

옹이 형태별 소재의 압축강도 예측에 관한 연구*¹

김 광 철*^{2†}

A Study on the Estimation for the Compressive Strength of Member According to the Knot Types*¹

Gwang-Chul Kim*^{2†}

요 약

구조용 목재부재의 성능 예측에 가장 큰 영향을 끼치는 옹이를 활용하여 유한요소 수치해석을 실시하였다. 다른 구조용 재료와 달리 목재의 경우 직교이방성을 나타내기 때문에 이를 적용하였고 옹이를 실린더 형태, 원추형 형태, 육면체 형태로 모델화 하였다. 목재 부재에 대해 실제 압축강도실험을 실시하여 그 파괴형태를 파악하고 최대강도값을 계산하였으며, 각 부재의 치수와 옹이의 크기, 위치, 개수를 반영한 수치해석 모델을 제작하여 유한요소해석을 실시하였다. 실험에서 얻어진 최대압축강도를 적용한 수치해석을 실시하여 옹이자료에 따른 각 부재의 응력분포형태를 파악하고 이를 실제 부재의 파괴형태와 비교 분석하였다. 수치해석에 소요되는 시간이나 요소 분할의 어려움, 옹이 주위의 응력 전달의 유사성 등에 기준했을 때 실린더 형태의 요소가 가장 타당하다고 판단되었다. 또한 응력 분포 모양과 변형 분포 모양을 비교한 경우 유한 요소 수치해석의 결과에서 응력이 가장 집중되는 부분과 변형이 가장 심하게 발생한 주위에서 실제 시편의 파괴나 균열이 발생함을 알 수 있었다. 이를 기초로 유한요소 수치해석법을 직교이방성과 옹이 모델링을 적절히 적용할 경우 휨응력을 받는 부재와 인장 응력을 받는 부재 등의 성능 해석에 유용한 수단으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

ABSTRACT

Finite element numerical analysis was conducted with using the knot data which has a strong influence on the prediction of capacity for the structural wood member. Wood is a orthotropic property unlike other structural materials, so orthotropic property was applied. Knot was modelled as a cylinder shape, cone shape, and cubic shape. Compressive test was carried out to investigate the failure types and to calculate ultimate strengths for the wood members. Numerical

*¹ 접수 2009년 11월 10일, 채택 2010년 2월 4일

*² 전북대학교, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

† 교신저자(corresponding author) : 김광철(e-mail:)

model which can reflect the member size, number of knot, location of knot, size of knot was created and analyzed. By the numerical analysis using the ultimate compressive strength, numerical stress distribution types of each specimen was compared to real failure types for the test specimen. Cylinder shape modelling might be most reasonable, according to the necessary time for the analysis, the difficulty of element meshing, and the similarity of stress transfer around knot. Moreover, according to the stress and deformation distribution for the numerical analysis, failures or cracks of real specimen were developed in the vicinity of stress concentrated section and most transformed section. Based on the those results, numerical analysis could be utilized as a useful method to analyze the performance of bending member and tensile member, if only orthotropic property and knot modelling were properly applied.

Keywords: finite element numerical analysis, knot data, cylinder shape, failure type, orthotropic property

1. 서 론

목재의 강도를 감소시키는 요인에는 목재가 함유하고 있는 수분에서부터 목리경사, 건조로 인한 결점, 용이 등 다양하다. 이 중 구조용 목재부재의 성능 예측에 가장 큰 영향을 끼치는 인자가 용이이며 이를 반영하여 구조부재의 성능 예측을 하기 위해 다양한 연구 방법들이 시도되어왔다. 하지만 목재의 경우 다른 구조부재와 달리 방향에 따라 현저히 강도가 다르게 나타나는 전형적인 직교이방성 재료이며 또한 천연재료의 특성상 모든 영향인자를 반영한 부재 성능 예측 모델링에는 한계가 있어왔다. 따라서 가장 큰 강도 감소 요인이 되는 용이를 반영한 모델링과 예측에 연구가 집중되어 왔다. 하지만 용이의 경우 눈에 보이지 않게 목재 내부에 숨어있는 부분의 크기를 정확히 알 수 없기 때문에 정확한 치수를 반영한 모델링이 어렵다는 문제점을 내포하고 있다. 하지만 용이에 대한 실험적인 연구들을 종합해보면 어느 정도 용이 치수에 대한 가정을 해볼 수 있다.

김 등(2004)에 의하면, 용이는 제재목의 강도를 저하시키게 되는 가장 흔한 특성으로, 용이 하나의 영향은 구멍 하나의 영향과 맞먹는 것으로 취급할 수 있다고 하였으며, 일부 경우, 용이는 교주목리를 수반하기 때문에 천공에 의한 구멍보다 더 큰 영향을 미칠 수 있다고 하였다. Bodig과 Jayne (1982)에 의

하면 생재조건에서는 용이가 어느 정도의 강도나 강성을 가지지만 건조 등의 가공과정을 거치고 나면 실질적으로 사용조건이 되었을 때는 사실상 용이의 강도값이나 강성값을 0으로 가정하는 것이 옳다고 하였다. 하지만 용이가 모든 면에서 강도 결점 요인은 아니며 목리에 수직한 압축이나 목리방향으로의 전단에서는 오히려 강점으로 작용할 수도 있다고 하였다.

따라서 본 연구에서는 사전에 목재의 압축강도 실험을 실시하여 그 파괴형태를 파악하고 최대강도값을 계산하였다. 이를 바탕으로 각 부재의 치수와 용이의 크기, 위치, 개수를 반영한 수치해석 모델을 제작하여 유한요소해석을 실시하였다. 실험에서 얻어진 최대압축강도를 적용한 수치해석을 실시하여 용이자료에 따른 각 부재의 응력분포형태를 파악하고 이를 실제 부재의 파괴형태와 비교 분석하였다. 실제 용이의 영향은 압축보다는 인장이나 휨에서 더 크지만 본 연구에서는 용이 자료의 수치해석 적용 가능성을 파악하고자 압축실험만 실시하였다.

2. 재료 및 방법

구조용재로 널리 사용되는 낙엽송을 사용하였으며, 시편의 치수는 단면 크기, 60 × 60 mm으로, 길이는 200 mm로 하였다. 압축강도는 KSF 2206-2004-06에



Fig. 1. Cylinder type and cone type element of knot model for the compressive member.

따라 측정하였다. 하중 부하 속도는 10 mm/min이었다.

옹이 자료 측정의 경우 ASTM D245에 의하면 기둥 등의 압축부재의 경우 옹이의 최소 수치를 따라야 한다고 추천하고 있지만 본 연구에서는 시뮬레이션의 최적 결과를 얻기 위해 옹이의 최대 수치를 지름으로 하는 경우와 최소 수치를 지름으로 하는 경우 그리고 두 값의 평균값을 지름으로 하는 경우 세 가지에 대해 부재를 관통하는 실린더형태로 옹이를 모델화하고 이와 더불어 추가적으로 옹이의 최대 수치를 원뿔의 지름으로 하여 옹이를 원추형으로 모델화하여 결과를 살펴보았다(Fig. 1).

유한요소 수치해석을 적용하기 위한 사용 요소는 이전의 연구(김, 2009)에서 직교이방성을 지닌 목재에 가장 적합한 것으로 나타난 범용 유한요소 수치해석 프로그램 Ansys의 SOLID64라는 3차원 고체요소를 사용하였으며 실린더로 모델링한 경우의 요소분할은 6 mm로 하였고, 옹이를 원추형으로 모델링한 경우에는 원추형의 입구와 끝 부분의 치수차이로 인해 요소분할을 실린더와 동일하게 6 mm로 할 경우 옹이 모델링 요소간의 접촉면 발생으로 인한 에러가 발생하여 요소 분할을 4 mm로 더 작게 하여 수치해석을 수행하였다. 추가로 시편 A에 대해서는 사각요소도 사용하여 옹이 최대지름을 한변으로 하는 육면체 관통 형태의 요소를 사용해서 비교하였다. 개발한 유한요소 모델은 Figs. 2, 3과 같다. Fig. 2는 실린더 형태로 옹이를 모델화 한 것이며 Fig. 3은 옹이를 원추형 형태로 모델화 한 것이다. 각 그림에서 첫 그림은 전체를 도식화 한 것이고 차례로 정면, 우측면, 뒷면, 좌측면을 나타낸 것이다. 마지막에 전체적인 유한요소 모델을 표시하였다. 실린더 형태로 옹이를 모델화 한 경우에는 관통시키기 때문에 반대편에서

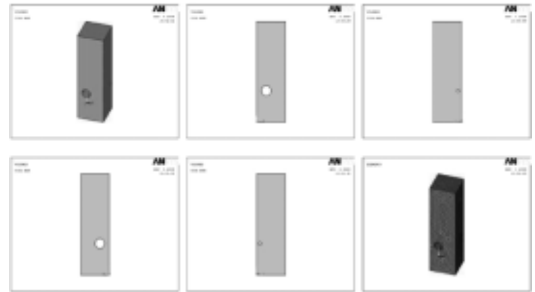


Fig. 2. Model for the compressive member using the cylinder type element (Specimen A: Solid/Front/Right/Back/Left/FEM model).

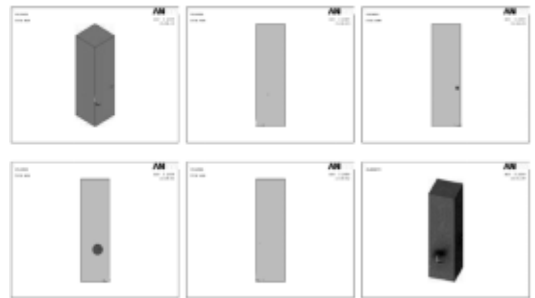


Fig. 3. Model for the compressive member using the cone type element (Specimen A: Solid/Front/Right/Back/Left/FEM model).

관통된 부분이 나타나지만 원추형으로 모델화 한 경우에는 반대편에서는 하나의 점으로만 표시가 되어 관통된 실린더 형태와는 모델이 다르게 보인다. 각 부재의 옹이 분포에 대한 자료는 Table 1과 같다.

유한요소 수치해석을 위한 상수값으로는 탄성계수와 전단계수 그리고 포아송비가 있다. 이전의 연구(김, 2009) 결과를 따라 탄성계수는 길이방향(y축) 12,000 MPa, x축 방향은 $12,000 \times 0.065$, z축 방향은 $12,000 \times 0.079$ 를, 전단계수는 $G_{xy} = 12,000 \times 0.069$, $G_{yz} = 12,000 \times 0.063$, $G_{xz} = 12,000 \times 0.007$ 로 포아송비는 $\nu_{xy} = 0.03$, $\nu_{yz} = 0.355$, $\nu_{xz} = 0.352$ 로 하였다.

Table 1. Knot data for the compressive member

Specimen A					
Front	Back	Left		Right	
None	From right 15 mm	None		From right 4 mm	
	From bottom 60 mm			From bottom 60 mm	
	Width 20 mm			Width 6 mm	
	Height 5 mm			Height 5 mm	
Specimen B					
Front	Back	Left		Right	
None	From right 1 mm	None		From right 30 mm	
	From bottom 154 mm			From bottom 149 mm	
	Width 9 mm			Width 6 mm	
	Height 5 mm			Height 6 mm	
Specimen C					
Front	Back	Left	Right		
From left 3 mm	From right 8 mm	From right left 6 mm	From right 5 mm	None	
From bottom 46 mm	From bottom 75 mm	From bottom 76 mm	From bottom 42 mm		
Width 4 mm	Width 6 mm	Width 7 mm	Width 12 mm		
Height 4 mm	Height 6 mm	Height 6 mm	Height 7 mm		

Table 2. Comparison among numerical analysis results using the SOLID 64 element (unit:mm)

Ultimate compressive strength (Mpa)	Non-knot	Max ^a	Min ^a	Avg ^a	Cone ^b	Cube
A	5954	0.925	1.320	0.938	1.002	1.249
B	5431	0.844	0.945	0.860	0.879	-
C	5743	0.892	1.030	0.928	0.974	-

^a: cylinder type element, ^b: cone type element

3. 결과 및 고찰

Table 2에 제시한 수치해석 결과는 측정된 옹이의 치수 중 옹이의 최대치수를 지름으로 한 경우, 최소 치수를 지름으로 한 경우 그리고 평균값을 지름으로 하여 실린더형태로 옹이를 모델링 한 3가지와 옹이를 원추형으로 모델링한 경우 각각에 대한 수직변위를 나타낸 것이다. 옹이의 영향을 고려하지 않고 수치해석을 수행한 이전의 연구(김, 2009)에서 얻어진 결과를 대조구로(Non-knot) 사용하여 비교하였다. 추가로 A 시편에 한해서 실린더 형태와 원추형 형태 이외에 육면체 형태로 옹이를 모델링한 결과를 비교의 목적으로 추가하였다.

3.1. 요소 사용별 변위 비교

KSF 2206에 따른 압축시편의 최대강도값과 그에 따른 계산 수직 변위($\delta = \frac{PL}{AE}$)와 수치해석의 결과는 Table 2와 같다.

Table 2에 의하면 대조구로서 옹이의 영향을 모델링 하지 않은 수직 변위(Non-knot)에 대해 옹이를 모델링 한 경우들의 수직 변위가 더 크게 발생함을 볼 수 있다. 옹이의 크기가 클수록 수치해석 모델의 손실면적이 증대하므로 당연히 수직 변위의 값은 옹이를 모델링 한 크기에 정비례하였다. Table 3에 각 수치해석 결과 간의 유의성을 검토하기 위해 유의성 검증 결과를 제시하였다.

Table 3. Anova table for the comparison among the numerical analysis results

Summary				
Groups	Count	Sum	Mean	Variance
Column 1	3	3.294623	1.098208	0.038716
Column 2	3	2.726707	0.908902	0.001816
Column 3	3	2.854652	0.951551	0.004168
Column 4	3	2.983365	0.994455	0.00877

Anova						
Factor	SS	DF	MS	F	P-value	F-limit
Treatment	0.059316	3	0.019772	1.479111	0.291908	4.066181
Error	0.10694	8	0.013368			
Total	0.166257	11				

F값이 1.48로 기각치 4.07보다 낮게 나타나므로 유의성이 존재하지 않는다. 즉 응이 모델링의 형태나 크기에 따른 그룹간의 통계적인 차이가 존재하지 않는다고 판단할 수 있다. 즉, 어떤 치수를 기준으로 응이를 모델링하여도 수직변위의 값은 달라지지만 그 차이가 통계적으로 의미를 가질 정도의 차이는 아니라고 할 수 있다. 이에 따르면 응이의 크기 측정에서 작은 치수를 측정하는 것보다는 큰 치수를 측정하는 것이 측정 오차를 줄일 수 있으므로 큰 치수를 기준으로 삼는 것이 효율적이라고 판단된다. 하지만 응이 모델링의 크기 문제가 아니라 응이 모델링에 따른 국부적인 응력분포에 관심이 있을 경우에는 실린더 형태의 응이 모델링과 원추형의 응이 모델링 그리고 육면체 형태의 응이 모델링 각각의 자세한 수치해석 결과를 비교할 필요가 있을 것이다.

Fig. 4에 세 가지 형태의 응이 모델링 결과를 비교해 나타내 보았다. Fig. 4의 (a)는 실린더형태의 요소로 응이를 모델화한 것이고 (b)는 원추형으로 응이를 모델링한 것이며 (c)는 육면체형태로 응이를 모델링 한 것이다. 각각에 대해 입방체, 전면, 우측면, 뒷면, 좌측면의 순서로 응력 분포 결과를 나타내었다.

실제 응이와 가장 근접한 형태의 모델링은 원추형을 사용하는 경우일 것이다. 눈에 보이지 않게 숨어있는 응이의 모양은 절개하지 않고는 정확히 알 방법이 없지만 대략적인 응이의 형태를 보면 육면체나 실린더

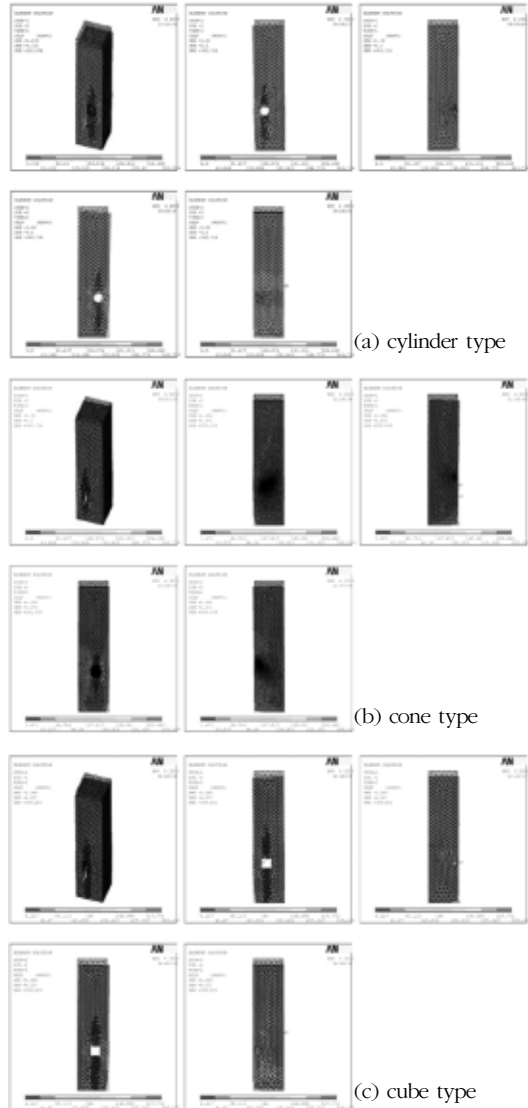


Fig. 4. The results of three knot modelling for the compressive member (Solid/front/right/back/left).

형태보다는 원추형에 가깝다고 추론해 볼 수 있다. 실제 수치해석의 결과 중 각 부위별 응력의 분포 형태를 보더라도 응이를 원추형으로, 즉 Fig. 4의 (b)의 형태로 모델링 했을 경우 부재의 자세한 국부적 응력 분포를 나타내기에 가장 적합했다. 즉 실제 응이의 분포형태가 실린더(Fig. 4의 a)나 육면체(Fig. 4의

c) 등의 정형화된 형태가 아니기 때문에 원추형으로 모델링하는 것이 옹이의 외양을 반영하는데 있어 가장 실질적이지만 유한요소해석의 특성상 원추형의 요소를 사용했을 경우 부재의 부정형요소분할에 따른 어려움과 해석에 소요되는 과도한 시간으로 실질적인 해석의 어려움이 존재했다. 실제 해석에 소요된 시간이 실린더형태의 요소나 육면체요소를 사용했을 경우에 비해 수백 배 더 소요되었다. 또한 옹이가 원추형으로 모델링 되면 원추형에 반영되는 요소 분할의 크기 문제로 다른 형태의 요소보다 분할의 크기가 작아야 한다는 어려움이 존재했다. 실제 실린더 형태나 육면체 형태의 요소를 사용할 경우 요소 분할은 6 mm 정도로 하면 정확한 해를 얻을 수 있었지만 원추형의 경우 4 mm 정도의 요소 분할을 해야 요소 분할이 가능하며 그 이상의 크기로 요소 분할을 실시하면 요소 분할 과정이 진행되지 않는 문제점을 가지고 있었다. 또한 육면체 형태의 요소를 사용했을 경우에는 요소 분할의 간단함과 해석 소요 시간의 단축이라는 장점이 있었지만 사각 요소 사용으로 인해 인접 요소간 응력 전달이 너무 급격한 경사를 지닌다는 점이 실제 옹이 주위의 응력 전달 방식과는 상이하여 문제점으로 인식되었다. 따라서 해석 소요 시간의 적절성과 옹이 주위의 응력 전달과의 유사성, 요소 분할시의 어려움의 정도 등을 고려할 때 실린더 형태로 관통되는 방식의 옹이 모델이 가장 현실적이라 판단된다.

3.2. 실제 파괴형태와 응력분포형태비교

Figs. 5~7에 각 부재의 실제 압축 강도 실험 시편과 유한요소 수치해석의 결과를 나타내었다. 전면, 우측면, 뒷면, 좌측면의 순서대로 나타냈으며 실제 파괴형태를 첫 번째에 나타내고 그 다음에 각 부재의 응력분포와 변형량 분포를 차례로 나타내었다. 서론에서 언급한 바와 같이 옹이 부위의 경우 완전히 관통한 구멍으로 취급하여 실린더 형태로 모델링한 결과이다. 실제 파괴형태와 어느 정도는 유사한 응력 분포를 보임을 알 수 있다. 하지만 옹이 이외에 목리 경사 등의 요인이 모델링 되지 않아 실제 파괴형태와 완전히 일치하지는 않는다. Cheng 등(2005)이 지적

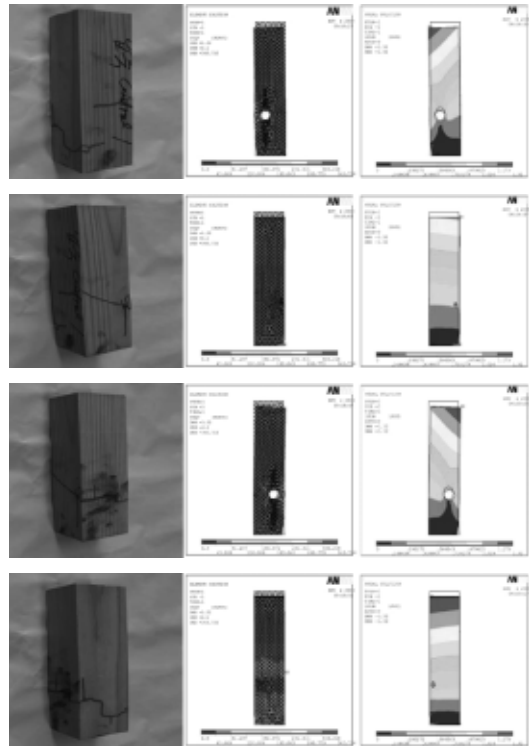


Fig. 5. Comparison of real failure mode and FEM results for specimen A (From left : Real member/element stress result/element nodal result).

한 바와 같이, 본 연구를 통해서도 실제로 목재 자체를 유한요소 수치해석의 적용으로 완전히 모델링한다는 것은 불가능하며 직교이방성 성질을 적용하여 방향별 변위와 응력차이를 규명하고 추가적으로 옹이에 의한 주변 응력분포와 변위 차이를 살펴보는 정도로만 사용하는 것이 타당하다고 판단되었다. 즉, 유한요소 수치해석을 보조 수단으로 사용하여 다양한 사례에 대해 실험적 연구와 병행하여 연구할 필요가 있다고 생각된다. 시편 A (Fig. 5)의 경우 뒷면 하단과 우측면 하단에 옹이가 분포한 경우로서 관통한 실린더로 옹이를 모델링했기 때문에 전면에서도 옹이 모델링으로 인한 구멍이 관찰되는 것이며 이에 따라 뒷면 옹이로 인한 응력의 불균일 전달이 나타난다. 뒷면의 옹이 위치에 따라 전면에는 반대쪽에 효과가 나타난다. 우측하단에 있는 옹이 역시 좌측에는 반

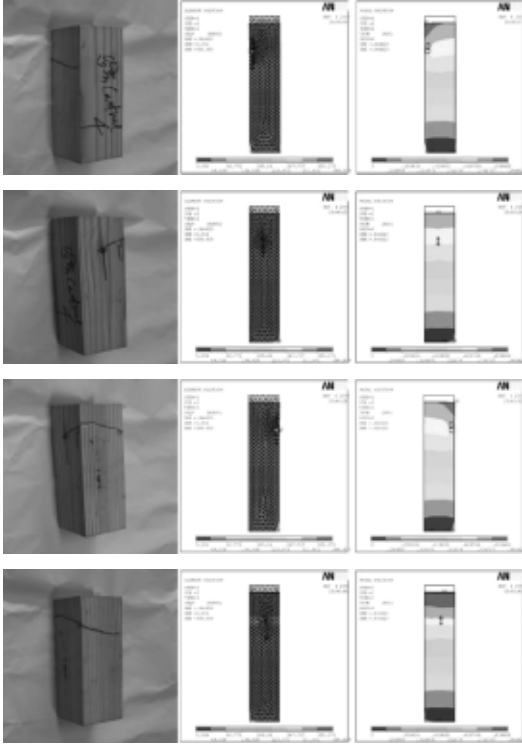


Fig. 6. Comparison of real failure mode and FEM results for specimen B (From left : Real member/element stress result/element nodal result).

대위치에 효과를 나타내게 되는 것이다. 유한요소 해석의 결과는 좀 더 선명한 색을 띠는 곳에 더 높은 응력이 발생한다는 의미이다. 즉 전체적으로 압축하중을 받는 상단에 가장 높은 응력이 작용함을 알 수 있고 용이를 모델링한 곳 주위로 국부적인 응력의 불균일 전달을 알 수 있다. 이러한 응력분포를 고려하여 접합부 등의 응력 집중 위치를 파악하고 그 부위를 보강 하는 등의 연구에 유한요소 해석 결과를 사용할 수 있을 것이다.

시편 B (Fig. 6)의 경우 우측면 상단과 뒷면쪽 상단에 용이가 분포하는 경우로서 이 역시 Fig. 5와 같이 전면과 좌측면에는 반대의 위치에 나타나며 각 해석결과는 다음과 같다.

시편 C (Fig. 7)의 경우에는 전면 하단부와 뒷면 하단부, 그리고 좌측면 하단부에 용이가 분포한 경

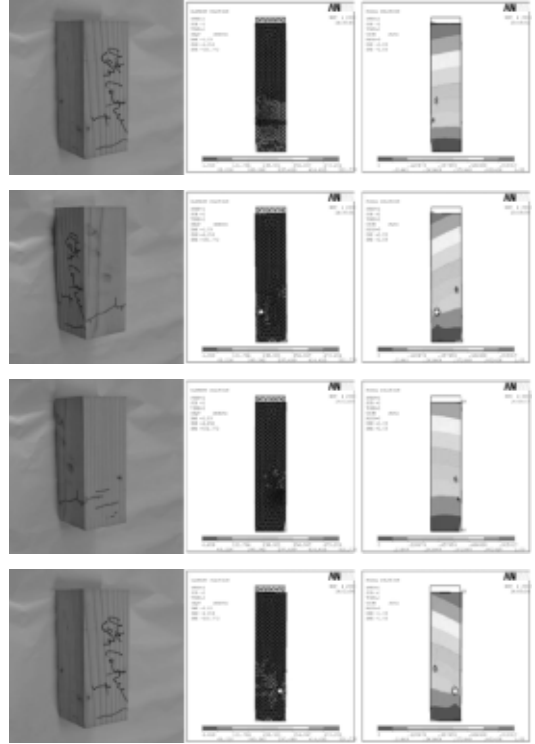


Fig. 7. Comparison of real failure mode and FEM results for specimen C (From left : Real member/element stress result/element nodal result).

우이다. Fig. 7에서 시편의 좌측면에 해당하는 그림은 전면 그림과 동일하지만 실제 시편의 좌측 부분을 관찰할 수 있어서 사용하였다. 본 시편 역시 용이 주위에서 응력의 불균일 전달을 관찰할 수 있으며, 본 시편의 경우 용이가 이웃에 근접함에 따라 이전의 시편 A와 B의 경우와 달리 응력의 전달이 급격히 변함을 알 수 있었다.

유한요소 수치해석의 결과 중 변형분포와 각 요소별 응력 분포를 관찰해보면 어느 곳에 응력 집중 현상이 발생하고 어느 부위의 변형이 가장 큰지를 알 수 있다. 실제 시편의 파괴나 균열이 발생한 부위와 비교했을 때 수치해석 결과의 응력 분포와 상당히 유사성이 있음을 알 수 있다. 물론 철골이나 콘크리트와 달리 목재에는 용이 이외의 영향 인자가 존재하기 때문에 완전히 일치하지는 않지만 유한요소 수치해

석의 결과를 기초로 추가적인 실험적 접근이 진행될 경우 다양한 형태의 접합부나 구조용 목재의 성능 해석과 구조 설계에 상당한 정도의 효율성을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

ASTM에서 규정한 압축파괴의 기준에 적용할 경우 시편 A는 crushing과 shearing이 혼재된 상태로 판단되며 시편 B는 wedge split과 shearing이 혼재된 상태 그리고 시편 C는 crushing이 주요 파괴 형태로 판단된다. 유한요소 수치해석의 결과 역시 Fig. 5와 Fig. 6 그리고 Fig. 7을 고려할 경우 응력의 국부적 분포를 보면 실제 파괴 형태와 유사하게 나타남을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 관련 연구를 기초로 하여 옹이 실린더 형태, 원추형 형태, 육면체 형태로 모델화 하였다. 본 연구에서 개발한 모델을 유한요소 수치해석에 적용하여 실제 목재의 압축강도실험 결과와 비교하여 어떤 모델이 가장 적합한 옹이 모형 모델인지를 검증하고 검증된 모형 모델을 사용하여 국부적인 응력분포 결과와 변형분포 결과를 사용하여 실제 압축부재의 파괴결과와 비교하였다. 실린더로 모델링한 경우와 육면체로 모델링한 경우의 요소분할은 6 mm로 하였고, 옹이를 원추형으로 모델링한 경우에는 요소 분할을 4 mm로 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 옹이의 크기를 선정하는 일차적인 모델링에서는 옹이의 치수로 측정 치수 중 최대값, 최소값, 평균값 각각을 선택하여 비교할 경우 통계적 유의성은 존재하지 않았다. 즉, 어떤 값을 옹이의 값으로 하든

수치해석의 결과에서는 차이가 없음을 알 수 있었다.

2) 모델링요소와 옹이의 실제 모양과 가장 유사하다고 판단되는 원추형 모델링의 결과는 수치해석에 소요되는 시간이 다른 모델에 비해 너무 과도하고 또한 원추형의 특성상 요소 분할을 다른 모델에 비해 작게 해야 하는 어려움이 있었다. 따라서 해석에 소요되는 시간이나 요소 분할의 어려움, 옹이 모델 주위의 응력 분포 등을 고려할 경우 실린더 형태의 모델이 가장 적합하다고 판단된다.

3) 유한요소 수치해석의 결과로서 얻어진 응력분포와 변형분포 결과를 활용할 경우 응력이 집중되는 곳과 변형이 심한 곳에서 실제 시편의 파괴나 균열이 발생하여 실제 구조용 목재부재의 성능해석의 기초 자료로 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김광철. 2009. 수치해석법을 활용한 압축부재 성능 해석의 가능성에 대한 연구, 한국가구조학회지 21(1): 26~39.
2. 김현중 외 4인. 2004. 목재공학개론, 선진문화사.
3. ASTM D245. 2006. Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber.
4. Cheng Piao, Todd F. Shupe, R. C. Tang, Chung Y. Hse. 2005. Finite element analysis of wood laminated composite poles. Wood and Fiber Science 37(3): 535~541.
5. FPL. 1999. Wood handbook. UDSA. Ch. 4.
6. Bodig, J. and B. A. Jayne. 1982. Mechanics of wood and wood composite, VNR. Ch.3.
7. KSF 2206-2004-06. 2004. Method of compression test for wood.