

## 침엽수 圓板의 투과성 증진을 위한 低壓蒸氣爆碎처리 효과\*1

이 남 호\*2 · 林 和男\*3

# The Effect of Low Pressure Steam Explosion Treatment on the Improvement of Permeability in the Softwood Disks\*1

Nam-Ho Lee\*2 · Kazuo Hayashi\*3

### ABSTRACT

This study was carried out to track the heated-air flows within the tree disk through measuring the distribution of wood temperatures during exposing the 75mm-thick Japanese cedar disk and to investigate the effects of the time for the first explosion cycle and the number of explosion cycles on the improvement of permeability of tree disk.

If the tree disk are exploded when the temperatures of the shell and core of it are not equilibrium yet, all of the inflated airs in the shell after explosion don't flow out toward the autoclave and some of them flow into the core of which the air pressures are lower than those of the shell.

It is very effective for the improvement of permeability of tree disk to make the first explosion cycle when the temperatures of the shell and the core equilibrate at the setting temperature of steam in the autoclave. The more tree disks were exploded under the same conditions of first explosion, the more their permeabilities were improved.

**Keywords** : Tree disk, explosion cycle, Japanese cedar, permeability, distribution of temperature

## 1. 서론

圓板은 판재에 비해서 곡선적 미관성이 뛰어나고, 다양한 형태변화가 용이하기 때문에 공예적 재료로서의 가치가 높은 편이고, 주로 조각용재, 장식용재, 관광기념품 및 각종 선삭가공용재 등으로 활용되어 부가가치가 높을 뿐만 아니라 小徑材나 彎曲材의 이용면에서도 유리하다.

그러나 원판의 髓(pith) 주변에는 引張상태의 積線방향 生長應力이 매우 높게 형성되어 있기 때문에 저장 중이거나 건조 중에 미미한 수분경사에 대해서도 심재부위가 쉽게 할렬되는 경향이 있다(Kubler, 1974 · 1975 · 1977; Lee & Jung, 1991 · 1992; Lee *et al.*, 1995). 따라서 표면의 수분증발속도나 자유수의 表層으로의 유동속도 등은 원판 건조중의 심재할렬 예방과 매우 밀접한 관련이 있다(Kubler, 1974 · 1975).

\*1 접수 1997년 5월 23일 Received May 23, 1997

본 논문은 한국과학재단의 1994년도 전반기 해외 Post Doc. 연구지원에 의해 수행된 과제의 일부임.

\*2 전북대학교 농과대학 College of Agriculture, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea

\*3 愛媛大學 農科大學 College of Agriculture, Ehime University, Matsuyama 790, Japan

Lee 등(1991 · 1992 · 1995)은 원판의 兩端단면을 종이 엔드테이핑(End-taping) 또는 알루미늄호일이나 비닐랩으로 엔드래핑(End-wrapping)처리하여 표면의 수분증발속도를 저하시키고, 아울러 材内外의 절대수증기압차에 의해서 자유수의 유동속도가 증진되는 眞空하에서 이들을 건조함으로써(Kanagawa, 1989; Liu & Zwick, 1994) 심재할렬을 예방코저하는 연구를 수행한 바 있다.

그러나 진공에 의한 자유수 유동속도의 증진효과를 보다 극대화하기 위해서는 건조시킬 재료의 투과성을 향상시키는 것이 매우 중요하다(Hayashi *et al.*, 1994; Kanagawa & Hayashi, 1992; Kanagawa *et al.*, 1994). 원판을 대상으로한 이러한 투과성 증진처리는 심재할렬 예방 뿐만아니라 증발속도를 억제하기 위한 별도의 처리를 불필요하게할 수도 있고, 또 보다 강한 건조조건을 적용할 수 있어 건조시간의 단축에도 기여할 수 있을 것으로 예측된다.

최근 일본삼나무(Japanese cedar)등과 같이 투과성이 불량한 高含水率의 침엽수 髓心기동재를 2~4기압의 低壓으로 증기폭쇄처리하여 세포벽의 폐색벽공(pit aspiration)을 開裂시킴으로써 투과성을 향상시키고저하는 시도가 이루어지고 있다(Hayashi *et al.*, 1994; Kanagawa & Hayashi, 1992; Kanagawa *et al.*, 1994). 목공예용 원판의 경우 섬유방향으로의 길이가 최대 20cm 정도로 짧고, 全徑단면이 수증기의 流入面으로 활용될 수 있기 때문에 수심기동재의 저압증기폭쇄처리와는 처리의 효과나 균일화 또는 처리시간면에서 상당한 차이가 있을 것으로 예측된다. 뿐만아니라 용도상 재료의 강도적 특성이 중요시 되지 않으므로 처리조건에 대한 선택의 폭이 넓으며, 원판을 半製品으로 가공한 후 건조할 경우 彫刻이나 선삭가공성이 용이한 이점 등을 얻을 수 있을 것으로 생각되나, 아직 원판의 저압증기폭쇄처리에 관한 연구는 이루어진 바 없다. 특히 수심기동재에 대한 일련의 저압증기폭쇄처리에 관한 연구에서는 최초 解壓시기를 단순히 경과시간에 따라 결정하였으나, 이것보다는 처리재의 온도분포, 즉 압력분포 양상에 근거하여 그 시기를 결정하는 것이 처리효과의 극대화에 유리할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 섬유방향으로의 두께가 75mm인 일본삼나무(*Cryptomeria japonica*) 원판에 대하여 최초 해압시기를 원판의 內層溫度가 100℃에 도달하였을때와 表層과 內層이 爆碎槽의 온도에서 평형을 이루었을때로 구분하여 폭쇄처리를 실시하였다. 증기폭쇄처리중 원판내의 온도분포를 관측하여 증기폭쇄처리를 전후한 熱氣의

흐름을 추적하고, 최초 폭쇄처리시기와 폭쇄처리의 횟수가 처리원판의 투과성 개선에 미치는 영향을 조사코저하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2. 1 저압증기폭쇄처리 시험편과 처리조건

직경 20.7cm, 길이 1.8m의 일본삼나무(*Cryptomeria japonica*) 원목 1本을 选材한 다음, 양 端단면을 30cm씩 잘라내고, 두께(섬유방향) 75mm의 원판을 각 증기폭쇄처리조건별로 각각 1개씩 엔드매치(end-match)시켜 채취하였다(Fig. 1). 이들 원판들의 생재비중과 초기함수율은 각각 0.34와 139.2%이었다.

저압증기폭쇄처리는 직경이 25cm이고, 깊이가 50cm로서 최대 10atm을 유지할 수 있는 autoclave내에서 실시하였다. 처리원판은 스팀보일러를 이용하여 가열하였고, 처리압력은 autoclave내의 蒸氣온도로 콘트롤하였다. 한편 처리중의 증기온도, 증기의 照射時間 및 폭쇄처리의 횟수 등은 자동콘트롤러를 부착하여 제어하였다. 또한 순간적인 解壓과 復壓이 가능토록 爆碎弁을 설치하여 사용하였다.

처리온도는 모두 134℃(절대수증기압 약 3atm)로 고정하였고, 폭쇄처리 횟수는 1회( $E_{1-100}$ 과  $E_{1-134}$ ), 5회( $E_{5-100}$ ) 및 10회( $E_{10-100}$ )로 구분하였다. 최초의 해압은  $E_{1-134}$ 의 경우만 처리 원판의 表層과 內層의 온도가 모두 폭쇄조내 수증기의 온도인 134℃에서 평형을 이루었을때 실시하였고, 나머지 경우는 처리원판의 내층온도가 100℃에 도달하였을때 실시하였다. 그리고  $E_{5-100}$  및  $E_{10-100}$  처리 원판의 경우 해압 및 복압시간은 각각 10초와 5분으로 고정하였다(Table. 1).

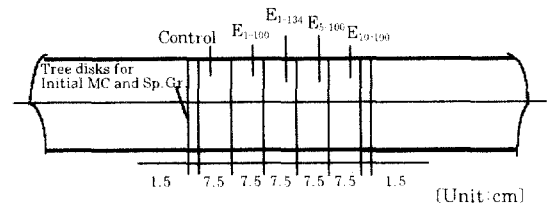


Fig. 1. Preparation of 75mm-thick tree disks for low pressure steam explosion test and Initial MC and specific gravities based on green volume(Sp.Gr.)

Table 1. The core temperature of tree disk when the 1st explosion(Core Temp. when 1st Explosion), the number of explosions, breathing- and incubating- time for each explosion test.

Treat	Core Temp. when 1st Explosion (°C)	Number of Explosion (cycles)	Breathing time (sec.)	Incubating time (min.)
E <sub>1-100</sub>	100	1	-	-
E <sub>1-134</sub>	134	1	-	-
E <sub>5-100</sub>	100	5	10	5
E <sub>10-100</sub>	100	10	10	5

## 2. 2 材溫分布의 관측

증기폭쇄처리를 전후한 熱氣의 흐름을 추적하기 위하여 처리중의 폭쇄조 및 원판의 표층과 내층의 온도변화를 데이터집적장치를 이용하여 5초 간격으로 수집하였다. 원판의 한 횡단면으로부터 섬유방향으로 원판두께의 1/4과 1/2떨어진 지점에 각각 열전쌍을 삽입하여 표층과 내층의 온도를 측정하였다(Fig. 2). 각 처리 원판의 접선단면상에서 髓를 향해 온도센서의 선단부가 원판의 心材部에 놓일 정도의 깊이로 직경 3.5mm의 구멍을 뚫고, 이곳에 온도센서를 삽입한 후 진공구리스로 밀봉하고, 다시 고무커버를 씌어 나사볼트 조임하는 방법으로 기밀을 보강하였다.

## 2. 3 투과성 평가

저압증기폭쇄처리가 끝난 각 원판의 심재부위에서 접선방향 3cm×방사방향 3cm의 정확한 방사단면을 갖는 무결점의 木片 2개씩을 채취하여 함수율 약 8%까지 건조하되, 건조중에 미세할렬이 발생하는 것을 예방하기 위하여 고주파진공건조기내에서 진공도는 50mmHg, 재온 40.5℃조건으로 건조하였다. 건조후 시험편을 다시 접선방향 2.5cm×방사방향 2.5cm×섬유방향 7cm크기로 조절한 다음, 온도 20℃, 상대습도 60%의 조건으로

조습처리하였다.

시험편을 진공대시케이터내의 Direct Sky Blue (C<sub>34</sub>H<sub>24</sub>N<sub>6</sub>Na<sub>4</sub>O<sub>16</sub>S<sub>4</sub>)의 0.5% 수용액속에 횡단면이 수면과 수직되게, 그리고 접선단면이 수면으로부터 일정 깊이에 놓이도록 주의해가며 침지하였다. 침지사이클은 진공상태에서 10분동안 침지한 후, 대기압 조건에서 50분간 침지하였다. 침지後 시험편의 접선단면 표면으로부터 깊이 1.5cm 面上에 색소가 침착된 면적을 화상처리기와 실체현미경으로 측정하여 저압증기 폭쇄처리별 투과성의 개선정도를 평가하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3. 1 최초 解壓時期와 材溫 변화

E<sub>1-100</sub> 처리와 E<sub>1-134</sub> 처리를 전후한 원판의 표층과 내층 및 폭쇄조내의 온도변화를 각각 Fig. 3에 나타내었다.

E<sub>1-100</sub> 처리의 경우 최초 폭쇄 直後 표층의 온도는 8℃ 정도 하강하였다. 반면에 폭쇄조內 135~139℃의 가열 수증기가 급격하게 방출되어 폭쇄조의 온도가 100.6℃로急降下하였음에도 불구하고, 내층의 온도는 오히려 폭쇄前에 비해서 0.6℃정도 상승하였다. 이는 해압을 함으로써 내층의 세포내강에 존재하는 공기의 온도보다 高溫인 熱氣가 인접한 표층을 통해서 내층으로 유입되었다는 반증으로서 폭쇄 직후 표층의 가열된 공기가 항상 폭쇄조內으로 유동하는 것은 아닌 것으로 생각된다. 즉, 폭쇄조와 표층의 수증기 온도는 약 134℃에서 온도평형을 이루고, 내층은 아직 100℃정도에 머무르고 있을 때 증기폭쇄처리를 실시한다면 폭쇄조와 표층의 세포내강에는 약 3atm의 압력이 형성되어 있는 반면에, 내층의 세포내강은 약 1atm 정도의 낮은 압력상태이기 때문에 폭쇄직후 먼저 폭쇄조내 열기의 대부분이 급격하게 외기로 방출되고, 이에 運動하여 표층의 공기의 용적이 팽창하게 된다. 팽창된 공기는 대기압상태의 폭쇄조층으로도 흘러나오지만,

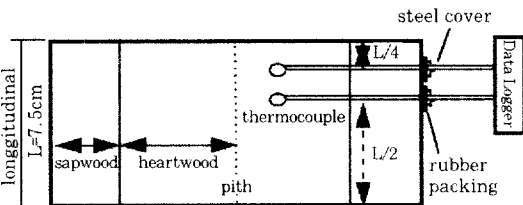


Fig. 2. Inserting of thermocouples for measuring temperatures of shell and core into the tree disk.

일부는 역시 아직 대기압 수준인 내층으로 流入되는 것으로 생각된다. 이 결과 폭쇄직후 내층의 온도는 오히려 약간 상승하지만, 표층은 공기의 급격한 용적팽창으로 말미암아 재온이 급강하된것으로 해석된다.

이러한 해석은  $E_{1-134}$  처리의 경우  $E_{1-100}$  처리와는 다르게 표층과 내층의 온도가 모두 13.8℃와 13.5℃씩 급격하게 저하된 사실에 의해서 더욱 확실해진다.  $E_{1-134}$  처리의 경우 표층, 내층 및 폭쇄조의 온도가 모두 132.8~134.9℃에서 거의 평형을 이루었을때 해압을 하였기 때문에, 먼저 폭쇄조내의 공기가 외기로 방출되고, 뒤이어 표층과 폭쇄조 사이에 형성된 압력경사 때문에 표층공기의 용적이 급격하게 팽창되지만, 이 팽창될 열기는 내층으로 유입되지 않고 상대적으로 低壓인 폭쇄조측으로 흐르는 것으로 해석된다.

따라서 폭쇄직후 목재내의 공기는 Kanagawa(1994)가 보고한 것처럼 항상 폭쇄조측으로 유동하는 것이 아니고, 폭쇄 직전의 온도경사 즉 절대수증기압의 差에 의해서 좌우되는 것으로 요약할 수 있다. 이러한 점을 고려해볼때 표층과 내층의 온도가 폭쇄조의 熱氣온도와 평형을 이루었을때 폭쇄를 할 경우 單位 증기폭쇄처리에 의해서 목재내의 표층은 물론 내층의 세포내강에 존재하는 공기의 급격한 용적팽창과 공기유동을 대량으로 유인할 수 있을 것으로 생각된다.

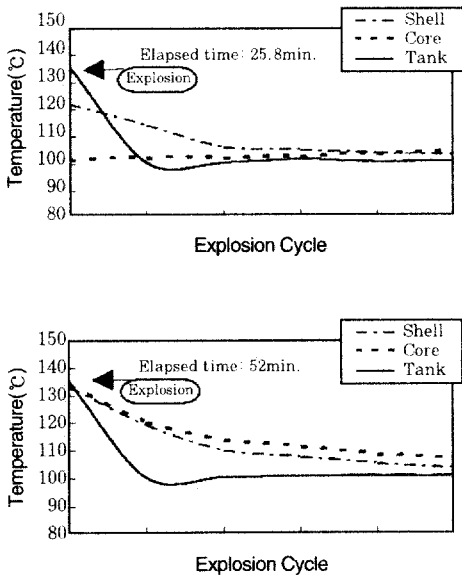


Fig. 3. The change of temperatures of shell and core of the tree disk and air in the autoclave after explosion for  $E_{1-100}$  (above) and  $E_{1-134}$  (below).

### 3. 2 증기폭쇄처리 횟수와 材溫 변화

$E_{5-100}$ 과  $E_{10-100}$  처리 원판의 증기폭쇄처리 중의 표층과 내층 및 폭쇄조내의 온도 변화를 Fig. 4에 나타내었다.

최초 폭쇄 直前의 폭쇄조 및 표층과 내층의 온도는  $E_{5-100}$ 의 경우 132.7℃, 112.6℃ 및 100.8℃였고,  $E_{10-100}$ 의 경우는 각각 128.8℃, 115℃, 100.6℃였다. 한편 최초 폭쇄 直後  $E_{5-100}$ 과  $E_{10-100}$  처리 모두 표층의 온도는 11~12℃ 정도 급격하게 낮아졌음에도 불구하고, 내층의 온도는 오히려 0.5℃ 정도씩 상승하여  $E_{1-100}$  처리의 경우와 동일한 경향을 보였다.

최초 폭쇄 直後 急落하였던 材溫은 곧바로 회복되었다.  $E_{5-100}$ 과  $E_{10-100}$  처리원판의 표층의 재온 상승幅은 각각 1.6℃와 0.1℃로서 최초 증기폭쇄처리前 1분 동안에 재온이 상승한 폭과 큰 차이가 없었다. 반면에 내층의 경우 최초 폭쇄후 1분동안  $E_{5-100}$  처리원판은 6.3℃,  $E_{10-100}$  처리원판은 4.5℃씩 재온이 상승하여 처리전의 같은 기간 동안의 재온 상승폭인 2.5℃나 1.8℃보다 훨씬 컸다. 이는 증기폭쇄처리에 의해서 표층에 열기의 새로운 流動通路가 다량 개척됨으로써 폭쇄조의 열기가 보다 용이하게 내층으로 對流 전달될수 있었기 때문인 것으로 생각된다.

$E_{5-100}$  처리나  $E_{10-100}$  처리 모두 표층의 온도가 거의 130℃에 육박하고, 내층의 온도는 100℃를 상당히 上廻한 이후부터는 증기폭쇄처리 직후에 표층과 내층의 온도가 모두 급격하게 떨어졌는데, 표층의 온도 하강폭이 내층의 경우보다 상당히 컸다. 폭쇄직후 폭쇄조내의 열기의 대부분이 외기로 급격하게 방출되기 때문에 폭쇄조와 표층 사이에 순간적으로 약 2atm 정도의 기압경사가 유도됨으로써 표층의 공기 또한 용적이 팽창하면서 폭쇄조측으로 방출되고, 이로 인하여 표층의 온도 또한 폭쇄조와 거의 평형온도인 100℃까지 급격하게 떨어지는 것으로 해석된다. 이번에는 내층의 온도가 표층보다 더 높은 상황이 도래됨으로써 내층의 공기가 표층을 거쳐 폭쇄조측으로 유동함으로써 내층 또한 온도가 떨어지지만 그 폭은 표층의 경우보다는 크지 않게 된다. 다시 復壓이 되어 재온의 연속적인 재상승이 이루어질 때까지 완만한 상승에 이어 완만한 하강이 뒤따르는 양상을 보여주고 있다. 이는 일련의 증기폭쇄처리에 의해서 벽공이 개열되어 열기의 대류유동이 활발해짐으로써 폭쇄조의 온도변화에 보다 민감하게 반응하였기 때문인 것으로 생각된다. 또한 폭쇄 직후에 발생한 공기의 급격한 대량이동의 餘震으로 인하여 상당한 난류가 형성되고 있는 것으로 추정된다.

$E_{5-100}$  처리나  $E_{10-100}$  처리 모두 마지막 증기폭쇄처리후 더 이상 加熱수증기가 공급되지 않았음에도 불구하고, 내층의 온도가 증기폭쇄처리 직후 급강하하였다가 약 3~4

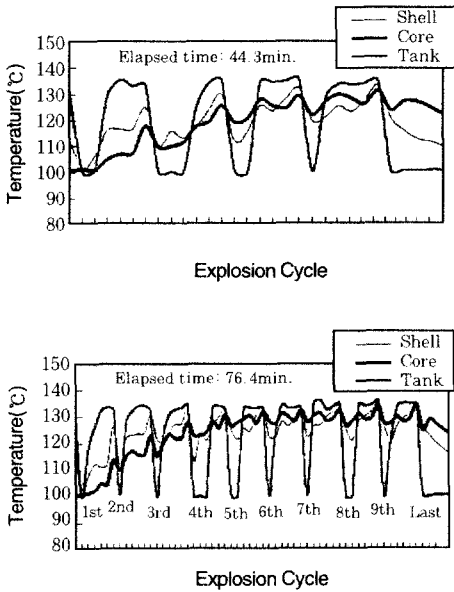


Fig. 4. The change of explosion temperatures of shell and core of the tree disk and air in the autoclave during explosion for E<sub>5-100</sub> (above) and E<sub>10-100</sub> (below).

℃정도 다시 상승한후 서서히 떨어지는 양상을 나타내고 있다. 이것은 폭쇄직후 폭쇄조나 표층의 열기가 모두 外氣쪽으로만 방출되는 것이 아니고, 일부가 원판의 內側으로도 유입되고 있다는 해석을 가능케한다. 즉, 표층으로부터 내층을 향해 유입되는 열기가 약간의 시간이 경과한 후 내층에 도달하면 폭쇄직후 하강했던 온도가 다시 상승하는 것으로 생각된다.

### 3. 3 증기폭쇄처리 원판의 투과성

Fig. 5는 각 증기폭쇄처리 원판을 0.5% Direct Sky Blue 수용액에 침적 처리한 후 용액의 침투에 의해서 착색된 접선단면의 내부모습을 화상처리한 사진이다.

E<sub>1-100</sub>처리의 경우 착색면적율이 41.5%로서 무처리제와 비교하여 볼 때 증기폭쇄처리에 의하여 투과성이 개선된 모습을 전혀 찾아볼 수 없다. 반면에 E<sub>1-134</sub>처리의 경우 증기폭쇄처리 회수가 E<sub>1-100</sub>처리와 마찬가지로 1회 입에도 불구하고 착색면적율이 75.8%로서 5회 증기폭쇄처리한 E<sub>5-100</sub>처리의 59.9%보다 훨씬 컸고, 10회 증기폭쇄처리한 E<sub>10-100</sub>처리와 거의 같은 수준에 이를 정도로 투과성 개선효과가 우수하였다. 이를 비추어 볼 때 單位처리당 투과성 개선 효과는 최초의 증기폭쇄처리 時期

에 매우 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

E<sub>1-134</sub>처리의 경우 폭쇄조, 표층 및 내층이 모두 134℃에서 온도평형을 이루었을때 최초 폭쇄를 실시하므로써 표층에서는 물론 내층에서도 공기의 급격한 용적팽창과 그에 수반하여 열기의 대량유동이 유도되어 폐쇄벽공들의 개열효과가 우수하였기 때문인 것으로 생각된다. E<sub>1-134</sub>처리의 경우 폭쇄 直後 표층과 내층의 재온이 각각 13.8℃와 13.5℃씩이나 큰 폭으로 급격하게 떨어졌던 반면에 E<sub>5-100</sub>처리나 E<sub>10-100</sub>처리에서는 쏠처리기간을 통해서 이 정도의 재온하강이 발견되지 않았던 점에서 이러한 해석이 가능하다. 따라서 표층과 내층이 모두 폭쇄조와 온도평형(즉, 압력평형)을 이루었을 때를 최초 증기폭쇄처리의 시기로 설정하는 것이 최소의 증기폭쇄처리로 투과성을 크게 개선할 수 있을 뿐 아니라 처리에 소요되는 에너지의 손실을 최소화하는데에도 바람직할 것으로 생각된다.

그러나 E<sub>1-134</sub>처리의 경우 처리에 소요된 시간이 총 52분으로서 E<sub>1-100</sub>처리의 약 26분이나 E<sub>5-100</sub>처리의 약 44분보다 더 길었다. 내층이 아직 표층이나 폭쇄조의 온도에 도달하기 전에 최초의 폭쇄를 실시할 경우 내층의 투과성 개선은 미미할지라도 처리후 재온의 상승속도를 촉진시키는 데 기여하는 효과가 있다. 따라서 표층과 내층이 모두 폭쇄조와 온도평형에 도달하기에 앞서 1차 증기폭쇄처리를 실시하여 처리시간의 단축을 꾀하는 것이 바람직할 것으로 생각한다.

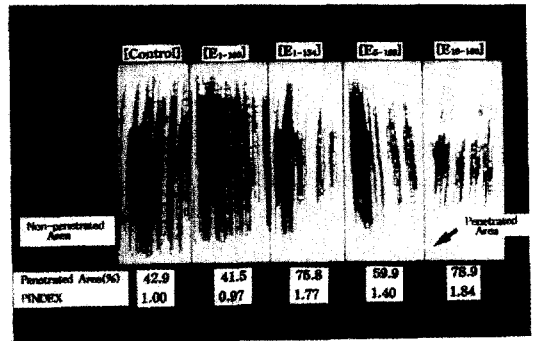


Fig. 5. The view of tangential section after soaking the specimens treated by each explosion cycle in 0.5% direct sky blue solution and percentage of colored area (colored area/total area × 100%) and index of improvement of permeability (PINDEX : the colored area of each exposed specimen/the colored area of control).

한편 최초 폭쇄처리조건이 동일할 경우 착색면적율은  $E_{10-100}$ ,  $E_{5-100}$ ,  $E_{1-100}$ 의 순으로써 처리횟수가 많을수록 투과성개선효과가 우수한 것으로 나타났다. 이의 원인에 대하여 Hayashi 등(1994)은 폭쇄처리가 반복될수록 폐쇄벽공의 開裂數가 증가하기 때문인 것으로 관찰하여 보고한 바 있다.

#### 4. 결 론

섬유방향으로의 두께가 75mm인 일본삼나무(*Cryptomeria japonica*) 원판에 대하여 최초 해압시기를 원판의 內層溫度가 100℃에 도달하였을때와 表層과 內層이 爆碎槽의 온도에서 평형을 이루었을때로 구분하여 폭쇄처리를 실시하였다. 증기폭쇄처리중 원판내의 온도분포를 관측하여 증기폭쇄처리를 전후한 熱氣의 흐름을 추적하고, 최초 폭쇄처리시기와 폭쇄처리의 횟수가 처리원판의 투과성 개선에 미치는 영향을 조사코저 본 연구를 수행하였다.

1. 표층과 내층이 온도평형에 도달하지 않은 상태에서 증기폭쇄처리를 할 경우, 표층의 팽창된 공기가 모두 폭쇄조층으로만 유출되는 것이 아니고, 일부는 상대적으로 기압이 낮은 내층으로 유입되는 것으로 나타났다.
2. 표층과 내층이 모두 증기폭쇄처리 온도에서 평형을 이루었을때 최초의 폭쇄를 실시하는 것이 처리재의 투과성 증진에 더 유리한 것으로 나타났다.
3. 최초 폭쇄처리조건이 동일할 경우 폭쇄처리횟수가 많을수록 투과성증진효과가 우수하였다.
4. 증기폭쇄처리를 종료할때까지 소요된 총 시간은  $E_{1-100}$ ,  $E_{5-100}$ ,  $E_{1-134}$ ,  $E_{10-100}$ 의 순으로 짧았다.
5.  $E_{5-100}$  처리 및  $E_{10-100}$  처리의 경우 최초의 증기폭쇄처리에 의해 材溫의 상승속도가 급격히 빨라지는 것으로 나타나 처리시간의 단축을 위하여 표층과 내층이 모두 폭쇄조와 온도평형에 도달하기에 앞서 1차 증기폭쇄처리를 실시하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

1. Hayashi, K., T. Murakami, Y. Kanagawa, and M. Yasuzima. 1994. Change of dryability under vacuum drying by improvement of permeability of wood. Proceedings of 4th

IUFRO International Drying Conference : 359~365

2. Kanagawa, Y. 1989. Resin distribution in lumber dried by vacuum drying combined with radio-frequency. Proceedings of IUFRO Wood Drying 1989 : 158~164
3. Kanagawa, Y., and K. Hayashi. 1992. Improvement of dryability by local steam explosion for Japanese cedar. Proceedings of 3rd IUFRO Drying Conference : 269~276
4. Kanagawa, Y., et al. 1994. Change of lumber temperature in treating of local steam explosion. *Wood Industry* 49(4) : 166~170
5. Kubler, H. 1974. Drying tree disks simply without defects. *Forest Prod. J.* 27(1) : 33~35
6. Kubler, H. 1975. Study on drying of tree cross sections. *Wood Sci.* 7(3) : 173~181
7. Kubler, H. 1977. Formation of checks in tree stems during heating. *Forest Prod. J.* 27(1) : 41~46
8. Lee, N. H., and H. S. Jung. 1991. Model of drying stress distribution in disks end-wrapped in Korean traditional paper and effects of end-wrappings on prevention of drying defects for vacuum drying of disks. *Mokchae Konghak* 19(1) : 31~63
9. Lee, N. H., and H. S. Jung. 1992. Effects of end-taping with Korean traditional paper on the distribution of vacuum drying stresses in wood disks. Proceedings of 3rd IUFRO Drying Conference : 227~234
10. Lee, N. H., K. Hayashi, and H. S. Jung. 1995. Possibility of drying of walnut disk for wooden arts in radio-frequency/vacuum dryer with mechanical pressure system. Proceedings of Vacuum Drying of Wood '95 : 270~279
11. Liu, F., S. Avramidis, and R. L. Zwick. 1994. Drying thick western hemlock in a laboratory radio-frequency/vacuum dryer with constant and variable electrode voltage. *Forest Prod. J.* 44(6) : 71~75