

핑거조인트가 국산 낙엽송 소경각재의 휨성능에 미치는 영향¹

김 윤 희² · 장 상 식^{2,†}

Effects of Finger-joint on Bending Performance of Square Timbers Produced from Domestic Small Diameter Larch Logs¹

Yun-hui Kim² · Sang-sik Jang^{2,†}

요 약

국토면적의 약 64%가 산림으로 구성되어 OECD 국가 중 네 번째로 산림면적의 비율이 높은 편임에도 원목 생산보다는 녹화에 초점을 맞추어 진행된 조림의 결과로 국내 목재자급률은 약 16.2%에 불과하다. 본 연구에서는 국산 간벌재로부터 소경각재를 생산하여 다중접착을 통해 기둥과 보 등의 다양한 구조용 집성재 제조하기 위하여 핑거조인트가 포함된 소경각재의 휨 성능을 핑거조인트가 없는 소경각재의 휨 성능과 비교하였으며 시험결과를 ASTM D2915에 따라 통계처리를 실시하여 허용응력을 산출하고 상호 비교 평가하였다. 기존의 구조용 집성재 생산라인에서 50 mm 이하의 층재에 대하여 사용하였던 핑거조인트 기계를 사용하여 제조된 핑거조인트 소경각재는 핑거조인트가 없는 부재에 비하여 50% 이하의 휨강도를 나타낸 반면 개선된 핑거조인트 방법을 적용하여 제조된 핑거조인트 부재는 약 80% 정도의 휨강도를 나타내었다. 또한, ASTM D 2915에 따라 핑거조인트가 없는 소경각재 및 핑거조인트가 포함된 소경각재의 허용 휨응력은 각각 12 MPa 및 11.4 MPa로 나타났다. 핑거조인트가 있는 소경각재의 경우에 핑거조인트가 없는 부재보다 강도의 편차가 적었으며, MOR은 약 80% 수준을 나타내었으나 허용 휨응력은 약 95% 수준을 나타내었다.

ABSTRACT

Despite Korea forest take 63.7% of the nation's territory, productivity of domestic structural lumber is low. Studies of domestic small lumbars need to be improved domestic structural timber productivity. In this study, small diameter lumber and finger joint small diameter lumber took bending test to calculate MOE and MOR. MOE of small diameter lumber was 9.3 kN/mm² and MOE of finger joint small diameter lumber was 15.4 kN/mm². Allowable standard bending stress of small diameter lumber and finger joint small diameter lumber was calculated according to ASTM D 2915. Standard allowable bending stress of small diameter lumber was 12 N/mm² and standard allowable bending stress of

¹ Date Received March 28, 2013, Date Accepted March 18, 2014

² 충남대학교 환경소재공학과 Department of Bio-based Materials, College of Agriculture and Life Science, Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea

[†] 교신저자(corresponding author): 장상식(e-mail: ssjang@cnu.ac.kr)

finger joint small diameter lumber was 11 N/mm^2 . Standard allowable bending stress of finger joint small diameter lumber should be considered to design structural beam members.

Keywords : domestic small diameter log, standard allowable bending stress, *Larix Kaempferi Carr.*

1. 서론

한국은 국토면적의 약 64%가 산림으로 구성되어 OECD 국가 중 핀란드(72.9%), 일본(68.5%), 스웨덴(68.7%)에 이어 네 번째로 산림면적의 비율이 높은 편이지만 목재자급률은 약 16.2%(2013년 임업통계 연보)로 낮은 실정이다. 나머지 부분을 수입재에 의존하고 있으나 최근 목재자원 보유국의 수출 규제 및 자원 보호 정책이 강화되면서 수입 여건이 악화되고 있다. 국산 목재의 공급 관리를 통해 안정적으로 목재 수급량을 유지하고 목재 산업의 원자재 부족난을 해소하고자 정부에서도 정책적인 노력을 펼치고 있다. 정책의 활성화와 더불어 지름 150 mm 이하의 수령 20년 이하 간벌재에 대한 효율적 활용 연구 및 개발이 필요하다.

목재의 고부가가치 용도 중의 하나로 구조용 부재를 들 수 있으며 특히 한옥 건축용 구조용재를 국산재로 공급하는 것은 목재의 고부가가치 이용 측면뿐만 아니라 우리나라의 전통 주거문화를 우리 목재로 지키고 가꾸어 나간다는 민족의 자부심 측면에서도 매우 중요하다. 현재까지 한옥 건축용 구조용재의 대경재의 제재를 통해 생산되어 왔으나 국내 지리적 환경 요인으로 오랜 시간이 필요하다. 반면, 지름이 작은 원목을 제재하여 용재로 사용하는 경우에는 수율 및 생산성이 낮고 제재목의 품질이 떨어져서 경제성이 낮아지기 때문에 용재로서의 이용보다는 생산비가 적게 들고 높은 수율을 기대할 수 있는 칩, 화목, 펠릿 등의 용도에 주로 사용되고 있다.

소경 간벌재로부터 생산된 소경각재는 그 자체로는 단면적이 작고 미성숙재의 함유비율이 높아서 구조성능 및 품질이 떨어지기 때문에 구조용재로 사용하기 어렵지만 가로 및 세로 방향으로 접착을 통하여 단면적을 키우면 기둥과 보 등의 다양한 구조부재로

사용이 가능하며 특히 한옥 건축용 부재로 충분히 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 기존의 구조용 집성재는 층재의 두께가 50 mm 미만인 경우에 적용되는 방법으로서 구조용 집성재 제조를 위하여 적용되는 핑거조인트는 두께 50 mm 미만의 제재목에 적용할 수 있으며 이 연구에서 사용된 소경각재처럼 두께 80 mm 이상인 부재에 적용하는 경우에도 구조성능을 제대로 발휘할 수 있는지가 평가되어야 한다.

핑거조인트는 구조용 집성재 생산을 위하여 사용되는 층재에서 큰 결점을 제거하고 부재의 길이를 이어서 비교적 결점이 적고 단면치수 및 길이가 큰 구조부재를 생산하기 위한 목적으로 적용되고 있다. 이 연구와 같이 소경각재를 이용하는 경우에는 소경각재에 포함된 웅이 등의 결점이 비교적 고르게 분포되어 있고 큰 결점이 많지 않으며 부재 단면의 중앙에 수심이 이미 포함되어 있기 때문에 결점 제거라는 측면은 그렇게 중요하지 않은 것으로 판단된다. 따라서 이 연구에서는 결점제거는 무시하고 길이 증가를 위하여 핑거조인트를 적용하였으며 두꺼운 부재의 핑거조인트에 적용할 수 있는 제조조건을 개발 및 적용하여 핑거조인트가 포함된 소경각재의 휨 성능을 평가하였다. 핑거조인트가 포함된 소경각재의 휨 성능을 핑거조인트가 없는 소경각재의 휨 성능과 비교하였으며 시험된 모든 소경각재 시험편의 시험 결과를 핑거조인트가 있는 것과 없는 것에 대하여 각각 ASTM D2915에 따라서 통계처리를 실시하여 허용응력을 산출하고 상호 비교 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

국산 낙엽송(*Larix Kaempferi Carr.*) 간벌재 중에

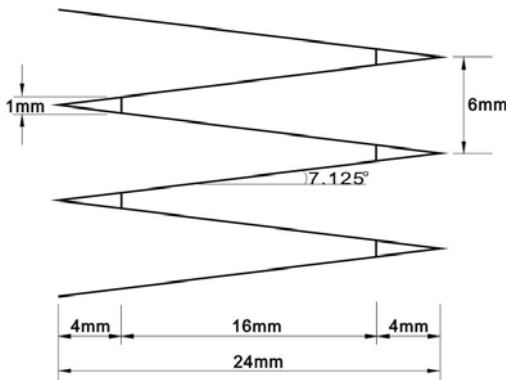


Fig. 1. Shape of Finger-joint.

서 흉고지름 120 mm~150 mm의 통직한 원목을 선별하여 공시원목으로 사용하였다. 선별된 원목은 2면 제재 공정을 통하여 95 mm × 95 mm 단면의 정각재로 제재하였으며 이를 건조한 후 단면치수 80 mm × 80 mm로 4면 대패가공을 실시하였다. 시험편의 평균 밀도는 508 kg/m³(0.508 g/cm³)이었으며 평균 함수율은 12.5%를 나타내었다. 시험편의 길이는 2.7 m로 하였으며 미성숙재가 다량 포함되어 있는 관계로 발생할 수 있는 뒤틀림 등의 건조결함을 최소화하기 위하여 가능하면 수심이 단면의 정 중앙에 오도록 하고 상하좌우를 대칭으로 제재하도록 하였다. 건축구조용으로 사용되는 구조부재들 중에서 기둥은 일반적으로 길이가 2.4 m로서 국산 낙엽송 간벌재의 평균 길이 2.7 m 보다 작기 때문에 핑거조인트를 통한 길이이음의 필요성이 높지 않다. 그러나 보와 같은 구조부재의 경우에는 일반적으로 길이가 2.7 m 이상으로 사용하는 경우가 있어 국산 낙엽송 소경각재를 한옥 등의 보 부재로 활용하기 위해서는 핑거조인트를 적용하여 길이이음을 하여야 한다. 이 연구에서는 핑거조인트가 소경각재의 휨 성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 핑거조인트가 중앙에 들어간 시험편을 제작하였다.

핑거조인트가 포함된 시험편을 제작하기 위하여 부재의 중앙을 절단한 후 양 단면에 Fig. 1과 같이 길이 20 mm, 하단 높이 6 mm, 끝 높이 1 mm, 끝 틈 4 mm 및 경사각 7.125°의 핑거를 가공하였다. 기존에 구조용 집성재 제조를 위하여 사용되던 핑거

조인트 가공기계에서 두꺼운 층재를 취급할 수 있도록 칼날과 목재 송재 관련 장비만 교체한 후 1차로 제작한 시험편의 경우에 휨 시험 결과 휨 성능이 핑거조인트가 없는 시험편에 비하여 매우 낮게 나왔기 때문에 압채압력이 부족하다는 판단에 따라서 유압기를 교체하여 압채압력이 정확하게 170 kgf/cm²가 되도록 하여 2차 시험편을 제작하였다. 핑거조인트 제조를 위하여 일본에서 수입된 PVAC 계열의 접착제를 사용하였으며 도포량은 250~300 g/m²로 조절하였다. 압채시간은 1초로 설정하였고 압력을 1초 동안 가한 후 해제하면 핑거부분이 뒤로 밀려나오는 현상이 관찰되었다. 이를 고려하여 가압 시에 핑거 끝틈이 2 mm가 되도록 조절하고 압력 해제 후 2 mm가 밀려나와서 핑거 끝틈이 4 mm가 되도록 하였다. 핑거조인트가 없는 소경각재 시험편은 68개를 제작하였으며 핑거조인트가 들어간 소경각재 시험편은 1차로 58개를 제작하였고 제조 과정을 개선하여 2차로 29개를 제작하였다.

2.2 시험방법

2.2.1 소경각재의 육안등급구분

소경각재의 등급을 구분하기 위하여 4개의 재면에 나타나는 결점을 육안으로 확인하고 Table 1에 주어진 기준을 적용하여 등급을 구분하였다. Table 1의 등급구분기준은 KS F 3021의 구조용 집성재 제조를 위한 층재의 등급구분기준으로서 소경각재의 경우도 구조용 집성재용 층재와 마찬가지로 구조용 접착제품의 제조에 사용되는 재료이기 때문에 이 기준을 적용하였다.

핑거조인트 소경각재의 경우에는 목재에 포함되어 있는 여러 가지 결점들이 부재의 휨강도에 미치는 영향보다는 중앙에 포함된 핑거조인트의 영향이 더욱 클 것으로 판단되어 별도로 육안등급구분을 실시하지 않았다.

2.2.2 실대재 휨 시험

이 연구에 사용된 소경각재는 소경 간벌재를 제재

Table 1. Standard for visual grading applied to square timbers produced from small diameter logs

	Quality standard			
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
Percentage of Maximum knot size/width	17% and less	25% and less	33% and less	50% and less
Cross grain	1:16 and less	1:14 and less	1:12 and less	1: 8 and less
Rot	not allowed			
Fiber separation	slight			
Discoloration	slight			
Diagonal grain	slight			
Wane	width not greater than 1/4 of cross-sectional size, and not allowed on two adjacent corners			
Other defects	slight			

하여 생산된 길이 2.7 m의 부재로서 실제 부재 생산에 사용되는 그대로 모든 결점들이 포함되어 있는 실대재이다. 따라서 소경각재 시험편의 휨 성능을 평가하기 위하여 KS F 2150의 실대재에 대한 1/3점 하중 휨 시험 방법을 적용하여 휨 시험을 실시하였다. 이러한 실대재 휨 시험 방법을 적용하여 부재의 휨 성능에 미치는 전단응력의 영향을 최소화하고 가능하면 순수한 휨 응력의 영향 하에서 휨 성능을 평가하고자 하였다. 소경각재의 휨 시험 결과로부터 KS F 2150에 주어진 식 (1) 및 (2)에 따라서 각각 MOE 및 MOR을 계산하였다.

$$MOE(N/mm^2) = \frac{P_p L^3}{4.7 \Delta_p b h^3} \dots\dots\dots (식 1)$$

$$MOR(N/mm^2) = \frac{P_{max} L}{b h^2} \dots\dots\dots (식 2)$$

- 여기서, P_p : 비례한도 하중 (N)
 L : 시험편의 길이 (mm)
 Δp : 비례한도 변형 (mm)
 b : 시험편의 나비 (mm)
 h : 시험편의 높이 (mm)

P_{max} : 최대하중 (N)

2.2.3 밀도 및 함수율

시험편의 밀도 및 함수율 측정을 위하여 KS F 2198 및 2199를 적용하였으며 휨 시험을 마친 후 즉시 밀도 및 함수율 측정 시험편을 채취하여 치수 및 무게 측정하고 103 ± 2°C로 유지되는 건조기에 넣어서 항량에 도달할 때까지 건조를 실시하였다. 밀도 및 함수율 측정용 시험편은 휨 시험이 끝난 부재에서 양끝으로부터 100 mm 이상 떨어지고 결점이나 파괴가 없는 부위를 선정하여 20 mm의 길이로 채취하였다.

2.2.4 소경각재의 허용응력

소경각재의 휨 시험 결과로부터 핑거조인트가 없는 소경각재 및 핑거조인트가 있는 소경각재의 허용응력을 산출하여 소경각재를 접착하여 제조되는 다중접착접합부재의 설계하중을 계산하는 기초값으로 적용하도록 하였다. 소경각재의 휨 시험 결과로부터 허용응력을 산출하는 방법이 KS 표준으로 제정되어 있지 않기 때문에 ASTM D 2915를 적용하였다. ASTM D 2915에 따르면 강도 시험 결과의 도수 분포곡선의 모양에 따라서 평균값을 중심으로 좌우가 대칭을 이루는 경우에는 정규분포로 가정할 수 있으

Table 2. Bending performance of square timbers with or without finger-joint produced from small diameter larch logs

Kinds	Species	Finger-joint	MOE (GPa)	MOR (MPa)
80 mm × 80 mm square timber	Larch	No	9.6	47.0
		Yes (Conventional)	11.9	22.7
		Yes (modified)	15.4	37.3

며 매우 높은 강도를 나타내는 시험편들은 있지만 매우 낮은 강도를 나타내는 시험편들의 수가 적거나 없는 경우, 즉 평균값을 중심으로 좌우가 비대칭인 경우에는 그 정도에 따라서 로그정규분포(lognormal distribution) 및 웨이블분포(Weibull distribution)로 가정하여 통계처리를 할 수 있다. 소경각재의 휨 시험 결과는 평균값을 중심으로 낮은 값과 높은 값이 좌우 대칭을 정확하게 이루지는 않지만 비교적 낮은 값 및 높은 값들이 많이 나타나는 경향을 나타내어 낮은 값이 끊어지는 모양의 로그정규분포나 웨이블 분포보다는 정규분포에 가까운 모양을 나타내는 것으로 판단되었다. 따라서 이 연구에서는 소경각재의 휨 시험으로부터 산출된 MOR 값에 대하여 정규분포로 가정하여 통계처리를 실시하였다.

먼저 소경각재의 MOR 값들을 최소값 20 MPa부터 최대값 100 MPa까지 5 MPa 단위로 구분하여 각각의 구간에 해당하는 시험결과의 수를 산출하고 이를 도수분포곡선으로 작성한 후 이에 적합한 정규분포곡선을 구하였다. 이 정규분포곡선으로부터 식 (3)에 따라서 5% 하한값(5% lower-exclusion limit)을 구하고 ASTM D 2915에서 제시하는 방법에 따라서 이 값에 1/2.1의 안전계수를 적용하여 휨허용응력을 산출하였다.

$$\sigma_{5\%} = \sigma_a - 1.645S_d \dots\dots\dots (식 3)$$

- 여기서, $\sigma_{5\%}$: 소경각재 MOR의 5% 하한값(MPa)
- σ_a : 소경각재 MOR의 평균값(MPa)
- S_d : 소경각재 MOR의 표준편차(MPa)

3. 결과 및 고찰

3.1 핑거조인트가 휨강도에 미치는 영향

소경각재의 실대재 휨 시험을 통하여 핑거조인트가 없는 소경각재와 핑거조인트가 포함된 1차 및 2차 소경각재 시험편에 대하여 얻어진 MOE 및 MOR은 Table 2와 같다.

Table 2에서 보면 MOE는 핑거조인트가 포함된 시험편에서 오히려 증가하는 경향을 나타내는데 이러한 경향은 핑거조인트의 영향이라기보다는 탄성계수가 목재에 따라서 편차가 크게 나타나기 때문인 것으로 생각된다. MOE에 비하여 MOR은 핑거조인트가 포함된 부재에서 감소하는 경향을 나타내었으며 기존의 구조용 집성재에서 사용되던 두께 50 mm 미만의 층재를 생산하던 핑거조인트 생산라인에서 두께만 증가시킨 방법으로 제조된 1차 부재에 비하여 피스톤을 교체하여 충분한 압력을 가할 수 있도록 개선된 생산라인에서 제조된 2차 부재의 MOR이 많이 향상되는 결과를 나타내었다. 1차 제조 핑거조인트 부재의 MOR은 핑거조인트가 없는 부재의 48.3% 정도에 불과하였으나 1차 제조된 핑거조인트 부재의 MOR은 79.4%를 나타내어 일반적으로 알려진 핑거조인트 부재의 강도비율인 80%에 근접하는 결과를 나타내었다. 따라서 두꺼운 부재에서도 핑거조인트 제조에 적합한 조건만 갖추어주면 충분한 강도를 갖는 부재를 생산할 수 있다는 사실을 확인할 수 있었다.

3.2 핑거조인트 소경각재의 허용응력 산출

핑거조인트가 없는 소경각재 및 핑거조인트가 있

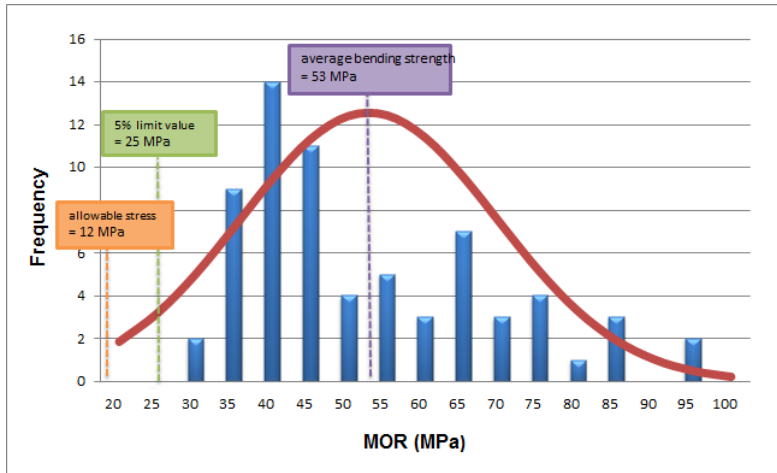


Fig. 2. Allowable bending stress of square timber without finger joint.

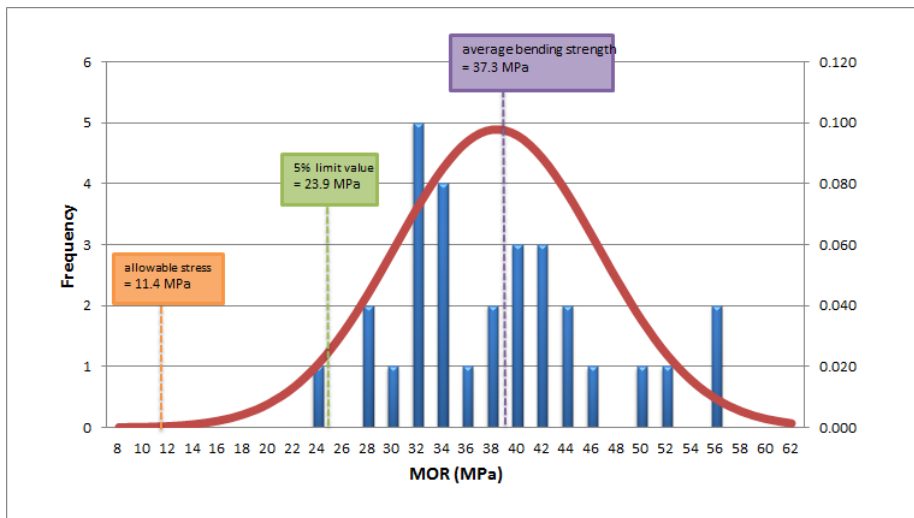


Fig. 3. Allowable bending stress of square timber with finger joint.

는 소경각재의 MOR에 대하여 5MPa 단위로 구간을 나누고 도수분포를 구하여 도수분포곡선을 그린 후 이를 정규분포곡선으로 구한 후 평균값과 5% 하한값 그리고 허용응력을 계산한 결과는 각각 Figs. 2 및 3과 같다.

핑거조인트가 없는 소경각재에 대한 MOR에 대한 통계분석 결과는 Fig. 2와 같으며 Fig. 2에서 평균 MOR은 53 MPa, 5% 하한값은 25 MPa 그리고 허용

힘응력은 12 MPa임을 알 수 있다. 핑거조인트가 포함된 소경각재의 MOR에 대한 통계분석 결과는 Fig. 3과 같고 Fig. 3으로부터 평균 MOR은 37.3 MPa, 5% 하한값은 23.9 MPa 그리고 허용 힘응력은 11.4 MPa임을 알 수 있다. 핑거조인트가 포함된 소경각재의 MOR은 핑거조인트가 없는 부재의 약 80% 수준이지만 허용 힘응력은 95% 수준으로서 핑거조인트가 없는 부재와 큰 차이를 나타내지 않았다. 이러한



Fig. 4. failure mode of small diameter lumber.



Fig. 5. failure mode of finger joint small diameter lumber.

결과는 핑거조인트가 포함된 부재의 휨 강도가 상호 큰 편차를 나타내지 않음으로써 표준편차가 작았기 때문인 것으로 판단된다.

옹이가 모인 옹이가 있는 경우에는 핑거조인트보다는 옹이 주변의 섬유경사를 따라서 파괴가 진행되는 형태를 나타내었다.

3.3 소경각재의 파괴 형태

큰 옹이나 섬유경사가 존재하는 시험편의 경우에는 섬유경사를 따라 인장 및 전단파괴가 발생하였다. 큰 옹이나 모인 옹이가 있는 부재의 경우에는 옹이 주변의 섬유경사를 따라서 파괴가 진행되는 형태를 나타내었으며 소경각재의 휨 강도 및 휨 파괴에 영향을 주는 가장 큰 단일요인으로 옹이(크기, 위치 및 분포정도에 따라서 차이)를 들 수 있을 것으로 생각된다.

핑거조인트가 포함된 소경각재의 경우에는 휨 하중 하에서 핑거조인트 부분에서 주로 파괴가 진행되었다. 일부 시험편의 경우에는 핑거조인트가 서로 빠지는 결합이 나타나기도 하였지만 이는 접착 불량으로 인한 것으로 생각되며 대부분의 경우는 핑거의 빠짐보다는 핑거 주변의 목재에서의 파괴를 나타내었다. 핑거조인트 소경각재의 경우에도 부재 내에 큰

4. 결 론

국산 낙엽송 소경 간벌재로부터 생산된 핑거조인트가 없는 소경각재 및 길이 중앙부에 핑거조인트가 포함된 소경각재의 휨 시험을 실시하였다. 소경각재에 대한 휨 시험을 실시한 결과 핑거조인트가 없는 부재의 MOE 및 MOR은 각각 9.6 GPa 및 47 MPa를 나타내었다. 핑거조인트가 포함된 소경각재의 MOE 및 MOR은 각각 15.4 GPa 및 37.3 MPa를 나타내었다. 기존의 구조용 집성재 생산라인에서 50 mm 이하의 층재에 대하여 사용하였던 핑거조인트 기계를 사용하여 제조된 핑거조인트 소경각재 제품은 핑거조인트가 없는 부재에 비하여 절반 이하의 휨강도를 나타내었으나 두꺼운 부재에 적절한 압력을 가할 수 있도록 개선한 기계로부터 제조된 핑거조인트 부재는 약 80% 정도의 휨강도를 나타내었다. 따라서 두꺼운 부재의 경우에도 적절한 장비 개선을 통하여

충분한 강도성능을 지닌 핑거조인트 부재의 생산이 가능할 것으로 생각된다.

ASTM D 2915에 따라서 핑거조인트가 없는 소경각재 및 핑거조인트가 포함된 소경각재의 허용 휨응력을 산출하였으며 그 결과는 각각 12 MPa 및 11.4 MPa로 나타났다. 핑거조인트가 있는 소경각재의 경우에 핑거조인트가 없는 부재보다 강도의 편차가 적었으며 이로 인하여 MOR은 약 80% 수준을 나타내었으나 허용 휨응력은 약 95% 수준을 나타내었다. 따라서 소경각재의 이용에 있어서 핑거조인트로 길이이음을 한 부재들도 핑거조인트의 품질만 적절하게 제조할 수 있다면 그렇게 큰 허용응력의 손실 없이 구조부재의 제조 및 설계에 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 산림청 ‘산림과학기술개발사업(과제번호 : S121213L090100)’의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

REFERENCES

- ASTM D 198:09. 2009. Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes, American society for testing materials.
- Lee, J.-K., Kim, J.-S. 2009. Profit Analysis in Using Small Diameter Log of Quercus species Journal of Korean Forest Society, 98(1), 49-54.
- KS F 2150. 2004. Method of static bending test for full sized structural lumber, Korean Standards association .
- KS F 2198. 2001. Determination of density and specific gravity of wood, Korean Standard Association.
- KS F 2199. 2001. Determination of moisture contents of wood, Korean Standard Association.
- KS F 2208. 2004. Method of bending test for wood, Korean Standard Association.
- KS F 3021. 2005. Structural glued laminated timber. Statistical Yearbook of Forestry. 2013. Korea Forest Service