

목재응용건조기술의 발전^{*1} —건조 편람, 건조 전처리 및 건조방법—

鄭 希 錫 ^{*2}

Development of Applied Wood Drying Technology ^{*1} — Manual, Predrying Treatment and Drying Methods —

Hee-Suk Jung ^{*2}

근년에 전세계에서 목재건조 기술의 주요 관심사는 첫째 건조응력발생과 건조결함 예방이고, 다음은 건조실 제어시스템, 건조스케줄개발, 목재수분이동, 합수율측정, 새로운 건조방법개발, 건조에너지 절약, 경제성분석, 태양열건조, 수학적모델링, 건조전처리, 마이크로웨이브 건조, 건조실 구성과 정비, 건조종기결정, 감압건조, 공정제어와 콘디숀닝, 제습건조, 목재치수 안정 및 고온건조 등의 순위이다.

건조중 발생하는 결함들은 건조경비 증가에 절대적인 영향을 끼칠 수 있다. 예를 들면, 가구공장에 있어서 건조재의 품등 향상에 따른 1%의 수율 증대 효과는 가구 부품 1000 보오드피트당 23\$의 생산비를 절감할 수 있고, 활엽수재의 천연건조시 수반되는 건조손상은 생재의 23%를 초과할 수 있다. 본 총설이 각종 문제를 개선하고 건조경비를 절감하는데 기여할 수 있기를 바라며, 또한 단판, 칩 또는 맬감과 같은 비재재품에 관한 건조에 관한것은 제외하였다.

1. 건조 편람

목재건조에 관한 연구결과와 경험을 다른 사람에게 전달하는 것은 큰 관심의 대상이 되어 왔다. Wengert 등은 활엽수재 건조에 관한 정보를 다룬 소책자 前乾燥室과 체습건조에 관한 소책자 등을 발간하였다. Rietz는 판재의 저장에 관한 편람을, 그리고 McMillen과 Wengert는 오늘날 미농무성의 동부산 활엽수재 건조에 관하여 저술하였다. DKOM의 개정판이 1988년 출간되었다. 건조실에 관한 편람은 Bachrich과 Pratt 등에 의해서 각각 발간된 바 있다. Wen-

gert가 저술한 교과서에는 활엽수재 건조에 관한 많은 실용적 논문들이 수록되어 있으며, Dening 등은 Southern pine의 건조를 밀도있게 다룬 편람을 저술하였다.

건조실무와 연구에 관한 일반 논문중에 MacKay는 캐나다 서부산 활엽수재의 건조 실무에 관해서, Wengert는 미국 동부와 남부산 가구용 활엽수재와 침엽수재 건조 등에 관한 연구 논문들을 발표한 바 있다. Milotka 등은 혁신적인 침엽수재 건조 방법을 소개한 바 있고, Ziegler는 목재건조를 성공적으로 수행하기 위한 기본 요건들에 대해 조사한 바 있다. Simpson 등은 미

*1 接受 1990年 10月 30日 Received October 30, 1990.

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

국에 있어서 목재건조 기술의 현재와 미래에 관한 정보를 제공하였고, Wengert 등은 참나무 판재의 적합한 건조법에 관한 논문을 요약한 바 있다. 또한 목재건조의 모든 분야를 전반적으로 다룬 건조공정 관리를 위한 시리즈를 발간해오고 있는데 건조기 작동에 관한 실무적인 면도 취급되었다. 이것은 1985년까지 FPRS News Digests로서 격월제로 출판되어 왔으며, 별쇄본은 Wengert로부터 제공받을 수 있다.

Holmes 등은 건조비를 산출하기 위한 컴퓨터 모델을 개발했다. 천연건조, 강제송풍건조, 자온건조 및 관행 열기건조 등을 망라한 활엽수재 건조 소요경비가 조사되었다. Smith는 침엽수재의 태양열건조기에 관한 경제적인 평가를 시도하였고, Paterson 등 열기건조실을 이용하여 경제성을 분석한 바 있다. 한편 Hart와 Wengert는 Southernpine 평소각재의 건조비용을 조사하였다.

2. 건조전처리

2.1. 전평삭처리

건조전 판재의 두 재면을 평삭처리하는 일반적인 개념은 20년 이전부터 시도되었다. 최근에는 참나무재를 이용하는 가구산업에서 전평삭 처리가 활발하게 적용되어 왔는데, 표면할렬예방, 건조속도촉진, 에너지 소모감소, 건조실의 용량의 효율적 이용 등이 잇점이 되고 있다.

2.2. 증자전처리

Simpson은 건조개시전 수 시간 판재를 증자 처리하므로써 건조속도를 촉진시킬 수 있다고 보고한 바 있다. 이 처리는 참나무재의 경우 건조시간 단축보다는 건조재의 품질 향상에 더 깊은 관심의 대상이고, 또한 정확한 조건과 경제적인 증자처리를 위한 필요한 장치들이 적절한 것으로 입증하지 못하여 실질적으로 이용되지 못한 실정이다. 호도나무의 재색을 개량하기 위한 증자통과 스케줄이 이용된 바 있다.

2.3. 재면코팅

재면코팅은 건조속도를 저하시키고, 수분경사를 완화시켜 건조결함의 발생을 억제코자 건조재의 두 재면을 코팅한 처리이다. Rice 등은 PVA를 이용하여 코팅한 결과 무처리재와 비교하여 표면할렬을 효과적으로 예방할 수 있었으나 재면코팅재료의 경화에 따른 공정상의 어려움 때문에 실용화 되지 않고 있다.

2.4. 수분증발 억제판

재면코팅과 동일한 목적을 위해서 Hart 등은 두께 $\frac{1}{4}$ 인치의 단판 또는 합판으로 건조재의 표면을 차단하여 급속한 수분증발을 억제하였다. 이러한 수분증발 억제판은 조작이 용이하도록 잔목과 인접잔적충중의 극히 얇은 단판이나 합판을 배치하여 사용한다. 이것을 각 잔적총 사이에 위치시키므로써 건조재의 두 재면의 수분 유동을 억제시킨다. 수분증발 억제판은 참나무재의 표면할렬을 감소시키는데 효과적이었으나, 이러한 공정의 경제성을 입증되지 않고 있다.

2.5. 틀어짐 억제

건조중 발생하는 틀어짐을 감소시키기 위해 잔적상단에 무거운 하중을 가하거나, 또는 다른

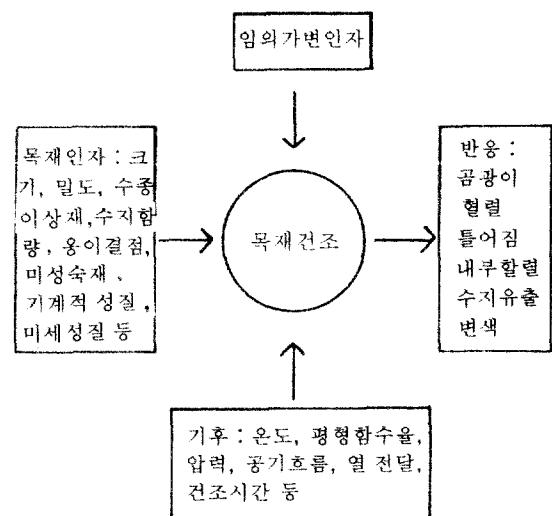


그림1. 목재건조 가변인자의 상호작용

억제력을 적용하는 방법은 호주를 비롯한 많은 국가에서 보편적으로 이용되고 있다. 그러나 북미에서는 하중을 작용시키는 방법을 거의 이용하지 않고 있다. 하중부하 방법의 잇점은 과거에도 잘 입증되어 왔다. Arganbright 등은 2×4ft Ponderosa pine의 건조시 200Psf의 상단하중이 틀어짐을 예방하는데 효과적임을 보고한 바 있고, Dedrick 등은 hem-fir의 틀어짐 예방에 약 250Psf가 효과적이라고 하였다. 기타 연구들(북미 제외)에서는 억제장치의 잇점들을 고려하였고, 몇몇 연구에서는 제재방법, 온도와 상대습도 등이 틀어짐에 미치는 영향을 조사된 바 있다.

Simpson은 유압식 하중장치가 활엽수 평소 각재의 비틀림을 감소시키는데 효과가 있음을 보고하였고, 또한 측면굽음을 예방하는데 요구되는 억제력을 예측하는 모델을 개발하였다. 소경목을 플리치(flitch)의 형태로 제재한 다음 건조하고, 그후 판재로 제재하는 방법인 Saw-Dry-Rip(SDR)는 많은 수종에서 틀어짐을 예방하는데 성공적임이 입증되었다.

2.6. 건조전 분류

과건조나 미건조를 최소화하기 위해 건조전에 판재를 분류하는 것은 생재함수율의 변이가 심한 침엽수종에 대해서 자주 제안되었다. 건조공정을 좀더 효율적으로 운용할 수 있는 이 개념은 Hogue에 의해서 언급되었으며, 건조전 분류에 관한 대부분의 연구들은 생재무게를 관심의 대상으로 인식해왔고, 평량장치는 Taylor에 의해서 개발되었다. Troughton 등은 생재와 생재 상태의 단판을 정확한 함수율계를 개발하여 함수율에 의한 건조전 분류를 가능케 하였다. Ward 등은 서부산 햄록과 미송의 경우 건조 전 분류가 효과적임을 입증하였고, lodegepole pine은 Nielson 등에 의해서, 그리고 incense-cedar는 Holmes 등에 의해서 각각 입증되었다. 건조전분류는 활엽수에 있어서 비경제적이지만, Harris 등은 무거운 수종일수록 내부활렬의 발생이 훨씬 크기때문에 oak rounds

건조실 발생되는 건조결합의 90% 이상은 생재 무게와 밀접한 관련이 있다고 보고하였다.

2.7. 기타 전처리

레이저를 이용한 판재의 자상처리는 건조속도를 증진시키는데 있어서 개발가능한 것으로 조사되어 왔다. Simpson은 자상처리 구멍들의 간격이 0.03인치 이하일 경우 건조속도를 증진시키는데 상당한 효과를 보였지만, 0.20인치 경우의 효과는 극히 미미함을 보고하였다. 전냉동처리는 건조전에 약 -20°F로 판재를 냉동시키는 방법으로서 건조손상의 증가없이 건조속도를 증가시키는 것으로 보고되었다. Chen 등은 호도나무 판재의 열판건조시 전냉동처리의 적용 가능성을 조사하였으나 별 효과가 없었다. Liy 등은 redwood의 전냉동처리는 수축율을 감소시킨다고 보고하였다.

3. 건조방법

3.1. 천연건조

이차율과 목재가격이 상승하고 건조재의 품종이 전반적으로 저하됨에 따라 천연건조에 대한 관심은 줄고 있다. 그러나 Simpson 등은 에너지절약 측면에서는 천연건조가 경제적이라고 주장하였다. Dening 등에 의해서 개발된 기상인자에 근거한 천연건조재의 함수율 추정은 건조내의 효율적 관리에 적용될 수 있다.

3.2. 강제송풍 천연건조

옥내송풍건조라고 불리는 이 건조방법은 대기중의 공기를 찬적층 사이로 유입시키는 팬(fan)이 설치된 한쪽 벽만을 가진 창고에서 목재를 건조하는 것이다. 이 건조실은 관행열기건조실과 구별하여 single-pass dryer라고도 부른다. 강제송풍천연건조는 건조가 용이한 수종의 건조에 있어서 가장 저렴한 건조방법으로서 Lewis는 강제송풍천연건조의 설계와 비용에 관해 언급하였다.

3.3. 창고형 저온예비건조실

창고형 예비건조실은 활엽수 생재를 함수율 약 25% 까지 건조하는데 가장 널리 이용되는 건조방법 중의 하나이다. 이 건조실은 온도 80~95°F, 상대습도 55~80% 범위를 유지할 수 있고, 재간풍속은 200fpm 정도로서 참나무 1인치 두께의 가구부재를 건조하는데 최적이다. Wengert 등은 이 건조방법의 비용, 성능 및 장·단점 등을 요약한 지침서를 출간하였다.

Divincenzo 등은 예비건조실의 가능성, 성능, 작동경험 및 건조재의 품등 등에 관하여 보고하였다. Cech는 white pine에 대한 예비건조의 유용성을 밝혔고, Fricke는 최상의 건조재 품등을 얻기 위해서 전진식 저온건조실이 적합하다고 주장하였다.

3.4. 태양열건조

건조실내에서 태양에너지를 이용하여 목재를 건조하는 것은 지난 30년 동안 활발하게 연구되어 왔다. Hall 등은 태양열건조에 관한 과거의 연구들을 요약하여 발표한 바 있다. 그리고 Wengert 등은 전 세계의 문헌을 조사하여 31종의 태양열건조실의 양식을 제시하였고, Rosen 등은 외부집열방식의 태양열 건조실에 대해 연구하였다. 경제적으로 가장 유리한 태양열 건조실은 온실형, 또는 반온실형이다.

Oliveira 등 여러 학자는 태양열건조실에 대해 이론적 분석을 시도한 바 있다. 이들중 Tscherntz 등이 발표한 논문은 열대지방에서 태양열건조에 관해 연구한 것이다. Yang은 고위도지방에서 태양열건조에 관한 연구를 실시하였고, Little은 Mississippi지방에 태양열에 의해 가열된 열수순환식 건조실을 제작해서 활엽수재를 건조하여 그 성능을 연구한 바 있다. 그리고 Steinmann 등은 태양열건조실의 자동제어 가능성에 관한 분석자료를 제시하였다.

Chen을 비롯한 다른 연구자들은 태양열건조에 관해 많은 연구를 수행하였고, 이것에 관한 이론적 모델이 Helmer 등에 의해 개발되어 발표

된 바 있다.

3.5. 제습건조

제습건조는 1960년대 후반기에 산업적으로 이용된 아래 소량의 활엽수재를 건조하는데 있어서 증기보일러, 또는 기타 다른 가열장치의 비용이 엄청나게 비쌀 경우 매우 인기있는 건조방법으로 여겨져왔다. 제습기를 설정하는데 있어서 고려되어야 할 여러가지 인자들을 Wengert 등이 요약하여 발표하였고, 또한 관행열기 건조와 제습건조를 비교한 연구를 수행한 바 있다. 또한 Lewis는 최근의 제습건조에 관한 연구들을 재조명하여 white pine, hard maple, spruce studs, 북미산 활엽수재, 서부산 침엽수재, redcedar 및 사시나무 등의 수종은 제습건조에 적합한 것으로 밝혀졌다.

3.6. 고온건조

고온건조 또는 100°C 이상에서 건조는 침엽수재, 특히 구조용재로 이용되는 침엽수재 건조에 자주 이용되어 왔다. 특히 Southern pine 평소각재의 건조에는 매우 적합하였다. Wengert는 건조실을 여러개의 영역(보통 9~12영역)으로 분할하되 제어하는 새로운 기술을 개발하였다. 궤도 사이의 중앙스팀코일(즉, 보조가열관 또는 채가열관)은 수직방향의 경우 2~3개의 分室로, 길이방향의 경우 3~4개의 分室로 분할되는 것이 전형적이다. 각 分室 또는 zone에 각각의 계측 및 제어장치가 설치되어 있고, 유입공기보다는 유출공기의 온도를 이용하여 제어한다. 따라서 유출공기의 온도를 일정하게 유지하기 위해서 고함수율 판재의 잔적부위에 유입되는 공기 온도가 증가되어야 하고, 이로 말미암아 고함수율 재는 더 빨리 건조되고, 최종함수율의 변이도 감소된다. 최종평균함수율과 재간온도차(TDAL)사이의 상관관계를 이용하여 최종함수율을 정확하게 추정하여 과건조를 최소화 시킬 수 있었다. zones, 재간온도차 측정 및 유출공기의 제어 등은 최종함수율의 변이 감소 및 건조손상, 특히 틀어짐의 발생을 감소시킬 수

있다. Oliveira 등은 재간온도차 등을 포함한 고온건조의 이론을 정립하여 발표하였고, Dericke는 재간온도차에 관한 이론적 분석을 시도하였다.

Denig 등은 고온건조의 이론과 건조속도에 영향하는 인자들에 관한 연구를 수행하였고, Southern pine의 건조시간에 미치는 영향인자들, 즉 잔적폭, 풍속, 온도 등에 관한 연구도 수행되었다. Price 등은 건조시간과 온도가 Southern pine의 틀어짐, 수축율 및 기계적 성질 등에 미치는 영향에 관해 조사한 바 있다. 그리고 McCollum은 고온건조가 건조수율과 판재수축에 미치는 영향을 조사하였고, Ziegler는 고온건조의 최근 발전과정과 그것들의 실용적 의미 등을 조명하였다. 또한 Wolfe는 고온건조와 관련된 일반적인 문제점들에 대해 언급하였고, Erickson 등은 자작나무 flitches를 고온건조한 후 함수율 균일화시키는 방법을 개선하여 보고하였다.

美松, red pine, 서부산 햄록, radiata pine도 고온건조된 바 있다. 가장 최근의 고온건조실은 건구온도 $240^{\circ}\text{F} \sim 270^{\circ}\text{F}$ 범위에서도 운용되는데, 고온과 고풍속(1200fpm 이상)에서 건조도 연구되어 왔다. Vermass는 유일하게 고주파고온건조에 관해 연구하여 건조속도의 촉진과 건조결함의 감소효과를 얻을 수 있다고 보고하였다. Boone는 활엽수재 고온건조에 관한 요약집을 발간하였고, 고온건조가 가능한 북부산 활엽수 12수종을 조사하였으며, 이들 중 몇 수종은 관행의 온도에서 예비건조한 다음 고온건조할 경우 건조결함이 감소됨을 발견하였다. 또 오리나무와 사시나무의 고온건조 가능성에 대해서도 연구된 바 있다.

3.7. 감압건조

감압건조는 건조속도가 빠르고 건조손상은 최소화시킬 수 있기 때문에 오랫동안 관심의 대상이 되어왔다. 최근의 연구들은 주로 열의 전달방법(즉, 전기가열식, 감압·가열교호식, 열수가열식, 라디오파가열식)과 그것들이 건조

재의 품등에 어떻게 영향하는가에 집중되고 있다.

Wengert 등은 교호식가열방법, 라디오파가열식 및 관행열기건조의 비교연구를 수행하여 비록 라디오파 가열식 감압건조의 경우 최종함수율의 변이가 심했지만 두 감압건조방법은 상당히 우수한 건조재를 얻을 수 있다고 보고한 바 있다. 그리고 Harris를 비롯한 다른 연구자들은 참나무재를 라디오파감압건조를 실시하여 최종함수율의 변이가 심한 사실을 발견한 바 있으나, Compton은 가구부재를 라디오파감압 건조하여 성공적인 결과를 얻었다. Simpson 등은 전기가열식 감압건조에 대한 연구를 수행하여 건조속도는 빠르지만 최종함수율의 변이와 너비굽음의 발생이 심하다고 보고하였다.

3.8. 라디오파건조

라디오파를 이용한 가열방식의 연구는 주로 감압 또는 기타 열대류 현상을 이용한 건조등과 조합된 방식의 건조로서 연구되어 왔지만, 라디오파 자체만을 이용한 건조에 관한 연구는 거의 전무하다. Simpson은 두께 1인치의 북부산 red oak 판재의 라디오파건조는 너무심한 건조손상을 야기하지만, 함수율 80%에서 25%까지 건조하는데 불과 15분밖에 소요되지 않는다는 점에서 예비건조로서 개발가능하다고 주장하였다.

3.9. 열판건조

열판건조에서는 건조중 열전달속도가 빠르고, 판재가 두께방향으로 압체된다. 그러나 판재가 두꺼울경우 건조시간과 건조손상이 증가하기 때문에 보통 두께 1인치 이하의 판재에만 국한하여 적용한다. Simpson은 제재방식과 예비건조가 몇가지 활엽수종의 열판건조특성에 미치는 영향을 조사하였는데, 정목판재의 내부혈络을 감소시키는데 유리하고, 이러한 효과는 경질단풍나무와 같은 수종보다는 방사조직이 발달해 있는 red oak와 같은 수종에서 더욱 뚜렷하다고 보고하였다. 열판건조전 함수율 약 25% 까지 예비건조하는 것은 건조재의 품등을 향상

시키나, 함수율 16%까지 예비건조한 white oak의 경우 내부할렬, 찌그러짐, 표면할렬 발생의 감소시키는 효과가 없는 것으로 나타났다.

Chen은 black walnut에 대한 단속열판건조와 연속열판건조 효과에서 단속열판건조재의 품등이 더 우수하나 건조결합의 발생을 완전히 예방할 수는 없다고 보고하였다. 그리고 전냉동처리 역시 열판건조재의 품등을 향상시키는데 큰 효과가 없었다. Chen등은 열판온도를 증가시키므로써 건조시간을 단축할 수 있으나, 압력의 증가는 건조속도 증진에 영향을 미치지 않고, 온도와 압력을 증가시키는 것은 모두 두께수축을 증가시킨다고 보고하였다.

3.10. 고압증기건조

1기압 이상의 압력상태를 유지하는 증기로 목재를 건조하는 방식은 Rosen에 의해서 연구되었다. 이러한 과열증기건조의 이론은 Vermass에 의해 제시되었고, Cuttrer 등은 고압증기건조가 투과성에 미치는 영향을 조사한 바 있다. 이러한 건조에 관한 연구에 의하면 두께 1인치의 대부분 수종에서 천연건조재를 함수율 약

7%까지 건조하는데 24~30시간 정도 소요된다. 재색이 어두운 색상으로 변화하는 점을 제외하고는 건조재의 품등은 양호한 편이며, 또 하나의 문제점은 장치의 부식이 용이한 점이다. 경제성은 관행열기건조에 비해 고압증기건조가 훨씬 유리한 것으로 밝혀져 있다.

3.11. 제트건조

제트건조는 제재목건조에 있어서 새로운 방법이지만 그 원리는 단판건조에서 이용한 원리와 동일하다. 이것은 공기의 흐름을 채면과 직각방향으로 유도하여 평행류와 비교하면 채면에 존재할 수 있는 공기의 정체층을 제거하므로써 열전달과 수분증발 속도를 증가시킨다.

제트건조기의 개발에 관한 대부분의 연구는 Rosen에 의해서 수행되었는데, 건구온도는 200~350°F, 습구온도는 180~195°F, 그리고 풍속은 3000fpm이 적용되었다. 또한 제트건조모델을 개발하는데 이용될 수 있는 실험식을 제시하였는데 그의 실험식은 건조속도와 건조시간을 예측하는데 적합한 것으로 보고되었다.