

GOVP 12001037

634.98  
L 293 2

최 종  
연구보고서

**주요 침엽수 구조용 제재와 특수용재의 가열판 압체식  
진공건조 기술개발**

**Development of Vacuum-Press Drying Technology for  
Structural Softwood Lumbers and Woods for Special Goods**

**제 1 세부과제 : 주요 침엽수 구조용 제재의 가열판 압체식  
진공건조 기술개발**

**Development of Vacuum-Press Drying Technology for  
Structural Softwood Lumbers**

**협동연구과제 : 특수용재의 압체식 고주파 진공건조 기술개발  
Development of Radio-Frequency/ Vacuum plus Mechanical  
Pressure Drying Technology of Woods for Special Goods**

연 구 기 관  
서 울 대 학 교  
농 림 부



# 제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “주요 침엽수 구조용 제재와 특수용재의 가열판 압체식 진공건조 기술개발” 과제 (제 1 세부과제 “주요 침엽수 구조용 제재의 가열판 압체식 진공건조 기술개발”, 협동연구과제 “특수용재의 압체식 고주파 진공건조 기술개발에 관한 연구”)의 최종 보고서로 제출합니다.

1999. 10. 30.

주관연구기관명 : 서울대학교  
총괄연구책임자 : 정희석  
세부과제연구책임자 : 정희석  
연구원 : 이준호  
강옥  
유태경  
박문재  
보조원 : 이응한  
권주용  
이영규  
이주한

협동연구기관명 : 전북대학교  
협동과제연구책임자 : 이남호  
연구원 : 강춘원  
유일영  
보조원 : 정태선  
최준호  
최낙준  
정백호  
이동진

# 요 약 문

## I. 제 목

주요 침엽수 구조용 제재와 특수용제의 가열판 압제식 진공건조 기술개발

## II. 연구개발의 목적 및 중요성

매년 세계의 목재 수요량은 점차 늘고 있으나 목재자원은 점차 감소되고 있다. 우리나라도 목재자원이 부족하여 외재를 다량 도입하고 있으며 목재자급율은 불과 5%정도에 지나지 않는다. 따라서 목재자원의 효율적 이용이 절대적인 명제가 되고 있다. 목제품은 원목에서 시작되는 소재가공 즉, 제재와 건조 등 여러 단계의 가공과정을 거치면서 제작된다. 원목에서 쪼갠 제재는 많은 수분을 함유하고 있기 때문에, 사용장소의 평형함수율까지 정식건조하지 않고 사용하면 사용중에 변색, 할렬, 틀어짐 및 수축 등 여러 가지 건조결함이 유발되기 때문에 목구조물과 목제품의 품질, 수명, 손실 및 안전 등에 큰 영향을 끼칠 수 있다.

그동안 목재는 주로 천연건조와 관행열기 건조법에 의해 건조되어 왔었다. 목재의 천연건조는 건조소요시간이 매우 길고 기건함수율 이하로 건조할 수 없으며 건조결함이 유발될 수 있다. 관행열기건조에 의하면 건조 소요시간은 상당히 단축되나 건조에너지가 다량 소요된다.

특히 두꺼운 기둥재와 같은 구조용재를 천연건조 또는 관행열기건조할 경우 건조속도가 더욱 느려지고 건조결함이 유발되기 쉽기 때문에 건조가 어렵거나 불가할 수 있다.

또한 목공예용 원판의 경우는 쉽게 할렬되기 때문에 건조손실이 크고, 화장용 단판의 경우는 틀어짐과 waviness가 발생하기 때문에 품질이 저하되고 건조손실이 커진다. 이들 소재가 저투과성 수종일수록 건조속도가 더욱 느려지고 건조결

합이 더 생기기 쉽다.

상압에서 관행열기 건조보다 고온을 적용하면 건조속도는 촉진되겠지만 목재강도 저하로 인하여 저항력이 줄어들어 건조결합이 더 발생하기 때문에 건조온도의 적용에도 한계가 따른다. 원판 건조의 경우 구조용재와는 달리 횡단면의 급속한 건조로 인하여 심한 할렬이 발생한다. 따라서 구조용재, 수심기등재, 원판 및 단판 등의 건조결합을 방지하면서 최대의 건조속도를 어떻게 얻느냐가 매우 중요한 과제가 되고 있다.

본 연구에서는 관행열기 건조법과 달리 진공 건조를 실시하면 건조속도는 저온에서도 고온 건조의 효과가 있고, 건조결합은 강도유지 효과에 의해 예방할 수 있기 때문에 최대 안전 건조속도(max. safe drying rate)로 건조할 수 있다. 또한 가열판 압체식 가열에 의해 가열판으로부터 목재에 열전달을 촉진하면서 건조에 소요되는 에너지를 절감하고, 특히 미성숙재가 다량 포함된 수심기등재 등은 가열판 압체에 의해 틀어짐을 막으면서 양질의 건조목을 얻고, 구조용재, 수심기등재, 목공예용 원판과 화장용 단판의 적절한 진공 건조 조건과 진공 건조 특성을 구명코자 실시하였다.

### III. 연구개발 내용 및 범위

본 연구는 주요 침엽수 구조용 제재와 특수용재의 가열판 압체식 진공 건조 기술을 개발하기 위해 아래와 같은 내용과 연구를 수행하였다.

#### 1. 주요 침엽수 구조용 제재의 가열판 압체식 진공 건조 기술개발

공시수종은 소나무, 잣나무, 낙엽송 및 웨스턴 헴록(western hemlock) 등 4수종이고, 제재 두께는 3cm, 5cm, 7cm, 9cm 및 11cm 제재를 대상으로 하여 약한 건조스케줄, 중간 온도 건조스케줄 및 강한 건조스케줄 등 3가지 건조스케줄 적용하여 목재 내부온도, 건조속도, 함수율분포, 수축율, 건조응력, 할렬, 틀어짐 및 강도 등 건조특성 구명과 및 전력 소요에너지를 구명하여 적정 건조스케줄을 개발코자 하였다.

#### 2. 특수용재의 압체식 고주파 진공 건조 기술개발

### 가. 구조용 수심기둥재의 압체식 고주파진공건조기술 개발

공시수종은 소나무, 리기다소나무, 잣나무와 낙엽송 4수종이고, 수심기둥재의 크기는 횡단면 13×13cm이고 재장이 2.1m이며, 무배활재와 배활가공처리재를 저압증기 폭쇄처리하여 잔적방법별로 건조속도, 재면할렬, 재온분포, 배활가공흡의 폭변화, 청변, 건조재의 수지용출 및 전력 소비량 등을 구명하여 수심기둥재의 적정한 압체식 진공건조기술을 개발코저 하였다.

### 나. 목공예용 원판의 압체식 고주파진공건조기술 개발

공시수종은 벗나무, 느티나무, 소나무 및 삼나무 등 4수종이고, 원판의 두께는 5cm와 7.5cm 이며, 원판에 엔드 테이핑(end taping) 처리후 배기카울과 차습판 삽입 여부에 따라 원판의 건조속도, 재온분포, 심재할렬, V형크랙, 변재변색 및 전력소비량을 구명하여 원판의 고주파 진공건조기술을 개발코저 하였다.

### 다. 화장용 단판의 압체식 고주파진공건조기술 개발

공시수종은 호도나무, 참나무, 단풍나무 및 너도밤나무 등 4수종이고, 단판두께는 0.1mm와 0.3mm이다. 이들 화장용 단판에 압체식 고주파 진공건조와 원적외선 건조법을 적용하여 건조속도, 틀어짐, 탄흔, 최종함수율의 변이 및 전력소비량을 구명하여 화장용 단판의 적정한 압체식 고주파 진공건조기술을 개발코저 하였다.

## IV. 연구개발결과 및 활용에 대한 건의

### 1. 주요 침엽수 구조용 제재의 가열판 압체식 진공건조 기술개발

#### 가. 연구개발 결과

1) 목재내부의 온도상승속도는 매우 컸었으며 수종과 제재 두께간에 큰 차이가 없었다. 두께방향의 온도경사는 매우 완만하였다. 목재내부의 완만한 온도경사는 모든 부위의 비교적 균일한 건조에 기여될 수 있다.

2) 강한 건조스케줄일수록 건조속도는 컸었다. 건조곡선은 초기함수율부터 함수율 약20% 수준까지 거의 직선적으로 감소하였고, 그 이후부터는 곡선적으로 감소하였다. 건조속도는 섬유포화점이하에서도 매우 컸었으나 함수율 10%이하부터는 매우 적었다. 제재 두께가 증가함에 따라 건조속도는 곡선적으로 감소하였

으나 열기건조의 경우보다 두께의 영향이 적었다. 소나무와 웨스턴 햄록의 건조속도는 컷었고 잣나무와 낙엽송의 건조속도는 적었다. 건조소요시간은 열기건조의 경우보다 두께 3cm 제재는 2배정도, 그리고 두께 11cm 제재는 4배이상 단축되었다.

3) 건조중 수분경사는 중심층의 함수율이 섬유포화점이하가 될 때부터 급속하게 완만하여졌다. 최종함수율이 15%정도 이하로 건조된 목재의 재장방향과 두께방향의 수분경사는 매우 완만하였다. 수분경사는 건조스케줄의 강약별로는 뚜렷한 차이가 없었다. 수분경사는 제재 두께가 증가함에 따라 증가하였으며 수종간의 수분경사는 소나무와 웨스턴 햄록은 낙엽송과 잣나무보다 완만하였다.

4) 건조중 두께와 폭 수축율은 초기함수율부터 함수율이 감소함에 따라 비례적으로 증가하였다. 건조된 정목의 두께 수축율은 폭 수축율보다 훨씬 컷었으나 판목의 경우는 일정하지 않았다. 가열판 압체식 진공건조 목재의 수축율은 목재의 정상수축을 또는 관행열기건조 목재의 수축율보다 적었다.

5) 건조중 건조응력은 함수율이 감소함에 따라 증가하다가 저함수율 영역에서 거의 일정 또는 감소하는 경향을 나타내고 있었다. 건조목재의 건조응력은 매우 경미하였다. 건조응력은 건조스케줄의 강약과 제재 두께에 따라서는 일정한 경향을 나타내지 않았다.

6) 건조목재의 횡단면과 표면 할렬은 건조스케줄 강약에 따라 일정한 경향을 나타내지 않았다. 횡단면할렬재의 발생율과 할렬의 최대길이는 제재 두께가 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 나타내었다. 표면할렬재의 발생율은 제재 두께에 따라 일정한 경향을 나타내지 않았으나, 최대길이는 증가하는 경향을 나타내었다. 내부할렬은 어떠한 스케줄, 수종과 제재 두께에서도 발생하지 않았다. 할렬과 관련된 침엽수 구조용 제재규격과 품등에 따라 분류하면 1등에 속하였다.

7) 길이굽음, 너비굽음, 측면굽음 및 비틀림 등의 틀어짐은 매우 경미하였다. 틀어짐은 건조스케줄의 강약에 따라 뚜렷한 차이를 나타내지 않았다. 소나무를 제외한 다른 수종의 길이굽음과 측면굽음은 제재 두께가 증가함에 따라 감소하였다. 그러나 비틀림은 제재 두께가 증가함에 따라 증가하였다. 수종간에 잣나무와 웨스턴 햄록은 적었고 소나무는 중간이며 낙엽송은 컷었다. 가열판 압체식 진공건조목재의 틀어짐은 적었고 비교적 우수한 품질을 유지하였다.

8) 진공건조목재의 평형함수율은 천연건조 목재의 것보다 적었지만 종압축강도, 휨강도와 탄성계수의 경우는 약간 증가하였다.

9) 소요 전기에너지는 함수율이 감소할수록 증가하였는데, 건조초기에 급격히 증가한 후 거의 일정하게 유지되다가 다시 증가하는 3단계로 구분되는 패턴을

나타내었다. 소요 전기에너지는 두께 3cm와 5cm간에는 차이가 없었으나, 제재 두께가 증가함에 따라 증가하였다. 가열판 압체식 진공건조에너지는 관행열기 건조와 고주파건조의 것보다 적게 소요되었다. 두께 3cm와 11cm 제재의 m<sup>2</sup>당 전기 에너지 비용은 각각 3,106원과 5,972원으로서 매우 적게 소요되었다.

10) 가열판 압체식 진공건조에서 함수율 15%수준까지 건조할 경우 매우 신속하게 건조할 수 있고, 수분경사, 건조응력, 수축율, 틀어짐 및 건조소요에너지가 적으며 내부할렬이 전혀 발생치 아니하고 기계적성질이 저하되지 않는 등 경제적이고 양질의 구조용재로 건조가공할 수 있었다.

11) 건조속도와 할렬의 발생정도에 따라 수종과 제재 두께별로 적당한 건조스케줄은 소나무의 경우 두께 7cm이하 제재는 강한 스케줄이고 9cm이상 제재는 중간온도와 강한 건조스케줄이다. 잣나무의 경우 5cm이하는 강한 스케줄이고 7cm 이상은 중간온도 스케줄이다. 낙엽송의 경우 모든 두께는 중간온도 스케줄이다. 웨스턴 햄록의 경우 9cm이하는 약한 스케줄이고 11cm는 중간온도 스케줄을 추천할 수 있다(표 2-2-4 참조).

## 나. 활용에 대한 건의

1) 본 연구에서 적용한 3가지 건조스케줄중에서 선택하여 공시수종(소나무, 잣나무, 낙엽송, 웨스턴 햄록)의 공시두께(3, 5, 7, 9 및 11cm) 제재를 가열판 압체식 진공건조하는데 적용할 수 있다.

2) 상기 공시두께 이외의 목재일지라도 두께 3~11cm 범위에 속하는 제재는 본 건조스케줄을 약간 수정하여 적용할 수 있다.

3) 상기 공시수종 이외의 침엽수종일지라도 건조스케줄을 약간 수정하여 적용할 수 있다.

4) 침엽수 구조용재 이외 가구, 내장재 등 각종 공작용재에도 건조스케줄을 약간 수정하여 적용할 수 있다.

5) 침엽수 구조용재와 공작용재의 두께가 두꺼운 목재일수록 가열판 압체식 진공건조의 효과는 더욱 커진다.

6) 본 건조기술은 목조건축(고궁, 고가옥과 고사찰 등의 보수와 복원 포함)에 사용하는 큰 구조용재의 인공건조에 유용하게 활용할 수 있다.

7) 속성수재, 미성숙재(소경재 포함), 생장이상재, 불규칙 목리를 가진 틀어지기 쉬운 목재는 가열판 압체식 진공건조에 의해 틀어짐을 예방할 수 있다.



8) 참나무와 같이 건조곤란수종의 가열판 압착식 진공건조에 의해 건조속진과 에너지 절감효과가 기대된다.

## 2. 특수용재의 압착식고주파진공건조기술 개발

### 가. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

#### 1) 구조용 수심기둥재의 압착식고주파진공건조기술 개발

국산 주요 침엽수종 11×11cm 수심재의 압착고주파진공건조는 건조시간 단축과 재면할렬, 청변 및 수지삼출 예방 등의 측면에서 매우 유리하였다. 특히 투과성이 불량하고 생재함수율이 높은 수종의 경우 저압증기폭쇄처리는 고주파진공건조성을 개선시키는데 크게 기여할 것으로 분석되었으며, 이상의 결과들은 현재 사회적 문제가 되고 있는 우리나라 전통고건축용 기둥재의 건조가공기술 개발에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 전망된다.

본 연구를 통하여 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

E<sub>1-100</sub>처리나 E<sub>1-134</sub>처리 모두 재온하강 폭이 배할재가 무배할재보다 더 큰 것으로 나타나, 배할가공면은 폭쇄직후 급격하게 팽창된 공기의 방출구로써의 역할을 기대할 수 있을 것으로 생각된다.

생재에서 건축용재의 이용함수율 수준까지 고주파진공건조되는데 소요된 시간은 66~138시간으로 관행열기건조나 천연건조에 관한 다른 연구보고와 비교하여 매우 짧았다.

낙엽송재의 경우 무배할재나 배할재 모두 저압증기폭쇄처리에 의한 건조속도 증진효과는 함수율 30%이상의 범위에서 뚜렷하였으며, 건조말기에는 그 효과가 크지 않는 것으로 나타났다. 그러나 소나무, 리기다소나무, 잣나무 등에서는 저압증기폭쇄처리에 의한 건조속도 증진효과는 미미하였다.

재면할렬은 배할가공처리에 의해 효과적으로 예방될 수 있었으나, 저압증기폭쇄처리나 연속압착 등은 거의 영향하지 않는 것으로 나타났다.

배할가공 흠의 확장은 연속압착에 의해 상당히 억제될 수 있었으며, 특히 연속압착에 의한 배할가공 흠 확장억제 효과는 수직잔적과 폭쇄처리재에서 더욱 효과적이었다.

수종, 재종, 폭쇄처리조건 등에 관계없이 고주파진공건조재의 촉진폭로시험

사이클에서의 수지용출은 없었다.

고주파진공건조중의 청변은 잣나무 무처리제에서 경미하게 발생하였을뿐 나머지의 경우에는 전혀 발생하지 않았다.

## 2) 목공예용 圖板의 압착식고주파진공건조기술 개발

소나무, 삼나무, 벗나무, 느티나무의 두께 5cm와 7.5cm 원판을 대상으로 압착고주파진공건조 특성을 조사한 결과 건조시간 단축은 물론 심재할렬, 변재할렬, V형크랙 등의 예방효과도 탁월하여 무손상의 원판을 대량으로 얻을 수 있는 것으로 평가되었다.

본 개발기술은 소경재나 만곡재, 가지 등 국산저급원목을 부가가치가 높은 목공예용재료 활용할 수 있는 전기를 마련한 것으로 판단되고, 특히 문화관광사업에 대한 사회적 관심이 고조됨에 따라 본 기술은 앞으로도 더욱 발전시켜 나가야할 것으로 생각된다.

본 연구를 통하여 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

초기함수율에서 목공예용재의 이용함수율 수준까지 건조되는데 대부분 1주일 정도의 시간이 소요되었다.

건조초기의 건조속도는 횡단면의 엔드레이핑처리 보다는 배기망의 삽입여부에 의해서 더 큰 영향을 받았다.

심재할렬의 경우 두께 7.5cm 소나무 원판에서 다소 심하게 발생하였을뿐 나머지의 경우에는 매우 경미하였다.

배기망잔적은 심재할렬이나 변재할렬 또는 V형크랙의 발생과는 직접적인 관련이 없었다.

변재할렬의 발생정도는 매우 경미하였으나 벗나무와 느티나무의 두께 7.5cm 원판에서는 매우 심하였으며, 이의 예방을 위해서는 심·변재 부위가 비슷한 시기에 섬유포화점에 도달케 하는 것이 매우 중요하다.

V형크랙의 발생정도는 경미한 편이었으며, 건조중 압착력을 해제하지 않을 경우 V형크랙에 의한 손상은 더욱 경감될 수 있을 것이다.

변색은 두께 7.5cm 삼나무 원판에서만 경미하게 발생하였을 뿐 나머지 경우에는 전혀 발생하지 않았다.

### 3) 화장용 單板의 압체식고주파진공건조기술 개발

현재 우리나라에서 널리 이용되고 있는 주요 화장용 단판에 대한 압체고주파진공건조는 건조시간단축과 이할, 끝말림, 탄흔 등의 예방에 매우 효과적이었고, 특히 단판 수백매를 다발묶음하여 건조하므로써 작업성을 크게 개선할 수 있었다. 본 연구를 통하여 개발된 기술은 고급 수종들 단판의 품질과 수율향상 및 건조생산비 절감에 활용하여 가구공작재나 악기용재, 건축내장재의 품질향상과 생산비 절감에 기여할 수 있을 것으로 판단되며, 특히 최근 급신장세를 보이고 있는 마루판 생산기술에도 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

본 연구를 통하여 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

생재에서 이용함수율수준까지 단판 3276매를 압체고주파진공건조하는데 소요된 시간은 65시간이었고, 단판의 최종함수율은 단판의 두께나 목리보다는 초기함수율의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

압체고주파진공건조의 경우 두께12cm의 동일 다발묶음내에서는 잔적층간에 최종함수율의 변이가 거의 없었다.

압체고주파진공건조가 원적외선건조보다 이할예방에 더욱 효과적이었다.

압체고주파진공건조의 경우 이할은 단판의 두께보다는 목리의 영향이 큰 것으로 나타나, 무늬결단판에서 경미하게 발생하였다.

압체고주파진공건조의 경우 끝말림은 전혀 발생하지 않아 원적외선건조보다 유리하였고, 원적외선건조에서 끝말림은 곱은결단판 보다는 무늬결단판에서, 얇은 단판보다는 두꺼운 단판에서 더 심하게 발생하였다.

압체고주파진공건조와 원적외선건조 모두 건조중 탄흔은 전혀 발생하지 않았다.

## SUMMARY

### I. PROJECT TITLE

Development of vacuum-press drying technology for structural softwood lumbers and woods for special goods.

### II. RESEARCH NECESSITIES AND OBJECTIVES

Demands of wood worldwide have been increasing and timber resources have decreased every year. A lot of timber has been imported from foreign countries because of the shortage of timber resources, and rate of self-supply is only 5 percent of total timber supply in Korea. Efficient utilization of timber is a very important matter.

Various wooden items are manufactured through drying and machining processes from logs. Green lumbers must be formally dried to equilibrium moisture content(MC) for the improvement of qualities, lengthening of service life, decrease of wastes and safety of wooden structures because green lumber could develop drying defects such as staining, checking and shrinking in use. Wood is usually air dried or kiln dried. The air drying of wood required the long drying time, and could not dry below air dried MC and drying defects occur. However, drying time is shortened and energy consumption increase with the kiln drying of wood. Large structural lumber such as pillars are difficult to dry because of the occurrence of severe drying defects and the very slow drying of timber. Also it is susceptible to check for tree disks, easy warping and waviness for thin decorative veneers. These materials have a high drying degrade and poor quality in the case of low permeable wood. Elevated temperature under atmospheric pressure speeds up the drying rate, and drying defects occur easily due to the reduction of wood strength. Severe end checks occur rapid end drying of tree disks at elevated temperatures. Therefore, the method for reducing

drying defects and increasing drying rates for large structural lumber, pillars with pith, tree disk and decorative veneer is a very important matter. Vacuum drying is essentially high-temperature drying in the effects of the drying rate without the dangers of the defects at low temperatures. The vacuum-press drying method in this study expects the maximum safe drying rate and to save energy consumption in that the heat is transferred to the lumber by direct contact with hot-water heated plates.

The objective of this research was to elucidate proper drying temperature and vacuum-press drying characteristics of structural softwood lumber, pillars with pith, tree disks for wood crafts, and decorative hardwood veneer, especially the reduction of warping for pillars with high proportions of juvenile wood.

### III. CONTENTS AND SCOPE OF THE RESEARCH

This project was the development of vacuum-press drying technology for structural softwood lumber and material for special uses as follows :

#### 1. Development of Vacuum-Press Drying Technology for Structural Softwood Lumbers

The species used were red pine(*Pinus densiflora*), white pine(*Pinus koraiensis*), larch(*Larix leptolepis*) and western hemlock(*Tsuga heterophylla*). The lumber thicknesses were 3, 5, 7, 9 and 11cm. Vacuum-press drying characteristics such as internal temperature, drying rate, MC distribution, shrinkage, drying stress, check, warp and strengths, electrical energy consumption and costs for 3, 5, 7, 9 and 11cm thick lumber were determined by applying mild, intermediate temperature and severe drying schedules. The proper drying schedules were recommended based on the drying rates and amounts of checks.

## **2. Development of Radio-Frequency/Vacuum plus Mechanical Pressure Drying Technology of Woods for Special Goods**

### **1) Development of Radio-Frequency/Vacuum plus Mechanical Pressure Drying Technology of Pillars for Heavy Frame**

- Study on a technology of low pressure steam explosion treatment in order to shorten drying times and to prevent from surface checking
- Development of a stacking technology to reduce an expansion in width of longitudinal kerf
- Investigation of effects of radio-frequency/vacuum plus mechanical pressure drying on prevention of drying defects
- Analysis of a required electrical powers during drying

### **2) Development of Radio-Frequency/Vacuum plus Mechanical Pressure Drying Technology of Log Cross Sections for Wooden Artifacts**

- Investigation of shortening drying times and preventing from heart checks by radio-frequency/vacuum plus mechanical pressure drying process
- Study on a control of shrinkage and a prevention of V-shaped cracks by mechanical pressure during radio-frequency/vacuum drying process
- Development of a stacking technology of log cross sections in order to prevent from V-shaped cracks
- Analysis of a required electrical powers during drying

### **3) Development of Radio-Frequency/Vacuum plus Mechanical Pressure Drying Technology of Decorative Veneers**

- Development of a technology of shortening drying times and prevention of burning in a radio-frequency/vacuum plus mechanical pressure dryer
- Development of a technology of reducing end waviness through mechanical pressure during radio-frequency/vacuum drying
- Investigation of optimum thickness of each stacking layer within a bundle of veneers in a radio-frequency/vacuum dryer

- Study on the characteristics of infrared radiation drying of veneers
- Analysis of a required electrical powers during drying

#### **IV. RESULTS AND SUGGESTION**

##### **1. Development of Vacuum-Press Drying Technology for Structural Softwood Lumbers**

###### **A. Results**

- 1) The internal temperature of the wood rose rapidly to a set point and did not show an apparent difference between species and lumber thicknesses. The small temperature gradients in the thickness direction will contribute to the even drying of lumber.
- 2) A high drying rate was revealed by a severe drying schedule. Drying curves are close to linear from the initial MC to about the MC of 20 percent, and then curvilinear below the MC of 20 percent, and decreased curvilinearly as the lumber thickness increased. Effects of lumber thickness on the drying rate were smaller than those of conventional kiln drying. Red pine and western hemlock lumber exhibited a high drying rate and a low drying rate was exhibited for white pine and larch lumber. Drying times of 3cm and 11cm thick lumber were about 2 and 4 times faster than conventional kiln drying, respectively.
- 3) Lumber exhibited steep moisture gradient above fiber saturation point(FSP) and gentle moisture gradient in the thickness and longitudinal direction below about the MC of 15 percent. Moisture gradient did not exhibit an apparent difference between drying schedules, and increased as lumber thickness increased. Moisture gradients of red pine and western hemlock lumber were more gentle than those of white pine and larch lumber.

- 4) Thickness and width shrinkage proportionally increased as MC decreased from the initial MC. Thickness shrinkage of dried quartersawn lumber was higher than the width shrinkage, but there were remarkable differences between thickness and width shrinkage for flatsawn lumber. The shrinkage of vacuum-press dried lumber was smaller than that of kiln dried lumber and normal shrinkage.
- 5) Drying stresses increased as MC decreased during the early stage of drying, and then remained nearly constant or decreased in the region of a lower MC. Dried lumber exhibited very slight drying stress. The drying stress of dried lumber did not exhibit a constant tendency between drying schedules and lumber thicknesses.
- 6) The amount of end and surface check of dried lumber did not show a constant tendency between drying schedules and lumber thicknesses. The percentage of lumber that was end checked and maximum length of end check increased as lumber thickness increased. Maximum length of surface check increased as lumber thickness increased but there was no relationship between the lumber thicknesses for the percentage of lumber that were surface checked. No internal checking appeared in all the species, thicknesses and drying schedules. The quality of dried lumber belonged to common I by classification based on the amount of checks using the existing standards.
- 7) The vacuum-press drying process resulted in small values in bow, cup, crook and twist. Warps were not significantly affected by drying schedules. Bow and crook of white pine, larch and western hemlock lumber decreased and twist increased as lumber thickness increased. The amount of warps were small for white pine and western hemlock, moderate for red pine and large for larch lumber. The degree of warpage in this study was generally within tolerable levels.
- 8) Equilibrium MCs of vacuum-press dried lumber were lower than those of



air dried lumber. Compressive strength parallel to the grain, MOR and MOE of vacuum-press dried lumber were higher than those of air dried lumber.

- 9) The electric energy consumption increased as MC decreased. The electric energy consumption curves were split into three sections : Energy consumption increased rapidly above about FSP, remained almost constant, and then increased rapidly. Electric energy consumption increased as lumber thickness increased. Energy consumption of vacuum-press drying was lower than kiln drying or the high frequency vacuum drying process. The costs of electric energy per cubic meter of lumber were 3,106 won for 3cm thick lumber and 5,972 won for 11cm thick lumber.
- 10) The vacuum-press drying process could rapidly dry and save a lot of energy up to 15 percent of the MC from the initial MC, vacuum-press dried lumber has a gentle moisture gradient, very slight drying stress, low shrinkage and warps, no internal checking and good mechanical properties. Therefore, structural softwood lumbers can be economically dried by vacuum-press drying.
- 11) A proper drying schedule can be recommended a severe schedule for below 7cm thick lumber and intermediate temperature or severe schedule for above 9cm thick lumber of red pine. Also, recommended is a severe schedule for below 5cm thick and intermediate temperature schedule for above 7cm thick lumber in the case of white pine, intermediate temperature schedules for all thickness of lumber in case of larch, and a mild schedule for below 9cm thick lumber and intermediate temperature schedule for 11cm thick lumber in case of western hemlock(Table 2-2-4).

## **B. Suggestion for application**

- 1) Four species and five lumber thicknesses can be applied by one of the drying schedules.
- 2) Lumber ranged from 3cm to 11cm thickness except the nominal thickness mentioned can be applied by modifying the drying schedule.
- 3) Other softwood lumber excluding species used can be applied by modifying the drying schedule.
- 4) Cabinet lumber for furniture, interior wood-work and the like can be applied by modifying the drying schedule.
- 5) The vacuum-press drying process had high drying efficiency for thicker building and cabinet lumber.
- 6) The vacuum-press drying process can be applied for very large structural material such as those used in the repair and reconstruction of old palaces, temples and traditional houses.
- 7) Lumber prone to warp such as fast grown species, juvenile wood including small diameter log, reaction wood and wood with irregular grain can be dried kept flat and straight by the vacuum-press drying process.

## **2. Development of Radio-Frequency/Vacuum plus Mechanical Pressure Drying Technology of Woods for Special Goods**

- 1) Development of Radio-Frequency/Vacuum plus Mechanical Pressure Drying Technology of Pillars for Heavy Frame

A radio-frequency/vacuum plus mechanical pressure(RF/VP) drying process was significantly effective in shortening drying times and preventing surface checks, blue stain, and resin exudation during accelerated cycling test when pillars with 11 cm by 11 cm in cross section of some domestic softwoods were dried. A RF/VP drying ability of the

softwoods with poor permeability and high initial moisture content could be significantly improved by the low pressure steam explosion treatment (explosion treatment).

We suggest that the RF/VP drying technology is very useful for a drying process of pillars and posts for heavy frames in Korean traditional wooden construction.

The important results are as follows:

It can be seen that a longitudinal kerf play a role as effluent of the inflated airs just after explosion because the drops of wood temperature was larger in pillars with longitudinal kerf than pillars without longitudinal kerf.

RF/VP drying times from green to in-use moisture content of outdoor building materials were 66 hours to 138 hours, and they were very short compared to residence times in a conventional kiln and air drying times of other reports about drying of pillars.

Drying rates of larch pillars with and without longitudinal kerf were prominently accelerated in above 30% moisture content by explosion treatment, while there was little effect during late drying stage. Drying rates of pillars of pine, pitch pine, and Korean red pine were not accelerated by the explosion treatments.

Surface checks were significantly prevented by longitudinal kerfing, but an explosion treatment and continuous press showed no relations to controlling surface checks.

Expansion in width of longitudinal kerf was very slight in continuous press, and it was dramatically reduced by continuous press when the exploded pillars were stacked for mechanical pressure to apply perpendicularly to longitudinal kerf.

Resin exudation did not observed during accelerating cycle test, and blue stain during drying was very slight for Korean red pine.

## 2) Development of Radio-Frequency/Vacuum plus Mechanical Pressure Drying Technology of Log Cross Sections for Wooden Artifacts

Log cross sections without any drying defects such as heart checks, sapwood checks, V-shaped cracks could be produced with high yield, and drying times were shortened by a radio-frequency/vacuum plus mechanical pressure(RF/VP) drying process.

We suggest that the results is so useful for utilizing domestic low quality logs such as small logs in diameter, crooked logs, and large limbs as materials for wooden artifacts with high added value, and the technology should be developed continuously.

The significant results are as follows:

RF/VP drying times from green to in-use moisture content of wooden artifacts were approximately a week for most of drying tests.

Drying rates during early drying stage were more largely effected by ventialed caul than by end-taping treatment.

All log cross sections except 7.5 cm-thick pine log cross sections were so slightly defected by heart checks.

Inserting ventialed cauls between log cross sections and electrode plate had not direct effect on preventions of heart checks, sapwood checks, and V-shaped cracks.

## 3) Development of Radio-Frequency/Vacuum plus Mechanical Pressure Drying Technology of Decorative Veneers

All decorative veneers used in the drying test could be dried within very short time without checking, end waving, and burning in a RF/VP kiln. Stacking veneers in a RF/VP kiln was very easy because they were close-piled with a bundle which is consist of several hundred sheets of veneer.

The results will contribute to improve a veneer quality, to increase an yield of sound veneer, and to curtail drying cost.

The significant results about RF/VP drying of decorative veneer are as follows:

About 3300 sheets of veneer were dried within sixty five hours from green to in-use moisture content of decorative veneer by RF/VP drying process. Final moisture contents of veneer were more largely related to initial moisture content than related to veneer thickness and veneer grain.

There was little variation in final moisture contents among stacking layers within a bundle after RF/VP drying.

Checking was occurred more seriously in the flat sliced veneer than in the quarter sliced veneer, and veneer thickness has little effect on formation of checking during RF/VP drying.

End waving was never observed in RF/VP-dried veneers, and RF/VP drying was more effective in controlling end waving than infrared radiation drying. In an infrared radiation drying process end waving was more severe in flat sliced veneers and thick veneers.

No burning was observed in all tested veneers during a RF/VP drying process and an infrared radiation drying process.

## CONTENTS

SUMMARY

CONTENTS

CHAPTER 1. INTRODUCTION

CHAPTER 2. DEVELOPMENT OF VACUUM-PRESS DRYING TECHNOLOGY OF MAJOR  
STRUCTURAL SOFTWOOD LUMBERS

Section 1. Introduction

Section 2. Materials and Methods

2.1. Lumbers used

2.2. Vacuum-press kiln, loading and drying schedules

2.3. Vacuum-press drying characteristics

Section 3. Results and Discussions

3.1. Changes of internal temperature

3.2. Drying curves, final moisture content, drying time and  
drying rate

3.3 Moisture content distribution during vacuum-press drying and  
dried lumber

3.4. Thickness and width shrinkage during vacuum-press drying  
and dried lumber

3.5. Drying stress during vacuum-press drying and dried lumber

3.6. Checks

3.7. Warp

3.8. Equilibrium moisture content and mechanical properties of  
dried lumber

3.9. Energy consumption and costs

Section 4. Conclusion

References

CHAPTER 3. DEVELOPMENT OF RADIO-FREQUENCY/VACUUM PLUS MECHANICAL PRESSURE  
DRYING TECHNOLOGY OF PILLARS FOR HEAVY FRAME

Section 1. Introduction

Section 2. Materials and Procedures

2.1. Materials

2.2. Low pressure steam explosion equipment and treating  
conditions

2.3. Radio-frequency/vacuum plus mechanical pressure drying  
test

2.3.1. Radio-frequency/vacuum plus mechanical pressure dryer

2.3.2. Stacking

2.3.3. Intermittent- and continuous pressing test

2.3.4. Radio-frequency/vacuum plus mechanical pressure drying  
test

2.4. Drying curves and drying rates

2.5. Surface checks and expansion in width of longitudinal kerf

Section 3. Results and Discussions

3.1. Changes of wood temperatures before and after explosion  
treatment

3.2. Drying times and drying rates

3.3. Surface checks

3.4. Expansion in width of longitudinal kerf

3.5. Resin exudation and blue stain

Section 4. Conclusions

References

CHAPTER 4. DEVELOPMENT OF RADIO-FREQUENCY/VACUUM PLUS MECHANICAL PRESSURE  
DRYING TECHNOLOGY OF LOG CROSS SECTIONS FOR WOODEN  
ARTIFACTS

Section 1. Introduction

Section 2. Materials and Procedures

2.1. Log cross sections

2.2. Radio-frequency/vacuum plus mechanical pressure drying  
test

- 2.2.1. Radio-frequency/vacuum plus mechanical pressure dryer
- 2.2.2. Stacking
- 2.2.3. Drying schedule and measurement of moisture content during drying
- 2.2.4. Measurements of drying defects and consumed electrical powers

### Section 3. Results and Discussions

- 3.1. Drying times and drying rates
- 3.2. Heart checks and sapwood checks
- 3.3. V-shaped cracks and stains
- 3.4. Consumed electrical powers

### Section 4. Conclusions

### References

## CHAPTER 5. DEVELOPMENT OF RADIO-FREQUENCY/VACUUM PLUS MECHANICAL PRESSURE DRYING TECHNOLOGY OF DECORATIVE VENEERS

### Section 1. Introduction

### Section 2. Materials and Procedures

- 2.1. Infrared radiation drying test
  - 2.1.1. Preparation of decorative veneers
  - 2.1.2. Infrared radiation dryer and drying schedule
  - 2.1.3. Final moisture contents and drying rates
  - 2.1.4. Checks, end waviness and burning
- 2.2. Radio-frequency/vacuum plus mechanical pressure drying test
  - 2.2.1. Preparation of decorative veneers
  - 2.2.2. Radio-frequency/vacuum plus mechanical pressure dryer and drying schedule
  - 2.2.3. Final moisture contents and drying rates
  - 2.2.4. Checks, end waviness and burning
  - 2.2.5. Required electrical power

### Section 3. Results and Discussions

- 3.1. Infrared radiation drying test



- 3.1.1. Drying rates and required electrical powers
- 3.1.2. Checks and end waviness
- 3.1.3. Burning
- 3.2. Radio-frequency/vacuum plus mechanical pressure drying test
  - 3.2.1. Drying rates
  - 3.2.2. Checks and end waviness
  - 3.2.3. Burning
  - 3.2.4. Required electrical powers

Section 4. Conclusions

References

## CHAPTER 6. SYNTHESIS

Section 1. Development of Vacuum-Press Drying Technology of Major Structural Softwood Lumbers

Section 2. Development of Radio-Frequency/Vacuum plus Mechanical Pressure Drying Technology of Woods for Special Goods

- 2.1. Development of radio-frequency/vacuum plus mechanical pressure drying technology of pillars for heavy frame
- 2.2. Development of radio-frequency/vacuum plus mechanical pressure drying technology of log cross sections of wooden artifacts
- 2.3. Development of radio-frequency/vacuum plus mechanical pressure drying technology of decorative veneers

## 목 차

제출문

요약문

- I. 제목
- II. 연구개발의 목적 및 중요성
- III. 연구개발 내용 및 범위
- IV. 연결개발 결과 및 활용에 관한 건의

SUMMARY

CONTENTS

목 차

제 1 장 서 론

제 2 장 주요 침엽수 구조용 제재의 가열판 압체식 진공건조 기술개발

제1절 서 설

제2절 재료 및 방법

1. 공시재료
2. 진공건조장치, 잔적과 건조스케줄
3. 진공건조 특성

제3절 결과 및 고찰

1. 목재 내부온도변화
2. 건조곡선, 최종함수율, 건조시간 및 건조속도
3. 건조중과 건조목재의 함수율 분포
4. 건조중과 건조목재의 두께와 폭 수축율
5. 건조중과 건조목재의 건조응력
6. 할 렐
7. 틀어짐
8. 건조목재의 평형함수율과 기계적성질
9. 건조소요에너지와 비용

제4절 결 론

## 참고문헌

### 제3장 구조용수심기등재의 압체식고주파진공건조기술 개발

#### 제1절 서 설

#### 제2절 재료 및 방법

1. 공시재료
2. 저압증기폭쇄처리 장치와 처리조건
3. 고주파진공건조시험
  - 가. 고주파진공건조기
  - 나. 잔적
  - 다. 간헐압체시험과 연속압체시험
  - 라. 고주파진공건조 시험
4. 건조곡선과 건조속도
5. 재면할렬과 배합가공흡 확장율

#### 제3절 결과 및 고찰

1. 저압증기폭쇄처리 전후의 재온변화
2. 건조시간과 건조속도
3. 재면할렬
4. 배합가공흡 확장율
5. 수지용출과 청변

#### 제4절 결론

#### 참고문헌

### 제4장 목공예용 圓板의 압체식고주파진공건조 기술 개발

#### 제1절 서설

#### 제2절 재료 및 방법

1. 공시원판
2. 고주파진공건조시험

- 가. 고주파진공건조기
- 나. 잔적
- 다. 건조조건과 건조중합수율 측정
- 라. 건조결합과 소비전력량 조사

### 제3절 결과 및 고찰

- 1. 건조시간과 건조속도
- 2. 심재합렬과 변재합렬
- 3. V형크랙과 변색
- 4. 소요전력량

### 제4절 결론

### 참고문헌

## 제5장 화장용 單板의 압체식고주파진공건조기술 개발

### 제1절 서설

### 제2절 재료 및 방법

- 1. 원적외선건조 시험
  - 가. 화장용 단판의 준비
  - 나. 원적외선건조장치와 건조조건
  - 다. 최종합수율과 건조속도
  - 라. 이합, 끝말림 및 탄흔
  - 마. 소요전력량
- 2. 압체고주파진공건조 시험
  - 가. 화장용 단판의 준비
  - 나. 고주파진공건조장치와 건조조건
  - 다. 최종합수율과 건조속도
  - 라. 이합, 끝말림 및 탄흔
  - 마. 소요전력량

### 제3절 결과 및 고찰

1. 원적외선건조 시험
  - 가. 건조속도와 소요전력량
  - 나. 이할과 끝말림량
  - 다. 탄흔
2. 압체고주파진공건조 시험
  - 가. 건조속도
  - 나. 이할과 끝말림량
  - 다. 탄흔
  - 라. 소요전력량

제4절 결론

참고문헌

## 제6장 종합결론

제1절 주요 침엽수 구조용 제재의 가열판 압체식 진공건조 기술개발

제2절 특수용재의 압체식고주파진공건조기술 개발 종합

1. 구조용 수심기등재의 압체식고주파진공건조기술 개발
2. 목공예용 圓板의 압체식고주파진공건조기술 개발
3. 화장용 單板의 압체식고주파진공건조기술 개발

## 제 1 장 서 론

우리나라는 목재자원이 부족하여 다량의 외재를 도입하여 충당하고 있으며 목재자급율은 불과 5%에 지나지 않는다. 목재자원의 효율적인 가공과 이용은 매우 중요한 과제이다. 목제품은 원목으로부터 제재와 건조 등 여러 단계의 가공과정을 거치면서 제작된다. 목재는 사용장소의 평형함수율까지 정식 건조하지 않고 사용하면 사용중에 변색, 할렬, 틀어짐 및 수축 등 여러 가지 건조결함이 유발되기 때문에 목구조물과 목제품의 품질, 수명, 손실 및 안전 등에 치명적인 영향을 끼칠 수 있다. 그러나 목재건조는 건조소요시간이 길고 건조결함이 유발되며 건조에너지가 다량 소비되는 가공공정이면서도 필수적인 가공공정이다.

큰 기둥재와 같은 구조용재를 천연건조 또는 관행열기건조할 경우 건조속도가 더욱 느려지고 건조결함이 한층 더 유발되기 쉽기 때문에 건조가 어렵거나 불가능할 수 있다. 또한 크지 않은 목재일지라도 저투과성 수종일수록 건조속도가 더욱 느려지고 큰 수분경사가 발생하기 때문에 건조결함이 생기기 쉽다. 건조속도는 촉진코저 보다 고온을 적용하게 되면 목재강도 저하로 인하여 저항력이 약화되어 건조결함이 쉽게 발생하기 때문에 고온의 적용에도 한계가 따른다.

원판 건조의 경우 구조용재 경우와는 달리 오히려 급속한 횡단면 건조로 인하여 심한 할렬이 발생한다. 또한 얇은 단판의 경우 건조중 단판이 틀어지고 waviness을 유발하기 때문에 단판품질과 건조수율이 크게 저하된다.

따라서 구조용재, 수심기둥재, 원판 및 단판 등의 건조에서 건조결함을 방지하면서 최대의 건조속도를 어떻게 얻느냐가 가장 중요한 과제이다. 본 연구에서는 침엽수 구조용재, 구조용 수심기둥재, 목공예용 원판 및 화장용 단판의 건조속도를 촉진하고, 아울러 건조결함을 줄이면서 건조재의 품질과 건조수율을 제고하고, 건조에너지를 절감하기 위한 적절한 진공건조기술을 개발코저 하였다. 목재를 진공건조할 경우 관행열기건조법과는 달리 저온 적용에 의해서도 건조속도는 고온건조의 효과가 있고 건조결함을 막으면서 최대 안전건조속도(max. safe drying rate)를 얻을 수 있다. 또한 가열판 압체식 진공건조법에 의하면

가열판으로부터 목재에 열전달이 촉진되고 건조소요에너지를 절감할 수 있다. 특히 어떠한 목재든지 치수가 불안정한 목재는 상하 가열판의 압체작용에 의해 틀어짐을 막으면서 양질의 건조목과 높은 건조수율을 기대할 수 있다. 따라서 일반 구조용재, 수심기동재, 목공예용 원판과 화장용 단판의 적절한 진공건조조건과 압체식 진공건조 특성이 구명된다면 이들 소재의 건조효율을 크게 제고할 수 있을 것이다.

침엽수 구조용 제재의 경우 소나무, 잣나무, 낙영송, 에스턴 햄록 등 4 침엽수 수종을 공시하여 두께 3cm, 5cm, 7cm, 9cm 및 11cm 제재품을 건조온도가 상이한 3가지 종류의 건조스케줄, 즉 약한 건조스케줄, 중간온도 건조스케줄과 강한 건조스케줄을 적용하여 가열판 압체식 진공건조에서 내부온도, 건조속도, 함수율 분포, 수축율, 할렬과 틀어짐 등의 건조결합 및 건조소요에너지 등 건조특성을 구명코져 하였다.

구조용 수심기동재의 경우 소나무, 리기다소나무, 잣나무와 낙엽송 등 4 침엽수 수종을 공시하여 가열판 압체식 고주파 진공건조에서 건조속도 촉진과 재면 할렬 예방을 위한 저압증기 폭쇄 처리효과, 배활가공흡 터짐 억제를 위한 잔적의 효과 및 전력소비량 등을 알기 위해 압체식 고주파 진공건조 특성을 구명코져 하였다.

목공예용 원판의 경우 벗나무와 느티나무, 소나무와 삼나무 등 4수종의 원판의 가열판 압체식 고주파 진공건조에서 엔드페이핑 처리효과, 배기카울과 차습판 삽입 여부에 따른 잔적 효과 및 전력소비량 등 압체식 고주파 진공건조 특성을 구명코져 하였다.

화장용 단판의 경우 호도나무, 참나무, 단풍나무, 너도밤나무 등 활엽수 4수종의 두께 0.1mm와 0.3mm 단판의 압체식 고주파 진공건조와 원적외선 진공건조에서 건조속도, 탄화, 수축과 틀어짐 등의 건조특성과 에너지 비용 등을 알고져 실시하였다.

이상과 같이 일반 구조용재, 수심기동재, 공예용 원판 및 화장용 단판 용재의 가열판 압체식 진공건조에서 건조시간 단축, 건조재 품질과 수율향상 및 에너지 절감을 할 수 있는 진공건조기술을 개발코져 실시하였다.

## 제 2 장 주요 침엽수 구조용 제재의 가열판 압체식 진공건조 기술개발

세 부 과 제 연 구 책 임 자 : 정 희 석(서울대학교)  
연 구 원 : 이 준 호(서울대학교)  
          유 태 경(서울대학교)  
          강  옥(서울대학교)  
          박 문 재(서울대학교)  
보  조  원 : 이 용 한(서울대학교)  
          이 영 규(서울대학교)  
          이 주 한(서울대학교)  
          권 주 용(서울대학교)



## 제1절. 서 설

한국전쟁 이후 산림 파괴로 인하여 우리의 주택, 조경, 위락 및 운동시설 등은 주로 콘크리트, 인조목재 및 플라스틱 등이 널리 사용되어 왔으나, 근년에 이르러 인구증가와 생활수준의 향상으로 인하여 이러한 시설의 수요가 늘어나고 있으며, 콘크리트보다 환경친화적인 목재의 사용이 더 선호되고 있다. 특히 전원주택의 경우 목조주택의 수요가 급격히 늘어남에 따라 구조용재 수요도 매년 증가하고 있다.

그 동안 구조용재의 공급은 주로 고가의 건조목재를 수입하여 사용하거나, 생재 또는 비정식 건조목재를 사용하여 왔었다. 생재와 비정식 건조목재를 사용한 목구조물은 구성 부재의 수축에 의한 틈새 발생, 강도저하, 할렬, 틀어짐과 변색 등의 하자가 발생하기 때문에 목구조물의 외관이 크게 훼손되고 수명이 단축되며 주거 안전에도 위험이 따르는 등 우리의 생명과 안전뿐만 아니라 경제적 손실이 초래된다.

그래서, 정부에서는 침엽수 구조용 재재의 건조에 따른 함수율 규격제정의 필요성에 따라 관련규격이 산림청 고시 제1995-27호(95. 11. 8)로 고시되었고, 1996년 5월부터 건조목재를 사용하도록 규정하고 있다.

국내 구조용재의 가공과 생산자는 구조용재의 효율적인 건조방법에 대해서 큰 관심을 갖게 되었을뿐만 아니라, 아울러 소비자도 구조용재의 품질과 가격에 깊은 관심을 갖고 있다. 두꺼운 구조용재일수록 건조소요시간이 매우 길어지고 건조결함이 유발되기 쉽기 때문에 천연건조 또는 관행열기건조에 의해서는 건조 가능한 구조용재는 두께의 제약을 받게 된다. 구조용재를 관행열기 건조에 의해 건조소요일수를 줄일려고 건조온도를 상승시키면 목재내부에 급격한 수분경사의 발생에 의해 건조응력이 증대되기 때문에 터지거나 틀어지기 때문에 건조목재의 품질이 떨어지고 건조수율이 저하되는 등 목재건조에서 애로사항이 되고 있다.

따라서, 구조용재의 건조시간을 단축하고 건조결함도 최소화할 수 있는 건조법이 개발되어야 한다. 이와 같은 효율적인 건조 방법면에서 보면 구조용재의 진공건조를 적용한다면 소기의 성과가 기대될 수 있다. 진공건조는 관행열기건조법과는 달리 저온에서도 고온건조의 효과를 기대할 수 있다. 즉 진공건조를

실시하면 관행열기 건조온도보다 저온을 적용하여도 물의 비점 저하로 인하여 건조속도가 촉진되면서 건조시간이 단축되고 동시에 건조소요에너지가 절약될뿐만 아니라, 목재온도가 저온이기 때문에 할렬과 틀어짐에 대한 목재의 저항성이 유지되면서 건조결함을 최소화할 수 있다. 그래서 진공건조는 다른 건조법보다 난건조목재라든가 큰 구조용재 건조에 적절한 건조방법으로 고려되어 왔다.

진공건조법 중에서도 가열방법에 따라 건조 메카니즘과 건조 특성이 상이한데, 가열판 압착식 진공건조법은 대류식 가열과 고주파 가열 등 다른 가열방법과는 달리 가열판이 목재와 접촉 압착함으로서 목재로 열전달이 촉진되고 상하 가열판의 압착작용에 의해 목재의 틀어짐을 막아주는 효과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 우리의 주요 침엽수종인 소나무(*Pinus densiflora* S. et Z.), 잣나무(*Pinus koraiensis* S. et Z.)와 낙엽송(*Larix leptolepis* Gordon)의 간벌재와 주벌 생산재, 그리고 다량 수입되고 있는 웨스턴 햄록(*Tsuga heterophylla*)을 구조용재로서 이용도를 제고하기 위하여 이들 수종의 5가지 제재 두께(3cm, 5cm, 7cm, 9cm 및 11cm)와 온도가 상이한 3가지 건조스케줄(약한 스케줄, 중간온도 스케줄 및 강한 스케줄)을 적용하여 효과적인 건조조건을 알고자 실시하였다. 이들 제재의 적절한 진공건조스케줄이 개발된다면 현재까지 저이용도의 국산재를 고부가가치의 구조용재로서 이용이 가능하게 되고, 국산재가 구조용재로서 가공이용하게 됨에 따라 수입하고 있는 고가의 구조용 건조목을 대체할 수 있기 때문에 국내 산림 생산과 목재가공산업의 활성화를 기하고 임업소득을 제고할 수 있으며 수입대체 효과를 기대할 수 있다.

## 제2절. 재료 및 방법

### 1. 공시재료

공시 수종은 구조용재로서 사용할 수 있는 주요 침엽수 4수종(소나무, 잣나무, 낙엽송 및 웨스턴 헴록)이고, 제재는 정목(楹目), 판목(板目) 및 추정(追楹) 등을 혼합하여 사용하였다. 제재와 건조에 관련되는 제재의 평균 연륜폭, 심재율, 생재비중과 생재 함수율을 조사하였다. 모든 제재의 크기는 폭 10~12 cm, 길이 0.9m와 1.8m이고, 두께 3, 5, 7, 9 및 11cm 등이다.

초기함수율은 시험재(sample board)의 횡단면에서 45cm 떨어진 부위에서 함수율 시험편을 절취하여 전건법에 의해 구하였고, 이 함수율을 건조 스케줄 적용에 사용하였다. 생재비중은 생재 부피와 전건 무게를 측정하여 구하였다. 적용한 건조스케줄별 제재 두께, 실제 두께, 평균연륜폭, 심재율, 초기함수율과 생재비중은 다음 표 2-2-1~2-2-3과 같이, 중간온도와 강·약 건조스케줄에 사용한 수종별 5두께 제재의 평균연륜폭 범위는 각각 소나무 2.7~4.6mm, 잣나무 2.6~6.2mm, 낙엽송 3.8~7.7mm, 웨스턴 헴록 1.2~7.7mm이고, 심재율의 범위는 소나무 13~96%, 잣나무 42~100%, 웨스턴 헴록 47~100%이며, 생재비중의 범위는 소나무 0.42~0.48, 잣나무 0.38~0.44, 낙엽송 0.45~0.58, 웨스턴 헴록 0.32~0.40이고, 초기함수율의 범위는 소나무 23.7~100.8%, 잣나무 34.7~89.6%, 낙엽송 26.9~45.0%, 웨스턴 헴록 23.4~79.7%로서 수종간뿐만 아니라 동일수종에서도 제재 두께에 따라 상당한 변이가 있었다.

사용한 제재의 종 수량은 4수종×5제재 두께×3건조 스케줄×15본(9:장재+6:단재) = 900본을 공시하였다.

### 2. 진공건조 장치, 잔적과 건조스케줄

#### 가. 진공건조장치

진공건조 장치는 가열판 압축식 진공건조 장치(Vacuum Wood Press Dryer, 모델 SOL)를 사용하고, 열판 압력 10톤/㎡와 진공도 160mmHg 수준으로 연속 감압시켰다. 진공도 160mmHg일 때 물의 비점은 60℃정도이다(Perré 등, 1995). 사용한 진공건조기는 그림 2-2-1과 같다.

#### 나. 잔 적

두께 3cm와 5cm 제재인 경우 모든 수종의 제재는 각각 동일 두께별로 구분하

여 모든 수종을 잔적하였다. 두께 7cm와 9cm 제재인 경우는 각각 초기함수율이 유사한 것끼리 분류하여 두께별로 소나무와 잣나무를 함께 잔적하였고 낙엽송과 웨스턴 햄목을 혼합 잔적하였다. 또한 제재 두께 11cm인 경우도 초기함수율이 유사한 것끼리 분류하여 잣나무와 낙엽송을 혼합 잔적하였고 소나무와 웨스턴 햄목을 혼합 잔적하였다. 모든 제재는 재간 간격이 1cm가 되도록 잔적한 후 잔적의 각층 상하에 알미늄 가열판을 배치하였다.

#### 다. 건조스케줄

4수종의 제재 두께별로 가열온도 고저에 따라 3가지 종류의 건조 스케줄, 즉 약한 건조스케줄(mild drying schedule), 중간온도 스케줄(medium temperature drying schedule)과 강한 건조스케줄(severe drying schedule)을 적용하였다(표 2-2-4). 건조온도는 열수의 온도를 기준으로 하였으며 두께가 비교적 얇은 3cm와 5cm 제재는 동일한 건조스케줄을 적용하였고, 두께 7cm 제재부터 증가함에 따라 온도는 점차 낮게 적용하였고, 목재의 함수율이 감소 단계에 따라 건조온도를 점차적으로 상승시켰다.

중간온도 스케줄을 적용한 이후 약한 스케줄과 강한 스케줄을 적용하였다. 약한 진공건조 스케줄은 중간온도 스케줄보다 모든 함수율단계에서 온도를 2℃ 낮게 적용하였고, 강한 스케줄은 중간온도 스케줄보다 모든 함수율 단계에서 2℃ 높게 조정된 스케줄을 적용하였다. 건조 스케줄은 초기함수율을 측정할 때 설정된 최습시험재의 함수율을 기준으로 하여 조작하였다.

### 3. 진공건조 특성

#### 가. 내부온도

중간온도 건조스케줄을 적용하여 건조 중 제재의 내부온도는 K타입 열전쌍 센서(장경 1.8mm)와 자동 온도 기록계(정밀도±0.1℃)를 이용하여 제재 내부의 3부위에서 연속적으로 측정하였다. 제재 두께방향에서 3부위는 가열판과 목재의 접촉부위, 제재 두께(t)의  $\left(\frac{t}{6}\right)$ 인 표층과  $\left(\frac{t}{2}\right)$ 인 중심층에서 측정하였다. 제재의 재장과 폭의 중앙에서 두께방향으로 구멍의 지름 2.0mm 드릴(drill)로 예비 천공한 후 센서를 삽입하고 삽입부위의 틈새는 실리콘으로 봉입하였다.

#### 나. 건조곡선, 최종함수율, 건조시간 및 건조속도

건조재의 최종 함수율이 15% 이하로 도달할 때까지 일정한 시간간격, 즉 얇

은 구조용제는 1일간격, 그리고 두꺼운 구조용제는 2일 간격으로 무게를 측정하였고, 최종함수율은 건조 종료시에 건조목재의 횡단면에서 50cm 떨어진 부위에서 함수율 시험편을 절취하여 전건법에 의해 구하였다. 최종함수율을 이용하여 모든 제재의 전건무게를 구하였다. 전건무게와 건조중 무게를 이용하여 건조시간별 함수율을 계산하여 건조곡선을 작성하고 회귀식을 구하였다. 건조속도는 초기함수율과 최종함수율 차이를 전건조기간으로 나눈 총평균 건조속도와 또한 함수율 30%에서 15%범위에서 계산하였다. 또한 제재 두께와 건조속도의 관계를 구하였다.

#### 다. 함수율 분포

##### 1) 건조중 함수율 분포

4수종의 두께 3cm, 5cm 및 7cm 제재의 중간온도 건조스케줄 적용시에 건조시간별 두께방향의 방향의 함수율 분포를 측정하였다. 함수율 분포 시험편은 건조시간이 경과함에 따라 횡단면에서 점차적으로 30cm씩 간격을 두면서 채취하였다.

##### 2) 건조목재의 함수율 분포

건조목재의 재장과 두께 방향의 함수율분포는 시험재의 횡단면에서 10cm, 40cm와 90cm되는 재장에서 두께방향으로 각각 표층, 중간층과 중심층의 함수율시험편을 채취하여 전건법으로 구하였다.

#### 라. 두께와 폭 수축율, 건조응력, 할렬, 찌그러짐 및 굽음

4수종의 두께 5cm와 7cm 제재의 중간온도 건조스케줄을 적용한 건조목재는 함수율 감소와 두께 와 폭 수축률의 상관관계를 구하였다. 모든 건조스케줄을 적용하였을 때 정목과 판목의 건조 전과 후의 두께와 폭을 측정하여 두께 수축율과 폭 수축율을 구하였다. 그리고 섬유포화점(30%)에서 함수율 12%까지 두께와 폭 수축율을 계산하여 구하였다.

#### 마. 건조응력

4수종의 두께 5cm와 7cm 제재의 건조응력의 시험편은 건조시간이 경과함에 따라 횡단면에서 점차적으로 30cm간격을 두면서 채취하여 건조중 건조응력의 변화를 함수율과 관련하여 구하였다. 4수종과 5두께 건조목재의 잔류응력 크기는 건조가 종료된 즉시 프롱의 양적 변위를 그림 2-2-2와 같이 측정하여 구하였다(Simpson, 1987).

## 바. 할 렬

4수종 5두께 제재의 3종류 건조스케줄 적용별 건조목재의 횡단면, 표면 및 내부에 발생하는 할렬의 크기와 수량 등을 조사하여 할렬재 발생비율과 할렬재에서 나타난 최대 할렬길이의 평균치를 구하였다. 그리고 제재 두께와 횡단면 할렬, 제재 두께와 표면할렬의 관계를 나타내었다.

## 사. 찌그러짐

4수종과 5두께 제재의 건조목재 찌그러짐의 정도는 횡단면의 사권상 단면 변형을 측정하여 나타내었다.

## 아. 틀어짐

4수종의 5두께 제재의 길이굽음, 너비굽음, 측면굽음, 비틀림의 최대높이를 측정하고, 최대높이와 재장의 비율을 구하였다. 그리고 4수종의 제재 두께별 틀어짐의 관계를 나타내었다.

## 자. 건조목재의 평형함수율, 기건비중 및 기계적성질

중간온도 건조스케줄을 적용한 건조목재를 온도 20℃와 상대습도 65%(EMC 12% 중간)에 평형에 도달하였을 때까지 조습처리를 한후 평형함수율을 측정하였고, 기건비중은 진공 건조재의 기건 부피와 전건무게를 측정하여 구하였다.

압축강도, 휨강도와 탄성계수를 한국공업규격(KS) 시험 방법에 의해 측정하여 상호비교하였다.

## 4. 건조소요에너지

적산전력계를 사용하여 3종류 건조스케줄별로 진공건조시에 소요되는 전기에너지를 건조시간 간격별로 측정하여 함수율 감소와 소요되는 전기에너지의 상관관계를 나타내고, 전건조과정에서 증발수분당 소요되는 전기에너지를 산출하였다. 목재 건조에 소요되는 전기 에너지의 비용은 다음조건에서 증발수분당 소요되는 전기에너지(kWh/kg)는 관계식에서 구하였고(그림 2-3-29), 목재의 평균 생재비중은 0.45이고, 재적은 5m<sup>3</sup>를, 초기함수율 50%에서 최종함수율 15%까지 조건에서 건조하고, 전기요금은 한국전력에서 적용하고 있는 산업용(병) 선택(II) 요금의 고압B에서 중간부하의 봄·가을철 전력량 요금 42,60원/kWh을 적용하여 계산하였다.

표 2-2-1 . 약한 건조스케줄 적용한 제재의 기초적 성질.

Table 2-2-1. Fundamental properties of lumber for mild drying schedule.

수종	기준 두께 (cm)	실제 두께 (cm)	평균 연륜폭 (mm)	심재율 (%)	생재비중	초기 함수율 (%)
소나무	3	3.1	4.4 (1.0)	76 (22.6)	0.43 (0.03)	78.5 (19.9)
	5	5.1	3.6 (0.9)	29 (32.1)	0.44 (0.05)	23.7 (8.3)
	7	6.8	3.6 (1.2)	8 (22.3)	0.48 (0.08)	28.1 (13.0)
	9	9.1	3.6 (1.2)	77 (24.5)	0.45 (0.04)	93.4 (29.9)
	11	11.2	3.7 (1.3)	50 (33.0)	0.47 (0.05)	62.3 (23.8)
잣나무	3	3.0	2.9 (1.1)	93 (9.77)	0.40 (0.04)	89.6 (39.3)
	5	5.2	6.2 (1.4)	95 (7.22)	0.38 (0.01)	37.8 (12.6)
	7	7.3	5.9 (0.8)	100 (4.4)	0.39 (0.01)	43.9 (7.8)
	9	9.1	4.8 (1.6)	81 (29.0)	0.40 (0.01)	34.7 (5.8)
	11	11.3	5.5 (1.4)	85 (14.7)	0.44 (0.03)	34.1 (6.2)
낙엽송	3	3.0	4.1 (1.0)	99 (2.3)	0.47 (0.03)	32.7 (2.9)
	5	5.1	4.2 (0.8)	96 (5.6)	0.53 (0.04)	26.9 (18.2)
	7	6.9	3.8 (0.9)	90 (12.2)	0.58 (0.05)	29.6 (19.2)
	9	9.3	4.7 (0.8)	91 (3.3)	0.46 (0.04)	38.4 (8.8)
	11	11.4	5.0 (0.6)	87 (4.0)	0.49 (0.04)	40.1 (7.0)
웨스턴 햄록	3	3.1	1.7 (1.7)	47 (36.3)	0.37 (0.02)	52.7 (20.7)
	5	5.0	6.2 (1.1)	100 (0.0)	0.36 (0.02)	21.0 (2.2)
	7	7.1	7.7 (1.4)	100 (1.4)	0.36 (0.02)	23.4 (17.3)
	9	9.2	4.6 (0.7)	60 (15.3)	0.34 (0.02)	70.9 (14.7)
	11	11.1	4.9 (0.8)	86 (25.2)	0.32 (0.01)	56.1 (16.7)

( ) : 표준편차임

표 2-2-2 . 중간 온도스케줄 적용한 제재의 기초적 성질.

Table 2-2-2. Fundamental properties of lumber for medium temperature drying schedule.

수종	기준 두께 (cm)	실제 두께 (cm)	평균 연륜폭 (mm)	심재율 (%)	생재비중	초기 함수율 (%)
소나무	3	3.0	2.9 (0.8)	13 (30.4)	0.45 (0.02)	100.8 (20.1)
	5	5.1	3.7 (1.3)	72 (35.9)	0.45 (0.03)	59.4 (24.4)
	7	7.0	4.6 (1.2)	24 (35.0)	0.43 (0.02)	97.5 (33.6)
	9	9.2	4.6 (0.8)	70 (6.4)	0.48 (0.08)	59.0 (19.9)
	11	11.6	4.6 (0.9)	76 (9.4)	0.42 (0.03)	65.3 (14.2)
잣나무	3	3.0	4.3 (0.8)	55 (42.7)	0.44 (0.02)	51.6 (23.8)
	5	5.2	3.5 (0.8)	91 (13.7)	0.43 (0.02)	70.4 (25.0)
	7	7.0	4.7 (1.1)	65 (29.0)	0.42 (0.03)	44.0 (16.1)
	9	9.1	3.4 (1.2)	42 (18.4)	0.39 (0.01)	75.2 (28.0)
	11	11.3	3.8 (1.6)	42 (17.2)	0.43 (0.04)	58.9 (21.9)
낙엽송	3	3.0	5.2 (1.7)	94 (14.6)	0.54 (0.05)	35.3 (5.7)
	5	5.1	5.9 (1.9)	94 (11.3)	0.49 (0.03)	32.2 (4.3)
	7	7.2	4.8 (0.7)	90 (11.3)	0.46 (0.05)	39.2 (5.9)
	9	9.1	4.4 (1.3)	100 (5.2)	0.58 (0.05)	42.5 (6.4)
	11	11.5	4.0 (1.0)	95 (5.7)	0.45 (0.05)	35.3 (6.3)
웨스턴 햄록	3	3.0	3.8 (3.5)	58 (41.7)	0.38 (0.03)	66.4 (17.4)
	5	5.1	4.6 (2.3)	100 (0.0)	0.40 (0.03)	74.1 (18.4)
	7	6.9	4.9 (0.9)	71 (21.2)	0.39 (0.02)	76.9 (15.5)
	9	9.2	4.8 (1.8)	78 (18.2)	0.36 (0.02)	28.1 (15.5)
	11	11.3	3.8 (2.3)	73 (24.6)	0.40 (0.03)	31.6 (7.3)

( ) : 표준편차임



표 2-2-3 . 강한 건조스케줄 적용한 제재의 기초적 성질.

Table 2-2-3. Fundamental properties of lumber for severe drying schedule.

수종	기준 두께 (cm)	실제 두께 (cm)	평균 연륜폭 (mm)	심재율 (%)	생재비중	초기 함수율 (%)
소나무	3	3.0	3.5 (1.6)	96 (8.9)	0.44 (0.03)	49.5 (24.4)
	5	4.8	3.4 (1.8)	21 (27.2)	0.45 (0.03)	57.1 (28.1)
	7	7.0	3.0 (0.8)	40 (46.1)	0.46 (0.04)	65.9 (26.1)
	9	9.2	2.7 (0.6)	33 (48.8)	0.47 (0.06)	30.1 (23.9)
	11	11.0	3.1 (1.6)	64 (24.5)	0.43 (0.04)	49.0 (17.0)
잣나무	3	3.0	2.6 (1.0)	68 (42.9)	0.42 (0.03)	42.1 (10.5)
	5	4.8	2.8 (1.6)	80 (20.0)	0.40 (0.02)	52.4 (12.2)
	7	7.0	4.7 (2.4)	94 (8.0)	0.41 (0.02)	60.6 (15.6)
	9	9.1	4.3 (2.8)	61 (46.4)	0.40 (0.01)	53.1 (9.6)
	11	11.0	3.2 (2.4)	80 (24.2)	0.43 (0.02)	44.5 (12.4)
낙엽송	3	2.9	7.7 (2.2)	93 (9.2)	0.51 (0.04)	30.6 (3.1)
	5	4.8	5.3 (1.9)	93 (9.6)	0.52 (0.04)	45.0 (7.0)
	7	7.0	4.7 (1.2)	93 (9.9)	0.52 (0.05)	43.8 (6.5)
	9	9.1	5.4 (1.7)	89 (10.0)	0.48 (0.04)	39.3 (14.5)
	11	11.0	5.1 (1.5)	94 (8.3)	0.49 (0.05)	38.2 (7.2)
웨스턴 햄록	3	2.9	1.8 (0.7)	97 (10.3)	0.38 (0.02)	79.7 (33.2)
	5	5.1	1.2 (0.3)	82 (22.5)	0.38 (0.03)	63.2 (24.6)
	7	6.2	1.2 (0.4)	100 (0.0)	0.37 (0.02)	42.3 (10.6)
	9	9.1	2.4 (0.4)	100 (0.0)	0.35 (0.02)	56.5 (20.4)
	11	12.0	1.2 (0.3)	100 (0.0)	0.36 (0.02)	28.0 (2.8)

( ) : 표준편차임

표 2-2-4. 조절 함수율 기준 가열판 압제식 건조스케줄.

Table 2-2-4. Vacuum-press drying schedules for the controlling moisture content.

제재두께 (cm)	함수율(%) 단계	건조온도(℃)		
		약한 스케줄	중간온도 스케줄	강한 스케줄
3과 5	>40	73	75	77
	40~30	78	80	82
	30~20	83	85	87
	<20	88	90	92
7	>40	71	73	75
	40~30	76	78	80
	30~20	81	83	85
	<20	86	88	90
9	>40	69	71	73
	40~30	71	73	75
	30~20	81	83	85
	<20	86	88	90
11	>40	69	71	73
	40~30	69	71	73
	30~20	79	81	83
	<20	84	86	88

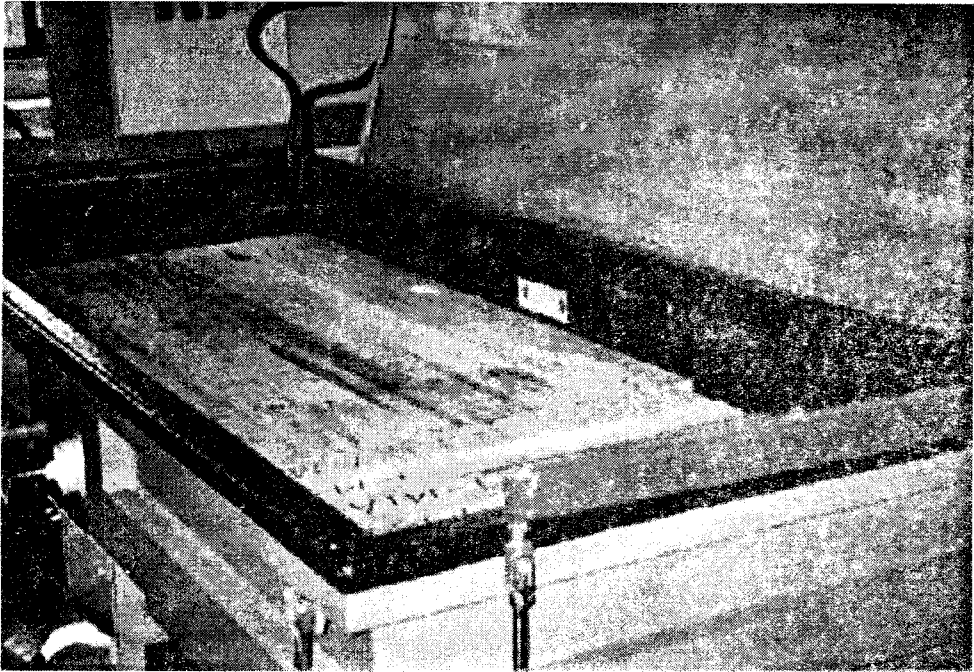


그림 2-2-1. 가열판 압체식 잔공건조장치와 잔적

Figure 2-2-1. Vacuum-press drying kiln and lumber stacking.

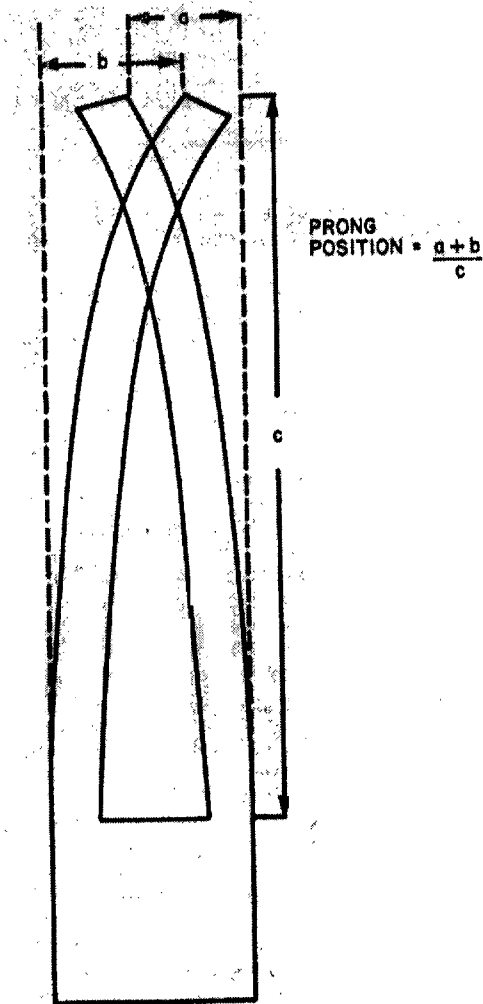


그림 2-2-2. 건조응력 시험에서 프롱의 양적 변위 측정법.

Figure 2-2-2. Method of quantifying displacement of prongs in drying stress test.

## 제3절 결과 및 고찰

### 1. 목재 내부온도 변화

중간온도 스케줄을 적용한 진공건조중 가열판의 온도 변화와 소나무 등 4수종의 5두께(3, 5, 7, 9 및 11cm) 제재의 목재 내부온도 변화는 그림 2-3-1~2-3-5와 같다.

가열판이 초기 설정온도(set point)에 도달하는 시간은 잔적된 제재 두께에 따라 상이하였다. 초기 설정온도에 도달하는 시간은 두께가 3, 5 및 7cm 제재의 경우 1.5~2.5시간 범위로서 제재 두께간에 뚜렷한 차이가 없었지만, 두께 9cm 제재의 경우는 약3시간, 그리고 11cm 제재의 경우는 4시간정도 소요되었는 바, 두꺼운 제재일수록 초기 설정온도에 도달하는데 소요되는 시간은 느렸다. 이와 같은 결과는 제재의 두께가 증가함에 따라 목질과 함유수분 가열에 소요되는 에너지가 비례하여 증가되는 것과 관련된다고 생각된다.

두께 3cm 제재의 경우 가열판이 초기 설정온도 75℃에 도달하였을 때 수종별로 제재의 표층과 중심층의 온도는 소나무 74.2와 72.0℃, 잣나무는 73.8와 72.2℃, 낙엽송은 75.1와 74.6℃, 그리고 웨스턴 헴록은 74.6와 73.8℃를 나타내었는 바, 표층온도는 가열판 온도와 같거나 약간 낮았으며 표층과 중심층간의 온도경사도 매우 완만하였다.

두께 5cm 제재의 경우 가열판이 초기온도 75℃에 도달하였을 때 수종별로 제재의 표층과 중심층 온도는 소나무 74.0와 68.1℃, 잣나무 71.8와 65.7℃, 낙엽송 75.0와 72.1℃, 그리고 웨스턴 헴록 74.2와 73.0℃로서, 표층온도는 가열판 온도와 같거나 약간 낮았고, 표층과 중심층간의 온도경사는 매우 완만하였다.

두께 7cm 제재의 경우 가열판이 초기 설정온도 73℃에 도달하였을 때 수종별로 제재의 표층과 중심층 온도는 소나무 58.0와 51.0℃, 잣나무 70.0와 63.0℃, 낙엽송 69.2와 48.0℃, 그리고 웨스턴 헴록 62.9와 33.0℃로서 잣나무를 제외하한 다른 수종의 표층온도는 가열판 온도보다 크게 낮았고, 표층과 중심층간의 온도경사도 매우 컸었다. 그러나 이들 수종은 가열시간이 2.5시간 경과후에 표층온도는 가열판 온도에 접근하였으며, 표층과 중심층간의 온도경사도 완만하여 졌었다.

두께 9cm 제재의 경우 가열판이 초기 설정온도 71℃에 도달하였을 때 수종별로 제재의 표층과 중심층 온도는 소나무 65.0와 64.0℃, 잣나무 70.0와 68.0℃, 낙엽송 63.2와 59.9℃, 그리고 웨스턴 헴록은 62.8와 60.3℃로서 잣나무를 제외하한 다른 수종의 표층온도는 가열판 온도보다 크게 낮았지만, 표층과 중심층간의 온

도경사는 완만하였다.

두께 11cm 제재의 경우 가열판이 초기 설정온도 71℃에 도달하였을 때 수종별 제재의 표층과 중심층 온도는 소나무 63.2와 58.0℃, 잣나무 70.0와 62.0℃, 낙엽송 70.0와 58.0℃, 그리고 웨스턴 헵록은 64.5와 59.0℃로서 잣나무와 낙엽송 표층온도는 소나무와 웨스턴 헵록보다 상당히 높았고 온도경사 컸었다.

가열판의 온도가 초기 설정온도에 도달한 이후 4수종과 5두께의 제재의 내부 온도는 건조시간이 경과함에 따라 점차적으로 상승하였고 표층과 중심층간의 온도경사는 점차적으로 작아졌다. 그리고 내부온도는 전건조기간동안에 고원온도(plateau temperature)를 유지하였다. 고원온도는 목재에 가열된 열량과 목재 수분증발과 제거에 소요되는 열량이 서로 균형을 이룰 때 재온이 거의 일정하게 유지되는 온도이다.

본 연구의 가열판 압체식 진공건조 방법과 가열판이 압체한다는 측면에서 유사성이 있고, 압력만 이루어지는 열판건조(press drying) 또는 고주파 가열 진공건조법 등의 보고내용을 살펴 보면, Hittmeier 등(1968)은 물푸레나무 등 9수종의 두께 0.5인치 보오드를 열판건조중 코아온도(core temperature)는 가열기간중 급속히 상승한 다음 고원온도를 유지하다가 자유수가 제거된 다음부터는 서서히 상승하였다. 고원온도의 존재는 자유수가 있어야만 하고 고원온도의 고저는 수종에 따라 투과성이 다르기 때문에 상이하다고 보고하였다. Wang 등(1975)은 두께 15mm red oak 판재의 열판건조에서 코아의 고원온도의 유지기간은 표층보다 길었고, 내부온도는 내부부위에 따라 매우 큰 차이가 있음을 보고하였다. Simpson 등(1988)은 인공조립한 두께 4인치 loblolly pine 제재의 열판건조에서 코아온도가 고원온도까지 상승하는데 가열판의 가압력이 증가할수록 짧았고, 표면과 중심층간의 온도경사는 매우 컸음을 보고하였다.

Avramidis 등(1994)은 두께와 폭이 9.1cm인 western redcedar 각재를 고주파 진공건조중 재장부위별 코아온도는 건조초기에 급상승하였고, 횡단면쪽에서 재장의 중앙으로 향할수록 더 높았다. 재장의 중앙부의 코아온도는 3~5시간동안 급속히 상승하여 고원온도에 도달한 후 2시간정도 유지되다가 자유수가 제거된 다음 서서히 상승하였다. 재장방향의 온도경사는 매우 컸었고, 함수율이 감소할수록 더욱 커졌음을 보고하였다. Jung 등(1998)은 두께와 폭이 10×10인치 크기의 웨스턴 레드시더 정각재의 고주파 진공건조중 예열시간은 5시간정도 소요되었고 예열된후 재장의 중앙과 두께방향의 코아온도는 서서히 상승하였으며 다른 부위보다 가장 높았으며, 온도경사는 재장방향과 두께방향에서 상당히 크게 나타내었다. 또한 Simpson(1987)은 두께 1인치의 참나무 판재를 담요(blankets) 가열식에 의한 진공과 제습 병용건조중 표면과 코아온도의 상승곡선은 건조 개

시온도의 고저에 따라 변화 패턴이 상이함을 보고하였다.

Anti(1992)은 너도밤나무 등 3수종의 작은 시험재를 마이크로웨이브 건조에서 내부온도의 변화단계에서 목재온도가 약 100℃까지 급속히 상승하는 기간, 100℃에서 거의 일정하게 유지되는 boiling phase 기간, 그리고 섬유포화점 이하에서 온도가 서서히 상승하는 기간으로 구분되는 온도변화 패턴을 보고하였다.

목재 내부온도의 상승속도와 온도경사는 내부 수분의 증발과 이동속도, 수분 경사, 건조응력의 크기 및 건조결함의 발생 등과 밀접한 관계가 있다. 목재 내부온도의 변화는 가열방법과 건조 방법에 따라 차이가 있었다. 본 연구의 내부온도는 앞에 보고된 가열법과 건조방법별 내용보다 예열시간이 짧고 두께방향에서 완만한 온도경사를 나타내고 있음이 상이하였고, 가열판 압착식 진공건조의 내부온도변화는 고유한 패턴을 나타내고 있었다.

본 연구에서 내부온도의 경사가 매우 완만함에 따라 목재 내부 부위별 온도의 차이가 줄어들게 된다. 온도차이가 적으면 모든 내부부위에서 균일한 수분증발과 제거가 가능할 수 있게 되고, 목재 내부부위별 수분이동 속도가 같게 된다. 목재내부에 수분경사가 적어지고 경미한 건조응력이 발생케 된다. 따라서 건조할렬과 틀어짐을 예방할 수 있는 조건을 제공해줄 수 있고 목재 개체간 건조의 균일성과 목재내부 함수율의 변이를 줄여주며 양질의 건조목재를 얻을 수 있는 조건 제공해 주는 것으로 생각된다.

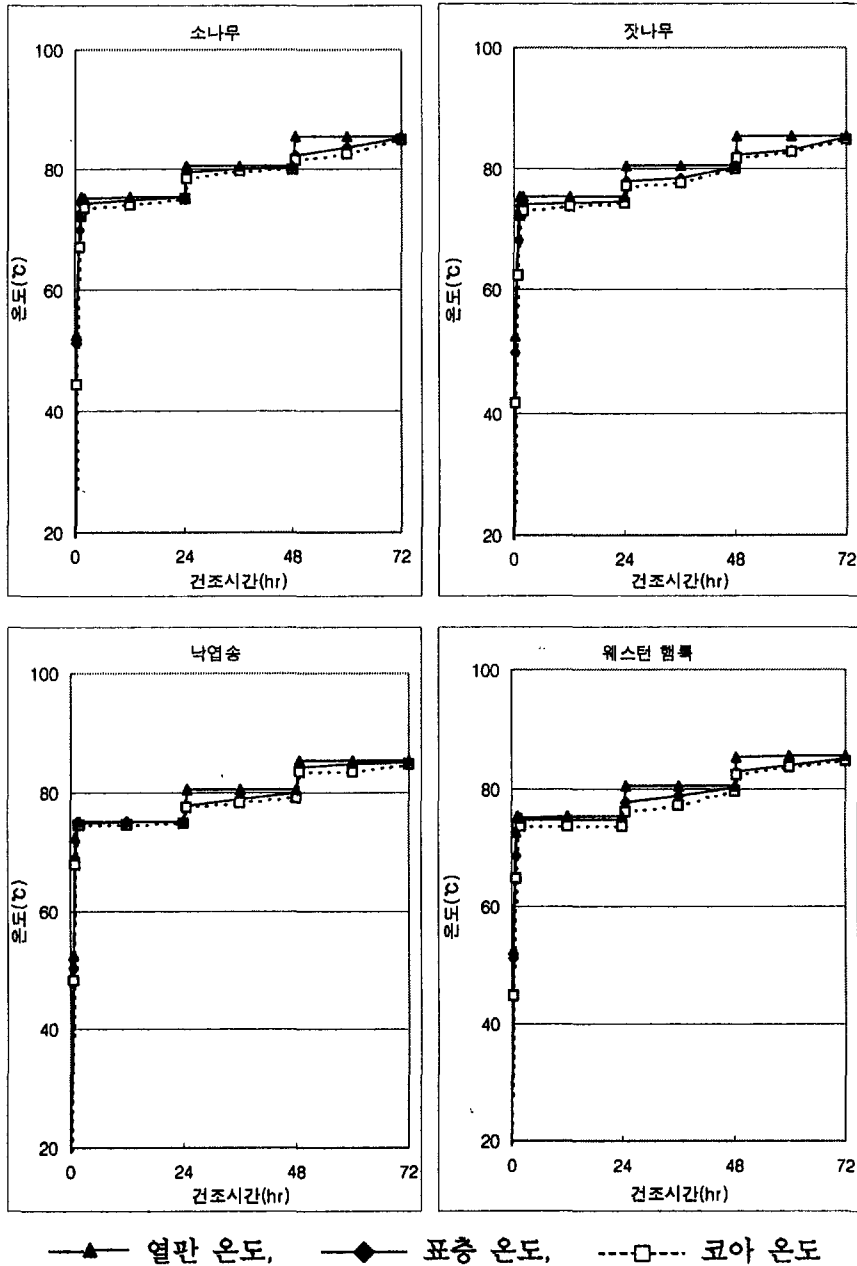
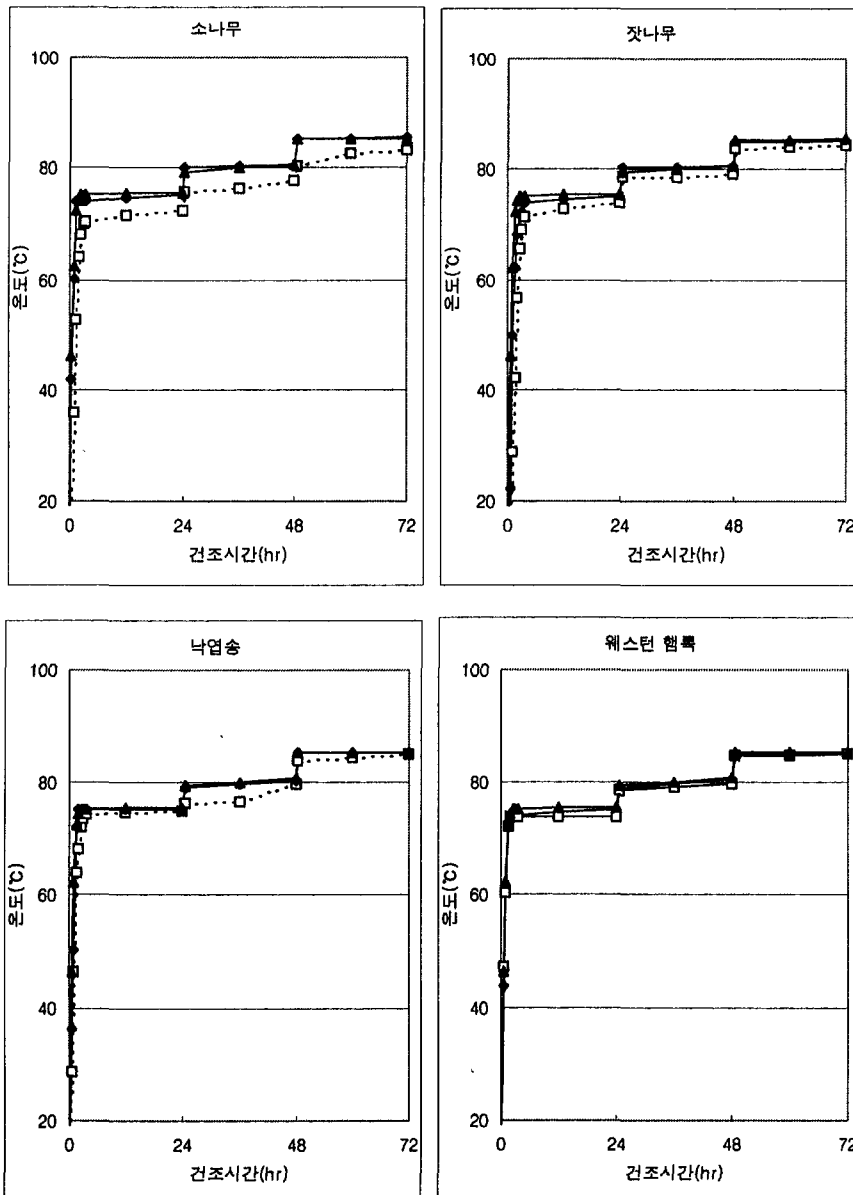


그림 2-3-1. 두께 3cm 침엽수 제재의 내부온도와 열판온도의 변화.

Figure 2-3-1. Changes of plate temperature and internal temperature of 3cm thick softwoods lumbers.





—▲— 열판 온도, —◆— 표층 온도, ---□--- 코아 온도

그림 2-3-2. 두께 5cm 침엽수 제재의 내부온도와 열판온도의 변화.  
 Figure 2-3-2. Changes of plate temperature and internal temperature of 5cm thick softwoods lumbers.

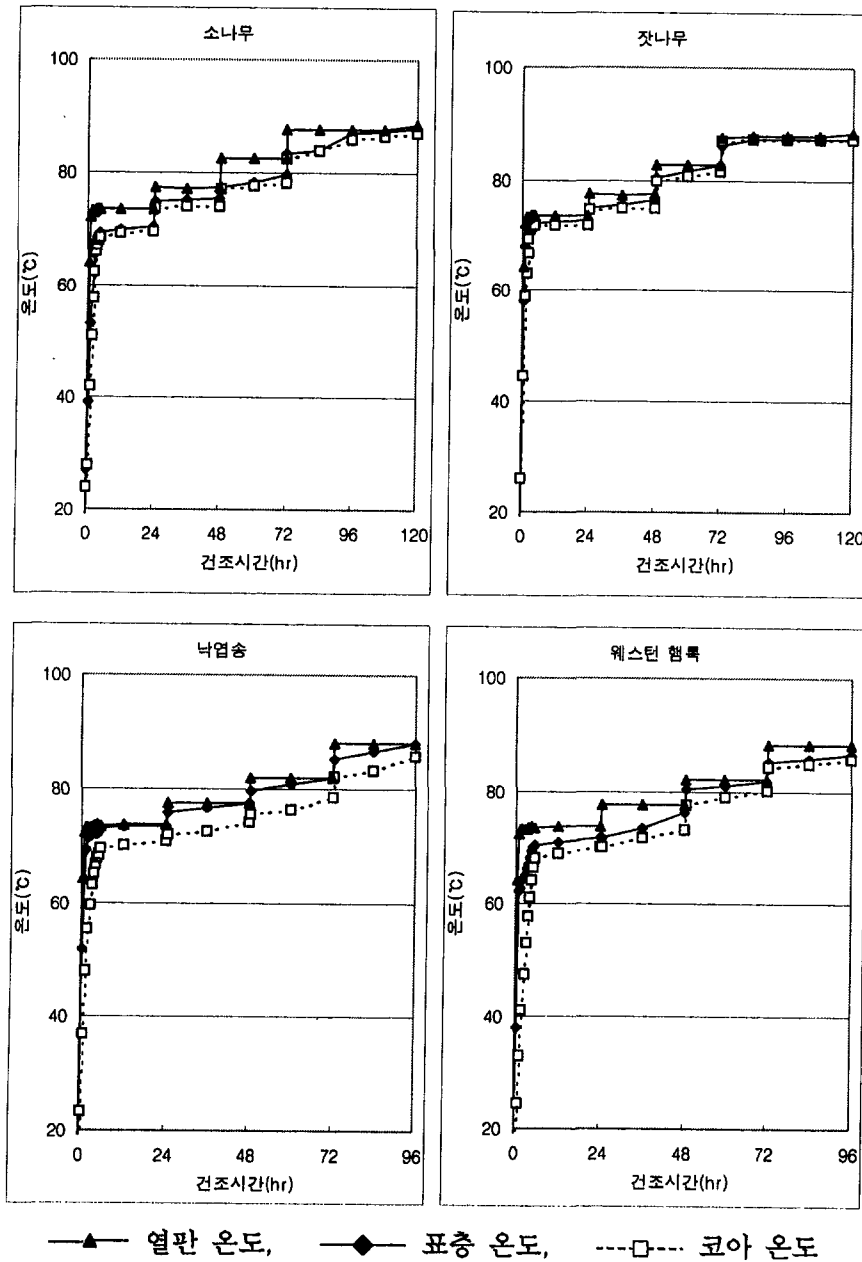


그림 2-3-3. 두께 7cm 침엽수 제재의 내부온도와 열판온도의 변화.

Figure 2-3-3. Changes of plate temperature and internal temperature of 7cm thick softwoods lumbers.

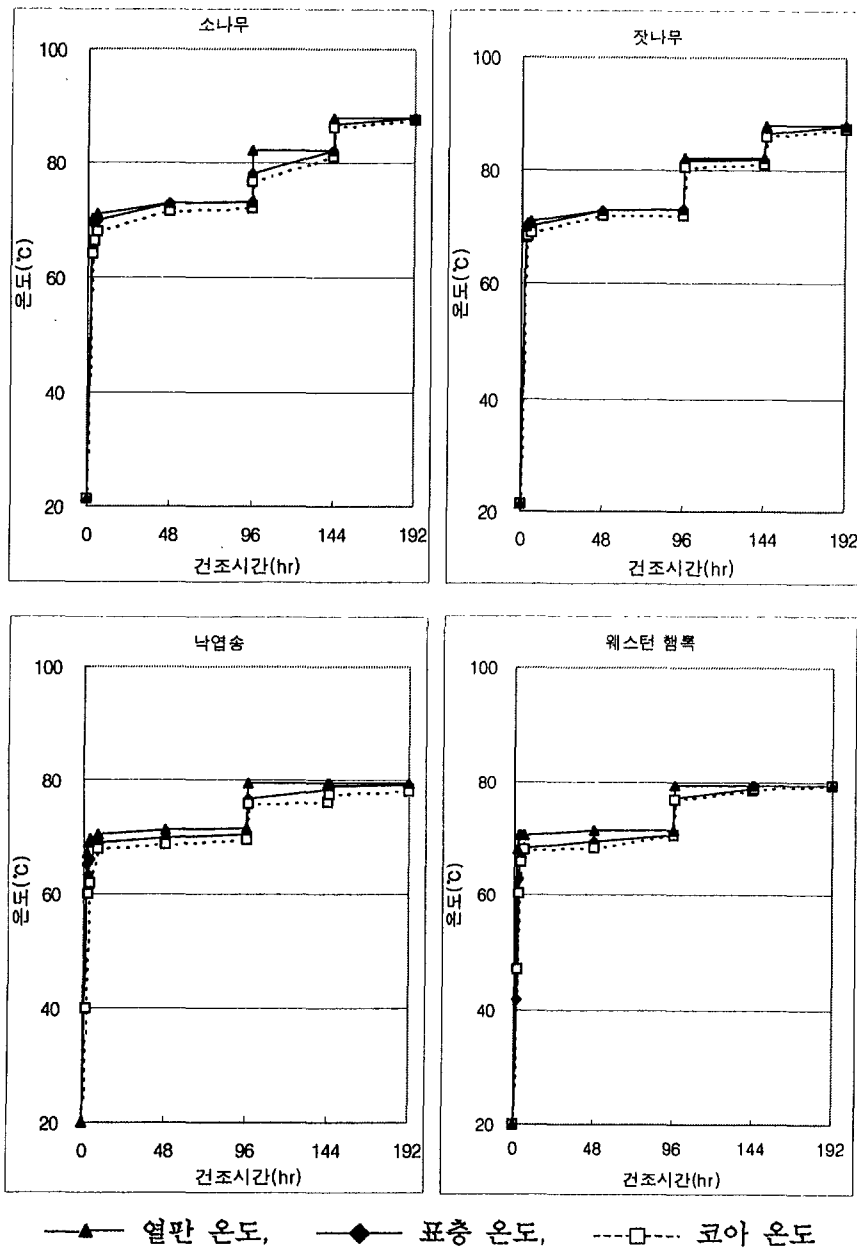


그림 2-3-4. 두께 9cm 침엽수 제재의 내부온도와 열판온도의 변화.  
 Figure 2-3-4. Changes of plate temperature and internal temperature of 9cm thick softwoods lumbers.

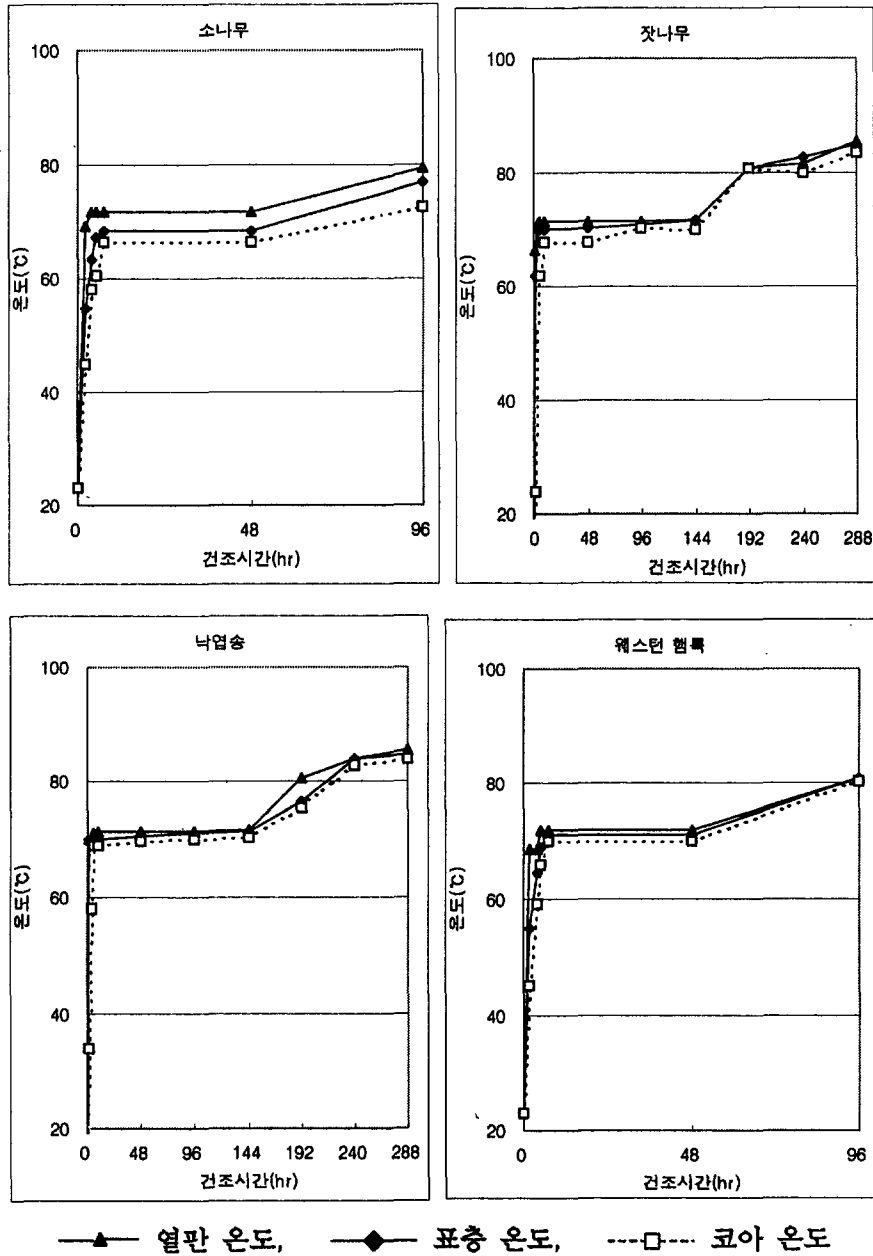


그림 3-5. 두께 11cm 침엽수 제재의 내부온도와 열판온도의 변화.

Figure 3-5. Changes of plate temperature and internal temperature of 11cm thick softwoods lumbers.

## 2. 건조곡선, 최종함수율, 건조시간 및 건조속도

### 가. 건조곡선

4수종의 5두께 제재의 적용 건조스케줄별 건조시간과 함수율의 관계를 나타낸 건조곡선은 그림 2-3-6~2-3-10과 같다. 함수율과 건조시간간에 회귀식은 표 2-3-1과 같으며,  $R^2$ 의 값은 매우 높았다. 건조스케줄의 건조온도가 높을수록 건조곡선의 기울기는 컸었다. 건조곡선의 경사는 초기함수율로부터 함수율 약20% 수준사이에는 컸었고 거의 직선적으로 감소하였으며, 그 이후부터 최종함수율까지는 적었고 곡선적으로 감소하였다. 특히 건조곡선의 기울기는 함수율 10%수준이하부터 매우 완만하였다.

건조곡선에 관한 보고로서 Avramidis 등(1994)은 변장 9.1cm western redcedar 각재의 고주파 진공건조 곡선은 거의 직선적 감소를 나타내었고, 전극 전압이 높을수록 건조곡선의 경사가 컸었다. 또한 Avramidis 등(1996)은 변장 9.1cm western hemlock 각재의 고주파 진공건조 곡선은 섬유포화점이상에서 거의 직선적 감소를 나타내었다가 그 이후부터 곡선적으로 감소하였음을 보고하였다. Harris 등(1984)은 두께 2인치의 red oak 제재의 관형열기건조와 고주파 진공건조간 건조곡선의 형태는 유사하였지만 고주파 진공건조시간은 열기건조의 것보다 17배 단축되었음을 보고하였다.

본 연구의 건조곡선의 형태는 redcedar와 western hemlock의 것과 유사하였지만 red oak 것과는 상이하였다. 일반적으로 진공건조곡선은 적용온도, 목재의 두께와 투과성 등에 따라 달라질 수 있지만, 대체로 생재에서 섬유포화점 부근까지는 항울건조에 직선적 형태를 나타내고 그 이후부터는 감울건조에 의해 곡선적 형태를 나타내고 된다. 본 연구의 건조곡선은 열기건조와 고주파 진공건조의 것과는 달리 섬유포화점이하까지 직선적으로 감소를 나타내고 있었다.

### 나. 최종함수율과 건조시간

4수종의 5두께 제재의 적용 건조스케줄별 최종함수율은 표 2-3-2와 같다. 조절함수율을 기준으로 하여 건조한 평균 최종함수율은 대부분 목표함수율보다 저함수율까지 건조되었다.

침엽수 구조용 제재규격에서 건조도에 따른 함수율은 15%이하, 20%이하 및 20%초과로 구분하고 있다(산림청, 1995). 건조도 15%이하를 기준으로 하였을 경우 건조스케줄별에 따라 초기함수율에서 함수율 15%까지 건조에 소요되는 최단과 최장 건조시간을 각각 건조곡선에서 찾아보면, 두께 3cm 제재의 경우 소나무

는 24와 54시간이고, 잣나무는 42와 54시간, 낙엽송은 36과 42시간, 웨스턴 햄록은 24와 36시간 정도 소요되었다. 두께 5cm 제재의 경우 소나무는 30와 36시간이고, 잣나무 54와 78시간, 낙엽송은 48과 54시간, 웨스턴 햄록은 24와 54시간 정도이었다. 두께 7cm 제재의 경우 소나무 54와 60시간, 잣나무 78와 120시간, 낙엽송은 72와 84시간, 웨스턴 햄록은 48와 84시간 정도이었다. 두께 9cm 제재의 경우 소나무 78과 168시간, 잣나무 96과 166시간, 낙엽송은 84와 216시간, 웨스턴 햄록은 84와 166시간정도이었다. 두께 11cm 제재의 경우 소나무 90과 132시간, 잣나무 102와 150시간, 낙엽송 108과 198시간, 웨스턴 햄록 90과 120시간 정도로서 수종과 제재 두께에 따라 상당한 차이가 있었다. 또한 제재 두께와 함수율 30%에서 15%까지 소요되는 건조시간의 관계는 그림 2-3-11과 같고, 두께 3cm, 5cm, 7cm, 9cm 및 11cm 제재의 계산한 건조시간은 소나무의 경우 각각 22.2, 31.8, 44.0, 55.3 및 62.7시간이고, 잣나무의 경우 각각 24.9, 37.0, 58.8, 61.5 및 100.1시간이며, 낙엽송의 경우 각각 34.5, 44.7, 57.9, 97.4 및 124.4시간이고, 웨스턴 햄록의 경우 각각 21.7, 20.6, 32.6, 54.5 및 78.9시간이었다.

수종간의 비교에서 건조소요시간은 소나무와 웨스턴 햄록은 짧았고, 잣나무와 낙엽송은 길었다. 수종간의 건조시간은 투과성 차이에 기인된 것으로 생각된다. 동일 수종의 같은 두께의 제재의 건조소요시간은 초기함수율과 최종함수율이 낮거나, 또는 적용건조온도가 높을수록 짧았다. 그리고 건조온도가 최단과 최장 건조시간에 영향은 제재 두께가 증가할수록 더욱 컸었다.

본 연구의 두께 9cm 제재의 건조소요시간은 Avramidis 등(1994)이 보고한 변장 9.1cm 정각재의 고주파 진공건조의 23시간보다 상당히 길었고 관행열기 건조시간 20일보다 훨씬 짧았다. 본 연구결과는 Higgins는 제재 두께에 따른 열기 건조시간계수(drying time factor)를 두께 4/4인치인 경우 0.4를 기준으로 한다면 두께가 1인치씩 3인치까지 증가함에 따라 건조시간계수는 1.00, 1.75와 2.85로 제시한 값보다 약간 적은 것 같다. 그리고 Kollman 등(1968)이 열기 건조시간은 제재 두께 비율의 제곱에 비례한다는 것보다 훨씬 적었다. 그러나 Perré 등(1995)이 진공건조시간은 관행열기 건조시간보다 3~5배 정도 빠르다고 보고한 범위에 속하였는데, 건조시간 비율은 두꺼운 제재일수록 더 컸었다. 진공건조시간은 목재의 투과성, 건조온도와 진공도 등에 좌우되지만, 가열판 압착식 진공 건조시간은 고주파 진공건조시간보다 긴 편에 속하였고, 제재 두께 증가에 따른 건조소요시간은 열기건조에 비하여 짧았다. 그리고 저함수율에서 건조속도는 매우 느려졌기 때문에 에너지 소모가 급격히 증가하게 된다.

## 다. 건조속도

### 1) 수종간 건조속도 비교

4수종 5두께의 적용 건조스케줄별 초기함수율부터 최종함수율까지 전건조기간의 건조속도와 함수율 30%부터 15%까지 범위사이 건조속도는 표 2-3-2와 같다. 전건조기간의 건조속도는 수종간에 초기함수율과 최종함수율의 차이가 있기 때문에 상호 비교하기가 어렵지만, 대체적으로 동일 제재두께의 경우 초기함수율과 최종함수율이 높을수록 크게 나타났다. 함수율 30%부터 15%까지 건조속도는 제재 두께가 얇을수록, 적용온도가 높을수록 크게 나타났고, 수종간의 건조속도는 웨스턴 햄톡이 가장 컸고, 다음은 소나무, 잣나무와 낙엽송 순위였다. 투과성은 목재조직 차이뿐만 아니라 심재와 변재의 구성 정도에 따라서도 달라진다. 본 연구의 심재율은 소나무는 적었고 낙엽송은 컸었는데 건조속도는 심재율이 클수록 느려진다.

Cividini 등(1995)은 두께 2.7cm 소나무 제재의 가열판 압체식 진공건조에서 건조속도는 초기함수율과 최종함수율이 각각 94%와 14%이고 건조온도가 95℃일 경우 4.26%/hr이었고, 초기함수율과 최종함수율이 각각 68%와 20%이고 건조온도가 90℃일 경우 0.97%/hr로 보고하였다. 두께가 비슷한 3cm 국산 소나무 제재의 건조속도와 비교하여 보면 국산 소나무의 건조속도가 더 적었는데, 본 연구에서 건조온도는 낮고, 제재두께는 두꺼우며, 최종함수율이 낮았는데 기인된 것으로 여겨진다.

### 2) 제재두께간 건조속도 비교

3가지 종류의 건조스케줄을 적용하여 함수율 30%부터 15%사이에서 4수종의 제재 두께간 건조속도의 비교는 그림 2-3-12와 같다.

각 수종의 두께 3cm, 5cm, 7cm, 9cm 및 11cm 제재의 평균 건조속도는 소나무의 경우 각각 0.691, 0.532, 0.465, 0.314 및 0.246%/hr이고, 잣나무의 경우 각각 0.620, 0.434, 0.268, 0.249 및 0.157%/hr이며, 낙엽송의 경우 0.441, 0.356, 0.265, 0.175 및 0.130%/hr이고, 웨스턴 햄톡의 경우 0.707, 0.548, 0.462, 0.306 및 0.198%/hr로서 건조속도는 제재 두께가 증가함에 따라 곡선적 감소를 나타내었다. 건조속도는 목재 두께가 증가함에 따라 내부수분의 이동거리가 비례적으로 증가하기 때문에 느려진다.

Kollmann 등(1968)이 확산율은 수증기압 경사에 비례하고 증기압경사는 제재 두께에 반비례한다는 논술에 비추어 보면, 본 연구의 건조속도는 열기건조속도보다 두께의 영향을 덜 받는 것으로 나타났었다.

#### **다. 건조중 함수율과 건조인자간의 관계**

건조중 함수율과 건조속도에 영향을 주는 제재 두께, 초기함수율 및 건조시간 등 인자간의 관계를 나타내는 회귀식, 또한 이들 인자와 3가지 건조스케줄을 종합한 것의 회귀식은 표 2-3-3과 같다. 일반적으로 제재 두께, 초기함수율 및 건조시간은 건조중 함수율과 밀접한 관계가 있다. 이들 건조인자가 상이할 때 건조중 함수율을 개략적으로 추정하는데 활용할 수 있다.



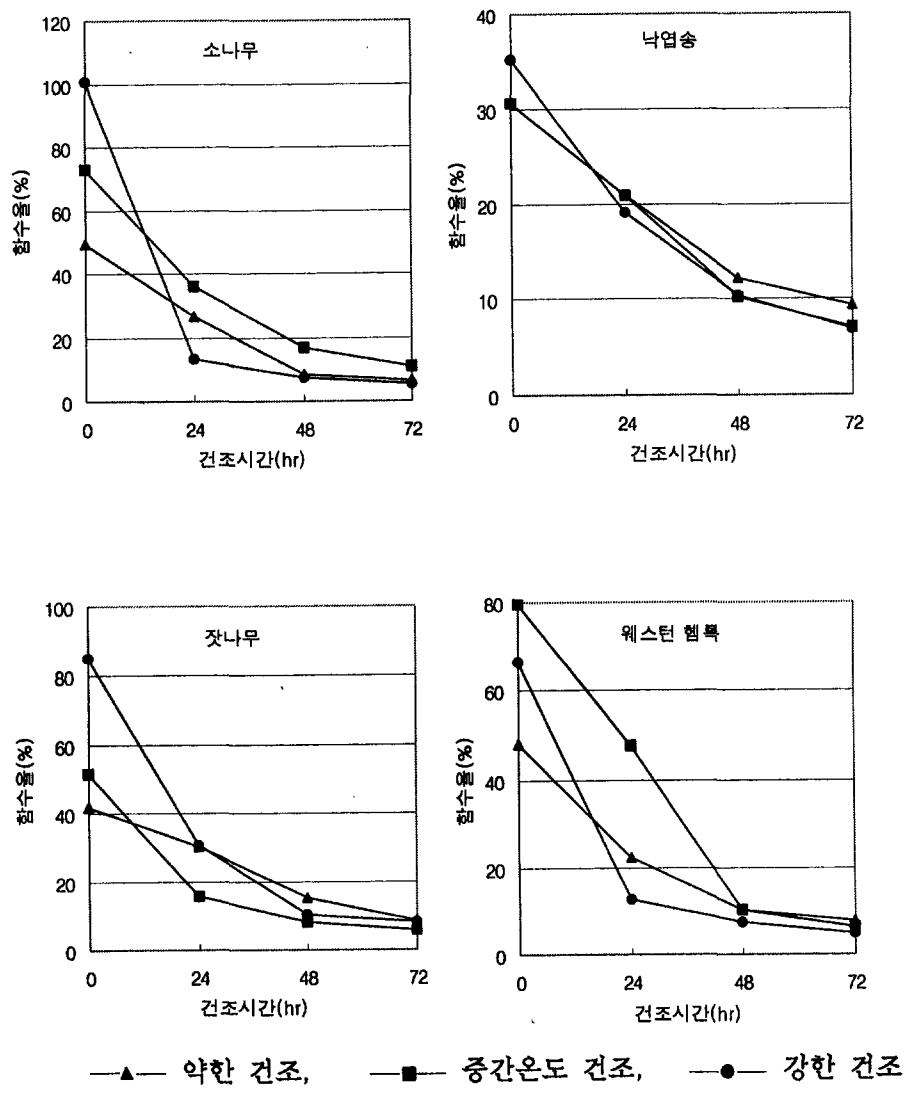


그림 2-3-6. 건조스케줄별 두께 3cm 침엽수 제재의 건조곡선.  
 Figure 2-3-6. Drying curves of 3cm thick softwood lumbers by drying schedule.

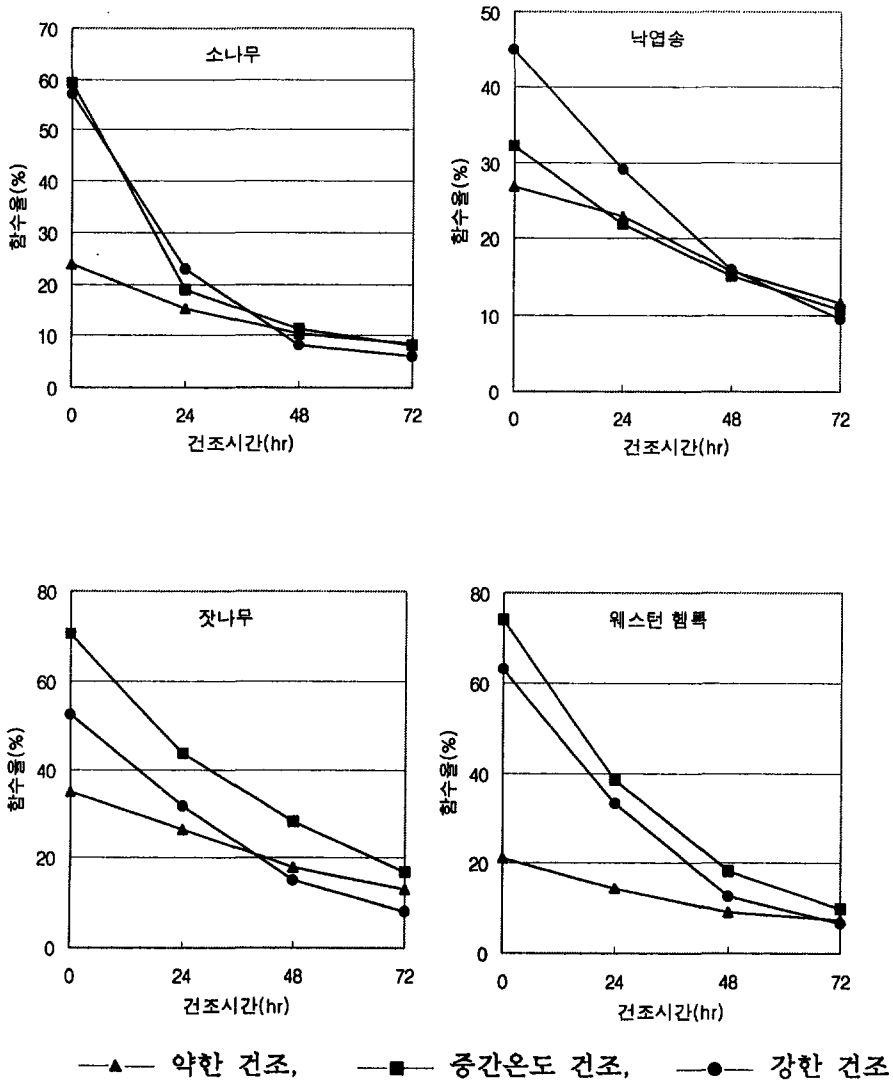
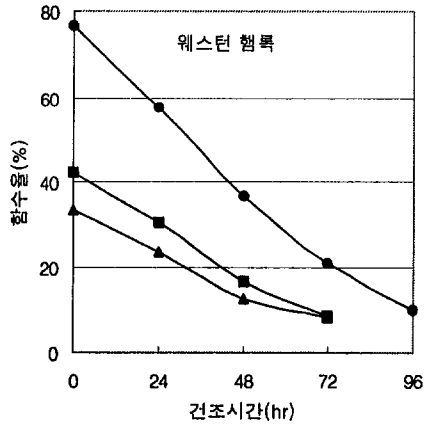
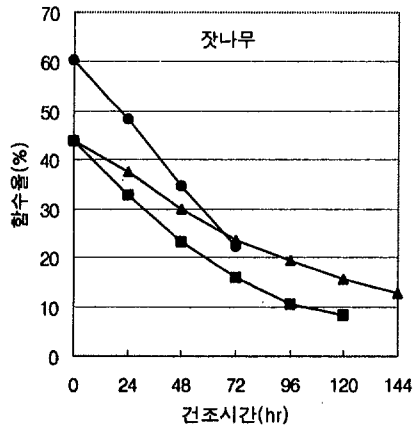
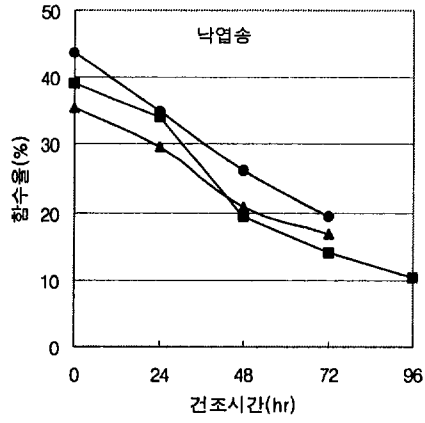
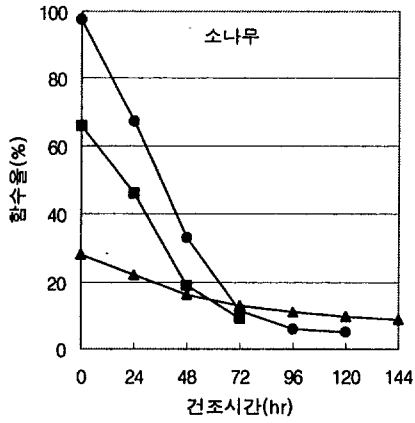


그림 2-3-7. 건조스케줄별 두께 5cm 침엽수 제재의 건조곡선.

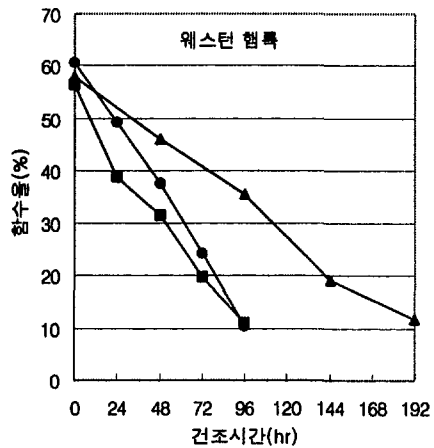
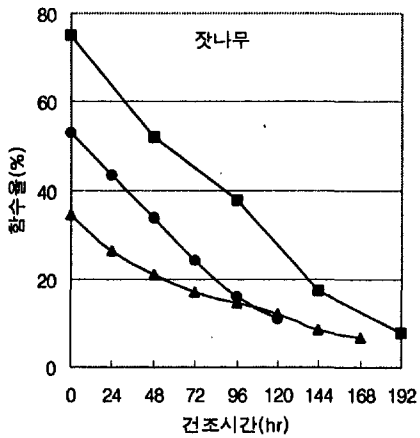
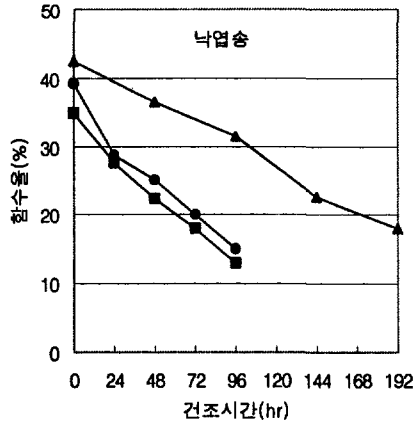
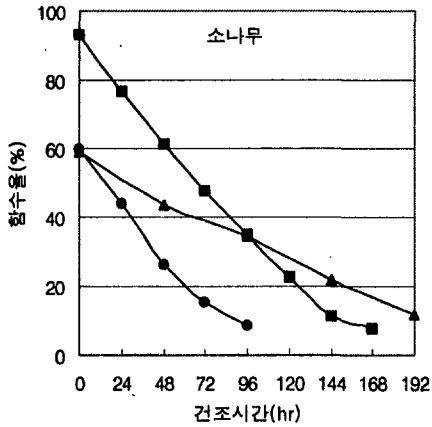
Figure 2-3-7. Drying curves of 5cm thick softwood lumbers by drying schedule.



—▲— 약한 건조, —■— 증간온도 건조, —●— 강한 건조

그림 2-3-8. 건조스케줄별 두께 7cm 침엽수 제재의 건조곡선.

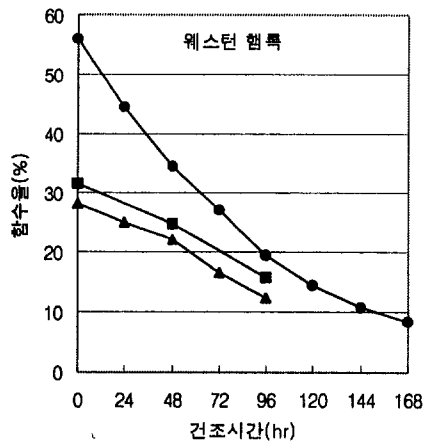
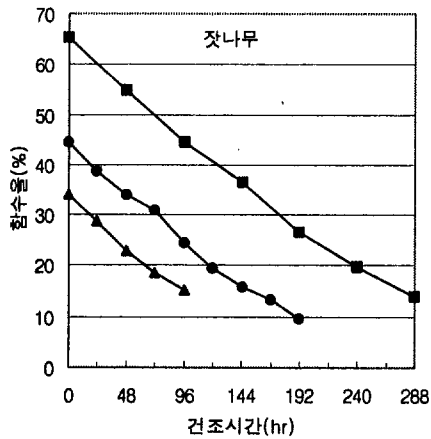
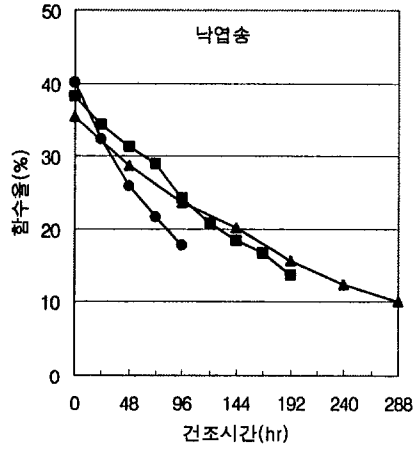
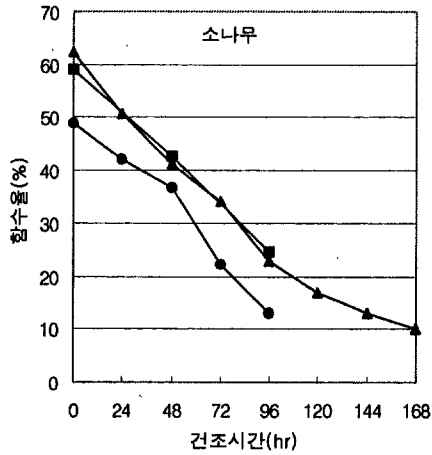
Figure 2-3-8. Drying curves of 7cm thick softwood lumbers by drying schedule.



—▲— 약한 건조,    —■— 중간온도 건조,    —●— 강한 건조

그림 2-3-9. 건조스케줄별 두께 9cm 침엽수 제재의 건조곡선.

Figure 2-3-9. Drying curves of 9cm thick softwood lumbers by drying schedule.



—▲— 약한 건조, —■— 중간온도 건조, —●— 강한 건조

그림 2-3-10. 건조스케줄별 두께 11cm 침엽수 제재의 건조곡선

Figure 2-3-10. Drying curves of 11cm thick softwood lumbers by drying schedule.

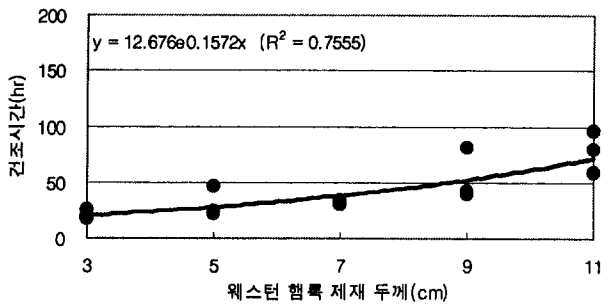
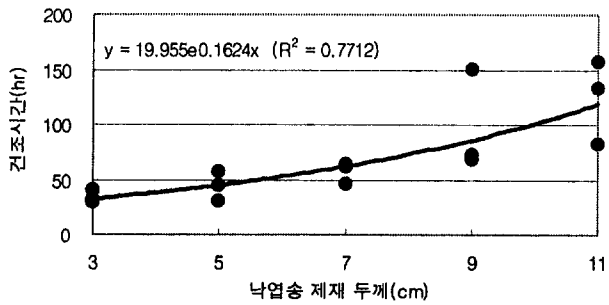
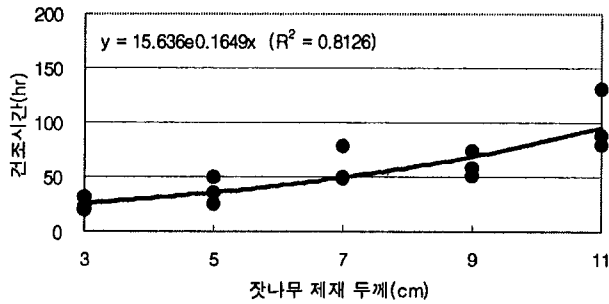
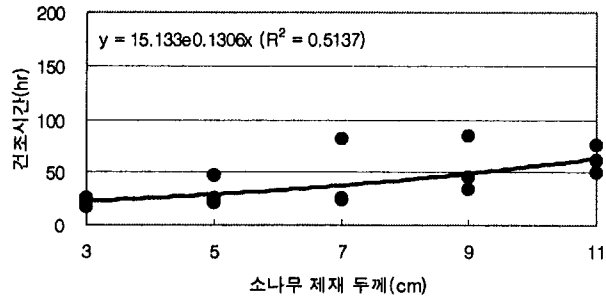


그림 2-3-11. 침엽수 제재 두께와 건조시간과의 관계.  
 Figure 2-3-11. Relationships between lumber thickness and drying time for softwoods lumbers.

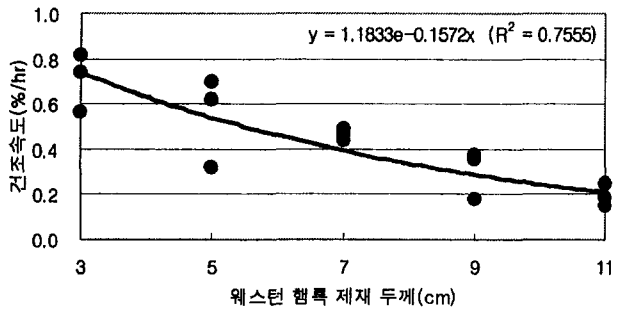
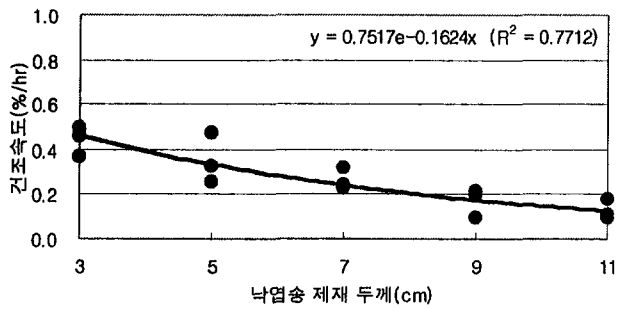
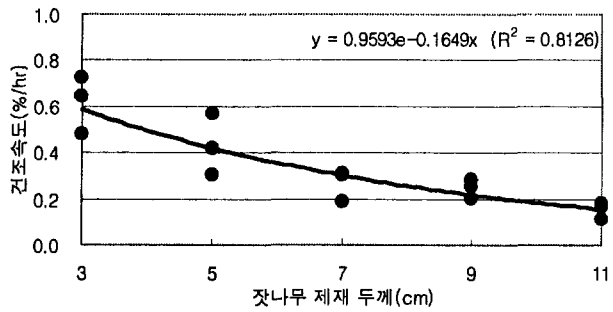
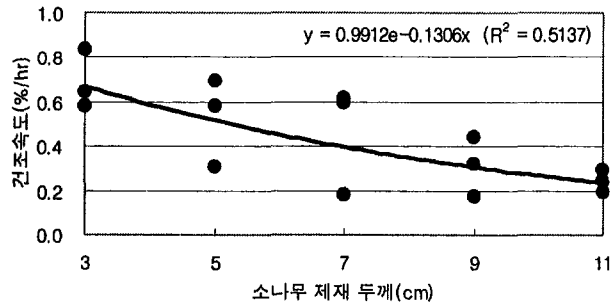


그림 2-3-12. 침엽수 제재 두께와 건조속도와의 관계.  
 Figure 2-3-12. Relationships between lumber thickness and drying rate for softwoods lumbars.

표 2-3-1. 제재 두께와 건조스케줄별 함수율(M)과 건조시간(t)간의 회귀식.

Table 2-3-1. Regression equations between moisture content(M) and drying time(t) for lumber thicknesses by drying schedules.

수종	두께(cm)	약한 건조스케줄		중간온도 건조스케줄		강한 건조스케줄	
		회귀식	R <sup>2</sup>	회귀식	R <sup>2</sup>	회귀식	R <sup>2</sup>
소나무	3	$M=48.506e^{-0.0301t}$	0.9544	$M=69.959e^{-0.027t}$	0.9897	$M=61.767e^{-0.0387t}$	0.8410
	5	$M=22.449e^{-0.0144t}$	0.9744	$M=47.56e^{-0.027t}$	0.9247	$M=51.001e^{-0.0323t}$	0.9584
	7	$M=29.945e^{-0.0084t}$	0.9715	$M=75.057e^{-0.0286t}$	0.9747	$M=107.5e^{-0.0275t}$	0.9706
	9	$M=64.703e^{-0.0081t}$	0.9648	$M=117.05e^{-0.015t}$	0.9577	$M=66.095e^{-0.0204t}$	0.9905
	11	$M=64.432e^{-0.0113t}$	0.9912	$M=61.251e^{-0.1191t}$	0.9762	$M=56.825e^{-0.0137t}$	0.9143
잣나무	3	$M=45.862e^{-0.0224t}$	0.9813	$M=41.509e^{-0.03t}$	0.9353	$M=73.374e^{-0.0353t}$	0.9448
	5	$M=35.592e^{-0.014t}$	0.9951	$M=70.438e^{-0.0196t}$	0.9996	$M=55.098e^{-0.0265t}$	0.9953
	7	$M=45.007e^{-0.0088t}$	0.9985	$M=45.065e^{-0.0144t}$	0.9955	$M=64.143e^{-0.014t}$	0.9771
	9	$M=34.038e^{-0.0046t}$	0.9930	$M=89.249e^{-0.0118t}$	0.9567	$M=58.541e^{-0.0133t}$	0.9838
	11	$M=34.688e^{-0.0086t}$	0.9978	$M=71.38e^{-0.0053t}$	0.9833	$M=48.832e^{-0.0078t}$	0.9820
낙엽송	3	$M=30.346e^{-0.017t}$	0.9844	$M=31.523e^{-0.0213t}$	0.9820	$M=33.749e^{-0.0225t}$	0.9904
	5	$M=28.307e^{-0.0121t}$	0.9784	$M=31.882e^{-0.0153t}$	0.9990	$M=46.511e^{-0.0219t}$	0.9962
	7	$M=36.166e^{-0.0106t}$	0.9854	$M=42.017e^{-0.0148t}$	0.9759	$M=44.682e^{-0.0113t}$	0.9771
	9	$M=44.804e^{-0.0046t}$	0.9758	$M=35.417e^{-0.0101t}$	0.9920	$M=38.452e^{-0.0095t}$	0.9838
	11	$M=39.649e^{-0.0084t}$	0.9984	$M=35.886e^{-0.0044t}$	0.9970	$M=39.796e^{-0.0052t}$	0.9910
웨스턴 향목	3	$M=43.764e^{-0.0262t}$	0.9653	$M=87.32e^{-0.037t}$	0.9494	$M=46.132e^{-0.0341t}$	0.8826
	5	$M=20.41e^{-0.015t}$	0.9846	$M=74.378e^{-0.0286t}$	0.9988	$M=65.283e^{-0.0323t}$	0.9925
	7	$M=34.9e^{-0.0202t}$	0.9904	$M=46.508e^{-0.0226t}$	0.9805	$M=88.85e^{-0.0212t}$	0.9732
	9	$M=66.999e^{-0.0085t}$	0.9625	$M=59.93e^{-0.0164t}$	0.9700	$M=72.045e^{-0.0175t}$	0.9191
	11	$M=30.19e^{-0.0086t}$	0.9489	$M=32.699e^{-0.0072t}$	0.9737	$M=58.675e^{-0.0116t}$	0.9979



표 2-3-2. 최종함수율, 전건조기간 및 함수율 30%에서 15%범위의 건조속도.

Table 2-3-2. Final MC, drying rates from initial MC to final MC, and from 30% to 15% MC.

수종	두께 (cm)	약한 스케줄			중간온도 스케줄			강한 스케줄		
		Final MC (%)	건조속도(%/hr)		Final MC (%)	건조속도(%/hr)		Final MC (%)	건조속도(%/hr)	
			전건조기간	30%에서 15%까지		전건조기간	30%에서 15%까지		전건조기간	30%에서 15%까지
소나무	3	6.5	0.60	0.65	10.8	0.87	0.58	5.6	1.32	0.84
	5	8.5	0.21	0.31	8.1	0.71	0.58	6.1	0.71	0.70
	7	8.6	0.14	0.18	9.0	0.79	0.62	5.0	0.77	0.60
	9	11.9	0.25	0.18	7.7	0.51	0.33	8.8	0.54	0.44
	11	10.0	0.31	0.25	24.6	0.36	0.20	12.9	0.38	0.30
잣나무	3	8.8	0.46	0.49	5.9	0.64	0.65	8.4	1.60	0.73
	5	13.0	0.30	0.30	8.0	0.62	0.57	17.1	0.74	0.42
	7	12.8	0.22	0.19	8.4	0.30	0.31	22.1	0.53	0.30
	9	6.7	0.17	0.20	7.7	0.35	0.26	11.0	0.39	0.29
	11	15.1	0.20	0.19	13.9	0.18	0.12	9.8	0.18	0.17
낙엽송	3	9.4	0.30	0.37	7.1	0.33	0.46	6.9	0.39	0.50
	5	11.6	0.21	0.26	10.7	0.30	0.33	9.5	0.49	0.48
	7	16.9	0.26	0.23	10.4	0.30	0.32	19.6	0.34	0.25
	9	18.0	0.13	0.10	12.9	0.23	0.22	15.1	0.25	0.21
	11	10.0	0.09	0.10	13.7	0.13	0.11	17.9	0.23	0.18
웨스턴 헬록	3	7.7	0.56	0.57	6.5	1.11	0.82	5.2	0.85	0.74
	5	7.3	0.19	0.33	9.7	0.90	0.62	6.6	0.79	0.70
	7	8.2	0.35	0.44	8.5	0.47	0.49	10.0	0.70	0.46
	9	11.7	0.24	0.18	11.0	0.47	0.36	10.5	0.52	0.38
	11	12.3	0.16	0.19	15.9	0.16	0.16	8.3	0.28	0.25

표 2-3-3. 건조중 함수율과 건조속도에 영향을 미치는 인자간의 관계

Table 2-3-3. Relationship between moisture content and factors that influence drying rate.

수종	스케줄	회귀식	R <sup>2</sup>
소나무	약한스케줄	$M = 3.1211t + 0.2958I - 0.2234T - 0.5863$	0.6789
	중간스케줄	$M = 2.7181t + 0.4731I - 0.4465T - 6.8437$	0.6167
	강한스케줄	$M = 4.6032t + 0.2527I - 0.5051T - 2.0466$	0.6729
	종합	$M = 3.4301t + 0.2940I - 0.2923T - 0.0808$	0.5146
잣나무	약한스케줄	$M = 1.4106t + 0.5800I - 0.1496T - 2.7806$	0.6959
	중간스케줄	$M = 5.1001t + 0.4060I - 0.1876T - 19.1847$	0.7639
	강한스케줄	$M = 3.6305t + 0.2867I - 0.2555T - 1.3154$	0.6071
	종합	$M = 3.2087t + 0.3891I - 0.1645T - 8.1739$	0.5757
낙엽송	약한스케줄	$M = 1.7283t + 0.5394I - 0.0989T - 1.9559$	0.7402
	중간스케줄	$M = 2.4071t + 0.4725I - 0.1492T - 5.7102$	0.5839
	강한스케줄	$M = 1.8561t + 0.4562I - 0.2479T + 2.7736$	0.7902
	종합	$M = 1.8382t + 0.4638I - 0.1014T - 3.0779$	0.5782
햄목	약한스케줄	$M = 2.3192t + 0.4753I - 0.1603T - 6.5001$	0.6030
	중간스케줄	$M = 4.1148t + 0.2541I - 0.4415T - 0.0115$	0.5719
	강한스케줄	$M = 4.4224t + 0.4169I - 0.3597T - 12.4387$	0.7641
	종합	$M = 3.2827t + 0.3388I - 0.2426T - 5.8036$	0.5665

※ M=함수율(%), t=제재 두께(cm), I=초기 함수율(%), T=건조시간(hr)

### 3. 건조중과 건조목재의 함수율 분포

#### 가. 건조중 함수율 분포

4수종의 두께 3cm, 5cm, 7cm 제재의 건조시간별 두께방향의 함수율 분포는 그림 2-3-13~2-3-15와 같다. 각 수종의 제재는 초기함수율의 차이가 있었고 초기함수율이 높을수록 건조초기에 수분경사가 나타났었다.

두께 3cm 제재는 건조시간 24시간이후 수분경사는 매우 완만하였고 48시간이 후에는 더욱 완만하였다. 두께 5cm 제재의 경우 초기함수율이 높은 소나무와 잣나무는 건조시간 24시간에 표층과 중간층간에 수분경사가 컸었으나 중간층과 중심층간에 함수율이 거의 같았다. 소나무는 48시간에서, 잣나무는 72시간에서 두께방향의 수분경사가 완만하여졌다. 그러나 초기함수율이 낮은 낙엽송과 웨스턴 햄록은 건조시간 24시간에서 완만한 수분경사를 나타내었다. 두께 7cm 제재의 경우 초기함수율이 낮은 소나무, 낙엽송과 웨스턴 햄록은 건조시간 24시간에서도 수분경사가 적었고 건조시간이 경과함에 따라 약간씩 감소하였다. 그러나 초기함수율이 큰 잣나무의 경우는 72시간 건조에서도 비교적 큰 수분경사를 나타내었고 96시간에서야 완만하여졌다. 두꺼운 제재의 저함수율 영역에서 수분경사의 완화속도는 매우 느렸음을 알 수 있었다.

Harris 등(1984)은 2인치 레드오크의 관행열기건조와 고주파 진공건조중 수분경사는 포물선형으로 나타났고, 관행열기건조중 건조시간별 두께방향의 수분경사는 고주파 진공건조의 것보다 적음을 보고하였다. Avramidis 등(1996)은 western hemlock의 고주파 진공건조중 두께방향의 함수율은 표층이 중심층보다 낮았으나, western redcedar는 오히려 표층이 중심층보다 높았음을 보고하였다. 일반적으로 열기건조중에는 중심층이 표층보다 높고, 고주파 진공건조중에는 표층이 중심층보다 높은 경우가 많으며 수분경사가 크게 나타난다.

본 연구의 결과는 기존의 관행열기건조와 고주파 진공건조중의 함수율 분포 패턴과 매우 상이하였고, 수분경사가 매우 완만하게 나타나고 있었다. 이와 같은 결과는 건조중의 목재부위간 온도경사가 경미한데 기인된 것으로 여겨진다. 특히 수분경사가 적을수록 내부할렬 발생의 억제 효과가 있을 것으로 생각된다.

#### 나. 건조목재의 함수율 분포

소나무의 3수종의 5두께별 건조목재의 횡단면으로부터 10cm(횡단면부위), 50cm(중간부위)와 90cm(중앙부위) 떨어진 재장의 두께방향의 함수율 분포는 그림 2-3-16부터 2-3-19와 같다.

건조목재의 두께별과 건조스케줄별 재장부위 함수율은 횡단면 부위가 가장 낮고 중앙부위가 가장 높았지만 두 부위간에 큰 차이를 나타내지 않았다. 또한 제재 두께방향에서는 표층이 가장 낮고 중심층이 가장 높았다.

소나무의 두께 3cm부터 9cm 제재는 건조스케줄에 관계없이 재장과 두께 방향에서 매우 완만한 수분경사를 나타내고 있었고, 두께 11cm 제재의 경우는 얇은 제재의 경우보다 약간 큰 수분경사를 나타내고 있었다. 다만, 중간온도 건조스케줄 적용의 경우는 재장과 두께 방향에서 특이하게 큰 수분경사를 나타내고 있었는데, 이는 심재율이 많고 최종함수율이 높았는데 기인된 것으로 생각된다.

잣나무의 두께 3cm 제재는 재장방향과 두께 부위간의 수분경사는 적용된 건조스케줄에 관계없이 거의 비슷하였으나, 두께 5cm이상의 제재는 건조스케줄과 제재두께에 따라 수분경사가 일정한 경향을 나타내지 않았다. 다만, 두께 7cm 제재에 강한 건조스케줄을 적용한 경우와 같이 초기함수율이 높거나, 심재율이 많은 제재는 재장과 두께 방향에서 비교적 급격한 수분경사를 나타내고 있었다.

낙엽송의 두께 3cm 제재의 수분경사는 건조스케줄에 관계없이 재장과 두께 방향에 따라 수분경사가 매우 완만하였다. 그러나 두께 5cm이상인 제재의 경우는 적용한 건조스케줄에 따라 수분경사가 일정한 경향을 나타내지 않았다. 두께 11cm 제재에 약한 건조스케줄을 적용한 경우와 같이 심재율이 적은 경우는 완만한 수분경사를 나타내고 있었다.

웨스턴 햄목의 두께 3cm 제재의 수분경사는 건조스케줄 적용과 관계없이 재장과 두께 방향에서 매우 적었고, 두께가 증가함에 따라 재장과 두께 방향의 수분경사는 적용 건조스케줄과 관계없이 약간 증가하는 경향을 나타내고 있었다.

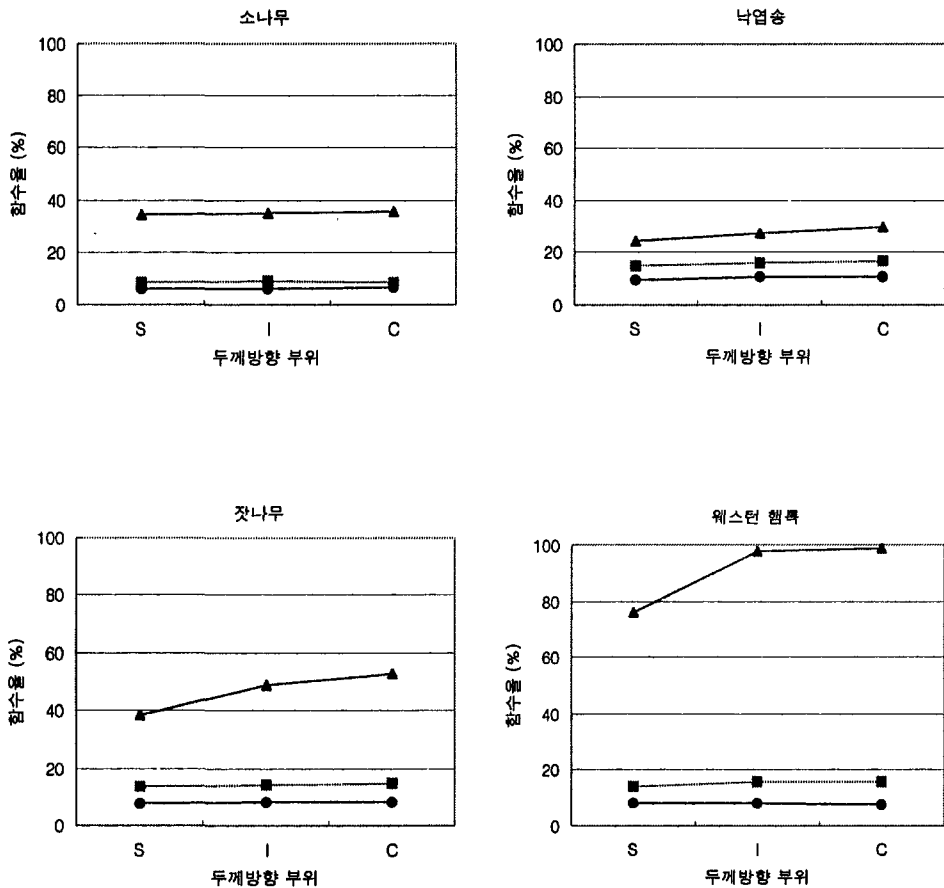
소나무와 웨스턴 햄목과 같이 건조속도가 큰 수종은 낙엽송과 같이 건조속도가 느린 수종보다 재장과 두께 방향의 수분경사가 적었다. 얇은 제재의 재장과 두께 방향에서 수분경사는 두꺼운 제재의 것보다 적었다. 건조스케줄의 강약에 따른 수분경사의 차이는 뚜렷하지 않았고, 수분경사는 제재의 초기함수율과 최종함수율이 높고, 심재율이 클수록 크게 나타났었다.

진공건조재의 함수율 분포와 관련되는 보고로서 Harris 등(1984)은 두께 2인치 레드오크의 고주파 진공건조재의 함수율 분포는 외층이 4.8%로서 가장 낮았고, 두께의 중심층은 11.2%로서 가장 높았으며 표층에서 중심층으로 향하면서 증가하였는데, 관행열기건조재의 함수율 분포모형과 유사하였고 진공건조재의 수분경사가 열기건조재의 것보다 더 큼을 보고하였다. Trofatter 등(1986)은 red oak의 고주파 진공건조재와 열기건조재의 최종함수율 변이는 각각 2~28%와 7~10% 범위로서 진공건조재의 수분경사와 건조목재 개체간의 함수율 변이는 열기건조재의 것보다 컸었고, 또한 고주파 건조에서 초기함수율은 최종함수율에

미치는 영향은 거의 없고, 비중과 최종함수율 사이에는 부의 상관관계가 매우 컸음을 보고하였다. Avramidis 등(1994)은 변장 9.1cm인 웨스턴 레드시더의 고주파 진공건조재의 함수율 분포는 재장방향에서 중앙이 낮고 양횡단면에서 높았으나 유의적인 차이를 나타내지 않았고, 두께방향의 경우는 중심층의 함수율이 표층보다 높았음을 보고하였다. 이와 같은 결과는 고주파건조에서 다습 부위를 선택적으로 가열하기 때문이라고 보고하였다. Avramidis 등(1996)은 변장 9.1cm인 웨스턴 햄록의 고주파 진공건조재의 재장방향에서 중앙의 함수율이 높았으나 재장부위간에 큰 차이가 없었고, 두께방향에서 중심층의 함수율은 표층의 것보다 낮았음을 보고하였다. Lamb 등(1993)은 어떤 진공건조시스템, 특히 고주파 진공건조의 경우 건조목재의 개체간과 개체내 부위에 따라 최종함수율의 변이가 크고, 이와 같은 변이는 건조실내의 동력의 변이에 의해 잔적 내부에 온점과 냉점이 생긴데 기인된 것으로 추측하였다.

이상의 보고내용과 같이 건조목재의 함수율 분포모형은 열기건조, 또는 진공건조 등 건조방법, 내부가열이나 외부가열 등 가열방법, 비중, 투과성, 초기함수율과 최종함수율 등과 관련하여 수종과 목재인자에 따라 상이할 수 있다. 가열판 압체식 진공건조재의 함수율분포에 관하여 보고된 바 없어 상호 비교가 불가능하다.

가열판 압체식 진공건조재의 재장과 두께 방향의 수분경사는 고주파 진공건조와 열기건조 등 다른 건조법에 의한 것보다 적었다. 이는 건조과정중에 목재부위간에 내부온도가 거의 균일하기 때문에 모든 부위가 비교적 균일한 건조가 이루어지는 결과로 믿어진다. 두께와 재장 방향에서 수분경사는 건조속도가 큰 얇은 제재는 건조속도가 느렸던 두꺼운 제재보다 적었고, 또한 건조속도가 큰 웨스턴 햄록과 소나무는 건조속도가 느렸던 낙엽송보다 수분경사가 적었다. 이와 같은 결과는 수종간 투과성의 차이에 기인된 것으로 생각된다. 가열판 압체식 진공건조는 고주파 진공건조보다 목표함수율까지 건조할 경우 매우 균일한 함수율 분포를 나타내고 있었다.



-▲- 0hr, -■- 24hr, -●- 48hr  
 S : 표층, I : 중간층, C : 중심층

그림 2-3-13. 가열판 압착식 진공건조중 두께 3cm 제재의 건조시간별 두께방향의 함수율 분포.

Figure 2-3-13. Transverse moisture content distribution of 3cm thick lumber during vacuum-press drying.

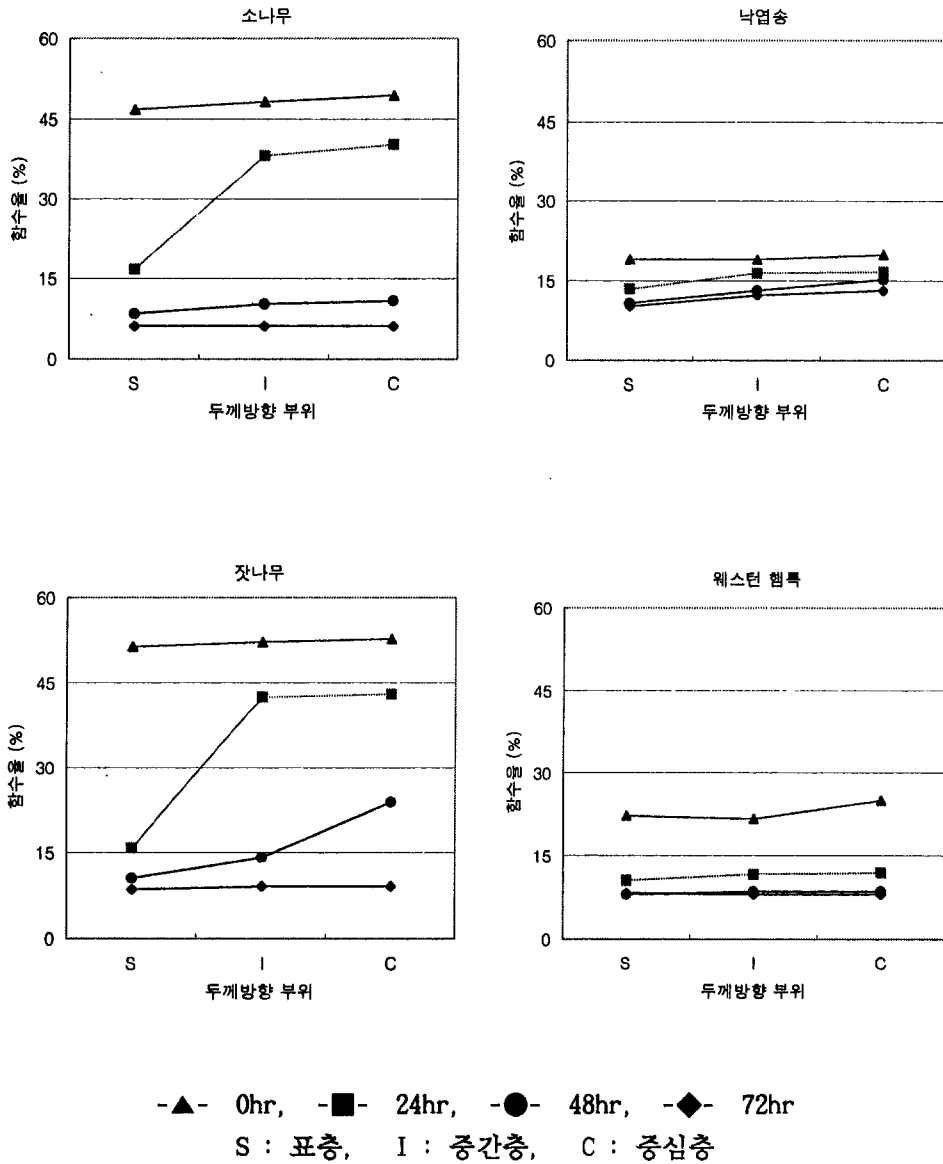


그림 2-3-14. 가열판 압체식 진공건조중 두께 5cm 제재의 건조시간별 두께방향의 함수율 분포.

Figure 2-3-14. Transverse moisture content distribution of 5cm thick lumber during vacuum-press drying.

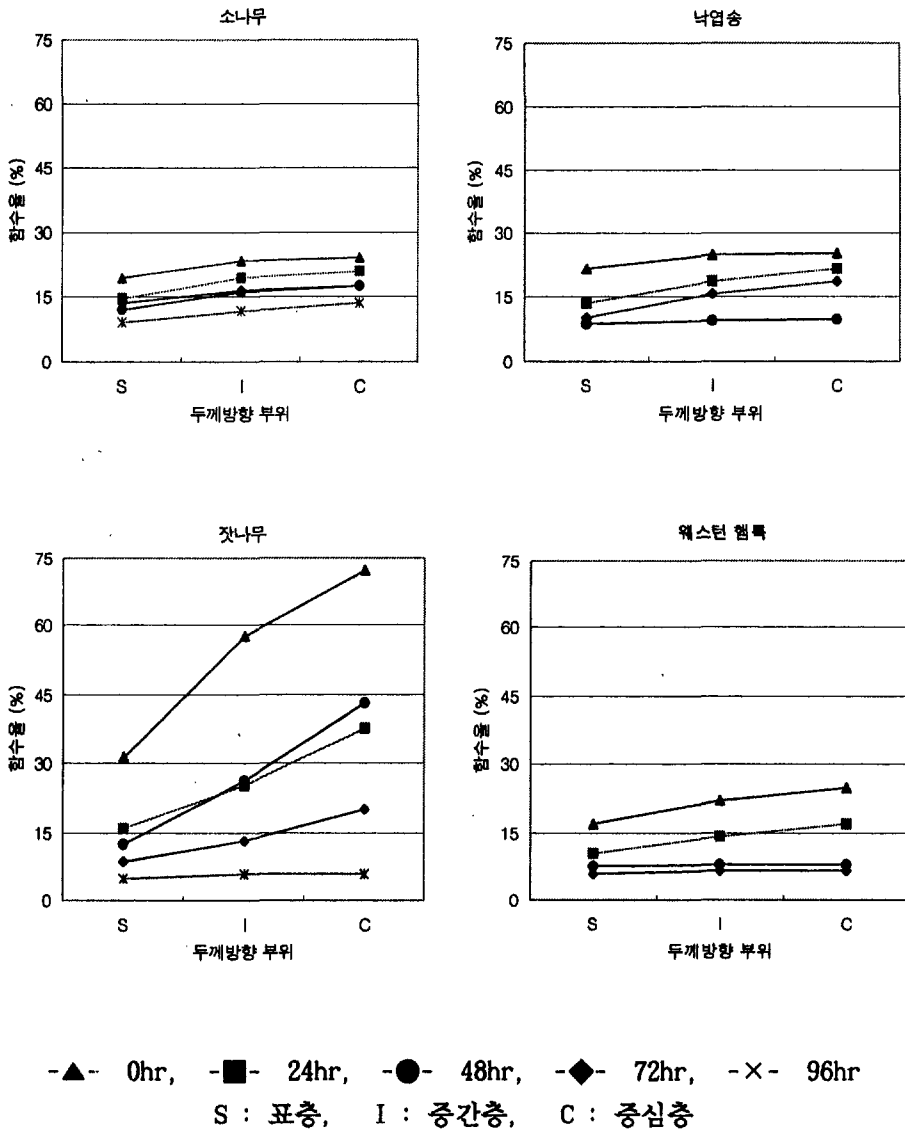
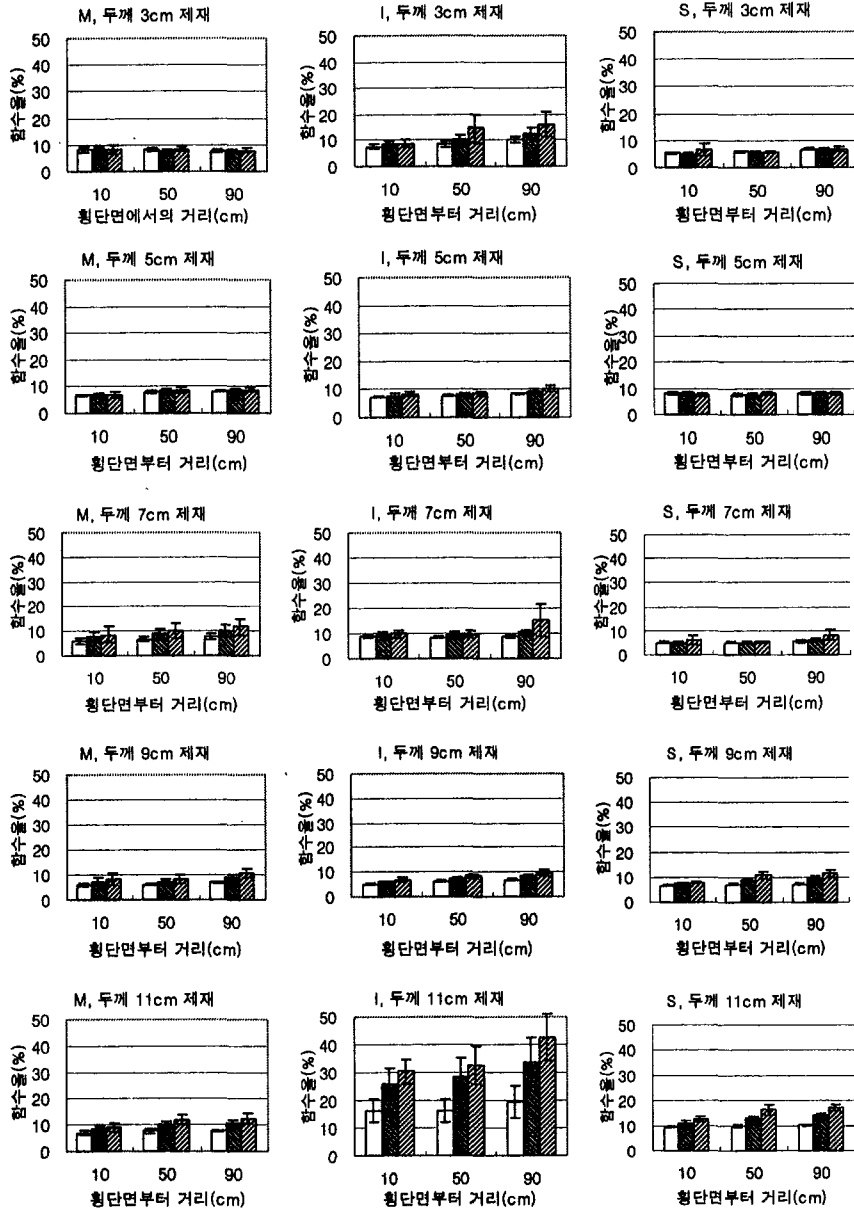


그림 2-3-15. 가열판 압제식 진공건조중 두께 7cm 제재의 건조시간별 두께방향의 함수율 분포.

Figure 2-3-15. Transverse moisture content distribution of 7cm thick lumber during vacuum-press drying.





M: 약한건조스케줄, I: 중간은도 건조스케줄, S: 강한 건조스케줄  
□ 표층, ▨ 중간층, ▩ 중심층

그림 2-3-16. 소나무 제재 두께 방향과 재장 방향의 함수율 분포.  
Figure 2-3-16. Transverse- and longitudinal moisture content distribution for lumber thicknesses of red pine.

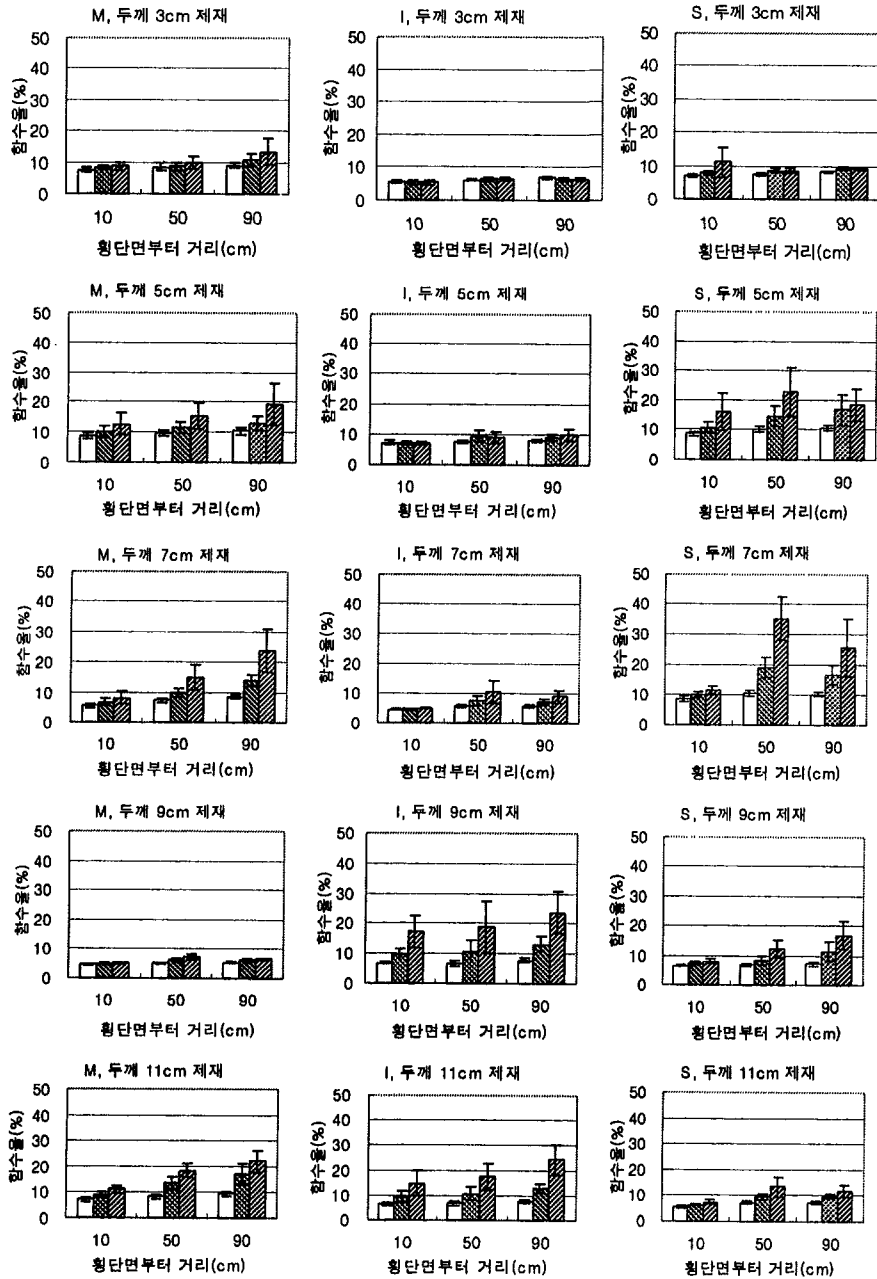


그림 2-3-17. 잣나무 제재 두께 방향과 재장 방향의 함수율 분포.  
 Figure 2-3-17. Transverse- and longitudinal moisture content distribution for lumber thicknesses of Korean white pine.

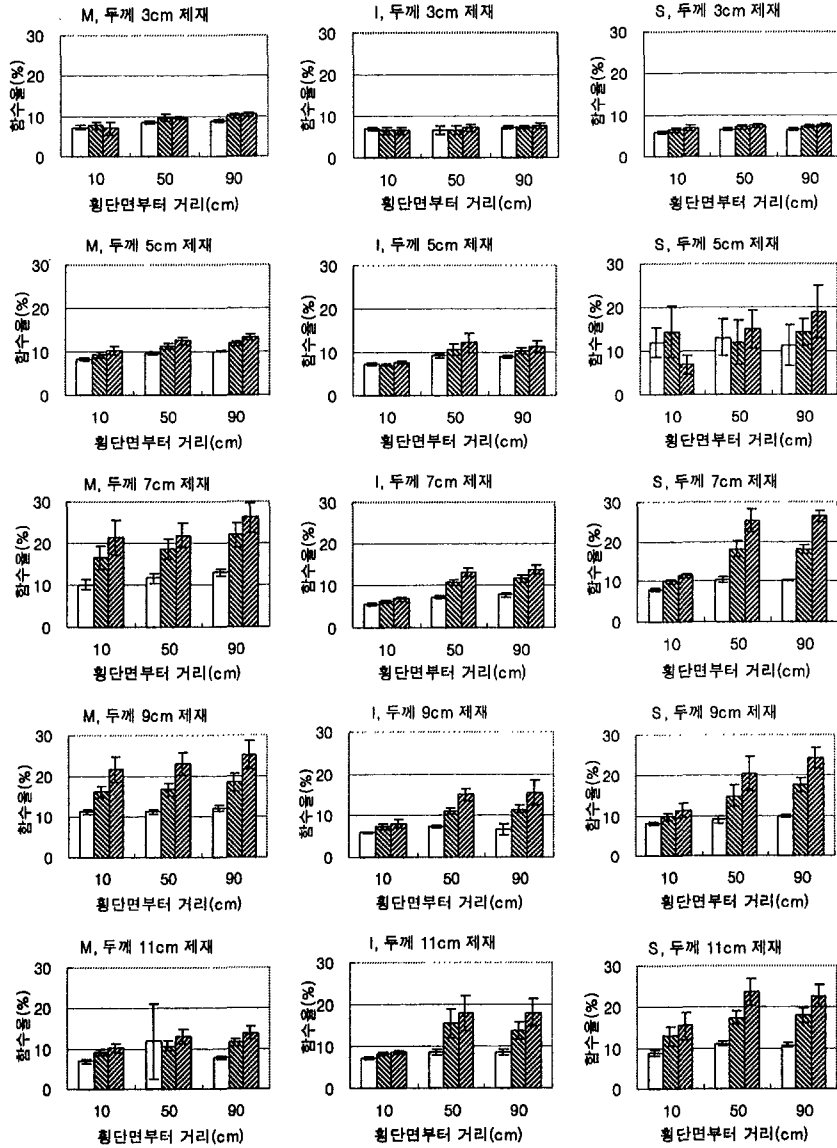


그림 2-3-18. 낙엽송 제재 두께 방향과 재장 방향의 함수율 분포.  
 Figure 2-3-18. Transverse- and longitudinal moisture content distribution for lumber thicknesses of larch.

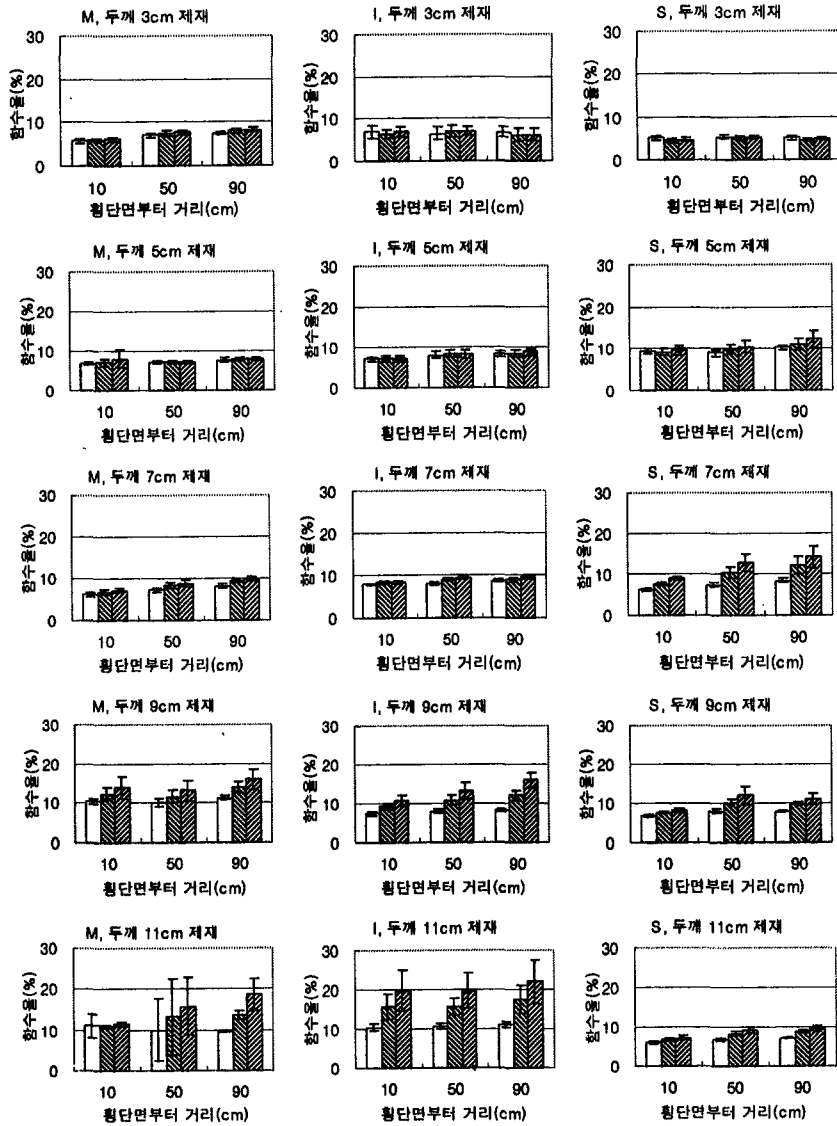


그림 2-3-19. 웨스턴 헴록 제재 두께 방향과 재장 방향의 함수율 분포.

Figure 2-3-19. Transverse- and longitudinal moisture content distribution for lumber thicknesses of western hemlock.

#### 4. 건조중과 건조목재의 두께와 폭 수축율

##### 가. 건조중 함수율과 수축율의 관계

4수종의 두께 5cm와 7cm 제재의 건조중 함수율과 두께와 폭 수축율의 관계는 그림 2-3-20과 같다. 함수율이 감소함에 따라 두께와 폭 수축율은 비례적으로 증가하였다. 함수율은 생재로부터 15%수준까지 거의 직선적으로 감소하였고, 그 이후부터는 곡선적으로 감소하였다. 건조곡선의 기울기가 클수록 상응하여 두께와 폭 수축율의 기울기도 커졌다.

수축율은 두께 5cm와 7cm 제재간에 뚜렷한 차이가 없었다. 두께와 폭 수축율 간의 차이는 수종과 제재 두께에 따라 다소 차이가 나타나고 있었는데, 이는 연륜각의 크기와 관련된 것으로 여겨진다. 즉 정목의 경우 두께 수축율은 적어지고 폭 수축율이 커지며, 판목의 경우는 정목과 반대현상이 나타나게 된다. 본 연구의 공시재는 연륜각을 고려치 않고 임의로 mixed grain을 사용하였는데 기인된 것으로 생각된다.

목재 함수율이 섬유포화점 이하로 감소되면 제거된 수분량만큼 수축하게 된다. 일반적으로 사용하고 있는 목재의 천연건조와 관행열기건조 과정에서 보면 평균함수율이 섬유포화점 이상에서도 수축현상이 일어나는데, 이는 표층은 섬유포화점 이하로 건조되고 내층은 섬유포화점 이상인 경우다. 이러한 경우에 대하여 Kollmann 등(1968)에 의하면 목재 수축율은 생재에서 함수율 22% 또는 25% 범위사이 건조에서 곡선적으로 증가하다가 함수율 22~24% 이하부터 건조되어짐에 따라 직선적으로 증가한다고 보고하였다.

본 연구결과에서 보면 초기함수율이 비교적 높은 잣나무 5cm 및 7cm 제재와 낙엽송 7cm 제재의 수축율은 건조초기 함수율 24% 이상에서도 함수율이 감소함에 따라 직선적으로 증가하였는 바, 가열판 압체식 진공건조과정중 함수율과 수축율의 관계는 관행열기건조의 경우와 매우 상이함을 알 수 있었다. 이와 같은 차이는 목재의 천연건조 또는 관행열기건조 과정중에 큰 수분경사를 나타내면서 건조되어가지만, 가열판 압체식 진공건조의 경우는 두께방향의 온도경사가 적고, 따라서, 두께부위간 비교적 균일한 건조에 의한 균일한 수축이 요인이 되는 것 같다.

##### 나. 건조목재의 수축율

4수종과 제재 두께별 초기함수율부터 최종함수율까지 가열판 압체식 진공건조한 정목과 판목의 실제 두께와 폭 수축율은 표 2-3-4와 같다. 또한 함수율 30%

에서 12%까지 함수율 감소분에 대한 정목과 판목의 계산한 두께와 폭 수축율은 표 2-3-5와 같다. 표 2-3-4의 실제 두께와 폭 수축율은 수종과 제재 두께별에 따라 초기함수율과 최종함수율이 각각 상이하기 때문에 수종과 제재 두께별로 수축율의 크기를 상대적으로 비교하기 어렵다.

따라서, 함수율 30%로부터 12%까지 동일한 함수율 감소분에 대하여 계산한 정목과 판목의 두께와 폭 수축율에 근거하면 모든 수종의 정목과 판목의 두께가 증가함에 따라 두께와 폭 수축율의 크기는 일정한 경향을 나타내지 않았다. 그렇지만 모든 수종의 정목의 두께 수축율은 폭 수축율보다 훨씬 컸었다. 모든 제재 두께를 종합하였을 경우 두께수축율대 폭수축율의 비율(T/W율)은 소나무 1.48, 잣나무 1.53, 낙엽송 1.88, 웨스턴 햄록 1.60으로서 수종간에 약간의 차이를 나타내었고, 모든 수종과 두께를 종합한 경우의 T/W율은 1.61을 나타내고 있었다.

판목의 경우 대부분 두께 수축율은 폭 수축율보다 컸었지만 잣나무와 웨스턴 햄록의 일부 제재 두께의 경우는 같거나 적었다. 모든 두께의 수축율을 종합한 경우의 T/W율을 수종별로 살펴보면 소나무 1.12, 잣나무 1.15, 낙엽송 1.22, 웨스턴 햄록 0.99로서 수종간에 약간의 차이를 나타내고 있었다. 모든 수종과 두께를 종합한 경우의 T/W율은 1.10을 나타내고 있었다.

이상과 같이 대부분 T/W율이 1.00을 초과하고 있었다. 이는 가열판 압체력이 1kg/cm<sup>2</sup>정도에서도 두께수축은 다소 촉진되고, 반면에 폭수축은 다소 억제되는 결과에 기인된 것으로 생각된다. 또한 정목의 T/W율이 판목의 것보다 큰 값을 나타내고 있었다. 이와 같은 결과는 제재의 연륜각의 크기와 밀접한 관계가 있는 것으로 생각된다. 즉 정목의 경우는 가열판 압체식 진공건조될 때 두께방향은 접선방향과 일치하고, 폭 방향은 방사방향과 일치하게 된다. 목재의 접선방향 수축율은 방사방향 수축율보다 2배정도 더 크기 때문에 접선방향의 두께 수축율은 커지고, 반면에 방사방향의 폭 수축율은 적어진다. 그러나 판목의 경우는 정목과 정반대로 방사방향의 두께 수축율은 적고, 접선방향의 폭수축율은 크게 나타나게 된다.

본 연구의 결과를 진공건조와 열판건조 등 다른 보고내용과 비교해 보면, 본 연구의 T/W율은 Cividini(1995)가 생재를 가열판 압체식 진공건조제의 두께 수축율은 폭 수축율보다 일반적으로 크게 나타났었는데, T/W율은 Scotch pine은 0.95로서 이상할 정도로 적었고, 단풍나무는 2.78과 월넛트(walnut)은 3.75 범위내에 속하였다. Hittmeier 등(1968)은 cypress의 8수종의 열판건조의 경우 두께 수축율은 폭 수축율보다 컸음을 보고하였고, Simpson 등(1988)은 loblolly pine의 열판건조에서 열판의 가압력이 증가할수록 두께수축율이 증가함을 보고

하였다.

본 연구의 수축율 크기를 이들 수종의 정상 수축율과 비교해 보면, 강 등 (1994)이 보고한 침엽수의 방사방향과 접선방향의 기건까지 수축율은 각각 소나무가 2.97%와 5.40%이고 잣나무가 1.80%와 4.34%이며, 낙엽송은 3.32%와 6.43%, 그리고 미국 임산물연구소(1987)에서 보고한 웨스턴 헴록의 방사방향과 접선방향의 전수축율은 각각 4.2%와 7.8%이었다. 목재의 방사방향 수축율과 접선방향 수축율의 합은 횡단면 수축율과 같고, 이는 용적수축율과 거의 유사하다. 또한 목재의 두께와 폭 수축율의 합은 목재의 횡단면 수축율과 같고, 용적수축율에 근접하게 된다. 따라서 이들 수종의 방향별 수축율의 합과 본 연구의 두께와 폭 수축율의 합을 동일한 건조도 조건에서 환산하여 비교하면, 본 연구의 가열판 압체식 진공건조재의 수축율은 정상수축율보다 작게 나타났다. Cividini(1995)는 가열판 압체식 진공건조재의 수축율은 일반적으로 정상수축율과 비교하면 두께 수축율은 크고 폭 수축율은 적게 나타난다고 하였으며, Scotch pine과 참나무의 경우는 정상수축율보다 적었지만, 월넛트의 경우는 오히려 크게 나타나는 등 수종에 따라 상이하다고 보고하였다. 본 연구의 결과는 Scotch pine과 참나무 수축율의 경우와 부합되고 있었다. Harris 등(1984)은 red oak의 고주파 진공건조재의 방사방향과 접선방향 수축율은 관행열기건조재의 것보다 적었음을 보고한 바 있다. 가열판 압체식 진공건조재의 수축율은 다른 건조법에 의한 것보다 적게 나타나는 것으로 여겨진다.

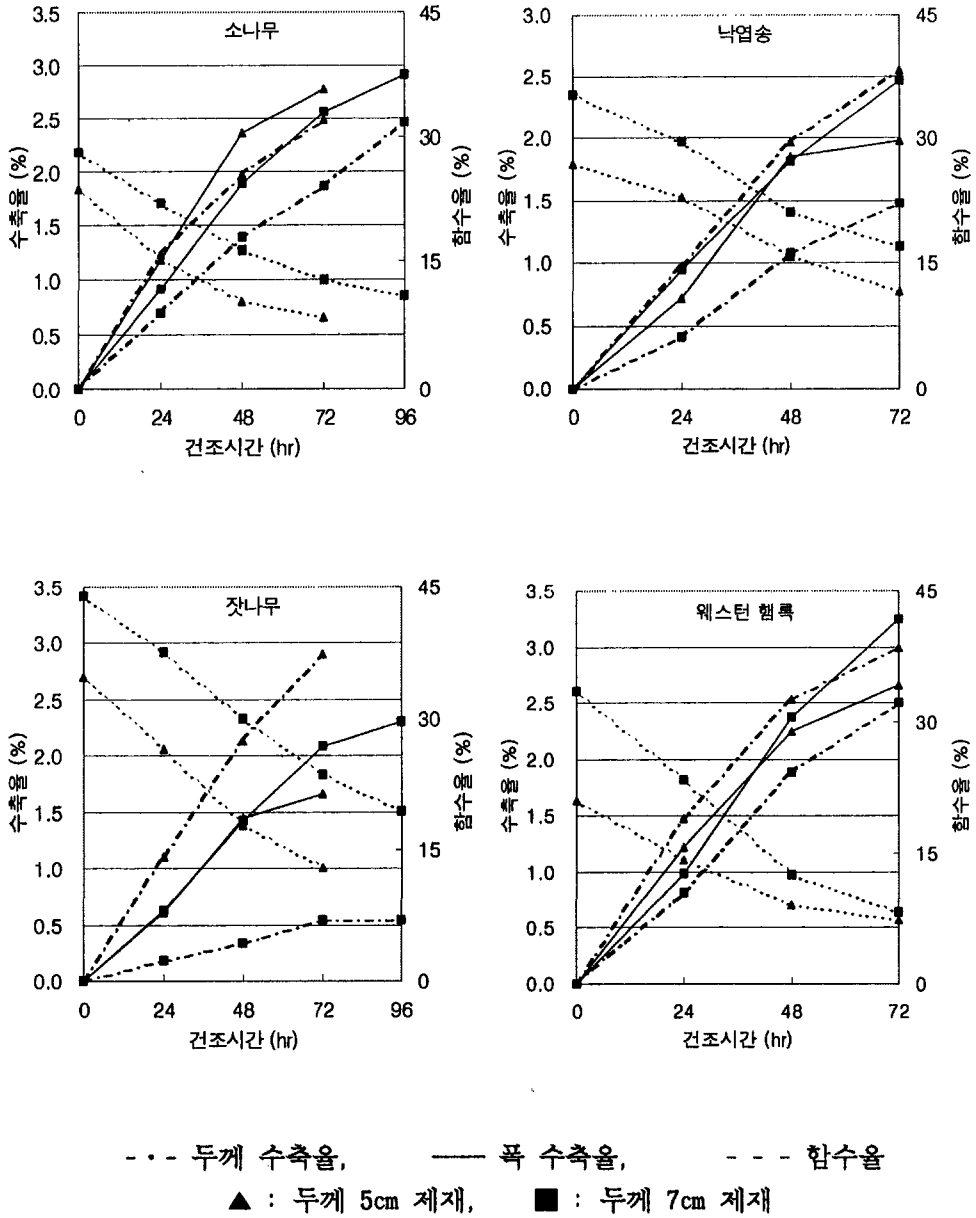


그림 2-3-20. 가열판 압착식 진공건조중 함수율과 수축율의 관계.  
 Figure 2-3-20. Relationship between moisture content and shrinkage of softwood lumber during vacuum-press drying.



표 2-3-4. 초기함수율에서 최종함수율까지 진공건조한 정목과 판목의 두께와 폭 수축율.

Table 2-3-4. Thickness and width shrinkage from initial MC to final MC for vacuum dried edge grained and flat grained lumber.

수종	제재두께 (cm)	정목		판목	
		두께수축율 (%)	폭수축율 (%)	두께수축율 (%)	폭수축율 (%)
소나무	3	4.93 (1.64)	3.36 (1.24)	4.61 (1.30)	3.94 (1.55)
	5	3.72 (1.50)	3.60 (0.94)	4.01 (1.71)	3.80 (1.36)
	7	4.95 (1.58)	2.73 (0.98)	3.97 (1.46)	3.51 (1.25)
	9	5.33 (1.30)	3.32 (0.84)	3.42 (1.46)	3.05 (1.39)
	11	3.52 (1.46)	2.03 (0.84)	2.88 (0.92)	2.59 (0.74)
	평균	4.31 (1.64)	2.92 (1.14)	3.87 (1.50)	3.45 (1.38)
갯나무	3	4.64 (1.89)	2.89 (0.77)	2.84 (1.24)	4.04 (2.71)
	5	3.35 (1.16)	1.67 (0.86)	2.83 (1.20)	2.13 (0.96)
	7	3.01 (1.46)	1.80 (0.57)	3.25 (1.77)	1.28 (0.64)
	9	3.65 (0.55)	2.67 (1.08)	3.05 (1.35)	2.91 (1.26)
	11	2.51 (0.97)	1.80 (0.90)	2.07 (1.09)	2.25 (1.22)
	평균	3.33 (1.49)	2.12 (0.97)	2.88 (1.40)	2.54 (1.76)
낙엽송	3	4.15 (0.98)	2.78 (1.05)	3.58 (1.46)	3.02 (1.25)
	5	3.26 (1.35)	1.94 (0.56)	2.74 (1.43)	2.41 (0.89)
	7	3.40 (0.97)	1.05 (0.51)	3.03 (1.34)	2.42 (1.35)
	9	3.58 (1.30)	1.30 (0.86)	2.17 (1.16)	1.52 (0.80)
	11	3.04 (1.60)	2.25 (1.07)	2.86 (1.52)	2.43 (0.69)
	평균	3.47 (1.32)	1.91 (1.09)	2.87 (1.43)	2.37 (1.13)
웨스턴 햄록	3	4.68 (1.28)	3.75 (1.10)	4.71 (1.38)	5.22 (1.19)
	5	4.98 (2.18)	2.55 (0.85)	4.80 (1.49)	4.23 (1.79)
	7	3.80 (0.69)	2.10 (0.88)	3.42 (0.96)	3.26 (1.31)
	9	4.34 (1.26)	2.84 (3.08)	2.82 (0.89)	3.25 (2.44)
	11	3.81 (1.80)	1.95 (0.69)	2.54 (1.01)	2.96 (1.56)
	평균	4.22 (1.65)	2.45 (1.67)	3.82 (1.48)	3.92 (1.87)
전수종	3	4.59 (1.51)	3.10 (1.07)	4.01 (1.54)	4.16 (1.90)
	5	3.87 (1.70)	2.60 (1.15)	3.45 (1.68)	3.08 (1.55)
	7	3.61 (1.33)	1.75 (0.09)	3.44 (1.42)	2.69 (1.46)
	9	4.29 (1.37)	2.51 (1.90)	2.88 (1.30)	2.71 (1.69)
	11	3.24 (1.55)	2.00 (0.88)	2.58 (1.20)	2.54 (1.11)
	평균	3.82 (1.59)	2.35 (1.29)	3.35 (1.53)	3.07 (1.70)

표 2-3-5. 함수율 12%에서 30%까지 진공건조한 정목과 판목의 두께와 폭 수축율.

Table 2-3-5. Calculated shrinkage of thickness and width from 30% to 12% MC for vacuum dried edge grained and flat grained lumber.

수종	제재 두께 (cm)	정목		판목	
		두께수축율 (%)	폭수축율 (%)	두께수축율 (%)	폭수축율 (%)
소나무	3	4.28 (1.88)	2.73 (0.77)	3.82 (1.24)	3.15 (1.00)
	5	3.28 (1.19)	3.16 (0.67)	3.64 (1.14)	3.52 (1.00)
	7	3.99 (1.32)	2.17 (0.65)	3.38 (1.09)	3.08 (0.74)
	9	4.32 (0.97)	2.70 (0.67)	3.42 (1.78)	3.12 (1.83)
	11	3.56 (1.12)	2.18 (0.92)	3.18 (1.15)	2.58 (0.74)
	평균	3.83 (1.34)	2.59 (0.85)	3.51 (1.31)	3.13 (1.17)
잣나무	3	3.71 (1.46)	2.31 (0.55)	2.37 (1.07)	3.34 (2.41)
	5	3.87 (1.72)	1.86 (0.65)	3.22 (1.77)	2.26 (0.99)
	7	4.13 (2.69)	2.81 (2.02)	3.57 (1.66)	2.10 (3.09)
	9	2.94 (0.58)	2.10 (0.80)	2.73 (1.31)	2.47 (0.91)
	11	3.09 (1.09)	2.27 (1.29)	3.18 (2.57)	3.03 (1.53)
	평균	3.50 (1.62)	2.29 (1.21)	2.98 (1.65)	2.59 (1.97)
낙엽송	3	3.44 (0.81)	2.31 (0.89)	2.96 (1.17)	2.48 (0.95)
	5	3.80 (1.59)	2.62 (1.58)	3.14 (1.67)	2.66 (0.91)
	7	5.07 (2.43)	1.68 (1.06)	3.78 (0.87)	2.94 (0.99)
	9	4.73 (2.76)	1.46 (0.68)	2.93 (1.94)	2.15 (1.30)
	11	3.73 (1.73)	2.85 (1.22)	2.98 (1.34)	2.77 (1.24)
	평균	4.14 (2.05)	2.20 (1.18)	3.16 (1.53)	2.60 (1.16)
웨스턴 햄록	3	3.55 (0.93)	2.84 (0.83)	3.61 (1.00)	4.03 (0.94)
	5	4.66 (1.51)	2.71 (1.45)	4.36 (1.25)	3.72 (1.14)
	7	3.05 (0.90)	1.87 (0.67)	3.04 (0.87)	2.94 (0.99)
	9	3.92 (1.07)	2.51 (2.44)	2.91 (0.93)	3.34 (2.22)
	11	3.62 (1.33)	2.29 (1.67)	3.10 (1.04)	3.10 (1.21)
	평균	3.85 (1.27)	2.41 (1.68)	3.44 (1.14)	3.49 (1.40)
평균	3	3.78 (1.41)	2.50 (0.77)	3.23 (1.23)	3.33 (1.52)
	5	3.85 (1.52)	2.66 (1.16)	3.57 (1.56)	3.01 (1.16)
	7	4.32 (2.18)	2.12 (1.36)	3.42 (1.23)	2.79 (1.75)
	9	4.10 (1.74)	2.20 (1.46)	2.98 (1.52)	2.76 (1.66)
	11	3.50 (1.33)	2.38 (1.31)	3.10 (1.57)	2.86 (1.20)
	총평균	3.82 (1.61)	2.37 (1.25)	3.27 (1.43)	2.96 (1.51)

## 5. 건조중과 건조목재의 건조응력

### 가. 건조중 함수율과 건조응력의 관계

4수종의 두께 5cm와 7cm 제재의 건조중 함수율과 건조응력의 관계는 그림 2-3-21과 같다. 두께 5cm 제재의 건조시간별 함수율은 7cm 제재의 것보다 급속하게 감소하였다. 낙엽송과 웨스턴 헴톡의 제재는 건조 48시간이후에 건조시간이 경과함에 따라 오히려 함수율이 증가하는 특이한 현상이 나타났는바, 이는 재내 재장부위에 따라 초기함수율 변이 또는 건조속도 차이에 기인된 것 같다.

함수율과 건조응력의 관계에서 보면 건조응력은 건조과정중 어떤 함수율 수준까지에서 함수율의 고저와 감소속도에 비례하여 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 일부 수종과 제재 두께, 즉 잣나무와 웨스턴 헴톡의 5cm 제재와 소나무 및 잣나무의 7cm 제재는 저함수율 영역에 이르러서 감소하는 경향을 나타내었다. 최대 건조응력은 제재 두께간에 차이가 있었고, 웨스턴 헴톡을 제외한 다른 수종의 7cm 제재 최대 건조응력은 5cm 제재의 것보다 더 컸었다. 최대 건조응력의 발생시기와 크기는 건조 초기할렬의 발생시기와 크기에 관계된다.

Simpson(1991)은 관행열기건조에서 건조응력의 발생은 hydrostatic tension과 수축을 차이에 기인되고, 표층은 건조초기에 인장응력, 건조후기에 압축응력을 나타내는 등 건조중 함수율과 건조응력의 변화에 대하여 보고하였다. Harris 등(1984)은 두께 2인치 red oak 제재의 고주파 건조중에는 표층은 초기와 중기에 인장응력을 나타내다가 건조후기에 인장 또는 압축상태를 나타내었고, 관행열기 건조와 고주파 진공건조중간에 건조응력의 패턴은 유사하였음을 보고하였다.

본 연구에서 대부분 제재의 표층은 건조 24시간후에 경미한 역표면경화응력을 나타내다가 그 이후에는 표면경화응력을 나타내고 있었는데, 표층의 응력상태는 관행열기건조와 고주파 진공건조의 것과 상이하였다. 이와 같은 결과는 건조중에 목재에 작용하는 압축력과, 또한 제재 두께방향에서 작은 온도경사에 의한 재내 부위별 고른 건조와 고른 수축에 기인된 것으로 생각된다.

### 나. 건조목재의 건조응력

4수종과 5두께 건조목재의 프롱시험에서 프롱(prong)의 거동은 거의 통직하였다. 건조응력의 정도를 나타내는 프롱의 양적 변위(quantifying displacement)는 그림 2-3-22와 같다. 모든 건조목재의 건조응력은 매우 경미하였다. 두께 11cm인 잣나무 제재의 중간온도 스케줄을 적용한 경우와 두께 9cm인 웨스턴 헴톡 제재의 약한 건조스케줄을 적용한 경우는 거의 영에 가까운 정도의 역표면경화

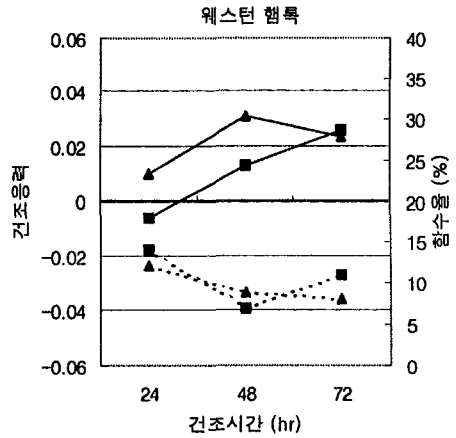
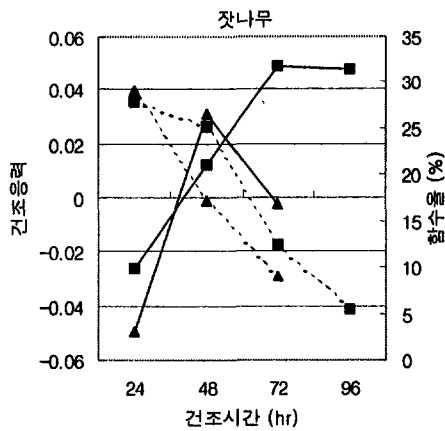
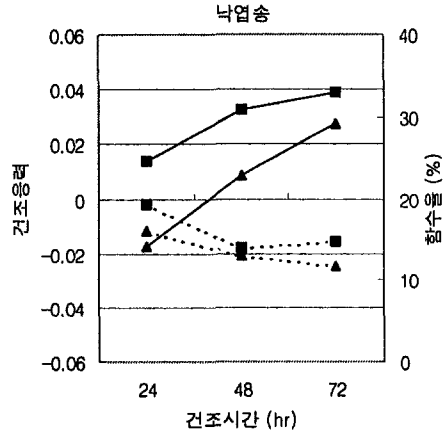
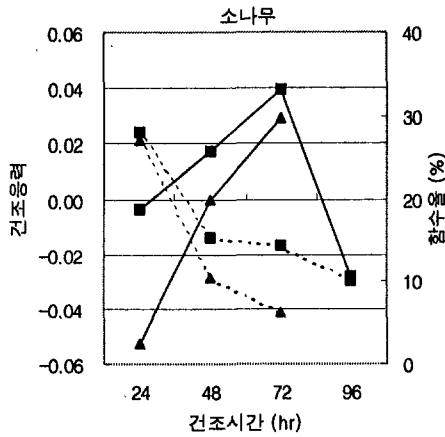
응력을 나타낸 것을 제외한 다른 수종의 제재 두께와 건조스케줄 적용한 건조목재는 매우 경미한 표면경화응력을 나타내었다. 건조응력 크기는 수종간, 제재 두께간 그리고 적용스케줄간에 일정하고도 뚜렷한 차이를 나타내지 않았다. 본 연구에서 프롱의 양적 변위가 가장 적은 것은 두께 7cm 낙엽송 제재의 약한 건조스케줄을 적용한 목재로서 0.003이었고, 가장 큰 것은 두께 11cm 낙엽송 제재의 강한 건조스케줄을 적용한 목재로서 0.144이었다. 4수종, 5두께 및 3건조스케줄 적용한 60처리중에서 양적 변위가 0.100이하인 것은 3처리로서 5%에 불과하였다.

Harris 등(1984)은 두께 2인치 red oak의 고주파 진공건조재와 열기건조재간에 표층과 내층의 응력분포 패턴은 유사함을 보고하였다. Simpson(1987)은 두께 1인치 red oak 제재의 고주파 진공건조재의 콘디손닝처리전 프롱의 양적 변위는 0.175이었으나, 콘디손닝처리후에 0.119로 감소하였으며, 32%정도 개량되었음을 보고하였다. 정 등(1989)은 두께 5cm인 다그러스퍼의 열기건조재의 양적 변위는 0.93이고, 두께 4cm와 5cm인 웨스턴 햄록의 양적 변위는 각각 0.80과 1.00으로서 두꺼운 제재의 경우가 더 컸었다. Rice(1988)는 넓고 두꺼운 제재는 좁은 제재보다 건조응력의 문제가 더 큼을 보고하였다.

일반적으로 열기건조, 고온건조 및 고주파 진공건조의 경우 상당한 크기의 건조응력이 잔류하기 때문에 건조응력을 제거하거나 완화하기 위해 건조종기에 콘디손닝처리를 적용하고 있다. 수종이 다르지만 가열판 압체식 진공건조재의 건조응력은 고주파 진공건조재의 경우보다 적었고, 또한 일부 수종에 국한되지만 열기건조재의 것보다 적었다. 건조목재 두께에 따라서 건조응력의 차이가 나타나지 않았다.

건조중에 발생하는 건조응력은 각종 활렬과 분할 등의 건조결함 발생과 밀접한 관련이 있고, 건조후에도 절삭과정과 절삭후에 건조목재의 치수변화를 야기하고 또한 목재가 틀어질 수 있기 때문에 콘디손닝처리를 실시하고 있다.

가열판 압체식 진공건조재는 건조응력이 거의 존재하지 않기 때문에 콘디손닝처리를 하지 않고도 바로 사용할 수 있을 것이다.



실선 : 건조응력,      점선 : 함수율  
 ▲ : 두께 5cm 제재,    ■ : 두께 7cm 제재

그림 2-3-21. 가열판 압체식 진공건조중 함수율과 건조응력의 관계.  
 Figure 2-3-21. Relationship between moisture content and drying stress of softwood lumber during vacuum-press drying.

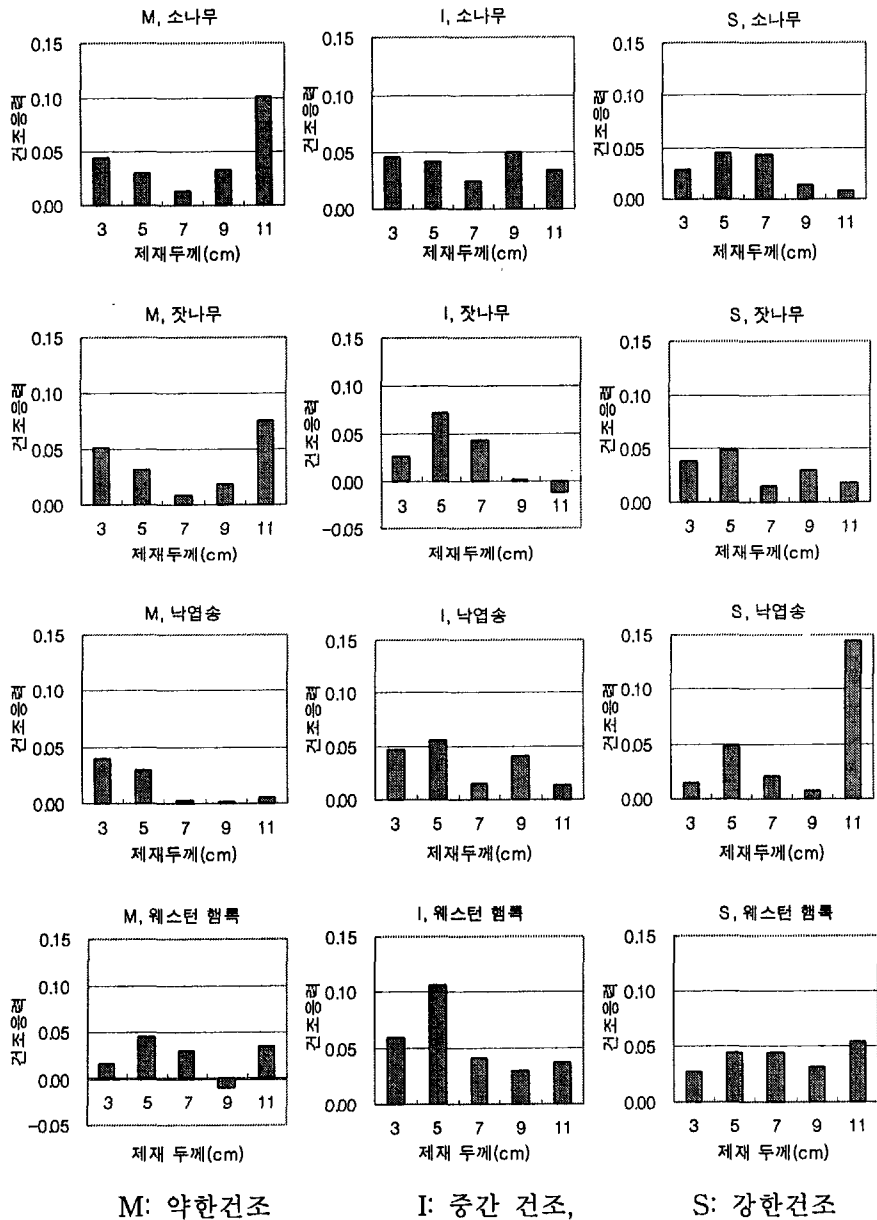


그림 2-3-22 . 건조스케줄별 침엽수 제재 두께별 건조용력.

Figure 2-3-22. Quantifying displacement of prong for softwood lumber thickness by drying schedule.

## 6. 할 렬

### 가. 적용건조스케줄별 할렬발생

4수종과 5두께 제재의 적용건조스케줄별 횡단면 할렬과 표면할렬이 생긴 할렬재 발생율과 최대길이, 내부할렬의 할렬재 발생율은 표 2-3-6~2-3-9와 같다.

#### 1) 횡단면 할렬

소나무 제재의 적용스케줄별 횡단면 할렬은 두께 5cm 제재는 건조스케줄의 건조온도가 높을수록 할렬재 발생율과 최대길이가 증가하였고, 다른 두께의 제재는 건조온도 증가에 따라 일정한 경향을 나타내지 않았지만, 강한 건조스케줄 적용시에 할렬재 발생율과 최대길이가 비교적 크게 나타났었다.

잣나무 제재의 경우 두께 7cm 제재는 건조온도가 높을수록 할렬재 발생율과 최대길이가 컸었으나, 다른 두께의 제재는 건조온도 증가에 따라 일정한 경향을 나타내지 않았다.

낙엽송 제재의 경우 모든 제재 두께에서 중간온도와 강한 건조스케줄 적용시에 할렬재 발생율과 최대길이가 증가하였다.

웨스턴 햄록의 경우는 적용건조스케줄에 따라 할렬재 발생율과 최대길이는 일정한 경향을 나타내지 않았다.

#### 2) 표면할렬

소나무 제재의 적용스케줄별 표면할렬은 두께 9cm 제재의 경우는 건조온도가 높을수록 할렬재 발생율과 최대길이가 증가하였으나, 다른 두께의 제재 경우는 건조스케줄의 강약에 따라 일정한 경향을 나타내지 않았다.

잣나무의 두께 9cm 제재는 건조온도가 높을수록 할렬재 발생율과 최대길이가 증가하였으나, 다른 두께의 제재 경우는 건조온도 차이에 따라 일정한 경향을 나타내지 않았다.

낙엽송의 두께 11cm 제재는 건조온도가 높을수록 할렬재 발생율과 최대길이가 증가하였으나, 다른 두께의 제재 경우 할렬재 발생율이 중간온도와 강한 건조스케줄 적용시에는 약한 건조스케줄 적용시보다 높았지만, 최대길이는 뚜렷한 차이를 나타내지 않았다.

웨스턴 햄록의 두께 5cm와 7cm 제재는 건조온도가 높을수록 할렬재 발생율이 증가하였으나 최대길이는 일정한 경향을 나타내지 않았다. 다른 두께의 제재 경우 건조스케줄에 따라 할렬재 발생율과 최대길이는 일정한 경향을 나타내지

않았다.

### 3) 내부할렬

4수종과 5두께 제재의 내부할렬은 어떠한 건조스케줄 적용에서도 발생하지 않았다. 이와 같은 결과는 목재건조에서 특이한 현상이다. 열기건조와 고주파 진공건조 등 가열에 의한 건조에서 초기조건이 강하면 건조후기에 내부할렬이 발생하는 것이 일반적이다. 가열판 압체식 진공건조의 경우 내부온도의 경사가 경미함에 따라 내부의 모든 부위가 골고루 건조됨에 따라 표층의 인장세트 (tension set)가 적고 건조후기에 내부의 인장응력이 적은데 기인된 것 같다.

## 나. 제재 두께별 할렬발생

4수종과 5두께 제재의 3가지 적용 건조스케줄을 종합하여 평균한 횡단면할렬과 표면할렬의 할렬재 발생율과 최대길이는 그림 2-3-23~2-3-24와 같다.

### 1) 횡단면할렬

소나무 제재 두께별 평균 할렬재 발생율과 최대길이는 3cm 제재의 경우 30%, 1.9cm와 5cm 제재의 경우 23%와 1.7cm, 7cm 제재의 경우 49%, 1.9cm와 9cm 제재의 경우 35%, 2.6cm와 11cm 제재의 경우 35%와 1.9cm로서 할렬재 발생율과 최대길이는 제재 두께간에 일정한 경향을 나타내지 않았다. 그리고 모든 두께의 평균 할렬재 발생율과 최대길이는 34%와 2.1cm로서 비교적 적었다.

잣나무 제재 두께별 평균 할렬재 발생율과 최대길이는 3cm 제재의 경우 49%와 1.6cm, 5cm 제재의 경우 81%와 2.3cm, 7cm 제재의 경우 65%와 3.2cm, 9cm 제재의 경우 70%와 3.6cm, 11cm 제재의 경우 95%와 2.9cm로서 두께가 증가할수록 할렬재 발생율과 최대길이는 비교적 증가하는 경향을 나타내었다. 그리고 모든 두께의 평균 할렬재 발생율과 최대길이는 72%와 2.8cm로서 비교적 적었다.

낙엽송 제재 두께별 평균 할렬재 발생율과 최대길이는 3cm 제재의 경우 77%와 1.1cm, 5cm 제재의 경우 65%와 1.6cm, 7cm 제재의 경우 86%와 2.3cm, 9cm 제재의 경우 67%와 2.2cm, 11cm 제재의 경우 70%와 3.3cm로서 두께가 증가함에 따라 할렬재 발생율과 최대길이는 일정한 경향을 나타내지 않았다. 그리고 모든 두께의 평균 할렬재 발생율과 최대길이는 73%와 2.1cm로서 비교적 적었다.

웨스턴 햄록 제재 두께별 평균 할렬재 발생율과 최대길이는 3cm 제재의 경우 30%와 1.1cm, 5cm 제재의 경우 40%와 1.5cm, 7cm 제재의 경우 60%와 2.2cm, 9cm 제재의 경우 70%와 2.4cm, 11cm 제재의 경우 70%와 4.4cm로서 두께가 두꺼



위집에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 그리고 모든 두께의 평균 할렬재 발생율과 최대길이는 54%와 2.6cm이었다.

수종별로 보면 할렬재 발생율은 소나무가 가장 적었고, 다음은 웨스턴 햄록, 잣나무와 낙엽송 순위였다. 최대길이는 소나무와 낙엽송이 가장 적었고, 다음은 웨스턴 햄록과 잣나무 순위였다.

우리나라는 일반적으로 원목길이가 6자로 조제되고 원목의 수송과 저목과정 중에 원목의 횡단면 할렬이 발생되고 있다. 이러한 원목을 켜서 공시한 제재는 원천적으로 횡단면 할렬이 발생할 소지가 내포되고 있다. 본 연구의 할렬발생 정도는 이러한 조건을 전제한다면 횡단면 할렬은 경미한 것으로 여겨진다.

## 2) 표면할렬

소나무 제재 두께별 평균 할렬재 발생율과 최대길이는 두께 3cm 제재의 경우 14%와 5.9cm, 5cm 제재의 경우 21%와 8.4cm, 7cm 제재의 경우 16%와 6.9cm, 9cm 제재의 경우 14%와 14.3cm, 11cm 제재의 경우 5%와 10.4cm로서 두께가 증가함에 따라 일정한 경향을 나타내지 않았다. 그리고 모든 두께의 평균 할렬재 발생율과 최대길이는 714%와 10.0cm이었다.

잣나무 제재 두께별 평균 할렬재 발생율과 최대길이는 3cm 제재의 경우 26%와 4.3cm, 5cm 제재의 경우 63%와 10cm, 7cm 제재의 경우 60%와 17.7cm, 9cm 제재의 경우 28%와 20.2cm, 11cm 제재의 경우 53%와 12.9cm로서 두께가 증가함에 따라 최대길이는 증가하는 경향을 나타내었으나 할렬재 발생율은 일정한 경향을 나타내지 않았다. 그리고 모든 두께의 평균 할렬재 발생율과 최대길이는 46%와 13.3cm로서 비교적 적었다.

낙엽송 제재 두께별 평균 할렬재 발생율과 최대길이는 두께 3cm 제재의 경우 44%와 7.9cm, 5cm 제재의 경우 67%와 8.4cm, 7cm 제재의 경우 79%와 13.5cm, 9cm 제재의 경우 56%와 24.8cm, 11cm 제재의 경우 65%와 33.5cm로서 두께가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 그리고 모든 두께의 평균치는 62%와 18.3cm로서 비교적 적었다.

웨스턴 햄록 제재 두께별 평균 할렬재 발생율과 최대길이는 3cm 제재의 경우 14%와 6.1cm, 5cm 제재의 경우 35%와 10.6cm, 7cm 제재의 경우 49%와 10.2cm, 9cm 제재의 경우 28%와 16.5cm, 11cm 제재의 경우 58%와 20.0cm로서 두께가 증가함에 따라 대체적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 그리고 모든 두께의 평균치는 37%와 14.0cm로서 비교적 적었다.

수종별로 보면 할렬재 발생율은 소나무가 가장 적었고, 다음은 웨스턴 햄록, 잣나무와 낙엽송 순위였다. 최대길이는 소나무가 가장 적었고, 잣나무와 웨스턴

햐목과 낙엽송 순위였다.

목재는 건조과정중에 수분경사가 생기고 표층이 섬유포화점이하가 되면 표층이 수축하려고 하나 섬유포화점 이상을 유지하는 내층에 의해 표층의 수축이 억제되어 표층에는 인장응력이 생긴다. 이 인장응력이 목재조직의 강도보다 크면 횡단면할렬과 표면할렬이 발생케 된다.

Bramhall 등(1976)에 의하면 할렬은 표층과 내층 사이, 방사방향과 접선방향 사이, 그리고 정상재와 생장이상재 사이 수축율 차이에 기인하며 판목은 정목보다 더 크게 일어난다고 하였다. Simpson(1991)은 횡단면할렬과 표면할렬은 두께와 폭이 증가할수록 발생하기 쉽다고 보고하였다. Rice(1999)는 건구온도 100 °F에서 230 °F까지 시간건조스케줄을 적용한 eastern spruce studs의 6개 잔적별 횡단면과 표면할렬재 발생율은 30.9~74.0 범위이고 평균치는 56.6%이며 내부할렬의 경우는 20.3%~63.0% 범위이고 평균치는 40.4%로서 미성숙재량에 의해서 과대하게 나타났음을 보고하였다.

침엽수재의 stud의 두께는 1-7/8인치에서 4인치 범위인 바, 본 연구의 제재 두께와 유사하여 본 연구의 결과를 Rice의 보고와 비교하여 보면 소나무와 웨스턴 햐목은 적었고 잣나무와 낙엽송은 큰 편에 속하는 등 수종별로 차이가 있었다. 침엽수 구조용재의 경우 횡단면할렬과 표면할렬이 경미한 정도는 고려치 아니하고 다만 분할과 윤할 등의 크기만을 규정하고 있다. 따라서 본 연구의 할렬 발생정도에 의한 품등을 구분한다면 분할과 윤할 등은 발생치 아니하였기 때문에 침엽수 구조용 제재 규격에 따라 품등을 구분하면 1종구조재와 2종구조재에서 1등에 속하여 우수한 품질을 나타내었다.

표 2-3-6. 건조스케줄별 가열판 압체식 진공건조 소나무 제재의 할렬.  
 Table 2-3-6. Checks of vacuum-press dried red pine lumber by drying schedules.

제재 두께 (cm)	건조 스케줄	횡단면 할렬		표면할렬		내부할렬
		할렬재 발생율 (%)	평균 최대 길이 (cm)	할렬재 발생율 (%)	평균 최대 길이 (cm)	
3	M* <sup>1</sup>	60	2.6 (1.0)* <sup>4</sup>	40	5.9 (4.6)	0
	I* <sup>2</sup>	7	0.6 (-)	-	-	0
	S* <sup>3</sup>	23	0.4 (0.2)	-	-	0
5	M	40	0.9 (0.6)	20	2.3 (0.7)	0
	I	54	1.9 (0.5)	31	14.2 (15.9)	0
	S	67	2.1 (1.4)	13	5.9 (2.8)	0
7	M	7	0.7 (-)	20	3.3 (2.5)	0
	I	73	2.6 (1.6)	7	10.2 (-)	0
	S	69	1.2 (0.9)	23	9.3 (5.3)	0
9	M	20	0.7 (0.4)	13	6.8 (0.8)	0
	I	92	2.6 (1.8)	39	13.7 (13.0)	0
	S	100	3.0 (2.1)	40	17.3 (19.0)	0
11	M	100	2.1 (1.2)	15	17.3 (5.2)	0
	I	60	0.6 (0.2)	47	3.8 (1.7)	0
	S	100	2.3 (1.1)	13	26.8 (20.8)	0

\*<sup>1</sup>: 약한 건조스케줄   \*<sup>2</sup>: 중간온도 건조스케줄   \*<sup>3</sup>: 강한 건조스케줄  
 \*<sup>4</sup>: 표준편차

표 2-3-7. 건조스케줄별 가열판 압착식 진공건조 잣나무 제재의 할렬.  
 Table 2-3-7. Checks of vacuum-press dried white pine lumber by drying schedules.

제재 두께 (cm)	건조 스케줄	횡단면 할렬		표면할렬		내부할렬
		할렬재 발생율 (%)	평균 최대 길이 (cm)	할렬재 발생율 (%)	평균 최대 길이 (cm)	
3	M <sup>*1</sup>	73	2.1 (0.7) <sup>*4</sup>	47	4.2 (4.5)	0
	I <sup>*2</sup>	62	1.1 (0.6)	31	4.6 (2.4)	0
	S <sup>*3</sup>	13	1.0 (0.6)	-	-	0
5	M	67	2.1 (1.3)	67	9.9 (9.9)	0
	I	100	2.8 (1.2)	60	11.0 (8.3)	0
	S	77	1.8 (0.9)	62	8.9 (6.9)	0
7	M	20	2.4 (2.1)	53	27.2 (22.4)	0
	I	77	2.2 (0.9)	39	12.5 (5.5)	0
	S	100	4.1 (2.2)	87	13.8 (11.8)	0
9	M	92	2.9 (1.6)	-	-	0
	I	20	2.6 (0.2)	13	7.5 (3.7)	0
	S	100	4.3 (2.3)	67	22.8 (16.6)	0
11	M	100	3.7 (2.1)	39	19.1 (14.1)	0
	I	87	1.5 (0.8)	53	5.4 (4.0)	0
	S	100	3.3 (2.0)	67	16.7 (15.4)	0

\*1: 약한 건조스케줄 \*2: 중간온도 건조스케줄 \*3: 강한 건조스케줄  
 \*4: 표준편차

표 2-3-8. 건조스케줄별 가열판 압착식 진공건조 낙엽송 제재의 할렬.  
 Table 2-3-8. Checks of vacuum-press dried larch lumber by drying schedules.

제재 두께 (cm)	건조 스케줄	횡단면 할렬		표면할렬		내부할렬
		할렬재 발생율 (%)	평균 최대 길이 (cm)	할렬재 발생율 (%)	평균 최대 길이 (cm)	할렬재 발생율 (%)
3	M* <sup>1</sup>	40	0.2 (0.1)* <sup>4</sup>	7	13.2 (-)	0
	I* <sup>2</sup>	100	2.0 (1.3)	60	9.5 (4.5)	0
	S* <sup>3</sup>	92	0.5 (0.3)	31	3.0 (1.9)	0
5	M	87	1.3 (1.0)	60	6.2 (5.0)	0
	I	100	1.7 (1.2)	85	5.8 (4.1)	0
	S	80	1.9 (1.0)	60	15.6 (8.9)	0
7	M	60	1.0 (1.0)	60	12.1 (8.9)	0
	I	100	2.4 (1.7)	100	15.1 (9.4)	0
	S	100	2.9 (2.0)	80	12.9 (8.4)	0
9	M	7	0.4 (-)	20	10.2 (6.8)	0
	I	100	2.4 (1.3)	100	30.7 (13.3)	0
	S	100	2.2 (1.4)	53	20.6 (11.2)	0
11	M	13	0.3 (0.0)	13	9.8 (6.6)	0
	I	100	3.7 (2.6)	87	26.6 (15.0)	0
	S	100	3.3 (1.2)	100	43.9 (19.3)	0

\*<sup>1</sup>: 약한 건조스케줄 \*<sup>2</sup>: 중간온도 건조스케줄 \*<sup>3</sup>: 강한 건조스케줄  
 \*<sup>4</sup>: 표준편차

표 2-3-9. 건조스케줄별 가열판 압착식 진공건조 웨스턴 헴록 제재의 합렬.  
 Table 2-3-9. Checks of vacuum-press dried western hemlock lumber by drying schedules.

제재 두께 (cm)	건조 스케줄	횡단면 합렬		표면합렬		내부합렬
		합렬재 발생율 (%)	평균 최대 길이 (cm)	합렬재 발생율 (%)	평균 최대 길이 (cm)	
3	M <sup>*1</sup>	20	0.6 (0.5) <sup>*4</sup>	-	-	0
	I <sup>*2</sup>	53	1.6 (0.7)	33	6.3 (2.0)	0
	S <sup>*3</sup>	15	0.2 (0.1)	8	4.9 (-)	0
5	M	13	1.0 (0.8)	20	4.3 (3.9)	0
	I	47	1.7 (1.7)	33	10.4 (5.5)	0
	S	62	1.5 (0.9)	54	13.6 (9.6)	0
7	M	13	1.2 (1.1)	20	5.1 (5.3)	0
	I	93	2.7 (1.4)	60	14.9 (13.9)	0
	S	77	1.5 (1.1)	69	7.1 (5.2)	0
9	M	20	1.4 (1.1)	7	6.2 (-)	0
	I	100	3.1 (1.3)	47	23.1 (25.1)	0
	S	92	1.9 (1.2)	31	7.5 (5.1)	0
11	M	100	6.9 (1.3)	80	22.5 (15.6)	0
	I	20	1.4 (0.8)	47	7.8 (6.7)	0
	S	92	2.9 (2.9)	45	29.6 (40.1)	0

\*1: 약한 건조스케줄 \*2: 중간온도 건조스케줄 \*3: 강한 건조스케줄  
 \*4: 표준편차

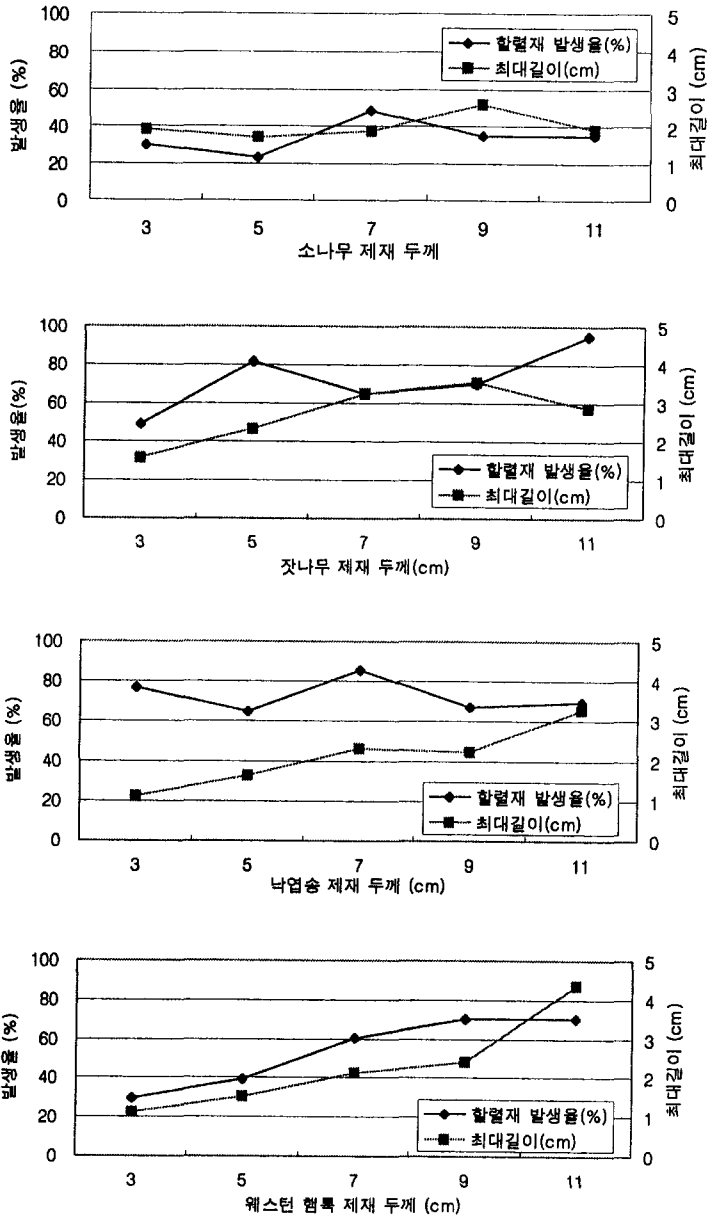


그림 2-3-23. 가열판 압제식 진공건조 제재 두께별 횡단면할렬.

Figure 2-3-23. End checks of vacuum-press dried softwoods lumber by thicknesses.

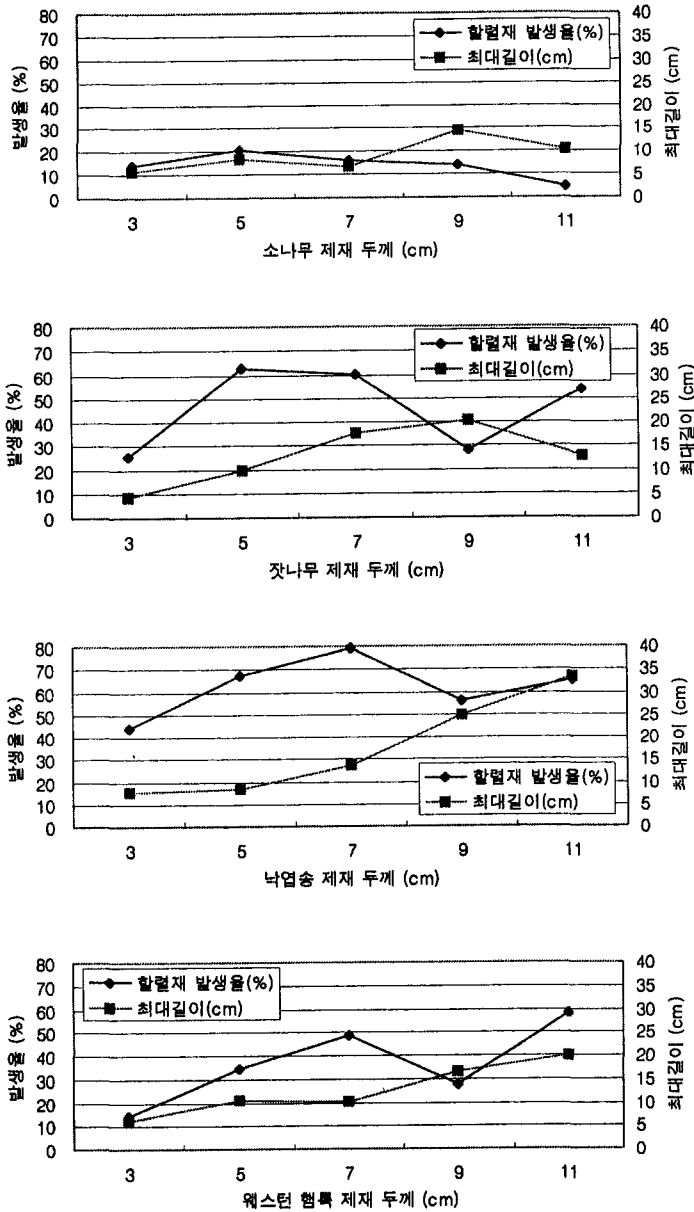


그림 2-3-24. 가열판 압체식 진공건조 제재 두께별 표면할렬.

Figure 2-3-24. Surface checks of vacuum-press dried softwoods lumber by thicknesses.



## 7. 틀어짐

### 가. 건조스케줄 적용별 틀어짐

4수종의 5두께 제재의 건조스케줄 적용별 건조목재의 길이굽음, 너비굽음, 측면굽음 및 비틀림의 최대높이와 굽은면의 최대높이대 재장의 비율은 표 2-3-10~2-3-13과 같다. 길이굽음, 측면굽음과 비틀림은 모든 수종과 제재 두께에서 발생하였으나, 너비굽음은 소나무, 잣나무와 낙엽송 제재는 일부 건조스케줄 적용의 경우에만 발생하였고 매우 경미하였다. 모든 수종과 제재 두께에서 3가지 건조스케줄 즉, 강한건조, 중간온도 건조 및 강한건조 스케줄에 따라서 각종 틀어짐의 정도는 일정한 경향을 나타나지 않았다. 이와 같은 결과는 건조스케줄간의 온도차이(2℃)가 너무 적어서 틀어짐에 영향하지 못하고, 다만 제재 개체간의 목취부위에 따른 연륜각의 크기와 목리방향 등의 인자에 의해서 좌우되는 것으로 생각된다.

Simpson 등(1988)은 loblolly pine의 열판 건조재의 틀어짐은 미성숙재를 많이 가진 가벼운 목재는 다른 부위의 무거운 목재보다 적었고, 근주원목에서 켄 제재는 상부원목(top log)에서 켄 제재보다 적었음을 보고한 바와 같이, 본 연구에서도 공시 제재의 목취부위가 일정치 않고 임의로 켄 제재를 사용하였기 때문에 제재에 따라 연륜각, 목리방향 및 물성이 다르기 때문에 틀어짐의 정도가 각각 상이한 것으로 생각된다.

### 나. 수종과 제재 두께별 틀어짐

4수종의 3가지 종류의 건조스케줄을 적용한 제재 두께별 길이굽음, 측면굽음 및 비틀림의 각각의 평균치는 그림 2-3-25~2-3-27과 같다. 길이굽음의 경우 소나무는 두께 7cm 제재에서 가장 컸었고 두께가 7cm보다 얇아지거나 두꺼울수록 감소하였다. 잣나무는 제재 두께에 따라 굽음의 정도는 일정한 경향을 나타내지 않았다. 그러나 낙엽송과 웨스턴 햄록은 두께가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있었다. 수종별로는 잣나무와 웨스턴 햄록이 적었고, 소나무는 중간이며 낙엽송이 심하였다.

측면굽음의 경우 소나무 제재는 두께 7cm에서 가장 컸고, 두께가 7cm보다 얇을수록 적었으나 두꺼운 경우에는 일정한 경향을 나타내지 않았다. 잣나무는 두께간에 거의 일정한 경향을 나타내었고 낙엽송과 웨스턴 햄록은 두께가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고 있었다. 수종별로는 잣나무와 웨스턴 햄록이 적었고 소나무와 낙엽송은 컸었다.

비틀림의 경우 소나무와 웨스턴 햄록은 두께가 증가함에 따라 커지는 경향을 나타내고 있었으며, 잣나무와 낙엽송은 두께 7cm에서 가장 컸고, 두께 7cm보다 얇아지거나 두꺼워질 때 감소하였다. 수종간에는 잣나무와 웨스턴 햄록이 적었고 소나무와 낙엽송은 컸었다.

각종 건조방법에 따른 틀어짐에 관한 보고로서 Simpson(1982)은 red oak 의 3수종의 재장 6피트인 생재부터 건조한 열판건조재와 생재를 함수율 25%까지 저온 제습건조한 후 열판 건조재간의 측면굽음, 길이굽음, 너비굽음과 비틀림의 정도는 수종간에 차이가 있었는데, red oak의 생재로부터 건조한 것과 예비건조 후 실시한 열판건조재의 틀어짐 정도는 각각 측면굽음의 경우 8/32와 10/32, 길이굽음은 12/32와 8/32, 너비굽음은 1/64와 1/64를 나타내었고, 예비건조가 틀어짐에 미치는 효과는 뚜렷하지 않았음을 보고하였다. Harris 등(1985)은 재장 7피트이고 두께 5/4인치인 참나무재의 고주파 진공건조재의 길이굽음, 너비굽음과 비틀림은 제습건조재의 것보다 적었고 측면굽음의 경우에만 차이가 없었으며, 모두 허용범위에 속하였다. 이와 같이 건조방법별로 틀어짐 차이는 고주파 진공건조재의 저수축율에 기인된 것으로 추정하였다. Simpson 등(1988)은 loblolly pine 열판건조재의 틀어짐은 열판의 가압력 25psi 적용의 경우가 50과 70psi 경우보다 적었음을 보고하였다. Simpson(1991)은 틀어짐은 섬유방향 수축율 차이에 기인되며 미성숙재와 생장이상재를 포함한 제재에서 발생한다고 보고하였다. Cividini(1995)는 가열판 압착식 열판건조재의 길이굽음, 너비굽음과 비틀림은 현저하게 감소되고 온도와 가압력의 영향을 받지 않았음을 보고하였다. 본 연구의 틀어짐도 적용온도에 따라서는 차이가 없었고 제재의 마이크로 휘브릴 각도, 연륜각의 크기와 목리방향 등의 영향을 크게 받는 것으로 생각되었다. Shupe 등(1997)은 spruce pine의 두가지 건조스케줄의 영향에서 고온건조재의 길이굽음과 측면굽음은 컸으나 비틀림은 차이가 없음을 보고하였다.

본 연구의 결과를 제재규격에 따라 평가해 보면, 미국 Southern Pine Inspection Bureau(1977)의 등급규격(grading rule)에 의하면 재장 8피트인 Select Structural, No. 1, Construction과 Stud 등급은 측면굽음 8/32인치, 길이굽음은 16/32인치, 비틀림은 12/32인치까지 허용하고 있으며, No. 2, No. 3, Standard와 Utility grade는 이들 이상의 틀어짐을 허용하고 있다.

우리나라 산림청 고시 개정-제정된 목재규격(1995)의 "침엽수 제재의 품등" 규격에서 작은 각재와 큰 각재의 굽음은 1등과 2등이 각각 0.2%와 0.3%이하로 규정하고 있는 바, 본 연구의 결과를 우리 규격에 따르면 1등, 2등과 3등에 속하는 비율이 소나무의 경우 각각 27%, 40%와 33%이었고, 잣나무의 경우 각각 40%, 53%와 7%이며, 낙엽송의 경우 각각 27%, 27%와 46% 이었고, 웨스턴 햄록의

경우 각각 33%, 60%와 7%로서 웨스턴 헵톡이 가장 우수하였으며, 다음은 잣나무, 소나무와 낙엽송 순위였다. 그러나 본 연구의 재장은 미국규격에 비하여 재장이 2피트 짧지만 상기 미국규격의 길이굵음은 16/32와 비교하여 보면 본 연구의 대부분 굵음은 규격치의 허용범위에 속하면서 상등품에 속하였다.

표 2-3-10. 건조스케줄 적용별 가열판 압착식 진공건조 소나무 제재의 틀어짐의 정도.

Table 2-3-10. Degree of warpage of vacuum-press dried red pine lumber by drying schedules.

제재 두께 (cm)	건조 스케줄	길이굽음		너비굽음		측면굽음		비틀림	
		최대 높이 (mm)	굽음 (%)	최대 높이 (mm)	굽음 (%)	최대 높이 (mm)	굽음 (%)	최대 높이 (mm)	비틀림 (%)
3	M <sup>*1</sup>	6.23 (2.23) <sup>*4</sup>	0.35 (0.12)	-	-	6.55 (4.44)	0.36 (0.25)	6.34 (1.80)	0.35 (0.10)
	I <sup>*2</sup>	2.80 (2.39)	0.12 (0.13)	-	-	2.36 (1.36)	0.13 (0.08)	3.82 (2.29)	0.21 (0.13)
	S <sup>*3</sup>	4.01 (1.71)	0.16 (0.13)	1.32 (0.02)	0.07 (0.00)	5.19 (1.81)	0.25 (0.19)	2.72 (1.23)	0.15 (0.07)
5	M	6.43 (3.45)	0.36 (0.19)	1.85 (-)	0.10 (-)	8.03 (7.65)	0.45 (0.42)	-	-
	I	5.38 (2.06)	0.30 (0.11)	-	-	3.07 (1.12)	0.17 (0.06)	4.32 (2.08)	0.24 (0.12)
	S	4.33 (1.00)	0.24 (0.13)	-	-	5.35 (2.63)	0.31 (0.26)	6.32 (3.01)	0.35 (0.17)
7	M	5.85 (3.91)	0.33 (0.22)	-	-	11.49 (8.80)	0.64 (0.49)	3.75 (1.77)	0.21 (0.10)
	I	4.49 (1.26)	0.25 (0.07)	-	-	5.54 (2.58)	0.31 (0.14)	7.29 (2.44)	0.41 (0.14)
	S	8.54 (3.83)	0.47 (0.21)	-	-	11.33 (8.73)	0.63 (0.48)	2.89 (1.88)	0.16 (0.10)
9	M	4.04 (2.15)	0.22 (0.12)	0.94 (-)	0.05 (-)	5.54 (6.09)	0.31 (0.34)	9.17 (4.24)	0.51 (0.24)
	I	4.41 (2.25)	0.24 (0.13)	-	-	4.83 (1.29)	0.27 (0.07)	5.11 (1.75)	0.28 (0.10)
	S	4.75 (2.26)	0.26 (0.13)	-	-	5.67 (3.66)	0.32 (0.20)	3.97 (1.65)	0.22 (0.09)
11	M	6.06 (5.67)	0.34 (0.31)	-	-	10.53 (4.93)	0.59 (0.27)	5.12 (2.94)	0.28 (0.16)
	I	2.41 (0.80)	0.13 (0.04)	-	-	4.20 (1.51)	0.23 (0.08)	7.20 (2.54)	0.40 (0.14)
	S	3.63 (0.82)	0.20 (0.05)	-	-	5.44 (2.32)	0.30 (0.13)	6.73 (2.51)	0.37 (0.14)

\*1: 약한 건조스케줄 \*2: 중간온도 건조스케줄 \*3: 강한 건조스케줄

\*4: 표준편차

표 2-3-11. 건조스케줄 적용별 가열판 압체식 진공건조 잣나무 제재의 틀어짐의 정도.

Table 2-3-11. Degree of warpage of vacuum-press dried white pine lumber by drying schedules.

제재 두께 (cm)	건조 스케줄	길이굽음		너비굽음		측면굽음		비틀림	
		최대 높이 (mm)	굽음 (%)	최대 높이 (mm)	굽음 (%)	최대 높이 (mm)	굽음 (%)	최대 높이 (mm)	비틀림 (%)
3	M <sup>*1</sup>	4.89 (1.50) <sup>**4</sup>	0.27 (0.08)	- -	- -	7.52 (5.69)	0.42 (0.32)	2.51 (1.25)	0.14 (0.07)
	I <sup>*2</sup>	4.83 (1.37)	0.27 (0.08)	- -	- -	4.16 (1.09)	0.23 (0.06)	2.72 (1.23)	0.15 (0.07)
	S <sup>*3</sup>	3.67 (1.77)	0.20 (0.10)	- -	- -	3.82 (2.19)	0.16 (0.14)	4.65 (2.13)	0.26 (0.12)
5	M	2.93 (0.52)	0.16 (0.03)	1.14 (0.46)	0.06 (0.03)	3.62 (1.57)	0.20 (0.09)	7.06 (2.20)	0.26 (0.24)
	I	5.03 (2.04)	0.28 (0.11)	- -	- -	7.22 (1.86)	0.40 (0.10)	3.40 (2.52)	0.19 (0.14)
	S	3.84 (1.15)	0.21 (0.06)	- -	- -	4.37 (2.51)	0.24 (0.14)	2.68 (1.15)	0.15 (0.06)
7	M	2.10 (0.48)	0.12 (0.03)	- -	- -	2.29 (0.92)	0.13 (0.05)	6.30 (2.65)	0.35 (0.15)
	I	3.61 (1.57)	0.20 (0.09)	- -	- -	4.95 (3.02)	0.28 (0.17)	4.41 (3.33)	0.25 (0.19)
	S	6.78 (2.81)	0.38 (0.16)	- -	- -	7.17 (5.00)	0.40 (0.28)	3.66 (1.77)	0.20 (0.10)
9	M	4.34 (2.05)	0.24 (0.11)	- -	- -	4.04 (1.39)	0.22 (0.08)	3.64 (1.35)	0.20 (0.08)
	I	2.11 (1.03)	0.10 (0.07)	- -	- -	2.51 (1.28)	0.14 (0.07)	6.02 (2.33)	0.33 (0.13)
	S	4.70 (0.83)	0.23 (0.10)	- -	- -	6.11 (2.97)	0.34 (0.17)	4.44 (2.18)	0.25 (0.12)
11	M	3.90 (0.83)	0.22 (0.05)	- -	- -	3.28 (0.74)	0.18 (0.04)	3.70 (1.41)	0.21 (0.08)
	I	3.73 (2.35)	0.21 (0.13)	- -	- -	4.31 (2.26)	0.24 (0.13)	3.24 (1.28)	0.18 (0.07)
	S	5.06 (1.74)	0.28 (0.10)	- -	- -	6.16 (2.11)	0.34 (0.12)	4.55 (4.74)	0.25 (0.26)

\*1: 약한 건조스케줄 \*2: 중간온도 건조스케줄 \*3: 강한 건조스케줄

\*4: 표준편차

표 2-3-12. 건조스케줄 적용별 가열판 압착식 진공건조 낙엽송 제재의 틀어짐의 정도.

Table 2-3-12. Degree of warpage of vacuum-press dried white larch lumber by drying schedules.

제재 두께 (cm)	건조 스케줄	길이굽음		너비굽음		측면굽음		비틀림	
		최대 높이 (mm)	굽음 (%)	최대 높이 (mm)	굽음 (%)	최대 높이 (mm)	굽음 (%)	최대 높이 (mm)	비틀림 (%)
3	M <sup>*1</sup>	2.60 (1.17) <sup>*4</sup>	0.14 (0.06)	-	-	2.48 (0.52)	0.12 (0.06)	5.47 (0.82)	0.30 (0.05)
	I <sup>*2</sup>	7.66 (3.10)	0.43 (0.17)	-	-	7.75 (4.21)	0.43 (0.23)	5.01 (2.42)	0.28 (0.13)
	S <sup>*3</sup>	8.91 (5.16)	0.50 (0.29)	-	-	9.78 (5.70)	0.54 (0.32)	1.80 (0.66)	0.10 (0.04)
5	M	5.55 (2.51)	0.31 (0.14)	1.28 (0.20)	0.07 (0.01)	4.37 (1.69)	0.24 (0.09)	-	-
	I	8.53 (3.36)	0.47 (0.19)	-	-	8.40 (4.89)	0.47 (0.27)	3.58 (2.44)	0.17 (0.14)
	S	6.10 (3.56)	0.34 (0.20)	-	-	6.95 (4.69)	0.39 (0.26)	3.85 (0.50)	0.21 (0.03)
7	M	4.61 (3.30)	0.26 (0.18)	-	-	4.88 (2.41)	0.27 (0.13)	10.55 (13.74)	0.59 (0.76)
	I	3.51 (2.09)	0.20 (0.12)	1.19	0.07	5.36 (3.43)	0.30 (0.19)	14.43 (6.54)	0.80 (0.36)
	S	6.06 (2.72)	0.34 (0.15)	-	-	5.92 (2.22)	0.33 (0.12)	2.36 (0.79)	0.13 (0.04)
9	M	3.83 (1.50)	0.21 (0.08)	-	-	2.35 (1.47)	0.13 (0.08)	5.61 (3.07)	0.31 (0.17)
	I	5.29 (2.99)	0.29 (0.17)	-	-	6.89 (4.97)	0.38 (0.28)	5.80 (2.54)	0.32 (0.14)
	S	5.71 (1.53)	0.32 (0.08)	-	-	6.62 (2.59)	0.37 (0.14)	4.10 (2.31)	0.23 (0.13)
11	M	2.71 (0.91)	0.15 (0.05)	1.06	0.06	3.36 (1.37)	0.19 (0.08)	4.82 (3.21)	0.27 (0.18)
	I	5.34 (2.61)	0.30 (0.14)	-	-	6.16 (1.37)	0.34 (0.08)	4.33 (2.70)	0.24 (0.15)
	S	3.18 (1.41)	0.18 (0.08)	-	-	4.88 (1.88)	0.27 (0.10)	5.66 (4.02)	0.31 (0.22)

\*1: 약한 건조스케줄 \*2: 중간온도 건조스케줄 \*3: 강한 건조스케줄

\*4: 표준편차

표 2-3-13. 건조스케줄 적용별 가열판 압착식 진공건조 웨스턴 헵록 제재의 틀어짐의 정도.

Table 2-3-13. Degree of warpage of vacuum-press dried white western hemlock lumber by drying schedules.

제재 두께 (cm)	건조 스케줄	길이굽음		너비굽음		측면굽음		비틀림	
		최대 높이 (mm)	굽음 (%)	최대 높이 (mm)	굽음 (%)	최대 높이 (mm)	굽음 (%)	최대 높이 (mm)	비틀림 (%)
3	M <sup>*1</sup>	2.19 (1.54) <sup>*4</sup>	0.12 (0.09)	- -	- -	3.41 (1.84)	0.17 (0.11)	2.12 (0.54)	0.12 (0.03)
	I <sup>*2</sup>	7.35 (0.88)	0.41 (0.05)	- -	- -	6.43 (2.13)	0.36 (0.12)	2.61 (0.80)	0.14 (0.04)
	S <sup>*3</sup>	4.61 (1.89)	0.26 (0.11)	- -	- -	5.10 (1.50)	0.28 (0.08)	3.39 (2.20)	0.19 (0.12)
5	M	2.24 (1.09)	0.12 (0.06)	- -	- -	2.44 (0.22)	0.14 (0.01)	2.04 (1.47)	0.11 (0.08)
	I	4.31 (0.85)	0.24 (0.05)	- -	- -	4.70 (1.81)	0.26 (0.10)	3.39 (0.92)	0.19 (0.05)
	S	4.10 (1.89)	0.23 (0.11)	- -	- -	5.87 (2.96)	0.33 (0.16)	4.53 (3.02)	0.25 (0.17)
7	M	3.34 (1.11)	0.19 (0.06)	- -	- -	4.36 (2.66)	0.24 (0.15)	7.98 (1.32)	0.44 (0.07)
	I	5.42 (2.30)	0.30 (0.13)	- -	- -	4.89 (1.85)	0.27 (0.10)	4.13 (1.23)	0.23 (0.07)
	S	3.94 (1.30)	0.22 (0.07)	- -	- -	5.60 (2.96)	0.31 (0.16)	1.89 (0.49)	0.11 (0.03)
9	M	3.66 (2.02)	0.20 (0.11)	- -	- -	3.44 (0.95)	0.19 (0.05)	12.12 -	0.67 -
	I	3.75 (0.84)	0.21 (0.05)	- -	- -	4.24 (1.62)	0.21 (0.12)	3.16 (0.78)	0.18 (0.04)
	S	4.46 (1.43)	0.25 (0.08)	- -	- -	5.84 (3.11)	0.32 (0.17)	1.87 (0.46)	0.10 (0.03)
11	M	3.82 (1.52)	0.21 (0.08)	- -	- -	4.92 (2.01)	0.27 (0.11)	5.68 (3.49)	0.32 (0.19)
	I	3.18 (1.00)	0.18 (0.06)	- -	- -	2.91 (1.35)	0.16 (0.08)	- -	- -
	S	4.21 (0.57)	0.23 (0.03)	- -	- -	5.81 (3.01)	0.32 (0.17)	5.66 (4.02)	0.31 (0.22)

\*1: 약한 건조스케줄 \*2: 중간온도 건조스케줄 \*3: 강한 건조스케줄

\*4: 표준편차

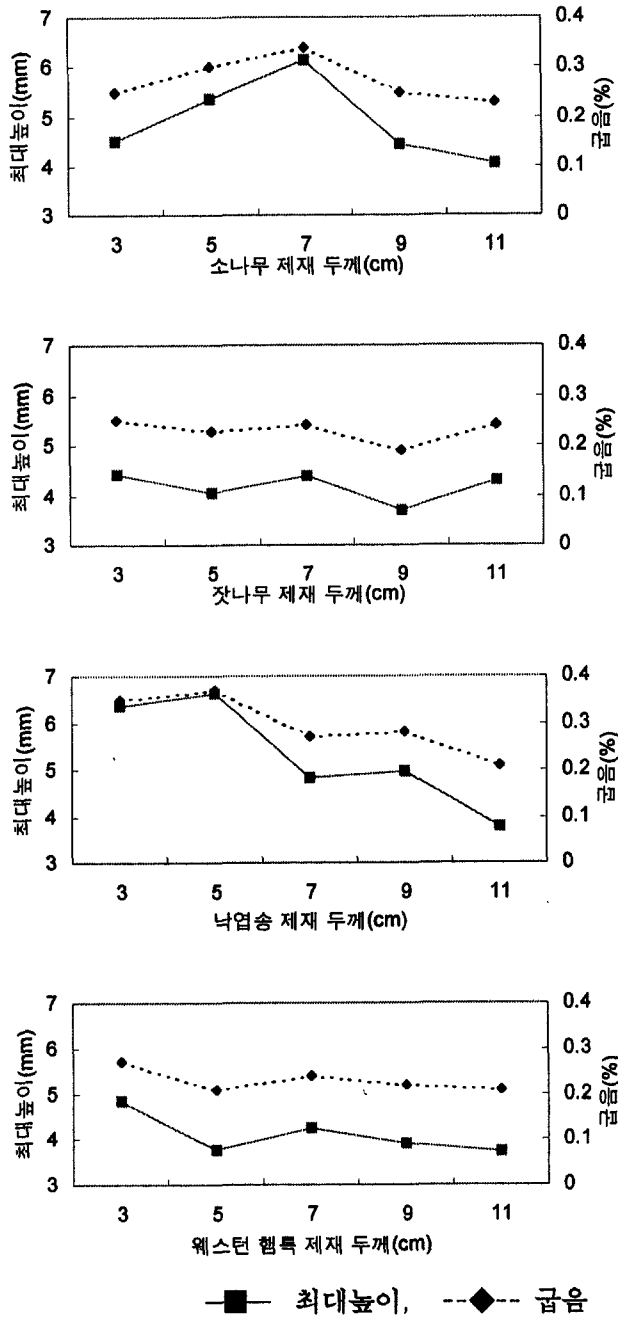
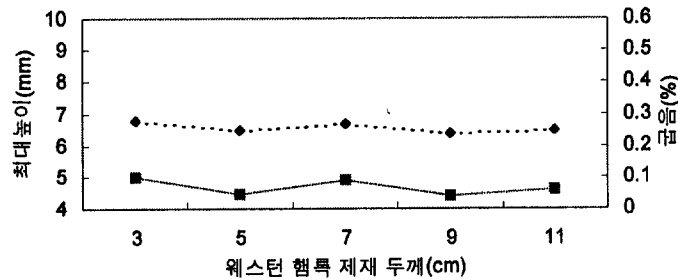
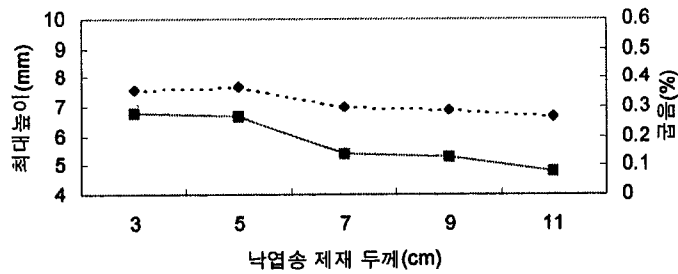
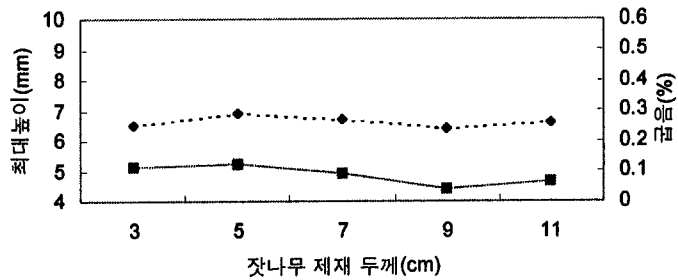
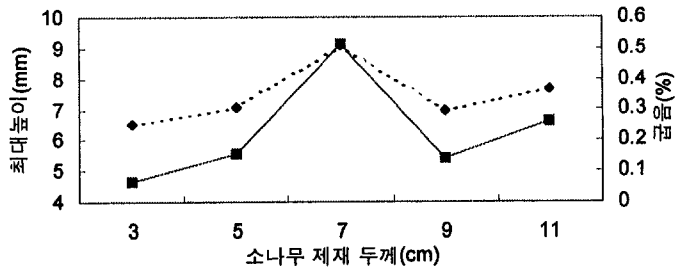


그림 2-3-25. 가열판 압체식 진공건조 제재 두께별 길이습윤.

Figure 2-3-25. Bow of vacuum-press dried softwoods lumber by thickness.





—■— 최대높이, --◆-- 굽음

그림 2-3-26. 가열판 압착식 진공건조 제재 두께별 측면굽음.  
 Figure 2-3-26. Crook of vacuum-press dried softwoods lumber by thickness.

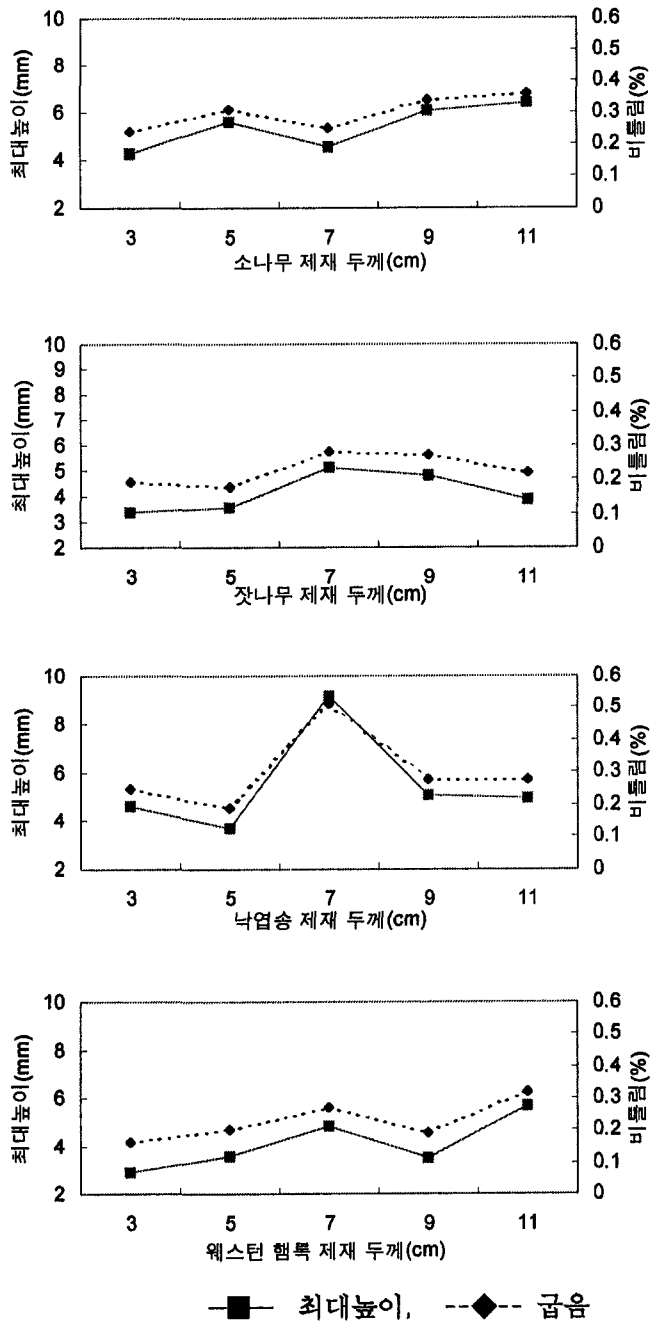


그림 2-3-27. 가열판 압착식 진공건조 제재 두께별 비틀림.

Figure 2-3-27. Twist of vacuum-press dried softwoods lumber by thickness.

## 8. 건조목재의 평형함수율과 기계적 성질

### 가. 평형함수율

공시 4수종의 진공건조재의 성질을 알고자 천연건조재의 성질과 비교코저 이들 건조목재의 평형함수율, 종압축강도, 휨강도 및 탄성계수의 평균치와 표준편차, 그리고 진공건조재와 천연건조재의 성질간의 t검정 결과는 표 2-3-14와 같다.

소나무, 잣나무, 낙엽송과 웨스턴 햄록의 진공건조재의 평형함수율은 기건재의 것보다 각각 2.2%, 2.4%, 2.2% 및 3.0% 감소하였고, 통계적으로 1% 수준에서 유의적인 차이가 나타났었다.

Lee 등(1984)은 동일 온도와 습도 조건에서 red oak의 고주파 진공건조재의 평형함수율은 제습건조재의 것보다 0.62% 감소하였다는 보고한 내용과 부합하였다.

### 나. 기계적성질

이들 수종의 기계적성질의 비교에서 종압축강도의 경우 소나무, 잣나무와 웨스턴 햄록의 진공건조재는 기건재의 것보다 각각 19.3%, 22.9%와 18.3% 증가하였으며, 통계적으로 1% 수준에서 유의적 차이를 나타내고 있었다. 그러나 낙엽송 진공건조재는 종압축강도가 기건재의 것보다 약간 컸었지만 유의적 차이는 나타나지 않았다.

휨강도의 경우 소나무, 잣나무 진공건조재는 기건재의 것보다 약간 큰 값을 나타내고 있었으나 통계적으로 유의적 차이를 나타내지 않았다. 그러나 낙엽송과 웨스턴 햄록 진공건조재는 기건재의 것보다 각각 23.0%와 23.8% 증가하였으며 1% 수준에서 유의적 차이를 나타냈었다.

탄성계수의 경우 웨스턴 햄록 진공건조재만이 기건재의 것보다 6.9% 증가하였고 5% 수준에서 차이가 나타났을뿐, 소나무, 잣나무와 낙엽송 등은 유의적 차이를 나타나지 않았다.

Hittmeier 등(1968)은 red oak 등 9수종의 할렐 등 건조결함이 없는 열판 건조재의 인성(toughness), 경도와 마모는 관행열기건조의 것과 차이가 없다고 보고하였으며, Wengert 등(1982)은 참나무의 고주파 진공건조재와 관행열기건조간에 경도와 인성은 차이가 없음을 보고하였다. Lee 등(1984)은 red oak의 고주파 진공건조와 제습건조간의 휨강도, 탄성계수, 종전단강도 및 경도는 유의적 차이가 나타나지 않았고, 다만 제습건조재의 종압축강도는 고주파 진공건조재보다

약 5%정도 더 컸었는데, 이는 제습건조재의 비중이 진공건조재의 것보다 크게 기인된 것이라고 보고하였다.

이상과 같이 고주파 진공건조재의 기계적성질과 다른 건조법에 의한 건조재의 성질간의 차이는 수종과 강도성질에 따라 일부의 경우는 같거나, 또는 차이가 나타나는 등 상이하게 보고되었다.

본 연구결과에서 진공건조재의 기계적성질은 대체적으로 기건재의 것보다 높게 나타나고 있었다. 이와 같은 결과는 목재의 함수율이 감소할수록 강도가 증가될 수 있기 때문에 진공건조재의 함수율이 기건재의 것보다 더 낮은 것도 한 요인으로 작용되었을 것이다.

표 2-3-14. 가열판 압착식 진공건조재와 기건재간의 평형함수율과 기계적성질의 비교.

Table 2-3-14. Comparison of EMC and mechanical properties between vacuum-press dried and air dried wood.

수종	건조처리	평형함수율 (%)	종압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	휨강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	탄성계수 (kg/cm <sup>2</sup> )
소나무	천연건조재	13.9(0.42) <sup>*1</sup>	352(19.9)	680(39.6)	76360(3736)
	진공건조재	11.7(0.89)	420(47.4)	737(96.2)	79370(8428)
	증감율(%) <sup>*2</sup>	-15.8	+19.3	+8.4	+3.9
	t값	7.025 <sup>**</sup>	5.465 <sup>**</sup>	1.941 <sup>ns</sup>	0.946 <sup>ns</sup>
잣나무	천연건조재	13.7(0.56)	297(40.6)	612(24.5)	67070(4720)
	진공건조재	11.3(0.25)	365(53.5)	620(111.0)	65300(13820)
	증감율(%)	-17.5	+22.9	+1.3	-2.6
	t값	12.522 <sup>**</sup>	5.325 <sup>**</sup>	0.657 <sup>ns</sup>	0.070 <sup>ns</sup>
낙엽송	천연건조재	13.7(0.27)	505(20.9)	817(69.7)	95940(5008)
	진공건조재	11.5(0.37)	584(77.5)	1005(134.2)	95620(14800)
	증감율(%)	-16.1	+15.6	+23.0	-0.3
	t값	15.668 <sup>**</sup>	1.959 <sup>ns</sup>	5.505 <sup>**</sup>	0.345 <sup>ns</sup>
웨스턴 햄록	천연건조재	14.4(0.49)	334(12.3)	629(38.4)	77940(3645)
	진공건조재	11.4(0.66)	395(54.7)	779(87.0)	83300(3458)
	증감율(%)	-20.8	+18.3	+23.8	+6.9
	t값	11.525 <sup>**</sup>	3.329 <sup>**</sup>	5.144 <sup>**</sup>	2.470 <sup>*</sup>

\*<sup>1</sup> : 표준편차를 표시함

\*<sup>2</sup> : 천연건조재 성질을 기준으로 한 증감율임

\* > t=2.262, t(9, 0.05)=2.262

\*\* > t=3.250, t(9, 0.01)=3.250

## 9. 건조소요에너지와 비용

### 가. 건조시간과 소요에너지의 관계

4수종의 5두께 제재의 건조시간별 증발수분(kg)당 소요전기에너지(kwh)는 그림 2-3-28과 같다. 모든 수종과 제재 두께의 증발수분당 전기에너지는 전반적으로 보면 건조시간 경과(함수율 감소)에 따라 증가하였다. 증가 패턴은 건조초기에 비교적 급속하게 증가하다가, 그 후 거의 일정하게 유지된 후 다시 급속하게 증가하는 3단계 변화추세를 나타내고 있었다. 건조기간중 건조스케줄의 온도를 상승시켰을 때 건조속도가 촉진되어 에너지 소비는 감소하였다.

건조 첫날 가열기간중에는 목질과 함수수분을 초기 설정온도까지 상승과 더불어 건조기의 내부기기의 가열 등에 의한 열에너지가 소요되기 때문이다. 가열기간중에 소요되는 열량은 목재비중 또는 초기함수율이 높을수록 증가하였다. 가열기간이후에 공급되는 열은 자유수와 결합수 증발에 소요된다. 자유수 증발에는 기화 잠열만 소요되기 때문에 자유수가 존재하는 기간에는 전기에너지가 거의 일정하게 소요되어진다. 그러나 자유수가 제거된 다음에 결합수 증발에는 기화잠열뿐만 아니라 흡착열이 요구된다. 흡착열은 결합수의 함수율이 감소함에 따라 곡선적으로 증가되기 때문에 건조후기, 특히 저함수율 범위에서 건조에는 전기에너지 소요량이 증가되고 있었다.

Simpson(1991)에 의하면 흡착열은 함수율이 20%수준부터 이하로 감소할수록 지수곡선적으로 증가한다고 보고하였는데, 본 연구의 건조중 함수율도 대략 20%수준에 도달하는 시간이후부터는 건조시간이 경과할수록 소요전기에너지는 지수적 증가를 나타내고 있었다.

### 나. 증발수분당 전기에너지

침엽수 4수종의 제재 두께별 증발수분당 소요된 전기에너지는 표 2-3-15와 같고, 제재 두께와 증발수분당 소요된 전기에너지의 관계는 그림 2-3-29와 같다.

전 건조기간동안 4수종의 증발수분당 전기에너지의 평균치는 두께 3cm 제재의 혼합잔적의 경우 0.488kWh/kg이었다. 두께 5cm 제재의 혼합잔적의 경우 0.484kWh/kg로서 서로 비슷하였다. 두께 7cm 제재의 경우 소나무와 잣나무의 혼합잔적의 경우 0.617kWh/kg는 낙엽송과 웨스턴 햄록의 혼합잔적의 경우 0.900kWh/kg보다 적었고, 4수종의 가중평균치는 0.691kWh/kg이었다. 두께 9cm 제재의 경우 소나무와 잣나무의 혼합잔적의 0.691kWh/kg는 낙엽송과 웨스턴 햄록의 혼합잔적의 0.891kWh/kg보다 적었고, 4수종의 가중평균치는 0.767kWh/kg이

었다. 두께 11cm 제재의 경우 소나무와 웨스턴 헴록의 혼합잔적의 0.699kWh/kg는 잣나무와 낙엽송의 혼합잔적의 1.084kWh/kg보다 적었고, 4수종의 가중평균치는 0.888kWh/kg이었다.

제재 두께가 증가할수록 건조소요에너지는 증가하였다. 두께 7cm이상인 제재의 경우 수종의 잔적 그룹간에 증발수분당 소요되는 전기에너지는 차이가 있었다. 증발수분당 전기에너지는 건조속도가 큰 소나무, 또는 웨스턴 헴록이 잔적된 그룹에서 적었고, 건조속도가 느린 잣나무, 또는 낙엽송이 잔적된 그룹에서 컸었다.

Resch(1990)에 의하면 증발수분 kg당 에너지 요구량은 소재, 단판과 파티클의 대류식 건조의 경우 1.11~3.33kWh이 소요되고, 소재의 고주파 진공건조의 경우는 1.67kWh정도 소요된다고 보고하였다. Avramidis 등(1992)은 3가지 수종, 즉 태평양 연안산 헴록, 다그라스 피와 웨스턴 레드시더의 여러 치수를 혼합잔적하여 고주파 진공건조한 결과 증발수분 kg당 소요되는 전기에너지는 각각 2.406kJ, 2.639kJ과 2.603kJ이 소요되었다고 보고하였다. 또한 Perré 등(1995)은 초기함수율이 거의 동일한 두께 27mm 참나무와 너도밤나무 판재의 가열판 압체식 진공건조에서 에너지 소비량은 각각 2.61과 1.43kWh/kg이고, hot climatised air kiln에서 두께 27mm와 54mm 참나무 제재의 열기건조의 경우 에너지 소비량은 각각 3.14과 4.00kWh/kg으로 보고하였는데, 참나무와 같이 건조속도가 느린 수종과 그리고 두꺼운 제재일수록 에너지 요구량이 컸었다.

본 연구에서 소요에너지는 참나무와 너도밤나무의 것보다 적었고, 공시 수종간에서도 건조속도가 느린 낙엽송은 건조속도가 빠른 소나무보다 컸었다.

가열판 압체식 진공건조의 소요에너지는 제재의 두께가 두꺼울수록 증가하였는데, 이는 목재 두께가 두꺼울수록 내부수분이 외부로 이동거리가 증가되면서 건조속도가 느려지기 때문이다. 본 연구의 에너지 소비량은 기존 고주파 진공건조와 열기건조의 경우보다 적었다.

수분증발에 소요되는 열량은 목재의 초기함수율과 최종함수율의 고저에 따라 달라졌다. 초기함수율과 최종함수율이 낮을수록 소요되는 에너지는 증가하게 되는 바, 본 연구에서도 모든 수종과 제재 두께에서 소요되는 에너지는 초기함수율과 최종함수율이 높을수록 적었다. 특히 최종함수율이 극히 낮을수록 소요되는 에너지는 매우 높았다. 따라서 목재의 건조도는 사용장소에 따라 알맞게 건조하여야 되고 과도 건조는 에너지가 낭비되기 때문에 지양되어야 할 것이다.

#### 다. 전기에너지의 비용

침엽수 4수종의 제재 두께별로 생재비중 0.45인 제재목 1m<sup>3</sup>(300사이)를 잔적하고 초기함수율 50%에서 최종함수율 15%까지 건조하는 데에 소요되는 전기에너지 비용의 산출 결과는 표 2-3-16과 같이 매우 저렴하였다. 두께 3cm 제재는 m<sup>3</sup>당 3,106원이 소요되었고 11cm 제재는 5,972원이 소요된 바와 같이 제재 두께가 증가함에 따라 전기 비용은 약간씩 증가하였다. 본 연구의 비용 산출 조건과 다른 경우, 즉 초기함수율이 더 높을 때에는 증발 수분당 전기에너지는 덜 소요되지만 전체 전기 소비량과 비용은 증가하게 된다. 또한 생재비중이 0.45보다 적을 경우에는 증발 수분량, 전기 소비량과 비용이 감소하게 될 것이다.

건조에 소요되는 에너지는 건조 방법에 따라 차이가 있고, 동일한 건조방법에 있어서도 수종, 목재의 두께와 투과성의 크기 초기함수율과 최종함수율 등 목재 조건과 건조스케줄의 강약에 따라 차이가 있게 된다. 건조비용에 영향을 미치는 에너지, 세금과 보험료, 노무, 시설과 장비, 재고비 등의 주요인자는 건조시스템에 좌우된다. 건조시스템에 따라 사용하는 연료의 종류가 달라지고 에너지 비용이 크게 영향을 끼치게 된다. 또한 건조시스템에 따라 건조목의 품질 수준과 degrade cost에 영향을 받는다. degrade cost는 수종과 목재값에 따라 크게 영향을 받는다. Lamb 등(1984)은 전기제습건조의 경우 생재에서 함수율 22%까지 1MBF를 건조하는 전체비용은 \$28.5이고 전기에너지 비용은 \$14.30로서 약 50% 차지하였고, 열기건조의 경우 생재에서 함수율 6%까지 1MBF를 건조하는 비용은 건조일수 7일과 21일 소요될 때 전체비용은 각각 \$37.23과 \$74.30이었고, 스팀과 전기비용은 각각 \$12.75와 \$38.25가 소요되었음을 보고한 바와 같이 에너지 비용이 상당한 부분을 점유하고 있음을 알 수 있다. 또한 Avramidis 등(1997)은 침엽수재의 고주파 진공건조에서 얇은 목재보다 두꺼운 목재에서 건조비용이 절감되었는데 두께 101mm 이상 제재의 건조비용은 열기건조에서보다 최소 15~25% 절감되었음을 보고하였다. 가열판 압체식 진공건조에 관한 에너지 소요량과 비용이라든가, 또한 우리나라에서는 건조비용에 관하여 보고되어 있지 않고 에너지 비용은 나라에 따라 상이하기 때문에 본 연구의 결과는 비교하기 어렵지만 전기에너지 비용과 전체 건조비용은 매우 크게 절감되는 사실을 알 수 있었다. 관행열기건조의 경우는 두께가 증가함에 따라 건조시간이 크게 연장되기 때문에 건조중 벽체 등 구조물을 통한 放熱과 환기공기에 의한 열손실이 클 수 밖에 없기 때문에 이 제재 두께가 건조 소요에너지와 비용에 미치는 영향은 매우크지만 본 연구에서는 제재 두께가 건조 소요에너지 비용에 미치는 영향은 매우 적었다. 따라서 가열판 압체식 진공건조는 대형 구조용재의 건조에서 더욱 효과적인 건조법임이 밝혀졌다.



표 2-3-15. 침엽수 제재두께별 증발수분량과 소요전력량.

Table 2-3-15. Amount of water evaporation and electrical energy consumption by the thickness of softwood lumber.

제재 두께 (cm)	건조 회수	수종별 증발수분량 (kg)					소요전력량 (kWh)
		소나무	잣나무	낙엽송	웨스턴 햄록	소계	
3	1	19.666	20.552	7.238	11.734	59.190	27.19
	2	23.056	10.574	8.252	12.736	54.618	33.38
	3	12.031	8.332	6.748	18.242	45.353	17.07
	소계	54.753	39.458	22.238	42.712	159.161	78.01
5	1	9.100	11.886	7.298	6.420	34.704	26.90
	2	20.611	21.082	9.964	23.258	74.915	33.47
	3	20.636	17.224	16.486	26.122	80.468	31.57
	소계	50.347	50.192	33.748	55.800	190.087	91.94
7	1	-	-	12.869	14.276	27.145	26.52
	2	38.883	24.776	-	-	63.659	49.36
	3	-	-	17.084	32.692	49.776	42.72
	4	46.391	17.930	-	-	64.321	52.90
	5	36.356	21.816	15.764	17.594	91.530	33.25
	소계	121.630	64.522	45.717	64.562	296.431	204.75
9	1	41.396	60.432	-	-	101.828	68.09
	2	-	-	23.076	36.491	59.567	62.17
	3	57.837	18.205	-	-	76.042	59.18
	4	-	-	18.683	33.108	51.791	41.86
	5	48.721	30.420	-	-	79.141	50.42
	6	-	-	13.294	32.050	45.344	35.55
	소계	147.954	109.057	55.053	101.649	413.713	317.27
11	1	-	53.478	26.952	-	80.430	91.19
	2	38.512	-	-	238.071	276.583	32.01
	3	-	17.642	21.814	-	39.456	34.72
	4	45.543	-	-	29.217	74.760	59.72
	5	-	29.028	24.749	-	53.777	62.33
	6	35.473	-	-	16.361	51.834	34.13
	소계	119.528	100.148	73.515	60.558	353.749	314.10
총계		494.212	363.377	230.271	325.281	1413.141	1006.07

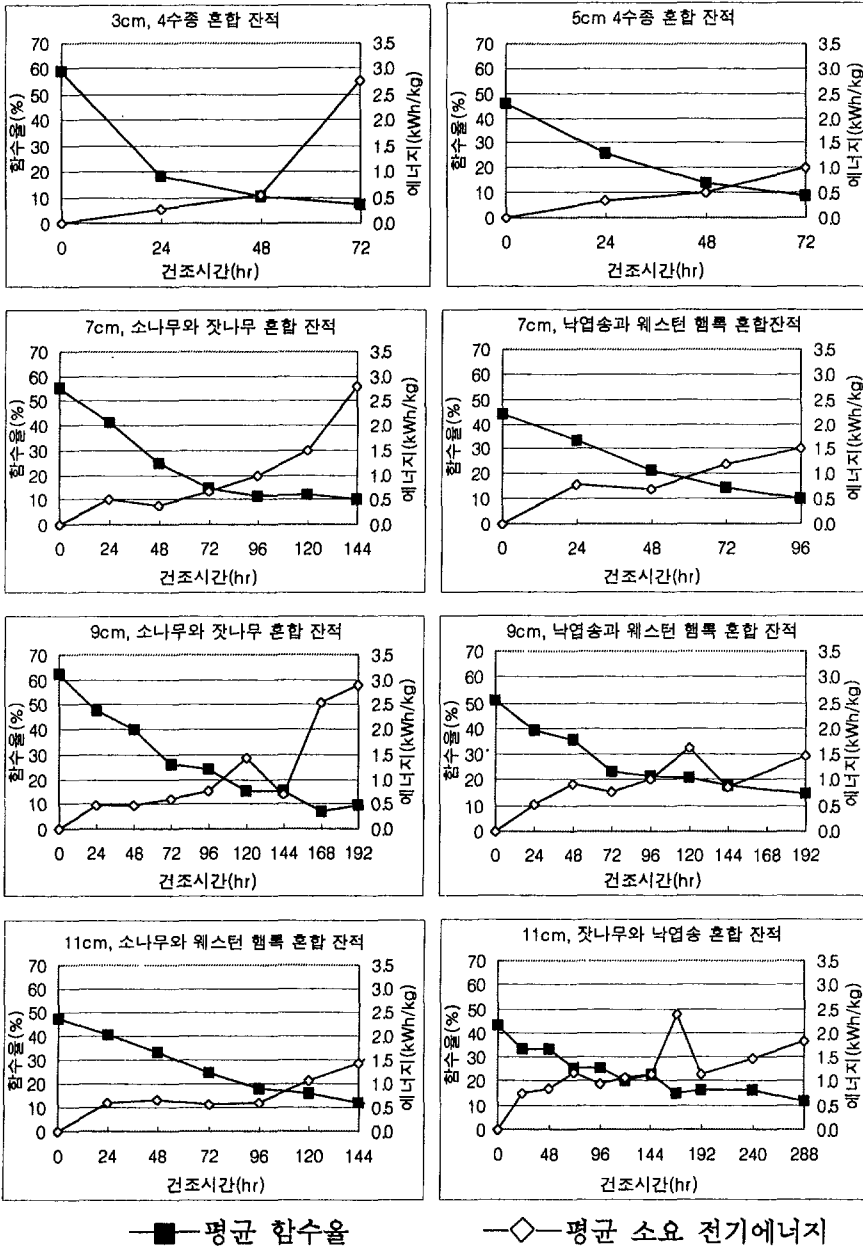


그림 2-3-28 . 혼합 잔적별 건조시간에 따른 평균 함수율과 평균 소요 전기 에너지.  
 Figure 2-3-28. Average moisture content and average electrical energy consumption in the mixed charges as each drying time.

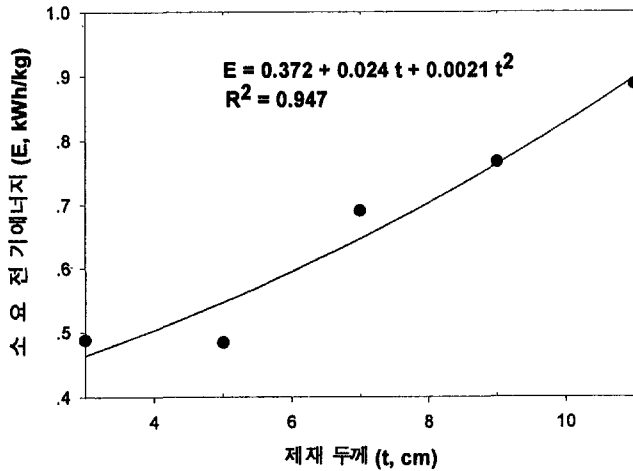


그림 2-3-29. 침엽수 제재 두께와 증발수분당 소요전기에너지의 관계.

Figure 2-3-29. Relationship between softwoods lumber thickness and electrical energy consumption per water evaporation.

표 2-3-16. 침엽수 구조용재의 진공건조 소요 전기에너지의 비용.

Table 2-3-16. Costs of electrical energy consumption for vacuum-press drying of structural softwood lumbars.

제재 두께	증발수분량 (kg)	증발수분당 전기에너지 (kWh/kg)	전체 전기 소비량 (kWh)	전기 에너지 비용 (원/m <sup>2</sup> )
3	157.5	0.4629	72.91	3,106
5	157.5	0.5445	85.76	3,653
7	157.5	0.6429	101.26	4,314
9	157.5	0.7581	119.40	5,086
11	157.5	0.8901	140.19	5,972

전기 요금은 42.60원/kWh임

## 제4절 결론

목재내부의 온도상승속도는 매우 컸었으며 수종과 제재 두께간에 큰 차이가 없었다. 두께방향의 온도경사는 매우 완만하였다. 목재내부의 완만한 온도경사는 모든 부위의 비교적 균일한 건조에 기여될 수 있다.

강한 건조스케줄일수록 건조속도는 컸었다. 건조곡선은 초기함수율부터 함수율을 약20% 수준까지 거의 직선적으로 감소하였고, 그 이후부터는 곡선적으로 감소하였다. 건조속도는 섬유포화점이하에서도 매우 컸었으나 함수율 10%이하부터는 매우 적었다. 제재 두께가 증가함에 따라 건조속도는 곡선적으로 감소하였으나 열기건조의 경우보다 두께의 영향이 적었다. 소나무와 웨스턴 햄록의 건조속도는 컸었고 잣나무와 낙엽송의 건조속도는 적었다. 건조소요시간은 열기건조의 경우보다 두께 3cm 제재는 2배정도, 그리고 두께 11cm 제재는 4배이상 단축되었다.

건조중 수분경사는 중심층의 함수율이 섬유포화점이하가 될 때부터 급속하게 완만하여졌다. 최종함수율이 15%정도 이하로 건조된 목재의 재장방향과 두께방향의 수분경사는 매우 완만하였다. 수분경사는 건조스케줄의 강약별로는 뚜렷한 차이가 없었다. 수분경사는 제재 두께가 증가함에 따라 증가하였으며 수종간의 수분경사는 소나무와 웨스턴 햄록은 낙엽송과 잣나무보다 완만하였다.

건조중 두께와 폭 수축율은 초기함수율부터 함수율이 감소함에 따라 비례적으로 증가하였다. 건조된 정목의 두께 수축율은 폭 수축율보다 훨씬 컸었으나 판목의 경우는 일정하지 않았다. 가열판 압체식 진공건조 목재의 수축율은 목재의 정상수축율 또는 관행열기건조 목재의 수축율보다 적었다.

건조중 건조응력은 함수율이 감소함에 따라 증가하다가 저함수율 영역에서 거의 일정 또는 감소하는 경향을 나타내고 있었다. 건조목재의 건조응력은 매우 경미하였다. 건조응력은 건조스케줄의 강약과 제재 두께에 따라서는 일정한 경향을 나타내지 않았다.

건조목재의 횡단면과 표면 할렬은 건조스케줄 강약에 따라 일정한 경향을 나타내지 않았다. 횡단면할렬재의 발생율과 할렬의 최대길이는 제재 두께가 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 나타내었다. 표면할렬재의 발생율은 제재 두께에 따라 일정한 경향을 나타내지 않았으나, 최대길이는 증가하는 경향을 나타내었다. 내부할렬은 어떠한 스케줄, 수종과 제재 두께에서도 발생하지 않았다. 할렬과 관련된 침엽수 구조용 제재규격과 품등에 따라 분류하면 1등에 속하였다.

길이굽음, 너비굽음, 측면굽음 및 비틀림 등의 틀어짐은 매우 경미하였다. 틀

어짐은 건조스케줄의 강약에 따라 뚜렷한 차이를 나타내지 않았다. 소나무를 제외한 다른 수종의 길이굽음과 측면굽음은 제재 두께가 증가함에 따라 감소하였다. 그러나 비틀림은 제재 두께가 증가함에 따라 증가하였다. 수종간에 잣나무와 웨스턴 햄록은 적었고 소나무는 중간이며 낙엽송은 컷었다. 가열판 압체식 진공건조제의 틀어짐은 적었고 비교적 우수한 품질을 유지하였다.

진공건조목재의 평형함수율은 천연건조 목재의 것보다 적었지만 종압축강도, 휨강도와 탄성계수의 경우는 약간 증가하였다.

소요 전기에너지는 함수율이 감소할수록 증가하였는데, 건조초기에 급격히 증가한 후 거의 일정하게 유지되다가 다시 증가하는 3단계로 구분되는 패턴을 나타내었다. 소요 전기에너지는 두께 3cm와 5cm간에는 차이가 없었으나, 제재 두께가 증가함에 따라 증가하였다. 가열판 압체식 진공건조에너지는 두께 3cm와 11cm 제재의  $m^3$ 당 전기 에너지의 비용은 각각 3,106원과 5,972원이 소요되었다. 관행열기건조와 고주파건조의 것보다 적게 소요되었다.

가열판 압체식 진공건조에서 함수율 15%수준까지 건조할 경우 매우 신속하게 건조할 수 있고, 수분경사, 건조응력, 수축율, 틀어짐 및 건조소요에너지가 적으며 내부할렬이 전혀 발생치 아니하고 기계적성질이 저하되지 않는 등 경제적이고 양질의 구조용재로 건조가공할 수 있었다.

본 연구의 범위에서 건조속도와 건조결함 등을 종합하여 볼 때 구조용 칩엽수의 적당한 건조스케줄은 소나무의 경우 두께 7cm이하 제재는 강한 스케줄이고, 9cm이상 제재는 중간온도와 강한 건조스케줄이다. 잣나무의 경우 5cm이하의 강한 스케줄이고 7cm이상은 중간온도 스케줄이다. 낙엽송의 경우 모든 두께는 중간온도 스케줄이다. 웨스턴 햄록의 경우 9cm이하의 약한 스케줄이고 11cm는 중간온도 스케줄을 추천할 수 있다(표 2-2-4 참조).

## 참 고 문 헌

1. Antti, A.L. 1992. Microwave drying of hardwood: Simultaneous measurements of pressure, temperature, and weight reduction. *Forest Prod. J.* 42(6):49~54.
2. Avramidis, S., F. Liu & B.J. Neilson. 1994. Radio-frequency/vacuum drying of softwoods: Drying of thick western redcedar with constant electrode voltage. *Forest Prod. J.* 44(1):41~47.
3. Avramidis, S., and E.L. Zwick. 1992. Exploratory radio-frequency/vacuum drying of three B.C. coastal softwoods. *Forest Prod. J.* 42(7/8):17~24.
4. Avramidis, S., L. Zhang, and S.G. Hatzikiriakos. 1996. Moisture transfer characteristics in wood during radio-frequency/vacuum drying. *Proceedings of 5th Int'l. IUFRO Wood Drying Conference. Quevec city, Canada:125~134.*
5. Avramidis, S., and E.L. Zwick. 1997. Commercial-scale RF/V drying of softwood lumber. part 3. Energy consumption and economics. *Forest Prod. J.* 47(1):48~56.
6. Bramhall, G. and R.W. Wellwood. 1976. *Kiln Drying of Western Canadian Lumber. VP-X-159:23~32.*
7. Cividini, R. and V. Pagnozzi. 1995. Vacuum-press plus dryer-recent practical experiments of a new leap ahead in high temperature wood drying. *Proceedings of the Int'l. Conference on Wood Drying. High Tatras, Slovak Republic:223~230.*
8. Cividini, R. 1995. Timber straightening and shrinkage tests in vacuum press plus dryer. *Proceedings of the Int'l. Conference on Wood Drying. High Tatras, Slovak Republic:231~236.*
9. *Forest Prod. Lab., USDA. 1987. Wood Handbook, Agric. Handbook 72:3-13~3-14.*
10. Harris, R.A. and M.A. Taras. 1984. Comparison of moisture content distribution, stress distribution, and shrinkage of red oak lumber dried by a radiofrequency/vacuum process and a conventional kiln. *Forest Prod. J.* 34(1):44~54.
11. Harris, R.A., M.A. Taras, and J.G. Schroeder. 1984. Sound quality

- upholstered frame parts yields from lumber and green cutting dried by a radio-frequency/vacuum system and by conventional kiln-drying. *Forest Prod. J.* 34(7/8):19~21.
12. Harris, R.A., J.G. Schroeder and M.A. Taras. 1985. Yields of unexposed, oak dimension parts from lumber planed before vs. after drying by radio-frequency/vacuum or dehumidification methods. *Forest Prod. J.* 35(7/8):17~19.
  13. Hittmeier, M.E., G.L. Comstock, and R.A. Hann. 1968. Press drying nine species of wood. *Forest Prod. J.* 18(9):91~96.
  14. Higgins, N.C. 1974. A rule-of-thumb method for estimating drying time. *Lumber Drying Sourcebook*:35~38.
  15. Jung, H.S. 1989. Standardization of Drying Technology of Wood(II). Seoul National University:1~146.
  16. Jung, H.S., S. Avramidis, and L. Cai. 1998. Drying characteristics of large western redcedar timber during radio-frequency/vacuum drying. *Mokchae Konghak* 26(3):1~8.
  17. Lee, A.W.C., and R.A. Harris. 1984. Properties of red oak lumber dried by radio-frequency/vacuum process and dehumidification process. *Forest Prod. J.* 34(5):56~58.
  18. Lamb, F.M., and E.M. Wengert. 1993. Comparison of lumber drying quality between two vacuum drying systems and a conventional predryer and dry kiln system. *Proceedings of the Int'l. Conference on Wood Drying. High Tatras, Slovak Republic*:251~256.
  19. Kollmann, F.F.P., and W.A. Cote, Jr. 1968. *Principles of Wood Science and Technology.* Springer-Verlag. 204~235.
  20. Perré, P., P. Joyet, and D. Aléon. 1995. Vacuum drying : Physical requirements and practical solutions. *Proceedings of the Int'l. Conference on Wood Drying. High Tatras, Slovak Republic*:7~34.
  21. Resch, H. 1990. Energy consumption in drying solid wood products. *Proceedings of the 3rd. Int'l. Symposium on Forest Products Industry in the 21st. Century. Suwon, Korea.* 13~32.
  22. Rice, B. 1992. Drying stresses and what to do about them. *Lumber Drying sourcebook*:7~8.
  23. Rice, R.W. 1999. Measurement of delayed warp in eastern spruce studs.

- Proceedings of 6th Int'l. IUFRO Wood Drying Conference. Stellenbosch, South Africa. 273~285.
24. Shupe, T.O., O. Harding, E. Choong and R. Mills. 1997. Effect of two drying schedules on spruce pine lumber defects. *Forest Prod. J.* 47(1):57~60.
  25. Simpson, W.T. 1982. Predrying before press-drying to reduce drying defects in hardwoods. *Forest Prod. J.* 32(11/12):77~80.
  26. Simpson, W.T. 1987. Vacuum drying northern red oak. *Forest Prod. J.* 37(1):35~38.
  27. Simpson, W.T. J.D. Danielson and R.S. Boone. 1988. Press-drying plantation-grown loblolly pine 2 by 4's to reduce warp. *Forest Prod. J.* 32(11/12):41~48.
  28. Simpson, W.T. 1991. Dry Kiln Operator's Manual. Agric. Handbook No. 188. Forest Prod. Lab. Madison, Wisconsin. 1~256.
  29. Southern Pine Inspection Bureau. 1977. Grading Rules.
  30. Trafatler, G., R.A. Harris, J. Schroeder, and M.A. Taras. 1986. Comparison of moisture content variation in red oak lumber by a radio-frequency/vacuum process and a conventional kiln. *Forest Prod. J.* 36(5):25~28.
  31. Wang, J.H., and F.C. Beall. 1975. Laboratory press-drying of red oak. *Wood Science* 8(2):131~140.
  32. Wengert, E.M., and F.M. Lamb. 1982. A comparison of conventional and new drying methods. Presented at the Southern Furniture Mfg. Assoc. and National Furniture Mfg. Assoc. Joint Meeting, Louisville, Ky.:7.
  33. 산림청. 1995. 개정·제정된 목재규격. 산림청고시 제1995-30호. 14:55.
  34. 임업연구원. 1994. 한국산 주요목재의 성질과 용도. 연구자료 제95호:4~23.
  35. 한국전력. 1999. 전기요금 안내. 산업용.



### 제 3 장 구조용 수심기등재의 압체식고주파진공건 조기술 개발

협동과제연구책임자 : 이남호(전북대학교)  
연구원 : 강춘원(익산대학)  
보조원 : 정태선(전북대학교)  
최준호(전북대학교)  
이동진(익산대학)

## 제1절 서 설

소나무, 리기다소나무, 낙엽송, 잣나무 등은 우리나라 전역에 널리 植栽되어 있어, 그 자원이 풍부한 편으로서 1995년 한 해 동안 공급된 國產 원목량만 도 약 110만 m<sup>3</sup>에 이르며, 이들중 말구직경 20cm 미만의 소경재이 약 77%를 차지하고 있다(임업연구원, 1997). 따라서 이들 침엽수 間伐소경재의 활용방안을 강구하여 그 이용가치를 제고하는 것은 의미있는 일이다.

간벌소경재는 제재수율이 매우 낮을 뿐아니라, 대부분 미성숙재로 구성되어 있어 건조중에 틀어지기 쉽다. 특히 낙엽송의 경우 나선목리(spiral grain)가 발달되어 있어 틀어짐이 더욱 심한 편이다. 이러한 가공상의 문제점들을 해결하기 위하여 수심재(pillar)의 형태로 활용하는 방안이 추천되고 있다. 그러나 수심재는 두께가 두꺼워 건조속도가 느리고, 또 건조중에 수분경사가 심하게 형성될 뿐아니라 접선방향 인장성장응력이 높게 형성되어있는 髓(pith)를 포함하고 있기때문에 횡단면할렬과 재면할렬(surface check) 및 分割(split) 등이 쉽게 발생하는 경향이 있다(Lee 등, 1998; Kubler, 1974, 1975, 1977). 뿐만아니라 관행열기건조에서처럼 고온에서 장기간 노출될 경우 강도저하가 초래되어 구조용재로서의 가치가 떨어지는 바, 가능한한 저온에서 건조하는 것이 바람직하다. 그러나 건조에 장기간이 소요될 경우 에너지의 소비가 증가되는 것은 물론 청변 등의 발생으로 건조재의 가치가 저하되는 문제가 초래되기도 한다. 따라서 침엽수 간벌소경재를 수심기둥재로 활용하기 위해서는 저온으로 고온의 효과를 얻을 수 있는 진공건조방식이 적합하다.

고주파진공건조(radio-frequency/vacuum drying; RF/V drying)는 材內外간의 증기압경사와 표층과 내층간의 逆온도경사 때문에(Kanagawa, 1989; Liu 등, 1994) 수심재의 건조시 건조시간을 단축하고, 재면할렬을 예방하는데 유리한 점을 지니고 있다. 그러나 고주파진공하에서 자유수 유동속도를 증진시키는 기동력(driving force)을 발현시키기 위해서는 건조재의 투과성을 향상시키는 것이 매우 중요하다(李 등, 1997; Hayashi 등, 1995; Kanagawa 등 1992).

목재의 투과성을 개선시키기 위한 방법으로 水中貯木 상태에서 水中細菌을 활용하거나 刺傷처리(incising) 등이 제시된 바 있으나, 오랜 처리기간, 변색, 외관손상 등이 문제점으로 지적되고 있다. 최근 새로운 투과성 증진처리방식으로서 저압증기폭쇄처리(low pressure steam explosion treatment; Explosion treatment) 방법이 제시되어 건조속도 및 약제주입성 개선에 우수한 효과를 나

타내는 것으로 보고되고 있다(李 등, 1997; Hayashi 등, 1995; Kanagawa 등 1992). 특히 李 등(1997, 1999)은 침엽수 원판을 대상으로한 저압증기폭쇄처리 시험에서 목재의 표층과 내층간에 증기압 평형이 이루어졌을때 최초 폭쇄를 실시하는 것이 단위폭쇄처리당 투과성 개선효과가 우수한 점을 밝힌 바 있다. 그러나 아직 國産 수심재에 관한 저압증기폭쇄처리 효과 등에 대해서는 전혀 연구된 바 없다.

또한 재면할렬을 예방코저 수심재의 접선단면상에 섬유방향으로 背割(longitudinal kerf)을 가공하여 건조하므로써 좋은 결과를 얻고 있으나, 건조중에 배할가공 흠이 확장되어 미관을 저하시키는 문제가 야기되고 있다(鄭 등, 1997; 齊藤周逸 등, 1993; 久田卓興 등, 1993).

본 연구에서는 저압증기폭쇄처리 및 배할가공처리가 국산 주요 침엽수종 11×11cm의 수심재의 고주파진공건조성 개선에 미치는 영향과 압체력이 배할가공흠 확장 억제 등에 미치는 영향 등을 구명코저 하였다.

## 제2절 재료 및 방법

### 1. 공시재료

길이 180cm의 국산 침엽수 간벌소경재 원목을 횡단면 11×11cm의 수심재가 되도록 4면제재한 다음, 길이가 150cm가 되도록 양 마구리면을 제거하되, 양단에서 생재비중시험편과 초기함수율시험편을 각각 2개씩 채취하였다. 준비한 수심재는 각 수종별로 총 70본으로 14본은 無배할재로, 나머지 56본은 배할가공재로 각각 활용하였다. 시험에 사용된 수심재의 평균 생재비중과 평균 생재함수율은 소나무 0.42와 77.3%, 리기다소나무 0.41과 63.0%, 낙엽송 0.43과 32.8%, 잣나무 0.40과 84.2% 이었다.

背割은 수심재의 4재면중에 한 재면에 대해서만 수심재 두께의 2/3인(鄭 등, 1997) 3.5cm 깊이로 폭이 3mm되게 가공하였다(그림 3-1).

### 2. 저압증기폭쇄처리 장치와 처리조건

저압증기폭쇄처리는 직경 40cm × 길이 400cm로서 최대 10기압을 유지할 수

있는 실린더형의 폭쇄조내에서 실시하였다. 처리 수심재는 스팀보일러를 이용하여 가열하였고, 처리압력은 폭쇄조내의 증기온도로 콘트롤하였다. 처리중의 증기온도, 증기의 照射時間 및 폭쇄밸브의 開放횟수 등은 자동콘트롤러로 제어하였다. 부착된 폭쇄밸브는 순간적인 開閉가 가능하도록 설계된 밸브이다. 처리온도는 모두 134℃ (절대수증기압 3기압)로 고정하였고, 폭쇄처리횟수는 1회 (E1-100과 E1-134), 5회(E5-100), 10회(E10-100), 20회(E20-100) 및 30회 (E30-100)로 구분하였다. 최초 해압은 E1-134의 경우만 수심재의 표층과 내층의 온도가 모두 폭쇄조내 수증기 온도인 134℃에서 평형을 이루었을때 실시하였고, 나머지 경우는 수심재의 내층 온도가 100℃에 도달하였을때 실시하였다. 그리고 5회, 10회, 20회 및 30회 처리의 경우 최초 폭쇄처리 이후 각각 4회, 9회, 19회 및 29회를 반복하여 폭쇄처리하되, 解壓과 復壓시간은 각각 10초와 5분으로 고정하였다. 한편 폭쇄처리를 전후한 표층과 내층의 재온변화를 관측하기 위하여 배합의 반대측 재면으로부터 내층을 향하여 1cm 되는 지점(표층)과 5.5cm 되는 지점(내층)에서 접선방향으로 깊이 5.5cm의 구멍을 뚫고, 이곳에 열전쌍을 삽입하여 자동온도기록계로 관측하였다.

### 3. 고주파진공건조시험

#### 가. 고주파진공건조기

고주파진공건조기는 길이 300cm x 폭 83cm x 깊이 26cm 크기의 角形으로 상부덮개가 유연한 고무 시트로 이루어져 있어 건조중 내부에 잔적된 재목에 약 10,000kgf/m<sup>2</sup>의 압체력이 가해진다. 고주파발전기의 최대출력은 7kW이고, 주파수는 약 6 MHz로 고정하였으며, 7분-on, 3분-off로 작동시켰다.

#### 나. 잔적

상부와 하부에 접지전극판을 두고, 중앙에 기전전극판을 두어 2단으로 잔적하되, 배합가공재의 건조시에는 下段잔적층은 압체력과 배합가공 흙의 깊이 방향이 서로 평행이 되도록 잔적하였고, 上段잔적층은 압체력이 배합가공 흙의 깊이방향에 대하여 수직으로 작용하도록 잔적하여 압체력에 의한 배합가공 흙의 확장 억제효과를 비교 검토하였다 (그림 3-2). 각 폭쇄처리조건별로 2분씩을 동일로드에 잔적하되, 1분은 평행잔적을, 그리고 나머지 1분은 수직잔적을하였다.

### 다. 간혈압체시험과 연속압체시험

무배할재의 경우 각 폭쇄처리별로 2본씩의 수심재를 동일 로드에서 잔적하여 건조하면서 건조중합수율을 구하기 위하여 적절한 시간간격으로 시험재의 건조중무게를 평량코저 건조기의 작동을 중지한 다음 압체력을 해제하는 간혈압체만을 실시하였다. 반면에 배할가공재의 경우는 간혈압체시험을 통해서 목표합수율까지의 소요시간을 조사한 다음, 건조종료시까지 압체력을 해제하지 않고 연속적으로 가하여 연속압체가 배할가공품의 확장과 재면할렬 억제에 기여하는 효과를 검토하였다.

### 라. 고주파진공건조시험

무배할재의 경우는 간혈압체시험만을 1회 실시하였고, 배할가공재의 경우는 모두 간혈압체시험과 연속압체시험을 각각 2회씩 실시하였다. 간혈압체시험의 경우 모든 수중에 대하여 건조중 재온을 생재~30%는 40.5℃, 30%~25%까지는 42.5℃, 25%~종말은 44.5℃로 콘트롤하였으며, 연속압체시험에서는 간혈압체시험 결과에 준하여 합수율스케줄을 표 3-1과 같은 시간스케줄로 변환하여 건조하였다. 진공도는 모두 50~140mmHg로 고정하였다.

표 3-1. 수종별 연속압체 고주파진공건조스케줄.

소나무		리기다소나무		낙엽송		잣나무	
건조시간	재온(℃)	건조시간	재온(℃)	건조시간	재온(℃)	건조시간	재온(℃)
0~108시간	40.5	0~72시간	40.5	0~12시간	40.5	0~96시간	40.5
~114시간	42.5	~96시간	42.5	~30시간	42.5	~108시간	42.5
~138시간	44.5	~120시간	44.5	~66시간	44.5	~120시간	44.5

주: 진공도는 모두 50~140 mmHg이었음

#### 4. 건조곡선과 건조속도

모든 간헐압체시험에 대하여 수심재의 건조중무게를 평량하고, 건조종료후 최종함수율시험편으로부터 구한 수심재의 전건무게로 건조시간별 건조중함수율과 건조속도를 구하였다. 건조곡선과 건조속도는 잔적방법이나 압체방법에 따른 차이는 없을 것으로 가정하고 배합가공처리 및 저압증기폭쇄처리에 따른 효과만을 분석하였다.

#### 5. 재면할렬과 배합가공흡 확장율

건조종료후 수심재의 네 재면에 나타난 할렬의 총 발생 갯수와 총 길이를 배합가공처리의 유무, 잔적방법별 및 압체방법별로 구분하여 조사하였다.

건조개시전과 종료 직후에 배합가공 흡의 폭을 측정하여 아래 식(3-1)로 배합가공흡 확장율을 조사하였다.

$$K(\%) = \frac{W_a - W_o}{W_o} \times 100(\%) \dots\dots\dots \text{식 (3-1)}$$

K : 배합가공흡 확장율(%)

W<sub>o</sub>: 건조전 배합가공흡의 폭(mm)

W<sub>a</sub>: 건조종료 직후의 배합가공흡의 폭(mm)

## 제3절 결과 및 고찰

### 1. 저압증기폭쇄처리 전후의 재온변화

각 수종별 폭쇄처리직후 E1-100처리와 E1-134처리재의 표층과 내층의 재온변화를 표 3-2에 나타내었다. 낙엽송 E1-134처리의 경우 무배할재나 배할재 모두 폭쇄처리 직후 표층과 내층의 재온이 큰 폭으로 하강한 반면에, E1-100처리의 경우 재온의 하강 폭이 상대적으로 작았으며, 특히 내층의 재온하강은 매우 경미하였다. 이는 E1-134처리의 경우 표층과 내층의 증기압이 서로 평형을 이룬 상태에서 폭쇄처리를 실시하므로써 폭쇄 직후에 표층뿐아니라 내층에서도 세포내강내 공기의 급격한 용적팽창이 유도되고 있음을 의미하는 것으로 폐쇄벽공의 開裂효과도 E1-100처리보다 우수할 것으로 판단된다 (李 등, 1997). 따라서 최초 폭쇄처리에 의한 투과성 증진효과의 극대화를 위해서는 표층과 내층의 증기압이 폭쇄조내 증기압과 평형을 이루었을 때 실시하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

처리에 소요된 시간은 배할재의 경우가 무배할재보다 오히려 약간 더 길었음에도 불구하고, E1-100처리나 E1-134처리 모두 재온하강 폭이 배할재가 무배할재보다 더 큰 것으로 나타났다. 이는 배할가공면이 폭쇄중 열기의 유입면으로써의 역할은 크게 기대할 수 없다 할지라도 폭쇄직후 급격하게 팽창된 공기의 방출구로써 작용은 가능할 것으로 생각되어, 배할가공처리는 폭쇄처리효과의 섬유방향으로의 균일화를 위해서 유효할 것으로 여겨진다.

소나무재와 낙엽송재의 E5-100, E10-100, E20-100 및 E30-100처리재의 폭쇄를 전후한 재온하강 폭을 그림 3-3~그림 3-10에 각각 나타내었다.

폭쇄처리 초기의 경우 내층의 재온은 처리직후에 거의 변화가 없거나 오히려 약간 상승하는 경향을 보였다. 이는 열기가 외층으로부터 내층으로 유입되고 있음을 의미하는 것으로 폭쇄직후 熱氣의 흐름은 폭쇄조, 표층 및 내층간에 증기압경사에 의존하는 것으로 해석된다.

또한 폭쇄처리 횟수가 계속 반복되면서 표층 및 내층의 재온하강 폭은 점점 증가하는 것으로 나타나, 폭쇄처리 횟수가 증가할수록 폭쇄처리에 의한 효과는 더욱 증가할뿐 아니라 균일화될 수 있을 것으로 해석된다 (李 등, 1997; Hayashi 등, 1995; Kanagawa 등, 1992).

표 3-2. 최초폭쇄처리 직후의 표층과 내층의 재온하강온도.

수 종	폭쇄처리	무 배 할			배 할 가 공		
		표층(℃)	내층(℃)	소요시간 (분)	표층(℃)	내층(℃)	소요시간 (분)
소나무	E1-100	6.7	-1.5	57	3.2	1.6	64
	E1-134	24.0	26.9	188	23.7	2.5	221
리기다 소나무	E1-100	4.3	0.7	55	5.8	3.9	62
	E1-134	17.5	8.3	156	21.6	19.5	183
낙엽송	E1-100	3.7	0.7	55	16.4	3.7	59
	E1-134	15.9	9.1	142	20.9	16.4	170
잣나무	E1-100	7.1	1.5	54	4.3	0.5	59
	E1-134	23.8	10.1	145	23.6	13.4	155

## 2. 건조시간과 건조속도

그림 3-11~그림 3-18은 각 수종의 무배할재와 배할재의 간헐압체시험에 의해 작성한 고주파진공건조곡선이고, 그림 3-19~그림 3-26은 각 수종의 건조시간별 건조속도의 변화를 나타낸 것이다.

낙엽송 무배할재의 경우 건조개시후 66시간만에 20.7~23.1%까지 건조되었고, 배할재는 19.0~21.6%까지 건조되었다. 두께 12cm 잣나무 수심재의 천연건조와 열수순환가열식진공건조에 소요된 시간인 104일과 15일에 비하면(鄭 등, 1997) 건조시간이 크게 단축되었고, 이러한 경향은 모든 수종에서 유사하였다.

낙엽송 무배할재나 배할재 모두 저압증기폭쇄처리에 의한 건조속도 증진효과는 우수하였다(표 3-3). 무배할재의 무처리 평균 건조속도가 0.05%/시간에 불과한데 반하여, E1-134처리의 경우는 0.16%/시간으로 나타났고, 배할재의 경우도 이와 유사한 경향을 보여 무처리와 E1-134처리의 평균 건조속도가 각각 0.14%/시간과 0.38%/시간으로 나타났다.

특히 저압증기폭쇄처리에 의한 건조속도 증진효과는 함수율 30%이상의 범위에서 뚜렷하였다. 이는 저압증기폭쇄처리에 의해 폐쇄벽공의 일부가 開裂되어 자유수의 모세관유동 속도가 증진되었기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 저압증기폭쇄처리는 함수율이 높을수록, 그리고 투과성이 불량한 경우에 더욱 유효



할 것으로 생각된다(李 등, 1997; Hayashi 등, 1995; Kanagawa 등, 1992). 한편 건조말기에는 무처리재와 저압증기폭쇄처리재의 건조속도가 크게 차이나지 않는 것으로 나타났다. 따라서 건조말기의 건조속도를 증진시키기 위해서는 材溫을 상승시키는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

그러나 소나무, 리기다소나무, 잣나무 등에서는 저압증기폭쇄처리에 의한 건조속도 증진효과는 매우 미미하거나 전혀 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 소나무 무배할재의 경우 E1-134처리만이 무처리재의 평균건조속도보다 빠르게 나타났을뿐 나머지 처리에서는 모두 더 낮았다. 이것은 낙엽송을 제외한 다른 수종의 경우 부과성이 양호하여 폭쇄처리에 의한 폐쇄벽공의 개열효과가 미약하기 때문인 것으로 판단된다.

한편 저압증기폭쇄처리에 의한 건조속도 증진효과가 뚜렷하였던 낙엽송의 경우 배할가공처리에 관계없이 동일 함수율 수준에서는 E1-134처리재의 건조속도가 E1-100처리재보다는 상당히 빨랐다. 이는 圓板의 경우에서와 같이 최초 폭쇄처리시기가 처리효과에 지대한 영향을 미치고 있음을 반증하는 것으로써 (李 등, 1997) 材內外가 모두 증기압 평형을 이루었을때 최초 폭쇄를 실시할 경우 단위처리에 의한 효과의 극대화를 피할 수 있음을 의미한다.

표 3-3. 소나무와 낙엽송재의 간헐압체고주파진공건조중의 평균 건조속도(%/시간).

재 종	무처리	E1-100	E5-100	E10-100	E20-100	E30-100	E1-134
소나무 (무배할)	0.62	0.58	0.39	0.42	0.30	0.48	0.63
소나무 (배 할)	0.41	0.38	0.51	0.44	0.35	0.43	0.35
낙엽송 (무배할)	0.05	0.11	0.10	0.08	0.08	0.07	0.16
낙엽송 (배 할)	0.15	0.23	0.21	0.19	0.45	0.30	0.41

### 3. 재면할렬

고주파진공건조의 간헐압체시험 및 연속압체시험중 발생한 재면할렬의 발생 정도는 표 3-4와 같다.

모든 소종에 있어서 배할재는 재면할렬의 평균 總발생갯수나 평균 總발생길

이 모두 무배할재와 비교하여 훨씬 경미하였다. 이는 건조초기 수분경사에 의해서 표층에 형성되는 표면인장응력(surface tensile stress)의 상당량이 배할가공 흡을 통해서 해제되기 때문인 것으로 해석된다(鄭 등, 1997; 齊勝周逸 등, 1993; 久田卓興 등, 1993).

그러나 저압증기폭쇄처리나 연속압체 등은 재면할렬 예방에 거의 영향하지 않는 것으로 나타났으며, 오히려 폭쇄처리 횟수가 많거나 또는 폭쇄처리 시간이 긴 경우에는 재면할렬이 더 심하게 발생한 경우도 있었다. 이것은 폭쇄처리중에 세포벽에 부분적인 파괴가 수반되어 목재의 강도는 손실된 반면에, 본 시험에서 사용한 수심재의 초기흡수율이 낮아 폭쇄처리에 의한 자유수 유동속도의 증진효과가 충분히 발휘되지 못하였거나 고흡수율재라 할지라도 투과성이 양호하여 폭쇄처리에 의한 내부수분의 이동속도 증진효과를 검증할 수 없었기 때문인 것으로 생각된다. 폭쇄처리에 의한 재면할렬의 억제효과는 투과성이 불량한 고흡수율재를 대상으로 더 연구되어져야할 것으로 판단된다.

#### 4. 배할가공흡 확장율

표 3-5는 배할재의 간헐압체시험과 연속압체시험중의 잔적방법별 배할가공흡 확장율을 나타낸 것이다..

연속압체제의 배할가공흡 확장율은 배할가공 흡의 깊이방향에 대한 압체력의 적용방향이나 폭쇄처리조건에 관계없이 간헐압체제에 비교하여 상당히 작았으며, 오히려 건조후 배할가공 흡이 좁아진 경우도 있었다. 이는 간헐압체의 경우 건조중에 압체력을 해제하는 순간 횡단방향수축이 용이하게 이루어진 반면에, 연속압체의 경우 재면에 장기간 압체력이 가해지므로써 횡단방향 수축이 억제될 뿐아니라 세트량도 상당량 유도되었기 때문일 것으로 생각된다(鄭 등, 1997). 수심재의 경우 한 재면에서 발생한 수축이 나머지 세 재면으로 전파되는 특성을 지니고 있는 만큼 앞으로 각각의 재면에 대한 수축거동을 검토해 볼 필요가 있다고 생각된다.

특히 연속압체에 의한 배할가공 흡의 확장억제는 낙엽송 E1-134처리를 제외하고는 모든 경우에서 압체력을 배할가공 흡의 깊이 방향에 대하여 수직으로 가하였을 때가 평행으로 가하였을 경우보다 더 효과적이었다. 수직잔적의 경우 압체력에 의한 목재의 수축억제외에도 압체력이 배할가공 흡의 확장을 직접적으로 억제하는 방향으로 작용하기 때문인 것으로 해석된다.

연속압체에 의한 배할가공 흡 확장억제 효과는 폭쇄처리재에서 더욱 뚜렷

하게 나타났으며, E20-100처리나 E30-100처리에서는 배할가공 흠이 좁아지기도 하였다. 이것은 폭쇄처리에 의해 목재조직이 연화되었거나, 일부 破裂되어 압체 력이 더욱 효과적으로 작용할 수 있었기 때문인 것으로 생각된다.

표 3-4. 각 수종별 고주파진공건조제의 재면할렬의 평균발생정도.

수종	압체	재면할렬 <sup>1)</sup>	무배할제							배할제						
			무처리	E1-100	E1-134	E5-100	E10-100	E20-100	E30-100	무처리	E1-100	E1-134	E5-100	E10-100	E20-100	E30-100
소나무	간헐압체	발생갯수 (개)	3	4	4	20	6	7	2	0	2	4	4	1	3	0
		발생길이 (cm)	52.0	40	26.5	383.5	57	160	19.5	(2)	(0)	(2)	(0)	(1)	(1)	(0)
	연속압체	발생갯수 (개)	-	-	-	-	-	-	-	0	10	7	0	10	12	7
		발생길이 (cm)	-	-	-	-	-	-	-	(0)	(12)	(0)	(7)	(0)	(3)	(0)
리기다 소나무	간헐압체	발생갯수 (개)	1	2	9	37	16	0	2	10	0	0	0	0	8	2
		발생길이 (cm)	8	19	71	411	197.5	0	16.5	(0)	(19)	(4)	(0)	(0)	(6)	(9)
	연속압체	발생갯수 (개)	-	-	-	-	-	-	-	2	0		5	0	1	0
		발생길이 (cm)	-	-	-	-	-	-	-	(1)	(0)		(2)	(1)	(0)	(0)
낙엽송	간헐압체	발생갯수 (개)	2	3	6.5	23.5	11	3.5	2	0.5	0	0.5	3	3	1	13
		발생길이 (cm)	30	29.5	48.8	397.3	254.5	80	18	(1)	(6.5)	(14)	(1.5)	(0.5)	(4)	(18)
	연속압체	발생갯수 (개)	-	-	-	-	-	-	-	(6)	(28)	(168.8)	(18)	(1.5)	(13)	(206.5)
		발생길이 (cm)	-	-	-	-	-	-	-	3	0	5	23.8	14.8	12	96
잣나무	간헐압체	발생갯수 (개)	4	2	3	2	7	5	2	0.5	0	2	0	1	0	3
		발생길이 (cm)	12	7	27.5	23	36.5	42	15.5	(0)	(0)	(1)	(1)	(2)	(1)	(2)
	연속압체	발생갯수 (개)	-	-	-	-	-	-	-	2	0	7.5	0	1.5	0	8.5
		발생길이 (cm)	-	-	-	-	-	-	-	(0)	(0)	(3.5)	(1.5)	(7.5)	(3.5)	(9.0)
소나무	간헐압체	발생갯수 (개)	4	2	3	2	7	5	2	0.5	0	2	0	1	0	3
		발생길이 (cm)	12	7	27.5	23	36.5	42	15.5	(0)	(0)	(1)	(1)	(2)	(1)	(2)
	연속압체	발생갯수 (개)	-	-	-	-	-	-	-	2	1	4	0	0	2	0
		발생길이 (cm)	-	-	-	-	-	-	-	(0)	(1)	(2)	(0)	(1)	(1)	(2)

- 1.1) 각 수심기등재에 발생한 평균재면할렬.
2. ( )는 수평잔적재의 경우임.

표 3-5. 고주파진공건조중 간헐 및 연속압제재의 배합가공률 확장율(%).

수종	압제		무처리	E <sub>1-100</sub>	E <sub>1-134</sub>	E <sub>5-100</sub>	E <sub>10-100</sub>	E <sub>20-100</sub>	E <sub>30-100</sub>
소나무	수직	간헐	12.7	16.9	23.9	66.2	61.9	9.8	52.1
		연속	-11.3	-32.4	-16.9	-15.5	-23.9	-38.0	25.4
	수평	간헐	31.0	33.8	85.9	36.6	28.2	29.6	45.1
		연속	5.6	21.1	-5.6	15.5	-12.7	-57.8	0.0
리기다 소나무	수직	간헐	53.6	75.3	87.5	59.3	54.2	77.5	50.3
		연속	29.4	32.6	21.4	48.6	25.4	1.3	-7.2
	수평	간헐	79.8	70.5	90.3	81.5	57.3	88.7	58.5
		연속	45.3	30.5	15.7	59.4	7.5	-0.7	-7.5
낙엽송	수직	간헐	50.4	81.0	90.2	56.4	57.1	78.9	51.4
		연속	30.3	29.6	38.7	43.0	16.2	-0.7	-5.0
	수평	간헐	81.7	45.8	81.7	79.6	46.5	93.7	55.0
		연속	47.2	34.5	23.2	52.1	-9.9	3.6	-4.2
잣나무	수직	간헐	48.5	79.3	95.3	76.5	75.3	83.6	53.6
		연속	10.3	21.4	-1.5	10.4	5.4	-5.5	-10.5
	수평	간헐	85.3	82.4	85.4	85.6	79.6	92.6	65.2
		연속	40.4	30.5	38.4	17.9	5.5	-3.8	-5.4

## 5. 수지용출과 청변

수종별 건조재의 촉진폭로시험사이클에서의 수지용출정도 및 건조중 청변의 발생정도를 표 3-6에 나타내었다.

수종과 재종 및 폭쇄처리조건 등에 관계없이 모든 경우에 있어서 수지용출은 없었다. 정 등(1997)은 잣나무 간벌통나무와 수심재의 열판접촉가열식 진공건조의 경우에도 동일한 촉진폭로시험사이클에서 수지가 용출되지 않는 것으로 보고한 바 있다. Kanagawa(1989)는 고주파진공건조재의 경우 열기건조재와 비교하여 수지의 잔존량에는 차이가 없음에도 불구하고, 사용중에 거의 수지가 용출되지 않음을 보고하면서 고주파진공건조중에 수지가 고착되었을 것으로 추정하는 바 있다.

한편 청변은 잣나무 무처리재에서 경미하게 발생하였을뿐 여타의 경우에는 전혀 관찰되지 않았다. 잣나무의 경우 청변이 매우 민감하게 발생하는 수종으로 알려져 있으나 폭쇄처리재의 경우 134℃의 고온으로 가열되므로써 변색군이 사멸되었기 때문인 것으로 생각된다.

표 3-6. 수종별 저압증기폭쇄처리재의 고주파진공건조후 수지용출과 청변의 발생정도.

수종	폭쇄처리	축진폭로시험사이클				청변
		20℃, RH 90%	20℃, RH 65%	40℃, RH 90%	40℃, RH 65%	
소나무	무처리	-	-	-	-	-
	E1-100	-	-	-	-	-
	E1-134	-	-	-	-	-
	E5-100	-	-	-	-	-
	E10-100	-	-	-	-	-
	E20-100	-	-	-	-	-
	E30-100	-	-	-	-	-
리기다 소나무	무처리	-	-	-	-	-
	E1-100	-	-	-	-	-
	E1-134	-	-	-	-	-
	E5-100	-	-	-	-	-
	E10-100	-	-	-	-	-
	E20-100	-	-	-	-	-
	E30-100	-	-	-	-	-
낙엽송	무처리	-	-	-	-	-
	E1-100	-	-	-	-	-
	E1-134	-	-	-	-	-
	E5-100	-	-	-	-	-
	E10-100	-	-	-	-	-
	E20-100	-	-	-	-	-
	E30-100	-	-	-	-	-
잣나무	무처리	-	-	-	-	경미
	E1-100	-	-	-	-	-
	E1-134	-	-	-	-	-
	E5-100	-	-	-	-	-
	E10-100	-	-	-	-	-
	E20-100	-	-	-	-	-
	E30-100	-	-	-	-	-

주: - 없음

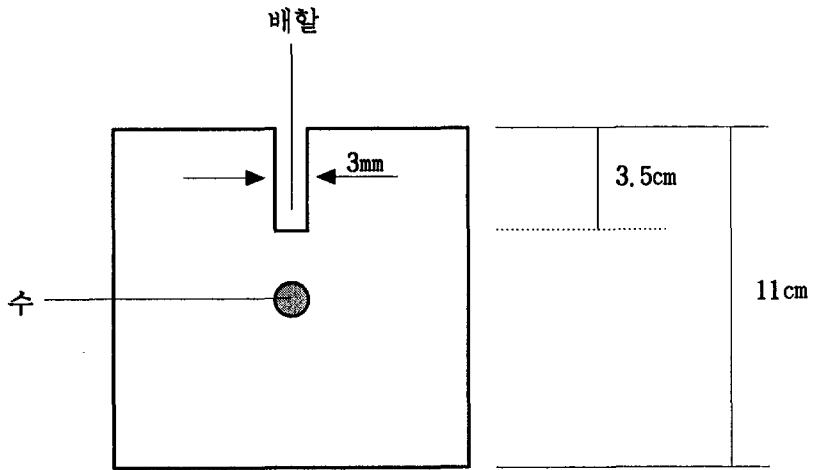


그림 3-1. 수심기동재의 배할가공처리

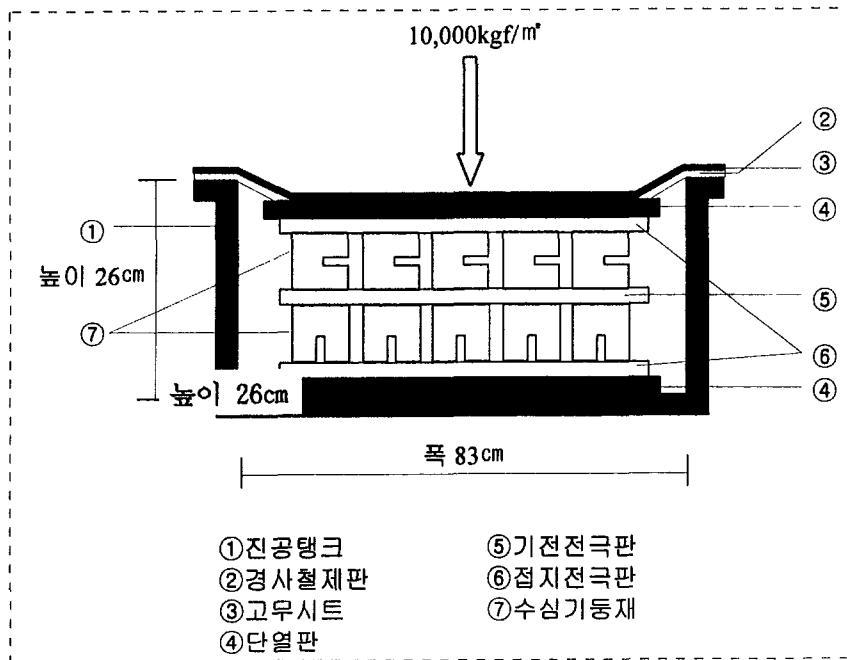


그림 3-2 고주파진공건중의 수직잔적(상단)과 수평잔적(하단)

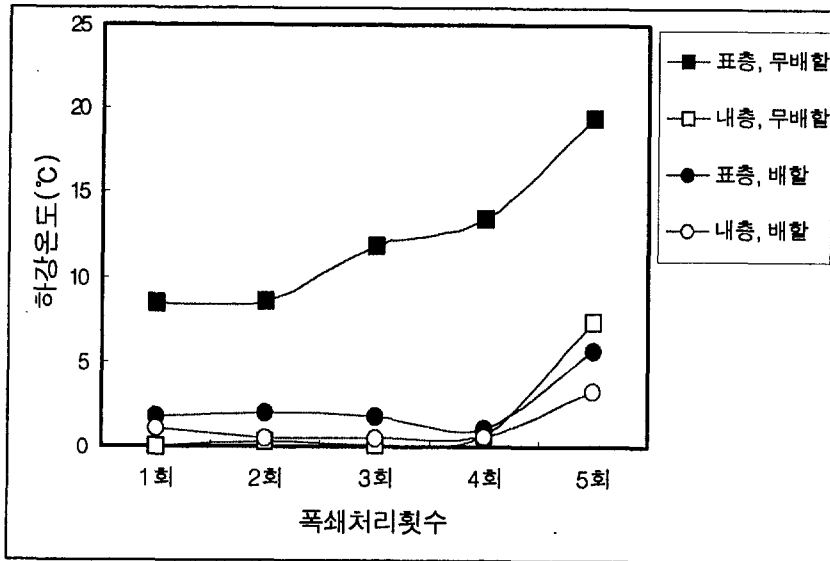


그림 3-3. 소나무 E5-100 폭쇄처리중의 재온변화

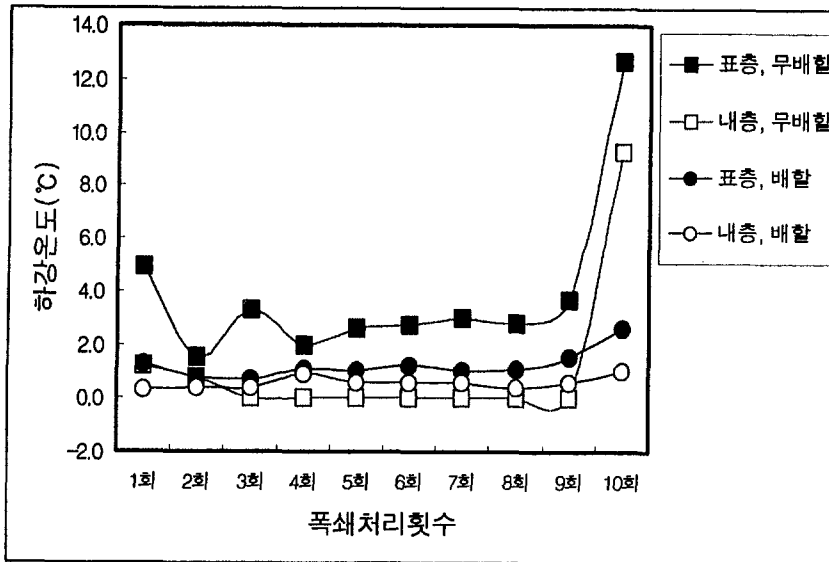


그림 3-4. 소나무 E10-100 폭쇄처리중의 재온변화

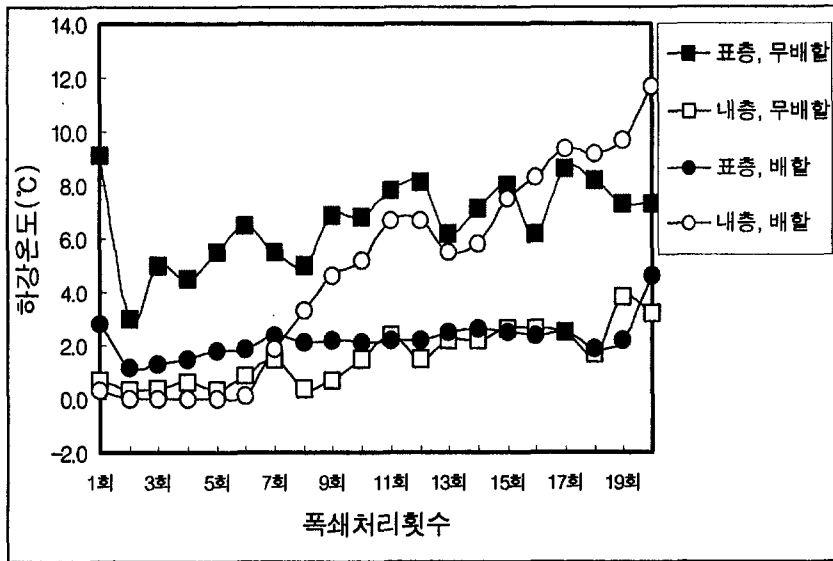


그림 3-5. 소나무 E20-100 폭쇄처리중의 재온변화

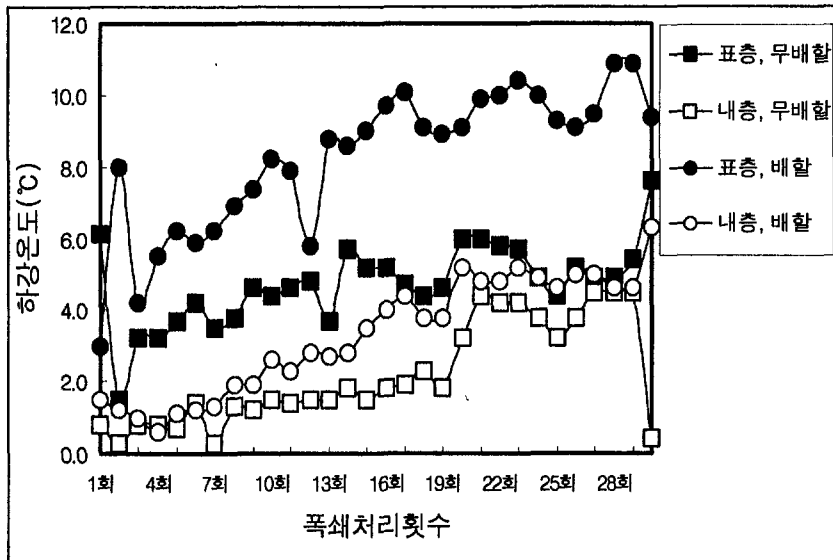


그림 3-6. 소나무 E30-100 폭쇄처리중의 재온변화



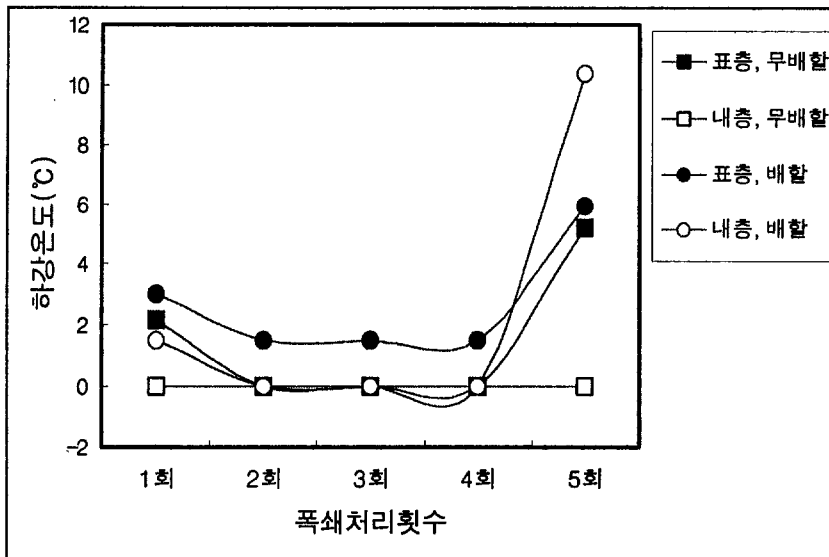


그림 3-7. 낙엽송 E5-100 폭쇄처리중의 재온변화

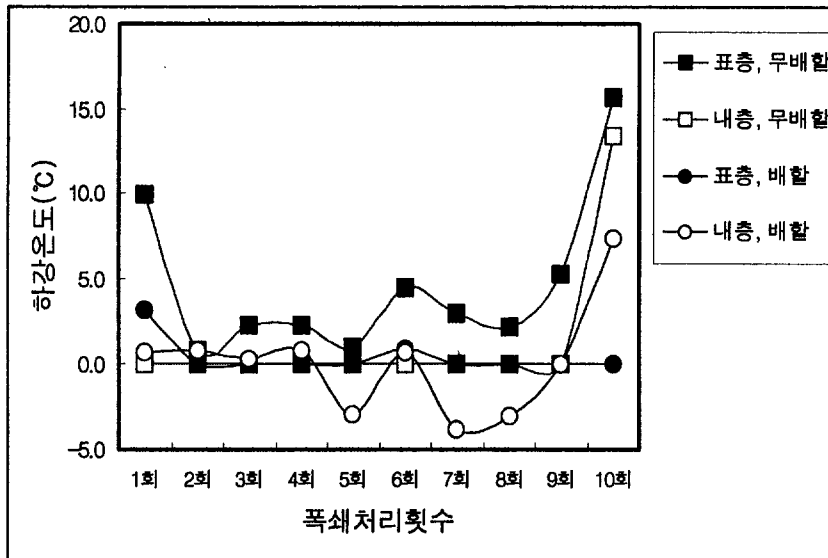


그림 3-8. 낙엽송 E10-100 폭쇄처리중의 재온변화

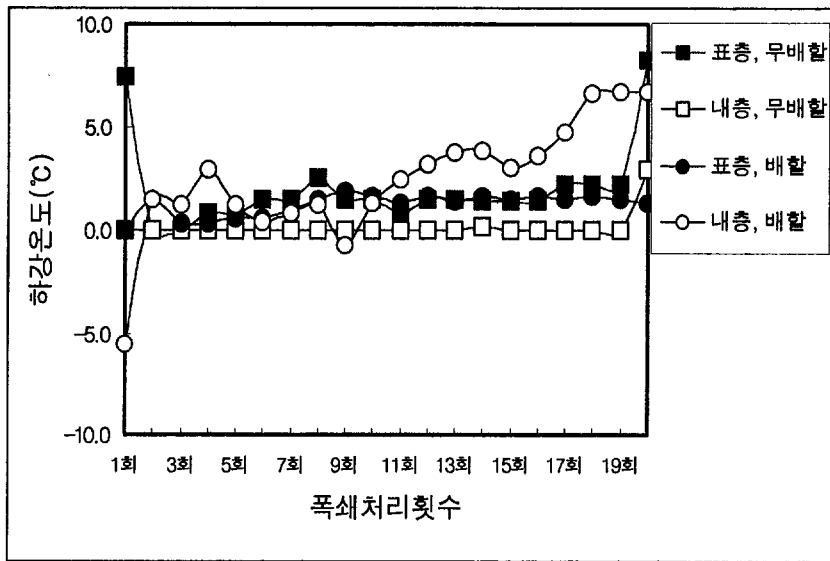


그림 3-9. 낙엽송 E20-100 폭쇄처리중의 재온변화

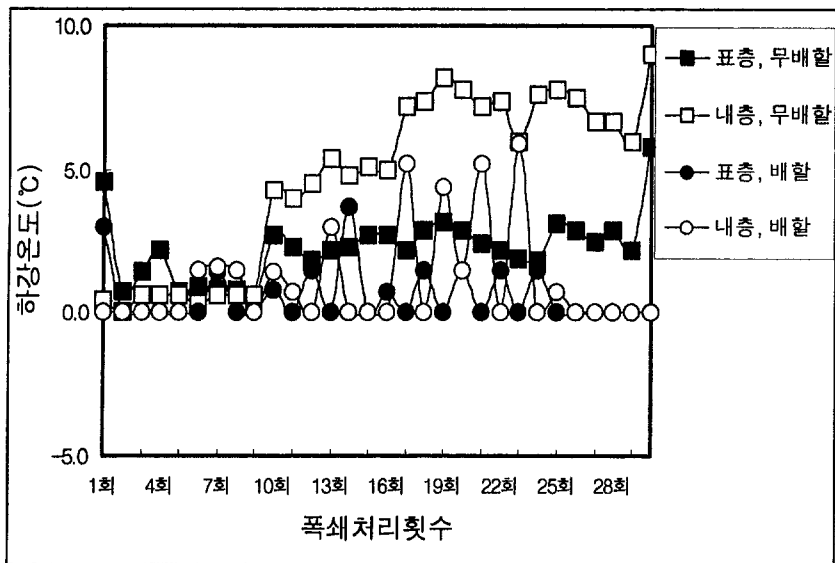


그림 3-10. 낙엽송 E30-100 폭쇄처리중의 재온변화

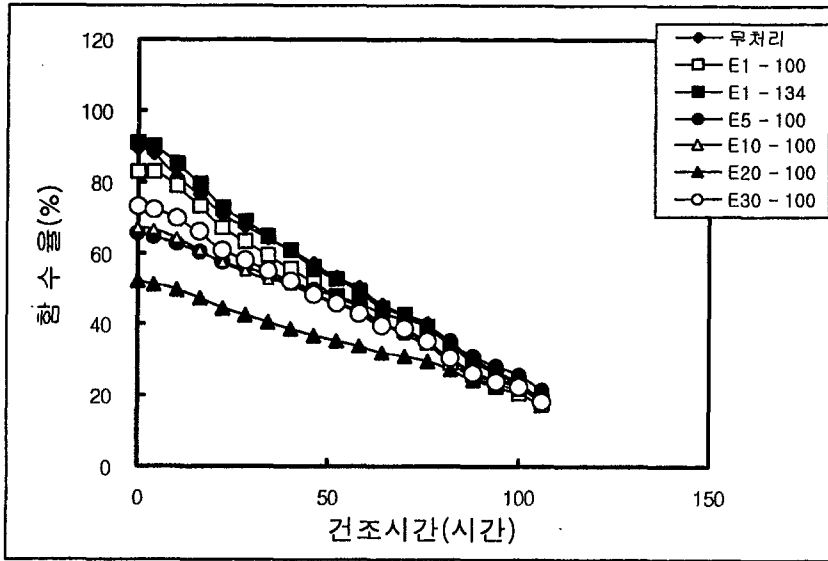


그림 3-11. 소나무 무배할재의 간헐압체고주파진공건조곡선

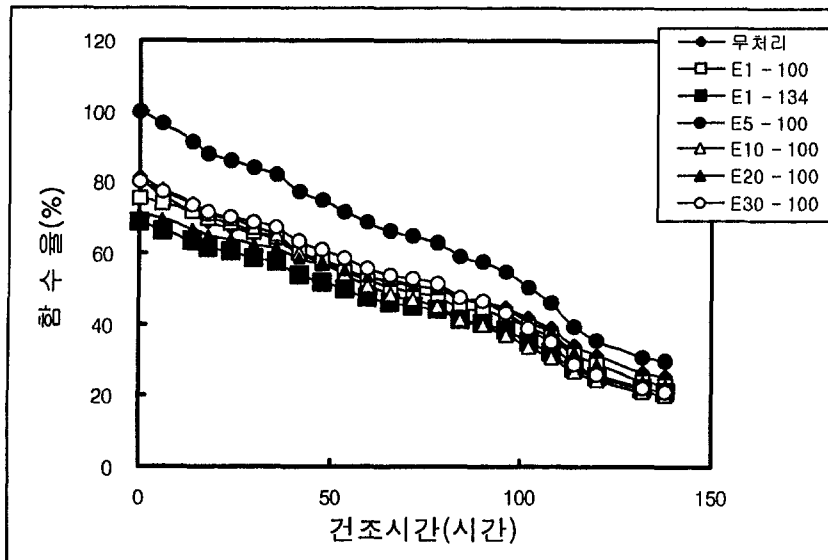


그림 3-12. 소나무 배할재의 간헐압체고주파진공건조곡선

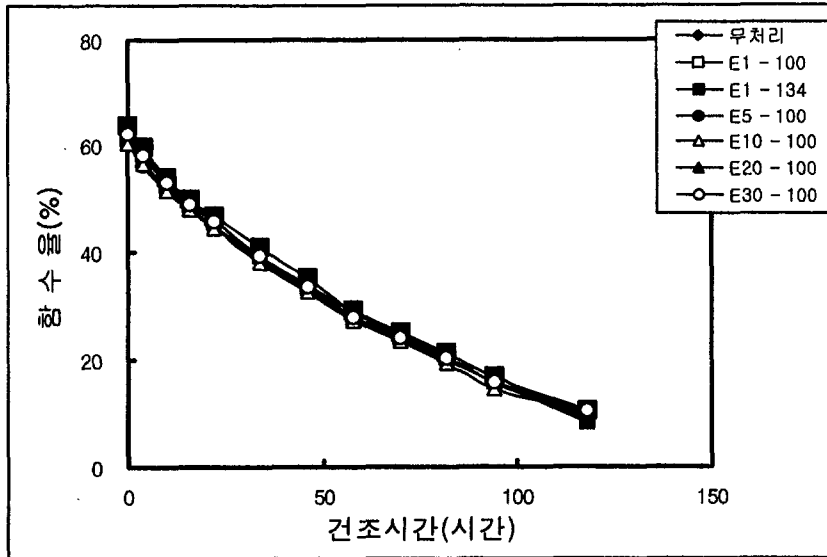


그림 3-13. 리기다소나무 무배할재의 간헐압체고주파진공건조곡선

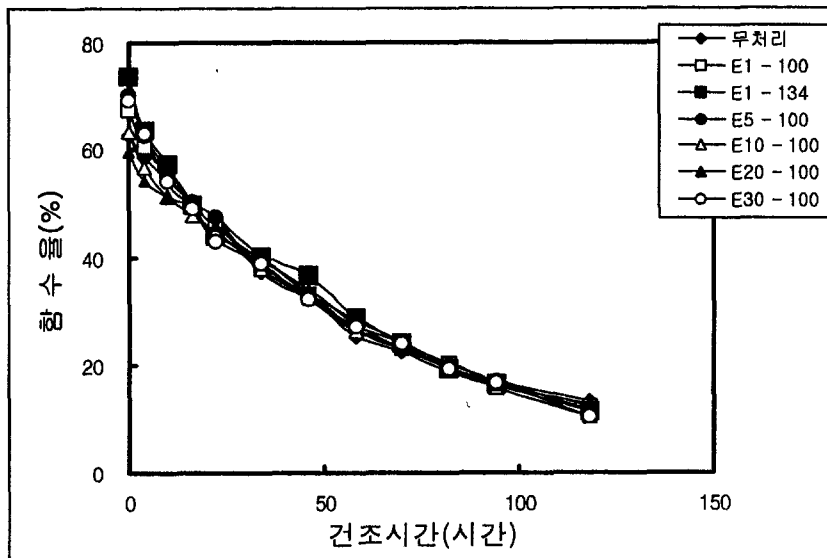


그림 3-14. 리기다소나무 배할재의 간헐압체고주파진공건조곡선

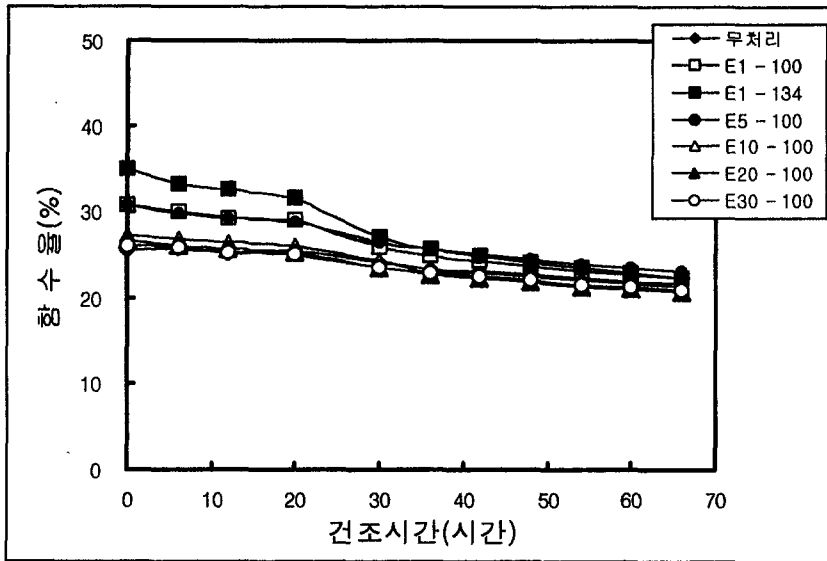


그림 3-15. 낙엽송 무배합재의 간헐압체고주파진공건조곡선

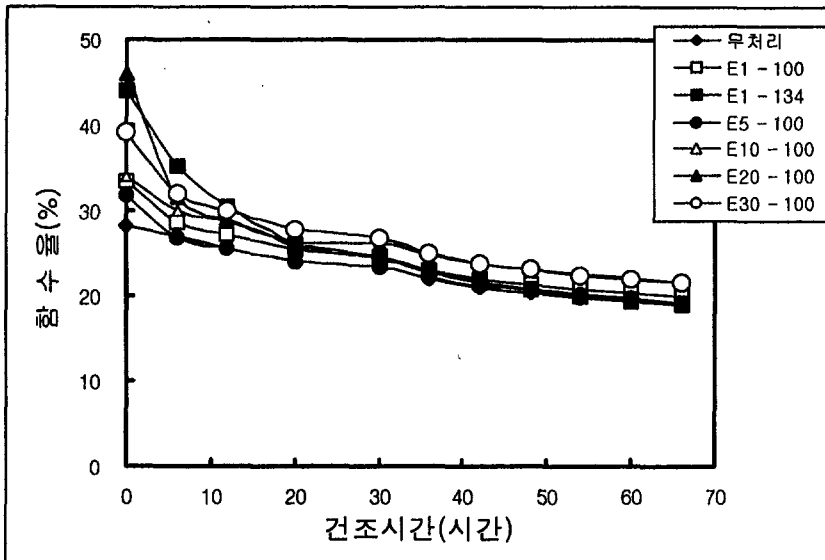


그림 3-16. 낙엽송 배합재의 간헐압체고주파진공건조곡선

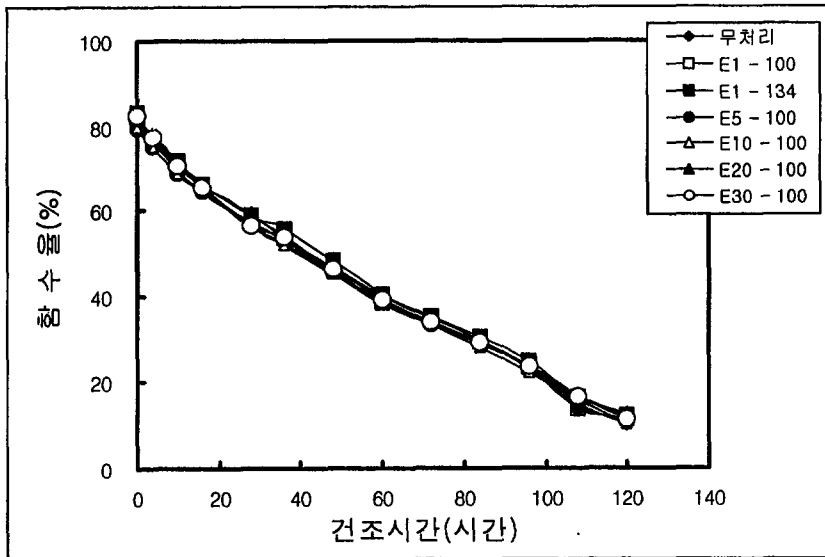


그림 3-17. 잣나무 무배할재의 간헐압체고주파진공건조곡선

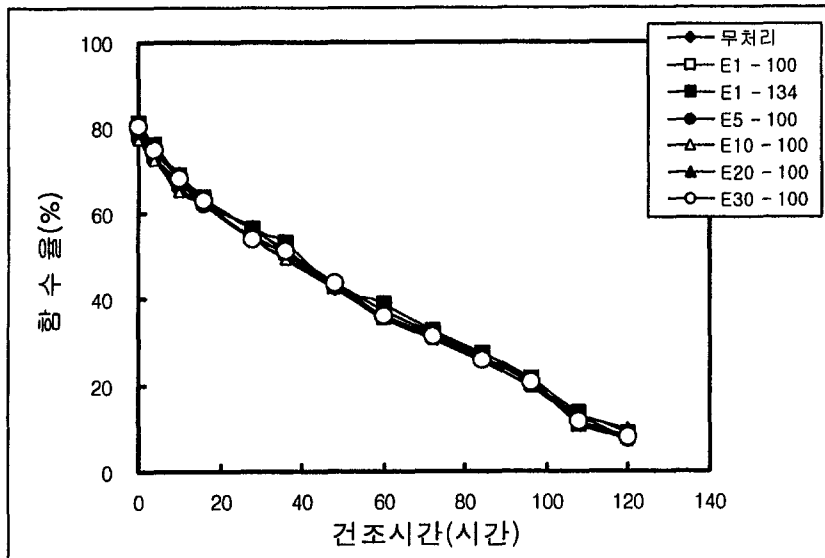


그림 3-18. 잣나무 배할재의 간헐압체고주파진공건조곡선

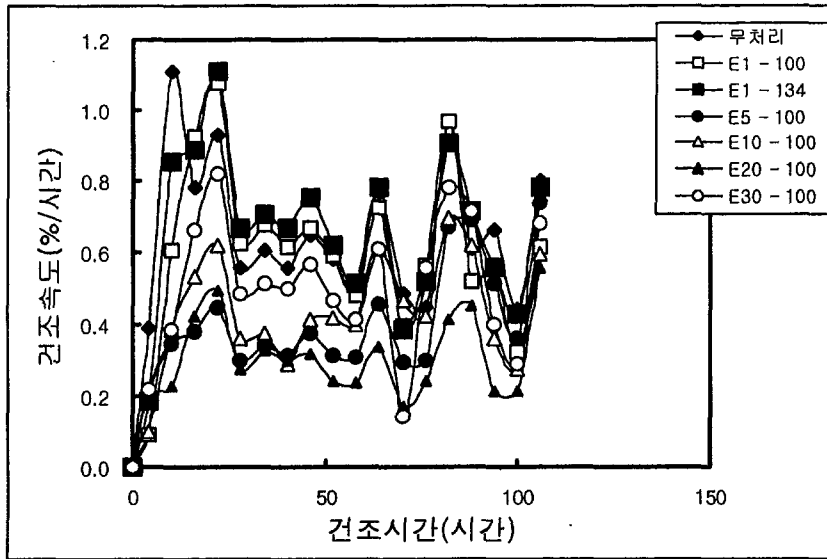


그림 3-19. 소나무 무배할재의 간헐압체고주파진공건조속도

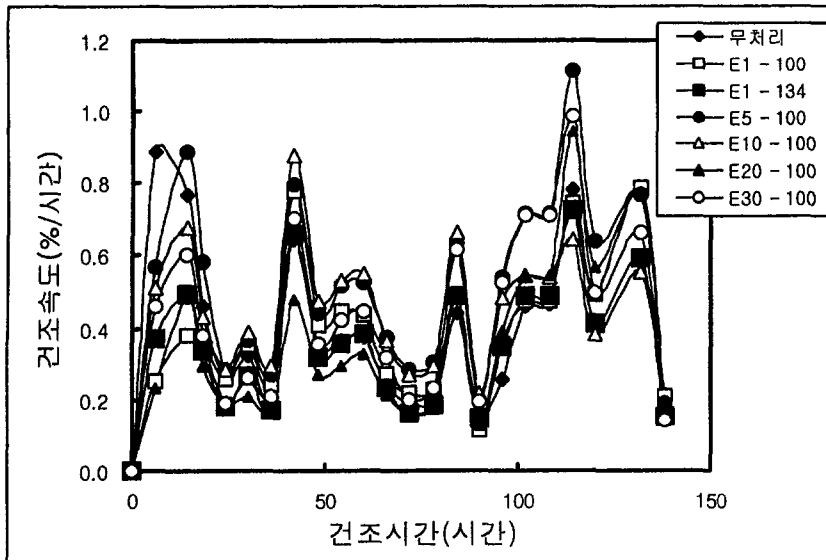


그림 3-20. 소나무 배할재의 간헐압체고주파진공건조속도

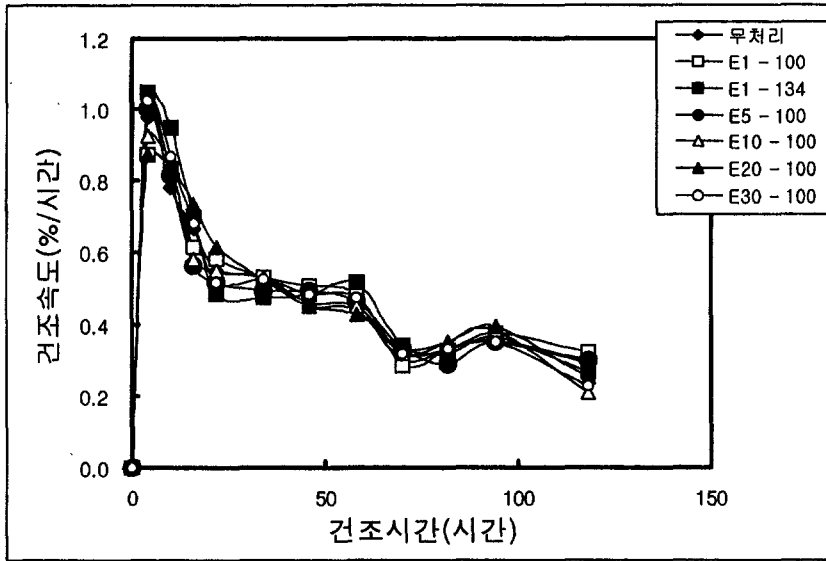


그림 3-21. 리기다소나무 무배합재의 간헐압체고주파진공건조속도

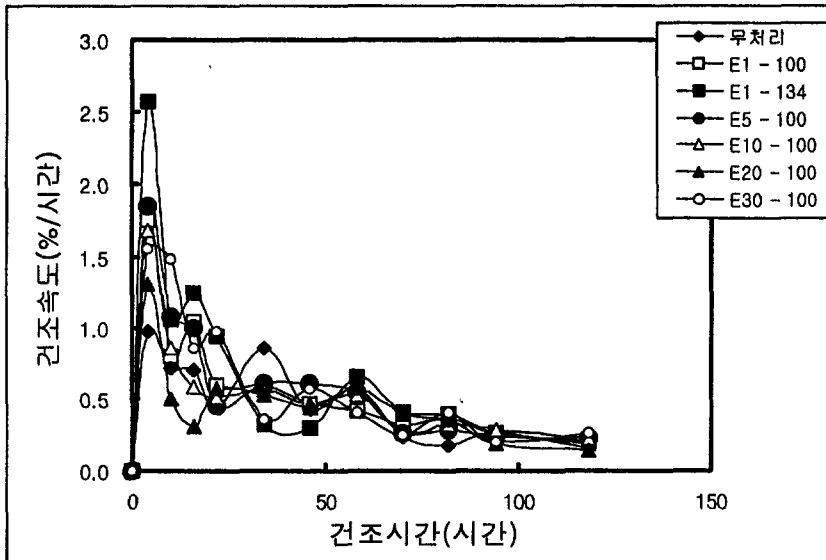


그림 3-22. 리기다소나무 배합재의 간헐압체고주파진공건조속도



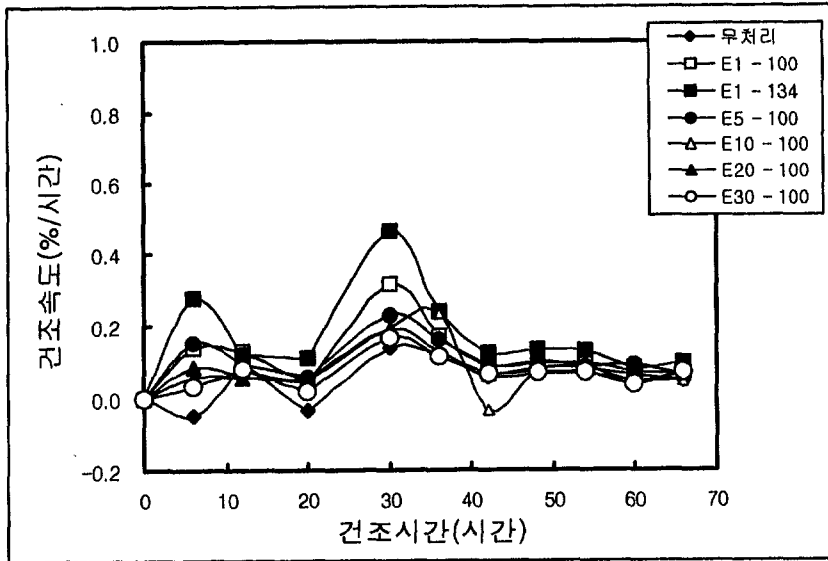


그림 3-23. 낙엽송 무배합재의 간헐압체고주파진공건조속도

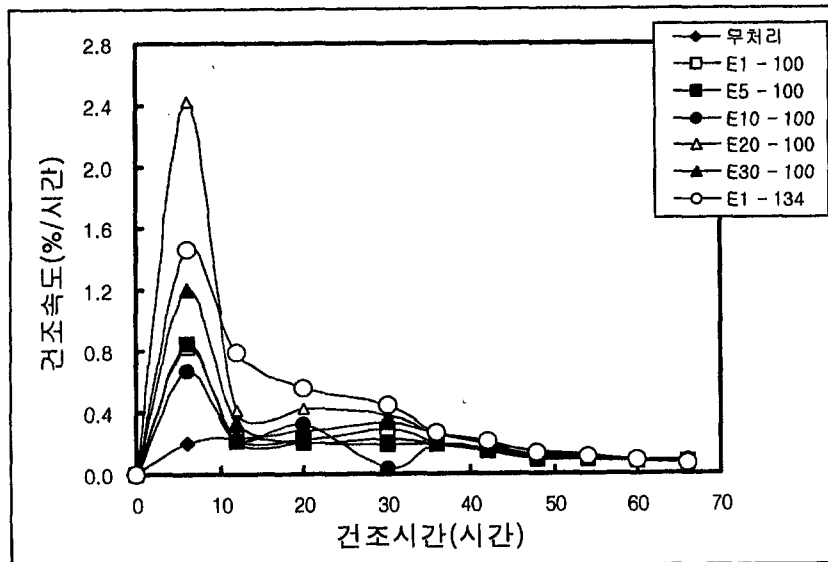


그림 3-24. 낙엽송 배합재의 간헐압체고주파진공건조속도

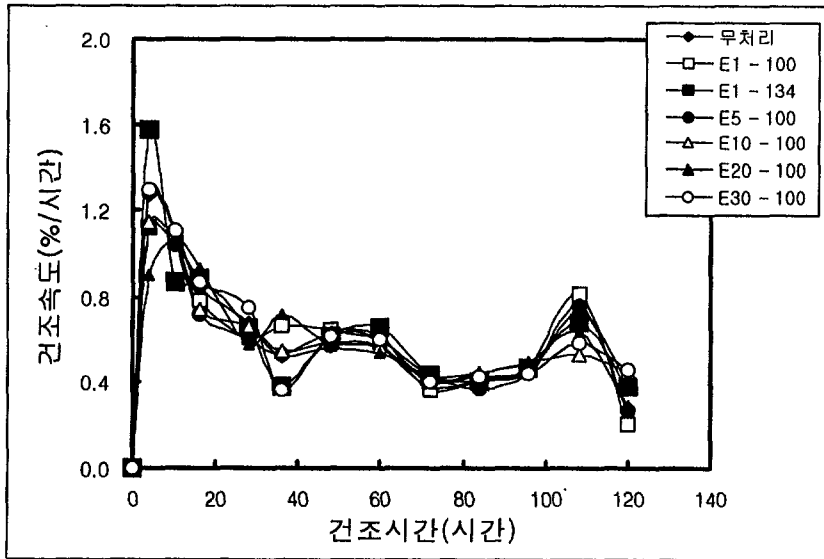


그림 3-25. 잣나무 무배할재의 간헐압체고주파진공건조속도

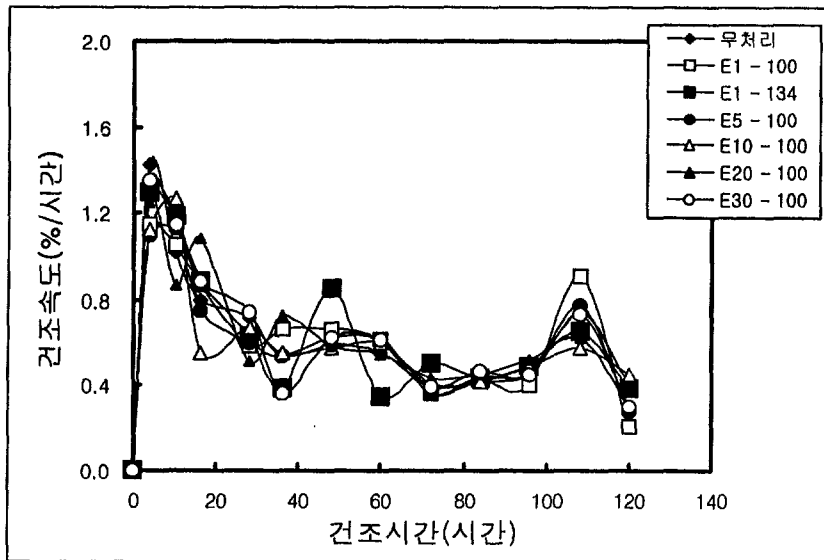


그림 3-26. 잣나무 배할재의 간헐압체고주파진공건조속도

## 제4절 결론

저압증기폭쇄처리 및 배합가공처리가 國産 주요 침엽수종 11×11cm의 수심재의 고주파진공건조성 개선에 미치는 영향과 압체력이 배합가공 흡 확장억제에 미치는 영향 등을 검토한 결과는 다음과 같다.

1. 낙엽송 E1-134처리의 경우 무배합재나 배합재 모두 폭쇄처리 직후 표층과 내층의 재온이 큰 폭으로 하강한 반면에, E1-100처리의 경우 재온의 하강 폭이 상대적으로 작았으며, 특히 내층의 재온하강은 매우 경미하였다.
2. E1-100처리나 E1-134처리 모두 재온하강 폭이 배합재가 무배합재보다 더 큰 것으로 나타나, 배합가공면은 폭쇄직후 급격하게 팽창된 공기의 방출구로써의 역할을 기대할 수 있을 것으로 생각된다.
3. 폭쇄처리 횟수가 계속 반복되면서 표층 및 내층의 재온하강폭은 점점 증가하는 것으로 나타나, 폭쇄처리 횟수가 증가할수록 폭쇄처리에 의한 효과는 더욱 증가할뿐 아니라 균일화될 수 있을 것으로 해석된다.
4. 생재에서 건축용재의 이용함수를 수준까지 고주파진공건조되는데 소요된 시간은 66~138시간으로 관행열기건조나 천연건조에 관한 다른 연구보고와 비교하여 매우 짧았다.
5. 낙엽송재의 경우 무배합재나 배합재 모두 저압증기폭쇄처리에 의한 건조속도 증진효과는 함수율 30%이상의 범위에서 뚜렷하였으며, 건조말기에는 그 효과가 크지 않는 것으로 나타났다. 그러나 소나무, 리기다소나무, 잣나무 등에서는 저압증기폭쇄처리에 의한 건조속도 증진효과는 미미하였다.
6. 재면할렬은 배합가공처리에 의해 효과적으로 예방될 수 있었으나, 저압증기폭쇄처리나 연속압체 등은 거의 영향하지 않는 것으로 나타났다.
7. 배합가공 흡의 확장은 연속압체에 의해 상당히 억제될 수 있었으며, 특히 연속압체에 의한 배합가공 흡 확장억제 효과는 수직잔적과 폭쇄처리재에서 더

육 효과적이었다.

8. 수종, 재종, 폭쇄처리조건 등에 관계없이 고주파진공건조재의 축진폭로시험 싸이클에서의 수지용출은 없었다.
9. 고주파진공건조중의 청변은 잣나무 무처리재에서 경미하게 발생하였을뿐 나머지의 경우에는 전혀 발생하지 않았다.

## 참 고 문 헌

1. 임업연구원. 1997. 1997년도 한국의 목재수급실태. 임업연구원 연구자료 133호:47-48.
2. Hayashi, K., K. Nakamura, Y. Kanagawa, M. Yasuzima, and K. Aoki. 1995. Improvement of dryability of wood and its distribution by local steam explosion. *J. of the Society of Materials Science* 44(498):279-283.
3. 久田卓興, 齊藤周逸. 1993. 心持ち柱材の急速乾燥(II) -短期間の天乾と高周波減壓乾燥の併用-. 建築用針葉樹材の乾燥に関する資料集(II):67.
4. 정희석, 이남호, 박정환. 1997. 잣나무 간伐통나무와髓心材의 가열판식 진공건조 특성. *한국목재공학회지* 25(4): 51-60.
5. 정희석, 이준호, 이용환, 강욱. 1998. 소나무, 잣나무 구조용 제재의 가열판압체식 진공건조기술 개발. *한국목재공학회 '98추계학술발표논문집*: 37-42.
6. Kanagawa, Y. 1989. Resin distribution in lumber dried by vacuum drying combined with radio-frequency. *Proc. of IUFRO Wood Drying Conference*:158-164.
7. Kanagawa, Y., K. Hayashi, and M. Yasuzima. 1992. Improvement of dryability by local steam explosion for Japanese cedar. *Proc. of 3rd IUFRO International Wood Drying Conference*:269-276.
8. Kubler, H. 1974. Drying tree disks simply without defects. *Forest Products J.* 24(7):33-35.
9. Kubler, H. 1975. Study on drying of tree cross sections. *Wood Science* 7(3):173-181.
10. Kubler, H. 1977. Formation of checks in tree stems during heating. *Forest Products J.* 27(1):41-46.
11. 이남호, 林和男. 1997. 침엽수 圓板의 투과성 증진을 위한 저압증기폭쇄처리 효과. *한국목재공학회지* 25(3): 37-42.
12. Lee, N. H, K. Hayashi, and H. S., Jung. 1998. Effect of radio-frequency/vacuum drying and mechanical press-drying on shrinkage and checking of walnut log cross sections. 1998. *Forest Products J.* 48(5):73-79

13. Lee, N. H., K. Hayashi. 1999. Effect of end-covering and low pressure steam explosion treatment on drying rate and checking during radio-frequency/vacuum drying of Japanese cedar log cross sections: in processing by Forest Products Society.
14. 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 Products J. 44(6):71-75.
15. 齊藤周逸, 久田卓興. 1993. 心持ち柱材の急速乾燥 -材面被覆による割れ防止と減圧処理-. 建築用針葉樹材の乾燥に関する資料集(II):66.

## 제 4장 목공예용 圓板의 압체식 고주파진공건조 기술개발

협동과제연구책임자: 이남호(전북대학교)

연구보조원: 정태선(전북대학교)

최준호(전북대학교)

김지희(전북대학교)

## 제1절 서 설

1995년도 우리나라 목공예산업의 시장규모는 연간 3,425억원으로서 결코 작은 규모가 아니며, 문화수준의 향상, 판촉활동의 활성화, 각종 이벤트의 폭증 등으로 목공예산업은 더욱 확장될 것으로 예상된다. 특히 2002년 월드컵은 목공예산업 발전의 한 전기가 될 것으로 판단된다.

뿐만아니라 국내의 경제, 산업적 측면을 고려해 볼 때 목공예산업의 발전 잠재력은 더욱 높아지고 있다. 첫째, 목공예산업은 소경재와 만곡재의 집약적 이용이 가능하여 목재자원의 안정적 공급과 원목구입비의 절감이 가능하고, 둘째, 시설 및 설비투자비의 부담이 적고, 셋째, 다른 목제품들과 비교하여 물류부피가 작아 물류비 부담 또한 매우 적다. 또한 목공예품은 다품종 소량생산체제에 적합한 중소기업형 제조업으로서 순발력이 우수하고 부가가치가 높은 산업이다.

그러나 목공예용재의 경우 미관적 재질이 우수한 재목이 요구되어 물푸레나무, 들메나무, 사방오리나무, 단풍나무, 벗나무 등의 활엽수를 1995년 한 해 동안만 해도 359,000m<sup>3</sup>를 외국에서 도입하였고, 국산재량 97,000m<sup>3</sup>까지 합하면 연간 456,000m<sup>3</sup>의 원목이 목공예용재로 사용되었다(임업연구원, 1997). 그러나 양질의 활엽수류는 벌채규제 등으로 인하여 이미 가격이 급등한 상황이며, 이제 그 구입자체가 어려운 실정이다.

따라서 국산재중 비교적 임목축적량이 많은 간벌소경재나 거의 폐재로 인식되고 있는 만곡재, 가지 등을 고부가가치의 목공예용재로 활용하는 방안을 강구하여 재료의 안정적 공급을 피하고, 국내 목재산업의 국제경쟁력을 제고하여 수출증대를 피하는 전략이 필요하다. 소경재나 만곡재의 목공예용재화를 위해서는 圓板의 형태로 활용하는 것이 미관적 측면, 제재수율의 향상이나 素材크기의 제약 등으로부터 유리하기 때문에 원판은 우리나라 실정에 적합한 공예적 재료임과 동시에 경쟁력있는 공업적재료이기도 하다. 따라서 원판을 활용한 목공예품의 가공기술을 개발할 필요가 있다.

원판에 반드시 포함되어 있는 髓 주위에는 인장상태의 접선방향 성장응력이 매우 높게 형성되어 있을뿐아니라, 횡절응력(crosscut stresses)과 습열회복응력(hygrothermal recovery stress) 등이 첨가되어 있기 때문에 室內 陰乾 방식으로 2~3개월의 장기간에 걸쳐 서서히 건조시키더라도 심재부위가 쉽게 활렬되는 경향이 있다. PEG 등과 같은 약제를 주입하는 방법이 시도되기도 하지만 장기간의 처리시간과 그에 따른 변재변색, 축감불량 및 도장성 불량 등이 문제점으로 지적되고 있다. 최근 고주파진공건조에 의해서 심재활렬이 효과적으로 예방될수



있고, 특히 적절한 잔적을 실시할 경우 심재할렬 예방효과는 더욱 우수한 것으로 나타났다(Lee 등, 1998, 1999). 뿐만아니라 고주파진공건조 할 경우 건조시간의 단축과 그에 따른 변재 변색예방, 잔적작업의 편리함 등의 이점도 얻을 수 있다. 그러나 고주파진공건조는 V형 크랙의 예방 측면에서 몇 가지 유리한 면을 지니고 있음에도 불구하고 불완전한 것으로 나타났다(Lee 등, 1998).

따라서 고주파진공건조중 원판의 횡단면에 대해서 수직방향으로 압체력을 가하여 횡단방향간 수축율의 差를 감소시켜 이방성수축응력을 감소시키거나, 오히려 압축응력상태로 전환시키므로써 V형크랙 또한 예방될수 있을 것으로 Lee 등(1998)에 의해서 제안된 바 있으나, 아직 이에 관한 실질적인 연구는 이루어진 바 없다. 심재할렬은 물론 V형크랙에 의해서도 손상되지 않도록 짧은 시간내에 건조하기 위해서는 압체식 고주파진공건조기술개발이 절실하다. 또한 Lee 등(1997)은 원판을 진공건조할 경우 인접한 두 상하 원판의 양 횡단면이 직접 접촉하지 않도록 잔적하는 것이 V형크랙 예방에 중요한 인자로 작용할 것이라고 제안한 바 있다.

본 연구에서는 소나무, 삼나무, 벗나무, 느티나무의 두께 5cm와 7.5cm 원판을 대상으로 배기망의 활용여부가 원판의 고주파진공건조 특성에 미치는 영향을 검토코저하였다.

## 제2절 재료 및 방법

### 1. 공시원판

공시수종으로는 국산 소나무, 삼나무, 벗나무, 느티나무의 4수종을 선택하였으며, 두께 5cm와 7.5cm의 공시원판을 준비하되 각각 별개의 원목에서 채취하였다. 동일 두께의 원판들은 무처리재와 배기망처리재가 엔드매치되게 채취하였으며, 각 엔드매치시리즈의 양끝에서 두께 1~1.5cm 크기의 원판을 1매씩 준비하여 생재비중과 초기함수율조사용으로 활용하였다. 단, 두께 7.5cm 벗나무 원판의 경우 횡단면의 변재부위를 한지1매 엔드테이핑처리(end-taping; ET)하거나 횡단면의 전단면을 한지1매 ET처리하였고, 두께 7.5cm 느티나무 원판은 횡단면의 변재부위를 한지 1매 ET처리한후 고주파진공건조하였다.

각 수종별 공시원판의 직경, 생재비중, 생재함수율, 수량, 횡단면처리 및 잔적단 등은 표 4-1과 같다.

표 4-1 공시수종별 원판의 직경, 생재비중, 생재함수율, 수량, 횡단면처리 요약

수종 및 두께	잔적	평균직경 (cm)	생재비중	생재함수율(%)			수량 (개)	횡단면 테이핑처리	잔적단	
				평균	심재	변재				
소나무 5cm	무처리	25.5	0.44	70.8	-	-	24	-	2단	
	배기망	25.5	0.44	70.8	-	-	24	-	2단	
	7.5cm	무처리	27.6	0.42	118.0	-	-	9	-	1단
		배기망	28.4	0.42	118.0	-	-	9	-	1단
삼나무 5cm	무처리	23.9	0.27	97.2	-	-	30	-	2단	
	배기망	23.9	0.27	97.2	-	-	30	-	2단	
	7.5cm	무처리	27.4	0.28	143.6	70.4	217.1	24	변재1매 ET	2단
		배기망	26.5	0.28	143.6	70.4	217.1	24	변재1매 ET	2단
벚나무 5cm	무처리	18.7	0.50	61.6	-	-	30	-	2단	
	배기망	18.7	0.50	61.6	-	-	30	-	2단	
	7.5cm	무처리	24.7	0.53	58.3	-	-	6	변재1매 ET	1단
					61.3	-	-	6	전단면1매 ET	
		배기망	24.1	0.53	58.3	-	-	6	변재1매 ET	1단
					59.6	-	-	6	전단면1매 ET	
느티나무 5cm	무처리	13.5	0.49	67.3	-	-	33	-	2단	
	배기망	13.5	0.49	67.3	-	-	33	-	2단	
	7.5cm	무처리	18.7	0.63	64.7	74.7	54.5	26	변재1매 ET	1단
		배기망	18.5	0.63	64.7	74.7	54.5	26	변재1매 ET	1단

## 2. 고주파진공건조시험

### 가. 고주파진공건조기

고주파진공건조기는 길이 274cm×폭 102cm×깊이 40cm 크기의 角形으로 상부덮개가 유연한 고무시트로 이루어져 있어 건조중 내부에 잔적된 원판의 횡단면에 대하여 수직방향으로 약10,000kgf/m<sup>2</sup>의 압체력이 가해진다. 고주파발전기의 최대출력은 7kW이고, 주파수는 13 MHz로 고정하였으며, 8분-ON, 3분-OFF로 작동시켰다.

### 나. 잔적

두께 5cm원판은 모두 상부와 하부에 접지전극판을 두고, 중앙에 기전전극판을 두어 2단으로 잔적하되 재온컨트롤용 원판은 하단에 배치하였다(그림 4-1). 한편 두께 7.5cm원판은 상부를 기전전극판으로, 하부를 접지전극판으로 하는 1단 잔적하였다.

무처리의 경우 원판의 횡단면과 전극판사이에 두께 3mm의 합판을 삽입하여 잔적하였고, 배기망처리의 경우는 원판의 횡단면과 전극판사이에 약 3mm정도의 공간을 확보하기 위하여 목질섬유상의 망을 삽입하였다(그림 4-1).

#### 다. 건조조건과 건조중합수율 측정

원판의 고주파진공건조시험은 전압과 주파수를 일정하게 고정하고, 원판 내층의 재온을 변화시켜가며 콘트롤하였으며, 진공도는 모두 40~100mmHg 범위를 유지시켰다. 재온은 테프론 튜브(teflon tube)로 코팅한 백금촉은 저항체를 원판의 내층에 접선단면에서 수를 향하여 심재부까지 삽입한 다음 실리콘으로 밀봉하였고, 고주파발진에 의해 유기되는 전자파는 필터를 사용하여 제거한 다음 자동 콘트롤하였다. 각 수종별 두께별 고주파진공건조시험 조건은 예비실험을 통하여 표 4-2, 표 4-3과 같이 설정하였다.

건조중 적절한 시간간격으로 건조기의 작동을 중지하여 압체력을 해제한 다음 원판의 무게를 평량하여 건조중합수율과 건조속도를 산출하였다. 단, 2단잔적을 실시한 두께 5cm 원판의 경우는 상단에 잔적한 원판들에 대해서만 조사하였다.

#### 라. 건조결합과 소비전력량 조사

건조종료후 모든 원판들의 양 횡단면상에 나타난 심재할렬과 변재할렬 및 V형크랙의 발생정도와 변재변색의 발생정도를 조사하였으며, 적산전력량계를 부착하여 건조중 소요되는 에너지를 측정하되 고주파발진을 위한 소요에너지와 기타 진공시스템운전에 소요되는 에너지를 구분하여 조사하였다. 다만 잔적방법이나 횡단면의 엔드레이핑처리를 모두 동일 로드에서 잔적하여 건조하였기 때문에 수종과 두께에 따른 소요전력량만을 구분할 수 있었다.

표 4-2. 소나무와 삼나무 원판의 두께별 고주파진공건조시험 조건

수종	두께 5cm		두께 7.5cm	
	건조시간(시간)	재온(℃)	건조시간(시간)	재온(℃)
소나무	0~163	38.5	0~12	36
	~203(배기망)	38.5	~36	38
			~48	40
			~60	42
			~84	44
			~96	48
			~120	50
			~144	54
~168	58			
삼나무	0~96	36	0~24	36
	~152	38	~48	38
	~216(배기망)	38	~72	40
			~96	42
			~120	44
			~144	46
			~216	48
			~240	50
~276	52			

표 4-3. 벚나무와 느티나무 원판의 두께별 고주파진공건조시험 조건

수종	두께 5cm		두께 7.5cm	
	건조시간(시간)	재온(℃)	건조시간(시간)	재온(℃)
벚나무	0~32	38.5	0~12	36
	~56	40.5	~24	38
	~80	42.5	~48	40
	~104	44.5	~84	43
	~120	46.5	~120	45
	~144(배기망)	46.5	~156	48
			~192	53
느티나무	0~48	36.5	0~32	38.5
	~96	38.5	~56	40.5
	~120	40.5	~80	42.5
	~134	42.5	~104	44.5
	~150	44.5	~120	46.5
	~174(배기망)	44.5	~144	46.5

## 제 3절 결과 및 고찰

### 1. 건조시간과 건조속도

각 수종의 원판의 두께별 고주파진공건조곡선과 건조시간 경과에 따른 건조속도의 변화를 그림 4-3 ~ 그림 4-19에 나타내었다.

두께 5cm 소나무원판의 경우 초기함수율 75.5%에서 함수율 약 4~5%까지 건조되는데 무처리 원판은 163시간이, 그리고 배기망처리 원판은 203시간이 소요되었다.

소나무 두께 75mm 원판이나 다른 수종의 경우도 대부분 1주일 이내에 이용 함수율수준까지 건조되어 참나무 10.5cm 각재의 고주파진공건조소요시간인 600시간이나 느릅나무 12cm 각재의 236시간보다는 상당히 짧았다(Terazawa 등, 1998).

삼나무 75mm 원판의 경우는 건조소요시간이 약 12.5일 정도로 다른 경우와 비교하여 다소 길었는데, 이는 초기함수율이 142.5%로 매우 높았기때문인 것으로 생각된다.

동일수종 동일두께의 원판들에서는 배기망잔적 처리를 할 경우 무처리 원판들에 비하여 건조소요기간이 더 길거나, 또는 동일건조시간동안 함수율감소량이 더 적은 것으로 나타났다. 이는 무처리재의 건조초기 건조속도가 배기망처리 원판보다 매우 빠르게 나타났으며, 비록 건조중기 이후 건조속도가 역전되어 배기망처리재의 건조속도가 더 빠르게 나타났다고 할지라도 건조초기의 건조속도 차를 극복할 만큼 크지 않아 결과적으로 무처리재의 평균건조속도가 더 크게 나타났기 때문이다. 전극판과 피건조재사이에 간극이 존재할 경우 고주파발진전압이 감소하고, 간극에 의한 발진전압감소효과는 유전체 손실이 큰 고함수율 범위에서 더 크기 때문에 배기망처리 원판의 건조초기 건조속도가 상대적으로 저하된 원인이다. 건조시간이 경과함에 따라 함수율이 감소되면서 발진전압 감소효과가 둔화되어 두 잔적 처리간에 건조속도차는 점점 작아지다가 건조중기이후 역전되는 양상을 보이게 된다(Terazawa 등, 1999). 특히 건조초기는 모세관유동이 내부수분이동의 주체가 되므로 고주파진공하에서 재내외간의 절대압의 차에 기인하여 형성되는 기동력이 최대로 발휘되기 때문에 전극판과 피건조재 사이의 간극은 건조속도를 크게 저하시키는 것으로 판단된다(Lee 등, 1998). 소나무 두께 5cm 원판의 경우 건조개시직후 건조속도는 무처리재가 0.95%/시간인 반면에 배기망처리 원판은 0.70%/시간에 불과하였다. Lee 등(1997)은 원판을 고주파진공건조

할 경우 전극판에 결로가 발생하는 경우 전극판과 접촉한 횡단면측과 그 반대측 횡단면사이에 수분경사가 형성되면서 어느 한쪽 횡단면사이에 심재할렬이나 변재할렬의 발생위험성이 높으므로 배기망을 삽입하여 잔적하는 것이 바람직하다고 제안한 바 있다. 그러나 본 시험의 경우 열수에 의해서 가열되는 열판으로 전극판을 보온처리하므로써 전극판상에서의 결로를 예방 할 수 있었고, 이러한 경우 배기망 잔적은 불필요한 것으로 판단된다. 벗나무 두께 75mm 원판의 경우 건조초기 건조속도는 잔적방법에 관계없이 변재1매ET처리 원판의 건조속도가 전 단면ET처리 원판과 비교하여 더 빠르게 나타났다. 이는 벗나무의 경우 횡단면의 심재부위를 통한 수분증발도 활발하다는 것을 의미하는 것으로서 심재와 변재의 초기함수율이 유사할 경우 횡단면의 변재부위만을 엔드데이핑처리하는 것은 심·변재간에 수분경사를 유발시킬 수 있으므로 투과성등과 같은 면밀한 분석에 근거하여 실시하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 한편 무처리 전단면1매ET처리 원판이라 할지라도 건조초기의 건조속도는 배기망 잔적한 변재1매 ET처리 원판의 건조속도보다 빠르게 나타나 건조초기의 건조속도는 횡단면의 엔드데이핑처리 보다는 배기망의 삽입여부에 의해서 더 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 건조시간이 경과한 저함수율 범위에서도 설정재온의 상승과 더불어 건조속도도 증가하는 양상을 보았다. 이것은 고주파진공건조에서 건조말기라 할지라도 재온을 상승시키므로써 건조속도를 증가시킬수 있음을 의미한다. 한편 Avramidis 등 (1996)은 고주파진공건조중 전압을 증가시켜가면서 전 건조기간내내 거의 일정한 건조속도를 유지시키는 건조제어방식은 제안한 바 있다.

## 2. 심재할렬과 변재할렬

각 수종별 두께별 원판의 심재할렬과 변재할렬의 발생정도는 표 4-4 ~ 표 4-7과 같다. 심재할렬의 발생정도가 소나무 두께 5cm 원판이나 벗나무 두께 5cm 원판, 느티나무 두께 5cm 원판등에서는 배기망 잔적 처리재에 비하여 무처리재에서 다소 심하게 발생한 반면, 나머지의 경우에는 비슷하거나 역전되었고, 변재할렬의 발생정도도 무처리재와 배기망잔적재간에 일정한 경향이 없는등 심재할렬이나 변재할렬의 발생은 배기망잔적과는 직접적인 관련이 없는 것으로 나타났다.

심재할렬의 경우 두께 5cm 소나무원판과 두께 7.5cm 삼나무의 배기망잔적 처리 원판에서 다소 심하게 발생하였을 뿐 나머지의 경우에는 매우 경미하였다. 이는 고주파진공건조의 경우 기본적으로 내부수분의 이동속도가 빨라 수분

경사가 완만하게 형성되는 이점을 지니고 있기 때문이다(Lee 등, 1998). 그러나 소나무의 경우 두께 7.5cm 원판에 비하여 보다 완만한 건조조건이 적용되어 건조 소요시간이 길었던 두께 5cm 원판에서 심재할렬이 더 심하게 발생하였다. 심재할렬이나 변재할렬의 예방을 위해서는 무엇보다도 양횡단면간이나 동일 원판내에서 심·변재부위간 건조속도를 균일하게 유지하는 것이 매우 중요하며(Lee 등, 1998), 이러한 점에서 전극판에서의 결로예방을 위한 특별한 대책이 강구되어야 한다.

변재할렬의 경우 대체로 발생정도가 경미한 편이었으나 벚나무와 느티나무의 두께 7.5cm 원판에서는 매우 심하게 발생하였다. 이것은 원판의 두께방향으로의 수분경사보다는 심·변재간에 초기함수율이나 투과성의 차이 등으로 심재나 변재중 어느 한쪽 부위가 먼저 섬유포화점에 도달하면서 두 부위의 경계면선상에 인장응력이 형성되기 때문인 것으로 생각된다. 동일 두께 동일처리 원판임에도 불구하고 심재할렬은 거의 전혀 발생하지 않은 사실이 이를 뒷받침한다. 따라서 심·변재부위가 거의 동시에 섬유포화점에 도달케 하는 것이 매우 중요하다. 그러나 초기함수율이나 투과성 등이 매우 복잡하게 관여하기 때문에 결코 간단하지 않으며 과학적인 분석을 통하여 건조지표들이 개발되어야 할 것으로 생각된다.

표 4-4 소나무 원판의 심재할렬과 변재할렬의 발생정도

두께	잔적	심재할렬			변재할렬			횡단면 엔드테이핑
		무손상율 (%)	총개수 (개)	총길이 (cm)	무손상율 (%)	총개수 (개)	총길이 (cm)	
5cm	무처리	29.2	2	7.3	83.3	0.3	0.4	없음
	배기망잔적	54.2	0.7	1.9	75.0	0.4	1.0	없음
7.5cm	무처리	88.9	0.1	0.5	100	0	0	없음
	배기망잔적	88.9	0.1	0.1	100	0	0	없음

주: (무손상원판수)/(총시험원판수)×100(%)

표 4-5 삼나무 원판의 심재할렬과 변재할렬의 발생정도

두께	잔적	심재할렬			변재할렬			횡단면 엔드레이핑
		무손상을 총개수 (%)	총길이 (개) (cm)	무손상을 총개수 (%)	총길이 (개) (cm)			
5cm	무처리	100	0	0	100	0	0	없음
	배기망잔적	83.3	0.3	1.1	100	0	0	없음
7.5cm	무처리	66.7	0.4	1.9	100	0	0	변재1매
	배기망잔적	37.5	1.1	5.9	100	0	0	변재1매

주: (무손상원판수)/(총시험원판수)×100(%)

표 4-6 벗나무 원판의 심재할렬과 변재할렬의 발생정도

두께	잔적	심재할렬			변재할렬			횡단면 엔드레이핑
		무손상을 총개수 (%)	총길이 (개) (cm)	무손상을 총개수 (%)	총길이 (개) (cm)			
5cm	무처리	86.7	0.2	0.4	66.7	0.7	1.9	없음
	배기망잔적	96.7	0.1	0.1	90.0	0.1	0.3	없음
7.5cm	무처리	100	0	0	0.0	5.0	6.6	변재1매
	배기망잔적	100	0	0	0.0	7.0	7.9	변재1매
	무처리	100	0	0	0.0	6.3	7.7	전단면1매
	배기망잔적	91.7	0.1	0.6	0.0	6.5	7.2	전단면1매

주: (무손상원판수)/(총시험원판수)×100(%)

표 4-7 느티나무 원판의 심재할렬과 변재할렬의 발생정도

두께	잔적	심재할렬			변재할렬			횡단면 엔드레이핑
		무손상을 총개수 (%)	총길이 (개) (cm)	무손상을 총개수 (%)	총길이 (개) (cm)			
5cm	무처리	93.9	0.1	0.1	100	0	0	없음
	배기망잔적	97.0	0.1	0.1	100	0	0	없음
7.5cm	무처리	100	0	0	3.8	4.1	16.5	변재1매
	배기망잔적	100	0	0	1.9	4	15.6	변재1매

주: (무손상원판수)/(총시험원판수)×100(%)



### 3. V형크랙과 변색

표 4-8은 각 수종별 두께별 원판의 V형크랙 발생정도를 나타낸 것이다. 느티나무원판에서는 전혀 발생하지 않았고, 소나무 두께 7.5cm 원판과 삼나무와 벗나무의 두께 5cm 원판에서는 매우 경미하게 발생하였으며, 나머지 원판들에서는 발생정도가 보통이었다. 그러나 건조중 원판의 횡단면에 대하여 수직으로 가해지는 압체력을 건조종료시까지 연속적으로 적용할 경우에는 잔류이방성수축응력의 해제를 완화시킬 수 있어 V형크랙에 의한 손상은 더욱 경감될 수 있을 것으로 판단된다.

삼나무 두께 7.5cm 원판의 경우 동일 단면에서 변재부위의 초기함수율이 심재부위보다 부려 146.7%나 높으므로 말미암아 원판 횡단면상의 심·변재부위가 섬유포화점에 도달하는 시기가 서로 다르고, 이에 따라 건조초기에 심·변재의 경계선상에 미세한 할렬이 발생될 우려가 높다. 한편 건조후기에 형성되는 이방성수축응력이 건조초기에 발생한 미세할렬부에 집중되면서 V형크랙으로 진전될 수 있으며 (Lee 등, 1997 and 1998) 강도가 약한 수종일수록 그 위험성은 더욱 높아진다. 따라서 이러한 경우 심·변재부위의 수분증발속도를 콘트롤하여 섬유포화점에 도달하는 시기를 조정할 필요가 있으나 다양한 인자들이 작용하기 때문에 매우 복잡하다. 예를들어 느티나무 두께 7.5cm 원판의 경우 변재부위의 초기함수율이 심재부위보다 약 20%정도 낮고, 또한 일반적으로 심재보다는 변재의 투과성이 양호하기 때문에 아무런 조치를 취하지 않을 경우에 변재가 심재보다 먼저 섬유포화점에 도달하여 수축하려하나 아직 섬유포화점 이상인 심재에 의해서 수축이 억제되면서 변재부위에 인장응력이 형성될 수 있다. 따라서 변재부의 건조속도를 지연시킬 필요가 있으며, 이에 따라 횡단면의 변재부위만을 한지1매로 엔드데이핑처리하였다. 그러나 얼마만큼 지연시켜야 할 것인지? 또는 과연 변재의 건조속도를 지연시켜야 할만큼 심재의 투과성은 불량한 것인지? 등 정량적인 자료가 부족하여 처리가 적절하지 못할 경우 본 시험에서와 같이 다수의 변재할렬이 발생될 수 있다.

변색은 두께 7.5cm 삼나무 원판에서만 경미한 청변이 발생하였을 뿐, 나머지 수종의 경우에는 전혀 발생하지 않았다. 두께 7.5cm 삼나무 원판의 경우 평균 초기함수율이 143.6%에 이를 정도로 높아 고함수율범위가 비교적 오랫동안 지속되었기 때문인 것으로 생각되어 건조초기의 건조속도를 보다 빠르게 유지할 필요가 있다.

표 4-8 수종별 원판의 V형크랙 발생정도

수종	잔 적	두께 5cm			두께 5cm		
		무손상율 (%)	총폭 (cm)	총길이 (cm)	무손상율 (%)	총폭 (cm)	총길이 (cm)
소나무	무처리	58.3	0.2	4.7	88.9	0.1	1.1
	배기망잔적	41.7	0.4	6.5	88.9	0.1	1.1
삼나무	무처리	70	0.1	1.8	20.8	0.5	7.8
	배기망잔적	90	0.1	0.6	58.3	0.2	0.3
벚나무	무처리	70	0.2	2.2	50.0 <sup>1)</sup>	0.1 <sup>1)</sup>	14.5 <sup>1)</sup>
					41.7 <sup>2)</sup>	0.2 <sup>2)</sup>	16.5 <sup>2)</sup>
	배기망잔적	90	0.2	0.9	66.7 <sup>1)</sup>	0.1 <sup>1)</sup>	12.3 <sup>1)</sup>
					58.3 <sup>2)</sup>	0.1 <sup>2)</sup>	13.8 <sup>2)</sup>
느티나무	무처리	100	0	0	100	0	0
	배기망잔적	100	0	0	100	0	0

- 주: 1) 변재1매엔드테이핑처리 원판  
 2) 전단면1매엔드테이핑처리 원판

#### 4. 소요전력량

고주파진공건조중 소요에너지를 각 수종별 두께별로 구분하여 표 4-9에 나타내었다.

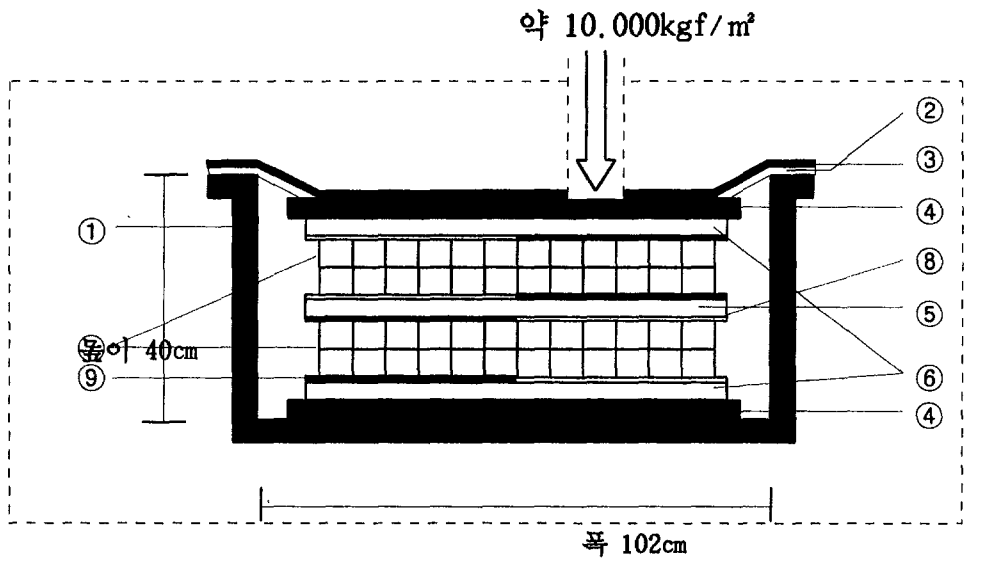
물 1kg을 증발시키기 위하여 고주파 가열에 소요된 비에너지는 3.5 ~ 9.1 kWh/kg·물로서 두께 101mm 침엽수 각재를 고주파진공건조하는데 있어서 고주파 가열에 소요된 비에너지 1.29kWh/kg·물(Zwick 등, 1995)과 비교하여 매우 높았다. 이것은 본 시험에 사용된 고주파진공건조기의 경우 불과 1㎡정도의 소형건조기이었으며, 이것마저도 시험편 잔적공간의 나머지가 시험편부분(dummy log cross sections)을 사용하여 잔적하였기 때문인 것으로 생각된다. 뿐만아니라 건조중에 시험편의 무게를 측정하기 위하여 건조기의 작동을 중지하고서 매회 30분정도의 시간동안 외기에 노출되므로 팔미압아 재가열을 위하여 추가적인 에너지소요가 있었을 것으로 생각되며, 이것은 가열뿐만아니라 진공펌프의 작동에도 상당한 에너지 투입의 요인으로 작용하였다. 고주파진공건조비용은 수용재적과 밀접한 관련이 없으며, Zwick 등(1995)는 수용재적이 110㎡인 고주파진공건조기는 수용재적 25㎡인 고주파진공건조기에 비하여 건조비용을 50%까지도 절감할 수 있다고 보고한 바 있다. 따라서 본 시험의 소요전력량 자료는 실용화 자료로서는 적합하지 않는 것으로 생각된다.

진공시스템 작동에 소요되는 에너지는 2.3 ~ 10.8kWh/kg·물의 범위였다.

특히 뱃나무 두께 7.5cm 원판의 경우 10.8kWh/kg·물로서 다른 경우와 비교하여 상당히 높은 편으로서 고주파가열에 소요된 비에너지 7.5kWh/kg·물 보다도 더 높았다. 이것은 건조개시 직후 12시간동안 진공시스템 작동에는 69.1kWh가 소요되었고, 고주파가열에는 10.3kWh밖에 소요되지 않는등 건조초기 ~ 건조중기까지의 진공시스템 작동에 소요된 전력량이 고주파가열에 소요된 전력량보다 큰 것에 기인한 것으로 분석되었다. 또한 삼나무 두께 7.5cm 원판의 경우도 진공시스템 작동에 소요된 비에너지가 고주파가열에 소요된 비에너지보다 2.1kWh/kg·물 더 높게 나타났는데, 이 경우 초기함수량이 매우 많아 이에 비례하여 증발된 수증기의 배기량도 많기 때문인 것으로 생각된다.

표 4-9 각 수종의 두께별 원판의 고주파진공건조중 소요에너지

수종	두께	총수분증발량(kg)			총소요전력량(kWh)			비에너지(kWh/kg·물)		
		무처리	배기량	계	고주파가열	진공시스템	계	고주파가열	진공시스템	계
소나무	5cm	23.6	25.2	48.8	426.5	270.5	697.0	8.7	5.5	14.2
	7.5cm	21.3	22.0	43.3	356.6	100.5	457.1	8.2	2.3	10.5
삼나무	5cm	20.6	21.5	42.1	257.5	125.8	383.3	6.1	3.0	9.1
	7.5cm	44.3	43.9	88.3	311.4	491.6	803.8	3.5	5.6	9.1
뱃나무	5cm	12.3	12.7	25.0	224.5	88.1	312.6	9.0	3.5	12.5
	7.5cm	13.4	13.4	26.8	201.1	289.1	490.2	7.5	10.8	18.3
느티나무	5cm	9.6	9.9	19.5	177.4	83.4	260.8	9.1	4.3	13.4
	7.5cm	22.8	22.6	45.4	238.3	278.3	516.6	5.2	6.1	11.3



- |        |                |
|--------|----------------|
| ①진공탱크  | ⑥접지전극판         |
| ②경사철제판 | ⑦원판            |
| ③고무시트  | ⑧두께 3mm 목질섬유상망 |
| ④단열판   | ⑨두께 3mm 합판     |
| ⑤기전전극판 |                |

그림 4-1. 두께 50mm 원판의 무처리 및 배기망잔적

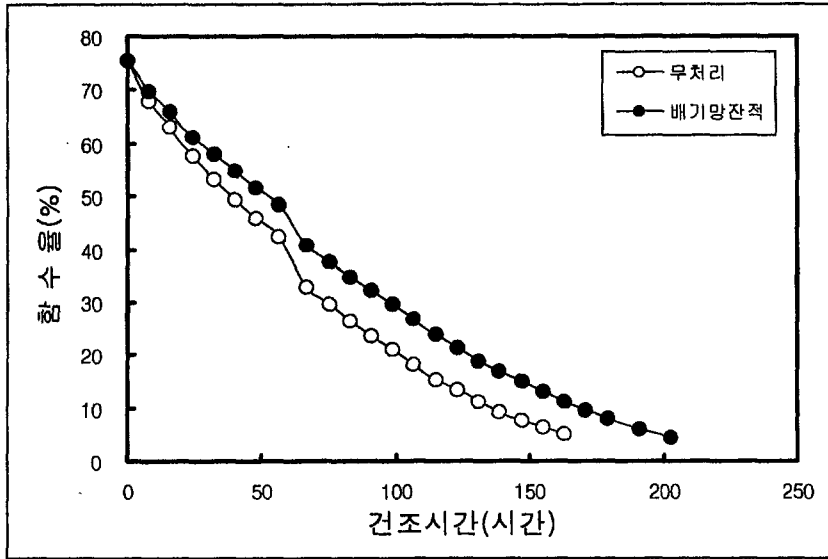


그림 4-2. 두께 5cm 소나무 원판의 압채고주파진공건조곡선

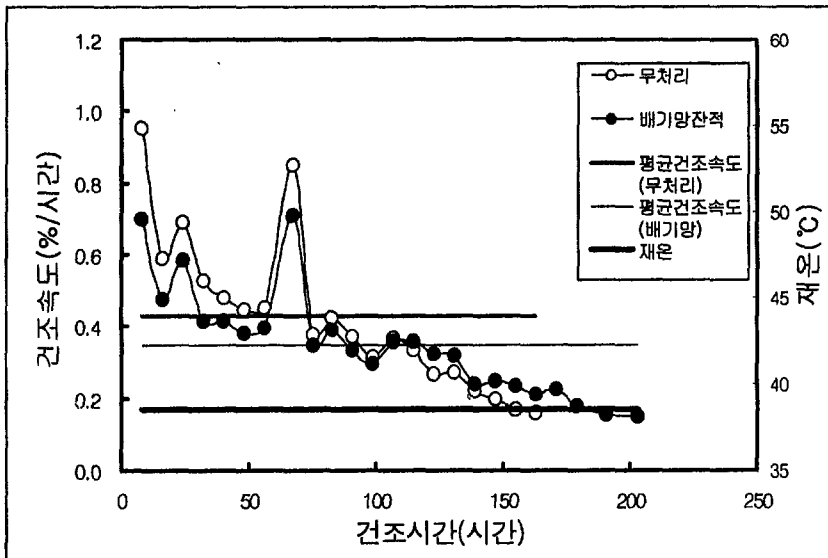


그림 4-3. 두께 5cm 소나무 원판의 건조시간별 압채고주파진공건조속도

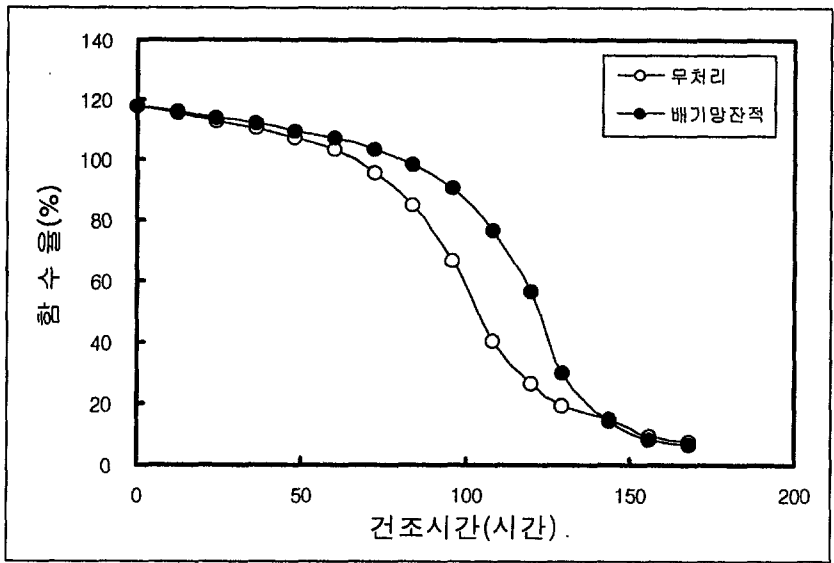


그림 4-4. 두께 7.5cm 소나무 원판의 압제고주파진공건조곡선

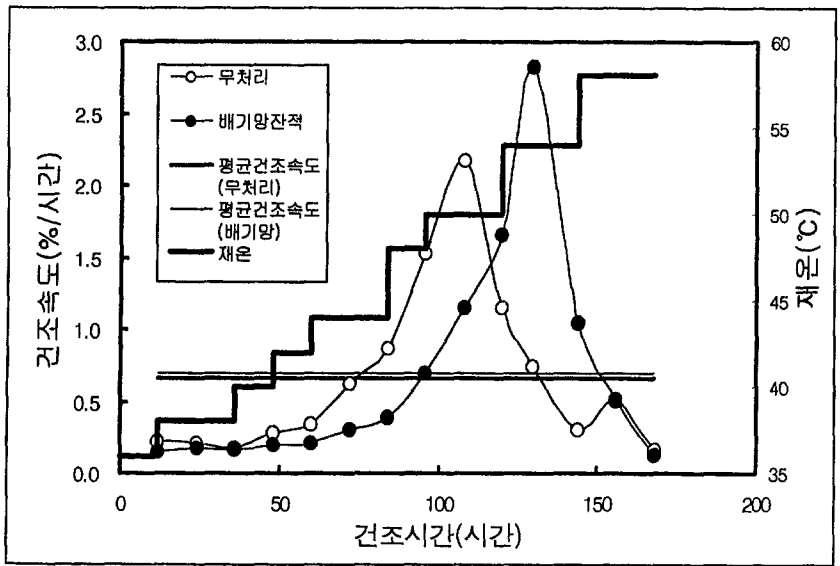


그림 4-5. 두께 7.5cm 소나무 원판의 건조시간별 압제고주파진공건조속도

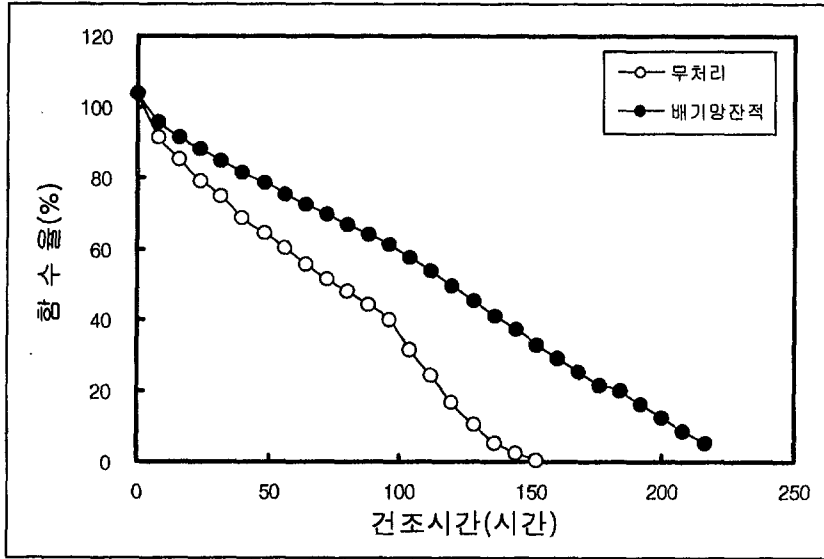


그림 4-6. 두께 5cm 삼나무 원판의 압체고주파진공건조곡선

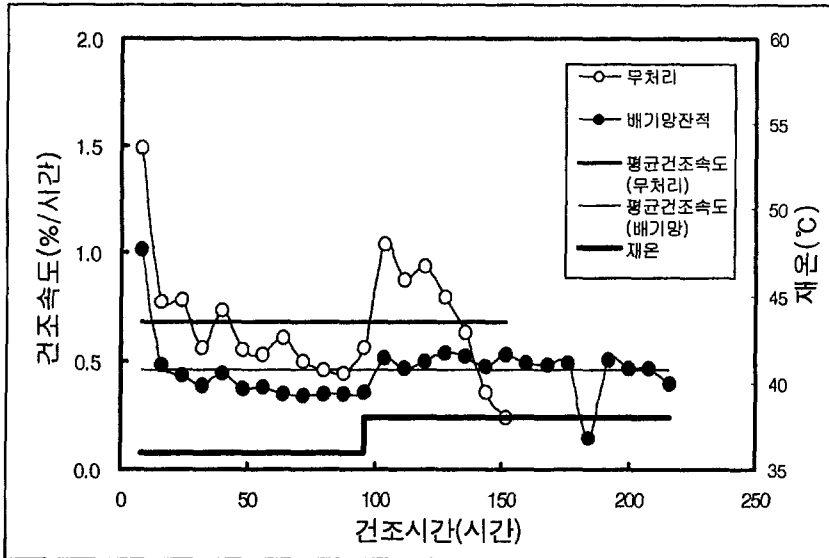


그림 4-7. 두께 5cm 삼나무 원판의 건조시간별 압체고주파진공건조속도

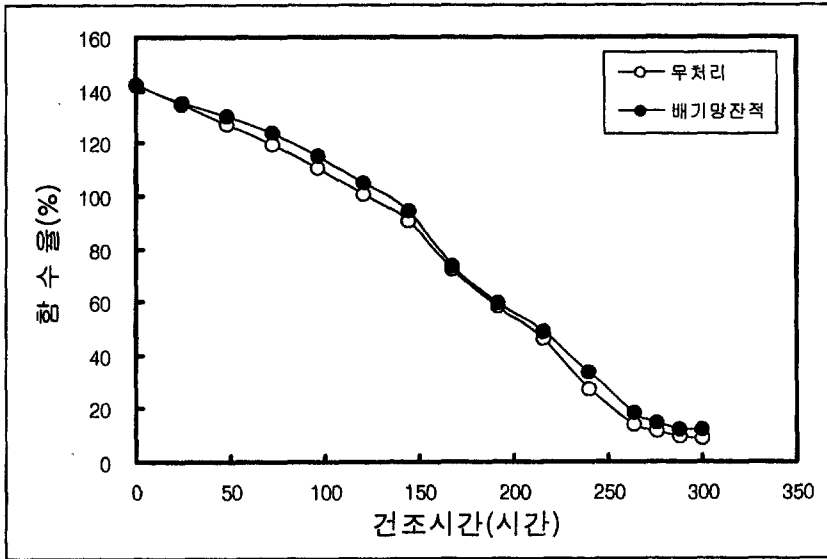


그림 4-8. 두께 7.5cm 삼나무 원판의 압체고주파진공건조곡선

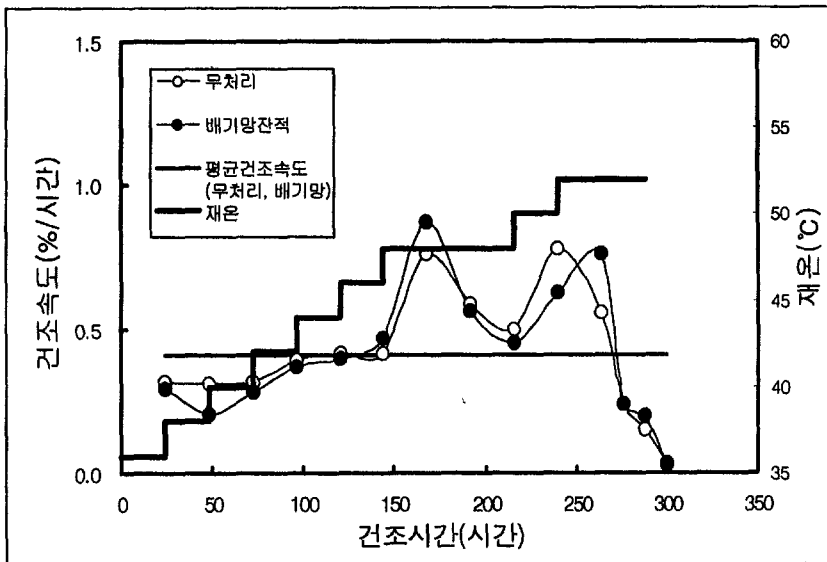


그림 4-9. 두께 7.5cm 삼나무 원판의 건조시간별 압체고주파진공건조속도



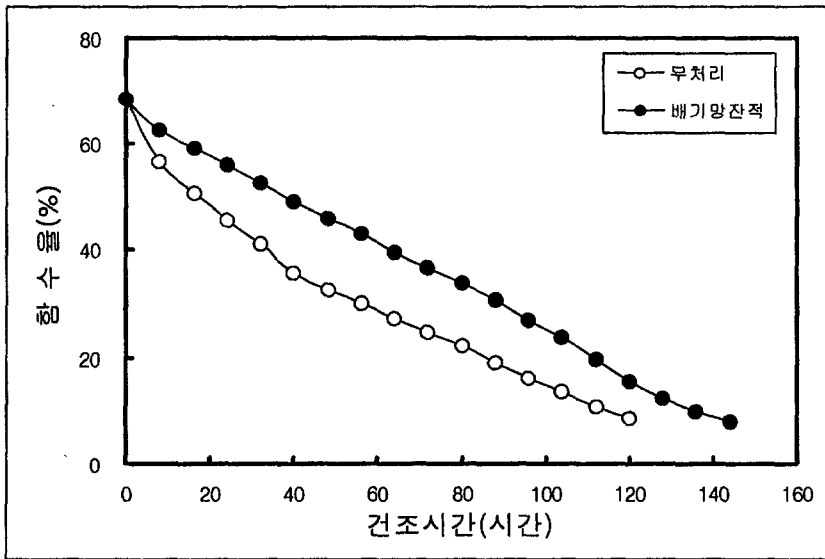


그림 4-10. 두께 5cm 벗나무 원판의 압체고주파진공건조곡선

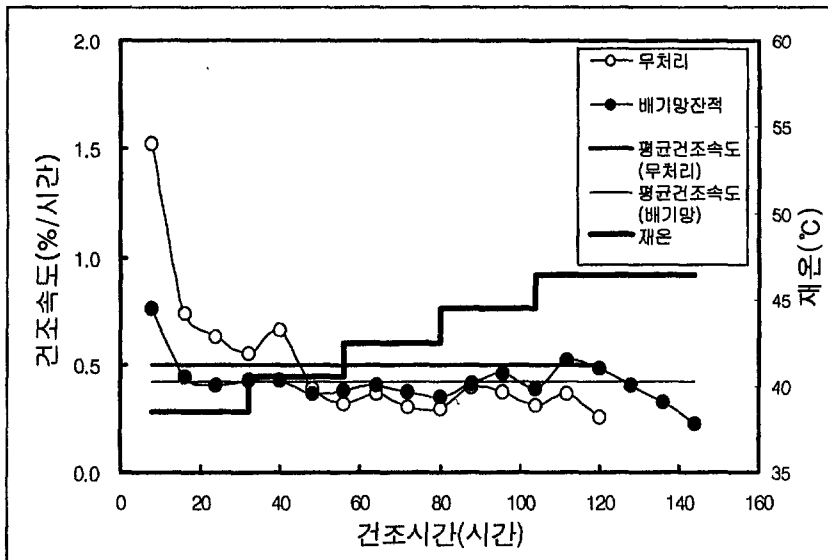


그림 4-11. 두께 5cm 벗나무 원판의 건조시간별 압체고주파진공건조속도

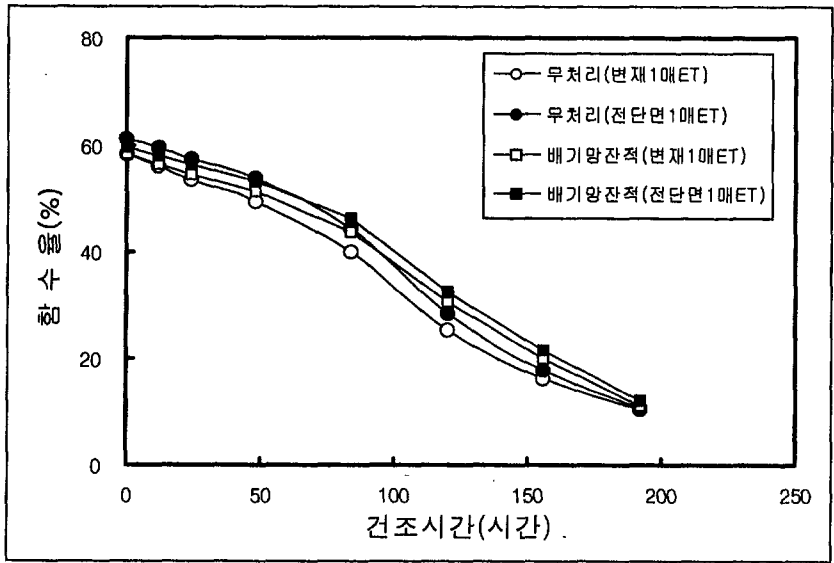


그림 4-12. 두께 7.5cm 벗나무 원판의 압제고주파진공건조곡선

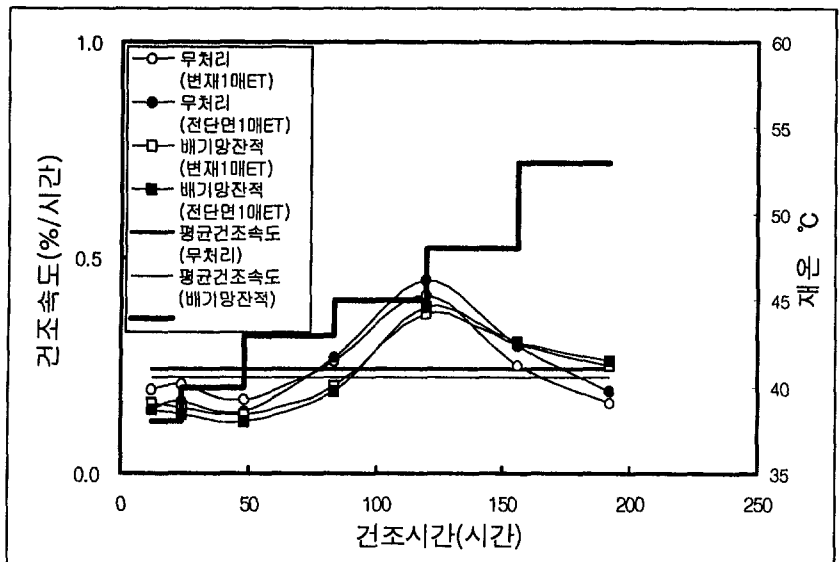


그림 4-13. 두께 7.5cm 벗나무 원판의 건조시간별 압제고주파진공건조속도

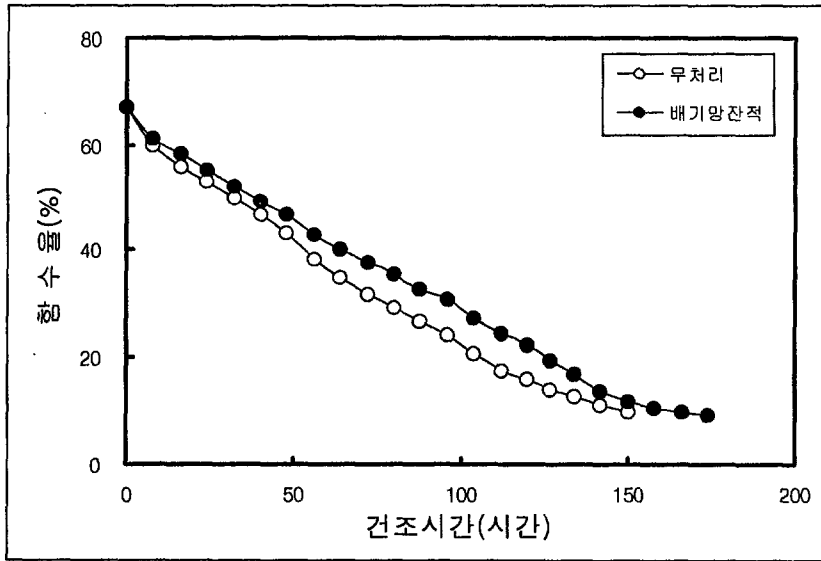


그림 4-14. 두께 5cm 느티나무 원판의 압체고주파진공건조곡선

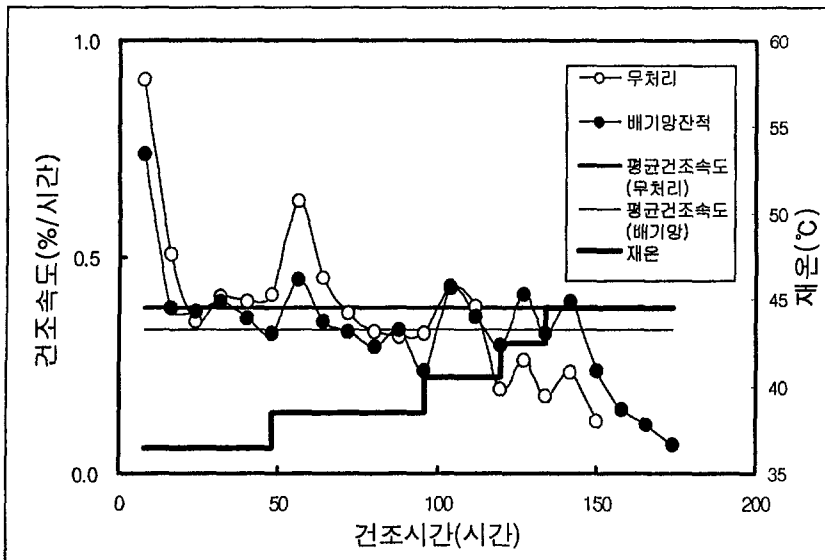


그림 4-15. 두께 5cm 느티나무 원판의 건조시간별 압체고주파진공건조속도

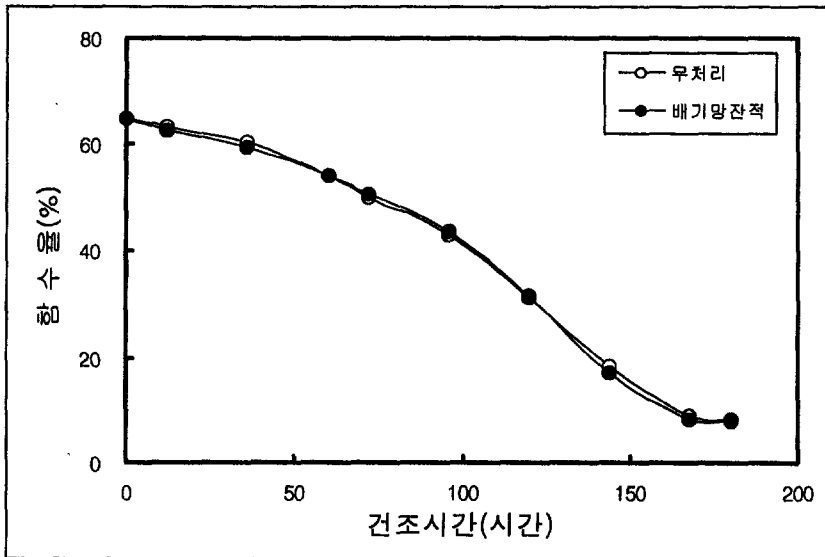


그림 4-16. 두께 7.5cm 느티나무 원판의 압체고주파진공건조곡선

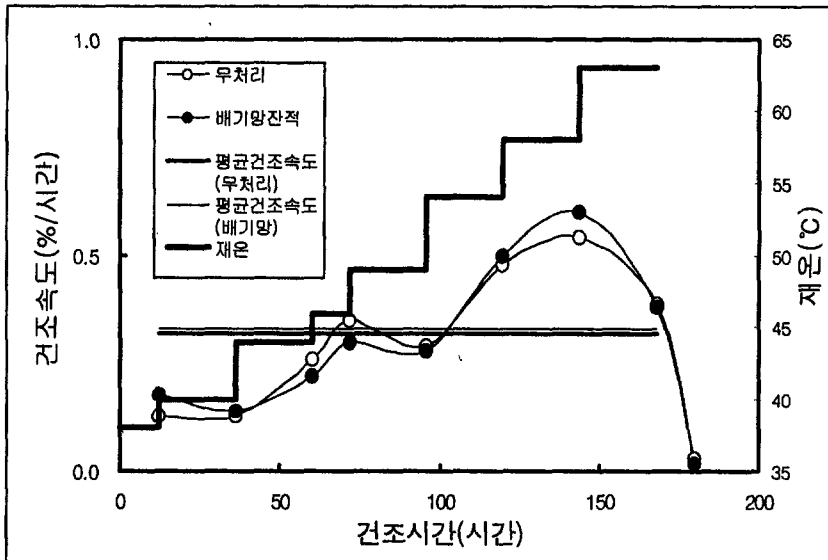


그림 4-17. 두께 7.5cm 느티나무 원판의 건조시간별 압체고주파진공건조속도

## 제 4 절 결론

소나무, 삼나무, 벗나무, 느티나무의 두께 5cm와 7.5cm 원판을 대상으로 배기망의 활용여부가 고주파진공건조의 건조시간과 건조속도, 건조결함 및 소요에너지 등에 미치는 영향을 검토한 결과는 다음과 같다.

1. 초기함수율에서 목공예용재의 이용함수율을 수준까지 건조되는데 대부분 1주일 정도의 시간이 소요되었다.

2. 배기망잔적처리 원판들의 평균건조속도는 무처리 원판들에 비하여 느렸고, 특히 건조초기에 매우 느리게 나타났다.

3. 건조초기의 건조속도는 횡단면의 엔드페이핑처리 보다는 배기망의 삽입여부에 의해서 더 큰 영향을 받았다.

4. 저함수율 영역이라 할지라도 재온을 상승시키므로써 건조속도를 촉진시킬 수 있는 것으로 나타났다.

5. 심재할렬의 경우 두께 7.5cm 소나무 원판에서 다소 심하게 발생하였을 뿐 나머지의 경우에는 매우 경미하였다.

6. 배기망잔적은 심재할렬이나 변재할렬 또는 V형크랙의 발생과는 직접적인 관련이 없었다.

7. 변재할렬의 발생정도는 매우 경미하였으나 벗나무와 느티나무의 두께 7.5cm 원판에서는 매우 심하였으며, 이의 예방을 위해서는 심·변재 부위가 비슷한 시기에 섬유포화점에 도달케 하는 것이 매우 중요하다.

8. V형크랙의 발생정도는 경미한 편이었으며, 건조중 압체력을 해제하지 않을 경우 V형크랙에 의한 손상은 더욱 경감될 수 있을 것이다.

9. 변색은 두께 7.5cm 삼나무 원판에서만 경미하게 발생하였을 뿐 나머지 경우에는 전혀 발생하지 않았다.

10. 물 1kg을 증발시키기 위하여 고주파가열에 소요된 비에너지는 3.5 ~ 9.1kWh/kg·물로서 상당히 높은 편이었으나, 산업용규모의 고주파진공건조기를 활용하거나 건조중 건조기를 개방하지 않는다면 비에너지는 크게 감소할 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

1. Chen, Z. and F. M. Lamb. 1995. The concept of boiling front in vacuum drying. Proceedings of International Conference on Wood Drying. Technical University in Zvolen, Slovak Republic: 110-118.
2. Harris, R. A. and M. A. Taras. 1984. 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. Forest Prod. J. 34(1): 44-54.
3. Hayashi, K. and S. Terazawa. 1977. Studies on cell-collapse of water-saturated balsa wood (V). Mokuzai Gakkaishi 23(1): 30-34.
4. \_\_\_\_\_, K. Nakamura, Y. Kanagawa, M. Yasujima, and K. Aoki. 1995. Improvement of dryability of wood and its distribution by local steam explosion. J. of the Society of Materials Science 44(498): 279-283.
5. Kanagawa, Y., K. Hayashi, and M. Yasuzima. 1992. Improvement of dryability by local steam explosion for Japanese cedar. Proceedings of 3rd IUFRO International Wood Drying Conference. Vienna, Austria: 269-276.
6. Kubler, H. 1973. Role of moisture in hygrothermal recovery of wood. Forest Prod. J. 5(3): 198-204.
7. \_\_\_\_\_ . 1973. Hygrothermal recovery under stress and release of inelastic strain. Forest Prod. J. 6(1): 78-85.
8. \_\_\_\_\_ . 1974. Drying tree disks simply without defects. Forest Prod. J. 24(7): 33-35.
9. \_\_\_\_\_ . 1975. Study on drying of tree cross sections. Wood Science 7(3): 173-181.
10. \_\_\_\_\_ . 1977. Formation of checks in tree stems during heating. Forest Prod. J. 27(1): 41-46.
11. Lee, J. H. and H.S. Jung. 1996. Internal temperature and moisture content of plantation larchlumber during high-temperature drying. 5th International IUFRO Wood Drying Conference. Quebec, Canada: 269-274.
12. 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. Vienna, Austria: 227-234.
13. \_\_\_\_\_ and K. Hayashi. 1997. The effect of low pressure steam explosion treatment on the improvement of permeability in the softwood disks. J. of Korean Wood Science and Technology 25(3): 37-42.
  14. \_\_\_\_\_, K. Hayashi, and H.S. Jung. 1998. Effect of radio-frequency/vacuum drying and mechanical press-drying on shrinkage and checking of walnut log cross sections. Forest Prod. J. 48(5): 73-79.
  15. 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.
  16. Smith, W.B., A. Smith, and E.F. Neauhauser. 1994. Radio-frequency/vacuum drying of red oak: energy, quality, value. 4th IUFRO International Wood Drying Conference. Rotorua, New Zealand: 263-270.
  17. Terazawa, S and K. Hayashi. 1972. Collapse in wood drying process. Wood Industry 27(11):2-7.
  18. Wilhelmy, V. and H. Kubler. 1973. Stresses and checks in log ends from relieved growth stresses. Wood Science 6(2): 136-142.
  19. Zwick, R. L. and S. Avramidis. 1995. The commercial viability of radio-frequency/vacuum drying of softwoods. Proceedings of Drying Pacific Northwest Species for Quality Markets. Bellevue, Washington, USA : 87-94.
  20. 이남호 외. 1997. 지리산지역 목공예 제조업체의 국제경쟁력 제고를 위한 특성화 기술개발. 농림부연구보고서 : 33-85, 160-176
  21. 寺澤眞, 金川靖, 林和男. 1998. 木材の高周波真空乾燥 海青社

## 제 5 장 화장용 單板의 압체식 고주파 진공건조 기술 개발

협동과제연구책임자: 이남호(전북대학교)  
연구보조원: 정태선(전북대학교)  
최준호(전북대학교)  
최낙준(전북대학교)



## 제1절 서 설

지구상의 可用목재자원이 점점 저질화 되어감에 따라 재질이 우수하고 미관성이 뛰어난 목재자원을 집약적으로 이용하고자 두께 0.2~0.6mm 정도의 매우 얇은 單板으로 가공하여 활용하는 사례가 급증하고 있다. 저질폐잔재로 제조된 각종 목질판상재료나 침엽수 합판 등의 표면에 질감과 무늬가 아름다운 활엽수 화장용단판을 오버레이(overlay)하여 가구공작재나 악기용재 또는 건축내장재 등의 재료로 활용하여 부가가치를 증진시키고 있다. 특히 최근 국내 마루판시장이 커지면서 화장용단판의 수요는 괄목할만한 성장을 보이고 있다.

화장용단판은 두께가 얇아 판재나 각재에서처럼 건조중 수분경사에 기인한 할렬은 경미한 편이나, 틀어짐이나 끝말림(end waviness)의 발생이 용이하고, 고온에 노출되어 단판의 재색이 암색화(darkening)되거나 심할 경우 탄화되어 미관적 가치의 저하는 물론 접합성이 떨어지는 문제가 있다. 또한 초기 건조속도가 느릴 경우 청변이나 갈변 등이 발생할 위험성도 대단히 높고 단판 한장 한장을 증적(open-pile)하는 것 또한 매우 불편한 일이다.

화장용단판을 고주파진공건조할 경우 저온건조가 가능하기 때문에 단판의 암색화 내지는 탄화를 막을 수 있고, 적정량의 단판 여러장을 묶음을 만들어서 잔적할 수 있으므로 작업이 간단하며, 다발묶음의 두께가 상당히 두껍다할지라도 내부가열이 가능한 유전가열 방식이기 때문에 잔적층간 최종함수율의 변이를 줄일 수 있는 잇점이 있을 것으로 예측된다. 뿐만아니라 건조중 단판의 재면에 대하여 수직방향의 압체력이 가해질 경우 틀어짐이나 끝말림의 발생도 매우 효과적으로 억제할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 최근 李(1997)는 주요 활엽수종의 화장용단판을 원적외선건조를 실시하여 탄화예방, 건조시간단축, 최종함수율의 균일화등의 효과를 검토한 바 있다.

본 연구에서는 현재 우리나라에서 널리 이용되고 있는 화장용단판 몇 종을 단판의 두께나 목리 등을 달리하여 선정한 다음, 압체고주파진공건조와 원적외선건조를 실시하여 건조시간과 건조속도, 이할, 끝말림량, 탄화, 소요에너지 등을 분석하였고, 압체고주파진공건조에서는 다발묶음내 층간 함수율분포 등을 조사하여 다발묶음의 적정 두께를 설정하기 위한 자료를 제공하였다.

## 제2절 재료 및 방법

### 1. 원적외선건조 시험

#### 가. 화장용단판의 준비

미국산 단풍나무(hard maple)와 너도밤나무(beech)의 꺾은결 단판과 무늬결 단판을 무늬목생산업체로부터 분양받아 비닐랩에 밀봉하여 항온항습기에 보관하며 시험에 활용하였다. 각 화장용단판의 두께는 0.12mm와 0.45mm 2두께 수준으로 구분하였고, 각 단판의 실제 두께를 직시버어니어캘리퍼스로 측정하였다.

건조시험용 단판은 모두 길이(섬유방향) 60cm로 준비하였으며, 각 단판의 양단에서 길이 3cm의 단판을 채취하여 초기함수율을 구하였다. 건조시험에 사용된 단판들의 평균두께와 폭, 수량 및 초기함수율은 표 5-1과 같다.

표 5-1. 원적외선건조 시험용 화장용단판의 평균 두께와 폭, 수량 및 초기 함수율.

수종	목리	두께(mm)		폭(cm)	초기함수율(%)	수량(매)
		공칭두께	실두께			
단풍나무	꺾은결	0.12	0.17 (0.01)	21.5	72.3 (17.4)	52
		0.45	0.53 (0.02)	25~26	95.6 (4.95)	52
	무늬결	0.12	0.16 (0.01)	30	132.4 (7.3)	49
		0.45	0.54 (0.02)	30	128.5 (3.82)	48
너도밤나무	꺾은결	0.12	0.15 (0.01)	23.5	35.4 (8.45)	50
		0.45	0.54 (0.01)	25	65.3 (4.14)	53
	무늬결	0.12	0.18 (0.01)	30	77.3 (4.22)	36
		0.45	0.62 (0.02)	30	64.8 (3.19)	33

주:( )는 표준편차임.

## 나. 원적외선건조장치와 건조조건

원적외선 방사체는 판넬형으로서 정격전압과 정격소비전력이 각각 380V와 25Kw이고, 1枚의 유효방사면적은 60×245mm로서 상·하부에 각각 21매씩이 설치되어 있다. 상·하방사체 사이에는 무늬목단판을 고정시킬 수 있도록 설계된 클램핑장치가 부착되어 있다. 또한  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 精度를 가진 비접촉식 적외선온도센서를 장치의 상부에 부착하여 건조중 단판의 표면온도 측정이 가능하도록 구성하였으며, 상·하부 방사체간의 거리와 클램핑장치간의 거리는 조절이 가능하도록 설계되어 있다(그림 5-1). 본 시험에서는 상·하부 방사체간의 거리를 15cm로 하였다(양, 1992).

각 무늬목단판의 원적외선건조조건은 원적외선 방사체의 온도와 건조시간으로 콘트롤하였으며, 원적외선방사체가 설정온도에 도달한 직후에 건조시험용 무늬목단판을 방사체사이에 투입하여 일정시간 동안 건조하였다. 각 무늬목단판별 건조온도와 건조시간은 예비실험을 통하여 얻어진 자료를 근거로 건조재의 품질과 함수율 약 5%까지 도달하는데 소요된 시간을 검토하여 결정하였다. 각 화장용단판별 건조시험조건은 표 5-2와 같다.

표 5-2. 화장용단판별 원적외선건조시험 조건.

수 종	목 리	공칭두께(mm)	건조시험조건	
			방사체온도 ( $^{\circ}\text{C}$ )	건조시간 (초)
단풍나무	곧은결	0.12	180	50
		0.45	180	240
	무늬결	0.12	180	120
		0.45	180	360
너도밤나무	곧은결	0.12	180	30
		0.45	180	240
	무늬결	0.12	180	45
		0.45	180	180

## 다. 최종함수율과 건조속도

생재함수율과 건조시험용단판의 생재무게로부터 전건무게를 계산하고, 이 값과 건조종료후의 무게로부터 최종함수율을 계산하였다. 또한 건조중 감소한

함수율감소량과 건조소요시간으로부터 건조속도를 산출하였다.

#### 라. 이할, 끝말림 및 탄흔

건조종료직후 화장용단판의 표면에 나타난 할렬의 발생갯수와 발생길이를 조사하였다.

탄흔은 건조종료 직후 단판의 양 재면상에 나타난 정도를 육안으로 관찰하여 없음, 경미, 보통, 심함 및 매우 심함 등 5단계로 평가하였다.

또한 끝말림량은 건조종료후 실내에 장기간 보관하여 조습처리한후 그림 5-2의 a~d선상에서 각 측정선으로부터 후방 10cm 떨어진 부위를 일정하중으로 가압하면서 말림량측정자로 조사하였다(李, 1997).

#### 마. 소요전력량

적산전력량계를 설치하여 방사체를 설정온도까지 상승시키는데 소요되는 전력량과 화장용단판을 투입한후 수분증발에 소요되는 전력량으로 구분하여 측정하였다.

## 2. 압체고주파진공건조 시험

### 가. 화장용단판의 준비

미국산 물푸레나무(ash), 벚나무(cherry), 단풍나무(hard maple), 적참나무(red oak)의 곧은결 단판과 무늬결 단판을 무늬목단판생산업체로부터 분양받아 -10℃의 저온저장고에 보관하며 시험에 활용하였다. 단, 단풍나무의 경우 곧은결 단판에 대해서만 두께를 0.2mm와 0.5mm로 구분하여 시험하였다. 나머지 물푸레나무, 벚나무 및 적참나무의 단판두께는 모두 0.2mm이었다. 건조시험에 사용된 화장용 단판의 길이(섬유방향)는 모두 240cm내외였다. 각 건조시험용 단판의 두께, 폭, 초기함수율 및 수량은 표 5-3과 같다.

### 나. 고주파진공건조장치와 건조조건

고주파진공건조기는 길이274cm×폭102cm×길이40cm 크기의 角形으로 상부 덮개가 유연한 고무시트로 이루어져있어 건조중 내부에 잔적된 화장용단판의 재면에 대하여 수직방향으로 약 10,000kgf/m<sup>2</sup>의 압체력이 가해진다. 고주파발전기의 최대 출력은 7kW이고, 주파수는 13MHz로 고정하였으며, 8분-on 2분-off로 작동시켰다.

단판은 동일 목리의 단판들을 생재상태의 두께가 약 12cm가 되도록 다발 묶음을 하여 무늬결단판 묶음은 하단에, 그리고 곧은결단판 묶음은 상단에 각각 잔적하였으며, 단풍나무의 경우는 두께0.2mm묶음은 하단에 두께0.5mm묶음은 상단에 배치하였다(그림 5-3).

건조조건은 테프론코팅한 백금촉은저항체를 생재상태의 소재(solid wood)에 삽입한후 실리콘으로 밀봉하고, 유기전파를 필터링한후 재온으로 콘트롤하였다.

건조조건은 0~24시간 50℃, 24~48시간 55℃, 48~68시간 60℃, 68~73시간 65℃로 설정하였고, 진공도는 40~100mmHg로 고정하였다.

표 5-3. 압체고주파진공건조시험용 화장용 단판의 폭, 초기함수율 및 수량.

수종	목리	단판의 형상		초기함수율(%)				수량(매)			
		두께(mm)	폭(cm)	평균	⊕표층	중간층	⊖표층	계	⊕표층	중간층	⊖표층
물푸레나무	곧은결	0.2	16~21	58.9	62.0	58.8	56.0	507	169	169	169
	무늬결	0.2	23~23.5	83.2	82.7	79.4	87.6	207 <sup>1)</sup>	69	69	69
벗나무	곧은결	0.2	16~17.5	83.7	90.2	83.1	77.8	462	154	154	154
	무늬결	0.2	12~20	82.8	86.2	84.1	78.2	600	200	200	200
단풍나무	곧은결	0.2	13~20	101.7	104.8	96.4	103.9	603	201	201	201
		0.5	17~24	91.2	102.4	94.3	76.9	171	57	57	57
적참나무	곧은결	0.2	13.5~17	41.4	42.5	45.8	335.9	408	136	136	136
	무늬결	0.2	17~20	51.0	41.5	57.8	53.8	38	106	106	106

주: 1) 곧은결 단판을 가잔적하여 잔적두께를 조절.

#### 다. 최종함수율과 건조속도

건조종료후 단판의 한쪽 횡단면으로부터 10cm떨어진 부위에서 길이 5cm되게 최종함수율 조사용 시험편을 채취하여 최종함수율과 전건무게를 조사하고, 이것을 이용하여 초기함수율과 건조속도 등을 산출하되, 모두 동일다발묶음내에서 두께방향을 ⊕표층, 중간층, ⊖표층으로 3등분하여 구하였다.

#### 라. 이할, 끝말림 및 탄흔

건조종료후 동일 다발묶음내에서 ⊕표층, 중간층, ⊖표층의 각 층에서 균일하게 단판 15매를 추출하여 이할, 끝말림 및 탄흔을 원적외선건조시험과 동일

한 방법으로 조사하였다.

#### 마. 소요전력량

적산전력량계를 설치하여 건조중 소요되는 에너지를 측정하되 고주파발진에 소요되는 에너지와 기타 진공시스템과 전극판의 보온가열에 소요되는 에너지로 구분하여 조사하였다.

### 제3절 결과 및 고찰

#### 1. 원적외선건조 시험

##### 가. 건조속도와 소요전력량

화장용단판의 수종별, 두께별 원적외선건조 소요시간과 최종함수율, 건조속도 및 소요전력량은 표 5-4와 같다.

수종과 목리, 두께에 관계없이 대부분 30초~360초 이내에 생재에서 화장용단판의 이용함수율 수준까지 건조가 가능하였으나 두께0.12mm 너도밤나무 무늬결 단판의 경우 45초 동안의 원적외선건조후 최종함수율이 20.6%로 다소 높게 나타나 건조시간을 좀더 연장할 필요가 있었다.

모든 수종과 목리에서 두께0.12mm 단판의 건조속도는 1.05~1.33%/초로 두께0.45mm 단판의 0.26~0.35%/초보다 작게는 3.2배내지 크게는 4.4배까지 빠르게 나타났다. 원적외선은 침투력이 약하여 두께가 두꺼운 것은 열전도가 느리기 때문인 것으로 생각된다(한,1992). 한편 곧은결단판과 무늬결단판간에는 뚜렷한 차이가 없었다.

방사체의 온도를 설정온도인 180℃까지 초기가열하는데 소요된 전력량은 모두 1.3KWh이었고, 단판 1매를 함수율 1%감소당 수분증발에 소요된 전력량은 0.001~0.041KWh/%MC·1枚로 매우 적었다. 일반적으로 너도밤나무 곧은결단판의 경우를 제외하고는 두께가 얇을수록 전력량 소모량이 적었는데, 역시 두께가 얇을 경우 원적외선의 침투가 용이하기 때문인 것으로 판단된다. 李(1997)는 화장용단판의 원적외선건조에 소요된 전력량은 열기건조의  $\frac{1}{5}$ ~ $\frac{2}{5}$ 에 불과한 것으로

보고한 바 있다. 이것은 원적외선건조의 경우 주변 공기를 가열하거나 가열된 공기의 배출에 따른 열손실이 없기때문이다(안 등, 1993; 한, 1992, 1993).

표 5-4. 화장용 단판의 원적외선건조 소요시간, 최종함수율, 건조속도 및 소요전력량.

수종	목리	공칭두께 (mm)	초기 함수율 (%)	최종 함수율 (%)	소요시간 (초)	건조속도 (%/초)	소요전력량	
							초기가열 (KWh)	수분증발 (KWh/%MC·1枚)
단풍나무	곶은결	0.12	72.3	5.9 (10.40)	50	1.33	1.3	0.001
		0.45	95.6	11.1 (2.62)	240	0.35	1.3	0.019
	무늬결	0.12	132.4	6.1 (2.9)	120	1.05	1.3	0.012
		0.45	128.5	8.4 (7.77)	360	0.33	1.3	0.014
너도밤나무	곶은결	0.12	35.4	1.1 (5.31)	30	1.14	1.3	0.041
		0.45	65.3	3.5 (2.69)	240	0.26	1.3	0.005
	무늬결	0.12	77.3	20.6 (3.20)	45	1.26	1.3	0.025
		0.45	64.8	11.5 (2.11)	180	0.30	1.3	0.030

주:( )는 표준편차임.

### 나. 이할과 끝말림량

표 5-5는 원적외선건조중에 발생한 이할과 끝말림량의 정도를 나타낸 것이다.

대부분의 단판에서는 이할의 발생이 매우 경미하였거나 전혀 발생하지 않아 이할에 의한 무손상단판의 비율이 88.9~100%에 이르렀으나 단풍나무의 두께 0.12mm 단판에서는 곶은결단판과 무늬결단판 모두 무손상단판 비율이 약 35%에 불과하였다. 두께0.12mm와 두께0.45mm간에 두께차는 건조응력의 차를 유발할 정도로 크지는 않지만 두께가 얇을 경우 단판의 횡인장강도의 절대값이 상대적으로 작기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 무손상비율이 낮은 경우에도 이할의 총평균발생길이는 단판 1매당 2.4cm정도로 경미한 편이었으며 곶은결 단판과 무늬결 단판간에는 뚜렷한 차이가 없었다.

한편 끝말림량은 무늬결단판보다는 곶은결단판에서, 그리고 두꺼운 단판

보다는 얇은 단판에서 더 경미하였다. 무늬결단판의 경우 단판의 폭방향이 접선 방향인 관계로 건조중 폭수축량이 곧은결단판보다 더 크기 때문인 것으로 생각된다. 또한 단판의 두께가 두꺼울수록 단판이 강직하여 건조중 발생한 끝말림량이 다시 복원되는 것이 상대적으로 어려울 것으로 생각된다.

표 5-5. 화장용 단판의 원적외선건조중 발생한 이합과 끝말림량.

수 종	목 리	공칭두께 (mm)	이 합		끝말림량(mm)		
			무손상율 <sup>1)</sup> (%)	평균총길이 (cm)	최소	평균	최대
단풍나무	곧은결	0.12	34.6	2.4	0.3	1.9	4.1
		0.45	100	0	0.5	4.2	7.7
	무늬결	0.12	34.7	2.4	0.8	3.4	7.1
		0.45	100	0	4.0	8.7	13.4
너도밤나무	곧은결	0.12	100	0	0.5	2.5	5.6
		0.45	96.2	0.2	0.3	2.3	4.8
	무늬결	0.12	88.9	0.9	1.0	4.4	8.8
		0.45	97.0	0.1	2.2	6.5	10.4

주:1)(무손상단판수)/(총시험단판수)×100(%)

#### 다. 탄흔

표 5-6은 건조직후 각 화장용단판의 탄흔정도를 육안으로 조사한 결과이다.

모든 무늬목단판에서 탄흔은 나타나지 않았다. 원적외선건조조건은 방사체의 온도가 180℃로 높은 편이었음에도 불구하고 방사체와 무늬목단판이 직접 접촉하지 않는 비접촉傳熱에 의해서 에너지가 투입되기 때문에 전혀 탄흔이 나타나지 않은 것으로 생각된다(李, 1997). 따라서 무늬목단판의 원적외선건조방식은 탄흔 없이 高溫의 적용이 가능하므로써 건조시간의 단축과 단판 고유의 재색유지 및 접착성 저하 예방 등의 효과를 거둘 수 있을 것으로 판단된다.



표 5-6. 원적외선건조 직후 화장용 단판의 탄흔 발생정도.

수종	목리	공칭두께(mm)	탄흔(%) <sup>1)</sup>				
			없음	경미	보통	심함	매우심함
단풍나무	곧은결	0.12	100	-	-	-	-
		0.45	100	-	-	-	-
	무늬결	0.12	100	-	-	-	-
		0.45	100	-	-	-	-
너도밤나무	곧은결	0.12	100	-	-	-	-
		0.45	100	-	-	-	-
	무늬결	0.12	100	-	-	-	-
		0.45	100	-	-	-	-

주: 1) (탄흔발생단판수)/(총시험단판수)×100(%)

## 2. 압체고주파진공건조 시험

### 가. 건조속도

화장용 단판의 압체고주파진공건조시험중 건조소요시간, 최종함수율 및 건조속도를 표 5-7에 요약하여 나타내었다.

두께0.2mm 화장용 단판의 경우 수종과 목리에 관계없이 65시간만에 생재에서 평균함수율 9.0~12.2%까지 건조가 가능하였고, 단풍나무 두께0.5mm 곧은결단판의 경우는 동일시간 동안 함수율 15.5%까지 밖에 건조되지 않았다. 그러나 평균 건조속도는 1.17%/시간으로 두께0.2mm의 다른 단판들과 비교하여 결코 느린 편이 아니었으며, 초기함수율이 낮았던 적참나무의 곧은결과 무늬결단판, 그리고 물푸레나무의 곧은결단판의 경우 다른 단판들과 비교하여 건조속도는 느리지만 최종함수율이 더 낮은 것으로 미루어 보아, 결국 단판의 최종함수율은 초기함수율과 매우 밀접한 양의 상관관계가 있는 것으로 판단된다.

평균최종함수율이 약 12%이하까지 건조되었던 단판들에 있어서는 동일 다발묶음내에서 잔적층간에 최종함수율 변이는 거의 없었다. 따라서 단판을 생재 두께 기준으로 12cm정도 되도록 다발묶음을한 상태로 고주파진공건조하더라도 다발묶음내의 모든 단판들이 균일한 함수율을 유지하게 하는 것이 가능할 것으로 판단되고, 이것은 단판의 고주파진공건조는 관행적인 열풍건조나 열판건조, 원적외선건조 등과 비교하여 잔적작업이 용이하고, 건조공간을 매우 밀도있게 활용할 수 있음을 의미한다.

물론 단풍나무 두께 0.5mm의 끈은결단판의 경우 ⊕표층과 중간층, 그리고 ⊖표층간에 최종함수율 차이가 크게 나타났으나 건조시간을 좀더 연장하거나 건조조건을 강화할 경우 잔적층간 최종함수율 변이는 크게 감소될 것으로 예상된다. 기전전극판과 가까운 위치에 잔적된 ⊕표층의 단판 함수율이 접지전극판측에 잔적된 ⊖표층의 단판 함수율보다 약 10%이상 높게 나타났는데, 이것은 함수율이 10%이하에 도달함에 따라 접지전극판측 또는 접지전극판과 기전전극판의 중간부위의 온도가 더 높아지면서 이부위에서 추가적인 건조가 이루어지기 때문이다(Trofatter 등, 1987).

동일 수종내에서 단판의 목리가 건조속도에 미치는 영향은 없었다.

표 5-7. 압체고주파진공건조 소요시간, 최종함수율 및 건조속도.

수종	목리	공칭두께 (mm)	건조시간 (시간)	최종함수율(%)				건조속도(%/시간)			
				평균	⊕표층	중간층	⊖표층	평균	⊕표층	중간층	⊖표층
물푸레나무	끈은결	0.2	65	10.9	11.3	10.5	11.0	0.74	0.78	0.74	0.69
	무늬결	0.2	65	11.8	11.9	11.9	11.5	1.11	1.10	1.04	1.20
벚나무	끈은결	0.2	65	12.2	11.5	12.2	12.9	1.10	1.21	1.09	1.01
	무늬결	0.2	65	11.6	12.6	12.1	10.0	1.10	1.13	1.11	1.05
단풍나무	끈은결	0.2	65	10.9	10.0	10.5	12.3	1.40	1.46	1.32	1.41
		0.5	65	15.5	20.0	17.0	9.4	1.17	1.27	1.19	1.04
적참나무	끈은결	0.2	65	9.8	9.9	9.6	9.9	0.49	0.50	0.56	0.40
	무늬결	0.2	65	9.0	8.9	8.9	9.3	0.65	0.50	0.75	0.69

### 나. 이할과 끝말림량

압체고주파진공건조중 각 화장용단판에 발생한 이할은 표 5-8과 같다.

끈은결 단판의 경우 수종이나 두께 및 잔적층에 관계없이 이할이 전혀 발생하지 않았고, 또 무늬결단판중에서도 물푸레나무와 적참나무에서만 경미하게 발생하였다. 단풍나무 두께0.12mm(실두께 0.17mm) 끈은결단판의 원적외선건조중 이할에 의해 손상되지 않는 단판의 비율이 34.6%(표 5-5)에 불과한 반면에 동일 수종, 동일목리의 두께0.2mm 단판의 압체고주파진공건조중에는 전혀 발생하지 않아 압체고주파진공건조에 의한 이할 예방효과는 원적외선건조 보다 유리한 것으로 나타났다. 이것은 압체고주파진공건조의 경우 건조중 화장용 단판의 재면에

대하여 약 10,000kgf/m<sup>2</sup>의 압체력이 가해지므로 말미암아 단판의 횡단방향 수축이 크게 억제되면서 얻어진 결과로 생각된다.

무늬결단판의 경우 단판의 폭방향이 접선방향이므로 폭방향이 방사방향인 곧은결단판보다 폭방향 수축이 크기 때문에 이합의 발생도 상대적으로 용이한 것으로 생각된다.

이합이 발생한 물푸레나무나 적참나무의 무늬결단판의 경우도 ⊖표층의 단판에서는 이합이 전혀 발생하지 않았다. 이것은 잔적층간에 건조중 함수율감소가 균일하지 않는 것을 의미하는 것으로서 진공탱크내에 전자장이 균일하지 않거나 전극판에서 결로가 발생하고 있는 것으로 생각된다. Terazawa 등(1998)은 전극판에서의 결로를 예방하기 위해서 전극판과 피건조재사이에 합판 등의 재료를 삽입하거나 전극판을 열판으로 보온가열할 필요가 있으며, 단판의 다발 묶음의 두께가 클 경우에는 접지전극판과 기전전극판 사이에 전원을 공급하지 않는 중간전극판을 배치하는 것이 바람직하다고 제안한 바 있다.

표 5-8. 화장용단판의 압체고주파진공건조중 이합의 발생정도.

수종	목리	공칭두께(mm)	평균		⊕표층		중간층		⊖표층	
			무손상율 <sup>1)</sup> 평균총길이		무손상율 <sup>1)</sup> 평균총길이		무손상율 <sup>1)</sup> 평균총길이		무손상율 <sup>1)</sup> 평균총길이	
			(%)	(cm)	(%)	(cm)	(%)	(cm)	(%)	(cm)
물푸레나무	곧은결	0.2	100	0	100	0	100	0	100	0
	무늬결	0.2	95.6	0.30	93.3	0.60	93.3	0.30	100	0
벗나무	곧은결	0.2	100	0	100	0	100	0	100	0
	무늬결	0.2	100	0	100	0	100	0	100	0
단풍나무	곧은결	0.2	100	0	100	0	100	0	100	0
		0.5	100	0	100	0	100	0	100	0
적참나무	곧은결	0.2	100	0	100	0	100	0	100	0
	무늬결	0.2	77.8	6.98	60	15.8	73.3	5.2	100	0

주: 1) (무손상단판수)/(총시험단판수) × (100)

표 5-9는 압체고주파진공건조중에 발생한 끝말림의 정도를 나타낸 것이다.

수종과 목리, 두께 및 잔적층에 관계없이 끝말림의 발생정도는 측정이 불가능할 정도로 매우 경미하였다. 이것은 건조중 단판의 재면에 대하여 수직방향

으로 수축이 크게 억제될 뿐아니라 끝말림을 유도할만한 요인들도 압체력에 의해 상쇄되어지기 때문인 것으로 생각된다. 단풍나무 두께12mm(실두께 17mm)와 0.45mm(실두께 0.53mm) 곧은결단판의 경우 원적외선건조중 상당한 끝말림이 발생한 것과 비교하여 불 때(표 5-5) 압체고주파진공건조가 끝말림 예방에 더욱 효과적인 것으로 나타났다.

표 5-9. 화장용단판의 압체고주파진공건조중 끝말림 발생정도.

수 종	목 리	공칭두께 (mm)	끝말림량(mm)		
			⊕표층	중간층	⊖표층
물푸레나무	곧은결	0.2	-	-	-
	무늬결	0.2	-	-	-
벗나무	곧은결	0.2	-	-	-
	무늬결	0.2	-	-	-
단풍나무	곧은결	0.2	-	-	-
		0.5	-	-	-
적참나무	곧은결	0.2	-	-	-
	무늬결	0.2	-	-	-

주: -없음

#### 다. 탄흔

표 5-10은 압체고주파진공건조중 화장용단판에 발생한 탄흔의 정도이다.

수종과 목리, 두께 등에 관계없이 어떠한 단판에서도 압체고주파진공건조중에는 탄흔이 발생하지 않았다. 고주파진공건조의 경우 물의 끓는점이 낮아 저온의 건조조건으로도 고온의 효과를 얻을 수 있기 때문에 본 시험에서는 건조말기에도 재온을 65℃이하로 유지하므로써 건조중 熱변색을 예방할 수 있었던 것으로 판단된다.

표 5-10. 화장용단판의 압체고주파진공건조중 탄흔의 발생정도.

수 종	목리	공칭두께 (mm)	탄 흔(%) <sup>1)</sup>				
			없음	경미	보통	심함	매우심함
물푸레나무	곧은결	0.2	100	-	-	-	-
	무늬결	0.2	100	-	-	-	-
벗나무	곧은결	0.2	100	-	-	-	-
	무늬결	0.2	100	-	-	-	-
단풍나무	곧은결	0.2	100	-	-	-	-
		0.5	100	-	-	-	-
적참나무	곧은결	0.2	100	-	-	-	-
	무늬결	0.2	100	-	-	-	-

주: 1) (탄흔발생단판수)/(총시험단판수)×100(%)

- 는 0(zero)

#### 라. 소요전력량

화장용단판의 압체고주파진공건조중 소요된 총전력량과 수분 1kg증발에 소요된 비에너지, 함수율 1%감소당 소요된 비에너지 및 시간당 소요된 비에너지 등을 표 5-11에 나타내었다.

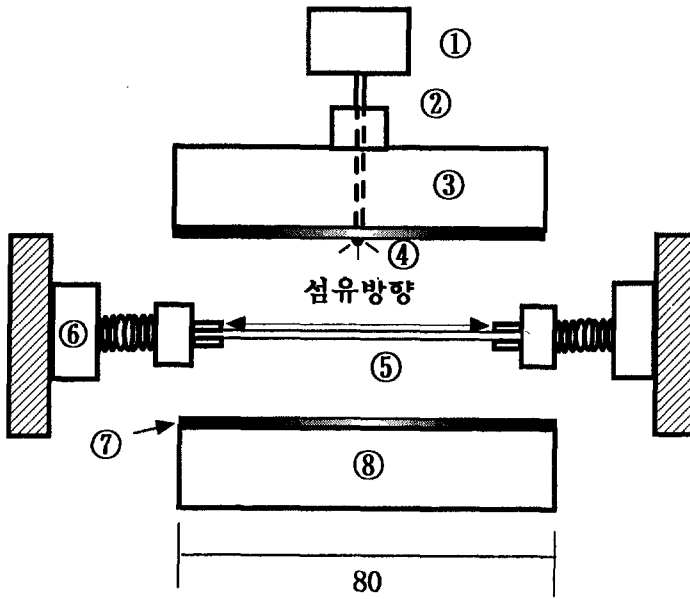
두께가 0.2mm 또는 0.5mm이고 폭 12~24cm, 길이가 240cm내외인 단판 3276매를 생재에서 이용함수율 수준까지 건조하는데 소요된 총전력량은 389.4kWh로서 고주파발진에 247.7kWh, 기타 진공펌프와 전극판의 보온가열시스템 가동에 141.7kWh가 각각 소요되어 총소요전력량의 약 64%가 고주파발진에 사용되었다. 단판 1매당 사용된 전력량은 0.12kWh이었다.

또한 물 1kg을 증발시키기 위해서 고주파발진에 소요된 비에너지는 2.57kWh/kg·물로서 두께 101mm각재의 1.29kWh/kg·물(Zwick 등, 1995)보다 높았다. 이것은 본 시험에 사용된 건조기가 소형인데다 건조기내에 잔적공간을 충분히 활용하지 못하였고, 고주파발진기의 냉각을 위해 송풍팬이 전건조기간 내내 가동되었기 때문인 것으로 생각된다.

표5-11. 화장용단판의 압체고주파진공건조중 소요전력량과 비에너지.

시스템	수분증발량 (kg)	평균함수율(%)		총건조 단판수 (매)	총소요 전력량 (kWh)	비에너지		
		초기	최종			kWh/kg·물	kWh/%MC	kWh/단판
고주파발전	-	-	-	-	247.7	2.57	3.96	0.08
기타 <sup>1)</sup>	-	-	-	-	141.7	1.47	2.26	0.04
계	96.32	74.2	11.5	3276	389.4	4.04	6.21	0.12

주: 1)진공펌프와 전극판의 보온가열시스템.



- |               |               |
|---------------|---------------|
| ① 온도기록계       | ② 땅           |
| ③ 상부방사판(이동가능) | ④ 비접촉식온도센서    |
| ⑤ 단판          | ⑥ 클램핑장치(신장가능) |
| ⑦ 방사세라믹       | ⑧ 하부방사판(이동가능) |

그림 5-1. 화장용단판의 원적외선건조장치의 모식도.

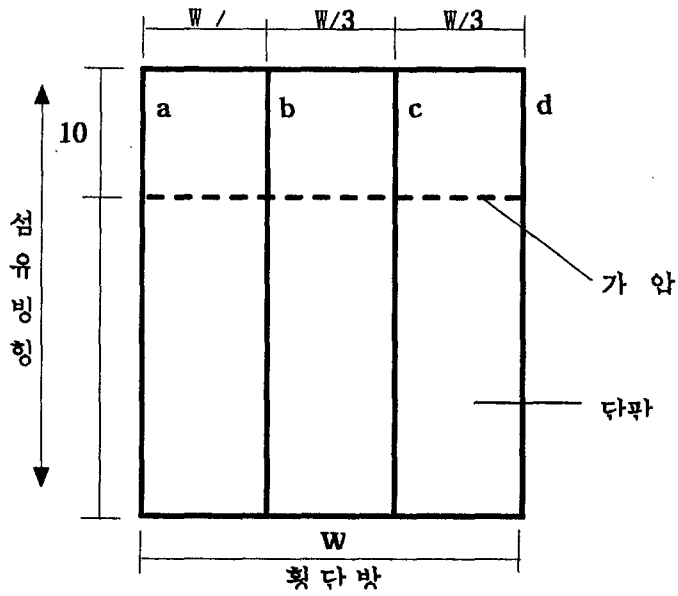


그림 5-2. 건조단판의 끝말림측정 방식(단위: cm)

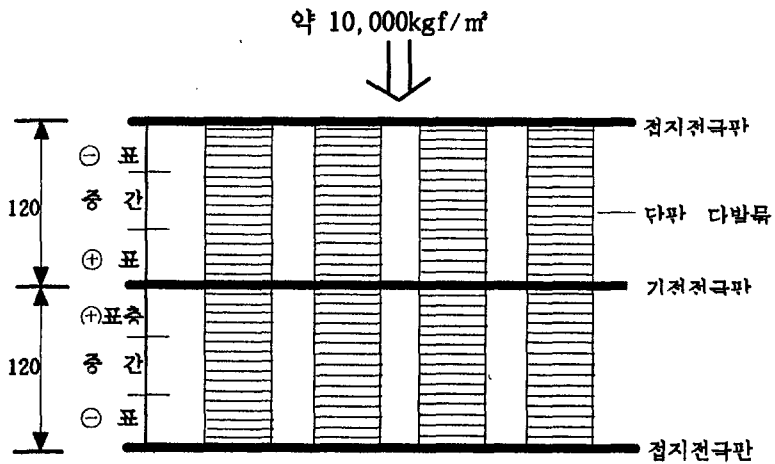


그림 5-3. 화장용단판의 압축고주파진공건조시험중의 잔적(단위: mm)



## 제4절 결론

현재 우리나라 산업현장에서 널리 활용되고 있는 화장용단판 몇 종을 단판의 목리와 두께 등을 달리하여가며 원적외선건조와 압체고주파진공건조를 실시하여 건조특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 원적외선건조의 경우 단판1매를 생재에서 이용함수율 수준까지 건조하는데 초기가열시간을 제외하고 30~360초 정도 소요되었다.

2. 두께0.12mm단판의 원적외선건조속도는 두께0.45mm단판의 원적외선건조속도보다 약 3~4배정도 빨랐다.

3. 생재에서 이용함수율수준까지 단판 3276매를 압체고주파진공건조하는데 소요된 시간은 65시간이었고, 단판의 최종함수율은 단판의 두께나 목리보다는 초기함수율의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

4. 압체고주파진공건조의 경우 두께12cm의 동일 다발묶음내에서는 잔적층간에 최종함수율의 변이가 거의 없었다.

5. 원적외선건조와 압체고주파진공건조 모두 단판의 목리는 건조속도에 영향을 미치지 않았다.

6. 압체고주파진공건조가 원적외선건조보다 이할예방에 더욱 효과적이었다.

7. 압체고주파진공건조의 경우 이할은 단판의 두께보다는 목리의 영향이 큰 것으로 나타나, 무늬결단판에서 경미하게 발생하였다.

8. 원적외선건조의 경우는 목리에 관계없이 두께가 얇을 경우 이할의 발생이 상대적으로 심하였다.

9. 압체고주파진공건조의 경우 끝말림은 전혀 발생하지 않아 원적외선건조보다 유리하였고, 원적외선건조에서 끝말림은 끈은결단판 보다는 무늬결단판에서, 얇은 단판보다는 두꺼운 단판에서 더 심하게 발생하였다.

10. 압축고주파진공건조와 원적외선건조 모두 건조중 탄흔은 전혀 발생하지 않았다.

11. 압축고주파진공건조의 경우 수분 1kg증발에 소요된 比에너지는 4.04kWh/kg·물이었고, 단판1매당 소요된 比에너지는 0.12kWh/단판1매이었으며, 원적외선건조의 경우 단판의 두께가 얇을수록 전력소요량이 적었다.

## 참 고 문 헌

1. 木材燻孝. 1987. 食品工業への원적외선가열の利用 -システム開發と新しい考え方- 食品と開發 22(8).
2. 寺澤 眞. 金川靖 . 林和男. 1998. 木材の高周波眞空乾燥. 海靑社.
3. 안영수, 서두원, 한문희, 양준환. 1993. 원적외선 가열의 효과 및 응용기술. Energy R&D 15(3): 107-119
4. 양중식. 1992. 원적외선 방사세라믹스 재료와 응용. 제2회 원적외선방사체 응용기술 심포지움요약집, 서울 :29-70
5. 이남호. 1997. 무늬목단판의 원적외선건조 특성, 한국목재공학회지 25(4): 22~28
6. 정희석. 1979. 판재와 단판의 열판건조에 관한 연구. 서울대 농학연구 4(1):67-96
7. 池澤幹彦. 1990. 遠赤外線の最新技術と その應用. 技術情報セクタ.
8. 최태섭. 1993. 원적외선 응용 및 이용기술. 공업진흥청 요업기술원 제3회 원적외선 방사체 응용기술 심포지움 요약집:127-144
9. 한충수. 1992. 원적외선을 이용한 응용기술. 공업진흥청 요업기술원 제2회 원적외선 방사체 응용기술 심포지움 요약집: 87-115
10. 한충수. 1993. 원적외선 가열에 의한 농산물 건조효과. 공업진흥청 요업기술원 제3회 원적외선 방사체 응용기술 심포지움 요약집: 29-51
11. Hartley, J. 1986. Hardwood veneer drying - a review. Proceedings World for. Congr.Div.5:77-88
12. Loehnertz, S.P. 1988. A continuous press dryer for veneer. For. Prod. J.38(9):61-63
13. Lutz, J.F., H.Habermann, and H.R. Panzer. 1974. Press-drying green flatsliced walnut veneer to reduce buckling and end waviness. For. Prod. J. 24(5):29-35
14. Lutz. 1978. Wood veneer : Log selection, cutting, and drying. USDA Tech. Bull. No.1577:70-86
15. Maht, J. and R.Röh.1995. Introduction of total quality management tools in vacuum drying of veneer. Proc. of 4th IUFRO International Conference on Wood Drying:172-181
16. Sommer, J.A. 1993. Softwood veneer drying as shown for radiata pine.

Proc. of International, Seminar on Manufacturing and Use of Softwood Plywood:1-24

17. Trofatter, G, RA. Hsrris, J. Schroeder, M.A. Taras. 1986. Comparison of moisture content variation in red oak lumber dried by a radio-frequency/vacuum process and a conventional kiln. Forest Products Journal 36(5):25-28
18. Tschernitz, J.L. 1985. Empirical equations for estimating drying times of thick rotary-cut veneer in press and jet dryers. USDA FPL Report No. 453
19. Zwick, R.A. and S. Avramidis. 1995. The commercial viability of radio-frequency/vacuum drying of softwoods. Proceedings of drying pacific Northwest species for quality markets in Bellevue, Washington, USA. : 87-94

## 제6장 종합 결론

### 제1절 주요 침엽수 구조용 제재의 가열판 압체식 진공 건조기술개발

#### 1. 진공건조 특성

소나무 등 4수종의 구조용 제재 두께별 가열판 압체식 진공건조 특성을 구명하고 추천 건조스케줄을 개발코저 연구한 결과는 다음과 같다.

목재 내부온도는 기존의 열기건조와 고주파 진공건조 등 어떠한 건조법의 경우보다 온도의 상승속도가 빨랐고 온도경사는 적었다.

건조속도는 곡선적으로 감소하였으나 제재 두께가 증가함에 따라 열기건조의 경우보다 두께가 건조속도에 미치는 영향이 적었다. 따라서 두꺼운 구조용제일 지라도 건조시간을 크게 단축할 수 있다.

건조중 수분경사는 중심층의 함수율이 섬유포화점이하부터 건조됨에 따라 급속하게 완만하기 시작하였으며 건조목재의 수분경사는 두께방향과 재장방향에서 매우 완만하였다.

건조중 수축율은 함수율이 감소함에 따라 비례적으로 증가하였으며 수축율은 목재의 정상수축율보다 적어서 건조수축율을 제고할 수 있다. 건조응력은 건조중에 약간 증가하다가 섬유포화점이하부터 감소하였고 건조완료후에 매우 경미하였기 때문에 콘디셔닝처리를 하지 않아도 바로 사용할 수 있다.

횡단면 할렬의 발생율과 길이는 제재 두께가 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 나타내고 있었으나 표면할렬재의 발생은 제재 두께의 영향을 받지 않았으나 길이는 두께가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 내부할렬은 전혀 발생하지 않았다. 구조용재로서 이용에 지장이 없을 정도이었다.

길이굽음, 너비굽음, 측면굽음 및 비틀림의 정도는 가열판의 압체작용에 의해 매우 경미하였다. 진공건조목재의 평형함수율은 천연건조목재에 비해 적었고 종압축강도, 휨강도와 탄성계수는 약간 증가하였다.

건조소요에너지는 기존의 다른 건조법보다 크게 절감되었고 두께 3cm와 11cm 제재의  $m^3$ 당 전기 에너지의 비용은 각각 3,106원과 5,972원으로서 매우 적게 소요되었다.

소나무의 건조속도는 낙엽송의 것보다 컸었으며, 기타 건조특성은 수종간에 비슷하거나 약간의 차이가 있었다.

## 2. 추천 건조스케줄

약한 스케줄, 중간온도 스케줄과 강한 건조스케줄을 적용한 결과 건조속도는 강한 건조스케줄 적용에서 가장 컸었고 초기할렬의 발생정도는 수종과 제재 두께에 따라 상이하였다. 건조효율 제고면에서 건조속도와 할렬에 근거하여 종합적으로 판단하여 볼 때 소나무의 경우 두께 7cm이하 제재는 강한 스케줄이고 9cm이상 제재는 중간온도와 강한 건조스케줄이다. 잣나무의 경우 5cm이하는 강한 스케줄이고 7cm이상은 중간온도 스케줄이다. 낙엽송의 경우 모든 두께는 중간온도 스케줄이다. 웨스턴 햄록의 경우 9cm이하는 약한 스케줄이고 11cm는 중간온도 스케줄을 추천할 수 있다(표 2-2-4 참조).

## 3. 연구결과의 활용

본 연구결과는 침엽수의 구조용재뿐만 아니라 공작용재도 효율적으로 건조하여 양질의 건조목재를 생산할 수 있다. 특히 속성수재, 생장이상재, 미성숙재, 불균일 목리를 가진 틀어지기 쉬운 목재를 통직하게 건조할 수 있다. 따라서, 건조중에 틀어짐이 쉬운 소경 및 저질재, 건조속도가 지극히 느린 대형 구조용재(고궁과 사찰의 복원과 보수용 등)의 신속한 건조, 참나무와 같이 건조가 느리고 터지기 쉬운 건조곤란 목재 등의 건조에 적용할 경우 건조시간 단축, 건조에너지의 절감효과, 건조목재의 품질향상을 크게 기대할 수 있다. 그리고 이 건조법은 잔적량이 많지 않기 때문에 대기업에서보다 중소기업에서 더 적합한 건조법이 될 수 있다.

# 제2절 특수용재의 압체식고주파진공건조기술개발 종합

## 1. 구조용 수심기등재의 압체식고주파진공건조기술 개발

저압증기폭쇄처리 및 배합가공처리가 國産 주요 침엽수종 11×11cm의 수심재의 고주파진공건조성 개선에 미치는 영향과 압체력이 배합가공 홈 확장억제에 미치는 영향 등을 검토한 결과는 다음과 같다.

낙엽송 E1-134처리의 경우 무배합재나 배합재 모두 폭쇄처리 직후 표층과 내층의 재온이 큰 폭으로 하강한 반면에, E1-100처리의 경우 재온의 하강 폭이 상대적으로 작았으며, 특히 내층의 재온하강은 매우 경미하였다.

E1-100처리나 E1-134처리 모두 재온하강 폭이 배합재가 무배합재보다 더 큰

것으로 나타나, 배합가공면은 폭쇄직후 급격하게 팽창된 공기의 방출구로써의 역할을 기대할 수 있을 것으로 생각된다.

폭쇄처리 횟수가 계속 반복되면서 표층 및 내층의 재온하강폭은 점점 증가하는 것으로 나타나, 폭쇄처리 횟수가 증가할수록 폭쇄처리에 의한 효과는 더욱 증가할뿐 아니라 균일화될 수 있을것으로 해석된다.

생재에서 건축용재의 이용함수를 수준까지 고주파진공건조되는데 소요된 시간은 66~138시간으로 관행열기건조나 천연건조에 관한 다른 연구보고와 비교하여 매우 짧았다.

낙엽송재의 경우 무배합재나 배합재 모두 저압증기폭쇄처리에 의한 건조속도 증진효과는 함수율 30%이상의 범위에서 뚜렷하였으며, 건조말기에는 그 효과가 크지 않는 것으로 나타났다. 그러나 소나무, 리기다소나무, 잣나무 등에서는 저압증기폭쇄처리에 의한 건조속도 증진효과는 미미하였다.

재면할렬은 배합가공처리에 의해 효과적으로 예방될 수 있었으나, 저압증기폭쇄처리나 연속압체 등은 거의 영향하지 않는 것으로 나타났다.

배합가공 흙의 확장은 연속압체에 의해 상당히 억제될 수 있었으며, 특히 연속압체에 의한 배합가공 흙 확장억제 효과는 수직잔적과 폭쇄처리재에서 더욱 효과적이었다.

수종, 재종, 폭쇄처리조건 등에 관계없이 고주파진공건조재의 촉진폭로시험 사이클에서의 수지용출은 없었다.

고주파진공건조중의 청변은 잣나무 무처리재에서 경미하게 발생하였을뿐 나머지의 경우에는 전혀 발생하지 않았다.

## 2. 목공예용 圓板의 압체식고주파진공건조기술 개발

소나무, 삼나무, 벗나무, 느티나무의 두께 5cm와 7.5cm 원판을 대상으로 배기망의 활용여부가 고주파진공건조의 건조시간과 건조속도, 건조결함 및 소요에너지 등에 미치는 영향을 검토한 결과는 다음과 같다.

초기함수율에서 목공예용재의 이용함수를 수준까지 건조되는데 대 부분 1주일 정도의 시간이 소요되었다.

배기망잔적처리 원판들의 평균건조속도는 무처리 원판들에 비하여 느렸고, 특히 건조초기에 매우 느리게 나타났다.

건조초기의 건조속도는 횡단면의 엔드테이핑처리 보다는 배기망의 삽입여부에 의해서 더 큰 영향을 받았다.

심재할렬의 경우 두께 7.5cm 소나무 원판에서 다소 심하게 발생하였을뿐 나머지의 경우에는 매우 경미하였다.

배기망잔적은 심재할렬이나 변재할렬 또는 V형크랙의 발생과는 직접적인 관련이 없었다.

변재할렬의 발생정도는 매우 경미하였으나 벗나무와 느티나무의 두께 7.5cm 원판에서는 매우 심하였으며, 이의 예방을 위해서는 심·변재 부위가 비슷한 시기에 섬유포화점에 도달케 하는 것이 매우 중요하다.

V형크랙의 발생정도는 경미한 편이었으며, 건조중 압체력을 해제하지 않을 경우 V형크랙에 의한 손상은 더욱 경감될 수 있을 것이다.

변색은 두께 7.5cm 삼나무 원판에서만 경미하게 발생하였을 뿐 나머지 경우에는 전혀 발생하지 않았다.

물 1kg을 증발시키기 위하여 고주파가열에 소요된 비에너지는 3.5 ~ 9.1kW h/kg·물로서 상당히 높은 편이었으나, 산업용규모의 고주파진공건조기를 활용하거나 건조에 건조기를 개방하지 않는다면 비에너지는 크게 감소할 것으로 생각된다.

### 3. 확장용 單板의 압체식고주파진공건조기술 개발

현재 우리나라 산업현장에서 널리 활용되고 있는 확장용단판 몇 종을 단판의 목리와 두께 등을 달리하여가며 원적외선건조와 압체고주파진공건조를 실시하여 건조특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

원적외선건조의 경우 단판1매를 생재에서 이용함수율 수준까지 건조하는데 초기가열시간을 제외하고 30~360초 정도 소요되었다.

두께0.12mm단판의 원적외선건조속도는 두께0.45mm단판의 원적외선건조속도보다 약 3~4배정도 빨랐다.

생재에서 이용함수율수준까지 단판 3276매를 압체고주파진공건조하는데 소요된 시간은 65시간이었고, 단판의 최종함수율은 단판의 두께나 목리보다는 초기함수율의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

압체고주파진공건조의 경우 두께12cm의 동일 다발뭉음내에서는 잔적층간에 최종함수율의 변이가 거의 없었다.

원적외선건조와 압체고주파진공건조 모두 단판의 목리는 건조속도에 영향을 미치지 않았다.

압체고주파진공건조가 원적외선건조보다 이할예방에 더욱 효과적이었다.



압체고주파진공건조의 경우 이할은 단판의 두께보다는 목리의 영향이 큰 것으로 나타나, 무늬결단판에서 경미하게 발생하였다.

원적외선건조의 경우는 목리에 관계없이 두께가 얇을 경우 이할의 발생이 상대적으로 심하였다.

압체고주파진공건조의 경우 끝말림은 전혀 발생하지 않아 원적외선건조보다 유리하였고, 원적외선건조에서 끝말림은 곧은결단판 보다는 무늬결단판에서, 얇은 단판보다는 두꺼운 단판에서 더 심하게 발생하였다.

압체고주파진공건조와 원적외선건조 모두 건조중 탄흔은 전혀 발생하지 않았다.

압체고주파진공건조의 경우 수분 1kg증발에 소요된 비에너지는 4.04kWh/kg·물이었고, 단판1매당 소요된 비에너지는 0.12kWh/단판1매이었으며, 원적외선건조의 경우 단판의 두께가 얇을수록 전력소요량이 적었다.