

木製 프러쉬 문의 함수율 변동에 따른 틀어짐과 좌굴 예측모델 (II) :
치수변동과 탄성계수의 간이측정법과 불량율 예측
Monte Carlo 시뮬레이션^{*1}

강 옥^{*2} · 정 희 석^{*2}

**Warping and Buckling Prediction Model of Wooden Hollow
Core Flush Door due to Moisture Content Change (II)
: Simple Method of LMC and MOE, and Monte Carlo
Simulation for Calculating Reject^{*1}**

Wook Kang^{*2} · Hee-Suk Jung^{*2}

ABSTRACT

Even the same materials are assembled in flush door skin panel, warping is not simply prevented under the changes of environmental conditions since wood and wood-based material have large variations in their physical and mechanical properties.

The parameters such as linear movement coefficient(LMC), modulus of elasticity (MOE), required to predict warping could be estimated by oven drying method and dynamic method instead of American Society for Testing Materials(ASTM) procedure. The relationship between warping and LMC was curvilinear, while it between warping and MOE was linear. LMC had a larger effect on warping than MOE. Material propensity of skin panel such as hardboard and plywood showed normal distributions. The variation of material properties, however, was much larger in plywood than in hardboard. Monte Carlo simulation also indicated that rejection ratio of flush door due to the occurrence of warping could be predicted with consideration of the relationship of warping and parameters of probability distribution of MOE, LMC, and moisture content.

Keywords : warping, wooden hollow core flush door, linear movement coefficient, normal distribution, Monte Carlo simulation

^{*1} 접수 1999년 4월 8일, Received Apr. 8, 1999

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

- 요약 -

목재와 목질재료는 물리적 및 기계적 성질에 큰 변이를 지니므로 프러쉬 문의 표면재를 동일한 재료로 제조하는 경우에도 주위 환경의 변화에 따라 틀어짐이 발생될 수 있다.

틀어짐을 예측하는데 필요한 치수변동계수(LMC)와 탄성계수 등은 ASTM 규정대신에 전건법과 동적 탄성계수로 추정할 수 있었다. 틀어짐과 LMC간 관계는 곡선적이지만, 틀어짐과 탄성계수간에는 선형관계를 나타내었다. 경질섬유판과 합판과 같은 표면재의 재료성질은 정규분포를 나타내었다. 그러나 그 변이는 경질섬유판보다 합판이 훨씬 더 컸다. 확률분포 모수와 틀어짐의 관계를 이용해 몬테카를로 시뮬레이션을 한 결과 틀어짐의 발생 크기에 따른 프러쉬 문의 불량률을 예측할 수 있었다.

1. 서론

목재와 목질재료는 흡습성 물질이므로 외기상태 온습도에 따라 목재내 수분이 흡탈착하게 되는데 이 과정에서 수축 또는 팽윤이 일어나 치수가 변동하게 된다. 이에 따라 문의 표면재와 배면재(face and back)에 발생하는 내부응력이 다르면 목재문은 틀어지게 된다. 즉, 양 표면재간의 응력 불균형에 의해 틀어짐이 발생한다고 할 수 있는데, 이 응력 불균형은 고유불균형(natural unbalance), 구조불균형(systematic unbalance)으로 대별할 수 있다. 고유불균형이란 문의 양쪽 표면재에 동일 재료를 사용했을 때 발생하는 것인데, 그 이유는 목재는 천연물체이므로 동일 수종이라도 물리적 및 기계적성질에 자연변이(natural variation)를 가지고 있기 때문이다. 따라서 틀어짐 발생 정도는 사용된 재료의 물리적 성질과 기계적 성질의 변이계수에 따라 다르다. 반면에 구조불균형이란 문의 양 표면에 사용된 재료가 다르거나 단면이 기하학적으로 비대칭일 때 틀어짐이 발생하는 것으로, 문의 외관 디자인이나 비용절감 등으로 인해 비대칭으로 제조되는 경우가 해당된다.

목製 문의 틀어짐은 제조 당시 또는 사용환경에서 발생하는 것이 불가피하다. 목재나 목질재료의 변이로 인해 양 표면재의 내부응력을 동일하게 하는 것은 매우 곤란하다. 따라서 틀어짐이 전혀 발생되지 않게 제조하는 것은 현실적으로 불가능하다는 사실을 경험적으로 잘 알고 있기 때문에 각국의 관련규격에서 그 허용 틀어짐을 규정하고 있다.

그러므로 한국공업규격(KS, 1989)에서는 장롱문에 있어 허용 틀어짐을 2mm/1000mm이하로 규정하고 있다. 그러나 American National Standards Institute (ANSI, 1980)에서는 치수가 900mm×2100mm×35mm 이상인 프러쉬 문의 경우에는 제품 전체치수에 대한

여 허용 틀어짐을 6mm 이하로 규정하고 있으며, 또한 심재의 두께가 19mm, 11mm, 6mm인 문을 가구부재에 대해 허용 틀어짐을 각각 0.7mm/300mm, 0.9mm/300mm, 1.3mm/300mm 이하로 규정하고 있어 KS와는 약간 상이한 면이 있다.

정 등(1994)은 목재의 국내 연간 실내 평형함수율에 대해 조사하였으며, 강 등(1999)은 hollow core 형태의 프러쉬 문의 함수율 변동에 따른 틀어짐과 좌굴을 예측할 수 있는 방법을 제시한바 있다.

목질재료의 선팽윤(linear expansion)의 정밀측정 방법은 Suchsland(1970)에 의해 제시된 바 있는데, American Society for Testing Materials(ASTM, 1990)에서 규정하고 있는 방법으로 측정하면 평형상태에 도달하는 시간이 오래 걸리게 된다(두께 10mm 경우 약47일). 이를 개선하기 위해 Barnes 등(1978)은 파티클보드에 대해 VPS (Vacuum-Pressure-Soak)법과 ASTM방법을 비교한 결과 상당히 높은 상관관계를 나타냈다고 한다. 또한 Szabo 등(1976)은 경질섬유판에 대해 ASTM 규정대로 시험한 결과 시편치수를 2배로 하면 평형상태에 도달하는 기간도 거의 2배로 단축될 수 있다고 보고하였다. 그리고 Suchsland 등(1989)은 파티클보드와 MDF의 선팽윤계수 측정에 있어 전건법과 ASTM법은 상관관계가 매우 높게 나타났다고 한다.

Suchsland(1986)는 목질 적층패널의 확률분포에 따른 컴퓨터 시뮬레이션을 하였는데 그 이유는 양면이 대칭이 되게 재료를 사용하더라도 목질재료의 자연변이로 인해 틀어짐이 발생되므로 각 영향인자에 따른 틀어짐 정도를 알아보기 위해서였다. 이 때 모든 분포는 정규분포라 가정하였다. Kline 등(1987)은 Monte Carlo 시뮬레이션은 시스템의 영향인자 데이터로부터 시스템 거동에 대한 정보를 얻을 수 있는 방법이며, 일반적으로 관측치로부터 특정 확률분포를

수를 선택하는 이론적 방법은 없다고 하였다. Law 등(1991)은 최적분포 검정방법과 각 분포에 따른 random variate를 발생시키는 방법을 잘 나타내었으며 Hayashi 등(1993)은 휨강도의 최적확률분포를 구하기 위해 최우법(log-likelihood test)과 KS검정(Kolmogorov-Smirnov test)을 실시한 결과 정규분포나 대수정규분포보다 3 모수 와이벌분포에 더 근사하지만, 실용적으로 정규분포를 적용할 수 있다고 한 바 있다.

Hirashima 등(1994)은 종진동법으로 구한 집성재의 탄성계수가 정규분포와 대수정규분포 2가지 분포 가정하고 χ^2 분포 적합도 검정결과 대수정규분포에 더 가깝다고 하였다. Taylor(1995)는 공업화 목재 시스템에 대한 Monte-Carlo simulation 방법의 적용 예 및 그 개괄에 대해 잘 설명하였으며 Mihashi 등(1996)은 일본산 cedar 집성재의 비파괴 휨 MOE 측정결과 정규, 대수정규, 와이벌 3분포함수에 대해 KS 검정결과 정규과 와이벌분포 2개는 거의 동일하였지만, 대수정규분포는 떨어졌다. 따라서 일반적인 정규분포로 가정하고 시뮬레이션하였다.

따라서 본 연구에서는 수분변화에 따른 주택용 hollow core type의 flush door 틀어짐 및 좌굴 예측에 필요한 탄성계수, 치수변동을 등을 구하기 위해서, 신속하게 측정할 수 있는 비파괴시험에 의한 동적탄성계수와 전진법에 의한 수축율의 적용가능성에 대해 알아보고자 한다. 또한 목질재료의 자연변이로 인해 해석적 방법만으로는 틀어짐 현상을 설명하기 어려우므로 확률분포모형하에서 불량율을 예측할 수 있는 기법을 제시하여 제조전 설계단계에서 사용되는 재료의 종류나 문의 형태에 따라 틀어짐 발생정도를 예측할 수 있도록 하고자 한다.

2. 재료 및 방법

목재 프러쉬 문의 표면재로 대부분 사용되는 합판과 경질섬유판을 공시재료로 선택하여 함수율 변동에 따른 치수변동과 탄성계수를 측정하기 위해 각각 3×70×500mm 시험편을 채취하였다. 치수변동계수는 양단에서 약 1cm 떨어진 지점에 철물을 고정시켜 측정하였으며 비파괴 정적 인장탄성계수와 함수율 등은 ASTM 1037(1990)에 따라 조사하였다.

심재의 수종은 Meranti를 선정하여 탄성계수로 측정된 비파괴 휨탄성계수를 적용하였으며, 정적 탄성

계수와 동적 탄성계수와와의 관계를 알아보기 위해 Metriguard사에서 제작한 Stress wave timer를 사용하여 동적 탄성계수($E_d = dV^2/g$)를 함께 측정하였다.

Plate-Buckling 예측모델(강 등, 1999)의 가정하에서 목재문의 틀어짐에 영향을 미치는 표면재와 배면재의 치수변동과 탄성계수 차이에 대해 수치 시뮬레이션(analytical simulation)을 하고, 또한 합판과 경질섬유판의 틀어짐 영향인자인 선펡윤계수와 탄성계수의 측정 데이터에 대한 최적분포를 계산하였다.

이 때 가정 근사분포는 정규분포, 대수정규분포, 와이벌분포 등 3가지로 한정하여 P-P 선도(probability-probability plot), Q-Q 선도(quantile-quantile plot) 비교(Law 등, 1991) 및 SIMAN 프로그램(Pegden 등, 1990)을 이용해 χ^2 와 KS(Kolmogorov-Smirnov) 적합도 검정(goodness-of-fit hypothesis test)을 하여 최적분포와 그 모수를 계산하였다.

이를 토대로 양면이 모두 합판 또는 경질섬유판인 대칭인 경우와 표면은 합판이고 배면은 경질섬유판인 비대칭인 3가지 형태의 목재 프러쉬 문에 대해 실내 평형함수율을 고려한 년중 틀어짐 발생을 Monte Carlo simulation을 실시하여 틀어짐 발생빈도를 계산한 후, KS 등 규정을 초과하는 불량율의 연간변동도 예측해 보았다. 이 때 flush door의 치수는 두께 36×폭 500×길이 2000mm라고 가정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 치수변동과 탄성계수 측정법

3.1.1 선펡윤계수 측정

기전에서 전진상태까지 치수가 수축될 때 치수변동계수와 상대습도 45%에서 상대습도 85%로 치수가 변화될 때 것을 비교한 결과는 Table 1과 같다.

합판은 흡습에 의한 치수변동계수가 탈습보다 더 크게 나타났지만, 경질섬유판의 경우에는 그 반대로 나타났으며 그 차는 매우 작음을 알 수 있었다.

Suchsland(1989)가 조사한 바에 따르면 상대습도 50%에 평형상태 도달된 시험편을 103℃에서 전진상태까지 수축시켜 치수변동계수를 구한 것과 상대습도 47%에서 상대습도 81%까지 팽윤시켜 구한 것의 치수변동계수를 비교하였는데, 파티클보드의 경우 전진법에 의한 치수변동계수가 상대습도 47%에서 상대습

Table 1. Comparison of linear movement coefficient($\times 10^{-3}$) between adsorption and desorption

Material	Direction	No. of specimen	RH45% to RH85% at 26°C	Air-dry to oven-dry
Plywood	α_1	54	0.161 \pm 0.032	0.147 \pm 0.022
	α_2	18	0.222 \pm 0.039	0.162 \pm 0.019
Hardboard	α_1	54	0.478 \pm 0.035	0.500 \pm 0.035
	α_2	18	0.495 \pm 0.049	0.512 \pm 0.039

± : standard deviation

Table 2. Static and dynamic MOE for small specimen

Material	No. of specimen	Static MOE ($\times 10^3$ kgf/cm ²)	Dynamic MOE ($\times 10^3$ kgf/cm ²)	Static/Dynamic
Plywood	216	52 \pm 10	58 \pm 10	0.893
Hardboard	216	35 \pm 5	47 \pm 3	0.737
Solidwood	40	111 \pm 29	126 \pm 29	0.884

도 81%의 것보다 약간 작았다고 하며, MDF의 경우에는 그 반대로 나타났다고 하는데 본 연구결과와도 잘 일치함을 알 수 있다.

전건법과 상대습도 변화법에 의한 합판과 경질섬유판의 치수변동 거동이 다른 이유는 구성 요소(element) 크기에 기인하거나, 일반적으로 상대습도에 따른 목질재료의 함수율변동은 선형이 아니라 “S”자 형태를 나타내어 저습과 고습에서 기울기 차의 상이함에 그 원인이 있다고 추정된다.

또한 여러 목질재료에 대해 Kohta 등(1997)이 50°C, 상대습도 90% 조건에서 36시간 방치시킨 후 60°C에서 탈습시킨 것과, 60°C에서 22시간 건조시킨 것을, 상대습도 90% 25°C, 상대습도 50%로 흡습시킨 선풍운계수를 비교하였는데 상관계수가 0.998로 상관관계가 매우 높은 것으로 나타나 본 연구결과와 유사하였다.

그리고 Barnes 등(1976)은 파티클보드에 대해 VPS(Vacuum-Pressure-Soak)법과 ASTM방법을 비교한 결과 상당히 높은 상관관계를 나타난 것으로 보아, 측정방법간에 선풍운계수의 정확도 차이는 있지만, ASTM 등에서 규정한 방법으로 치수변동(20 \pm 3°C, 상대습도 50%→90%)을 조사한다는 것은 장시간이 소요되기 때문에 연구 목적을 제외하고는 실제적으로 적용한다는 것은 매우 어렵다.

따라서 목제문 제조에 사용되는 목질판상재의 물리적 및 기계적 성질은 제조조건, 즉 사용수종 등에 따라 차이가 크므로 이를 제조전에 가능한한 신속하게 평가할 필요가 있으므로, 간이방법의 하나로 전건법에 의해 신속하게 선풍운계수를 측정하여 틀어짐을 추정할 수 있다고 생각된다.

3.1.2 탄성계수

치수가 500×70mm인 소시편의 합판과 경질섬유판의 정적 인장탄성계수와 동적 인장탄성계수를 측정 비교한 결과는 Table 2와 같이 모두 동적탄성계수가 약간 더 크게 나타났다. 합판과 목재의 그 비는 약 0.9로 유사하였으나 고밀도 섬유판은 0.74로 합판에 비해 그 비가 더 적은 것으로 나타났다.

그리고 Fig. 1에서 보는 바와 같이 상관계수는 경질섬유판 0.906, 합판 0.920, 목재 0.980순으로 나타났다. 합판과 경질섬유판의 경우는 인장탄성계수이며 목재는 휨탄성계수이므로 정적 탄성계수 측정방법에 따라서도 약간 차이가 있는 것을 알 수 있었다.

또한 치수가 2180×490mm인 실제 문치수에 가까운 실대시편에 대해서도 비교하여 본 결과, Table 3에서 보는 바와 같이 소시편과는 약간 다르게 나타났다.

Table 3. Static and dynamic MOE for actual specimen.

Material	No. of specimen	Static MOE ($\times 1000 \text{ kg/cm}^2$)	Dynamic MOE ($\times 1000 \text{ kg/cm}^2$)	Static/Dynamic
Plywood	17	48 ± 5	67 ± 11	0.725
Hardboard	17	37 ± 9	46 ± 2	0.811

합판의 경우 정적 탄성계수와 동적탄성계수 비가 0.725로 경질섬유판보다 더 적게 나타났으며 두 경우 모두 상관계수가 작은 시편에 비해서는 현저히 저하되었다. 그리고 정적인장탄성계수와 동적탄성계수간 상관계수는 경질섬유판 0.700, 합판 0.862로 나타났는데, 소시편의 경우보다는 상관관계가 낮은 이유는 측정수가 작은 것이 주원인이라 생각된다.

E_1, E_2 는 각각 $50569 \text{ kg/cm}^2, 61881 \text{ kg/cm}^2$ 이라 가정하여 시뮬레이션을 하였다. 그리고 심재의 함수율변동은 없고 탄성계수가 $100,000 \text{ kg/cm}^2$ 이며 심재비는 0.12라 가정하였다.

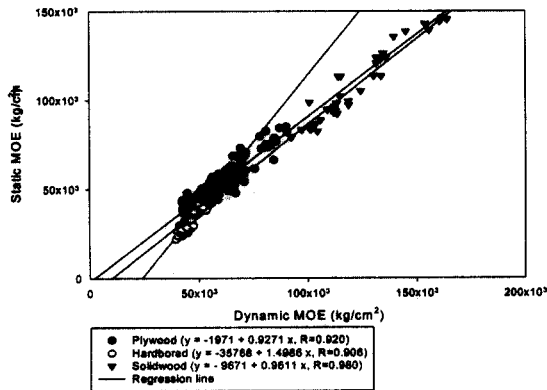


Fig. 1. Correlation between dynamic and static MOE of plywood, hardboard and solidwood.

3.2 틀어짐 시뮬레이션

3.2.1 수치 시뮬레이션

시뮬레이션에 가정한 문의 치수는 $2000 \times 500 \times 36 \text{ mm}$ 이고 가정하고 함수율 변동은 1%라 가정하여 표면재와 배면재간 치수변동계수와 탄성계수 차이에 대해 수치 시뮬레이션(analytical simulation)을 실시하였다.

표면재와 배면재간의 치수변동계수와 탄성계수 차이에 따른 틀어짐을 알아보기 위해 표면재와 배면재를 합판이라 가정하여 포아손비는 0.0415이고 두께는 3mm로 동일하며 표면재의 $\alpha_1=0.000161, \alpha_2=0.000222,$

Fig. 2. The effect of the linear movement coefficient and MOE ratio between face and back on warping in desorption process. $MOE_b = \text{MOE of back}, MOE_f = \text{MOE of face}$

Fig. 3. The effect of the linear movement coefficient and MOE ratio between face and back on warping in adsorption process.

그 결과는 Fig 2와 Fig. 3에서 보는 바와 같이 프러쉬 문의 틀어짐은 흡습시나 탈습시 모두 표면재와 배면재간 치수변동계수와 탄성계수 비가 증가할수록 틀어짐이 증가하였다. 흡수율 1% 변동에 따른 탈습 과정에서 틀어짐 크기는 $\frac{\alpha_b}{\alpha_f}=1$ 이고 $\frac{MOE_b}{MOE_f}=3$ 인 경우 약 1mm/2000mm이지만 $\frac{\alpha_b}{\alpha_f}=3$ 이고 $\frac{MOE_b}{MOE_f}=1$ 인 경우 약 3.5mm/2000mm로 나타났으며, 흡습과정에서는 $\frac{\alpha_b}{\alpha_f}=1$ 이고 $\frac{MOE_b}{MOE_f}=3$ 인 경우 약 0.89mm/2000mm, $\frac{\alpha_b}{\alpha_f}=3$ 이고 $\frac{MOE_b}{MOE_f}=1$ 인 경우 약 0.92mm/2000mm로 나타났다.

따라서 탈습과정에서는 표면재나 배면재의 탄성계수보다는 치수변동계수 영향이 더 크지만 흡습과정에서는 그 영향이 매우 유사함을 알 수 있었다.

또한 틀어짐은 탄성계수와는 곡선비례, 치수변동계수와는 직선비례 관계에 있는 것을 알 수 있으며, 탈습시에는 표면재와 배면재간 탄성계수나 치수변동계수 비가 증가할수록 틀어짐은 증가되지만, 흡습시에는 틀어짐이 어느 정도에 한계에 도달하면 더 이상 증가되지 않는 것을 알 수 있다. 그 이유는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 탄성계수와 치수변동계수 비가 증가됨에 따라 표면재에 비해 배면재의 주응력이 급격

Fig. 4. The effect of the linear movement coefficient and MOE ratio between face and back on the buckling stress.

히 증가되고 배면재에서 좌굴응력이 좌굴 임계응력보다 커지게 되면 틀어짐은 더 이상 진행되지 않고 좌굴변형이 발생되기 때문이다.

3.2.2 Monte Carlo 시뮬레이션

이제까지 살펴 본바에 따르면 목재 프러쉬문에 있어 표면재와 배면재의 사용재료와 두께가 같다면 틀어짐은 발생되지 않는다. 그러나 목질재료는 천연물체이므로 고유변이를 갖기 때문에 목재 프러쉬 문에 있어 표면재와 배면재에 두께가 동일한 재료를 사용하여도 틀어짐이 발생하게 된다. 왜냐하면 동일한 재료이더라도 탄성계수와 치수변동계수는 차이가 있을 수 있기 때문이다.

따라서 표면재와 배면재가 일정 확률분포를 갖는 경우 틀어짐이 어떠한 분포를 나타낼 것인지를 알아보기 위한 Monte Carlo 시뮬레이션을 하기 위하여, 틀어짐의 주요인에 대한 시험을 하였는데 탄성계수, 흡수율, 밀도 등은 기전상태의 것을 측정하였으며 선펡창계수(LMC)는 상대습도 45%에서 상대습도 85%로 변화시켜 측정하였다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 합판과 경질섬유판의 밀도와 동적탄성계수간 상관계수는 각각 0.389, 0.699로 나타났는데, 합판의 상관계수가 작은 이유는 각 프라이(ply) 두께 구성비율과 방향별 탄성계수가 동적탄성계수에 미치는 영향이 지배적이기 때문이라 생

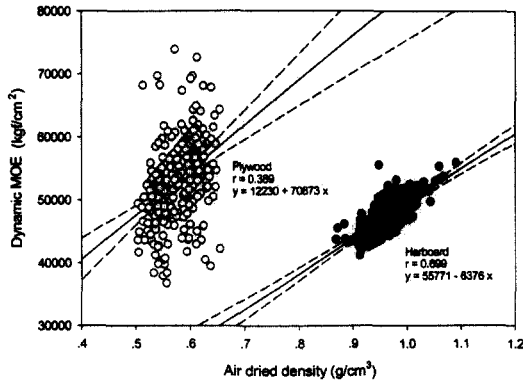


Fig. 5. Relationship between density and dynamic MOE of plywood and hardboard.

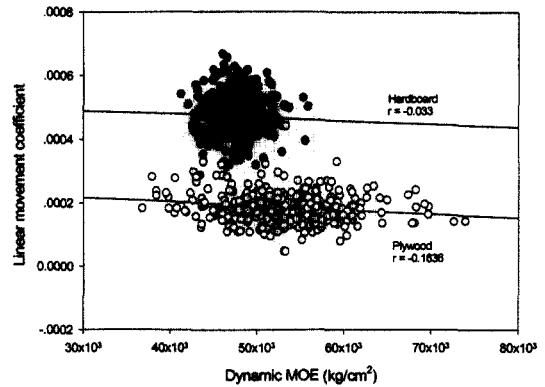


Fig. 6. Relationship between dynamic MOE and the linear movement coefficient of hardboard and plywood.

Table 4. Best fitted distribution of some factors on the wooden door warping

Materials	Properties	No. of specimen	Squared error			Best fit (parameters)
			Normal	Weibull	Lognormal	
Plywood	MOE(kgf/cm ²)	327	0.004288	0.007145	0.0405	Normal (53.2 × 10 ³ , 6.2 × 10 ³)
	LMC ¹⁾	327	0.002819	0.005875	0.002644	Lognormal (0.0001859, 0.00005)
	MC(%)	327	0.00304	0.009726	0.006008	Normal (12.9, 0.66)
	Air dried density(g/cm ³)	327	0.007351	0.00643	0.01164	Weibull (0.1103, 3.28)
Hardboard	MOE(kgf/cm ²)	331	0.001941	0.002099	0.02107	Normal (47.4 × 10 ³ , 2.4 × 10 ³)
	LMC	331	0.008076	0.008306	0.02593	Normal (0.0004714, 0.000076)
	MC(%)	331	0.002933	0.01019	0.003513	Normal (8.2, 0.42)
	Air dried density(g/cm ³)	331	0.003746	0.00773	0.01008	Normal (0.96, 0.031)

* 1) LMC : linear movement coefficient

Normal(μ, σ), Lognormal(μ, σ), Weibull(β, α)

μ, σ : mean and standard deviation, β, α : scale and shape parameter

각된다. 그러나 탄성계수와 선펡창계수간에는 Fig. 6과 같이 상관관계가 거의 없었다. 따라서 틀어짐 계산시 입력값인 탄성계수와 선펡창계수는 서로 독립적이라 할 수 있다.

틀어짐의 주요인에 대한 근사분포 대상을 정규분포, 와이벌분포, 대수정규분포, 3가지로 한정하고 측정데이터에 대해 분석한 결과 P-P선도와 Q-Q선도를 비교하고 적합도 검정을 하여 최적분포(best fit)를 계산한 결과는 다음 Table 4와 같았다.

합판의 선펡창계수는 대수정규분포, 밀도가 와이벌분포를 한 것을 제외하고는 모두 정규분포가 최적분포로 나타났다. 그러나 합판의 선펡창계수와 밀도의 경우도 정규분포와의 오차의 차이가 그다지 크지 않기 때문에 목재문의 틀어짐에 대한 Monte Carlo 시뮬레이션은 모두 정규분포라 가정하여도 무방하다고 생각한다.

이는 Hirashima 등(1994)이 미국산과 일본산 집성재용 약 100개의 각 라미나에 대해 종진동법으로 구

한 탄성계수가 정규분포와 대수정규분포라 가정하고 χ^2 적합도 검정한 결과 대수정규분포에 더 가깝다는 결과와는 상반되지만, Mihashi 등(1996)이 삼나무(*Cryptomeria japonica* D. Don)의 탄성계수에 대해 정규분포, 대수정규분포, 와이벌분포 등 3가지 추정분포에 대해 KS 적합도 검정결과 정규분포와 와이벌분포 2가지는 거의 동일하지만, 대수정규분포는 그 오차가 더 크게 나타났는데 Monte Carlo 시뮬레이션시 정규분포라 가정한 결과와는 동일하였다.

또한 Suchsland 등(1986)이 적층판넬에 대한 틀어짐 시뮬레이션시 탄성계수와 선펡창계수를 모두 정규분포로 가정한 것과는 잘 일치됨을 알 수 있었다.

그리고 측정분포와 추정분포의 오차는 P-P선도에서는 중앙부에서 크게 나타나고, Q-Q선도에서는 양끝(tail)부분에서 크게 나타남을 알 수 있었다. 그리고 P-P 및 Q-Q선도의 결과와 적합도 검정결과가 거의 일치함을 알 수 있으며 합판과 경질섬유판의 동적탄성계수와 치수변동계수의 측정분포와 추정분포의 형

Fig. 7. The linear movement coefficient distribution of plywood and hardboard.

Fig. 8. Dynamic MOE distribution of plywood and hardboard.

Table 5. The wooden flush door types for simulation and results

Type	Material	Face	Back	Simulated warping	
				Maximum (mm)	Over 6mm (%)
I		Plywood	Plywood	10.1	9.2
II		Hardboard	Hardboard	7.6	2.2
III		Plywood	Hardboard	9.8	12.6

상을 비교한 그림은 Fig. 7 및 Fig. 8과 같이 매우 근사함을 알 수 있었다.

목재문 치수가 2000×500×36mm일 때, 표면재와 배면재에 따른 문의 종류가 Table 5와 같이 3가지인 경우에 대해 시뮬레이션하였는데 그 가정은 다음과 같다.

가정 1. 표면재와 배면재의 선펡창계수 및 탄성계수는 정규분포라 가정하고 그 평균값과 표준편차값은 Table 1의 결과를 적용하였으며

가정 2. 심재의 함수율 변동과 표면재와 배면재의 두께 변동은 무시하고

가정 3. 기건상태 합판과 경질섬유판이 탈습되는 과정의 틀어짐을 알기 위해 함수율 감소폭은 각각 4%와 2%로 하였다.

가정 3의 함수율 변동은 정 등(1994)의 조사에 의하면 겨울에 목재의 아파트 실내평형함수율이 7.7% 이었다고 하므로 제조당시 함수율 12% 목재의 경우 약4.3%의 함수율 감소가 이루어진다는 사실에 근거한 것이다.

상기 가정을 적용하여 계산한 결과, Table 5에서 보는 바와 같이 양면이 합판이거나 경질섬유판으로 대칭인 경우에도 틀어짐이 발생하는 것을 알 수 있으며, 양면이 경질섬유판인 것은 틀어짐이 6mm 이상인 것이 2.2%로 합판의 9.2%에 비해 틀어짐 발생정도가 작은 것을 알 수 있었다. 그 이유는 경질섬유판의 탄성계수와 선펡창계수 변이가 합판보다 더 작기 때문이다.

또한 예측되는 바와 같이 일면이 합판이고 다른면이 경질섬유판인 비대칭인 경우에는 틀어짐 6mm 이상이 12.6%로 단면이 대칭인 경우보다 틀어짐 발생정도가 더 크게 나타났다.

상기 결과로부터 틀어짐을 감소시키기 위해서는 양면에 동일한 재료를 사용하여야만 하지만, 동일한 경우에도 틀어짐 불량을 완전히 방지하는 것은 매우 어렵다는 사실을 알 수 있다. 따라서 사용재료의 변이

를 감소시키는 방안에 대한 연구가 필요하며 플러쉬 도어의 두께를 증가시키는 방안에 대해서도 검토할 필요가 있다고 생각된다.

4. 결 론

木製 문의 틀어짐은 제조 당시 또는 사용환경에서 발생하는 것을 완전히 방지한다는 것은 매우 어렵다. 그 이유는 목재나 목질재료의 고유변이로 인해 양 표면재의 내부응력을 동일하게 설계 또는 제조가 매우 곤란하기 때문이다. 따라서 틀어짐이 전혀 발생되지 않게 제조하는 것은 현실적으로 불가능하다는 사실을 경험적으로 잘 알고 있기 때문에 각국의 관련규격에서 그 허용 틀어짐을 규정하고 있다.

그러므로 제조전 설계단계에서 사용재료의 성질에 따른 목재문의 틀어짐 발생빈도를 예측할 수 있는 방법에 대해 조사한 결과는 다음과 같다.

1. 목재문 생산현장에서 틀어짐불량을 방지하기 위해 시뮬레이션에 필요한 사용재료의 치수변동 및 탄성계수를 알기 위해서는 전건법 및 동적탄성계수 측정법을 적용할 수 있음을 알 수 있었다.

2. 목재 플러쉬 문이 틀어지는 현상은 표면재와 배면재의 함수율 변동에 따른 치수와 탄성계수 변화로 인해 발생되는데 판-좌굴이론 모델을 토대로 시뮬레이션한 결과, 틀어짐과 탄성계수의 관계는 직선비례, 치수변동계수와는 곡선비례 관계에 있는 것으로 나타났다. 또한 틀어짐에 대한 영향은 탄성계수보다 치수변동계수가 더 큰 것으로 나타났다.

3. 합판과 경질섬유판의 밀도와 동적탄성계수 상관계수는 각각 0.389, 0.699로 나타났는데, 합판의 상관계수가 작은 이유는 각 프라이(ply) 두께 구성비율과 방향별 탄성계수가 동적탄성계수에 미치는 영향이 지배적이기 때문이라 생각된다. 그리고 동적탄성계수와

치수변동간의 상관관계는 거의 없는 것으로 나타났다.

4. 치수변동계수와 탄성계수의 확률분포는 정규분포라 가정하여도 큰 무리가 없는 것으로 나타났다. 표면재와 배면재의 사용재료가 동일하여도, 즉 양면이 합판 또는 경질섬유판의 경우, 실내평형함수율이 낮은 겨울에 길이가 2000mm인 목재문에 있어서 틀어짐이 6mm 이상인 것이 각각 9.2%, 2.2% 정도 발생할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 목재문 제작에 사용되는 재료의 물리적 및 기계적 성질 변이계수 크기에 따라 불량율이 달라지므로, 향후 확률분포 및 그 모수에 대한 연구가 진행된다면 Monte Carlo simulation 기법을 사용하여 틀어짐 및 좌굴 불량율을 예측할 수가 있다고 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. Barnes, H.M., and S. Wang. 1976. Comparison of linear expansion test methods for particle-board. Forest Products J. 26(8): 27-28.
3. Bryan, E.L. 1962. Dimensional stability of particle-board. Forest Products J. 12(12): 572-576.
4. Hayashi, T., and S. Oshiumi. 1993. Bending strength distribution of laminated-veneer-lumber for structural use. The Journal of the Japan Wood Research Society. 39(9): 985-992.
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. Hirashima, Y., Y. Yamamoto, and S. Suzuki. 1994. Modeling for the strength of glulam beams and for their probabilistic distribution. The Journal of the Japan Wood Research Society. 40(11): 1172-1179.
7. Kline, D.E., D.A. Bender, and J.L. Nieber, 1987. Modified regression approach for modeling probability distribution. Transactions of the ASAE. 30(3): 697-702
8. Kohta, M., and S. Shiigehiko. 1997. Linear expansion of wood-based panel products caused by moisture content treatment. Wood industries. 52(7): 342-347.
9. Law, A.M., and W.D. Kelton. 1991. Simulation modelling and analysis. McGraw-Hill, Inc.
10. Mihashi, H., N. Itagaki, Y. Ito, and N. Suzuki. 1996. Analytical model for the design of performance in glulam beams of Japanese cedar I. Prediction model for flexural strength including the effect of the reinforcement by laminating and of the plastic deformation in the compressive zone. The Journal of the Japan Wood Research Society. 42(2): 122-129.
11. Pegden, D.C., R.E. Shannon and R.P. Sadowski. 1990. Introduction to simulation using SIMAN. McGraw-Hill, Inc.
12. Suchsland, O. 1970. Optical determination of linear expansion and shrinkage of wood. Forest Products J. 20(6): 26-29.
13. Suchsland, O., and J.D. McNatt. 1986. Computer simulation of laminated wood panel warping. Forest Products J. 36(11/12): 16-23.
14. 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.
15. Szabo, T., and S.U. Grierson. 1976. Improved method for linear expansion measurement in hardboards. Forest Products J. 26(1): 54-56.
16. Taylor, S.E., M.H. Triche, D.A. Bender, and F.E. Woeste. Monte-Carlo Simulation Methods for Laminated Panels. Forest Products J. 45(7/8): 43-50.
17. Wood flush doors. 1980. ANSI/NWMA I.S.1-80. National Woodwork Manufacturers Assoc.
18. 강욱, 정희석. 1999. 목재 프러쉬 문의 함수율변동에 따른 틀어짐과 좌굴 예측모델(I) -예측모델과 실험결과 비교. (목재공학, 심사중)
19. 목재 가정용 가구(옷장 및 이불장). 1989. KS G 4008. 한국공업표준협회.
20. 목재 문 및 문틀. 1990. KS F 3109. 한국공업표준협회.
21. 정희석, 이남호. 1994. 실내의 온도, 상대습도와 목재 평형함수율의 년중 변이. 한국임학회지 83(4): 540-544.