

봉형 GFRP를 삽입접착한 낙엽송 집성재 접합부의 모멘트저항 성능 평가¹

이 인 환² · 송 요 진² · 정 홍 주² · 홍 순 일^{2,†}

Moment Resistance Performance Evaluation of Larch Glulam Joint Bonded in Glass Fiber Reinforced Plastic Rods¹

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

요 약

국내산 낙엽송 집성재와 봉형 GFRP의 접착성능을 평가하기 위해 집성재에 선공을 한 후 봉형 GFRP를 삽입하고 접착제로 목재와의 간극을 충전시켜 인발시험편을 제작하였다. 인발시험편은 접착 깊이, 접착층 두께, 접착제 종류를 다르게 적용하여 실험하였다. 봉형 GFRP를 삽입접착한 캔틸레버형 라멘구조 시험체는 인발시험 결과를 토대로 제작, 강판삽입형 시험체와 모멘트 저항 성능을 비교검토 하였다.

인발시험결과 봉형 GFRP의 삽입깊이가 봉형 GFRP 직경의 5배일 때 가장 우수한 접착력이 측정되었으며, 접착층 두께는 1 mm일 경우 2 mm일 때보다 17%~29% 향상된 접착력이 측정되었다. 또한 폴리우레탄(poly-urethane) 접착제를 사용한 시험편이 레조시놀(resorcinol) 접착제를 사용한 시험편보다 2.9~4.0배 높은 성능을 발휘하였다.

봉형 GFRP로 접합한 캔틸레버형 라멘구조 시험체는 드리프트 핀을 사용한 강판삽입형 시험체와 비교하여 평균 0.82배 낮은 모멘트 저항 성능이 측정되었지만 초기강성은 0.93배로 대등한 성능을 보였다.

ABSTRACT

In order to evaluate the bond performance of domestic larch glulam and the glass fiber reinforced plastic (GFRP) rod, the specimen with the GFRP rod bonded-in domestic larch glulam for pull-out test was produced. The test was carried out using various specimens with different gluing depth, width of glue-line and type of adhesive. The cantilever type rahmen structure specimen with bonded-in GFRP rods was produced based on the result of pull-out test, and its moment resistance performance was compared and examined with the moment resistance performance of slotted-in steel plate specimen.

As a result of the pull-out test, the most excellent bond performance was found when the insertion depth of GFRP rods was 5 times larger than the diameter of GFRP rods. When the glue-line thickness was 1 mm, the bond performance improved by 17%~29% in comparison to the bond performance in the case of the glue-line thickness of 2 mm.

¹ Date Received September 15, 2014, Date Accepted October 21, 2014

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)

Also, the bonded strength of the specimen used with poly-urethane adhesive was 2.9~4.0 times greater than the bonded strength of specimen used with resorcinol adhesive.

The cantilever type rahmen structure specimen with bonded-in GFRP rods showed the moment resistance performance 0.82 times lower in comparison to the slotted-in steel plate specimen used with the drift pin, but the initial stiffness was similar as 0.93 times.

Keywords : glass fiber reinforced plastic rods, bond performance, pull-out test, cantilever type rahmen structure specimen

1. 서 론

대한민국의 산림면적은 637만 ha로 국토의 63.7%를 차지하고 있으며 이는 OECD 국가에서 네 번째로 높은 비율이다. 그중 낙엽송은 10대 조림수종의 하나이며 소나무 다음으로 공급량이 많은 침엽수재다(임업통계연보 2013). 또한 국내산 낙엽송은 상대적으로 높은 강도적 특성으로 인하여 구조용 부재로서의 가치가 인정되기 때문에 집성재 등 다양한 공학목재의 소재로 연구되고 있으며 활용도가 높아지고 있다(Kim *et al.* 2008).

집성재로 제작된 목구조물의 내력성능은 기둥과 보의 접합강도에 따라 평가되기 때문에 접합구조 및 접합물이 중요하다. 그중 집성재구조물의 접합구조는 강판삽입형과 강판측재형(Steel-Wood-Steel)이 대표적으로 사용되는 실정이다. 하지만 이러한 금속접합부는 외기에 노출되어 부식의 위험이 존재하며 심미성 저하 및 접합부의 중량 증가 등의 단점이 있으며, 목재와 일체화가 잘 이루어지지 않는다(Soltis *et al.* 1987). 따라서 집성재간 접합에 다양한 신소재 접합물의 연구가 진행되고 있다. 그중 봉형 유리섬유강화플라스틱(GFRP)을 집성재에 삽입접착한 접합부는 외관상 접합물이 드러나지 않으므로 심미적인 가치가 높고 중량대비 높은 강도와 내약품성 및 내부식성 등의 이점을 보여 최근 연구되고 있는 접합형식이다(Madhoushi *et al.* 2008). 이러한 접합부는 봉형 GFRP와 집성재간의 다양한 접합방법에 따라 접착력이 큰 영향을 받기 때문에 접착제 종류와 접착층 두께 및 삽입깊이를 달리한 접착력 평가가 이루어지고 있다(Harvey *et al.* 2000). 목재와 봉형 GFRP의 접착력은 인발시험을 통해 평가하고 있다(Madhoushi *et*

al. 2004).

본 연구에서는 봉형 GFRP와 국내산 낙엽송 집성재간의 적합한 접착제 및 접착층 두께, 봉형 GFRP의 적정 삽입깊이에 따른 접착성능을 평가하기 위하여 인발시험을 실시하였다. 또한 인발시험의 결과를 적용하여 봉형 GFRP 접합부와 강판삽입형 접합부의 모멘트저항 성능을 비교 검토하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 인발시험편 제작 및 시험방법

80 CW 사포로 샌딩하여 표면을 거칠게 한 봉형 GFRP (D : 12 mm)와 국내산 낙엽송(*Larix kaempferi* Carr.) 집성재를 사용하여 Fig. 1-(a)와 같은 시험편을 제작하였다.

인발 시험편의 높이는 봉형 GFRP의 삽입깊이(3D, 5D, 7D)와 같으며, 선공직경은 14 mm 또는 16 mm로 구분하였다. 이때, 집성재와 봉형 GFRP간 접착층이 1 mm 또는 2 mm로 형성된다. 이후 봉형 GFRP가 집성재의 정중앙에 위치하도록 삽입하고, 집성재와 봉형 GFRP의 간극에 레조시놀(resorcinol) 접착제 또는 폴리우레탄(poly-urethane) 접착제를 충전시켜 접착하였다.

인발 시험을 위하여 봉형 GFRP에 Fig. 1-(b)의 A와 같은 금속치구를 epoxy접착제로 접착하고, 강도 시험기의 인장 Jig에 고정시켰다. 시험편의 집성재부분은 강도시험기에 고정틀을 이용하여 고정된 후 분당 5 mm의 하중속도로 실험을 실시하였다. 시험편은 접착제의 종류, 접착층 두께, 삽입깊이를 달리하여 12 type으로 구분하였고, 각 type당 5개씩 총 60

Table 1. Nomenclature of GFRP rods specimens

Specimens name	Adhesive	Glue line thickness (mm)	Bonded length (mm)
R1-3D*	Resorcinol	1 mm	3D
R1-5D			5D
R1-7D			7D
R2-3D		2 mm	3D
R2-5D			5D
R2-7D			7D
P1-3D			3D
P1-5D	Poly-urethane	1 mm	5D
P1-7D			7D
P2-3D			3D
P2-5D		2 mm	5D
P2-7D			7D

*D : Diameter of the GFRP rods.

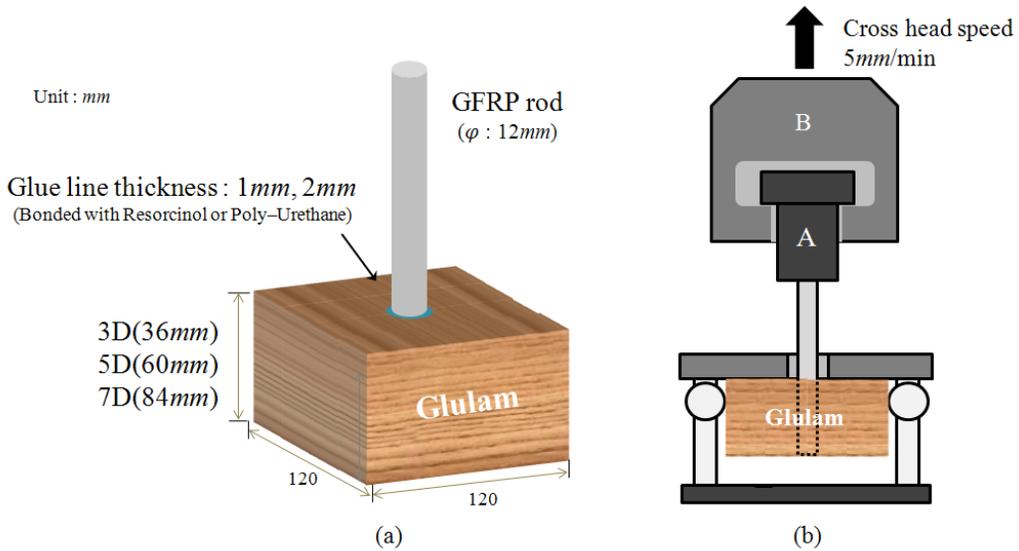


Fig. 1. Shape of GFRP rods specimen and pull-out test.

개를 제작하여 Table 1과 같이 종류별로 명명하였다.

2.2. 모멘트저항 성능 시험편 제작

낙엽송 집성재에 봉형 GFRP (D : 20 mm)를 삽입접

착한 캔틸레버형 모멘트저항 시험체(Type-GFRP)는 인발시험에서 우수한 성능을 보인 접착제, 접착층 두께, 봉형 GFRP의 삽입 깊이를 적용하여 제작하였다.

Type-GFRP는 Fig. 2-(a)와 같이 기둥재의 횡단면과 보부재 하단부에 접착층 두께 1 mm로 형성하기

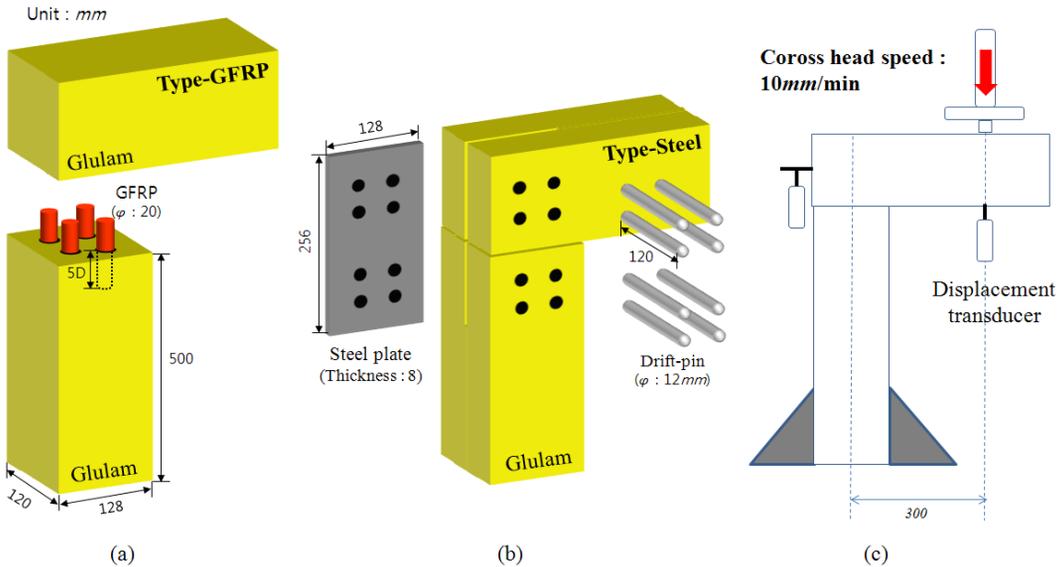


Fig. 2. Shape of moment resistance specimen and test.

위하여 직경 22 mm, 삽입깊이 5D (100 mm)로 선공하고 봉형 GFRP를 삽입하였으며, 집성재와 봉형 GFRP의 간극 및 접합면은 폴리우레탄(poly-urethane) 접착제로 접착하여 제작하였다.

강판삽입형 모멘트저항 시험체(Type-Steel)는 집성재의 기둥재와 보부재에 각각 슬릿(slit)가공하여 두께 8 mm 강판을 삽입한 후 직경 12 mm 드리프트핀으로 접합하였다(Fig. 2-b). 시험체는 Type별로 3개씩 모두 6개를 제작하였다.

모멘트 저항 시험은 시험체의 기둥재하단부를 고정틀에 고정한 후 기둥재의 중심으로부터 300 mm 떨어진 보부재에 분당 10 mm 하중속도로 실험하였다(Fig. 2-c).

3. 결과 및 고찰

3.1. 낙엽송 집성재와 봉형 GFRP의 접착력 평가

인발시험 결과 폴리우레탄(poly-urethane) 접착제는 양호한 접착력 및 경화 후 탄성이 유지되는 특성

때문에 하중-변형 곡선에서 폴리우레탄(poly-urethane) 접착제를 사용한 시험편들이 최대하중 이후에 완만한 곡선 형태가 관찰되었다(Yoon *et al.* 2000). 반면 레조시놀(resorcinol) 접착제를 사용한 시험편은 최대하중 이후 급격히 감소하는 경향을 보였다(Fig. 3).

봉형 GFRP를 삽입접착한 LVL시험편은 목재 세포가 찢어지거나 파열되면서 봉형 GFRP 주변목재가 원형으로 파단 되었고(Madhoushi *et al.* 2004), 유럽산 가문비나무 집성재는 봉형 GFRP의 삽입깊이가 늘어나면 집성재에 목부파단이 발생하였다(Laura *et al.* 2005). 반면 국내산 낙엽송 집성재는 목부파단이 관찰되지 않았다. 이는 가문비나무의 비중(0.39)보다 국내산 낙엽송 비중(0.61)이 더 높을 뿐만 아니라 MOE 및 MOR도 평균 1.2배 1.5배 우수하여 위와 같은 파괴형상이 관찰된 것으로 사료된다.

인발시험에 의한 봉형 GFRP와 낙엽송 집성재간 접착층 파괴형상은 다음 2가지로 나타났으며, 파괴형상에 따른 접착력은 다음 식을 이용하였다.

- ① 집성재와 접착층간 접착력이 봉형 GFRP와 접

Table 2. Results of pull-out test for GFRP rods specimen

Adhesive	Glue line thickness (mm)	Bonded length (mm)	Maximum Load (kN)	Bond strength (MPa)
Resorcinol	1 mm	3D	1.2	1.0
		5D	2.8	1.3
		7D	3.2	1.1
	2 mm	3D	1.1	0.8
		5D	2.1	0.9
		7D	2.4	0.9
Poly-urethane	1 mm	3D	4.3	3.2
		5D	8.7	3.9
		7D	10.0	3.2
	2 mm	3D	3.1	2.3
		5D	7.9	3.5
		7D	9.5	3.0

*D : Diameter of the GFRP rods.

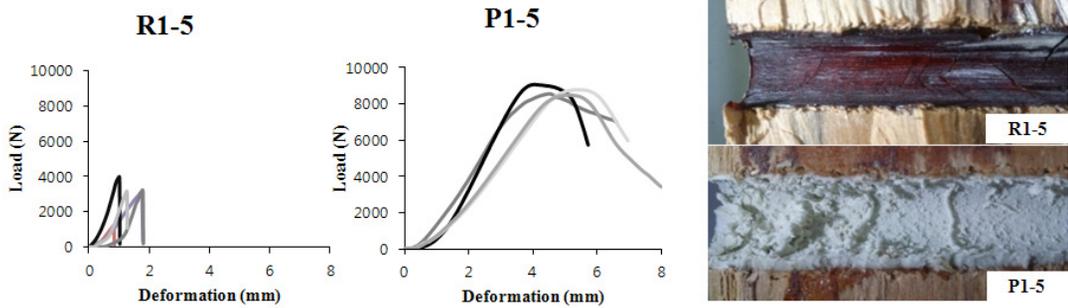


Fig. 3. Load-deformation curve of GFRP rods specimen and failure modes.

착층간 접착력보다 상대적으로 우수하여 봉형 GFRP와 접착층 사이에서 계면파괴(식 (1)).

- ② 집성재와 접착층, 접착층과 봉형 GFRP간 접착력이 비슷하여 접착층에서 응집파괴(식 (2)).

$$Bond\ Strength\ T_g\ (MPa) = \frac{P_{max}(N)}{3.14 \times D_g(mm) \times H(mm)} \dots\dots (1)$$

$$Bond\ Strength\ T_a\ (MPa) = \frac{P_{max}(N)}{3.14 \times D_a(mm) \times H(mm)} \dots\dots (2)$$

$P_{max}(N)$: 최대하중(N)

D_g : 봉형 GFRP의 직경(mm)

D_a : 파단된 접착층간 직경(mm)

D_w : 파단된 목재간 직경(mm)

H : 접착 깊이(mm)

레조시놀(resorcinol) 접착제로 접착한 시험편들은 모두 봉형 GFRP와 접착층간 계면파괴가 발생하여 식(1), 폴리우레탄(poly-urethane) 접착제로 접착한 시험편들은 모두 접착제에서 응집파괴가 발생하였기 때문에 식(2)를 적용하여 평균 접착력을 산출하였다 (Table 2).

Table 3. Results of moment performance evaluation test for moment resistance specimen

Type	Initial stiffness ($N \cdot m/rad.$)	Ave. Initial stiffness ($N \cdot m/rad.$)	Yield moment ¹ ($kN \cdot m$)	Ave. Yield moment ($kN \cdot m$)	Mmax ($kN \cdot m$)	Ave. Mmax ($kN \cdot m$)	Rotation angle (rad.)
Type-Steel-1	30.0		2.1		2.9		0.07
Type-Steel-2	34.0	34.7(1.0) ²	3.1	2.5(1.0) ³	3.7	3.3(1.0) ⁴	0.09
Type-Steel-3	40.0		2.2		3.3		0.07
Type-GFRP-1	31.0		2.2		2.8		0.10
Type-GFRP-2	36.0	32.3(0.9)	1.8	2.0(0.8)	2.6	2.8(0.8)	0.10
Type-GFRP-3	30.0		1.9		2.9		0.12

¹At 0.5% offset, ²Ave. initial stiffness ratio based on the Type-Steel, ³Ave. yield moment ratio based on the Type-Steel, ⁴Ave. maximum moment ratio based on the Type-Steel.

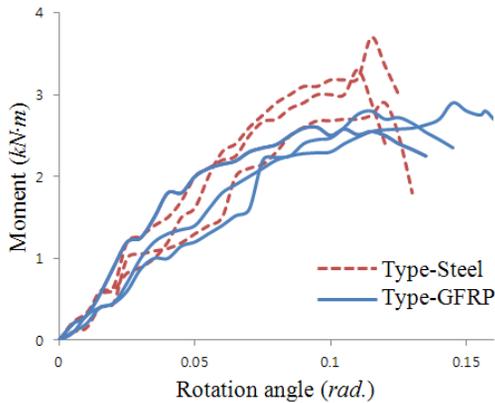


Fig. 4. Moment-rotation angle curves of moment resistance specimen.

폴리우레탄(poly-urethane) 접착제를 사용한 시험편들은 레조시놀(resorcinol) 접착제를 사용한 시험편과 비교하여 2.9~4.0배 높은 접착력이 측정되었다. 레조시놀(resorcinol) 접착제는 목재간 접착력이 우수한 반면 봉형 GFRP에 대한 접착력은 저하되기 때문에 이러한 결과가 관찰되었다. 또한 접착층 두께가 1 mm 시험편들이 2 mm 시험편들 보다 1.1~1.4배 우수한 접착력이 측정되었다. 최대하중은 삽입깊이가 증가할수록 양호하였으나, 접착력은 5D에서 가장 높게 관찰되었다. 가장 우수한 접착력을 가진 P1-5D는 봉형 GFRP를 삽입접착한 시험체(Type-GFRP)의 모멘트 저항 성능평가에 적용하였다.

3.2. 모멘트저항 성능 평가

국내산 낙엽송 집성재로 제작한 캔틸레버형 라멘 구조의 모멘트-변형각의 곡선 그래프는 Fig. 4와 같으며, 모멘트 저항 성능은 Table 3과 같다.

평균 최대모멘트는 봉형 GFRP를 사용한 시험체가 2.8 $kN \cdot m$ 로 강관삽입형 시험체 3.3 $kN \cdot m$ 보다 18% 낮게 측정되었다. 초기강성은 32.3 $N \cdot m/rad.$ 와 34.7 $N \cdot m/rad.$ 로 봉형 GFRP를 사용한 시험체가 7% 낮게 측정되었다.

봉형 GFRP의 접착력을 높이기 위해 표면에 구사를 코팅하거나 돌기를 성형하는 등 집성재와 접착력을 향상하기 위한 추가적인 공정이 이뤄진다면 인발 저항이 향상된다고 보고되어있기 때문에(You *et al.* 2011), 이러한 봉형 GFRP를 이용한 집성재의 접합부 개발이 필요할 것으로 사료된다.

3.3. 캔틸레버형 라멘구조 시험체의 파괴 모드

드리프트핀을 이용한 강관삽입형 시험체는 보 및 기둥부재에서 파괴형상을 확인하였다. Type-Steel-1과 Type-Steel-3은 하중이 보부재에 가해지면서 드리프트핀의 높은 강성으로 인해 집성재가 압입되어 변형이 일어났고, 하중이 지속됨에 따라 압입된 집성재에서 기둥부재의 횡단면 방향으로 취성파단이 발생하였다(Fig. 5). 반면 Type-Steel-2는 기둥부재의 연단

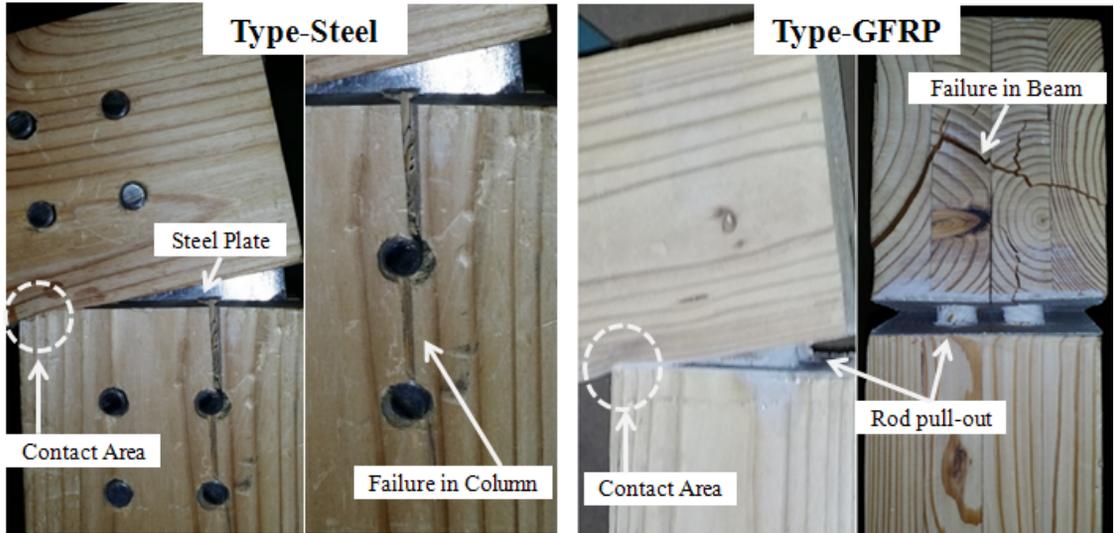


Fig. 5. Failure modes of moment performance test for moment resistance specimen (Left: Type-Steel, Right: Type-GFRP).

거리에서 1차 파단이 발생한 뒤 하중이 감소하지 않고 계속 증가하다가 보부재의 연단거리에서 2차 파단이 발생하였다. 또한 모든 시험체의 접지면이 압입되었으나 목부파단은 관찰되지 않았다.

봉형 GFRP를 사용한 시험체 Type-GFRP의 파괴형상은 폴리우레탄(poly-urethane) 접착층의 탄성에 의해 봉형 GFRP가 서서히 인발되면서 모멘트 값이 증가하였다. 접합부에 삽입된 봉형 GFRP에 전단력이 가해져 더 이상 인발되지 않았다. 이후 Type-GFRP의 보부재가 봉형 GFRP와 집성재의 접지면에서 발생한 압축응력에 의하여 내부에서 횡단면쪽으로 파단이 발생하였다(Fig. 5). 각재형 LVL에 봉형 GFRP를 삽입접착한 경우 접지면이 압입되면서 초기부터 점차적으로 할렬이 늘어난 반면(Madhoushi *et al.* 2004), 국내산 낙엽송 집성재는 접지면적 중 보부재만 압입될 뿐 할렬 및 초기 파단은 발생하지 않았다.

4. 결 론

국내산 낙엽송 집성재에 봉형 GFRP를 삽입접착한 접합부의 활용도를 높이기 위하여 집성재와 봉형

GFRP간 접착층 두께 및 봉형 GFRP 삽입깊이에 따른 접착력을 분석하였다.

인발시험 결과 폴리우레탄(poly-urethane) 접착제로 봉형 GFRP와 집성재를 삽입접착한 시험편은 인성파괴가 일어나 구조물 접합부에 적용 시 접합내력이 높을 것으로 기대된다. 집성재와 봉형 GFRP간 접착층의 두께는 1 mm, 봉형 GFRP의 삽입 깊이는 직경의 5배에서 양호한 성능을 발휘하였다.

앞선 시험결과를 바탕으로 제작된 캔틸레버형 라멘구조 시험체(Type-GFRP)는 강판삽입형 시험체(Type-Steel)와 비교하여 최대모멘트가 0.82배 낮았지만, 초기강성은 0.93배로 대등한 성능을 발휘하였다. 또한 봉형 GFRP를 삽입한 접합부는 금속과는 상이하게 대기부식과 접합부 노출이 없어 금속 접합부보다 심미성이 향상되었다.

봉형 GFRP에 표면가공을 하여 접착력 향상에 대한 추가적인 연구가 진행된다면 기존의 금속 접합부와 동등하거나 그 이상의 성능이 측정될 것이라 기대된다.

사 사

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2013R1A1A2011524).

REFERENCES

- Broughton, J.G., Hutchinson, A.R. 2001. Pull-out behaviour of steel rods bonded into timber. *Mater Struct.* 34(236): 100-109.
- Harvey, K., Ansell, M.P. 2000. Improved timber connections using bonded-in GFRP rods. In: *Proceedings of International Timber Engineering Conference, Vancouver, July-August. Poster 4.*
- Jeon, S.H., Shon, B.L., Kim, C.H., Jang, H.S. 2012. A Fundamental Study for the Behavior of Lightweight Aggregate Concrete Slab Reinforced with GFRP Bar. Korea Concrete Institute: 99-108.
- Kim, K.H., Hong, S.I. 2008. Bearing Properties of Domestic Larix Glulam. *Journal of The Korean wood science and technology.* v.36 no.4: 93-101.
- Laura, D.L., Vincenza, S., Antonio, L.T. 2005. Analytical and experimental study on bonded-in CFRP bars in glulam timber. *Composites: Part B* 36: 279-289.
- Madhoushi, M., Ansell, M.P. 2008. Behaviour of timber connections using glued-in GFRP rods under fatigue loading. Part II: Moment-resisting connections. *Composites: Part B* 39: 249-257.
- Madhoushi, M., Ansell, M.P. 2004. Experimental study of static and fatigue strengths of pultruded GFRP rods bonded into LVL and glulam. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 24: 319-325.
- Park, Y.H., Choi, Y. 2013. Flexural Behaviors of GFRP Rebars Reinforced Concrete Beam under Accelerated Aging Environments. Korea Concrete Institute: 137-144.
- Statistical yearbook of forestry 2013. Korea forest service.
- Soltis L. A. and Wilkinson, T. L. 1987. FRL General Tech. Rep. FRL-GTR54, FPL: 1-21.
- Yoon, S.S., 2000. A Study on the Synthesis and Modification of Aqueous Polyurethane Adhesive. Department of Chemical Engineering. p. 64.
- You, Y.J., Kim, J.H., Park, Y.H., Park, J.S. 2012. Enhancements in Performance and Manufacturing Efficiencies of GFRP Rebar. Korea institute for Structural Maintenance Inspection 16(1): 110-119.
- You, Y.J., Park, Y.H., Kim, H.Y., Choi, J.W., Kim, J.H. 2013. Creep Behavior of Pultruded Ribbed GFRP Rebar and GFRP Reinforced Concrete Member. Korea Concrete Institute 25(2): 187-194.