

## 목재단판의 마이크로파-열풍 병용 건조 1: 뉴질랜드산 라디아타 소나무 단판의 건조특성\*1

이형우\*2†

### Combined Microwave-Convective Drying of Wood Veneer 1: Drying Characteristics of Radiata Pine Veneer Grown in New Zealand\*1

Hyoung-Woo Lee\*2†

#### 요약

본 연구는 두께 24 mm 뉴질랜드산 라디아타 소나무 단판의 마이크로파-열풍 복합 건조특성을 파악하기 위하여 수행되었다. 단판을 100°C 열풍과 복합한 마이크로파 건조한 결과 함수율 160%에서 0%까지 건조하는데 7.5분이 소요되었다. 이 건조속도는 100°C 열풍만으로 건조한 경우에 비하여 약 3배 정도 높은 수준이었다. 그러나 과도한 마이크로파 출력이 가해지면 탄흔이 남는 문제가 발생하였다. 그러므로 최적의 건조조건을 결정하기 위해서는 다양한 규격과 수종의 단판에 대한 마이크로파 건조특성의 파악이 요구됨을 알 수 있었다.

#### ABSTRACT

Combined microwave-convective drying of 24mm-thick radiata pine veneer grown in New Zealand was conducted to investigate drying characteristics. The veneers could be dried from 160% to 0% moisture content in 7.5 min by microwave drying combined with hot-air of 100°C. This drying rate is about three times higher than that of conventional convective drying with only hot air of 100°C. However there remained charred spots when too high microwave power was applied. Therefore

\*1 접수 2003년 1월 7일, 채택 2003년 5월 13일

이 연구는 에너지관리공단 지원 에너지절약기술개발사업(2001-2003)으로 이루어졌음.

\*2 전남대학교 농업과학기술연구소

† 주저자(corresponding author) : 이형우(e-mail: hwlee@jnu.ac.kr)

investigations of the microwave-drying characteristics of veneer of various sizes and species are needed to determine the optimal drying conditions.

**Keywords:** radiata pine veneer grown in New Zealand, drying rate, charred spots, microwave power

## 1. 서 론

### 1.1. 우리 나라 합판공업 현황

우리 나라 합판공업은 1925년 동명목재상사를 효시로 1960년대 초반부터 인도네시아 등 열대우림지역에서 공급되는 남양재를 원료로 본격적인 합판생산을 개시하여 1970년대에는 80여개의 공장에서 260만<sup>3</sup>m<sup>3</sup>이 넘는 합판을 생산하였고, 이 중 65%에 달하는 170만<sup>3</sup>m<sup>3</sup>을 수출하는 등 세계적인 합판 수출국으로서 당시 우리 나라 수출을 주도하며 수출한국의 기반 확보에 크게 기여하였다. 그러나 1980년대 중반부터 남양재 원목의 주요 수출국인 인도네시아가 원목 수출을 금지함에 따라 원료난에 봉착한 많은 수의 합판제조공장들이 차례로 문을 닫게 되었다.

특히, 1992년 리우선언 이후 UN에서 주도해 온 지구환경보호를 위한 열대림 보호운동 및 지속 가능한 산림경영의 적용으로 남양재 원목의 공급 감소는 더욱 가속화되었으며 남양재에만 의존하던 합판산업은 존재의 갈림길에 서게 되었다. 그러나 합판은 건축 내외장을 위한 필수적인 자재로서 어려운 환경 속에서도 국내 합판생산은 꾸준히 그 명맥을 유지하고 있다. 이(2000)가 보고한 최근 자료에 따르면 2000년 9월 현재 8개 합판제조회사가 연간 105만<sup>3</sup>m<sup>3</sup>의 생산능력을 지니고 있는 것으로 파악되고 있다.

그러므로 원료의 전환과 에너지 절감을 위한 생산시설의 교체만이 원료 구득난과 에너지비용의 대폭적인 상승으로 침체되어가고 있는 우리 나라 합판산업을 유지·발전시킬 수 있는 유일한 방법임을 산학연 모든 관련자들이 공통적으로 인식하고 있다.

원료 전환 대책의 일환으로 최근에는 인공 조립된 침엽수를 이용하여 단판을 생산할 수 있는 기술이 개발, 보급되어 장기적이고도 안정적으로 원료를 공급받을 수 있는 가능성이 높아지고 있다. 그러나 침엽수

재는 열대 활엽수재에 비하여 품질이 낮고 고르지 못하며 특히 웅이가 많이 포함되어 있어 최종 제품인 합판의 품질에 막대한 영향을 미칠 가능성이 매우 높다. 그러므로 원료의 열악한 조건을 공정과 설비 및 기술에서 극복해야만 수입 합판과의 경쟁이 가능할 것으로 판단되고 있다.

### 1.2. 합판공정의 에너지 절감대책

Corder(1976)가 미국의 예를 보고한 바에 따르면 목재나 단판의 제조공정에 소요되는 에너지의 60~70%가 건조공정에서 사용되고 있다. 국내 합판업체가 공통적으로 사용하고 있는 연속식 열풍 단판건조기를 예로 들자면 1일 평균 80<sup>3</sup>m<sup>3</sup>의 단판을 건조하기 위하여 78,000 kW 이상의 에너지를 소비하고 있다. 그러므로 연간 1,050,000 m<sup>3</sup>의 합판을 생산하기 위해서는 연간 약 10억 2천만 kW의 에너지가 요구되며, 이를 원유로 환산하면 255,000 TOE(ton of energy: 원유 1톤으로 생산할 수 있는 에너지의 양)가 된다.

그러나 국내 합판업체에서 제공하는 자료를 분석해보면 그 열효율은 25~30%수준에 머물고 있다. 그러므로 단판 건조공정에서의 에너지 절약은 곧 상당한 원가절감으로 이어지며, 이는 결국 국내 합판업체의 경쟁력을 강화시켜주는 일이 될 것이다. 일 예로 단판 건조공정의 열효율을 50% 수준으로 향상시킨다면 연간 약 190억원의 원가절감이 예상되며, 에너지 역시 120,000 TOE 이상의 절감을 기대할 수 있다.

### 1.3. 열풍식 단판 건조공정의 문제점

국내 합판업체가 사용하고 있는 연속식 열풍 단판 건조기는 거의 전량이 유럽이나 일본에서 수입된 제품으로 제작연도가 최고 30여년전에 이를 정도로 노후된 구식이다. 따라서 낮은 열효율은 피할 수 없는

상황이며, 건조기의 길이가 25~35 m에 이를 정도로 길어서 막대한 공간을 차지하고 있다. 또한, 요구되는 생산성(이송속도 약 1.5~1.9 m/min)을 유지하기 위해서는 180°C 이상의 고온 열풍을 이용해야하므로 고온에 의한 단판의 열변색과 건조결합 발생 등 여러 가지 문제점들이 야기되고 있다. 그러므로 에너지를 절감하는 동시에 생산성을 유지하면서 품질을 향상시킬 수 있는 새로운 개념의 건조방법이 절실히 요구되고 있다.

#### 1.4. 마이크로파를 이용한 단판건조

단판의 건조공정에 마이크로파를 적용하려는 시도는 이미 1960년대부터 이루어진 바 있다. 미국의 Warner(1966)는 915MHz, 12~25 kW급의 마이크로파 건조장치를 제작하여 단판건조에 적용한 결과 단판 이송속도 1~4 m/min의 범위에서 매우 만족스러운 결과를 얻었다. Gruber(1967)는 열풍식 단판건조 공정에서 부위별 불균일 함수율과 수낭(water-pocket)에 의한 문제를 해결하기 위하여 마이크로파를 이용한 단판 재건조(redrying)를 실시한 결과 제반 문제점들을 해결할 수 있었다. 이와 같은 성과는 마이크로파의 선택적 가열특성을 적절히 활용한 결과라 할 수 있다.

일본에서도 마이크로파를 이용한 단판건조 연구가 수행된 바 있으며, 일례로 田口 崇(1972) 등은 140, 370 및 660W급 실험장치를 이용하여 두께 0.9, 2.55 및 4.5 mm 단판을 건조한 결과 단판의 두께가 두꺼울수록, 그리고 출력이 낮을수록 건조효율이 높아 건조조건의 최적화에 따라 대개 90% 이상의 건조효율을 얻을 수 있다고 보고한 바 있다. 미국의 Olson(1983) 등은 열풍과 마이크로파를 병행하는 실험을 수행한 결과 마이크로파만을 사용한 경우보다 우수한 결과를 얻고 있으며, 특히 저출력의 마이크로파를 적용하면 에너지절감 효과와 건조시간 단축 외에도 단판의 재색, 유연성 및 편평도 등의 품질이 매우 개선되는 것으로 보고하고 있다.

지금까지의 연구결과에서 알 수 있듯이 마이크로파를 이용한 단판건조 방법은 에너지와 건조시간 절감 외에도 품질의 개선 등 매우 다양한 장점을 얻을 수

있다. 최근 미국의 목재건조기 제작 전문업체인 B社에서 마이크로파 단판건조기의 장점에 대하여 제시한 내용은 다음과 같다.

- ① 에너지 절감 효과
- ② 건조시간 단축에 따른 생산성 향상과 건조기 라인길이 축소에 따른 공간 절약
- ③ 원재료 즉, 단판 수종에 따른 제약사항 제거
- ④ 균일한 건조
- ⑤ 목섬유의 경화(hardening) 억제
- ⑥ 단판 재색 향상
- ⑦ 공정조건에 따른 단판의 손상 방지
- ⑧ 배기량(emission) 절감에 따른 환경보호
- ⑨ 건조기 수명연장 및 고온과 수지용출에 따른 화재 발생 가능성 저하
- ⑩ 건조기 유지, 보수 및 청소 작업 절감

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 공시재료

국내 중견합판 제조회사인 D社로부터 뉴질랜드산 두께 2.4 mm radiata pine 단판 50매를 분양받아 150×150 mm 정도의 크기로 재단하여 공시재료로 사용하였으며, 각 건조방법별로 각 5매씩 할당하였다. 본 단판은 rotary lathe로 절삭된 것으로 초기 함수율은 180~100% 범위였으며, 그 평균은 약 153% 정도로 비교적 높은 초기함수율을 나타내었다.

### 2.2. 마이크로파 건조장치

본 연구에 사용된 마이크로파 건조특성 실험장치의 구조는 Fig. 1과 같았다. magnetron(주파수 2,450 MHz)의 출력은 0~700 W까지 조절이 가능하며, 최고 100°C의 열풍을 병용할 수 있도록 제작하였다. 건조중 재료의 표면과 내부 온도는 적외선 온도센서(측정범위 0~300°C)와 thermocouple를 이용하여 각각 측정할 수 있으며, 재료의 건조중 중량변화는 로드셀(0~5 kg)을 이용하여 측정이 가능하도록 설계되었다.

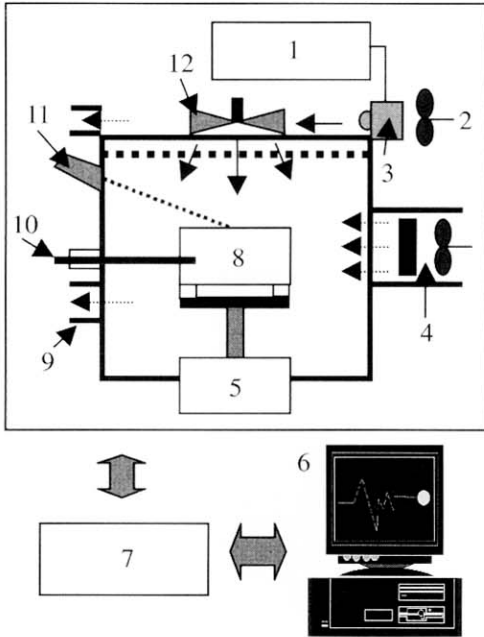


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental microwave equipment(1. Microwave power controller; 2. Cooling fan; 3. Magnetron; 4. Heater & blower; 5. Load cell; 6. Personal computer; 7. Data acquisition & control system; 8. Sample; 9. Ventilation; 10. Thermocouple; 11. Infrared temperature sensor; 12. Microwave stirrer).

### 2.3. 건조조건

출력변화에 따른 단판의 건조특성을 파악하기 위하여 magnetron의 출력을 200 W, 300 W 및 600 W로 고정하여 각각 실험을 실시하였으며, 각 조건별로 열풍은 100℃를 유지하도록 하여 건조 중 계속 단판 위를 표면과 평행하게 흐르도록 하였다(200 W+HA, 300 W+HA, 600 W+HA). 또한, 마이크로파를 병용하는 효과를 파악하기 위하여 100℃ 열풍만으로 건조하는 실험도 추가로 실시하였다(HA).

한편, 열풍의 효과 역시 파악하기 위하여 200W 출력에 100℃가 아닌 실온의 냉풍을 불어주는 실험도 수행하였다(200 W+CA). 그리고 마이크로파 건조의 생산성 향상을 위한 대책 수립을 위하여 6매의 단판

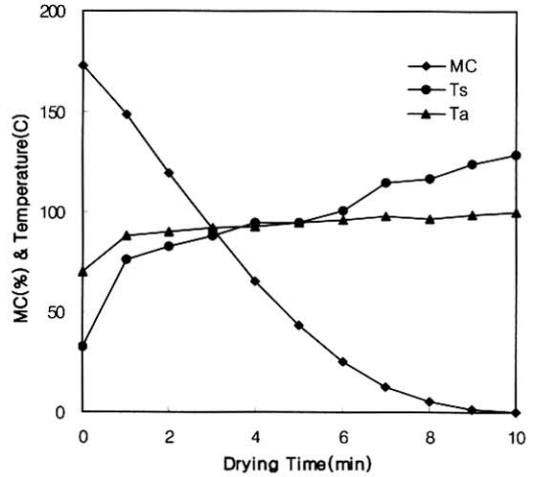


Fig. 2. Changes of moisture content(MC), surface temperature and air temperature during drying of 2.4 mm-thick radiata pine veneer with 200 W-microwave power and hot air(T<sub>s</sub>: veneer surface temperature, T<sub>a</sub>: air temperature).

을 실적(solid pile)하여 400W의 출력과 열풍으로 동시에 건조하는 실험도 수행되었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 건조곡선과 표면온도

Fig. 2는 마이크로파 출력 200 W와 100℃ 열풍을 병용하여 건조한 결과로 함수율 173%에서 전건까지 약 10분 정도가 소요되었다. 합판제조용 단판의 적정 마무리 함수율은 4~5%이나 본 연구에서는 단판의 마이크로파 건조특성을 파악하기 위하여 전건상태까지 건조를 진행하였다. 단판 표면의 온도는 건조가 시작되자 곧 상승하기 시작하여 함수율 약 30% 부근에서 100℃를 초과하였다. 이처럼 함수율 30% 부근에서 목재의 온도가 100℃ 초과하는 것은 본 함수율이 목재의 섬유포화점 근방으로 대부분의 자유수가 증발되고 결합수만 남게되면 투입되는 에너지가 결합수의 증발뿐만 아니라 목재의 가열에도 일부 사용되기 때문인 것으로 사료된다. 또한, 열풍으로 인하여 단판

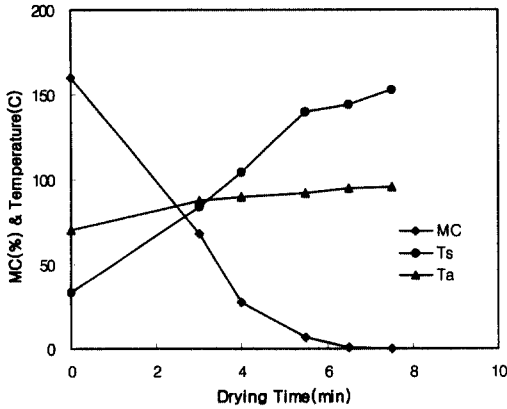


Fig. 3. Changes of moisture content(MC), surface temperature and air temperature during drying of 2.4 mm-thick radiata pine veneer with 300 W-microwave power and hot air( $T_s$ : veneer surface temperature,  $T_a$ : air temperature).

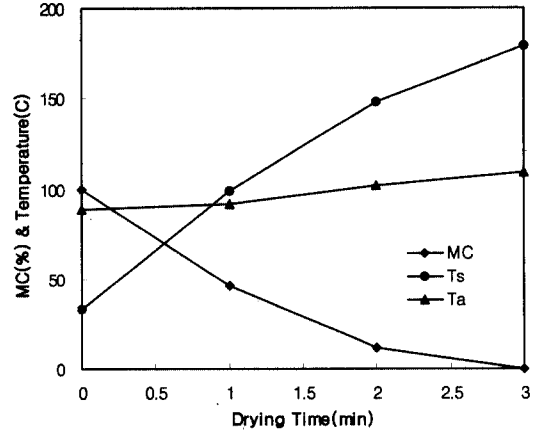


Fig. 4. Changes of moisture content(MC), surface temperature and air temperature during drying of 2.4 mm-thick radiata pine veneer with 600 W-microwave power and hot air( $T_s$ : veneer surface temperature,  $T_a$ : air temperature).

표면에서의 수분 증발이 내부수분의 표면으로의 이동보다 신속하게 이루어져 투입 에너지가 축적되는 현상도 영향하는 것으로 판단된다. 따라서 목재의 흡수율이 감소할수록 목재의 가열에 사용되는 에너지의 양이 증가되어 목재의 온도는 물의 끓는점인 100°C를 초과하여 계속 상승하게 된다. 한편, 건조종료 직전의 표면온도는 129°C로서 단판의 품질을 악화시킬 가능성은 없는 것으로 판단되었다.

Fig. 3의 마이크로파 출력 300 W와 100°C 열풍을 병용한 실험 결과를 보면 초기흡수율 160%에서 전건까지 약 7분 30초가 소요되었으며, 200 W의 경우와 마찬가지로 흡수율 30% 부근에서 표면온도가 100°C를 초과하였다. 그러나 건조종료 직전의 표면온도가 153°C에 이르러 단판의 과열에 따른 단판 품질의 악화 가능성이 있을 것으로 판단된다.

Fig. 4는 마이크로파 출력 600 W와 100°C 열풍을 병용한 결과로서 초기흡수율 100%에서 전건까지 단 3분이 소요되었으나 건조개시 2분 후 단판 표면의 온도가 150°C를 빠르게 초과하면서 표면에 연소에 의한 탄흔이 발생하였다. 따라서 과도한 출력은 품질에 커다란 악영향을 미칠 것이 확실시된다. Fig. 5는 단지 100°C 열풍만으로 건조한 결과로 건조초기 표면온도

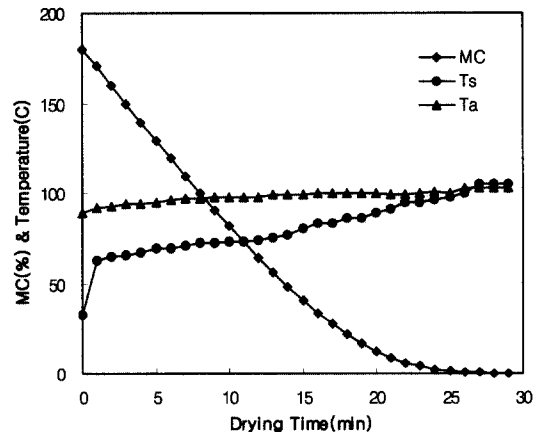


Fig. 5. Changes of moisture content(MC), surface temperature and air temperature during drying of 2.4 mm-thick radiata pine veneer with hot air only( $T_s$ : veneer surface temperature,  $T_a$ : air temperature).

가 60°C 수준까지 급격히 상승한 후 본격적으로 수분 증발이 진행되면서 온도 상승속도가 낮아졌으며, 초기 흡수율 179%에서 전건까지 약 30분이 소요되고 있다.

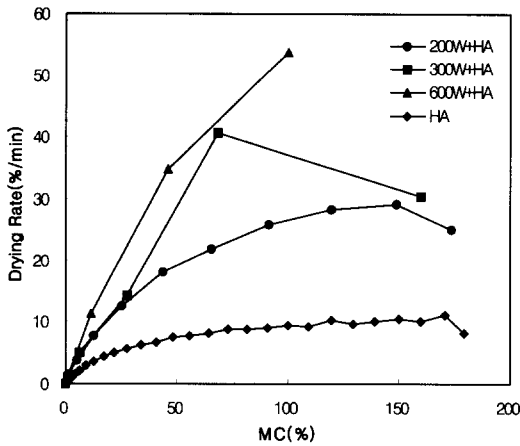


Fig. 6. Changes of drying rates with respect to moisture content(MC) during drying of 2.5 mm-thick radiata pine(HA : hot air of 100°C).

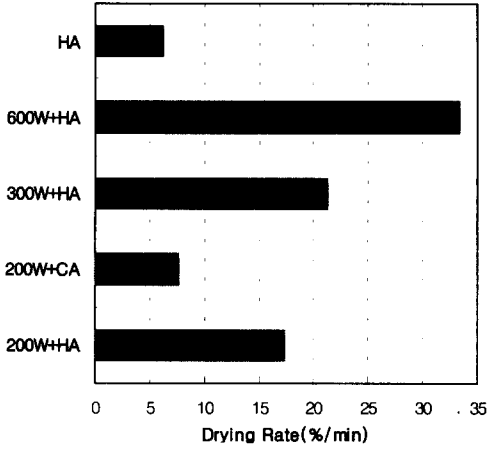


Fig. 7. Average drying rates according to microwave-power and air-conditions (HA : hot air of 100°C, CA : cold air at room temperature).

3.2. 건조속도

Fig. 6은 각 건조조건별 함수율에 따른 건조속도를 나타내고 있다. 출력 600 W를 제외하고는 각 건조방법별로 가열기간을 지나면서 건조속도가 상승하였다가 점차 감소되는 추세를 보이고 있다. 출력이 높을수록 건조속도 역시 높은 수준을 나타내었으며 단지 열풍만을 사용한 경우에는 예상대로 매우 낮은 건조속도를 나타내었다. 한편, 300 W나 600 W의 출력에서는 최대 건조속도 이후 건조속도가 급격히 감소하였으나 200 W의 저출력에서는 비교적 완만히 감소되고 있다. 특히, 섬유포화점으로 예상되는 함수율 30% 이하에서는 출력의 고저에 관계없이 건조속도가 비슷해지는 경향을 보이고 있다. 따라서 건조초기에는 고출력이 건조속도 극대화에는 유리하나 섬유포화점 이하에서는 낮은 출력을 적용하는 것이 에너지 절감 효과를 극대화할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 7은 각 건조조건별 평균 건조속도를 나타낸 것으로 열풍 단독의 경우 6.2%/min에 비하여 열풍과 함께 마이크로파를 사용한 것이 2.8배~5.4배에 이르고 있다. 200 W의 출력에 실온(36°C)의 냉풍을 사용한 경우에는 7.7%/min의 건조속도를 보여 열풍 단독 사용의 경우보다 약 1.2배의 건조속도 향상효과가 있

었으나 마이크로파와 열풍 병용의 경우에 비해서는 상당히 낮은 효과를 나타내었다. 따라서 본 실험의 결과에 비추어볼 때 냉풍보다는 열풍을 병용하는 것이 마이크로파 건조의 효과를 극대화할 수 있는 방법이라 판단된다. 이처럼 냉풍 사용시 효과가 감소되는 원인으로는 마이크로파로 가열될 재료 위를 냉풍이 흐르면서 에너지를 빼앗아 냉각시키므로써 수분 증발을 위한 충분한 에너지를 가해주지 못하기 때문으로 사료된다. 그러나 마이크로파로 가열된 재료의 온도와 거의 같은 온도 수준의 열풍을 병용한다면 가열된 재료로부터 공기로의 열손실이 없어서 대부분의 에너지가 수분의 증발에 사용될 수 있기 때문에 건조속도 향상과 함께 에너지 절감의 효과도 배가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Table 1는 생산성 향상을 위한 대책으로 6매의 단판을 포개어 출력 400 W와 100°C 열풍 조건에서 동시에 20분 동안 건조한 결과로서 예상대로 최상층 단판의 초기중량 대비 수분제거량이 가장 높았으며, 2번째 단판 역시 비교적 높은 비율을 나타내었다. 그러나 3번째 이하의 단판은 거의 비슷한 수준을 보였다. 한편, 400 W의 고출력에서 탄흔이 발생된 단판은 없었으며, 따라서 최상층의 단판이 완전 건조되었다고 하더라도 잉여 마이크로파 에너지가 나머지 미건조된

Table 1. Weight loss by evaporation of water from each veneer during microwave-hot air drying of a bundle of six-veneers

Veneer No.	Initial Weight (A)	Final Weight (B)	Water removed (A-B)	(A-B)/(A)
1	51.56	18.24	33.32	0.65
2	61.26	23.02	38.24	0.62
3	60.92	25.28	35.64	0.58
4	56.07	22.22	33.85	0.60
5	56.44	23.95	32.49	0.58
6	53.68	22.52	31.16	0.58
Total	339.93	135.23	204.70	0.60

단판으로 투입되는 선택적 가열 특성을 입증한 예로 판단된다.

### 3.3. 건조 단판의 품질

각 건조조건별 건조단판의 형상에서는 별다른 차이점은 발견할 수 없었으나 600 W의 고출력이 적용된 단판에서는 고온에 의한 탄흔이 발견되었다. 따라서 적정 수준 이상의 고출력 적용은 단판의 품질에 매우 치명적인 영향을 줄 수 있으며, 건조시간 단축과 에너지절감 및 생산성 향상을 전반적으로 만족시킬 수 있는 적절한 출력조건을 찾는 것이 가장 기본적인고도 중요한 과제로 사료된다. 일례로 田口 崇(1972) 등은 150℃ 이상의 고온으로 단판이 가열되면 치명적인 건조결함이 발생될 수 있다고 지적한 바 있으며, 단판의 온도를 기준으로 150℃를 초과하지 않는 조건의 탐색도 최적의 조건을 탐색하는 좋은 기준이 될 것으로 판단된다. 한편, 본 연구에서 사용된 단판의 규격이 매우 작아 단판의 주요 품질지표인 함수율 균일성, 끝말림 및 할렬 등에 대한 검토가 이루어질 수 없었다.

## 4. 결론

300 W의 마이크로파와 100℃ 열풍을 복합하여 두께 2.4 mm의 radiata pine 단판을 건조한 결과 100℃ 열풍만으로 건조한 경우에 비해 건조속도가 약 3배

이상 향상됨을 알 수 있었다. 따라서 마이크로파-열풍 복합 건조방법을 적용하면 단판 건조의 생산성을 비약적으로 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 그러나 고출력의 경우 건조시간은 더욱 단축되는 반면 탄흔 등의 결함이 발생되므로 단판의 규격이나 수종에 대한 적절한 마이크로파 출력 수준을 찾는 연구가 필요한 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

1. Corder, S. E. 1976. Energy use in an industrial veneer dryer. *Forest Products Journal* 6(9): 38~47.
2. Gruber, G. J. 1967. Practical aspects of microwave veneer drying. *The Journal of Microwave Power* 2(2): 51~59.
3. 이종영. 2000. 한국 합판·보드류 산업의 변화. 서울대학교 임산공학과 30주년 기념 산학연 심포지엄 논문집.
4. Olson, J. R. and D. G. Arganbright. 1983. Drying sweetgum veneer with combinations of impinging hot air and microwave energy. *Forest Products Journal* 33(5): 51~56.
5. Warner, H. C. 1966. Microwave processing of sheet materials. *The Journal of Microwave Power* 1(3): 81~88.
6. 吉田弥明, 田口 崇. 1972. 單板のマイクロ波乾燥. 日本北海島林業試験場報告.