다. 따라서 수종과 동시에 초기함수율 수준 및 투과성도 고려하여 연속가열 시간을 결정해야 할 것으로 판단된다.

연속가열 이후 간헐건조 단계에서는 30초 가열 후 목재 표면과 내부온도가 90℃ 이하가 될 때까지 냉각 후 다시 건조하는 과정을 시편의 중량에 거의 변화가 없을 때까지 계속하였다. 그러나 오동나무 중 2-b, 5-a 및 5-b 등 규격이 큰 시편의 경우에는 예비실험 결과 30초간의 가열로도 탄화가 시작되는 경향이 있어 20초간 가열로 그 과정을 변경하여 실험하였다.

**Table 3.** Initial moisture contents and initial microwave drying rates of samples of *Paulownia coreana*, *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima*

Sample No.	<i>Paulownia coreana</i>		<i>Pinus densiflora</i>		<i>Quercus acutissima</i>	
	IMC (%)	Drying rate (g/sec)	IMC (%)	Drying rate (g/sec)	IMC (%)	Drying rate (g/sec)
1-a	262	0.06	112	0.09	78	0.11
1-b	260	0.09	144	0.11	79	0.12
2-a	273	0.14	110	0.13	75	0.09
2-b	244	0.13	144	0.15	77	0.11
5-a	240	0.13	129	0.14	78	0.13
5-b	245	0.11	148	0.15	75	0.13

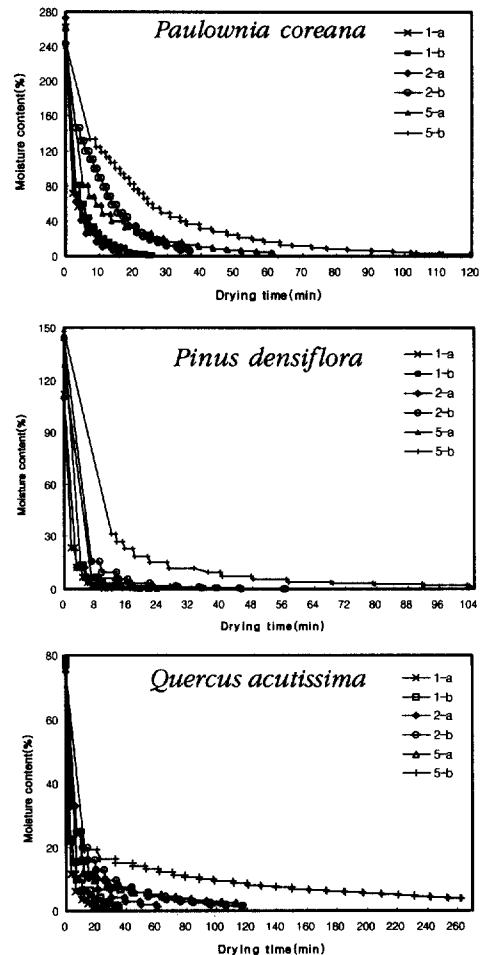
### 3.2. 건조곡선

Fig. 3은 각 수종별 시편의 형상에 따른 건조곡선을 보여주고 있다. 그림에서 곡선이 계단식으로 나타난 것은 건조초기 연속가열기간 이후 목재 온도의 상승을 막기 위해 간헐건조 하였기 때문에 건조초기 연속가열기간 동안에는 매우 급격히 수분이 증발되었으며, 이후 간헐건조 단계로 들어서면 함수율이 낮아질수록 건조속도가 낮아짐을 알 수 있었다.

Table 3은 수종 및 시편 형상별 초기함수율과 건조초기 연속가열기간의 건조속도로 동일 수종에서는 초기함수율이 높을수록, 그리고 시편의 규격이 클수록 초기 건조속도가 높은 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 목재가 포함하고 있는 수분의 양이 많을수록 magnetron으로부터 발생된 마이크로파의 이용효율이 높아져 거의 대부분의 에너지가 수분의 가열과 증발에 소모되기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 건조초기의 급격한 건조로 대부분의 시편에서는 찌그러짐 등의 변형이 발생하였으나 본 연구의 목적은 단지 함수율 측정에 있으므로 문제되지 않았다.

### 3.3. 건조중 목재온도

건조초기 연속가열 후 간헐적인 가열을 통하여 얻어진 건조중 목재의 표면과 내부 온도 변화는 Figs. 4~6과 같았다. 일반적으로 두께가 10 mm 이하인 소시편에서는 표면과 내부온도의 차이가 심하지 않았으나 두께 20 mm 이상의 시편에서는 그 온도 차이가 현



**Fig. 3.** Microwave drying time curves of *Paulownia coreana*, *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima*.

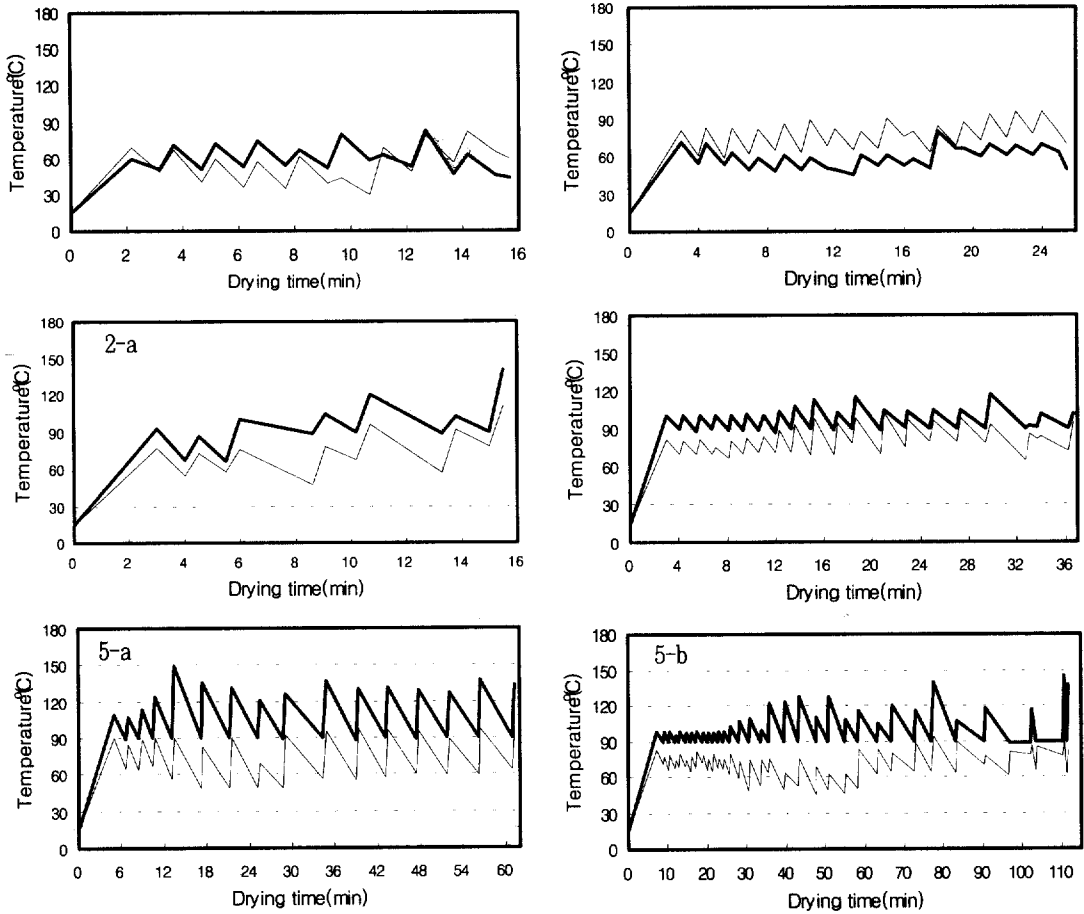


Fig. 4. Surface and core temperatures of *Paulownia coreana* samples during microwave heating. (Legend: — Center - - - Surface)

격히 발생되었으며, 시편의 규격이 커질수록 온도차가 증가되는 경향을 보였다. 이와 같은 현상은 마이크로웨이브의 특성에 기인한 것으로 규격이 작은 경우에는 별다른 차이가 없지만 규격이 큰 경우에는 보다 많은 수분이 분포되어 있는 목재 내부의 온도가 이미 건조된 표면에 비해 높게 상승된 것으로 판단된다.

수중에 따라서는 소나무의 경우 최고 온도 180°C를 기록하였으나 오동나무에서는 일부 시편(오동 2-a)을 제외하고는 150°C를 초과하지 않았다. 참나무의 경우에도 대개 160°C 부근에서 최고온도를 기록하였다. 그리고 모든 시편은 아무런 그을음이나 탄화의 흔적 없이 거의 전건상태까지 건조가 가능하였다.

### 3.4. 건조시간

Table 4에서 보는 바와 같이 시편의 체적이 커질수록 더 많은 건조시간이 소요되었다. 이것은 마이크로웨이브의 출력이 고정되어 있는 상황에서 체적이 커짐에 따라 가열 및 제거해야 할 수분과 목질의 양이 증대되기 때문인 것으로 해석된다. 그러나 체적이 같은 2-b와 5-a 시편의 경우에는 마구리면(end)의 면적이 2배인 5-a 시편의 건조시간이 보다 단축된 것을 알 수 있다. 이는 마이크로웨이브 건조에서 주된 수분이 동 방향이 섬유방향임을 입증하는 것으로 마이크로웨이브에 의한 목재 내부의 신속한 가열로 목재내부의

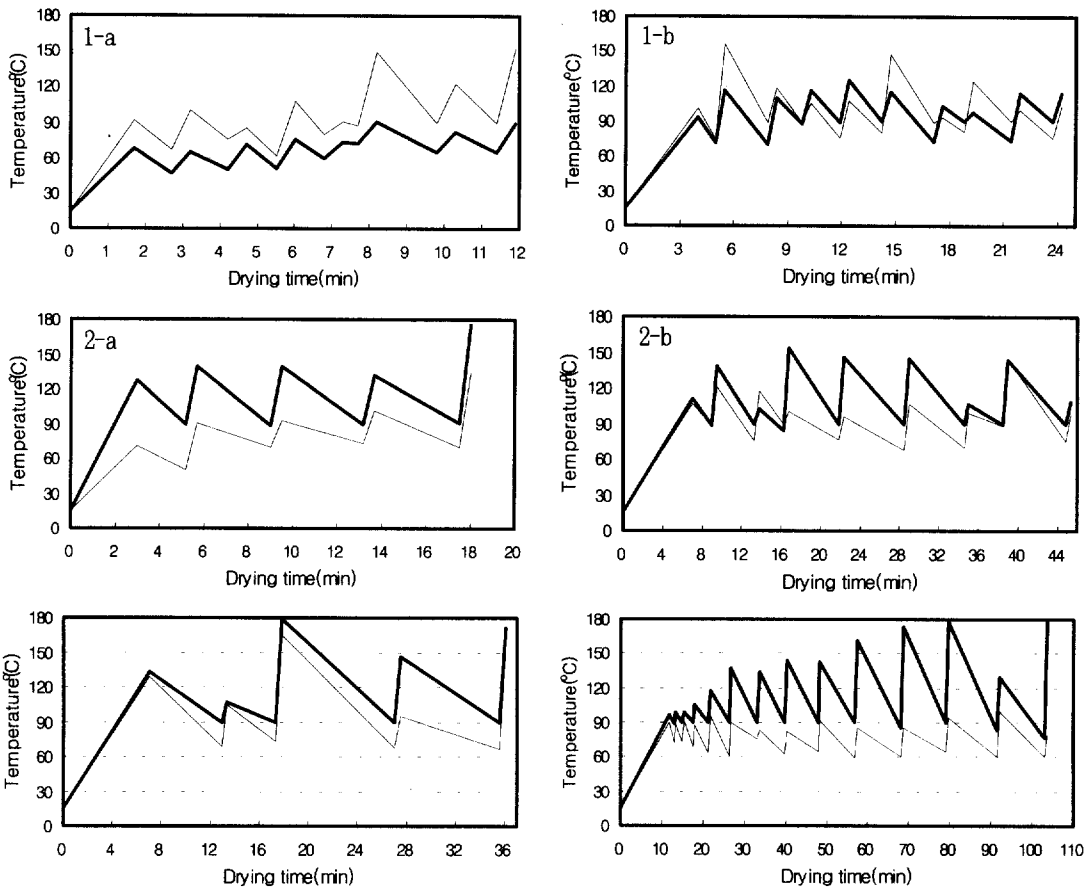


Fig. 5. Surface and core temperatures of *Pinus densiflora* samples during microwave heating. (Legend: — Center - - - Surface)

증기압이 급격히 증가되어 목재내 수분을 이동이 쉬운 섬유방향을 주경로로 하여 밀어내기 때문인 것으로 사료된다(Antti, 1995).

### 3.5. 열풍식 전건법과의 비교

마이크로웨이브 오븐을 이용한 전건법의 효과를 검증하기 위하여 1-a형(초기함수율 117%)과 1-b형(초기함수율 150%)의 소나무 시편을 각각 열풍식 오븐을 이용, 103°C에서 전건한 결과 각각 150분(9,000초)과 180분(10,800초)이 소요되었다. 이 결과를 동일한 시편에 대한 마이크로웨이브 전건법의 결과(830

초와 1,452초)와 비교해 보면 약 10.8배와 7.4배에 이르며, 따라서 본 방법의 획기적인 시간절감 효과를 알 수 있었다.

한편, 마이크로웨이브 전건법에 의해 거의 전건된 시편들을 다시 열풍식 오븐에 투입하여 103°C에서 전건한 결과 모든 시편에서 0.1~0.2 g 정도의 편차만을 확인 할 수 있어 본 방법이 비교적 정확하며, 특히 신속을 요하는 산업현장에서는 매우 요긴하게 사용될 수 있는 방법으로 판단되었다. 또한, 산업현장에서 목재의 함수율을 측정할 경우에는 섬유방향 길이(L)를 10 mm 이하로 하여 시편을 채취해도 무방하므로 어떠한 수종이라도 약 2,000초(약 33분) 이내에 마이크

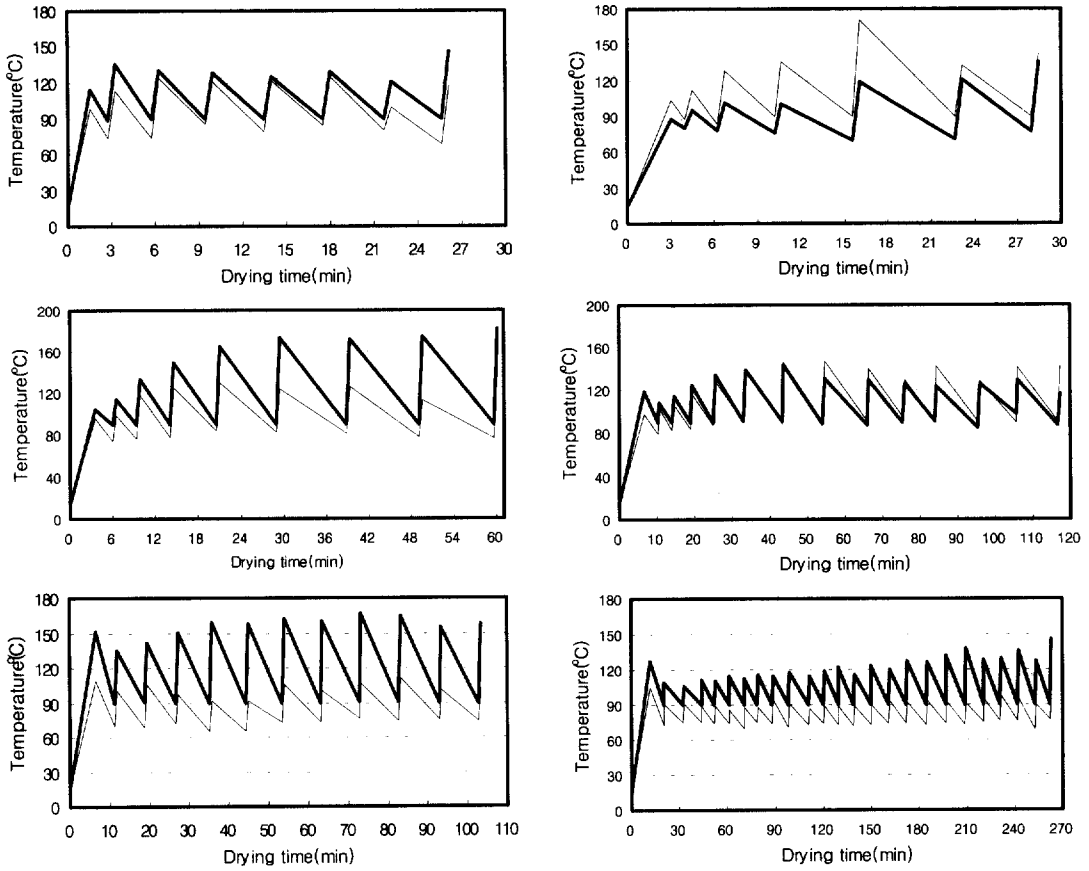


Fig. 6. Surface and core temperatures of *Quercus acutissima* samples during microwave heating. (Legend: \_\_\_\_\_ Center \_\_\_\_\_ Surface)

Table 4. Heating time, cooling time and total drying time for microwave oven-drying of samples of *Paulownia coreana*, *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima* (unit: sec)

Sample No.	<i>Paulownia coreana</i>			<i>Pinus densiflora</i>			<i>Quercus acutissima</i>		
	HT <sup>(1)</sup>	CT <sup>(2)</sup>	TT <sup>(3)</sup>	HT <sup>(1)</sup>	CT <sup>(2)</sup>	TT <sup>(3)</sup>	HT <sup>(1)</sup>	CT <sup>(2)</sup>	TT <sup>(3)</sup>
1-a	430	660	1,090	310	520	830	300	1,266	1,566
1-b	660	960	1,620	510	942	1,452	390	1,670	2,060
2-a	360	570	930	300	782	1,082	450	3,159	3,609
2-b	560	1,660	2,220	690	2,680	3,370	780	6,253	7,033
5-a	600	3,076	3,676	540	2,117	2,657	760	6,021	6,781
5-b	1,140	6,068	7,208	1,110	5,765	6,875	1,440	13,714	15,154

<sup>(1)</sup> heating time, <sup>(2)</sup> cooling time, <sup>(3)</sup> total drying time.

로웨이브-전건법을 통하여 비교적 정확한 함수율 측정이 가능할 것으로 기대된다.



**Table 5.** Estimated oven-dry weights per 1 m<sup>3</sup> based on green volume of green *Paulownia coreana*, *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima* by microwave oven-drying method  
(unit: kg/m<sup>3</sup>)

Sample No.	<i>Paulownia coreana</i>	<i>Pinus densiflora</i>	<i>Quercus acutissima</i>
1-a	167.6	386.4	669.6
1-b	190.4	408.2	763.6
2-a	187.5	378.2	718.4
2-b	192.0	383.2	683.7
5-a	195.4	385.2	693.1
5-b	178.7	376.5	678.3
Average	185.3	386.3	701.1

#### 4. 결 론

본 연구를 통하여 가정용 마이크로웨이브 오븐의 전건법에 대한 응용 가능성을 충분히 확인할 수 있었다. 그리고 Table 4에서 보는 바와 같이 냉각시간이 전체 건조시간중 60~90%를 차지하고 있다는 사실은 냉각시간 단축을 통하여 보다 신속하게 전건시킬 수 있는 가능성을 제시해주고 있다. 즉, 가열중 목재의 온도를 연속적으로 파악하여 자동적으로 magnetron의 on-off를 자동 제어할 수 있다면 불필요한 냉각으로 인한 시간지연을 최대한 단축할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 현재까지 마이크로웨이브가 조사되는 공간 안에서 재료의 온도를 측정할 수 있는 계측장비는 광섬유온도센서 정도로 그 가격이 매우 고가이므로 오히려 산업현장에서 사용하기에는 부적합할 수도 있다.

따라서 산업현장에서의 사용을 권장하기 위해서는 보다 다양한 수종에 대한 예비실험을 거쳐 기초자료를 제시해주므로써 매우 저렴한 가격의 가정용 마이크로웨이브 오븐을 활용할 수 있도록 해주어야 할 것

으로 사료된다. 한편, 고온으로 인한 휘발성 물질의 휘발에 의한 과도한 함수율 제시가 될 가능성도 있으나 본 연구는 산업현장에서의 응용을 목적으로 하였으므로 약간의 오차는 허용 가능할 것으로 사료된다.

국산 오동나무, 소나무 및 상수리나무에 대한 가정용 마이크로웨이브 오븐을 응용한 전건법 개발에 관한 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같았다.

1. 초기 연속가열 시간은 함수율이 높고 시편 체적이 클수록 연장되었다.
2. 시편의 온도는 가열 시작 후 급속히 상승하였으며, 최고온도는 160~180℃ 정도였다.
3. 소요된 전체 건조시간 중 냉각시간이 차지하는 비율은 60~90%로 매우 높았다.
4. 열풍식 전건법과 비교하여 1/7~1/10 정도의 시간으로도 전건이 가능하여 산업현장에 적용하기에 적합할 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

1. Antti, A. L. 1995. Microwave drying of pine and spruce. Holz als Roh- und Werkstoff 53: 333-338.
2. Antti, A. L. 1999. Heating and drying wood using microwave power. Doctoral thesis, Lulea University of Technology, Sweden.
3. Forest Products Laboratory. 1999. Wood handbook. Forest Products Society 4-4~4-23.
4. Harris, R. A. 1982. Rapid determination of fuel wood moisture content using a microwave oven for drying. Forest Products Journal 32(10): 56-58.
5. Johnson, E. L. NA. Rapid drying of wood blocks using a microwave technique. Forintek Canada Corp., Vancouver, B. C.
6. Norum, R. A. and W. C. Fischer. 1980. Determining the moisture content of some dead forest fuels using a microwave oven. USDA Forest Service, Res. Note INT-277.