

GFRP 보강적층판 및 GFRP rod를 이용한 낙엽송 집성재 접합부의 모멘트저항 성능평가¹

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

Moment Resistance Performance Evaluation of Larch Glulam Joints using GFRP-reinforced Laminated Plate and GFRP Rod¹

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

요 약

구조용 집성재 라멘 접합부에 일반적으로 사용되는 접합철물을 대신하여 단판과 GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic)를 복합시킨 GFRP 보강적층판과 삽입 접착형 GFRP rod를 접합물로 사용하였다. 이들을 적용시킨 접합부에 대한 모멘트저항 성능평가 결과, 접합철물을 이용한 실험체(Type-1)와 비교하여 GFRP 보강적층판과 GFRP rod 핀을 사용한 실험체의 항복모멘트는 4% 낮게 측정되었으나 회전강성은 29% 높게 측정되었다. 또한 GFRP 보강적층판과 목재(*Eucalyptus marginata*)핀을 사용한 실험체는 Type-1 실험체와 비교하여 항복모멘트 11%, 회전강성 56% 높게 측정되며 가장 양호한 성능을 나타내었다. 파괴형상과 완전탄소성 분석을 통해서도 핀에 의한 전단내력으로부터의 취성파괴가 아닌 연성거동을 나타내며, 접합내력이 상승하고 부재의 일체화가 이루어짐을 확인하였다. 반면, GFRP rod를 삽입 접착한 실험체는 접착 불량으로 측정이 불가하거나 접합성능이 매우 낮게 측정되었다.

ABSTRACT

Instead of metal connector generally used on the structural glued laminated timber rahmen joints, the GFRP reinforced laminated plates combining veneer and GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) and bonded type GFRP rod were used as the connectors. As a result of moment resistance performance evaluation on the joint part applied with these connectors, the yield moment of specimen using the GFRP reinforced laminated plates and GFRP rod pin was measured 4 % lower in comparison to the specimen (Type-1) using the metal connectors, but the initial rotational stiffness was measured 29% higher. Also, the yield moment and rotational stiffness of the specimen using the GFRP-reinforced laminated plates and wood (*Eucalyptus marginata*) pin showed were measured 11% and 56% higher in comparison to the Type-1 specimen, showing the best performance. It was also confirmed through the failure shape

¹ Date Received August 20, 2015, Date Accepted September 11, 2015

본 논문은 2015년 '제4회 목조건축 국제심포지엄'에서 부분적으로 발표되었음.

² 강원대학교 산림환경과학대학 산림응용공학부 산림바이오소재공학전공. Program of Forest Biomaterials Engineering, Division of Forest Material Science & Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

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

and perfect elasto-plasticity analysis that it showed ductility behavior, not brittle fracture, from the shear resisting force by the pin and the bonding strength increased and the unification of member was carried out. On the other hand, in case of the specimen bonded with GFRP rod, it was impossible to measure the bonding performance or it was measured very low due to poor bonding.

Keywords : structural glulam, timber frame, moment resisting joints, glass fiber reinforced plastic, glass fiber reinforced plastic rod, adhesive

1. 서 론

목구조물의 내구성은 목재 자체의 강도 성능뿐만 아니라 목재 접합부의 접합성능에 따라 좌우된다. 집성재 구조물에 대한 접합기술은 접합철물을 이용한 강판 삽입식이 일반적이다. 하지만 강판과 볼트 및 드리프트 핀을 이용한 접합은 목재와 금속의 강도 차이로 인해 목재의 섬유방향 하중 시 할렬파단이 일어나며 이는 취성파괴로 이어져 접합부의 강도를 감소시키는 취약점으로 작용한다.

섬유강화플라스틱(Fiber Reinforced Plastics; FRP)을 이용한 보강방법은 금속재료보다 가볍고, 비강도, 비강성, 내식성 등이 우수한 특징을 가지고 있어 건축 및 토목구조물의 보수나 보강에 그 사용이 증가하고 있다. FRP를 이용한 접합부 보강은 효과적인 대안이 될 수 있으며, 지진과 같은 하중에서 에너지를 소산하는 용량 및 성능을 유지하면서 큰 변형에 견딜 수 있는 가능성을 제공한다. Kasal *et al.* (2004)은 기둥-보 접합부에 고밀도 목재와 유리섬유로 보강한 접합부의 내진성능을 평가하였다. 시험결과 취성파괴를 완화하였고, 내진 수용력과 신뢰성이 증가하였다고 보고하였다. Pedersen *et al.* (2002)은 FRP를 금속 dowel과 삽입형 강판 대체로 사용하는 연구를 제시하였으며, 목재 두께와 무관하게 FRP dowels의 사용에 의해 소성 거동을 나타내는 것을 확인하였다. Madhoushi *et al.* (2008)은 GFRP rod로 접착된 기둥-보의 피로강도를 모의 지진하중 조건 하에서 연구하였고, 실험 결과 동적 하중 하에서 에너지 분산을 위한 좋은 연성능력을 보여준다고 하였다. 이처럼 목구조물의 취약부위를 FRP를 이용하여 보완하는 방법으로 관련 연구가 진행되고 있다.

종래의 목구조물의 접합부위 보강방법은 대부분이 보강철물을 통한 방법으로 접합구를 증가시키거나 보강강판을 사용하고 있는데, 이러한 방법은 집성재 접합부의 근본적인 취약점인 할렬파단을 보강하지 못한다. 따라서 본 연구에서는 기존의 슬릿 삽입형 강판과 드리프트 핀 접합부를 대체할 목적으로 GFRP 보강적층판과 비금속 핀 접합을 이용한 슬릿 삽입형 접합부와 glued-in rod 방법으로 GFRP rod와 에폭시 접착제를 이용한 삽입 접착형 접합부를 제작하였다. 이번 실험에서는 기둥과 보 부재를 강접합한 일방향 구조시스템인 문형라멘구조를 접합방법과 접합구 종류를 달리하여 5타입의 실험체를 제작하였으며, 각 접합부의 모멘트저항 성능을 비교 검토 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

집성재 제작에 사용된 수종은 국내산 낙엽송(Larix kaemferi Carr.) 층재(두께 30 mm, 폭 200 mm)로서 평균함수율은 13%, 평균비중은 0.55이었다. 집성재 조합을 위해 종진동의 고유 진동수를 이용한 휨 탄성계수로 등급 구분하였으며, 레조시놀 접착제를 사용하여 단면적 190 × 200 mm의 7 ply 집성재를 제작하였다.

GFRP 보강적층판(GFRP-reinforced laminated plate, 이하 GFRP plate) 제작에 사용된 단판의 수종은 라디에타소나무(Pinus radiata D. Don)로 단판의 두께는 3.6 mm, 평균 함수율은 8.5%, 평균비중은 0.53이었다. 보강재는 직물형태의 유리섬유를 불포화 폴리에스테르 수지를 사용하여 시트의 형태로 가공

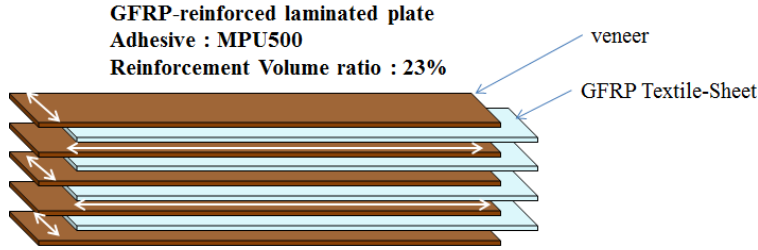


Fig. 1. Configuration of GFRP-reinforced laminated plate.

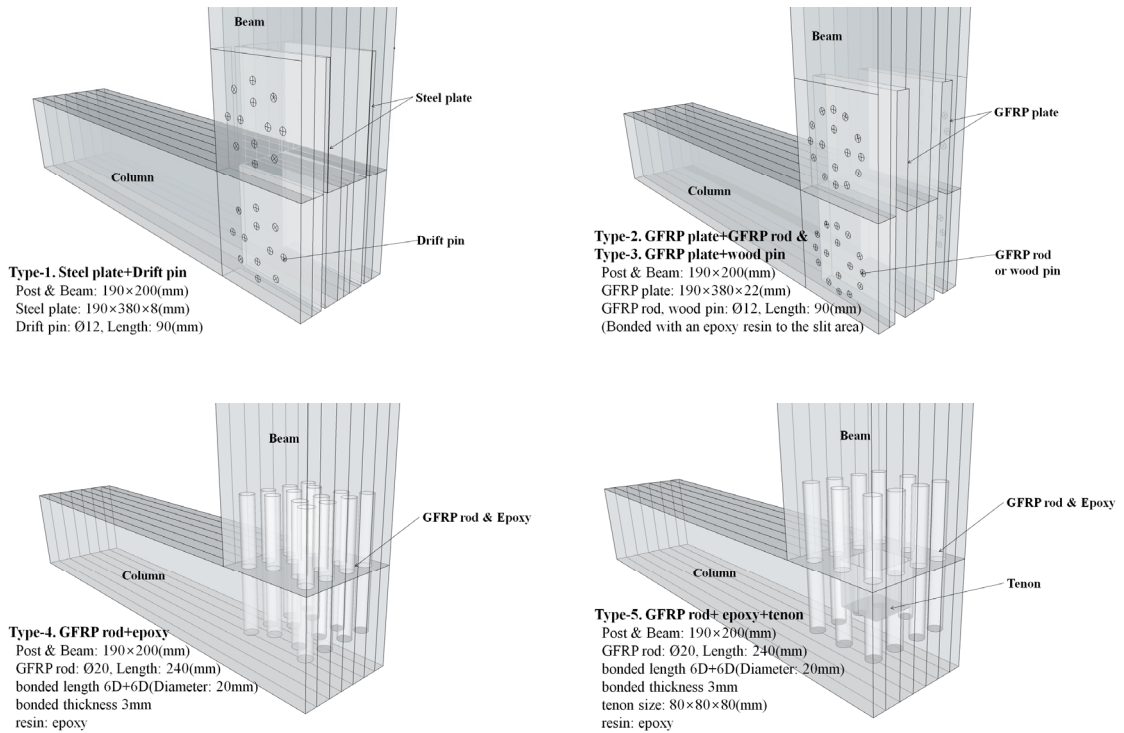


Fig. 2. Column-Beam Joints details of each specimen.

된 두께 1.3 mm의 GFRP (GFRP Textile-Seet)를 사용하였다. GFRP 보강적층판은 단판 5 ply 각층에 보강재를 삽입한 형태로 Fig. 1과 같다.

접합구는 슬릿 삽입형 접합부에 사용되는 직경 12 mm 드리프트 핀, GFRP rod, 목재(Eucalyptus marginata) 핀과 삽입 접착형 접합부에 사용되는 직경 20 mm GFRP rod (삽입 접착형: 에폭시 접착제)를 사용하였다.

2.2. 모멘트 저항 실험체

캔틸레버형 모멘트 저항 실험체는 훈데거 사의 K2i 1259 프리컷 가공기계를 이용하여 가공하였으며, 기둥의 치수는 190 × 200 × 1000 (mm), 보의 치수는 190 × 200 × 1100 (mm)이었다. 실험체는 접합 방법과 접합구 종류를 달리하여 5타입의 실험체를 제작하였다(Fig. 2). Type-1은 강판을 집성재 슬릿 부

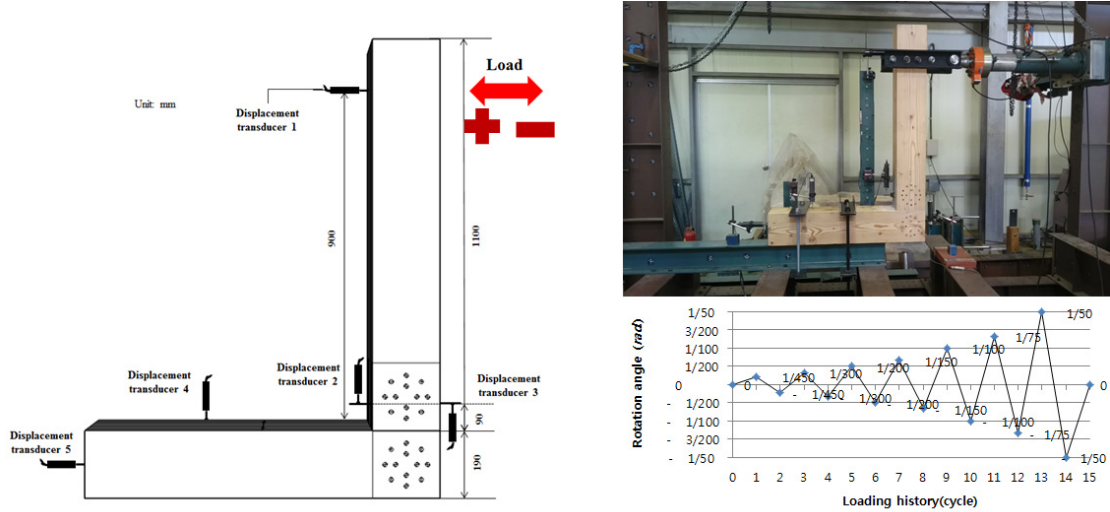


Fig. 3. Test set-up for moment resistance performance and Loading schedule.

위에 삽입하여 드리프트 핀으로 접합한 실험체로 2개의 강판과 드리프트 핀을 사용하여 양 면에서 접합하였다. 이때 강판의 크기는 $190 \times 380 \times 8$ (mm), 드리프트 핀의 직경 12 mm, 길이 90 mm이었다. Type-2와 Type-3은 GFRP 보강적층판을 집성재 부재의 슬릿 부위에 삽입하여 에폭시 수지로 접착 후 GFRP rod 또는 목재 핀으로 접합한 실험체로 2개의 GFRP 보강적층판과 GFRP rod 또는 목재 핀을 사용하여 양면에서 접합하였다. 접합구 삽입 전 GFRP 보강적층판과 기둥-보 접합을 위해 에폭시 수지를 도포하여 기둥 접합부 슬릿에 접착한 후, 보부재 접합을 위해 클램프를 이용하여 기둥과 보를 완전히 밀착 접합 하였다. 이때 GFRP 보강적층판의 크기는 $190 \times 380 \times 22$ (mm), GFRP rod와 목재 핀의 직경 12 mm, 길이 90 mm이었다. Type-4는 직경 20 mm GFRP rod와 에폭시 접착제를 사용하여 기둥과 보를 접착 접합한 실험체로 기둥재의 접선단면과 보부재의 횡단면에 접착층 두께 3 mm, 접착깊이 6D (120 mm)로 선공하고 GFRP rod를 삽입하였으며, 이때 GFRP rod에는 접착층 두께조절을 위한 Spacer를 부착하였다. 집성재 선공부와 GFRP rod의 간극에는 에폭시 접착제를 충전 시켰으며 보부재와 기둥재의

접합면 또한 에폭시 접착제를 도포하여 클램프를 이용해서 완전히 밀착 접합하였다. Type-5는 Type-4 실험체에서 장부 맞춤을 더한 실험체로 보부재 횡단면에 가로, 세로, 두께 80 mm의 숫장부를, 기둥재의 방사단면에 같은 크기의 장부 구멍을 파내어 접합하였다.

2.3. 모멘트 저항 시험방법

시험방법은 변형각이 $\pm 1/450, \pm 1/300, \pm 1/200, \pm 1/150, \pm 1/100, \pm 1/75, \pm 1/50$ rad. 순으로 정부 가력을 1회 실시 후 정방향으로 수평 가력하여 최대 하중의 80%까지 저하될 때까지 하중을 가력하거나, 변형각이 1/15 rad.을 초과할 때까지 수평 가력을 실시하여 시험을 종료하였다. 변위 측정은 Fig. 3과 같이 변위계 1은 하중이 가해지는 보부재의 반대편에서 수평변위(중국가력 방향을 정), 변위계 2,3은 보부재 접합부의 연직 변위, 변위계 4,5는 기둥재의 변형을 시험 후 보정하기 위해 설치하였다.

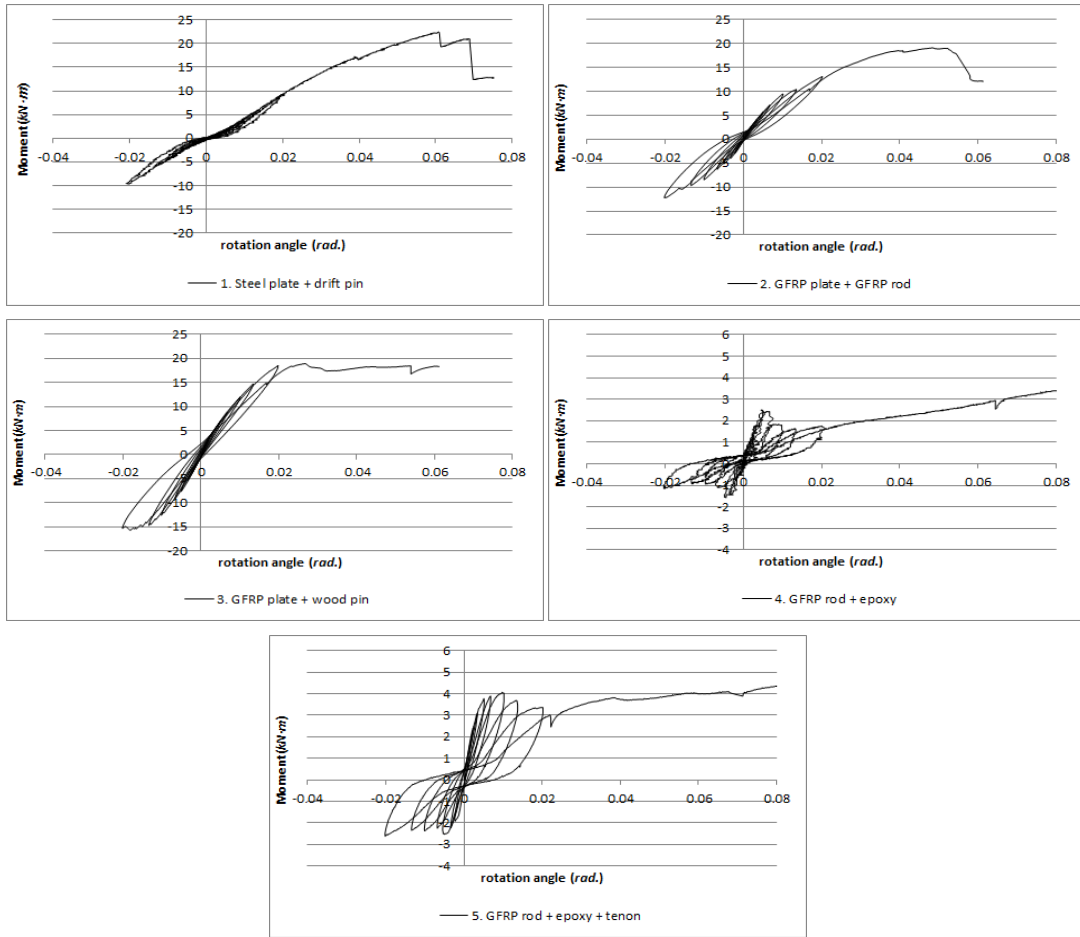


Fig. 4. Moment-Rotation angle curves.

3. 결과 및 고찰

3.1. 접합부의 모멘트-회전각 및 파괴형상

Fig. 4, 5에 각 접합부의 모멘트-회전각 곡선과 파괴형상을 나타내었다. 강판을 집성재 부재의 슬릿 부위에 삽입하여 드리프트 핀으로 접합한 모멘트 저항 실험체(Type-1)의 최대모멘트는 22.4 kN·m, 최대모멘트 시 변형각은 0.0609 rad.이었다. 사이클이 종료되는 변형각 0.02 rad. 범위까지는 거의 탄성에 가까운 거동을 보이고 0.04 rad. 부근에서부터 드리프트

핀의 전단내력으로부터 기동재 끝면방향으로 할렬이 발생하였다. 이후 보부재의 회전에 의해 기동재에 압입이 발생하였고, 드리프트 핀의 지압력이 발생하면서 기동재의 끝단면으로 취성파괴가 발생하며(Fig. 5-Type-1) 내력이 저하되었다.

GFRP 보강적층판을 집성재 부재의 슬릿 부위에 삽입하여 에폭시 수지로 접착 후 GFRP rod로 접합한 모멘트 저항 실험체(Type-2)의 최대 모멘트는 19.11 kN·m, 최대모멘트 시 변형각은 0.0484 rad.이었다. 그래프를 보면 Type-1과 달리 초기 미끄러짐이 발생하지 않은 것을 확인할 수 있다. 이는 결합

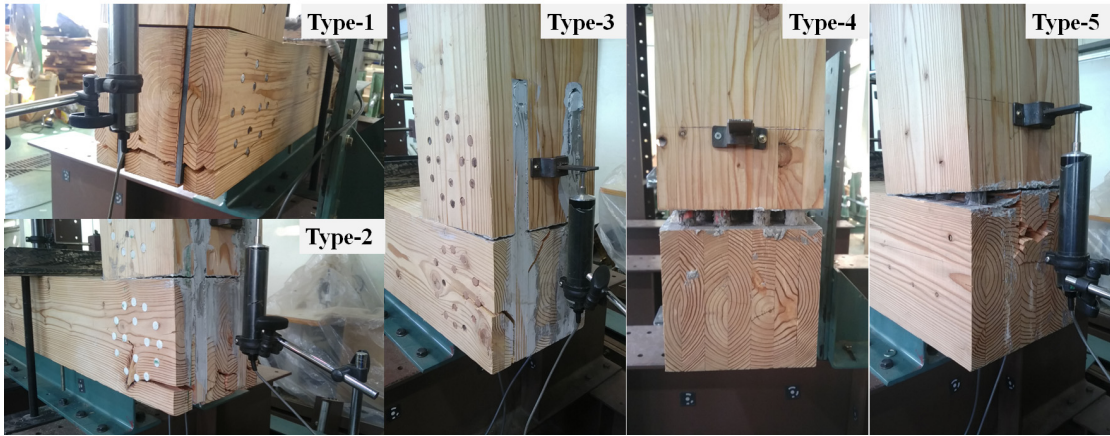


Fig. 5. The shape of each specimen failure.

철물을 이용한 접합방법과 달리 제작 공정 시 GFRP 보강적층판의 슬릿부 접착을 통해 부재의 일체화를 이룬 후 선공을 함으로써 선공 오차를 줄일 수 있었기 때문으로 생각된다. 변형각 0.02 rad. 범위까지는 탄성에 가까운 거동을 보였으며, 우선적으로 접합부 슬릿 내에서 접착층이 떨어졌다. 이후 GFRP rod의 지압력에 의해 기둥재 끝단면으로 취성파괴가 발생하며 내력이 저하되었다(Fig. 5-Type-2).

GFRP 보강적층판을 집성재 부재의 슬릿 부위에 삽입하여 에폭시 수지로 접착 후 목재 핀으로 접합한 모멘트 저항 실험체(Type-3)의 최대모멘트는 18.9 kN·m, 최대모멘트 시 변형각은 0.0269 rad.이었다. 파괴형상은 슬릿 내 GFRP 보강적층판과 집성재 사이에서 접착층 파괴가 우선적으로 발생하였으며, 기둥재에서 활렬파단이 발생하였다. 하지만 이는 Type-1, Type-2와 비교하여 핀에 의한 전단내력으로 부터의 압입 파괴로 보기 어렵고 GFRP 보강적층판과 집성재간의 접착면에 의한 파괴로 보여진다(Fig. 5-Type-3). 또한 최대모멘트 이후 모멘트의 급격한 저하가 발생하지 않고 변형이 증가되는 현상을 보였다.

GFRP rod로 접착 접합한 모멘트저항 실험체(Type-4)의 최대 모멘트는 측정하지 못하였으며, 시험이 종료되는 0.066 rad.를 초과할 때까지 모멘트 저항이 증가하였다. 이는 집성재와 GFRP rod간의 접착이 제대로 이루어지지 못하였음을 보여주며,

GFRP rod가 인발되는 형상을 보였다(Fig. 5-Type-4).

기둥-보 부재 장부 맞춤과 GFRP rod로 접착 접합한 모멘트저항 실험체(Type-5)의 최대모멘트는 5.1 kN·m, 최대모멘트 시 변형각은 0.1041 rad.이었다. Type-4 실험체와 같이 집성재와 GFRP rod 간의 접착이 제대로 이루어지지 못하였음을 확인하였으며, 보부재의 숫장부에 의해 기둥재 끝단면으로 취성파괴가 발생하였다(Fig. 5-Type-5). 모멘트 저항의 증가는 거의 장부에 의한 압축·전단력에 의한 것으로 판단된다.

3.2. 접합부의 모멘트 저항 성능평가

모멘트와 회전각의 관계로부터 완전탄소성 분석(Beak *et al.*, 2009)을 수행하여 M_y (항복모멘트), θ_y (항복회전각), R (회전강성), M_{max} (최대모멘트), θ_{max} (최대회전각), M_u (종국모멘트), θ_u (종국회전각), θ_v (완전탄소성 모델의 항복점 회전각), μ (소성률)을 산정하였으며, 산정 방법에 의거하여 평가한 실험결과를 Table 1에 나타내었다. Type-1 실험체의 실험결과 항복모멘트 10.37 kN·m, 최대모멘트 22.40 kN·m, 종국모멘트 17.59 kN·m, 회전강성 542.4 kN·m/rad., 소성률 2.03 등이 산출되었다. 최대모멘트가 가장 높게 측정되었으나 초기 미끄러짐

Table 1. Evaluation results of the joint

| specimen | Type-1 (steel plate + drift pin) | Type-2 (GFRP plate + GFRP rod) | Type-3 (GFRP plate + wood pin) | Type-4 (GFRP rod + epoxy) | Type-5 (GFRP rod + epoxy + tenon) |
|-----------------------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|---|
| M_y (kN · m) | 10.37 | 9.90 | 11.53 | - | 2.67 |
| θ_y (rad.) | 0.0191 | 0.0141 | 0.0136 | - | 0.0277 |
| R (kN · m/rad.) | 542.4 | 703.4 | 845.5 | - | 96.4 |
| M_{max} (kN · m) | 22.40 | 19.11 | 18.90 | - | 5.10 |
| θ_{max} (rad.) | 0.0609 | 0.0484 | 0.0269 | - | 0.1041 |
| M_u (kN · m) | 17.59 | 16.75 | 18.70 | - | 4.11 |
| θ_u (rad.) | 0.066 | 0.061 | 0.057 | - | 0.066 |
| θ_v (rad.) | 0.0325 | 0.0234 | 0.0223 | - | 0.0430 |
| μ | 2.03 | 2.62 | 2.58 | - | 1.53 |

이 있는 것을 확인할 수 있으며 이는 비교적 낮은 회전강성을 갖는 요인으로 작용하였다. Type-2 실험체는 항복모멘트 9.90 kN · m, 최대모멘트 19.11 kN · m, 종국모멘트 16.75 kN · m, 회전강성 703.4 kN · m/rad., 소성률 2.62 등이 산출되었다. 초기 미끄러짐 없이 모멘트가 직선적으로 상승한 것을 확인할 수 있다. Type-1 실험체와 비교하여 항복모멘트는 5%, 최대모멘트는 15% 낮게 측정되었으나, 회전강성은 30% 높게 측정되었다. 이는 GFRP 보강적층판의 두께가 두꺼워 집성재의 단면적 손실이 컸음에도 불구하고, 접착제 사용을 통해 부재의 일체화가 이루어졌기 때문이라 판단된다. Type-3 실험체는 항복모멘트 11.53 kN · m, 최대모멘트 18.90 kN · m, 종국모멘트 18.70 kN · m, 회전강성 845.5 kN · m/rad., 소성률 2.58 등이 산출되었다. Type-1 실험체와 비교하여 최대모멘트는 16% 낮게 측정되었으나, 회전강성은 56% 높게 측정되었다. 강성의 증가는 항복모멘트와 종국모멘트가 Type-1 실험체 보다 높게 측정되는 요인이 되었으며, 집성재와 같은 목질재료인 목재 핀을 사용하고 접착과 압체가 이루어짐으로써 부재의 일체화가 이루어졌기 때문이라 판단된다. Type-4 실험체는 집성재와 GFRP rod 간의 접착이 제대로 이루어지지 않아 GFRP rod만 인발되었고, 최대모멘트를 측정하지 못하여 다른 특성치 등을 산출할 수 없었다. Type-5 실험체도 마찬가지로

Type-4 실험체와 같이 집성재와 GFRP rod 간의 접착이 제대로 이루어지지 못하였음을 확인하였으며, 보부재의 숫장부에 의해 기동재 끝단면으로 취성파괴가 발생하였다. GFRP rod를 이용한 접착형 접합 구조의 경우 GFRP rod와 집성재 간의 접착력이 중요한 내력 기구이므로 이에 대한 추가적인 보안 방법 고안이 필요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 GFRP 보강적층판 및 GFRP rod를 이용한 낙엽송 집성재 기동-보 접합부의 가능성을 검토하기 위해, 모멘트저항 시험을 실시하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

기동-보 모멘트저항 시험편의 반복가력 시험을 통해 GFRP 보강적층판을 집성재 부재의 슬릿 부위에 삽입하여 에폭시 수지로 접착 후 목재 핀으로 접합한 모멘트 저항 실험체(Type-3)가 접합철물을 사용한 실험체(Type-1)와 비교하여 항복모멘트가 11%, 회전강성이 56% 높게 나타났다. GFRP 보강적층판 두께에 의해 집성재의 횡단면 단면적이 줄어들고, 드립트 핀보다 14배 이상 낮은 강도의 목재핀을 사용함에도 불구하고, 접착과 압체가 이루어짐으로써 접합내력이 상승하고 부재의 일체화가 이루어졌음을 확인하였다. 또한 집성재와 같은 목질재료의 접합부

재를 사용하여 일체화시킴으로서 접합구 압입에 의한 파괴 억제와 심미성 향상에 대한 가능성을 확인하였다. 추후 GFRP 보강적층판을 사용한 집성재 부재의 외측보강 및 정밀한 접착공정을 통한 부재의 일체화가 이루어질 수 있다면 접합성능이 더욱 증가 될 것으로 생각된다.

사 사

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

REFERENCES

- Beak, H.S., Imura, Y. 2009. Development of Moment Resisting Joints Using Threaded Steel Shaft and Drift Pin. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction* 25(8): 61-69.
- Hwang, K.H., Park, J.S., Park, M.J. 2007. Shear Performance of Post and Beam Construction by Pre-Cut Process. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 35(6): 1-12.
- Kasal, B., Heiduschke, A., Kadla, J., Haller, P. 2004. Laminated timber frames with composite fibre-reinforced connections. *Progress in Structural Engineering and Materials* 6(2): 84-93.
- Kasal, B., Pospisil, S., Jirovsky, I., Heiduschke, A., Drdacky, M., Haller, P. 2004. Seismic performance of laminated timber frames with fiber-reinforced joints. *Earthquake engineering & structural dynamics* 33(5): 633-646.
- Kim, S.C., Yang, I.S., Moon, Y.J. 2007. Experimental Study on the Behavior of Joints Consisting Structural Laminated Timber and H Section Steel under Cyclic Loading. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction* 23(2): 27-34.
- Kim, K.H., Song, Y.J., Hong, S.I. 2013. Shear Strength of Reinforced Glulam-bolt Connection by Glass Fiber Combination. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 41(1): 51-57.
- Larsen, H.J., Jensen, J.L. 2000. Influence of semi-rigidity of joints on the behaviour of timber structures. *Progress in Structural Engineering and Materials* 2(3): 267-277.
- Lee, I.H., Song, Y.J., Jung, H.J., Hong, S.I. 2015. Moment Resistance Performance Evaluation of Larch Glulam Joint Bonded in Glass Fiber Reinforced Plastic Rods. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 43(1): 60-67.
- 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: Engineering* 39(2): 249-257.
- Naoyuki, I., Wataru, K., Benitez, G.A. 2010. The development of the rigid frame wooden house structure jointed with glued-in hardwood dowels. In 11th World Conference on Timber Engineering 2010 Conference Proceedings Vol. 1, No. S 40.
- Pedersen, M. 2002. Dowel type timber connection. PhD Thesis, Technical University of Denmark.