

GLARE 의 섬유층 배향이 피로층간분리 거동에 미치는 영향

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

Influences of Fiber Laminate Orientation on the Behavior of Fatigue Delamination in GLARE

Jin-Woo Hwang ((Mech. Eng., Graduate school, Korea Univ.), Sam-Hong Song (Mech. Eng., Korea Univ.),
Cheol-Woong Kim (Research Institute of Eng. & Tech., Korea Univ.)

ABSTRACT

The behavior of fatigue delamination in a GLARE(Glass Fiber Reinforced Metal Laminates) under fatigue loading conditions investigated. The behavior of fatigue delamination was examined basing on investigation of the crack and delamination using a SAM (Scanning Acoustic Microscope). The crack and delamination behavior on the relationship among a-N, SAM images and crack length-delamination length were considered. The test results indicated the features of different fatigue delamination and crack growth according to each fiber orientation angle and also obtained to more increase delamination than crack through the relationship between crack length and delamination length in GLARE.

Key Words : Glass Fiber Reinforced Metal Laminates (유리섬유강화 금속적층재, 이하 GLARE), Fatigue Delamination (피로층간분리), Fiber Orientation Angle (섬유배향각), Crack length (균열길이, a), Delamination length (층간분리길이, Del.length)

1. 서론

유리섬유강화 금속적층재(이하, GLARE)는 항공기 구조용 복합재료로 주로 이용되고 있다. 항공기는 복잡한 형상의 부품결합으로 인해 다양한 노치가 존재한다. 이때 노치주위는 하중방향에 의해 국부적인 응력집중현상이 발생하고, 노치부분에서는 균열발생과 함께 금속층과 섬유층의 접촉면이 분리되는 피로층간분리가 발생한다. 피로층간분리는 금속층에서 섬유층으로의 응력전달을 저해하며 하중형태에 따라 진전형태가 달라진다. 이는 구조물의 피로수명 감소뿐만 아니라 급격한 파괴도 야기시킬 수 있다. 섬유배향에 대한 피로층간분리는 하중방향에 큰영향을 받는다. Marissen⁽¹⁾은 단순(인장-인장 또는 인장-압축)반복하중

하에서 층간분리영역은 반타원의 형상을 나타낸다고 보고한 바 있다. 송과 김⁽²⁾은 GLARE를 이용한 반복-굽힘 모멘트 시험에서 균열길이와 층간분리의 관계가 항상 균열선단으로부터 층간분리가 발생하는 경향을 보여줬다. 윤등은 피로균열성장 거동과 지연에 대해 균열과 층간분리를 비파괴검사법을 이용해서 설명한 바있다⁽³⁾. 그러나 본 연구에서 층간분리형상이 섬유적층배향의 영향에 따라 각기 다른 양상을 보였고 SAM(Scanning Acoustic Microscope)촬영을 통해 균열과 피로층간분리 거동이 다르게 일어남을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 단순-인장 피로하중하에서 섬유층 배향각이 균열과 피로층간분리에 미치는 영향에 대해 다음과 같은 세부연구를 하였다. 첫째, 섬유배향각에 따른 균열진전과 피

Table 1 Chemical compositions of Al5052

Composition	Fe	Mg	Si	Cu	Mn	Cr	Zn
wt %	0.40	2.60	0.25	0.10	0.10	0.25	0.10

Table 2 Mechanical properties of S-glass fiber

Fiber type	Ultimate tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Tensile strain to failure (%)	Density (g/cm ³)
S-glass	4600	86	5.3	2.55

로사이클과의 관계. 물재, SAM을 이용한 섬유 배향각과 피로충간분리 거동의 관계. 셋째, 충간분리길이(Del._{length})와 균열길이(a)의 관계 등이다.

2. 제작 및 실험방법

2.1 시험편 형상

Fig. 2(a)는 피로균열진전 시험에 사용된 Al/GFRP 적층재 시험편의 형상이다. 휠커터를 이용하여 시험편의 중앙부에 예비균열(a=10mm)을 만들었다. 프리프레그의 두께는 0.13mm, 10 플라이(ply)이고 알루미늄 판재의 두께가 0.5mm, 상하 2 장이다. 총 두께는 핫-프레스의 압축에 의해 2.0mm 이다. 시험편의 섬유적층방향은 Fig. 2(b)와 같다.

2.2 실험방법

본 실험에 사용된 실험기기는 전기유압식 압축피로 시험기인 MTS 이다. 피로시험은 응력비 0.1 과 20Hz 의 Sine 파형을 갖는 일정진폭, 최대응력 크기가 36MPa 의 인장-인장상태의 피로하중하에서 수행되었다. 충간분리는 SAM 촬영을 통하여 균열의 진전에 따른 충간분리 영역의 형상과 면적, 섬유의 상태 및 파단 여부등을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 섬유배향각에 따른 균열진전과 피로사이클과의 관계

Al/GFRP 적층재는 알루미늄층과 섬유층사이

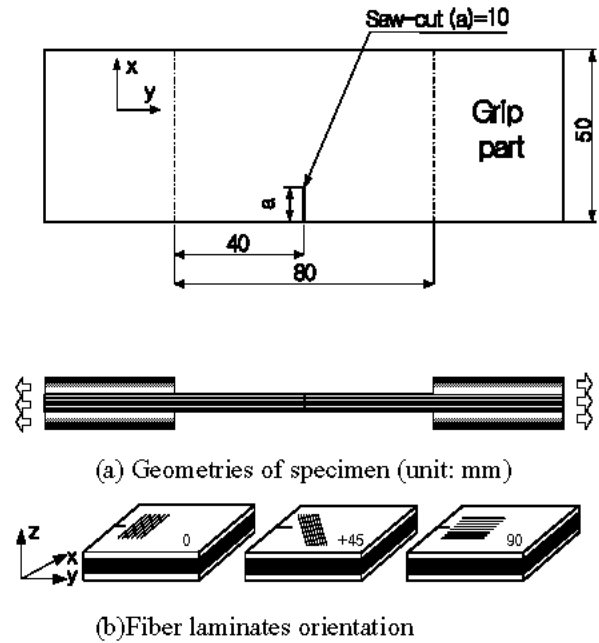


Fig. 2 Geometries of Al/GFRP laminate

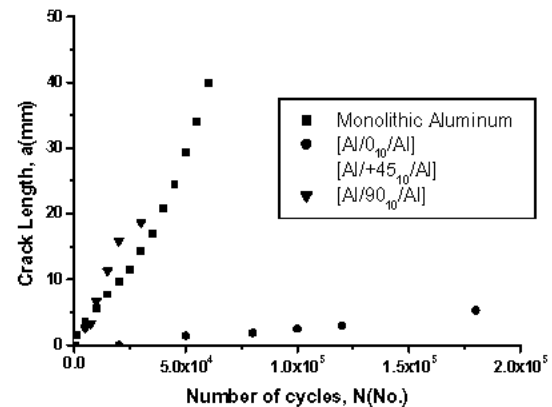


Fig. 3 Relationship between Crack length and cycles

의 결합강성도, 계면에 작용하는 충간전단강도의 크기, 섬유가교효과가 주된 원인에 의해 균열이 진전한다. Fig. 3 은 단일재 알루미늄과 GLARE 의 섬유배향에 대한 a-N 관계를 보여준다. 하중방향과 수평인 0 도 섬유배향은 사이클의 증가에 따른 균열진전이 전형적인 결과와 같았다. 이는 알루미늄층에서 섬유층으로의 응력전달이 부하초기부터 끝까지 용이하게 이루어졌기 때문이다. 이는 송과 김⁽⁴⁾의 연구내용과 유사한 경향을 보였다. 반면에 0 도를 제외한 섬유배향의 사이클 증가에 따른 균열진전은 단일재 알루미늄과 같은 변화를 보였다. 하중방향과 수직인 90 도 섬유배향은 단일

재 알루미늄보다 더 빠른 균열진전을 보였다. 45 도섬유배향은 균열진전이 일정하게 나가다가 어느 순간에 급격히 빨라졌다. 이는 반복 굽힘 하중 에서의 균열진전거동보다 더 섬유 배향의 차이에 따른 섬유가교효과를 보여주는 결과라고 보여진다. 즉 인장-인장 하중하에서 사이클의 증가에 따른 균열진전이 섬유배향에 민감하게 영향을 받는다고 판단된다.

3.2 SAM 을 이용한 섬유배향각과 피로층간분리 거동의 관계

본 연구에서 피로균열진전실험 과정 중 균열이 전파하는 형태와 피로층간분리가 진전하는 형태를 조사한 결과, Fig. 4 에서 처럼 균열과 피로층간분리진전은 섬유배향각에 따라 각기 다른 양상을 보여줬다. Fig. 4(a)는 층간분리영역이 타원형의 모양으로 발생, 성장하였다. 이는 Marissen⁽¹⁾이 단순(인장-인장 또는 인장-압축)반복하중 하에서 층간분리영역의 형상은 반타원의 형상을 나타낸다고 보고한 것과 같은 양상을 보여줬다. 반면에 Fig. 4(b)에선 균열진전이 섬유배향영향 때문에 층간분리를 따라 균열이 진전하였다. 이는 층간분리가 섬유배향에 의존하여 진전됨에 따라 하중집중이 균열선단 윗부분에 많이 집중되는 경향을 보였다. Fig. 4(c)에서는 섬유배향이 하중방향과 수직인 관계로 균열진전 감소에 거의 영향을 주지 못하였다. 그 이유는 균열진전과 함께 라미나의 분리가 발생하였기 때문이다. 균열과 피로층간분리는 섬유배향에 따라 양상들이 각각 달랐으며 단지 층간분리영역을 고려하여 본다면 피로층간분리가 크게 존재하는 적층재에서는 균열이 빠르게 성장하지 않았다. 이는 층간분리영역이 균열진전에 대해 섬유가교 작용을 하였다고 보여진다.

3.3 층간분리길이(Del_{length})와 균열길이(a)의 관계

섬유배향각에 따른 층간분리 거동을 고찰하는데엔 여러가지 방법이 있다. 송과 김⁽⁴⁾은 층간영역의 면적을 이용하여 층간분리 거동을 관찰하였다. Wang, S. S.⁽⁵⁾은 층간분리영역의 넓이(I_d)를 이용하여 층간분리균열성장률을 설명하였다. 그러나 Fig. 4 에서 처럼 섬유배향을 달리한 적층재는 각기 다른 층간분리형

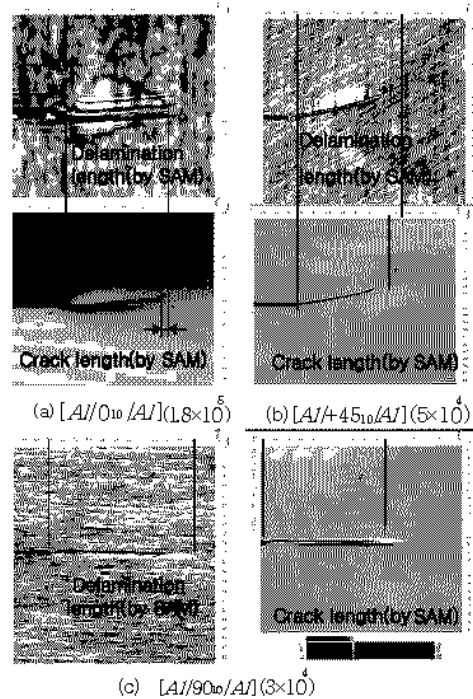
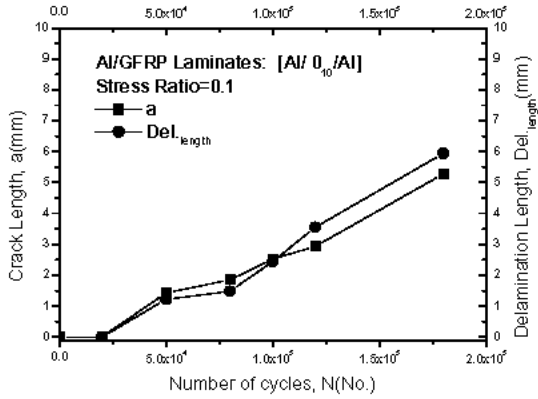
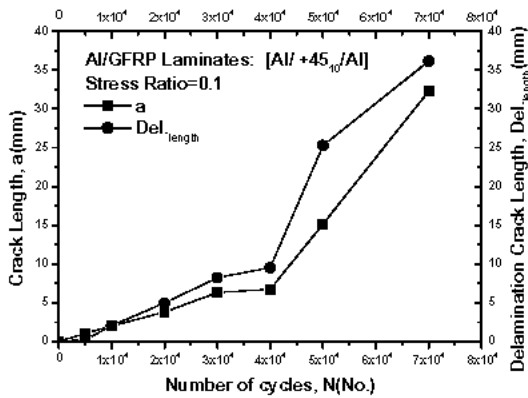


Fig. 4 SAM images of the shape of crack profile and delamination in the GLARE under tension loading

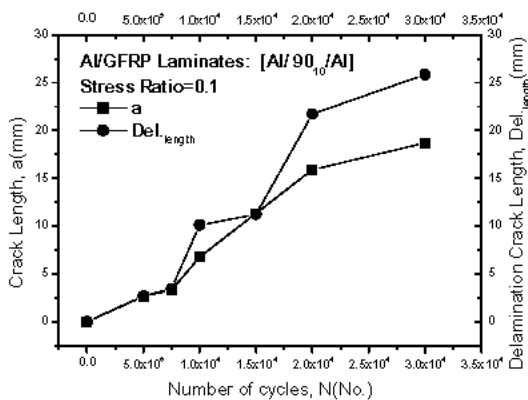
태를 가지므로 위의 방법들을 섬유배향이 다른 적층재엔 적용하기 어렵다고 보여진다. Fig. 4(a)만이 타원형의 층간분리영역을 나타냈으며 다른 적층재에서는 섬유배향에 따른 양상만이 존재하였다. 이에 본연구에서는 층간분리와 균열길이가 어떤 상호 관계를 나타내는지에 대해 알아보기 위해 층간분리영역의 길이(Del_{Length})를 측정하여 균열길이(a)와 비교해 보았다. Fig 5 는 비교결과 그래프이다. Fig. 5(a), (b), (c)초기 단계에는 균열과 층간분리 길이가 동반하는 양상을 보여줬다. 이것은 송과 김⁽²⁾의 연구결과처럼 균열선단과 층간분리성장이 같이 증가하였다고 볼 수 있다. 그러나 사이클 주기가 증가할수록 층간분리 길이가 조금씩 더 증가하였다. 이는 층간분리가 균열 길이보다 더 빨리 진전함을 알 수 있었고 Roebroeks⁽⁶⁾의 보고처럼 균열선단 후방으로부터 약간 떨어진 곳에서 층간분리가 시작되었다는 결과와 일맥상통한다. 위 결과를 살펴보면 어느 순간부터 층간분리가 섬유가교역할을 수행하였으며, 이런 현상이 일어나는 이유중에 하나는 금속층과 섬유층의 응력분포 차이때문



(a) Al/GFRP laminate: [Al/0₁₀/Al]



(b) Al/GFRP laminate: [Al/+45₁₀/Al]



(c) Al/GFRP laminate: [Al/90₁₀/Al]

Fig. 5 Relationship among crack length, delamination crack length and cycles

이라 판단되어진다. 추후에 응력비를 달리한 연구를 통해 층간분리를 수반한 균열진전현상에 대한 연구가 필요하다.

4. 결론

GLARE 의 섬유층 배향이 피로층간분리 거동에

미치는 영향에 대해 수행된 결과는 다음과 같다.

1. 인장-인장피로하중하에서는 사이클의 증가에 따른 균열진전이 섬유배향에 민감하게 영향을 받고, 섬유가교에도 영향을 끼친다.
2. 초음파 SAM 장비를 이용하여 균열길이와 층간분리형상을 측정할 수 있었다. 그 결과 0도 섬유배향영향에 의해 층간분리 형상이 타원형이 되는 것을 알 수 있었다.
3. 섬유배향각에 따른 층간분리거동을 살펴보기 위하여, 층간분리길이를 이용해서 층간분리성장거동을 관찰한 결과 층간분리는 균열선단에 앞서 생성됨을 관찰 할 수 있었다. 이는 층간의 응력분포에 의한 결과라 보여진다

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: R01-2003-000-10567-0) 지원으로 수행 되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Marissen R., "Fatigue Crack Growth in ARALL. A Hybrid Aluminum-Aramid Composite Material, Crack Growth Mechanics and Quantitative Prediction of Crack Growth Rates," *ph.D. Thesis*, Delft University of Technology, Netherlands, 1988.
2. S. H. Song, and C. H. Kim, "The delamination and Fatigue Crack Propagation Behavior in GLARE under Cyclic Bending Moment," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 25, No.8 pp. 1277-1286, 2001.
3. 윤한기, 박원조, 허정원, "CFRP 로 보강한 하이브리드 복합재료에서 비파괴검사법을 이용한 피로균열 지연의 연구," 한국복합재료학회, 제 12 권, 제 3 호, pp.1-7, 1999.
4. 송삼홍, 김철웅, "하이브리드 복합재료의 섬유 배향각이 피로균열 및 층간분리 거동의 관계에 미치는 영향," 대한기계학회논문집 A 권, 제 28 권, 제 3 호, pp. 281~288, 2004.
5. Wang, S. S., "Delamination Crack Growth in Unidirectional Fiber-Reinforced Composites under Static and Cyclic Loading," *Composite Materials: Testing and Design(Fifth Conference) ASTM STP 674*, pp.642-663, 1979.
6. Roebroeks, G. H. J. J., "Observations on Cyclic Delamination in ARALL Under Fatigue Loading," *Report LR-496*, Dept. of Aerospace Eng., Delft Univ. of Tech. Netherlands, 1986.