

Internal Wood Temperature Manipulation Using Quadratic Residue Diffusor Microwaves

Ki-Ho Kim, Kyung-Min Kim*

Division of Plant Biosciences, School of Applied Biosciences, College of Agriculture and Life Science, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

Quadratic Residue Diffusor Microwave를 이용한 목재의 내부 온도변화에 관한 연구

김기호 · 김경민*

경북대학교 농업생명과학대학 응용생명학부

Abstract

In contrast to conventional microwaves, QRD (Quadratic Residue Diffusor) microwaves are a new energy-efficient technology that enhances the effect of sterilization based on changing the wavelength phase difference. Therefore, this study investigated the sterilization of wood using environmentally friendly and low energy consuming QRD microwaves. The results are as follows: for the QRD microwaves used in this study, the efficiency $E = 5.75e0.32 S$ ($R^2=0.908$). Although the early water content was not constant, the average water content was 30.3% and after one week of natural drying, the water content was 22.6%, representing an average water content reduction of about 8%. When increasing the microwave level from 3 kW ~ 9 kW, the time taken for the temperature to increase was reduced. After the QRD microwave treatment, the wood samples showed no change in their flexural rigidity, compressive strength, or cleavage. The QRD microwave levels used in the experiments were 3, 5, 7, and 9 kW, where 9 kW was found to be the most efficient. Thus, for the purpose of eliminating nematodes and termites inside wood, a higher QRD microwave level was found to be more effective and energy efficient.

Keywords : Compressive Strength , Efficiency, Flexural rigidity , Magnetron, QRD Microwave

서 론

산업적으로 산림자원이 절대부족 한 우리나라는 목재 대부분을 수입의존 하고 있다. 그러나 목재수입으로 인한 수출국의 목재 토속병해충으로부터 많은 환경적 피해를 입고 있어 그 대책으로 열적 소독 및 메틸브로마이드를 이용한 화학적 방식의 검역소독을 주로 하고 있다. 하지만 고온 살균하거나(Wilson 1988), 마이크로필터, 광촉매를 주로 이용하기 때문에 가격이 매우 비싸고(Lee 1999; Lee 2007; Miyama et al. 2002; Chung et al. 2010; Kwon et al. 2013), 전 세계적으로 가장 많이 사용하는 화학적 훈증소독제인 메틸브로마이드(CH_3Br)는 오존층을 파괴하는 물질로 1989년 발효된 몬트리올 의정서에 의해 선진국은 2005년부터 전면 사용 금지되고 있으며 개발도상국은 2015년부터 전면 사용금지가 된다.

최근 화학적 방식의 피해 사례로써 인천항을 통해 수입되는 원목과 식물소독에 의한 기체상태의 메틸브로마이드

가 호흡기와 피부, 눈을 통해 인체 내 흡수, 누적되어 메틸브로마이드 말초신경병 의증으로 판정되기도 하고 손, 발 저림, 어지러움, 다리마비 증상을 호소하고 있다. 환경 피해사례로는 브롬화메탄($CHBr_4$) 및 메틸브로마이드(CH_3Br)를 이용한 검역소독에 기체형태 분사되어 대기 오존층을 파괴하기도 한다. 따라서 종전의 메틸브로마이드를 이용한 훈증소독이나 열원을 이용한 열처리 검역소독 및 기타 화학 작용제 방식은 보다 새로운 방식으로 전환할 필요가 있다.

이에 마이크로파를 이용한 저온멸균 방식이 새로이 대두되고 있다. 마이크로파 에너지 멸균방법은 특수발열 효과와 비발열 효과에 의해 진행된다. 그러므로 기존의 열에 의한 멸균방법과 비교하면 짧은 시간과 저온에서 멸균할 수 있다(Park 2005). 따라서 목재의 이화학적 특성의 변화를 줄이고, 에너지도 30%~50% 절약할 수 있다. 또한 마이크로파는 피가열물에 직접 가열·건조하기 때문에 불

Received: January 15, 2014 / Revised: March 13, 2014 / Accepted: March 25, 2014

*Corresponding Author: Kyung-Min Kim, Tel. 82-53-950-5711, Fax. 82-53-958-6880, Email. kkm@knu.ac.kr

©2012 College of Agricultural and Life Science, Kyungpook National University

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, Provided the Original work is Properly cited.

필요한 열에너지 소모가 없다. 뿐만 아니라 가열시스템 (Chamber) 및 용기자재가 가열되지 않는 특징이 있다. 본 연구에서 사용한 QRD (Quadratic Residue Diffusor) Microwave는 일반적인 Microwave와 달리 파장의 위상차를 변화시켜 균일한 살균을 유도할 수 있어 저전력으로 효과를 높일 수 있는 새로운 기술로 알려져 있다. 따라서 친환경적이고 에너지 소비가 적은 QRD (Quadratic Residue Diffusor) Microwave를 이용하여 목재의 내부 온도변화 추이를 통하여 목재 토속병해충을 멸균할 수 있는 가능성에 대한 기초적인 연구를 수행하고자 하였다.

재료 및 방법

일반 Microwave와 QRD Microwave의 특성 비교

본 연구에 사용한 Microwave는 주파수 2,450 MHz이며 Figure 1과 같이 일반 Microwave는 파형의 위상차가 나타나는 부분에서 가열이 일어나 불균일(Mode)현상이 나타난다. 이 Mode현상은 금속체에 조사 될 경우에는 방전(Spark)이 발생하게 된다. 따라서 Microwave 조사 위치에 따라 에너지 불균일 현상이 나타나 살균작용이나 건조작용, 식품의 가열, 냉동식품의 해동 및 식품의 간이살균에 비효율

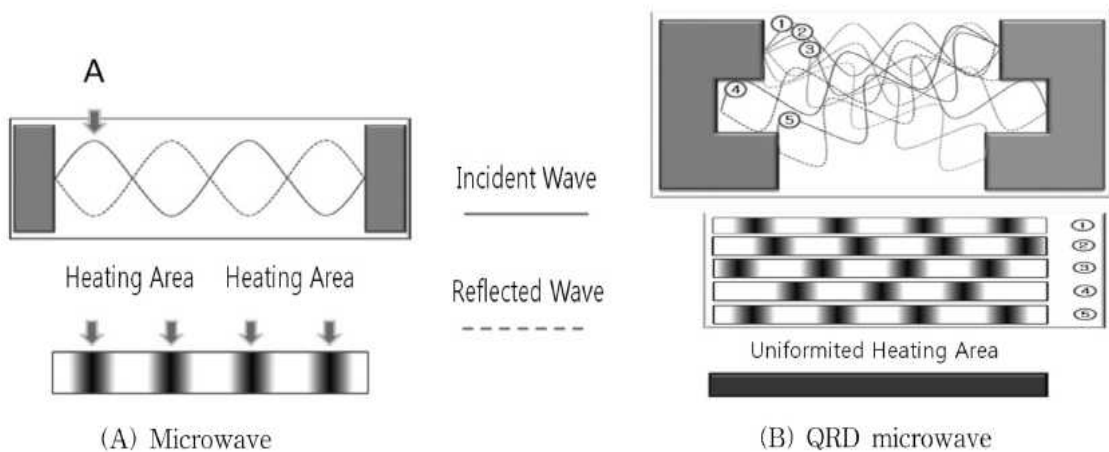


Figure 1. Characteristic comparison between conventional and QRD microwaves

Table 1. Specifications of Magnetron 2M246

Anode Average Current (A)	Anode Voltage (V)	Filament Current (A)	Filament Voltage (V)	Frequency (MHz)	Dimensions (mm)	Weight (kg)	Power Supply System	Cooling System
330	4.4	10	3.15	2,460	93.2×127×133	0.9	Transformer	Air

Table 2. Efficiency according to magnetron treatment

Microwave level (kW)		3 kW	5 kW	7 kW	7 kW
T2-T1(°C)	1	33.1-28.2	43-28.6	56.3-29.3	61.3-29.5
	2	32.5-27.0	43.7-27.6	56.1-27.3	61.0-26.8
	3	31.7-26.5	41.0-26.6	52.9-26.5	62.2-27.4
Temperature Difference	1	4.9	14.4	27	31.8
	2	5.5	16.1	28.8	31.8
	3	5.2	14.4	26.4	34.8
Efficiency	1	0.087	0.256	0.48	0.565
	2	0.097	0.286	0.512	0.608
	3	0.092	0.256	0.469	0.619

성을 나타낸다. 반면에 QRD Microwave는 Magnetron에서 발생하는 고주파를 Diffusor라는 요철판으로 파형의 위상을 변화시킴으로써 균일한 에너지가 방출된다. 특히 열전도성이 낮은 유전체의 가열에 매우 효과적이다(Figure 1)

실험장치

QRD Microwave 실험장치는 가로×세로×높이 각각 1.27×0.72×1.32 m로 자체 제작하였다(Figure 2). Diffusor는 Chamber의 벽면에서 나오는 Microwave의 파형을 위상을 변화시켜 Chamber 내부의 균일한 고주파가 발생되도록 한다(Figure 1). Magnetron 2M246의 사양은 Table 1과 같다.

온도 측정시스템

온도측측을 위해 사용된 시스템은 온도계측용 인터페이스(AX5232, AXIOM, Taiwan) 1장을 12-Slot용 산업용 컴퓨터(AX6150A, AXIOM, Taiwan)에 설치하고, RS232C를 통하

여 시스템 컴퓨터에 입력되도록 하였다. AX5232는 총 32 Points의 온도와 전압을 계측할 수 있으나, 본 실험에서는 15 Points를 계측하였다. Board상에서 영점보상(Cold Junction Compensation)과 12 bit의 분해능, Sample 비 100 MHz의 성능을 가지고 있다. 그리고 계측을 위한 프로그램은 SCADA방식의 Wizcon 7.02(PCSOFT, Israel)를 사용하였다. 또한 시스템 전체의 관리와 온도변화를 측정 및 기록하는 스테이션은 586컴퓨터를 사용하였으며, T-type 열전대로 측정된 자료를 AX5232 컨버터를 통하여 산업용 컴퓨터(MODICON, IBM, Korea)에서 일시 기억 후 RS-232C 직렬 통신케이블을 통하여 시스템 컨트롤 스테이션에 실시간으로 기록되도록 하였다.

QRD Microwave의 조사방법

가열실험을 수행하기 위해 QRD Microwave 조사는 Magnetron 용량을 3 kW, 5 kW, 7 kW, 9 kW로 나누어 공급하였다.

Table 3. Early water content in wood and one week later

Division	No.	Microwave Level (kW)	Water Content (%)			
			T1	T2	T3	T4
Before Drying	1	3	28.7	26.1	26.8	48.3
	2	5	26.0	25.0	28.2	42.4
	3	7	38.9	24.1	24.2	32.0
	4	9	36.3	25.1	24.3	29.1
	Average			32.5±6.1 ^a	25.1±0.8	25.9±2.0
After Drying	1	3	22.5	22.3	25.0	25.3
	2	5	25.9	24.9	26.6	42.4
	3	7	19.9	16.6	14.2	12.4
	4	9	21.3	19.6	18.1	24.7
	Average			22.4±2.6	20.9±3.6	21.0±5.8

^a. mean±SD



Figure 2. Temperature measuring device for QRD microwaves and positions of QRD microwave magnetrons (Left: 5 kW, Right: 4 kW).

목재의 내부 온도변화 실험

실험에 사용한 목재는 미송(*Pseudotsuga menziesii*)이며, 가로×세로×높이가 각각 25×20×20 cm로 규격을 설정하였으며 목재 샘플은 4개를 준비하였다(Figure 3). QRD Microwave 조사에 의한 목재의 온도를 측정하기 위한 위치는 Figure 3와 같이 나이트의 중심인 수심에서부터 심재, 변재, 수피로 나누어 깊이 80 mm의 위치에 6 mm의 구멍을 뚫어 그 내부의 온도를 각각 T1, T2, T3, T4로 설정하여 측정하였다. 목재의 무게는 실험 전에 측정하고 실험 후 30분이 경과된 시점 즉, 가열된 목재를 식힌 이후에 다시 측정하였다. 이때 목재의 위치 별 온도 변화와 함수율의 변화를 동시에 측정하였다. 또한 동일한 목재를 자연 건조시켜 약 4주 후에 동일한 방법으로 실험하였다. 목재의 수분 함수율 측정은 수분측정기(CEM DT-129, China)를 사용하였다.

목재 강도 시험

목재 강도 시험은 KTR 한국화학융합시험연구원에서 목

재의 휨강도, 압축강도, 할렬(check) 3가지를 목재 강도를 측정하였다. 목재 4가지를 3 kW, 5 kW, 7 kW, 9 kW 처리 전과 처리 후로 하여 목재 강도 시험하였으며 휨강도는 3x3x40 cm크기로 수심, 변재, 수피부분 3군데 측정하였고 압축강도는 3x3x6 cm크기로 수심, 변재, 수피부분 3군데 측정하였고 할렬은 무작위로 4군데 실험하였다.

결과 및 고찰

마이크로웨이브는 전기 에너지를 물분자의 운동에너지로 전환되고 다시 열에너지로 변환된다. 마이크로웨이브 출력 에너지 열량은 일반적으로 860 kcal/kW이다. 또한 Magnetron 제조사의 기술력에 따라 성능차이가 차이가 나타날 수 있고 뿐만 아니라 전기 에너지가 마이크로웨이브로 변화 시 손실은 20~30% 정도 줄어든다. 따라서 전기에너지

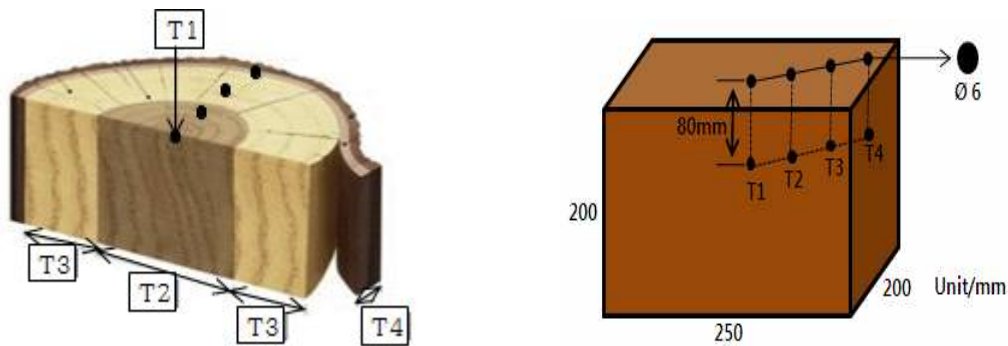


Figure 3. Temperature measurement locations in wood sample and standard.

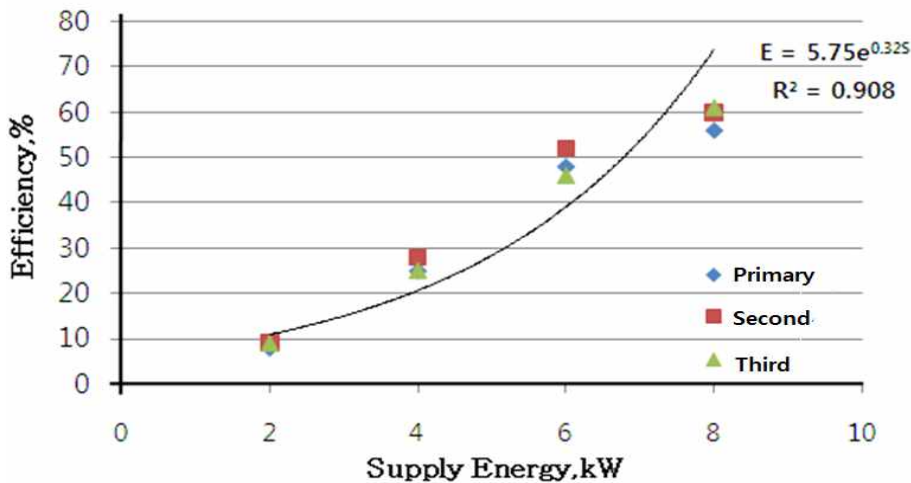


Figure 4. Efficiency according to magnetron treatment.

Table 4. Wood strength test results before QRD microwave treatment

Characteristic	3 kW	5 kW	7 kW	9 kW	Average
Flexural Strength (N/mm ²)	62.71±10.00 ^a	82.49±1.90	73.64±0.52	70.91±18.12	72.44±8.16
Compressive Strength (N/mm ²)	60.55±8.07	82.49±1.90	53.02±3.59	60.08±13.41	57.54±3.51
Cleavage	-	-	-	-	-

^a. mean±SD

Table 5. Wood strength test results after QRD microwave treatment

Chararistic	3 kW	5 kW	7 kW	9 kW	Average
Flexural Strength	75.48±2.92 ^a	84.91±1.87	74.52±3.58	76.75±0.69	76.75±4.75
Compressive Strength	62.23±9.84	52.75±5.21	68.28±6.54	60.23±2.03	60.87±6.41
Check	-	-	-	-	-

^a. mean±SD

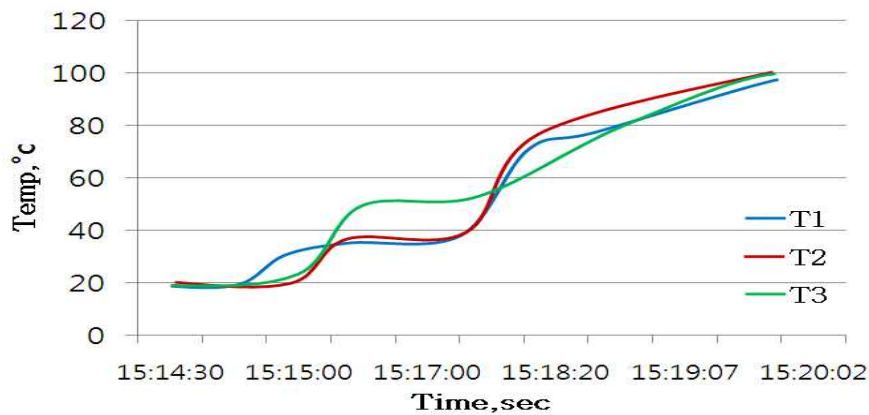


Figure 5. Rate of temperature increase to 100°C with magnetron treatment at 9 kW.

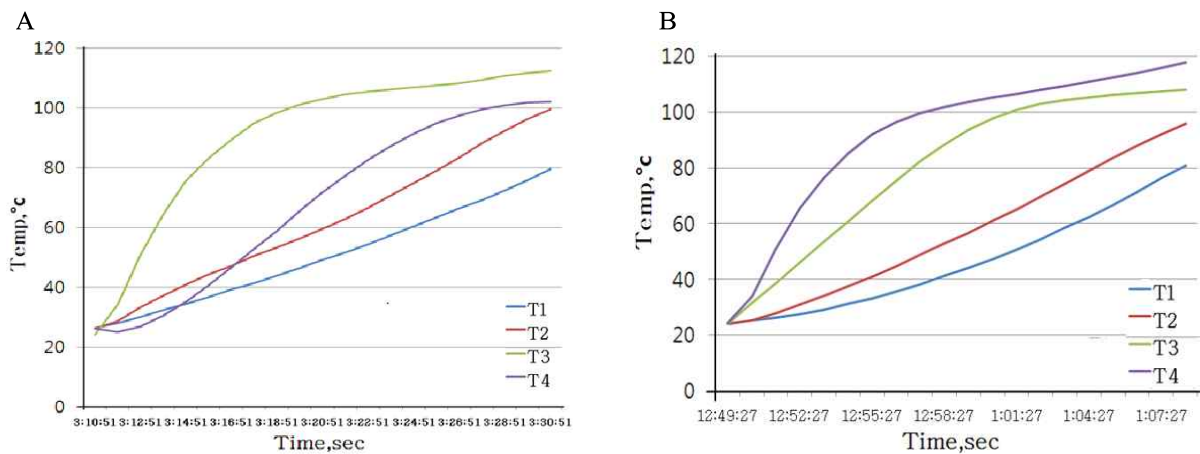


Figure 6. Lumber temperature change after magnetron treatment at 3 kW.

A: before drying, B: after drying.

1 kW는 약 602~688 kcal의 열량으로 산출된다. 본 연구에서는 실험용 QRD Microwave의 효율성을 용량별로 실험하였다. 실험은 물 500 ml를 Magnetron 3, 5, 7, 9 kW를 각각 조사하고 3차례 실험한 결과는 Table 2와 같다. 또한 Magnetron 용량에 따른 효율성의 상관식은 $E=5.75e0.32 S$ 로 나타났으며 R^2 값은 0.908로 높은 상관관계를 보여주고 있다(Figure 6). Figure 5는 QRD Microwave를 최대 9 kW 조사하고 목재의 내부 위치 1, 2, 3에서 100°C 상승하는데 소요시간을 나타내고 있다. 목재의 위치에 따라 수분 함수율이 다소 차이가 있어 조사 120~240 sec 사이에는 위치 별 온도가 뒤바뀌기도 하지만 약 300 sec 소요 이후에는 모두 100°C로 상승하였다. 또한 150 sec 이상에서 수심, 심재, 변재의 온도 변화가 거의 일정하게 상승되는 것은 목재의 밀도나 함수율 등의

물리적인 조건이 비슷한 것으로 보여진다. QRD microwave의 조사할 경우 목재의 온도상승 조건은 수분함량에 크게 좌우된다. 시험 전 초기 수분함량은 수피에서 수분함량이 가장 높았고, 심재와 변재가 가장 낮게 나타났다. 1주일 동안 자연 건조 후에도 비슷한 양상으로 나타났다. 수심, 심재, 변재, 수피의 수분함량이 목재 별 균일하게 설정하기가 매우 어렵다. 따라서 실험에 사용한 목재의 수분 함수율을 위치 별로 조사하고 실험결과와 비교 분석하였다. 또한 목재를 인위적으로 건조시키지 않고 실험실에서 1주일간 자연 건조시켰으나 목재의 위치 별 건조율은 일정하지 않았다. 이것은 목재의 위치 별 밀도나 물리성에 따라 균일성이 다른 결과로 추정되었다. 목재의 전체 평균 초기 수분 함수율은 30.3%이었고 자연건조 1주일 후의 수분 함수율은 22.6%로써 평균 약 8% 수분함량

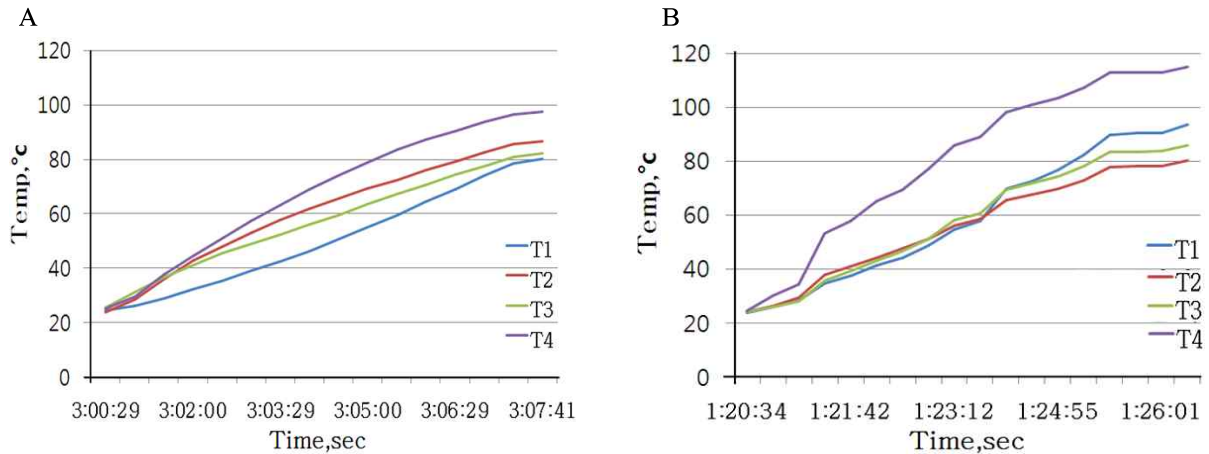


Figure 7. Lumber temperature change after magnetron treatment at 5 kW. A: before drying, B: after drying.

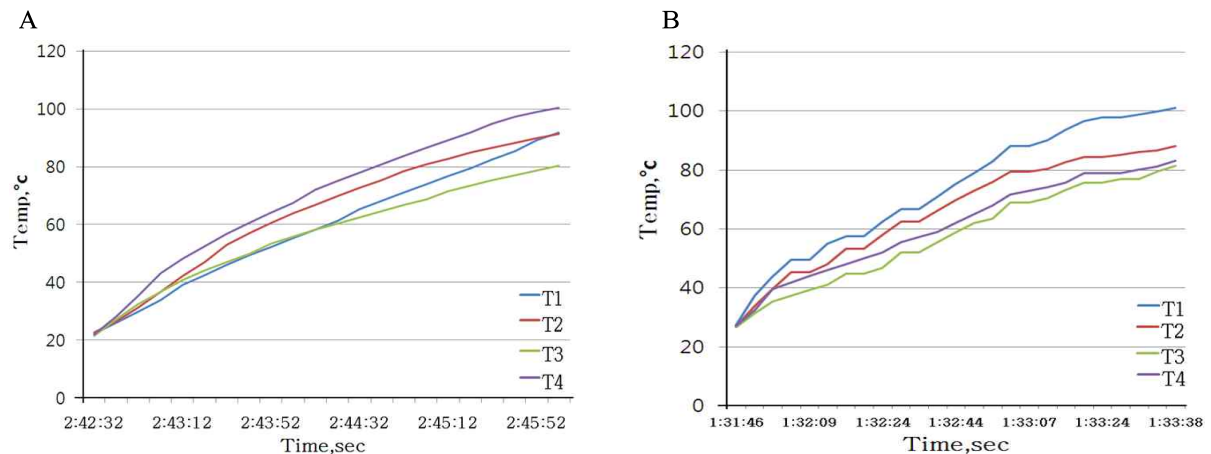


Figure 8. Lumber temperature change after magnetron treatment at 7 kW. A: before drying, B: after drying.

이 줄어들었다(Table 3,7)

Figure 6은 건조 전후의 마그네트론 3 kW 조사할 경우 목재의 수심, 심재, 변재, 수피의 온도가 80°C 이상 상승하는데 소요되는 시간을 나타내고 있다. 목재의 내부 온도를 80°C로 기준한 것은 목재 내부에 기생하는 선충이나 흰개미 등의 유해충을 멸균하는데 적정 온도로 판단된다. 그림에서와 같이 마그네트론 3 kW 조사할 경우 목재의 변재에서는 300 sec 정도에서 80°C로 상승한 반면 수피와 심재의 순으로 온도가 빠르게 상승하였다. 목재의 제일 내부인 수심에서는 1,200 sec가 소요되었다. 이와 같이 수심에서 가장 늦게 온도가 상승한 것은 마이크로파가 내부 침투성이 외벽보다 떨어지는 것으로 볼 수 있다. 또한 변재가 외벽보다 빨리 온도가 상승한 것은 목재의 내부 함수율이 수피에서 높음에도 불구하고 반드시 비례하지 않음을 알

수 있었다. 1주일 건조 후의 1,140 sec로 약간 짧아졌고 수심과 심재는 비슷하였다. 반면에 변재와 수피의 온도변화는 다른 결과로 나타났다. 이것은 목재의 건조 불균일이나 재질의 물리성 등에 따라 차이가 있는 것으로 보여진다. Figure 7은 건조 전 후의 마그네트론 5 kW 조사 할 경우 목재의 수심, 심재, 변재, 수피의 온도가 80°C 이상 상승하는데 소요되는 시간을 나타내고 있다. 건조 전의 데이터에서는 마그네트론 3 kW 조사 할 경우와 비슷하게 수심에서 가장 늦게 온도가 상승하였고 수피에서는 300 sec 만에 80°C에 도달하였다. 마그네트론 5 kW 조사 할 경우 수심의 온도가 80°C 상승하는데 약 490 sec가 소요되어 Magnetron 3 kW 조사보다 효율성이 높아짐을 나타내었다. 건조 후의 데이터에서는 390 sec만에 모든 위치에서 온도가 80°C 이상으로 상승하였다. 또한 수피에서는 높은 함수율로 약 180

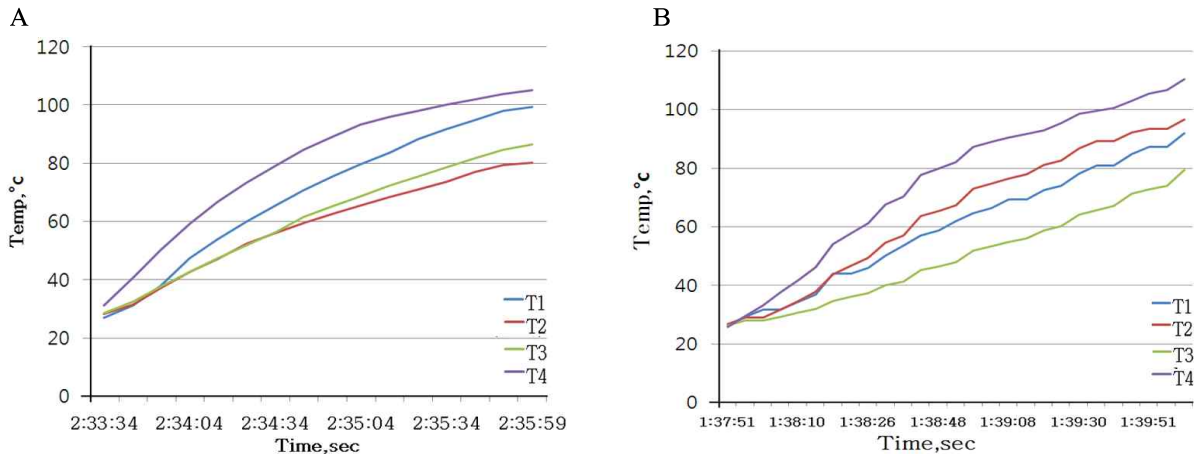


Figure 9. Lumber temperature change after magnetron treatment at 9 kW.

A: before drying, B: after drying.

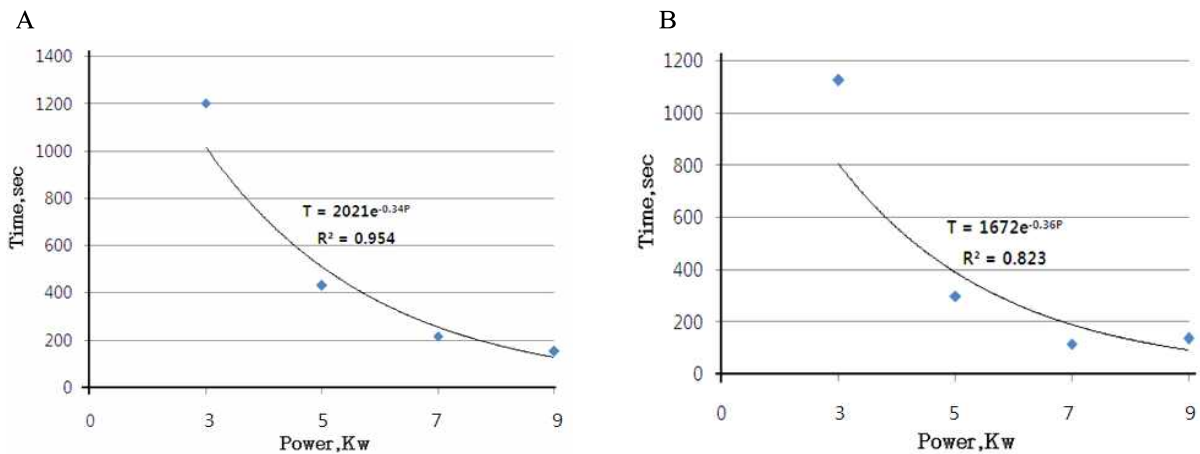


Figure 10. Correlation of internal temperature increase of 80°C according to magnetron capacity.

A: before drying, B: after drying.

sec 부근에서 80°C로 상승하였다. Figure 6의 결과와 유사하게 건조 후가 건조 전보다 약간 빠른 온도 상승을 보여주고 있었다.

Figure 8은 건조 전후의 마그네트론 7 kW 조사할 경우 목재의 수심, 심재, 변재, 수피의 온도가 80°C 이상 상승하는데 소요되는 시간을 나타내고 있다. 마그네트론 7 kW에서는 변재에서 가장 늦게 온도가 상승하였으며 약 260 sec가 소요되었다. 건조 후에는 목재의 모든 위치에서 80°C 이상 상승하는데 170 sec가 걸려 매우 빠르게 목재의 내부 열균이 가능함을 알 수 있었다.

Figure 9는 건조 전 후의 마그네트론 9 kW 조사할 경우 목재의 수심, 심재, 변재, 외벽의 온도가 80°C 이상 상승하는데 소요되는 시간을 나타내고 있다. 마그네트론 9 kW 조사할 경우 변재에서 온도가 가장 늦게 상승하였으며 약 200 sec가 소요되었다. 위치 별로 온도상승 시간이 달라지는 것은 목재의 전자파 침투율과 함수율 등 물리적인 특성에 따라 달라져 다소 일정하지 않은 것으로 생각된다. 건조 후에는 목재의 모든 위치에서 80°C 이상 상승하는데 120 sec가 소요되었다. 따라서 마그네트론의 용량이 3 kW에서 9 kW까지 증가할수록 지수함수적인 관계로 온도 상승시간이 줄어드는 것을 알 수 있었다. 그러나 목재의 위치별 온도 상승시간은 목재의 물리적인 특성과 목재의 위치에 따른 균일성이나 밀도 등이 달라 반드시 비례하지 않는 것으로 판단되었다.

Figure 10은 건조 전후의 QRD microwave 용량별 80°C 상승 시간의 변화를 나타내고 있다. 건조 전의 데이터에서는 Magnetron 용량이 클수록 소요시간이 지수함수적으로 감소하였다. 상관식은 $T=2021e-0.34P$ 이며 R^2 값은 0.954로 높은 상관관계를 보여주고 있다. 건조 후의 데이터도 건조 전과 매우 유사하였으며 $T=1672e-0.96P$ 이며 R^2 값은 0.823로 나타났다. 본 실험에서는 QRD microwave 용량을 3, 5, 7, 9 kW로 제작하여 실험한 결과 9 kW가 가장 효율성이 높은 것을 알 수 있었다. 따라서 목재 내부의 선충이나 흰개미 등의 퇴치를 위해서 QRD microwave 용량을 일정부분까지 높여 공급할수록 에너지 효율성에서 유리한 것으로 나타났다.

QRD microwave 처리 전 같이 목재 강도 시험 결과 용량과 상관없이 휨강도와 압축강도 모두 변화가 없었으며 할렬도 없었다(Table 4). 처리 후에도 비슷한 결과를 보였다(Table 5) 결과적으로 목재 강도 시험결과 QRD microwave 처리 전 후로 휨강도, 압축강도, 할렬의 차이가 없었다.

요약

본 연구에서 사용한 QRD(Quadratic Residue Diffusor) 마이크로파는 일반적인 마이크로파와 달리 파장의 위상차를 변화시켜 균일한 살균을 유도할 수 있어 저전력으로 효과를 높일 수 있는 새로운 기술로 알려져 있다. 따라서 친환경

적이고 에너지 소비가 적은 QRD 마이크로파를 이용하여 목재를 소독 할 가능성에 대한 기초적인 연구를 수행하였으며 얻은 결과는 아래와 같다. 본 연구에 사용된 QRD microwave의 효율성은 $E=5.75e0.32S$ ($R^2=0.908$)로 나타났으며 초기 수분 함수율은 일정하지 않았고 평균 수분함수율은 30.3%이었다. 자연건조 1주일 후의 수분 함수율은 22.6%로써 평균 약 8% 수분함량이 줄어들었다. 또한 마그네트론의 용량이 3 kW에서 9 kW까지 증가할수록 지수함수적인 관계로 온도 상승시간이 줄어드는 것을 알 수 있었다. 목재 강도 시험 결과에서는 QRD microwave 처리 전후로 휨강도, 압축강도, 할렬의 차이는 없었다. 따라서 QRD microwave 용량을 3, 5, 7, 9 kW로 제작하여 실험한 결과 9 kW가 가장 효율성이 높은 것을 알 수 있었다. 따라서 목재 내부의 선충이나 흰개미 등의 퇴치를 위해서 QRD microwave 용량을 일정부분까지 높여 공급할수록 에너지 효율성에서 유리한 것으로 나타났다.

주요 추가어: 압축강도, 효율성, 휨강도, magnetron, QRD microwave

사사

본 논문은 농촌진흥청 어젠다사업 (2013) 지원에 의해 이루어진 것임.

인용문헌

- Chung SW, Ha YS, Lee JW, Park JM, Kwon SH, Lee KM (2010) Development of a hydroponic recycle system using the visible light-reactive titanium dioxide photocatalyst for sterilization of nutrient solution (I) Determination of factor. *J Bio Syst Eng* 35: 420-425.
- Chung SW, Ha YS, Lee KY, Kim JS, Park JM, Kwon SG, Choi WS, Kwon SH, Mitsuoka M, Inoue E, Okayasu T (2013) Sterilization in hydroponic recycling system using visible light-reactive titanium dioxide photocatalysts. *J Fac Agr Kyushu U* 58: 93-98.
- Lee IH (1999) Development of equipment for recycling of nutrient solution in green house by utilizing of UV-photocatalytic disinfection. Final report of the research project, Ministry Agriculture & Forestry, Gwacheon, Republic of Korea.
- Lee KM (2007) Development of a hydroponic recycle system using the visible light-reactive titanium oxide photocatalyst for sterilization and purification of nutrient solution. Final report of the research project, Ministry Agriculture & Forestry, Gwacheon, Republic of Korea.
- Miyama Y, Sunada K, Hashimoto K (2002) Photocatalytic water treatment of tomato hydroponic culture system using solar

light. Proceedings of the 14th International conference on photochemical conversion and storage of solar energy W2-P-34.

Park HD (2005a) Radio frequency and microwave electronics illustrated. HongRung Publishing Company. Seoul.

Park HD (2005b) Microwave technology. Hong-Rung Publishing Company. Seoul.

Wilson GCS (1988) The effect of various treatments on the yield of tomatoes in re-used perlite. *Acta Hort* 221: 379-382.