

## 대형요소의 기계적 접합법을 이용한 공학목재 개발<sup>1</sup>

박주생<sup>2</sup> · 심국보<sup>2</sup> · 김광모<sup>2</sup> · 박문재<sup>2</sup> · 조성택<sup>2</sup> · 김의정<sup>2</sup>

### Development of Engineered Wood using Mechanical Jointing Methods with Large Elements<sup>1</sup>

Joo-saeng Park<sup>2</sup>, Kug-bo Shim<sup>2</sup>, Kwang-mo Kim<sup>2</sup>, Moon-jae Park<sup>2</sup>,  
Sung-taig Cho<sup>2</sup> and Wae-jung Kim<sup>2</sup>

#### 요 약

본 연구에서는 국산 중소경재를 보다 효과적으로 활용하기 위한 목적으로 제재 수율이 높은 대형 요소를 이용하여 구조용으로 사용될 수 있는 공학목재를 개발하였다. 중소경 원목으로부터 생산된 상대적으로 큰 단면의 Flitch재를 이용하여 세 가지 기계적 접합방법을 적용한 구조용 대단면 공학목재를 개발하고 휨시험을 통해 그 성능을 평가하였다. 개별 요소를 접합하기 위한 기계적 접합방법으로는 강철 볼트와 목재 다우얼, 철제 래그 볼트가 각각 검토되었다.

개발된 공학목재의 휨성능을 평가한 결과, 강철 볼트를 적용한 경우에 MOR은 평균 514kgf/cm<sup>2</sup>, MOE는 129,000kgf/cm<sup>2</sup>로 대표적인 구조용 공학목재인 집성재에 비해 조금 낮거나 유사한 경향을 나타내었다. 목재 다우얼과 철제 래그 볼트를 적용한 경우에는 하중이 증가함에 따라 층재가 분리되어 개별적으로 하중에 저항함으로써 MOR과 MOE 모두가 절반정도로 감소되었다.

본 연구의 결과로부터 대형요소의 기계적 접합으로 제조되는 공학목재의 휨성능은 개별 요소의 접합 성능에 의해 가장 크게 영향 받음을 알 수 있었다.

#### ABSTRACT

In this study, new engineered woods, which can be used as structural members, are developed using three different mechanical jointing methods with large elements produced from logs in a high yield. Flitches of relatively large cross-section are produced from small or medium diameter logs, and are joined with steel bolts, wood dowels and steel lag bolts. Static bending tests are performed for these three types of built-up beams.

Built-up beams joined with steel bolts show 514kgf/cm<sup>2</sup> for MOR and 129,000kgf/cm<sup>2</sup> for MOE, which are close to those of typical structural glulams. In case that wood dowels and steel lag bolts are used, elements are isolated as load increases and resists the applied load individually. Therefore, built-up beams joined with wood dowels or steel lag bolts show almost half of steel bolts for both MOE and MOR.

1. 접수 2006년 10월 2일, Received on October 2, 2006.

2. 국립산림과학원 Korea Forest Research Institute, 207 Cheongnyangni-Dong, Dongdaemun-Gu, Seoul 130-712, Korea.

From the results of this study, it was indicated that bending properties of engineered woods manufactured using mechanical jointing methods with large elements are influenced mainly by jointing performance between each elements.

**Keywords :** Engineered wood, built-up beam, large element, mechanical jointing method, bending property

## 서론

최근 국내에서는 성공적인 인공조립 산물의 하나인 국산 낙엽송을 이용한 공학목재의 개발을 통해 구조부재로의 활용을 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 이러한 연구의 방향은 주로 기존 경골목 조공법에 사용되는 두께 38mm의 구조용 제재를 이용한 트러스 부재의 개발과 두께 15mm에서 40mm 사이의 라미나를 이용한 대단면 구조용 집성재의 개발과 성능평가에 초점이 맞추어져 왔다.

한편, 목재 건조기술의 발달과 사용가능한 원목으로부터 최종 제품에 이르는 공정상에서 제기되는 수율의 문제 및 공학목재 제조에 따른 비용의 상승을 고려할 때, 상대적으로 큰 단면의 요소를 이용한 새로운 공학목재의 개발에 대한 연구가 필요한 시점으로 사료된다.

본 연구에서는 이러한 대형요소를 이용한 공학목재 개발의 한 방법으로서 국산 낙엽송 중소경 원목으로부터 생산된 상대적으로 큰 단면의 Flitch재를 이용하여 세 가지 기계적 접합방법을 적용한 구조용 대단면 공학목재를 개발하고 성능을 평가하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 공시재료

본 연구에서는 목재유통센터(여주)에서 구입한 말구직경 21-25cm의 국산 낙엽송 중소경 원목으로부터 제재한 두께 90mm의 Flitch재를 공시재료로 사용하였다. 열기건조와 품질검사 및 대패가공을 거쳐 최종 단면 마감치수 75mm×100mm 및 75mm×50mm의 대형 요소를 제조하

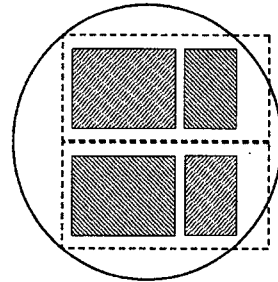


Figure 1. Cross-section of flitch elements processed from log.

였고, 강철 볼트, 목재 다우얼 및 철제 래그볼트를 이용하여 이중보 및 사중보 형태의 보용 공학목재를 개발하고자 하였다. 원목으로부터 Flitch재의 제재 및 대형요소로 사용된 최종 제재의 단면 가공은 다음의 Figure 1에 제시되어 있고, 이 과정에서의 최종 수율은 약 42.3%였으며, 최종 함수율은 평균 12.8%로 측정되었다.

### 2. 시험방법

#### 2.1 열기건조 및 품질검사

원목으로부터 제재된 두께 90mm의 Flitch재는 다음의 Table 1에 제시된 건조스케줄을 적용

Table 1. Kiln drying schedule.

Time (hr)	Dry-T (°C)	Wet-T (°C)	RH (%)
0 - 12	54	52	86
12 - 36	57	54	87
36 - 84	60	57	87
84 - 132	63	57	76
132 - 180	66	57	66
180 - 228	68	57	58
228 - 276	71	57	51
276 - 324	77	57	40

하여 열기건조 하였으며, 열기건조 후 건조결합을 조사하였고, 개별 부재의 4면에 대한 Static 및 Dynamic MOE를 측정하였다.

2.2 대형요소를 이용한 공학목재의 설계

보 재료로 사용하는 재료는 휨하중에 대한 저항성은 물론 경제적인 장점도 가져야 한다. 공학목재 중에 보재료로 사용하는 재료는 대표적으로 집성재 또는 트러스 부재 등을 들 수 있다. 그러나 집성재의 경우 접합공정을 거치기 때문에 비용의 증가를 유발할 수 있다. 또한 트러스 재료의 경우에는 국산재를 이용하여 생산하는 경우 수율의 감소가 발생할 수 있다.

따라서 국산재를 이용할 수 있는 보재료의 경우에는 단면의 증가에 의해 가공수율을 향상할 수 있음은 물론, 건조결합을 예방할 수 있으며, 대단면 기둥재료와 단면의 비례가 이루어 질 수 있는 구조를 개발하는 것이 바람직할 것이다. 여기에 제조비용의 절감도 매우 중요한 부분이다.

본 연구에서는 이와 같은 필요조건을 만족시키도록 Figure 2, Figure 3 그리고 Figure 4와 같은 세 종류의 기계적 접합 방법을 이용한 보 부재를 개발하였다. 상현과 하현의 접합에는 각각 강철 볼트, 목재 다우얼 및 철제 래그 볼트를 사용하였다. 특히 강철 볼트를 적용한 Figure 2의

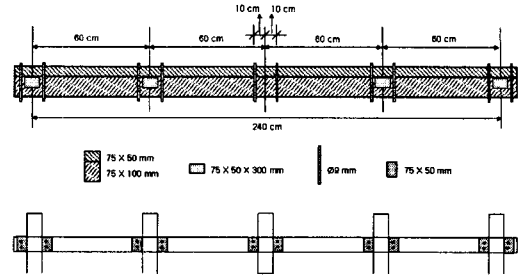


Figure 2. Built-up beam manufactured with steel bolts.

경우에는 전통 한옥의 보재료에서 채용하고 있는 포구조를 원용하여 장선조립형 이중보를 제조하였고, 보재료로 사용할 경우 중층의 바닥구조를 고정하기 위한 장선이 조립될 수 있는 구조를 전통 건축으로부터 채용하였다. 또한 휨하중에 저항하도록 하기 위하여 포구조의 양편으로 짜맞추기 방법을 적용하여 볼트에 의한 전단력에 저항할 수 있는 포를 채용하였다. 볼트결합은 토크렌치를 사용하여 일정한 모멘트로 채울 수 있도록 하였으며, 54 Nm로 체결하였다.

목재 다우얼을 적용한 Figure 3의 경우에는 위의 볼트를 대신하여 고밀도의 아까시나무 다우얼을 사용할 경우 제조비용 및 공정의 간소화를 가져올 수 있다는 점을 고려하여 제작하였다.

마지막으로 Figure 4의 철제 래그볼트를 사용

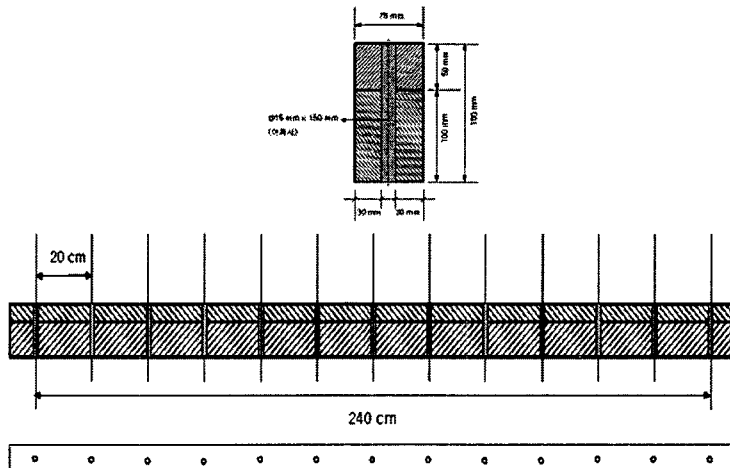


Figure 3. Built-up beam manufactured with wood dowels.

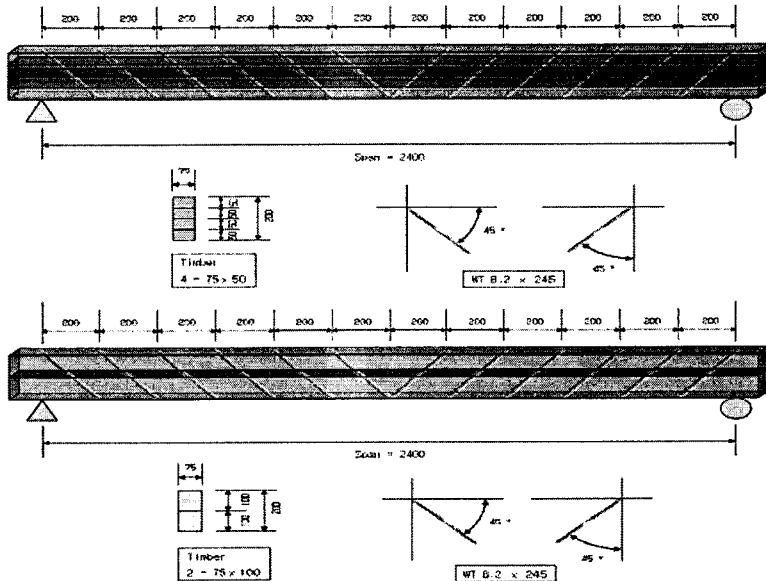


Figure 4. Two types of Built-up beam manufactured with steel lag bolts.

한 경우에는 제조 공정상의 간소화와 상하부재 결합력의 보강을 위해 채용하였는데, 래그볼트의 규격으로 인해 Figure 4에 제시된 것과 같은 두 종류의 75mm×200mm 단면을 갖는 보 부재를 제작하여 사용하였다.

석하기 위하여 보 부재의 각 부위에 스트레인 게이지를 부착하여 스트레인의 변화를 측정하였으며, 시편의 중앙부위에서 LVDT를 사용하여 보의 처짐량을 측정하였다.

### 2.3 휨성능 평가

세 종류의 기계적 접합법을 이용한 보 부재의 휨강도 성능을 평가하기 위하여 Instron 5585(최대 하중 20톤)을 사용하였다. 하중속도는 5mm/min.을 적용하였으며, 지간거리는 2.4m로, 하중은 1/3 점 하중을 부여하였다. 상현과 하현의 접합성능 평가와 상현과 하현의 휨하중에 대한 거동을 분

## 결과 및 고찰

### 1. 건조속도 및 요소 MOE

9cm flitch 재의 초기 함수율은 42.7%, 최종함수율은 12.8%이었으며, 이때까지의 건조속도는 0.127%/hr이었다. 온건한 건조조건을 채택한 결과 건조속도는 늦었으나 건조결합의 발생은 많지 않았다.

개별 요소에 대해 수행한 static 및 dynamic MOE를 측정한 결과는 다음의 Figure 6과 같다. 대체로 Static MOE 가 Dynamic MOE 보다 다소 크게 나타났으며, 좁은 재면(1,3)방향에 대한 MOE가 넓은 재면(2,4) 방향의 MOE보다 상대적으로 컸다. 단면의 크기에 따른 MOE 차이는 Dynamic의 경우에만 나타났다.



Figure 5. Third points bending test for built-up beam.

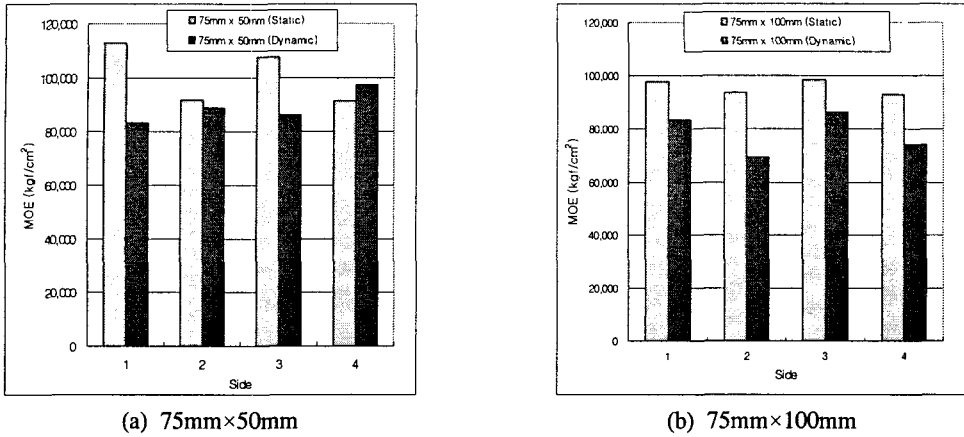


Figure 6. Comparison of MOE for 4 sides of elements

2. 휨강도 및 휨강성

각 접합형태에 따른 보 부재의 휨실험 결과로부터 계산된 최대하중, 휨강도 및 MOE 의 결과는 다음의 Table 2와 같다.

철제 래그볼트를 적용한 경우는 75mm×50mm 의 요소를 4개 접합한 것과 75mm×100mm의 요소를 2개 접합한 경우를 각각 제시하였다. Table 2의 결과를 보면, 최대하중은 단면의 춤이 50mm 더 큰 철제 래그볼트를 이용한 보 중 75mm×100mm의 요소를 2개 접합한 경우가 가장 큰 것으로 나타났으나, 나머지 MOE와 MOR 모두에서 강철 볼트를 적용한 경우가 가장 우수한 휨성능을 보였다. 이 경우, 평균 MOR은 514 kgf/cm<sup>2</sup>이었으며, MOE는 평균 129,000kgf/cm<sup>2</sup>로 구조용 집성재의 평균 MOR인 600kgf/cm<sup>2</sup> 보다 작은 값을 나타내었으나, 구조용 집성재 평균 MOE와는 비슷한 탄성계수를 나타내었다. 이와 비교하여 목재 다우얼과 철제 래그볼트를 적용한 보에서는 상하부재의 접합이 개별 목재 다우얼과 래그볼트에 의존하는 구조의 취약성으로 인해 상대적으로 낮은 휨성능을 보인 것으로 판단된다. 따라서 이러한 형태의 대형요소 접합보에서는 상하부재의 접합 성능이 가장 큰 영향인자인 것으로 생각되며, 접합된 부재가 하나의 요소처럼 거동하도록 하면서도 제작의 용

Table 2. Comparison of bending strength and MOE.

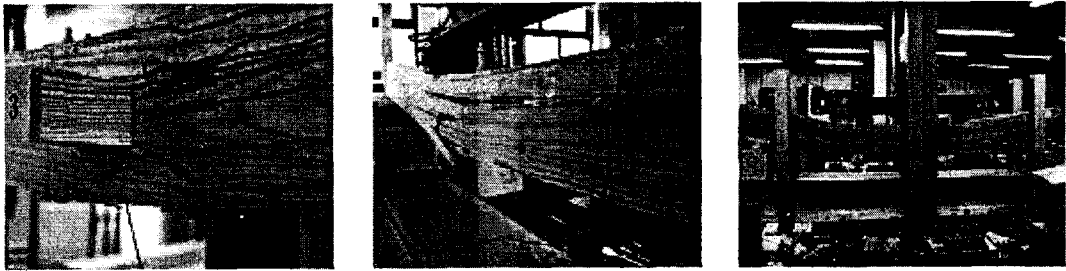
Type of Built-up Beam	Ultimate Load (kgf)	MOE (kgf/cm <sup>2</sup> )	MOR (kgf/cm <sup>2</sup> )
Steel Bolt	3,612	128,624	514
Wood Dowel	2,374	86,027	338
Steel Lag Bolt	3,592	50,557	287
	4,955	74,620	396

이성 등이 반영된 새로운 접합 방법의 개발이 요구된다.

3. 파괴모드 및 변형을 분석

세 종류의 접합보에 대한 휨실험 결과 관찰된 파괴형상은 다음의 Figure 7과 같다.

강철 볼트를 적용한 접합보의 경우에는 비례한계하중을 벗어나는 순간 파괴가 발생한 경우(파괴모드 I)와 비례한계하중을 벗어나 연성 변형이 발생한 후 파괴를 보인 두 가지 형태(파괴모드 II)로 나타났다. 파괴모드 I의 경우에는 하중전달블록과 가장 가까운 압축면 볼트 접합부 부근에서 압축변형이 발생함과 동시에 인장면에서 갑작스런 파괴가 발생하였으나, 파괴모드 II의 경우에는 이중보의 중앙



(a) Steel bolt

(b) Wood dowel

(c) Steel lag bolt

Figure 7. Failure modes for each type of built-up beams.

부위에 위치한 볼트 접합부 부근에서 압축변형이 발생한 후 처짐량이 증가하는 경향을 보이다가 인장면에서의 인장파괴에 의해 하중지지를 상실했다. 이러한 경향은 다음의 Figure 8과 Figure 9에 제시된 각 파괴모드 별 하중-처짐 곡선과 변형을 곡선에서도 관찰할 수 있다.

파괴모드 I의 경우에는 상현과 하현이 접한 부분에서의 변형을 차이가 많지 않았다. 만약 볼트의 체결력이 적절하지 못했다면 상현의 아랫부분과 하현의 윗부분의 변형율의 차이가 크게 나타났겠지만, 충분한 체결력을 유지하여 상-하현을 단일 재료와 같이 휨하중에 저항하도록 작용했을 것으로 판단되었다. 또한 상현과 하현의 충분한 결합력으로 인해 중립축이 인장 또는 압축변형되지 않고 유지되는 중에 파괴된 것도 특징으로 판단할 수 있었다.

그러나 파괴모드 II의 경우에는 상현재 하부

와 하현재 상부의 변형을 차이가 나타나기 시작했고, 비례한계하중에 다다른 처짐량 30mm의 경우에서부터 상현재의 하부에 압축변형이 급격하게 증가하는 경향을 나타내고 있었다. 또한 중립축의 변형율도 비례한계하중을 지난 부분에서부터 인장변형을 나타내고 있어 볼트에 작용하는 전단응력에 의해 볼트주위 목재부위의 압축변형이 발생했을 것으로 판단되며, 이에 따라 파괴시간이 지연되었을 것으로 판단할 수 있었다.

목재 다우얼을 적용한 접합보의 경우에는 상하부재의 결합을 담당하던 목재다우얼의 단계적인 파괴(파괴모드 III)로 상하부재가 서로 따로 거동하다가 파괴되었다. Figure 7의 (b)에서 보이는 것과 같이 하현부재의 처짐이 상현부재에 비해 급격히 증가하는 경향을 나타내었으며, 결과적으로 하현부재의 인장측 결점부위에서 최종적인 파괴를 보였다.

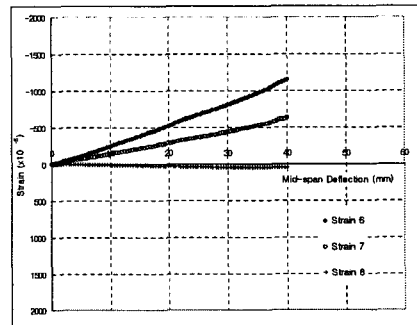
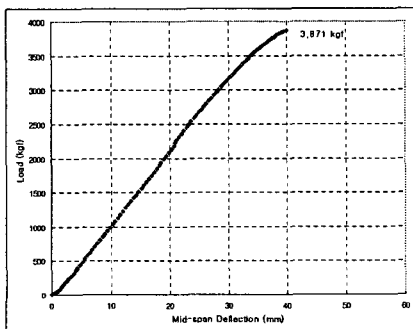


Figure 8. Load-deflection and strain curve for failure mode I.

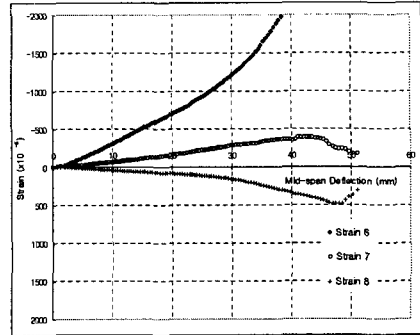
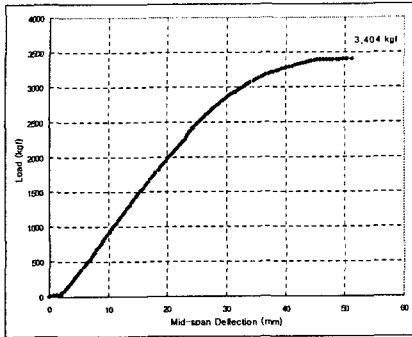


Figure 9. Load-deflection and strain curve for failure mode II.

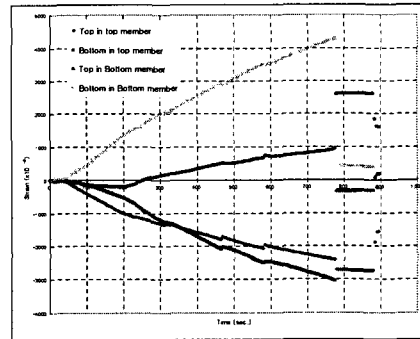
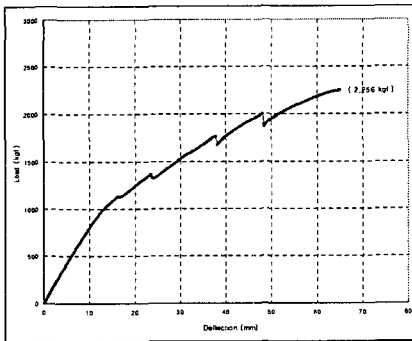
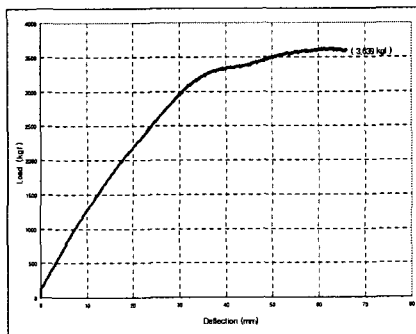


Figure 10. Load-deflection and strain curve for failure mode III.

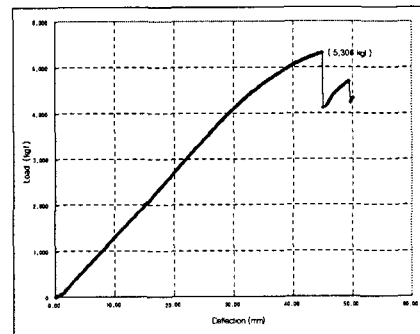
위의 Figure 10의 하중-처짐 곡선과 변형을 곡선에서 보이는 것처럼, 전체 단면상 중립축의 위쪽에 위치하는 상현의 하부가 초반에는 압축 거동을 보이다가 점차 인장 거동으로 전환됨을 알 수 있으며, 하현의 상부는 계속적인 압축 거동을 보이면서 결국 상현의 상부보다

더 큰 압축 변형을 나타내었다.

철제 래그볼트를 적용한 보 경우에는 4-요소보와 2-요소보가 각각 파괴모드 II와 파괴모드 I의 경향을 보였으며, 이는 다음의 Figure 11에 제시된 하중-처짐 곡선에서 확인할 수 있다.



(a) 4-element beam



(b) 2-element beam

Figure 11. Load-deflection curves for built-up beam with steel lag bolt beam.

## 결 론

본 연구에서는 국산 중소경재를 보다 효과적으로 활용하기 위하여 대형요소의 기계적 접합법을 이용한 공학목재를 개발하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 먼저 중소경재를 대형요소로 제재하는데 있어서 최종 가공수율은 42.3%로 기존 집성재 제조수율에 비해 크게 향상되었으며, 두께 90mm의 대형요소를 건조하는데 있어서 최고온도 77℃의 온건한 건조조건을 적용함으로써 건조결합의 발생을 억제할 수 있었다.

2. 대형요소의 접합 방식에 따른 휨성능 평가 결과, 강철 볼트를 적용한 경우에 MOR과 MOE는 각각 514kgf/cm<sup>2</sup>와 129,000kgf/cm<sup>2</sup>로 동일 수종 집성재에 비해 조금 낮거나 유사하게 나타났다. 반면에 목재 다우얼과 철제 래그 볼트를 적용한 경우에는 MOR과 MOE 모두 절반정도로 감소되었다. 이는 층재간의 접합력이 약하여 하중이 증가함에 따라 층재가 분리되어 개별적으로 하중에 저항하기 때문인 것으로 판단되었다.

3. 각각의 접합 방식에 따른 파괴모드를 I, II, III의 세가지 모드로 분류하고, 각각의 모드에서 층재의 응력 분포를 분석하여 제시하였다. 이 결과는 새로운 공학목재의 접합방식을 개발하기 위한 이후의 연구에서 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

## 인 용 문 헌

1. American Forest and Paper Association. 1997. National Design Specification for Wood Construction.
2. American Institute of Timber Construction. 1994. Timber construction manual. John Wiley & Sons, Inc.
3. Breyer, D. E. 1998. Design of wood structures. 3rd Ed.
4. Canadian Wood Council. 1995. Wood design manual.
5. Canadian Wood Council. 1999. Introduction to wood design.
6. Doyle, D. V., and Scholten, J. A. 1963. Performance of bolted joints in Douglas fir. Res. Pap. FPL-RP-2. Madison, WI.
7. Frest Product Laboratory. 1999. Wood Handbook, wood as an engineering material. USDA For. Serv. FPL Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113.
8. Kim, K. C. 1999. Analysis of the behavior of bolt jointed wood connection by applying semi-rigid theory. Department of Forest Products, Seoul National University. Ph. D. Thesis.
9. Madsen, B. 1992. Structural behavior of timber connection. Timber Engineering LTD.
10. Yasamura, M., Mutora, T., and Sakai, H. 1987. Ultimate properties of bolted joints in glued-laminated timber. Paper 20-7-3, CIB W18, Dublin, Ireland.