

탄소성이방성 솔리드 유한요소법 활용을 위한 목재 재료 모델 생성 연구¹

홍 정 표³ · 김 철 기² · 이 전 제² · 오 정 권^{3,†}

Elasto-plastic Anisotropic Wood Material Model for Finite Solid Element Applications¹

Jung-Pyo Hong³ · Chul-Ki Kim² · Jun-Jae Lee² · Jung-Kwon Oh^{3,†}

요 약

삼차원 솔리드 유한요소 방법을 이용한 목재 거동 해석을 보다 효율적으로 손쉽게 활용하기 위하여, 이에 필요한 목재재료모델 생성 방법을 개발하였다. 2단선형 탄소성이방성 이론에 근거하여 목재의 주요 세 방향 즉, 섬유, 방사 및 접선방향의 구성방정식을 정의하였다. 목재재료상수 결정의 단순화를 위하여 방사방향과 접선방향의 특성을 섬유직각 방향으로 통합하고, 요구되는 총 27개의 재료입력상수를 방향별 탄성계수와 항복응력, 그리고 프와송 비를 포함하는 6개의 독립상수로 단순화하였다. 개발된 목재재료모델을 이용하여 북미 더글라스 피 압축시험에 대한 삼차원 유한요소 모델을 개발하고 주요 세 방향에 대한 실험 측정치들과 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 성공적인 모델해석 결과를 얻었으며, 이를 바탕으로 향후 진척되어야 할 연구개발 방향과 예상되는 문제점들을 논의하였다.

ABSTRACT

A simplified material model, which was efficiently implemented in a three-dimensional finite solid element (3D FE) analysis for wood was developed. The bi-linear elasto-plastic anisotropic material theory was adopted to describe constitutive relations of wood in three major directions including longitudinal, radial and tangential direction. The assumption of transverse isotropy was made to reduce the requisite 27 material constants to 6 independent constants including elastic moduli, yield stresses and Poisson's ratios in the parallel, and perpendicular to grain directions. The results of Douglas fir compression tests in the three directions were compared to the 3D FE simulation incorporated with the wood material model developed in this study. Successful agreements of the results were found in the load-deformation

¹ Date Received December 16, 2013, Date Accepted March 12, 2014

² 서울대학교 산림과학부. Department of Forest Science, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

³ 서울대학교 농업생명과학연구원. Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

† 교신저자(Corresponding author): 오정권(e-mail: jkoh75@hotmail.com)

curves and the permanent deformations. Future works and difficulties expected in the advanced application of the model were discussed.

Keywords : finite element model, wood material, anisotropic, elasto-plastic theory, compression, modulus of elasticity

1. 서 론

솔리드 요소(solid element)를 이용한 삼차원 유한 요소(3D FE) 해석은 하중을 받는 물체의 내부 응력 거동을 해석하는데 선호되는 방법 중의 하나이다. 목 구조 분야에서도, 일반적으로 실시되는 재하시험으로부터 얻는 제한된 정보의 한계성을 극복하고 구조 해석에서의 활용도를 높이기 위한 연구가 수행되어야 한다. 예를 들면 목재-철물 접합부 설계에서 보다 연성적 성능을 갖도록 하는 요구가 있을 때, 하중의 작용-반작용에 따른 철물과 목재 상호간의 응력집중 발생을 제어하는 것이 무엇보다 중요하다. 이러한 구조물 내부의 응력해석을 수행하는 데 있어 효율적이고 경제적인 방법이 솔리드 요소를 이용한 유한요소 해석이라 할 수 있다. 현재까지 이러한 목재 거동에 대하여 모두에게 인정받을 만한, 수학적으로 엄정한 재료모델은 개발되지 않았다고 볼 수 있다. 솔리드 요소의 삼차원 목재재료 이론 중, 가장 보편적으로 통용되는 모델은 목재의 주요 세 방향 즉, 섬유, 방사 및 접선방향에 근거한 직교이방성 모델(orthotropic material model)이고 이는 목재의 탄성거동 내에서 좋은 결과를 나타낸다고 알려져 있다(Bodig 1982; Patton-Mallory 1996; Guan *et al.* 2001). 재료의 영구 변형과 비선형 거동을 예측하기 위한 보다 발전된 모델로 Moses (2000)는 탄소성이방성 이론(anisotropic plasticity theory)에 근거한 3D FE모델을 개발하였다. 그는 목재의 주요 세 방향에 대한 탄소성 구성방정식 모델을 적용하여 목재 전단 성능에 대한 연구를 수행하였다. 그 후, 이와 같이 탄소성이방성 이론에 근거한 목재 볼트 접합부 거동 해석을 Chen (2003) 등과 Kharouf (2005) 등이 2차원 유한요소 해석방법으로 연구하였다.

비선형 3D FE 방법을 이용하여 목재의 거동 해석

에 있어서 제일 먼저 마주치게 되는 어려움은 목재 재료모델링에서 재료입력상수를 결정하는 일이다. 탄소성이방성 구성방정식을 2단선형 응력-변형 관계로 정의할 때 요구되는 재료 상수는 총 27개로 이 모든 것을 실험측정값으로 결정하기에는 그 비용과 시간이 많이 소요되고 상수 상호간 수학적 연관성 부족으로 해가 수렴하지 못할 확률이 높아지게 된다.

따라서, 본 연구에서는 솔리드 요소를 이용한 목재의 삼차원 유한요소 해석을 수행하는데 있어서 목재재료모델의 입력변수가 되는 재료상수의 경험적 결정 방법과 사용자가 쉽게 프로그램 코드를 구성할 수 있는 방법을 제시하였다. 유한요소 해석 프로그램의 하나인 ANSYS®를 이용하여 목재의 압축거동에 대한 실험측정값과 시뮬레이션 결과를 비교 분석하여 목재재료 모델로서의 타당성을 검증하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 재료상수 결정 방법

솔리드 유한요소 모델 개발에 필요한 목재재료 모델은 목재의 찌그러짐이나 압축 영구변형 그리고 이에 따른 에너지 소산을 설명할 수 있는 이방적 탄소성 이론에 근거하였다. 목재의 직교이방적 방향과 단면에 대한 정의를 Fig. 1에 나타냈으며 각 방향 및 단면 별 탄소성 2단선형 응력-변형 관계를 가정하고 이로부터 재료상수를 유도하였다.

이러한 가정하에 한 수중에 대한 목재재료 모델의 일반화된 탄소성 이방성 재료상수는 아래와 같이 총 27개의 값이 필요하다.

- X-, Y- 및 Z-방향의 탄성계수
- X-, Y- 및 Z-방향의 인장 탄젠트 계수

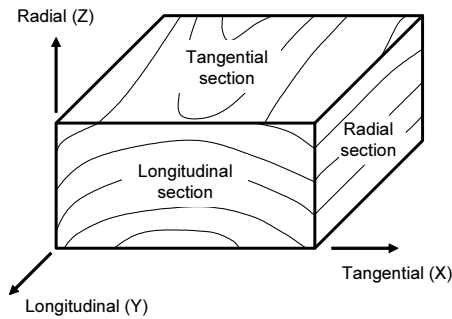


Fig. 1. Three principal directions and sections in wood.

- X-, Y- 및 Z-방향의 압축 탄젠트 계수
- X-, Y- 및 Z-방향의 인장 항복 응력
- X-, Y- 및 Z-방향의 압축 항복 응력
- XY-, YZ- 및 XZ-방향의 전단탄성계수
- XY-, YZ- 및 XZ-방향의 탄젠트 전단계수
- XY-, YZ- 및 XZ-방향의 전단 항복 응력
- XY-, YZ- 및 XZ-방향의 프와송 비

실제 목재의 기계적 거동 특성은 압축과 인장에서 서로 다르다. 그러나 인장 항복점은 목재에서 실질적으로 대부분 취성 파괴가 발생하고 소성변형을 나타내지 않으므로, 압축거동에 근거한 구성방정식을 인장 응력-변형 관계에도 적용하였다(Patton-Mallory 1996; Moses 2000; Chen 등 2003; Kharouf 등 2005).

섬유 길이, 방사 및 접선 방향에 따라, 각각 일축 하중실험을 통하여 얻은 측정된 재료상수를 입력 사용하면, 목재의 직교이방성도 및 재료상수 결정의 정밀 방법 차이에 따라 탄소성 해석의 해를 얻기 위해서 반드시 만족시켜야 할 consistency 방정식 조건 즉, 식 (1)과 항복응력은 닫힌 항복표면을 구성하여야 한다는 조건을 원하는 수준의 소성변형까지 얻을 수 있는 확률이 낮아진다. 다시 말해, 주요 세 방향에 따른 재료상수들이 상호 연관되어야 조건 충족 확률이 높아지게 된다.

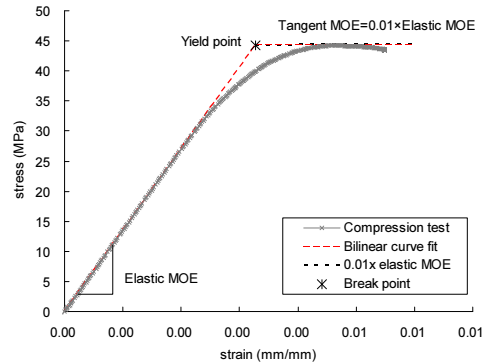


Fig. 2. An example of a bilinear stress-strain curve fitting to an experimental curve.

$$\frac{\sigma_{+X} - \sigma_{-X}}{\sigma_{+X}\sigma_{-X}} + \frac{\sigma_{+Y} - \sigma_{-Y}}{\sigma_{+Y}\sigma_{-Y}} + \frac{\sigma_{+Z} - \sigma_{-Z}}{\sigma_{+Z}\sigma_{-Z}} = 0 \quad (1)$$

여기서 σ_{+i} 와 σ_{-i} 는 i 방향에서의 인장 및 압축 항복강도, $i = X, Y, Z$.

따라서, 본 연구에서는 이러한 조건들에 대하여 그 충족요건을 만족시키고 원활한 수렴 해를 얻기 위하여, 목재 특성을 섬유방향, 그리고 방사방향과 접선방향을 평균한 섬유직각방향만을 고려한 가로등방성(transverse isotropy) 재료로 단순화하였다. 이로써 주요 세 방향에 대하여 필요로 하는 재료상수는 줄어들게 되며, 이러한 가정은 현실적으로 실험데이터 생산 비용을 절감하며 기존 문헌 자료를 활용할 수 있는 방안을 제시한다고 판단되었다. 각 세부 재료상수에 대한 설명과 그 결정방법을 분석 정리하였다.

2.2. 탄성계수와 항복응력

가로등방성과 압축기반 구성방정식 가정에 따라 섬유 및 직각방향의 탄성계수는 일축 압축시험으로부터 구하였다. 실험으로부터 얻은 응력-변형 곡선을 2단선형 응력-변형 곡선으로 변환한 후 이로부터 Fig. 2와 같이 탄성계수와 항복응력을 구하였다. 항복응력 이후 소성거동은 경험적 판단으로 탄성계수

에 변환계수 0.01을 곱한 값을 접선계수로 하여 이에 따르도록 가정하였고(Patton-Mallory 1996) 2단선형 곡선의 교차점을 항복응력으로 정의하였다.

2.3. 전단탄성계수와 전단항복응력

목재의 주요 세 방향 재료상수와 마찬가지로 주요 세 평면 즉, XY, YZ, XZ에 대한 전단계수와 전단항복응력도 입력변수도 결정되어야 한다. 실험을 통하여 전단관련 상수를 얻기에는 그 시간과 비용이 많이 드는 단점이 있고 상호 연관된 상수 확보를 위하여 본 연구에서는 Saliklis (2003) 등이 개발한 전단강도 예측 이론적 모델을 적용하였다. 이 모델은 알고 있는 주축의 재료상수를 기반으로 2단선형 전단응력-변형 곡선을 예측하는 것으로, 유한요소 해석에 쉽게 적용될 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 재료모델 연구에서 이용된 전단탄성계수와 전단 항복응력은 식 (2), (3), (4), (5)에 따라 산정하였고 항복 후 거동은 전단탄성계수에 탄젠트 계수 0.01을 곱한 값으로 가정하였다.

· 전단계수

$$G_{TL}, G_{LT} = \frac{\sqrt{E_L \cdot E_T}}{2 \cdot (1 + \sqrt{\nu_{TL} \cdot \nu_{LT}})} \quad (2)$$

$$G_{TT} = \frac{\sqrt{E_T \cdot E_T}}{2 \cdot (1 + \sqrt{\nu_{TT} \cdot \nu_{TT}})} = \frac{E_T}{2 \cdot (1 + \nu_{TT})} \quad (3)$$

· 전단항복응력

$$(\gamma_y)_{TL}, (\gamma_y)_{LT} = \frac{(\sigma_0)_T}{2 \cdot (E_T - (E_t)_T)} \cdot \sqrt{\frac{E_T}{G_{TL}}} \quad (4)$$

$$(\gamma_y)_{TT} = \frac{(\sigma_0)_T}{2 \cdot (E_T - (E_t)_T)} \cdot \sqrt{\frac{E_T}{G_{TT}}} \quad (5)$$

여기서,

L = 섬유평행방향

T = 섬유직각방향

E = 압축탄성계수 [MPa]

E_t = 탄젠트 계수 ($0.01 \times E$) [MPa]

G = 전단계수shear modulus [MPa]

ν = 프와송 비

γ_y = 전단항복변형 [mm/mm]

σ_0 = 2단선형 응력-변형 곡선에서 소성 연장선의 응력절편 [MPa]

2.4. 프와송 비

가로등방성 가정에 따라 목재재료모델에 필요한 프와송 비는 독립된 LT면과 TT면(L = 섬유평행방향, T = 섬유직각방향)의 프와송 비(ν_{LT} 와 ν_{TT}), 그리고 계산에 의한 TL면의 프와송 비(ν_{TL})로 가정하였다. 프와송 비 또한 실험에 의하여 구할 수 있으나, 본 연구에서는 기존 문헌 자료-Wood Handbook (FPL 1999)를 통하여 독립된 두 개의 프와송 비를 구하였고, ν_{TL} 는 식 (6)에 따라 계산된 값을 사용하였다. 이는 강성매트릭스의 대칭성을 유지시켜주는 방법이다.

$$\nu_{TL} = \nu_{LT} \cdot (E_T / E_L) \quad (6)$$

2.5. 목재재료모델 코드

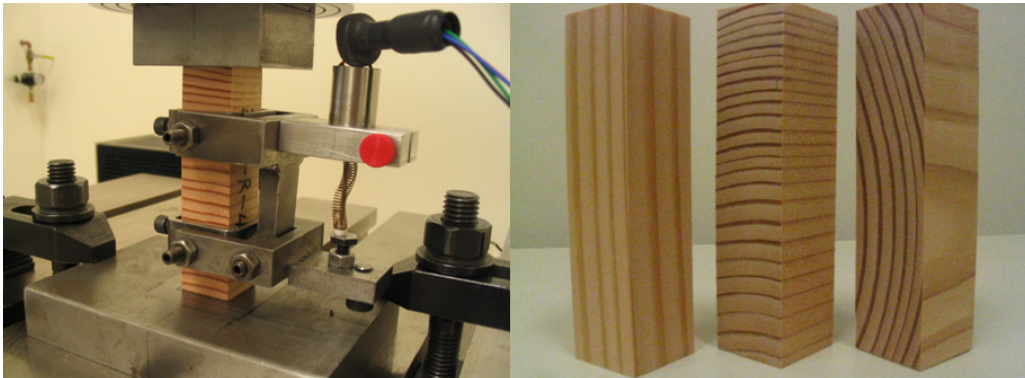
본 연구의 재료상수 결정에 대한 내용을 종합하여, Table 1에 정리하였다. 실험이나 기존 문헌 자료를 근거로 구하여야 할 독립된 값은 총 6개로, 그 내용을 보면, 섬유평행방향 탄성계수와 섬유직각방향의 탄성계수, 그리고 그 방향들의 항복응력, 그리고 두 개의 프와송 비로 쉽게 구성되도록 단순화하였다. 이 외의 재료 입력 상수들은 이 6개 상수에 근거하여 상호 연관된 식으로부터 구하였다. 이렇게 결정된 재료 상수에 대해 재료 프로그램 입력코드화를 손쉽게 하기 위하여, EXCEL® 스프레드시트를 이용한 코드 생성기를 개발하였다. 이 코드 생성기는 6개의 독립 재료상수 입력을 받아서 consistency검사와 항복표면 닫힘 검사를 수행하고, 입력된 함수에 따라 재료상수를 생성하여 ANSYS에 필요한 입력파일을 생성토록 하였다.

Table 1. Procedures for determining the material constants of the 3D FE model for wood

Requisite constant	Direction ¹	Method of determination	Douglas fir
Elastic modulus (MPa)	Z, Y, X	Compression test	832, 16,900, 832
Elastic shear modulus (MPa)	ZY, YX, ZX	Coupled bilinear constitutive model ²	1,740, 1,740, 301
Poisson's ratio	ZY, YX, ZX	from the Wood Handbook	0.018, 0.37, 0.38
Tensile yield stress (MPa)	Z, Y, X	Equal to compressive properties	4.5, 44.3, 4.5
Tensile tangent modulus (MPa)	Z, Y, X	Equal to compressive properties	8.3, 169, 8.3
Compressive yield stress (MPa)	Z, Y, X	Compression test	4.5, 44.3, 4.5
Compressive tangent modulus (MPa)	Z, Y, X	0.01 × elastic modulus	8.3, 169, 8.3
Shear yield stress (MPa)	ZY, YX, ZX	Coupled bilinear constitutive model ²	3.2, 3.2, 1.3
Shear tangent modulus (MPa)	ZY, YX, ZX	0.01 × elastic shear modulus	17.4, 17.4, 3.0

¹ Y(longitudinal)=parallel to grain and X(tangential)=Z(radial)=perpendicular to grain.

² Calculated values by theoretical relationships with the normal material constants.

**Fig. 3.** Compression tests for longitudinal, radial and tangential specimens.

2.6. 모델타당성 분석

2.6.1. 압축실험

목재의 길이, 접선 및 방사 방향 압축실험을 실시하고, 이로부터 방향 별 탄성계수와 항복응력을 구하였다. 이로부터 얻은 재료상수를 근거로 목재재료모델을 생성하고 3D FE 압축시험 모델을 개발하여 실제 시험으로부터 얻은 압축 하중-변형 거동과 3D FE 해석 결과를 비교하여 목재 재료 모델의 타당성 분석을 하였다.

목재 압축시험편은 함수율 15%로 건조된 Douglas-Fir

(*Pseudotsuga menziesii*)를 이용하였으며 시험 방법은 ASTM D 143 (ASTM 2003)을 적용하였다. 압축시험편 25 × 25 × 102 (mm) 크기로 섬유, 방사 및 접선방향에 따라 각각 45개의 압축 시험을 수행하였다 (Fig. 3). 변형측정은 직류차등변환기(direct current differential transformer, DCDT)를 이용한 측정기를 이용하였다. 균일한 응력상태에서 측정이 가능하도록 시험편 중앙 게이지 길이 50 mm 내에서의 압축변형량을 측정하도록 기구가 설계되었다. 만능강도시험기(SINTECH test system)를 이용하여 하중 속도 0.6 mm/min을 적용하여 시험하였다.

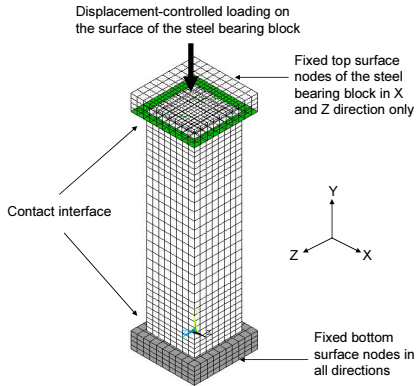


Fig. 4. Three-dimensional FE model for the 1 × 1 × 4 compression test.

시험으로부터 얻은 하중-변위곡선은 식 (7), (8)에 따라 응력-변형 곡선으로 변환하였고 Fig. 2와 같이 2단선형 곡선으로 전환하여 탄성계수와 항복응력을 결정하였다. 재료상수 결정 방법에 따라 Douglas fir에 대한 3D FE해석 입력상수는 Table 1에 나타내었다.

$$\text{Stress} = \text{applied load/area} (= 625 \text{ mm}^2) \text{ [MPa]} \quad (7)$$

$$\text{Strain} = \frac{\text{DCDT measurement}}{\text{initial gauge length} (= 50 \text{ mm})} \text{ [mm/mm]} \quad (8)$$

2.6.2. 솔리드유한요소모델

Douglas fir 압축 거동 비교분석을 위한 3D FE압축시험편 모델을 Fig. 4와 같이 개발하였다. 상용프로그램인 ANSYS®에서 제공되는 솔리드 요소, SOLID45를 이용하였다. SOLID45는 8절점으로 각 절점마다 3 자유도를 지니는 등매개 직육면체 요소 (quadrilateral isoparametric brick element)이다. 압축 시험편과 하중을 전달하는 베어링 블록 모두 SOLID45를 이용하여 형태를 생성하였다. 실제 하중 조건과 가능한 한 가깝게 시뮬레이션 하기 위하여 스틸베어링블록 모델을 목재시험편 위아래 접촉면에 포함시키고 변위조절재하방법으로 스틸베어링블록 윗면에서 하중이 가해지도록 재하 방법을 취하였다. 이를 위하여 스틸베어링 블록과 목재시험편 접촉면 사이에는 표면-표면 접촉요소(CONTA174 and TARGE170)

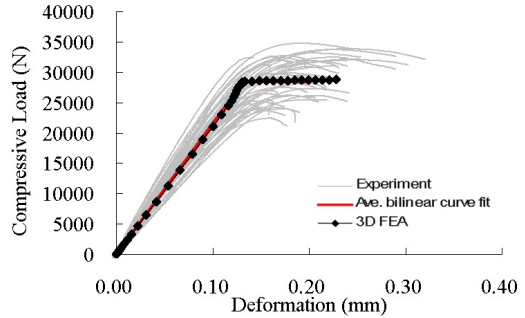


Fig. 5. Simulated load-deformation curves of parallel to grain compression.

를 사용하였고 접촉마찰계수는 일반적으로 목재유한요소 해석에 적용되는 0.7을 사용하였다(Smith 1983). 스틸베어링블록 모델링에 이용된 재료상수는 탄성계수 200GPa, 항복응력 250 MPa 그리고 프와송 비 0.3을 이용한 완전탄소성 거동을 가정하였다.

경계조건으로 하단 스틸 베어링 블록의 바닥면 절점을 모든 방향에 대하여 고정하였고 적용하중 계산은 시험편 길이 방향으로 바닥 절점에서의 반작용 힘을 총합하여 구하였다. 변위 자료는 50-mm 게이지 길이에 해당되는 두 개의 중앙 절점의 변위 차로 계산하여 시뮬레이션 된 하중-변위 곡선을 구하였다. 메쉬 수렴은 모델로부터 얻은 하중-변위 곡선의 수렴을 조사하여 메쉬 세분화 공정으로 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 섬유방향의 압축

Fig. 5에 섬유방향 압축 하중-변위 곡선에 대한 시험결과와 3D FE해석 결과를 비교하였다. 총 45개 시험결과로 도출된 2단선형 곡선 평균값과 비교하여 좋은 시뮬레이션 결과를 보여주었다. 그러나, 탄성-소성 변환점과 관련하여 실제 하중-변위 곡선은 점진적인 변화를 보이는 반면 모델 해석으로부터 나온 곡선은 급격한 변화를 보여주었다. 이는 2단선형 구성방정식을 가정한 결과이며, 실제와 같이 점진적인

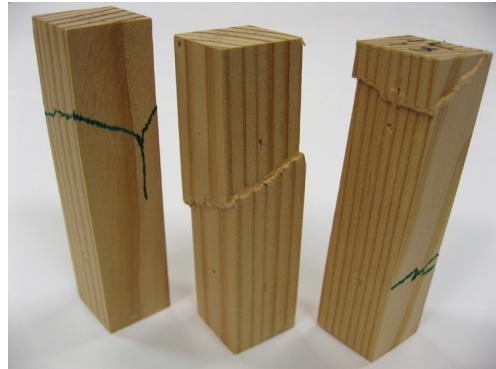
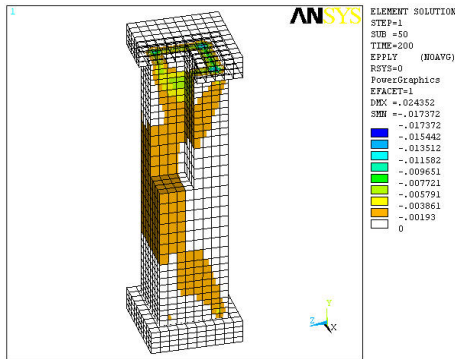


Fig. 6. Compressive failure of the parallel to grain specimen.

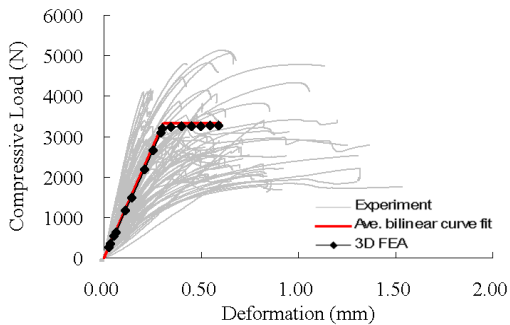


Fig. 7. Simulated load-deformation curves of perpendicular to grain compression.

변화를 시뮬레이션 하기 위해서는 다단 선형 구성방정식을 적용하면 개선될 것이라 판단되었다. 하지만, 다단 선형 구성방정식 선택에 따른 해 수렴의 문제와 변환점의 재료 상수결정 방법 등의 모델개발 복잡성이 뒤따르는 어려움이 예상되었다.

삼차원 변형 시뮬레이션 결과는 전반적으로 Fig. 6에서 보여지듯이, 관찰된 파괴 형태와 비교하여 볼 때 대략 45도 경사각의 실제 파괴와 소성변형으로 표현되는 경사각이 유사함을 알 수 있었다. 모델의 “현실성” 측면에서, 본 연구에서 적용한 경계조건은 모델의 작용 하중이 스틸베어링블록 모델을 통하여 전달되는, 실제와 같은 조건으로 이루어졌다. 일반적으로 1차원이나 2차원 모델 또는 솔리드 요소를 이용하지 않는 3차원 수치해석 모델의 경우 경계조건

과 재하 방법에 따라 그 해석 결과가 달라지는 문제로 논란의 소지가 많이 있다고 보고되고 있다 (Tsujiimoto *et al.* 1986; Chen *et al.* 2003). 그러나 일반적으로 솔리드요소를 이용한 삼차원 모델은 있는 그대로의 조건을 모델화하므로 이러한 논란거리를 제거할 수 있는 장점이 있음을 알 수 있었다.

3.2. 섬유직각방향의 압축

섬유직각방향에 대한 압축 하중-변위 시험결과와 모델해석 결과에 대한 비교는 Fig. 7에 나타내었다. 섬유방향 압축 결과와 마찬가지로 시험에 의한 2단 선형과 모델 결과의 곡선이 서로 일치하였다. 참고로 Fig. 7의 시험 하중-변위 곡선은 방사방향과 접선방향 시험 결과 모두를 섬유직각방향 압축 결과로 함께 표시하였다. 비선형 정도가 심한 시험 곡선에서와 같이 일반적으로 섬유직각방향의 압축 거동에서 항복점과 탄젠트 계수를 정의하기는 다소 모호하였다. 이로 인하여 본 연구에서 탄젠트 계수를 얻기 위한 방법으로 인위적인 $0.01 \times$ 탄성계수로 가정한 이유이기도 하였다.

Fig. 8은 섬유직각방향 압축 시험편의 길이방향에 대한 소성변형의 진행 과정을 나타내고 있다. 실제 압축변형을 나타낸 Fig. 9과 비교 분석하면, 모델해석 결과는 초기 경사진 소성변형 발생으로 시작하여 최종 시험편 중앙부분에서 소성변형으로 불룩한 형

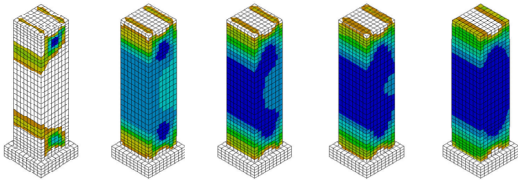


Fig. 8. Progress of longitudinal plastic strain contour under the perpendicular to grain compression.



Fig. 9. Actual deformed shapes of the radial and tangential specimen overloaded.

태로 변화하였고, 실제 압축 거동은 목재섬유의 압축에 의한 찌그러짐과 조만재 분포의 비대칭으로 좌굴이 발생하는 형태를 보여주었다. 특히, 방사방향 시험편의 좌굴 변형은 강도가 약한 조재의 취성적인 찌그러짐으로 발생하였는데, 이것은 Fig. 7의 실제 하중-변위 곡선에서 탄성영역 후의 급격한 하중 저하의 형태를 나타낸 이유이기도 하였다. 섬유경사각이나 조만재의 영향은 육안구조 수준의 유한요소 모델링에서 극복하여야 할 문제임을 알 수 있었다.

3.3. 목재재료 모델의 응용

이상의 결과로부터 본 연구에서 개발된 목재재료 모델은 전반적으로 목재의 압축거동 삼차원 시뮬레이션에 잘 적용되는 것으로 판단되었다. 목구조물에 이용되는 대표적인 구조용 목재 수종들에 대한 기본 재료 물성값은 문헌을 통하여 쉽게 얻을 수 있으며

로 본 연구에서 개발된 재료상수 결정방법들을 이용하여 보다 다양한 수종의 삼차원 목재 거동 해석에 이용될 수 있으리라 판단하였다. 특히, 목재의 철물 접합부, 목재-목재 접합부 등과 같이 기하학적 형상에 따라 성능이 좌우되는 분야에서 실험의 대안으로 폭넓게 응용될 수 있을 것이라 기대된다.

4. 결 론

솔리드 요소를 이용한 삼차원 유한요소 해석방법을 목재 거동 해석에도 손쉽게 이용하고자, 목재 재료모델 재료 상수 결정 및 코드 생성을 단순화하는 연구를 수행하였다. 목재의 압축거동을 2단선형 구성방정식을 가정한 탄소성이방성 이론에 근거하여 목재재료 모델 구성방법과 그 근거를 제시하였다. Douglas fir에 대한 압축시험 결과를 가지고 본 모델의 타당성을 검증 수행하였다. 하중-변위 곡선에 대한 해석결과는 매우 우수하였으며, 실제 거동과 시뮬레이션도 만족스러운 결과를 얻었다. 조만재와 같은 목재섬유의 구성 차이에서 오는 실제 거동은 본 모델링 수준에서 시뮬레이션 하기에는 한계가 있었다. 이를 고려한 해석 방법과 모델링 기법 개발이 요구되었다.

REFERENCES

- American Society for Testing and Materials (ASTM). 2003. Annual Book of ASTM Standards, Section 4-Construction, Volume 04.10 Wood. ASTM international, West Conshohocken, PA.
- Chen, C. J., Lee, T. L., Jeng, D.S. 2003. Finite element modeling for the mechanical behavior of dowel-type timber joints. Computers & Structures, Vol. 81, pp. 2731-2738.
- Bodig, J., Jayne, B.A. 1982. Mechanics of wood and wood composite. Van Nostrand Reinhold Company Inc.
- Forest Products Laboratory (FPL). 1999. Wood handbook-Wood as an engineering material, General

- Technical Report, FPL-GTR-113.
- Guan, Z.W., Rodd, P.D. 2001. DVW-Local reinforcement for timber joints. *Journal of Structural Engineering*, 127(8): 894-900.
- Kharouf, N.G., McClure, Smith, I. 2005. Postelastic behavior of single- and double-bolt timber connections. *Journal of structural engineering*, 131(1): 188-196.
- Moses, D.M. 2000. Constitutive and analytical models for structural composite lumber with applications to bolted connections. Ph.D dissertation, Department of Civil Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada.
- Patton-Mallory, M. 1996. The three-dimensional mechanics and failure of single bolt wood connections. Ph.D dissertation, Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, CO, USA.
- Saliklis E.P., Urbanik, T.J., Tokyay, B. 2003. Bilinear modelling of cellulosic orthotropic non-linear materials, *Journal of Pulp and Paper Science*, Vol. 29, No. 12, pp. 407-411.
- Smith, I. 1983. Coefficient of friction value applicable to contact surfaces between mild steel connectors such as bolts and dry European white wood. *Journal of the Institute of Wood Science*, 9(5): 229-234.
- Tsujimoto, Y., Wilson, D. 1986. Elasto-plastic failure analysis of composite bolted joints *Journal of Composite Materials*, 20(3): 236-252.