

切削方向이 木材의 레이저切削特性에 미치는 影響*1

李亨雨²

Effects of Cutting Direction on the Laser Machining Characteristics of Wood*1

Hyoung-Woo Lee²

ABSTRACT

When cutting 2.0cm-thick red oak and hard maple with an air-jet-assisted carbon-dioxide laser of 2kW output power, maximum feed speed at the point of full penetration of the beam decreased with increasing the angle between grain and cutting direction. Feed speed averaged 3.75 and 3.38 meters per minute for red oak and hard maple, respectively.

Gray-level of laser-cut surfaces were analyzed by image analysis system. The highest gray level of laser-cut surface was obtained when red oak was cut parallel to grain by laser. Surface profiler was used to scan the sawn and laser-cut surfaces. Center line average roughnesses of laser-cut surfaces were higher than those of sawn surfaces. Scanning electron micrographs showed the cell walls which were melted by laser.

Keywords : Laser-machining of wood, machining characteristics of wood, cut-surface roughness test, image analysis

1. 서론

레이저는 일정 기체에 1만 볼트 이상의 고압 전기방전으로 에너지를 순간적으로 투입하여 기체를 구성하고 있는 전자가 勵起되었다가 다시 원위치로 복귀하면서 방출하는 빛에너지를 특수한 렌즈를 통하여 集束시켜 물체를 순간적으로 加熱, 溶融, 蒸發시키거나 높은 압력의 레이

저광으로 물체를 공중에 띄울 수도 있으며, 이때에 발생하는 빛의 파장은 어떤 물리적인 것보다도 안정화되어 있다. 이와 같은 빛의 성질을 이용하여 1960년 미국 Huges Aircraft사의 과학자 Mainman이 ruby laser(효율 1%)를 발명한 것을 嚆矢로 최근까지 여러 형태의 레이저가 속속 개발되고 있으며, 금세기 최대의 발명중 하나로까지 여겨지고 있다(Bever, 1986; Considine, 1983).

*1 접수 1996년 11월 15일 Received November 15, 1996

본 연구는 1994년도 한국과학재단 지원 해외Post-Doc. 연구비에 의하여 수행되었음.

*2 전남대학교 농과대학 College of Agriculture, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

레이저를 이용한 목재절삭의 장점으로는 톱밥의 발생이 없고, 절단폭(kerf)이 작아 목재손실을 최소화할 수 있으며, 칼날의 마모도 없고 소음도 상당히 감소시킬 수 있다. 또한 아무리 복잡한 형태도 被削材에 아무런 應力을 발생시키지 않는 상태에서 절삭해낼 수 있으며, 그 절삭면도 매우 양호하다. 그리고 CNC(Computer Numerical Control) 등에 의한 자동생산시스템에도 쉽게 연결할 수 있다는 점 등으로 인하여 미국을 중심으로 활발한 연구가 진행되어 왔다.

McMillin 등(1971)은 southern pine을 대상으로 압축공기를 이용하여 절삭 중인 부분의 증기나 발생입자들을 제거하고 레이저빔을 보호하는 한편, 절삭표면을 식혀줌으로써 깊고도 정확한 四角의 절단면을 갖도록 하였다. 한편, Barnekov 등(1986)은 피삭재의 종류에 따라 素材의 경우에는 압축공기가 효과적이거나 削片板이나 纖維板등의 접착제를 포함하는 木質材料의 레이저절삭에는 질소나 헬륨가스가 적합한 것으로 보고한 바 있다. Kamke 등(1990)은 물 분사장치를 이용하여 피삭재의 절삭부위를 적서 過乾燥를 방지함과 동시에 표면에 잔류하는 그을음의 양을 감소시키기도 하였으며, Mukherjee 등(1990)은 공기 분사노즐을 초음파 형태로 변형시켜 고압의 공기를 분사함으로써 절삭속도를 증가시키고자 하였다.

Peters 등(1977)은 레이저의 출력을 조절하면서 송재속도와 피삭재의 두께, 밀도 및 종류, 그리고 레이저출력과의 관계식을 유도한 바 있으며, Arai 등(1977·1978)도 레이저가공 부위의 열에 의한 영향을 X線 回折法으로 분석한 이후, 三次元圖式解를 응용하여 절단폭의 최소화와 직선성유지를 위한 최적의 송재속도 및 출력조건을 구하고자 시도하기도 하였다.

최근 McMillin 등(1984)은 2~5kW의 高出力 레이저절삭으로 가능한 최대 송재속도가 15m/min라고 발표한 바 있으나 Tillman(1985)이 제시한 C-N-S의 45m/min나 일반 락의 30m/min에 비하면 매우 낮은 수준임을 알 수 있다. 물론 피삭재의 上下 兩面에서 동시에 레이저가공한다면 송재속도는 빨라지겠지만 그에 따른 부가비용 또한 증가할 것이다. 그러나 Barnekov 등(1986)은 裁斷이 아닌 彫刻의 경우에는 200~800W의 출력으로도 기존의 절삭방법과 거의 같은 속도로 가공할 수 있다고 보고하였다. 또한 Barnekov 등(1989)은 集成이나 표면처리된 많은 종류의 목질재료의 절삭에서 접착제, 高密度 및 다양한 구성요소들로 인하여 carbide나 metal-ceramic 또는 다이아몬드로 구성된 기존의 절삭방법에 많은 문제점이 있음을 지적하기도 하였다.

그러나 McMillin 등(1985)은 레이저에 의한 切削面 接着力이 절삭면에 잔류하는 그을음 등에 의하여 기존의 鋸斷面 접착력의 약 75% 수준에 이르며, 레이저 목재절삭시 소모되는 비절삭 에너지(specific cutting energy)가 톱절삭의 경우에 비해 매우 높다는 문제점들을 제시하기도 하였다. 그러므로 레이저의 에너지효율이 획기적으로 향상되지 않는 한 피삭재를 절단하는 공정에 레이저가 이용될 경우에는 높은 에너지소모로 그 경제성이 취약하게 될 가능성이 있어 보다 부가 가치를 향상시킬 수 있는 공정에 이용함으로써 경제성을 유지하여야 할 것이다. 따라서 고급화되어 가는 목제품의 추세에 부응하기 위하여 목재의 재단과정보다는 조각기법에 레이저를 이용하고, 이때 레이저의 운용을 CNC 등과의 연결로 자동화한다면 고부가가치의 목제품 생산으로 경제적 측면에서도 그 타당성을 인정받을 수 있을 것이다.

그러나 국내에서는 아직 목재의 레이저절삭에 대한 연구가 본격적으로 시도되지 못하고 있는 실정으로 본 연구에서는 2kW급의 고풍력 레이저를 이용하여 절삭방향이 목재의 레이저절삭특성에 미치는 영향에 대한 기본적인 자료를 얻고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

본 연구의 공시재료로는 환공재인 미국산 참나무(northern red oak: *Quercus rubra* L.: 기건비중 0.63)와 산공재인 미국산 단풍나무(hard maple: *Acer saccharum* Marsh.: 기건비중 0.54)를 이용하였다. 이 수종들은 미국에서 가구재료로 가장 많이 사용되고 있는 대표적인 활엽수재이며, 소비자의 수요도 많은 것으로 알려져 있다.

모든 시편은 두께 2.0cm, 폭 2.5cm, 길이 15cm의 크기로 제작하였으며, 기건상태에서 실험을 수행하였다. 한편, 레이저 절삭장치는 수치제어(CNC: Computer Numerical Control)장치에 연결되어 있으나 정확한 절삭방향의 유지와 실험의 간편화를 위하여 시편 자체의 목리를 섬유방향에 대하여 평형(절삭각 0도), 30도, 45도 및 수직(90도)이 되도록 각 방향별 10개씩 제작하였다. 따라서 레이저 출력장치는 단지 직선운동만을 할 수 있도록 하였다.

2.2 레이저 절삭장치

본 연구에 사용한 레이저 절삭장치는 미국 미시간주립 대학의 재료공학과내 고풍력 레이저 실험실에서 보유하고

고 있는 것으로 레이저의 출력은 2.0kW(frequency = 5kHz)로 고정하였다. 효과적인 레이저절삭을 위한 공기분사의 압력은 25psi(1.78kg/cm²)로 1분당 공기유량은 1.55ft³/min(4.39×104cm³/min)이었다. 초점의 위치는 시편 표면으로부터 시편 내부로 2mm 떨어진 지점에 고정하였으며, 공기노즐은 시편 표면으로부터 1mm 떨어진 곳에 위치하도록 하였다. 노즐로부터 높은 압력으로 분사되는 공기는 레이저절삭 중 증발 또는 용융된 물질을 불어내는 한편, 공기의 공급으로 목재 연소에 도움을 준다. 또한, 레이저 빔의 통로로부터 플라즈마나 연기를 제거하여 레이저 빔의 분산을 최소화함으로써 에너지를 절감하는 효과가 있으며, 절삭중인 피삭재의 표면을 냉각시키는 역할도 한다.

2.3 절단가능 최대 송재속도

단풍나무와 참나무의 완벽한 절단이 가능한 최대 송재속도를 구명하기 위하여 각각 3.8m/min과 3.0m/min을 최초로 적용하여 절삭한 후 완벽한 절단이 이루어지지 않는 경우에는 0.25m/min단위로 속도를 낮추고, 완벽한 절단이 된 경우에는 반대로 0.25m/min씩 속도를 증가시키면서 완벽한 절단이 가능한 최대의 송재속도를 찾았다.

2.4. 레이저절삭면 특성

2.4.1 레이저절삭면 탄화 정도

레이저절삭면의 탄화정도를 측정하기 위하여 화상처리 시스템을 이용, 각 절삭면 畫像(image)의 gray level의 분포와 그 평균 값을 구하였다. 사용된 CCD카메라(흑백)의 해상도는 41만 畫素였으며, 화상 신호처리용 보드의 해상도는 256×256이었다.

2.4.2 레이저절삭면의 형상

레이저절삭면의 형상과 거친 정도를 측정하기 위하여 레이저 변위센서와 servo actuator를 이용한 표면형상 측정시스템을 구성, 적용하였다. 레이저 변위센서의 측정정밀도는 10 micrometer였으며, 센서로부터 출력되는 신호는 A/D converter를 거쳐 RS232통신에 의해 컴퓨터에 입력되도록 하였다. 입력된 자료는 본 연구를 위해 작성한 거칠기 분석용 프로그램을 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 절단 가능 최대 송재속도

수종별 절삭방향에 따른 절단 가능 최대 송재속도는 표 1과 같았다. 두 수종 모두에서 섬유방향과 평행한 종절(ripping)의 경우 송재속도가 가장 빠른 것으로 나타났다. 이러한 사실은 종절시 목재의 절단을 위하여 레이저로부터 공급되어야 하는 에너지의 양이 적다는 것을 의미한다. 종절의 경우 세포벽에서 레이저에 의해 제거되는 단면적이 횡절의 경우보다 작다. 또한, 레이저 절삭시 목질을 통한 열전달의 주된 방향도 횡절의 경우 섬유방향이 되나 종절의 경우에는 횡방향이 된다. Siau(1984)에 따르면 섬유방향의 열전달이 횡방향에 비해 약 2.5배에 이른다는 사실을 고려할 때 횡절시보다 많은 에너지가 열전달에 의해 손실될 것이다. 따라서 종절시 절단을 위하여 제거되어야 할 목질의 양이 줄어들게 되므로 요구되는 에너지의 양도 감소한다. 레이저의 출력은 2kW로 고정되어 있으므로 레이저에 의한 에너지 공급량은 송재속도에 따라 달라지게 된다. 한편, 송재속도가 증가할수록 목재에 전달되는 에너지의 양도 감소한다.

Table 1. Average weight of wood substance removed and maximum feed speed at the point of full penetration of the laser beam by cutting angle.

Species	Cutting angle (degree)	Average weight of wood substance removed (g)	Maximum feed speed (m/min)
Red oak	0	1.19	4.10
	30	1.24	3.70
	45	1.25	3.70
	90	1.29	3.50
Hard maple	0	1.36	3.60
	30	1.31	3.30
	45	1.48	3.30
	90	1.25	3.30

Table 2. Maximum and average gray levels of laser-cut surfaces of red oak and hard maple at different cutting angles.

Species	Cutting angle (°)	Maximum gray level	Average gray level
Red oak	0	93	29
	30	62	20
	45	67	21
	90	85	28
Hard maple	0	180	42
	30	125	38
	45	123	35
	90	101	22

참나무의 경우 절단 전과 절단 후 시편무게의 차이로 추정된 제거된 목질의 무게는 절삭각도가 증가할수록 약간씩 증가되어 종질에 가까울수록 제거되어야 할 목질의 양이 줄어든다는 사실을 입증하고 있다. 그러나 단풍나무에서는 조직적 특성상 특별한 경향을 찾을 수 없었다.

한편, 비중이 높은 수종임에도 불구하고 참나무에 대

한 최대 송재속도가 단풍나무의 그것에 비해 높은 것은 환공재로 공극의 크기가 큰 참나무의 경우 절삭시 공극을 통한 공기의 유입과 연소가스의 배출이 원활히 이루어지기 때문인 것으로 추측된다. 특히, 참나무 종질(절삭각 0도)의 경우 절삭에 의해 발생되는 연소가스가 절삭단면의 공극을 통해 원활히 배출되므로 최대 송재속도가 가장 크게 나타났다.

3.2. 레이저 절삭면의 특성

3.2.1 절삭면의 gray level

그림 1은 레이저절삭면을 화상처리하여 측정된 gray level의 분포를 histogram으로 표현하고 있으며, gray level의 최고 값과 평균 값은 표 2와 같았다. 참나무의 경우 단풍나무에 비해 비교적 gray level이 높은 것으로 나타나 참나무의 절삭면이 단풍나무에 비해 약간 밝은 색을 띄고 있음을 알 수 있었다. 특히, 참나무를 목리에 평행한 방향으로 절삭할 경우 gray level이 가장 높았다. 이처럼 참나무의 경우 단풍나무에 비해 절삭면의 gray level이 높은 것은 공극율이 큰 참나무의 경우 절삭시 산소의 공급과 함께 연소가스의 배출이 보다 원활히 이루어

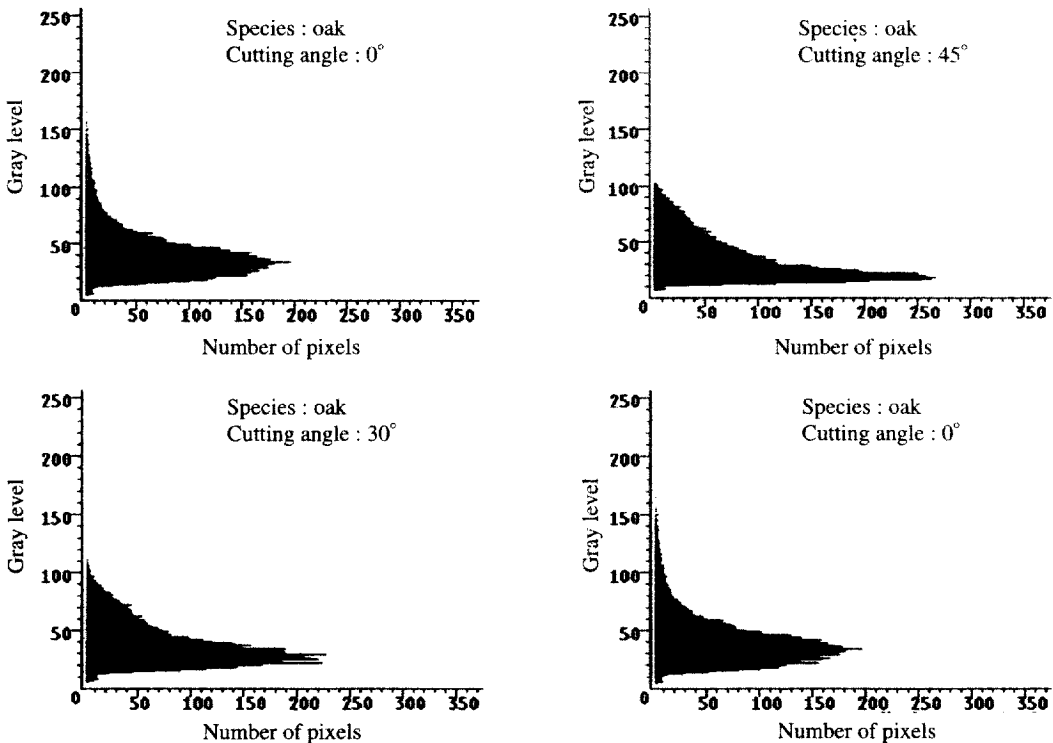


Fig. 1. Gray level histograms on the laser-cut surfaces of red oak.

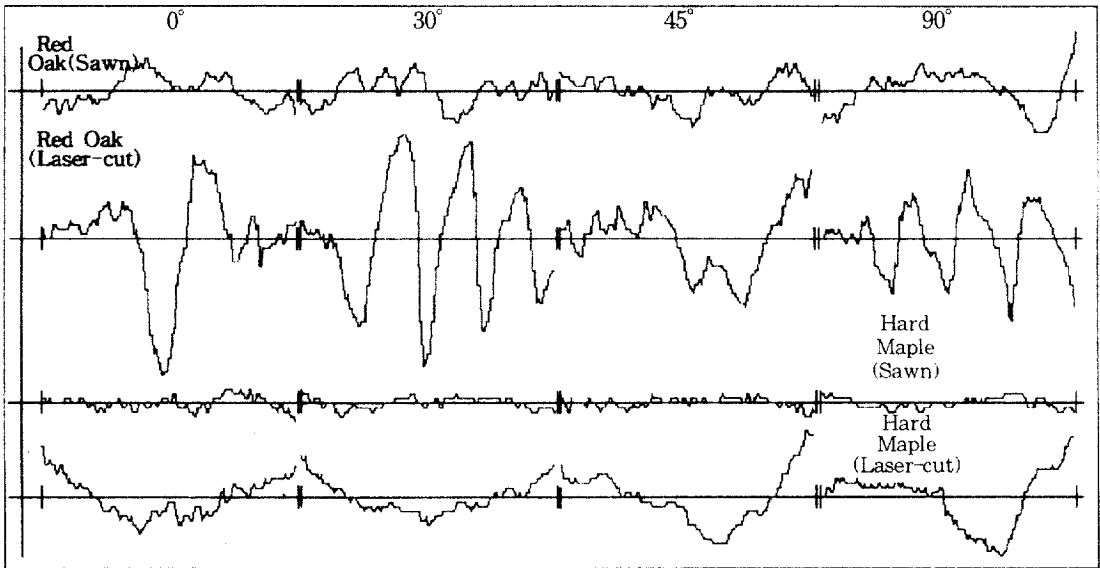


Fig. 2. Surface profiles on sawn and laser-cut surfaces of red oak and had maple.

저 단풍나무에 비해 상대적으로 절삭면의 연소가 완벽하게 이루어졌기 때문에 판단된다.

한편, 절삭방향에 따른 절삭면 gray level의 변화를 보면 참나무의 경우 절삭각도가 작을수록 즉, 목리에 평행한 절삭방향에 가까울수록 비교적 밝게 나타나고 있다. 그러나 단풍나무에서는 절삭방향에 따른 절삭면 gray level의 변화 경향이 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이와 같은 차이점도 목재의 조직적 차이에 의한 것으로 추정된다.

3. 2. 2. 절삭면의 거칠기

그림 2는 레이저절삭면과 등근톱에 의한 절삭면의 거칠기를 레이저변위센서를 이용하여 측정된 결과이다. 두 수종 모두에서 레이저절삭면이 등근톱 절삭면에 비하여

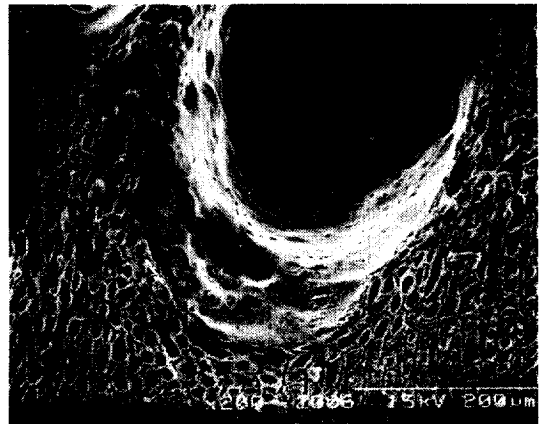


Fig. 3. Scanning electron micrograph of red oak surfaces cut with carbon-dioxide laser across the grain($\times 500$).

Table 3. Center line average roughnesses of sawn and laser-cut surfaces of red oak and maple by four different cutting angles.

(Unit: micrometer)

Species	Cutting angle(degree)							
	Sawn surface				Laser-cut surface			
	0	30	45	90	0	30	45	90
Red oak	18	29	22	31	61	91	124	126
Hard maple	13	9	9	9	18	19	19	20

평균거칠기가 높은 것으로 나타났다. 등근톱 절삭에서는 일부 섬유들은 정확히 절단되는 한편, 일부는 섬유가 절단되기 전 톱니에 의해 밀려 공극을 막아버리게 된다. 그러나 그림 3에서 볼 수 있듯이 레이저절삭에서는 절삭면 표면에 노출된 세포벽이 절삭 중 용융하여 마치 세포벽의 일부가 침식된 듯 보이게 된다. 따라서 절삭에 의해 오히려 공극이 확대되는 현상이 발생하게 되어 그 절삭면이 거친 것으로 판단된다. 특히, 참나무의 경우 공극의 크기가 단풍나무에 비해 크므로 레이저절삭면의 거칠기도 매우 높은 것으로 나타났다(Table 3).

4. 결 론

목재의 레이저 절삭에 대한 본 연구결과에 따르면 절삭방향에 따라 적용할 수 있는 최대 송재속도가 다르므로 절삭방향별로 송재속도를 달리한다면 보다 신속한 가공에 의한 생산성 향상을 기할 수 있을 것이다. 그러나 레이저 절삭의 가장 큰 단점이라 할 수 있는 절삭면의 탄화와 불규칙한 형상은 여전히 문제점으로 남아 있다. 이와 같은 단점을 극복하기 위한 새로운 시도의 하나로는 이중 레이저빔에 의한 절삭일 것이다. 다시 말하면 1차 빔으로는 절삭을 수행하고, 곧 이어 2차 빔에 의해 절삭면에 남은 탄화물질을 제거하는 한편, 불규칙한 표면을 보다 평활하게 한다면 문제를 어느 정도 해결할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 본 주제에 대한 보다 깊고도 활발한 연구가 절실히 요구되고 있다.

참 고 문 헌

1. Arai, T., S. Shimakawa, and D. Haysshi. 1977. Study on laser machining of wood. *Mokuzai Gakkaishi* 23(7) : 317~321
2. Arai, T., H. Kawasumi, and N. Konoshita. 1978. Three-dimensional graphic analysis to determine the optimum laser cutting conditions of board. *Mokuzai Gakkaishi* 24(5) : 281~286
3. Barnekov, V. G., C. W. McMillin, and H.

- A. Huber. 1986. Factors influencing laser cutting of wood. *Forest Prod. J.* 36(1) : 55~58
4. Barnekov, V. G., H. A. Huber, and C. W. McMillin. 1989. Laser machining wood composites. *Forest Prod. J.* 39(10) : 76~78
5. Bever, M. B. 1986. Encyclopedia of materials science and engineering, Vol. 4. The MIT Press : 2501~2516
6. Considine, D. M. 1983. Van Nostrand's scientific encyclopedia, 6th ed., Vol. 2. Van Nostrand Reinhold Co., Inc. : 1734~1740
7. Kamke, F. A. and P. N. Peralta. 1990. Laser incising for lumber drying. *Forest Prod. J.* 40(4) : 48~54
8. McMillin, C. W. and J. E. Harry. 1971. Laser machining of southern pine. *Forest Prod. J.* 21(10) : 34~37
9. McMillin, C. W., R. W. Connors, and H. A. Huber. 1984. ALPS-A Potential New Automated Lumber Processing System. *Forest Prod. J.* 34(1) : 13~20
10. McMillin, C. W. and H. A. Huber. 1985. Glue-bond strength of laser cut wood. *Forest Prod. J.* 35(1) : 23~25
11. Mukherjee, K., T. Grendzwell, P. A. A. Khan, and C. W. McMillin. 1990. Gas flow parameters in laser cutting of wood-nozzle design. *Forest Prod. J.* 40(10) : 39~42
12. Peters, C. and C. Bannas. 1977. Cutting wood and wood-based products with a multikilowatt CO2 laser. *Forest Prod. J.* 27(11) : 41~45
13. Siau, J. F. 1984. Transport processes in wood. Springer-Verlag
14. Tillman, D. A. 1985. Forest Products : Advanced technologies and economic analyses. Academic Press., Inc.