

Hailwood-Horrobin 방정식을 이용한 한국의 야외 목재평형함수율 결정¹

나 중 범^{2,†}

Determination of Equilibrium Moisture Content of Outdoor Woods by Using Hailwood-Horrobin Equation in Korea¹

Jong-Bum Ra^{2,†}

요 약

본 연구는 지역 및 계절 변화에 따른 목재의 평형함수율을 조사하기 위해 수행되었다. 국내 73개 장소에서 30년(1981~2010) 동안 축적된 기상자료와 Hailwood-Horrobin 방정식을 이용하여 목재평형함수율을 계산하였으며 계산된 목재평형함수율의 변화 추이를 조사하였다. 평년값(30년 평균값)을 사용하여 계산된 목재평형함수율은 대구가 11.5로 가장 낮았으며 흑산도가 15.8로 가장 높은 것으로 나타났다. 계절별로 살펴보면 여름(6월, 7월, 8월)이 15.3으로 가장 높았으며 가을(9월, 10월, 11월) 13.7, 겨울(12월, 1월, 2월) 12.2, 봄(2월, 3월, 4월) 12.0의 순서로 평형함수율이 낮은 것을 알 수 있었다. 월별 목재평형함수율은 4월이 11.6으로 가장 낮았으며 7월이 16.1로 가장 높은 것으로 나타났다. 지역에 따른 월별 평형함수율의 편차는 제주가 3.0으로 가장 작았으며 흑산도가 8.7로 가장 큰 값을 보여주었다. 목재의 평형함수율은 목재의 수축 및 팽윤과 관련이 있다는 것을 고려할 때 월별 평형함수율의 편차가 큰 지역에서는 평균평형함수율을 고려하여 목재의 건조를 실시해야 할 것으로 보인다.

ABSTRACT

This research was carried out to investigate equilibrium moisture content (EMC) of wood in outdoor locations in Korea. EMC was calculated using Hailwood-Horrobin equation for 73 different locations in Korea using the 1981 to 2010 climate normal data obtained from the Korea Meteorological Administration (KMA). Daegu showed the lowest values of EMC (11.5), and the highest EMC values (15.8) was found in Heuksando. Considering the season effect, summer (June, July, August) showed the highest values 15.3, followed by autumn (September, October, November) 13.7, winter (December, January, February) 12.2, and spring (February, March, April) 12.0. Monthly EMC showed the lowest values 11.6 in April and July showed the highest EMC values 16.1. The smallest changes in monthly EMC

¹ Date Received July 17, 2014, Date Accepted August 25, 2014

² 경남과학기술대학교 건설환경공과대학 인테리어재료공학과. Department of Interior Materials Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju 660-758, Korea

[†] 교신저자(corresponding author): 나중범(email: jb@gntech.ac.kr)

were found in Jeju island and Heuksando showed the largest values 8.7. A proper wood drying based on average EMC is more required in the regions with larger variation in EMC.

Keywords : equilibrium moisture content, Hailwood-Horrobin equation

1. 서 론

목재의 함수율은 목재 주변의 대기조건과 밀접한 관련을 가지고 있다. 목재가 일정한 대기 조건에 장기간 방치되면 목재로부터 증발되는 수분과 목재로 응축되는 수분의 양이 같아지는 동적평형상태에 도달하게 되는데 이때의 목재함수율을 평형함수율(Equilibrium Moisture Content)이라고 말한다(Forest Products Lab 1987; Hailwood and Horrobin 1946). 흡습성 물질인 목재는 평형함수율에 도달할 때까지 대기 중에 존재하는 수분을 흡착 또는 탈착하게 되는데 이 과정에서 목재의 크기가 변하게 된다. 목재의 수축과 팽윤은 목재 및 목제품에서 발생하는 할렐과 갈라짐 등과 같은 결함을 발생시킨다.

평형함수율에 대한 연구는 대부분 1900년대 초·중반에 걸쳐 수행되었다. 이는 평형함수율이 건조 및 치수안전성과 관련된 목재의 물리적 성질을 이해하는 가장 기본적인 자료를 제공하기 때문이다. 미국임산물연구소는 미국 전역을 기후에 따라 건조한 지역, 습한 지역, 기타의 세 곳으로 분류한 후 각각의 환경에 맞추어 실내 및 실외용 목제품의 적정 함수율을 제시한 바 있다(Simpson 1973). 국내의 경우 평형함수율에 대한 연구는 Jo. *et al.* (1981)에 의해 수행되었는데, 이들은 소나무, 미송, 신갈나무 및 레드라왕을 대상으로 국내 6개 지방(서울, 춘천, 대전, 경주, 진주, 광주)의 평형함수율을 비교하였으며 평형함수율은 지역별·수종별 차이가 있음을 보고한 바 있다. 이 연구에 따르면 평형함수율은 중부지방(서울, 춘천, 대전)이 남부지방(경주, 진주, 광주)보다 크고, 4월에 최저치 8월에 최고치가 관측되었으며, 수종별로는 소나무, 미송, 신갈나무, 레드라왕의 평형함수율이 각각 14.8%, 13.7%, 14.0%, 14.2%였다고 보고하였다.

목재의 평형함수율은 대기 중의 수분을 흡착 혹은

탈착할 수 있는 목재의 특성에 따라 상이하기 때문에 수종에 따른 차이가 존재할 뿐 아니라 같은 수종에서도 차이가 존재한다. 또한 목재의 건조방법, 추출물의 양 등 여러 인자에 의해 영향을 받게 되는데 목재를 이용하는 측면에서 볼 때 이러한 차이를 모두 고려하는 것은 불가능하다(Wangaard 1967). 따라서 대기 중의 상대습도와 온도를 이용하여 예측된 평형함수율을 목재가 그 조건에 방치되었을 경우 도달하게 되는 실제 평형함수율이라고 가정하여 사용하게 된다(Rasmussen 1988). Hailwood-Horrobin 방정식이 평형함수율을 예측하기 위하여 일반적으로 사용된다. 이 방정식은 목재의 물리·화학적 특성을 고려하지 않기 때문에 수축이력현상이나 추출물에 의한 평형함수율의 변화 등을 설명하지는 못하지만 사용이 간편하고 평균적인 평형함수율 값을 제공한다고 간주된다. 미국임산물연구소는 Hailwood-Horrobin 방정식을 사용하여 미국 내 262개 장소와 미국 외 122개 장소에서의 월별 평형함수율을 제시한 바 있다(Simpson 1998).

평형함수율은 목재의 수축과 팽윤의 발생 정도에 대한 기본 정보를 제공한다. 따라서 목재가 사용되는 최종 장소의 평형함수율을 인지할 수 있다면 건조 또는 제조과정 동안에 목재의 함수율을 평형함수율에 도달하도록 건조함에 의하여 수분의 변화에 의해 야기되는 문제점을 해결하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구는 국내 축적된 기상 자료를 활용하여 지역 및 계절별 목재의 평형함수율을 구하고 이들의 변화 경향을 알아보기 위하여 수행되었다.

2. 재료 및 방법

1981년부터 2010년까지의 국내 상대습도와 온도 자료를 기상청 웹사이트에서 다운받았으며 평년값

(30년 평균값)을 사용하여 목재의 평형함수율을 계산하였다. 국내에서는 현재 약 80개 지역에서 기후 자료가 측정되고 있지만 64개 지역에서만 30년 이상의 온도 및 기후자료가 축적되어 있다. 기후와 관련된 자료는 일반적으로 평년값(30년 평균)을 사용하는 것을 고려하여 본 연구에서도 64개 장소에서 관측된 온도 및 상대습도의 평년값을 이용하여 목재평형함수율을 Hailwood-Horrobin 방정식에 의해 계산하였다.

$$EMC = \frac{1800}{W} \left(\frac{Kh}{1-Kh} + \frac{K_1Kh + 2K_1K_2K^2h^2}{1 + K_1Kh + K_1K_2K^2h^2} \right)$$

$$W = 349 + 1.29T + 0.0135T^2$$

$$K = 0.805 + 0.000736T - 0.00000273T^2$$

$$K_1 = 6.27 - 0.00938T - 0.000303T^2$$

$$K_2 = 1.91 + 0.0407T - 0.000293T^2$$

where T is temperature ($^{\circ}\text{C}$), h is relative humidity ($\%/100$), EMC is moisture content ($\%$), and W , K , K_1 , and K_2 are coefficients of an adsorption model developed by Hailwood and Horrobin (1946).

Hailwood-Horrobin 방정식은 -1.1°C (30°F) 이상의 조건에서 실험한 결과를 가지고 만든 경험적 모델이기 때문에 이 공식을 적용할 경우 영하의 날씨를 보이는 겨울의 평형함수율을 적절히 예측할 수 있는지에 대한 의문점이 존재하였다. 그러나 이 문제는 Hedlin (1967)에 의해서 해결되었는데, 그는 -12.2°C 의 온도에서 측정한 평형함수율의 값이 Hailwood-Horrobin 방정식에 의해 외삽된 평형함수율 값과 비슷하다고 보고한 바 있다.

3. 결과 및 고찰

국내 73개 장소에서 30년(1981~2010) 동안 측정된 기상자료와 Hailwood-Horrobin 방정식을 이용하여 계산된 목재의 평형함수율은 Table 1에서 볼 수 있다. 국내 평형함수율의 연평균값은 13.3%였으며

지역별로는 11%에서 16% 범위에 있는 것으로 나타났다. 대구가 11.5%로 가장 낮았으며 흑산도가 15.8로 가장 높은 값을 보여주었다. 대구의 평균 온도와 상대습도는 14.1°C 와 62%였으며 흑산도는 13.4°C , 77%였다. 내륙에서는 부안의 평형함수율이 15%로 가장 높았는데 이 지역의 온도와 상대습도는 12.7°C 와 76%였다. 일반적으로 평형함수율은 온도가 낮고 상대습도가 높은 곳에서 높은 값을 보여준다.

계절별로 살펴보았을 때의 평형함수율은 여름(6월, 7월, 8월)이 15.3%로 가장 높은 값을 보였으며 가을(9월, 10월, 11월) 13.7%, 겨울(12월, 1월, 2월) 12.2%, 봄(2월, 3월, 4월)이 12.0%의 순으로 나타났다. 봄에 평형함수율이 제일 낮은 곳은 대구로 10.3%였으며 가장 높은 곳은 흑산도로 15.3%를 보여주었다. 여름도 봄과 마찬가지로 대구가 13.2%로 가장 낮았으며 흑산도가 19.9%로 가장 높았다. 그러나 가을의 경우 창원이 11.9%로 가장 낮았으며 대관령이 15.5%로 가장 높았고 겨울은 동해가 9.4% 그리고 부안이 15.2%로 각각 최저값과 최고값을 보여주었다.

월별 목재평형함수율을 살펴보면, 2월, 3월, 4월이 각각 11.9%, 11.9%, 11.6%로 평형함수율이 낮게 떨어지는 기간임을 알 수 있으며, 그 다음으로 1월, 5월, 11월, 12월이 각각 12.3%, 12.6%, 12.9%, 12.5%를 보여주었다. 10월이 13.5%, 6월과 9월이 각각 14.1%와 14.8%의 평형함수율을 보이는 것으로 나타났다. 가장 높은 달은 7월로 16.1%였으며 8월이 그 다음으로 15.6%의 값을 보여준다. Jo *et al.* (1982)은 국내 평형함수율이 4월에 가장 낮으며 8월에 가장 높은 것으로 보고한 바 있다. 다섯 개 지역에서 4년에 걸친 실험을 통하여 평형함수율을 계산한 것과 7월과 8월의 평형함수율 차가 0.5%인 것을 고려하면 본 연구의 결과와 큰 차이는 없는 것으로 판단된다.

지역에 따른 월별 평형함수율을 살펴보면 7월의 경우 흑산도의 평형함수율이 21.6%로 최대값을 나타내었으며 대구가 13.9%로 최소값을 보여주었다. 월별 평형함수율이 최소로 나오는 곳은 12월의 동해로 9.0%의 값을 보여주었다. 지역에 따른 월별 평형함수율의 편차는 제주와 부안이 3.0%로 가장 작은 값을 보였으며 흑산도가 8.7%, 내륙지방에서는 부산

나중범

Table 1. The equilibrium moisture content (%) of wood calculated from climate data for the period 1981-2000 in Korea

Location	EMC (%)												Avg
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
Seoul	11.3	10.9	10.9	10.5	11.6	12.6	15.3	14.4	12.9	11.9	11.7	11.5	12.1
Baengnyeongdo	12.1	11.9	12.3	12.3	13.2	15.3	18.2	16.4	14.1	12.7	12.0	12.1	13.6
Dongducheon	12.0	11.1	10.7	10.4	11.9	13.0	15.9	15.2	14.3	13.3	12.2	11.8	12.7
Incheon	11.6	11.7	12.0	12.1	13.3	14.4	16.7	15.5	13.9	12.7	12.1	11.7	13.1
Suwon	12.4	12.2	12.2	11.7	12.7	13.6	15.9	15.2	14.3	13.6	13.2	12.7	13.3
Ganghwa	12.6	11.9	11.9	11.8	13.2	14.5	16.9	15.9	14.4	13.3	13.1	12.9	13.5
Yangpyeong	13.2	12.2	11.6	10.9	12.2	13.3	15.7	15.9	15.4	15.0	14.1	13.7	13.6
Icheon	12.2	11.3	10.9	10.3	11.5	12.6	15.0	14.8	14.3	13.5	12.8	12.7	12.6
Cheorwon	13.3	12.4	11.9	11.0	12.2	13.6	16.1	15.8	15.0	14.2	13.8	13.7	13.5
Chuncheon	13.4	12.5	11.9	11.1	12.4	13.5	15.7	15.8	15.4	14.8	14.3	14.0	13.7
Wonju	12.8	12.2	11.6	10.9	11.9	13.1	15.3	15.2	14.8	14.2	13.7	13.4	13.2
Yeongwol	12.1	11.5	11.1	10.3	11.9	13.2	15.8	15.6	15.1	14.2	13.1	12.8	13.1
Inje	12.9	12.2	11.7	10.8	12.3	13.6	15.6	15.6	15.2	14.1	13.4	13.2	13.4
Hongcheon	13.4	12.6	11.8	10.8	11.9	12.9	15.0	14.9	14.7	14.1	13.7	13.8	13.3
Gangneung	9.4	9.9	10.7	10.1	11.3	13.5	14.8	15.2	14.2	11.6	10.1	9.2	11.7
Sokcho	9.7	10.4	11.5	11.5	13.0	15.6	16.7	16.8	15.2	12.2	10.5	9.4	12.7
Daegwallyeong	12.8	12.8	12.9	11.5	13.0	15.9	18.4	19.0	18.1	14.9	13.5	12.9	14.6
Donghae	9.4	9.9	10.8	11.0	13.0	15.4	16.8	16.8	15.7	12.6	10.6	9.0	12.6
Ulleungdo	13.6	13.4	13.5	13.2	13.8	16.2	18.3	17.8	16.2	13.9	13.1	13.2	14.7
Taebaek	11.6	11.4	11.7	10.4	11.4	13.7	15.5	15.9	15.8	13.5	12.2	11.4	12.9
Chungju	14.3	13.3	12.5	11.3	11.9	13.2	15.0	15.3	15.5	15.1	14.9	14.9	13.9
Chongju	12.9	12.0	11.4	10.6	11.4	12.6	14.6	14.5	14.2	13.4	13.3	13.3	12.9
Chupungnyeong	11.7	11.3	11.0	10.4	11.7	13.5	16.1	16.0	15.4	13.6	12.7	12.1	13.0
Jecheon	13.4	12.7	12.1	10.9	11.9	13.0	15.4	14.9	14.6	14.1	13.8	13.8	13.4
Boeun	13.2	12.6	12.0	11.3	12.2	13.5	15.0	15.3	15.1	14.4	13.8	13.6	13.5
Seosan	13.9	13.5	13.2	12.8	13.7	14.7	17.1	16.5	15.5	14.6	14.4	14.3	14.5
Daejeon	12.3	11.2	10.6	10.3	11.5	12.7	15.0	15.0	14.3	13.4	12.8	12.7	12.7
Cheonan	14.1	13.1	12.5	11.6	12.3	13.7	15.6	15.4	14.9	14.1	14.3	14.3	13.8
Boryeong	13.8	13.6	13.2	12.8	13.8	14.9	16.9	15.8	14.8	13.9	13.6	13.8	14.2
Buyeo	14.3	13.3	12.8	12.3	13.1	14.2	16.2	15.7	15.1	14.6	14.5	14.9	14.3
Geumsan	14.0	13.1	12.4	11.5	12.3	13.4	14.9	14.9	14.8	14.4	14.3	14.5	13.7
Gunsan	13.8	13.7	13.7	13.8	14.5	15.8	17.2	16.6	15.3	14.2	13.9	14.0	14.7
Jeonju	13.2	12.7	12.1	11.3	12.1	13.4	15.0	14.7	14.1	13.4	13.2	13.3	13.2
Buan	15.4	14.7	14.1	13.7	14.3	15.5	16.7	16.0	15.4	14.5	14.5	15.4	15.0
Imsil	14.9	13.8	13.0	12.0	12.7	14.1	15.7	15.7	15.1	14.5	14.6	15.0	14.3
Jeongeup	14.7	13.7	12.6	11.7	12.2	13.4	14.9	14.7	14.6	13.8	14.0	14.7	13.8
Namwon	14.1	12.9	12.3	11.6	12.4	13.7	15.5	15.4	14.6	14.4	14.4	14.7	13.8

Table 1. Continued

Location	EMC (%)												Avg
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
Jangsu	14.3	13.7	13.0	12.1	12.9	14.6	16.3	16.4	16.0	15.1	14.8	14.7	14.5
Gwangju	13.0	12.4	11.9	11.6	12.4	13.8	15.8	15.1	14.2	12.9	13.0	13.2	13.3
Mokpo	13.2	13.3	13.0	12.9	13.9	15.2	17.2	15.9	14.6	13.1	12.9	13.2	14.0
Heuksando	13.2	13.7	14.2	15.2	16.6	18.8	21.6	19.3	16.9	14.0	13.1	12.9	15.8
Wando	12.8	12.7	12.6	12.8	14.0	16.0	18.1	16.6	14.8	13.1	13.1	13.0	14.1
Yeosu	10.3	10.5	11.1	11.8	13.1	15.2	17.6	15.7	13.7	11.8	11.2	10.7	12.7
Juam	13.2	12.4	12.0	12.0	12.8	13.8	15.3	15.3	15.1	14.4	14.1	13.8	13.7
Jangheung	13.1	12.8	12.7	12.6	13.5	14.6	16.6	15.9	15.1	13.8	13.6	13.5	14.0
Haenam	13.7	13.4	13.3	13.0	13.8	14.8	16.7	16.0	15.1	13.8	13.8	14.0	14.3
Goheung	12.4	12.2	12.1	12.0	12.8	14.3	15.8	14.9	14.2	13.1	13.1	12.8	13.3
Uljin	9.8	10.6	11.7	11.9	13.4	16.1	17.2	17.3	16.1	13.2	11.4	9.9	13.2
Andong	11.7	11.4	11.3	10.6	11.7	13.4	15.6	15.4	15.3	14.2	13.2	12.2	13.0
Pohang	9.4	9.8	10.7	10.8	12.0	14.1	15.4	15.4	14.7	12.2	10.8	9.7	13.46
Daegu	10.3	10.1	10.2	9.9	10.8	12.0	13.9	13.6	13.4	12.0	11.3	10.7	11.5
Bonghwa	12.5	12.2	12.1	11.2	12.2	13.4	15.4	15.2	14.9	14.2	13.5	12.9	13.3
Yeongju	11.6	11.1	11.1	10.4	11.5	13.0	15.3	15.2	14.7	13.4	12.7	12.1	12.7
Mungyeong	10.8	10.6	10.6	10.0	11.3	12.9	15.7	15.4	14.6	13.0	12.0	11.3	12.4
Yeongdeok	10.0	10.6	11.6	11.3	12.1	14.1	15.6	15.8	15.3	13.0	11.3	10.1	12.6
Uiseong	12.7	12.2	11.9	11.0	11.6	12.5	14.4	14.5	14.7	14.2	13.9	13.4	13.1
Gumi	11.6	11.2	10.9	10.3	11.2	12.5	14.5	14.5	14.3	13.2	12.7	12.2	12.4
Yeongcheon	10.9	11.0	11.2	10.6	11.5	12.8	14.3	14.2	14.1	12.9	12.3	11.6	12.3
Busan	9.2	9.8	10.8	11.7	13.2	15.2	17.5	15.7	14.1	11.9	10.7	9.5	12.4
Ulsan	9.5	9.8	10.8	11.2	12.3	13.9	15.4	15.0	14.6	12.6	11.2	9.9	12.2
Changwon	9.7	9.8	10.7	11.3	12.6	14.5	15.9	14.6	13.2	11.5	10.9	10.1	12.1
Tongyeong	10.1	10.3	11.0	12.2	13.8	15.6	17.7	16.0	14.2	12.5	11.6	10.4	13.0
Jinju	11.8	11.7	11.9	12.3	13.3	14.7	16.5	16.1	15.4	14.4	13.7	12.6	13.7
Geochang	12.3	11.9	11.7	11.4	12.4	13.6	15.6	15.6	15.3	14.1	13.3	12.8	13.3
Hapcheon	12.0	11.6	11.3	11.0	11.7	12.9	14.6	14.6	14.6	13.8	13.2	12.5	12.8
Miryang	11.5	11.2	11.3	11.4	12.3	13.3	15.3	14.9	14.5	13.6	13.0	12.3	12.9
Sancheong	11.0	11.1	11.1	11.0	11.9	13.4	15.3	15.2	14.8	13.3	12.4	11.5	12.7
Geoje	9.8	9.8	10.4	11.0	12.4	14.0	15.9	14.8	13.8	12.3	11.4	10.2	12.2
Namhae	11.0	11.0	11.2	11.5	12.4	13.8	15.6	15.0	14.0	12.2	12.0	11.3	12.6
Jeju	12.4	12.3	12.3	12.5	13.3	14.9	15.2	14.6	14.0	12.5	12.2	12.3	13.2
Gosan	12.8	13.1	13.3	14.2	16.0	18.0	19.4	16.9	15.0	13.0	12.7	12.5	14.7
Seogwipo	11.9	11.7	11.7	12.1	13.2	15.4	17.4	15.4	13.6	11.8	11.8	11.7	13.1
Seongsan	12.9	12.4	12.3	12.6	13.6	16.4	17.5	16.0	14.4	12.8	12.8	12.9	13.9
Avg.	12.3	11.9	11.9	11.6	12.6	14.1	16.1	15.6	14.8	13.5	12.9	12.5	13.3

이 8.3%의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 목재의 평형함수율은 목재의 수축 및 팽윤과 관련이 있다는 것을 고려할 때 특히 월별 평형함수율의 편차가 큰 지역에서는 평균 평형함수율을 목표함수율로 하여 목재를 건조하는 것이 바람직하다고 하겠다. 비록 계산된 평형함수율이 예측된 값이기 때문에 실제 사용되는 목재의 평형함수율이라고 말할 수는 없지만, 본 논문에서 제시된 평형함수율은 목재의 건조와 관련된 일반적인 지침을 제공할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 국내 73개 지역 및 계절 변화에 따른 목재평형함수율을 조사하여 목재의 수축 팽창과 관련된 기초자료를 제공하기 위해 수행되었으며 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

1. 국내 목재평형함수율의 전체 평균값은 13.3%로 나타났다.
2. 계절별로 살펴보았을 때 여름이 15.3으로 가장 높았으며 가을 13.7, 겨울 12.2, 봄 12.0 순으로 낮아지는 것을 알 수 있다.
3. 월별 목재평형함수율은 4월이 11.6으로 가장 낮았으며 7월이 16.1로 가장 높은 평형함수율을 보여주었다.
4. 지역에 따른 월별 평형함수율의 편차는 제주가 3.0으로 가장 작았으며 흑산도가 8.7로 가장 큰 것으로 나타났다.

사 사

이 논문은 2013년도 경남과학기술대학교 기성회 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

REFERENCES

- Forest Products Laboratory. 1987. Wood handbook: Wood as an engineering material. Agriculture Handbook 72. (Rev.) Washington, DC: U. S. Department of Agriculture. 466p.
- Hedlin, C.P. 1967. Sorption isotherms of twelve woods at subfreezing temperatures. Forest Products Journal 17 (12): 43-48.
- Hailwood, A.J., Horrobin, S. 1946. Absorption of water by polymers: analysis in terms of a simple model. Transaction of the Faraday Society 42B: 84-102.
- Jo, J.M., Kang, S.G., Shim, C.S., Jung, H.S. 1982. Annual Equilibrium Moisture Content of Wood in Korea. Journal of The Korean Wood Science and Technology 10 (2): 3-11.
- Rasmussen, E.F. 1988. Dry Kiln Operators Manual. Hardwood Research Council. Forest Products Laboratory, U.S. Department of Agriculture., ed.
- Simpson, W.T. 1973. Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models. Wood and Fiber 5 (1): 41-49.
- Simpson, W.T. 1998. Equilibrium moisture content of wood in outdoor locations in the United States and Worldwide. Research Note FPL-RN-0268, Forest Products Laboratory, U. S. Department of Agriculture.
- Wangaard, F.F., Granados, L.A. 1967. The effect of extractives on water-vapor sorption by wood. Wood Science and Technology 1: 253-277.