

소나무 원목의 열처리 소요 에너지 평가*¹

엄 창 득*² · 박 준 호*² · 한 연 중*² · 신 상 철*³ · 정 영 진*³ · 정 찬 식*³ · 여 환 명*^{4†}

Evaluation of Energy Consumption in Heat Treatment of Pine Log*¹

Chang-Deuk Eom*² · Jun-Ho Park*² · Yeon Jung Han*² · Sang-Chul Shin*³ ·
Young Jin Chung*³ · Chan-Sik Jung*³ · Hwanmyeong Yeo*^{4†}

요 약

본 연구에서는 소나무 원목의 열처리 시 소요에너지에 대해 분석하였다. 소나무재선충 감염목에 대한 적절한 열처리는 소나무 재선충의 감염 확산을 막고, 감염목의 용재로서의 사용 가능성을 높인다. 본 연구에서는 병해충 감염목의 FAO 열처리 기준(International standards for phytosanitary measures (ISPM) No.15)에서 제시한 병해충 사멸 조건인 '목재 중심부 온도를 56°C에서 30분 유지'를 위하여 소요되는 에너지를 평가하였다. 열처리에 소요되는 총 소요에너지는 초기 열처리 설정조건 도달에 필요한 처리기 벽체 가열, 처리기 내 공기 가열, 목재가열, 습도유지, 벽체 열손실로 구성되는 초기소요에너지와 열처리 설정조건 도달 이후의 열손실 보완 소요 에너지, 즉 목재가열, 습도유지 및 처리기 벽체 열손실을 보완하기 위한 열손실 보완 에너지로 구분하였다. 단위 시간당 초기소요에너지는 열처리 설정조건 도달 이후의 단위시간당 열손실 보완 에너지량보다 크며, 설정조건 도달 이후의 단위시간 당 소요에너지는 거의 일정한 값을 가졌다. 시험결과 실험조건에 있어서 건조 온도와 더불어 상대습도가 매우 큰 영향을 미쳤으며 목재조건으로는 함수율 차이에 의해 변하는 밀도가 큰 영향을 미쳤다. 고온과 높은 상대습도 및 낮은 함수율, 즉 낮은 밀도가 열처리 속도를 증가시켰다. 이 연구를 통하여 소나무재의 열처리에 있어서 보다 효율적인 에너지 관리 방안을 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

ABSTRACT

The required energy for the heat treatment of pine log was evaluated in this study. A proper heat treatment of pine log infected by pinewood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*) can prevent spreading of the infection by pinewood nematode and make the infected pinewood

*¹ 접수 2008년 7월 14일, 채택 2008년 9월 1일

*² 서울대학교 산림과학부, Dept. Forest Sciences, Seoul National Univ

*³ 국립산림과학원 산림환경부, Dept. Forest Environment, Korea Forest Research Institute

*⁴ 서울대학교 산림과학부, Dept. Forest Sciences, Research Institute for Agriculture and Life Science, Seoul National Univ.

† 주저자(corresponding author) : 여환명(e-mail: hyeo@snu.ac.kr)

valuable again. The FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) heat treatment standard for various types of infected wood for which a heat treatment of the core part of the wood is necessary is 30 minutes at 56°C, taking into account the international standards for phytosanitary measures (ISPM No. 15). In this study, the energy consumption during the heat treatment was separated into two kinds of energy, initial energy for heating kiln drier and to reach set point temperature and relative humidity and the required energy supplementing heat loss. The initial required energy per unit time is greater than that during the treatment. The energy consumption per unit time varied little during the heat treatment. As a result, the set point relative humidity with set dry bulb temperature and density of wood dependent on moisture content are very important factors to change energy consumption in the experiment. The heat treatment at higher temperature and higher humidity levels requires more energy consumption but less treatment time. It is expected that a more effective energy program could be planned for the heat treatment of pine log through this study.

Keywords: heat treatment, pinewood nematode, pine log, energy consumption, phytosanitary measures

1. 서 론

소나무 재선충은 북미의 자생종(Knowles *et al.*, 1983)으로 동아시아의 소나무 산림을 황폐화시키고 있을 뿐 아니라 유럽으로 확산되어 전세계적인 피해를 입히고 있다. 우리나라에서는 1998년 부산 금정산에서 처음 소나무 재선충 피해목이 발견된 이후 급속하게 감염지역이 넓어져(정 등, 2003), 2006년 현재 중부지방까지 확산되어 피해지역이 7,871 ha에 이르고 있다(산림청 2007). 소나무 재선충은 이동 거리가 짧아 스스로 다른 나무로 옮겨갈 수 없지만, 솔수염하늘소와 북방수염하늘소 등을 매개충으로 하여(Takizawa *et al.*, 1982) 먼 거리까지 이동할 수 있게 된다. 소나무재선충은 주로 솔수염하늘소의 호흡기 또는 내부에 기생하다가 솔수염하늘소가 수피를 파괴하며 산란 시 소나무의 수피 내부로 이동하여 가도관 내의 수분 이동을 막아 소나무를 고사시키는 것으로 알려져 있다. 훈증, 소각, 파쇄, 나무주사, 위생간벌, 항공살포, 열처리 등과 같은 소나무재선충 감염목 처리 방법 중에서 열처리에 관한 연구는 사멸온도와 사멸시간에 한정되어 진행되어왔다. Dwinell (1990)은 열기건조와 천연건조를 시킨 후 재선충에 감염된 소나무의 소나무재선충

사멸여부를 조사하였으며, 열기건조에서 목재내부 온도가 60°C 이상이면 소나무재선충이 완전히 사멸된다고 보고하였다. 또한, Kinn (1986)은 소나무재선충에 감염된 12 mm~29 mm 길이의 목재 칩을 다양한 온도와 시간 조건에서 열처리한 결과 스티가열이 소나무재선충 사멸에 효과적이라고 보고하였다. 에너지효율 측면에서 효과적인 목재열처리를 시행하기 위해서는 처리기별로 다양한 온습도를 적용하여 소비되는 에너지를 평가 분석하여야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 다양한 온습도 설정조건에서 FAO 열처리 기준(International standards for phytosanitary measures (ISPM) No.15)인 소나무원목 중심부 온도를 56°C에서 30분 처리(CRF 2002; IPPC 2002; 엄 등, 2007)하기 위해 소요되는 에너지를 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

말구직경이 25 cm, 33 cm, 그리고 40 cm 세가지 직경을 지닌 재장이 90 cm인 소나무(*Pinus densiflora*) 생재원목을 공시재료로 사용하였다. 원목 횡

Table 1. Moisture content and density of pine logs and heat treatment conditions

Temperature (°C)	Relative humidity (%)	∅ 40 cm*1		∅ 33 cm		∅ 25 cm	
		Average MC (%)	Density (kg/m ³)	Average MC (%)	Density (kg/m ³)	Average MC (%)	Density (kg/m ³)
90	20	33.3	615	38.0	508	15.4	479
	50	60.1	738	64.8	607	58.0	656
	70	51.4	698	55.7	573	42.7	592
120	6	63.6	755	68.7	621	64.1	681
	10	56.9	724	59.6	587	51.2	627
	30	52.4	703	54.5	569	45.1	602

*1: top diameter of log

단면으로부터의 수분증발과 열전달을 최소화하기 위하여 횡단면을 염화비닐수지로 싸고, 그 위에 두께 89 mm의 grass wool (R11 인슐레이션 ISOVER, 벽산단열재산업)로 막고, 이를 알루미늄호일로 씌운 후, 그 위를 먼지지원단으로 씌워 시험체의 횡단면을 밀봉하였다. 사용된 원목의 함수율과 밀도 및 설정 온도와 습도 조건은 Table 1과 같다.

2.2. 실험방법

외부 2,300 mm (길이) × 1,360 mm(폭) × 1,080 mm (높이), 내부 1,570 mm (길이) × 1,200 mm (폭) × 640 mm (높이)의 크기로 제작된 열처리기는 열처리기 바닥에 위치한 열선에 의해서 가열되며 증습장치에 의해 습도가 조절된다. 처리기 측면에 위치한 송풍기에 의해 조절되는 원목 길이방향으로의 풍속은 약 3 m/s로 균일하게 유지된다. 매 처리조건마다 직경 25 cm, 33 cm, 40 cm 원목 각 한 본씩을 1 set로 하여 처리기에 투입하여 열처리하였다. 열처리 시 사용된 전기에너지는 적산전력계를 통하여 측정하였으며 소나무를 잔적하지 않고 열처리기를 가동하였을 시와 소나무열처리 시의 전력사용량을 측정하고, 소요에너지를 비교하였다. 열처리 기준조건 도달 여부를 확인하기 위해 지름 1 mm의 K type 열전대를 목재 내부에 삽입하고 이를 자료수집장치 (Datalogger, CR1000, Campbell Scientific Inc.)

에 연결하여 목재중심부 온도를 측정·기록하였다. 각 열처리 실험 전후 원목의 무게를 측정하여 증량 감소를 확인하였으며, 열처리 전에 측정된 초기함수율을 근거로 원목의 전건무게를 계산한 후 이 계산된 원목의 전건무게와 실험 도중 변화된 원목무게를 이용하여 함수율 감소를 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 소나무 열처리

열처리되는 소나무원목 중심부의 온도가 56°C에 도달한 시간은 Table 2와 같다. <90°C, 50%RH>에서 말구직경 40 cm의 원목은 778분이 소요되었고, 직경 33 cm는 640분, 직경 25 cm는 390분이 소요되었다. <120°C, 10%RH>에서 말구직경 40 cm의 원목은 617분이 소요되었고, 직경 33 cm는 520분, 직경 25 cm는 350분이 소요되었다. 90°C 조건에서보다 120°C 조건에서 열처리 시간이 단축되었으며, 직경이 커질수록 목표온도에 도달하는 시간은 길었다.

Fig. 1은 <90°C, 50%RH> 조건과 <120°C, 10%RH> 조건에서의 각 직경별 온도 상승 경과를 보여준다. 직경 40 cm 원목의 열처리 시간을 비교해보면, 120°C의 경우 고습조건인 30% RH에서 56°C에 도달하는 시간이 가장 짧은 545분을 보였고, 10%RH에서 617분, 그리고 6%RH에서 가장 긴 619분을 보였다.

Table 2. Heat treatment time in each heat treatment condition

Temperature (°C)	Relative humidity (%)	Heat treatment time (minutes) ^{*)}			Energy consumption (kWh)
		∅ 40 cm	∅ 33 cm	∅ 25 cm	
90	20	745	710	410	35.0
	50	778	640	390	50.1
	70	714	620	390	51.2
120	6	619	600	420	34.5
	10	617	520	350	43.7
	30	545	470	300	58.0

*1: Time required to reach target core temperature of 56°C in a log

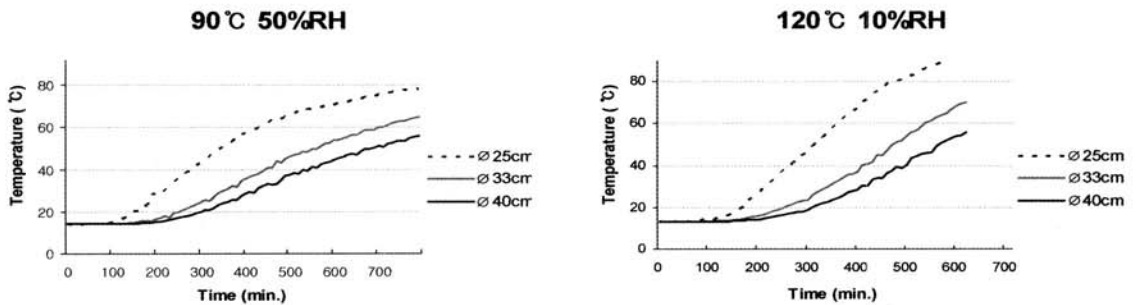


Fig. 1. Core temperature of pine log during the heat treatment.

반면 90°C 조건에서는 예상한 바와 동일하게 고습인 70%RH에서 56°C에 도달하는 시간이 나머지 낮은 습도조건들보다 짧은 714분을 보였다. 하지만 낮은 습도조건에서는 20%RH가 아닌 50%RH 조건에서 56°C에 도달하는 시간이 가장 긴 778분 소요되었다. 이는 동일한 밀도의 시편의 경우 열처리 온도가 높고 높은 상대습도 조건에서 열처리 시간이 단축되지만, <90°C, 50%RH> 실험에 사용된 목재의 경우 전건비중은 같으나 함수율이 높은 원목을 사용해 밀도(ρ)가 커지게 되고, 비열(c) 또한 증가하게 되었기 때문으로 사료된다. <90°C, 20%RH> 조건에서 평균함수율 33%의 밀도 615 kg/cm³ 원목이 열처리된 것에 비해서, <90°C, 50%RH> 조건에서는 평균함수율 60%의 밀도 738 kg/cm³인 원목이 사용되었다. 열전도도(k)의 증가에 따른 열확산계수($k/\rho c$)의 증가보다 비열과 밀도를 곱한 값(ρc)의 증가에 의한 열확산계수 감소 요인이 더욱 클 경우 소

나무 원목 내 열확산 속도가 느려질 수 있음이 확인되었다.

모든 목재 열처리공정 수행 시 공정초기에 건조기 내의 온도와 습도를 맞추기 위해서 단위시간당 많은 에너지가 소요되었다. 이 초기에너지는 처리기 벽체가열, 처리기 내 공기가열, 목재가열, 습도유지 및 벽체열손실로 가정할 수 있다. 이러한 초기 설정온습도 도달을 위한 에너지 소요는 1시간 이내에 마무리되었으며, 설정조건에 도달한 이후에는 목재가열, 습도유지와 벽체열손실을 보완하기 위한 에너지가 일정한 수준에서 지속적으로 필요하였다. 이에 따라 열처리 개시 후 1시간의 소요에너지량을 통하여 초기 소요에너지를 유추할 수 있으며 이 값을 초기 소요에너지량으로 보았다. 목재가열을 위한 에너지를 제외하고는 유사한 양의 에너지가 소요될 것이라고 기대되는 무잔적 열처리 가동 시의 소요에너지 분석을 우선 실시하였다.

Table 3. Energy consumption (kWh) during the idle operation of vacant kiln

Temperature (°C)		90			120		
Relative humidity (%)		20	50	70	6	10	30
Initial required energy for first 1 hour after start (kWh)	A	5.06	5.22	5.45	4.20	5.90	6.10
Average energy consumption per hour during idle operation (kWh/h)	B	2.14	3.38	3.58	2.65	2.98	4.74

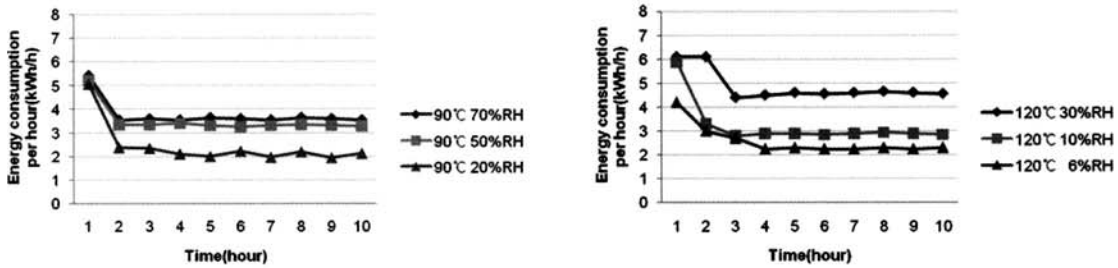


Fig. 2. Energy consumption per hour during idle operation of vacant kiln.

3.2. 무잔적 열처리 가동 시 소요에너지 분석

무잔적 열처리 가동 시 초기 소요에너지량은 <90°C, 20%RH>에서 5.06 kWh, <90°C, 50%RH>에서 5.22 kWh, <90°C, 70%RH>에서 5.45 kWh가 사용되어 90°C 조건의 초기 소요 에너지는 상대습도에 따라 일정부분 커짐을 알 수 있었다. 120°C에서의 초기 소요에너지는 6%RH에서 4.20 kWh, 10%RH에서 5.90 kWh, 30%RH에서 6.10 kWh가 소요되었으며 90°C와 마찬가지로 상대습도에 따라서 초기의 소요에너지량의 변화가 나타났다. 1시간 이후 소요되는 단위시간당 에너지량은 각 처리조건 별로 큰 변동 없이 균일하게 유지되었는데, 이를 습도유지 및 벽체열손실을 보완하기 위한 단위시간당 에너지량으로 가정할 수 있다. 90°C 조건에서 열손실에 따른 단위시간당 보완에너지는 20%RH에서 2.14 kWh/h, 50%RH에서 3.38 kWh/h, 70%RH에서 3.58 kWh/h를 보였다. 120°C 조건에서는 6%RH 2.65 kWh/h, 10%RH 2.98 kWh/h, 30%RH에서 4.74 kWh/h가 소요되었다(Table 3, Fig. 2).

각 온도에서 높은 상대습도 조건인 <90°C, 70%RH> 조건과 <120°C, 30%RH> 조건에서 열손실 값이 크게 나타났는데 이로써 높은 상대습도를 유지하기 위해 증습장치 가동에 필요한 에너지량이 상당히 크고, 열처리의 밀폐정도가 열손실 감소에 큰 영향을 차지하는 것을 유추할 수 있다.

3.3. 원목 열처리 시의 소요에너지 분석

원목을 잔적하지 않고 빈 열처리를 가동하였을 때와 비교하여 시험목 처리시의 소요에너지는 전반적으로 상승된 값을 보여주고 있다. 90°C의 초기 소요 에너지는 20%RH에서 5.90 kWh, 50%RH에서 6.50 kWh, 70%RH에서 6.70 kWh가 사용되었다. 120°C에서의 초기 소요에너지량은 6%RH에서 4.50 kWh, 10%RH에서 6.70 kWh, 30%RH에서 7.40 kWh를 보였다. 90°C 조건에서 열손실을 보완하기 위한 시간당 소요에너지는 20%RH에서 2.55 kWh/h, 50%RH에서 3.64 kWh/h, 70%RH에서 4.08 kWh/h를 보였다. 120°C에서 열손실을 보완하기 위한 시간당 소요에너지는 6%RH에서 3.22

Table 4. Energy consumption (kWh) during the heat treatment

Temperature (°C)		90			120		
Relative humidity (%)		20	50	70	6	10	30
Initial required energy for first 1 hour after start (kWh)	A	5.90	6.50	6.70	4.50	6.70	7.40
Average energy consumption per hour during heat treatment (kWh/h)	B	2.55	3.64	4.08	3.22	3.99	6.26
Real time required to reach target core temperature of 56°C (hour)	C	12.42	12.97	11.9	10.32	10.28	9.08
Total energy consumption (kWh)	$A + B \cdot (C-1)$	35.0	50.1	51.2	34.5	43.7	58.0
Energy consumption per unit volume of wood (kWh/m ³)		149	214	218	147	187	248

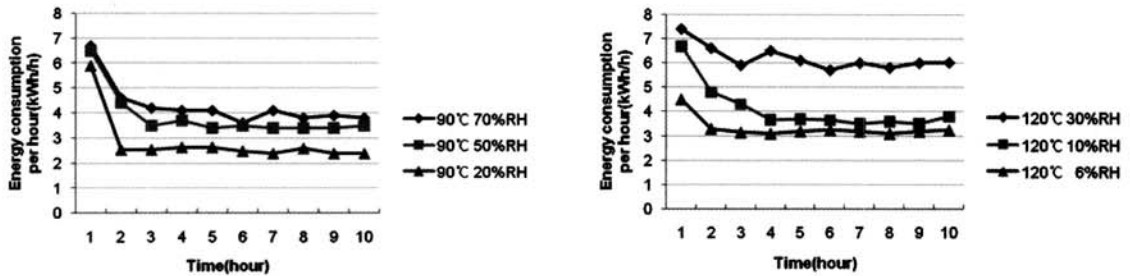


Fig. 3. Energy consumption per hour during pine log heat treatment.

kWh/h, 10%RH에서 3.99 kWh/h, 30%RH에서 6.26 kWh/h를 나타내었다(Table 4, Fig. 3).

〈120°C, 30%〉에서는 설정 조건의 유지를 위한 단위시간당 열손실 보완 에너지가 초기 단위시간당 소요에너지의 85%에 해당하는 높은 값을 나타내어 밀폐가 잘되지 않는 처리기의 경우 고온 고습 조건은 에너지 효율 면에서 불리함을 보여준다.

또한 목재 1m³ 당 소요에너지는 〈90°C 20%RH〉에서는 149 kWh, 〈90°C 50%RH〉에서는 214 kWh, 〈90°C 70%RH〉에서는 218 kWh, 〈120°C 6%RH〉에서는 147 kWh, 〈120°C 10%RH〉에서는 187 kWh, 〈120°C 30%RH〉에서는 248 kWh였다.

3.4. 원목열처리 시와 무잔적 열처리기가동 시의 소요에너지 차이 분석

원목 열처리 소요에너지와 무잔적 열처리기를 가

동하였을 시의 소요 에너지를 비교하여 보았다 (Table 5). 초기 소요에너지의 경우 90°C조건에서 원목을 열처리할 경우 20%RH에서 0.84 kWh, 50%RH에서 1.28 kWh, 70%RH에서 1.25 kWh가 더 소요되었다. 120°C에서는 6%RH에서 0.3 kWh, 10%RH에서 0.8 kWh, 30%RH에서 1.3 kWh가 더 소요되었다. 열손실을 보완하기 위한 에너지 또한 초기소요에너지와 같이 원목열처리 시 증가하였다. 90°C의 경우 20%RH에서는 0.41 kWh/h, 90°C 50%RH에서는 0.26 kWh/h, 70%RH에서는 0.50 kWh/h가 더 사용되었다. 120°C의 경우에도 6%RH에서 0.57 kWh/h, 10%RH에서 1.01 kWh/h, 30%RH는 1.52 kWh/h가 더 소모되었다.

열처리 시에는 목재 내 목질과 잔존수분의 가열을 위한 열에너지가 큰 비중을 차지한다. 본 실험의 결과로 열처리 소요에너지를 분석해보면 원목잔적 후 열처리기가동 시와 원목잔적을 하지 않은 상태에서

Table 5. Difference of energy consumption between idle operation of vacant kiln and heat treatment of pine log

Temperature (°C)	90			120		
	20	50	70	6	10	30
Relative humidity (%)						
Difference of initial required energy for first 1 hour after start (kWh)	0.84	1.28	1.25	0.30	0.80	1.30
Difference of average energy consumption per hour during treatment (kWh/h)	0.41	0.26	0.50	0.57	1.01	1.52

Table 6. Weight loss and moisture content decrement during heat treatment

Heat treatment condition		Weight loss (kg)			MC decrement (%)
Temp. (°C)	RH (%)	∅ 40 cm	∅ 33 cm	∅ 25 cm	
90	20	0.76	0.49	0.49	2.08
	50	0.30	0.05	0.25	0.74
	70	0.55	0.60	0.90	0.46
120	6	2.95	1.98	1.96	8.28
	10	2.60	2.62	2.24	9.36
	30	1.50	0.02	0.01	1.10

열처리 가동시의 에너지 소비 간의 차이가 목재열 처리에 사용되고 있음을 알 수 있다.

처리에 설정습도를 유지하게 하는 가습장치를 부착하고, 처리기 내외부공기의 유동통로 크기를 동일하게 한 후, 동일한 설정온도를 유지시키는 경우, 무잔적 열처리 가동 시에 비한 원목열처리 시의 소요에너지 증가량은 고습조건에 비해서 저습조건에서 적었다. 즉, 높은 상대습도 설정조건의 경우 가습장치 가동을 위해 다량의 에너지가 가열에너지에 추가되어 소모되고, 밀폐상태가 좋지 않은 경우에 고습공기가 처리기 외부로 쉽게 방출되어 다시 가습장치의 가동을 유도하지만, 낮은 상대습도 설정조건의 경우 목재로부터 나온 수분에 의한 증습이 용이하고, 밀폐상태가 좋지 않아 처리기내부 공기가 외부로 유출되더라도 적은 에너지에 의한 설정습도 유지가 가능하다.

열처리 전후의 시편의 무게 변화와 함수율 감소는 Table 6과 같다. 기대한 바와 같이 저습조건의 경우

많은 수분증발에 의한 큰 건조효과를 얻을 수 있는 것으로 판단된다. 하지만 본 실험에서는 섬유방향으로의 수분이동을 차단하고 횡단면으로 부터의 수분 증발을 막은 상태에서 실험을 진행하였던바 실제 횡단면에서의 수분증발이 용이한 경우 발생할 함수율 감소량과는 차이가 있을 수 있음을 밝혀둔다.

4. 결 론

열처리 온도는 90°C보다 120°C에서 보다 빠른 열처리가 이루어졌으며 상대습도가 증가함에 따라서 열처리가 신속하게 이루어졌다. 하지만 임의의 설정습도를 유지시키는 가습장치를 부착한 열처리기의 밀폐가 양호하지 않은 상태에서 동일한 설정온도를 유지시키려 할 때, 높은 상대습도 조건을 설정한 경우는 저습조건을 설정한 경우에 비해 매우 많은 에너지 손실이 초래될 수 있음을 보였다. 또한 저함수율 원목, 즉 밀도가 낮은 원목의 열처리 시간이 고탈

수출 원목을 대상으로 한 열처리 시간에 비해 줄어들 수 있을 것이다. 본 연구에서 열처리 공정 중 시간별 에너지 소요량이 평가 분석됨으로써 소나무재의 열처리 수행 시 목재크기, 밀도, 설정온도, 습도에 따른 에너지 손실을 고려한 효율적인 열처리 방안을 마련할 수 있으리라 기대된다.

참 고 문 헌

1. CRF 2002. Code of Federal Regulations 7 Parts 319, Agriculture, a Special Edition of Federal Register, Revised as of January 1, 2002 US Government Printing Office, Washington DC 2002.
2. Dwinell L. D. 1990. Heat-treating and drying southern pine lumber infested with pinewood nematodes. Forest products J. 40: 53~56.
3. IPPC 2002. International Standards for Phytosanitary Measures: Guidelines for Regulating Wood Packing Materials in International Trade. Secretariat of the International Plant Protection Convention. FAO/UN Rome March 2002
4. Kinn D. N. 1986. Heat-treating wood chips: a possible solution to pine wood nematode contamination. Tappi 69 pp.97~98.
5. Knowles, K., Y. Beaublen, M. J. Wingfield, F. A. Baker, and D. W. French. 1983. The pinewood nematode new in Canada. Forestry Chronicle, 59: 40.
6. Takizawa, Y. and T. shoji. 1982. Distribution of *Monochamus saltuarius* Gebler, and its possible transmission of pinewood nematodes in Iwate Prefecture. Forest Pests, 31: 4~6.
7. 산림청. 2007. 2007년도 산림과 임업 동향에 관한 연차 보고서. 산림청. 대전. p. 720.
8. 엄창득, 한연중, 신상철, 정영진, 정찬식, 여환명. 2007. 소나무 원목의 열처리에 관한 연구. 목재공학 35(6): 50~56.
9. 정영진, 이상명, 김동수, 최광식, 이상길, 박정규. 2003. 솔수염하늘소의 유충침입공과 성충탈출공의 측정과 소나무 내 분포. 韓應昆誌 42(4): 315~321.