

잣나무 만곡 복합집성재의 휨강도 성능평가¹

송요진² · 정홍주² · 이인환² · 홍순일^{2,†}

Performance Evaluation of Bending Strength of Curved Composite Glulams Made of Korean White Pine¹

Yo-Jin Song² · Hong-Ju Jung² · In-Hwan Lee² · Soon-Il Hong^{2,†}

요약

본 연구에서는 잣나무 곡선부재의 휨 성능을 향상시키기 위하여 Glass fiber 소재의 보강재와 낙엽송 층재로 보강한 만곡 복합집성재를 제작하였다. 잣나무 만곡집성재는 보강유무 및 보강방법에 의하여 다섯 종류로 제작되었다. 대조시편인 Type-A는 잣나무 층재로만 제작된 시편이며, Type-B는 최외층에 잣나무 대신 동일한 두께의 국내산 낙엽송 층재로 제작한 시편이다. Type-C는 직물형태의 glass fiber cloth가 매 층재 사이에 삽입된 시편이다. Type-D는 glass fiber cloth가 최외층재들의 안쪽과 바깥쪽에 2장씩 보강된 시편이다. Type-E는 sheet 타입의 GFRP를 Type-D와 동일한 위치에 1장씩 보강한 시편이다.

휨 강도 시험 결과, Type-A의 파괴계수와 비교하여 Type-B는 29%, Type-C는 6%, Type-E는 48% 증가되었으며 Type-D는 오히려 2% 감소하였다. 파괴모드에서 Type-A와 Type-B 그리고 Type-C는 최대하중에 도달하는 순간 완전히 파단되는 경향을 보였다. 그러나 Type-D와 Type-E는 보강재에 의해 파단이 억제되어 하중의 감소가 천천히 진행되었으며, 보강재 GFRP sheet(Type-E)는 압축응력과 인장응력에 대한 보강효과가 glass fiber cloth(Type-D)보다 양호한 것으로 확인되었다.

ABSTRACT

In this study, to improve bending strength performance of Korean white pine, we made the curved composite glulam that was reinforced with glass fiber materials and larch lamina. Five types of Korean white pine curved glulams were made depending on whether they had been reinforced or not and how they had been reinforced. Type-A, reference specimen, was produced only with Korean white pine lamina, and Type-B was with larch lamina in the same thickness. Type-C was made by inserting a glass fiber cloth of textile shape between the each layer. Type-D was reinforced with two glass fiber cloths, which were placed inside and outside of the outermost lamina. Type-E was reinforced with GFRP sheet in the same way as Type-D.

¹ Date Received June 10, 2015, Date Accepted July 3, 2015

² 강원대학교 산림환경과학대학 산림바이오소재공학과. Department of Forest Biomaterials Engineering, College of Forest and Environmental Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

[†] 교신저자(Corresponding author) : 홍순일(e-mail: hongsi@kangwon.ac.kr)

As a result of this bending strength test, the modulus of rupture (MOR) of Type-B, Type-C and Type-E were increased by 29%, 6%, and 48% in comparison with Type-A. However, MOR of Type-D was decreased by 2% in comparison with Type-A. In the failure modes, Type-A, Type-B and Type-C were totally fractured at the maximum load. However, load values of Type-D and Type-E decreased slowly because of reinforcement of fracture suppression, and the GFRP sheet (Type-E) had better reinforcing effect on compressive stress and tensile stress than the glass fiber cloth (Type-D).

Keywords : korean white pine, curved composite glulam, glass fiber cloth, glass fiber reinforced plastic, bending strength, neutral axis

1. 서 론

국내산 잣나무는 제재와 대패질 및 건조성이 비교적 양호한 목재에 속해 주로 건축 내장재 또는 가구, 합판 제작 등 쓰임이 많은 수종이다. 또한 국내에서 소나무, 낙엽송, 리기다 다음으로 산림면적(214,357 ha)뿐만 아니라 임목축적량(17,320,735 ha)이 높은 주요 침엽수종 중 하나이다(임업통계연보 2014). 그러나 보 또는 기둥과 같은 중목구조용 집성재로 사용하기에는 비교적 비중과 강도가 낮으며, 작은 웅이들이 많아 휨 가공성이 불량하다는 단점이 있다(Chong and Park 2008). 이러한 단점들을 개선하여 잣나무의 고도이용기술개발을 위한 노력으로 국내에서는 열처리 및 과열증기처리를 하는 연구를 통해 잣나무 판재의 휨 강도, 압축 강도 등 기계적 강도를 증가 시키는 연구가 실시되었다(Park *et al.* 2012. Lim *et al.* 2014). 이와는 다른 방법으로 층재 생산 시 웅이를 제거하여 핑거 조인트로 종 접합 시키는 방법과 집성재 제작 시 층재들 사이에 보강재를 삽입하여 제작하는 방법이 있다. 특히, 층재들 사이에 보강재를 삽입하여 제작한 복합집성재에 관한 연구는 해외에서 오래전부터 꾸준히 연구되고 있는 분야이다. 과거에는 알루미늄이나 철과 같은 금속판을 사용하여 복합집성재를 제작하였다면 최근에는 유리(glass), 탄소(carbon), 아라미드(aramid), 바살트(basalt) 등의 섬유를 판 또는 봉의 형태로 인발성형한 FRP (Fiber Reinforced plastic)가 사용되는 추세이다. GM. Raftery와 AM. Harte는 낮은 등급으로 조합된 가문비나무 집성재의 인장부에 GFRP (Glass

Fiber Reinforced Plastic) 판을 보강해줌으로써 강성을 12% 증가시켰다(Raftery and Harte 2011). GM. Raftery와 F. Kelly (2014)는 바살트 섬유 봉을 집성재 인장부에 섬유방향으로 삽입접착 시켜 강성은 10% 이상, 최대 휨 모멘트는 23% 이상 증가시켰다. 더불어 FRP 재료를 사용한 복합집성재는 목재와 FRP 제품간의 접착강도가 신뢰도의 큰 영향을 미친다. 따라서 섬유의 종류와 성형 가공된 형태에 따른 적합한 접착제를 찾는 연구 또한 중요하다. 이에 국내에서는 다양한 접착제 및 FRP의 성형 형태에 따른 제품들 간의 전단접착강도가 평가되었다(Park *et al.* 2009. Kim and Hong 2011). 그러나 최근에는 국내 공학목재 분야에서 복합집성재의 개발 및 품질 평가에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 또한 낮은 등급의 집성재를 보강하여 높은 등급으로 개선시키는 연구들 역시 미비한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 비중이 낮고 웅이가 많은 국내산 잣나무 만곡집성재의 휨 강도 성능을 높이기 위한 방법으로 glass fiber 소재의 보강재들로 보강한 만곡 복합집성재와 최외층에 잣나무 대신 낙엽송 층재를 사용한 이중수종 만곡 복합집성재를 제작하여 휨 강도 성능평가를 실시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

집성재 제작에는 결점 제거 후 핑거 조인트로 종 접합 시킨 20 mm (T) × 100 mm (W)의 국내산 잣나

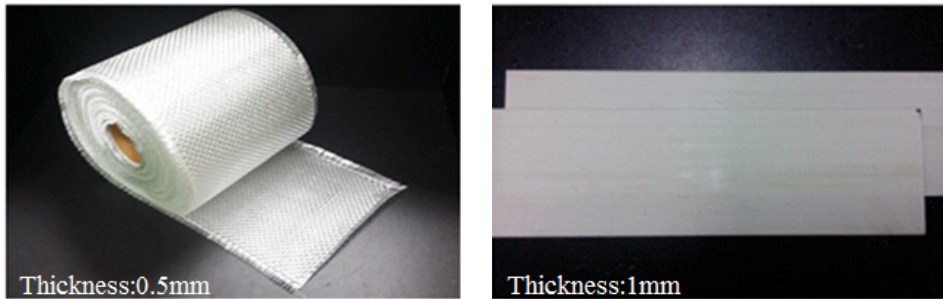


Fig. 1. The shape of glass fiber cloth (left) and GFRP sheet (right).

무(*Pinus koraiensis* Siebold et Zucc.) 층재를 사용하였다. 핑거 접합 시 레조시놀 접착제를 사용하였으며, 층재의 평균 함수율은 12%, 평균 비중은 0.45이었다. 보강재로는 평균함수율 12%, 평균비중 0.54인 20 mm (T) × 100 mm (W)의 국내산 낙엽송(*Larix kaempferi* Carr.)과 기성제품인 glass fiber cloth, GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) sheet를 사용하였다. glass fiber cloth는 유리섬유다발을 경사와 위사를 1본씩 매번 교차하여 제작한 직물형태의 보강재로 두께가 0.5 mm인 제품을 사용하였다. GFRP sheet는 유리섬유를 수지와 함께 혼합하여 판의 형태로 인발성형한 보강재로 두께가 1 mm인 제품을 사용하였다.

2.2. 잣나무 만곡 복합집성재 제작

잣나무 아치집성재는 보강 유무 및 보강방법에 의하여 다섯가지 종류로 제작하였으며 곡률을 0.18로 동일하게 적용하였다. 잣나무 층재는 등급구분 없이 무작위로 조합하였으며, 보강재는 Fig. 2와 같이 삽입하였다. 대조시험편인 Type-A는 잣나무로만 제작된 시험편이다. Type-B는 인장측 최외층재와 압축측 최외층재에 잣나무 층재 대신 동일한 크기의 낙엽송 층재로 제작한 시험편이다. Type-C는 glass fiber cloth를 체적비 2%로 보강한 시험편이며, 매 층재 사이에 1장씩 삽입 후 적층하였다. Type-D는 glass fiber cloth를 체적비 4%로 보강한 시험편이며, 인장측 및 압축측 최외층재의 안쪽과 바깥쪽에 각각 2장

씩 삽입 후 적층하였다. Type-E는 GFRP sheet로 보강한 시험편이며 보강재의 체적비와 보강위치는 Type-D와 동일하게 적용하였다.

Park *et al.* (2009)과 Kim *et al.* (2011)에 의한 시험결과를 토대로 목재-목재, 목재-glass fiber cloth 조합, 즉 Type-A, B, C, D 제작에는 레조시놀(제품명: Neolite-3040) 수지를 사용하였으며, 목재-GFRP sheet 조합에 해당되는 Type-E 시험편만 초산비닐수지(제품명: MPU-500)로 시험편을 제작하였다. 접착제의 도포량은 300 g/m²로 양면도포 하였으며, 압제압력은 0.98 N/mm²로 적용하여 상온에서 24시간 이상 경화시켰다. 시험편 수는 각 종류별로 2본씩 제작하였다.

2.3. 휨 강도 시험방법

모든 시험편은 지점간거리 2400 mm로 중앙집중 하중을 가하여 시험하였다. 변위를 측정하기 위하여 시험편의 중앙에 2개의 변위계(Displacement transducer)를 설치하였으며 결과 분석에는 평균값을 이용하였다. 보강방법에 따른 잣나무 만곡 복합집성재의 중립축 이동을 측정하기 위해 종류별로 1개의 시험편에 스트레인게이지(TML사)를 부착하여 변형율을 측정하였다. 최대용량 30 tonf인 수직재하 시험기를 이용하여 시험하였고, 하중 속도는 10 mm/min로 시험편이 완전히 파괴될 때까지 진행하였다.

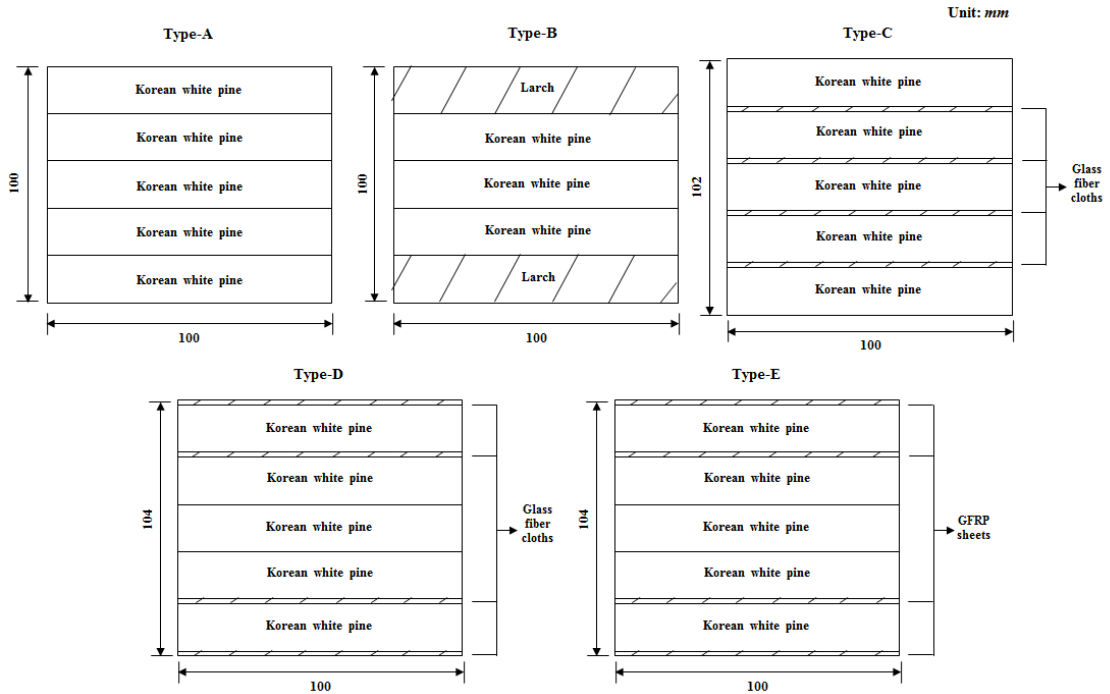


Fig. 2. Combination of laminas and location of reinforcements.

3. 결과 및 고찰

3.1. 잣나무 만곡 복합집성재의 휨 강도 성능

휨 강도 시험결과 잣나무 층재로만 제작한 Type-A의 평균 탄성계수는 11650 MPa로 측정되었으며, 최외층재들을 잣나무 대신 나엽송으로 적층시킨 Type-B의 평균 탄성계수는 16100 MPa로 Type-A보다 38% 증가하였다. 매 층재 사이마다 glass fiber cloth를 1장씩 삽입한 Type-C의 평균 탄성계수는 Type-A와 비교하여 23% 증가된 14350 MPa로 측정되었다. Glass fiber cloth를 인장측 및 압축측 최외층재들의 안쪽과 바깥쪽에만 2장씩 보강한 Type-D의 평균 탄성계수는 Type-A와 비교하여 88% 증가되었으며, Type-C보다 53% 높게 측정되었다. GFRP sheet로 보강한 Type-E의 평균 탄성계수는 Type-D와 비교하여 큰 차이가 없었다.

파괴계수의 경우 Type-A는 평균 65.3 MPa로 측정

되었다. Type-B의 평균 파괴계수는 84.1 MPa, Type-C는 69.5 MPa로 측정되어 탄성계수와 동일하게 최외층을 나엽송으로 적층한 Type-B가 높은 보강효과를 보였다. 그러나 Type-D의 경우에는 다섯 가지 시험편중 가장 높은 탄성계수가 측정되었음에도 불구하고 평균 파괴계수는 64.3 MPa로 측정되어 보강효과를 확인하지 못하였다. Type-E의 경우 평균 파괴계수가 96.6 MPa로 Type-A보다 48%, Type-B보다 15% 증가하였으며, 탄성계수 또한 높게 측정되었으므로 보강효과가 가장 높은 것으로 확인되었다.

결과적으로 만곡 복합집성재에서 glass fiber cloth는 비례한도 하중의 증가와 비례한도 변형을 감소시켰지만 소성영역에서는 그 효과가 크지 않는 것으로 확인되었다. 반면 GFRP sheet는 탄성영역과 소성영역에서 모두 변형을 억제하는 효과가 확인되었다. 이러한 원인은 두 보강재의 형상의 차이 및 인장강도와 목재-보강재간의 접촉력에서 기인하는 것으로 생각된다.

Table 1. The results of bending strength of curved composite glulam

Specimens	No.	MOE (MPa)	Ave. MOE (MPa)	MOR (MPa)	Ave. MOR (MPa)
Type-A	1	10500	11700 (1.00)*	58.8	65.3 (1.00)**
	2	12800		71.8	
Type-B	1	15200	16100 (1.38)*	81.0	84.1 (1.29)**
	2	17000		87.2	
Type-C	1	14800	14400 (1.23)*	74.1	69.5 (1.06)**
	2	13900		64.8	
Type-D	1	20000	22000 (1.88)*	61.2	64.3 (0.98)**
	2	24000		67.5	
Type-E	1	20500	20400 (1.74)*	95.4	96.6 (1.48)**
	2	20200		97.7	

* Ratio based on the Modulus of elasticity of Type-A, ** Ratio based on the Modulus of rupture of Type-A

3.2. 파괴모드

Type-A₁은 인장측 최외층재부터 파단이 발생하여 중층재부터는 층재의 섬유방향을 따라 좌우로 진행되었으며 압축측 최외층재가 파단되기 전에 인장부재들이 완전히 파단되어 하중이 크게 감소하였다. 이와는 반대로 Type-A₂는 최초 인장측 최외층재에서부터 파단이 진행되었지만 압축부에서 파단이 발생할 때까지 나머지 인장부재들은 파단되지 않았다. Type-B₁과 Type-B₂는 인장측 최외층재인 낙엽송부터 파단됨을 시작으로 중층재까지는 인장에 의한 파단이 발생하였으며 중층재부터 상층재로 파단이 진행되었다. 최외층재들이 내층재들보다 강도가 크게 높기 때문에 내층재들의 응력이 증가하면서 인장측 최외층재가 파단되어 일순간에 부재 전체가 완전히 파단된 것으로 분석된다. Type-C₁과 Type-C₂는 Type-A₁과 유사한 파괴모드가 관찰되었으며, 매 층마다 보강을 하였지만 인장측 최외층재의 바깥쪽을 보강하지 않았기 때문에 최외각층이 쉽게 파단된 것으로 생각된다. 그러나 인장측 최외층재의 바깥쪽을 보강한 Type-D₁은 하중이 증가하자 인장측 최외층재와 바깥쪽에 보강되었던 보강재가 박리되며 약 18 kN에서 최외층재가 파단되어 하중이 감소하였다. 이후 하중이 다시 증가하다가 약 16 kN에서 압축측 최외층재가 파단되며 최종적으로 파괴가 되었다. 이

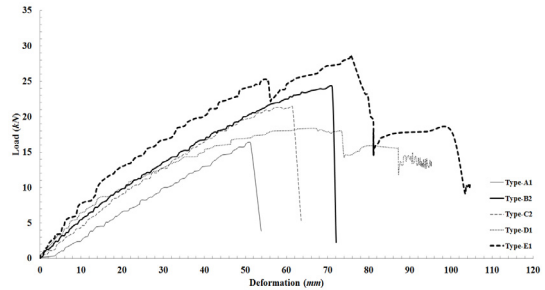


Fig. 3. Typical load-deformation curves of the specimens.

때 인장측 및 압축측 최외층재에 보강된 보강재들은 층재와 박리되었지만 보강재 자체는 손상되지 않은 것을 확인하였다. 따라서 glass fiber cloth와 잣나무 간의 양호한 접착성능을 확보한다면 집성재의 내력 성능은 향상될 것으로 생각된다. Type-D₂는 Type-D₁과 동일한 경향의 파괴모드가 관찰되었다. Type-E₁의 파괴모드는 약 25 kN에서 인장측 최외층재 바깥쪽에 보강되었던 GFRP sheet가 일부 박리되면서 약 22 kN까지 하중이 다소 감소하였다. 이 후 28 kN까지 하중이 다시 증가하였으며 인장측 최외층재에서 2차 파단이 발생하였다. 그러나 인장측 최외층재의 안쪽에 있던 GFRP sheet가 파단이 내층재로 진행되는 것을 막아주어 약 18 kN까지 하중이 재차 증가 후 압축측 최외층재에서부터 3차파단이 발생하였다.

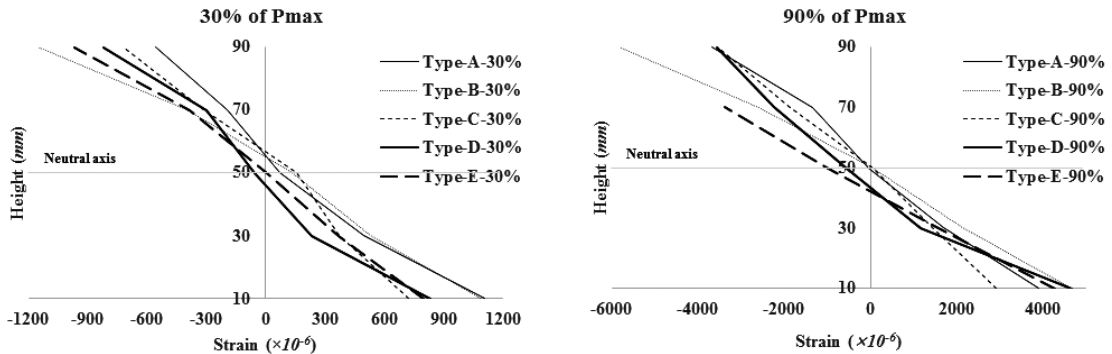


Fig. 4. The neutral axis shift of curved composite glulam.

Type-E₂는 Type-E₁과 동일한 경향의 파괴모드가 관찰되었다.

3.3. 중립축 이동

대조시험편인 Type-A의 본래 중립축 높이는 50 mm (집성재 높이/2)이며, 탄성영역인 최대하중의 30%일 때 중립축은 55 mm로 압축부로 이동하였지만 소성영역인 최대하중의 90%일 때는 49.6 mm로 본래 중립축과 거의 일치하였다. Type-B의 중립축 역시 탄성영역에서는 55 mm, 소성영역에서는 50.4 mm로 측정되었으며, Glass fiber cloth 1장씩 매 층재 사이에 균일하게 보강한 Type-C (본래 중립축 높이: 51 mm) 또한 탄성영역에서는 56.6 mm, 소성영역에서는 50.6 mm로 측정되었다. Glass fiber cloth를 최외층재의 내외측에 2장씩 보강한 Type-D의 본래 중립축 높이는 52 mm이며 탄성영역에서는 46 mm, 소성영역에서는 43.2 mm로 본래 중립축 보다 8.8 mm 인장부로 이동하였다. GFRP sheet를 최외층재 내외측에 1장씩 보강한 Type-E는 탄성영역에서는 50 mm로 본래 중립축과 큰 차이가 없었지만 가성영역에서는 42.2 mm로 인장부로 크게 이동하였다.

4. 결 론

국내산 잣나무 만곡집성재의 휨 강도 성능을 높이기 위한 방안으로 glass fiber 소재의 보강재들과 낙

엽송 층재를 이용한 만곡 복합집성재를 제작하여 휨 성능 평가를 실시하였다.

시험결과 보강유무에 상관없이 최초 모든 시험편의 인장측 최외층재에서 파단이 발생하는 것을 확인하였다. 이에 최외층재에 잣나무를 대신하여 보다 강도가 높은 낙엽송 층재를 사용한 결과 파괴계수가 약 30% 증가함을 확인하였다. 또한 인장측 및 압축측 최외층재의 바깥쪽과 안쪽에 GFRP sheet로 체적비를 높여 보강한 만곡 복합집성재는 약 50% 가까이 파괴계수를 증가시킬 수 있었다.

결론적으로 잣나무 집성재 최외층재의 바깥쪽을 보강한다면 부재의 강도가 증가하는 것을 확인하였다. 그러나 이러한 보강방법은 심미성이 떨어지는 문제점이 있다. 따라서 본 연구의 결과를 종합해 보았을 때 압축측 및 인장측 최외층재는 강도가 높은 이수종 층재를 사용하며 보강재는 최외층재들의 안쪽에 삽입하여 보강한다면 잣나무 만곡 복합집성재의 성능 및 심미성 모두 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 2013년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였음(120131791).

REFERENCES

- Chong, S.H., Park, B.S., 2008. Wood properties of the useful tree species grown in Korea. Korea forestry research institute, pp. 208-228.
- Gary M. Raftery, Annette M. Harte, 2011. Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate. *Composites: Part B* 42, pp. 724-735.
- Gary M. Raftery, Fiona Kelly, 2014. Composite elements of basalt fibre rods and low grade glulam. World conference on timber engineering (WCTE2014), pp. 1-10.
- Kim, K.H., Hong, S.I., 2011. Bonding performance of glulam reinforced with textile type of glass-and aramid-fiber, GFRP and CFRP. *Journal of The Korean Wood Science and Technology* 39(2): 156-162.
- Korea forest service, 2014. *Statistical yearbook of forestry*.
- Lim, H.M., Hong, S.H., Kang, H.Y., 2014. Investigation of the color change and physical properties of heat-treated pinus koraiensis square lumbers. *Journal of The Korean Wood Science and Technology* 42(1): 13-19.
- Park, J.C., Shin, Y.J., Hong, S.I., 2009. Bonding performance of glulam reinforced with glass fiber-reinforced plastics. *Journal of The Korean Wood Science and Technology* 37(4): 357-363.
- Park, Y.G., Eom, C.D., Park, J.H., Chang, Y.S., Kim, K.M., Kang, C.W., Yeo, H.M., 2012. Evaluation of Physical Properties of Korean Pine (*Pinus koraiensis* Siebold & Zucc.) Lumber Heat-Treated by Superheated Steam. *Journal of The Korean Wood Science and Technology* 40(4): 257-267.