

# An Experimental Study of the Variation of the Moisture Content of Plywood and the Change of Thermal Conductivity of Plywood According to its Moisture Content

Jin-Sung Lee\*, Kyung-Su Kim<sup>ID</sup>\*, Jung-Kyoo Kang\*\* and Chang-hyuck Yoo\*

\*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, INHA University, Incheon, Korea

\*\*Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co. Ltd, Geoje, Korea

## 습도 조건에 따른 합판의 함수율 변화와 함수율에 따른 합판의 열전도율 변화에 대한 실험적 연구

이진성\* · 김경수<sup>ID</sup>\* · 강중규\*\* · 유창혁\*

\*인하대학교 조선해양공학과

\*\*대우조선해양

**KEY WORDS:** Plywood 합판, Moisture content 함수율, Thermal conductivity 열전도율, LNG cargo containment system LNG화물창 시스템, Relative humidity 상대 습도

**ABSTRACT:** Plywood is one of the important materials in LNG cargo containment systems, and, due to the characteristics of the wood, its properties vary greatly depending on the humidity conditions in the storage facility. Due to the distribution environment of plywood, there is a high probability of long-term exposure to the domestic seasonal environment. Considering an environment in which the humidity changes greatly according to the seasons in Korea and the characteristics of the wood, it is necessary to acquire data on changes in the characteristics of the plywood for accurate quality control. In this study, the moisture content of plywood was determined experimentally to reflect the seasonal environmental conditions of shipyards in Korea. A noticeable change in the thermal conductivity was confirmed experimentally.

### 1. 서 론

목재는 강도대비 낮은 열전도율과 가공 편이성 때문에 LNG(Liquefied natural gas) 화물창 시스템에서 중요한 소재로 사용된다. 특히 GTT(Gaztransport & Tchnigaz)의 No.96 LNG 화물창 시스템의 경우 단열재를 내부에 수용하고 있는 상자의 형태로 목재를 사용하며 여기에서 목재는 단열재이자 강도부재로서 중요한 역할을 한다. 그러나 목재의 경우 보관이나 사용 환경에 따라 형상 변형과 함께 강도 및 단열능력이 쉽게 변화하여 품질 관리에 큰 어려움이 있다. LNG 화물창 시스템의 경우 다양한 목재 형태 중에서도 변형 저항성이 뛰어난 합판(Plywood)을 사용하지만 합판의 경우에도 온도와 습도에 따른 기계적, 열적 성능 변화를 완전히 피할 수 없다.

No.96 LNG 화물창의 경우 북유럽산 자작나무 합판을 주로 사용한다(Lloyd's Register, 2017). 이러한 이유로 국내 조선소에서는 대량의 합판의 장기간 보관이 불가피하다. 또한 국내 조선소의 계절별 상대습도가 여름 장마철에는 70% 이상으로 매우 높고 겨울철에는 약 20~30%로 매우 낮기 때문에 이러한 환경 조건에 따른 합판의 성능 변화에 대한 자료 확보가 요구된다(KMA, 2017).

목재는 오랜 기간 다양한 분야에서 사용되어왔기 때문에 관련된 연구가 많이 있다. 특히 목재의 큰 단점 중 하나인 온습도 변화에 따른 목재의 재료 특성 변화에 대한 연구 사례가 많다. Gerhards(1982)은 온도와 함수율 변화에 따른 목재의 압축 강도와 같은 기계적 특성 변화에 대해 연구하였다. Simpson(1982)은 상대 습도 조건에 따른 목재의 함수율 변화를 확인하였다. 합판

Received 31 January 2018, revised 2 August 2018, accepted 18 October 2018

Corresponding author Kyung-Su Kim: +82-032-860-7341, ksukim@inha.ac.kr ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4414-0745>

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

의 함수율에 따른 치수 변화에 대한 연구 사례도 확인할 수 있었다(APA, 2016). 건축분야의 경우 목재의 단열성능이 중요한 지표인 만큼 관련된 연구가 다수 확인할 수 있었다. MacLean and Wis(1941)은 다양한 목재들의 상온에서의 단열성능을 측정하였으며 Steinhagen(1977)은 목재의 함수율에 따른 비열과 열전도율과 같은 열 물성치를 상온 환경 조건에서 정리 하였다.

위의 연구 사례들과 같이 목재에 대한 대부분의 연구들이 상온과 저온에서의 원목(Timber)을 대상으로 하고 있어 극저온 환경에서 운용되며 합판이 주 재료인 LNG 화물창 시스템에는 적합하지 않다. Kim et al.(2017)의 연구와 같이 No.96 화물창 시스템에 사용되는 합판의 극저온 기계 강도를 실험적으로 평가한 사례도 있으나 목재의 함수율이나 극저온에서의 단열 성능에 대한 연구는 찾아보기 어렵다. 계절에 따라 습도의 변화가 매우 큰 국내 조선소의 계절적 환경과 습도 조건에 따라 재료 특성이 크게 변화하는 목재의 특성상 이와 관련된 데이터의 확보가 필수적이지만 관련된 연구가 부족하다. 환경 조건에 따른 정확한 목재의 열적 특성이 아닌 잘못된 열전도율을 바탕으로한 단열성능 예측은 실제와는 다른 결과를 얻을 가능성이 높다.

본 연구에서는 No.96 LNG 화물창 시스템에 사용되는 합판을 대상으로 하여 보관 습도 조건에 따른 함수율의 변화를 계측하였다. 또한 일정 습도 조건에서 충분한 시간동안 보관된 합판을 대상으로 극저온(-160°C), 저온(-80°C) 및 상온에서 열전도율을 측정하고 함수율에 따른 열전도율 변화를 분석하였다. 이러한 습도 조건에 따른 합판의 함수율 변화와 그때의 열전도율 데이터 확보를 통해 향후 BOR(Boil-off rate) 예측 관련 연구와 기존 LNG화물창 개선 연구의 기초 자료로 사용하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시험편

합판은 Fig. 1과 같이 여러장의 단판(Veneer)을 섬유방향이 서로 직교하게 배치하고 수지로 접착 및 가열 압착하는 방식으로 제작된다. 섬유 방향이 직교하게 결합되어 있어 원목재(Timber)에 비해 변형이 적고 사용한 수지 종류에 따라 습기에 강한 특성이 있다. 그러나 원목(Timber)에 비해 상대적으로 습도의 영향이 적을뿐 합판의 경우에도 습도의 영향을 완전히 무시할 수는 없다. 또한 단판의 재료가 되는 수종에 따라 그 특성이 판이

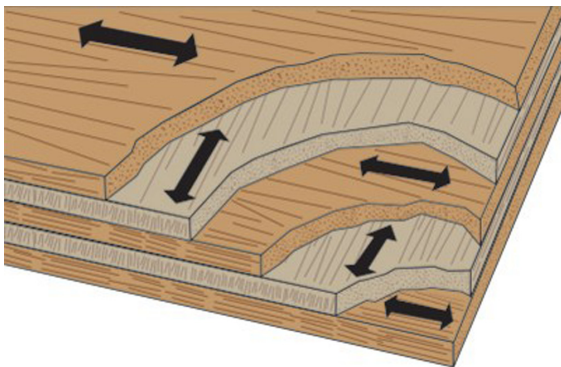


Fig. 1 Schematic diagram of plywood

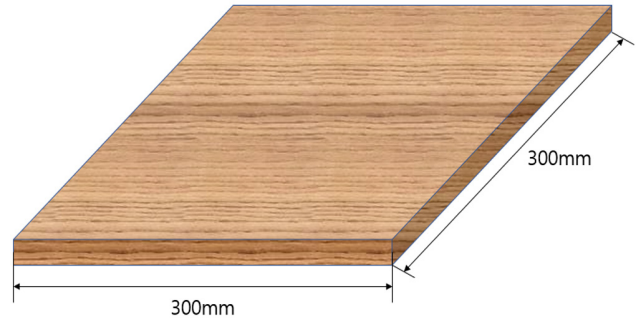


Fig. 2 Plywood specimen

하게 달라진다. 본 연구에서는 No.96 LNG 화물창 시스템에 사용되는 북유럽산 자작나무와 페놀계 수지로 제작한 두께 9mm (9t)와 12mm(12t) 두 종류의 합판을 시험편으로 사용하였으며 열전도율 측정을 위해 Fig. 2와 같이 300mm × 300mm(너비, 폭) 크기로 가공 하였다.

### 2.2 실험장비 및 실험변수

실험 케이스를 간략하게 하기 위하여 온도 변수는 상온(25°C)로 고정하였으며 상대 습도는 여름과 겨울의 기상청 관측 자료를 바탕으로 상대습도(Relative humidity, RH) 30%와 70% 총 두 조건으로 설정 하였다. 일정한 온도와 습도에서 합판을 보관하기 위하여 항온항습장치에 시험편을 보관 하였으며 비파괴식 목재 수분 측정장비(Testo616, Germany)를 사용하여 24시간 간격으로 함수율을 측정 및 기록하였다. 측정된 함수율의 변화가 ±0.1% 이하로 일정해졌을때 보호열판법 열전도율 측정장비(GHP 456 Titan, Germany)를 사용하여 극저온(-160°C), 저온(-80°C) 및 상온(20°C)에서 열전도율을 측정하였으며 이들 실험 변수를 Table 1에 정리하였다. 또한 실험에 사용한 주요한 장비들은 Fig. 3과 같다.

Table 1 Independent variables

Temperature [°C]	Thickness [mm]	Humidity [RH, %]	Conductivity measurement point [°C]
25	9, 12	30, 70	-160, -80, 20



(a) Testo616(Testo, Germany)



(b) Thermohygrostat



(c) GHP456 Titan(Netzsch, Germany)

Fig. 3 Experimental apparatus

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 상대습도에 따른 합판의 함수율 변화

특정 상대 습도 조건에서 보관한 합판의 함수율 측정결과를 Fig. 4과 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 6은 각각의 습도 조건과 합판의 두께별로 평균값을 계산한 것이다. 약 30% 상대습도인 실험실 환경에서 일정기간 시편을 보관한 후 실험을 시작하였기 때문에 상대습도 30% 실험의 경우 시간에 따른 함수율의 변화가 거의 나타나지 않았다. 상대 습도 70% 조건의 경우 함수율이

안정화 하는데까지 약 200시간 이상의 시간이 소요되었다. 각 실험 케이스별 최종 함수율은 Table 2와 같다.

Table 2 Final moisture content of each case

Humidity [RH, %]	Thickness [mm]	Moisture content [%]
30	9	8.2
	12	8.7
70	9	16.1
	12	15.5

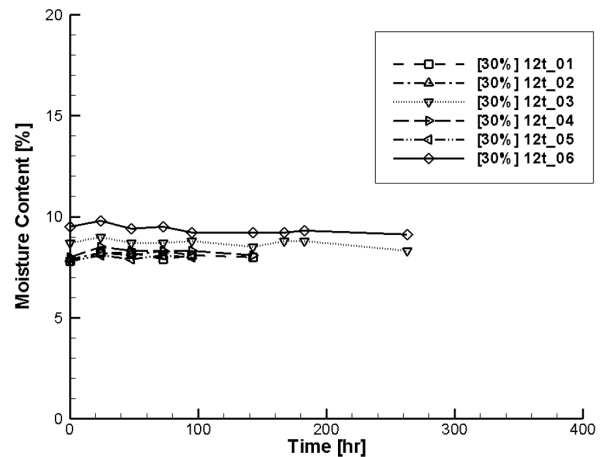
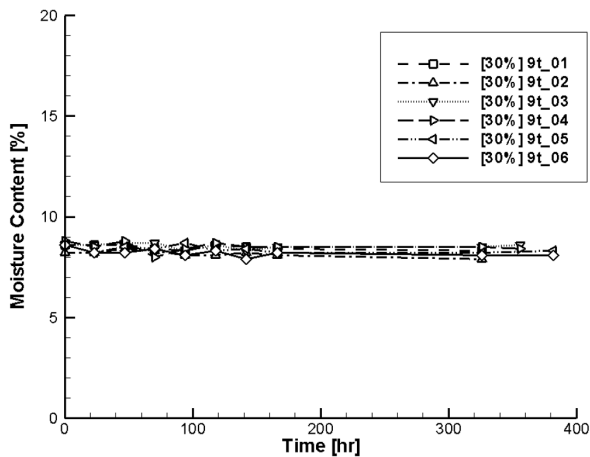


Fig. 4 Moisture content according to preprocessing time at 30% (RH)

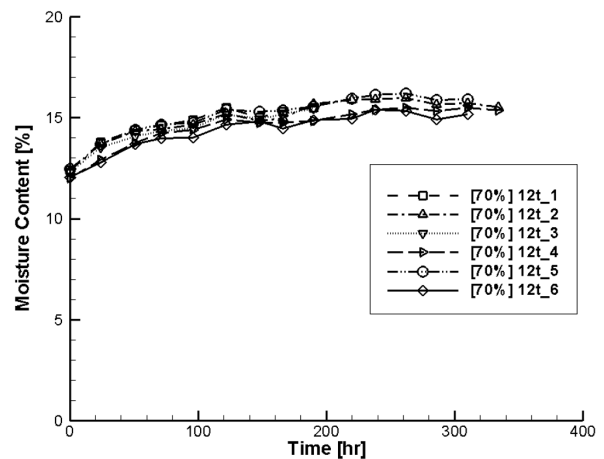
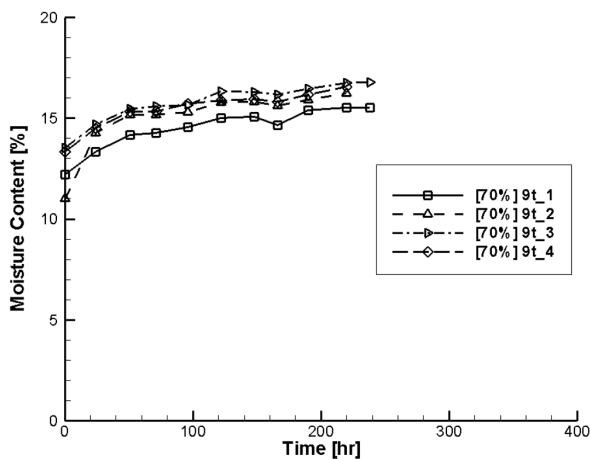


Fig. 5 Moisture content according to preprocessing time at 70% (RH)

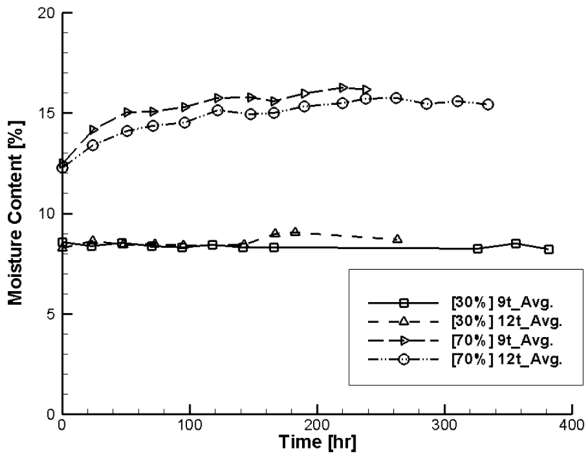


Fig. 6 Average value of moisture content according to preprocessing time

3.2 함수율 값에 따른 열전도율

각 케이스별 평균 열전도율 값을 아래 Fig. 7에 나타내었으며 같은 상대 습도 조건일 때 두께 9t와 12t의 열전도율 차이가 극저온(-160°C)에서는 약 7% 만큼 12t의 열전도율이 더 높게 나타났으나 상온(20°C)에서는 1%이하로 그 차이가 작았다. 각각의 실험 케이스에서는 실험 횟수 별로 함수율(Moisture content, MC)의 차이가 0.5%이하로 매우 작았으며 그 작은 차이가 확인한 열전도율 차이로 나타나지는 않는 것으로 확인하였다.

Table 3 The thermal conductivity of plywood (9t)

Temperature [°C]	Thermal conductivity [W/(m·K)]		Difference [%]
	RH30%	RH70%	
-160	0.0564	0.0594	5.32
-80	0.0867	0.0929	7.07
20	0.1209	0.1300	7.56

Table 4 The thermal conductivity of plywood (12t)

Temperature [°C]	Thermal Conductivity [W/(m·K)]		Difference [%]
	RH30%	RH70%	
-160	0.0606	0.0638	5.34
-80	0.0916	0.0972	6.12
20	0.1228	0.1314	7.03%

Fig. 8 그리고 Table 3과 Table 4는 측정 온도별로 전처리 조건에 따른 열전도율 결과를 비교한 것이다. 함수율 증가에 따라 열전도율이 증가하는 것을 확인하였다. 상대습도 30% 조건 대비 상대습도 70% 조건에서의 열전도율 증가율이 극저온에서는 약5% 상온에서는 7%로 상온에서 더 높은 증가율을 가지는 것을 알 수 있다.

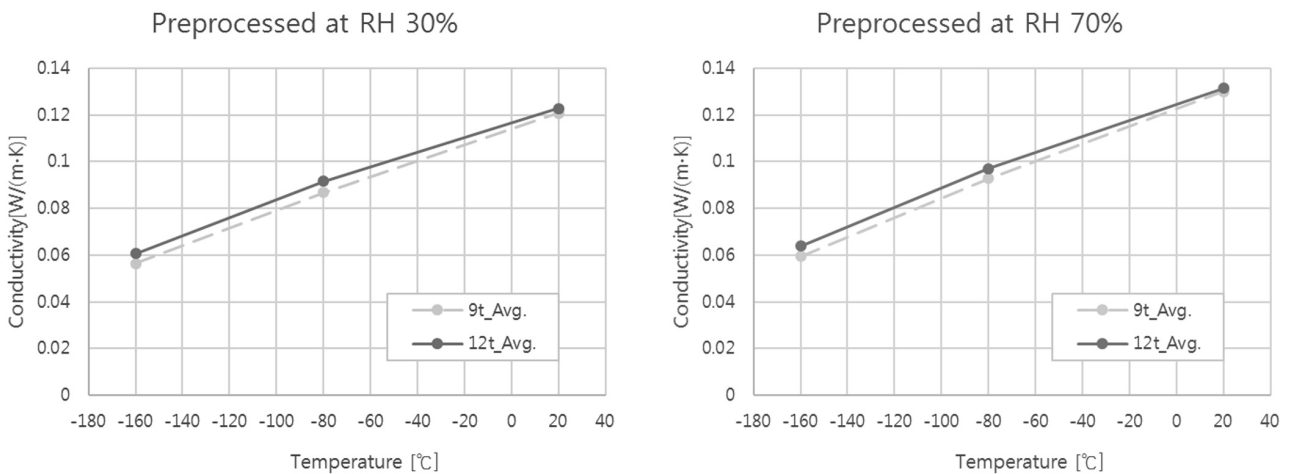


Fig. 7 Thermal conductivity of preprocessed plywood

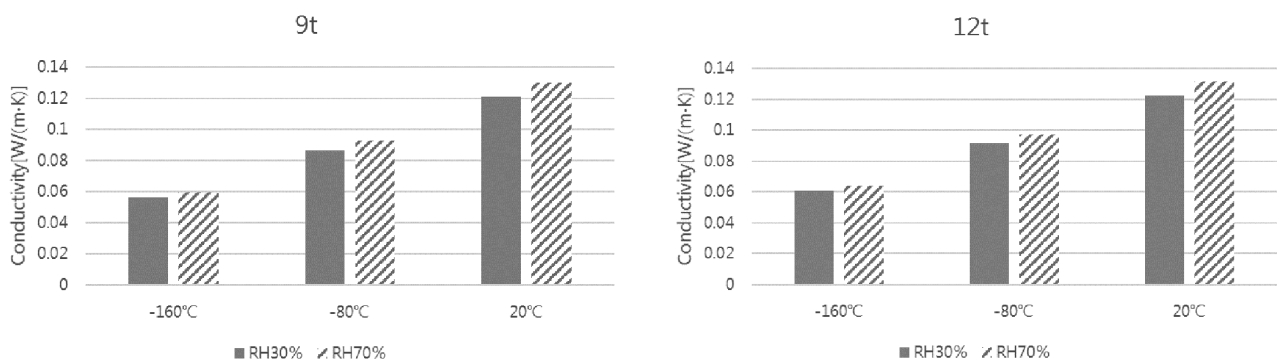


Fig. 8 The change of thermal conductivity according to humidity

## 4. 결 론

## 후 기

본 연구에서는 항온항습장치를 사용하여 합판을 특정 온도 및 습도 조건에서 전처리를 하고 보관 시간에 따른 함수율 변화를 확인하였다. 또한 보호열판법 열전도율 측정장비를 사용하여 전처리가 끝난 합판의 열전도율을 측정하고 합판의 함수율에 따른 열전도율 데이터를 확보하였으며 그 실험 결과를 아래와 같이 정리하였다.

(1) 상대습도 30% 조건에서는 합판의 함수율이 약 8.5%로 형성되는 것을 확인하였으며 상대습도 70% 조건에서는 약 15.6%에서 형성되는 것을 확인하였다. 방습 특성을 가진 페놀계 수지를 사용한 합판을 대상으로 했음에도 불구하고 보관 환경에 따라 목재 내의 수분이 약 2배가량 차이가 나는 것은 주목할만 하다.

(2) 함수율 변화에 따른 열전도율의 유의미한 변화를 확인할 수 있었다. 함수율 증가에 따른 열전도율 증가분은 극저온에서는 약 5.3% 상온에서는 약 7%로 확인 되었으며 극저온에서보다 상온에서 함수율이 열전도율에 미치는 영향이 더 큰것을 확인 하였다.

(3) 두께 차이에 의해 열전도율의 차이가 있었으나 각각의 두께별로 함수율 증가에 따른 열전도율 증가분은 9t와 12t 모두 유사하였다.

본 연구를 통해 합판의 보관 습도 조건에 의한 열전도율에 유의미한 변화가 있는 것을 확인 하였으며 LNG 화물창 시스템의 정확한 품질 관리를 위해서는 습도 관리의 중요성을 인지할 수 있었다. 또한 합판의 보관 습도 조건에 따른 열전도율 변화에 대한 기초적인 데이터를 확보할 수 있었다. 그리고 합판의 두께에 따라 극저온 환경에서 열전도율 값의 차이가 있는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 No.96 LNG 화물창 시스템에서 주로 사용하는 9t와 12t 두 종류의 합판을 실험하였으나 실제 화물창에는 다른 두께의 합판도 사용된다. 따라서 다양한 두께의 합판에 대한 추가적인 실험이 필요하다. 또한, 실험 케이스의 간략화를 위하여 전처리 온도를 모두 동일하게 25°C로 설정하여 실험을 진행하였으며 실제 합판의 함수율에 영향을 주는 대기중 수분 즉 절대 습도 값은 온도에 따라 달라지기 때문에 더욱 정확한 데이터 확보를 위하여 다른 온도와 추가 습도 조건에서의 연구가 더 필요할 것으로 생각된다.

본 연구는 대우조선해양(주)의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

- American Plywood Association(APA), 2016. The Engineered Wood Association, Moisture-Related Dimensional Stability. [Online] (Updated May 2016) Available at: <<http://www.apawood.org>> [Accessed Dec. 2017].
- Gerhards, C.C., 1982. Effect of Moisture Content and Temperature on the Mechanical Properties of Wood:an Analysis of Immediate Effects. *Wood and Fiber*, 14(1), 4-36.
- Kim, J.H., Park, D.H., Choi, S.W., Lee, J.M., 2017. Cryogenic Mechanical Characteristics of Laminated Plywood for LNG Carrier Insulation System. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 31(3), 241-247.
- Korea Meteorological Administration(KMA), 2017. Weather Data Release Portal. [Online] Available at: <<http://data.kma.go.kr>> [Accessed 20 Dec. 2017].
- Lloyd's Register, 2017. List of Lloyd's Register Approved Material/Components for GTT NO96 Membrane Containment system. [Online] (Updated April 2017) Available at: <<http://www.lr.org>> [Accessed Dec. 2017].
- MacLean, J.D., Wis, M., 1941. Thermal Conductivity of Wood. *Heating Piping & Air Conditioning*, 13(6), 380-391.
- Simpson, W.T., 1982. Importance of Relative Humidity and Temperature Control in Conditioning Wood Products. *Wood and Fiber*, 14(2), 94-103.
- Steinhagen, H.P., 1977. Thermal Conductive Properties of Woods. *USDA Foreste Service Forest Products Laboratory*, 1-10.