

木製 프러쉬 문의 함수율 변동에 따른 틀어짐과 좌굴 예측모델 (I) :
예측모델과 실측치 비교^{*1}

강 옥^{*2} · 정 희 석^{*2}

**Warping and Buckling Prediction Model of Wooden
Hollow Core Flush Door due to Moisture Content
Change (I) : Comparison of Prediction Model with
Experimental Results^{*1}**

Wook Kang^{*2} · Hee-Suk Jung^{*2}

ABSTRACT

Wooden hollow core flush door is one of the main products of furniture manufacturing and woodworking industries. Warping and buckling of the door is serious problems in service. It has been reported that warping is caused by differences of physical and mechanical properties of face and back of skin panel for the door. This study focused on the prediction of warping and buckling phenomena of the flush door using numerical models. Predictions from the models were also compared with the experimental results obtained from the doors with plywood and hardboard skin panels under various environmental conditions.

Three elastic constitutive models, so called elastic beam model, plate model and plate-buckling model, were employed to predict warping and buckling of the doors. It was observed that warping was more pronounced in low humidity condition than in high humidity condition. The plate model considering Poisson's effect was reliable to predict warping more closely than elastic beam model in low humidity condition. The plate-buckling model, however, was the best in the fitting of predictions with the experimental results under high humidity condition because buckling was developed in face and back of skin panel at that condition.

Keywords : warping, buckling, wooden hollow core flush door, elastic constitutive model

*1 접수 1999년 4월 8일. Received April. 8, 1999

*2 서울대학교 농업생명과학대학 College of Agriculture and Life Science, Seoul National University, Suwon 441-744 Korea

- 요약 -

목재 hollow core 형태의 프러쉬문은 가구과 목공품 산업에서 주요 제품으로 사용중 틀어짐과 좌굴은 매우 중요한 문제이다. 틀어짐은 도아 표면재 간의 물리적 및 기계적 성질의 차이에 기인된다고 알려져 있다. 본 연구는 수치적 모델을 사용해 틀어짐과 좌굴을 예측하는데 그 목적이 있다. 여러 환경조건에서 경질섬유판과 합판으로 만들어진 프러쉬 문에 대한 각 모델들과 실측치간의 비교를 하였다.

문의 틀어짐과 좌굴을 예측하기 위해 3가지 연속체 모델, 즉 보, 판상 및 판상-좌굴 모델이 채택되었다. 틀어짐은 고습에서보다 저습에서 현저하게 훨씬 현저하게 발생되었으며, 포아송 비를 고려한 판상 모델은 저습에서 보 모델보다 더 정확하게 틀어짐을 예측할 수 있었다. 그러나 고습에서 좌굴이 문의 표면재에 발생하기 때문에 판상-좌굴 모델이 모든 시험범위에서 가장 적절하였다.

1. 서 론

목공품과 가구 제조공정에 있어서 매우 다루기 어려운 제품불량 중 하나가 주택이나 가구 장동 등 비교적 치수가 큰 문의 틀어짐(warping) 현상이다. 왜냐하면 일단 발생되면 보수가 어려우며, 그 불량원인을 명확히 구명하기 어렵기 때문이다.

국내외에서 생산되고 있는 문의 종류는 중층이 심재로 완전히 채워지지 않은 hollow core 문과 심재로 완전히 채워진 solid core 문으로 구별될 수 있다. hollow core 문의 심재에는 보통 목재, 파티클보드, 중밀도섬유판 등이 사용되며 solid core 문의 심재에는 보통 파티클보드와 중밀도섬유판이 사용되고 있다. hollow core 형태 문의 표면재로서 보통 합판이나 경질섬유판이 사용되며 주택용 문, 가구용 문 및 선반류 등에 대부분 적용되고, solid core 문의 표면재는 LPL(low pressure laminate), HPL(high pressure laminate), 도장 화장종이 등이 사용되는데 가구용 문에 대부분 적용되고 있다.

주택과 장롱 문의 경우 매년 생산되는 양에 대한 정확한 통계는 없지만 연간 40만호의 아파트가 신축되고 40만 세트의 장롱이 제작된다 가정하면, 아파트당 5짝의 문이 설치되고 장롱 1세트당 6짝의 문이 설치되므로 연간 약 440만짝의 문이 생산된다고 할 수 있는데, 틀어짐 불량이 일정기간 생산된 제품의 전체 로트에 발생하는 경우도 있고 년중 발생되므로 손실 비용규모가 크다. 따라서 틀어짐 원인에 대한 해석방법을 개발하여 그 영향인자들이 미치는 효과를 수치적으로 분석함으로써 틀어짐으로 발생하는 손실비용을 감소시킬 수 있는 방안을 연구할 필요가 있다.

목재의 온도 및 상대습도에 따른 평형함수율, 탄성계수 및 치수변동은 이미 잘 밝혀져 있지만, 목질판상재는 사용재료와 제조조건에 따라 차이가 있으므로 자료마다 차이가 있다. 또한 이방성 재료(anisotropic material)인 목재의 건조과정에서 수축에 따른 변형에 대한 시뮬레이션은 근래 들어 연구가 활발히 이루어지고 있다.

함수율 증감에 따라 목재나 목질재료의 평형함수율과 탄성상수(elastic constant)는 변화게 된다. Hearmon(1948)은 주요 수종의 탄성계수 및 포아송 비를 잘 정리한 바 있다. 탄성계수, 전단탄성계수, ν_{RL} , ν_{TL} , ν_{LR} 은 함수율이 증가하면 감소하지만 ν_{RT} , ν_{TR} , ν_{LT} 는 그 반대로 증가한다고 보고하였다.

Suchsland(1971)는 경질섬유판의 여러 온도와 상대습도에서 평형함수율과 방향별 탄성계수 증감을 조사하였으며 McNatt(1993)는 6개사의 경질섬유판에 대해 온도 20℃에서 상대습도 30%, 50%, 65%, 80%, 90%일 때 평형함수율과 인장탄성계수 증감을 연구 보고하였다.

Watkinson 등(1990)은 뉴질랜드산 목질복합체(wood composites) 즉, 파티클보드, MDF, 유침처리 경질섬유판에 대해 상대습도에 따른 물리적 성질변화를 측정된 결과 평형함수율은 파티클보드와 MDF는 유사하였으나 경질섬유판은 이보다 낮게 나타났으며 선팽윤율도 경질섬유판이 낮은 경향을 보였다고 한다. Suchsland(1971)는 가구용 veneered panel의 선팽윤에 대해 조사하였는데, 파티클보드 심재의 경우에는 탄성론적 이론치와 측정치가 잘 일치하였지만 extruded 파티클보드 심재의 경우에는 잘 일치하지 않았는데 그 이유는 소성변형에 기인한다고 하였

다. Myers(1982)는 9가지 변수에 따른 43가지의 경질섬유판을 실험실에서 제작하여 상대습도 50%-90%-50% cycle에서 치수안정성을 조사한 결과는 Currier(1957)의 결과와 약간 상반되었는데, Currier는 시판 14가지 경질섬유판로 시험한 결과 86% 길이가 감소되었으며 나머지 14%는 길이가 신장되었다고 보고한 바 있다.

Xu 등(1997)은 목질복합체의 선폽윤 모델을 제시하고 탄성적이고 균일방향성 분포라는 가정하에서 실제 거동과 유사한 결과를 나타냈다고 하며, Kohta 등(1997)은 각종 목질패널류(합판, MDF, HB, PB, OSB)에 대해 조사했는데 흡습과 탈습에 따른 길이 변화가 거의 선형관계에 있었으며, 함수율 변화율 1%당 선폽윤계수에 대해 보고하였다.

Hearmon(1948)은 여러 경계조건(boundary condition)에서 합판의 좌굴에 대해 잘 정리한 바 있는데, 모두 1축압축(unidirectional compression)에 대해서만 고려하였다. 그러나 1축압축력하에서 이방성을 고려한 합판의 좌굴은 이론치와 매우 유사함을 나타내었다. Timoshenko 등(1961)은 등방성 재료의 4변고정조건하에서 2축압축에 따른 좌굴을 에너지법으로 나타낸 바 있다.

藤田彰介 등(1976)은 PB 패널에 HPL(High Pressure Laminate)을 한쪽면만 접착시킨 경우, 즉 기하학적 비대칭에 있어 접착후 외기 변화에 따른 틀어짐 추정식을 유도하고 실험치와 비교한 적이 있으며, Szalai(1981)은 가구용 적층패널에 있어 수분 변화에 따른 틀어짐 현상을 재료역학의 Composite Beam에 대한 이론으로 잘 정리한 바 있으며 Kwiatkowski(1984)는 기하학적 대칭 복층목질패널에 있어 각종 온도경사에 따른 틀어짐을 판상이론으로 유도한 바 있다. Suchsland(1990)는 파티클보드에 단판을 접착시킨 cabinet door에 있어 단판의 목리방향 및 두께, 수종 차이에 따른 틀어짐의 추정방법을 제시하였다. Suchsland 등(1995)은 PB 기재에 대해 HPL, MSP(Melamine Saturated Paper), Vinyl sheet를 접착시킨 후 함수율 변화에 따른 틀어짐을 측정하였는데 대체적으로 선형 탄성이론치와 잘 일치하였다고 한다. 그러나 틀어짐이 작은 경우에는 이론치에 비해 측정치가 약간 더 컸으며 틀어짐이 큰 경우에는 그 반대현상을 나타내었다고 한다. 이 때 접착제는 초산비닐수지와 에폭시수지를 사용하였는데 접착층이 미치는 영향은 매우 적었으며, 틀어짐 주 요인은 재료의 선폽윤율이었다고 보고하였

다.

정(1992)은 hollow core door의 길이굽음(bowing)에 대한 연구에서 평형함수율 6% 및 평형함수율 15% 조건에서 약 90일간 시험한 결과 사용된 심재에 따라 길이굽음에 차이가 있었다고 한다. 시험후 심재와 패널의 접착력을 시험한 결과 양호한 상태를 나타내었다.

목질재료 이외의 일반 복합체, 주로 engineering plastic composite 틀어짐에 대해서는 Reddy 등(1995)과 Daniel 등(1994)이 잘 나타내었다.

이상에서 살펴 본 바와 같이 복층판(composite panel or laminated panel)의 온도 및 수분경사에 따른 변형예측도 그간 많이 보고된 바 있으나, 이론에 대한 검증 및 실험은 주로 보이론(beam theory)에 의해 이루어졌다. 그러나 hollow core type의 복층판에 대한 보고는 그다지 없으며, 특히 포아송비를 고려한 판이론(plate theory)을 적용, 연구보고한 예는 더 찾아보기 힘들다.

따라서 본 연구에서는 주위환경의 수분변화에 따른 주택용 hollow core type의 flush door 틀어짐 및 좌굴에 대한 이론정립 및 분석모델을 제시하고자 한다.

2. 틀어짐과 좌굴 예측 모델

주택 및 장롱에 사용되는 프러쉬 문의 심재의 배열에 따른 명칭은 Stile, Rail, Ladder 등 3가지로 구분되는데, Stile은 길이방향(X1), Rail과 Ladder는 폭방향(X2)으로 배열된 것이다.

심재에는 목재, 합판, 파티클보드, 섬유판, LVL 등 여러 가지 목질재료가 사용되고 있으며 심재의 최소 치수는 KS(1989)에 규정하고 있지만 stile이나 ladder의 사용 수에 대해서는 규정하고 있지 않기 때문에 제조업체마다 그 간격은 일정하지 않으며 표면재(skin)로 합판을 사용하게 되어 있지만, 실제로는 합판 이외에 경질섬유판이나 파티클보드가 사용되는 경우도 있다.

목질 적층재(wood laminated composite)가 틀어지는 현상은 다음과 같이 설명할 수가 있다.

목재는 함수율이나 온도에 따라 길이가 변화된다. 즉 함수율이나 온도중 어느 하나가 증가하면 치수가 늘어나고, 감소하면 줄어들게 된다. 그러나 목재에 있어서는 함수율에 비해 온도에 따른 치수변동은 매

우 적기 때문에 거의 무시할 수 있다. 적층부재에 함수율경사가 발생하거나 부재요소간 수축(팽윤)율이 다르면, 부재간이 접착되어 있어 수축(팽윤)이 자유롭지 못하기 때문에 라미나(lamina)에 내부응력이 발생하게 된다. 따라서 부재의 경계면이 구속되지 않으면 내부응력 차에 의해 부재에 변형이 발생하게 되는데, 이러한 현상을 틀어짐이라고 한다. 목재 플러쉬 문에서도 표면재간 치수변동과 탄성계수 차이에 의해 틀어짐이 Fig. 1과 같이 발생되는데, 그 형상은 사용재료 및 작업방법에 따라 여러 가지 형태로 일어날 가능성이 있다.

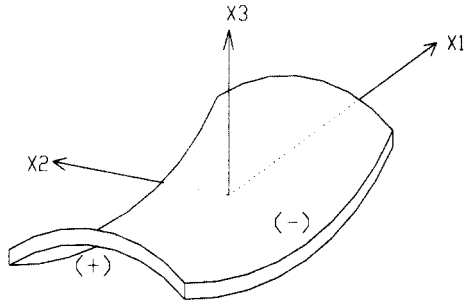


Fig. 1. Warping shape and sign convention.

부재요소간 수축력 차이에 기인한 내부응력의 크기는 식 (1)과 같이 부재요소간 수축율비, 탄성계수비, 두께비에 따라 다른데, 보이른(beam theory)에 근간한 틀어짐 계산방법은 Suchsland(1985)가 잘 나타내었으며.

$$R(\text{or } w) = f(T_i, E_i, \alpha_i \cdot \Delta MC_i) \quad (1)$$

- 여기서 R = 곡률반경(cm),
- w = 중앙부위 처짐량(cm)
- T_i = 각 층의 두께 (cm),
- E_i = 각층의 MOE (kgf/cm²)
- α_i = 각 층의 치수변동계수 (cm/cm),
- ΔMC_i = 각 층의 함수율변동량 (%)

그러나 hollow core 플러쉬 문의 경우에는 심재울, 즉 사용심재의 폭에 대한 표면재 폭의 비를 심재율 (r ≤ 1)이라 하면, 이 값(r)에 중층의 탄성계수(E)에 곱한 것을 심재의 탄성계수로 적용시켜야 한다.

직교이방성 판(orthotropic plate)에서 함수율 변동에 따른 틀어짐은 다음 식(2)를 이용해 계산할 수 있는데(강, 1999)

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \frac{1}{R_1} \\ \frac{1}{R_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} K_{11} &= \sum_{i=1}^n C_{11i} T_i, & K_{12} = K_{21} &= \sum_{i=1}^n C_{12i} T_i, \\ K_{13} &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n C_{11i} (S_i^2 - S_{i-1}^2) \\ K_{14} = K_{23} &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n C_{12i} (S_i^2 - S_{i-1}^2), & K_{22} &= \sum_{i=1}^n C_{22i} T_i \\ K_{24} &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n C_{22i} (S_i^2 - S_{i-1}^2), \\ K_{33} &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n C_{11i} (S_i^3 - S_{i-1}^3) \\ K_{34} = K_{43} &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n C_{12i} (S_i^3 - S_{i-1}^3), \\ K_{44} &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n C_{22i} (S_i^3 - S_{i-1}^3) \\ N_1 &= \sum_{i=1}^n \alpha_{1i} \Delta MC_i \cdot C_{11i} T_i + \sum_{i=1}^n \alpha_{2i} \Delta MC_i \cdot C_{12i} T_i, \\ N_2 &= \sum_{i=1}^n \alpha_{1i} \Delta MC_i \cdot C_{21i} T_i + \sum_{i=1}^n \alpha_{2i} \Delta MC_i \cdot C_{22i} T_i \\ M_1 &= \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^n \alpha_{1i} \Delta MC_i \cdot C_{11i} (S_i^2 - S_{i-1}^2) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=1}^n \alpha_{2i} \Delta MC_i \cdot C_{12i} (S_i^2 - S_{i-1}^2) \right] \\ M_2 &= \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^n \alpha_{1i} \Delta MC_i \cdot C_{21i} (S_i^2 - S_{i-1}^2) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=1}^n \alpha_{2i} \Delta MC_i \cdot C_{22i} (S_i^2 - S_{i-1}^2) \right] \end{aligned}$$

식 (2)에 대해 역행렬을 취하여 ε₁, ε₂, 1/R₁, 1/R₂를 구한 각 층의 잔류응력(residual stress)을 계산하며 다음 식(3)을 이용해 틀어짐을 구한다.

$$w = \frac{1}{2} \left(\frac{x_1^2}{R_1} + \frac{x_2^2}{R_2} \right) \quad (3)$$

그러나 흡습시 면내(in-plane) 좌굴이 발생되는 경우 그 좌굴응력은 에너지법(강, 1999와 Timoshenko, 1961)을 이용해 다음 (4)와 같이 유도할 수 있다.

木製 프러쉬 문의 합수올 변동에 따른 틀어짐과 좌굴 예측모델 (I) : 예측모델과 실측치 비교

$$(\sigma_1 + \frac{a^2}{b^2} \sigma_2)_{cr} = \frac{4}{3} \frac{\pi^2 a^2}{h} \left(\frac{3D_1}{a^4} + \frac{3D_2}{b^4} + \nu_{12} \frac{2D_2}{a^2 b^2} \right) \quad (4)$$

따라서 hollow core 문의 경우 각 표층의 양단 즉, 4변이 심재에 접착제로 고정되어 있다고 가정하면 그 좌굴응력(σ) 값은 틀어짐 크기에 따라 약간 변화가 되지만, 상기 식 (4) 좌항의 좌굴응력이 우항의 좌굴임계응력(σ_{cr})보다 크면 좌굴이 일어나게 된다. 일단 표면재나 배면재에 좌굴이 발생되면 틀어짐은 더 이상 진행되지 않는다고 할 수 있다.

3. 재료 및 방법

3.1 시험재료

합수올변동에 따른 문의 거동 측정을 위한 시험에 표면재의 연구대상으로 합판과 경질섬유판을 사용하였다. 그것은 상기 목질판상재가 대표적인 사용재료이고, 양표면재간의 선폽윤계수와 탄성계수 차이에 의해 문의 틀어짐이 발생되고, 합판의 선폽윤계수가 경질섬유판 보다 작기 때문에 본 연구목적상 인위적으로 용이하게 틀어짐을 발생시키기 위해 두 재료를 공시체로 선택하여 시험하였다.

또한 보통 목재문의 심재로는 남양재가 사용되지만, 근래 일본에서는 LVL을 심재로 사용하고 있기 때문에 공시체로 선택하였다.

시중에 판매되고 있는 Table 1과 같은 재료를 사용하였는데, 목질재료는 시험전 1개월 정도 기건상태에 방치시켜 충분히 평형에 도달하게 하였다.

합판과 두께 15mm인 심재의 수종은 Meranti이며 두께 30mm인 심재는 LVL로 브라질산 Elliot pine을 사용해 13매로 적층된 것을 사용하였다.

접착제 종류에 따른 틀어짐 영향을 알아보기 위해 목공용으로 일반적으로 사용되는 초산비닐 에멀전수지와 에폭시 수지를 공시체로 선택하였는데, 시간경과에 따른 접착력 발현속도는 초산비닐이 훨씬 빠르며 접착후 5시간만에 거의 완전한 접착력을 나타내었으나 에폭시 경우는 48시간 경과후야 거의 완전 경화됨을 알 수 있었다. 또한 72시간 경과후 초산비닐수지와 에폭시수지의 전단강도는 Table 1과 같이 거의 동일하며 탄성계수도 매우 유사하였다.

3.2 방법

3.2.1 물리적 및 기계적 성질 측정

치수변동은 양단에서 떨어진 지점에 철물을 고정시켜 치수변동을 측정하였다. 정적 인장탄성계수와 합수올 등은 ASTM(1990)에 따라 조사하였다. 치수변동 시편은 공시 문 한개당 길이방향 치수변동 시편 4개, 폭방향 치수변동시편 2개를 채취하였다. 정적 인장시편은 공시 문 한 개당 길이방향 4개, 폭방향 2개를 채취하여 Table 3과 같은 각 환경조건에서 비파괴로 측정하였다. 그러나 시간변화에 따른 측정은 공시문 하나에 대해 치수변동 시편 2개에 대해서만 측정을 실시하였으며 심재의 탄성계수로 측정된 비파괴 휨탄성계수를 적용하였다.

또한 합판과 경질섬유판의 상기 두 환경조건에서 탈습 및 흡습속도를 비교하기 위해 다음 식 (5)을 이용하여 확산계수 (k)를 구하였다.

Table 1. Properties of the materials used to build the door

Material		Air dried density (g/cm ³)	Strength (kg/cm ²)	Size (mm)
Panels	Plywood	0.643 ± 0.079 ¹⁾	316 ± 70 ⁴⁾	1220 × 2440 × 3
	Hardboard	0.918 ± 0.014	414 ± 25 ⁴⁾	1220 × 2440 × 3
Core	Solid wood	0.483 ± 0.047	-	40 × 2180 × 15
	LVL ²⁾	0.510 ± 0.010	-	30 × 2180 × 30
Adhesives	PVAc ³⁾	-	65 ± 14 ²⁾	
	Epoxy	-	62 ± 3 ²⁾	

1) ± : standard deviation, 2) LVL : Laminated veneer lumber, 3) PVAc : Polyvinyl acetate emulsion resin, 4) tensile strength, 5) shear strength

$$\ln \frac{MC_{ini}}{MC_{eq}} = kt \quad (5)$$

여기서, MC_{ini} = 초기 함수율(%),
 MC_{eq} = 평형도달시 함수율(%)
 t = 시간(hr)

3.2.2 틀어짐과 좌굴의 측정

기건상태에 충분히 방치된 합판과 경질섬유판 및 심재를 사용해 문을 제작하였다. 본 연구에서 설정한 모델의 타당성을 검증하기 위해 치수가 2180×490mm 인 Fig. 2 (a) 및 (b)와 같은 2가지 형태의 시료 문을 제작하여 항온항습기에 방치시킨 후 일정시간 간격으로 틀어짐을 측정하였다. 이들 평형상태에 있는

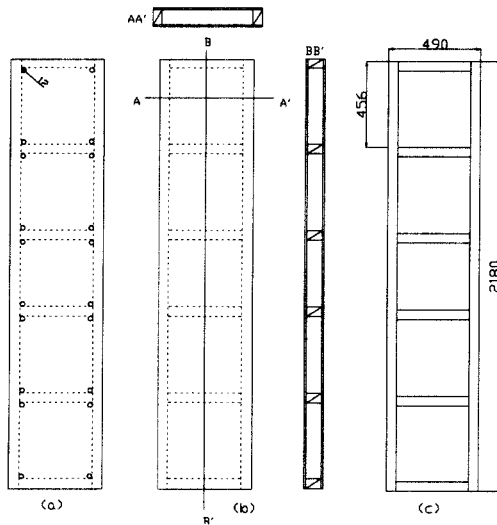


Fig 2. Door specimen for warping measurement.

문이 다른 온습도 환경에 방치되면 함수율 변동에 따라 치수변동이 발생되는데, 문의 표면재는 외기에 노출된 면과 안 쪽 면간의 환경조건이 다르게 되고 일정시간이 경과된 후에야 외기면과 안쪽면 간의 온습도 조건이 동일해지는 평형상태에 이르게 된다.

치수변화와 목재문의 틀어짐의 관계를 명확히 검증하기 위해 Fig. 2 (a)와 같이 표면에 직경12mm되게 천공을 하여 천공문(semi-open system)을 제작하였는데 표면재의 내부응력에 영향을 최소화시키기 위해 심재 바로 안쪽에 천공을 실시하였다. 또한 Fig. 2 (b)와 같이 표면재에 천공을 하지 않은 일반문(closed system)을 제작해 시험하였다.

천공문 및 일반문의 제작조건은 Table 2와 같고 Table 3의 환경조건에 노출시켜 틀어짐을 측정하였다. 이 때 접착시간(약2시간)동안의 외기중에서 함수율 변동을 최소화시키기 위해 모든 목질재료는 대기 상태에서 접착전까지 방치시켜 조습을 하였다. 각 환경조건 단계별 변환점은 각 시편의 무게, 치수변화 및 틀어짐 등이 변화되지 않을 때를 기준으로 하였다. 또한 각 단계 종료시 동적탄성계수와 정적탄성계수도 측정하였다.

틀어짐은 길이방향으로 양 끝에 강선을 연결시킨 후 양가장자리와 가운데 3곳의 중앙부위 변형량을 측정하여 그 평균값으로 하였다.

또한 自重에 의한 변형억제를 최소화시키기 위해 제작한 분리대위에 세워놓았으며 또한 顛倒를 방지하기 위해 문의 중앙부위를 서로 연결하여 고정시켰다.

좌굴은 치수가 500×500mm인 시료 문을 제작한 후 환경조건에서 평형상태에 도달하는 시간을 줄이기 위해 Fig. 2 (a)와 같이 가장자리 4곳에 직경 12mm 정도의 천공을 실시하였고 다이얼게이지가 장착된

Table 2. Door specification for warping measurement

Door type	Panel		Core		No. of specimen
	Face	Back	Material	Thickness(mm)	
Semi-open system	Plywood	Hardboard	Solidwood	15	2 (2)*
			LVL	30	2 (2)*
Closed system	Plywood	Hardboard	Solidwood	15	3
			LVL	30	3

* () : specimen using epoxy adhesive

木製 프리쉬 문의 함수율 변동에 따른 틀어짐과 좌굴 예측모델 (I) : 예측모델과 실측치 비교

Table 3. Two climate conditions in humidity chamber

Condition	I	II
Dry bulb temperature (°C)	26	26
Wet bulb temperature (°C)	18	23
Relative humidity (%)	45	85

Table 4. Door specification for buckling measurement

No.	Panel		Core		No. of specimen
	Face	Back	Materials	Thickness(mm)	
1	Plywood	Hardboard	Solidwood	15	2
			LVL	30	2
2	Plywood	Plywood	Solidwood	15	2
			LVL	30	
3	Hardboard	Hardboard	LVL	30	2

시험장치를 제작해 변위를 측정하였으며, 그 시료형태와 반복수는 Table 4와 같다. 좌굴변위는 양가장자리 심재부위 평균변위와 가운데 부분의 변위차이를 적용하였다.

3.2.3 계산방법

포아송 비를 실제로 정밀하게 측정하는 것은 매우 어렵기 때문에 목재의 포아송비는 일부 수종에 대해 조사된 바 있지만, 목질 판상재의 포아송비를 측정하는 데는 매우 드물다. 프레이크보드, chipboard는 plane isotropic wood composite라고 할 수 있으므로 0.3으로 가정해도 큰 무리가 없다고 하였다(Bodig, 1982). 따라서 본 연구에서는 경질섬유판의 포아송비 값으로 0.3을 적용하였다.

그러나 합판은 plane orthotropic composite이고 실제 포아송 비를 측정하는데 있어서도 인장시편의 응력분포 불균일성으로 인해 그 값을 구하기가 매우 어려웠다. 그러나 목재의 물리적 성질을 측정한 예가 있으므로 다음과 같이 구하였다.

합판의 경우 light red meranti(木材工業 핸드ブック, 1982)의 값 (E_L 117,000kg/cm², E_T 42,000kg/cm², ν_{LT} 0.60)과 다음 식(6)을 이용해 ν_{TL} 의 값 0.0215를 구하였으며

$$\frac{\nu_{LT}}{E_L} = \frac{\nu_{TL}}{E_T} \left(\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \right) \quad (6)$$

$$\text{또한 } \nu_{12} = \nu_{TL} \frac{E_L}{E_2} \text{ 과 } E_2 = \frac{2T_c E_T + T_c E_L}{\sum T_i}$$

(Hearmon, 1948)의 관계식을 이용하였는데, 시료 합판의 경우 갑판:중판:을판 두께비가 1:2:1이므로 $\nu_{12} = 0.0415$ 을 구하여 적용하였다.

그리고 다음과 같은 3가지 예측모델에 대해 Fig. 3과 같이 컴퓨터 프로그래밍을 하여 목재 문의 틀어짐 및 내부응력을 계산하였다. 또한 유한요소해석법의 적용가능성을 알아보기 위해 프로그램을 작성하고 최적 mesh 분할에 대해 조사하였다. 이 때 플러쉬 문의 전체길이에 대해 요소분할을 하지 않고 문의 중앙부를 좌표원점으로 하고 도아 두께 정도의 길이에 대해 틀어짐을 계산한 후 전체 틀어짐을 구하였다.

Model I : 판-좌굴이론 - 포아송비를 적용하고 좌굴을 고려

Model II : 판이론 - 포아송비를 적용하고 좌굴 무시

Model III : 보이론 - 포아송비와 좌굴을 무시

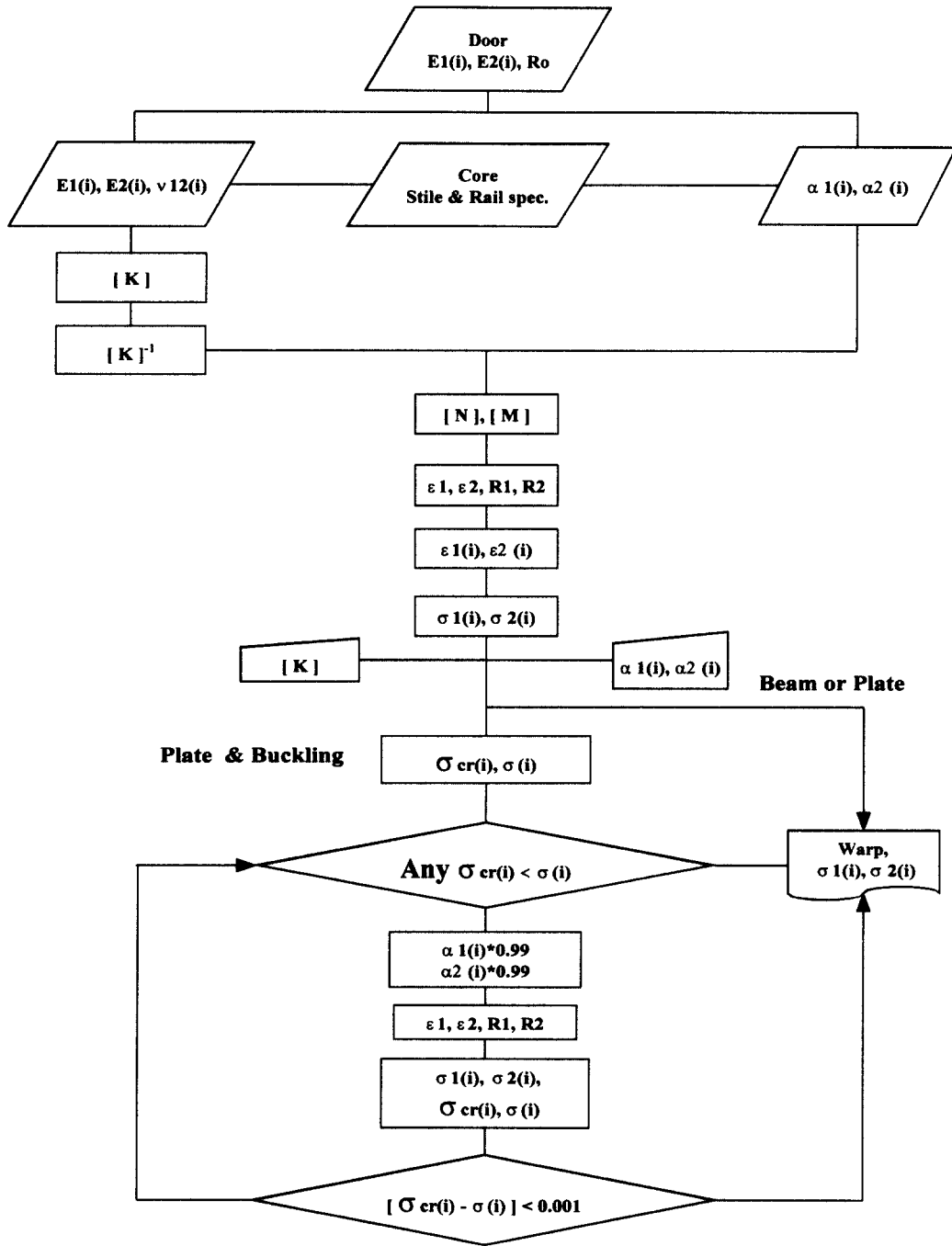


Fig. 3. Flow chart for calculation of warping and stress.

4. 결과 및 고찰

4.1 목재문의 틀어짐

4.1.1 함수율 변동에 따른 치수와 탄성계수 변화

4.1.1.1 함수율 변동

합판과 경질섬유판의 실측 평형함수율, 치수변동 및 탄성계수변동을 Table 6에 나타 내었다. 합판은 상대습도 45%에서 8.61%, 경질섬유판은 7.01%이었다. 또한 상대습도 85%에서 합판과 경질섬유판의 평형함수율은 14.84%와 11.74%로 나타나 합판은 목재의 평형함수율과 유사하며 경질섬유판은 합판보다 평형함수율이 낮음을 알 수 있었다. 또한 기건상태에서 상대습도 45%까지 함수율 변동 (ΔMC)은 합판 4.2%, 경질섬유판 1.87%로 합판이 매우 컸으며 기건상태에서 상대습도 85%까지는 그 반대로 합판 2.02%, 경질섬유판 2.86%로 경질섬유판 함수율 변동이 약간 더 크게 나타났다. 경질섬유판의 평형함수율은 사용 수종, 접착제 및 제조방법에 따라 약간 차이가 있지만 다른 연구결과(McNatt, 1974; Watkinson 등, 1990)의 결과와 유사하였다.

4.1.1.2 탄성계수 변동

합판의 길이방향에 대한 폭방향 탄성계수 비 (E_2/E_1)는 평균 1.22이었으며, 경질섬유판의 경우

에는 1.0으로 나타났는데 보통 두께가 3mm인 3plys 합판제조 경우 갑판:중판:울판 두께비를 1:2:1로 하고 동일수종을 사용하면 이론적으로는 방향별 탄성계수는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다(Bodig, 1982).

$$E_1 = \frac{1}{t} (2E_L t_f + E_T t_c),$$

$$E_2 = \frac{1}{t} (2E_T t_f + E_L t_c)$$

여기서 $t_f = t_c$ 이므로 E_2/E_1 가 1.0이어야만 하지만, 표면 평활성 개선을 위한 연마로 인해 갑판의 두께가 감소되거나 Meranti 수종의 수급관과 제조 원가를 낮추기 위해 중판에 밀도가 높은 저급 수종을 사용한 것이 그 주요인이 아닌가 추정된다.

McNatt 등(1993)이 조사한 경질섬유판의 경우에는 E_2/E_1 가 0.88~1.00으로 제품에 따라 약간의 차이가 있으나 E_1 이 E_2 보다 약간 더 크게 나타났다고 한다.

또한 E_1 과 E_2 변이계수는 합판은 12.9%, 21.8%이고 경질섬유판은 5.5%, 5.0%로 합판이 경질섬유판보다 훨씬 더 크게 나타났는데 이것은 구성 단위요소가 크기 때문이라 생각된다. 합판의 경우는 단판이 단위 구성요소이고 경질섬유판은 섬유체(fiber bundle)로 섬유판의 단위 구성요소 크기가 훨씬 작아 결점 분산 등으로 인해 더 균질하기 때문이라 생각된다.

Table 6. Dimensional change and MOE due to moisture content change

	EMC(%)	Tensile MOE (kg/cm ²)		Coefficient of linear movement ($\times 10^{-3}$)	
		E1(//) ¹⁾	E2(⊥) ²⁾	α 1(//)	α 2(⊥)
Plywood				0.161 ± 0.032	0.222 ± 0.039
Air dry	12.82 ± 0.70	48,768 ± 6,171	59,596 ± 12,283		
Condition- I	8.61 ± 0.40	50,569 ± 6,781	61,881 ± 13,656	-	-
Condition- II	14.84 ± 0.82	48,231 ± 6,060	59,118 ± 13,417		
Hardboard				0.478 ± 0.035	0.495 ± 0.049
Air Dry	8.88 ± 0.28	36,835 ± 1,402	60,893 ± 13,052		
Condition- I	7.01 ± 0.19	38,861 ± 1,363	61,632 ± 12,342	-	-
Condition- II	11.74 ± 0.53	28,261 ± 2,581	61,388 ± 13,368		

※ 1), 2) : value in direction of panel length and width, respectively.

경질섬유판 탄성계수의 방향별 변이계수는 기건상태에서 E_1 3.8%, E_2 4.2%로 차이가 매우 적지만, 합판은 E_1 12.7%, E_2 20.6%로 그 변이계수 차이가 매우 크게 나타났다. 이것은 주로 갑판과 을판의 절삭상태, 즉 레이스 체크(lathe check) 깊이 정도에 따른 응력집중 때문으로 생각된다.

상대습도 45%에서 85%로 함수율이 증가될 때 E_1 과 E_2 변화는 각각 합판은 4.6%, 4.5% 감소되었으며 경질섬유판은 27.2%, 28.5%로 그 감소 폭이 합판보다 매우 크게 나타났다. 따라서 경질섬유판의 경우는 상대습도에 따른 탄성계수 변화를 측정할 결과 인장탄성계수는 상대습도 65%를 기준으로 할 때 상대습도 30%에서 약20% 증가, 상대습도 90%에서 15% 감소되었다고 연구보고와 그 경향이 일치됨을 알 수 있다(McNatt, 1993).

4.1.1.3 치수변동계수

길이방향 (α_1)과 폭방향의 선팅윤계수 (α_2)는 합판은 0.000161, 0.000222이었으며 경질섬유판은 0.000478, 0.000495로 나타났다. Kohta 등(1997)은 방향을 고려치 않은 치수변동계수에 대해 조사한 바 있는데 라왕합판, 건식경질섬유판의 경우 0.00018, 0.00049라고 발표하여 본 연구결과와 매우 유사한 결과였다. 또한 McNatt 등(1993)은 상대습도 50%에서 상대습도 90%간 경질섬유판 치수변동이 0.0016~0.0046으로 제품마다 큰 차이가 있었다고 하였는데 함수율 변동폭 (ΔMC)을 알 수 없고 실험조건이 약간 다르므로 치수변동계수를 직접비교할 수는 없지만, 본 실험결과에서 ΔMC 는 4.73%이므로 치수변동은 0.00226, 0.00234로 McNatt 시험결과와 중간정도 위치에 있음을 알 수 있다.

그리고 McNatt 등(1993)은 경질섬유판 종류에 따라 α_2/α_1 비가 1.02~1.16로 나타났다고 하였는데 본 연구에서는 1.04로 나타났다.

따라서 경질섬유판의 치수변동계수는 길이방향과 폭방향이 거의 동일함을 알 수 있지만, 합판은 길이방향보다 폭방향이 크게 나타났다. 합판의 경우 이론상으로는 탄성계수변동에서 살펴 본바와 같이 갑을판 두께 합과 중판 두께의 비 등으로 인해 폭방향보다 길이방향 치수변동이 더 커야 하지만, 실험결과와는 그 반대로 나타났다.

4.1.2 함수율 변동에 따른 문의 거동

4.1.2.1 시간에 따른 함수율과 치수변동

기건상태에 노출된 control 시편을 건구온도 26°C, 상대습도45%와 상대습도85%가 유지되는 항온항습기에 100시간씩 방치시켰을 때 표면재인 경질섬유판과 합판, 심재인 목재의 함수율 변화는 Fig. 4와 같다.

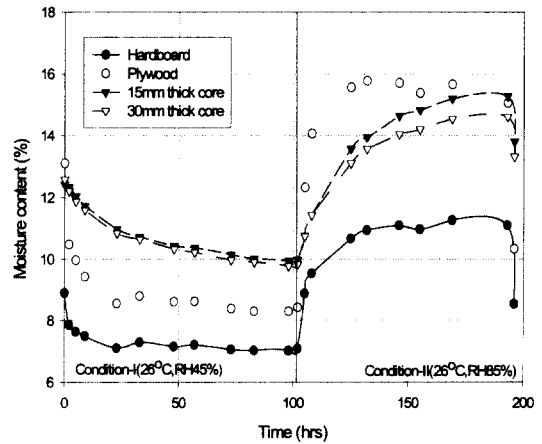


Fig. 4. Moisture content changes of hardboard, plywood and solidwood with time in each environmental conditions.

합판과 경질섬유판은 환경조건이 변화될 때 약 24시간 전후로 평형상태에 도달하였으나, 심재로 사용되는 목재는 두께 15mm와 30mm 모두 100시간내에 완전한 평형상태에 도달되지 않았다.

문에 사용되는 표면재와 심재는 동일한 환경조건에서도 평형에 이르는 시간이 매우 차이가 크다. 따라서 실제 기후환경에서는 온도와 습도가 매우 동적으로 변화되므로 문의 거동을 해석하는데 있어, 표면재에 비해 두께가 큰 심재의 평형속도가 매우 느리기 때문에 심재의 치수변동을 고려해야만 하는지의 문의 간다.

확산계수 (k)의 경우 심재와 합판 및 경질섬유판 모두 흡습 확산계수가 탈습보다 크게 나타났다 (Table 7). 이것은 목재의 일반적 경우와는 반대인데, 그 이유는 본 연구에서 적용한 너무 급격한 온습도변화로 인해 과도현상이 지배적이었기 때문이라 생각된다.

Table 7. Diffusion coefficient (k) at the specific condition, temperature 26°C

Material		Desorption(MC%/hr)	Adsorption(MC%/hr)
Plywood		0.0188	0.0234
Hardborad		0.0098	0.0157
Soildwood	15mm	(0.0022)	(0.0034)
	30mm	(0.0024)	(0.0032)

() : value at nonequilibrium state

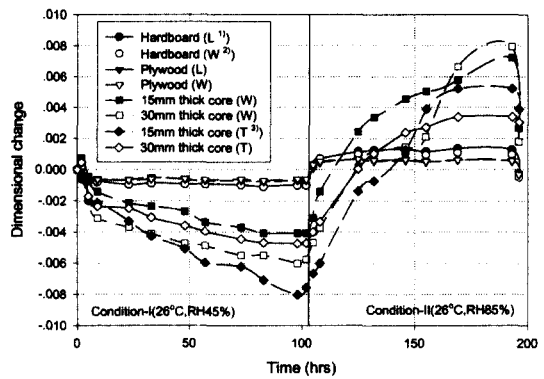
그리고 합판이 경질섬유판보다 탈습과 흡습속도가 매우 큰 것을 알 수 있다. 또한 목재의 밀도에 따른 탈습속도비는 $\frac{t_1}{t_2} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^\alpha$ 로 나타낼 수 있는데 α 값은 1.5~1.9이다. Table 1에 있는 합판과 경질섬유판의 밀도값 0.643과 0.918과 Table 7의 확산계수값을 대입시키면 α 값이 1.8이 된다. 따라서 목재의 탈습과 유사한 결과를 나타내었다.

심재는 완전히 평형상태에 도달하지 않았지만 조건 종료시의 함수율을 평형함수율로 가정하여 계산하면 밀도가 합판보다 작지만 흡탈습속도계수가 1/11보다 작은 것을 알 수 있다.

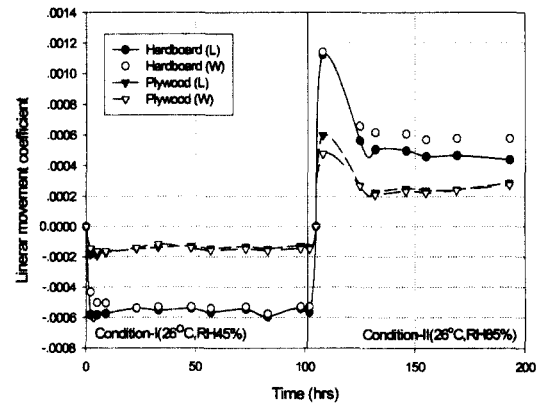
시간에 따른 치수변동과 치수변동평균계수 변화를 Fig. 5 (a)와 Fig. 5 (b)에 나타내었다. 여기에서도 합판과 경질섬유판이 각 환경조건에서 약24시간에 평형에 도달함을 확인할 수 있어 두께가 얇은 경우 단면에 함수율 경사가 매우 적어 함수율 변동속도와 치수변동 속도가 거의 일치됨을 알 수 있었다. 그리고 치수변동크기는 목재, 경질섬유판, 합판 순으로 나타났다.

여기서 주목할만한 점은 합판과 경질섬유판이 평형에 도달하기 이전, 치수변동계수가 과도적으로 크게 나타났다는 것이다. 특히 탈습시보다 흡습시 과도적인 치수변동계수가 매우 큰 이유는 Table 7에서 보는 바와 같이 확산계수 차이와 단면에 함수율 경사가 있는 비평형상태에 있어 겉보기 현상에 기인한다고 생각된다.

그러나 평형상태에서 흡습과 탈습시 치수변동계수는 매우 유사하였는데, 이것은 사용재료는 약간 다르지만 Kohta(1997)와 Suchsland (1989)의 흡습에 의한 치수변동계수와 탈습에 의한 치수변동계수의 관계에 대해 보고한 결과와 잘 일치하고 있다.



(a)



(b)

- 1) L : direction of length, 2) W : direction of width,
- 3) T : direction of thickness

Fig. 5. The dimensional changes(a) and linear movement coefficient changes(b) of hardboard and plywood with time.

4.1.2.2 시간에 따른 문의 틀어짐

서로 다른 두 환경조건에서의 시간에 따른 문의 틀어짐은 함수율과 치수변동 변화곡선과 매우 유사한 형태를 가지며 심재두께에 따라 틀어짐 차이가 매우 크게 나타났다(Fig. 6).

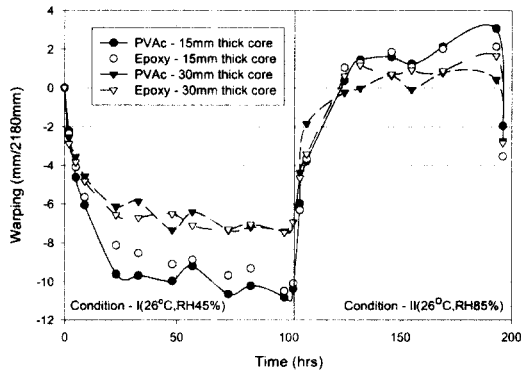


Fig. 6. Warping of doors built using PVAc and epoxy adhesives with time.

예측되는 바와 같이 심재두께가 두꺼울수록 틀어짐이 작는데, 길이 2180mm인 문의 중앙부위 틀어짐은 심재두께 15mm는 탈습시 최대 11mm, 흡습시 3mm를 나타내었으며 심재두께 30mm는 탈습시 최대 7mm, 흡습시 1.5mm를 나타내었다.

또한 탈습시와 흡습시 치수변동 크기는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 비슷하지만, 틀어짐은 탈습시와 흡습시 보다 매우 크게 나타났음을 알 수 있었다.

그리고 표면재와 심재는 접착제에 의해 강고(rigid)하게 결합되어 있다는 가정하에서 모델을 개발하였지만, 접착제 종류에 따른 틀어짐 차이를 알아보기 위해 초산비닐 에멀전과 에폭시 수지를 비교한 결과 Fig.6과 같이 차이가 그다지 없었다. 이것은 Suchsland 등(1995)이 파티클보드에 HPL 등을 두 접착제로 접착하여 집성판의 틀어짐 시험을 한 결과와도 일치하였다. 그 이유는 실온에서 초산비닐과 에폭시 접착제의 접착강도와 탄성계수가 유사하므로 두 접착제간의 틀어짐 차이는 없다고 생각된다. 그러나 일부 측정점에서 접착제 종류간 틀어짐 차이가 있는 것은 표면재의 확산계수 차이와 항온항습기내 문 시료 위치에 따른 탈습 및 흡습속도 차이에 주로 기인되는 것으로 생각된다.

4.1.3 예측모델과 비교

4.1.3.1 평형시 예측모델과 비교

천공문(심재 치수변동 고려)과 일반문(심재치수변동 미고려)에 대해 각 조건에서 평형에 도달하였을 때 틀어짐을 이론치와 측정치를 비교하기 위해 치수변동과 인장탄성계수 변화에 조사한 결과, 기건상태에서 상대습도 45%로 변화될 때 길이방향 치수변동은 합판 -0.00044~-0.00092, 경질섬유판 -0.00101~-0.00138으로 합판보다 약 2배 정도 크게 나타났다. 그리고 기건상태에서 상대습도 85%로 변화될 때 길이방향 치수변동은 합판 0.00026~0.00042, 경질섬유판 0.00095~0.00124로 합판보다 약 3배 정도 크게 나타났으며 폭방향도 유사한 경향을 나타내었다. 이와같이 치수변동에 차이가 큰 것은 치수변동계수와 평형함수율 차이 때문인데, 특히 고습에서 경질섬유판의 함수율변동이 합판보다 크기 때문에 저습에서보다 치수변동에 더 큰 차이가 발생되었다고 생각된다.

이를 조건 1과 조건 2에서 일반문과 천공문의 틀어짐 평균으로 측정값과 예측값의 차이를 비교한 결과, 기건상태에서 상대습도 45%로 변화될 때 심재두께 15mm의 경우 틀어짐이 8.89~14.9mm, 30mm의 경우 틀어짐이 7.53~10.6mm로 나타나 심재두께에 따라 틀어짐 차이가 매우 큰 것을 알 수 있었다. 그러나 기건상태에서 상대습도 85%로 변화될 때 심재두께 15mm의 경우 틀어짐이 1.65~5.88mm, 30mm의 경우 틀어짐이 -0.56~4.49mm로 심재두께에 따라 틀어짐 차이는 그다지 없는 것으로 나타났다. 그 이유는 고습에서는 문 표면재의 좌굴이 지배적으로 작용하기 때문이라고 생각된다.

또한 틀어짐은 고습보다는 저습에서 크기가 크다는 사실을 알 수 있는데, 국내에서 목재의 년중 평형함수율 변동을 정 등(1994)이 측정한 결과에 따르면 아파트 안방과 거실의 경우 년중 7.7~13.5%였고 단독주택 거실은 10.5~13.4%를 나타낸다고 보고한 바 있으므로 목재문에 사용되는 재료의 기건 함수율은 목재는 12%전후에서 대부분 관리되기 때문에 공장서 제작된 목재문의 함수율은 아파트 경우 -4.3%~+1.5%, 단독주택은 -1.5~1.4%로 아파트의 경우가 변동이 심하다고 할 수 있다. 따라서 경험적으로 여름보다 겨울에 틀어짐 불량이 많이 발생한다는 사실과도 잘 일치함을 알 수 있었다.

일반문과 천공문의 틀어짐 측정값과 모델별 예측값과의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. 조건 1에서는

木製 프러쉬 문의 함수율 변동에 따른 틀어짐과 좌굴 예측모델 (I) : 예측모델과 실측치 비교

판이론 모델에 비해 보이론 모델에 의한 예측값이 측정값보다 틀어짐을 더 작게 나타냈으며, 그 반대로 조건 2에서는 판이론 모델보다 더 크게 나타내었다. 판-좌굴이론 모델은 고습환경에서 표면재 치수가 팽창될 때 좌굴을 고려한 것으로 저습에서는 판이론 모델과 동일하므로 조건 1에서는 틀어짐 예측값도 동일하여 Fig. 7에는 겹쳐서 나타나게 되었다. 그러나 조건 2에서는 판이론 모델에 의한 예측값은 판-좌굴이론 모델에 비해 측정값보다 과대한 값을 나타내었다.

또한 Fig. 8과 같이 틀어짐 측정치와 판-좌굴이론 모델에 따른 예측치의 상관관계를 나타냈는데 상관계수가 0.953으로 매우 근사함을 알 수 있었고, 판-

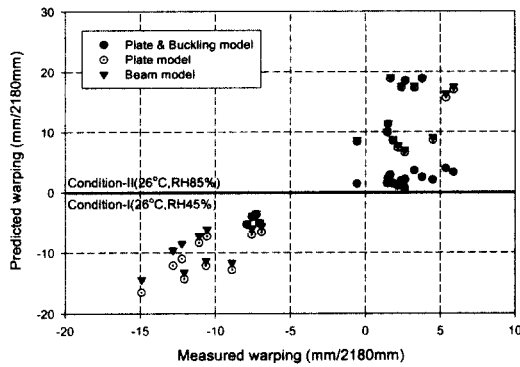


Fig. 7. Comparison of measured and predicted warping by the models for the semi-open door.

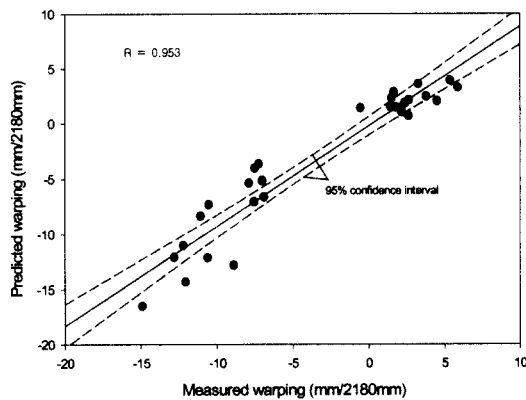


Fig. 8. Correlation between measured and predicted warping by plate & buckling model.

좌굴이론 모델에 따른 예측치가 측정치보다 조건 1에서는 더 작았고 조건 2에서는 그 반대로 크게 나타났지만 그 오차는 약1mm로 매우 작았다.

따라서 조건 1과 조건 2 모두에서 포아송비를 고려한 판이론 모델이 포아송비를 고려치 않은 보이론 모델보다 더 정확하다는 것을 알 수 있으며, 고습에서는 표면재의 좌굴을 고려한 판-좌굴이론 모델을 적용해야만 된다는 것을 알 수 있었다.

또한 동적으로 변하는 환경에서 표면재나 심재의 함수율 및 치수변동이 평형에 도달하기 이전에 문의 틀어짐을 해석하는데 있어서 표면재보다 두께가 매우 크고 문의 내부에 있는 심재 인자를 고려해야 하는 것인지 의문이 생긴다.

일반적으로 Hollow core 목재문의 경우 심재두께가 표면재의 수배에 이르므로 동일한 환경조건에서 평형상태에 도달하는 시간이 큰 차이가 있다. 앞에서 살펴본 바와 같이 표면재는 기건상태에서 상대습도 45%로 변하는 환경조건에서 약 24시간만에 평형상태에 도달하였지만, 심재는 100시간이후에도 평형상태에 도달하지 않음을 알 수 있다.

따라서 표면재 및 심재가 어느정도 평형상태에 도달되었다고 추정되는 상기 시험결과로 함수율 변화에 따른 심재의 치수변동 등 인자를 고려한 것과 하지 않은 결과를 비교해 보면 Fig. 9와 같이 그 차는 약1mm로 작았다. 그 이유는 문의 틀어짐 주요인은 단면중심에서 거리가 떨어진 표면재 응력에 의해 크게 좌우되기 때문이다.

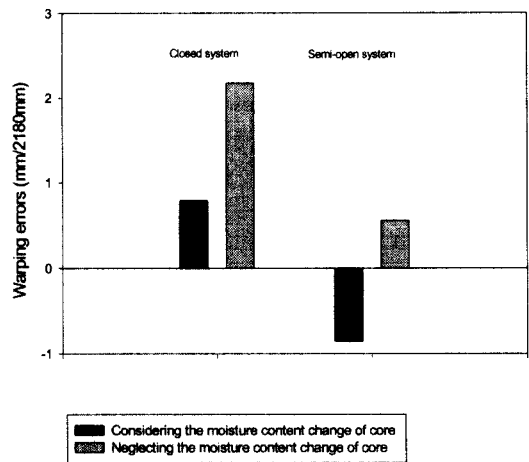


Fig. 9. The effect of the core dimensional change on warping.

Table 8. Warping predicted by finite element method

No.	Type	warping (mm) in 2180mm length		
		Beam model	FEM (A)	FEM (B)
P-1		- 5.34	- 5.33	- 4.63
P-2		- 6.70	- 6.54	- 5.76
E-1		-10.97	-10.69	- 9.38
E-2		-12.64	-12.23	-10.07

또한 조건 1의 가정하에서 심재두께 15mm인 문에 대해 심재의 함수율변동이 없다고 가정하여 유한요소해석법으로 틀어짐을 구한 결과, mesh 분할시 표면재와 배면재의 두께를 3등분한 것(A)은 Table 8에서 보는 바와 같이 보이른 모델 값과 거의 일치하였다.

그러나 표면재와 배면재의 두께를 1등분(B)한 것은 3등분(A)에 비해 오차가 크게 나타났다. 따라서 유한요소법으로 프러쉬문의 틀어짐을 예측하기 위해서는 표면재와 배면재의 두께를 3등분한 것을 요소의 단위길이와 폭으로 한 정방형 요소분할이 적절함을 알 수 있었다.

4.1.3.2 시간에 따른 예측모델과 비교

양면이 외기에 노출되어 있는 control 시편과 근사한 속도로 치수변동을 한다고 가정되는 천공문과 한쪽 면만 외기에 노출되어 있는 일반문의 시간에 따른 조건별 틀어짐의 변화곡선은 Fig. 10~Fig. 11과 같이 심재두께 15mm와 30mm 두 경우 모두 근사하게 추정할 수 있음을 알 수 있었다.

천공문의 경우에는 틀어짐 증감기울기는 측정치와 판-좌굴이른 모델에 따른 이론치간이 유사하였지만 조건 1에서 틀어짐 절대값은 측정치가 이론치보다 약간 크게 나타났는데, 그 이유는 평형상태에서의 결과로 미루어 보아 control 시편 수의 부족에 따른 측정오차에 기인한다고 생각된다. 그리고 조건 2에서는 고습에 노출된 초기 약 5시간이내를 제외하고는 매우 근사하게 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

그러나 일반문의 경우에는 조건 1에서 천공문과는 반대로 측정치가 이론치보다 크게 나타났는데, 그 이유는 표면재가 양면으로 수분변동이 일어난다고 가정하여 틀어짐을 추정하였기 때문이라 생각된다. 조

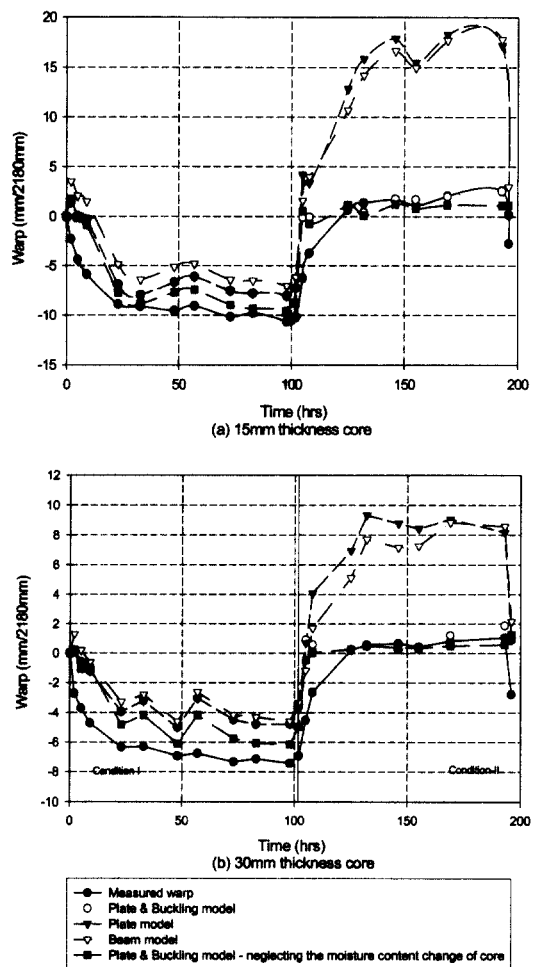


Fig. 10. Warping of semi-open system doors, 15mm and 30mm thickness core with time.

木製 프러쉬 문의 함수율 변동에 따른 틀어짐과 좌굴 예측모델 (I) : 예측모델과 실측치 비교

건 말기, 약 100시간 경과 후에야 문의 표면재와 배면재가 평형상태에 이르는 것으로 추정된다. 조건 2에 있어서는 심재두께 15mm인 경우에는 약100시간, 30mm인 경우에는 약 60시간이후에 측정치와 이론치가 일치되는 것으로 보아 일반문은 환경조건의 온습도에 따른 평형상태에 도달하기는 상당한 시간이 필요함을 알 수 있었다.

그러나 본 연구의 시험체 문과는 달리 실제 생산되는 문은 대부분 표면이 도장되어 있으므로 흡탈습속도가 매우 느리기 때문에 주어진 환경조건에서 평형상태에 도달하는 속도는 본 연구결과보다 더 매우 느리리라 생각되어 향후 이에 대한 연구도 수행될

필요가 있다고 생각된다.

또한 천공문의 경우에도 평형상태에 이르기 전에는 심재의 치수변동을 고려하지 않은 것이 더 근사하게 틀어짐을 추정할 수 있는 것으로 나타났다.

그리고 시간에 따른 틀어짐은 천공문과 일반문 모두 저습과 고습에서 판-좌굴이론 모델에 의해 근사하게 추정을 할 수 있음을 알 수 있었다.

4.1.3.3 시간에 따른 추정 주응력(principal stress)과 좌굴응력

저습에서는 인장응력, 고습에서는 압축응력이 표면재 내부에 발생되어 좌굴이 발생됨을 알 수 있었는데, 시험한 천공문중 하나인 두께 30mm의 대표적인 예에 대해 식 (4)를 적용한 결과는 Fig. 12와 같다.

상대습도 45%에서 발생된 합판의 길이방향 인장응력(σ_1)은 13kg/cm²인 것에 비해 경질섬유판은 51kg/cm²으로 합판보다 매우 크기 때문에 경질섬유판 쪽으로 틀어짐이 발생된다. 그리고 상대습도 85%에서 발생된 합판의 압축응력은 21kg/cm², 경질섬유판은 48kg/cm²로 마찬가지로 경질섬유판이 크게 나타났다. 따라서 상대습도 45%와는 반대로 합판 쪽으로 틀어짐이 발생되었다.

틀어짐 크기는 표면재와 배면재의 응력차이 크기에 비례하지만 Fig. 12에서 보는 바와 같이 상대습도 45%에 비해 상대습도 85%에서 발생하는 틀어짐의 크기는 매우 작다. 그 이유는 식 (4)에 의해 좌굴임계응력(σ_{cr})과 좌굴응력(σ)을 계산한 결과, 상대습도 85%에서 합판의 σ_{cr} 은 17kg/cm², 경질섬유판은 16kg/cm²로 경질섬유판이 약간 작았지만, 그 반대로 σ 은 합판이 34kg/cm², 경질섬유판이 69kg/cm²로 크기 때문이다. 즉 고습에서 틀어짐은 좌굴임계응력 이하에서는 틀어짐이 발생되지만 그 이상에서는 틀어짐은 발생되지 않고 좌굴만 진행되기 때문이다.

따라서 합판과 고밀도 섬유판 모두 좌굴이 발생되지만, 좌굴응력이 합판보다 경질섬유판이 크기 때문에 경질섬유판의 좌굴현상이 더 심하다는 것을 알 수 있었다.

이와 같이 경질섬유판에 비해 저습 및 고습에서 합판의 내부응력의 크기가 작았으며, 고습에서 압축응력에 의해 발생하는 경질섬유판의 좌굴응력은 고습노출 직후부터 발생되는데 그 크기는 약 69kg/cm²이므로 Suchsland 등(1986)이 발표한 경질섬유판의 비례한도 값인 141~205kg/cm²의 34~49%에 상당하

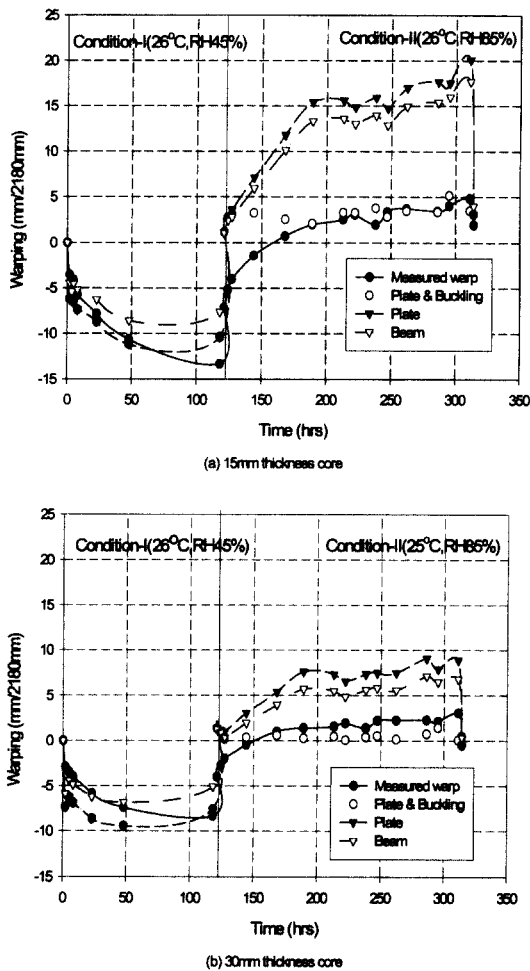


Fig. 11. Warping of closed system doors, 15mm and 30mm thickness core with time.

여 장기간 고습조건에 방치될 때에는 소성변형이 일어날 수 있음을 알 수 있다.

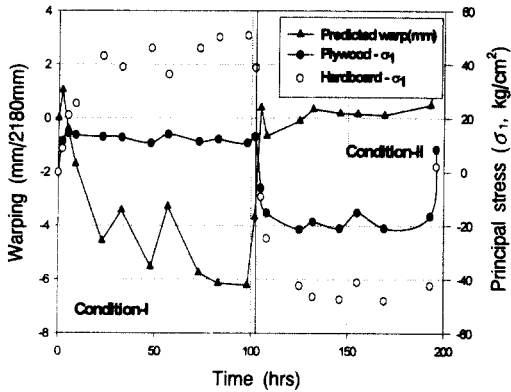


Fig. 12. Simulated warping and principal stress (σ_1) of plywood and hardboard in direction of length with time.

4.2 고습에서 표면재 좌굴

실제로 고습에서 이론과 같이 압축응력에 의해 표면재에 좌굴이 발생되는지를 알아보기 위해 시험을 한 결과는 다음 Fig. 13와 같다. 여기서 (+)는 심재 쪽으로 변형이 생겨 뒤틀리고 (-)는 그 반대로凸형을 말한다.

양면이 각각 합판과 경질섬유판인 문의 경우 Fig. 15에 나타난 바와 같이 조건 1에서는 심재 두께에 관계없이 변형이 매우 작았다. 그리고 조건1에서 조건 2로 변경 2시간후, 심재두께 30mm인 경우 합판과 경질섬유판 변형이 (+)쪽으로 발생되었지만 심재두께 15mm인 경우는 합판만 (+)쪽으로 변형이 발생되고 경질섬유판은 변형이 발생되지 않았다. 그러나 조건 2에서 심재두께에 관계없이 합판쪽은 변형이 일정상태를 유지하였지만 경질섬유판쪽은 계속 증가되었는데 약100시간만에 심재두께 15mm 경우 0.7mm 정도의 최대변형을 나타내고 심재두께 30mm 경우 약 120시간만에 최대변형이 약1.0mm에 이르렀다. 따라서 흡수에 의해 합판과 경질섬유판 모두 좌굴이 발생되지만 경질섬유판쪽의 좌굴이 더 크다는 사실을 알 수 있는데 이것은 Fig. 28에서 보는 바와 같이 추정 경질섬유판의 좌굴응력이 더 크다는 것과 잘 일치하고 있다. 그리고 심재 두께 30mm가 15mm인 문보다 경질섬유판의 좌굴변형이 큰 이유는 심재두께가 작을수록 틀어짐이 용이하게 일어나므로 식(4)에서 알 수

있는 바와 같이 경질섬유판쪽의 좌굴응력이 작게 발생되기 때문이다.

본 연구에서는 좌굴응력 크기에 대해서만 다루었지만, 금후 좌굴응력에 따른 변형의 크기를 예측할 수 있는 방법도 연구할 필요가 있다고 생각된다.

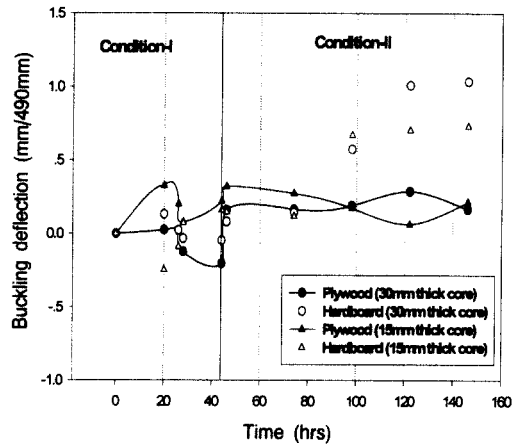


Fig. 13. Buckling deflection of semi-open door whose face and back is hardboard and plywood each at the specific condition.

5. 결 론

목공품과 가구 제조에 있어 주요 제품인 목재 hollow core 플러쉬 문의 틀어짐과 좌굴에 대해 연구를 하였는데 측정 편의상 표면재와 배면재에 각각 합판과 경질섬유판을 사용해 시료 문을 건전상태에서 제작한 후 항온항습기에 상대습도 45%와 상대습도 85% 조건에서 틀어짐과 좌굴을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 틀어짐에 영향을 미치는 인자의 영향 정도를 파악하고 정량적인 관계를 알아보기 위해 판-좌굴이론, 판이론, 보이론 모델 등 3가지 모델을 가정한 후, 각 모델에 따른 예측치와 실제 측정치를 비교하였다. 그 결과 저습에서는 포아송비를 고려한 판이론과 판-좌굴이론이 보이론보다 더 정확하게 문의 틀어짐을 예측할 수 있었으며 고습에서는 좌굴을 고려한 판-좌굴 이론이 가장 적합하였다. 따라서 모든 환경조건에서 목재 플러쉬 문의 틀어짐과 좌굴을 예측하는데

있어 판-좌굴이론이 최적모델이라는 것을 알 수 있었다.

2. 단기간에 걸친 문의 틀어짐을 해석하는데 있어서는 심재의 치수 및 탄성계수 변동을 고려할 필요가 없었다.

3. 아파트 문의 틀어짐 불량이 경험적으로 10월말에서 3월에 걸쳐 발생되는데 그 이유는 그 기간이 년중 실내의 평형함수율이 가장 낮고 기건상태로부터의 함수율 변동이 가장 크기 때문인데, 틀어짐은 탈습과정에서 주로 발생되었다는 본 연구결과와도 잘 일치하였다.

4. 기건상태에서 제조된 Hollow core 목재문은 고습조건에서 틀어짐은 저습조건보다 크지 않지만 좌굴이 발생된다. 따라서 고습에서는 좌굴을 고려하여 문의 틀어짐을 계산하여야만 한다는 것을 알 수 있었다. 따라서 저습에서 틀어짐 방지를 위해서는 심재, 즉 Stile과 Ladder의 수를 증가시킬 필요는 없지만 사용재료에 따라 좌굴응력이 작은 재료를 선택 사용하는 경우에는 좌굴응력을 시뮬레이션하여 소성변형이 생기지 않도록 그 수 및 간격도 조정할 필요가 있다고 생각된다.

5. 목재문의 틀어짐을 방지하기 위해서는 양 표면재의 물리적이나 기계적 성질이 동일하도록 하는 것이 원칙이다. 그러나 사용재료의 변이계수가 크면 동일 재료를 사용한 경우에도 틀어짐이 발생할 수 있다. 변이계수는 합판보다 경질섬유판이 작기 때문에 이러한 점에서는 유리하다고 할 수 있다. 그러나 경질섬유판의 치수변동이 합판보다 약 2배에 이르며 또한 함수율 증가시 탄성계수 감소폭이 크므로 고습조건에서 합판에 비해 좌굴이 생기기 쉽다는 단점이 있다. 특히 여름철 야적시는 고습상태에 장기간 노출되기 쉬우므로 좌굴에 의한 소성변형으로 인해 문 표면의 심재부분에 요철(telegaphing)이 발생되기 쉽다고 생각된다.

참 고 문 헌

1. ASTM. 1990. Standard methods of evaluating the properties of wood-base fiber and particle panel materials. D1037-89.
2. Bodig, J., and B.A. Jayne. 1982. Mechanics of wood and wood composites. Van Nostrand Reinhold. pp125.

3. Currier, R.A. 1957. Effect of cyclic humidification on dimensional stability of commercial hardboard. Forest Products J. 7(3): 95-100.
4. Daniel, I. M., and O. Ishai. 1994. Engineering mechanics of composite materials. Oxford University Press. pp200-227.
5. Hearmon, R.F.S. 1948. The elasticity of wood and plywood. Dept. of scientific and industrial research. Forest Products Research. Special report No. 7.
6. Kohta, M., and S. Shiigehiko. 1997. Linear expansion of wood-based panel products caused by moisture content treatment. Wood industries. 52(7): 342-347.
7. Kwiatkowski, K., and Paprzycki. 1984. Durchbiegung unbeschichteter bzw. beidseitig beschichteter plattenformiger Holzwerkstoffe unter Temperatureinwirkung. Holztechnologie. 25(6): 314-318.
8. McNatt, J. D. 1974. Effects of equilibrium moisture content changes on hardboard properties. Forest Products J. 24(2): 29-35.
9. McNatt, J.D. 1975. Humidity effects on properties of structural particleboards from forest residues. USDA Research paper. FPL 267.
10. McNatt, J.D., and G. Myers. 1993. Selected properties of commercial high-density hardboards. Forest Products J. 43(4): 59-62.
11. Myers, G.C. 1982. Response of experimental hardboard dimensions and weight to cyclic relative humidity. Forest Products J. 32(7) : 41-44.
12. Reddy, J.N., and A. Miravete. 1995. Practical analysis of composite laminates. CRC press. pp51-80.
13. Suchsland, O. 1971. Linear expansion of veneered furniture panels. Forest Products J. 21(9):90-96.
14. Suchsland, O., and J.D.McNatt. 1985. On the warping of laminated wood panels. Report on cooperative study between U.S. FPL, and Forstry Dept., Michigan State Univ., East Lansing, Mich. pp120.
15. Suchsland O., and G.E. Woodson. 1986. Fiberboard manufacturing practices in the United States. USDA Forest Service. Agriculture handbook No. 640. pp222-223.

16. Suchsland, O., and H. Xu. 1989. On the measurement of linear expansion of particleboard and medium density fiberboard. *Forest Products J.* 39(6): 39-42.
17. Suchsland, O. 1990. Estimating the warping of veneered furniture panels. *Forest Products J.* 40(9): 39-43.
18. Suchsland, O., F. Yonggang, and D. Xu. 1995. The Hygroscopic warping of laminated panels. *Forest Products J.* 45(10): 57-63.
19. Szabo, T., and S.U. Grierson. 1976. Improved method for linear expansion measurement in hardboards. *Forest Products J.* 26(1): 54-56.
20. Szalai, J. 1981. Ermittlung der Verformung zweiseitig furnierter Platten infolge Feuchteänderung mit den methoden der Festigkeitslehre. *Holztechnologie.* 22(4): 235-239.
21. Timishenko S.P., and Gere J.M. 1961. *Theory of elastic stability.* McGraw-Hill, Inc. pp386-387.
22. Tong, Y., and O. Suchsland. 1993. Application of finite element analysis to panel warping. *Holz als Rohund Werkstoff.* 51: 55-57.
23. Watkinson, P.J. and N.L. van Gosliga. 1990. Effect of humidity on physical and mechanical peoperties of New Zealand wood composites. *Forest Products J.* 40(7/8): 15:20.
24. Xu, W., and O. Suchsland. 1997. Linear expansion of wood composites : A model. *Wood and Fiber Science.* 29(3): 272-281.
25. 木材工業 핸드ブック. 1982. 丸善株式會社.
26. 藤田彰介, 佐野弥三郎, 岩下睦. 1976. ファイバーボード, パティクルボードの加工. pp210-219. 森北出版株式會社.
27. 강육. 1999. 목재 프러쉬 문의 함수율 변동에 따른 틀어짐과 좌굴 예측모델. 농학박사학위논문. 서울대학교.
28. 목재 가정용 가구(옷장 및 이불장). 1989. KS G 4008. 한국공업표준협회.
29. 정회석, 이남호. 1994. 실내의 온도, 상대습도와 목재 평형함수율의 년중 변이. *한국임학회지* 83(4): 540-544.
30. 정우양. 1992. 家具 및 建築用 木製 프러시도어의 길이굽음 變形發生 原因應力에 관한 연구. *목재공학.* 20(3): 39-54.