한국가구학회지 2010.01. Vol. 21(1): 26-39

수치해석법을 활용한 압축부재 성능 해석의 가능성에 대한 연구[1]

김광철[2]

The study on the possibility of performance analysis for the compressive member using the numerical method[1]

Gwang-Chul Kim[2]

ABSTRACT

This is a leading study to replace the structural analysis methodology on the specific traditional joint by a numerical analysis. Tests were carried out to test the compressive methodologies with the numerical results. The Japanese larch was used as a sample.

The Orthotropic property of wood was specifically considered for the finite element numerical analysis. Linear numerical analysis and non-linear numerical analysis for the BEAM element and the two SOLID elements of ANSYS were used to analyze the compressive performance. In addition, more finely divided elements were used to raise the accuracy of the numerical result. Finally, the statistically significant differences were tested between that of the analytical and numerical results.

It could be concluded that the SOLID 64 element shows the most optimum result when the non-linear analysis with the more finely divided element was used. However, finely dividing of the element is a considerable time consuming process, and it is quite difficult to raise the accuracy of the non-linear numerical analysis. Therefore, if considering the vertical displacement to be of the only interest, the BEAM element is more efficient than the SOLID element because the BEAM element is reflected as a simple line, which is less time consuming and difficult in dividing the elements. But, the BEAM element cannot accurately model the knot as a strength defect factor which is an important property in the orthotropic property of wood. Therefore, the SOLID element should be used to model the strength defect factor, knot, as it can be efficiently applied on the structural size flexure member which could be more strongly effected by the knot. In addition, it is useful at times when the

---

1. 논문접수: 2009. 8. 30.; 심사: 2009. 09. 30.; 투고확정: 2010. 01. 16.
2. 전북대학교 주거환경학과, Dept. of Housing Environmental Design, Chonbuk National University, Jeonju, Korea. E-mail: gckim@jbnu.ac.kr.

failure types of members are to be more closely investigated, as the SOLID element is able to examine the local stress distribution of the member.

The conclusion drawn by this study is of the good concordance between analytical results and numerical results of compressive wood members, but how orthotropic properties should only be considered. The numerical analysis on the specific Korean traditional joints will be based on the current study results.

Keywords: BEAM element, SOLID element, linear numerical analysis, non-linear numerical analysis.

1. 서 론

최근 국가적으로 저탄속 녹색성장에 대한 10대 정책과제를 지정하여 다양한 분야에서 이를 충족시키기 위한 연구와 개발이 진행 중이다. 특히 친환경 녹색 산업 개발 및 녹색 공간 조성은 인간의 삶의 문제와 가장 직결되는 분야이므로 더 적극적인 관심을 받고 있다. 90년대 초반부터 목조주택에 대한 국민적 관심은 폭발적으로 증가하여 꾸준한 상승세를 보였으나 외환위기와 환율의 문제로 인한 수입목재 가격의 상승으로 상승세가 주춤하였다. 그러나 최근 들어 주 5일제 근무와 전원생활에 대한 수요 증대 등의 여러 요인으로 목조건축물은 펜션 이나 전원주택에 대한 수요 증가로 다시금 상승세에 있다.(김 등, 2009)

그러나, 우리국민들에게 내재되어 있는 목조건축에 대한 관념은 현대적인 경량골조목조주택이나 통나무주택 등의 외래 주택이 아니라 뿌리 깊은 향수를 지닌 한옥에 대한 것이다. 이에 관련하여 최근 국토해양부에서 제시한 한옥에 대한 새로운 정의를 주의해 볼 필요가 있다. 기존의 한옥에 대한 정의는 각 지역마다의 조례를 보면 간단하게 “기와지붕과 목조기둥을 갖춘 건축물” 등으로 되어 있다. 건축법 시행령 및 시행규칙 개정에 따른 새로운 국토해양부의 정의는 “기둥과 보가 목조구조이고 지붕틀과 기와가 한식, 자연재료로 마감된 전통양식이 반영된 건축물과 부속시설”로 되어 있다. 이를 고려한다면 경량골조나 통나무구조보다 더 많은 양의 목재가 한옥 시공에 사용되어야 하며 이는 곧 더 많은 탄소저장고로서의 역할을 수행 할 수 있어 정부의 저탄소 녹색성장 정책과도 일맥상통한다. 하지만 현행 한옥이 경량골조나 통나무구조에 대해 갖고 있는 가장 큰 문제점은 경제성이며 이어서 숙련된 시공 기술 인력의 미비이다. 또한 기존 한옥에 대단면 부재 사용만을 고집하는 전통 기술 인력과 대중들의 고정 관념이다. 부재의 치수를 줄이면서 공장 대량 생산을 통한 규격화로 현실적인 경제성 문제를 해결한다면 단순한 문화재측면에서의 한옥이 아니라 실용적인 주거 공간으로서의 한옥도 충분히 가능할 것이다.

이를 위해 가정 먼저 선행되어야 할 것이 한옥 구조에 대한 과학적이며 체계적인 구조해석과 이를 통한 최적화된 접합부 선정 및 시공일 것이다. 따라서 전통접합부에 대한 구조해석을 수치해석법과 직접실험을 통해 다양한 형태에 대해 진행하고 최적의 접합부 형태를 선정하고, 선정된 접합부의 부위별 수치를 다양화하여 추가적인 실험과 수치해석법 활용으로 최적의 수치를 선정해서 실제 현장에 적용해야 한다. 본 연구에서는 선행 조건으로 접합을 실시하지 않은

단순 부재에 대해 압축실험을 실시하고 동일한 수치조건을 적용하여 수치해석법을 적용한 결과와 비교 분석하고자 한다.

2. 재료 및 방법

국내에서 구조용재로 널리 사용되는 낙엽송을 사용하였다. 시편의 치수는 관련 연구에서 전통주먹장 접합부와 나비장 접합부의 단면과 길이에 동일하게 하기 위하여 단면 크기는 60×60mm으로, 길이는 200mm로 하였다.(Fig.1)

압축강도는 KSF 2206-2004-06(Method of compression test for wood)에 따라 측정하였다. 하중 부하 속도는 10mm/min이었다.

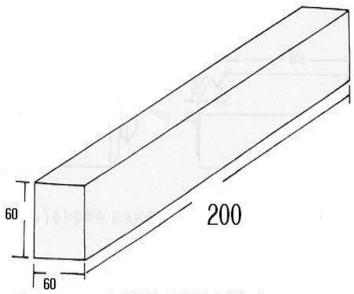


Fig. 1. The features for compression specimen.

수치해석은 법용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 10을 사용하였으며 수치해석 방법의 수단으로 정도를 높이기 위하여 선형해석법 이외에 비선형해석법을 추가적으로 사용하여 해석하였다. 기존의 법용 프로그램에서 대부분 철골이나 콘크리트 등의 구조재료는 등방성으로 가정하여 해석을 진행하며 목재 역시 등방성으로 가정하고 수치해석을 진행하고 있다. 하지만, Bodig과 Jayne(1982)에 의하면 목재의 경우 대략 탄성계수의 비율이 길이방향:방사방향:접선방향의 비율이 20:1.6:1로서 등방성 재료와는 상당한 차이를 보임을 보고한 바 있다. 유리섬유나 수정 같은 재료들은 길이방향 대 접선방향의 비율이 4:1정도를 보이는 반면에 목재의 경우 극단적인 경우에는 24:1정도의 직교이방성을 보이는 수종도 존재한다. 따라서 본 연구에서는 직교이방성을 고려한 수치해석을 실시하였다. 마지막으로 실제 실험결과와 수치해석 결과의 유사성을 검증하기 위해 통계적 유의성 검증을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

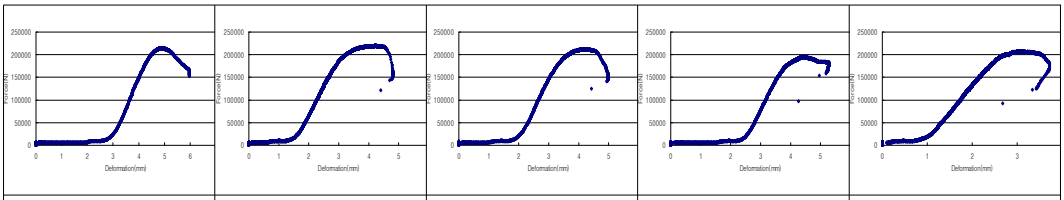
3-1 압축부재의 성능분석

3-1-1 실험결과

표 1-1에 KSF 2206에 따라 압축실험을 실시한 시편의 최대 압축강도 값과 최대 강도 값을 적용하여 계산한 압축부재의 수직 변위($\delta = \frac{PL}{AE}$)를 나타내었고, 유한요소 수치해석의 결과들을 각각 표시하였다. 전체적인 실험 시편의 하중-변형량 곡선은 유사하게 그림 2와 같이 나타났다.

3-1-2 유한요소 정식화

기둥용 압축부재를 유한요소로 모델로 만들면 기둥에 전달될 하중으로 인해 압축부재내의 여러 점들의 수직변위가 발생한다. 축방향 하중을 가정하면 기둥의 실제 수직변위를 선형함수를 사용하여 기둥의 각 요소나 단면에 대한 수직변위로 근사화할 수 있다. 수직변위 형상 u는 기둥의 여러 점에서의 수평이 아닌 수직한 변위를 나타내며, 수직변위 형상은 Y의 함수로 표현 가능하다. 일반적으로 요소에서의 선형 수직변위 분포는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.(박, 2008)



No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5

Fig. 2. Load-deformation relations of compression test.

Table 1-1. Comparison of results between analytical and numerical analysis values for BEAM 4 element

			#1-3		#1-4		#1-5	
	Ultimate compressive strength(Mpa)	Analytical	Esize10	Esize5	Esize10	Esize5	Esize10	Esize5
No.1	59.54	0.923144	0.923144	0.923144	0.923144	0.923144	0.923144	0.923144
No.2	61.00	0.945698	0.945698	0.945698	0.945698	0.945698	0.945698	0.945698
No.3	58.87	0.912752	0.912752	0.912752	0.912752	0.912752	0.912752	0.912752
No.4	54.31	0.842054	0.842054	0.842054	0.842054	0.842054	0.842054	0.842054
No.5	57.43	0.890452	0.890452	0.890452	0.890452	0.890452	0.890452	0.890452

(Esize10:element meshing size 10mm, Esize5:element meshing size 5mm,)(#1-3: 선형수치해석결과, #1-4: 비선형수치해석결과, #1-5: 해석의 정확성을 높이기 위해서 실제 압축 실험을 실시한 결과의 stress-strain 관계를 추가로 고려하여 해석한 비선형해석결과)

Table 1-2. Comparison of results between analytical and numerical analysis values for SOLID elements

			#2-6		#2-7		#2-8		#2-9	
	Ultimate compressive strength(Mpa)	Analytical	Esize10	Esize5	Esize10	Esize5	Esize10	Esize5	Esize10	Esize5
No.1	59.54	0.923144	0.924531	0.92471	0.922666	0.922842	0.924627	0.924732	0.922766	0.922863
No.2	61.00	0.945698	0.947202	0.947385	0.945244	0.945425	0.9473	0.947408	0.945347	0.945446
No.3	58.87	0.912752	0.914128	0.914305	0.912305	0.912478	0.914223	0.914326	0.912403	0.912499
No.4	54.31	0.842054	0.84332	0.843484	0.84177	0.841918	0.843408	0.843504	0.841859	0.84195
No.5	57.43	0.890452	0.891767	0.89194	0.890033	0.890189	0.89186	0.891961	0.890128	0.890224

(#2-6:SOLID185 요소 사용한 선형수치해석결과, #2-7:SOLID185 요소 사용한 비선형수치해석결과, #2-8:SOLID64 요소 사용한 선형수치해석결과, #2-9:SOLID64 요소 사용한 비선형수치해석결과)

$u^{(e)} = c_1 + c_2 Y$.....(1)

미지수 c_1과 c_2에 대해 풀기 위해 절점의 수직변위 u_i와 u_j로 주어지는 요소 끝단의 수직변위에 대한 조건인 식 (2)를 식 (1)에 대입한다.

$Y = Y_i$ 에서 $u = u_i$

$Y = Y_j$ 에서 $u = u_j$.....(2)

식 (2)를 식 (1)에 대입하면 2개의 미지수를 가지는 2개의 식으로 구성된 식 (3)이 된다.

$u_i = c_1 + c_2 Y_i$

$u_j = c_1 + c_2 Y_j$.....(3)

미지수 c_1와 c_2에 대해 풀면 식 (4)가 얻어진다.

$$c_1 = \frac{u_i Y_j - u_j Y_i}{Y_j - Y_i},\ c_2 = \frac{u_j - u_i}{Y_j - Y_i} \text{.....(4)}$$

절점 값으로 수직변위 분포를 나타내면 식 (5)와 같아지며 식 (5)를 u_i와 u_j에 관해서 정리하면 식 (6)이 얻어진다.

$$u^{(e)} = \frac{u_i Y_j - u_j Y_i}{Y_j - Y_i} + \frac{u_j - u_i}{Y_j - Y_i} Y \text{.....(5)}$$

$$u^{(e)} = \left(\frac{Y_j - Y}{Y_j - Y_i}\right) u_i + \left(\frac{Y - Y_i}{Y_j - Y_i}\right) u_j \text{.....(6)}$$

위의 식에서 괄호안의 항들을 형상함수 S_i와 S_j로 정의하여 나타내면 식 (7)과 같다.

$$S_i = \frac{Y_j - Y}{Y_j - Y_i} = \frac{Y_j - Y}{l}$$

$$S_j = \frac{Y - Y_i}{Y_j - Y_i} = \frac{Y - Y_i}{l} \text{.....(7)}$$ 여기서 l은 요소의 길이이다.

그러므로 요소에 대한 수직변위를 형상함수와 절점의 수직변위로 나타내면 식 (8)과 같으며 식 (8)을 다시 행렬의 형태로 나타내면 식 (9)와 같아진다.

$u^{(e)} = S_i u_i + S_j u_j$.....(8)

$$u^{(e)} = \begin{bmatrix} S_i & S_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} \text{.....(9)}$$

이 형상함수는 강성행렬의 유도를 간단히 하는데 유용한 것으로 각각의 상응하는 절점에서는 1의 값을 가지고 이웃한 절점에서는 0의 값을 가지는 특징을 가지고 있다.

최소 총 포텐셜 에너지 정식화 방법을 통한 축방향 하중을 받는 부재의 강성행렬과 하중행렬은 변형이 생기는 동안 외력에 의한 일은 변형에너지의 형태로 부재 내에 저장된다는 이론을 적용한 것으로서 변형에너지 $\Lambda^{(e)}$는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Lambda^{(e)} = \int_V \frac{\sigma\epsilon}{2} dV = \int_V \frac{E\epsilon^2}{2} dV \text{.....(10)}$$

요소의 수가 n개이고 m개의 절점으로 이루어진 물체라면 물체의 총 포텐셜 에너지 Π는 총 변형에너지와 외력에 의한 일의 차이로 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Pi = \sum_{e=1}^{n} \Lambda^{(e)} - \sum_{i=1}^{m} F_i u_i \text{.....(11)}$$

최소 총 포텐셜 에너지의 원리는 안정된 시스템에 있어서 평형을 이루는 위치의 변위는 시스템의 총 포텐셜 에너지가 최소화되는 점에서 결정된다는 것이다. 즉,

$$\frac{\partial \Pi}{\partial u_i} = \frac{\partial}{\partial u_i} \sum_{e=1}^{n} \Lambda^{(e)} - \frac{\partial}{\partial u_i} \sum_{i=1}^{m} F_i u_i = 0 \text{.....(12)}$$

위의 형상함수에 관한 (8)번식과 각 부재의 변형률은 $\varepsilon = \frac{du}{dy}$라는 관계식 그리고 (10)번식을 정리하여 u_i와 u_j에 대한 변형에너지를 최소화하면 식 (13)과 같은 강성행렬 $[K]$와 하중행렬 $[F]$를 얻을 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial \Lambda^{(e)}}{\partial u_i} \\ \frac{\partial \Lambda^{(e)}}{\partial u_j} \end{Bmatrix} = \frac{AE}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix}$$

$$\{F\}^{(e)} = \begin{Bmatrix} F_i \\ F_j \end{Bmatrix} \text{.....(13)}$$

각 요소에 대한 강성행렬과 하중행렬을 계산하고 조합하게 되면 전체 구조물의 강성행렬과 전체 하중행렬이 얻어진다.

3-1-3 수치해석 결과

범용 유한요소 수치해석 프로그램인 Ansys를 사용하여 수치해석을 실시하였으며 사용요소는 BEAM 4와 SOLID 185 그리고 SOLID 64요소 세 가지이다.

BEAM 4는 3-D elastic beam 요소로서, 절점은 i,j,k의 3개로 이루어지며 자유도는 x,y,z,θ_x, θ_y,θ_z의 6개로 구성된다. 입력해야할 요소의 물성치는 면적과 관성모멘트, 재료의 단면에 관한 치수이며, 재료 물성치는 탄성계수와 밀도 그리고 포아송비 이다. 본 요소를 사용하면 2차원 구조해석에 사용하는 BEAM 3보다 정확한 수치해석 결과를 얻을 수 있다.

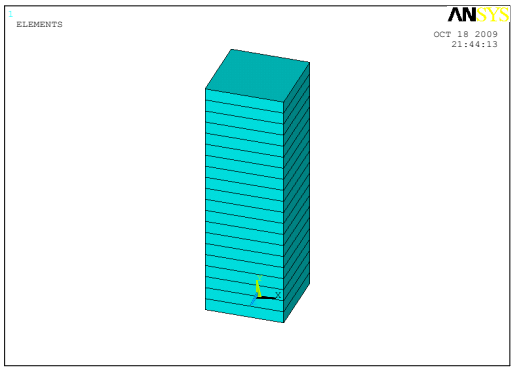
SOLID 64는 3차원 고체문제의 해석에 사용되는 요소로써 특히 비등방성재료의 수치해석에 적합하게 개발된 특수요소로서, 8개의 절점과 각 절점에서는 3개의 자유도를 가지고 있다. 수정이나 복합재료의 수치해석 수단으로 개발된 요소이다. SOLID 185는 3차원 고체문제의 해석에 가장 일반적으로 사용되는 요소로서 SOLID 64처럼 8개의 절점과 각 절점에서는 3개의 자유도를 가지고 있다. 본 요소는 압축이 어려운 탄소성재료나 대 변량을 보이는 재료 혹은 과다 탄성재료, 소성을 보이는 재료 및 크립 효과를 보이는 재료 등 광범위한 고체재료에 적용 가능한 요소로 인정받고 있다.

세 가지 요소 모두에 대해 선형수치해석과 비선형수치해석을 진행하였으며 각각의 요소 분할을 두 가지로 차별화하여 요소의 정선 과정을 통한 수치해석 결과의 정확도 차이 역시 고찰하였다. 본 연구에서는 한옥 전통접합부에 수치해석 적용가능성을 알아보는데 목적이 있으므로 최대한 어떤 요소의 사용이 목재에 가장 적합한지와 요소분할을 통한 정확도 차이 탐지에 집중하여 후속 연구에 필요한 기초자료 습득에 무게를 두었다.

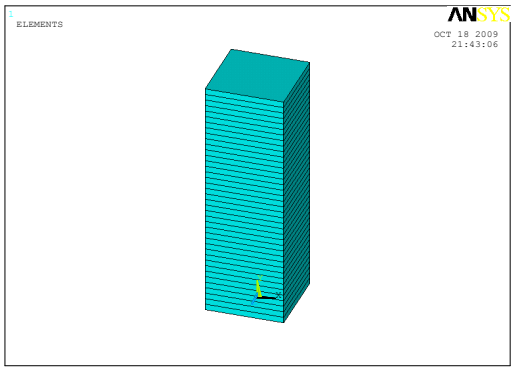
FPL(1999)의 결과에 기초한, 낙엽송의 직교이방성에 따른 유한요소 해석을 위한 초기 입력자료는 표2와 같다. ANSYS 프로그램의 특성상 압축력을 받는 목재의 길이방향은 X축이 아니라 Y축이 되는 것에 유의해야 한다. 좌표계에 따른 초기 값을 잘못 입력하면 정확한 목재의 직교이방거동이 설명되지 않는다. 철골재료나 콘크리트재료와의 가장 상이한 점임을 주의해야 한다. 본 연구에서는 그림 3과 같은 유한요소 모델을 적용했으므로 목재의 직교이방성에 따라 $E_L = E_y$로 가정하고, $E_T = E_x$, $E_R = E_z$로 하였다. 따라서 전단탄성계수와 포아송비 역시 위 기준을 적용하였다. 본 연구의 목적이 어떤 ANSYS 요소가 목재의 유한요소해석에 가장 적합한지를 알아보는 것이기 때문에 수치해석의 결과 값은 ANSYS에서 출력되는 소수점 6자리까지 나타내어 상대적 정확성을 검증하고자 하였다. 본 연구에서 모델링한 압축부재는 그림 3과 같으며 (a)와 (b)는 BEAM 4 요소이며 (c)와 (d)는 SOLID 요소이다. 각각의 부재를 10mm단위로 요소 분할한 경우와 요소를 더 작게 5mm단위로 분할한 각각의 모델링을 통해 요소 정선에 따른 정확도 증가를 살펴보았다. Esize10은 수치해석을 위한 요소분할을 10mm 크기로 한 것이고 Esize5는 5mm 크기로 요소 분할 한 것이다.

Table 2. Elastic constants for the finite element analysis.(at approximately 12% moisture content)

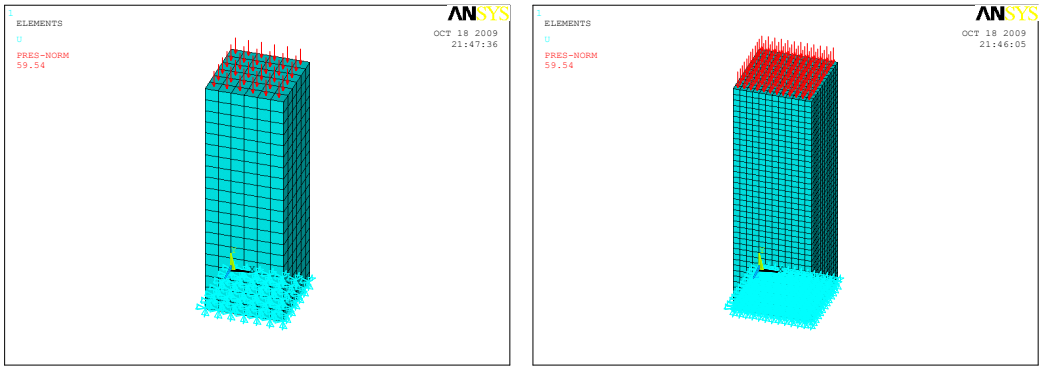
E_x(MPa)	E_y(MPa)	E_z(MPa)	G_{xy}(MPa)	G_{yz}(MPa)	G_{xz}(MPa)	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}
E_L×0.065	12900	E_L×0.079	E_L×0.069	E_L×0.063	E_L×0.007	0.03	0.355	0.352



(a)BEAM4-Esize10model



(b)BEAM4-Esize5model



(c)SOLID-Esize10model (d)SOLID-Esize5model

Fig. 3. Finite element meshes used to model the compressive specimen.

3-1-3-1 BEAM 4의 결과

BEAM 4요소의 경우 3차원 구조해석이 가능한 ANSYS 요소이지만 실제 프로그램에서는 요소의 분할 시에 가로 및 세로로의 분할이 불가능하고 가로로의 적층 분할만 가능하다는 단점이 존재한다. 물론 목재 이외의 강철이나 콘크리트 등의 기존 건축 재료의 해석에서는 모두 등방성 재료이기 때문에 이 부분이 문제가 되지 않는다. 다만 직교이방성을 가지는 목재를 모델화하는데 있어 한계점이 있다. 특히 본 연구의 후속연구로 이어질 옹이의 강도감소 특성 반영이 이 요소에서는 불가능하다. 프로그램 자체가 BEAM요소를 그림 4처럼 하나의 긴 선으로 인식하기 때문에 옹이의 특성을 요소 중간에 삽입할 방법이 없다. 또한 전체적인 응력분포를 완전한 3차원으로 표현하기 어려워서 부재의 파괴 거동을 설명하는데 단점이 있다. 따라서 이 요소는 목재에 있어서는 옹이 등의 강도감소 요인을 반영하지 않는 무결점재료의 거동해석이나 혹은 압축력을 받는 부재의 수직변위에 주로 관심이 있을 경우에만 적절히 사용될 수 있다고 판단된다.

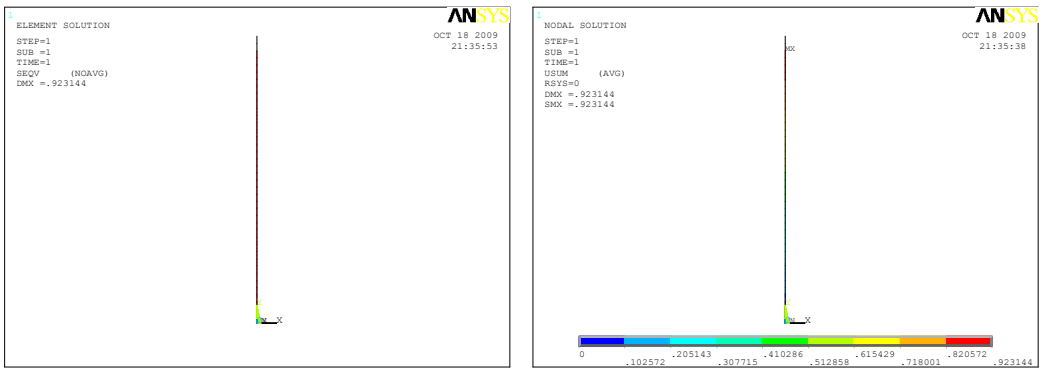


Fig. 4. BEAM element in ANSYS program(#1-3 Esize 5의 1번).

표 1-1의 결과를 보면 최대 압축강도를 적용한 계산 값과 수치해석 결과들이 정확히 일치한다. #1-3과 #1-4, #1-5 모두 직교이방성을 고려한 것이며 #1-3은 선형수치해석결과이고 #1-4는

비선형수치해석결과이다. #1-5는 비선형해석결과이지만 해석의 정확성을 높이기 위해서 실제 압축 실험을 실시한 결과의 stress-strain 관계를 추가로 고려하여 해석한 결과이다. 또한 각 200mm길이의 압축부재의 요소분할에 있어서 10mm 간격의 요소분할 결과와 5mm 요소 분할의 결과 역시 동일하였다. 즉 BEAM 요소를 사용하여 압축부재의 수직변위와 응력분포를 파악하기 위해서는 추가적인 요소정선과정이 해석에 소요되는 시간에 비해 정확도의 증가는 없다고 판단된다. 따라서 단순한 거동파악을 위한 BEAM 요소를 사용할 때에는 미세한 요소분할은 불필요하며 또한 비선형해석 역시 선형해석의 결과와 달라질게 없으므로 불필요하다고 판단된다. 그림 5에 비선형해석으로 인한 추가적인 해석 소요 시간이 발생한 것을 표시하였다.

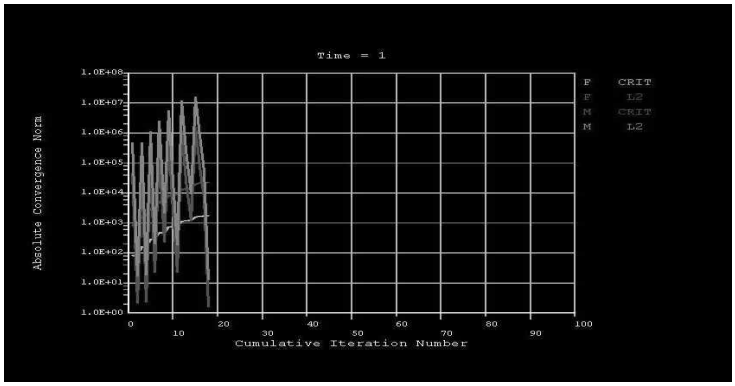


Fig. 5. Non-linear analysis features for orthotropic characteristics of wood.

3-1-3-2 SOLID 185의 결과

표 1-2의 #2-6과 #2-7이 해당되며 전자는 선형수치해석결과이며 후자는 비선형수치해석결과이다. 고체문제에 주로 사용되는 본 요소는 후속연구에서 진행될 옹이의 강도 감소 특성을 반영할 수 있는 적합한 요소로 판단된다. 앞의 BEAM 요소의 경우 옹이를 실린더 형태나 원추형 형태로 반영할 방법이 없지만 본 SOLID 요소는 옹이로 인한 강도감소 효과를 고체요소의 체적 감소를 통해 반영할 수 있을 것으로 여겨진다. 또한 BEAM 요소의 경우 압축부재의 국부적 응력분포를 나타내기 어려워 구조부재의 지역적 파괴를 설명할 수 있는 응력분포 표현에 부적합하므로 이후의 인장부재나 휨부재 등의 수치해석 거동에는 옹이의 영향을 모델링할 수 있고 부재의 국부적인 응력분포를 그림 6처럼 나타낼 수 있는 SOLID요소가 적합할 것으로 생각된다. 그림 6에 제시된 수치해석 결과처럼 부재의 위치별 응력분포와 위치별 변위를 관찰할 수 있기 때문에 어느 지점에서 변형이 가장 심하고 또한 어느 부위에 응력이 집중되어 파괴로 이어질 가능성이 많은지를 수치해석을 통해 사전에 파악 할 수 있다는 장점이 있는 것이다.

앞에서도 언급하였지만 실질적으로 소수점 둘째자리까지는 동일하지만 이후 고려할 구조부재의 치수나 하중 값에 따라서 소수점의 자리 수는 달라지므로 본 연구에서는 ANSYS 출력 자릿수에 기준하여 비교하였다. 먼저 SOLID 185요소의 수치해석 결과를 보면 표 1-2에 제시된바와 같이 선형수치해석의 결과 값이 비선형 수치해석 값보다 더 크게 나타나며 각 해석방법에서는 요소를 더 미세하게 분할 할경우의 값이 요소 정선전의 값에 비해 더 크게 나타나는 경향을

보인다. 하지만 계산 값과의 절대차이는 표 3($\frac{Analytical - Numerical}{Analytical} \times 100$)에 나타난 바와 같이 비선형수치해석의 값이 선형수치해석의 값보다 작았다. 즉 비선형수치해석이 선형수치해석보다 더 정확도가 높다고 할 수 있다. 또한 비선형수치해석의 경우 요소를 정선할 경우 즉 요소분할을 더 적게 할 경우 더 계산 값에 근접함을 알 수 있다. 하지만 해석과정에 소요되는 시간이 미세한 요소분할로 인해 상당히 증가함을 고려하면 효율성면에서는 재고할 필요가 있다고 판단된다. 실제 본 연구에서 요소를 10mm 단위로 분할했을 경우에 비해 5mm 단위로 분할했을 경우 약 30배 정도 해석 시간이 더 소요되었다. 본 연구에서 실험한 압축시편의 길이는 200mm이기 때문에 5mm 요소 분할에 의한 비선형수치해석의 경우에도 3분정도의 시간이 소요되지만 만일 휨거동을 해석하기 위한 실대재 시편들의 경우라면 해석에 소요되는 시간은 상당할 것이다.

한편, 선형수치해석의 경우 요소 정선으로 인한 정확도 증가는 일어나지 않았다. 오히려 행렬의 계산과정에서 발생하는 오차의 누적으로 요소 정선에 따라 약간의 정확도 감소가 발행하였음을 생각한다면 선형수치해석 역시 요소 정선은 불필요하다고 판단된다. 선형해석의 경우 요소 정선에 따른 추가적인 해석 소요 시간의 증가는 미비하였다.

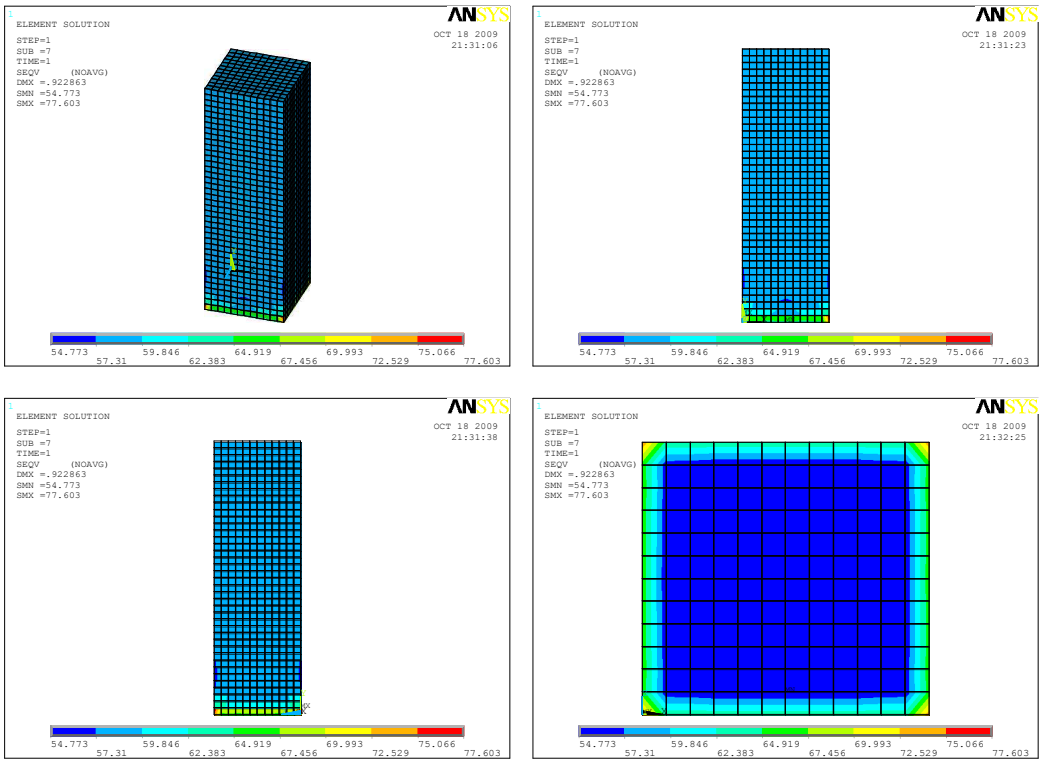


Fig. 6. SOLID element in ANSYS program(#2-9 Esize 5의 1번 결과: 윗 좌측부터 시계방향으로 입체결과/전면/우측면/바닥면).

Table 3. Comparison of analytical results with finite element model

#2-6		#2-7		#2-8		#2-9	
Esize10	Esize5	Esize10	Esize5	Esize10	Esize5	Esize10	Esize5
-0.150265	-0.169655	0.051762	0.032697	-0.160664	-0.172038	0.040930	0.030422
-0.159070	-0.178421	0.047972	0.028833	-0.169433	-0.180853	0.037081	0.026613
-0.150760	-0.170152	0.048966	0.030012	-0.161168	-0.172452	0.038229	0.027712
-0.150315	-0.169791	0.033758	0.016182	-0.160766	-0.172167	0.023189	0.012382
-0.147656	-0.167084	0.047077	0.029558	-0.158100	-0.169442	0.036408	0.025627

그러나 이상은 절대 값만의 비교이므로 각 결과 값이 통계적으로 유의차가 존재하는지 추가적인 검증이 필요하다. 따라서 선형수치해석결과와 비선형수치해석결과간의 유의성 검사와 요소 정선에 따른 통계적 유의성 검사를 실시하였다. 두 집단 간의 유의성 비교를 해야 하므로 먼저 F 검정을 실시하여 두 집단의 분산에 대해 등분산인지 이분산인지를 결정하고 이를 바탕으로 t 검정을 실시하여 집단 간의 통계적 유의성 비교를 실시하였다.

결과는 표 4와 같다. 각각의 비교 값들에 대한 F 검정의 결과 F값이 0.05보다 높아 비교 대상들이 등분산이라는 가정 하에 t-검정을 실시하였다. SOLID 185 요소의 경우 4가지 비교 모두 t 통계량이 기각치보다 작고 유의 확률 값이 0.05보다 크므로 비교 대상들 간에는 유의차가 존재하지 않았다. 즉 통계적 관점에서 각 비교 대상 값들의 차이는 없는 것으로 받아들여진다는 것이다. 또한 계산 값과 비교의 대상 4가지 중 하나인 선형해석 결과 값과의 유의성 검증에서도 두 집단 간에는 유의차가 존재하지 않는 것으로 나타났다.

따라서 요소 정선에 따른 해석 소요 시간의 급격한 증가나 비선형해석의 적용상의 어려움을 고려한다면 고도의 정확성이 요구되는 경우가 아니라면 직교이방성에 대한 고려만 충분히 해줄 수 있다면 선형수치해석 방법으로도 상당한 정도의 수치해석 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4. Statistical significant difference between results(at 95% confidence limit)

SOLID 185		SOLID64	
Linear(10*)-Nonlinear(10)	NS	Linear(10)-Nonlinear(10)	NS
Linear(5)-Nonlinear(5)	NS	Linear(5)-Nonlinear(5)	NS
Linear(10)-Linear(5)	NS	Linear(10)-Linear(5)	NS
Nonlinear(10)-Nonlinear(5)	NS	Nonlinear(10)-Nonlinear(5)	NS
Analytical-Linear(10)	NS	Analytical-Linear(10)	NS

(*: number means element meshing size)

3-1-3-3 SOLID 64의 결과

표 1-2의 #2-8과 #2-9가 해당되며 전자는 선형수치해석의 결과이고 후자는 비선형수치해석의 결과이다. 본 요소 역시 SOLID 185처럼 선형과 비선형의 차이 이외에도 각각의 경우에서 요소 분할을 10mm 간격과 5mm 간격으로 달리하여 요소 정선에 따른 차이 역시 살펴보았다.

SOLID 64 요소의 경우에도 SOLID 185 요소의 결과와 동일하게 표 1-2를 보면 선형해석의 결과 값이 비선형해석의 결과 값보다 크게 나타났으며 각 해석방법에서는 요소 정선을 했을 경

우의 결과 값이 더 크게 나타났다. 계산 값과의 차이, 즉 정확도에서도 표 3를 보면 SOLID 185와 동일하게 비선형수치해석의 결과 값이 선형수치해석 결과 값 보다는 정확도가 높았으며 비선형해석의 경우 요소 정선을 통해서 더 정확한 값을 얻을 수 있었다. 하지만 본 요소도 마찬가지로 요소 정선으로 인한 해석 소요 시간의 상당한 증가는 고려해야 할 문제점으로 판단된다. 본 요소 역시 선형수치해석의 경우 요소 정선에 의한 정확도 증가는 나타나지 않았다. 그 이유는 SOLID 185와 동일할 것으로 판단된다. SOLID 64 요소에 대한 결과 값들 역시 통계적 유의성 검증을 실시하였다. 결과는 표 4와 같다. 각각의 비교 값들에 대한 F 검정의 결과 F값이 0.05보다 높아 비교 대상들이 등분산 이라는 가정 하에 t-검정을 실시하였고, SOLID 64 요소 역시 SOLID 185 요소처럼 4가지 비교 모두 t 통계량이 기각치보다 작고 유의 확률 값이 0.05보다 크므로 비교 대상들 간에는 유의차가 존재하지 않는다. 즉 통계적 관점에서 각 비교 대상 값들의 차이는 없는 것으로 받아들여진다는 것이다. 또한 본 요소도 마찬가지로 계산 값과 비교의 대상 4가지 중 하나인 선형해석 결과 값과의 유의성 검증에서 두 집단 간에는 유의차가 존재하지 않는 것으로 나타났다.

3-1-3-4 SOLID 요소간의 결과 비교

선형수치해석의 결과 값(표 1-2)을 보면 SOLID 64의 결과 값이 SOLID 185의 결과 값보다 더 크게 나타나며 이로 인해 계산 값과의 절대 차(표 3)는 더 벌어진다. 즉, 선형수치해석을 실시할 경우에는 SOLID 185 요소 사용이 정확도를 더 높일 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 비선형수치해석의 결과 값을 보면 SOLID 64의 결과 값이 더 정확도가 높음을 알 수 있다. 따라서 정확도의 측면에서만 본다면 SOLID 64 요소를 사용하여 비선형수치해석을 실시하고 더불어 가능한 한 요소를 작게 분할하는 것이 최적의 결과를 얻을 수 있을 것이다. 앞에서 밝혔듯이 SOLID 64 요소의 개발 목적이 비등방성 요소를 해석하려고 하는 것에서 출발한 것이므로 일반적으로 가장 널리 사용되는 고체요소인 SOLID 185 요소 보다는 직교이방성을 지닌 목재에 더 타당한 것은 당연한 것으로 여겨질 수 있을 것이다. 하지만 비선형수치해석을 실시하는데 있어서의 난해함과 요소 정선으로 수반되는 해석 소요 시간의 상당한 증가는 정확도 상승과 맞물려 구조해석 및 설계자에게 어려운 선택을 요구하게 될 것이다. 두 가지 고체요소들 간의 추가적인 통계적 유의성 검증은 3.1.3.2절과 3.1.3.3절의 내용을 검토해보면 불필요한 것으로 판단된다.

3-1-3-5 BEAM 요소와 SOLID 요소의 결과 비교

압축력을 받는 부재의 경우 복잡한 요소분할과 장시간의 해석이 소요되는 SOLID 요소보다 하나의 선으로 해석되는 BEAM 요소가 더 정확하고 신속한 결과를 나타낸다. 하지만 하나의 선으로 인식되는 특성으로 인해 상대적으로 직교이방성을 보이는 목재에서 특히 옹이라는 특이한 강도감소 요인을 가지는 목재에 대한 모델링에는 BEAM 요소가 문제점을 가지고 있다. 즉, 옹이를 원추형이나 가운데가 빈 실린더 형태로 모델링하여 전체 부재에서 체적의 감소로 옹이의 강도감소 특성을 반영할 방법이 없다. 따라서 단순 압축부재의 계산에서는 약간의 정확도가 떨어지지만-하지만 통계적 유의성을 보이지 않는 정도의 정확도 차이- 옹이 등의 강도 감소 요인을 모델링 할 수 있는 SOLID 요소를 사용해야 옹이의 영향이 더욱 커지는 실대재 휨 부재 등에 효율적으로 적용할 수 있을 것이다. 또한 부재의 파괴 형태에 관련된 응력의 분포 모양을

BEAM 요소에서는 관찰할 수 없다. 하지만 SOLID 요소에서는 세부적인 응력 분포 양상을 파악할 수 있으므로 특히 직교이방성을 지니는 목재에는 반드시 SOLID 요소를 사용하여 수치해석을 실시해야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 접합을 실시하지 않은 단순 부재에 대해 압축실험을 실시하고 동일한 수치조건을 적용하여 수치해석법을 적용한 결과와 비교 분석하여 차후 세부적인 전통접합부의 다양한 형태별 구조해석을 수치해석으로 대체하고자 하는 선행연구이다. 목재의 직교이방성을 고려하여 해석을 실시하였고, BEAM 요소와 SOLID 요소 두 가지에 대해 선형수치해석과 비선형수치해석을 진행하였으며 각각의 요소 분할을 두 가지로 차별화하여 요소의 정선 과정을 통한 수치해석 결과의 정확도 차이 역시 고찰하였다. 마지막으로 실제 실험결과와 수치해석 결과의 유사성을 검증하기 위해 통계적 유의성 검증을 실시하였다.

선형수치해석을 실시한 결과 SOLID 185 요소 사용이 SOLID 64 요소보다 정확도가 높았지만, 비선형수치해석의 경우 SOLID 64의 정확도가 더 높음을 알 수 있었다. 따라서 정확도의 측면에서만 본다면 SOLID 64 요소를 사용하여 비선형수치해석을 실시하고 더불어 가능한 한 요소를 작게 분할하는 것이 최적의 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 비선형수치해석을 실시하는데 있어서의 어려움과 요소 정선으로 수반되는 해석 소요 시간의 상당한 증가는 정확도 상승과 맞물려 구조해석 및 설계자에게 어려운 선택을 요구하게 될 것이다.

압축력을 받는 부재의 수직변위에만 관심이 있다면 복잡한 요소분할과 장시간의 해석이 소요되는 SOLID 요소보다 하나의 선으로 해석되는 BEAM 요소가 더 정확하고 신속한 결과를 나타낸다. 하지만 하나의 선으로 인식되는 특성으로 인해 상대적으로 직교이방성을 보이는 목재에서 옹이라는 중요한 강도감소 요인을 가지는 목재에 대한 모델링에는 BEAM 요소가 문제점을 가지고 있다. 따라서 옹이 등의 강도 감소 요인을 모델링 할 수 있는 SOLID 요소를 사용해야 옹이의 영향이 더욱 커지는 실대재 휨 부재 등에 효율적으로 적용할 수 있을 것이다. 또한 부재의 파괴 형태에 관련된 세부적인 응력의 국부적 분포 모양을 관찰 할 수 있는 SOLID 요소를 사용하여 수치해석을 실시해야 목재의 파괴 형태 등을 규명할 때 유용할 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 건축재료 중 목재만의 특징인 직교이방성을 정확히 반영만 한다면 철골구조나 콘크리트구조처럼 수치해석의 결과가 상당히 우수한 것을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 이어지는 연구에서는 옹이의 강도 감소 요인을 반영한 실질적인 유한요소 해석을 통해 구조부재의 국부적 응력분포를 정확히 파악하여 파괴형태 분석 및 구조 설계에 반영을 할 수 있고 또한 실제 전통접합부의 정확한 형태를 반영한 유한요소 수치해석이 가능할 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

김광철, 박희준, 정인수. 2009. 목재 폐기물 재활용의 의의 및 필요성에 대한 고찰. 한국가구학회

지. 20(1):31-41.

박정선. 2008. ANSYS를 이용한 유한요소해석. ITC. Ch. 3 & Ch.11.

ASTM D245. 2006. Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber.

B.H. Xu, M. Taazount, A. Bouchaïr, P. Racher. 2009. Numerical 3D finite element modelling and experimental tests for dowel-type timber joints. Construction and Building Materials. 23:3043 - 3052.

Cheng Piao, ToddF. Shupe, R. C. Tang, Chung Y. Hse. 2005. Finite element analysis of wood laminated composite poles. Wood and Fiber Science. 37(3):535-541.

FPL. 1999. Wood handbook. UDSA. Ch. 4.

Johan Sj¨odin, Erik Serrano. 2008. A numerical study of methods to predict the capacity of multiple steel-timber dowel joints. Holz Roh Werkst. 66:447 - 454.

Jozsef Bodig & Benjamin A. Jayne. 1982 Mechanics of wood and wood composite. VNR. Ch.3.

KSF 2206-2004-06. 2004. Method of compression test for wood.

M. A. Zocher, S. E. Groves, D. H. Allen. 1997. A three-dimensional finite element formulation for thermoviscoelastic orthotropic media. International Journal for numerical methods in engineering. 40:2267-2288.

M. del Senno, M. Piazza, R. Tomasi. 2004. Axial glued-in steel timber joints:experimental and numerical analysis. Holz Roh Werkst. 62:137 - 146.

S. J. Smith, I. D. Parsons, and K. D. Hjelmstad. 1999. Finite-element and simplified models of GFRP connections. Journal of structural engineering JULY:749-756.

Z.W. Guana, E.C. Zhub. 2009. Finite element modelling of anisotropic elasto-plastic timber composite beams with openings. Engineering Structures. 31:394-403.