

항공기 주익용 하이브리드 복합재의 섬유배향각과 층간분리 성장과의 관계

송삼홍(고려대 기계공학과), 김철웅(고려대 공학기술연구소),
김태수*, 황진우(고려대 대학원 기계공학과)

The Relationship between Fiber Stacking Angle and Delamination Growth of the Hybrid Composite Material on an Aircraft Main Wing

S. H. Song(Mechanical Eng. Dept., Korea Univ.), C. W. Kim(Research Institute of Eng & Tech. Korea Univ.),
T. S. Kim*, J. W. Hwang (Mechanical. Eng. Dept. Graduate School Korea Univ.)

ABSTRACT

The main object of this study was evaluated by the delamination damage for fiber stacking angle. Therefore, this work need to compare the shape of delamination for a different fiber stacking angle. So this study uses a method of fatigue test which was created $[0]_2, [+45]_2, [90]_2$. The extension of the delamination zone formed between aluminium alloy and glass fiber-adhesive layer were measured by an ultrasonic C-scan image. As a result, the shapes of delamination zone don't depend upon the crack propagation. We could know that the delamination zone grew interaction between stress flow of fiber layer and crack driving force. Hence, the existing study were applied to the stress transfer, fiber bridging effect, delamination growth rate should need to the develop useful factor because of change of fiber stacking angle.

Key Words : Hybrid Composite Material (하이브리드 복합재료), Delamination(층간분리), Fiber Stacking Angle(섬유배향각), Bridging Stress Distribution (가교응력분포), Delamination Growth Rate(층간분리성장률), Fiber Bridging Effect(섬유가교효과), Crack Driving Force(균열진전력)

1. 서론

하이브리드 복합재료 중에서 Al/GFRP 적층재는 단일 재 알루미늄에 비해 피로특성, 비강도, 비강성 등이 매우 우수하여 항공기 주익 구조에 주로 적용된다. 그러나 Al/GFRP 적층재가 장시간에 걸쳐 비행 하중을 받게 되면 다양한 형태의 파손이 발생할 수 있다⁽¹⁾. 이 중 알루미늄층과 섬유층 사이에서 발생하는 층간분리는 하이브리드 복합재료의 대표적인 피로파손 형태이며, 현재 다방면으로 연구되고 있다. 예를 들어, Marissen⁽²⁾은 피로균열 성장률과 층간분리 성장이 상호 의존적임을 증명하였고, Guo⁽³⁾는 층간분리 형상을 삼각형 또는 타원형태로 규정하고, 이에 따른 가교응력의 분포를 평가하였다. 또한 Toi⁽⁴⁾는 섬유가교효과가 사이클 및 균열길이 모두에 의존적임을 증명하였다. 그러나 이들의 연구는 하중방향과 섬유층의 방향을 평행하게 제작한

것으로 국한 되었다. 그러나 실제로 항공기 주익 접합부는 다양한 형태의 하중을 받기 때문에 섬유배향각 변화를 통한 연구는 Al/GFRP 적층재의 우수한 피로 특성을 얻기 위하여 필수적이다. 따라서 알루미늄 층의 균열 및 적층재 사이에서 발생하는 층간분리의 섬유배향각에 따른 비교평가가 요구된다. 이를 위하여 본 연구에서는 섬유배향각을 변화시켜 $[Al/0_2/Al]$, $[Al/+45_2/Al]$, $[Al/90_2/Al]$ 의 형태로 제작한 뒤 피로시험을 하였다. 그리고 섬유배향각의 변화에 독립적인 층간분리 형상의 평가방법을 위한 기초 자료를 수집하고, 각각의 섬유배향각에 따른 층간분리의 거동을 Scan 이미지를 통하여 비교 분석하였다. 이에 따른 세부적인 연구내용은 다음과 같다. 1) 섬유배향에 따른 균열길이 및 층간분리 면적과 피로수명의 관계, 2) 섬유배향각이 균열진전에 미치는 영향, 3) 섬유배향에 따라 변화하는 층간 층간분리의 거동이다.

2. Al/GFRP 적층재 제작 및 실험방법

2.1 Al/GFRP 적층재 제작

Al/GFRP 적층재는 Al5052 판재와 유리섬유(s-glass) 프리프레그를 2/1의 형태로 적층하였다. 이 때 선 처리로 Al5052의 접착 면을 크롬 산 아노다이징(chromic acid anodizing) 처리하였다. Al/GFRP 적층재에 이용된 프리프레그는 Fig. 1(a)에 제시한 바와 같이 0°, 45°, 90°의 섬유배향각으로 Al 층과 적층하였다. 사용된 유리섬유의 기계적 특성은 Table 1과 같고 Al5052의 기계적 특성은 Table 2와 같다. 적층된 시험편은 핫-프레스를 이용하여 경화하였다. 프리프레그 수지계의 DSC 측정 결과 후 가열 과정을 채택하여 화학적으로 더욱 안정된 시험편을 얻을 수 있었다.

2.2 시험편의 형상

Fig. 1(b)는 본 연구의 반복-굽힘 모멘트 시험에 사용된 Al/GFRP 적층재의 형상과 치수이다. 휠 커터를 이용하여 시험편의 중앙 끝단에 노치(a=10mm)를 가공하고, 시험편의 물림부는 10.5mm의 지름으로 드릴링 하였다. 적층재 중 프리프레그의 두께가 0.5mm, 2플라이(ply)이고, 알루미늄 판재의 두께가 0.5mm, 상하 2장이므로 시험편의 총 두께는 2.0mm이다.

2.3 피로시험 방법

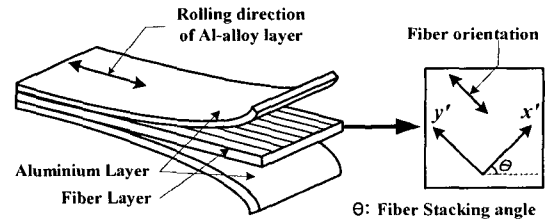
피로시험은 굽힘 및 비틀림 피로시험기를 이용하였다. 최대모멘트는 98N-m이며, 회전 수는 2000 RPM, 33Hz이다. 하중은 반복굽힘 모멘트 M=4.9N-m를 가하였고, 시험편에 균일한 하중이 부가 되도록 R=-1로 적용하였다. 피로균열은 접안 이동 측미계를 이용하여 100배율에서 측정하였으며 증간분리파손은 Scan 기법을 이용하여 해당 사이클의 이미지를 얻었다.

Table 1 Mechanical properties of S-glass fiber

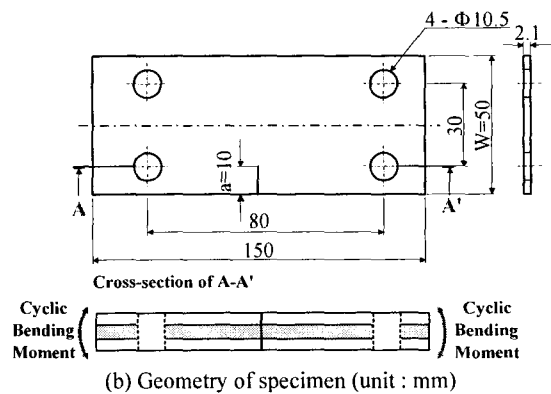
Fiber type	Ultimate tensile strength (Mpa)	Tensile modulus (Gpa)	Tensile strain to failure (%)	Density (g/cm)
S-glass	4600	86	5.3	2.55

Table 2 Mechanical properties of Al5052

Alloy	Tensile strength (Mpa)	Yielding strength (0.2% offset)	Thickness (mm)
S-glass	4600	86	



(a) Schematic of a Al/GFRP laminate and Fiber stacking angle



(b) Geometry of specimen (unit : mm)

Fig. 1 Fiber stacking angle and geometry of specimen

3. 섬유배향각에 따른 피로거동

3.1 섬유배향각에 따른 균열길이와 피로수명의 관계

Al/GFRP 적층재는 반복하중을 받게 되면 섬유가교 효과로 인하여 단일재 알루미늄에 비해 피로수명이 약 10배 이상 향상된다고 보고된 바 있다. 이 중 섬유가교 효과를 발생시키는 섬유층의 배향각이 변화하게 되면 Fig. 2와 같이 피로수명의 변화가 생긴다. 섬유배향각이 0°인 경우는 사이클에 따라 일정한 균열진전 양상을 보이며 가장 안정되고 우수한 피로수명을 나타냈다. 반면 45°의 섬유배향각 일 때는 0°에 비해 약 2배 가량의 빠른 균열진전이 일어났다. 이는 섬유배향각이 45°가 되면서 섬유에 의한 응력전달이 균열을 중심으로 대칭적으로 발생하지 못하고 섬유의 방향과 균열이 전파하는 방향이 일치하는 쪽에서만 발생하였기 때문이다. 또한 Fig. 3에 제시된 것처럼 증간분리면적(A_B) 역시 0°인 경우에 비해 약 1/2배 정도 낮게 나타났다. 이것은 후에 설명한 증간분리 형상과도 관계가 깊다. 섬유배향각이 90°인 경우는 Al/GFRP 복합재료 중 가장 낮은 피로수명을 갖는다. 초기 1×10⁵ cycle까지는 기지를 통한 응력분배가 이루어지다가 기지의 파괴에 따라 증간분리면적의 증가로

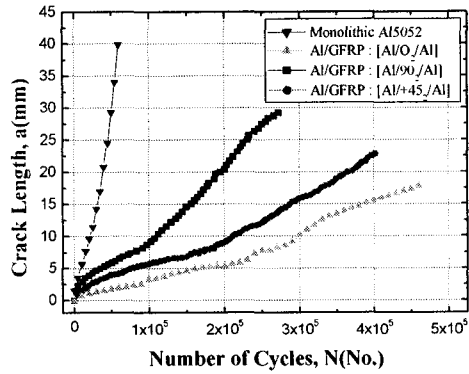


Fig. 2 Influence of the fiber stacking angle on the Fatigue life in Al/GFRP laminate under cyclic bending moment at 4.9N-m

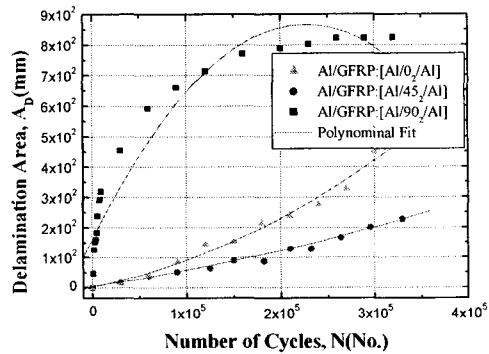


Fig. 3 Delamination area growth as a fiber stacking angle under cyclic bending moment at 4.9N-m

균열은 세 경우 중 가장 빨리 성장하게 되며, 이후 층간분리가 더 이상 증가하지 않게 되면 균열은 일정속도로 빠르게 전파하게 된다. 이것은 하중의 방향에 섬유가 수직하게 배향되면서 응력분담을 원활히 수행하지 못했기 때문이다. 이상에서 본 균열의 전파 및 층간분리의 성장은 섬유배향각에 따른 층간의 응력과 섬유층의 응력전달에 밀접한 관계가 있을 것으로 판단된다.

3.2 섬유배향각이 균열진전에 미치는 영향

섬유층은 알루미늄층의 응력을 섬유의 방향으로 가교시켜주는 역할을 한다. 따라서 섬유배향각이 변화하게 되면 층간의 응력과 섬유의 응력 전달 기구가 변화하게 되며, 이것이 결과 적으로 알루미늄층의 균열진전에 영향을 주게 된다. 알루미늄에 대한 섬유배향각이 0°와 90°인 경우 균열은 하중에 수직한 방향으로 진전된다. 0°의 경우 섬유층에

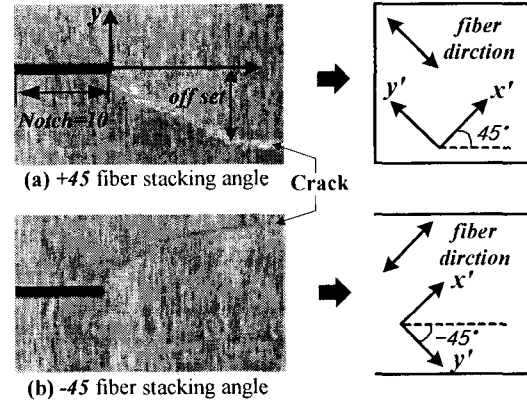


Fig. 4 Changing a crack propagation path as a fiber stacking angle

의한 응력의 분포가 균열을 기준으로 좌우 대칭이 되기 때문이다. 90° 또한 균열진전 방향과 섬유층의 응력전달 방향이 동일하기 때문에 같은 균열진전 양상을 갖는다. 반면 +45°의 섬유배향각의 경우 알루미늄층의 균열은 섬유의 방향에 영향을 받게 된다. (Fig. 4) 균열발생 초기에는 섬유층과 알루미늄층 사이에 45° 방향으로 확실한 응력 전달이 이루어지기 때문에 균열이 섬유방향에 영향을 받는다. 그러나 하중을 받음에 따라 접합 층 사이에 층간분리가 발생하게 되고 섬유에 의한 응력전달이 감소하면서 균열이 점차 하중과 수직한 방향으로 전파한다. 마찬가지로 -45°의 섬유배향각인 경우는 균열진전방향과 응력전달 방향이 일치하는 쪽이 좌표상 제 2 상한 이기 때문에 Fig. 4(b) 형태의 균열전파 경로를 갖는다. 하지만 섬유층에 비해 알루미늄층이 상당히 두꺼워 지거나 얇아지게 되었을 때 두께와 같은 균열전파경로를 갖는지는 차후 보충된 실험을 통한 확인이 필요하다.

3.3 섬유배향각에 따른 층간분리 거동

층간분리 파손의 형상은 섬유배향각에 따라 다양한 형태로 발생하게 된다. Fig. 5(a)에 제시된 것처럼 섬유층에 의한 응력 전달은 Y'방향으로 일어난다. 이에 따라 층간분리는 Y' 방향으로 성장하게 되며, 알루미늄층에 발생하는 균열에 의존하여 X'방향으로 증가한다. 그러나 (c)의 경우는 하중을 받은 초기에 X'방향으로 기지의 파괴가 급속히 발생하며, 이 경로를 따라 Al 층의 균열이 전파한다. 이것은 섬유가 하중방향에 수직하게 배향되어 가교효과를 전혀 발생시키지 못했기 때문이며, 재료의 수명을 현저히 감소시키게 된다. 다음 (b)와 같이 적층배향이 +45°인 경우는 (a)와 (c)의 중간 형태의 층간분리 거동을 나타낸다. 이 경우 역시 최초

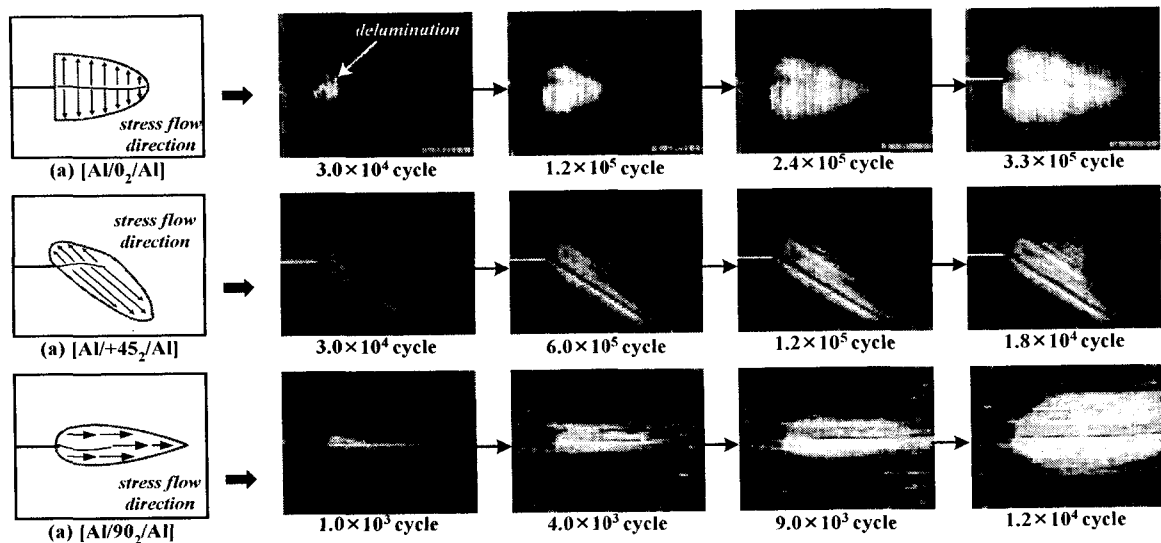


Fig. 5 Scan image of the delamination zone as a fiber stacking angle

하중을 받을 때 Notch 선단에서 Y'방향으로 기지의 파괴가 발생한 후 이를 따라 층간분리가 증가한다. 또한 알루미늄 층에 균열이 발생하면서 균열에 의존적으로 층간분리가 X 방향으로 확장하게 된다. 그러나 (a) 경우와는 달리 층간분리는 음의 Y' 방향으로 진전되지 않는다. 이것은 전 절에서 설명한 섬유배향에 의해 균열이 영향을 받은 것과 같은 현상으로 이해 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 섬유배향각이 90° 인 경우가 피로수명이 가장 짧다. 그 이유는 하중의 방향과 섬유층의 응력 전달 방향이 수직하기 때문에 섬유에 의한 섬유가 교효과가 발생하지 못했기 때문이다. 45° 인 경우는 0° 에 비해 약 50%정도 저하된 비로 수명을 갖는다. 이것은 섬유의 방향과 균열의 진전방향이 상호작용을 일으키는 방향으로만 응력전달이 발생했기 때문이며, 층간분리 파손 면적 또한 0° 에 비해 50%가 된다.

(2) 0° 와 90° 의 섬유배향각의 경우 섬유의 방향이 하중의 방향과 수직하거나 일치하기 때문에 균열은 항상 하중방향에 수직하게 발생하게 된다. 반면 ±45° 인 경우는 섬유의 방향, 즉 응력전달 방향에 영향을 받아 균열전파 경로가 변화하게 되며, 이 영향은 층간분리가 성장하면서 감소한다.

(3) 0° 의 경우 층간분리 형상은 응력전달 방향과 균열진전 방향에 의존하여 삼각형 또는 타원 형태로 성장 하게 된다. 그러나 45° 와 90° 의 경우는 균열진전과 일치하는 층간분리 성장 거동을 보

이 않았다. 층간분리 파손은 섬유배향각에 따른 응력전달방향과 균열 진전력의 상호작용에 의해 발생한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 : R01-2001-000-00395-0) 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Zhi-He Jin and Yiu-wing Mai, 1997, "Residual Strength of an ARALL Laminate Containing a Crack," *Journal of Composite Material*, Vol. 31, No. 8 pp.746~761
2. Marissen, R., 1988, "Fatigue Crack Growth in ARALL ; Crack Growth Mechanism and Quantitative Prediction of the Crack Growth Rates," Ph. D. Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands.
3. Ya-Jun Guo, Xue-Ren Wu, 1999, "Bridging stress distribution in center-cracked fiber reinforced metal laminates" *Engineering Fracture Mechanics*, Vol 63, pp. 147~163
4. Toi Y., 1995, "An Experimental Crack Growth Model for Fiber/metal Laminates," *Proceedings of the Eighteen Symposium of ICAF, Melbourne, Australia*, pp. 899~909