

응력적층재의 볼트 압체력 경시변화*1

엄 창 득*2 · 이 상 준*2 · 김 광 모*2†

Aging Characteristics of Bolt Pretension of Stress-laminated Timber*1

Chang-Deuk Eom*2 · Sang-Joon Lee*2 · Kwang-Mo Kim*2†

요 약

본 연구는 응력적층재의 압체력 경시변화에 대한 분석을 위해 수행되었다. 실내·외에 설치한 응력적층재의 압체력은 시간에 따라 감소하였으며, 응력적층재의 재압체 후 압체력 감소의 속도는 현저히 느려졌다. 하지만 응력적층재의 실사용을 위해서는 정확한 압체력의 예측이 필요한 것으로 사료된다. 기존의 압체력 예측 모델을 적용하여 압체력의 경시변화를 예측한 결과와 실제 압체력 변화는 상이한 양상을 나타내었으며, 이에 따라 시간과 외부환경에 따른 응력적층재의 압체력 예측 모델의 개발이 필요할 것으로 사료된다.

ABSTRACT

In this study, it is carried out to analysis of the bolt pretension of the stress-laminated timber. Bolt pretension of stress-laminated timber was decreased by time. The loss of force is caused by moisture content, shrinkage of wood. After re-stressing the stress-laminated timber, the rate of force decrement was slowed significantly. To use of stress-laminated timber for the service, it is necessary to make an accurate estimate of force. It is clear that is different between actual value and predicted value changes by existing model for bolt pretension of stress-laminated timber. Accordingly, considering the time and the external environment, the development of prediction model is needed.

Keywords: bolt pretension, stress-laminated timber, moisture content

*1 접수 2011년 10월 14일, 채택 2011년 11월 16일

*2 국립산림과학원 녹색자원이용부 재료공학과, Division of Wood Engineering, Department of Forest Products, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

† 교신저자(corresponding author) : 김광모(e-mail: lovewood@forest.go.kr)



Fig. 1. Evenstad bridge in Norway (Kim, 2011).

1. 서론

응력적층재는 목재에 프리스트레스 공법을 적용한 것으로 국내에서는 연구 및 적용사례가 없고 집성재의 이용이 활발한 목재 이용 선진국을 중심으로 개발되어 이용되어 왔다. 긴 경간에 따른 높은 구조성능이 요구되면서 주기적인 점검 및 관리가 가능한 목조 교량에 주로 이용되고 있으며, 최근에는 교량의 장기적인 모니터링을 통해 와이어에 가해지는 응력의 변화를 확인함으로써 부재와 와이어의 결합방식을 개선하는 연구가 진행되고 있다. 응력적층재에서 층재의 하중전달은 프리스트레스에 의해 발생하는 압축력과 마찰력에 의해 이루어진다(김, 2010). 또한 응력적층재의 성능은 층재 사이의 압축력에 의하여 좌우된다. 층재간의 압축력은 층재와 층재를 결합해주는 와이어의 인장력에 의해 발생되며, 압축력은 시간에 따라 완화된다. 이 때 층재의 외부조건(온도, 상대습도), 내부조건(함수율, 수축)의 영향을 받게 된다(Kainz 등, 1998).

응력적층재의 압축력 경시변화에 대한 연구는 주로 설치된 목조교량에 압축력 측정센서를 설치하여 교량에 설치된 응력적층재의 재압체 및 보수 시기의 판단에 이용되고 있다. 이와 더불어 대기환경인 온도와 상대습도를 측정하여 응력적층재의 평형함수율을 계산하고 이에 따른 수축률과 기본 물성을 바탕으로 압축력 예측에 대한 연구가 진행된바 있다(Pousette, 2002).

본 연구에서는 응력적층재를 이용한 차량용 교량의 축조를 위한 연구의 일환으로 응력적층재의 횡방향 압축력의 경시변화 평가를 진행하였으며, 응력적층재의 이용 가이드라인을 구명하기 위한 기초연구를 진행하였다.

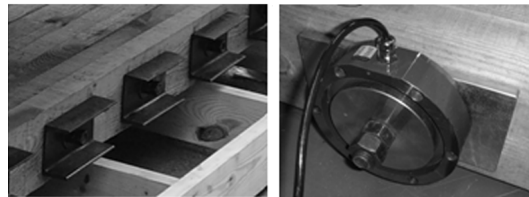
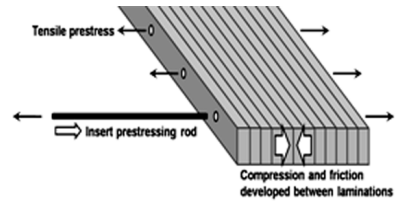


Fig. 2. Schematic diagram of stress-laminated timber (Kim, 2010).

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

본 연구에서는 국내 사방사업의 일환으로 조림되어 현재 입목축적량이 많은 리기다소나무(Pitch pine, *Pinus rigida* Mill.)를 공시수종으로 선정하였다. 응력적층재에 사용된 판재는 열기건조하여 측정된 함수율과 전건비중은 각각 13.3 (± 0.77)%와 0.52 (± 0.015)이었다. 김 등(2010)의 연구결과를 바탕으로 응력적층재를 제작하였다. CuAz-2 약제로 방부처리된 리기다소나무 제재목(50 × 145 × 1,800 mm)의 폭 중앙에 300 mm 간격으로 총 6개의 볼트구멍을 천공하고, 15개의 부재를 넓은 재면이 맞닿도록 무작위로 배치한 후에 각 볼트구멍에 지름 17 mm, 길이 1,000 mm의 전산볼트를 삽입하여 횡방향으로 압체하였다. 한쪽 면에는 목재와 접촉면의 크기가 100 × 150 mm인 'ㄷ'자 형강(SM 490, 100 (D) × 50 (H) mm)과 와셔를 설치하였으며, 반대쪽 면에는 동일한 면적의 철판과 load-cell을 설치하여 일정 간격으로 응력적층재의 압축력을 측정하였다. 그리고 양면에서 너트를 2중으로 조여 볼트의 풀림을 방지하였다.



Fig. 3. Specimens for measuring compressive performance of stress-laminated timber (left: indoor, right: outdoor).

2.2. 실험방법

2.2.1. 실내외 응력적층재 압체력 측정

실험 조건은 실내·외의 두 가지로 설정하였다. Fig. 3과 같이 온도 20°C, 상대습도 50%의 조건을 일정하게 유지하는 실내와 강우에 직접 노출되는 것을 방지하기 위하여 지붕만을 설치한 야외에 각 1조씩 2조의 시험체를 설치하였다. 볼트의 초기압체력은 미국 도로교통설계기준(AASHTO, 2008)에서 고시한 100 psi (7.03 kgf/cm²)에 맞게 3,060 kgf (= 7.03 kgf/cm² × 14.5 cm × 30 cm)로 하였으며, 각 볼트에 가해지는 하중이 비교적 균일하게 증가되도록 하중을 500 kgf씩 증가시키면서 토크렌치를 이용하여 순차적으로 볼트의 압체력을 증가시켰다. 인접한 볼트의 조임에 의한 압체력 감소가 발생하였기 때문에 3,000 kgf로 압체한 후에 약 3~5회 반복 압체하여 모든 볼트의 초기 압체력이 3,000~3,100 kgf 사이의 하중을 유지하도록 하였다. 볼트의 압체 과정에서 각 볼트에 가해지는 하중은 볼트의 한쪽 끝에 설치된 로드셀을 통해 확인하였으며, 이후 볼트 압체력 경시변화는 1시간 간격으로 로드셀에 의해 측정되어 데이터로깅시스템을 통해 집적하였다.

2.2.2. 압체력 예측 모델 적용

응력적층재의 압체력 변화를 예측하는 기존 연구의 결과를 바탕으로 압체력 예측 모델을 개발하기 위하여 기존 모델의 예측성능을 검토하였다. 응력적층재를 구성하는 목재(라미나)와 스틸바의 물성과 주

위환경에 따라 변하는 변이로 구성된 아래의 식 (1)을 이용하여 온도 및 함수율 변화시 압체력 변화를 예측하였다(Pousette 등, 2002).

$$\Delta F_S = \frac{E_{G90} A_G [(\alpha_{G90} - \alpha_S) \Delta T - \beta_{G90} \Delta u]}{\left(\frac{E_{G90} A_G}{E_S} + A_S\right)} A_S \quad \text{식 (1)}$$

α_{G90} : 목재의 열팽창계수(K⁻¹) = 3.3 × 10⁻⁵

α_S : 철의 열팽창계수(K⁻¹) = 1.15 × 10⁻⁵

β_{G90} : 목재의 수분팽창계수 = 0.2

E_{G90} : 목재의 횡방향탄성계수(N/m²) = 4~5 × 10⁸

E_S : 철의 탄성계수(N/m²) = 2.1 × 10¹⁶

ΔF_S : 압체력 변화(kN)

$\Delta \sigma_S$: 압체압력 변화(N/m²)

A_S : 철의 면적(m²)

A_G : 목재의 면적(m²)

ΔT : 온도 변화(K)

Δu : 함수율 변화

또한 목재의 함수율은 주위환경(온도, 상대습도)에 따라 변하게 된다. 이에 따라 식 (1)을 적용하여 압체력의 변화를 측정시 응력적층재의 함수율 변화를 식 (2)를 이용하여 계산하였다(Dyken 등, 2010).

$$MC = (a_A T^2 + b_A T + c_A) RH^2 + (a_B T^2 + b_B T + c_B) RH + a_C T^2 + b_C T + c_C \quad \text{식 (2)}$$

여기서, 식 (2)에 적용된 각 계수의 값은 다음과 같다.

	a	b	c
A	0.00000057	0.00002934	0.00117
B	0.0000703	0.0028933	0.087604
C	0.0020553	0.0024551	4.181162

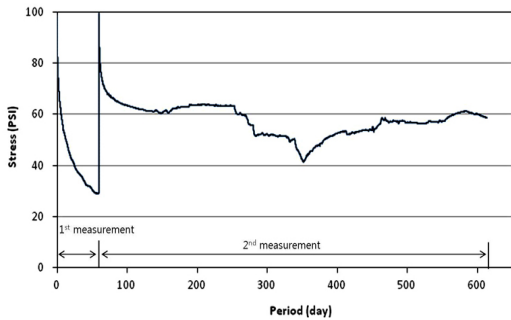


Fig. 4. Actual compressive stress of indoor stress-laminated timber.

3. 결과 및 고찰

3.1. 실내 시험체

실내 시험체의 경우 2009년 12월에 제작 설치하여 2011년 9월까지 약 600여 일 동안 압체력 경시변화를 측정하였다(Fig. 4). 20°C, 50%의 항온항습조건에 보관한 실내 시험체의 경우 최초 압체 후 약 24.7일이 경과한 시점에서 재압체 조건인 40 psi에 도달하였으며, 60일이 경과하여 압체력이 30 psi 이하로 감소한 시점에서 1차 측정을 종료하였다. 기존 문헌에서와 같이 시간 경과에 따라 압체력 손실속도가 점차 감소하는 지수함수의 형태를 나타내었으며 (Ritter, 1990), 최초 압체 후 16.7시간 경과 후에 압체력의 20%가 손실되었다. 이후에는 압체력이 10 psi 감소하는데 각각 1.72, 3.36, 6.93, 12.0, 27.2일이 소요되어 각 단계에서 약 2배 정도씩 소요시간이 늘어나는 것으로 확인되었다.

1차 실험이 종료된 시험체를 완전히 해체하고 판재의 잔류응력이 충분히 해소될 수 있도록 약 20일간 항온항습조건에서 보관한 후에 재압체하여 2차 측정을 시작하였다. 초기 20% 압체력 손실에 소요된 시간은 약 31.5시간으로 1차에 비해 2배 정도 증가하였으며, 80 psi에서 70 psi로 감소하는데 걸린 기간은 6.89일로 1차의 1.72일에 비해 4배 증가하였다. 압체력 손실속도는 이후에 더 감소하여 1차에서 5.77일 만에 60 psi에 도달한데 비해 2차에서는 약 80일이

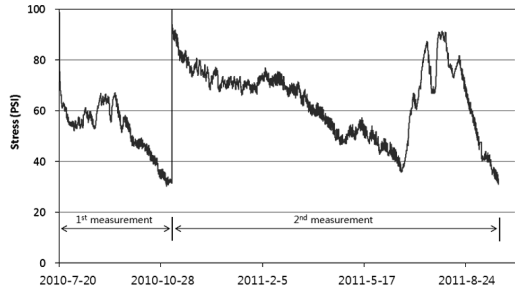


Fig. 5. Actual compressive stress of outdoor stress-laminated timber.

경과한 시점에서 60 psi에 근접하였다. 1차에 비해 약 60일간의 장기 횡방향 압축응력을 받은 후의 2차 측정에서 압체력 손실속도가 크게 감소하였으며, 150일 이후 비정상적인 압체력의 증가와 감소는 항온항습실의 제어 장치의 오작동으로 인해 발생한 실험오차이다. 정상 작동 후 압체력은 약 60 psi까지 증가하여 약 550일이 경과한 현재에도 재압체 조건인 40 psi에는 도달하지 않았다. 응력적층제의 장기적인 구조 안전성을 확보하기 위해서는 정확한 압체력의 완화주기 예측과 함께 횡방향 압체에 의해 발생하는 영구변형이 목재의 다른 성능에 미치는 영향에 대한 검토도 진행되어야 할 것으로 판단된다.

3.2. 실외 시험체

실외 시험체는 2010년 7월 20일에 최초 설치하였는데, 8월초에서 9월말 사이 잦은 강우에 따른 목재의 흡습으로 인하여 압체력이 실내 시험체에 비해 높게 유지되었다. 따라서 압체력이 50 psi로 손실되는데 70일 이상의 기간이 소요되었으며, 이는 실내 항온항습조건에서 30 psi에 도달한 51.9일을 크게 넘는 기간이다. 이후에는 압체력이 비교적 일정하게 감소하여 10 psi 감소하는데 20일 정도씩 소요되었는데, 이는 오랜 강우기간 동안 목재 내부에 침투한 수분의 건조에 따른 목재의 수축이 크게 영향하였을 것으로 판단된다.

110일이 경과하여 압체력이 30 psi에 도달한 시점에서 재압체한 후에 2차 측정을 진행하였다. 2차 측

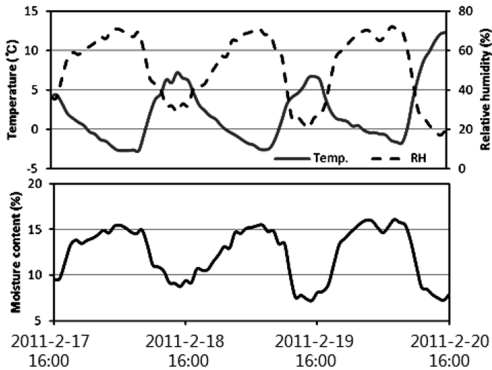


Fig. 6. Climatic data (above) for Seoul in Korea and MC (below) of specimens.

정에서 70 psi까지 감소하는데 소요된 시간은 약 100 일 정도였으며, 이후 압체력은 계속 감소하여 6월에 약 40 psi까지 도달했다. 하지만 여름철 긴 장마로 인해 압체력이 다시 90 psi까지 증가하였다. 이후 압체력은 급격히 감소하여 9월 26일에 30 psi까지 감소하였다. 응력적층재의 2차 측정에서 소요된 시간은 약 320일이었다.

하루 동안 응력적층재의 압체력 변화를 분석해보면 오전 7시-8시 사이에 압체력이 가장 작았고, 이후 증가하여 오후 4시경에 가장 큰 압체력을 나타냈으며 다시 감소하는 경향을 보여주고 있다(Fig. 7). 측정이 진행된 시간동안 유사한 경향이 나타났다.

3.3. 압체력의 예측값과 실측값 비교

실의 시험체의 압체력 실측값과 기존 압체력 예측 모델인 식 (1)을 통한 예측값을 비교하였다. 전 구간에서 예측값과 실측값의 비교에 앞서 미소구간에서 압체력의 계산값과 실측값을 비교해 보았다. 재압체 후 2011년 2월 18일~22일 사이의 온도와 상대습도, 그리고 이에 따른 목재의 평균함수율은 Fig. 6과 같다. 이를 바탕으로 예측한 압체력과 실측값은 Fig. 7에 나타내었다. 예측값과 실측값 사이에는 약간의 딜레이 시간이 존재하고 계산값의 진폭이 실측값보다 1/2 적게 나타난다. 이는 실제 응력적층재는 비평형 상태에서 놓여있지만 모델에서는 평형상태를 가정하

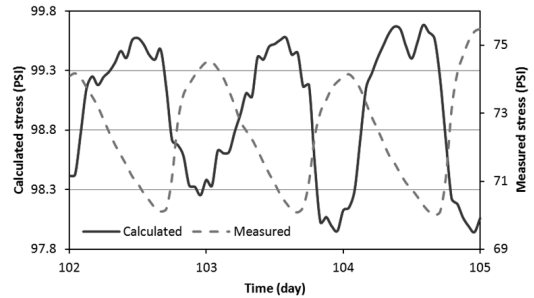


Fig. 7. Comparison of calculated and measured compressive stress of outdoor stress-laminated timber for micro-period.

고 있기 때문에 응력적층재의 내부요인을 완벽하게 반영하기 못하기 때문인 것으로 판단된다.

이론적으로 온도가 상승하면 전산볼트와 목재는 팽창하게 되는데, 이때 볼트의 팽창율이 목재보다 작지만 열전도율이 더 우수하기 때문에 목재보다 더 많이 팽창하고 이에 따라 압체력은 감소하게 된다. 또한 상대습도가 상승하면 볼트의 크기는 변화가 없지만 목재는 팽창하기 때문에 압체력은 증가하게 된다. 예측값은 이 현상을 완전히 평형에 도달한 것으로 가정하는 반면에 실제 측정에서는 평형에 도달하기 전에 이미 다른 조건으로 변화되기 때문에 차이가 발생한 것으로 판단된다.

실외 응력적층재의 2차 압체 실험 기간 중 2010년 11월 8일부터 2011년 6월까지 측정 기간 동안 실험체 주위의 온도와 상대습도의 변화와 함수율은 아래의 Figs. 8, 9와 같다. 이 값들은 한 시간 간격으로 측정 후 하루 동안의 평균값으로 변환하여 사용하였다. 이에 따른 응력적층재의 평균함수율은 약 8~37%의 범위에 분포하였으며, 섬유포화점인 약 30% 이상의 값은 강우시 대기 중의 높은 상대습도로 인해 목재함수율이 과대예측된 것으로 판단된다.

Fig. 10은 응력적층재의 압체력 실측값과 예측값을 나타낸다. 응력적층재의 예측값은 초기값(100 psi)에서 온도와 상대습도에 따라 증가 또는 감소를 반복하며 그 값이 100 psi 근처에서 일정하게 유지하는 경향을 보이는 반면 실측값은 시간에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 이처럼 응력적층재의 실제

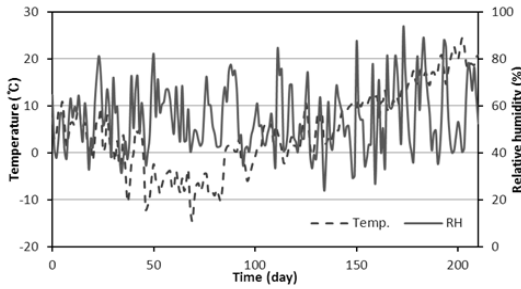


Fig. 8. Climatic data (temperature and RH) for Seoul in Korea.

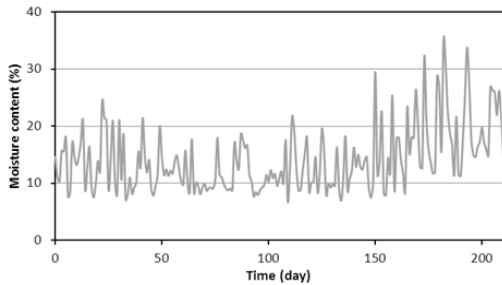


Fig. 9. Moisture content changes of outdoor stress-laminated timber.

압체력의 변화와 예측된 압체력 간의 차이가 많이 발생하였는데 이는 압체력 예측모델이 온도와 상대습도의 함수로 구성되어 있고 시간의 함수는 반영되지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 즉 기존 모델에서 압체력은 주위환경인 온도와 상대습도에 의해 결정되며, 온도보다는 상대습도와 함수율의 영향을 많이 받는다. 이에 따라 시간에 따라 변하는 응력적층재의 외부요인(온도, 상대습도)과 내부요인(함수율)을 모두 반영할 수 있는 응력적층재의 압체력 예측모델의 개발이 필요하겠다.

4. 결 론

본 연구에서는 응력적층재의 실제 사용에 앞서 압체력 경시변화에 대한 연구를 수행하였다. 응력적층재는 외부환경(온도, 상대습도) 및 시간에 따라 압체력이 변하는 결과를 보였다. 약 600일 이상 응력적층

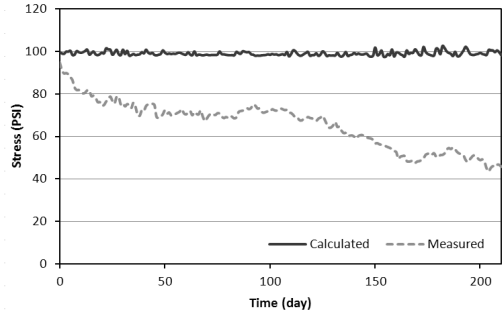


Fig. 10. Comparison of measured and calculated compressive force of outdoor stress-laminated timber.

재의 압체력 경시변화를 관찰한 결과 재압체 시간이 점점 증가하고 또한 실제 이용시 경시변화의 모니터링을 통해 그 재압체 시간을 결정해야 할 것으로 판단된다. 기존의 압체력 예측 모델을 적용하여 압체력의 경시변화를 예측한 결과와 실제 압체력 변화는 상이한 양상을 나타내었으며, 이에 따라 이를 이용하여 경시변화를 예측하는 것은 불가능한 것으로 사료된다.

본 연구의 결과를 바탕으로 응력적층재의 압체력 변화의 심도 있는 해석을 위해서 추후실험시 대기조건(온도, 상대습도)과 응력적층재의 함수율 측정이 병행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 실내 시험체에 적용하여 모델 검증을 진행하여 모델의 보정 사항을 점검하고, 시간경과에 따른 압체력 완화원인을 구명하고, 응력적층재에 발생하는 영구변형과 재압체 주기 및 이력현상에 대한 연구를 수행할 것이다.

참 고 문 헌

1. 김광모, 심국보, 김병남. 2010. 방부처리 리기다소나무의 휨거동 특성. 목재공학 38(4): 306~315.
2. 김광모. 2011. 목조 차도교량 사례-노르웨이 에벤스타브리지. 산림. 2011년 5월호. p. 86~89.
3. 엄창득, 김광모, 이상준, 심상로, 박문재, 여환명. 2011. 횡방향 압체력 경시변화. 2011 한국목재공학회 학술발표대회 요지집. p. 168~169.
4. AASHTO. 2008. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 4th edition, 2008 Interim Revisions, Section 9: Decks and Deck System. Washington,

- D.C. American Association of State Highway and Transportation Official.
5. Dyken T. and H. Kepp. 2010. Monitoring the moisture content of timber bridges. Proceeding of international conference on timber bridges: 223~235.
 6. Kainz, J. A., J. P. Wacke, and M. A. Ritter. 1998. In situ performance of stress-laminated timber bridge decks. Proceedings of SEM Spring Conference on Experimental and Applied Mechanics. p. 265~267.
 7. Pousette. A., P. Jacobsson. M. Gustafsson. J. Horttanainen, and K. Dahl. 2002. Stress laminated bridge decks, part II. Nordic timber bridge project report, Nordic wood. ISBN 82-7120-034-8.
 8. Ritter. M. A. 1990. Timber bridges: Design, construction, inspection, and maintenance. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Engineering Staff, EM 7700-8.