

마이크로파 가열 단판의 함수율 변화 및 열분포 특성¹

신기훈² · 서진석³ · 박철우⁴ · 임남기^{2,†}

Moisture Content Change and Heat Distribution Characteristics of Veneer Heated by Microwave¹

Ki-Hoon Shin² · Jin-Suk Suh³ · Cheul-Woo Park⁴ · Nam-Gi Lim^{2,†}

요약

잣나무, 리기다소나무, 낙엽송, 백합나무 등 수종과 두께가 다른 평단판 및 단판롤(롤 형태의 단판)을 고정형 마이크로파로 가열하여 가열 전후 형상, 표면 함수율, 함수중량 변화와 표면 열분포를 분석한 결과는 다음과 같다. 평단판의 경우 마이크로파 가열에 따른 품질상태는 비교적 양호한 것으로 나타났지만, 약간의 뒤틀림이 발생하였으며, 이는 비균일 건조응력에 따른 변형과 고정형 마이크로파 장비의 특성상 단판 형태로 가열 시 국부적인 조사가 이루어진 영향이 컸기 때문으로 판단된다. 단판롤 형태의 마이크로파 가열 특성은 가열 후 품질 모두 양호하였으며, 특히 평단판에서 나타난 뒤틀림 등의 결함은 없는 것으로 나타났다. 또한 열분포 및 확산 등이 매우 안정적으로 이루어진 것으로 판단되며, 이러한 열분포는 표면 함수율 분포 및 함수중량 감소에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 단판롤 형태는 수종 및 두께에 따라 출력과 조사시간 등 충분한 시험이 실시된다면, 고정형 장비에서도 충분한 건조효율을 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

ABSTRACT

The analysis of shape before and after heating, Surface moisture content, Moisture weight change and surface heat distribution by fixed type microwave heating in forms of flat veneer and veneer roll of Korean pine, pitch pine, larch and yellow poplar was conducted. The results were as follows: In case of flat veneer, the quality after microwave heating was comparatively good, but it was somewhat warped. These phenomena may be due to transformation by nonuniform drying stress and stronger effect of local irradiation on the veneers when heating veneer owing to the characteristics of fixed type microwave equipment. In case of the features of roll-shaped veneer heated by microwave, the quality

¹ Date Received January 3, 2014, Date Accepted March 31, 2014

² 동명대학교 건축·디자인대학 건축공학과. Department of Architectural Engineering, College of Architecture & Design, Tongmyong University, Busan 608-711, Korea

³ 국립산림과학원 임산공학부 목재가공과. Division of Wood Processing, Department of Forest Products, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

⁴ 이즈원산업 기업부설 연구소. Department of Research and Development, ISONE Industry, Busan 612-060, Korea

[†] 교신저자(Corresponding author): 임남기(e-mail: ing@tu.ac.kr)

after heating was comprehensively excellent. Especially there was no warping unlike flat veneer. Heat distribution and diffusion were also very stable for roll-shaped veneer and such heat distribution had much influence on surface moisture content and moisture weight loss. Accordingly, the veneer roll would show sufficient drying efficiency in fixed type microwave equipment through a scrutinized examination on generating power and irradiation time according to species and thickness of veneer.

Keywords : fixed type microwave heating, flat veneer, veneer roll, drying efficiency

1. 서 론

1.1. 연구배경 및 목적

목재를 얇게 절삭한 단판은 목질재료의 기초 소재이기도하며, 특히 합판과 같이 단판을 교차시켜 열압 프레스한 제품에 주로 적용되고 있지만, 다양한 응용 제품으로의 개발과 실적은 부족한 실정이다. 단판의 보다 광범위한 사용을 위해서는 다양한 제품 개발을 위한 노력이 필요할 것으로 사료된다.

이러한 단판제품 개발과 관련하여, 얇게 절삭된 소폭의 단판을 나선형으로 적층하여 원통형 단판적층재를 제조하는 연구가 있으며, 구조재 이외에 공예 재료로서의 적성을 파악하고자 도장처리에 따른 표면 성질을 구명하는 연구가 진행되었다(Hwang *et al.* 2012). 또한, 이 공학목재를 응용한 건축 구조부재, 가로등과 같은 다양한 제품 개발로의 연구가 진행되고 있으며, 이러한 원재료는 국내산 원목의 활발한 사용 및 건조된 단판의 원통형 적층에 따라 원목 건조의 어려움을 동시에 해결할 수 있는 방법으로 기대되고 있다. 하지만, 얇은 단판을 건조하기 위한 방법으로 일반적인 열기건조를 할 경우, 건조시간 증대, 단판의 뒤틀림 및 갈라짐 등 결함이 발생되거나 건조 이후 2차제품 제조시 어려움이 발생하는 등의 문제로 얇은 단판의 무결함급 건조 방법에 대한 선택과 검증이 필요한 실정이다. 한편, 목재의 건조방법 중 마이크로파를 이용한 건조의 경우 목재 가열시 일반적인 열기건조와 반대의 함수분포를 가지는 것이 일반적인 특징이며, 건조 품질이 우수한 제품 제조가 가능한 것으로 선행연구를 통하여 나타나고 있다(Yoon *et al.* 2013; Lim 2011).

따라서 본 연구에서는 잣나무, 리기다소나무, 낙엽송, 백합나무 등 수종과 두께가 다른 단판 및 롤 형태의 목재를 마이크로파 가열·건조 특성을 분석하기 위해 고정형 마이크로파 장비를 이용한 실험 후 제품의 가열 및 건조 효율을 분석하며, 추후 마이크로파 가열 단판의 응용제품 개발과 컨베이어 형태의 가열·건조 시스템 개발에 필요한 기초자료로 활용하고자 한다.

1.2. 마이크로파

마이크로파는 파장이 cm단위로 측정되는 전자파(electromagnetic wave, EMW)의 총칭이며, 센티미터 단위의 파장을 일컫는 총칭이며, 일반적으로 1,000 MHz (파장 : 약 30 cm)에서 30,000 MHz (파장 : 약 1 cm)까지의 전자파로 통칭된다(Murasaki 1999). 가정과 산업에서 사용되는 마이크로파 건조기는 일반적으로 파장 12.2 cm와 에너지 1.02×10.5 eV와 상응하는 주파수 2,450 MHz를 사용한다.

마이크로파를 이용한 가열은 쌍극자 회전현상과 이온 분극현상의 두 가지 효과에 의해 온도가 상승하는 원리를 이용하여 재료를 가열하는 유전가열(dielectric heating) 방식으로서 유전체 내부는 플러스(+) 이온과 마이너스(-) 전자가 쌍을 이루고 있으며, 전체적으로 전계제로의 상태로 되어 있다(Ahn 2000). 이를 전계 내에 놓으면 유전체 곳곳에서 전기적 평형 상태로부터 분극되어 전계 방향이 변하며, 쌍극자는 회전하면서 반전한다. 이때 물을 구성하는 H-O-H 분자의 회전 저항에 의한 마찰 에너지가 소비되고, 소비 에너지는 유전물질 내에서 열로 변하게 된다.

Table 1. The Experiment factors

		Species of veneers used	Width	Thickness	Length
Samples	Softwood	Korean pine	10.6 cm	2.6 mm	veneer : 40 cm, Roll : 20 m
		Pitch pine		2.6 mm,	
		Larch		3.7 mm	
	Hardwood	Yellow poplar			
Microwave	Specification	Frequency (GHz)	2.5		
		Generating power (kW, variable)	1~6		
		Chamber volume (cm)	70 × 70 × 70 (343,000 cm ³)		
	Heating experiment	Output power (kW)	3		
		Heating period (min)	Flat veneer	Less than 20 min	
			Veneer roll	Less than 60 min	
	Target limits after heating	Surface moisture content (%)	Flat veneer	Per sample, 3 point / 40 cm, Average	
Veneer roll			Per sample, 100 point / 20 m, Average		
	Temperature (°C)	Average 80°C ± 10			
Lab temperature and humidity			28°C / 80%, Average		
Analysis	Changes in shape	No split, warping or discoloration before and after heating			
	Changes in surface moisture content	Changes of Surface moisture content before and after heating (Use of surface moisture content-measuring device)			
	Changes in weight	Moisture weight* changes before and after heating			
	Thermal pixel	Surface temperature of samples before and after heating (Use of FLIR Thermal Pixel Camera, Max. 350°C)			

* Moisture weight : 본 연구에서는 목재 섬유이외에 수분만의 중량으로 정의하며, 마이크로파 가열 시 목재 내부 수분이 마찰열로 확산, 증발되어 대기 중으로 사라지는 수분의 양을 목재 전체중량(섬유+수분) 대비 수분이 감소되는 비율로 나타낸 것을 Moisture weight loss rate로 한다.

마이크로파 발생원으로는 마그네트론을 사용하고 있으며, 이는 일종의 진공관(Vacuum tube)으로써 직류전압을 직접 마이크로파 에너지로 변화시키는 장치이다. 일반적으로 마그네트론은 915 MHz용, 2,450 MHz용으로 출력 0.5~25 kW의 제품이 생산되고 있으며, 대출력인 경우 수냉식, 소출력의 경우 공랭식을 사용하여 마그네트론에서 발생하는 열을 제거한다. 마그네트론의 출력은 음극으로 흐르는 전류에 비례하므로 순간적으로 이 전류를 조절하면 출력을 쉽게 조절할 수 있다.

특히, 마이크로파의 경우 수분을 함유한 목재의 가열 및 건조는 열기건조와는 반대로 수분이 내부에

서 가열되어 외부로 확산되는 함수분포를 나타내며, 목재의 온도를 100°C 이상 높일 필요 없이 내부 수분의 분자간 마찰에 의한 에너지 소비만 부담하면 되므로 에너지 소비가 적을 뿐 아니라 가열에 따른 목재 결합발생을 최소화할 수 있다(Murasaki 1999). 또한 급속 가열 및 목재의 온도와 함수상태 등 가열 전후의 특성에 기인된 인위적 결과 도출이 가능하므로 높은 건조 효율성을 나타낼 수 있다.

본 연구에 사용한 마이크로파 발생장치는 2,450 MHz용으로 1~6 kW까지 출력 조절이 가능한 가변형으로써 피가열물에 따라 선택적으로 출력 조절이 가능하므로 저출력 및 고출력에 따라 목재의 부피와

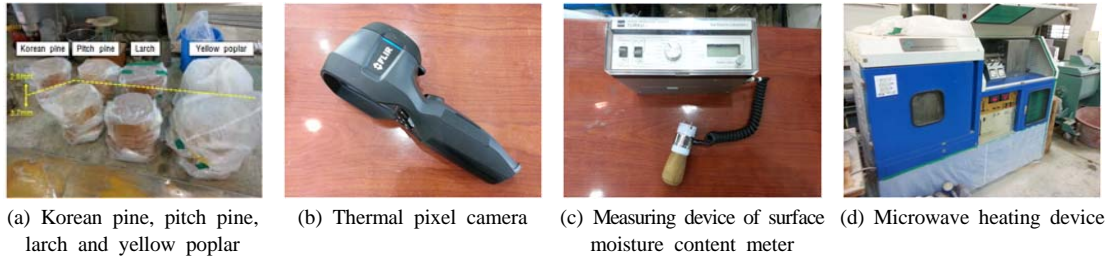


Fig. 1. Experiment materials and equipment.

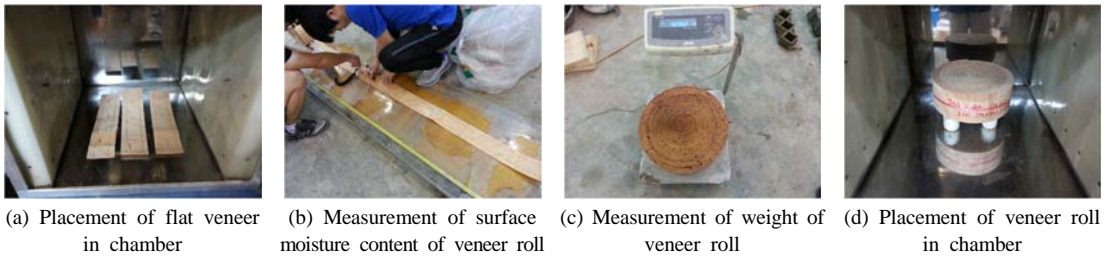


Fig. 2. Two types of veneer for microwave heating.

특성 및 열확산과 함수율 감소 등 마이크로파 출력, 시간 도출이 가능하다.

형상변화, 표면 함수변화, 중량변화, 열분포 변화 등을 분석하였으며, 실험인자는 Table 1과 같다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험인자

마이크로파 가열·건조에 사용한 시험편은 침엽 수종으로는 잣나무, 리기다소나무, 낙엽송이며, 활엽 수종으로는 백합나무 단판을 사용하였다. 시험편의 너비는 10.6 cm로 동일하며, 두께는 2.6 mm와 3.7 mm로 분류되었다. 마이크로파 가열·건조에는 길이 40 cm 평단판과 길이 20 m 단판롤 형식을 사용하였다. 한편, 잣나무 3.7 mm의 경우 시험편 가공 특성상 절삭의 어려움으로 인하여 시험인자에서 제외하였다.

마이크로파 가열장비는 2.5 GHz의 출력 가변형(1~6 kW)으로써 필요한 출력을 선택적으로 조절할 수 있다. 본실험에서의 출력은 예비실험을 통하여 중간 출력인 3 kW를 채택하였으며, 가열시간 및 가열 후 함수량 등의 목표량은 예비실험을 통하여 선정하였다. 마이크로파 가열·건조 전후 분석사항으로는

2.2. 실험재료 및 장비

실험에 사용된 시험편 및 열화상 카메라, 전기저항식 표면 함수율 측정기, 마이크로파 가열 장비는 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 (a)의 경우 왼쪽부터 잣나무, 리기다소나무, 낙엽송, 백합나무 순으로 배치되었으며, (b)의 열화상 카메라는 FLIR사의 I7모델을 사용하였다. (c)의 전기저항식 표면 함수율 측정기는 목재 수종 및 온도차이를 구분하여 측정가능하며, 3 mm 시침이 4개로써 보다 정확한 표면 함수측정이 가능하다. (d)는 국내 HTM사에서 제작된 마이크로파 고정형 장비이며, 480 V형 수냉식으로, AVR(자동전압조정기) 등을 설치하여 안정적인 가동이 가능하다.

2.3. 실험방법

실험은 단판 수종별 평단판과 단판롤 형태로 구분한 후 마이크로파 가열을 실시하였다. 가열 이전 분

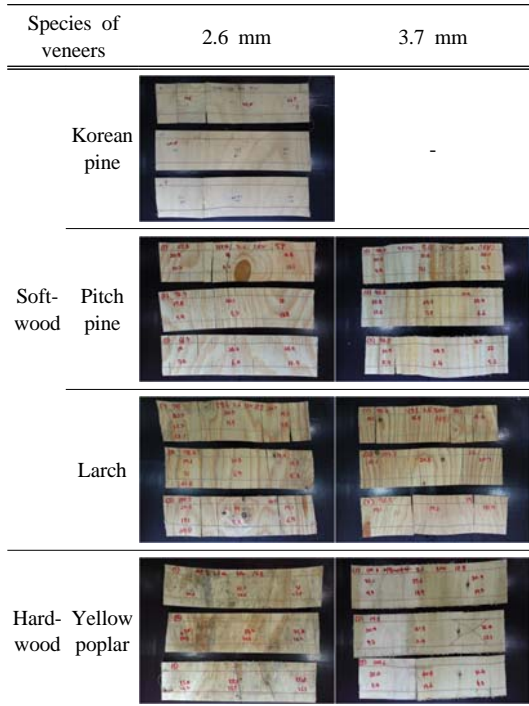


Fig. 3. Appearance of flat veneers after microwave heating.

류된 시험편은 가열 전후 중량 및 표면 함수율을 측정하였으며, 가열 후에는 열화상 카메라로 목표 가열 시간 내에 나타난 열화상을 촬영하였다. 시험편 단판은 수종별 3개씩 1묶음으로 하여 마이크로파 장비 챔버 내부에 배치 후 가열하였으며, 롤은 20 m단위의 1롤을 챔버에 배치 후 가열하였다. 특히, 표면 함수율 측정은 단판의 경우 1개당 3 point를 측정하였으며, 단판롤은 1롤당 100 point를 측정하여 평균값을 사용함으로써 정확도를 높이고자 하였다. 단판 가열 전 측정 형상은 Fig. 2와 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 마이크로파 가열 단판

3.1.1 평단판의 표면 형상 변화

단판의 마이크로파 가열 후 형상 특성은 Fig. 3과

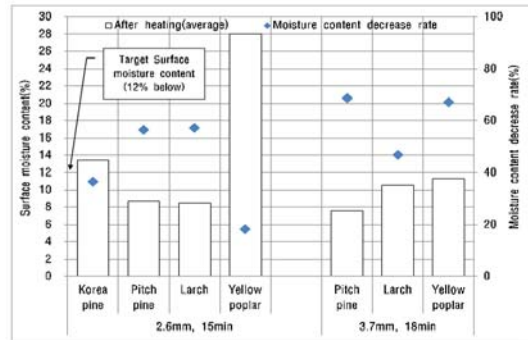


Fig. 4. Surface moisture content and moisture content decrease rate of flat veneer by thickness before and after microwave heating.

같다. 단판의 마이크로파 가열 후 형상은 침엽수종으로 잣나무와 리기다소나무의 경우 두께에 상관없이 약간의 뒤틀림이 있었지만, 전체적으로는 양호한 것으로 나타난 반면, 낙엽송의 경우 가열 이전부터 갈라짐이 많았으며, 가열 후 추가로 갈라짐 또는 약간의 뒤틀림이 있는 것으로 나타났다. 활엽수종으로 백합나무의 경우 Table 1에 따른 가열 후 목표치를 만족하기 위해서는 보다 많은 가열 시간과 출력의 조절이 필요할 것으로 판단되며, 이는 침엽수 대비 상대적으로 많은 수분을 함유하고 있고 건조가 용이하지 않은 활엽수의 복잡한 섬유 구조적 특성(Um 2005~Butterfield 2000) 때문으로 사료된다.

3.1.2. 평단판 표면의 함수 변화

단판의 마이크로파 가열 전후 표면 함수변화 특성은 Table 2 및 Fig. 4와 같다. 3 kW 15분 마이크로파 가열한 2.6 mm 단판의 표면 함수율은 리기다소나무와 낙엽송은 목표함수율인 12% 이하를 만족한 반면, 잣나무와 백합나무는 이에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 또한 함수 감소율도 표면 함수율과 같이 리기다소나무와 낙엽송이 55% 이상으로 감소폭이 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 잣나무와 백합나무의 경우 리기다소나무 및 낙엽송 대비 가열 전 상대적으로 높은 함수상태였기 때문인 것으로 사료되며, 15분 이상 가열되어야 목표 함수율을 만족할 수 있

Table 2. Surface moisture content changes of flat veneer before and after microwave heating

Classifications			Before heating (%)				After heating (%)		
Species of veneers	Thickness (mm)	Heating period (min)	Sample No.			Av.	Sample No.		
			①	②	③		①	②	③
Korean pine	2.6	15	25.1	19.3	19.0	21.1	13.5	12.9	13.8
Pitch pine			18.3	19.3	22.5	20.0	9.1	8.1	8.8
Larch			20.7	19.4	19.5	19.9	9.1	6.7	9.7
Yellow poplar			35.9	34.2	32.9	34.3	28.3	30.6	25.0
Korean pine	3.7	18	-	-	-	-	-	-	-
Pitch pine			22.6	27.9	22.7	24.4	7.2	8.9	6.6
Larch			19.1	22.0	19.0	20.0	11.2	11.5	9.2
Yellow poplar			33.3	34.6	35.8	34.6	16.0	9.5	8.5

Table 3. Moisture Weight changes of flat veneer before and after microwave heating

Classifications				Before heating (g)				After heating (g)			
Species of tress	Thickness (mm)	Heating period (min)	Sample No.			Av.	Sample No.			Av.	
			①	②	③		①	②	③		
Softwood	Koreanpine	2.6	15	50.4	48.9	51.1	50.1	43.9	44.2	46.3	44.8
	Pitch pine			59.2	52.8	66.2	59.4	48.4	47.8	53.2	49.8
	Larch			78.6	87.1	87.2	84.3	65.2	71.7	70.9	69.3
Hardwood	Yellow poplar			86.8	83.1	84.8	84.9	59.8	58.1	57.0	58.3
Softwood	Koreanpine	3.7	18	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pitch pine			104.2	117.1	89.3	103.5	63.7	67.4	59.4	63.5
	Larch			87.7	105.0	103.0	98.6	78.2	82.2	82.3	80.9
Hardwood	Yellow poplar			124.8	144.3	121.8	130.3	78.1	86.8	74.8	79.9

을 것으로 판단된다.

3 kW 18분 마이크로파 가열 된 3.7 mm 단판의 표면 함수율은 3가지 수종 모두 목표 함수율을 만족 하였으며, 백합나무의 경우 2.6 mm 15분 가열보다 높은 감소폭을 가진 것으로 나타났다. 특히 18분 가열 시 함수율 감소율이 15분 보다 평균적으로 1.4배 정도 높게 나타나 3분의 가열시간 차이로 비교적 높은 건조속도를 가지는 것으로 나타났다. 이는 가열시간이 증가하는 구간에서 수분의 임계점에 이르기 위해 보다 활발한 마찰활동 및 확산 운동이 일어났기

때문으로 사료된다. 또한 시험편 두께가 증가함에 따라 단판 내부 세포내강 및 벽 등에서의 수증기압을 형성할 수 있는 조건이 마련되었기 때문에 3 kW 18분 가열 시 목표 함수율 도달이 가능했던 것으로 판단된다.

3.1.3. 평단판 함수증량 변화

단판의 마이크로파 가열 전후 함수증량 변화 특성은 Table 3 및 Fig. 5와 같다. 3 kW 15분 마이크로파 가열한 2.6 mm 단판의 감소율 중 잣나무, 리기다소

Table 4. Surface heat distribution of flat veneer after microwave heating

Classifications		Softwood			Hardwood
		Korean pine	Pitch pine	Larch	Yellow poplar
Thickness	2.6 mm				
Heating period (min)	15				
Temperature (°C)	Max.	44.6	87.8	119.5	45.0
Thickness	3.7 mm	-			
Heating period (min)	18				
Temperature (°C)	Max.	-	105.7	116.0	65.1

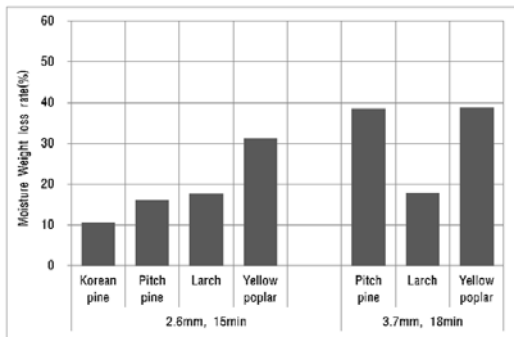


Fig. 5. Moisture Weight loss rate (%) of flat veneer by thickness before and after microwave heating.

나무, 낙엽송은 표면함수 감소율과 유사한 경향으로 나타난 반면, 백합나무의 경우 표면함수 감소율 대비 함수중량 감소율은 약 2.7배 정도의 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 가열 전 높은 함수분포와 밀도 등으로 인해 침엽수의 건조율에 활엽수인 백합나무가 미치지 못했기 때문으로 판단된다.

3 kW 18분 마이크로파 가열한 3.7 mm 단판의 함수중량 감소율은 리기다소나무와 백합나무는 매우 유사한 것으로 나타났으며, 낙엽송이 가장 낮은 것으로

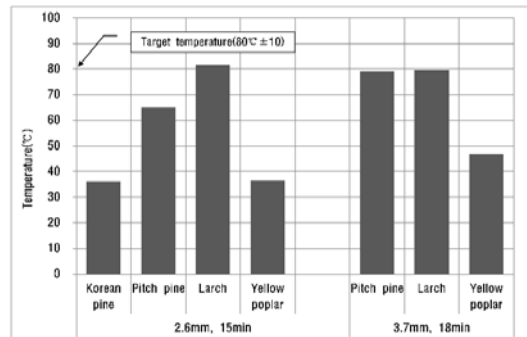


Fig. 6. Average temperature of flat veneer after microwave heating.

로 나타났다. 이는 표면 함수율의 감소와 같은 경향으로서 가열시간이 길수록, 또한 시험편 두께가 두꺼울수록 보다 안정적인 건조효율을 가지는 것으로 판단되며, 백합나무의 경우 15분 대비 18분 가열 시 건조율이 높은 것으로 나타났다.

3.1.4. 평단판 가열 후 열분포

단판의 마이크로파 가열 후 표면 열분포 형상은 Table 4 및 Fig. 6과 같다. 3 kW 15분 마이크로파 가

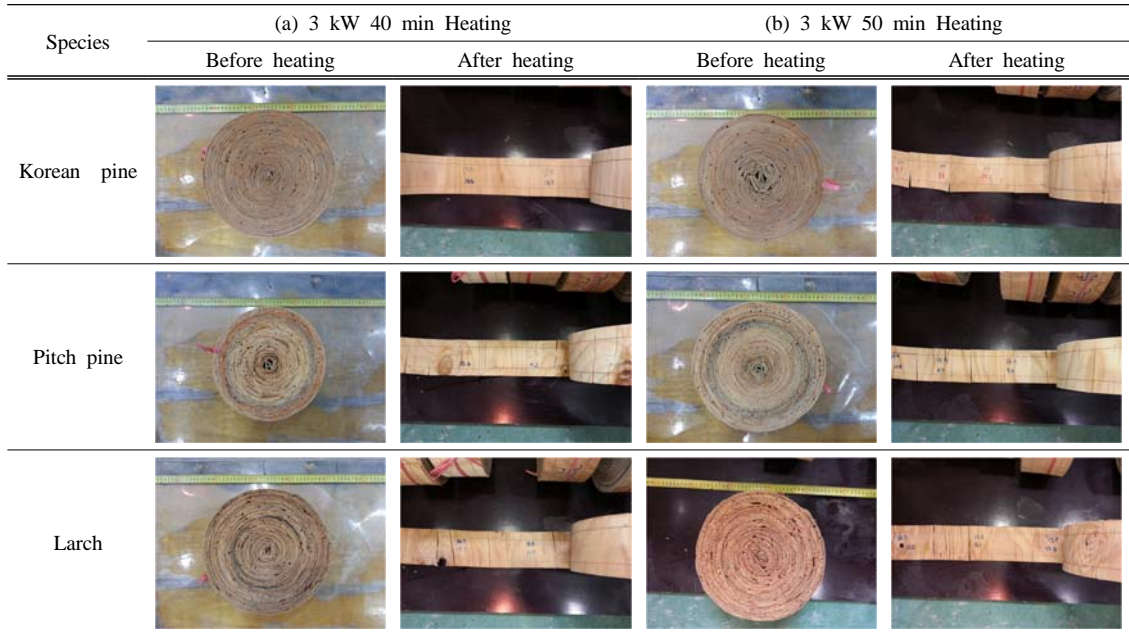


Fig. 7. 2.6 mm thick veneer roll before and after microwave heating.

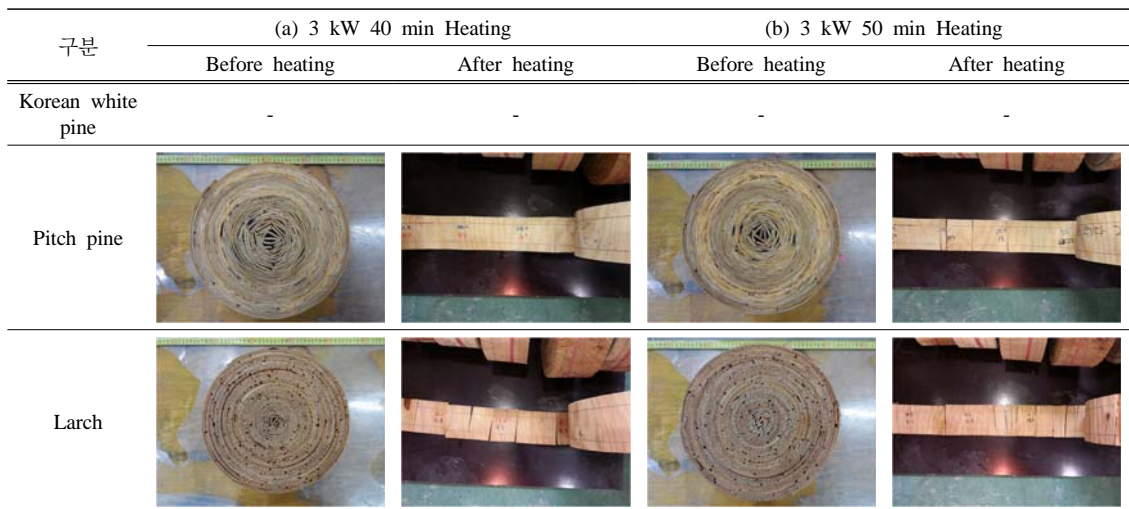


Fig. 8. 3.7 mm thick veneer roll before and after microwave heating.

열한 2.6 mm 단판의 열분포는 목표 온도인 80℃에 낙엽송을 제외한 수종은 도달하지 못하였으며, 잣나무와 백합나무는 가장 낮은 평균 온도분포를 가지는 것으로 나타났다. 반면, 3 kW 18분 마이크로파 가열

된 3.7 mm 단판의 열분포 중 리기다소나무와 낙엽송은 목표 온도에 도달하였으며, 백합나무도 50℃ 가까운 열분포로 15분 가열의 경우보다 높은 평균 온도를 형성하는 것으로 나타났다.

Table 5. Surface moisture content changes of veneer roll before microwave heating

Classifications			Before heating
Species of veneers	Thickness (mm)	Heating period (min)	(%)
Korean pine	2.6	40	19.6
Pitch pine			17.6
Larch			18.1
Korean pine			19.2
Pitch pine			17.7
Larch			17.9
Korean pine	3.7	40	-
Pitch pine			23.6
Larch			16.9
Korean pine			-
Pitch pine			24.3
Larch			16.3

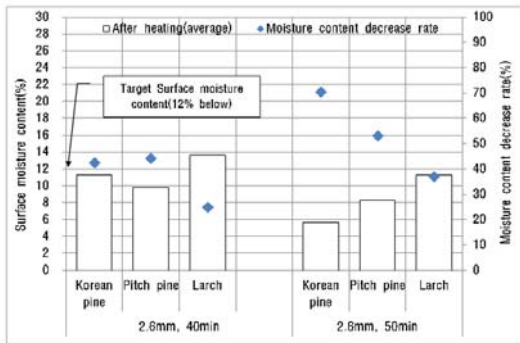


Fig 9. Surface moisture content and moisture content decrease rate (%) of 2.6 mm thick veneer roll after microwave heating.

하지만, 잣나무의 경우 리기다소나무, 낙엽송 대비 가열에 따른 열확산 및 분포 등이 불안정한 것으로 나타났다. 이는 가열 초기 함수율은 유사하지만 중량 및 섬유밀도가 낮아 가열 후 안정적인 열분포와 수분증발이 이루어지지 못했기 때문으로 사료되며, 리기다소나무 및 낙엽송은 잣나무 대비 보다 높은 중량 및 섬유밀도로 인해 내부 수분 마찰열 발생 후 압력에 의한 수분확산 등이 균일하였기 때문으로 판단

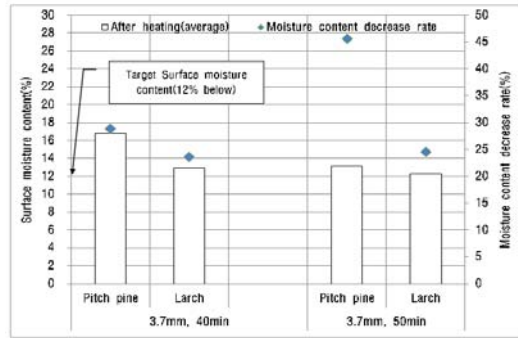


Fig. 10. Surface moisture content and moisture content decrease rate (%) of 3.7 mm thick veneer roll after microwave heating.

된다. 또한 Table 4에 의한 열분포 이미지를 참고할 경우 두께가 증가할수록 보다 열확산이 많았으며, 균등하고 안정적인 가열이 가능한 것으로 판단되지만, 더욱 균등한 가열이 가능한 마이크로파 출력과 가열 시간을 수종별로 적합하게 도출하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

3.2. 마이크로파 가열 단판롤

3.2.1. 단판롤 표면 형상 변화

단판롤의 마이크로파 가열 후 형상은 Figs. 7~8 과 같다. 단판롤의 마이크로파 가열 후 형상은 단판 가열과 비교시 매우 안정적이었으며, 결함이 발생했던 낙엽송의 경우도 가열 이전 상태와 같은 품질을 유지하는 것으로 나타났다. 하지만, 백합나무의 경우 전술한 바와 같이 본 실험에서의 마이크로파 가열 목표치 범위를 벗어난 가열시간과 출력이 필요한 것으로 나타나 해당 실험에서 결과분석은 제외하였다.

3.2.2. 단판롤 표면 함수 변화

단판롤의 마이크로파 가열 후 표면 함수변화 특성은 Table 5 및 Figs. 9~10과 같다. 마이크로파 3 kW 가열된 2.6 mm 단판롤의 표면 함수 분포 중 40 분 가열된 잣나무 및 리기다소나무 시험편은 목표 함수율을 만족하였지만 낙엽송은 약간 상회하는 것

Table 6. Moisture Weight changes of veneer roll before and after microwave heating

Classifications			Before heating (g)	After heating (g)
Species of veneers	Thickness (mm)	Heating period (min)		
Korean pine	2.6	40	2,613.6	2,284.0
Pitch pine			2,764.1	2,331.6
Larch			4,170.0	3,715.4
Korean pine		50	2,372.3	1,882.4
Pitch pine			3,037.3	2,467.5
Larch			4,268.2	3,658.2
Korean pine	3.7	40	-	-
Pitch pine			4,293.3	3,666.2
Larch			4,768.2	4,319.6
Korean pine		50	-	-
Pitch pine			4,149.1	3,472.6
Larch			4,922.4	4,315.6

으로 나타났다. 하지만 50분 가열 시 모든 수종이 목표함수율을 만족하였으며, 잣나무와 리기다소나무는 각각 6% 및 8% 정도로 40분 가열보다 낮은 함수분포를 나타냈다. 낙엽송의 경우도 12% 이하로 나타난 것으로 보아 목표함수율을 확보하기 위해서는 3 kW 출력에서는 50분 이상 가열이 필요한 것으로 판단된다.

마이크로파 3 kW 가열된 3.7 mm 단판롤의 표면 함수 분포의 경우 40분 및 50분 가열 시 목표함수율은 만족하지 못하였으며 특히, 리기다소나무는 가열 이전 높은 함수율로 인한 가열시간 부족 때문으로 판단된다. 하지만 50분 가열된 리기다소나무의 함수율 감소율은 45%를 상회하였으며, 목표치와 상관없이 가장 높은 감소율을 나타내어 건조율이 가장 우수하였으며, 60분 이상 가열할 경우 목표 함수율 만족이 가능할 것으로 판단된다. 한편, 낙엽송은 40분 및 50분 모두 유사한 결과를 나타내어 가열시간과 상관없이 뚜렷한 감소는 없는 것으로 나타났다.

3.2.3. 단판롤 함수중량 변화

단판롤의 마이크로파 가열 후 함수중량 변화 특성은 Table 6 및 Figs. 11~12와 같다. 마이크로파 3

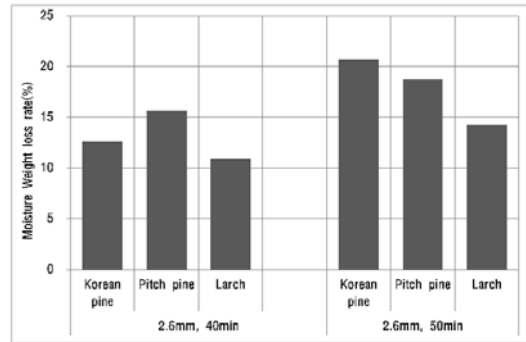


Fig. 11. Moisture Weight loss rate (%) of 2.6 mm thick veneer roll after microwave heating.

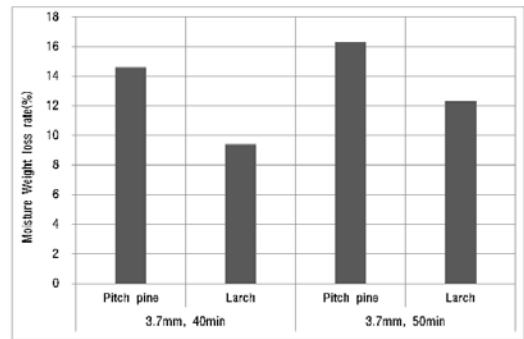
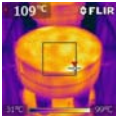
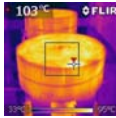
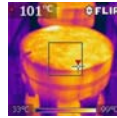
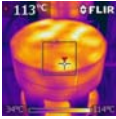
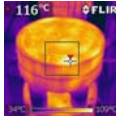
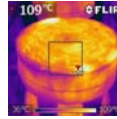
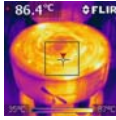
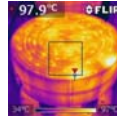
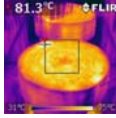
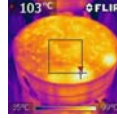


Fig. 12. Moisture Weight loss rate (%) of 3.7 mm thick veneer roll after microwave heating.

kW 가열된 2.6 mm 단판롤은 표면함수 감소율과 유사한 경향으로 나타났으며, 40분 가열의 경우보다 50분 가열 시 함수중량 감소율이 높은 것으로 나타났다. 한편 50분 가열 시 함수중량 감소율은 잣나무, 리기다소나무, 낙엽송 순으로 나타났는데, 이는 가열 전후 결과와 반비례 하는 것으로, 함수중량이 감소하여도 수종별 고유의 질량 또는 밀도 등에 의한 차이 때문으로 사료되며, 이를 바탕으로 마이크로파 출력과 가열시간은 수종에 따라 적합한 조건을 도출해야 한다는 것을 알 수 있다. 따라서 단판 2.6 mm의 롤 형태는 50분 이상 가열 시 수종의 특성에 적합하게 함수중량이 감소되며, 수종별 목표 건조율 확보를 위해 50분을 기준으로 추가 가열을 할 경우 최적의 적

Table 7. Surface heat distribution of veneer roll by microwave heating

Species of veneers		Korean pine	Pitch pine	Larch	Yellow poplar
Thickness	2.6 mm				Exceeded the desired heating time limit, so additional experiment needs to be proceeded after setting additional goal
Heating period (min)	40				
Temperature (°C)	Max.	109.0	103.5	101.3	
Thickness	2.6 mm				Same to the above
Heating period (min)	50				
Temperature (°C)	Max.	113.2	116.1	109.1	
Thickness	3.7 mm	-			Same to the above
Heating period (min)	40				
Temperature (°C)	Max.	-	86.4	97.9	
Thickness	3.7 mm	-			Same to the above
Heating period (min)	50				
Temperature (°C)	Max.	-	81.3	103.4	

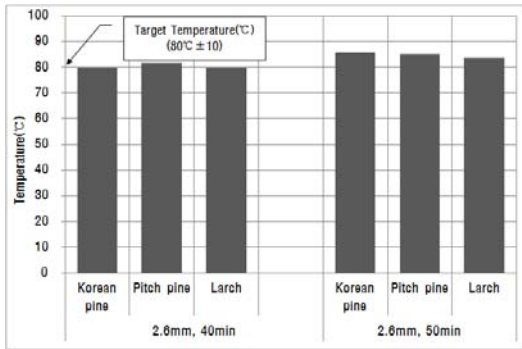


Fig. 13. Average temperature of 2.6 mm thick veneer roll after microwave heating.

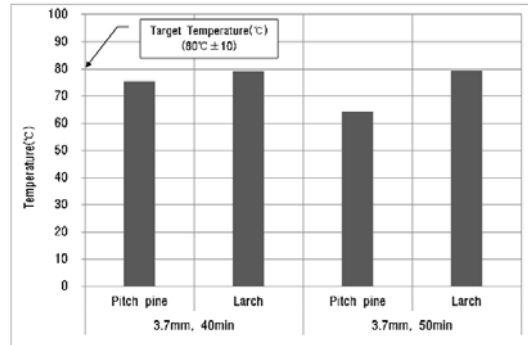


Fig. 14. Average temperature of 3.7 mm thick veneer roll after microwave heating.

정 출력 및 시간 도출이 가능할 것으로 판단된다.

마이크로파 3 kW 가열된 3.7 mm 단판롤의 함수율 감소율은 2.6 mm 보다 40분 가열과 50분 가열에서의 차이가 보다 뚜렷한 경향으로 나타났다. 즉

가열시간이 길어질수록 함수율 감소율도 높아지며, 수종별 특성에 적합한 감소율을 가지는 것으로 나타났다. 따라서 단판 가열시 두께에 따라 가열 및 건조효율의 차이가 발생한 것과 같이 롤 형태의 단

판도 3 mm 이상 두께에서 보다 안정적인 품질이 확보되는 것으로 나타났다.

3.2.4. 단판롤 가열 후 열분포

단판롤의 마이크로파 가열 후 표면 열분포 형상은 Table 7 및 Figs. 13~14와 같다. 마이크로파 3 kW 가열된 2.6 mm 단판롤의 평균 열분포 특성은 시험편 모두 목표 온도를 만족하는 것으로 나타났으며, 대부분 80℃ 기준 $\pm 5.9^\circ\text{C}$ 이내로 매우 균일한 열분포 특성을 가지는 것으로 나타났다. 또한 함수증량 감소율 및 표면 함수 감소율 변화 특성과 비교시 온도차이는 크지 않지만 미세하게 유사한 경향을 가지는 것으로 나타났다. 이는 단판 두께 2.6 mm, 길이 20 m 롤 형태를 마이크로파 3 kW로 가열할 경우 가열된 시험편에서의 열분포 및 확산 정도는 표면함수 및 함수증량 변화에 영향을 주는 것으로 판단되며, 40분과 50분 가열에서의 작은 온도 차이는 단판 가열 후 품질 특성에 높은 영향을 주는 것으로 사료된다.

한편, 단판롤 형태로 가열 시 전체적으로 평단판보다 균일한 열분포를 가지는 것으로 나타났다. 이를 롤 형태로 서로 겹쳐진 단판과 단판에서의 열손실이 낮았기 때문이며, 각 단판별 증기로 배출되는 수분 열기가 겹쳐진 단판에 어느 정도 영향을 미쳤기 때문으로 사료된다. 따라서 고정형 마이크로파 장비에서 단판을 가열할 경우 롤 형태로 가열하는 것이 가열 및 건조율에서 평단판 대비 우수할 것으로 사료된다.

마이크로파 3 kW 가열된 3.7 mm 단판롤의 평균 열분포 특성은 전체적으로 2.6 mm의 온도분포보다 유사하거나 낮은 것으로 나타났는데, 이는 두께 증가 대비 가열시간이 부족한 때문으로 사료되며, 상기 함수율 및 증량 감소율 결과에서 3.7 mm의 감소율은 2.6 mm의 감소율에 미치지 못한 것과 같은 이유로 판단된다. 또한 Table 7의 3.7 mm 40분, 50분 열분포 이미지는 2.6 mm 가열된 열분포에 대비하여 전체 열분포 및 확산이 확실히 형성되지 못한 것으로 나타나므로 3.7 mm 단판롤은 3 kW 가열 시 50분 이상 추가 가열시간이 확보되어야 할 것으로 사료된다.

한편, 시험편 중 리기다소나무 50분 가열 시험편만 목표 온도를 만족하지 못하는 것으로 나타났는데,

이는 함수 및 증량 감소율이 가장 높게 나타난 것과 대조적인 것으로 이에 대한 추가 분석이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

잣나무, 리기다소나무, 낙엽송, 백합나무 등 수종과 두께가 다른 평단판 및 단판롤의 마이크로파 가열·건조 특성 및 건조효율 분석 결과는 다음과 같다.

1) 단판 형태로 마이크로파 가열 시 가열 후 품질 상태는 비교적 양호하지만, 약간의 뒤틀림 등이 발생하였는데, 이는 두께가 얇은 단판을 고정 없이 가열했기 때문에 가열 중 열응력 등에 의한 뒤틀림이 자유롭게 발생한 것으로 사료된다. 또한 고정형 마이크로파 장비의 특성상 단판 형태로 가열 시 국부적인 조사(照射)가 이루어진 영향도 높은 것으로 판단되며, 이를 컨베이어 형태로 가열할 경우 이와 같은 현상은 감소될 수 있을 것으로 사료된다. 한편, 단판을 가열할 때 3 mm 이상 두께를 사용하여 표면 함수율 및 함수증량을 적절히 선정 및 가열하여 결합발생 감소 등을 최소화하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

2) 단판롤 형태로 마이크로파 가열에 따른 형상은 모두 양호한 것으로 나타났으며, 특히 단판에서 나타난 뒤틀림 등의 결합은 없는 것으로 나타났다. 롤 형태로 마이크로파 가열 시 열분포 및 확산 등이 매우 안정적으로 나타났으며, 이러한 열분포는 표면함수 분포 및 함수증량 감소에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 고정형 마이크로파 장비의 한계점인 국부적인 조사도 단판보다 넓은 체적 및 면적을 가지므로 보다 균일한 열전달 및 가열이 가능했던 것으로 판단된다. 따라서 단판롤 형태는 수종 및 두께에 따라 출력과 조사시간 등 충분한 시험이 실시된다면, 고정형 장비에서도 충분한 건조효율을 나타낼 수 있을 것으로 판단되며, 이는 컨베이어 형태로 시험한 결과와 비교 후 판단하는 것도 좋은 방법으로 사료된다.

REFERENCES

- Ahn, D.Y. 2000. Study on the drying characteristics of food wastes using the Microwave. Dissertation for Master's Degree, Chungnam national university.
- Butterfield, B.G., Meylan, B.A., 2000. trans. by Um, Y.G., Three dimensional structure of wood, WIT Consulting, pp. 22-23.
- Hwang, S.W., Kim, J.I., Park, S.B., Suh, J.S., 2012. Bonding Quality of Cylindrical LVL and Surface Durability by Its Painting. Journal of The Korean Wood Science and Technology 40(6): 418-423.
- Lim, N.G., 2011. Flame resistance and durability of compressed structural wood through microwave heat drying method. The Journal of the Korean institute of building construction 11(2): 162-171.
- Murasaki. 1999. Industrial Microwave Application Technology, Gigeon. pp. 1-2.
- Murasaki. 1999. Industrial Microwave Application Technology, Gigeon. pp. 114-115.
- Park, C.W., Lim, N.G., Her, J.W., 2011. The liquid flame proofing agent's permeating effect of wood using microwave. The Journal of The Korean Institute of Building Construction 11(3): 256-265.
- The secret of timber. 2005. trans. by Um, Y.G., pp. 153-155.
- Yoon, T.H., Kim, C.H., Lim, N.G., Park, C.W., 2013. Characteristics of Flame Retardent and Mothproof Conservation of Microwave Heated wood. Journal of The Korean Wood Science and Technology 41(3): 234-246.