

마이크로파 원목 건조 최적화에 관한 연구*1

이형우*2† · 김도형*2

Study on the Optimization of Microwave Log Drying*1

Hyoung Woo Lee*2† · Do Hyoung Kim*2

요 약

직경 20~30 cm의 원목을 마이크로파 건조하여, 건조속도와 건조 후 목재의 결함이나 문제점 등 원목의 건조 특성을 파악함으로써 마이크로파에 의한 원목건조조건을 최적화하고자 하였다. 출력 20 kw의 마이크로파 건조기는 건조 중 원목 내부온도에 기준하여 제어하였다. 소나무 원목의 경우 원목 내부온도가 120°C를 초과하지 않도록 제어한 결과 48시간 이내에 함수율 20% 미만까지 안전한 건조가 가능하였다. 건조곤란 수종의 하나인 참죽나무의 원목 경우 표면할렬이 심각하게 발생하여 원목상태로의 건조가 불가능하였다. 원목의 건조속도는 원목의 초기함수율이 높을수록 빨라짐을 보였다.

ABSTRACT

Logs with average diameters of 20~30 cm were dried with microwave to investigate microwave drying characteristic of log and determine the optimal drying conditions. Microwave dryer with output of 20 kW was controlled with respect to the temperature of log during drying. Japanese red pine logs with average diameter of 281.9 mm were dried safely by microwave to below moisture content of 20% within 48 hours. Chinese toon logs showed serious surface checks during microwave drying. Higher drying rates were found with higher initial moisture content.

Keywords: wood drying, log drying, microwave drying, *Pinus densiflora*, *Cedrela sinensis* Juss

* 1 접수 2009년 3월 3일, 채택 2009년 5월 21일

본 연구는 산림청 지원 2006년도 산림과학기술개발사업 임업특정연구과제로 수행되었음.

* 2 전남대학교 농업과학기술연구소. Inst. of Agri. Sci. & Tech., College of Agri., Chonnam Nat'l Univ., Gwangju 500-757, Korea

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

1. 서 론

현재 우리나라의 목재 수급은 대부분 수입재에 의존하고 있는 실정으로 최근의 자료를 보면 2006년도 원목을 기준으로 한 목재 공급량에서 수입재가 전체 공급량의 70%를 차지하고 있고, 목제품 수입을 포함한 실질적인 자급율은 9.2%에 불과하다. 국산재 원목의 소비구조는 제재 16%, 펄프·칩 21%, 보드 37%, 갯목 2%, 기타 24%로써 주로 저부가가치 용도로 이용된다[1]. 그에 반해 수입 원목은 건축재, 가구재, 합판 등 부가가치가 높은 용도로 이용되고 있어 국산재의 이용구성과 구별되고 있다.

이는 국산재의 전체 생산량의 약 75%정도가 III영급 이하인 (~30년생) 말구직경 16 cm 이하의 소경재이고[2], 대경재는 극히 적기 때문이다. 대경재 생산 비율이 낮기 때문에 중·소경재로서는 제재 생산성이 낮고 제제품도 치수가 작으며 웅이 등의 결점이 많아 고품질의 제제품을 생산하기 어렵다. 또한 소경재는 대부분이 수(pith)를 포함한 미성숙재가 주를 이루고 있어 물리적, 역학적 특성이 성숙재보다 떨어지고, 특히 수축과 팽윤의 이방성이 커서 건조 과정이나 마무리 가공 시 할렬, 뒤틀림 등의 결점이 발생하기 쉽기 때문에 생산된 제제품은 건축 가설재와 같은 건축물 축조의 보조재로 쓰이고 있는 실정이다[3].

따라서 국산 소경재는 제재목 생산보다는 소경 원목 그 자체를 그대로 사용하는 것이 수율을 극대화하는 동시에 부가가치 역시 극대화하는 방법이 된다고 할 수 있다. 그러나 건조대상 목재의 두께 또는 직경이 증대되면 될수록 건조가 어렵고 건조 중 심한 건조결함이 발생되어 수율이 낮아진다. 수가 포함된 미성숙재는 원초적으로 기계적 특성이 매우 열악하여 건조 중 건조결함이 빈번히 일어나는 문제가 있다.

건조결함은 건조응력과 밀접한 관계가 있고 건조응력은 단면 내 함수율 경사에 의해 가장 큰 영향을 받는다. 목재에 마이크로파를 조사하면 함수율이 높은 부분에 에너지 흡수가 더 많이 일어나므로 선택적 건조가 가능하며 목재 내층이 표층보다 먼저 가열되고, 내층수분이 표층으로 이동하기 때문에 표층

의 함수율이 내층보다 높아진다. 따라서 표층이 받은 인장응력이 일반 건조보다 작기 때문에 표층의 접선방향 인장응력 집중으로 인한 V형 크랙이나 횡단면할렬, 표면할렬을 예방할 수 있다[4]. 마이크로파건조는 두꺼운 목재에 효과적임에 반해 설비가 고가이고 수용재적이 적어 단위제적 당 건조비용이 증가하는 단점이 있지만 열기건조에 비해 건조시간이 짧기 때문에 동일 기간 내 건조공정 반복수를 늘릴 수 있다.

마이크로파를 목재 건조에 사용하려는 노력은 1960년대부터 시작되어 왔는데, 최근에 Antti는 주로 실험적 연구를 실시한 바 있다[5]. Perre 등은 마이크로파 발생장치의 형태가 건조에 미치는 영향에 대하여 연구하였으며[6], Zielonka 등은 열기건조와 마이크로파건조 시 온도분포를 예측할 수 있는 간이식을 발표하였다[7].

Yamada 등은 삼나무 중공재(hollowed-out timber)의 건조 시 발생하는 V자 할렬을 방지하기 위해 고주파와 마이크로파를 이용한 전처리에 대해[8], Fujimoto 등은 삼나무 원목과 수심 정각재의 마이크로파 건조 특성에 대하여 연구하였으며[9], Piao 등은 방부처리가 된 삼나무 원주재(round timber)의 마이크로파 건조, 열기 건조와 천연 건조에 대해 비교 연구 한 바 있다[10].

Hansson은 마이크로파건조가 목재의 강도, 경도 및 재색변화에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였으며[11], Brodie는 마이크로파건조와 태양열건조의 효과에 대해 발표한 바 있다[12].

강 등은 3 cm 두께 판재의 열기건조와 마이크로파-진공건조에 대해 비교 연구한 바 있으며[13], 이는 목재 단판의 마이크로파-열풍건조에 대해[14], 그리고 강 등은 수심정각재의 열기건조와 마이크로파 건조 중 함수율분포에 대해 연구한 바 있다[15].

본 연구에서는 마이크로파를 이용하여 직경 20~30 cm의 국산재 원목을 건조함으로써 건조 후 목재의 결함이나 문제점 등 원목건조특성을 파악하여 원목을 결함 없이 신속하게 건조할 수 있는 기술을 개발하여 국산 소경재 활용의 부가가치를 향상시키고자 하였다.



Fig. 1. Microwave dryer.

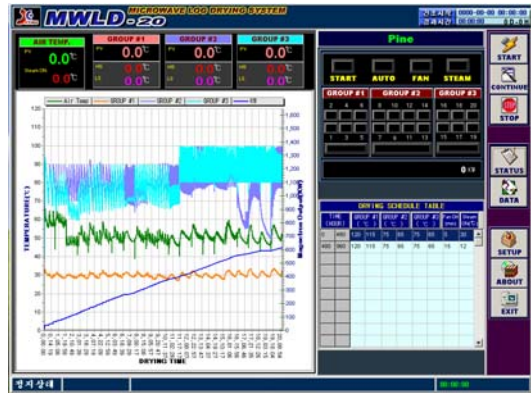


Fig. 2. Microwave dryer control program.

2. 재료 및 방법

2.1. 건조장치

수용능력 1 m³이고, 최장 4 m의 원목을 투입할 수 있는 건조장치(Fig. 1)를 사용하였으며, 건조장치 좌우에 각각 1 kW급 마이크로파 발진기(주파수 2450 MHz) 10개씩 총 20개를 장착하여 총 출력 20 kW가 되도록 하였다. 발진기를 건조장치의 좌우에 고르게 배치하여 마이크로파가 집중되는 현상을 최소화하고자 하였다. 만일 건조 장치에 원목을 가득 채울 수 없을 경우에는 설치된 발진장치의 일부만을 가동할 수 있도록 하였다.

본 실험 장치에 장착된 제어시스템은 PLC를 기반으로 하였으며, 컴퓨터를 통해 획득한 정보를 표시할 수 있도록 연결하였다. 본 마이크로파 건조 장치에 사용된 프로그램은 Fig 2와 같다.

2.2. 공시재료

본 실험에는 대표적인 국산 구조용재의 하나인 소나무(*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.)와 대표적인 가구용재의 하나이며 건조가 곤란한 수종으로 알려져 있는 참죽나무(*Cedrela sinensis* Juss)를 구입하여 공시원목으로 사용하였다. 실험에 사용된 원목의 평균 규격은 Table 1과 같다.

Table 1. Log dimensions and initial moisture contents of Japanese red pine and Chinese toon

Species	Length (m)	Diameter (mm)	Initial MC (%)
Japanese red pine	3.73	281.9	68.86
Chinese toon	1.82	235.4	49.36

2.3. 함수율 측정

공시재료의 원구와 말구부분에서 제취한 3 cm × 3 cm × 3 cm 시편을 원목별로 준비하여 전건법으로 초기함수율을 측정하였다.

2.4. 제어전략

마이크로파를 이용한 가열은 온도상승이 매우 신속하기 때문에 약간의 제어불능 또는 실수로도 국부적인 과열이 발생되어 runaway현상이 발생되므로 안전한 마이크로파 원목건조를 위해서는 치밀한 제어전략을 필요로 한다. Runaway현상은 국부적으로 열전도도가 매우 낮거나 또는 국부적으로 loss factor와 같은 유전특성들이 크게 증가되어 온도상승을 제어할 수 없을 경우에 발생된다.



Fig. 3. Loading logs into dryer.

일반적으로 열기건조에서는 목재의 함수율이나 건조시간을 기준하여 온습도를 달리 적용하는 건조 스케줄을 적용하고 있다. 그러나 마이크로파 건조에서는 건조장치 내에 함수율 센서를 장착하는 것이 불가능하다. 또한, 열기를 이용할 경우에는 외부에서 가열기의 on/off 만을 제어하여도 목재의 온도를 안전한 수준에서 유지할 수 있지만 마이크로파 건조에서는 목재의 온도를 직접적으로 측정해야만 제어가 가능하다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 건조장치 내 투입되어 있는 원목에 온도센서(K-type thermocouple)를 직접 삽입하여 건조 중 온도를 측정하고 상한온도와 하한온도를 설정하여 설정온도 사이에 원목의 온도가 유지되도록 제어하였다.

한편, 마이크로파 에너지 투입량과 수분증발량의 사이의 관계를 파악하기 위하여 건조과정 중 사용된 누적 전력량을 측정할 수 있도록 하였다.

2.5. 실험방법

건조 전 원목의 초기 함수율을 측정한 후 직경에 따라 2~3개씩 분류하여 그룹을 지었고 건조기 내에 쌓여진 순서에 따라 시료 A, B, C라 하였고, 중앙에 위치한 시료 B의 중심부에 온도센서를 삽입하였는데 소나무의 경우 3개의 온도센서를 참죽나무의 경우 2개의 온도센서를 사용하였다. 온도센서로부터



Fig. 4. Runaway phenomenon inside log.

측정된 목재내부온도를 건조기 출입구 쪽부터 온도 1, 2, 3이라 하였고, 이들 센서로부터 측정된 온도가 설정한 온도로 유지되도록 마이크로파 발진장치를 자동제어하였다.

건조 중 increment borer를 이용하여 각 부위별 시편을 채취하고 진건법에 의하여 함수율을 측정하였다. 그러나 원목에 따라서는 국부적인 함수율 차이로 인하여 정확한 함수율 측정이 불가능하다고 판단되어, 참죽나무의 경우 원목의 전체무게를 측정하여 함수율을 추정하는 방법을 사용하였다.

건조종료 후 정확한 함수율을 측정하기 위해 일정 간격으로 횡절, 시편을 채취한 후 시편을 만들어 진건법으로 최종함수율을 알아보았다. 그리고 최종함수율을 이용하여 함수율변화를 추정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 소나무 원목의 마이크로파 건조

1차 실험은 초기함수율 65~79%인 소나무 3본을 원목내부 온도 130~100°C로 설정하여 건조한 결과 초기에 급격한 가열을 보이며 약 27시간 후 함수율 10~24% 수준으로 떨어졌으나 원목의 국부적인 과열로 인한 Runaway 현상으로 Fig. 4와 같이 탄화가 진행되어 건조를 중단하였다.

온도 설정이 1차 실험의 실패 원인으로 추정되어

Table 2. Temperature schedule for the 3rd test of microwave drying of Japanese red pine logs

Step	Start (Hour)	Finish (Hour)	Set temperature	
			High (°C)	Low (°C)
1	0	11.69	120	100
2	11.69	23.21	110	100

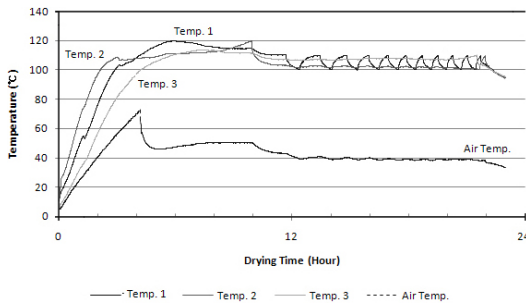


Fig. 5. Temperature changes in Japanese red pine logs during the 3rd microwave drying test.

2차 실험에서는 설정온도를 각 105~100°C로 설정하여 동일한 방법으로 실험을 수행하였다. 초기 함수율 79~65%인 시료가 약 6시간 후 함수율 40~47%를 나타내었으며, 약 48시간 후 함수율은 23~33% 수준으로 떨어졌다.

온도의 하향조정으로 탄화에 대한 위험은 없었으나, 함수율 40%까지는 함수율이 급격히 감소하였으나 40%부터는 건조속도가 급격히 낮아졌다.

따라서 3차 실험에서는 2차 실험의 조건으로는 만족할 만한 수준의 건조속도를 얻을 수 없을 것으로 판단하여 Table 2에서처럼 약 12시간까지는 120~100°C로 설정하고, 건조후기의 국부적인 과열에 의한 탄화를 방지하기 위해 110~100°C로 설정하여 실험을 수행하였다.

Fig. 5는 3차 실험과정 중 원목 내부 온도와 건조기 내 공기온도 변화를 보여주고 있다. 공기온도는 건조초기 급격한 가열에 의하여 발생된 증기에 의해 약 70°C까지 상승한 이후 증기발생량이 줄어들면서 더 이상은 70°C를 초과하지 못하였다. 이와 같은 상

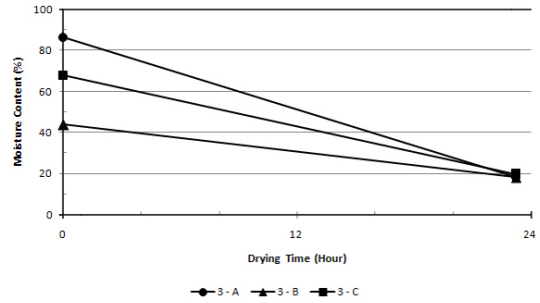


Fig. 6. Moisture content changes of Japanese red pine logs during the 3rd microwave drying test.

Table 3. Temperature schedule for the 4th test of microwave drying of Japanese red pine logs

Step	Start (Hour)	Finish (Hour)	Set temperature	
			High (°C)	Low (°C)
1	0	12.00	120	100
2	12.00	15.72	100	90
3	15.72	87.69	105	100

황은 결국 원목을 둘러싸고 있는 공기의 온도가 원목 내부온도보다 상당히 낮음으로써 오히려 원목 내부로부터 공기 중으로 열이 손실이 일어날 수 있음을 의미한다. 즉, 공기순환에 의한 열손실이 원인으로 판단되었다.

Fig. 6은 시료의 함수율 변화로, 86~43%의 초기 함수율이 약 24시간 동안 18%로 급속히 감소하였지만 3차 실험에서도 부분적인 탄화가 일어나 실험을 중단하였다.

그러나 Fig. 6의 함수율 변화를 보면 각기 다른 시료의 함수율이 건조후반으로 가면서 같은 수준의 함수율로 수렴함을 알 수 있었으며, 이는 마이크로파 건조에서 고함수율의 원목이 저함수율 원목보다 상대적으로 건조속도가 빠름을 의미하고 있다.

4차 실험에서는 조건을 세분화해서 실험을 행하였다. 그 조건은 Table 3과 같이 3단계를 적용하였다. 건조초기 12시간과 12~16시간, 그리고 16시간 이후로 나누어 내부 온도의 상한과 하한 값을 각각

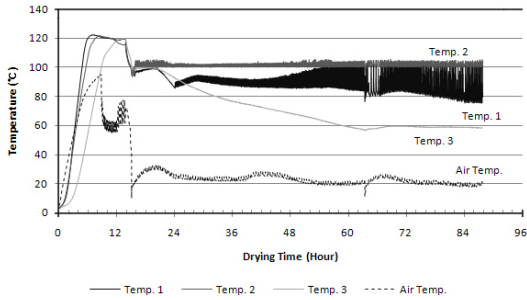


Fig. 7. Temperature changes in Japanese red pine logs during the 4th microwave drying test.

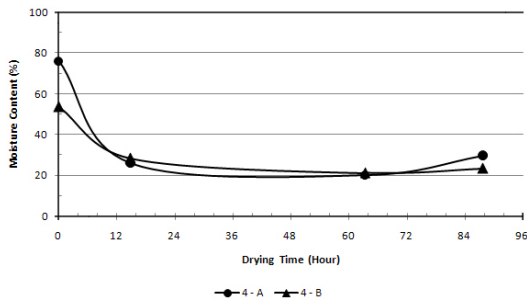


Fig. 8. Moisture content changes of Japanese red pine logs during the 4th microwave drying test.

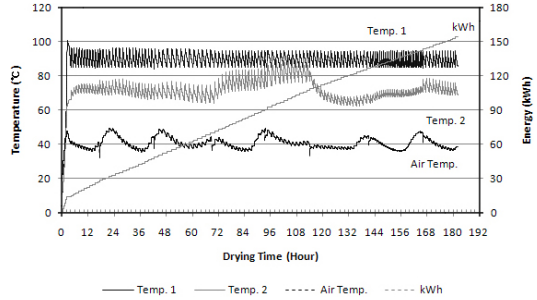


Fig. 9. Temperature changes in Chinese toon logs during the 1st microwave drying test.

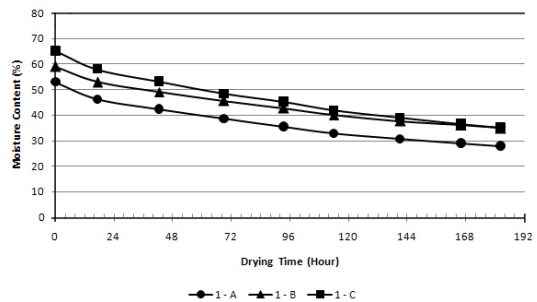


Fig. 10. Moisture content changes in Chinese toon logs during the 1st microwave drying test.

120°C와 100°C, 100°C와 90°C 및 105°C와 100°C로 설정하였다.

Fig. 7은 건조 과정 중 온도변화를, 그리고 Fig. 8은 시료의 함수율 변화를 보여주고 있다. 건조 초기에 급격한 함수율 감소를 보이며 약 48시간 내에 함수율 20%까지 감소함을 보여주고 또한 20% 부근에서는 함수율 감소가 더더짐을 보여준다.

건조원목의 내부 함수율 분포를 확인하기 위해서 시료를 절단해 전건법에 의해 함수율 분포를 확인해본 결과 목재 내 함수율은 양 끝 2~3개 부위에서는 비교적 높게 나타났지만 가운데 6개에서는 함수율 10% 이하까지 건조 됐음을 알 수 있었다. 이러한 이유로는 건조 중 원목의 중심부에서 발생된 수증기가 가도관을 따라 이동하면서 수분이 양끝으로 물리는 현상 때문으로 추정된다.

3.2. 참죽나무 원목의 마이크로파 건조

참죽나무 원목의 마이크로파 건조 실험에서는 건조 중 1일 1회씩 건조를 중단하고 원목의 무게를 측정하여 원목의 함수율을 추정하였으며, 이후 건조가 완료된 후 시편을 채취하여 전건법으로 함수율을 보정하였다.

참죽나무 원목을 대상으로 실시한 1차 실험에서 건조 조건을 95°C~85°C로 설정하였는데, 이는 참죽나무가 소나무에 비해 건조가 매우 곤란한 수종으로 알려져 있어 소나무에 비하여 비교적 낮은 온도 조건을 적용하여 건조속도를 지연시키고자 하였기 때문이다. 실험결과 Fig. 10과 같이 초기함수율 약 60% 수준에서 함수율 30% 수준까지 약 180시간이 소요되었으며, 건조 중 원목의 상태를 육안으로 점



Fig. 11. Dried Chinese toon logs.

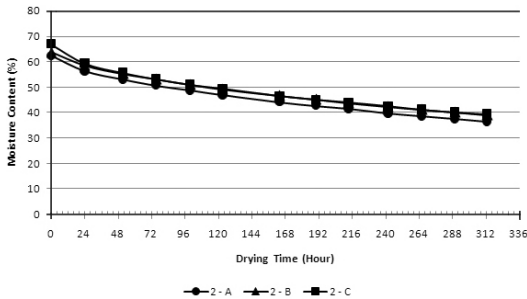


Fig. 12. Moisture content changes in Chinese toon logs during the 2nd microwave drying test.

검한 결과 Fig. 11과 같이 심한 건조결함이 관찰되어 더 이상의 건조과정을 진행하지 않았다.

2차 실험에서는 1차 실험에서 심각한 건조결함이 발생하였으므로 건조 결함을 최소화하기 위하여 온도조건을 75°C~65°C로 낮추어 설정하였다. 설정온도가 매우 낮은 수준이었으므로 초기 함수율 약 60%에서 함수율 40% 수준까지 건조하는데 약 312시간이 소요되어 마이크로파를 적용하는 효과를 거의 얻을 수가 없었다.

Fig. 13은 참죽나무 건조 1, 2차 실험에서 건조단계별 에너지투입량 대비 수분증발량과의 관계와 함수율을 나타냈다. R²값이 0.891로 상관관계가 비교적 높음을 알 수 있었다.

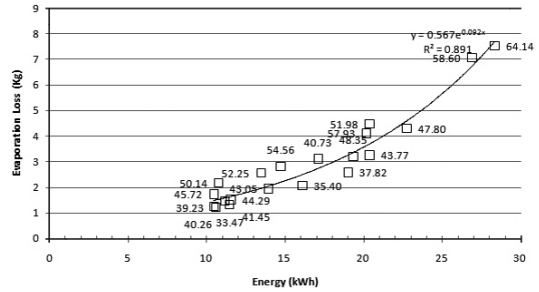


Fig. 13. Relationship between input energy and amount of water evaporated during drying.

4. 결론

본 연구는 마이크로파를 이용한 원목건조 시스템의 개발을 위한 실험의 일부로 실시되었다. 국산 소나무 원목을 대상으로 한 경우 비교적 마이크로파 건조특성이 양호하여 별다른 건조결함 없이 신속하게 건조할 수 있었다.

그러나 건조곤란 수종의 하나인 참죽나무 원목을 대상으로 한 건조실험의 경우 표면 할렬이 심하게 발생하여 원목을 정각재의 형태 또는 제재목의 형태로 재단하고 틀어짐 발생 억제장치를 장착하여 건조하는 것이 보다 신속하고 건조결함을 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

참고 문헌

1. 산림청. 2008. 목재 수급 및 실적. <http://www.forest.go.kr>
2. 권구중, 김남훈. 2002. PEG처리에 의한 국내산 주요 소경재의 치수안정화에 관한 연구. 목재공학 30(1): 40~47.
3. 이춘택. 1993. 소경재의 이용방안. 목재공학 21(3): 65~73.
4. Resch, H. 1968. Microwave for the drying of wood products. Holz als Roh-und Werkstoff 26(9): 247~249.
5. Antti, L. 1999. Heating and drying wood using microwave power. Doctoral thesis. Div. of Wood Physics, Luleå University of Technology.
6. Perre, P. and I. W. Turner. 1999. The use of nu-

- merical simulation as a cognitive tool for studying the microwave drying of softwood in an over-sized waveguide. *Wood Sci. & Tech.* 33(6): 445~464.
7. Zielonka, P. and E. Gierlik. 1999. Temperature distribution during conventional and microwave drying. *Holz als Roh-und Werkstoff* 57(4): 247~249.
 8. Yamada, N., S. Okumura and Y. Taniguchi. 2001. High-frequency and microwave heating as a pretreatment of kiln drying of hollowed timber. *Mokuzai Gakkaishi* 47(6): 501~507.
 9. Fujimoto, N., Y. Morita, T. Oouchi, H. C. Lin, K. Oohashi, and K. Kondo. 2005. Drying of sugi Logs with microwave heating. *J. soc. Mat. Sci., Japan*, 54(4): 371~376.
 10. Piao, J., N. Fujimoto, K. Oohashi, M. Tanikawa, M. Kitada, H. Sonobe, and Y. Ueda. 2006. Drying Properties of Sugi Round Timber with Microwave Heating. *J. Fac. Agr., Kyushu Univ.* 51(2): 345~349.
 11. Hansson, L. 2007. Microwave Treatment of Wood. Doctoral thesis. Div. of Wood Physics, Luleå University of Technology.
 12. Brodia, G. 2008. Innovative Wood Drying - Applying microwave and Solar Technologies to Wood Drying. VSM Verlag Dr. Müller.
 13. 강호양. 2003. 은사시나무 판재의 열기건조, 고온건조, 마이크로파-진공 건조. *목재공학* 31(4): 31~37.
 14. 이형우. 2004. 목재단판의 마이크로파-열풍 병용건조 1: 뉴질랜드산 라디아타 소나무 단판의 건조특성. *목재공학* 32(1): 45~51.
 15. 강욱, 이형우, 정우양. 2006. 소나무 수심정각재의 건조 중 3차원 함수율 분포와 변이. *목재공학* 34(1): 7~14.