

반복-굽힘 모멘트의 진폭에 따른 A15052/AFRP 적층재의 층간분리 영역과 피로균열진전 거동

송삼홍[†] · 김철웅^{*}

(2001년 1월 30일 접수, 2001년 5월 24일 심사완료)

The Delamination and Fatigue Crack Propagation Behavior in A15052/AFRP Laminates Under Cyclic Bending Moment

Sam-Hong Song and Cheol-Woong Kim

Key Words: Cyclic Bending Moment(반복-굽힘 모멘트), A15052/AFRP Laminate(알루미늄 5052/아라미드섬유 적층재), Crack Bridging Effect(균열 가교 효과), Delamination Zone(층간분리 영역), Fiber Bridging Modification Factor(섬유가교 수정인자, β_{fb}), Crack Growth Rate(균열성장률, da/dN), C-Scan(C-스캔), Stress Intensity Factor Range(응력확대계수 범위, ΔK)

Abstract

Aluminum 5052/Aramid Fiber Reinforced Plastic(A15052/AFRP) laminates are applied to the fuselage-wing intersection. The A15052/AFRP laminates suffer from the cyclic bending moment of variable amplitude during the service. Therefore, the influence of cyclic bending moment on the delamination and the fatigue crack propagation behavior in A15052/AFRP laminate was investigated in this study. A15052/AFRP laminate composite consists of three thin sheets of A15052 and two layers of unidirectional aramid fibers. The cyclic bending moment fatigue tests were performed with five different levels of bending moment. The shape and size of the delamination zone formed along the fatigue crack between A15052 sheet and aramid fiber-adhesive layer were measured by an ultrasonic C-scan. The relationships between da/dN and ΔK , between the cyclic bending moment and the delamination zone size, and between the fiber bridging mechanism and the delamination zone were studied. Fiber failures were not observed in the delamination zone in this study. It represents that the fiber bridging modification factor should turn out to increase and that the fatigue crack growth rate should decrease. The shape of delamination zone turns out to be semi-elliptic with the contour decreased non-linearly toward the crack tip.

1. 서론

알루미늄/아라미드 섬유(A1/AFRP) 적층재의 피로균열진전거동에서 층간분리영역의 거동은 섬유

가교효과와 연관된 중요한 인자이다. 따라서, 최근 A1/AFRP 적층재의 연구는 피로균열진전과에 따른 층간분리영역의 거동에 대해 활발히 이루어지고 있다.

최근의 연구동향을 살펴보면, Marissen^(1,2)은 피로균열성장률과 층간분리 영역의 성장률은 상호 의존적임을 증명하고 이를 이용하여 균열성장거동을 계산하기 위한 모델을 제시했다. Lin 등⁽³⁾과 Macheret 등⁽⁴⁾은 타원형의 층간분리형상보다는 삼각형의 층간분리형상에서 섬유가교효과가 더 우

[†] 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail : shsong@mail.korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3353 FAX : (02)921-8532

^{*} 회원, 고려대학교 대학원 기계공학과

수하다고 보고하였다. Roebroeks⁽⁵⁾는 과대하중이 작용할 때 알루미늄 층에는 소성역이 증가하고, 증가된 소성역에 의해 피로균열성장률은 감소하고 층간분리영역은 증가한다고 하였다.

Guo 등⁽⁶⁾은 층간분리영역의 크기와 형상은 saw-cut에 지대한 영향을 받는다고 하였다.

또한, 김 등⁽⁷⁾과 Song 등^(8,9)은 Al5052/AFRP 적층재에서 기지의 수지혼합비 변화가 피로거동에 미치는 영향을 연구하는데 수지혼합비(에폭시수지:경화제:경화촉진제 비율) 1:1:0.2 인 경우 가장 우수한 섬유가교효과를 나타낸다고 보고하였다.

Takamatsu 등⁽¹⁰⁾은 GLARE3-5/4의 층간분리거동을 연구하여 Marissen⁽¹¹⁾이 제안한 K_{lim} 을 증명하였고 da/dN 과 ΔK 의 관계에서 피로균열진전률이 감소하는 영역(영역 I)과 증가하는 영역(영역 II)으로 구분하였다.

이상 열거한 일련의 연구에서 적용된 하중은 모두가 단순(인장-인장 또는 인장-압축) 반복하중 상태이다. 그러나 Al5052/AFRP 적층재는 항공기의 동체-날개 연결부에 적용되고 Fig. 1과 같이 이 부위는 운항 중에 지속적인 변동진폭의 반복-굽힘 모멘트를 받게 된다.⁽¹²⁾

따라서, Al/AFRP 적층재의 피로균열전파특성은 실제 적용부위의 하중조건상태와 동일한 반복-굽힘 모멘트 하에서 연구되어야 한다고 판단된다.

반복-굽힘 모멘트 하에서 Al5052/AFRP 적층재의 피로거동은 단순(인장-인장 또는 인장-압축) 반복하중 하에서의 피로거동과는 구체적으로 어떻게 다르며, 피로균열전파의 특성인 da/dN 과 ΔK 와의 관계 및 층간분리영역의 거동 등은 단순(인장-인장 또는 인장-압축) 반복하중을 받는 상태와는 어떻게 다른가 등에 대한 상세한 연구는 저자가 확인한 범위 내에서는 아직 찾아볼 수 없었다.

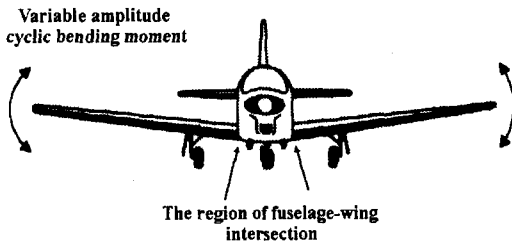


Fig. 1 Schematic of variable cyclic bending moment in aircraft

따라서 본 연구에서는 다음과 같은 사항들을 실험을 통하여 상세하게 고찰해보고자 한다.

첫째, 반복-굽힘 모멘트의 진폭크기가 피로수명에 미치는 영향. 둘째, 반복-굽힘 모멘트의 진폭크기에 따른 da/dN 과 ΔK 의 변화거동. 셋째, 단순 반복하중 상태와 반복-굽힘 모멘트 상태 하에서의 da/dN 과 ΔK 의 관계 비교. 넷째, 반복-굽힘 모멘트 하에서의 층간분리영역의 거동. 다섯째, 층간분리면적과 ΔK 의 관계 등이다.

2. 시험편 제작 및 실험방법

2.1 Al5052/AFRP 적층재 제작

2.1.1 프리프레그 제작

프리프레그 제작에 사용된 아라미드 섬유는 AKZO사의 Twaron[®](type-2200)을 사용했다.

Twaron[®] 2200의 기계적 특성은 Table 1과 같다. 또한, 아라미드 섬유에 함침할 수지용액 제작은 Song 등⁽⁸⁾이 제안한 우수한 피로강도와 기계적 특성을 보이는 수지혼합비인 <에폭시 수지 : 경화제 : 경화촉진제> = <1:1:0.2>를 채택했으며 Table 2와 같다.

Table 1 Mechanical properties of Twaron[®] 2200

Tensile modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Density (g/cm ³)	Coeff. of thermal expansion (10 ⁻⁶ /K)	Filament diameter (μm)
115	3150	2.6	1.44	-3.5	12

Table 2 Component and the mixture ratio of Al5052/AFRP

Factor Name	Component	Mixture ratio ^a		Thickness (mm)
		Equivalence ratio	Volume ratio**	
Al5052 /AFRP	Al5052	-	-	0.5
	Prepreg*	1 : 1 : 0.2 ^{##}	312 : 150 : 76	0.3

* Prepreg = matrix(epoxy resin + curing agent + accelerator) + aramid fiber

** Volume ratio = (molecular weight / specific gravity) × equivalence ratio

Mixture ratio = epoxy : curing agent : accelerator

20 % of epoxy content

Table 2에 제시한 에폭시 수지(YD-128)와 경화제(MDA-150), 경화촉진제(K-54)의 분자량은 각각 368 g/mol, 169 g/mol, 265 g/mol 이고 비중은 각각 1.18, 1.13, 0.97 이다.

Table 2와 같은 수지혼합비로 배합된 수지용액을 단방향 아라미드 섬유에 함침했다. 수지함침은 수지조를 사용하는 방법이 일반적이거나 수지함침물을 정확히 조절하기가 힘들기 때문에 계산에 의해 측정된 수지량을 비이커를 이용해서 조절하였고 직접 수지에 함침시키는 직접함침법을 이용했다. 이때 수지함침률은 50%로 적용했다.

2.1.2 적층 및 경화

2.1.1항의 방법으로 제작된 프리프레그를 Fig. 2에 나타난 바와 같이 알루미늄 판재(A15052)와 3/2로 적층했다. 이때, 프리프레그와 알루미늄 판재와의 접착력을 향상시키기 위해 알루미늄 표면을 연마지 #220으로 압연방향과 일치되게 연마했다. 사용된 A15052의 화학적 성분과 기계적 특성은 Table 3, 4와 같다.

적층된 시험편을 핫-프레스를 이용하여 120°C의 온도로 90분간 경화하였고 이때의 압력은 1.2 MPa이다. 예열시간 30분, 냉각시간 30분으로 하였다. 따라서 화학적으로 안정된 시험편을 제작할 수 있었다. 계면은 경화반응에 의하여 에폭시의 분자 사이에 가교결합이 일어나서 분자량이 증가하며 3차원의 망상구조로 변화한다. 아라미드 섬유의 경우, 섬유방향의 열팽창계수와 섬유 직각방향의 열팽창계수는 무려 35배 이상 차이가 난다.

Table 3 Chemical composition of A15052

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

Table 4 Material properties of A15052

Alloy	Tensile strength (MPa)	Yielding strength (0.2% offset) (MPa)	Thickness (mm)
A15052	283	228	0.5

2.1.3 시험편 가공 및 형상

Fig. 2는 피로균열진전 시험에 사용된 A15052/AFRP 적층재의 형상이다. 휠커터를 이용하여 시험편의 중앙에 예비균열(a=10mm)을 만들고 시험편의 물림부는 10.5 mm의 지름으로 드릴링 하였다. 프리프레그의 두께가 0.3 mm이고 알루미늄 판재의 두께가 0.5 mm이므로 시험편의 총 두께는 2.1 mm이다.

2.2 실험방법

본 실험에 사용된 시험기기는 굽힘 및 비틀림 피로시험기(TB-10, Shimadzu Co.)이다. 최대 모멘트 진폭은 98 N-m이고 분당회전수는 2000 rpm (33.3 Hz), R = 0.1이다. 하중의 형태는 반복-굽힘 모멘트를 가하였고 모멘트 값을 24.5, 29.4, 34.3, 39.2, 44.1, 49.0 N-m로 4.9 N-m 간격으로 증가시켰다. A15052/AFRP 적층재가 항공기의 동체-날개 연결부에서 반복-굽힘 모멘트를 받는 형태를 Fig. 3과 같이 나타내었다.

Fig. 3에서와 같이 반복-굽힘 모멘트가 A15052/AFRP 적층재에 작용하면, 알루미늄층은 피로균열이 발생하지만 섬유층은 손상되지 않은 채로 남아 균열을 가교한다. 또한 섬유층은 하중을 받는 균열의 주요부분에서 응력을 전달받고 균열 선단에서의 응력확대계수와 COD를 감소시킨다. 그러나 균열진전의 영향으로 균열후방의 알루미늄

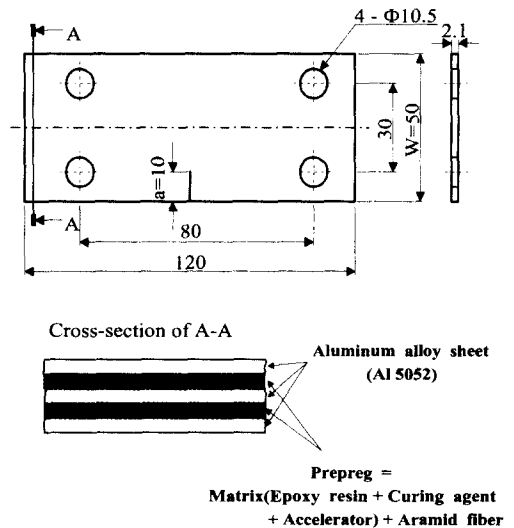


Fig. 2 Geometry of specimen (unit : mm)

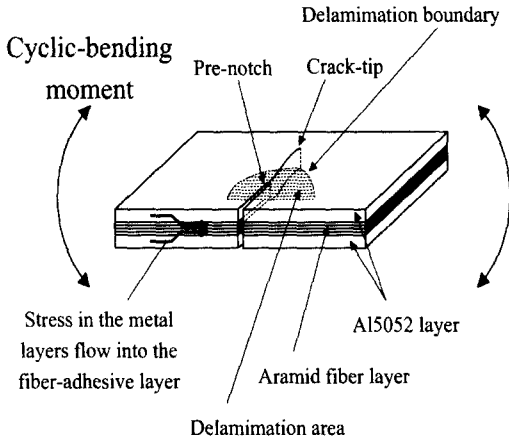


Fig. 3 Schematic of crack bridging mechanism under cyclic-bending moment

늄층과 섬유층의 경계면에는 층간분리 영역이 발생한다.

피로균열 관찰은 접안 이동 측미계를 이용하였고 100배의 배율로 피로균열을 관찰하였다. 시험편의 균열선단에서 작용하는 응력확대계수 범위 (ΔK)의 계산은 식 (1)과 같고, 형상계수 $f(a/W)$ 값은 식 (2)⁽¹³⁾와 같다.

$$\Delta K = f(a/W) \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

where,

$$f(a/W) = \frac{\sqrt{2 \tan \frac{\pi a}{2W}}}{\cos \frac{\pi a}{2W}} \left[0.752 + 2.02 \left(\frac{a}{W} \right) + 0.37 \left(1 - \sin \frac{\pi a}{2W} \right)^3 \right] \quad (2)$$

식 (1), (2)에 의해 구해진 Al5052(monolithic Al5052)의 ΔK 와 Al5052/AFRP 적층재의 ΔK 를 섬유가교 수정인자(β_n)로 변환하였다. 그리고 사이클 증가에 따른 섬유가교 효과의 관계를 반복-굽힘 모멘트의 크기에 따라 비교해 보았다.

또한, 반복-굽힘 모멘트의 진폭을 변화하여 피로균열진전 시험을 마친 Al5052/AFRP 적층재를 C-scan(Mi-SCOPE exla, Hitachi Co.) 촬영을 하여 반복-굽힘 모멘트의 진폭에 따른 층간분리 영역의 형상과 면적, 섬유의 상태 및 파단여부 등을 관찰하였다.

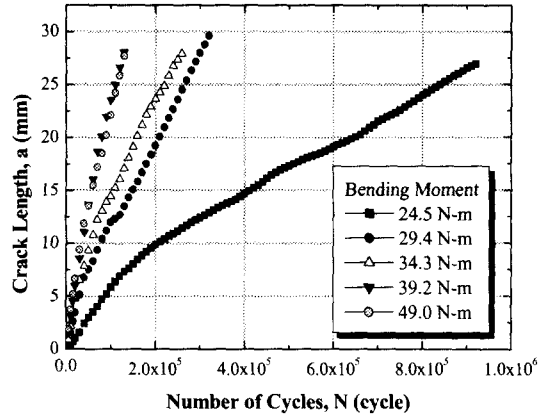


Fig. 4 Influence of the cyclic bending moment level on the relationship between crack length and cycles in the Al5052/AFRP

3. 실험결과 및 고찰

3.1 반복-굽힘 모멘트의 진폭크기가 피로수명에 미치는 영향

Al5052/AFRP 적층재에 반복하중이 작용하면, 알루미늄층의 균열선단에 걸린 하중이 섬유층으로 전달되는 섬유가교효과에 의해 균열주위의 K와 COD는 감소한다. 따라서 단일 알루미늄(monolithic aluminum)에 비해 피로수명은 10배 이상 향상된다.⁽⁸⁾ 그러나, 반복-굽힘 모멘트가 Al5052/AFRP 적층재에 작용할 때 반복-굽힘 모멘트의 진폭크기에 따른 피로수명은 불규칙적인 거동을 나타낼 것이다. 왜냐하면, Al5052/AFRP 적층재의 피로수명은 알루미늄층과 섬유층 사이의 결합강성도, 계면에 작용하는 전단강도의 크기, 섬유가교의 효율 등에 의한 알루미늄층의 균열주위 응력분포로부터 다양하게 영향을 받기 때문이다.

반복-굽힘 모멘트가 Al5052/AFRP 적층재에 가해짐에 따라 계면에는 전단응력이 증가하고 알루미늄층에는 균열이 진전한다. 이때 균열주위에서 알루미늄층과 섬유층 사이가 분리될 수 있다. 이러한 분리는 균열주위에서의 결합강성도를 줄이고 알루미늄층에서 섬유층으로의 하중전달을 저하시킨다. 따라서 섬유가교효과는 감소한다. 반복-굽힘 모멘트의 크기가 증가할수록 계면의 전단강도가 증가하며 섬유가교효과는 급격히 저하하고

피로수명은 단축된다. 이상과 같은 메커니즘에 의해 A15052/AFRP 적층재의 피로수명은 불규칙적인 거동을 나타낼 것이라고 판단된다.

Fig. 4는 5가지 반복-굽힘 모멘트의 크기(24.5, 29.4, 34.3, 39.2, 49.0 N-m)에 따라 진전되는 균열의 길이와 사이클의 관계를 나타낸 그래프이다.

균열발생구간을 전체적으로 보면, 반복-굽힘 모멘트의 진폭이 커질수록 피로수명은 단축됨을 볼 수 있다.

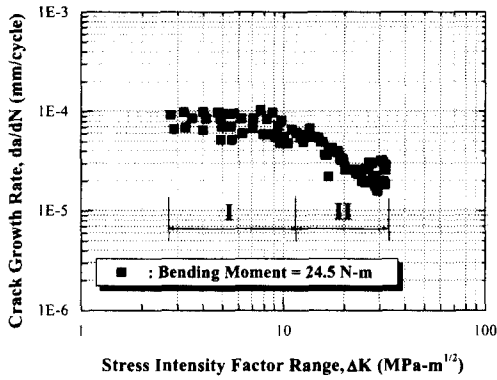
또한, 굽힘 모멘트의 진폭이 커질수록 진폭간의 피로수명의 차이가 적어진다. 즉, 균열발생시점을 균열길이 3 mm라고 보았을 때, 피로수명은 큰 차이를 나타내지 않았다. 그러나 균열길이 25 mm를 기준으로 피로수명을 평가해 보았을 때, 반복-굽힘 모멘트가 24.5 N-m일 때와 29.4 N-m일 때는 3.4배의 피로수명 차이를 나타냈다. 반면, 반복-굽힘 모멘트 39.2 N-m와 49.0 N-m간의 피로

수명은 균열발생 초기부터 후기까지 거의 동일한 양상을 나타냈다. 이러한 메커니즘의 원인은 앞에 언급한 알루미늄층과 섬유층 사이의 결합강성도, 계면에 작용하는 전단응력의 크기, 섬유가교의 효율과 관련이 있다. 또한, 3.2절에 언급할 da/dN 과 ΔK 의 관계에서 영역II의 크기와도 관계가 있다고 생각된다.

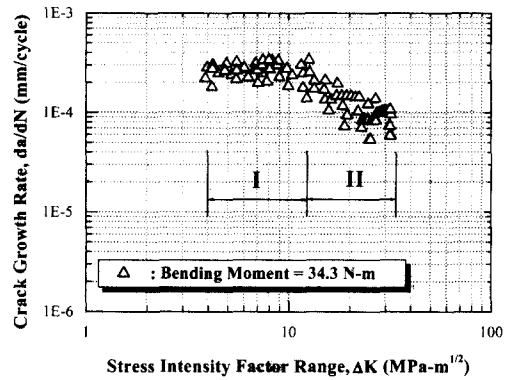
3.2 반복-굽힘 모멘트의 진폭크기에 따른 da/dN 과 ΔK 의 변화거동

3.1 절에서 언급한 바와 같이 반복-굽힘 모멘트의 진폭이 커질수록 진폭간의 피로수명 차이가 적어지는 이유를 규명하기 위하여 Fig. 5와 같이 균열성장률(da/dN)과 응력확대계수범위(ΔK)의 관계를 나타내 보았다.

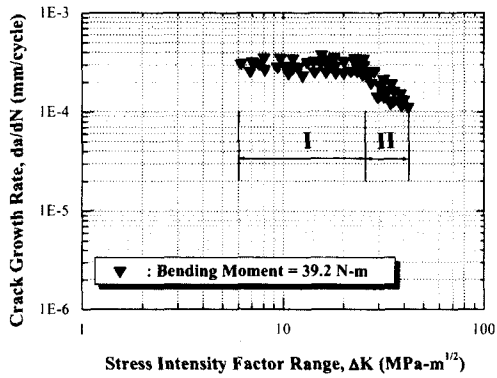
전체적으로 응력확대계수범위가 증가할수록 균열성장률은 감소하는 추세를 나타냈다. 또한, 크



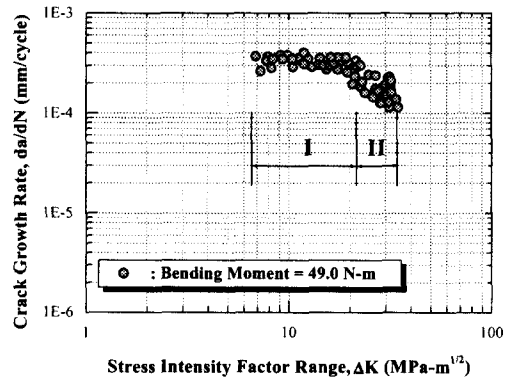
(a) Bending moment = 24.5 N-m



(b) Bending moment = 34.3 N-m



(c) Bending moment = 39.2 N-m



(d) Bending moment = 49.0 N-m

Fig. 5 Relationship between da/dN and ΔK in the A15052/AFRP under cyclic bending moment

계 두 가지의 양상으로 구분할 수 있었는데, 피로균열진전 초반에는 피로균열성장률이 일정한 양상을 보이다가 후반에는 서서히 감소하는 양상을 관찰할 수 있었다. 이는 A15052/AFRP 적층재가 반복-굽힘 모멘트를 받을 때의 특이 현상이다.

Fig. 5의 (a), (b), (c), (d)에서 관찰할 수 있는 것과 같이 초반의 균열성장률이 일정한 구간을 영역 I 이라고 정의하였고, 후반의 균열성장률이 서서히 감소하는 구간을 영역 II라고 정의하였다.

영역 I 에서 피로균열성장률이 일정한 이유로는 반복-굽힘 모멘트의 부하초기에 알루미늄층의 균열선단에서 섬유층으로의 응력전달이 용이하게 이루어져 응력구배가 적어지고 결국, 균열성장속도 증가를 저지하는 요인으로 작용했기 때문이라고 판단된다.

또한, 영역 II에서 피로균열성장률이 감소하는 이유는 사이클이 증가하여도 섬유의 파단이 발생하지 않아서 지속적인 응력전달이 가능했기 때문이다. 이로 인해 섬유가교효과는 누적되고 피로균열진전속도는 저하하게 되었다.

3.3 단순 반복하중상태와 반복-굽힘 모멘트상태

하에서의 da/dN과 Δ K의 관계 비교

하중의 형태가 변화함에 따라 da/dN과 Δ K의 형태도 변화할 것이다. 따라서 Fig. 5에서 제시한 반복-굽힘 모멘트 하에서의 da/dN과 Δ K의 관계와 단순(인장-인장 또는 인장-압축) 반복하중 하에서의 da/dN과 Δ K를 비교하기 위해서 Fig. 6과 같은 그래프를 제시하였다.

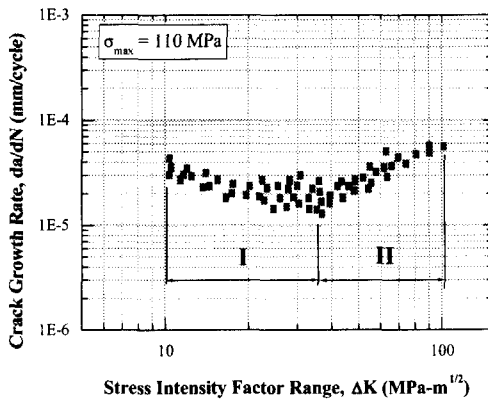


Fig. 6 Relationship between da/dN and Δ K in the GLARE3-5/4 under constant amplitude loading of $\sigma_{max} = 110$ MPa by Takamatsu⁽¹⁰⁾

Fig. 6은 Takamatsu 등⁽¹⁰⁾이 A17075/GFRP 적층재로 제작된 GLARE3-5/4를 이용하여 피로균열진전시험을 하고 da/dN과 Δ K의 관계로 나타낸 결과이다.

Fig. 6에서 Takamatsu는 피로균열성장률이 서서히 감소하는 초기구간을 영역 I 이라고 정의하였고 피로균열성장률이 서서히 증가하는 구간을 영역 II라고 정의하였다. Fig. 6의 영역 I 은 파단되지 않은 섬유에 의해 섬유가교효과가 크게 작용하여 알루미늄층의 피로균열성장률이 감소하는 구간이고, Fig. 6의 영역 II는 누적된 반복하중에 의해 섬유가 파단되고, 그 결과, 응력전달이 용이하지 못해 섬유가교효과는 저하하고 피로균열성장률은 증가하는 구간이라고 보고하였다.

Fig. 6에서 피로균열성장률이 감소한 영역 I 과 피로균열성장률이 증가한 영역 II는 섬유의 파단 여부로 결정된다. 만약, 최종단계까지 섬유의 파단이 발생하지 않았다면 섬유가교효과는 지속적으로 누적될 것이고 이로 인해 피로균열성장률은 사이클이 증가할수록 지속적으로 감소할 것이다. 인장-인장의 반복-굽힘 모멘트 하에서 아라미드 섬유는 연신율이 좋기 때문에 파단은 발생하지 않았다. 따라서 Fig. 5와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

이러한 섬유가교효과를 통한 피로균열성장률 증감은 섬유가교 수정인자(β_{fb})를 통하여 설명할 수 있다. Toi⁽¹⁴⁾가 제안한 섬유가교 수정인자(fiber bridging modification factor, β_{fb})는 섬유가 삽입된 A15052/AFRP 적층재의 Δ K 값과 섬유가 삽입되

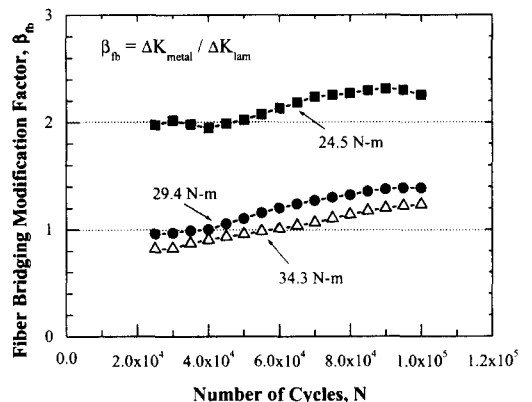


Fig. 7 Relationship between fiber bridging modification factor(β_{fb}) and cycles under cyclic bending moment

지 않은 단일 A15052의 ΔK 값의 비를 나타내며 식 (3)과 같다.

$$\beta_{fb} = \frac{\Delta K_{metal}}{\Delta K_{lam}} \quad (3)$$

여기서,

ΔK_{metal} : stress intensity factor range(A15052)

ΔK_{lam} : stress intensity factor range(A15052/AFRP)

식 (3)에서 섬유가교 수정인자(β_{fb}) 값이 증가할수록 섬유가교효과는 증대됨을 알 수 있다.

Fig. 7에 제시한 바와 같이 모든 진폭에서 반복-굽힘 모멘트의 사이클이 증가함에 따라 섬유가교 수정인자가 증가했다. 즉, 사이클이 증가할수록 섬유가교효과가 증대되고 피로균열진전률이 저하하는 특이현상이 발생했음을 알 수 있다.

3.4 반복-굽힘 모멘트 하에서의 층간분리영역의 거동

A15052/AFRP 적층재에 반복-굽힘 모멘트가 작용할 경우, 균열선단을 기준으로 균열후방에는 알루미늄층과 섬유층의 계면이 분리되는 층간분리영역이 발생한다. 이러한 층간분리 영역은 알루미늄층과 섬유층 사이에 불연속면을 형성하여 섬유층으로 응력전달을 저해하는 요인으로 작용한다. 따라서, 층간분리 영역의 면적이 증가하면 섬유가교효과는 저하될 것이다. 이러한 현상은

섬유파단과 층간분리가 함께 발생했을 때 극대화될 것이다. 하지만 층간분리영역에 섬유의 파단이 발생하지 않았다면 층간분리 영역이 피로균열진전률을 증가시키는 요인으로 크게 작용하지 못할 것이라고 판단된다. 따라서 상기한 내용과 반복-굽힘 모멘트의 크기가 층간분리 영역에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 C-scan을 이용하여 시험편을 촬영하고 Fig. 8과 같은 결과를 얻었다.

Fig. 8은 A15052/AFRP 적층재에 반복-굽힘 모멘트가 작용할 때, 사이클이 증가함에 따라 층간분리영역이 증가해 가는 형태를 단계적으로 나타낸 모식도이다. a/W를 기준으로 (a) 1단계(a/W=0.3), (b) 2단계(a/W=0.5), (c) 3단계(a/W=0.6), (d) 4단계(a/W=0.8)로 구분한 것이다. Fig. 9는 Fig. 8에서 (d) 4단계(a/W=0.8)에 해당하는 C-scan 사진이다. Fig. 9에 나타낸 바와 같이 하중방향은 섬유방향과 동일하다. C-scan 사진에서 밝은 영역은 층간분리영역이다. Fig. 9 (a), (b), (c), (d)를 비교해보면 반복-굽힘 모멘트의 크기가 증가할수록 층간분리 영역의 면적은 증가했음을 볼 수 있다.

층간분리영역의 형상은 균열선단을 기준으로 균열후방으로 넓게 퍼지는 형상이며, 전체적으로 보면 반타원의 형상을 나타낸다. 그러나 스티칭(stitching)에 의해 층간분리 영역의 확장이 다소 저지된 것을 관찰할 수 있다. 층간분리영역은 주로 균열의 진전에 의해 발생이 시작되고 이미 층간분리가 발생한 영역에서는 사이클이 증가함에 따라 하중방향으로 확장해 나간 것으로 보인다.

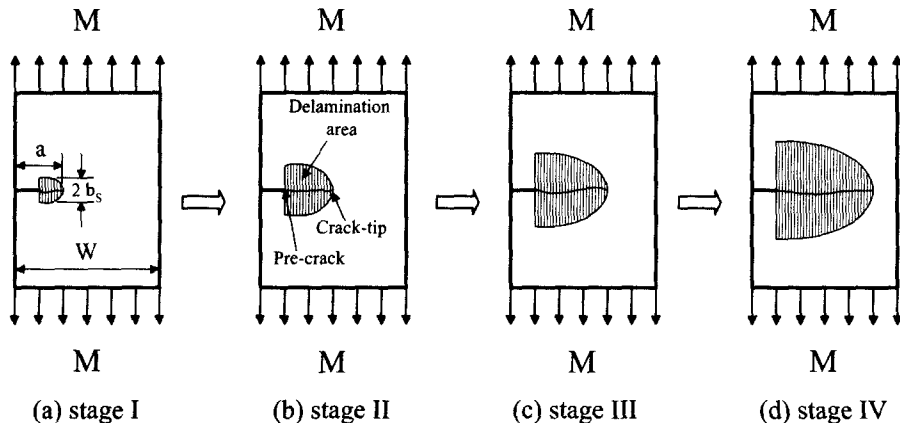
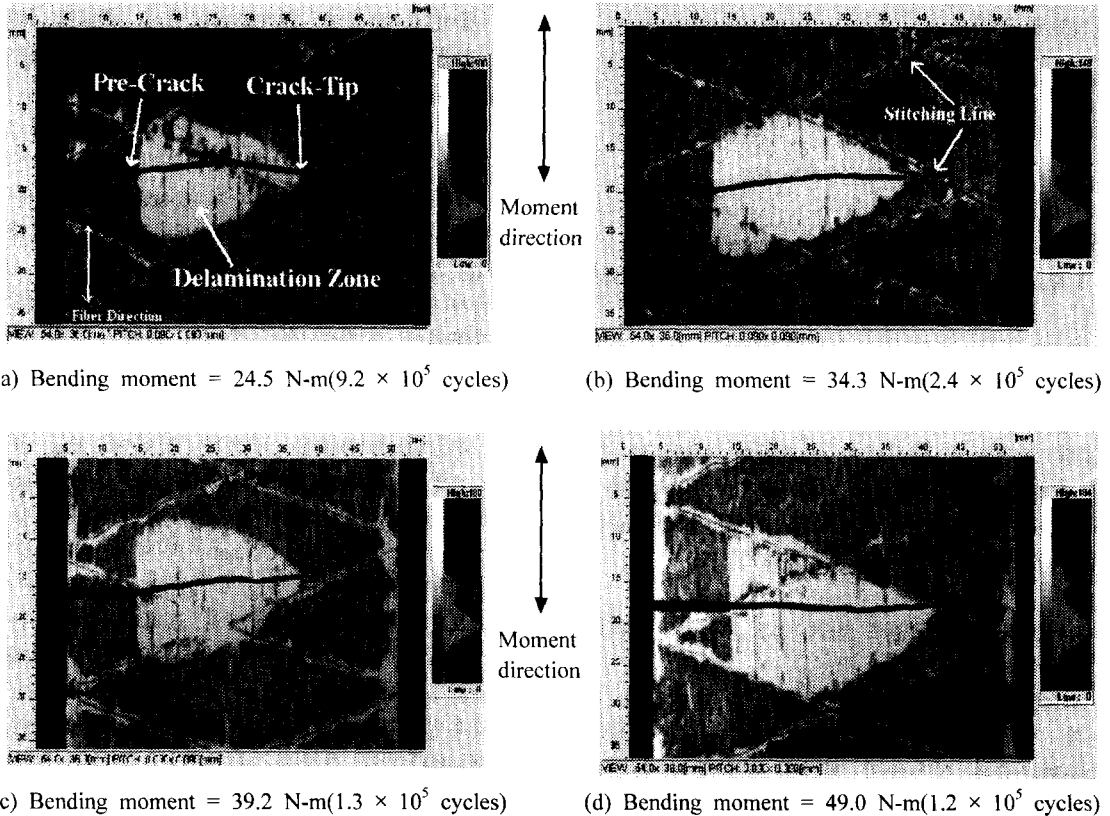


Fig. 8 Schematic of relationship between crack growth and delamination extension under cyclic bending moment



(a) Bending moment = 24.5 N-m(9.2×10^5 cycles)

(b) Bending moment = 34.3 N-m(2.4×10^5 cycles)

(c) Bending moment = 39.2 N-m(1.3×10^5 cycles)

(d) Bending moment = 49.0 N-m(1.2×10^5 cycles)

Fig. 9 Ultrasonic C-scan pictures of the shape of crack and delamination in the Al5052/AFRP under cyclic bending moment

다시 말하면, 하중방향의 층간분리 길이는 층간 분리발생 시작으로부터 얼마만큼의 반복하중이 그 지점에 발생하였는지를 예측할 수 있는 인자로 사용 가능할 것 같다.

Marissen⁽¹⁵⁾은 단순(인장-인장 또는 인장-압축) 반복하중 하에서 층간분리영역의 형상은 반타원의 형상을 나타낸다고 보고한 바 있다. 그러므로 단순(인장-인장 또는 인장-압축) 반복하중일 때와 반복-굽힘 모멘트일 때, 모두 층간분리 영역의 형상은 반타원의 모습이 나타남을 알 수 있었다. 다시 말해서, 층간분리영역의 형태는 하중의 형태에 크게 영향을 받지 않으며, 사이클 증가에 따라 하중방향으로 성장해 나감을 알 수 있다.

한편, 예비균열부는 하중방향으로 응력이 불연속되므로 반복-굽힘 모멘트에 의한 영향을 전혀 받지 않았음을 알 수 있고, 이에 따라 이 부위에서는 층간분리영역도 발생하지 않았다.

Fig. 9 (a), (b), (c), (d) 모두에서 나타난 균열은 알루미늄 층에서만 나타난 균열이다. 알루미늄 층에서 발생한 균열은 하중방향과 수직하게 진전했고 거의 직선에 가깝게 나타났음을 관찰할 수 있다. 또한, 연신율이 좋은 아라미드 섬유는 파단은 발생하지 않았음을 관찰할 수 있다.

Fig. 5 (a), (b), (c), (d)의 영역II에서 피로균열 성장률이 서서히 감소하는 현상과 Fig. 9의 C-scan 사진결과를 관계지어 보면 섬유의 파단이 발생하지 않는 경우, 층간분리영역은 피로균열진전속도를 증가시키는 원인으로 작용하지 못한다고 판단된다.

3.5 층간분리 면적과 ΔK 의 관계

3.2 절에서 반복-굽힘 모멘트 진폭이 증가할수록 ΔK 의 영역II가 좁아짐을 알 수 있다. 이러한 현상은 층간분리영역의 거동과 밀접한 관련이 있

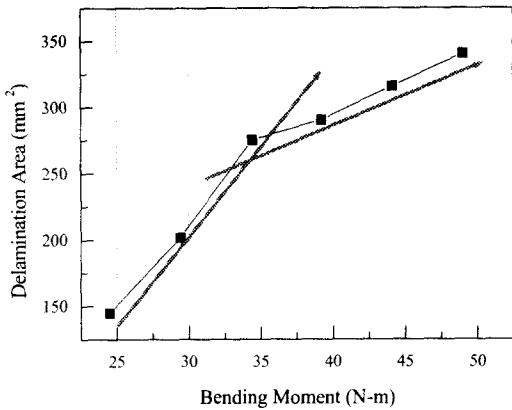


Fig. 10 Relationship between cyclic bending moment and delamination area in the A15052/AFRP at 1×10^5 cycles

을 것이다. 따라서 모든 반복-굽힘 모멘트 진폭에서 1×10^5 cycles일 때를 기준으로 반복-굽힘 모멘트 진폭과 층간분리면적의 관계를 Fig. 10에 나타내었다.

전체적으로 보면 반복-굽힘 모멘트의 진폭이 증가할수록 층간분리면적이 증가한다. 그러나 반복-굽힘 모멘트 진폭 39.2 N-m를 기준으로 진폭이 작은 경우(24.5, 29.4, 34.3 N-m)와 큰 경우(39.2, 44.1, 49.0 N-m)의 층간분리면적 증가율은 다른 기울기를 보인다. 즉, 반복-굽힘 모멘트 39.2 N-m 이상부터는 층간분리면적 증가율이 감소한다. 이러한 현상은 Fig. 5 (c), (d)의 영역II가 Fig. 5 (a), (b)의 영역II에 비해 좁아지는 현상과 밀접한 관계가 있을 것이라 생각된다. 즉, Fig. 5의 영역II가 좁아졌음은 ΔK 가 작아졌음을 의미한다. 따라서 층간분리면적의 증가율도 영역II가 넓을 때 (Fig. 5 (a), (b))에 비하여 감소하였다고 생각된다.

위의 내용을 종합해보면, 반복-굽힘 모멘트의 진폭이 큰 경우, 영역II의 ΔK 감소와 함께 층간분리면적증가율이 감소함을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 반복-굽힘 모멘트의 진폭이 커질수록 진폭 간의 피로수명차이는 적어졌다. 또한, 반복-굽힘 모멘트의 진폭크기와 피로수명 관계는 da/dN 과

ΔK 의 관계에서 영역II와 층간분리영역 증가율에 관련이 있다.

(2) 반복-굽힘 모멘트 하에서의 피로균열성장률 (da/dN)은 초반에 일정한 양상을 보이다가 사이클이 증가할수록 피로균열성장률이 점차로 감소됨을 볼 수 있다. 그 원인은 반복-굽힘 모멘트 하에서는 아라미드 섬유 파단이 발생하지 않아서 섬유가교효과가 꾸준히 증가했기 때문이다.

(3) 단순(인장-인장 또는 인장-압축) 반복하중 하에서는 피로균열성장률이 감소하는 초기구간(영역 I)과 피로균열성장률이 증가하는 후기구간(영역 II)으로 구분할 수 있다. 그러나 반복-굽힘 모멘트 하에서는 피로균열성장률이 일정한 초기구간(영역 I)과 피로균열성장률이 감소하는 후기구간(영역 II)으로 구분할 수 있었다. 그 이유는 반복-굽힘 모멘트 하에서 사이클이 증가할수록 섬유가교 수정인자(β_{fb})가 증가했기 때문이다.

(4) 반복-굽힘 모멘트의 진폭이 커질수록 층간분리영역은 증가하였다. 또한, 층간분리영역의 형상은 단순 반복하중상태일 때와 같은 형태인 반타원의 형태를 나타내었다. 즉, 층간분리 영역의 형상은 작용하중의 형태보다는 작용하중의 방향에 더 큰 영향을 받음을 알 수 있었다.

(5) 반복-굽힘 모멘트의 진폭이 큰 경우, 영역II의 ΔK 감소와 함께 층간분리면적 증가율이 감소함을 볼 수 있다.

참고문헌

- (1) Marissen R., 1988, "Fatigue Crack Growth in ARALL : A Hybrid Aluminum-Aramid Composite Material : Crack Growth Mechanism and Quantitative Prediction of the Crack Growth Rates," Ph. D. Thesis, Delft University of Technology.
- (2) Marissen R., 1984, "Fatigue Crack Growth in Aramid Reinforced Aluminum Laminates (ARALL) - Mechanisms and Predictions," DFVLR, *Institut für Werkstoff-Forschung*, DFVLR-FB-84-37.
- (3) Lin C. T., Kao P. W. and Yang F. S., 1991, *Composite*, Vol. 2, p. 135.
- (4) Macheret J., Teply J. L. and Winter E. F. M., 1989, *Polymer Composites*, Vol. 10, p. 322.
- (5) Roebroeks G. H. J. J., 1987, "Constant

- Amplitude Fatigue of ARALL-2 Laminates," *Report LR-539*, Dept. of Aerospace Engineering, Delft University of Technology.
- (6) Guo Y. J. and Wu X. R., 1999, "Bridging Stress Distribution in Center-cracked Fiber Reinforced Metal Laminates : Modeling and Experiment," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 63, pp. 147~163.
- (7) 김철웅, 손세원, 1999, "수지혼합비가 FRMLs의 피로균열전파거동과 기계적 성질에 미치는 영향에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제16권, 제8호, pp. 149~154.
- (8) Song S. H. and Kim C. W., 2000, "The Influence of Resin Mixture Ratio for the Use of Prepreg on the Fatigue Behavior Properties in FRMLs," *International Journal of KSPE*, Vol. 1, No. 1, pp. 33~41.
- (9) 송삼홍, 김철웅, 2001, "프리프레그 제작용 에폭시 수지·경화제·경화촉진제 혼합비 변화에 따른 FRMLs의 피로거동특성," 대한기계학회는 문집 A권, 제25권, 제4호, pp. 592~601.
- (10) Tohru Takamatsu, Takashi Matsumura, Norio Ogura, Toshiyuki Shimokawa, Yoshiaki Kakuta, 1999, "Fatigue Crack Growth Properties of a GLARE3-5/4 fiber/metal Laminate," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 63, pp. 253~272.
- (11) Marissen R., 1985, "ARALL(Aramid Reinforced Aluminum Laminates) a Hybrid Composite with a Great Resistance Against Fatigue Crack Propagation," *Report DGLR*, pp. 85~137.
- (12) Gunnink J. W., Verbruggen M. L. C. E. and Vogelesang L. B., 1984, "ARALL, A Light Weight Structural Material For Impact and Fatigue Sensitive Structures," *The 10th European Rotorcraft Forum*, The Hague, The Netherlands, pp. 241~254.
- (13) Anderson T. L., 1994, "Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications," Second Edition, *CRC Press*, p. 63.
- (14) Toi Y., 1995, "An Experimental Crack Growth Model for Fiber/metal Laminates," *Proceedings of the Eighteenth Symposium of ICAF*, Melbourne, pp. 899~909.
- (15) Marissen R., 1988, "Fatigue Crack Growth in ARALL. A Hybrid Aluminum-aramid Composite Material, Crack Growth Mechanics and Quantitative Predictions of the Crack Growth Rate," *Report LR-574*, Faculty of Aerospace Eng., Delft University of Technology, The Netherlands.