

은행나무, 감나무, 가중나무 세포내강의 액체이동

전 수 경[†]

강원대학교 산림바이오소재공학과

Capillary Flow in Different Cells of *Ginkgo Biloba*, *Diospyros Kaki* and *Ailanthus Altissima*

Su Kyoung Chun[†]

Department of Forest Biomaterials Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

Abstract: A study was carried out to observe the 1% aqueous safranin solution flow speed in longitudinal and radial directions of softwood *G. biloba*, ring-porous wood *A. altissima*, and diffuse-porouswood *D. kaki*. In radial direction, ray cells and in longitudinal direction tracheids, vessel and wood fiber were considered for the measurement of liquid penetration speed at less than 12% moisture contents (MC). The length, lumen diameter, pit diameter, end wall pit diameter and the numbers of end wall pits determined for the flow rate. The liquid flow in the those cells was captured via video and the capillary flow rate in the ones were measured. Vessel in hardwood species and tracheids in softwood was found to facilitate prime role in longitudinal penetration. Radial flow speed was found highest in ray parenchyma of *G. biloba*. Anatomical features like the length and diameter, end-wall pit numbers of ray parenchyma were found also responsible fluid flow differences. On the other hand, vessel and fiber structure affected the longitudinal flow of liquids. Therefore, the average liquid penetration depth in longitudinal tracheids of *G. biloba* was found the highest among all cells considered in *D. kaki* and *A. altissima*.

Keywords: *Capillary flow rate, Ginkgo biloba, Diospyros kaki and Ailanthus altissima, Tracheids, Vessel, Wood fiber, Ray parenchyma, Pit aperture, Numbers of endwall pits, Cell lumina diameter, Cell length*

1. 서 론

생체에서 도관과 가도관의 구조는 축방향 액체 이동을 주도하기 때문에 도관과 가도관이 액체 이동에 주된 역할을 한다는 것은 당연한 일이다. 그 효과는 세포의 크기, 개수, 분포 및 충전물의 존재 유무에 따라 다르다. 목재 내의 액체 흐름은 공극

구조의 연속성에 의해 조절된다. 다양한 세포의 형태를 갖고 있는 활엽수는 침엽수보다 더 복잡하다.

침엽수에서 가도관은 막혀 있어서 주요한 축방향 흐름의 통로는 가도관과 가도관 사이에 있는 유연벽공이다(Siau 1984; Flynn 1995). 접선방향 액체 흐름은 또한 첫째로 축방향가도관의 유연벽공 사이에서 이루어진다(Erickson 1970; Keith and Chauret 1988). 공기의 투과성을 접선방향과 축방향에 비교하면 대략 103배 정도 더 적다(Petty 1970; Flynn 1995). 축방향 흐름은 축방향가도관

2015년 3월 15일 접수; 2015년 4월 13일 수정; 2015년 4월 15일 게재확정

[†] 교신저자 : 전 수 경 (chun@kangwon.ac.kr)

과 벽공 구조의 모세관 구조에 달려있고, 방사유세포는 방사방향 흐름의 주요통로이다. 침투된 액체는 벽공을 통해 인접한 가도관으로 확산된다 (Olsson *et al.* 2001). 액체에 의해 투과된 거리는 수종마다 다양한데 그 이유는 방사유조직의 배열 때문이다. 목재에서 액체의 측면 흐름은 대개 방사방향으로 배열된 방사유세포를 통해 이루어진다. 그것들은 도관방사조직간 벽공과 연결되어 있어서 액체의 방사방향 흐름을 돕는다.

Watanabe *et al.* (1998)에 따르면, 목재 내에서의 액체이동에는 세포벽을 통한 확산과 세포내강이 이동의 두 가지 유형이 있고, 세포내강 이동은 목재를 가공하는 과정에서 주로 발생한다고 했다. 모세관 작용을 통한 이동은 확산을 통해 이루어지는 것보다 훨씬 더 빠르다. 실제로 모세관의 투과성을 개선하여 흡수가 최대 상태가 되게 하기 위해서는 모세관의 투과 속도가 증가되어야 한다. 액체 이동은 목재의 함수율뿐만 아니라(Hansmann *et al.* 2002), 섬유방향(Bolton 1988; Fujii *et al.* 2001; Kamke and Lee 2007)에 따라 이동속도가 달라진다. 물리적 화학적(Hansmann *et al.* 2002) 및 해부학적 특징도 액체 이동과 관련되어 있다(Thomas 1976; Owoyemi and Kayode 2008). 목섬유가 목재조직의 대부분을 구성하는 주된 요소이지만, 일반적으로 일차적인 액체 이동은 목섬유보다 도관이 중요한 역할을 한다(Leal *et al.* 2007). 그럼에도 불구하고, 목섬유의 침투성은 도관 혹은 인접한 다른 세포의 액체 이동에 영향을 미칠 수 있다. 도관과 달리 무공재인 목섬유는 목섬유의 벽이 후벽이고, 상대적으로 벽공이 작아서 액체 투과에 효과적이지 않다. 세포상호 간 벽공은 액체의 이동에 있어서 중요한 통로가 되며, 그 구조 및 분포는 목재의 액체 침투에 영향을 미친다.

목재를 염료에 담가 염색목재를 만들어 장식재 등에 사용한다. 염색이 잘 되기 위해서는 목재의 침투성이 좋아야 하는데 몇 가지 수종의 침투성을 조사하기 위해 사프라닌을 이용하여 해부학적 구조와 액체 침투 현상을 이해하기 위하여 방사방향과 축방향으로 모세관 투과속도를 측정하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 재료

목재의 기본 성상을 파악하기 위하여 침엽수재인 은행나무(*Ginkgo biloba* L.)와 활엽수의 환공재인 가중나무(*Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle), 활엽수재의 산공재인 감나무(*Diospyros kaki* Thunb.)의 목재해부학적 성질을 지상고 1.2 m의 높이에서 두께 3 cm의 원판을 각각 수종별로 만들어 조사했다. 은행나무의 수고는 5.8 m, 흉고직경은 12.1 cm 연륜 수는 19이었고, 감나무의 수고는 4.6 m, 흉고 직경 9.4 m, 연륜 수는 12이었으며, 가중나무의 수고는 5.6 m, 흉고직경은 9.2 m, 연륜 수는 15이었다. 각각의 공시목은 강원도 강릉시 교동과 노암동에서 채취되었다.

2.2. 실험 방법

2.2.1. 해부학적 특징 시료 제작

가도관, 도관, 목섬유, 방사유세포의 길이, 직경은 축방향 또는 방사방향 액체 이동에 영향을 준다(Ahmed and Chun 2009). 따라서 본 연구에서는 수종별로 Table 1과 같이 해부학적 특징을 조사하였다.

본 연구에서는 가도관, 도관, 목섬유, 방사유세포의 평균 길이, 최소·최대 내강직경, 마르고와 벽공의 최소·최대 지경, 말단벽 벽공구의 수를 Table 1과 같이 조사했다. 삼단면 현미경표본 제작을 하기 위해서 웅이나 응력재가 없는 무결점 시편을 채취하였다. 채취된 시편을 연회하기 위하여 오토크레이브에서 30분~2시간 연화했다. 연화된 시편을 활주식 마이크로톰에서 시편을 15 μm 두께로 절삭했다. 목재의 해리는 Schurz법을 사용했다. 각각의 샘플을 제작한 후 염색한 다음 알코올시리즈로 탈수 처리하고 봉입한 후 현미경으로 관찰했다. 세포의 특징 크기는 *I*-solution으로 측정했다. 전자현미경 관찰은 전계방사형 주사전자현미경(FE-SEM HITACHI S-4300)으로 관찰했다. 측정은 특징에 따라 7회 내지 25회 반복 측정하여 평균값을 구하였다.

Table 1. Different Micro-Structural Feature

Species	Anatomical properties	Mean	Min.	Max.
<i>Ginkgo biloba</i>	Length of Longitudinal Tracheid (μm)	897.73 (\pm 81.89)		
	Length of Ray Parenchyma Length (μm)	186.92 (\pm 42.37)		
	Diameter of Longitudinal Tracheid Lumina (μm)		26.34 (\pm 4.49)	35.2 (\pm 9.88)
	Diameter of Ray Parenchyma Lumina (μm)		19.42 (\pm 1.14)	27.6 (\pm 3.69)
	Diameter of pit aperture in longitudinal Tracheid (μm)		2.86 (\pm 0.19)	3.61 (\pm 0.68)
	Diameter of Cross Field Pit Aperture (μm)		0.86 (\pm 0.31)	3.45 (\pm 1.92)
<i>Diospyros kaki</i>	Length of Vessel (μm)	335.99 (\pm 60.27)		
	Length of Fiber (μm)	554.88 (\pm 77.28)		
	Length of Ray Parenchyma (μm)	46.5 (\pm 13.6)		
	Diameter of Vessel Lumina (μm)		75.62 (\pm 20.84)	96.86 (\pm 22.7)
	Diameter of Fiber Lumina (μm)		19.91 (\pm 1.76)	20.27 (\pm 3.08)
	Diameter of Ray Parenchyma Lumina (μm)		17.24 (\pm 2.29)	19.54 (\pm 3.22)
	Diameter of Intervessel pit aperture (μm)		0.62 (\pm 0.15)	1.14 (\pm 0.17)
	Diameter of Fiber pit aperture (μm)		1.46 (\pm 0.34)	3.02 (\pm 0.85)
	Diameter of Vessel-Ray pit aperture (μm)		0.47 (\pm 0.21)	0.85 (\pm 0.33)
	Diameter of Endwall pit aperture in Procumbent Cell (μm)		0.71 (\pm 0.17)	1.57 (\pm 0.48)
	Numbers of Endwall pits of Procumbent Cell	21		
<i>Ailanthus altissima</i>	Length of Large Vessel (μm)	375.81 (\pm 87.05)		
	Length of Small Vessel (μm)	75.24 (\pm 15.65)		
	Length of Fiber (μm)	504.42 (\pm 49.35)		
	Length of Ray Parenchyma (μm)	46.58 (\pm 6.11)		
	Diameter of Large Vessel Lumina (μm)		167.26 (\pm 30.4)	230.13 (\pm 29.22)
	Diameter of Small Vessel Lumina (μm)		36.75 (\pm 3.76)	41.88 (\pm 3.56)
	Diameter of Fiber Lumina (μm)		14.72 (\pm 1.81)	17.38 (\pm 1.30)
	Diameter of Ray Parenchyma Lumina (μm)		14.08 (\pm 2.94)	22.34 (\pm 2.44)
	Diameter of pit aperture in Largevessel (μm)		2.08 (\pm 0.17)	2.84 (\pm 0.37)
	Diameter of pit aperture in Smallvessel (μm)		0.57 (\pm 0.18)	0.98 (\pm 0.42)
	Diameter of pit aperture in Fiber (nm)		0.62 (\pm 0.39)	0.97 (\pm 0.40)
	Diameter of pit aperture in Vessel-Ray Pits (μm)		0.98 (\pm 0.55)	1.54 (\pm 0.84)
	Diameter of Endwall Pit Aperture in Procumbent Cell (μm)		0.85 (\pm 0.10)	1.49 (\pm 0.48)
		Numbers of Endwall pits in Procumbent Cell	4	

2.2.2. 염료용액 침투 속도 측정방법

본 연구에서는 safranin으로 처리한 후 각 방향별 및 세포별 침투 깊이를 *i-camscope* (model SV32) 현미경으로 7회 반복 측정했다. 사프란인용액 침투할 때 실내 환경 조건은 습도 65%, 온도

24°C, 바람속도 0에서 실시했고, 시편은 growth-chamber (MLR-352H)에서 함수율을 12%로 조절하여 사용했다. 방사단면 10 mm (R) × 5 mm (T) × 40 mm (L)와 축방향 5 mm (R) × 10 mm (T) × 40 mm (L)로 시편을 제작하였다. 축방향 침투 실험

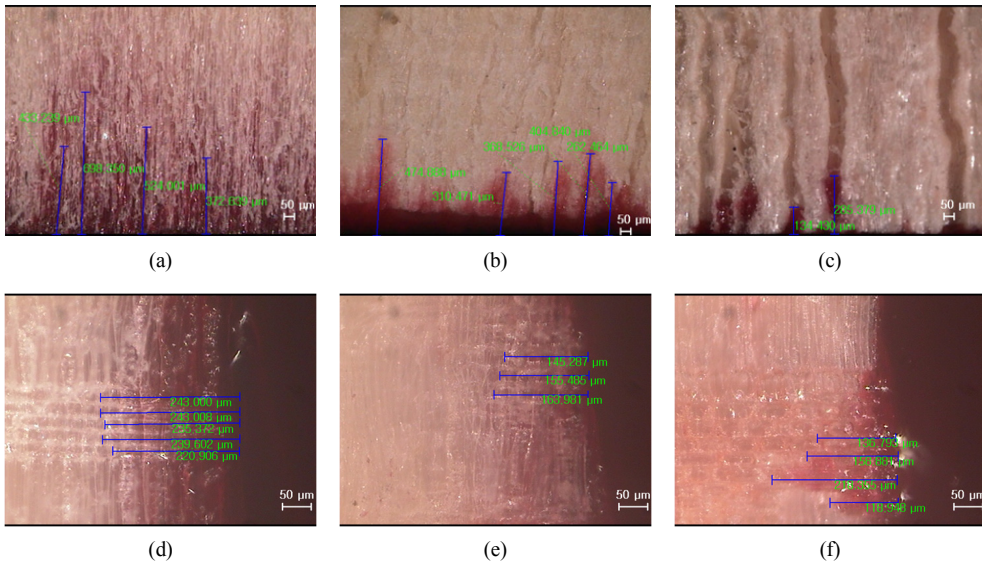


Fig. 1. Sequence of penetration measurement (a) in Earlywood Longitudinal tracheid of *G.biloba* at 1.392 sec., (b) in Latewood vessel of *D. kaki* at 1.392 sec., (c) in Earlywood large vessel of *A. altissima* at 1.392 sec., (d) in Ray Parenchyma of Sapwood of *G. biloba* at 52.2 sec., (e) in Ray Parenchyma of Sapwood of *D. kaki* at 52.2 sec., (f) in Ray Parenchyma of Sapwood of *A. altissima* at 52.2 sec..

을 위하여 한 개의 접선단면과 횡단면을 제외하고, 방사단면 침투 실험을 위해서 한 개의 접선단면과 방사단면을 제외한 모든 부분을 실리콘수지로 코팅하였다. 1% 사프란린 용액이 코팅되지 않은 단면을 관통하게 되고, *i-camscope*를 이용하여 침투 과정을 비디오 현미경으로 5분간 촬영하였다. 그 후 Vitrual Dub-MPEG2 1.6.19 software로 축방향에서는 0.348, 0.696, 1.044 and 1.39초마다 방사방향에서는 0.348, 17.4, 34.8 and 52.2초마다 촬영했다. 감나무는 만재폭이 매우 좁은 산공재이므로 변재에서만 측정했다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 해부학적 특징

가중나무 소도관의 직경은 감나무의 것보다 2.3 배 더 작았고, 방사유세포 내강은 가중나무가 감나무보다 더 작았으며, 가중나무의 대도관은 감나무 도관보다 2.4배 더 넓었다. 가중나무와 감나무의 도관의 길이는 목섬유보다 더 짧았고, 감나무의 목섬유 길이는 가중나무의 것보다 1.17배 더 길었다.

도관상호간 벽공구의 면적은 가중나무가 감나무보다 2.5배 더 넓었고, 도관방사조직간 벽공구의 면적은 가중나무가 감나무보다 더 컸다. 은행나무 가도관 직경의 평균은 활엽수 도관보다 더 작았고, 방사유세포 내강의 면적은 감나무와 가중나무보다 약 1.59배와 1.7배 컸으며, 가도관 길이는 감나무와 가중나무의 도관들보다 더 길었다.

3.2. 축방향과 방사방향의 침투

축방향 흐름은 도관의 높은 침투성 때문에 방사방향의 흐름보다 훨씬 높다(Lihra *et al.* 2000). 축방향과 방사방향 사이의 침투성의 차이는 수종과 세포에 따라 다르게 나타났으며, 은행나무 축방향 가도관이 가장 더 높게 침투되었다. 은행나무 축방향 가도관의 액체 침투 깊이는 감나무 도관과 목섬유보다 높았고, 은행나무 축방향가도관은 가중나무 목섬유보다 높았다. 은행나무의 가도관은 세포 길이가 더 길고 벽공이 더 많기 때문에, 그 침투 깊이는 감나무 가중나무의 도관이나 목섬유보다 더 높았다. 감나무 목섬유의 액체 침투 깊이는 가중나무의 목섬유보다 더 높았으나, 가중나무의 대

Table 2. Longitudinal Capillary Flow Late in Different Cells of *G. biloba*, *D. kaki* and *A. altissima*

Cells	capillary flow late (Um)			
	0.348 sec.	0.696 sec.	1.044 sec.	1.392 sec.
Longitudinal Tracheid of <i>G. biloba</i>	232.92	467.85	582.09	661.87
Vessel of <i>D. kaki</i>	75.63	163.98	231.45	274.38
Fiber of <i>D. kaki</i>	66.17	107.35	156.33	202.01
Large Vessel of <i>A. altissima</i>	89.96	147.44	185.27	204.78
Small Vessel of <i>A. altissima</i>	79.31	129.97	195.50	222.16
Fiber of <i>A. altissima</i>	55.20	85.37	132.03	158.82

Table 3. Radial Capillary Flow Late in Ray Parenchymas of *G. biloba*, *D. kaki* and *A. altissima*

Cells	capillary flow late (Um.)			
	0.348 sec.	17.4 sec.	34.8 sec.	52.2 sec.
Ray Parenchyma of <i>G. biloba</i>	60.21	123.08	183.04	196.99
Ray Parenchyma of <i>D. kaki</i>	23.19	81.69	107.90	126.60
Ray Parenchyma of <i>A. altissima</i>	21.16	93.34	99.89	112.27

도관은 소도관이나 은행나무 가도관보다 더 낮게 침투되었다. 이것은 가중나무의 소도관 및 은행나무의 가도관 직경이 가중나무의 대도관보다 직경이 작아서 나타난 것으로 생각된다. 감나무 목섬유는 가중나무 목섬유보다 약간 모세관 이동성이 높았고, 감나무 도관은 환공재인 가중나무보다 침투율이 더 높았다. 긴 세포의 은행나무 축방향가도관은 활엽수종의 목섬유보다 침투율이 더 높았다. 그러나 이 결과는 이전의 결과들과는 반대였다. 이 연구의 결과는 짧은 시간 동안의 액체처리를 실시한 것을 고려해야 될 것이다. 높은 침투율은 *Cryptomeria japonica*의 조재 가도관에서 발견되는 경향이 있다 (Kitin *et al.* 2009). 액체 침투성이 초기에 급격하게 감소하여 시간이 지날수록 흐름 감소가 눈에 띄었다. 즉, 침투 깊이와 시간 사이에는 음의 관계가 성립되었다. 시간이 지나갈수록 목재세포 내의 액체 침투성의 감소 원인은 일반적으로 가스에 의한 색전증의 증가에 원인이 있는 것으로 생각된다. 본 연구에서도 침투 속도는 모든 목재 세포에서 시간이 경과함에 따라 서서히 감소되었다.

방사유세포는 모세관의 끝과 끝이 서로 연결되어 있다. Siau (1995)는 활엽수재에 방사유세포가 많아도 중요한 역할을 하지 못한다고 했다. 침엽수에서

방사유세포는 길고 말단벽 벽공구는 넓다(Ahmed *et al.* 2006). 결과적으로 활엽수의 방사유세포와 비교하여 침엽수재의 방사유세포가 더 중요한 역할을 했다. 한 연구에 의하면 함침 시 방사단면이 액체의 중요한 흐름의 통로로서 역할을 담당한다고 했다 (Wardrop and Davies 1961; Banks 1970). 몇몇의 연구 결과는 은행나무의 방사유세포가 중요한 흐름의 통로로서 역할을 한다고 했다(Keith and Chaurat 1988; Trenard and Gueneau 1984).

활엽수재 도관의 배열은 천공을 통해 끝에서 끝으로 다른 도관에 연결되어 있으므로 축방향 침투는 목섬유보다 도관이 중요하고, 도관의 직경과 관계가 크다. 목섬유는 끝이 막혀있는 무공재이고, 도관과 비교하여 두꺼운 세포벽과 비교적 작은 벽공이 불균일하게 분포한 목섬유는 용액의 흐름이 나타나지 않을 수 있다. 방사유세포의 내강은 큰 것보다 작은 것이 더 높은 모세관 압력을 가진다는 것은 Young-Laplace식으로부터 잘 알 수 있다. 세포의 직경은 물질 이동의 중요인자로 사료되었고, 방사방향 침투에서 해부학적 특성은 방사유세포내강의 직경과 길이, 말단벽 벽공의 수와 직경에 의해 다르다는 것을 발견했다. 도관, 목섬유, 방사유세포의 침투의 차이는 해부학적 차이에 의한 것

이었다.

측면 유동 주요 통로인 방사유세포는 내강의 직경이 작고, 길이가 긴 세포에서 침투 깊이가 높았고, 작은 말단벽 벽공구와 짧은 방사유세포는 액체 유동이 원활하지 않았다.

방사유세포 벽공의 배열은 방사방향에서의 효율적인 액체 흐름을 가능케 하며, 이것은 방사유세포가 측면으로의 물질 이동에 중요한 역할을 한다. 방사유조직의 가장 바깥쪽 터널에 위치한 방사유세포는 종종 함침할 때 중요한 액체 수송 경로 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Liese and Bauch 1967; Erickson and Balatinecz 1964). 은행나무 방사유세포는 감나무와 가중나무 방사유세포보다 많이 침투되었다. 활엽수재인 감나무와 가중나무의 방사유세포가 침엽수재인 은행나무 방사유세포보다 더 낮은 침투성을 갖는 이유를 찾고자 조사한 결과 은행나무의 방사유세포 내강직경이 감나무와 가중나무의 방사유세포 내강직경보다 컸지만, 은행나무의 방사유세포 길이가 감나무와 가중나무의 방사유세포 길이보다 길어 액체가 이동할 때 말단벽의 방해로 적게 받아 높은 침투성을 보였다. 방사유세포의 액체의 이동은 말단벽에 의해 방해받으므로 세포의 길이가 긴 것이 적은 수의 말단벽을 통과하여 결국 방해로 덜 받게 된다.

감나무와 가중나무의 방사유세포 길이, 직경 및 말단벽 벽공구의 크기는 비슷하지만, 감나무 방사유세포의 침투 높이가 높은 것은 감나무의 말단벽 벽공구의 수가 많은 것이 원인이다.

4. 결 론

은행나무 축방향 가도관의 액체 침투 깊이는 다른 모든 세포들 중에서 가장 많이 침투되었다. 방사방향에서 가장 높은 침투 깊이는 은행나무 방사유세포였고, 가장 낮은 것은 가중나무 방사유세포였다. 가중나무 목섬유의 침투 깊이는 축방향의 다른 세포들 중에서 가장 적게 침투되었다. 가중나무의 대도관의 침투 깊이는 도관 중에 가장 적게 침투가 되었다. 감나무의 목섬유가 가중나무보다 더 많이 침투되었다. 가중나무의 직경이 작지

만 비중도 낮아 감나무보다 덜 침투가 되었다. 최대침투 높이에서 은행나무가 가장 높았고 가중나무가 가장 낮았다.

사 사

2013년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였음.

참 고 문 헌

- Ahmed, S. A. and S. K. Chun, 2009. Observation of liquid permeability related to anatomical characteristics in Samaneasaman. *Turk. J. Agric. For.* 33: 155-163.
- Ahmed, S. A., S. H. Chong, S. K. Chun, B. S. Park. 2006. Ray parenchyma and ray tracheid structure of four Korean pine wood species. *J. Kora furniture Soc.* 17(4): 101-107.
- Banks, W. B. 1970. Some factors affecting the permeability of Scots Pine and Norway Spruce. *Wood Sci.* 5(1): 10-17.
- Bolton, A. J. 1988. A reexamination of some deviations from Darcy's Law in coniferous wood. *Wood Sci. Technol.* 22: 311-322.
- Erickson, H. D. and J. J. Balatinecz, 1964. Liquid flow paths into wood using polymerization techniques: Douglas-fir and styrene. *FRo. Prod.* 14: 293-299.
- Erickson, H. D. 1970. Permeability of Southern Pine wood-a review. *Wood Science.* 2(3): 149-158.
- Flynn, K. A. 1995. A review of the permeability, fluid flow, and anatomy of spruce(Picedaspp.). *Wood Fiber Sci.* 27: 278-284.
- Fujii, T., S. J. Lee, N. Kuroda, and Y. Suzuki, 2001. Conductive function of inter vessel pits through a growth ring boundary of *Machilus thunbergii*. *IAWA J.* 22(1): 1-14.
- Hansmann, C., W. Gindl, R. Wimmer, and A. Teischinger. 2002. Permeability of wood-a review. *Wood Res.* 47(4): 1-16.
- Kamke, F. A. and J. N. Lee. 2007. Adhesive penetration in wood-a review. *Wood fiber Sci.* 39: 205-220.
- Keith, C. T. and G. Chauret. 1998. Anatomical stud-

- ies of CCA penetration associated with conventional (tooth) and with micro (needle) incising. *Wood Fiber Sci.* 20: 197-208.
- Kitin, P., T. Fujii, H. Abe, and K. Takata. 2009. Anatomical features that facilitate radial flow across growth rings and from xylem to cambium in *Cryptomeria japonica*. *Ann. Bot.* 103: 1145-1157.
- Leal, S., V. B. Sousa, and H. Pereira. 2007. Radial variation of vessel size and distribution in cork oak wood (*Quercus suber* L.). *Wood Sci.* 41: 339-350.
- Liese, W. and J. Bauch. 1967. On anatomical causes of the refractory behaviour of spruce and Douglas fir. *Wood Sci.* 4(1): 3-14.
- Lihra, T., A. Cloutier, S. Y. Zhang. 2000. Longitudinal and transverse permeability of Balsam fir wetwood and normal heartwood. *Wood Fiber Sci.* 32(2): 164-178.
- Olsson, T., M. Megnis, and J. Varna. 2001. Study of the transverse liquid flow paths in pine and spruce using scanning electron microscopy. *Wood Sci.* 47: 282-288.
- Owoyemi, J. M. and J. O. Kayode. 2008. Effect of incision on preservative capacity of *Gmelina arborea* wood. *Biotech.* 7: 351-353.
- Petty, J. A. 1970. Permeability and structure of the wood of Sitka spruce. *Proc. Roy. Soc. Lond. B* 175: 149-166.
- Siau, J. F. 1984. *Transport processes in wood*. Springer, Berlin, New York.
- Siau, J. F. 1995. *Wood: Influence of moisture on physical properties*. Dept. of wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia. pp. 227.
- Thomas, R. J. 1976. Anatomical features affecting liquid permeability in three hardwood species. *Wood Fiber Sci.* 7(4): 256-263.
- Trenard, T. and P. Gueneau. 1984. Penetration pathways of liquid gallium in wood seen by scanning electron microscopy. *Wood Fiber Sci.* 16: 403-410.
- Wardrop, A. B. and G. W. Davies. 1961. Morphological factors relating to the penetration of liquids into wood. *Holzforchung.* 15: 130-141.
- Watmanabe, U., Y. Imamura, and Iida. 1998. Liquid penetration of precompressed wood VI: Anatomical characterization of pit fractures. *J. Wood Sci.* 44: 158-162.