

고온고압에서의 목재 평형함수율 측정^{*1}

이 원 희^{*2} · 安部 久^{*3} · 黒田尚宏^{*3}

Measurement of Equilibrium Moisture Content of Wood at High Temperatures and Vapor Pressures^{*1}

Weon-Hee Lee^{*2} · Hisashi Abe^{*3} · Naohiro Kuroda^{*3}

ABSTRACT

In this study, it was examined the method to estimate equilibrium moisture content(EMC) at high vapor pressures and high temperatures above 100°C. The material used for the experiment was Sugi(*Cryptomeria japonica*). EMC was investigated at temperatures ranging from 100°C to 160°C and under saturated vapor pressures above 1atm. The correlation between temperatures and vapor pressures have a good agreement with those observed by thermocouple and pressure gauge in the air state of autoclave, respectively. A sensitivity of quartz spring was 65mm/g. Moisture content(MC)s calculated from the quartz spring elongation by vapor sorption showed a good agreement with MCs by oven-dried method. Using this system, it was found that EMC at high vapor pressures and high temperatures above 100°C were higher than EMC of wood in 1 atm pressure conditions. With this system, therefore, it was concluded that the EMCs of wood and wood-based materials at high temperatures were able to be evaluated.

Keywords : EMC, high temperatures, high vapor pressures, quartz spring.

1. 서 론

최근 목재가공기술의 발전에 동반하여 고온영역에 있어서의 목재의 열처리에 관한 관심이 고조되고 있다. 특히 이 가운데에서도 목재의 압축성형가공, 고속 건조 등의 고도의 가공기술이 목재의 고부가가치화,

목재 및 목질재료의 치수안정화 등, 목질계제품의 고품질화를 목표로 대내외적으로 연구, 개발되고 있다.

따라서 열처리후의 목재성질의 변화, 열압축의 거동, 처리후의 구성성분의 변화 등에 대한 많은 기초적인 지식은 얻어져 있지만, 고온영역에 있어서 수증기압의 변화에 따른 수분의 거동과 변형에 관해서는

*1 접수 1998년 6월 10일 Received June 10, 1998.

본 연구는 1997년도 한국 학술진흥재단 지방대 육성 연구과제 자원에 의해 수행되었음.

*2 702-701, 대구시 북구 산격동 1370 경북대학교 농과대학 임산공학과 College of Agriculture, Kyungpook National University, Taegu 702-701, KOREA

*3 日本国 茨城県 農林省森林綜合研究所 木材利用部 物性研究室 Forestry and Forest Products Research Institute, Tsukuba Norin P.O.Box 16, Ibaraki 305 Japan

실험수행의 곤란함 등으로 인해서 연구내용이 전무한 사실이다. 특히 고온영역에 있어서 평형함수율에 관한 데이터는 그 데이터의 활용이 주택환경이나 종래의 건조기술에의 적용에 한정되어 있었던 탓으로 고온에서의 데이터정비가 시급한 실정이다.

기존의 연구결과중 시트카스프루스재를 이용한 흡착등온선의 실험치를 보면, 1기압하에서 온도 100℃까지는 실험이 가능함을 알 수 있다. 또 이러한 흡착등온선에 대해서 수식적으로 모델화한 연구결과도 Kauman(Kauman, W.G. 1956) 및 Simpson(Simpson, W.T. 1971; Simpson, W.T. et. al. 1981)에 의해 시뮬레이션한 결과도 보고되고 있다. 그러나 이론식의 구성상 수식만으로 모델화하는데에는 조건 등에 따라 많은 어려움이 있을 것으로 예상된다. 특히 압력이 가해지는 상태에서의 목재의 흡착량은 어느 정도인지에 대해서는 전혀 알 수 없다. 포화수증기압곡선을 보게되면 이 사실을 보다 쉽게 이해할 수 있는데, 온도에 대해서 수증기압을 그리게 되면 단조증기압곡선이 얻어지며, 온도상승에 따라 수증기압력의 증가와 더불어 절대습도의 양이 상승함을 알 수 있다. 따라서 고온영역에서 높은 압력이 가해지는 경우, 목재의 평형함수율은 1기압상태하에서와는 반대로 점점 증가하는 경향을 나타낼 것으로 예상된다. 일정 상대증기압하에서 온도증가에 따라 목재의 수분흡착량은 감소하지만, 고온·고압하에서는 반대로 증가하는 경향을 나타내어 흡착등온선 역시 위쪽으로 올라갈 것으로 예상된다. 본 연구에서는 온도 100℃이상의 범위에서는 실험방법이 전혀 알려져 있지 못한 관계로 먼저 함수율 측정방법 및 목재의 평형함수율에 대하여 조사 검토하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

삼나무(杉, *Cryptomeria japonica* D.DON)의 변재부를 이용하였으며, 시험편의 치수는 2cm(R)×4cm(T)×0.1cm(L)로서 전건상태로 조정하여 이용하였다.

2.2 실험

2.2.1 함수율 측정장치

고온·고압하에서의 목재의 함수율은 일반적인 증

량법으로는 측정할 수 없기 때문에 특별한 장치를 고안하지 않으면 불가능하다고 할 수 있다. 그래서 내압glass제의 오토클레이브에 실리콘오일과 석영스프링을 이용하여(Kuroda, N., 1997), 고온에서의 수분흡착실험을 행하여 목재의 중량변화를 카세트미터로써 측정하였다.

2.2.2 실험조건 및 방법

온도 100℃부터 160℃까지의 범위에 있어서, 밀폐된 용기내에서 충분히 포화될 수 있는 수분양으로 조정하여 평형함수율측정을 행하였다. 함수율측정의 온도범위는 100℃부터 160℃까지 10℃간격으로 하였으며, 습도는 100%로 5시간동안 가열처리를 행하는 과정에서 15분 간격으로 중량의 시간에 따른 변화를 측정하였다(이 등, 1998). 우선 실험전후에 있어서 전건중량을 측정하였고, 포화수증압조건하에서 각 처리온도별 함수율측정을 위한 스프링의 늘어난 길이 측정 실험이 끝난후 중량감소율과 함수율을 산출하였다. 함수율산출을 위하여 각 실험전에 있어서 미리 석영스프링의 늘어나는 길이를 여러가지 중량별로 정밀하게 측정하였다.

2.2.3 측정장치의 구성 및 검점

그림1에 오토클레이브의 내부온도와 포화수증기압의 관계를 이상기체의 경우(reference)와 비교하여 나타내었다. 온도 증가에 따라 수증기압이 약간 증가

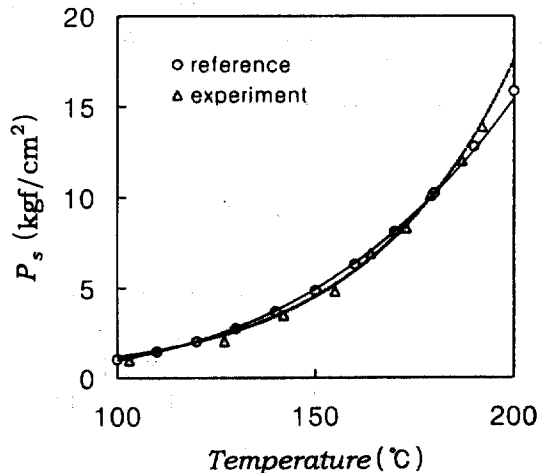


Fig. 1. Saturated vapor pressures for reference and experimental values as a function of temperatures.

하고 있는 것은 공기자체의 열팽창이 가미된 관계로 일어나는 현상이라고 생각되며, 특히 이 현상은 고온 쪽에서 차이가 나고 있다. 따라서, 이로 인하여 실험 시의 고온에서의 실제증기압은 매우 높아질 것으로 예상되며, 폭발의 위험을 고려한 실험장치를 고안하지 않으면 안될 것으로 생각되었다. 이에 특별한 실험장치를 고안하여 제작하였는데, 내압용 유리로 만든 500ml크기의 오토클레이브와 이를 지지하는 프레임 및 두껍부분에 붙은 증기분사노즐, 압력센서, 온도센서, 습도센서로 구성되어 있다(Kuroda, N., 1997). 석영스프링은 열에 의한 저항력이 큰 관계로 고온에서 사용할 수 있는 것으로 알려져 있으며, 여기서 오토클레이브의 두껍부분에 매달고, 하부 선단부분에 목재시편을 연결하여 수분흡착에 의해 일어나는 스프링의 길이변화를 일정시간 간격으로 측정하였다. 또한 각 실험조건을 맞추기 위해서 증류수를 오토클레이브 내에 일정량씩 조정, 주입하여 습도 및 압력변화를 조절하였다. 소정의 온도 유지를 위하여 실리콘오일을 사용하여, 이 오일bath안에 오토클레이브 장치를 넣고 실리콘오일을 열팽창을 고려하여 적당량 넣은 다음, 온도상승속도를 약 2.5°C/min로 하여 정상온도에 달한 때부터 6시간동안 15분간격으로 스프링의 늘어남을 1/100mm정밀도의 카세트 미터로써 조사하였다.

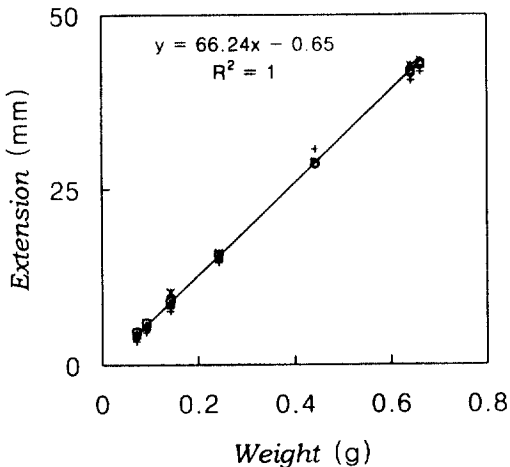


Fig. 2. Calibration plot of quartz spring. The known weight of eight calibrated samples is plotted against the measured extension of quartz spring.

이 일련의 실험으로부터 유리로 만든 오토클레이브는 온도 약 180°C, 압력10kg/cm²의 조건에서도 파괴되지 않았으며, 안전성은 보장되었다. 단 한가지 심각한 문제점이라면, 오토클레이브내부는 미묘한 온도변화에도 결로가 발생하기 쉬우며, 특히 센서가 붙어있는 오토클레이브의 연결부분의 결로발생은 피할 수 없는 결함으로서 앞으로 보완해야 될 사항으로 남아있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 석영스프링의 측정정밀도

100°C이상의 고온에 있어서 물체는 열팽창 등으로 인하여 일정한 물성치를 유지하기 어려운 것이 일반적이다. 고온·고압하에서 스프링의 신축이 불균일하다면, 고온에서 함수율을 측정한다는 것은 무리인 관계로, 먼저 석영스프링의 열에 대한 영향이 어느정도 인지를 조사하였다.

먼저 그림2에는 실온에 있어서, 백금으로 만든 표준시편의 중량에 대한 석영스프링의 늘어난 길이를 나타내었다. 반복횟수는 8회 행하였으며, 이 중에서 8회째의 결과에 대하여 원점을 통하는 직선회귀를 한 결과 결정계수 1.0의 높은 상관성을 나타냈다. 나머지 7회에 대해서도 상관성을 분석한 결과, 모두 결정계수가 0.998이상의 높은 상관성을 나타내어 석영스

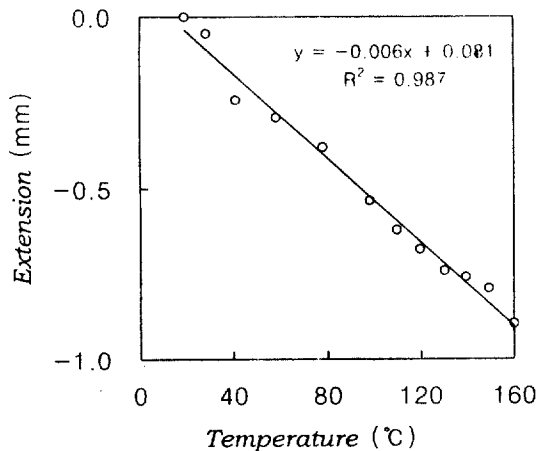


Fig. 3. Extension of quartz spring by itself with temperatures under saturated vapor conditions.

프링의 감도 및 관측자의 관찰의 재현성이 확인되었다. 이로부터 카세트미터의 측정정밀도 및 센서의 작동 역시 아무런 문제가 없었다.

다음은 실온에서부터 온도 160℃ 범위까지에 있어서, 석영스프링의 열에 의한 신축량을 조사하였다. 그 결과를 그림3에 나타냈다. 횡축에 온도를, 종축에 늘어난 길이를 플롯하였는데, 석영스프링은 온도가 상승할수록 직선적으로 점차 줄어드는 것을 관측할 수 있었다. 보통 열이 가해지면 물체는 열팽창에 의해서 늘어나는 것이 일반적인 사실에 비추어보면, 이 현상은 수차례에 걸쳐 실험을 반복해도 동일한 결과가 나오는 것으로 실험에 이상이 있는 것은 아님이 확인되었다. 온도가 상승할수록 석영스프링이 수축하는 것은 석영재료에 있어서 온도상승이 석영의 강성의 증대를 유발하여 일어나는 현상으로 생각된다. 이 결과로부터 스프링의 측정정밀도를 조사한 결과를 기준으로 실험치를 계산함에 있어서 온도보정을 행할 필요가 있음을 시사하는 것으로 판단되었다. 온도 보정은 시험편의 중량을 기준으로 행해야 하며, 그림3에 의거하여 계산해 보면 예를들어, 100℃에서는 0.519mm, 160℃에서는 0.879mm만큼 석영스프링의 길이가 수축되므로 여기에 상당하는 양의 함수율을 보정해 주어야만 한다. 만약 전건시험편의 중량이 0.4g 이라고 한다면, 100℃에서는 약 0.5%의 함수율을 관측치에 가산해 주어야 한다.

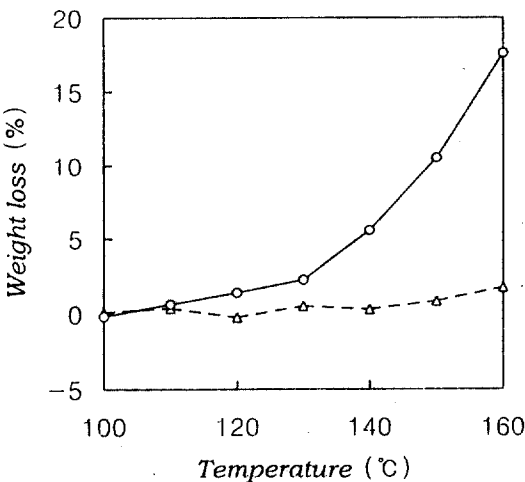


Fig. 4. Relationships between temperatures and weight loss of wood (water vapor saturation(○), without water vapor(△)).

3.2 고온상태에서의 중량감소율

열처리전의 전건중량을 기준으로 하여 처리후의 목재중량의 감소비율을 산출하였다. 그림4에는 포화수증기내에서와 건조공기내에서의 목재의 열처리온도에 따른 중량감소율을 나타내었다. 처리시간은 정상상태에서 모두 5시간씩 행하였다. 무수상태에서 목재를 열처리하면 온도를 높여도 중량감소율은 극히 적으며, 140℃이후에 소량 증가하는 경향이 보이지만, 온도에 의한 차이가 거의 없었다. 그러나 포화수증기내에서는 온도상승과 더불어 중량감소율은 단조증가하는 곡선을 보임으로써 열처리온도의 영향이 큰 것으로 나타났다. 이 사실로부터, 열처리에 의한 목재의 실질중량의 감소율은 온도 및 가열조건에 의해 다르고, 처리조건의 증기압에 의존해서 변화함을 알 수 있다. 즉, 같은 온도에서 처리하여도 수증기가 존재하는 경우, 공기중의 물분자에 의해 목재세포벽중의 헤미셀룰로오스가 고온하에서 탈수소화반응으로 furfural로 전환되며, 이때 발생하는 유리초산기에 의해 산가수분해가 진행되므로 중량감소가 발생하는 것으로 생각된다. 따라서 물분자의 가수분해에 기여하는 역할이 매우 큰 것이 인정되었다(Fengel, G. & Wegener, G., 1984).

3.3 포화수증기속에서의 평형함수율

수증기 포화상태에서 목재시험편을 5시간 가열한 고온상태에서 목재의 평형함수율을 구하였다. 그림5에는 함수율에 미치는 온도의 영향을 검토하기 위하여 온도 100℃부터 160℃의 범위에 있어서 평형에 도달한 시기의 평형함수율을 가열전후의 전건중량을 기준으로 산출하여 나타내었다. 100℃이상의 고온에서의 평형함수율은 섬유포화점 이상의 고함수율로서 1기압조건에서의 고온에서의 목재의 함수율과는 전혀 다른 결과를 나타내었다. 110℃까지는 가열전후에 있어서 열처리에 의한 실질중량의 차이(Δ)가 거의 없지만, 120℃부터 열처리에 의한 중량감소가 증가함을 나타내고 있으며, 이것은 그림4의 중량감소율의 온도변이와 일치하는 점이다. 가열처리전의 전건중량을 기준으로 구한 함수율의 시간경과를 온도를 변화시켜 보면 150℃까지는 단조증가하는 모양을 나타내다가 160℃에서는 급격하게 저하하는 현상을 나타내었다. 이것은 고온의 포화수증기속에서는 흡수에 의한 중량증가와 가수분해에 의한 실질중량의 감소가 동시에 병행하여 일어나고 있음을 알 수 있다. 이론적

4. 결 론

무수상태에서의 건열처리, 수증기 포화상태에서의 가수분해처리를 100°C 이상에서의 고온상태에서 삼나무材를 이용하여 평형함수율을 측정하였다. 그 결과, 물분자가 목재 세포벽의 분해에 기여하는 역할이 대단히 큰 것을 알 수 있었다. 또한 고온고압처리와 관련한 기존의 논문에서 고온처리에서는 압력의 유무가 목재의 물성치에 미치는 영향이 크다는 학설의 근원이 물분자의 역할로 추정되어졌으며, 고온에서의 함수율 측정장치에는 센서부분의 결로 등, 어느경도의 문제는 남아있기 때문에 측정장치의 개선이 필요할 것으로 판단된다.

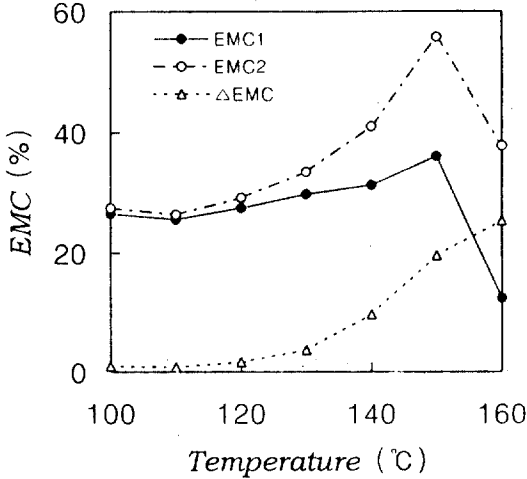


Fig. 5. Variations of equilibrium moisture content (EMC) based on oven-dry weight before (●) and after(○) heat treatment and its difference(△) in saturated vapor pressures.

으로 포화수증기 조건에서는 온도가 상승할수록 수증기압력의 증가와 더불어 절대습도의 양이 급상승하기 때문에, 목재의 평형함수율도 절대습도에 비례하여 1기압하에서의 조건과는 비교가 안될 정도로 매우 높을 것으로 추정된다. 따라서 160°C에서의 평형함수율은 150°C까지의 함수율의 연장선상에 위치해야 할 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 160°C 조건에서 함수율의 급격한 저하는 가수분해에 의한 실질증량의 감소량이 수분흡착에 의한 증량증가량보다 더 많이 일어났기 때문인 것으로 생각할 수 있다. 따라서 이 온도영역에 있어서 수분흡습에 관련한 목재 구조의 변이점이 존재하고 있음을 시사하고 있다. 따라서 수분이 존재하는 조건에서 목재를 고온에서 열처리를 하게 되면, 높은 온도와 압력 및 수분의 작용에 의해 치수안정화 등과 같은 증기열처리에 의한 목재의 성능에 큰 변화가 일어날 수 있는 이유가 여기에 있는 것이 아닌가 생각된다.

참 고 문 헌

- 이원희, Kuroda, N., Abe, H. 1998. 100°C 이상의 고온하에서의 목재함수율. 한국목재공학회 '98 학술발표논문집. 87-91.
- Kuroda, N. 1997. Nondestructive Evaluation of Wood-Moisture Content and Passage for Effective Wood Utilization, '97 International Symposium on Wood Science & Technology, Seoul, p.43.
- Fengel, G., Wegener, G. 1984. WOOD, pp.274-276, Walter de Gruyter. Berlin.
- Simpson, W.T. 1971, Equilibrium moisture content prediction for wood. Forest Prod. J. 21(5):48-49
- Simpson, W.T. et.al. 1981. Equilibrium moisture content of wood at high temperatures. Wood and Fiber. 13(3):150-158
- Kauman, W.G. 1956. Equilibrium moisture content relations and drying control in superheated steam drying. Forest Prod. J. 6(9):328~332