

일방향 복합재료 하이브리드 조인트의 정적 및 피로특성에 관한 연구

김병철*, 임태성*, 박동창*, 이대길**

Study on the static and fatigue characteristics of the composite hybrid joint with uni-direction fiber orientation

Byung Chul Kim*, Tae Seong Lim*, Dong Chang Park* and Dai Gil Lee**

Abstract

For the bolted joint of the composite structure, quasi-isotropic stacking is generally used to increase the bearing strength. For the bolted joint of uni-directional composite, the fatigue life limit of the bolted joint can be improved by applying clamping force though the static strength is still very low. In this paper, the static and fatigue characteristics of hybrid joint are investigated which can overcome the disadvantage of the bolted joint of uni-directional composite under static loading by applying adhesive joining. The experimental result shows that the static strength and fatigue life can be improved by applying clamping force to the hybrid joint and the hybrid joint is a good solution for the efficiency of the composite structures.

Key Words: 접착조인트 (Adhesive joint), 볼트조인트 (Bolted joint), 하이브리드 조인트 (Hybrid joint)

1. 서 론

복합재료는 금속에 비해 높은 비강성, 비강도를 가지며 감쇠 및 충격특성이 우수하여 경량 구조물을 제작하는데 중요한 재료이다[1]. 그러나, 복합재료로 제작된 대형 구조물의 효율성은 복합재료 부재 자체보다는 체결부에 의해 결정되므로 각 부재간의 접합부의 설계는 매우 중요하다. 복합재료 구조물의 체결부는 기계적 체결방법과 접착에 의한 체결방법이 주로 사용되고 있다. 이 중에서도 기계적 체결방법은 접착에 비해 작업절차가 간단하며, 별도의 경화공정이 필요없다는 장점을 가지고 있어 다양한 분야에 사용되고 있으며 연구가 활발히 진행되고 있다 [2].

기계적 체결부의 파손강도는 복합재료 부재의 적층각에 영향을 받는다. 일방향 적층이 많을수록 파손모드는 전단파손(Shear Failure)에 가깝고, 준등방성에 가깝게 적층할수록 베어링 파손(Bearing Failure)이 유발되며, 베어링 강도(Bearing Strength)가 전단 강도보다 훨씬 우수한 것으로 알려져 있다 [3]. 그러나, 일방향 복합재료의 경우 정적강도는 훨씬 낮지만 체결부에 적절한 체결력을 부여하면 준등방성의 경우와 비슷한 피로한계 수명을 가질 수 있다. 따라서, 일방향 복합재료 체결부의 피로특성을 그대로 유지하면서 정적강도를 향상시킬 수 있는 조인트를 설계한다면 부재 및 전체 구조물의 효율성과 생산성의 측면에서 상당한 이점을 가질 수 있다.

본 연구에서는 일방향 복합재료의 기계적 체결부에 접착제를 적용함으로써 정적강도를 개선시키고 우수한 피로특성을 가지는 하이브리드 조인트의 정적 및 피로특성을 실험에 의해 규명하였

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과 교수

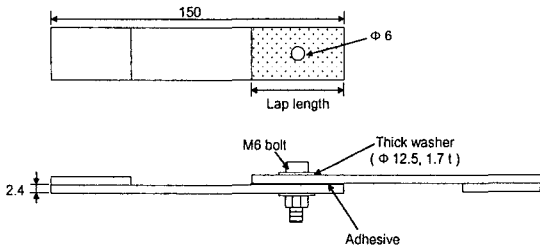


Fig. 1 Dimension of Test Specimen

다.

2. 시편 및 실험장비

2.1 시편 제작

하이브리드 조인트 시편은 단일겹치기 형상 (Single-Lap)이며 제원은 Fig. 1과 같다. 일방향 복합재료 적층판은 대부분 일방향 유리섬유 에폭시 복합재료 (UGN 150, SK Chemical, Korea)이고 외면에 시편제조시나 구조물의 제작시 발생하는 섬유 박리를 막기 위하여 직조 유리섬유 에폭시 복합재료 (GEP, SK Chemical, Korea)를 사용하였으며 $[GEP_2/O_8]_s$ 로 적층하였다. 오토클레이브 (Autoclave)를 이용하여 복합재료 적층판을 성형한 후 시편크기에 맞게 절단한 후 볼트 체결을 위한 구멍을 텅스텐 카바이드 드릴날을 이용하여 겹침면적의 정중앙부에 가공하였다. 접착될 면적은 사포 (#120)를 이용하여 표면처리를 수행하였으며 접착제를 고르게 도포하고 볼트를 체결한 후 다시 오토클레이브에서 80°C에서 2시간동안 경화시켰다. 토크렌치를 이용하여 체결력을 균일하게 부여하였으며 윤활제를 바른 후 체결하였다. 접착제는 3M사의 Scotch-Weld 2216 B/A Gray를 사용하였고, 볼트는 M6규격을 사용하였으며 사용된 와서는 내경 6.3 mm, 외경 12.5 mm, 두께 1.5 mm인 것을 사용하였다. 경화가 완료된 후 흘러나온 접착제는 접착층 끝단에 걸리는 응력을 완화시켜주는 역할을 하나 실험의 일관성을 위해 칼로 제거하였다. 하이브리드 조인트와의 비교실험을 위한 볼트조인트는 Fig. 1에서 겹치기 면적은 같으며 접착제만 제거한 형태이고, 접착조인트도 겹치기 면적은 같고 구멍을 가공하지 않은 상태에서 접착두께를 0.1 mm로 조절하여 제조하였다.

Table 1 Experimental variables for static test

	Lap length	30	40	50
Joint type				
Adhesive only				
Bolted (finger tighten)				
Bolted (clamping pressure)				
Hybrid (finger tighten)				
Hybrid (clamping pressure)				

2.2 시험장치

하이브리드 조인트의 정적강도 실험을 위해 INSTRON 4469를 이용하였으며, 하중속도 0.5 mm/min로 실험하였다. 하이브리드 조인트의 피로강도 실험을 위해서 INSTRON 8801를 이용하였으며, 인장피로하중을 10 Hz로 가하여 피로수명을 기록하였다.

3. 정적 및 피로특성

3.1 정적 파괴 모드

Fig. 2는 본 실험에서 사용된 일방향 복합재료 하이브리드 조인트의 정적파괴모드를 보여준다. 하중을 받은 조인트의 겹침부는 좌굴을 일으키고 구멍에 의한 응력집중과 복합재료 끝단에 발생하는 필 응력 (Peel stress)은 접착제의 파괴를 유발시킨다. 이후 일방향 복합재료의 전단파괴와 표면 GEP층의 섬유방향 크랙이 일어나고, GEP층의 섬유파단이 일어나면서 최종파손에 도달한다.

3.2 하이브리드 조인트의 정적특성

하이브리드 조인트의 정적특성을 비교과확하기 위해 5가지 체결방법에 대해 3가지 겹침길이에 따라 정적실험을 수행하였으며 실험변수는 Table.1에 정리된 바와 같다.

Fig.3는 겹침길이가 40 mm일때의 조인트 타입에 따른 정적실험 결과이다. 볼트조인트의 경우 이미 알려진 바와 같이 체결력이 존재할 경우 정적강도가 증가함을 알 수 있다 [4]. 그러나 복합재료는 대부분 일방향으로 적층되었으므로 접착

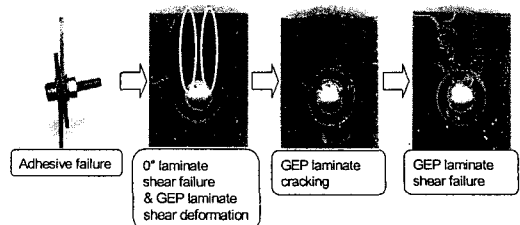


Fig.2 Static failure mode of the hybrid joint

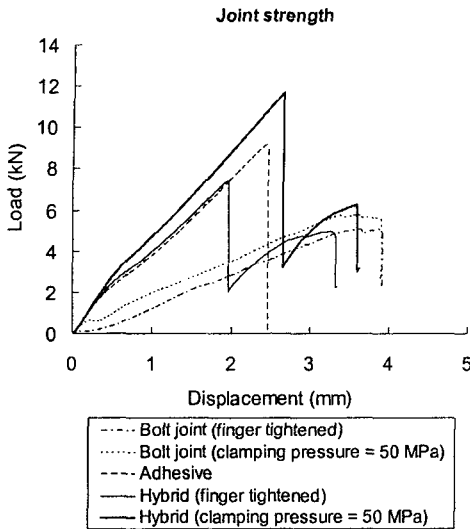


Fig. 3 Static strength comparison (Lap length = 40 mm)

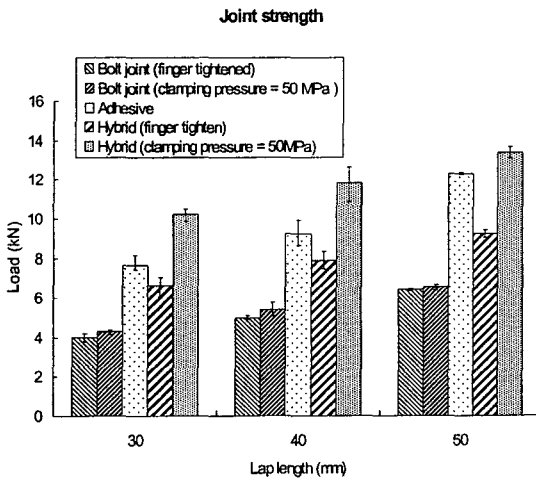


Fig. 4 Static strength w.r.t. lap length

조인트의 정적강도보다 현저히 낮았다. 볼트조인트에 접착제를 적용한 하이브리드 조인트의 경우, Fig. 3에 나타난 바와 같이 접착층 파괴시 최대 강도를 보이며 이후 볼트조인트의 전단파손 (Shear failure)에 의한 하중지지가 가능했다. 접착제의 영향으로 최대 강도에 이를 때까지 하중은 거의 선형적으로 증가하지만 접착층이 파괴된 후에는 복합재료의 전단파손이 진행되면서 비선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 하이브리드 조인트의 최대강도는 접착강도에 의존하므로 볼트 조인트의 베어링파손 (Bearing failure)를 유도하기

위한 준등방성 (Quasi-Isotropic)적층은 무의미하며, 오히려 부재강성을 떨어뜨리고 생산성을 저하시킬 것으로 사료된다. 또한, 체결력이 존재할 경우 정적강도가 증가하고 볼트조인트의 경우보다도 강도향상효과가 크게 나타났으며, 접착조인트보다도 높은 강도를 보였다. 반면 손조임 (Finger tightened)한 하이브리드 조인트의 정적강도는 접착조인트보다도 낮게 나타났다. 이는 구멍에 의한 복합재료와 접착층에 응력집중이 유발되었고, 겹침면적의 중앙부가 구속되면서 복합재료 끝단의 필 응력 (Peel stress)이 유발되어 강도가 저하되는 것으로 사료된다. 이때 체결력이 존재하면 접착제가 받는 응력을 분산시키고 복합재료와 와셔간의 마찰력으로 인해 볼트로 하중전달이 가능하므로 정적강도가 증가하는 것으로 사료된다.

Fig. 4는 겹침길이에 따른 정적강도를 나타낸다. 겹침길이가 증가함에 따라 정적강도는 증가하는 경향을 보였다. 또한 손조임한 하이브리드 조인트의 강도는 접착조인트보다 저하되나, 체결력이 존재할 때 크게 증가하여 손조임에 비해서 약 50%의 강도향상을 보였다. 체결력이 존재하는 하이브리드 조인트의 정적강도는 접착조인트에 비해 10~30%정도 증가하는 경향을 보였으며 겹침길이가 증가하면서 강도향상 폭이 감소하는 경향을 보였다. 따라서 하이브리드 조인트를 이용하면 겹침길이가 적을수록 강도향상효과가 크고 접착조인트보다 겹침길이를 줄여도 같은 정적강도를 얻을 수 있다는 점에서, 복합재료가 절약되고 경량볼트나 리벳을 이용하면 경량화의 효과까지 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

3.4 피로 파괴 모드

피로하중을 받는 하이브리드 조인트의 파괴모드는 정적시험의 경우와 같이 접착층 파괴가 먼저 발생하고, 이후 볼트구멍부가 하중방향으로 확장되면서 전단파손 (Shear failure)이 진행되었다. Fig. 5는 접착층 파괴가 일어난 후 전단파손이 진행되는 양상을 보여준다.



Fig. 5 Fatigue failure mode of hybrid joint

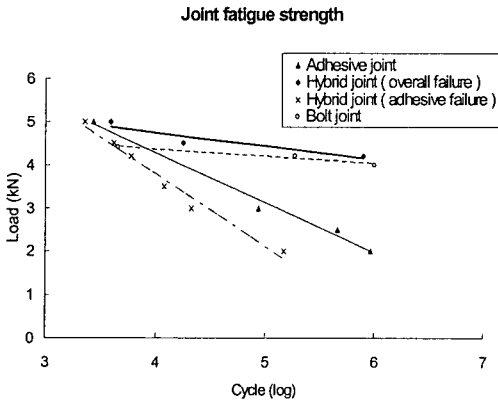


Fig. 6 S-N curve of hybrid joint and bolt joint with clamping force and adhesive joint

3.4 하이브리드 조인트의 피로특성

하이브리드 조인트의 피로강도를 평가하고 볼트조인트 및 접착조인트와 그 특성을 비교하였다. 손조임한 조인트의 경우 정적강도가 체결력을 가한 경우보다 낮으므로 접침길이가 40 mm일 경우에 대해 체결력이 존재하는 하이브리드 조인트, 볼트조인트와 접착조인트에 대해서만 실험하였다. 하중은 10 Hz의 인장피로응력을 가하였다.

Fig. 6은 각 조인트에 대한 피로수명선도이다. 하이브리드 조인트의 접착층 파괴는 접착조인트의 피로수명보다 조기에 발생했으며 하중수준이 낮아질수록 차이가 크게 나타났다. 이는 구멍에 의해 접착층에 응력집중이 유발된 것에 기인한 것으로 사료된다. 기존 논문에서도 접착조인트에 구멍이 가공되었을 때 피로수명이 저하되며, 하중수준이 높을 때는 수명차이가 적으나, 낮아질수록 차이가 증가하는 것으로 보고된 바 있다 [5]. 접착조인트는 체결력이 존재하는 볼트조인트의 경우보다 하중이 증가함에 따라 피로수명의 저하가 큰 것으로 나타났다. 반면, 체결력이 가해진 볼트조인트는 정적하중의 70%이상의 하중에서도 10^6 사이클 이상의 피로수명을 보이며, 같은 하중에서 접착조인트보다 월등한 피로수명을 보였다. 결론적으로 피로하중을 받는 하이브리드 조인트에서 정적강도와 같은 접착제접합과 볼트 체결의 중첩된 효과를 기대하기는 어렵고 접착층 파괴는 접착조인트보다 조기에 발생되지만, 접착층이 파괴된 후 체결력이 가해진 볼트가 하중을 지지할 수 있어 높은 피로파괴수명을 가질 수 있으므로 볼트조인트 및 접착조인트 보다 유리하다

고 볼 수 있다.

5. 결론

1. 하이브리드 조인트의 정적강도는 체결력을 가할 경우 손조임보다 50%가량 증가하는 보강효과를 보였으며, 접착조인트보다 10~30%정도 향상되었다.

2. 체결력이 존재하는 하이브리드 조인트의 피로수명은 접착층 파괴시점이 접착조인트보다 빠르나, 접착층 파괴 이후에도 체결력이 가해진 볼트가 하중을 지지할 수 있어 높은 피로수명을 가질 수 있었다.

3. 일방향 복합재료의 기계적 체결은 전단파손 (Shear failure)으로 인한 낮은 정적강도가 문제이다. 이때, 하이브리드 조인트를 이용하면 높은 정적강도를 만족시킬 수 있고, 볼트조인트의 피로특성을 그대로 유지할 수 있는 이점이 있다.

참고문헌

- [1] D.G. Lee and N.P. Suh, *Axiomatic Design and Fabrication of Composite Structures*, Oxford University press, 2004
- [2] Reinhart, T.J. and et al., *Composites-Engineered Materials Handbook Vol. 1*, 1987, ASM International, pp. 665-728
- [3] Matthews, F.L., *Joining Fibre-Reinforced Plastics*, Elsevier Applied Science, 1987
- [4] Je Hoon Oh, Young Goo Kim & Dai Gil Lee, *Optimum bolted joints for hybrid composite materials*, Composite Structures, 1997, vol. 38, no. 1-4, pp. 329-342
- [5] Maofeng Fu, P.K. Mallick, *Fatigue of hybrid (adhesive/bolted) joints in SRIM composites*, International Journal of Adhesion & Adhesives, 2001, vol. 21, pp. 145-159