

# Al Sheet/CFRP 다적층 하이브리드 복합재료의 굴곡강도에 미치는 카본섬유 체적률 및 배열방향 영향

유 재 환

대원과학대학

(2004. 7. 23. 접수 / 2004. 11. 8. 채택)

## The Influence of Volume Fraction and Fiber Orientation of CFRP Layer on Flexural Properties of Al7075/CFRP Multi-Layered Hybrid Laminate Material

Jae-hwan Yoo

Daewon Science College

(Received July 23, 2004 / Accepted November 8, 2004)

**Abstract :** The Al7075/CFRP multi-layered hybrid laminate material consists of the alternating Al7075-T6 sheets and carbon/epoxy prepregs of M40 grade. The influence of volume fraction and fiber orientation of Al7075/CFRP layer on flexural properties of Al7075/CFRP laminate alternating Al7075-T6 and carbon/epoxy prepreg was investigated. The results obtained from the experimental analysis are as follows:

1. In the  $0^\circ$  fiber orientation, the amount of increase of the flexural rigidity was 20.5% at the 26.5% volume fraction and 38.0% at the 35.7% volume fraction compared with the flexural rigidity level(20.0GPa) of the 10% volume fraction of CFRP. 2. In the  $\pm 45^\circ$  fiber orientation, the amount of decrease of the flexural rigidity was 23.5% at the 20.0% volume fraction and 31.5% at the 33.3% volume fraction compared with the flexural rigidity level of the 10% volume fraction of CFRP. 3. In the  $0^\circ$  fiber orientation, the flexural strength was 481.5MPa at the 10% volume fraction of CFRP and 583.8MPa at the 26.5% volume fraction and 653.7MPa at the 35.7% volume fraction. 4. In the  $\pm 45^\circ$  fiber orientation, the flexural strength was 354.0MPa at the 20.0% volume fraction of CFRP and 340.5MPa at the 33.3% volume fraction.

**Key Words :** multi-layered hybrid laminate, volume fraction, fiber orientation, carbon/epoxy prepreg, CFRP, Al7075/CFRP laminate, flexural rigidity, flexural strength

### 1. 서 론

각각의 구조용 재료가 가지는 특성을 상호 보완하기 위하여 이종재료를 접합, 응용할 수 있는 새로운 개념의 재료인 하이브리드 복합재료(hybrid composite material)에 대한 연구가 활발하다<sup>1-3)</sup>.

이종재료가 접합된 하이브리드 복합재료의 기계적 물성은 하이브리드 복합재료가 가지고 있는 접합구조에 크게 의존하는 것으로 알려져 있으며, 접합구조에 따른 실험 결과는 매우 다양하게 보고되고 있다<sup>4,5)</sup>. 하이브리드 복합재료 중에서 프리프레

그(prepreg)를 사용하여 제조한것을 복합재료는 일반적으로 적층 하이브리드 복합재료로 호칭하는데 이것은 2 종류 이상의 강화재료를 적층하여 접합한 형태이다.

그리고 적층 하이브리드 복합재료는 강화재료의 종류에 따라 composite/composite의 형태와 composite/metal의 형태로 대별된다<sup>6-12)</sup>. 이 연구에서는 composite/metal 형태인 Al7075/CFRP 하이브리드 복합재료에서 CFRP 체적률(volume ratio) 및 탄소섬유 배열방향(fiber orientation)을 달리한 패널(panel)을 동시성형공정으로 제작하고, 제작된 패널로부터 인장시험편 및 굴곡시험편을 채취하였다<sup>12)</sup>. 인장시험과 굴곡시험을 통하여<sup>12,13)</sup> 굴곡강도와 인장 및 굴곡파

괴 기구를 검토하여, 하이브리드 복합재료의 강도에 미치는 CFRP 체적률 및 탄소섬유 배열방향에 따른 영향을 실험적으로 검토하였다.

## 2. 실험 및 고찰

### 2.1. 하이브리드 복합재료 패널 제작

본 실험에서 사용된 금속인 Al7075-T6 재료는 두께 0.9mm의 박판으로 Al 클래딩(Al cladding) 표면처리를 거친 Alclad사 제품을 사용하였다. Al7075-T6를 샌딩(sanding)처리하고 샌드 블라스팅(sand blasting)처리함으로써 접합면적을 최대로 하였고, 표면의 이물질을 제거한 후 composite인 탄소섬유/에폭시 프리프레그와 동시성형(co-cure) 공정으로 하였다. 여기서 탄소강화섬유 프리프레그는 Toray사 M40급인 탄소섬유가 함침된 제품이다.

Al7075-T6재와 탄소섬유/에폭시 프리프레그 적층의 설계단계에서 금속 재료와 composite 재료의 계면에서 발생하는 전식현상의 방지와 이종재료 사이에 급격한 탄성계수 완화를 목적으로 전달재료를 고려하였다. 전달재료는 GFRP 제품의 표면재료로 사용되는 분류번호 #120, 유리섬유/에폭시 프리프레그를 선택하여 사용하였고, 침착한 유리섬유/에폭시 프리프레그는 시험편의 전 조건에 대하여 동일량이 투입되었다.

하이브리드 복합재료의 성형조건은 에폭시 수지 시스템의 성형조건과 동일하므로 카본섬유/에폭시 라미네이팅 제조공정의 오토클래빙 공법으로 다적층형태의 패널을 제조하였다. 오토클래브 성형과정에서의 승온속도를 1.5°C/min으로 제어하여 성형온도 127°C 및 오토클래브 압력 3.4GPa에 도달하게 하여 90분간 유지하였다. 냉각속도는 3°C/min로 제어하였고, 오토클래브 온도가 50°C일 때 오토클래브의 압력을 대기압으로 하여 냉각과정에서 발생하는 하이브리드 복합재료의 변형이 없도록 하였다.

### 2.2. CFRP 체적률 및 탄소섬유의 배열방향

다적층 형태의 패널인 성형된 하이브리드 복합재료는 0°의 방향(UD)만 가지는 탄소섬유/에폭시 프리프레그를 0.9mm 두께를 가진 Al7075-T6 재료 압연방향과 일치하는 방향으로 반복 적층시켜 성형시킨 것이다. CFRP 체적률 조건을 달리하기 위해서 탄소섬유/에폭시 프리프레그를 1겹, 3겹, 5겹으로 변화시켜 적층함으로써 상이한 탄소섬유 체적률을 나타

내게 하였다. 그리고 CFRP의 탄소섬유 배열방향의 조건을 달리하기 위해서 Al7075-T6 재료 압연방향에 ±45°의 방향으로 탄소섬유/에폭시 프리프레그를 1겹, 2겹 및 3겹으로 변화시켜 상이한 탄소섬유 배열방향을 나타내게 하였다.

0°의 탄소섬유 배열방향을 가지는 하이브리드 복합재료에 대한 CFRP 체적률은 각각 10.00%, 26.53% 및 35.71%로 나타났으며, 45°의 방향을 가지는 하이브리드 복합재료에 대한 CFRP 체적률은 각각 20.00%, 33.33% 및 42.86%로 나타났다. 또한 A1C(0°)A1C(±45°)A5C(0°)A재는 12.2%로 나타났다.

그리고 하이브리드 복합재료에서 1겹의 탄소섬유/에폭시 프리프레그가 적층될 때마다 약 0.125mm의 두께상승이 있으므로, 탄소섬유/에폭시 프리프레그를 0°의 방향으로 1겹을 Al7075-T6재료 사이에 적층한 A1C(0°)A1C(0°)A1C(0°)A재의 하이브리드 복합재료에서 1겹의 탄소섬유/에폭시 프리프레그에 의한 체적률은 약 3.13%로 평가되었다.

### 2.3. 인장 파괴기구

Al7075/CFRP 하이브리드 복합재료에 인장하중이 작용되면 취성이 강한 CFRP층에서의 층간분리 및 Al7075재와 CFRP재의 탄성변형을 차이에 의한 경계면의 경계박리(Fig. 1의 A부)가 발생한 후, 상대적으로 탄성변형율이 높은 CFRP층에서 최초 균열(C부)의 발생, 성장의 과정을 거쳐 CFRP층이 파단(B부)된 이후 Al7075층에서의 급속한 파단이 발생하는 양상을 보였다. 즉, Al7075/CFRP 하이브리드 복합재료는 1 단계에서 CFRP재와 Al7075재의 계면박리, 2 단계에서 CFRP층의 층간분리, 3 단계에서 CFRP층의 파단, 최종적으로 Al7075재의 파단으로 이어짐을 알 수 있었다.

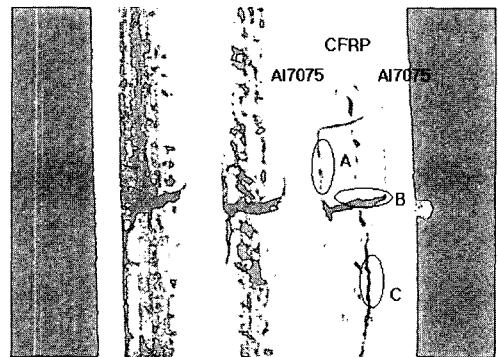


Fig. 1. Failure procedure by tensile loading.

즉, 하이브리드 복합재료에 인장하중이 부하되면 1 단계에서 CFRP재와 Al7075-T6재의 디분리, 2 단계에서 CFRP층의 층간분리, 3 단계에서 CFRP층의 파단, 최종적으로 Al7075-T6재의 파단으로 이어짐을 알 수 있었다.

하이브리드 복합재료의 파단면 형상을 거시적으로 관찰하면, CFRP 체적률이 적은 A1C(0°)A1C(0°)A1C(0°)A재에서는 Al7075-T6재와 CFRP재 사이의 계면박리가 1차 발생한 후, CFRP층의 급격한 층간분리 후 CFRP재와 Al7075-T6재의 완전한 계면박리와 동시에 Al7075-T6재의 급속한 파단으로 관측되었으나, 상대적으로 CFRP 체적률이 높은 A5C(0°)A5C(0°)A5C(0°)A재는 Al7075-T6재와 CFRP재 사이의 계면박리가 1차 발생한 후 1개 CFRP층의 층간분리로 시작하여 전체의 CFRP층에 대한 층간분리가 이루어진 후 CFRP재와 Al7075-T6재의 완전한 계면박리의 과정을 거쳐 최종적으로 Al7075-T6재의 파단으로 이어졌다.

따라서, 하이브리드 복합재료의 기계적 물성을 향상시키는 방안은 Al7075-T6재와 CFRP층의 계면박리를 억제하는 조건인 CFRP층의 체적률을 감소시키는 공정의 개발이 선행되어야 하고, CFRP의 층간분리를 억제하는 조건인 CFRP재의 기지조적인 에폭시 레진 함량을 최소화시켜 CFRP층에서의 탄소섬유 체적률을 증가시키는 공정의 개발이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

#### 2.4. CFRP 체적률 및 배열방향이 굴곡강성 계수에 미치는 영향

0°의 방향으로 1점의 카본섬유/에폭시 프리프레그가 적층된 경우의 굴곡강성계수는 20.0GPa으로 평가되었으며, Al7075/CFRP 다적층 하이브리드 복합재료의 기준치로 사용하였다. 따라서 1점의 카본섬유/에폭시 프리프레그가 적층된 경우의 굴곡강성계수치 20.0GPa을 기준으로 할 경우, 0°의 방향으로 3점의 카본섬유/에폭시 프리프레그가 적층된 경우의 굴곡강성계수는 24.1GPa으로 평가되어 하이브리드 효과가 있는 것으로 결론지을 수 있으며, 1점을 기준으로 20.5%의 상승효과를 나타내었다.

따라서 이 연구의 주된 목적이 곡면성형성을 갖는 Al 재료 개발이고, 곡면형상을 갖는 부재는 주로 굴곡하중을 받으므로 Al7075/CFRP 하이브리드 복합재료에서 Fig. 2의 결과는 중요한 의미가 있다. 즉, Al7075/CFRP 하이브리드 복합재료를 구성할 때

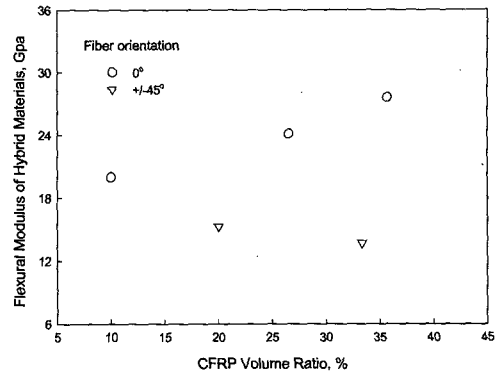


Fig. 2. Behavior of flexural modulus on various CFRP volume ratio in Al7075/CFRP hybrid materials

구조물의 응력해석을 통하여 주 하중방향에 일치하게 0°의 방향으로 탄소섬유 프리프레그를 적층하면 설계목적에 부합하는 구조물을 구성할 수 있다는 결과를 얻은 것이다.

0°의 방향으로 5점의 카본섬유/에폭시 프리프레그가 적층된 경우의 굴곡강성계수는 27.6GPa으로 평가되어 38.0%의 상승효과가 있었다. 이러한 결과는 하이브리드 복합재료에서 CFRP 체적률을 증가시키면 종탄성계수는 감소하는 경향이 있었으나 굴곡강성계수의 경우는 증가하는 경향을 나타낸 것이고, 설계과정에서 요구하는 굴곡강성계수를 만족시킬 수 있는 CFRP 체적률을 결정할 수 있다.

±45°의 방향으로 1점의 카본섬유/에폭시 프리프레그를 반복 적층한 하이브리드 복합재료의 경우, 굴곡강성계수는 15.3GPa으로 평가되어, 0° 방향으로 1점의 카본섬유/에폭시 프리프레그가 적층된 경우의 굴곡강성계수치 20.0GPa을 기준치로 비교하면 23.5%가 감소한 것으로 평가할 수 있다. 재료가 굴곡하중을 받으면 재료의 상피는 압축응력, 하피는 인장응력을 받게되고 따라서 이종재료가 접합된 하이브리드 복합재료의 굴곡강성계수는 방향성을 가지고 있는 CFRP에 의존하는 결과로 볼 수 있다. 즉, 방향성을 가지지 않는 Al 재료는 굴곡강성계수의 변화에 영향을 미치지 못하므로 하이브리드 복합재료의 굴곡강성계수는 방향성을 가지고 있는 CFRP에 의존한다고 할 수 있다.

그리고 ±45°의 방향으로 2점의 카본섬유/에폭시 프리프레그를 적층한 경우, 굴곡강성계수는 13.7GPa으로 평가되어, 0° 방향으로 1점의 카본섬유/에폭시 프리프레그가 적층된 경우를 기준치로 비교하면 31.5%가 감소되었다. ±45°의 방향으로 카본섬유/에

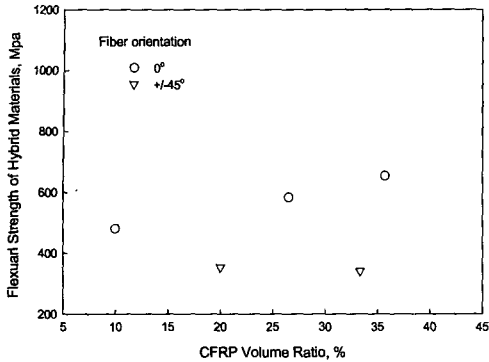


Fig. 3. Behavior of flexural strength on the effects of various CFRP volume ratio in Al7075/CFRP hybrid material

폭시 프리프레그를 적층하는 경우에는 CFRP 체적률의 증가와 더불어 굴곡강성계수는 감소하는 경향을 보인 것이다.

따라서 하이브리드 복합재료의 CFRP 체적률 및 탄소섬유 배열방향이 굴곡탄성계수에 미치는 영향에 대한 실험의 결과를 평가하였을 때, 0°의 탄소섬유 배열방향을 가진 경우에는 하이브리드화의 효과를 보이고 있으나, ±45°의 배열방향을 가진 경우에는 하이브리드화의 효과를 볼 수 없는 결과로 평가되었다.

### 2.5. CFRP 체적률 및 배열방향이 굴곡강도에 미치는 영향

하이브리드 복합재료에 굴곡하중이 작용되면, 굴곡강도는 굴곡강도가 상대적으로 높은 CFRP 체적률에 의존하게 되며, 굴곡강도 크기는 Al7075-T6재보다 높고 CFRP보다 낮은 범위 내에 존재하는 것으로 추산할 수 있다.

그리고, Al7075/CFRP 하이브리드 복합재료에서 CFRP 체적률이 재료의 굴곡강도를 결정짓는 요인임을 알 수 있다. 즉 굴곡강도의 단위가 재료의 단위면적당 부하되는 하중으로 정의되는 점을 감안하면, Al7075/CFRP 하이브리드 복합재료는 일정한 두께를 가지는 Al 재료에서 CFRP 두께를 변수로 하므로 CFRP 체적률이 재료 물성을 결정하는 요인이 된다.

0°의 방향으로 1겹의 탄소섬유/에폭시 프리프레그가 적층된 하이브리드 복합재료의 굴곡강도는 481.5MPa로 평가되었다. 3겹 및 5겹인 경우, 각각 583.8MPa, 653.7MPa의 실험 결과치를 보여, 1겹의 탄소섬유/에폭시 프리프레그가 접합된 경우와 비교

하면 21.2%, 35.8%로 CFRP 체적률이 증가할수록 굴곡강도도 증가되었다.

따라서, 하이브리드 복합재료에서 CFRP 체적률이 재료의 굴곡강도를 결정짓는 요인임을 알 수 있다. 즉 굴곡강도의 단위가 재료의 단위면적당 부하되는 하중으로 정의되는 점을 감안하면, 하이브리드 복합재료는 일정한 두께를 가지는 Al7075-T6재에서 CFRP 체적률을 변수로 하므로 CFRP 체적률이 하이브리드 복합재료의 물성을 결정하는 요인이 된다.

±45°의 방향으로 1겹의 탄소섬유/에폭시 프리프레그를 적층한 경우, 굴곡강도는 354.0MPa, 2겹에서는 340.5MPa의 결과를 보였다. ±45° 방향의 CFRP 물성이 0°보다 낮은 일반적 경향을 따르고 있으며, ±45° 방향에서는 CFRP 체적률이 증가할수록 굴곡강도는 저하되는 경향이 있었다. 이러한 결과는 ±45° 방향의 CFRP 물성이 Al7075-T6재 물성보다 상대적으로 낮기 때문에 나타난 결과로 보여진다. 따라서 ±45° 방향에서는 CFRP 체적률이 증가할수록 굴곡강도는 저하되는 경향을 실제 응용설계시 중요한 자료로 활용할 수 있을 것이다.

인장실험에서 나타나는 것으로 알려진 하중의 제 1피크 발생, 응력저하, 재상승, 제 2피크발생, 응력저하, 재상승의 반복현상이 0°의 방향으로 탄소섬유/에폭시 프리프레그가 적층된 하이브리드 복합재료의 굴곡시험에서 관찰되었으며, ±45° 방향에서는 완만하게 관찰되었다. 이것은 CFRP 체적률의 비가 감소할수록 하이브리드 복합재료의 굴곡강도를 저하시키는 원인으로 작용되는 층간분리의 현상이 상대적으로 빠르게 나타났다고 평가할 수 있다.

하이브리드 복합재료의 파손과정에서 상피는 압축, 하피는 인장에 의하여 발생함을 확인하여 하이브리드 복합재료의 설계시, 하피부분에 0° 방향으로 탄소섬유/에폭시 프리프레그를 부가 적층하는 공정이 필요하였다. 이러한 실험의 결과는 최적의 적층조건을 제시할 수 있는 설계자료가 될 수 있고, 하이브리드 복합재료에서 하이브리드 효과는 CFRP 체적률을 최적화한 적층조건에서만 기대할 수 있으므로 하이브리드 복합재료의 적층설계시 최적의 CFRP 체적률을 결정하여 응용하여야 하는 기초자료로 활용할 수 있다.

### 3. 결론

- 1) Al7075/CFRP 하이브리드 복합재료의 인장강

도를 Al7075-T6재의 인장강도와 비교하면, 0°의 방향으로 CFRP가 적층된 경우에는 CFRP 체적률 10% 이하인 적층조건에서만 Al7075-T6재의 기계적 물성치보다 높은 하이브리드 효과를 기대할 수가 있는 것으로 나타났다. 그리고 ±45°의 방향으로 CFRP가 접합된 경우는 전 실험영역에 걸쳐 하이브리드화의 목적을 만족시키는 결과로 나타났다.

2. 0°의 방향으로 1겹의 탄소섬유/에폭시 프리프레그가 적층된 경우의 굴곡강성계수치 20.0GPa을 기준으로 할 경우, 겹수의 증가와 더불어 굴곡강성계수치의 상승효과가 있었다. 이러한 결과는 하이브리드 복합재료에서 CFRP 체적률을 증가시키면 종탄성계수는 감소하는 실험경향과 상반되는 결과이다. 그러나 ±45° 방향으로 CFRP가 적층된 경우에는 굴곡강성계수치가 감소하는 결과를 보였다.

3. 0°의 방향으로 적층된 CFRP 체적률이 증가할수록 굴곡강도도 증가되었다. 그러나 ±45°의 방향으로 CFRP가 접합된 경우에는 CFRP 체적률이 증가할수록 굴곡강도는 저하되는 경향을 보였다.

감사의 글 : 본 논문은 2001년도 세명대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 수행된 연구임.

### 참고문헌

- 1) J. C. McMillian, "Bonded Joints and Preparation for Bonding", NATOAGARD Lecture Series 102, 3, #7, p. 150, 1979.
- 2) D. H. Middleton, "Composite Materials in Aircraft Structure - The Involvement of the United States Aircraft Structure Industry in the Development of Advanced Composite Materials", Longman Scientific & Technical, John Wiley Inc., New York, pp. 273~288, 1990.
- 3) R. Marrison, "Flight Simulation Behavior Aramid Reinforced Aluminium Laminate (ARALL)", Eng. Fracture Mechanics, 19, pp. 261~277, 1984.
- 4) R. Marrison, "Fatigue Mechanism in ARALL - A Fatigue Resistant Hybrid Aluminium Aramid Composite Material", Fatigue, 87, Proc. 3rd Int. Cont. on Fatigue Threshold, Vol. 3, EMAS LTD, Warley, U.K, pp. 1271~1279, 1987.
- 5) H. K. Yoon, "The Effect of Bridging on Fatigue Crack Growth Behavior in Aramid Patched Aluminium Alloy (APAL)", J. of KSME, Vol. 8, No. 4, pp. 375~384, 1994.
- 6) G. L. Roderick, "Debond Propagation in Composite Reinforced Metals", NASA TMX-71948, 1974.
- 7) I. C. Taig, "Design Concepts for the Use of Composite in Airframes", British Aircraft Co., 1975.
- 8) S. Oken, "Analytical and experimental Investigation of Aircraft Metal Structures Reinforced with Filamentary Composites", NASA CR-1859, 1971.
- 9) C. T. Lin, "Fatigue Behaviour of Carbon Fiber Reinforced Aluminium Laminates", Composites, Vol. 22, pp. 135~141, 1991.
- 10) D. L. Davidson, "Fatigue Crack Growth through ARALL-4 at Ambient Temperature", Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., Vol. 14, No. 10, pp. 939~951, 1991.
- 11) F. A. Sandow, "Composite Repair of Cracked Aluminium Alloy Aircraft Structure", AFWAL-TR-87-3072, 1987.
- 12) Kyung-Bong Lee, "The effect of CFRP volume fraction and carbon fiber orientation on tensile/flexural properties in Al/CFRP laminate", Journal of the KIIS, Vol. 16, No. 5, 13~16, 2001.
- 13) Kyung-Bong Lee, "A study on mechanical and fatigue characteristics in a fiber-reinforced metal laminates of Al/CFRP", Journal of KIIS, Vol. 14, No. 5, pp. 11~15, 1999.