

고온수증기처리 목재의 전단강도 특성*1

김정환*2 · 이원희*2 · 김종만*3

Shear Strength Property of Wood Treated by Steam Treatment at High Temperature*1

Jung-Hwan Kim*2 · Weon-Hee Lee*2 · Jong-Man Kim*3

요 약

본 연구는 100℃ 이상의 고온영역에서 증기처리에 의한 소나무(*Pinus densiflora*)재와 라디아타소나무(*Pinus radiata*)재의 전단강도를 조사하였다. 본 연구에서 사용한 열처리 조건은 온도조건 100℃부터 200℃까지 20℃ 간격으로 6조건과 시간조건 5, 10, 20, 30분의 4조건이었으며, 폭쇄처리기를 사용하였다.

고온에서 증기처리에 의해 목재구성요소의 감소가 전단강도의 감소로 나타나고 목질재료의 광범위한 가소화를 진행시키는 것으로 판단된다. 목재의 전단강도는 증기처리시간에 따라서 점차적으로 감소한다는 것을 알 수 있었다. 10분 이상의 증기처리시간일 경우 온도가 올라갈수록 전단강도의 감소가 눈에 띄게 커졌다.

고온에서 증기처리에 의한 연화는 목재가공성 향상에 필요하다고 생각된다.

ABSTRACT

This study deals with shear strength test for *Pinus densiflora* and *Pinus radiata* treated at above 100℃ by heat steam. Treatment conditions of this experiment were operated at regular intervals of 20℃ at temperatures up to 200℃ for 5, 10, 20 and 30 minutes by using the steam-explosion apparatus.

It was examined, at high temperatures, degradation of some compounds from wood composition could lead to reduced the shear strength through heat steaming processes and play a large part in the plastic process of solid wood materials. It could be estimated that the shear strength of woods were gradually reduced by heat steaming time. Remarkable reduction of shear strength of woods was observed with increasing steaming temperatures above 10 minutes steaming time. Furthermore, this phenomenon shows a tendency to increase with higher temperatures.

* 1 접수 2001년 3월 29일, 채택 2001년 9월 10일

* 2 경북대학교 임산공학과, Department of Wood Sci. & Tech., Kyungpook National University, Taegu, Korea.

* 3 경상대학교 농과대학 산림과학부, Division of Forest Science, College of Agriculture, Gyeongsang National University, Chinju 660-701, Korea.

Therefore, it was considered that the softening by steaming treatment at high temperatures is necessary for the improvement on the wood processing ability.

Keywords: high temperatures, steam treatment, shear strength, heat softening

1. 서 론

목재는 수분과 열의 작용에 의하여 연화되면 작은 힘으로도 큰 변형을 일으키는 것으로 알려져 있다. 이러한 현상을 목재의 가소화라고 하는데, 이러한 목적으로 증자, 자비 등의 전처리를 행하는 각종 목재가공법이 있으며, 이 가공과정에서 수분과 열의 영향을 받는 경우도 많이 존재한다. 예를 들어, 목재의 압밀화 가공이나 휨가공의 적용사례는 그 대표적인 것이라고 할 수 있겠다(정 등, 1999). 이외에도 목질계 판상제품인 MDF 제조시 리파이너를 이용하여 목섬유를 제조하는데, 이 공정에서 가능한 한 손상이 적은 섬유를 얻기 위해서는 목재섬유를 결합하고 있는 리그닌을 부드럽게 하는 작업이 우선 가장 중요하다(Furuta 등, 1997)고 할 수 있다.

제재분야에서의 가소화 효과는 고함수율의 원목을 직접 가열하게 되면 목재의 연화에 동반하여 목재내부의 성장응력이 제거되고, 따라서 틀어짐이 적은 판재를 고수율로 얻을 수 있다. 그리고 건조분야에 있어서 제재품의 인공건조 중에 생기는 찌그러짐 현상은 수분과 열에 의해 연화된 세포벽에 건조응력이 작용하여 생기는 현상이다. 이외에도 목질재료 제조에 있어서 수분을 함유한 목재요소가 열압과정에서 선택적으로 가소화되는 것 때문에 두께방향으로 비중분포가 형성되는데, 이러한 비중의 분포는 목질계 재료의 강도성능에 직접적으로 크게 영향을 주게 된다. 따라서 목재를 최적의 제조조건 하에서 가공하고 이용하기 위해서는 수분과 열의 작용원리를 파악해야 하며(Yano, 1999), 따라서 그에 대한 기구해석이 필수 불가결하다고 하겠다. 그리고 pulp·제지산업에서는 화학적·물리적으로 여러 가지 처리에 따른 섬유특성을 밝히기 위한 연구가 많았으나, 보드산업에 있어서 섬유의 각종처리에 의한 특성분석은 미비한 실정이다.

이에 본 연구에서는 100℃ 이상의 고온영역에 있어서 수증기처리에 의한 목재의 열연화 특성을 검토하기 위하여 목재시편을 폭쇄처리조를 이용한 고압 밀폐용기 속에서 고온의 수증기처리를 행한 후 전단강도를 측정하였다. 전단강도의 측정 이유는 수분과 열에 의한 연화작용으로 섬유간 결합력의 저하도를 평가하기 위한 것으로서 목재 가공분야에 있어서, 특히 MDF 제조원료인 섬유를 제조하거나 휨가공에 있어서 휨강도와 전단력이 가장 주요한 하중으로 작용되는 것으로 판단되었기 때문이다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

국산 주요 침엽수종인 소나무(*Pinus densiflora*)재(비중 0.44, 평균연륜폭 5 mm)와 수입 주요 침엽수종의 하나인 라디아타소나무(*Pinus radiata*)재(비중 0.40, 평균연륜폭 7 mm)를 이용하여 전단시험에 대한 KS시험규격(KS F 2209)에 준하여 Fig. 1과 같은 의자형의 전단시험편을 제작하였다.

이 시험편들간의 함수율의 차이를 최소화 시키기 위하여 24시간 동안 물속에 침지시켰다가 꺼내어 24시간동안 온도 25℃, 상대습도(RH) 65%의 항온항습실에서 조습처리를 행하였다. 이러한 과정을 거친 시험편은 처음 제재했을 때 평균 함수율이 소나무는 37.1%, 라디아타소나무는 123.6%였으나 조습처리 후에는 각각 85.9%, 154.7%이었다. 기건상태에서 시험편들 각각의 함수율의 차이를 수분침지 및 조습처리를 통하여 25℃, 상대습도 65%의 상태에서 수분평형을 이루도록 함으로써 시험편들의 평균함수율이 높아졌다. 함수율을 조정한 시험편들은 각 수증기처리 시험조건 당 5개씩 준비하였다. Fig. 1에서 a는 섬유

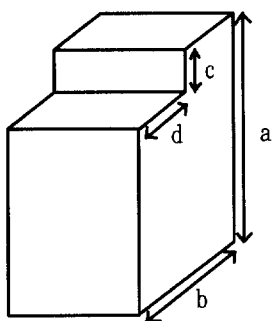


Fig. 1. Wood specimen's shape for shearing test (a = 40 mm, b = 30 mm, c = 10 mm, d = 10 mm).

방향, b는 방사방향을 나타낸다.

2.2 실험방법

수증기처리에 의한 목재의 열연화 특성을 알아보기 위하여 수증기처리 온도와 시간을 설정하였다. 온도 범위는 100℃부터 200℃까지 20℃간격으로 6등분하였으며 처리시간은 5분, 10분, 20분, 30분의 4가지 조건으로 설정하였다. 수증기처리 장치로는 100℃ 이상의 고온상태하에서의 고압수증기처리인 점을 고려하여 자체 제작한 폭쇄처리 장치를 이용하였다. 반응기(reactor)의 용량은 3 L이고, 반응물 회수조(product receive tank)의 용량은 50.6 L이고, 100 kg/cm² 정도의 압력에도 견딜 수 있도록 설계되었다. 수증기 발생장치(steam generator)는 56 L의 용량으로 80 kg/cm²의 압력에서도 견디는 안전도를 가지며 자동 전원 장치(control box)는 필요한 온도에서의 작동을 가능하게 한다.

실험은 먼저 폭쇄처리기속에 전단시험편을 넣은 후, 각 설정온도와 처리시간별로 수증기처리를 한 다음 폭쇄처리기의 압력을 낮추고 시험편을 꺼낸 다음, 냉각을 방지하기 위하여 시험편을 최대한 보온을 유지하여 전단강도 시험을 실시하였다. 전단강도 시험을 위한 지그는 Fig. 2와 같이 본 연구실에서 자체 제작하였으며, 강도시험에서 하중속도는 분당 10 mm로 설정하였다.

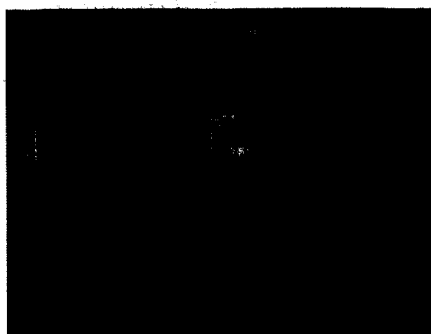


Fig. 2. Apparatus of shearing test.

3. 결과 및 고찰

3.1 고온에서의 함수율과 열연화

고온·고압 분위기 속의 시험편을 대기 증으로 꺼내게 되면 순간적으로 목재내의 수분이 방출되어 함수율을 감소현상이 나타나고, 온도가 높을수록 그리고 처리시간이 길수록 순간적인 수분증발현상 및 구성성분 분해량의 영향 및 시편의 질량감소 등이 복합적으로 나타나는 것이 알려져 있다(이원희 등, 1998).

Table 1과 2에는 각 공시재료의 처리온도와 수증기처리시간에 따른 수증기처리 전의 시편 함수율과 수증기처리 후 전단강도측정 직전의 시편 함수율의 변화를 나타내었다. Table 1에서 라디에타소나무의 경우, 고온수증기 처리 전의 함수율과 처리 후의 함수율을 비교해 보면, 100℃에서는 각 처리 시간별로 0.4%, 2.4%, 3.5%, 7.5% 감소하였고 200℃에서는 각 처리시간별로 18.2%, 95.2%, 69.8%, 81.5% 감소하였다. 이것은 온도와 처리시간이 증가할수록 고온수증기처리 후 대기 증으로 방출될 때 목재시편의 함수율이 더욱 감소하는 것을 나타낸다. 그리고 180℃ 이상의 수증기처리에서는 함수율의 감소가 급격해지는 것을 알 수 있었다. 일반적으로 고온 수증기처리에서는 추출성분과 헤미셀룰로오스가 감소하며 추출성분의 감소에 의해 섬유포화점이 높아진다는 보고가 있다. 따라서 심재부는 추출성분이 많기 때문에 변재부보다도 실질부의 감소량이 더 많아질 것이다. 또 이

Table 1. Change of moisture content(MC) in *Pinus radiata*.

Time	100℃		120℃		140℃		160℃		180℃		200℃	
	before steam	after steam	before steam	after steam	before steam	after steam	before steam	after steam	before steam	after steam	before steam	after steam
5 min	98.2	97.8	90.7	92.0	141.0	127.2	139.5	107.5	133.2	100.6	116.7	98.7
10 min	116.7	114.0	113.8	101.0	136.7	96.8	159.5	120.0	138.4	100.0	150.9	77.3
20 min	121.5	117.4	146.7	123.9	135.4	113.8	151.2	102.7	148.7	111.8	172.2	101.4
30 min	129.6	120.5	118.5	99.8	101.9	86.7	144.3	92.6	170.8	106.0	167.2	92.1

Table 2. Change of moisture content(MC) in *Pinus densiflora*.

Time	100℃		120℃		140℃		160℃		180℃		200℃	
	before steam	after steam	before steam	after steam	before steam	after steam	before steam	after steam	before steam	after steam	before steam	after steam
5 min	71.5	79.6	81.5	83.9	81.6	68.8	61.0	59.4	111.9	90.5	107.6	81.3
10 min	57.0	62.5	68.8	73.0	103.5	94.0	92.5	83.4	112.7	90.5	77.0	46.6
20 min	85.4	72.5	83.7	82.4	123.1	114.1	80.0	77.5	102.7	88.5	131.6	73.6
30 min	69.0	68.4	76.8	51.1	108.8	98.9	82.5	79.1	99.2	91.8	104.3	78.3

러한 조건하에서는 헤미셀룰로스 와 리그닌이 연화된다(Goring, 1966)고 보고되고 있다. 이러한 기존의 연구에 의해 판단하면 180℃ 이상의 온도영역에서 수증기처리에 의한 흡수율의 급격한 감소는 시간의 영향도 있겠지만 180℃ 이상의 온도에서는 목재내부의 추출성분이 아주 쉽게 분해되어 목재의 열연화가 쉽게 이루어진다는 것을 나타내는 것으로 판단된다.

Table 2의 소나무재의 경우, 라디아타소나무재와 마찬가지로 온도와 처리시간이 증가할수록 흡수율의 감소량도 증가하였으며, 180℃ 이상의 온도영역에서는 급격한 흡수율의 감소를 보이는 것으로 나타났다. 하지만 소나무재의 경우에는 라디아타 소나무재와는 다르게 100℃와 120℃의 5분과 10분 처리한 시험편의 흡수율이 고온 수증기 처리 후에 증가하는 것으로 나타나는데 이것은 100℃와 120℃, 5분과 10분 동안의 처리가 소나무 내부의 추출성분 감소에 영향을 주지 못하여 흡수율 증가 현상이 나타나는 것으로 판단된다.

세포벽 내부의 수증기압의 상승이 이들 목재 성분의 변화를 촉진시키고 셀룰로오스 마이크로피브릴간의 일시공극 등이 확대된다고 한다면, 수분응축은 더 잘

일어나기 쉽고 수분수축량도 증가하게 될 것이다. 이것이 고온·습윤 상태에서의 열처리과정에 있어서는 결과적으로 목재연화나 생장응력의 제거를 촉진시키는 것으로 연결된다고 하겠다. 따라서 고온 수증기처리에 의한 목재의 연화 가공공정에 의해서 목재의 활용도를 보다 확대시켜 나갈 수 있는 하나의 재료가공수단이 될 것으로 판단되어진다.

3.2 열연화에 미치는 목재 구성성분의 영향

일반적으로 목재의 흡수에 의한 연화와 강도저하는 목재구성성분 분자쇄간에 수소결합이 절단된 부분에 물분자가 들어가 내부 가소제로서 작용하고, 목재구성성분의 마이크로브라운 운동에 기인하는 열연화로 알려져 있다(Goring, 1966; Cousins, 1976; Cousins, 1978). 즉, 흡수에 의한 목재 구성성분간의 응집력 저하와 이 수분의 영향으로 가능하게 된 분자의 열운동이 목재 가소화의 주요인이라 할 수 있다. 따라서 여기서 우리가 판단할 수 있는 사실은, 목재가 흡수한 수분량과 가열온도가 가소화의 정도에 직접적으로 관여하고 있다는 사실이다.

이러한 열과 수분에 의한 연화는 횡압축에 의한 압

밀화 목재생산 및 압축과 인장변형을 증대로 인한 휨 가공 성능 향상과 리파이너를 이용하여 목재를 전단력에 의해 섬유화시킬 때 매우 중요한 요소라고 할 수 있을 것이다(矢野, 1999). 여기서 목재 세포벽의 주요 구성성분 중 셀룰로오스에 대해서는 결정영역에 수분침투가 어려워 전건상태 및 포수상태에서는 연화 온도는 거의 변화가 없다고 할 수 있다. 따라서 나머지 주요성분인 헤미셀룰로오스와 리그닌이 열연화(Furuta 등, 1997)에 직접적인 관련이 있을 것으로 생각된다.

본 실험결과, 생재상태 목재의 고온 수증기처리에 의한 현저한 전단강도의 저하는 리그닌의 용융 및 연화 등에 의해 세포간 결합력이 크게 저하되었기 때문으로 판단된다. 따라서 전단시험에 의한 전단강도의 저하는 연화에 기여하는 성분이 소실되고 세포벽 자체의 강도도 크게 떨어졌기 때문으로 추정된다. 또한 열연화 특성이 수중에 따라 다양한 기존의 연구결과로부터 목재의 가소화에는 수분과 온도의 차이에 의한 매트릭스성분의 가소화 차이 및 목리나 마이크로피브릴의 배열상태와 같은 미소한 목재의 구조적 인자가 상호 조합되어 일어나는 것으로 생각된다(Norimoto 등, 1993), 伊藤(1999)등에 의하면, 너도밤나무와 들메나무를 이용한 고압수증기처리에 의한 목재의 성분변화 결과를 보면, 처리조건 120, 140℃에서는 목재성분량의 변화가 보이지 않았고, 160℃에서는 헤미셀룰로오스나 α-셀룰로오스에 현저한 변화가 있었고, 리그닌은 거의 변화를 보이지 않았다. 또한 추출성분은 160℃에서 처리시간에 동반하여 현저하게 증가하였고, 이 증가는 주로 헤미셀룰로오스의 분해에 기인하는 것으로 판단하였고, 일부 셀룰로오스의 결정구조의 변화와 리그닌의 분해가 일어나며, 이들 성분의 변화가 목재의 미세구조를 불안정화시켜 목재의 강도가 저하하는 것으로 결론짓고 있다.

따라서 이상의 사실을 바탕으로, 본 연구에서 행한 고온 수증기처리에 의한 목재의 열연화정도를 전단강도시험으로 평가할 수 있을 것으로 판단되었다.

3.3 수분과 열연화에 의한 전단강도변화

목재의 강도에 영향을 미치는 목재내부 인자의 영

향도는 세포벽을 구성하는 셀룰로오스의 결정화도 및 섬유장, 만재부의 세포벽 두께가 클수록, 그리고 마이크로피브릴 경사각이 적을수록 강도가 커진다. 목재의 인자의 영향도로서는 온도가 상승하면, 목재의 구성분자가 진동하고 단위격자의 간격이 넓혀져 응집력이 감소되어 결국 강도가 감소된다. 목재는 열분해 온도 이하의 온도영역에서는 목재의 강도에 영향을 미치는 외부인자인 온도가 상승하면 강도가 감소되는 것으로 잘 알려져 있다. 특히 상온에 있어서 전건과 포수상태의 탄성율의 연구결과를 보면, 흡수에 의해 탄성율은 섬유방향과 방사방향에서 각각 40% 및 50% 저하하였으며, 포수목재의 탄성율은 100℃에서는 섬유방향과 방사방향에서 상온의 값보다 각각 50% 및 70% 저하하는 것으로 나타나(矢野, 1999), 목재세포벽 성분의 열연화가 외력에 대한 저항력을 경감시키는 주요인자로 작용함을 잘 알 수 있다.

본 실험결과, 기건상태에서의 소나무재와 라디아타 소나무재의 전단강도는 각각 67.15 kgf/cm², 69.17 kgf/cm²이었다. 이 시험편을 함수율 조정과정을 거쳐 각각의 조건에 맞추어 전단강도를 측정된 결과를, Fig. 3과 4에 고온수증기 처리시간에 따른 전단강도의 감소를 처리온도별로 도시하였다.

이 그림으로부터, 전체적으로 전단강도 저하의 경향이 본 연구에서 사용한 공시재료 전체에서 뚜렷하

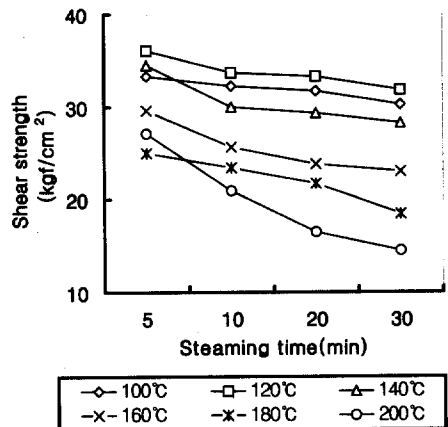


Fig. 3. Relationships between shearing strength and steaming time at high temperatures above 100°C in *Pinus densiflora*.

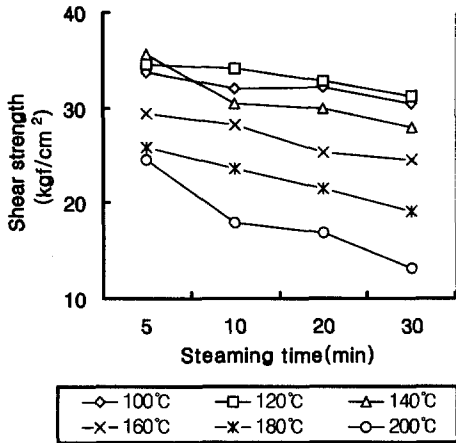


Fig. 4. Relationships between shearing strength and steaming time at high temperatures above 100°C in *Pinus radiata*.

게 나타나는 것이 관찰되었다.

먼저, Fig. 3에서 본 연구에서 설정한 가장 약한 처리조건인 100°C에서 5분간 처리했을 때 전단강도는 33.33 kgf/cm²으로 기건상태의 약 50% 정도로 감소하였고, 30분간 처리했을 때는 27.09 kgf/cm²으로 기건상태의 약 60% 정도로 감소하였다. 이것은 100°C 이상의 고온영역에서 수증기처리에 의한 전단강도의 저하가 현저하게 나타나는 것으로 판단되었다. 그리고 처리온도 100°C와 120°C의 경우 5분 처리재와 30분 처리재 간의 강도감소율이 각각 9.4%, 11.7%로 나타났고, 140°C 처리재에서는 5분 처리재와 30분 처리재 사이의 강도감소율이 18.1%로, 160°C와 180°C에서 5분 처리재와 30분 처리재에서는 각각 22.2%, 26.2%로, 200°C에서는 5분과 30분 처리재는 강도감소율이 46.6%로 나타났다. 이것은 처리온도와 처리시간이 증가할수록 전단강도 저하가 점증하는 것을 나타내며, 특히 200°C 정도의 고온에서는 처리시간의 증가가 전단강도의 저하에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

그리고 Fig에는 나타나지 않았지만, 220°C에서 증기처리결과, 시험편에 활열이 생기는 것을 관찰할 수 있었는데, 이것은 시험편 내부와 외부의 수분경사에서 기인하는 목재표면과 내부의 응력 차이 때문이라고 판단되었다.

Fig. 4의 라디아타 소나무재의 전단강도 저하 경향도 역시 소나무재의 전단강도 저하와 비슷한 경향으로 나타났다.

한 가지 특이한 점은 Fig. 3과 4에서 나타나듯이 두 공시수종에서 동일하게 온도조건 140°C에서 5분 처리재와 10분 처리재 사이의 강도감소가 급격하다는 것이다. 이것은 고온수증기처리의 최적조건을 찾는 실험을 세부적으로 깊이해보면 정확히 알 수 있겠지만, 지금으로써는 이 범위의 온도와 시간이 목재 열연화에 있어서 최적의 증기처리온도와 시간이 아닌가 판단되었다.

이상의 결과에서, 전단강도의 저하는 온도가 높아 질수록 처리시간이 길어질수록 더욱 현저해지는 것을 알 수 있었다. 특히 수증기 처리온도의 영향이 처리시간보다 더 크게 나타났으며, 열연화 특성을 이용한 가공현장에서 가능한 고온에서 단시간 처리하는 방법이 효율적인 것으로 판단되었다.

그리고 본 실험과정에서 시편의 색상 변화가 관찰되었는데, 200°C부터 표면탄화현상이 나타나기 시작하였다. 앞에서 말했듯이 200°C 이상의 온도영역에서 수증기처리를 하면 시편에 표면활열이 관찰되고 표면이 탄화되는 현상이 나타나는 것으로 보아, 이 온도영역에서의 수증기처리는 열연화보다는 열분해에 가까운 것으로 판단되었다.

4. 결 론

소나무재와 라디아타 소나무재의 고온수증기처리에 의한 목재의 전단강도 저하도는 처리온도가 높고, 처리시간이 길수록 급격한 경향을 나타내었다.

본 연구결과, 수분과 열에 의한 목재의 외부저항력 제거, 즉 목재의 전단강도의 저하는 온도가 높고, 처리시간이 길어질수록 더욱 현저해지는 것을 알 수 있었다. 특히 수증기 처리온도의 영향이 처리시간보다 더 크게 나타났으며, 수분을 다량 함유한 목재의 열연화에 의해 다양한 목재 가공성을 용이하게 해줄 수 있는 방안의 하나가 될 수 있음을 알 수 있었다.

금후 이 연구를 보다 활성화시키기 위해서는 예너지절감 차원에서 목재 열연화의 최적조건을 찾고,

100℃ 이상의 고온에서의 수분흡탈착 현상의 기구해석이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 이렇게 함으로써 물리적인 처리방법에 의한 친환경적이면서 에너지 소비를 줄일 수 있는 목재가공 산업으로의 발전이 이루어질 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 이원희, Hisashi, Abe, and Naohiro, Kuroda. 1998. 고온고압에서의 목재 평형습수율 측정. *목재공학* 26(4): 1-5.
2. 정승수, 이원희. 1999. 마이크로파 가열에 의한 소나무재의 목가공. *목재공학* 27(3): 17-22.
3. D. A. I.Goring. 1966. The structure of water in relation to the properties of wood constituents. *Pulp and Paper Magazine of Canada*. 64: T519-T524.
5. M. Norimoto, C. Ota, H. Akitsu, and T. Yamada. 1993. Permanent fixation of bending deformation in wood by heat treatment, *Wood Research*, No.79: 23-33.
6. W. J. Cousins. 1976. Elastic Modulus of Lignin as Related to Moisture Content. *Wood Sci. Technol*, 10: 9-17.
7. W. J. Cousins. 1978. Young's Modulus of Hemicellulose as Related to Moisture Content. *Wood Sci. Technol*, 12: 161-167.
8. Y. Furuta, M. Makinaga, H. Yano, and H. Kajita. 1997. Thermal-Softening Properties of Water-Swollen Wood II. *Mokuzai Gakkaishi*. 43(1): 16-23.
9. 矢野浩之. 1999. 室温から100℃での木材の熱軟化挙動. 日本木材學會レオロジ-研究會シンポジウム要旨集. 22-31.
10. 伊藤國徳, 三井勝也. 1999. 木材の熱處理による材質安定化に関する研究(第3報). 岐阜縣生活技術研究所報告, 2: 22-24.
11. 古田裕三. 1998. 高含水率状態での木材の熱軟化挙動. 日本木材學會レオロジ-研究會講演要旨集. 24-31.
12. 飯田生穂. 1986. 曲げヤング率によって評價した飽水木材の熱軟化. 日本木材學會誌. 32(6): 472-477.