

소나무 원목의 열처리에 관한 연구*¹

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

Study on Heat Treatment of Red Pine Log*¹

Chang-Deuk Eom*² · Yeonjung Han*² · Sang Chul Shin*³ ·
Yeong Jin Chung*³ · Chan Sik Jung*³ · Hwanmyeong Yeo*^{2†}

요 약

본 연구에서는 각종 병해충 감염목의 열처리 조건으로 목재 중심부 온도를 56°C에서 30분 이상 처리해야 한다는 FAO 열처리 기준(International standards for phytosanitary measures (ISPM) No.15)을 적용하여 소나무 재선충 감염의 확산을 막고 감염목을 용재로서 사용할 수 있게 하기 위하여 국산 소나무의 열처리특성을 분석하였다. 온도와 습도 및 함수율별 열처리속도 측정을 통하여 목표온도 도달시간을 분석하고 소비에너지를 평가하여, 열처리 공정 적용 기술개발의 기초 자료를 확보하고자 하였다. 열처리 시 함수율이 높을수록, 직경이 클수록 열처리 소요시간과 소요에너지가 증가하였고, 고온·고습 조건이 열처리 소요시간을 단축시켰다. 열처리기 현장투입 시 적절한 열처리공정 제어를 위해서는 열악한 주위환경 조건, 처리기 가동성능의 변화, 고습적용이 불가능한 상황 등을 고려한 다양한 온도·습도 조건에서의 가열과 냉각 시 소비되는 에너지 평가와 소요시간 예측이 필요하다.

ABSTRACT

FAO standard for heat sterilization of wood, International standards for phytosanitary measures (ISPM) No.15, must meet heat-treated wood core temperature to be higher than 56°C and keep the temperature for more than 30 minutes. This study was carried out to analyze the heat treatment

*¹ 접수 2007년 7월 18일, 채택 2007년 9월 12일

*² 서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부, Dept. of Forest Science, College of Agriculture and Life Science, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

*³ 국립산림과학원 산림병해충과 Dept. of Forest Insect Pests & Diseases, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

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

characteristics of domestic pinewood sterilized with the FAO standard. To enhance the effectiveness of heat treatment process in mountainous district energy consumption and time required to reach target temperature were evaluated at various temperature and relative humidity conditions and moisture contents of wood. Heat-treatment of high temperature and high humidity reduced the required heating time. Lower humidity levels at same temperature reduced energy consumption per unit time. However, lower humidity levels could not reduce total energy consumption greatly because longer treatment time was required at that condition. It is necessary to estimate energy consumption and predict treatment time in dynamic heating and cooling situations, because it frequently happens not to meet optimum treatment condition due to poor surrounding climates and operation performance of heat treatment facility in real field.

Keywords: heat sterilization, energy consumption, phytosanitary, pinewood, humidity, core temperature

1. 서 론

소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*)은 북미의 자생종으로서 20세기 초반 일본으로 유입된 이후 한국, 중국 등으로 상륙하여 동아시아의 소나무 산림을 황폐화시키고 있을 뿐만 아니라(Togashi and Shigesada, 2006), 현재 유럽으로도 확산되고 있다. 이에 세계 대부분의 나라는 소나무류의 자국 내 반입 시 훈증 처리 또는 열처리 시행을 의무적으로 실시하고 있다(Dwinell, 1997). 소나무재선충은 이동 거리가 짧아서 스스로 다른 나무로 이동할 수 없지만, 솔수염하늘소(*Monochamus alternatus*) 등을 매개충으로 하여 원거리를 이동하게 된다. 소나무재선충은 솔수염하늘소의 호흡기 또는 내부에 기생하여 솔수염하늘소가 수피를 파괴 시 소나무의 수피 내부로 이동하여 가도관 내 수분의 이동을 막아 소나무를 고사하게 만든다고 알려져 있다(Mamiya, 1983). 1988년 남부지방에서 최초 발견된 후 소나무재선충 감염은 2007년 현재 중부지방까지 확산하여 반출이 금지된 산림의 면적이 총 1,140,000 ha에 이르고 있는 실정이다.

소나무재선충 감염목의 처리 방법에는 별채 후, 훈증, 소각, 파쇄, 열처리, 나무주사, 위생간벌, 항공살포 등이 있다. 훈증 시 사람과 가축 등에 해가 있을 수 있어 사용 시 안전에 유의해야 하며, 철저한

감시 및 단속이 필요하고, 소각은 확실한 효과가 있지만, 산불 때문에 방제시기가 극히 제한적이고 임지에서 태울 경우 열해목의 발생이 많다. 파쇄는 매개충이 들어 있는 나무를 빠뜨리기 쉽고, 인력과 방제비가 많이 드는 단점이 있다. 그리고 나무주사의 경우 감염우려지역의 건전한 나무에 미리 살선충제를 주입하여 예방하는 방법으로 가격이 높은 편이다. 위생간벌은 최근 환경단체에 의하여 문제가 제기되고 있어 실행에 어려움이 존재하며, 마지막으로 항공살포는 매우 고비용의 문제점이 있으며, 바람에 의하여 주변의 인가나 축사에 피해가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 소나무재선충 감염의 확산을 막고 감염목을 용재로서 사용할 수 있는 방법으로 열처리에 관한 연구를 수행하였다. Dwinell (1990)는 소나무재선충에 감염된 소나무를 여러 열기건조와 천연 건조시킨 후 사멸여부를 조사하였다. 열기건조에서 목재온도가 60°C 이상이면 소나무재선충이 완전히 사멸되었다고 보고하였다. Kinn (1986)는 소나무재선충에 감염된 12~29 mm 길이의 목재 칩을 여러 온도와 시간에 따라 열처리한 결과 스팀가열이 소나무재선충 사멸에 효과적이라고 보고하였다. 소요에너지에 대한 연구에서 정 등(2001)이 진공건조에서 함수율 감소, 두께의 증가에 따라 소비에너지가 증가한다고 보고하였다. 또한 정 등(1995)은 열수를 이용한 원목 가열처리 시 가열시간별 목재 내부의

Table 1. Location of thermocouples in specimens

Log diameter (cm)	Depth from surface of log (cm)			
	T1 (core)	T2	T3	T4 (surface)
45	22	17	12	7
30	15	12	8	5
25	12	9	6	3

*: thermocouple

온도 변화에 대해 분석하였다.

FAO의 Guideline for Regulating wood packing material in international trade에 의해 공인된 해충사멸 열처리 대상 해충 목록에는 소나무재선충과 하늘소과해충이 포함되어 있다(ALSC, 2002; CRF, 2002; IPPC, 2002). 본 시험에서는 목재 중심부 온도를 56°C에서 30분 이상 처리해야 한다는 FAO 열처리 기준을 만족시키기 위한 국산 소나무 원목의 열처리 특성을 분석하였다. 온도와 습도 및 함수율별 열처리속도 측정을 통하여 목표온도 도달시간을 분석하고 소비에너지를 평가하여, 현장에서의 열처리 공정 적용 기술개발의 기초자료를 확보하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 소나무재선충 사멸온도 및 시간 평가

국립산림과학원에서 배양된 소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*)을 분양받아 냉장보관한 후 공시재료로 사용하였다. 소나무재선충 사멸온도 및 사멸시간을 확인하기 위하여, 열풍가열과 증탕을 열원 공급방법으로 사용하였다. 온도 110°C, 풍속 9.5 m/s인 열풍에 의해 가열되는 슬라이드글라스 위에 놓인 소나무재선충을 포함한 수분의 온도를 적외선 열화상 분석기(IR FLEXCAM PRO, Infrared Solutions com.)를 이용하여 측정하면서 비디오현미경(ICSL-305 system, Sometech)을 이용하여 100배 배율로 소나무재선충의 사멸여부를 관찰하였다. 그리고 56°C 조건에서 10초 간격으로 증탕처리한 후

처리된 소나무재선충을 비디오현미경으로 관찰하여 사멸시간을 측정하였다.

2.2. 소나무 열처리

공시목은 소나무재선충에 미감염된 소나무(*Red pine, Pinus densiflora*)로서, 말구직경이 25, 30, 45 cm, 재장 3.6 m인 3개의 생재원목을 준비하였다. 원목 내 연륜수는 40~60개이고, 연륜폭은 3.13~3.46 mm이었다. 전건비중과 함수율은 생재원목으로부터 소시편을 채취하여 측정하였다. 세 가지 직경(25, 30, 45 cm)인 길이 3.6 m 생재원목들로부터 횡단방향의 부위별 초기함수율 분포 및 비중 분포를 측정하기 위한 원반을 채취한 후, 길이 90 cm의 열처리용 원목 시험체를 준비하였다. 이 원목의 횡단면으로부터 수분증발과 열전달을 최소화시키기 위하여 단열재를 사용하여 횡단면을 밀봉하고, Table 1과 같이 내부온도 변화를 측정하기 위해 수피(표면)로부터 수(중심)까지 깊이를 사등분하여 직경 1 mm인 열전대(J type)를 원목당 4개씩 삽입한 후 1분 간격으로 내부온도를 측정하였다.

내부온도 측정을 위해 자료수집장치(CR1000, Campbell Scientific Inc.)를 사용하였다. 열처리 조건은 총 6가지(2 온도, 3 상대습도)를 적용하여 실시하였다(Table 2). 열처리 내 풍속은 약 3 m/s로 처리기 내부 부위별 풍속은 균일하였다. 목재 내부 온도를 측정하기 위해 시험편에 장착된 열전대를 통하여 수피부터 수까지의 온도변화를 관찰하면서 수부위의 온도가 56°C까지 도달되는 소요시간과 에너지를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 소나무재선충 사멸온도 및 사멸시간

소나무재선충 사멸온도를 고찰한 결과, 열풍가열의 경우 초반 활발한 움직임을 보이던 소나무재선충이 공인된 열처리 기준 온도인 56°C에 도달하였을

Table 2. Heat-treatment condition and physical properties of specimens

Heat-treatment condition (Temp, RH)	Diameter (cm)	Average MC (%)	Average density (kg/m ³)	Heat-treatment condition (Temp, RH)	Diameter (cm)	Average MC (%)	Average density (kg/m ³)
90°C, 20%	45	103	884	120°C, 6%	45	49	649
	30	92	775		30	27	518
	25	130	854		25	7	428
90°C, 50%	45	50	653	120°C, 10%	45	51	658
	30	28	520		30	31	529
	25	8	431		25	11	438
90°C, 70%	45	64	714	120°C, 30%	45	58	688
	30	39	561		30	35	545
	25	26	474		25	19	458

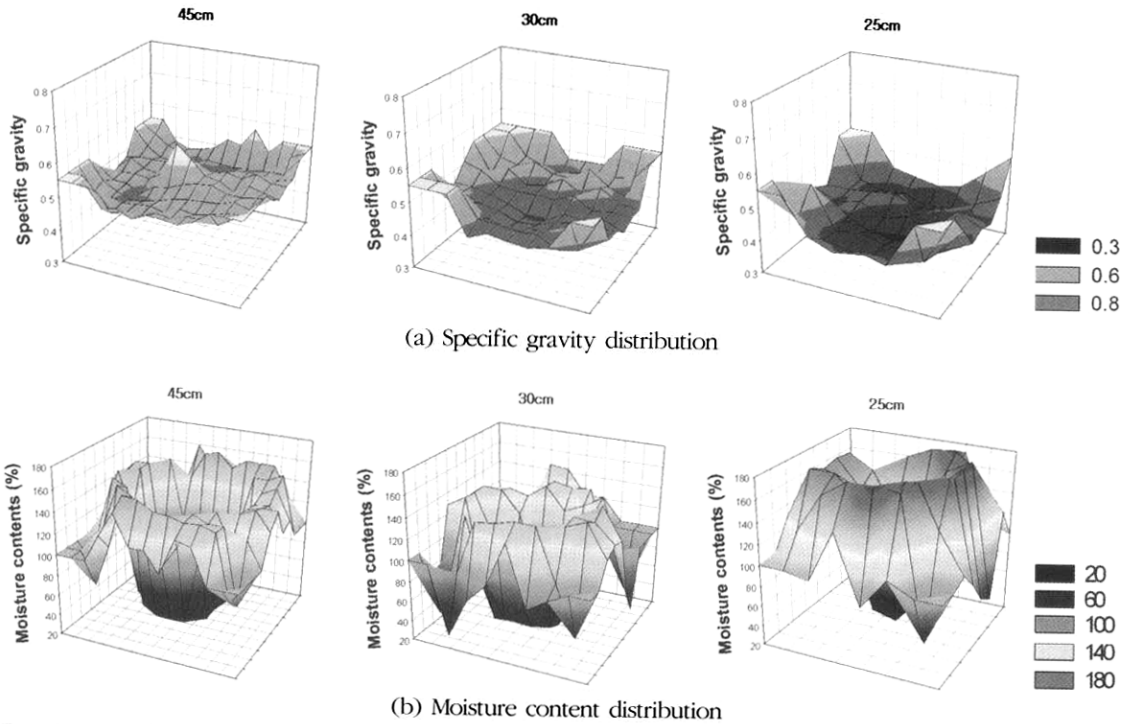


Fig. 1. Specific gravity (a) and moisture content (b) profiles in specimens.

때 완전히 사멸되었고, 증탕실험 결과 56°C에서 1분 이상 노출되는 조건에서 소나무재선충들은 5반복 실험에서 모두 사멸되었다.

3.2. 소나무 열처리

원목 내 비중 및 함수율 변이 측정 결과(Fig. 1) 공시목의 전건비중은 수 부위가 기타 부위에 비해 조금 낮은 경향을 보였으며 전건비중의 범위는 0.4~0.6이었다. 함수율은 내외부위별 차이가 상당히 크

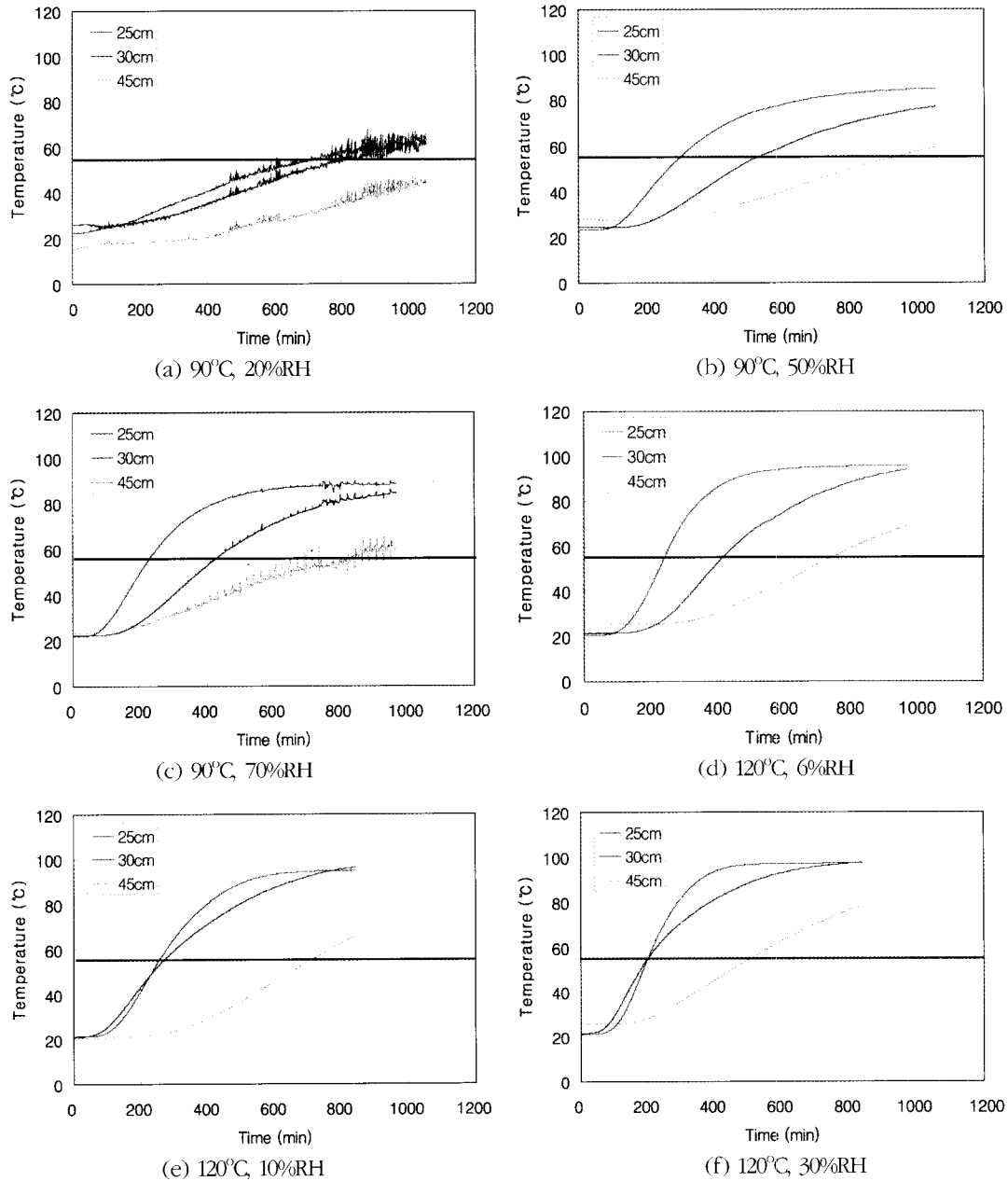


Fig. 2. Temperature change of the pith by heat-treating condition.

게 나타났으며, 그 범위는 30~190%였다.

열처리 시 내부온도는 표층부터 증가하기 시작하여 수 부위가 가장 늦게 증가하고, 대경재일수록 그 온도증가율의 차이가 커지는 경향을 나타내었다. 병

해충 사멸용 목표온도를 56°C로 가정하고 측정된 수 부위의 온도가 56°C에 도달하는 소요시간과 소요에너지를 조사한 결과 직경별, 함수율별 소요시간과 소요에너지가 상이하게 나타났다. 시험 중 열처리기 내

Table 3. Heat-treatment time by heat-treating condition

Condition		Time (min)			Condition		Time (min)		
Temp. (°C)	RH (%)	25 cm	30 cm	45 cm	Temp. (°C)	RH (%)	25 cm	30 cm	45 cm
90	20	750	800	1,200	120	6	240	430	730
	50	310	540	900		10	260	280	690
	70	230	430	840		30	200	210	520

부 온도는 작동 후 한 시간 이내에 목표온도에 도달 하였으며, 목표온도에서 약 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 내의 온도차를 유지하였고, 상대습도 또한 설정상대습도에서 약 $\pm 5\%$ 내의 습도차를 유지하였다.

직경별 열처리 소요시간은 직경 25 cm에서 최소 200분, 최대 750분, 45 cm에서 최소 520분, 최대 1,200분을 나타냈다. 직경이 커질수록 소요시간이 증가하는 경향을 보였다. 열처리 조건별 소요시간은 직경이 45 cm인 시험편의 경우 120°C , 6, 10, 30 %RH 조건에서 각각 730, 690, 520분이 소요되었다. 반면, 90°C , 20, 50, 70%RH 조건에서는 각각 1,200, 900, 840분이 소요되어 온도와 상대습도가 높을수록 열처리 소요시간이 단축됨을 알 수 있었다.

열처리에 소요되는 에너지는 열처리 조건에 따라 다르게 측정되었다. 시간당 소요에너지를 보면 90°C 의 경우 20%RH에서 3.1 kW, 50%RH에서 3.3 kW, 70%RH에서 3.7 kW로 상대습도가 증가하면 할수록 시간당 소요에너지는 증가하였다. 또한 120°C 에서도 6%RH에서 2.8 kW, 10%RH에서 3.7 kW, 30%RH에서 5.2 kW으로 상대습도가 증가할수록 시간당 소요에너지가 증가하였다. 하지만 수 부위가 56°C 에 도달하는 시간이 상대습도가 높아질수록 빨라지기 때문에 고온고습조건과 고온저습조건 간의 큰 총소요에너지 차이를 발견할 수 없었다. 총 소요에너지를 비교하면, 설정되는 온도와 상대습도만으로는 소요에너지를 예상할 수 없음을 알 수 있다. 원목의 초기함수율과 열처리기 작동장치의 열효율이 총 소요 에너지에 미치는 영향을 좀 더 정확히 분석하여야 한다.

현장 투입 시 운반 중 발생하는 열처리 장치 벽체의 단열 효과 감소 등으로 인해 설정 온도와 상대습도를 일정하게 유지키 어려울 수 있다. 가혹한 조건

Table 4. Energy consumption by heat-treating condition

Heat-treating condition		Consumption energy (kW)	Time* (hours)	Total energy (kWh)
Temp. (°C)	RH (%)			
90	20	3.1	20	62
	50	3.3	15	49
	70	3.7	14	52
120	6	2.8	12	35
	10	3.7	11	43
	30	5.2	9	45

*: heating time for core temperature of 45 cm diameter log to be higher than 56°C

에서 가동되어야 하는 열처리기 내 온·습도를 측정하고 그 때 소비될 에너지를 평가함으로써 열원료로 사용될 연료의 양을 환산 및 준비하고 열처리 소요시간을 예측함으로써 운반 및 다음 열처리 대상목 준비시기를 결정할 수 있다. 이를 위한 기초 자료로 본 연구결과가 사용되어질 수 있다.

4. 결 론

열처리시 함수율이 높을수록, 직경이 클수록 열처리 소요시간과 소요에너지가 증가하였고, 고온·고습 조건이 열처리 소요시간을 단축시켰다. 총소요에너지의 측면에서는 저습조건이 시간당 에너지 손실을 감소시키지만 소요시간을 증가시키기 때문에 고온저습조건에서 소요되는 총에너지와 고온고습조건 의 총소요에너지 간의 큰 차이는 발견할 수 없었다. 총 소요에너지평가를 위해서는 설정되는 온도와 상대습도와 더불어 원목의 초기함수율과 열처리기 작

동장치의 열효율에 대한 정확한 분석이 요구된다. 열처리기의 현장투입 시 적절한 열처리공정 제어를 위해서는 열악한 주위환경 조건, 처리기 가동성능의 변화, 고습적용이 불가능한 상황 등을 고려한 다양한 온도 · 습도 조건에서의 가열과 냉각 시 소비되는 에너지 평가와 소요시간 예측이 필요하다.

참 고 문 헌

1. ALSC (American Lumber Standard Committee, Inc). 2002. Wood Packing Material Enforcement Regulations. American Lumber Standard Committee.
2. CRF. 2002. Code of Federal Regulations 7 Parts 319, Agriculture, a Special Edition of Fedral Register, Revised as of January 1, 2002. US Government Printing Office, Washington DC. 2002.
3. Dwinell, L. D. 1990. Heat-treating and drying southern pine lumber infested with pinewood nematodes. *Forest products J.* 40: 53~56.
4. Dwinell, L. D. 1997. The pinewood nematode: regulation and mitigation. *Annu. Rev. Phytopathol.* 35: 153~166.
5. 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.
6. Kinn, D. N. 1986. Heat-treating wood chips: a possible solution to pine wood nematode contamination. *Tappi.* 69: 97~98.
7. Mamiya, Y. 1983. Pathology of the pine wilt disease caused by *bursaphelenchus xylophius*. *Ann. Rev. Phytopathol.* 21: 201~220.
8. Togahi, K. and N. Shigesada. 2006. Spread of the pinewood nematode vectored by the japanese pine sawyer: modeling and analytical approaches. *Popul. Ecol.* 48: 271~283.
9. 정희석, 이준호, 강욱, 이남호. 2001. 침엽수 제재두께별 가열판 압채식 진공건조의 소요 에너지. *목재공학.* 29(1): 9~15.
10. 정희석, 이남호, 여환명. 1995. 수종의 침엽수 단판용 원목의 가열과 냉각 시간. *목재공학.* 23(3): 16~22.