

인장과 휨변형 하에서 목재의 응력이완 및 이론모형^{*1}

장 상식^{*2} · 강 춘원^{*3}

Stress Relaxation of Wood and Theoretical Models under Tensile and Bending Strain^{*1}

Sang Sik Jang^{*2}, Chun Won Kang^{*3}

ABSTRACT

Stress relaxation tests have been performed under five different tensile strain levels and five different bending strain levels. Three different theoretical models have been developed based on four-element Burger's model, viscoelastic theory and viscous-viscoelastic theory. Experimental data were used to obtain parameters of the models and to verify accuracy of the models. Among the three theoretical models developed in this study, three-integral model (Model 3) based on viscous-viscoelastic theory showed the most exact estimations of stress relaxation under both tensile and bending strains and their correlation coefficients were greater than 0.99 for all the strain levels.

Model 1 showed little initial stress relaxation. Model 2 showed excessive initial relaxation and, then, no relaxation after about 20 minute of strain application. Stress retention under strain decreased as strain increased, which means increased stress relaxation as strain increases. When the strain level was less than proportional limit, the effect of strain level on stress relaxation was not clearly shown. However, this effect was increased as strain level increased when strain level was greater than proportional limit.

Keywords: Stress relaxation, Theoretical model, Tension, Bending, Viscous-viscoelastic model, Stress retention

1. 서 론

장기하중 하에서의 목재의 거동은 단기하중 하에서의 목재의 거동과 함께 오랫동안 목재 관련 연구

자들의 관심의 대상이 되어 왔다. 특히 구조용으로 사용되는 목재는 장기하중의 영향을 받게 되므로 장기하중 하에서의 거동은 목구조의 해석과 설계에 있어서 매우 중요한 요소라고 할 수 있다. 목재는 장기

*1 접수 1998년 3월 14일 Received March 14, 1998.

이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

*2 충남대학교 임산공학과 Dept. Forest Products, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea

*3 이리농공전문대학 임산공업과 Dept. Forest Products, Iri National College of Agr. and Tech., Iri, Korea

장상식 · 강춘원

하중 하에서 변형이 점차 증가하는 점탄성 재료로 알려져 있다. 이러한 점탄성의 특성은 크리프(creep) 현상에 의하여 설명될 수 있으며 이에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다(장 1989, 장 1990, Jang and Polensek 1989, Jang et al. 1993, Polensek and Jang 1989, Price 1994).

목재는 장기용력 하에서 변형이 증가되는 크리프 현상을 나타낼 뿐만 아니라 장기변형 하에서 용력이 회복되는 용력이완(stress relaxation) 현상도 나타내고 있다. 용력이완도 점탄성의 성질에 속하며 크리프와는 동일한 특성으로 파악할 수 있다. 그러나 목재의 용력이완에 관한 연구는 현재까지 거의 이루어지지 않고 있으며 연구자들의 관심도 부족한 실정이다(Ramon, 1969).

목재의 용력이 완은 작용하는 변형의 정도에 영향을 받으며 초기 변형의 크기가 클수록 용력이 완의 정도가 큰 것으로 알려져 있다(Ramon 1969). Ramon(1969)은 6가지 남미산 수종들에 대하여 압축과 인장 하에서의 용력이 완 시험을 실시하였으며 이들에 대한 3요소 모형을 개발하여 좋은 예측치를 얻을 수 있었다. 그러나 Ramon에 의하여 개발된 3요소 모형의 구성방정식은 매우 복잡한 형태를 취하고 있기 때문에 사용이 불편한 단점이 있었다. Bach와 Rovner(1967)는 미송을 이용하여 목리경사각에 따른 압축용력이 완의 특성을 연구하여 목리경사각이 증가할수록 용력이 완의 정도가 증가됨을 보고하였다. Kirbach 등(1976)은 가문비나무, 미송, 발삼전나무 등의 목재조직을 이용하여 목재의 미세조직에 대한 인장 및 압축용력이 완 시험을 실시하였으며 용력의 크기가 용력이 완의 정도에 큰 영향을 미치지 않으며 기간상태의 시험편보다 전혀 전조된 적이 없는 생재에서 인장용력의 이완이 크게 나타남을 보고하였다.

목재의 크리프 또는 응력이완과 같은 장기거동은 시험에 많은 시간이 소요되기 때문에 오래 전부터 여러 가지 이론모형이 개발되어 사용되고 있다. 근래에는 점성-점탄성 모형과 5요소모형(Jang and Polensek 1989, Polensek and Jang 1989, Jang et al. 1993)이 개발되어 휨하중 하에서의 목재(장 1990)와 물결학부(장 1989)에 적용된 바 있다.

목재의 용력이 완 특성은 목조건축이나 구조부재의 설계상의 문제 또는 사용중의 함수율 변동에 따른 수축이나 팽윤에 의한 잔존용력의 완화와 밀접한 연관을 갖고 있다. 목질재료의 제조시에 열압후의 팽윤과 같은 문제도 목재의 용력이 완 특성과 관련을

맺고 있다. 이외에 목재의 크리프현상도 응력이 완과 밀접한 관련을 갖고 있으며 이론모형을 통한 상호 정보의 교환도 가능할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 입장 및 휨변형 하에서 목재의 응력이완 특성을 관찰하고 몇 가지 이론모형을 개발하여 모형의 정확도를 비교하고자 한다.

2. 이론모형

점탄성 재료에 대한 이론모형 중에서 가장 대표적인 것으로 Burger의 모형을 들 수 있으며 이는 4요소모형으로서 순간탄성(instantaneous elastic, ϵ_1), 지연탄성(delayed elastic, ϵ_2) 및 점성(viscous, ϵ_3)을 나타내는 요소들로 구성된다. 총변형(ϵ)은 이들 세 가지 요소들의 합으로 표현될 수 있다.

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \dots \quad (1)$$

Burger의 모형에 대한 구성방정식에 Laplace 변환 및 Laplace 역변환을 실시하면 식 (2)와 같은 4 요소모형에 대한 구성방정식을 구할 수 있다(Findley 1976). 식 (2)는 많은 계수들을 포함하고 있고 용력이 완 시험결과로부터 계수들의 값을 얻기가 힘들기 때문에 이 식을 보다 간단하게 만들 필요가 있다. 식 (2)는 지수함수의 형태를 나타내므로 이를 간단하게 하나의 지수함수 항으로 표현하면 식 (3)과 같고 이를 모형 1로 하였다.

$$\sigma = \frac{\epsilon_0}{A} [(q_1 - q_2 r_1) e^{-r_1 t} - (q_1 - q_2 r_2) e^{-r_2 t}] \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\sigma = A_1 \varepsilon^{B_1} (e^{-A_2 \varepsilon^{B_2} t}) \dots \quad (3)$$

여기서 A_1 , A_2 , B_1 및 B_2 = 실험상수

용력이완 시험결과는 그림 1과 같은 모양으로 나타낼 수 있으며 잔존용력은 초기용력에서 시간에 따라서 이완된 용력(dissipated stress)을 뺀 값과 같다. 초기용력은 식 (3)의 모형에 시간(t) = 0을 대입하여 구할 수 있으며 이완된 용력은 점탄성모형(Findley, 1976)의 자연탄성모형을 사용하여 식 (4)와 같은 점탄성 용력이완모형을 구하였으며 이를 모형 2로 하였다.

인장과 휨변형하에서 목재의 응력이완 및 이론모형

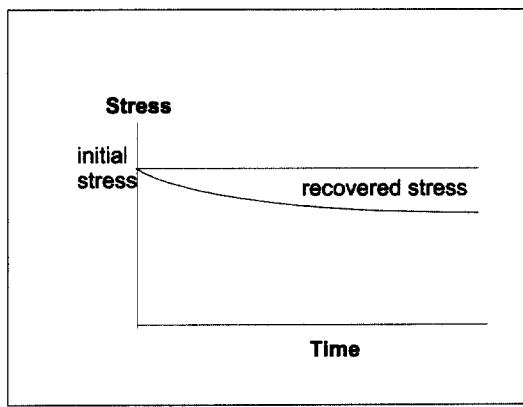


Fig. 1. Typical stress relaxation curve for wood under tensile and bending strain.

$$\sigma = A_1 \epsilon^{B_1} - A_2 \epsilon (1 - e^{-B_2 t}) \dots \dots (4)$$

여기서 A_1 , A_2 , B_1 및 B_2 = 실험상수

삼적분모형은 일반적으로 재료의 크리프거동을 잘 나타낼 수 있는 것으로 알려져 있다(Findley 등, 1976). 본 연구에서는 이완된 응력을 점성-점탄성모형인 삼적분모형(Jang and Polensek 1989)으로 나타내었다. 삼적분모형은 독립변수(응력 또는 변형)가 연속함수로 표현되는 경우에 종속변수(변형 또는 응력)가 3개의 적분을 포함하는 수식으로 표현되기 때문에 붙여진 이름이다. 이와 같은 삼적분모형은 독립변수가 단계적으로 변하는 stepwise function이 되는 경우에는 세 개의 Σ (합의 기호)로 표시될 수 있으며 이는 행열식을 이용하여 쉽게 풀 수가 있다(Jang and Polensek 1989).

본 연구에서는 응력이완을 삼적분모형으로 나타내고 식 (5)와 같이 주어진 변형 하에서 고정된 초기응력으로부터 응력이완을 뺏으로써 점성-점탄성 응력이완모형을 구하였으며 이를 모형 3으로 하였다.

$$\sigma = A_1 \epsilon^{B_1} - [F_1(t) \epsilon + F_2(t) \epsilon^2 + F_3(t) \epsilon^3] \dots \dots (5)$$

여기서 A_1 및 A_2 = 실험상수

$F_i(t)$ = 중요함수(kernel functions)

식 (5)에서 중요함수(kernel function) $F_i(t)$ 는 식 (6)과 같이 시간(t)에 대한 지수함수로 나타낼 수 있다.

$$F_i(t) = b_{i1} t^{c_1} + b_{i2} t^{c_2} + b_{i3} t^{c_3} \dots \dots (6)$$

여기서 $i = 1 \sim 3$ 그리고 b_{i1} , b_{i2} , b_{i3} , c_1 , c_2 및 c_3 = 실험상수

식 (3), (4), (5) 및 (6)의 계수들은 시험결과로부터 얻을 수 있으며 이 때에 선형 또는 비선형의 최소자승법과 비선형 방정식의 해를 구하는 Newton법이 사용되었다.

3적분모형의 계수들을 구하기 위하여 크리프모형을 위하여 개발된 행열식 이용 방법(Jang and Polensek 1989, Polensek and Jang 1989)이 적용되었다. 먼저 식 (7)과 같이 이완응력을 변형과 중요함수에 대한 행열식으로 표시하였다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{n1} \\ \sigma_{n2} \\ \sigma_{n3} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \epsilon_1 & \epsilon_{1^2} & \epsilon_{1^3} \\ \epsilon_2 & \epsilon_{2^2} & \epsilon_{2^3} \\ \epsilon_3 & \epsilon_{3^2} & \epsilon_{3^3} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{Bmatrix} \dots \dots (7)$$

여기서 σ_{ni} = i번째 변형에 대한 이완응력

식 (7)을 중요함수에 대하여 풀면 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \epsilon_1 & \epsilon_{1^2} & \epsilon_{1^3} \\ \epsilon_2 & \epsilon_{2^2} & \epsilon_{2^3} \\ \epsilon_3 & \epsilon_{3^2} & \epsilon_{3^3} \end{Bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \sigma_{n1} \\ \sigma_{n2} \\ \sigma_{n3} \end{Bmatrix} \dots \dots (8)$$

식 (8)에서 σ_{ni} 를 최소자승법을 적용하여 시간에 대한 power function으로 나타내고 식 (8)을 풀면 모형 3의 중요함수를 구할 수 있다.

3. 재료 및 방법

인장과 휨변형 하에서의 응력이완 모형의 계수를 구하고 모형 예측의 정확도를 검증하기 위하여 시중 제재소에서 구입한 미송(douglas-fir)의 무결점 소형

장상식 · 강춘원

인장시험편 및 휨시험편을 사용하였으며 시험방법은 KS F2207과 KS F2208에 의하였다. 인장시험편의 치수는 나비 27mm, 두께 4mm 및 길이 390mm로 하였으며 중앙 평행부의 길이는 50mm로 하였다. 휨시험편의 치수는 2cm×2cm×32cm로 하였다. 시험편은 15%로 열기 전조된 재재목으로부터 용이, 등근 모, 수 등의 결합들이 포함되지 않도록 채취하였으며 수주일 동안 실험실내의 환경과 평형상태에 도달하도록 조습처리하였다.

인장시험편에는 인장하중의 크기 150, 300, 450, 600 및 750kgf에 상용하는 초기 인장변형을 가하였고 휨시험편에는 휨하중의 크기 40, 60, 80, 100 및 120kgf에 해당하는 초기 휨변형을 가하였다. 초기변형을 가한 후 변형을 고정시킨 상태에서 용력의 변화를 로드셀을 통하여 연속적으로 측정하였고 이론

모형의 계수를 계산하기 위하여 변형을 가한 후 0, 5, 10, 20, 60, 180, 300, 1500, 2700, 3900, 5100, 6300, 7500, 8700, 9900 및 11100초의 시간대별로 용력의 크기를 기록하였다. 시험후 각각의 시험편으로부터 1개의 5mm 길이의 시험편을 채취하여 함수율과 비중을 측정하였으며 그 값은 10.1%와 0.51을 나타내었다.

정적 인장시험에서 측정된 시험편에 대한 탄성계수와 인장강도의 값은 각각 $224,000 \text{kgf/cm}^2$ (비례한도에서 하중 1,250kgf과 변형 0.32mm) 및 $1,250 \text{kgf/cm}^2$ (최대하중 1,345kgf)를 나타내었다. 정적 휨시험에서 측정된 시험편의 MOE와 MOR은 각각 $72,900 \text{kgf/cm}^2$ (비례한도에서 하중 83kgf과 변형 3.5mm)와 773kgf/cm^2 (최대하중 147kgf)을 나타내었다.

Table 1. Parameters for Model 1, Model 2 and Model 3 under tensile and bending strains

Model	Parameters				
	A ₁	B ₁	A ₂	B ₂	
1	Tension	212846.920	0.998	8.93×10^{-6}	-0.0816
	Bending	27.063	0.919	1.14×10^{-5}	0.483
2	Tension	212846.920	0.998	21923.740	0.0323
	Bending	27.063	0.919	3.751	0.00454
3	Tension	212846.920	0.998	-	-
	Bending	27.063	0.919	-	-

Table 2. Parameters of kernel functions for Model 3 under tensile and bending strains

Load level, i	b _{i1}	b _{i2}	b _{i3}	c _i	
1	Tension	21030.200	-8696.000	2462.200	0.102
	Bending	1.052	-1.269	0.498	0.235
2	Tension	-17307976.900	15972539.600	-5027278.900	0.129
	Bending	-0.533	1.024	-0.461	0.220
3	Tension	3340135887.500	-4105091941.800	1933568817.700	0.157
	Bending	0.0638	-0.151	0.0957	0.211

인장과 휨변형하에서 목재의 응력이완 및 이론모형

4. 결과 및 고찰

인장응력이완 시험 결과 중에서 인장하중 150, 450 및 750kgf에 상응하는 3가지 변형 하에서 측정된 값들이 인장응력이완 모형의 계수들을 구하기 위하여 사용되었고 휨응력이완 시험에서는 40, 80 및 120kgf의 휨하중에 상응하는 3가지 휨변형 하에서의 시험결과가 모형의 계수들을 구하기 위하여 사용되었다. 인장하중 300 및 600kgf와 휨하중 60 및 100kgf에 상응하는 변형 하에서의 응력이완 측정치는 모형의 정확도 검증을 위한 비교치로 사용되었다.

모형 3(삼직분 모형)의 경우에 세가지 변형 하에서의 측정치가 필요하며 모형의 예측치는 모형을 구하기 위하여 사용된 측정치의 범위 내에서만 적용이 가능하기 때문에 시험에 사용된 전체 변형의 범위를 나타낼 수 있도록 최소값, 중간값 및 최대값을 선정하여 모형의 계수를 구하였다. 모형 1과 모형 2의 경우에는 몇가지의 실험치를 사용하느냐하는 것은 모형의 계수에 대한 신뢰도의 문제이며 모형을 구하는 과정에서는 문제가 없다.

이 연구에서 얻어진 모형 1(식 (3)), 모형 2(식 (4)) 및 모형 3(식 (5))의 계수들을 인장과 휨에 대하여 표 1에 수록하였으며 식 (6)의 중요함수의 계수들은 인장과 휨에 대하여 표 2에 수록하였다.

5가지 인장변형 하에서의 응력이완 시험 결과와 모형 1, 모형 2 및 모형 3의 예측치를 그림 2에 수록하였다. 그림 2에서 보면 모든 변형 하에서 모형

3의 예측치가 시험 결과와 매우 유사하여 가장 정확한 모형임을 알 수 있다. 인장응력이완 시험에 적용된 150kgf, 300kgf, 450kgf, 600kgf 및 750kgf의 5 가지 하중에 상응하는 변형값(변형율)은 0.036mm (0.00072), 0.071mm(0.00142), 0.107mm(0.00214), 0.142mm(0.00284) 및 0.178mm(0.00356) 이었다.

휨응력이완 시험에 적용된 5가지 하중인 40kgf, 60kgf, 80kgf, 100kgf 및 120kgf에 상응하는 변형값은 1.63mm, 2.40mm, 3.19mm, 4.07mm 및 5.17mm 이었으며 각각의 휨변형 하에서의 응력이완 시험결과와 세가지 이론모형의 예측치를 그림 3에 수록하였다. 인장응력이완 시험에서와 마찬가지로 휨변형 하에서도 모형 3의 예측치가 가장 정확하였다.

모형 1은 응력이완의 실험값과 비교하였을 때 전반적으로 초기 응력이완의 예측이 부족하였고 거의 직선적인 응력이완의 예측치를 나타내었다. 모형 2는 실험값보다 초기에 매우 큰 응력이완을 보이다가 20분 정도의 시간 이후에는 거의 응력이완을 나타내지 않았다. 모형 1, 모형 2 및 모형 3의 각각의 변형 하에서의 상관계수를 인장 및 휨에 대하여 표 3에 수록하였다. 표 3에서 보면 모형 3은 모든 변형 조건하에서 0.99 이상의 높은 상관계수를 나타내었다.

그림 4는 휨응력 하에서 시간에 따른 잔존응력(stress retention)을 초기응력에 대한 비율로 나타낸 것으로써 모형 3의 예측치를 시험결과와 함께 수록하였다. 그림 4에서 보면 시간이 증가할수록 잔존응

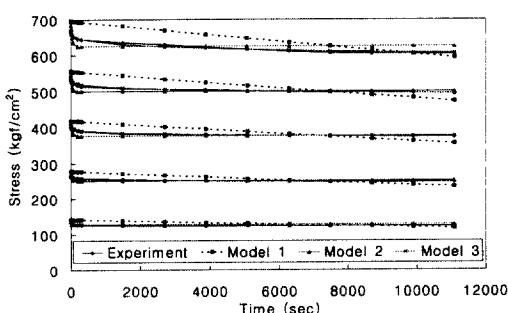


Fig 2. Experimental results and estimations by theoretical models for tensile stress relaxation of wood: In order from the bottom, stress relaxation under tensile strain of 0.00072, 0.00142, 0.00214, 0.00284 and 0.00356, respectively.

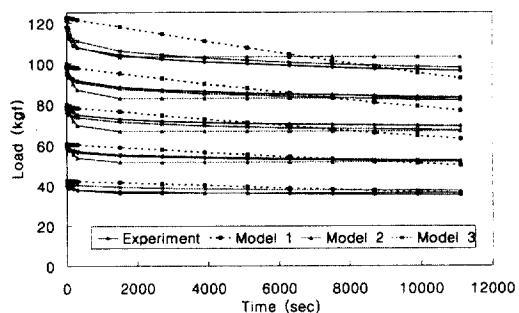


Fig 3. Experimental results and estimations by theoretical models for bending stress relaxation of wood: In order from the bottom, stress relaxation under bending deflection of 1.63, 2.40, 3.19, 4.07 and 5.17mm, respectively.

Table 3. Correlation coefficients of theoretical models under tensile and bending strains

Model	Correlation coefficients (R^2) under									
	Tensile strain					Bending deflection (mm)				
	0.00072	0.00142	0.00214	0.00284	0.00356	1.63	2.40	3.19	4.07	5.17
1	0.732	0.821	0.814	0.804	0.880	0.890	0.879	0.873	0.875	0.989
2	0.884	0.884	0.880	0.896	0.840	0.949	0.963	0.963	0.961	0.994
3	0.995	0.997	0.999	0.993	0.992	0.998	0.996	0.996	0.995	0.998

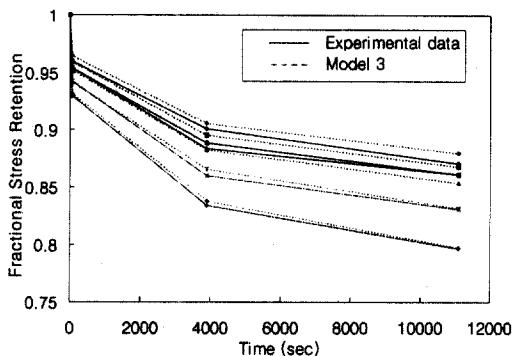


Fig. 4. Experimental data and estimations by Model 3 for bending stress retention: In order from the top, stress relaxation under bending deflection of 1.63, 2.40, 3.19, 4.07 and 5.17mm, respectively.

력이 점차 감소하였으며 그 감소율이 초기에는 크게 나타났으나 약 1시간 이후에는 감소율이 크게 둔화되었다. 초기에 가해지는 변형의 크기가 증가할수록 응력의 잔존율이 크게 떨어짐으로써 응력이완이 더 많이 발생함을 알 수 있다.

이러한 응력잔존율의 감소는 비례한도에서의 변형 값을 기준으로 하여 이보다 작은 변형 하에서는 큰 변화를 보이지 않다가 이보다 큰 변형 하에서는 변형이 증가함에 따라 응력이완이 크게 증가됨을 알 수 있다. 응력이완은 탄성과는 반대되는 현상을 나타내어 변형이 증가할수록 잔존율이 감소하는 현상을 나타내어 변형이 증가할수록 응력이완이 많이 나타남을 알 수 있다. 이러한 응력이완의 정도는 비례한도를 기준으로 하여 그 이하의 변형에서는 변형의 크기에 별로 영향을 받지 않으나 그 이상의 변형에서는 변형의 크기에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다.

수 있다. 인장에서의 비례한도는 최대 하중과 근사하기 때문에 이 연구에서 적용된 5가지 인장변형은 모두 비례한도보다 낮은 값이었으며 이에 따라서 인장변형 하에서의 응력잔존율 변화는 변형의 크기에 따라서 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

5. 결 론

5가지 인장변형과 5가지 휨변형 하에서 목재의 응력이완 시험을 실시하였으며 목재의 응력이완을 예측할 수 있는 3가지의 이론모형을 개발하여 그 정확도를 검증하였다. 5가지 변형 하에서의 시험결과 중에서 3가지 시험결과가 모형의 계수를 구하기 위하여 사용되었으며 나머지 2가지는 시험결과의 검증을 위하여 예측치와 비교되었다. 4요소모형에 근거한 지수함수모형(모형 1), 점탄성모형(모형 2) 및 점성-점탄성모형(모형 3) 중에서 모형 3이 가장 정확한 예측치를 산출하였으며 그 상관계수가 모든 변형조건 하에서 0.99 이상을 나타내었다.

모형 1은 초기 응력이완의 예측이 부족하였고 모형 2는 초기의 과도한 응력이완 이후 응력이완이 거의 나타나지 않는 예측치를 나타내었다. 모형 3은 초기 응력이완 및 그 이후의 응력이완 예측에서도 시험결과와 매우 근사한 값을 나타내었다.

변형 하에서의 응력잔존율은 변형의 크기가 증가할수록 잔존율이 감소하는 현상을 나타내어 변형이 증가할수록 응력이완이 많이 나타남을 알 수 있다. 이러한 응력이완의 정도는 비례한도를 기준으로 하여 그 이하의 변형에서는 변형의 크기에 별로 영향을 받지 않으나 그 이상의 변형에서는 변형의 크기에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 장상식. 1989. 크리프에 의한 못결합부의 강성도의 변화에 관한 연구. 목재공학 17(4):35-43.
2. 장상식. 1990. 휨하증하에서 목재의 크리프거동에 관한 연구. 한국가구학회지 19(1):1-11.
3. Bach, L. and B. Rovner. 1967. Stress relaxation in wood at different grain angles. Inform. Rep. VP-X-14, Forest Products Lab. Vanvouver, B.C., Canada.
4. Findley, W.N., J.S. Lai, and K. Onaran. 1976. Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials. North-Holland Pub. Co., Amsterdam, Germany.
5. Jang, S. and A. Polensek. 1989. Theoretical models for creep slip of nailed joints between wood and wood-based materials. Wood Science and Technology 23:237-249.
6. Jang, S., Y. Fuzimoto, and Y. Mataki. 1993. Viscous-viscoelastic models for creep of nailed joints. Mokuzai Gakkaishi 39(4): 418-427.
7. Kirbach, E., L. Bach, R. W. Wellwood and J. W. Wilson. 1976. On the fractional stress relaxation of coniferous wood tissues. Wood and Fiber 8(2):74-83.
8. Polensek, A. and S. Jang. 1989. Predicting creep of nailed lumber-to-plywood joints. J. of Engineering Mechanics 115(10):2182-2198.
9. Price, E. W. 1994. Parameters that may affect creep and duration-of-load behavior of wood composite panel products. Paper presented at IUFRO Timber Engineering Meeting, July 5-7, 1994, University of Technology, Sydney, Australia.
10. Ramon Echenique-Manrique. 1969. Stress relaxation of wood at several levels of strain. Wood Science and Technology 3:49-73.