

韓紙 엔드래핑처리 圓板의 減壓乾燥應力 分布模型 및 엔드래핑스의 乾燥缺陷 豫防效果*¹

李南浩*²·鄭希錫*²

Model of Drying Stress Distribution in Disks End-wrapped in Korean Paper and Effects of End-wrappings on Prevention of Drying Defects for Vacuum Drying of Disks*¹

Nam-Ho Lee*² Hee-Suk Jung*²

SUMMARY

It was proved that in conventional kiln drying of disks piling position in the kiln exerted a great influence on drying rates, and the larger the variation of disk diameter, the more undulating drying rates of disks. While in vacuum drying disks there was no influence on drying rates.

By the end-wrapping treatments and the radial direction of disks tangential surface stresses in the core of disks were slightly compressive in three species. In control disks the drying stresses distributed into one step-style that compressive stresses in the pith side of 6cm from pith were larger than those in the bark side, while in the disks end-wrapped with Korean paper the drying stresses distributed uniformly, because flow rates of free water in disks had no difference between heart-and sap-wood by obstruction of evaporating water from surface of disks by end-wrapping with Korean paper. And end-wrapping with Korean paper considerably restrained those.

Tangential differential shrinkage stresses developed the maximum tensile stress near the bark, and with approaching the pith the stresses gradually reduced and changed into compressive stresses in near the pith. At the end of vacuum drying the maximum tangential tensile stresses of disks end-wrapped with Korean paper were smaller than those of control disks, and critical moisture contents causing

*1. 接受 1990年 9月 14日 Received September 14, 1990

本 論文은 1989년도 韓國科學財團 學位論文研究支援費에 의해 수행되었음.

*2. 서울대학교 農科大學 College of Agriculture, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea

the V-shaped crack of disks end-wrapped with Korean paper were lower than those of control disks because of the set by obstruction of evaporating water of end-wrapping with Korean paper.

In the experiment of vacuum drying stress distribution the disks end-wrapped with Korean paper or aluminum foil in three species were free from V-shaped cracks and control disks were defected very slightly by V-shaped cracks. And also disks end-wrapped with Korean paper were free from heart checks in *Alnus japonica* and *Juglans sinensis*, and heart checks were occurred very slightly in others. Especially, not to speak of disks end-wrapped with Korean paper, vacuum drying of disks end-wrapped with aluminum foil prevented effectively drying defects, moreover drying times could be shortened, that is, *Ginkgo biloba*, *Alnus japonica*, and *Juglans sinensis* disks could be dried from green to in-use moisture content in 110 hours, 272 hours, and 407 hours, respectively.

1. 緒 論

원판은 판재에 비하여 곡선적 미관성이 매우 우수하여 전통적으로 테이블 床板, 전통 목기용재, 대형 안내판용재 또는 공예가치가 높은 조각품, 선삭가공품 등의 素材로 이용되어 왔고, 특히 오늘날은 문화수준의 향상으로 목재를 이용한 장식용 공예품, 관광기념품 및 아동용 오락기구 등의 수요가 급증하고, 또한 이들 제품에 어떤 예술성을 부여함으로써 가치를 향상시키고자하는 경향이 두드러지고 있다. 이런 측면에서 원판을 활용할 수 있는 가공기술을 개발하는데 관심을 갖는 것은 매우 의미있는 일이라 생각된다.

그러나 원판은 일반 제재품의 경우와는 달리 건조중 水分傾斜에 기인되는 表面應力의 발생이 극히 미미한 반면에 수목의 성장중에 형성된 모든 生長應力이 잔류하고, 횡단방향 異方性收縮應力이 변형에 의해서 해소되지 않고, 오직 파괴에 의해서만 제거되기 때문에 원판의 저장중 또는 건조 중에 心材割裂, 輪割과 V형크랙(V-shaped crack) 등의 乾燥缺陷이 판재보다 매우 민감하게 발생한다. 또한 乾燥缺陷의 발생을 억제코자 陰乾 등의 건조방법을 적용하여 乾燥速度를 지연시킬 경우에는 변재부가 쉽게 변색되어 원판 고유의 미관적 가치를 저하시킬 우려가 있을 뿐만아니라, 일단 損傷된 원

판은 木工藝品으로서 활용가치를 상실하게 된다. 따라서 원판건조 중에 수반되는 乾燥應力의 生成과 消滅 과정 및 應力分布模型을 구명하고, 적합한 원판건조방법을 제시하는 것은 원판의 효율적 利用度를 提高하는데 있어서 선결과제라고 생각된다.

그러나 원판을 건조하는데 있어서 熱對流에 의해 열이 전달되는 건조법으로 건조할 경우 棧積의 곤란, 棧積率 저하, 그리고 熱氣의 不均一한 配分과 그에 따른 熱에너지 損失 및 棧積部位間的 乾燥速度의 큰 차이가 필연적으로 나타날 것이고, 이러한 문제점들은 원판건조의 건조조건 설정을 더욱 어렵게 만들것이다. 이들 문제점을 극복하기 위해서는 熱傳導에 의해 열이 전달되는 減壓乾燥 방법을 적용하는 것이 바람직할 것이고, 특히 熱水循環加熱式 減壓乾燥(vacuum drying with hot water circulation heating system)는 더욱 적절한 건조방법일 것으로 생각된다. 뿐만아니라 減壓乾燥는 木材内外의 큰 압력차에 의한 自由水 유동속도의 증대로 表面應力의 발생을 완화시킬 수 있기 때문에 원판에서 심하게 형성되는 心材割裂 예방에도 효과적일 것으로 여겨지는 등 여러 측면에서 圓板減壓乾燥는 매우 유리할 것으로 전망되나 이에 관한 연구는 이루어져 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 목공예 수종으로 널리 이용되고 있는 오리나무(*Alnus japonica*), 호도나

무(*Juglans sinensis*) 및 은행나무(*Ginkgo biloba*)의 두께 5cm 원판을 공시재료로하여 목재수분의 급속한 증발을 억제할 수 있을 것으로 기대되는 韓紙와 알루미늄호일(aluminum foil)로 엔드래핑(End-wrapping)한 다음 減壓乾燥를 실시하면서 棧積위치별 乾燥速度, 乾燥缺陷의 발생경과, 건조시간 등 乾燥特性을 파악하여 원판의 慣行熱氣乾燥 특성과 비교하므로써 圓板減壓乾燥의 가능성을 진단하고, 가능한 한 최적의 건조조건과 근접된 상태에서 減壓乾燥應力分布試驗이 수행될 수 있도록 乾燥應力分布 試驗條件 推定試驗을 실시하였다. 이러한 推定試驗의 결과를 바탕으로하여 동일 수종의 무처리와 韓紙 엔드래핑 원판의 減壓乾燥應力 分布模型과 그 변천과정 및 V형크랙 발생 臨界含水率을 조사하고, 또한 減壓乾燥중 韓紙 및 알루미늄호일(aluminum foil) 엔드래핑의 乾燥缺陷 예방효과 등을 파악하므로써 최적의 圓板減壓乾燥條件을 추적할 수 있는 자료를 얻고, 圓板減壓乾燥의 적합성을 구명하고자 본 연구를 수행하였다.

2. 研究 史

Wilhemly등(1973a)은 입목의 橫切로 인해 과생되는 섬유방향 生長應力の 변화가 髓 부위에 접선방향 引張應力을 附加的으로 유도하여, 심재할렬의 발생을 촉진시킨다고 주장하였으며, 또한 Wilhemly(1973b)는 입목의 橫切로 인해 縱剪斷應力이 증가하나 最大縱剪斷應力이 형성되는 부위가 방사방향 引張應力이 미미하거나, 壓縮應力 상태인 부위와 일치하는 사실을 밝혔다. Archer(1981)는 圓筒形 樹幹의 殘留生長應力에 관한 이론적 모델을 조사한 연구를 통해 섬유방향의 生長應力은 髓 부위에 壓縮應力이, 그리고 수피 부위에 引張應力이 각각 존재하며, 방사방향의 경우 원주선상에는 應力이 존재하지 않으나 髓에 접근할수록 壓縮應力이 증가하는 분포모형을 제시한 바 있으며,

Castera(1989)는 영율의 변이는 表面應力에 큰 영향을 미친다고 보고하였다.

한편 Barnacle(1971)은 髓근처에 높은 접선방향 引張生長應力(tangential tensile growth stresses)이 존재하기 때문에 원판 건조의 경우 비록 건조초기에 극히 완만한 수분경사가 형성된다 할지라도 이는 心材割裂을 유발시킬 수 있음을 환기시킨 바 있다. Kubler(1973, 1977)는 또한 생재를 가열처리 할 경우 나타나는 Hygrothermal recovery 현상 또한 원판 건조시 心材割裂을 유발시키는 또 다른 원인임을 주장하였다. 그리고 Noguchi등(1987)은 원판의 직경, 건조 온도, 상대습도 및 풍속 등이 느티나무 원판 건조시 할렬 발생에 미치는 영향을 조사한 결과 상대습도만이 영향을 미친 사실을 밝혔다.

Ylinen(1949)은 Scotch pine 원판 건조시 異方性收縮應力의 경우 수피부위에서 접선방향 引張應力이 가장 크게 형성되고, 점점 감소하여 髓 부위에서는 오히려 壓縮應力상태로 전환되는 이론적 분포모형을 제시하였고, 미국임산물연구소(FPL, 1956)는 V형크랙의 幅은 접선방향과 방사방향간의 수축을 차이 및 원판의 직경에 비례하는 이론식을 제시하였으나, Kubler(1975)는 원판의 직경은 접선방향 引張應力의 크기에 영향을 미치지 않는다는 상반된 주장을 하였다.

Kubler(1974)는 PEG등과 같은 화학약품에 의한 치수안정화 처리는 약제주입기간이 길뿐만 아니라, 원판의 미관적 가치를 저하시키고 도장성을 불량하게 하는 단점이 있음을 지적하였다. Hsu 등(1974)은 원판 건조시 원주선상에 밴드결체를 실시할 경우 접선방향 引張應力을 상당량 감소시킬 수 있을 것이라고 제안하였고, 아울러 각 수종별 V형크랙 발생 臨界含水率을 추정하여 보고한 바 있다.

Kanagawa등(1978)은 투과성이 양호한 수종을 고주파 감압 건조(Radio Frequency Vacuum Drying)할 경우 표면할렬의 발생 없이 건조시간을 관행 열기 건조의 약 1/10 정도로 단축시킬 수 있다고 보고하였다.

Harris 등(1984a)은 高周波 減壓乾燥의 함수율분포 및 乾燥應力分布模型은 관행 열기 건조와 비교하여 큰 차이가 없으며, 판재 수축율은 高周波 減壓乾燥가 관행 열기 건조보다 약 30% 정도 적다는 사실을 보고하였으나, Kanagawa(1989)는 미송 판재를 高周波 減壓乾燥할 경우 관행 열기 건조와는 반대로 건조 초기에 表層에 壓縮應力이, 內層에 引張應力이 각각 형성되어 高周波 減壓乾燥는 표면할렬의 발생을 억제하는데 매우 효과적이라는 상반된 주장을 한 바 있다.

Harris 등(1984b)은 高周波 減壓乾燥材는 材面의 색상이 관행 열기 건조재보다 더 밝기 때문에 건조재의 미관적 가치를 유지하는데 高周波 減壓乾燥가 유리하다고 역설하였고, 또 Harris 등(1985b)은 高周波 減壓乾燥의 경우 前平削處理에 의한 건조수율 증대효과가 없음을 발견하였는데, 이것은 감압조건하에서는 自由水 유동속도가 매우 빨라 木毛에 應力이 집중되는 현상을 피할 수 있기 때문이라고 주장한 바 있다.

3. 材料 및 方法

3.1 供試材料

3.1.1 供試樹種

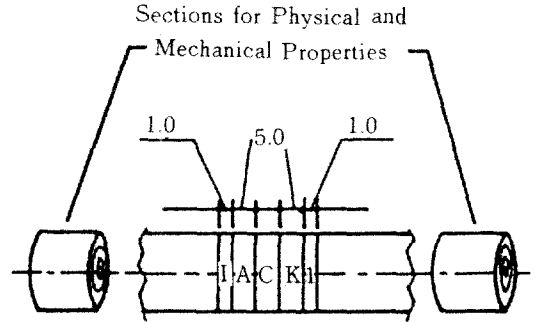
공시수종은 주로 목공예용재, 조각재 등으로 많이 이용되어 원판으로서 이용가치가 높은 오리나무(*Alnus japonica*), 호도나무(*Juglans sinensis*) 및 은행나무(*Ginkgo biloba*)를 사용하였다.

3.1.2 供試圓板

공시원목의 양 횡단면을 약 40cm 정도 제거한 다음 Fig.1과 같이 두께 5cm의 원판을 알루미늄 호일 엔드래핑처리재, 무처리재 및 한지 엔드래핑처리재로 구분하고, 엔드-매치(end-match) 되게 절취하여 乾燥應力分布 시험조건 추정시험과 減壓乾燥應力分布 시험용 원판으로 이용하였다.

3.1.3. 韓紙 엔드래핑처리

물과 전분을 중량비 5:1로 배합하여 제조한



- I: Disks for initial moisture content
- C: Disks for control
- K: Disks for end-wrapping with Korean paper
- A: Disks for end-wrapping with aluminum foil

Fig.1. Sample disks preparation in test of drying schedules of drying stress distribution and vacuum drying stress distribution (unit : cm).

전분풀을 공시원판에 균일하게 도포한 다음, 두께 0.08mm, 평량 $25.77 \pm 0.84 \text{ g/m}^2$, Cobb 吸水度 $44.9 \pm 4.82 \text{ g/m}^2$ 인 사각형의 한지 1매씩을 공시원판의 양 횡단면에 부착하였다.

3.1.4 알루미늄호일 엔드래핑처리

두께 0.02mm, 폭 330mm, 길이 30~40cm 크기의 식품포장용 알루미늄호일 2매가 서로 직교되도록 하여 공시원판 전체를 래핑하였다.

3.1.5 供試圓板의 生材比重

공시수종의 生材比重은 공시원판의 물리적 및 기계적 성질 조사용 원목으로부터 Fig.2와 같이 두께 35mm의 판재를 채취하여 변장 30mm, 길이 5mm의 生材比重 試驗片 20개씩을 각 건조방법별로 준비하여 침적법으로 구하였다.

乾燥應力分布 시험조건 추정에 사용된 공시원판의 수량, 長直徑, 短直徑, 偏心率, 初期含水率 및 生材比重은 Table 1과 같고, 減壓乾燥應力分布試驗에 사용된 공시원판의 경우는 Table 2와 같다.

3.1.6 供試圓板의 收縮率

수축율 시험편은 공시원판의 물리적 및 기계적 성질 조사용 원목을 Fig.2와 같이 제재한 다음, 각 공시수종별로 수축율 시험편 20개씩을

Table 1. Number, shape, initial moisture content and green volume specific gravity of sample disks used in test of drying schedules for vacuum drying stress distribution

Species	Drying method	End treatment	Number of disks	End shape			Initial MC(%)	Sp. Gr.
				Long diameter(cm)	Short diameter(cm)	Eccentricity		
<i>Alnus japonica</i>	Conventional kiln drying	Control	15	27.28 ±1.35	21.58 ±0.64	0.20 ±0.05		
		Korean paper	15	27.16 ±1.26	21.58 ±0.40	0.22 ±0.07	46.4 ±5.14	0.39 ±0.01
		Aluminum foil	15	26.66 ±1.22	21.42 ±0.53	0.19 ±0.16		
	Vacuum drying	Control	15	29.52 ±5.49	23.57 ±3.01	0.19 ±0.06		
		Korean paper	15	29.59 ±5.54	23.55 ±3.04	0.19 ±0.07	57.5 ±5.05	0.39 ±0.01
		Aluminum foil	15	30.07 ±5.43	23.79 ±2.95	0.26 ±0.06		
<i>Juglans sinensis</i>	Conventional kiln drying	Control	15	24.71 ±1.15	18.16 ±1.63	0.26 ±0.09		
		Korean paper	15	24.55 ±1.33	17.84 ±1.34	0.27 ±0.09	64.2 ±2.25	0.58 ±0.03
		Aluminum foil	15	24.49 ±1.11	18.10 ±1.33	0.26 ±0.08		
	Vacuum drying	Control	17	23.33 ±2.25	20.34 ±1.24	0.12 ±0.07		
		Korean paper	17	23.38 ±2.18	20.02 ±1.02	0.14 ±0.06	65.7 ±3.65	0.59 ±0.02
		Aluminum foil	17	23.21 ±2.33	20.27 ±0.96	0.12 ±0.06		
<i>Ginkgo biloba</i>	Conventional kiln drying	Control	11	28.64 ±9.74	21.25 ±6.71	0.25 ±0.09		
		Korean paper	11	26.20 ±7.42	20.98 ±6.28	0.20 ±0.06	89.8 ±16.3	0.36 ±0.01
		Aluminum foil	11	27.16 ±8.35	21.22 ±6.16	0.21 ±0.05		
	Vacuum drying	Control	11	28.40 ±1.25	21.46 ±0.70	0.24 ±0.06		
		Korean paper	11	27.18 ±1.39	20.64 ±0.83	0.24 ±0.08	71.0 ±21.88	0.37 ±0.01
		Aluminum foil	11	26.96 ±0.64	20.94 ±0.60	0.22 ±0.06		

제작하여 측정하였으며, 공시수종별 전수축율, 기건수축율, T/R 비 및 함수율 9%까지의 접선 방향 수축율과 방사방향 수축율의 차이는 Table 3과 같다.

3.2 供試器機 및 實驗裝置

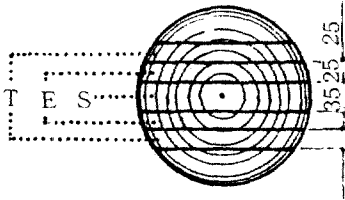
3.2.1 慣行 熱氣乾燥室

폭 129cm, 길이 120cm, 높이 64cm 크기인 캐비

네트형 건조실로서 건 · 습구온도 조절범위 ± 0.2℃이고, 風速 1.0m/sec를 유지할 수 있는 側面透風式 건조실을 사용하였다.

3.2.2 減壓乾燥機

熱水循環加熱式으로서 상부 덮개가 유연한 고무시트로 이루어져 건조기 작동시 약 0.001kg/cm²의 압력이 내부에 잔적된 원판에 전달되는 길이 530cm×폭 85cm×높이 50cm, 온도조절 ±



S : Lumber for green volume specific gravity and shrinkage
 E : Lumber for modulus of elasticity
 T : Lumber for tangential tensile strength

Fig.2. Preparation of lumbers for physical and mechanical properties(unit : mm).

알루미늄 2024(A193.4%, Cu4.5%, Mg1.5%, Mn0.6%)를 이용하여 Fig.4와 같은 U형의 크

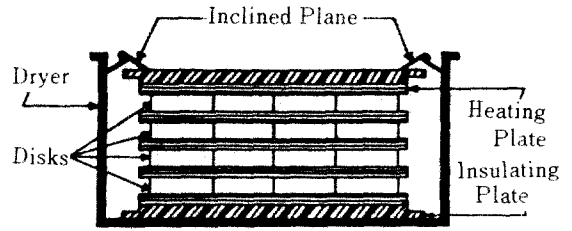


Fig.3. Front view of vacuum dryer with hot water circulation heating system.

Table 2. Number, shape, initial moisture content and green volume specific gravity of sample disks used in vacuum drying stress distribution test

Species	End treatment	Number of disks	End shape			Initial MC(%)	Sp. Gr.
			Long diameter (cm)	Short diameter (cm)	Eccentricity		
<i>Alnus japonica</i>	Control	12	21.92	18.73	0.14	91.4	0.38
	Korean paper	12	21.94	18.89	0.14		
	Aluminum foil	12	22.00	18.53	0.15		
<i>Juglans sinensis</i>	Control	10	28.52	26.82	0.06	99.9	0.58
	Korean paper	10	28.33	26.63	0.06		
	Aluminum foil	10	28.16	26.66	0.05		
<i>Ginkgo biloba</i>	Control	10	26.32	24.08	0.08	111.0	0.37
	Korean paper	10	26.42	23.69	0.09	84.7	
	Aluminum foil	10	26.49	24.01	0.08	111.5	

Table 3. Shrinkage of green to oven dry, 12% MC, and 9% MC and difference between tangential and radial shrinkage of green to 9% MC

Species	Shrinkage(%)									
	Green to oven dry			Green to 12%MC			Green to 9%MC			
	T	R	T/R	T	R	T/R	T	R	T/R	T-R
<i>Alnus japonica</i>	7.71	4.14	1.88	5.10	2.31	2.27	5.57	2.77	2.12	2.99
	±0.69	±0.43	±0.23	±0.59	±0.41	±0.43	±0.61	±0.40	±0.34	±0.72
<i>Juglans sinensis</i>	8.67	4.92	1.77	5.10	2.53	2.05	5.99	3.13	1.93	2.86
	±0.21	±0.28	±0.11	±0.31	±0.36	±0.27	±0.26	±0.33	±0.19	±0.36
<i>Ginkgo biloba</i>	4.36	2.60	1.72	2.56	1.42	1.92	3.01	1.72	1.84	1.30
	±0.33	±0.37	±0.32	±0.31	±0.34	±0.62	±0.30	±0.34	±0.49	±0.48

Note: · T : Tangential, · R : Radial, · Mean ± Std.dev.

1°C, 眞空度 조절 10mmHg인 Fig.3과 같은 모양의 減壓乾燥機를 사용하였다.

3. 2. 3 乾燥應力 測定裝置

3. 2. 3. 1 U형 알루미늄 크립

減壓乾燥중 발생하는 원판의 섬유방향 및 접선방향의 변형율을 측정코자 彈性力이 우수한

립을 제작하였다. U형 크립의 曲面외측중양부에 크기 2.0×2.0mm, 저항 350Ω, 게이지 팩터(Gage factor) 2.06인 스트레인게이지를 Single-Arm Wheastone 회로를 구성하여 부착하였으며, 회로구성시 이용한 導線은 직경 0.16mm로서 -75~150°C 온도범위에서 사용가능한 것이

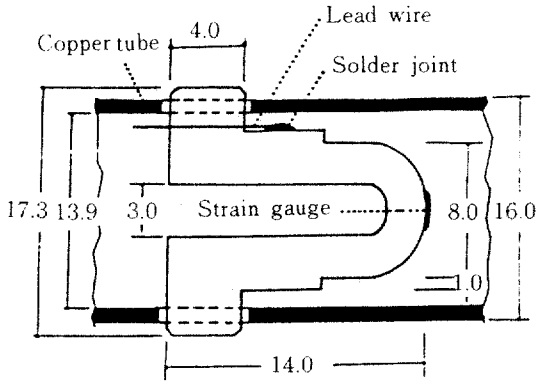


Fig.4. Lateral section of a U-shaped aluminum clip in the probe tube (unit : mm).

었다.

3.2.3.2 High Magnification Calibrator

정밀도 ±5/10,000mm로 검측할 수 있는 High Magnification Calibrator를 이용하여 임의의 압축변형을 각 U형 알루미늄크립의 선단에 50 반복씩 가했고, 이러한 압축변형에 반응하는 U형 알루미늄크립의 변형율을 Data Logging

System을 통해 조사하여, Table 4와 같은 補正 回歸式을 구하여 乾燥應力 계산에 이용하였다.

3.2.3.3 應力探知棒

원판의 髓로부터 방사방향으로의 일정거리별 섬유방향과 접선방향의 변형율을 측정코자 Fig.5와 같이 구리봉에 변장 4.5cm의 구멍 10개를 20mm간격으로 交互로 수직되게 만들었고, 각 구멍에 U형 알루미늄크립을 定着시킨 應力탐지봉 2개를 제작하여 무처리 및 한지엔드레핑 원판의 減壓乾燥應力 分布模型조사에 각각 이용하였다.

3.2.3.4 Data Logging System

U형 알루미늄크립에 전달되는 공시원판의 각 부위별 변형율을 동시에 scanning 하기위해 1 line cycle scanning 시간 1/60~1/50 sec, 해상도 1μ인 20채널의 Measurements Group社 System 4000을 사용하였으며, 그 Block diagram은 Fig.6과 같다.

3.2.4 Stress Wave Timer

Table 4. Regression equations for each U-shaped aluminum clip

End treatment	Grain direction	Distance from pith(cm)	Regression equation (R ²)
Control	Longitudinal	0	$\epsilon_c = -66.11 - 16.63 \epsilon_i (0.99)$
		4	$\epsilon_c = -24.12 - 14.71 \epsilon_i (1.00)$
		8	$\epsilon_c = -29.60 - 37.92 \epsilon_i (0.99)$
		12	$\epsilon_c = 589.65 - 22.28 \epsilon_i (0.93)$
		16	$\epsilon_c = 72.04 - 18.18 \epsilon_i (1.00)$
	Tangential	2	$\epsilon_c = 116.65 - 16.86 \epsilon_i (0.99)$
		6	$\epsilon_c = 37.50 - 17.39 \epsilon_i (1.00)$
		10	$\epsilon_c = 42.13 - 17.22 \epsilon_i (1.00)$
		14	$\epsilon_c = 33.99 - 18.04 \epsilon_i (0.99)$
		18	$\epsilon_c = 109.31 - 14.77 \epsilon_i (0.99)$
Korean paper	Longitudinal	0	$\epsilon_c = 28.85 - 16.24 \epsilon_i (1.00)$
		4	$\epsilon_c = 134.11 - 17.76 \epsilon_i (0.99)$
		8	$\epsilon_c = 149.64 - 15.91 \epsilon_i (0.99)$
		12	$\epsilon_c = -7.86 - 22.99 \epsilon_i (0.99)$
		16	$\epsilon_c = 2.04 - 15.02 \epsilon_i (1.00)$
	Tangential	2	$\epsilon_c = -36.02 - 20.55 \epsilon_i (0.99)$
		6	$\epsilon_c = 62.87 - 23.26 \epsilon_i (0.99)$
		10	$\epsilon_c = 6.95 - 14.96 \epsilon_i (1.00)$
		14	$\epsilon_c = 177.47 - 16.98 \epsilon_i (1.00)$
		18	$\epsilon_c = 27.37 - 31.22 \epsilon_i (0.99)$

Note : ϵ_c /Calibrated strain (μ)

ϵ_i /Strain indicated by data logging system (μ)

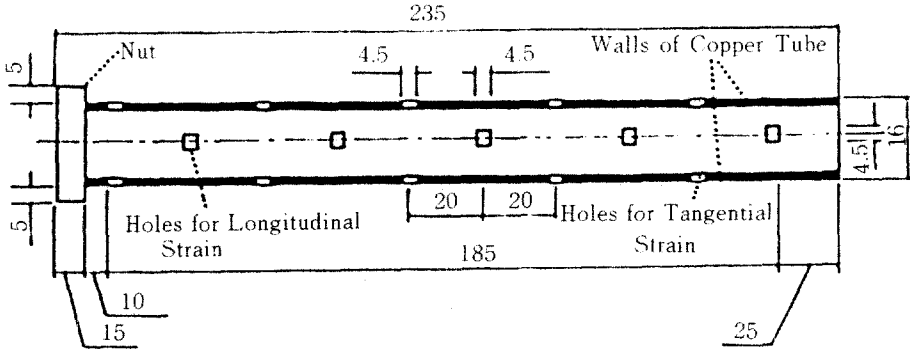


Fig.5. Arrangement of U-shaped aluminum clips in the probe tube (unit : mm).

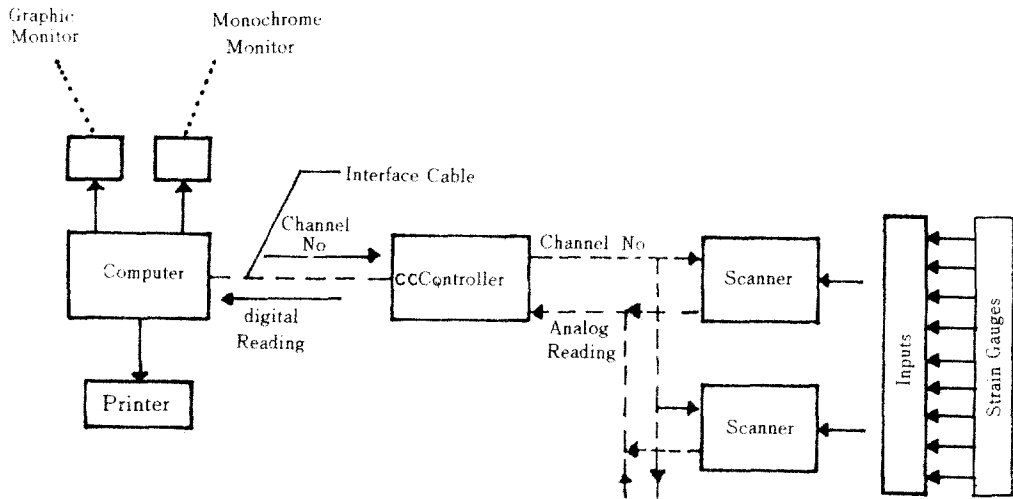


Fig.6. Block diagram of data logging system for indicating strain.

응력과 전달시간 측정범위 1~9999 μ sec인 Strss Wave Timer를 사용하여 乾燥應力 산출에 필요한 공시수종별 彈性係數를 비파괴시험 방법으로 측정하였다.

3.2.5 强度試驗機

V형 크랙 발생 臨界含水率을 추정기 위해 용량 10,000kgf인 강도시험기를 사용하여 공시수종의 접선방향 引張强度를 측정하였다.

3.2.6 自動温度記錄計

減壓乾燥 중 원관의 材温을 측정하기 위해 constantan-copper thermocouple이 장치된 6 채널의 자동온도기록계를 사용하였다.

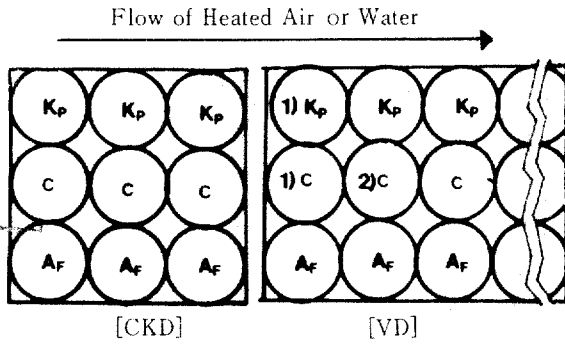
3.3 實驗方法

3.3.1 乾燥應力分布 試驗條件 推定

3.3.1.1 棧積

減壓乾燥시 棧積은 棧木을 사용하지 않고 熱板 위에 實積(solid pile)하였으며 材温 측정용 원관은 熱水의 流入部에 위치시켰고(Fig.7), 관행 열기 건조의 잔적은 棧木을 이용하여 棧積하되 熱氣의 배분상태를 검증코자 Fig.7과 같이 열기의 流入部, 流出部 그리고 中間部 등 3열의 棧積列을 적용하였고, 잔적 상단부의 공간은 dummy board를 사용하여 폐쇄시켰다.

단, 은행나무는 공시원관간의 직경의 차이가 커 잔적 하단부에서 상단부에 이르기까지 균일하게 3열의 잔적열을 적용하기가 불가능하였기 때문에 하단부 2층과 상단부 1층은 2열로, 잔여



- C: Control disk
- Kp: Disk end-wrapped with Korean paper
- Af: Disk end-wrapped with aluminum foil
- 1): Disks for measuring drying stress distribution
- 2): Disks for measuring wood temperature

Fig.7. Overviews of piling methods for conventional kiln drying and vacuum drying.

잔적층은 3열로 잔적하였다.

3.3.1.2 乾燥條件

Mitchell(1963)이 PEG 처리 원판 건조시 적용했던 건조조건(건구온도 43.5℃, 습구온도 38.5℃)을 기준하여 오리나무와 호도나무 두께 50mm 平小角材의 열기건조스케줄중 함수율 40~35% 단계의 조건을 동일 수종의 원판 관행 열기건조 조건으로, 그리고 은행나무의 경우 소나무 두께 50mm 平小角材의 열기건조스케줄중 함수율 40~35% 단계의 조건(일본 임업시험장, 1982)을 은행나무의 원판 慣行 熱氣乾燥條件으로 각각 적용하였다.

각 수종별 減壓乾燥條件은 관행 열기건조시 적용했던 건구온도를 材溫으로 사용하였고, 眞空度는 40~50mmHg(물의 沸點: 34.2~38.2℃)

를 유지시켰으며, 관행열기건조 및 減壓乾燥條件은 Table 5와 같다.

3.3.1.3 乾燥速度

건조중 함수율과 건조시간을 이용하여 건조시간 경과별 乾燥速度와 평균 乾燥速度를 산출하였으며, 특히 熱氣 또는 熱水의 유입부, 유출부 및 중간부에 잔적한 원판들의 乾燥速度를 조사하여 熱의 배분상태 등을 분석하였다.

3.3.1.4 乾燥缺陷

무처리 원판의 경우 건조중 무게를 평량할 때 마다 발생한 모든 심재할렬의 평균 갯수와 평균 길이를, 그리고 모든 V형 크랙의 평균 갯수, 평균 길이, 평균 폭 등을 조사하였고 엔드래핑 처리 원판의 건조종료후엔드래핑재료를 제거하고 心材割裂과 V형 크랙, 輪割등의 발생정도를 측정하였다.

3.3.2 減壓乾燥 應力分布試驗

3.3.2.1 棧積

乾燥應力分布 시험조건 추정시 減壓乾燥에 적용했던 것과 동일한 방법으로 棧積하되 乾燥應力探知用 원판은 熱水가 流入되는 부분에 잔적하였고, 材溫 측정용 원판은 Fig.7에서와 같이 乾燥應力探知用 원판과 사이드 매치(side match)되게 잔적하였다.

3.3.2.2 乾燥스케줄

乾燥應力分布 시험조건 추정에서 얻은 결과를 바탕으로 Table 6의 건조조건을 각 공시수종의 減壓乾燥스케줄로 적용하였다. 모든 수종의 건조조건의 변경은 한지 엔드래핑처리 원판의 건조중 평균함수율을 기준으로 하였다.

3.3.2.3 乾燥曲線과 乾燥速度

1일 1회 기준으로 공시원판의 건조중 무게를 평량하여 건조시간 경과별 함수율 감소상태를

Table 5. Conventional kiln drying and vacuum drying conditions for test of drying schedules of vacuum drying stress distribution

Species	Conventional kiln drying				Vacuum drying	
	DBT (°C)	WBT (°C)	RH (%)	EMC (%)	Wood temp. (°C)	Degree of vacuum(mmHg)
<i>Alnus japonica</i>	54.5	48.5	71	11.5	54.5	40~50
<i>Juglans sinensis</i>	43.5	38.5	67	11.4	43.5	40~50
<i>Ginkgo biloba</i>	60.0	56.0	81	13.8	60.0	40~50

Table 6. Vacuum drying schedules for species used in vacuum drying stress distribution test

Species	Moisture content(%)	Wood temp.(°C)	Degree of vacuum(mmHg)
<i>Alnus japonica</i>	Green~20%	49.0	40~50
	20%~Final	51.7	40~50
<i>Juglans sinensis</i>	Green~30%	38.0	40~50
	30%~20%	43.5	40~50
	20%~Final	46.2	40~50
<i>Ginkgo biloba</i>	Green~Final	54.5	40~50

조사하여 수종과 엔드래핑처리별 乾燥曲線을 작성하였고, 함수율단계별 乾燥速度도 구하였다.

3.3.2.4 乾燥應力分布

1) 應力探知棒 挿入

무처리 및 한지 엔드래핑처리 공시원판중 髓가 偏心되지 않은 원판을 각각 1개씩 선별하여 원판의 원주선상에서 髓를 향해 직경 17.0mm, 깊이 17~21cm의 구멍을 뚫었다. 이곳에 U형 알루미늄 크립의 양 선단부가 접선 또는 섬유방향과 일치하도록 하되, 접선방향 最大引張應力을 조사코자 원주선상에 위치한 U형 알루미늄 크립은 접선방향 변형율을 감지할 수 있도록 조치하며, 무처리 및 한지엔드래핑 공시원판에 각각 應力탐지봉 1개씩을 Fig.8과 같이 삽입한 후 실리콘으로 밀봉하였다.

應力탐지봉 삽입 후 U형 알루미늄의 크립이

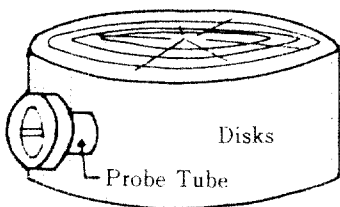


Fig.8. The probe tube inserted in disk for measuring drying stress distribution.

안정되도록 7~8시간 경과 후 減壓乾燥를 개시하였다.

2) 彈性係數

비파괴시험법으로 각 수종의 기건상태에서의 彈性係數를 측정코자 stress wave timer에 장착되어있는 두 개의 accelometer transducer 사이

의 應력과 전달시간을 조사하여 다음 식 (1)로 기건상태의 彈性係數를 계산하였고, 이 값을 기준으로하여 함수율 변화에 따른 彈性係數의 값을 식 (2)로 구하였다.

$$MOE = (10^{-15})V^2D/g \dots\dots\dots (1)$$

MOE : 彈性係數(kgf/cm²)

V : 應력과 전달속도(cm/μsec)

D : 시험편의 밀도(g/cm³)

g : 중력가속도(980cm/sec²)

$$E_2 = E_1 [1 - 0.02(M_2 - M_1)] \dots\dots\dots (2)$$

E₁ : 함수율 M₁에서 彈性係數(kgf/cm²)

E₂ : 임의의 함수율 M₂에서 彈性係數(kgf/cm²)

M₁ : E₁ 측정시 시험편의 氣乾含水率(%)

M₂ : 임의의 함수율(%)

3) 乾燥應力探知

건조중 각 알루미늄 크립에 작용하는 원판의 변형율을 Fig.9와 같은 절차에 의해 측정하였고, 이 값을 식 (3)에 대입하여 乾燥應力을 계산하였다.

$$\sigma = E \cdot \epsilon \dots\dots\dots (3)$$

σ : 임의의 건조중 함수율에서 乾燥應力(kgf/cm²)

E : 임의의 함수율에서의 공시수종의 彈性係數(kgf/cm²)

ε : 임의의 건조중함수율에서 원판의 변형율

3.3.2.5 V형 크랙 發生 臨界含水率

1) 接線方向 引張強度

접선방향 引張強度試驗片(Fig.10)을 각 수종별로 8개씩 준비하여 실내에서 3~4개월 조습처리한 후 파괴시험법으로 접선방향 引張強度를

실측하였고, 실측값을 기준으로 임의의 함수율에서 접선방향 引張強度를 식 (4)를 이용하여 산출하였다.

$$T_2 = T_1 [1 - 0.015(M_2 - M_1)] \dots \dots \dots (4)$$

T_1 : 함수율 M_1 에서 접선방향 引張強度 (kgf/cm²)

T_2 : 임의의 함수율 M_2 에서 접선방향 引張強度(kgf/cm²)

M_1 : T_1 을 측정할 때의 시험편의 氣乾含水率(%)

M_2 : 임의의 함수율(%)

2) V형 크랙 발생 臨界含水率

減壓乾燥중 乾燥應力分布試驗片의 원주선상

랙의 발생이 개시되는 臨界含水率로 판단하였다.

3.3.2.6 乾燥缺陷

건조종료 후 엔드래핑 재료를 제거한 다음 각 원판에 발생한 모든 심재할렬과 윤활의 평균 갯수와 평균 길이, 그리고 V형 크랙의 평균 갯수, 평균 길이와 평균 폭을 각각 조사하였다.

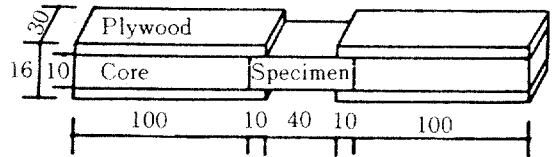


Fig.10. Shape of specimen for tangential tensile strength (unit : mm)

4. 結果 및 考察

4.1 乾燥應力分布 試驗條件 推定

4.1.1 乾燥曲線

4.1.1.1 減壓乾燥

오리나무, 호도나무 및 은행나무의 減壓乾燥曲線을 각각 Fig.11, Fig.12와 Fig.13에 나타냈다.

초기 함수율 57.5%인 오리나무원판은 건조시간 166시간 후에 무처리 원판은 5.2%, 한지 엔드래핑 원판은 7.9%, 그리고 알루미늄호일 엔드래핑 원판은 8.6%까지 각각 건조되었고, 건조중 함수율은 건조 종료시까지 일관되게 알루미늄호일 엔드래핑, 한지 엔드래핑, 무처리 순으로 높게 유지되었는데, 이와 같은 결과는 한지와 알루미늄호일이 원판의 횡단면에서의 급속한 수분증발을 억제하였기 때문인 것으로 생각된다.

그러나 한지 및 알루미늄호일 엔드래핑에 의하여 원판 표면에서의 수분증발이 무처리와 비교하여 상대적으로 억제 되었음에도 불구하고, 한지 엔드래핑 원판은 전 건조기간동안 제거된 함수율의 64.6%가, 그리고 알루미늄호일 엔드래핑 원판은 56.9%가 건조개시 20시간 동안에

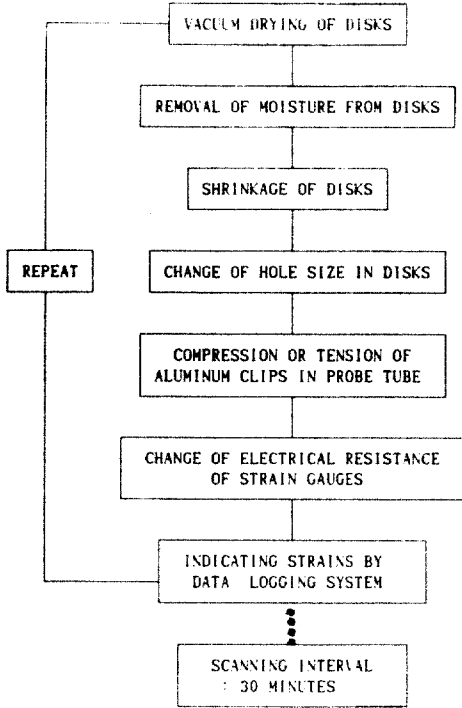
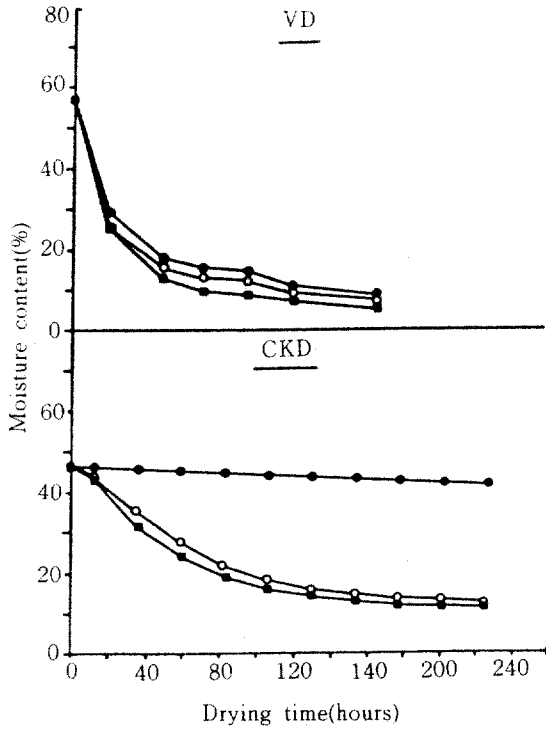


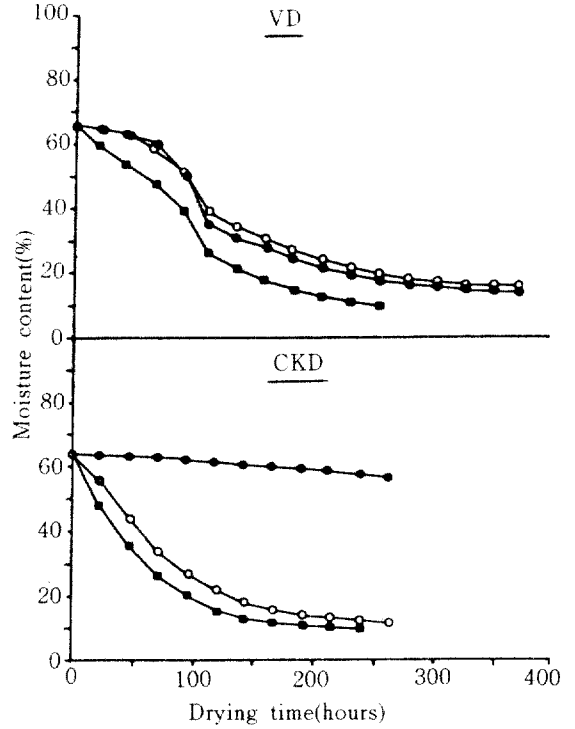
Fig.9. Procedure for indicating strains during vacuum drying disks.

에 형성되는 함수율단계별 접선방향 引張應力曲線과 기건상태의 접선방향 引張強度 실측값을 이용하여 식 (4)로 부터 산출한 함수율 단계별 접선방향 引張強度曲線을 각각 작성하여 그 교차점을 조사하였고, 이 때의 함수율을 V형 크



■-■ Control ○-○ Korean paper ●-● Aluminum foil

Fig.11. Drying curves for vacuum drying and conventional kiln drying of *Alnus japonica* disks in test of drying schedules for vacuum drying stress distribution.



■-■ Control ○-○ Korean paper ●-● Aluminum foil

Fig.12. Drying curves for vacuum drying and conventional kiln drying of *Juglans sinensis* disks in test of drying schedules for vacuum drying stress distribution.

편중되어 건조됨으로 말미암아 각 엔드래핑 처리에 의한 心材割裂 예방효과의 상당량이 손실되었을 것으로 생각된다. 특히 이 시기는 두께 25mm 이상의 원판을 室温 건조할 경우 함수율 35% 이상에서부터 心材割裂의 발생이 시작된다는 Kubler(1975)의 보고와 일치되는 시기이므로 각 엔드래핑처리에 따른 乾燥應力分布模型과 乾燥缺陷 豫防效果가 보다 명확하게 구명되기 위해서는 좀 더 완화된 건조조건을 적용해야 할 것이고, 또한 한지 및 알루미늄호일 엔드래핑 원판 공히 건조중 함수율이 약 25%를 전후하여 함수율 감소경향이 큰 변화를 나타내고 있어, 함수율 단계에 따른 2단계 건조스케줄이 적용되어야 할 것으로 생각된다.

초기함수율 65.7%인 호도나무 무처리 원판

의 경우 9.8%까지 건조하는데 256시간이 소요되었고, 한지 및 알루미늄호일 엔드래핑 원판은 15.1%와 14.2%까지 각각 건조하는데 372시간이 소요되었다. 특히 한지엔드래핑 원판의 건조중 함수율이 19.6% 이후부터 乾燥速度가 매우 느려 본 실험에서 적용한 건조조건으로는 엔드래핑한 원판을 이용함수율 수준까지 건조하는 것이 불가능하였고, 따라서 乾燥應力分布 시험시 함수율 20% 이후의 건조조건은 좀 더 강한 건조조건을 적용해야 할 것으로 판단된다.

특히 호도나무 원판의 관행 열기건조실험과 비슷한 수준의 초기함수율을 가진 원판을 동일 건조온도(43.5℃)에서 減壓乾燥 하였음에도 불구하고, 오히려 減壓乾燥 시간이 관행 열기건조 시간에 비해 무처리 16시간, 그리고 한지 엔드

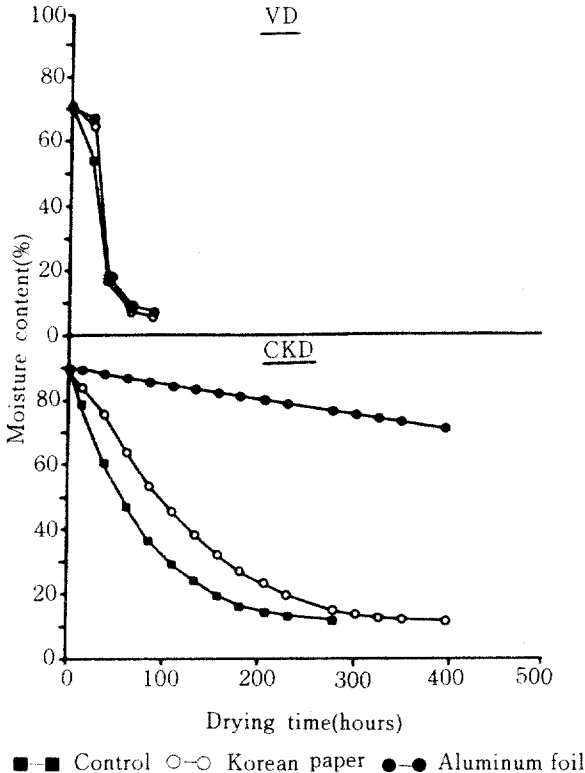


Fig.13. Drying curves for vacuum drying and conventional kiln drying of *Ginkgo biloba* disks in test of drying schedules for vacuum drying stress distribution.

래핑의 경우 108시간이 더 긴 사실은 주목할만 하며, 이것에 대한 명확한 구명을 위해 감압조건하에서의 온도변화에 따른 목재의 水分吸着과 脫着機構에 대한 연구가 선행 되어져야 할 것으로 생각된다. 또한 한지 및 알루미늄호일 엔드레핑 원판의 건조중 함수율 감소는 무처리 원판에 비해 완만하였으며, 그 정도는 보다 고온의 건조조건이 적용된 오리나무와 은행나무에 비해 뚜렷하였는 바, 한지 또는 알루미늄호일 엔드레핑에 의한 心材割裂 예방효과는 저온에서 한층 倍加될 것으로 推論된다.

초기함수율 71.0%인 은행나무는 무처리 6.0%, 한지 및 알루미늄호일 엔드레핑 각각 6.0%와 7.7%까지 건조하는데 불과 88시간 밖에 소요되지 않았고, 특히 건조개시 후 24~40시간의 시기에 한지 엔드레핑 원판은 전 건조기

간동안 감소한 함수율의 71.6%가, 그리고 알루미늄호일 엔드레핑 원판은 74.7%가 제거될 정도로 급속하게 함수율이 감소되었는데, 이 시기는 心材割裂과 V형 크랙의 발생이 시작되거나 확장되어 최대에 도달하는 시점으로서(Kubler, 1975) 함수율이 보다 완만하게 감소할 수 있도록 건조조건을 완화하는 것이 바람직할 것으로 여겨진다.

4.1.1.2 慣行 熱氣乾燥

초기함수율 46.4%인 오리나무는 건조시간 228시간후에 무처리 11.2%, 한지 엔드레핑 13.2%, 알루미늄호일 엔드레핑 41.3%까지 각각 건조되었고, 건조중 함수율은 減壓乾燥의 경우와 마찬가지로 건조종료시까지 알루미늄호일 엔드레핑, 한지 엔드레핑, 무처리 순으로 높게 나타났다. 특히 알루미늄호일 엔드레핑 원판의 경우 228시간 동안 불과 5.1%의 함수율만이 감소되어 감압건조의 경우와는 뚜렷한 차이를 보였다. 이는 알루미늄호일에 의한 엔드레핑은 단순히 通風遮斷에 의해 표면의 수분증발이 억제되기 때문인 것으로 생각되고, 따라서 알루미늄호일 엔드레핑은 관행 열기건조 뿐 아니라 熱對流에 의해 목재의 수분이 증발되는 모든 건조방법에 적용하기 곤란 할 것으로 여겨진다. 반면에 한지 엔드레핑의 경우 통풍차단 보다는 한지의 吸濕能에 의해 수분증발이 억제되어 한지 엔드레핑은 마치 樹木이 水分함양의 역할을 수행하는 것처럼 건조기 내부의 상황에 따라 吸濕과 吸濕을 반복하는 것으로 생각된다.

초기함수율 64.2%인 호도나무는 무처리 원판의 경우 10.1%까지 건조하는데 240시간이, 그리고 한지 및 알루미늄호일 엔드레핑 원판은 12.0%와 57.0%까지 각각 건조하는데 264시간이 소요되었는데, 알루미늄호일 엔드레핑 원판은 24시간에 불과 0.65%정도의 함수율만이 감소되었다.

초기함수율 89.8%인 은행나무는 무처리 원판의 경우 12.4%까지 건조하는데 278시간이 소요되었고, 한지와 알루미늄호일 엔드레핑 원판의 경우 398시간 경과후 각각 함수율 12.5%와

71.1%까지 건조되었다.

4.1.2 棧積位置別 乾燥速度

4.1.2.1 減壓乾燥

減壓乾燥시 熱水의 유입부, 유출부 및 중간부에 잔적된 공시원판의 엔드래핑 처리별 오리나무, 호도나무 및 은행나무의 乾燥速度를 각각 Fig.14, Fig.15 및 Fig.16에 나타냈다.

오리나무 무처리 원판의 건조초기 乾燥速度는 열수의 유출부 1.76%/hr, 유입부 1.70%/hr, 중간부 1.44%/hr의 순서로 나타났고, 한지엔드래핑 원판은 유출부, 유입부 및 중간부의 乾燥速度가 각각 1.80%/hr, 1.69%/hr 및 1.02%/hr로서 무처리 원판의 경우와 마찬가지로 열수의 유출부 乾燥速度가 유입부 및

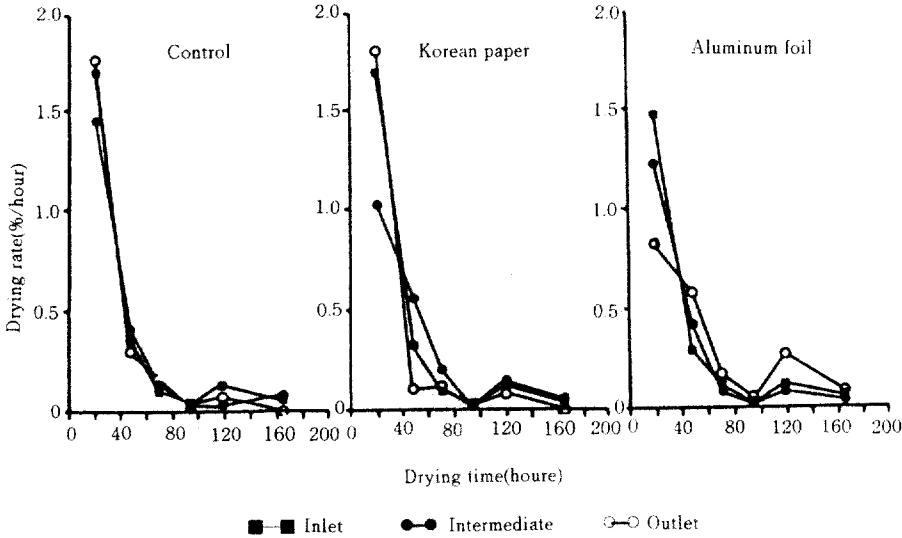


Fig.14. Drying rates of *Alnus japonica* by disk positions in the vacuum dryer in test of drying schedules for vacuum drying stress distribution.

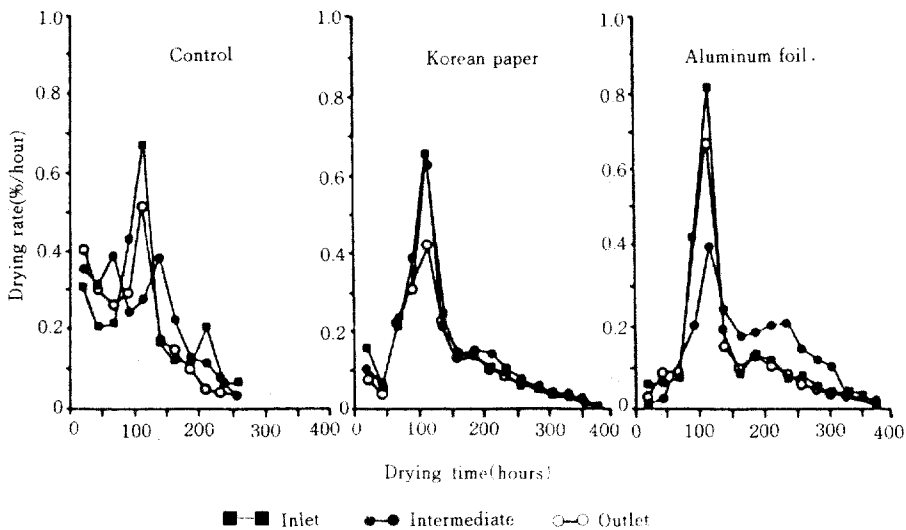


Fig.15. Drying rates of *Juglans sinensis* by disk positions in the vacuum dryer in test of drying schedules for vacuum drying stress distribution.

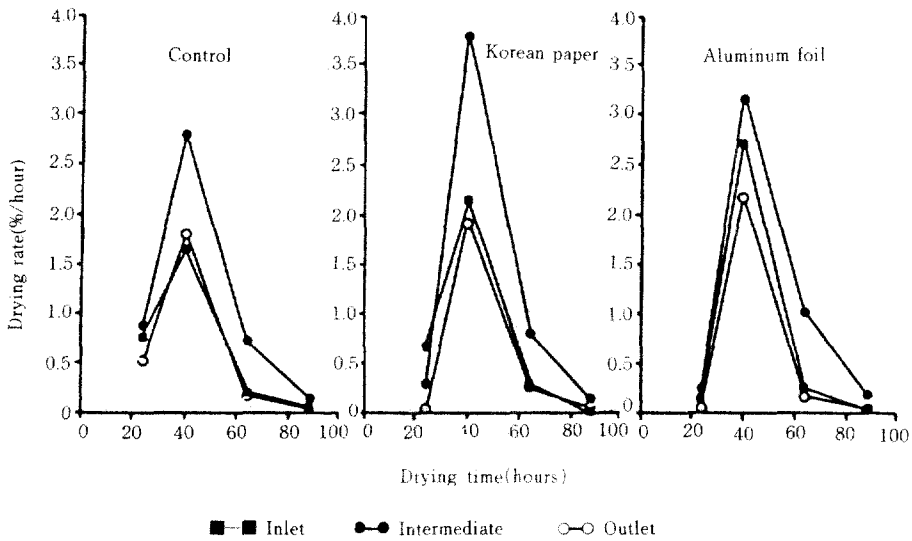


Fig.16. Drying rates of *Ginkgo biloba* by disk positions in the vacuum dryer in test of drying schedules for vacuum drying stress distribution.

중간부에 잔적된 원판들의 乾燥速度보다 빠른 경향을 보였다. 알루미늄호일 엔드레핑 원판의 경우 1.47%/hr, 1.23%/hr 및 0.82%/hr로서 유입부, 중간부, 유출부의 순으로 빠르게 나타났다. 이처럼 동일 건조기간중 잔적위치에 따른 乾燥速度 크기의 순서가 엔드레핑처리간에 상이할 뿐 아니라, 건조가 진행됨에 따라 동일 엔드레핑처리내에서도 혼전되는 양상을 보였는데, 이것은 열수의 순환에 의해 열원이 공급되는 熱水循環加熱式 減壓乾燥의 경우 熱源이 비교적 균일하게 배분되기 때문에 乾燥速度는 잔적의 위치에 크게 영향을 받지 않는다는 사실을 반증하는 것으로 생각된다.

호도나무의 경우도 오리나무와 마찬가지로 잔적위치별 乾燥速度 크기의 순서는 혼전되는 양상을 보였으며, 한지 엔드레핑 원판은 무처리나 알루미늄호일 엔드레핑 원판에 비해 비교적 안정된 경향을 나타냈다. 특히 엔드레핑처리 및 잔적위치에 관계없이 건조시간 90~112시간에서 乾燥速度가 급격하게 증가하는 현상을 보였고, 오리나무는 0~20시간에서, 은행나무는 24~40시간에서 각각 동일한 현상을 나타내었는데, 이 시기들은 각 공시수종의 V형 크랙의 발

생이 개시된 시점과 일치하였다. 이는 건조중 발생된 미세한 크랙에 의해 수분의 유동이 보다 용이해졌을 뿐아니라 (Boström, 1987), 특히 減壓乾燥시 乾燥速度는 건조재의 투과성에 의해 크게 좌우되기 때문에 乾燥速度가 더욱 급속해졌을 것으로 생각된다. 이와같은 급속한 건조는 V형 크랙 등 乾燥缺陷의 발생을 더욱 심화시키는 악순환으로 연결된다는 점에서 V형 크랙의 발생이 개시되는 시점을 포착하는 것은 圓板 減壓乾燥시 중요한 의미를 지니는 것으로 판단된다.

은행나무의 한지 및 알루미늄호일 엔드레핑 원판은 건조종료시까지 항상 중간부, 유입부, 유출부 순으로 乾燥速度가 빠르게 나타났고, 무처리 원판의 경우도 건조시간 24~40시간에서만 중간부, 유출부, 유입부의 순이었으며, 그 이외의 시간에서는 한지 및 알루미늄호일 엔드레핑의 경우와 동일한 양상을 보여 역시 오리나무, 호도나무와 마찬가지로 열수순환가열식 減壓乾燥의 乾燥速度는 잔적위치보다는 각 시험편 개체의 물리적 특성과 두께 변이 등에 영향을 받는 것으로 사료된다.

4.1.2.2 慣行 熱氣乾燥

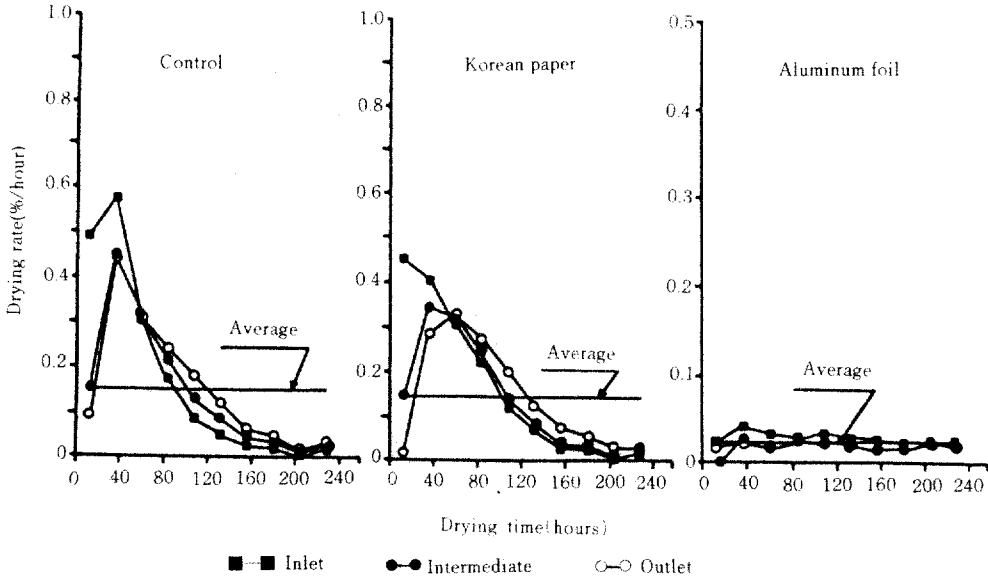


Fig.17. Drying rates of *Alnus japonica* by disk positions in the kiln in test drying schedules for vacuum drying stress distribution.

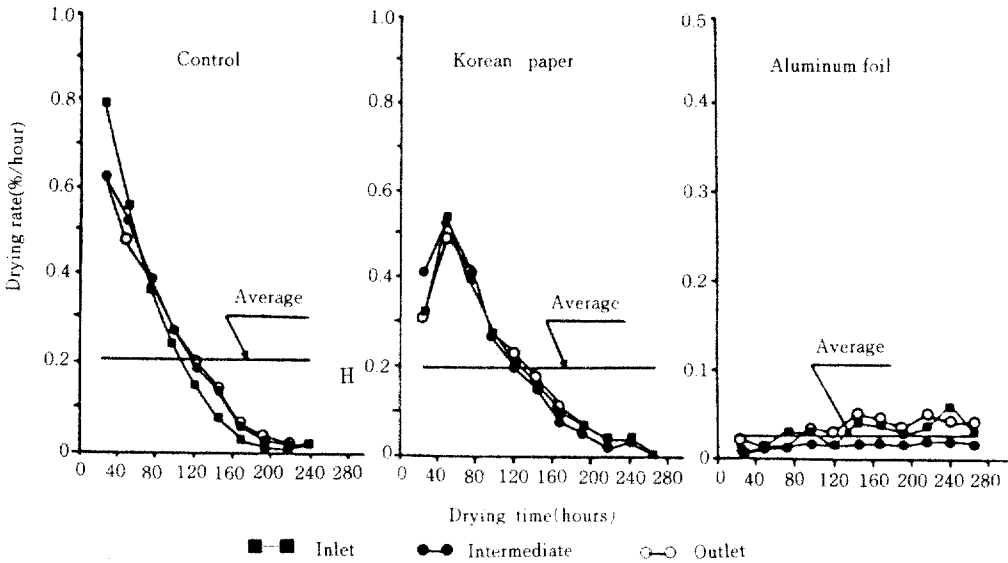


Fig.18. Drying rates of *Juglans sinensis* by disk positions in the kiln in test of drying schedules for vacuum drying stress distribution.

관행 열기 건조시 열기의 유입부, 유출부 및 중간부의 오리나무, 호도나무, 은행나무의 엔드래핑 처리별 乾燥速度는 각각 Fig.17, Fig.18 및 Fig.19와 같다.

오리나무와 호도나무의 경우 무처리와 한지 엔드래핑 원판은 건조 초기에는 유입부, 중간부, 유출부의 순으로 乾燥速度가 크게 나타났고, 은행나무의 경우도 유입부, 유출부의 순으로

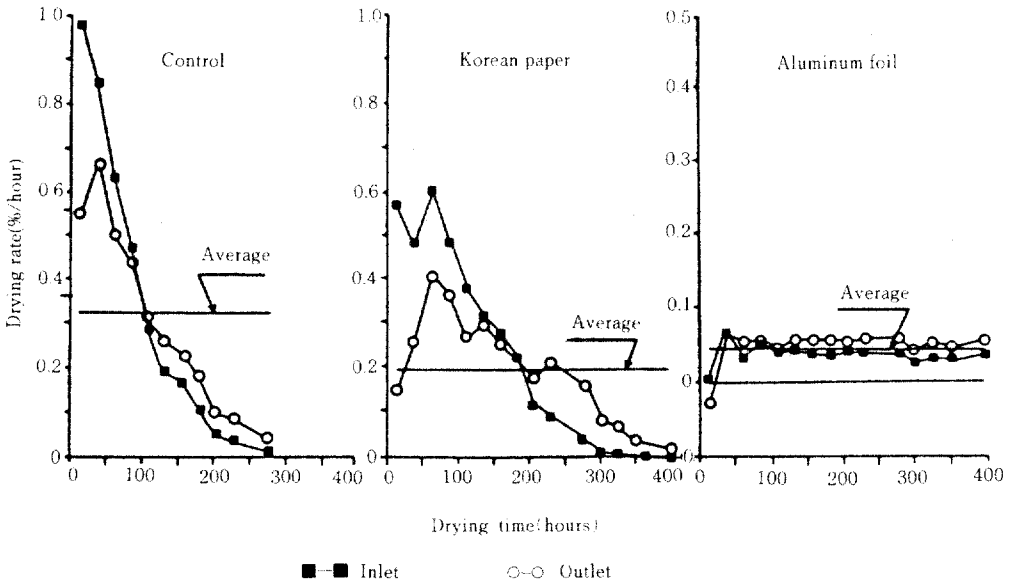


Fig.19. Drying rates of *Ginkgo biloba* by disk positions in the kiln in test of drying schedules for vacuum drying stress distribution.

로 빠르게 나타났다. 이와같은 잔적위치에 따른 乾燥速度의 차이는 열대류에 의해 열이 전달되는 건조방식경우 반드시 잔목을 사용하여 잔적해야 하기 때문에 원판의 경우 불균일한 잔적이 불가피하고, 따라서 건조기 내부는 심한 난류가 형성되어 유입되는 열기가 균일하게 배분되지 못하는데 기인한 것으로 생각되며, 건조가 계속해서 진행됨에 따라 무처리와 한지 엔드래핑 원판의 건조중 함수율이 오리나무의 경우 각각 24.2%와 27.9%인 시점에서, 호도나무의 경우 약 35.5%와 33.6%, 그리고 은행나무의 경우 36.3%와 32.1%에서 잔적위치별 乾燥速度는 역전되어 유출부가 유입부 보다 더 빠르게 나타났다. 건조중기 이후의 잔적위치별 乾燥速度의 역전 현상은 유입부에 잔적된 원판의 경우 건조 초기에 급속하게 건조되어 이미 저함수물 수준까지 건조되었으나, 중간부 또는 유출부에 잔적된 원판들은 아직도 고함수물 수준을 유지하고 있었기 때문인 것으로 사료된다. Table 1에서 보는 바와 같이 은행나무 원판들의 장직경과 단직경의 표준편차가 각각 $\pm 7.42 \sim 9.74\text{cm}$, ± 6 .

16~6.28cm로서 오리나무의 $\pm 1.22 \sim 1.35\text{cm}$ 와 $\pm 0.40 \sim 0.64\text{cm}$, 그리고 호도나무의 $\pm 1.11 \sim 1.33\text{cm}$ 와 $\pm 1.33 \sim 1.63\text{cm}$ 에 비교하여 변이가 매우 커 오리나무, 호도나무와 비교하여 건조중 乾燥速度의 변화기복이 심하였는바, 이러한 열기의 불균일한 배분은 건조실 용량이 클수록, 그리고 원판들의 직경의 변이가 클수록 더욱 심화 될 것으로 추론된다.

4.1.3 乾燥缺陷

4.1.3.1 心材割裂

1) 減壓乾燥

減壓乾燥중 오리나무, 호도나무 및 은행나무의 무처리 원판에 발생된 모든 心材割裂과 건조종료 후 각 엔드래핑 원판에 발생한 모든 心材割裂의 평균 발생갯수와 평균길이를 Fig.20(A), Fig.21(A)와 Fig.22(A)에 각각 나타냈다.

오리나무 무처리 원판은 함수율 24.8%에서 心材割裂이 발생하기 시작하여 함수율 12.9%에서 중지되었다. 건조종료 후의 각 엔드래핑 원판에 발생된 모든 心材割裂의 평균 갯수와 평균 길이는 무처리 원판 6.4개와 21.5cm, 한지 엔

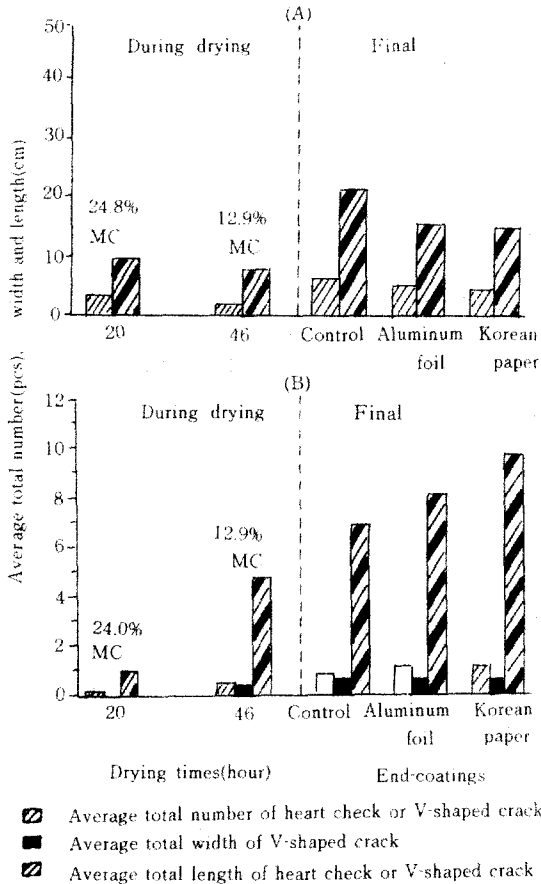


Fig.20. Average total number and length or width of heart check(A) and V-shaped crack(B) for control disks during vacuum drying and all disks at the end of VD *Alnus japonica* disk in test of drying schedules for vacuum drying stress distribution.

드래핑 원판 4.8개와 14.9cm, 그리고 알루미늄 호일 엔드래핑 원판 5.3개와 15.5cm로서 한지 및 알루미늄호일 엔드래핑 원판은 무처리 원판에 비해 心材割裂의 발생정도가 약간 경미한 편이었다. 그러나 건조초기에 형성되는 극히 미미한 引張應力이라 할지라도 이것은 활엽수재 원판 건조시 心材割裂을 유발시킬 수 있다는 보고(Kubler, 1974)에 비추어 볼 때, 각 엔드래핑에 의한 心材割裂 예방효과는 생재~24.8% 구간에서의 지나치게 급속한 건조로 인해 상당량 경

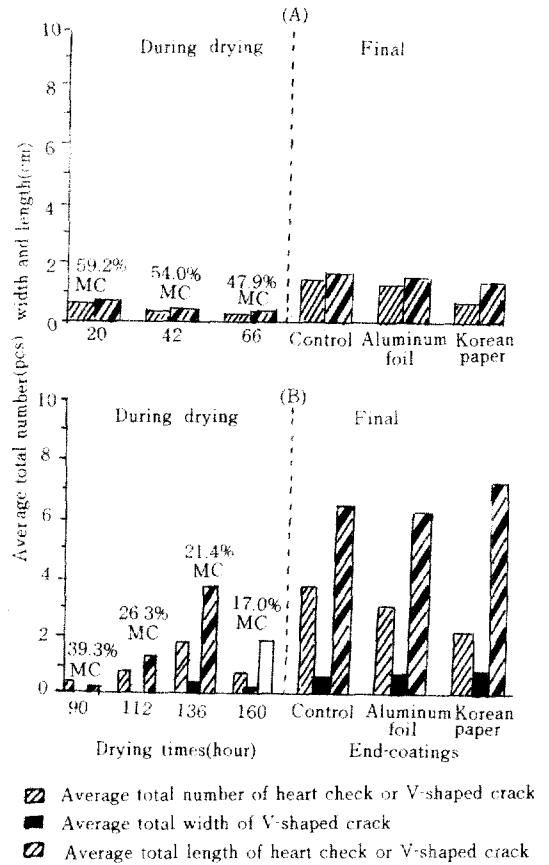


Fig.21. Average total number and length or width of heart check(A) and V-shaped crack(B) for control disks during vacuum drying and all disks at the end of VD *Juglans sinensis* disk in test of drying schedules for vacuum drying stress distribution.

감되었으리라 추측된다.

호도나무 무처리 원판은 함수율 59.2%에서 최초로 心材割裂이 발생하여 함수율 47.9%에서 그 발생이 중지되었고, 건조종료 후 각 엔드래핑처리별 모든 心材割裂의 평균발생갯수와 평균길이는 무처리 원판 1.5개와 1.7cm, 한지 엔드래핑 원판 0.8개와 1.4cm, 그리고 알루미늄호일 엔드래핑 원판 1.4개와 1.6cm로서 모두 극히 경미한 편이었으며, 특히 한지 엔드래핑 원판의 경우 가장 경미하였다.

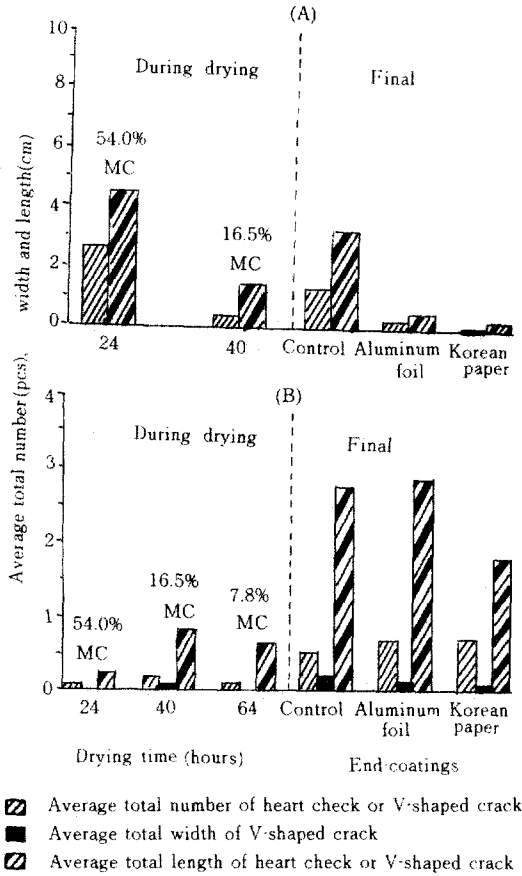


Fig.22. Average total number and length or width of heart check(A) and V-shaped crack(B) for control disks during vacuum drying and all disks at the end of VD *Ginkgo biloba* disk in test of drying schedules for vacuum drying stress distribution.

은행나무의 무처리 원판은 함수율 54.0%에서 心材割裂이 발생하기 시작하여 함수율 16.5%에서 중지되었으며, 건조종료 후의 각 엔드래핑 원판에 발생한 心材割裂의 평균 발생갯수와 평균길이는 무처리 원판 1.5개와 3.4cm, 한지 엔드래핑 원판 0.1개와 0.3cm, 그리고 알루미늄호일 엔드래핑 원판 0.4개와 0.6cm로서 극히 경미하였고, 한지 및 알루미늄호일 엔드래핑에 의한 心材割裂 예방효과는 두드러졌다.

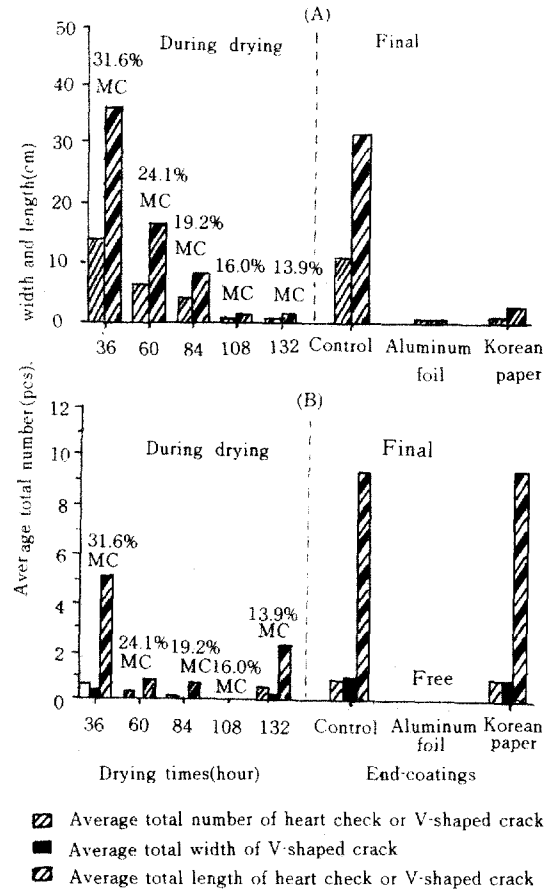


Fig.23. Average total number and length or width of heart check(A) and V-shaped crack(B) for control disks during conventional kiln drying and all disks at the end of CKD of *Alnus japonica* disk in test of drying schedules for vacuum drying stress distribution.

2) 慣行 熱氣乾燥

관행 열기 건조종 오리나무, 호도나무 및 은행나무의 무처리 원판에 발생된 모든 心材割裂과 건조종료 후 각 엔드래핑 원판에 발생한 모든 心材割裂의 평균 갯수와 평균길이는 각각 Fig. 23 (A), Fig. 24(A) 및 Fig. 25(A)와 같다.

오리나무의 경우 건조종료 후 각 엔드래핑 원판에 발생한 모든 心材割裂의 평균 갯수와 평균 길이는 무처리 원판 10.9개와 31.5cm, 한지 엔

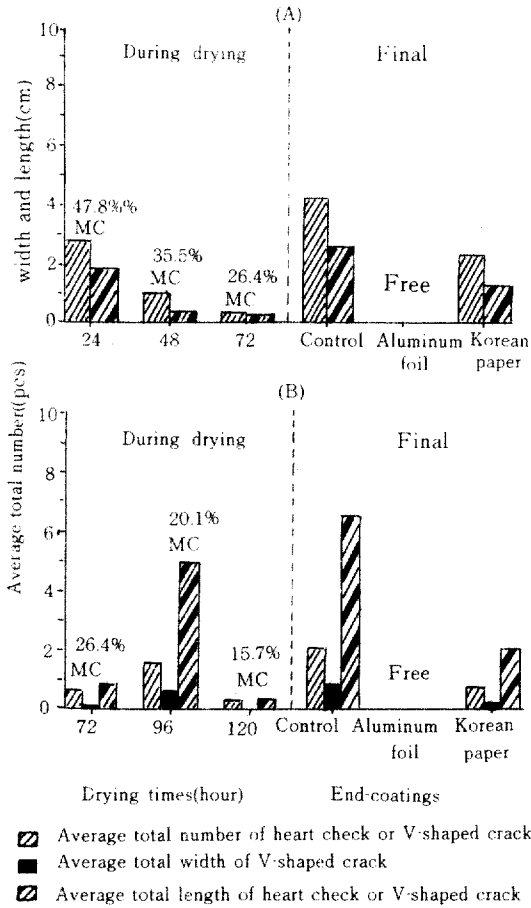


Fig.24. Average total number and length or width of heart check(A) and V-shaped crack(B) for control disks during conventional kiln drying and all disks at the end of CKD of *Juglans sinensis* disk in test of dryingschedules for vacuum drying stress distribution.

드래핑 원판 0.7개와 2.5cm, 알루미늄호일 엔드래핑 원판 0.2개와 0.3cm로 나타났다.

오리나무 무처리 원판의 경우 減壓乾燥와 비교하여 그 발생정도가 더 심하였으나, 한지 및 알루미늄호일 엔드래핑의 경우 상당히 경미한 편이었다. 이것은 減壓乾燥의 경우도 건조 초기의 乾燥速度를 최소한 관행 열기 건조 수준으로 저하시킬 경우 한지 엔드래핑에 의해 心材割裂의 발생이 상당량 억제될 수 있음을 역설적으로

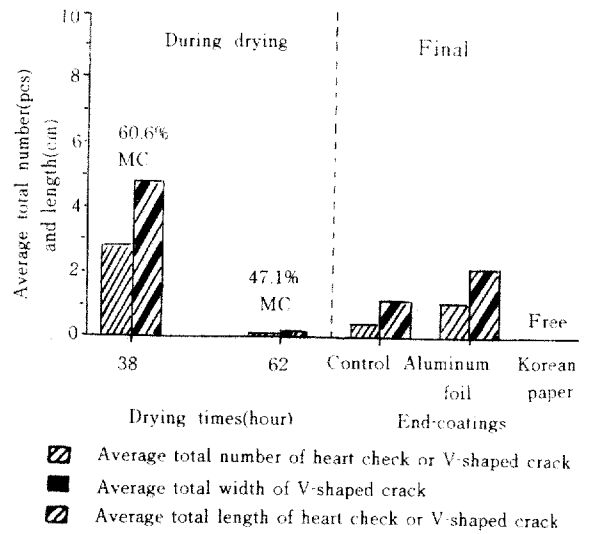


Fig.25. Average total number and length or width of heart check(A) and V-shaped crack(B) for control disks during conventional kiln drying and all disks at the end of CKD of *Ginkgo biloba* disk in test of dring schedules for vacuum drying stress distribution.

증명하는 것으로 사료되고, 알루미늄호일 엔드래핑 원판은 불과 5.1%의 함수율만이 감소되어 수분경사가 거의 형성되지 않았기 때문에 心材割裂의 발생이 극히 경미했던 것으로 판단된다.

건조종료 후 호도나무의 각 엔드래핑 원판에 발생한 모든 心材割裂의 평균 갯수와 평균 길이는 무처리 원판 4.3개와 2.6cm, 한지 엔드래핑 원판 2.3개와 1.3cm였고, 알루미늄호일 엔드래핑 원판의 경우 원판내 수분이 거의 제거되지 않아 心材割裂이 전혀 발생하지 않았다. 減壓乾燥와 비교하여 무처리와 한지 엔드래핑 원판의 경우 心材割裂의 발생정도가 더 심하였는데, 이것은 호도나무 원판의 건조초기의 乾燥速度와 減壓乾燥시 자유수 유동속도 증진에 따른 완만한 수분경사로서 설명할 수 있을 것으로 여겨진다.

건조종료 후 은행나무의 무처리 원판에 발생한 모든 心材割裂의 평균 갯수와 평균 길이는 0.5개와 1.1cm, 알루미늄호일 엔드래핑 원판은

1.0개와 2.1cm였고, 한지 엔드래핑 원판에서는 전혀 발생하지 않아 무처리와 한지 엔드래핑 원판의 경우 減壓乾燥와 비교하여 약간 경미한 편이었으나, 관행열기건조의 총 건조시간이 무처리 278시간, 한지 엔드래핑 원판 398시간으로서 減壓乾燥의 3배 이상인 점을 상기해 볼때 원판 減壓乾燥는 연구해 볼 만한 충분한 가치를 지닌 것으로 사료된다.

그리고 관행 열기건조시 호도나무와 오리나무의 알루미늄호일 엔드래핑 원판에는 心材割裂이 전혀 발생하지 않았거나, 극히 경미하게 발생하였고, 반면에 은행나무는 상대적으로 그 발생정도가 심한 편이었다. 이것은 알루미늄호일 엔드래핑 원판에서 건조종료시까지 제거된 함수율이 오리나무 5.1%, 호도나무 7.2%인 반면, 은행나무는 18.7%로서 건조종료시 이미 원판에 수분경사에 의한 접선방향 引張應力이 형성되어 있었기 때문인 것으로 사료된다.

4.1.3.2 V형 크랙

1) 減壓乾燥

減壓乾燥중 오리나무, 호도나무 및 은행나무의 무처리 원판에 발생한 모든 V형 크랙과 건조종료 후 각 엔드래핑 원판에 발생한 모든 V형 크랙의 평균 발생갯수, 평균 폭, 그리고 평균길이는 Fig.20(B), Fig.21(B) 및 Fig.22(B)와 같다.

V형 크랙은 무처리 원판의 경우 오리나무는 함수율 24.8%, 호도나무 39.3%, 은행나무는 54.0% 에서 발생하기 시작하여 함수율 12.9%, 17.9%와 7.8%에서 그 발생이 각각 중지되었다. 본 실험에서 나타난 V형 크랙의 발생이 개시된 함수율이 Kubler(1975)가 보고한 15%와 상당한 차이가 있는 것은 원판건조시 V형 크랙은 접선방향과 방사방향의 수축을 차에 기인한다는(FPL, 1956) 점에서 판재건조시 틀어짐의 發生機構와 유사하고, 또한 판재 고온건조시 틀어짐은 건조스케줄 그 자체에 의해 가장 큰 영향을 받는다는 Kayihan(1987)의 보고에 유념해 볼 때, 적용된 건조조건이 매우 상이하였기 때문인 것으로 사료되고, 다만 본 실험에

서 조사한 V형 크랙의 발생이 개시된 함수율은 단속적 방법에 의해 조사되었기 때문에 실제값과는 거리가 있을 것으로 사료된다.

2) 慣行 熱氣乾燥

관행 열기건조중 오리나무, 호도나무와 은행나무의 무처리 원판에 발생한 모든 V형 크랙과 건조종료 후 각 엔드래핑 원판에 발생한 모든 V형 크랙의 평균 갯수, 평균 폭 그리고 평균 길이는 Fig.23(B), Fig.24(B) 및 Fig.25(B)와 같다.

은행나무의 경우 엔드래핑처리에 관계없이 전혀 V형 크랙이 발생하지 않았고, 오리나무와 호도나무의 알루미늄호일 엔드래핑 원판에서도 발생하지 않았다. 이것은 알루미늄호일 엔드래핑 원판은 減壓乾燥와는 달리 거의 수분감소가 이루어지지 않아 異方性收縮應力이 형성되지 않았기 때문인 것으로 생각된다.

4.1.3.3 輪割

減壓 또는 관행 열기건조 종료 후 은행나무 원판에서 조사된 모든 윤할의 평균 갯수, 평균 길이와 윤할이 발생된 원판의 수량을 Table 7에 나타냈다.

Fig.26에서 보는 바와 같이 윤할이 발생된 부위의접선단면에서는 엽적(leaf trace)으로 보이는 좁쌀 크기 정도의 원추형 돌기가 방사방향으로 돌출해 있음이 관찰되어 은행 나무 원판에 발생한 윤할은 단순히 조직적 특성에 기인한 것으로 판단되나, 좀 더 명확한 구명을 위해 해부학적 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

또한 은행나무의 관행열기건조시 불과 18.7%의 함수율 감소에도 불구하고 心材割裂이 발생되었던 은행나무의 알루미늄호일 엔드래핑 원판에 윤할이 전혀 발생하지 않은 것은 윤할의 발생이 건조초기의 수분경사에 의해 크게 영향 받지 않음을 시사하는 것으로 해석된다.

4.1.4 圓板減壓乾燥의 可能性 判定

4.1.4.1 熱의 配分

관행열기건조의 경우 알루미늄호일 엔드래핑 원판을 제외한 무처리와 한지엔드래핑 원판의

Table 7. Average total number and length of ring failure and number of disks with ring failures at the end of drying *Ginkgo biloba* disk in test of drying schedules for drying stress distribution

Drying methods	End treatments	Average total No.	Average total length(cm)	No. of disks containing ring failure
Vacuum drying	Control	0.36	0.87	2
	Korean paper	0.36	2.83	3
	Aluminum foil	0.18	1.69	1
Conventional kiln drying	Control	0.38	3.02	3
	Korean paper	0.15	1.05	1
	Aluminum foil	0	0	0

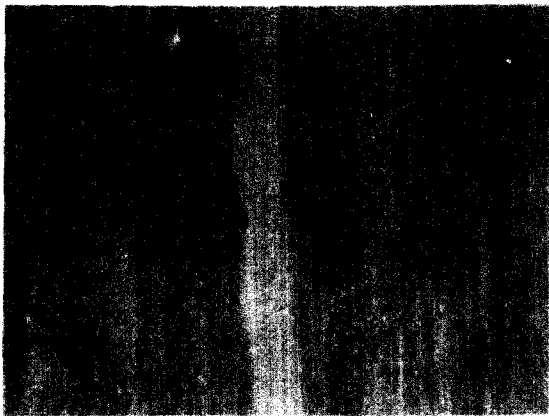


Fig.26. The tubercles on the tangential section of disk with ring failure after *Ginkgo biloba* disks.

잔적위치별 乾燥速度는 건조 초기에 열기의 유입부, 중간부, 유출부의 순으로 빠르게 나타났고, 건조 중기 이후에 역전되어 유출부, 중간부, 유입부의 순으로 나타나 잔적의 위치가 乾燥速度에 크게 영향을 미친다는 사실을 알 수 있었다. 이것은 건조실내에 유입되는 열기의 불균일한 배분에 기인하는 것으로서 관행열기건조 뿐 아니라 열대류 방식이 적용되는 어떠한 건조 방법에 있어서도 불가피한 문제점이라 생각된다. 특히 이러한 열기의 불균일한 배분은 열에너지의 손실은 물론이고, 원판이 건조조건에 예민하다는 점과 연관해 볼 때, 건조실 조작을 매우 어렵게 만들 것으로 판단된다.

반면 減壓乾燥의 경우 수종과 엔드래핑처리에 관계없이 잔적의 위치는 乾燥速度에 영향하

지 않은 것으로 나타나 열의 불균일한 배분 현상은 최소한 열순환가열식 減壓乾燥에서는 발생하지 않은 것으로 판단되었다.

4.1.4.2 乾燥時間과 乾燥缺陷

減壓乾燥시 총 건조소요시간이 관행 열기 건조시간보다 매우 짧았던 오리나무와 은행나무의 경우 관행열기건조에 비해 心材割裂과 V형 크랙의 발생정도가 비슷하거나 약간 심한 편이었으나, 減壓乾燥時間이 관행 열기 건조시간보다 오히려 길었던 호도나무의 경우 心材割裂의 발생정도는 관행열기건조에 비해 훨씬 경미하였고, V형 크랙은 약간 심한 편이었다.

따라서 減壓乾燥時間을 최소한 관행열기 건조수준으로 연장시킬 경우, Kanagawa 등(1978)과 Harris 등(1984a)이 각각 보고한 바 있는 減壓乾燥의 自由水 유동속도 증대효과와 판재수축을 감소효과 등 減壓乾燥 고유의 건조특성과 결부되어 圓板減壓乾燥는 心材割裂과 V형 크랙 등의 건조손상을 크게 경감시킬 수 있는 건조방법일 것으로 판단된다.

또한 減壓乾燥 중 한지와 알루미늄호일 엔드래핑처리는 원판 횡단면에서의 급속한 수분증발을 억제하는 것으로 나타났고, 건조초기에 극히 완만한 수분경사가 형성되더라도 心材割裂을 유발시킬 수 있다는 Barnacle(1971)의 보고에 비추어 볼 때, 한지 및 알루미늄호일 엔드래핑처리는 心材割裂의 한 예방책으로서 개발 가능할 것으로 판단된다.

減壓乾燥와 관행 열기건조를 막론하고 윤활

은 은행나무의 일부에서만 경미하게 발생하였는데, 이것은 윤활이 발생된 부위의 접선단면에서 발견된 소형의 원추형 돌기에 의한 인접조직층간의 결합력약화에 기인한 수종의 조직적 특성이므로 사료된다.

4.1.4.3 棧積

관행 열기건조의 경우 잔목을 사용한 잔적이 불가피하기 때문에 잔적율이 저하될 뿐 아니라, 특히 원판을 잔적할 경우 원판의 직경과 형상이 다양하여 잔적작업이 매우 곤란하였다. 반면 熱水循環加熱式 減壓乾燥의 경우 열전도 방식에 의해 열이 전달되기 때문에 잔적시 잔목이 불필요하여 원판의 직경과 형상에 구애를 받지 않았다.

은행나무 원판 33개를 관행열기건조할 경우 약 30분 정도의 잔적시간이 소요된 반면, 減壓乾燥시 약 2분 정도 밖에 소요되지 않아 작업시간을 약 1/15로 단축할 수 있었으며, 실제 산업용 건조실을 이용할 경우 減壓乾燥의 잔적의 편리함은 더욱 증대되리라 판단된다.

4.1.5 減壓乾燥應力分布 試驗條件의 設定

4.1.5.1 오리나무

한지엔드레핑 원판은 전 減壓乾燥기간 동안에 제거된 함수율의 64.6%가 건조개시 20시간에 편중되어 엔드레핑에 의한 心材割裂 예방효과가 상당량 손실되었을 것으로 추정되었고, 또한 무처리 원판의 건조중 평균함수율이 24.8% 일 때 무처리 원판에 V형 크랙이 발생하기 시작하여 12.9%까지 계속되었으며, V형 크랙이 발생하기 시작한 시점을 전후하여 乾燥速度는 큰 차이를 나타냈다.

따라서 心材割裂과 V형 크랙의 발생을 최소화하기 위해 전 건조시간 동안 보다 저온의 건조조건을 적용하되, 함수율 20% 이후는 다소 온도를 상승시켜 적절한 乾燥速度를 유지시키는 것이 바람직할 것으로 판단되어 오리나무 원판의 減壓乾燥應力分布試驗은 乾燥應力分布試驗條件 推定시 적용했던 건조스케줄보다 온도단계를 2단계 낮춘 T6-D3의 함수율 40~35% 단

계의 건조온도(49.0℃)를 생재~20% 단계의 減壓乾燥條件으로, 그리고 40~35% 단계와 30~25% 단계 건조온도의 중간값(51.7℃)을 함수율 20% 이하의 減壓乾燥條件으로 각각 적용해야 할 것으로 생각된다.

4.1.5.2 호도나무

호도나무의 경우 心材割裂은 무처리 원판의 건조중 평균함수율이 59.2%에서 발생하기 시작하여 47.9%에서 중지되었으며 그 발생정도는 극히 경미하였고, V형 크랙은 39.3%에서 발생하기 시작하여 17.9%까지 계속되었고, 역시 경미한 편이었다. 한지 엔드레핑 원판의 건조중 평균함수율이 19.6% 이후 소요된 건조시간이 총 건조시간의 31.2%를 점유하고 있을뿐 아니라, 乾燥應力分布 시험조건 추정시험에서 적용했던 건조조건으로 원판의 최종함수율을 이용함수율 수준까지 저하시키는 것은 불가능하였다.

따라서 乾燥缺陷의 발생을 가능한 한 억제하고, 건조말기의 乾燥速度를 촉진시키기 위해서는 乾燥應力分布 試驗條件 推定시 적용했던 건조스케줄 보다 온도단계를 1단계 낮춘 T2-D3의 함수율 40~35%, 30~25%, 25~20% 단계의 건조온도인 38.0℃, 43.5℃ 및 46.2℃를 원판의 함수율 생재~30%, 30~20%와 20%~종기 단계의 減壓乾燥條件으로 각각 적용하는 것이 적절할 것으로 생각된다.

4.1.5.3 은행나무

은행나무 減壓乾燥의 경우 총 건조소요시간이 88시간으로서 관행열기건조시간의 22.1~31.7%에 불과하였고, 心材割裂과 V형 크랙 등 건조손상도 극히 경미하였다.

그러나 건조손상을 최소화시키기 위해 乾燥應力分布 試驗條件 推定시 적용했던 건조스케줄 보다 온도단계를 2단계 낮춘 T8-D3의 함수율 40~35% 단계의 건조온도(54.5℃)를 건조종료시까지 圓板減壓乾燥條件으로 적용하는 것이 적절할 것으로 생각된다.

4.2 減壓乾燥應力分布

4. 2. 1 乾燥曲線

오리나무, 호도나무와 은행나무의 減壓乾燥曲線을 각각 Fig.27, Fig.28 및 Fig.29에 나타냈다.

초기함수율 91.4%인 오리나무의 경우 272시간이 경과한 뒤 무처리 원판은 9.6%, 한지 엔드래핑 원판은 10.6%, 알루미늄호일 엔드래핑 원판은 11.1%까지 각각 건조되어 미국임산물연

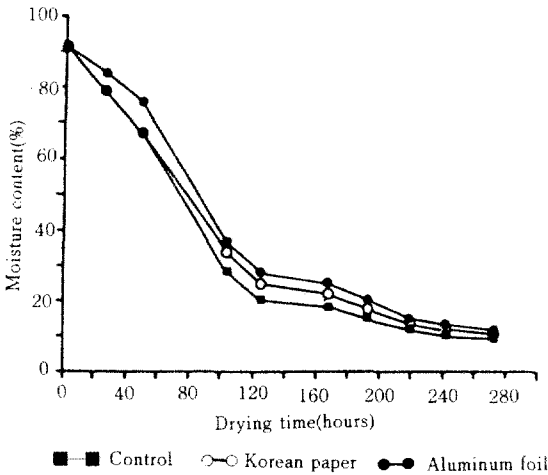


Fig.27. Vacuum drying curves of *Alnus japonica* disk in vacuum drying stress distribution test.

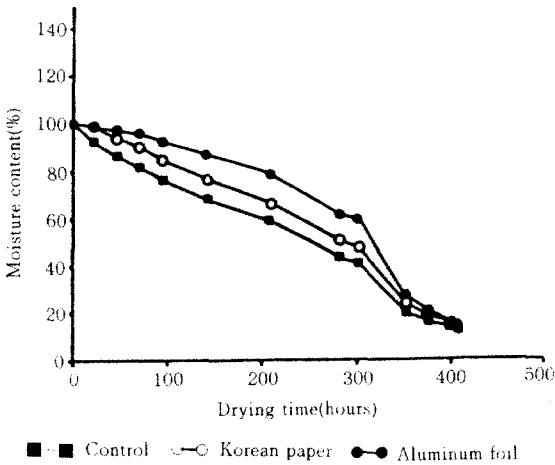


Fig.28. Vacuum drying curves of *Juglans sinensis* disk in vacuum drying stress distribution test.

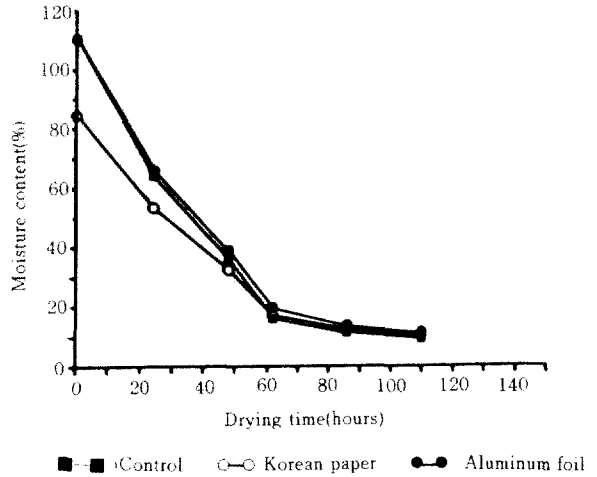


Fig.29. Vacuum drying curves of *Ginkgo biloba* disk in vacuum drying stress distribution test.

구소(FPL, 1988)가 두께 2.5cm 오리나무 판재의 생재에서 함수율 6%까지의 건조소요시간으로서 제시한 6~10일과 유사하였다.

은행나무는 110시간 경과 후 초기함수율 111.0%인 무처리 원판은 9.3%까지 건조되었고, 초기함수율 84.7%인 한지 엔드래핑 원판은 10.2%까지, 그리고 초기함수율 111.5%인 알루미늄호일 엔드래핑 원판은 11.0%까지 각각 건조되었다. 은행나무 圓板減壓乾燥시 소요된 총 건조시간은 건조특성이 유사할 것으로 판단되는 Douglas-fir의 두께 2.5cm, 직경 30cm인 원판을 함수율 8%까지 실온건조하는데 소요된 34일(Kubler, 1974)과 비교하여 약 1/8에 불과하였다.

초기함수율 99.9%인 호도나무는 407시간이 경과한 후 무처리 원판은 12.3%, 한지 엔드래핑 원판은 14.1%, 알루미늄호일 엔드래핑 원판은 14.3%까지 각각 건조되어 PEG 처리한 두께 5cm 호도나무 원판을 관행열기 건조할 경우 소요된 7일(Mitchell, 1963)과 비교하여 더 많은 시간이 소요되었으나, PEG 처리기간 약 6주를 고려해 볼 때 상당히 짧은 시간이었을 뿐만 아니라, PEG 처리는 원판의 색상을 다소 어둡

게 만들고, 표면의 질감이 좋지 못해 원판의 미관적 가치를 저하시킬 우려가 있는 것으로 보고된 바 있어(Kubler, 1974) 호도나무 圓板減壓乾燥 역시 건조시간의 단축, 에너지 절감 및 邊材變色 防止등의 측면에서 PEG 처리한 원판을 관행열기 건조하는 것보다 유리할 것으로 판단된다.

4.2.2 乾燥速度

공시수종에 따른 함수율 단계별 건조시간, 乾燥速度 및 최종함수율을 Table 8에 나타냈다.

오리나무의 경우 생재~30%와 30~20% 함수율 단계에서의 乾燥速度는 무처리, 한지 엔드

를 것으로 판단된다.

호도나무의 乾燥速度도 오리나무와 동일한 경향을 보였는데, 생재~60% 함수율 단계에서의 乾燥速度는 무처리 원판은 0.20%/hr, 한지 엔드래핑 원판 0.16%/hr, 그리고 알루미늄호일 엔드래핑 원판은 0.14%/hr로서 역시 한지와 알루미늄호일 엔드래핑 원판은 무처리 원판에 비해 乾燥速度가 느렸다.

은행나무의 생재~30% 함수율단계에서의 乾燥速度는 무처리 1.56%/hr, 알루미늄호일 엔드래핑 1.51%/hr, 한지 엔드래핑 1.08%/hr로서 무처리, 알루미늄호일 엔드래핑, 한지 엔드

Table 8. Final moisture content, drying times, and drying rates by the ranges of moisture content in vacuum drying stress distribution test

Species	End treatments	Final MC(%)	Green~30%MC (Green~60%MC)		30~20%MC [30~15%MC]		20~15% MC		15~10% MC	
			Drying time (hr)	Drying rate (%/hr)	Drying time (hr)	Drying rate (%/hr)	Drying time (hr)	Drying rate (%/hr)	Drying time (hr)	Drying rate (%/hr)
<i>Alnus japonica</i>	Control	9.60±1.55	100	0.62	27	0.37	69	0.07	73	0.07
	Korean paper	10.6±2.49	110	0.56	55	0.18	37	0.17	59	0.09
	Aluminum foil	11.1±3.03	121	0.51	92	0.11	29	0.19	70	0.08
<i>Juglans sinensis</i>	Control	12.3±3.41	<208>	<0.20>	—	—	<37>	<0.15>	<35>	<0.13>
	Korean paper	14.1±2.36	<251>	<0.16>	—	—	<31>	<0.17>	<19>	<0.24>
	Aluminum foil	14.3±3.58	<294>	<0.14>	—	—	<34>	<0.18>	<20>	<0.24>
<i>Ginkgo biloba</i>	Control	9.30±2.64	52	1.56	[11]	[0.95]	—	—	36	0.15
	Korean paper	10.2±2.54	50	1.08	[14]	[0.74]	—	—	39	0.15
	Aluminum foil	11.0±1.87	54	1.51	[25]	[0.45]	—	—	38	0.17

Note: < > -Drying time and drying rates for green ~ 60%MC
[] -Drying time and drying rates for 30~15%MC

래핑, 알루미늄호일 엔드래핑의 순으로 빠르게 나타났으며, 특히 心材割裂의 발생이 최대에 도달하고, V형 크랙의 발생이 개시되는 함수율 30~20% 단계에서 한지 및 알루미늄호일 엔드래핑 원판의 乾燥速度는 각각 0.18%/hr, 0.11%/hr로 무처리의 약 1/2 또는 1/3로 나타났다.

이것은 한지와 알루미늄호일 엔드래핑에 의해 수분증발이 억제되었기 때문인 것으로 사료되고, 이 함수율단계에서의 乾燥速度 지연은 표면에 引張應力이 형성되는 것을 가능한 한 억제하고, 또한 異方性收縮應力을 세트 상태로 유도하여 心材割裂과 V형 크랙의 예방에 효과가 있

래핑의 순으로 크게 나타났고, 특히 한지엔드래핑의 乾燥速度는 알루미늄호일 엔드래핑과도 비교하여 상당히 느린 편이었는데, 이것은 초기 함수율의 차이에 기인한 것으로 사료된다. 또한 30~15% 함수율단계에서도 한지 및 알루미늄호일 엔드래핑의 乾燥速度는 각각 무처리의 약 4/5와 1/2에 불과하여 한지 및 알루미늄호일 엔드래핑에 의해 心材割裂과 V형 크랙의 발생은 오리나무와 마찬가지로 상당량 억제되었을 것으로 판단된다.

4.2.3 乾燥應力 分布模型

4.2.3.1 表面應力

減壓乾燥중 건조초기에 오리나무, 호도나무 및 은행나무 원판의 내층에 형성된 부위별 접선 방향응력의 크기를 Table 9에 나타냈다.

割裂의 발생이 어느 정도 예방될 수 있음을 시사해 준다. 그리고 모든 수종의 무처리 원판의 경우 壓縮應力이 원주선상에서 髓 부위로 근접할

Table 9. Tangential surface stresses by distance from pith at the early stage of vacuum drying(kgf/cm²)

Species	End treatments	MC (%)	Distance from pith(cm)				
			2	6	10	14	18
<i>Alnus japonica</i>	Control	78.7	-3.15	-3.03	-1.82	-1.81	-
	Korean paper	66.5	-3.28	-3.24	-1.93	-1.95	-
<i>Juglans sinensis</i>	Control	78.6	-1.73	-1.77	-1.73	-1.73	-
		66.3	-1.88	-1.81	-1.84	-1.82	-
	Korean paper	76.3	-2.57	-2.48	-1.03	-1.07	-
<i>Ginkgo biloba</i>	Control	67.8	-2.72	-2.63	-1.24	-1.31	-
		76.4	-1.05	-1.08	-0.98	-0.98	-
	Korean paper	66.3	-1.24	-1.27	-1.05	-1.31	-
<i>Ginkgo biloba</i>	Control	63.9	-2.40	-2.30	-1.20	-1.33	-1.30
	Korean paper	53.7	-0.51	-0.52	-0.49	-0.57	-0.50

오리나무의 무처리 원판은 $-1.95 \sim -3.28 \text{ kgf/cm}^2$, 한지 엔드래핑은 $-1.73 \sim -1.88 \text{ kgf/cm}^2$ 의 壓縮應力을, 호도나무 무처리 원판은 $-1.03 \sim -2.72 \text{ kgf/cm}^2$, 한지 엔드래핑 원판은 $-0.98 \sim -1.27 \text{ kgf/cm}^2$, 그리고 은행나무 무처리 원판은 $-1.20 \sim -2.40 \text{ kgf/cm}^2$, 한지엔드래핑 $-0.49 \sim -0.57 \text{ kgf/cm}^2$ 를 각각 나타내어 엔드래핑처리 및 髓로부터 거리에 관계없이 미미한 壓縮應力상태를 나타냈다. 이것은 급속한 수분증발로 인해 표층은 이미 수축하려하나 섬유포화점 이상인 내부인접층에 의해 수축이 억제되어 표층에 引張應力이 형성되어 있음을 의미하는 것으로 해석되며, 원판의 경우 자유수 유동이 용이한 섬유방향으로 수분유동이 이루어지기 때문에 판재에 비해 그 크기는 훨씬 적을 것으로 사료되나 髓부위에는 접선방향 引張生長應力이 높게 형성되어 있어 (Archer, 1989) 극히 미미한 引張應力하에서도 心材割裂이 유발될 수 있음을 고려해 볼 때, 가능한 건조초기에 접선방향 引張應力이 형성되는 것을 억제하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

이러한 측면에서 동일 수종, 동일 부위에서 한지 엔드래핑 원판의 壓縮應力 크기가 무처리 원판에 비해 적고, 특히 髓 부위에서 그 차이가 더욱 현저한 사실은 한지엔드래핑에 의해 心材

수축 점진적으로 증가하지 않고, 髓로부터 약 6cm 거리를 臨界點으로하여 一階段狀으로 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이것은 심재부위의 수분유동 속도가 변재부위에 비해 상대적으로 느린 것에 기인한 것으로 생각된다. 다만 한지 엔드래핑의 경우는 한지의 표면수분 증발 억제 효과에 힘입어 수분유동속도의 차이에 큰 영향을 받지 않아 원판의 부위에 관계없이 대체로 균일한 분포를 보이고 있는 것으로 판단된다. 따라서 단순히 心材割裂만을 예방할 목적이라면 심재부위에만 한지 엔드래핑을 실시하므로써 변재변색의 위험으로부터 벗어날 수 있고, 이러한 점에서 한지는 알루미늄호일 엔드래핑과 비교하여 局部的인 엔드래핑이 가능한 잇점을 지닌 것으로 생각된다.

4.2.3.2 異方性收縮應力

減壓乾燥 중 오리나무, 호도나무 및 은행나무의 원판에 형성된 접선방향 異方性收縮應力の 分布模型은 각각 Fig.30, Fig.31 및 Fig.32와 같다.

동일 함수율 수준에서 모든 수종의 경우 원주 선상에는 최대 引張應力이 형성된 반면, 髓에 근접할수록 점점 감소하여 髓 근처에서는 오히려 壓縮應力 상태로 전환되었는데, 이것은 定性的인면에서 Ylinen(1949)의 이론적 분포모형과

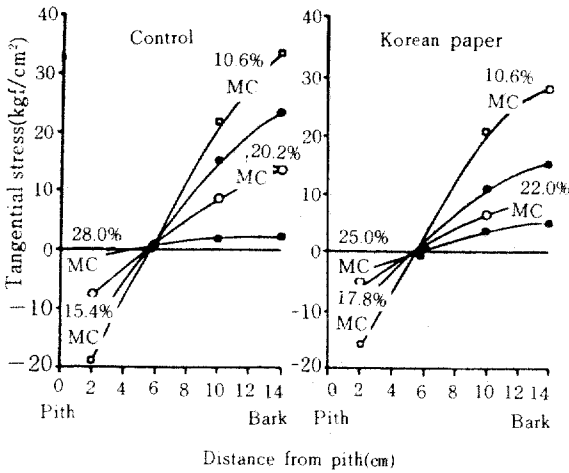


Fig. 30. Tangential differential shrinkage stress in *Abnus japonica* disk.

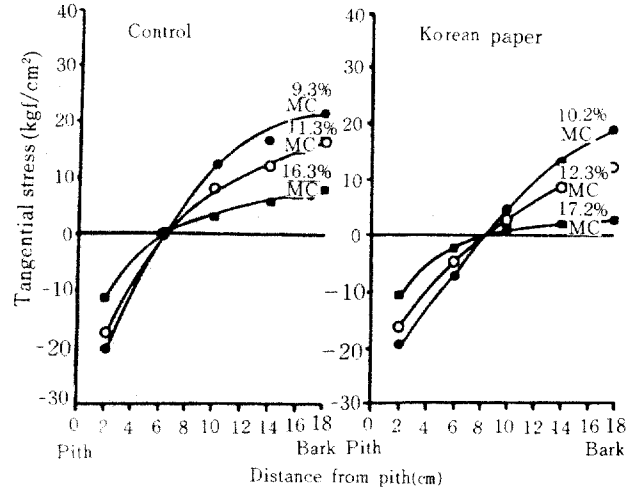


Fig. 32. Tangential differential shrinkage stress in *Ginkgo biloba* disk.

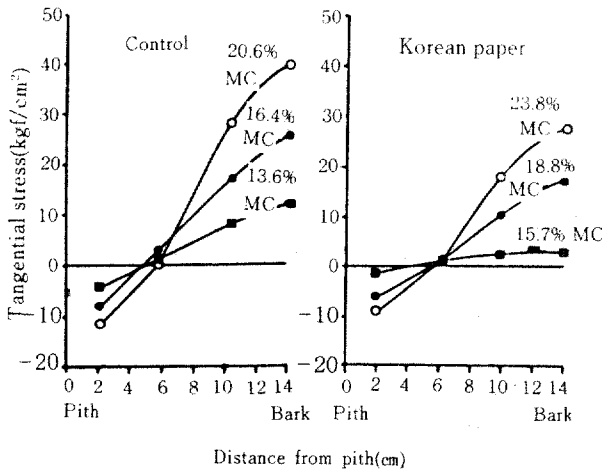


Fig. 31. Tangential differential shrinkage stress in *Juglans sinensis* disk.

일치하였다. 또한 함수율 수준에 관계없이 접선 방향 異方性收縮應力은 오리나무와 호도나무의 무처리 원판과 한지 엔드레핑 원판은 髓로부터 약 6cm 거리의 지점에서 零이 되었고, 은행나무 무처리 원판은 약 6cm, 한지엔드레핑 원판은 약 8cm 지점에서 각각 零이 되어 Ylinen(1949)이 보고한 髓로부터 원판 반경의 1/3 지점보다는 먼거리였다. 이는 Ylinen의 연구는 목재는 함수율 감소에 비례하여 균일하게 수축한다는 가정 하에 수행되었고, 또한 減壓乾燥에 의한 관재 수축율의 감소 효과에 의해 접선방향과 방사방

향간의 절대적인 수축율 차이가 적어졌기 때문인 것으로 생각된다.

건조 종료시기에 이르러 원주선상과 髓로부터 2cm 거리인 지점에 각각 형성된 접선방향 引張應力과 壓縮應力은 오리나무 무처리 원판의 경우 33.99kgf/cm²와 -18.76kgf/cm², 한지 엔드레핑 원판은 28.49kgf/cm²와 -15.73kgf/cm²이었고, 호도나무 무처리 원판은 39.78kgf/cm²와 -8.67kgf/cm²이었으며, 은행나무의 무처리 원판은 21.73kgf/cm²와 -20.43kgf/cm² 그리고 한지엔드레핑 원판은 18.75kgf/cm²와 -19.15kgf/cm²로서 모든 함수율이 감소함에 따라 원주선상의 引張應力과 髓 부위의 壓縮應力이 더욱 증가되는 경향을 보였다. 이는 함수율감소에 비례하여 원주선상 또는 髓에서의 접선방향과 방사방향간의 수축율 차이가 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

이러한 접선방향 異方性收縮應力의 分布模型과 그 변천 과정은 원판의 乾燥機構를 이해하는데 있어 시사하는 바가 크다. 즉 건조후기 이후 髓부위에 형성된 壓縮應力에 의해 높은 접선방향 引張生長應力이 相殺되므로 말미암아 心材割裂의 발생위험은 크게 감소될 것으로 사료된다. 그러나 건조후기에는 원주선상에 큰 접선방향 引張應力이 형성되기 때문에 원주선상에

서부터 V형 크랙의 발생이 개시될 수 있는데, Hsu 등(1974)은 밴드결체와 같은 기계적 억제력에 의해 원주선상의 접선방향 引張應力을 상당량 감소시킬 수 있다고 보고한 바 있으나, 개개의 원판에 밴드결체를 적용하는 것은 작업상 매우 불편하기 때문에 새로운 응력 억제대책이 개발되어야 할 것으로 생각된다.

특히 건조초기에 발생하는 心材割裂이 건조 후기에 나타나는 수축이방성에 기인한 접선방향 引張應力이 형성될 영역까지 진행되었을 경우 이러한 心材割裂은 건조후기에도 더욱 확대되어 목재조직의 약화를 초래하고, 이에 따라 V형 크랙의 발생이 한층 용이해진다는 점에서 건조초기의 心材割裂 예방은 한층 중요한 의미를 지닌 것으로 생각된다.

한지 엔드래핑처리에 의해 원주선상의 접선방향 引張應力이 다소 완화되었는데 건조종료 시기를 기준하여 오리나무는 21.7%, 호도나무는 30.3%, 그리고 은행나무는 13.7% 정도 각각 완화효과가 있었다.

이것은 한지엔드래핑에 의한 乾燥應力의 영구변형에 기인한 것으로 사료되며, 다른 수종과 비교하여 은행나무의 경우 한지엔드래핑에 의한 응력완화 효과가 적은 것은 乾燥速度가 상대적으로 빨라 영구변형량이 적었기 때문인 것으로 판단된다.

섬유방향의 表面應力과 異方性收縮應力의 분포는 엔드래핑처리에 관계없이 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 이것은 섬유방향으로의 수분경사가 극히 미미할뿐 아니라 수축을 또한 매우 적기 때문인 것으로 생각된다.

4.2.4 V형 크랙 발생 臨界含水率

오리나무, 호도나무 및 은행나무의 V형 크랙 발생 臨界含水率을 Fig.33, Fig.34와 Fig.35에 각각 나타냈다.

오리나무 무처리 원판과 한지 엔드래핑 원판은 약 10%와 6.5%, 호도나무 13.0%와 8.0%, 그리고 은행나무는 15.5%와 12.5%에서 원주선상의 접선방향 最大引張應力이 각각 목재의

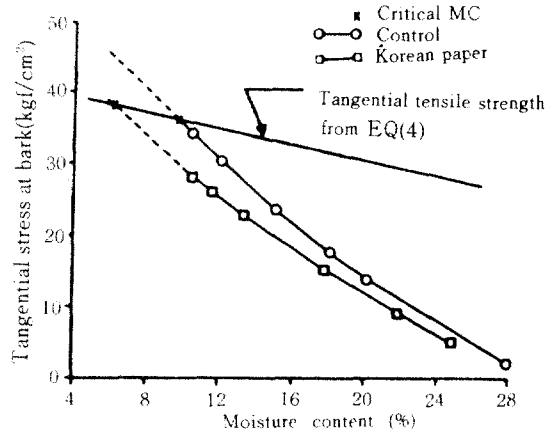


Fig.33. Critical moisture content initiating V-shaped crack in *Alnus japonica* disk.

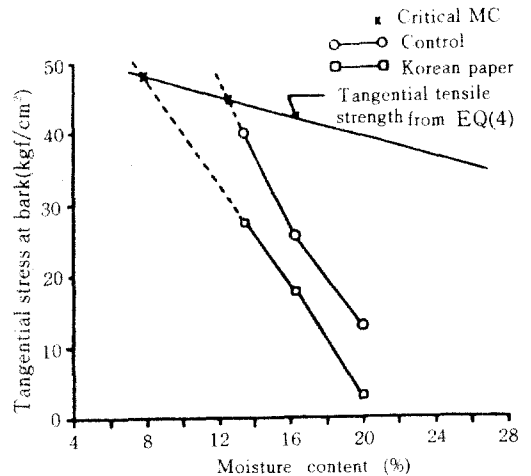


Fig.34. Critical moisture content initiating V-shaped crack in *Juglans sinensis* disk.

접선방향 인장강도를 초과하여 V형 크랙이 발생될 것으로 추정된다. 한지 엔드래핑에 의해 오리나무는 3.5%, 호도나무 5.0%, 은행나무 3% 정도씩 V형 크랙 발생 臨界含水率을 저하시킬 수 있었다. 이와같은 결과는 한지 엔드래핑의 접선방향 引張應力 완화효과에 기인한 것으로 생각되나, 보다 정확한 V형 크랙 발생 臨界含水率이 조사되기 위해서는 탄성계수의 분포모형, 인장강도와 탄성계수의 함수율에 따른 변화 등이 고려되어야 할 것으로 판단된다. 다만 미세한 V형 크랙이라 할지라도, 특히 減壓乾燥

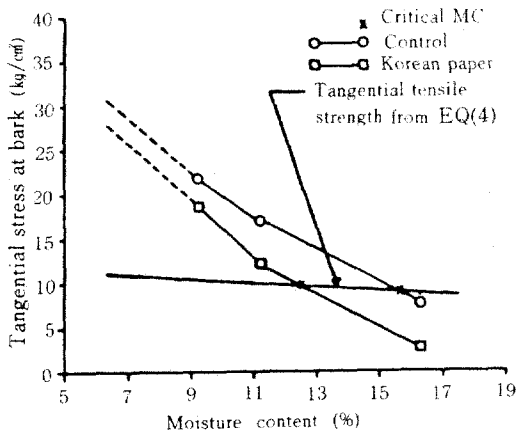


Fig.35. Critical moisture content initiating V-shaped crack in *Ginkgo biloba* disk.

의 경우 그것은 매우 급속한 乾燥速度를 초래하여 더욱 심한 크랙을 유발할 수 있으므로 안전한 적용을 염두에 두어야 할 것이다.

은행나무의 경우 오리나무, 호도나무와 비교하여 접선방향 최대 引張應力이 낮았음에도 불구하고, 다른 수종에 비해 V형 크랙 발생 臨界含水率이 높은 것은 접선방향 인장강도가 상대적으로 작았기 때문인 것으로 생각되며, 따라서 V형 크랙의 발생 폭을 단순히 접선방향과 방사방향간의 수축을 차이와 원판의 직경만으로 설명하는 것은 (FPL, 1956 and Kubler, 1975)수정되어야 할 것으로 여겨진다.

4.2.5 乾燥缺陷

4.2.5.1 心材割裂

減壓乾燥 應力 分布 試驗 종료 후 오리나무, 호도나무와 은행나무 원판에서 조사된 모든 心材割裂의 평균 갯수, 평균 길이 및 心材割裂이 발생된 원판의 갯수와 발생율을 Table 10에 나타냈다.

오리나무의 무처리와 한지 및 알루미늄호일 엔드래핑 원판은 전혀 心材割裂이 발생하지 않았다. 이미 조사된 Table 9의 원판의 부위별 表面應力의 크기로부터 오리나무의 경우 髓로부터 2cm 떨어진 부위의 원판 내층에 형성된 접선방향 壓縮應力이 최소한 3.28kgf/cm² 정도까지 형성되더라도 心材割裂은 발생하지 않음을 유추해 낼 수 있다. 따라서 한지 엔드래핑 원판의 경우 건조 초기의 乾燥速度를 다소 상승시켜 건조시간을 단축하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

호도나무 무처리 원판에 발생한 모든 心材割裂의 평균 갯수와 평균 길이는 0.30개와 1.25cm, 알루미늄호일 엔드래핑 원판은 0.10개와 0.15cm로서 각각 단 하나의 원판에서만 미세하게 발생하였고, 한지 엔드래핑 원판에서는 전혀 발생하지 않았다.

은행나무의 경우 발생된 모든 心材割裂의 평균갯수와 평균길이는 무처리 원판은 0.80개와 2.8cm, 한지 엔드래핑 원판은 0.20개와 0.35cm

Table 10. Average total length of heart check, and number and percentage of disks defected by heart check at the end of vacuum drying for vacuum drying stress distribution test

Species	End treatments	Average total		Defected disks	
		Number (pcs)	Length (cm)	Number (pcs)	Percentage (%)
<i>Alnus japonica</i>	Control	0	0	0	0
	Korean paper	0	0	0	0
	Aluminum foil	0	0	0	0
<i>Juglans sinensis</i>	Control	0.30	1.25	1	10
	Korean paper	0	0	0	0
	Aluminum foil	0.10	0.15	1	10
<i>Ginkgo biloba</i>	Control	0.80	2.80	4	40
	Korean paper	0.20	0.35	2	20
	Aluminum foil	0.50	2.38	4	40

그리고 알루미늄호일 엔드래핑 원판은 0.50개와 2.38cm로서 그 발생 정도는 극히 경미하였고, 특히 한지엔드래핑에 의한 心材割裂 예방효과는 뚜렷하여 10개의 원판중 단 2개의 원판에서만 미세한 心材割裂이 발생하였다.

이처럼 모든 수종에서 心材割裂이 전혀 발생하지 않았거나, 그 정도가 극히 미미했던 것은 목재내외의 큰 압력차에 기인한 자유수 유동속도의 증대 및 한지와 알루미늄호일 엔드래핑에 의한 수분 증발속도의 감소로 인해 접선방향引張應力이 감소되었기 때문인 것으로 생각된다.

4.2.5.2 V형 크랙

減壓乾燥 應力分布試驗 종료 후 오리나무, 호도나무와 은행나무 원판에서 조사된 모든 V형 크랙의 평균 갯수, 평균 폭, 평균 길이, V형 크

랙이 발생된 원판의 수량과 발생율을 Table 11에 나타냈다.

오리나무의 경우 무처리 원판중 오직 1개의 원판에서 폭 0.13cm, 길이 0.63cm 크기의 V형 크랙이 단 1개 발생하였을 뿐, 한지 및 알루미늄호일 엔드래핑 원판에서는 전혀 발생하지 않았고, 무처리 원판 중 3개의 원판에서 평균 폭 0.32cm, 평균 길이 1.72cm의 V형 크랙만이 발생하였다. 은행나무의 경우도 무처리 원판중 2개의 원판에서 평균 폭 0.05cm, 평균 길이 1.6cm 크기의 V형 크랙이 발생하였을 뿐 한지 및 알루미늄호일 엔드래핑 원판에서는 전무하였으며, 무처리 원판에서 발생한 V형 크랙도 Fig.35에 나타낸 바와 같이 輪割이 형성된 부위에서 발견되는 점으로 미루어보아, 은행나무의 V형 크랙

Table 11. Average total number width and length of V-shaped crack and number and percentage of disks defected by V-shaped crack at the end of vacuum drying for vacuum drying stress distribution test

Species	End treatments	Average total			Defected disks	
		Number (pcs)	Width (cm)	Length (cm)	Number (pcs)	Percentage (%)
<i>Alnus japonica</i>	Control	0.08	0.13	0.63	1	8.3
	Korean paper	0	0	0	0	0
	Aluminum foil	0	0	0	0	0
<i>Juglans sinensis</i>	Control	0.40	0.32	1.72	3	30
	Korean paper	0	0	0	0	0
	Aluminum foil	0	0	0	0	0
<i>Ginkgo biloba</i>	Control	0.20	0.05	1.60	2	20
	Korean paper	0	0	0	0	0
	Aluminum foil	0	0	0	0	0

Table 12. Average total number and length of ring failure, and number and percentage of disks defected by ring failure at the end of vacuum drying for drying stress distribution test

Species	End treatments	Average total		Defected disks	
		Number (pcs)	Length (cm)	Number (pcs)	Percentage (%)
<i>Alnus japonica</i>	Control	0	0	0	0
	Korean paper	0	0	0	0
	Aluminum foil	0	0	0	0
<i>Juglans sinensis</i>	Control	0	0	0	0
	Korean paper	0	0	0	0
	Aluminum foil	0	0	0	0
<i>Ginkgo biloba</i>	Control	0.20	0.72	2	20
	Korean paper	0	0	0	0
	Aluminum foil	0	0	0	0

은 원추형의 소형돌기에 의해 먼저 輪割이 발생하고, 輪割에 기인한 접선방향인장강도의 저하로 인해 발생하는 것으로 생각된다.

이와 같이 V형 크랙의 발생정도가 모든 수종에서 경미했던 것은 減壓乾燥에 의한 수축을 감소효과(Harris 등, 1984a)에 기인한 것으로 사료되고, 특히 엔드레핑 원판의 경우 乾燥速度 지연에 따른 異方性收縮應力の 영구변형화에 의해 V형 크랙이 전혀 발생하지 않은 것으로 사료된다.

4.2.5.3 輪割

減壓乾燥 應力分布試驗 종료 후 오리나무, 호도나무와 은행나무 원판에서 조사된 모든 輪割의 평균 갯수, 평균 길이, 輪割이 발생된 원판의 수량과 발생율을 Table 12에 나타냈다.

輪割은 오직 은행나무의 2개의 무처리 원판에서만 평균길이 0.72cm 크기의 輪割이 발생하였을 뿐이었다. 은행나무 무처리 원판의 輪割이 발생된 부위의 접선단면에는 역시 원추형의 소형 돌기가 존재하였으며, 한지 및 알루미늄호일 엔드레핑 원판의 경우 輪割이 발생하지 않은 것은 원추형의 소형 돌기가 존재하지 않았거나, 또는 乾燥速度 지연에 따른 방사방향 引張應力の 완화에 기인한 것으로 사료된다.

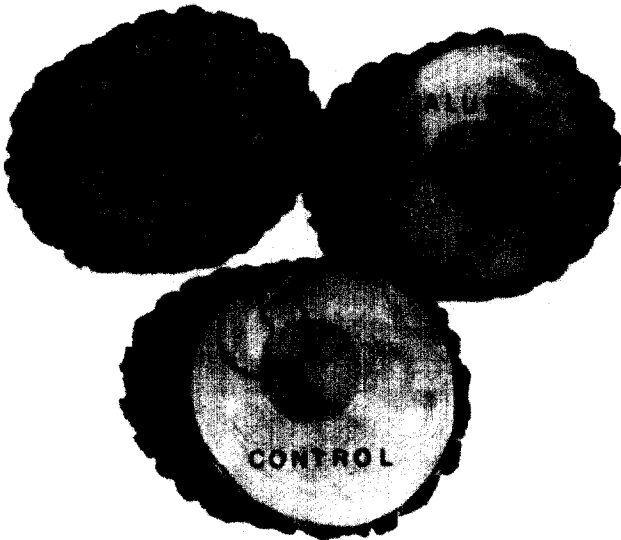


Fig.36. Disks of *Ginkgo biloba* after vacuum drying.

V. 要約

원판의 관행 열기건조시 잔적위치에 따른 乾燥速度의 차이는 심하였고, 원판의 직경이 변이가 클수록 乾燥速度의 변화기복도 심하였으나, 減壓乾燥의 경우 乾燥速度는 잔적위치와 원판 직경의 변이에 영향을 받지 않은 것이 확인되었다.

원판 內層의 접선방향 表面應力은 수종, 엔드레핑처리 및 直徑生長部位에 관계없이 미미한 壓縮應力을 나타냈고, 무처리 원판은 髓로부터 6cm인 점을 臨界點으로하여 髓 부위쪽이 圓周部 쪽보다 더 큰 壓縮應力을 나타내는 一階段狀의 분포모형을 보인 반면에, 한지 엔드레핑 원판은 균일한 분포모형을 나타냈는데, 이는 한지 엔드레핑의 경우 한지에 의한 표면수분 증발 억제효과로 심재와 변재부위간에 水分流動速度의 차이가 작았기 때문인 것으로 판단되며, 한지 엔드레핑은 內層의 壓縮應力을 억제하는 효과가 컸음을 알 수 있었다.

또한 收縮異方性에 기인한 접선방향 응력은 원주선상에서 最大引張應力을 나타냈고, 髓를 향할수록 점점 감소하여 髓 근처에서 壓縮應力으로 전환되는 분포모형을 보였다. 건조종료시 오리나무, 호도나무 및 은행나무의 한지 엔드레핑 원판의 접선방향 最大引張應力은 무처리 원판보다 작았고, 한지 엔드레핑 원판의 V형 크랙 발생 臨界含水率도 무처리 원판에 비하여 더 낮게 나타났는데, 이것은 한지의 수분증발 억제효과에 따른 원판의 永久變形化에 기인한 것으로 생각된다.

減壓乾燥 應力分布試驗에서 V형 크랙은 韓紙와 알루미늄호일 엔드레핑 원판에서는 전혀 발생하지 않았고, 무처리 원판에서도 매우 경미하게 발생하였다. 또한 心材割裂도 오리나무와 호도나무의 韓紙 엔드레핑 원판에서는 전혀 발생하지 않았고, 기타의 원판에서도 그 발생 정도는 매우 경미하였다. 특히 한지는 물론 알루미늄

늪호일 엔드래핑 원판의 減壓乾燥는 건조결함을 예방하는 데 효과적이었고, 더구나 은행나무는 110시간만에, 오리나무는 272시간, 그리고 호도나무는 407시간만에 각각 利用含水率 수준까지 건조가 가능하여, 건조시간이 크게 단축되었다.

參 考 文 獻

1. Archer, R.A. 1981. On the distribution of tree growth stresses(IV). Wood Sci. and Technol. 15: 201-209.
2. _____, 1987. On the origin of growth stresses in trees. Wood Sci. and Technol. 21: 139-154.
3. Barnacle, J.E. 1971. Rapid effect of drying on development of heart cracks. Australian Forestry 35: 251-257.
4. Boström, L. 1987. The fictitious crack model applied on shrinkage cracks in wood. Proceedings of The International Conference on Stress Development and Degrade during Wood Drying: 37-42.
5. Castera, P. 1989. Tensile creep of small wood specimens across the grain under drying conditions. IUFRO 1989 Wood Drying Symposium: 45-51.
6. Forest Product Laboratory. 1956. Drying and protection of wood items in original round form. USDA.: No 1187.
7. _____, 1988. Dry Kiln Operator's Manual. USDA.: 7-17~7-19, 7-50~7-51.
8. Harris, R.A. and A.W.C. Lee. 1985a. Properties of white pine lumber dried by radio-frequency/vacuum process and conventional kiln process. Wood and Fiber Science 17(4): 409-552.
9. _____, J.G. Schroeder, and M.A. Taras. 1985b. Yields of unexposed oak dimension parts from lumber planed before vs. after drying by radio-frequency/vacuum of dehumidification methods. For. Prod. J. 35(7): 17-19.
10. _____, and M.A. Taras. 1984a. Comparison of moisture content distribution, stress distribution, and shrinkage of red oak lumber dried by a radio-frequency/vacuum drying process and a conventional kiln. For. Prod. J.34(1): 44-54.
11. _____, _____, and J.G.Schroeder. 1984b. Sound quality upholstered frame part yields form lumber and green cuttings dried by a radio-frequency/vacuum drying process and a conventional kiln-drying. For. Prod. J.34(7/8): 19-21.
12. Hsu, N.N. and R.C.Tang. 1974. Internal stresses in wood logs due to anisotropic shrinkage. Wood Sci. 7(1): 43-51.
13. Kanagawa, Y. 1989. Resin distribution in lumber dried by vacuum drying combined with radio-frequency. Proceeding of IUFRO 1989 Wood Drying Symposium.: 158-163.
14. _____, S. Terazawa, and M. Ito. 1978. Wood drying with heating by high frequency under vacuum. Mokuzai Kogyo 33(6): 241-246.
15. Kayihan, F., M.Stainish, and G. Leick. 1987. Significant variables affecting warp during high temperature drying of *Pinus taeda*. Poreceedings of The International Conference on Stress Development and Degrade during Wood Drying.: 112-118.
16. Kubler, H. 1973. Role of moisture in hygrothermal recovery of wood. Wood Sci. 5(3): 198-204.
17. _____, 1977. Formation of checks in

- tree stems during heating. For. Prod. J. 27(1): 41-46.
18. _____ and T.H. Chen. 1975. Prevention of crosscut and heating heart checks in log ends. Wood Sci. and Technol. 9: 15-24.
 19. Mitchell, H.L. 1963. PEG-treated walnut limbwood makes handsome decorator clock. For. Prod. J. 13(9): 416.
 20. _____. 1972. How PEG helps the hobbyist who works with wood. USDA Forest Service, Forest Products Lab., Madison, Wis.
 21. Noguchi, M., K. Shigeru, S. Kenji, and U. Jiro. 1987. Feedback control for drying *Zelkova serrata* using in-process acoustic emission monitoring. For. Prod. J. 37(1): 28-34.
 22. Okuyama, T. and Y. Kikata. 1975. The residual stresses in wood logs due to growth stresses. Mokuzai Gakkaishi 25 (11): 681-687 1987
 23. _____, and Y. Sasaki. 1979. Crooking during lumbering due to residual stresses in the tree.
 24. Simpson, W.T. 1987. Vacuum drying northern red oak. For. Prod. J. 37(1): 35-38.
 25. Stamm, A.J. 1959. Effect of polyethylene glycol on the dimensional stability of wood. For. Prod. J. 9(10): 375-381.
 26. Trofatter, G., R.A. Harris, J. Schroeder, and M.A. Taras. 1986. Comparison of moisture content variation in red oak lumber dried by a radio-frequency/vacuum process and a conventional kiln. For. Prod. J. 36(5): 25-28.
 27. Wengert, E.M. and F.M. Lamb. 1983. A comparison of conventional and new drying methods, Proceedings of the Wood Drying Working Party at the IUFRO Div. V Con.: 19-23.
 28. Wilhelmy, V. and H. Kubler. 1973a. Probe for measurement of strains inside solid bodies. Experimental Mechanics 13(3): 142-144.
 29. _____. 1973b. Stresses and checks in log ends from relieved growth stresses. Wood Sci. 6(2): 136-142.
 30. Ylinen, A. 1949. Drying stresses in a cylindrical stock of wood. Finland Institute of Technology, No.1.
 31. 日本林業試驗場. 1982. 木材工業. 丸善株式會社: 309.
 32. 林業試驗場. 1984. 오리나무 목공예 이용시험. 1984년도 임업시험장 연구보고서: 854-859.