

층간분리성장률(dA_D/da)과 섬유가교효과인자(F_{BE})를 이용한 Al/GFRP 적층재의 피로거동 해석

송삼홍[†] · 김철웅^{*}

(2002년 8월 21일 접수, 2002년 12월 9일 심사완료)

The Analysis of Fatigue Behavior Using the Delamination Growth Rate(dA_D/da) and Fiber Bridging Effect Factor(F_{BE}) in Al/GFRP Laminates

Sam-Hong Song and Cheol-Woong Kim

Key Words: Al/GFRP Laminates(알루미늄/유리섬유 강화적층재), Cyclic Bending Moment(반복 굽힘 모멘트), Saw-cut(소컷), Delamination Growth Rate(층간분리성장률, dA_D/da), Fiber Bridging Effect Factor(섬유가교효과인자, F_{BE}), C-scan(C-스캔)

Abstract

The influence of cyclic bending moment on the delamination and the fatigue crack propagation behavior in Al/GFRP laminate such as the wing section was investigated. The main objective of this study was to evaluate the relationship between crack profile and delamination behavior. And a propose parameter on the delamination growth rate(dA_D/da) of Al/GFRP laminates with a saw-cut using relationship between delamination area(A_D) and cycles(N), crack length(a), stress intensity factor range(ΔK). Also, the fiber bridging effect factor(F_{BE}) was propose that the fiber bridging modification factor(β_{fb}) to evaluate using the delamination growth rate(dA_D/da). The shape and size of the delamination zone formed along the fatigue crack between aluminum alloy sheet. Glass fiber-adhesive layer were measured by an ultrasonic C-scan image. The shape of delamination zone turns out to be semi-elliptic with the contour decreased non-linearly toward the crack tip. It represents that relationship between crack length and delamination growth rate(dA_D/da) were interdependent by reciprocal action, therefore it's applicable present a model for the delamination growth rate(dA_D/da) in Al/GFRP laminates.

1. 서론

항공기의 주익은 부분적으로 알루미늄/유리섬유 강화 플라스틱(이하, Al/GFRP) 적층재가 사용된다. 주익은 주로 반복 굽힘모멘트를 받게되는데 이러한 반복 굽힘모멘트는 주익 노치부에 응

력을 집중시키고 균열을 유발하며 최종적으로 항공기 대형파손의 원인이 된다. 따라서, Al/GFRP 적층재의 알루미늄층에서 진행되는 균열을 섬유층에서 가교하고, 알루미늄층 균열주위에서 발생하는 응력을 섬유층이 분담하는 목적으로 Al/GFRP 적층재가 사용된다.⁽¹⁾ 그러나 Al/GFRP 적층재의 알루미늄층에서 발생, 전파되는 균열은 섬유층과 알루미늄층 사이에 층간분리(delamination) 형태의 손상영역을 발생시킨다. 층간분리는 섬유가교효과를 저하시키고 알루미늄층에서 섬유층으로의 응력분담을 방해한다. 따라서

[†] 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail : shsong@korea.ac.kr

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

^{*} 회원, 고려대학교 대학원 기계공학과

섬유강화 금속적층재에 대한 최근 일련의 연구는 층간분리에 집중되고 있다. 이에 관련된 최근 연구동향을 살펴보면 다음과 같다. Marissen⁽²⁾은 피로균열성장률과 층간분리 영역의 성장은 상호 의존적임을 증명하고 이를 이용하여 균열성장거동을 계산하기 위한 모델을 제시했다. Macheret 등⁽³⁾은 타원형의 층간분리형상보다는 삼각형의 층간분리형상에서 섬유가교효과가 더 우수하다고 보고하였다. Roebroeks⁽⁴⁾는 과대하중이 작용할 때 알루미늄 층에는 소성역이 증가하고, 증가된 소성역에 의해 피로균열성장률은 감소하며 층간분리영역은 증가한다고 하였다. Guo 등⁽⁵⁾은 층간분리영역의 크기와 형상은 소컷(saw-cut)에 지대한 영향을 받는다고 하였다. 또한, 송과 김⁽⁶⁾은 반복굽힘모멘트의 진폭에 따른 AI/FRP 적층재의 층간분리 영역과 피로균열진전 거동을 연구하였는데 층간분리영역의 형상은 하중모드보다는 하중방향에 더 큰 영향을 받는다고 보고하였다. Takamatsu 등⁽⁷⁾은 GLARE3-5/4의 층간분리거동을 연구하여 da/dN 과 ΔK 의 관계를 규명한 바 있다.

이상의 연구를 종합해보면 층간분리는 균열진전과 의존적인 관계임을 알 수 있다. 따라서 기존의 층간분리 연구는 균열진전과 층간분리의 관계를 중심으로 부하특성에 따른 거동 해석, 층간분리거동 모델 제시 및 균열진전에 따른 층간분리 변화 등에 관심을 두고 있다. 균열진전은 재료의 고유특성으로 파괴역학적 파라미터인 균열성장률(da/dN)로 설명할 수 있다. 만약, 균열성장률이 변화한다면 균열에 의존적인 관계인 층간분리 거동도 변화할 것이며, 층간분리 확장속도 또한 변화할 것이다.

따라서 본 연구에서는 균열성장률과 같은 파괴역학적 인자를 층간분리거동에 적용해 보고자 하였다. 다시 말해서 균열성장에 따른 층간분리의 확장을 파괴역학적 인자로 나타내기 위하여 “층간분리성장률”이라는 파라미터를 제안하고, 이를 토대로 섬유가교효과인자(F_{BE})를 제안하고자 하였다. 따라서 본 연구의 목적을 세분화하면 다음과 같다.

첫째, 단일재 알루미늄과 AI/GFRP 적층재의 피로수명 및 da/dN - ΔK 관계 비교. 둘째, 층간분리 면적과 사이클, 균열길이의 관계 비교. 셋째, 층간분리성장률과 균열길이, 사이클, 응력확대계수 범위(ΔK)의 관계 비교. 넷째, 섬유가교수정인자(β_B)와 섬유가교효과인자(F_{BE})의 관계 등이다. 이

를 통하여 층간분리성장률 및 섬유가교효과인자식을 제안하려고 한다.

2. AI/GFRP 적층재 제작 및 실험방법

2.1 AI/GFRP 적층재 제작

AI/GFRP 적층재는 AI5052와 유리섬유(S-glass) 프리프레그를 2/1의 형태로 적층하였다. 이때 선처리로 AI5052의 접착면을 크롬산 아노다이징(chromic acid anodizing) 처리하였다. AI/GFRP 적층재의 프리프레그로 사용된 유리섬유(S-glass)의 기계적 특성은 Table 1과 같고 AI5052의 기계적 특성은 Table 2와 같다. 적층된 시험편은 핫-프레스를 이용하여 Fig. 1과 같은 조건으로 경화하였다. 일반적인 경화 사이클과 달리 후가열(post-heating)을 택한 이유는 프리프레그 수지계의 DSC(Differential Scanning Calorimetry) 측정 결과 후가열 과정이 요구되었기 때문이다. 따라서 화학적으로 더욱 안정된 시험편을 얻을 수 있었다.

2.2 시험편의 형상

Fig. 2는 피로균열진전 시험에 사용된 AI/GFRP 적층재의 형상이다. 휠커터를 이용하여 시험편의 중앙 하단부에 예비균열($a=5\text{mm}$)을 만들고 시험편의 물림부는 10.5 mm의 지름으로 드릴링 하였다. 프리프레그의 두께가 0.5 mm, 2 플라이(ply)이고 알루미늄 판재의 두께가 0.5 mm, 상하 2장이므로 시험편의 총 두께는 2.0 mm이다.

2.3 실험방법

본 실험에 사용된 시험기기는 굽힘 및 비틀림 피로시험기(TB-10, Shimadzu Co.)이다. 최대 모멘

Table 1 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

Table 2 Mechanical properties of AI5052

Alloy	Tensile strength (MPa)	Yielding strength (0.2% offset) (MPa)	Thickness (mm)
AI5052	283	228	0.5

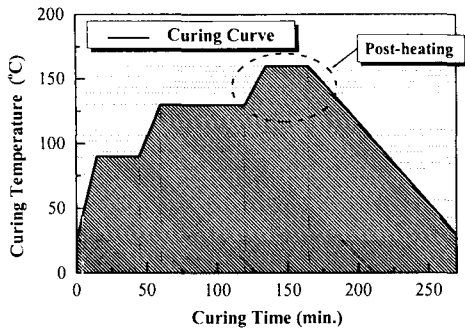


Fig. 1 Curing cycle of Al/GFRP laminates

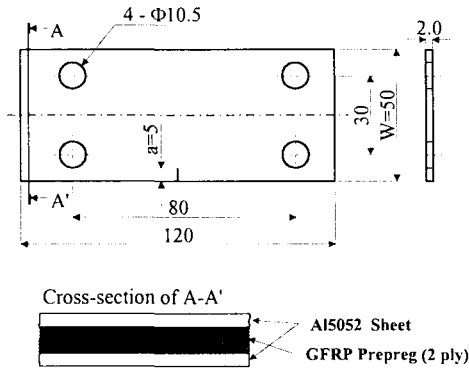


Fig. 2 Geometry of specimen (unit : mm)

트는 98 N-m이며, 분당회전수는 2000 rpm이고 33.3 Hz, $R = -1$ 이다. 하중은 반복 굽힘모멘트를 가하였고 모멘트 값을 4.9 N-m로 적용하였다. 피로균열 관찰은 집안 이동 측미계를 이용하였고 100 배율로 피로균열을 관찰하였다. 또한, Al/GFRP 적층재의 층간분리영역은 C-scan (MISCOPE exla, Hitachi Co.) 촬영을 통하여 균열의 진전에 따른 층간분리 영역의 형상과 면적, 섬유의 상태 및 파단 여부 등을 관찰하였다. 본 연구에서는 정량적인 결과를 도출하기 위해 동일조건에서 10개씩의 시험편을 사용하여 얻은 평균값을 실험결과에 적용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 단일재 알루미늄과 Al/GFRP 적층재의 피로수명 및 $da/dN-\Delta K$ 관계

Al/GFRP 적층재는 단일재 알루미늄과 달리 균열진전의 급격한 변화없이 사이클 증가에 따라 일정한 균열진전을 보인다. 송과 김⁽⁹⁾은 이러한

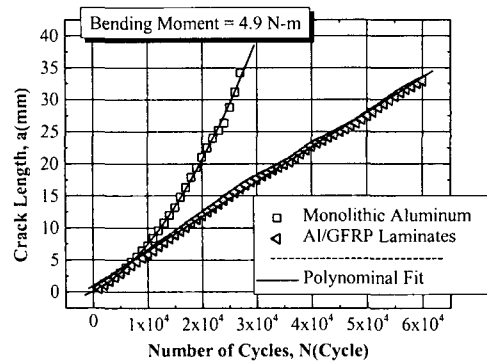


Fig. 3 Relationship between crack length(a) and cycles(N) in the monolithic aluminum and Al/GFRP laminates

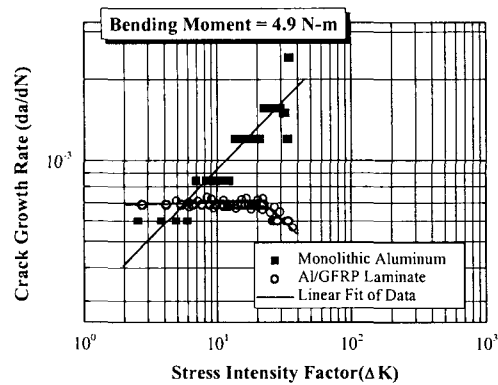


Fig. 4 Relationship between da/dN and ΔK in the monolithic aluminum and Al/GFRP laminates

거동은 알루미늄층과 섬유층사이의 결합강성도, 계면에 작용하는 층간전단강도의 크기, 섬유가교효과가 주된 원인이라고 보고하였다. Fig. 3은 단일재 알루미늄과 Al/GFRP 적층재의 전형적인 a-N 관계를 보여준다. Al/GFRP 적층재의 경우, 사이클 증가에 따른 균열진전이 거의 선형적인 기울기를 보인다. 거시적으로 보면, 이는 알루미늄층에서 섬유층으로의 응력전달이 부하초기부터 끝까지 용이하게 이루어졌으며 섬유가교효과에 의해 COD의 증가도 거의 나타나지 않았기 때문이다. 따라서 일정한 균열진전속도를 유지할 수 있었다. 균열길이 30 mm ($a/W = 0.6$)를 기준으로 볼 때, Al/GFRP 적층재는 단일재 알루미늄보다 피로수명이 약 2.2배 정도 향상되었다. 한편, 송과 김은 반복 굽힘모멘트를 받는 Al/GFRP 적층재의 연구에서 부하초반에는 피로균열성장률이

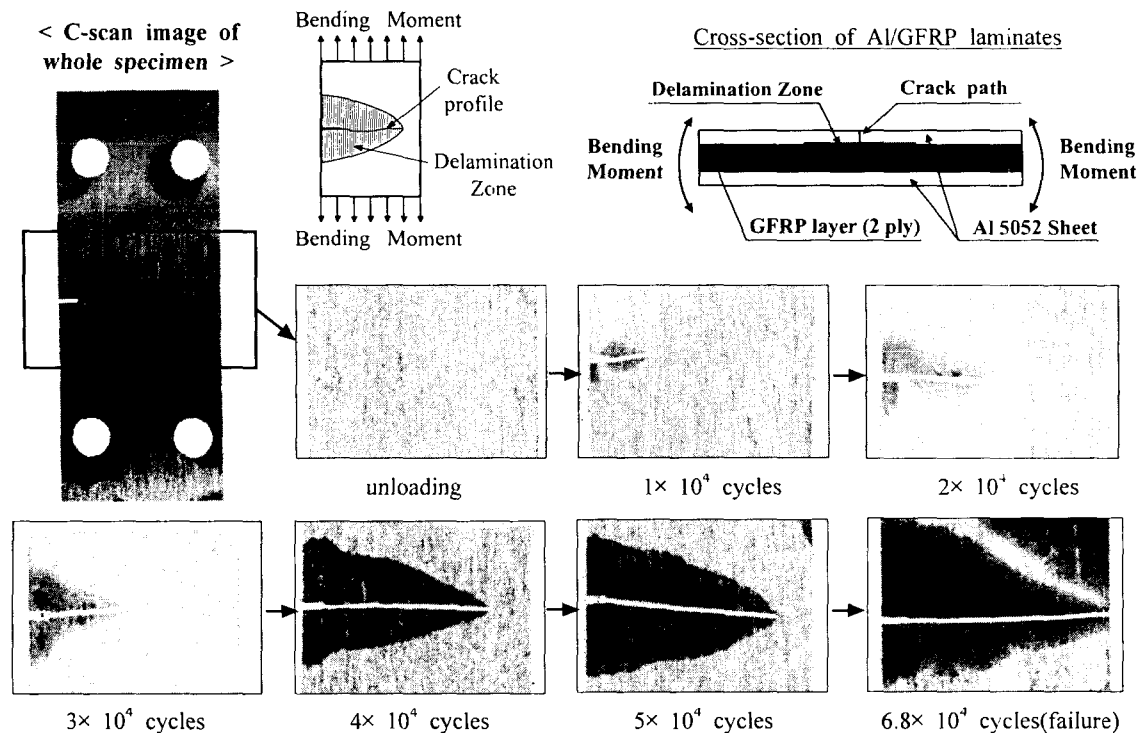


Fig. 5 Ultrasonic C-scan image of the crack and delamination in the Al/GFRP laminates under cyclic bending moment

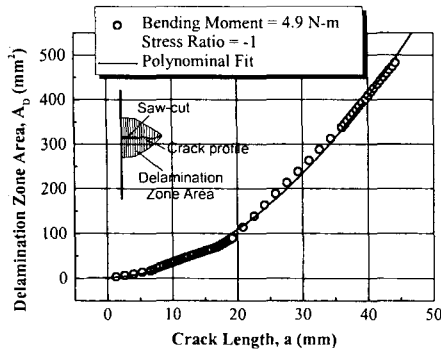
일정한 양상을 보이다가 부하후반에는 피로균열 성장률이 서서히 감소하는 경향을 보인다고 보고한 바 있다. 본 연구에서도 Al/GFRP 적층재의 경우, 유사한 경향이 나타났음을 Fig. 4를 통하여 관찰할 수 있었다. 결국, AFRP 및 GFRP 등 섬유(강화재)의 물성이 $da/dN \sim \Delta K$ 의 관계에 지대한 영향을 미치는지는 않으며, 부하후반에 섬유가 파단되지 않는 한, 균열성장률은 서서히 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다. 이러한 경향은 사이클이 증가하여도 파단되지 않은 섬유가 응력전달을 용이하게 하여 균열성장률의 증가를 저지했기 때문이고, 섬유가교효과는 누적되어 부하후반에 균열진전속도는 저하하게 된 것으로 판단한다.

3.2 층간분리성장률 거동

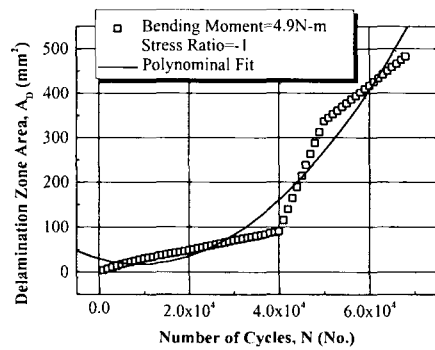
3.2.1 층간분리면적과 균열길이, 사이클 관계

균열성장에 의존적인 층간분리는 균열길이와 증가하면 동반하여 증가한다. Fig. 5는 균열이 증가할수록 층간분리면적이 증가하는 양상을 C-스캔 이미지로 촬영하여 사이클 별로 제시한 것이

다. Fig. 5에 사이클 별로 제시된 사진은 비파괴 검사시 알루미늄층과 섬유층의 계면에서 전달되는 파형신호를 증폭하여 이미지화 시킨 것으로 균열을 중심으로 층간분리영역이 선명하게 드러남을 볼 수 있다. Al/GFRP 적층재에 반복 굽힘모멘트가 가해지면 하중의 수직방향으로 균열이 성장하며 계면에서는 균열후방으로 넓게 퍼지는 형상으로 층간분리 영역이 성장한다. 이러한 층간분리거동이 균열길이 및 사이클과 어떠한 관계를 갖는지 검토하기 위해 Fig. 6과 같이 나타내었다. Fig. 6(a)는 층간분리 면적과 균열길이의 관계를 나타낸 그래프이고, Fig. 6(b)는 층간분리면적과 사이클의 관계를 나타낸 그래프이다. Fig. 6(a)에 제시된 바와 같이 층간분리면적과 균열길이는 일정한 관계성을 갖는다. 또한 2차 곡선과도 잘 일치됨을 볼 수 있다. Fig. 6(a)에서 균열초기 서서히 증가되는 층간분리 면적 증가 경향이 균열길이 20 mm ($a/W=0.3$) 이상부터 심화됨을 관찰할 수 있다. 이를 검토하기 위해 Fig. 3에서 Al/GFRP 적층재의 $a-N$ 관계를 살펴보면, 균열길이 20 mm 구간은 $3 \times 10^4 \sim 4 \times 10^4$ cycles에 해당하는 구간임



(a) Delamination Area - a



(b) Delamination Area - N

Fig. 6 Relationship between (a) delamination zone area and crack length, (b) delamination zone area and cycles in AI/GFRP laminates

을 알 수 있고, Fig. 5의 층간분리 이미지를 살펴 보면 $3 \times 10^4 \sim 4 \times 10^4$ cycles 구간에서 급격하게 층간분리 면적이 증가되었음을 관찰할 수 있다. 따라서 Fig. 3의 a-N 관계, Fig. 5의 층간분리 C-스캔 이미지 결과 및 Fig. 6(a)의 층간분리면적과 균열길이의 관계 등은 모두 잘 일치됨을 관찰할 수 있다.

반면, Fig. 6(b)에서 제시한 바와 같이 층간분리 면적과 사이클의 관계는 잘 일치하지 않는다. 일례로, Fig. 6(b)에서 $4 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$ cycles 구간은 급격한 층간분리 면적 증가를 보인다. 이를 검토하기 위해 Fig. 3을 살펴보면 $4 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$ cycles 구간은 균열길이 22~28 mm 구간이다. 그러나 Fig. 6(a)를 살펴보면, 균열길이 22~28 mm 구간에서의 층간분리면적의 급격한 증가는 관찰되지 않는다. 또한, Fig. 5를 살펴보면 $4 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$ cycles 구간에서 층간분리면적의 급격한 증가는 관찰되지 않는다. 이처럼 Fig. 6(b)의 층간분리 면적과 사이클의 관계는 일치되지 않는 점이

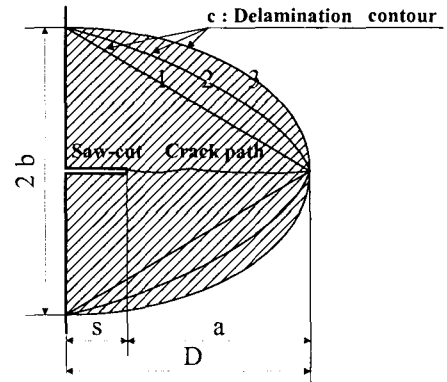


Fig. 7 Type of delamination contour

많다. 따라서 층간분리 면적과 사이클의 관계는 비의존적이라고 판단된다. 하지만, 사이클은 증가했으나 균열이 정류되는 경우, 층간분리면적은 증가될 것인가에 대한 여부는 정량적인 실험이 선행되어야 할 것 같다.

3.2.2 층간분리성장률과 균열길이, 사이클, 응력 확대계수 범위(ΔK)의 관계

본 연구에서는 층간분리성장률을 제안하기 위하여 균열길이 증가에 대한 층간분리 면적 확장 비율(식 (1))과 사이클 증가에 대한 층간분리 면적 확장비율(식 (2))의 관계식을 다음과 같이 제시해 보았다.

$$\frac{dA_D}{da} = f_s \frac{(A_D)_n - (A_D)_{n-1}}{a_n - a_{n-1}} \quad (1)$$

$$\frac{dA_D}{dN} = f_s \frac{(A_D)_n - (A_D)_{n-1}}{N_n - N_{n-1}} \quad (2)$$

여기서, a 는 균열길이, A_D 는 층간분리영역의 면적, f_s 는 층간분리 형상인자, N 은 사이클 수이다. 식 (1), (2)에서 층간분리면적(A_D)은 다음과 같다.

$$A_D = A_{De} - \{(s \times t_s) + (COD \times a)\} \quad (3)$$

여기서, A_{De} 는 총 층간분리면적, s 는 소켓 길이, t_s 는 소켓 두께, COD 는 균열개구변위이다.

식 (3)에서 총 층간분리영역 면적(A_{De})은 식 (4)와 같다.

$$A_{De} = 2\sqrt{T(T-b)(T-a)(T-c)} \quad (4)$$

여기서, 식 (4)의 T 는 Fig. 7의 b, c, D 를 이용하면 $T = (b + c + D)/2$ 과 같이 정리되고, b 는 층간분리 폭의 1/2, c 는 층간분리경계의 길이이다. 단, c 는 직선(Fig. 7의 1형태)이고, A_{De} 의 형태는 균열을 중심으로 대칭이라고 가정한다. 또한, 식 (1), (2)에서 f_s 는 층간분리경계의 형상에 따라 Fig. 7의 c 와 같이 세 가지로 구분된다. Fig. 7에서 층간분리 경계가 $c = 1, 2, 3$ 과 같을 때 식 (1), (2)에서 언급한 층간분리 형상계수(f_s)는 Fig. 7의 c 에 의존적이며 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

식 (1), (2)의 관계를 이용하여 Fig. 8 (a),(b) 및 Fig. 9 (a),(b)와 같이 나타내었다. Fig. 8(a) 및 Fig.

$$\begin{aligned}
 c = 1, f_s &= b \left(1 - \frac{s}{D} \right) \\
 c = 2, f_s &= b \sqrt{1 - \left(\frac{s}{D} \right)} \\
 c = 3, f_s &= b \sqrt{1 - \left(\frac{s}{D} \right)^2}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

9(a)는 식 (1)을 적용한 결과이고, Fig. 8(b) 및 Fig. 9(b)는 식 (2)를 적용한 결과이다. 층간분리성장률에서 식 (1)은 층간분리 면적 확장량을 균열 길이 증가량으로 나눈 값(dA_D/da)이고, 식 (2)는 층간분리면적 확장량을 사이클 증가량으로 나눈 값(dA_D/dN)이다. 또한, Fig. 8, 9, 10에서 실선으로 나타낸 Polynomial Fit는 산포되어 있는 결과 값들의 경향을 3차 곡선으로 나타낸 것이다.

식 (1)을 적용한 경우(Fig. 8(a), Fig. 9(a)), 실험 결과 뿐만 아니라 Fig. 6(a)와도 잘 일치됨을 관찰할 수 있었다. 즉, 사이클이 증가하고 균열이 진전될수록 층간분리성장률은 꾸준히 증가하는 경향을 보였다. 그러나 식 (2)를 적용한 경우(Fig. 8(b), Fig. 9(b)), 실험결과뿐만 아니라 Fig. 6 (b)와

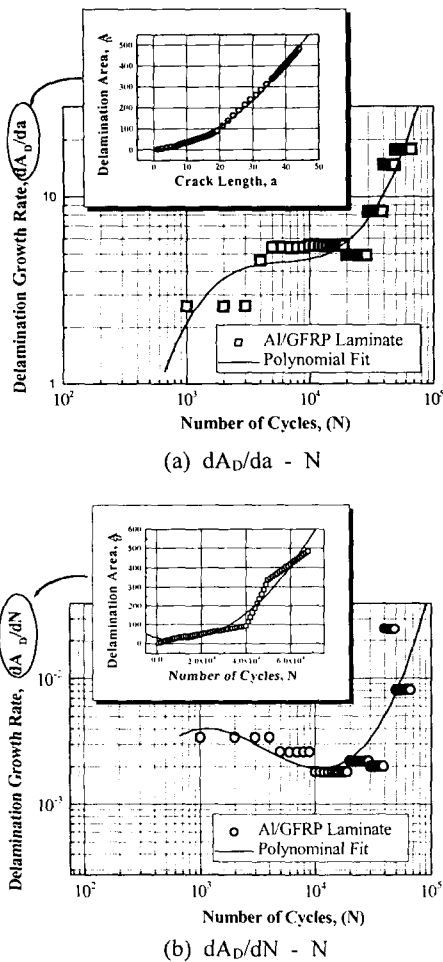


Fig. 8 Relationship between (a) delamination growth rate(dA_D/da) and cycles, (b) delamination growth rate(dA_D/dN) and cycles

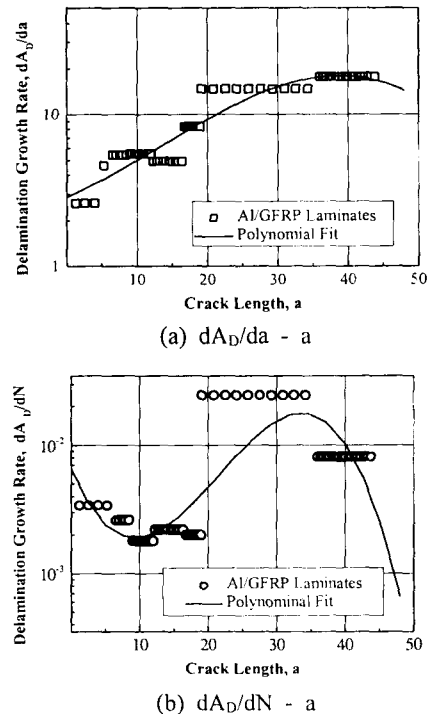


Fig. 9 Relationship between (a) delamination growth rate(dA_D/da) and crack length, (b) delamination growth rate(dA_D/dN) and crack length

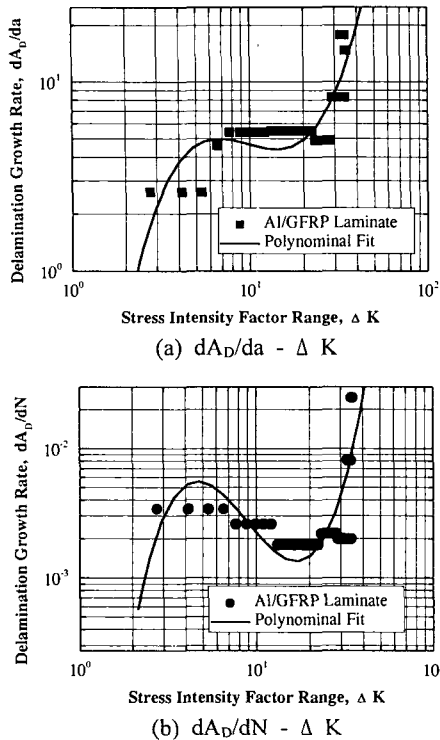


Fig. 10 Relationship between (a) delamination growth rate(dA_D/da) and ΔK , (b) delamination growth rate(dA_D/dN) and ΔK in Al/GFRP laminates

도 일치하지 않음을 관찰할 수 있었다. 본 연구에서 실제로 층간분리성장률이 감소되는 구간은 나타나지 않았다. 그러나 Fig. 8(b) 및 Fig. 9(b)에서는 층간분리성장률이 감소하는 구간이 존재한다. 종합해보면, 층간분리 확장과 균열길이의 관계는 비교적 정확하고 일관성있는 결과를 얻을 수 있었지만, 층간분리확장과 사이클의 관계는 부정확하고 일관성 없는 결과가 나타났다. 따라서, 층간분리성장률의 두 가지 제안식인 식 (1)과 식 (2) 중 식 (1)이 정확한 결과를 제시하고 다른 파괴역학적 인자와의 적용도 가능하다고 판단된다. 같은 맥락으로 Fig. 10 (a), (b)를 비교해 보아도 식 (1)이 정확한 결과를 제시함을 볼 수 있다. Fig. 10은 식 (1), (2)를 응력확대계수범위(ΔK)에 적용한 결과이다. Fig. 8 (a),(b)와 Fig. 10 (a),(b)는 그래프 x축 인자는 변화하였지만 아주 유사한 경향을 보여주고 있다.

위의 내용을 요약하면 다음과 같다. 층간분리 성장률을 제안하기 위해 층간분리 확장과 균열길

이의 관계(식 (1)) 및 층간분리 확장과 사이클의 관계(식 (2))를 균열길이(a), 사이클(N), 응력확대 계수범위(ΔK)에 적용해 본 결과, 층간분리성장률로 정의된 층간분리 확장은 사이클과의 관계보다는 균열길이와의 관계가 잘 일치됨을 볼 수 있다. 따라서 층간분리성장률은 식 (1)로 정의할 수 있다고 판단된다.

3.2.3 섬유가교수정인자(β_{fb})와 섬유가교효과인자(F_{BE})의 관계

반복 굽힘모멘트 4.9 N-m 하에서 Al/GFRP 적층재의 섬유층 파단은 관찰되지 않았다. 이와 같이 섬유의 파단이 발생되지 않는 경우, 사이클이 증가할수록 섬유가교효과는 증대된다고 보고된 바 있다.⁽⁶⁾ 그러나 섬유층이 파단되지 않더라도 층간분리영역은 알루미늄층과 섬유층 사이에 불연속면을 형성하기 때문에 응력전달이 용이하지 못하게 되고, 그로 인해 섬유가교효과는 급격히 저하될 것이다. 즉, 층간분리는 일정부하 후 섬유가교효과에 지대한 영향을 미칠 것이다.

$ToI^{(8)}$ 는 섬유가교효과를 검토할 수 있는 파라미터로 섬유가교수정인자(fiber bridging modification factor, β_{fb})를 제안한 바 있다. 유리섬유가 삽입된 Al/GFRP 적층재의 $\Delta K(\Delta K_{lam})$ 와 유리섬유가 삽입되지 않은 단일재 알루미늄의 $\Delta K(\Delta K_{metal})$ 의 관계를 이용하여 식 (6)과 같이 섬유가교효과를 평가하였다.

$$\beta_{fb} = \frac{\Delta K_{metal}}{\Delta K_{lam}} \quad (6)$$

식 (6)에서 섬유가교수정인자(β_{fb}) 값이 증가할수록 섬유가교효과는 증대됨을 알 수 있다. 식 (6)을 본 연구 결과에 적용해본 결과 Fig. 11과 같이 나타낼 수 있었다. 섬유가교수정인자와 사이클(N)의 관계 및 섬유가교수정인자와 균열길이(a)의 관계를 비교해본 결과 유사한 경향을 관찰할 수 있다. Fig. 11에서 사이클이 증가하거나 균열길이가 증가할수록 섬유가교효과는 서서히 증가됨을 관찰할 수 있다. 이러한 결과는 섬유가교효과의 경우 사이클 및 균열길이 모두에 의존적임을 의미한다. 이는 3.2.2항에서 언급한 층간분리성장률(dA_D/da)이 사이클과는 비의존적인 관계인 점과 다른 결과이다. 이 결과가 보여주는 바

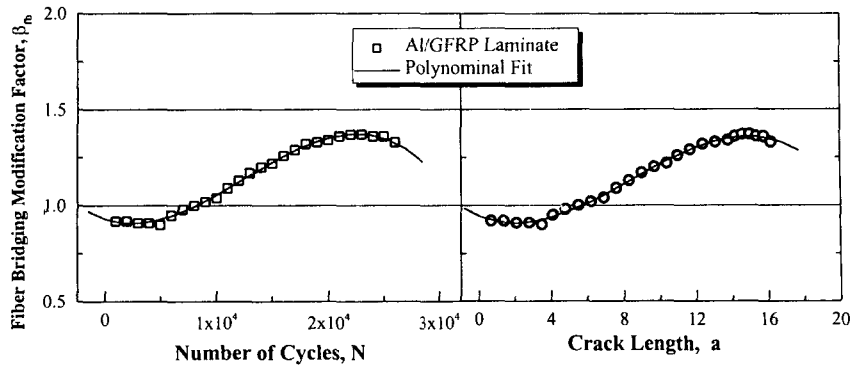


Fig. 11 Relationship between fiber bridging modification factor(β_b) and cycle, crack length in Al/GFRP laminates

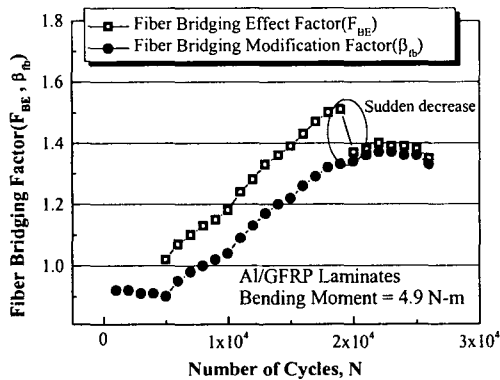


Fig. 12 Comparison of fiber bridging effect factor(F_{BE}) with fiber bridging modification factor(β_b) in Al/GFRP laminates under bending moment at 4.9 N-m

와 같이 Toi가 제안한 섬유가교수정인자는 이론적으로는 합당하나 층간분리면적(A_D), 층간분리성장률(dA_D/da) 등 섬유가교효과를 저해하는 대표적인 인자인 층간분리가 고려되지 않았기 때문에 정확한 해석결과로 판단하기는 어렵다.

Al/GFRP 적층재에서 실제로 섬유의 파단이 발생되지 않았더라도 층간분리영역은 사이클과 균열길이 증가에 따라 꾸준히 증가되고, 이 층간분리영역은 섬유가교효과에 영향을 미치기 때문에 Toi의 식(식 (6))은 수정되어야 한다고 생각된다. 따라서 본 연구에서는 식 (6)에 층간분리성장률(dA_D/da)의 인자를 도입해서 식 (7)과 같이 나타내었다.

$$F_{BE} = \beta_b \times f_{de} \quad (7)$$

여기서, F_{BE} 는 섬유가교효과인자이고, β_b 는 섬유

가교수정인자이다. 또한, f_{de} 는 층간분리성장률인자이다. 식 (7)에서 f_{de} 는 식 (8)과 같다.

$$f_{de} = \frac{\left(\frac{dA_D}{da}\right)_n}{\left(\frac{dA_D}{da}\right)_{max}} \quad (8)$$

섬유가교수정인자(β_b)와 섬유가교효과인자(F_{BE})를 비교한 결과를 Fig. 12에 나타냈다. 섬유가교수정인자와 섬유가교효과인자를 비교해보면 특이한 현상을 관찰할 수 있다. Toi의 섬유가교수정인자는 섬유가교효과가 서서히 증가하는 경향만 나타낸 반면, 본 연구에서 제안한 섬유가교효과인자(F_{BE})는 2×10^4 cycles에서 섬유가교효과가 급격히 감소하는 구간을 보였고, 그 후 거의 일정한 값을 보였다. 이 결과는 섬유가교효과가 2×10^4 cycles부터 급격하게 층간분리영역의 영향을 받기 시작하여 저하했음을 뜻한다. Fig. 5의 사이클별 층간분리 이미지를 관찰해보면 2×10^4 cycles부터 층간분리영역이 뚜렷해지기 시작함을 볼 수 있다. 또한, 2×10^4 cycles 이후 섬유가교효과는 일정한 값을 보인다. 이는 2×10^4 cycles 이후 충분히 증가된 층간분리영역이 알루미늄층과 섬유층 사이에서 일정한 관계로 섬유가교효과를 방해한 결과라고 생각된다.

요약해보면, 섬유가교수정인자(β_b)에 층간분리성장률(dA_D/da)을 적용하여 섬유가교효과인자(F_{BE})를 제안한 결과, 섬유가교효과인자는 층간분리가 섬유가교효과에 미치는 영향을 구체적으로 제시해 주었다. 따라서, 섬유가교효과인자(F_{BE})는 Al/GFRP 적층재의 섬유가교효과를 더욱 정확하게 표현할 수 있는 인자라고 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 유리섬유강화 금속적층재의 피로균열전파에 따른 충간분리성장률 파라미터를 제안하기 위해 AI/GFRP 적층재에 반복 굽힘 모멘트를 작용하여 실험을 수행하였다. 충간분리 면적과 균열길이, 사이클의 관계를 기초로 충간분리성장률과 균열길이, 사이클, 응력확대계수범위의 관계를 고찰해보고 섬유가교수정인자와 본 연구에서 제안된 섬유가교효과인자의 관계 등을 적용해본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 단일재 알루미늄과 AI/GFRP 적층재의 피로수명을 비교해본 결과, $a/W=0.6$ 일 때 AI/GFRP 적층재는 단일재 알루미늄보다 2.2배정도 피로수명이 향상되었다.

(2) 단일재 알루미늄과 AI/GFRP 적층재의 $da/dN-\Delta K$ 의 관계를 비교해본 결과, AI/GFRP 적층재의 경우 부하초반에는 피로균열성장률이 일정한 경향을 보이다가 부하후반에는 피로균열성장률이 저하하는 경향을 보였다. 이러한 이유는 사이클이 증가하여도 파단되지 않은 섬유가 응력전달을 용이하게 하여 섬유가교효과가 누적되었기 때문이다.

(3) 충간분리 면적과 균열길이, 사이클의 관계를 비교해본 결과, 충간분리 면적과 균열길이의 관계는 일정한 규칙성을 가지며 충간분리는 균열길이에 의존적인 관계를 나타냄을 $a-N$ 관계, 충간분리 C-스캔 이미지, 충간분리면적과 균열길이의 그래프 등을 통하여 종합적으로 증명할 수 있었다. 반면, 충간분리 면적과 사이클의 관계는 잘 일치하지 않으며 비의존적인 관계를 나타냄을 증명할 수 있었다.

(4) 충간분리성장률 거동을 제어하기 위하여 아래와 같은 두 가지 식을 제안해 보았다.

$$\frac{dA_D}{da} = f_s \frac{(A_D)_n - (A_D)_{n-1}}{a_n - a_{n-1}} \quad (1)$$

$$\frac{dA_D}{dN} = f_s \frac{(A_D)_n - (A_D)_{n-1}}{N_n - N_{n-1}} \quad (2)$$

여기서, a 는 균열길이, A_D 는 충간분리영역의 면적, f_s 는 충간분리 형상인자, N 은 사이클 수이다. 위의 두 식을 각각 균열길이, 사이클, 응력확

대계수범위(ΔK)의 관계에 적용해본 결과, 식 (1)이 실제 실험결과와 잘 일치하였다. 따라서, 충간분리성장률은 충간분리 확장량과 균열길이 증가량의 관계식인 식 (1)을 적용해야한다고 판단된다.

(5) 섬유가교효과를 고려할 때, Toi 가 제안한 섬유가교수정인자(β_{fb})는 충간분리에 대한 영향이 고려되어 있지 않으므로 본 연구에서는 아래와 같은 섬유가교효과인자(F_{BE})를 제안하였다.

$$F_{BE} = \beta_{fb} \times f_{de}$$

여기서, F_{BE} 는 섬유가교효과인자이고, β_{fb} 는 섬유가교수정인자이다. 또한, f_{de} 는 충간분리성장률인자이다.

Toi 가 제안한 섬유가교수정인자(β_{fb})에 충간분리성장률(dA_D/da)을 적용하여 섬유가교효과인자(F_{BE})를 제안한 결과, 섬유가교효과인자는 충간분리가 섬유가교효과에 미치는 영향을 구체적으로 제시해 주었다. 따라서, 섬유가교효과인자(F_{BE})는 AI/GFRP 적층재의 섬유가교효과를 더욱 정확하게 표현할 수 있는 인자라고 생각된다.

후 기

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

참고문헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) Macheret, J., Teply, J. L. and Winter, E. F.

- M., 1989, *Polymer Composites*, Vol. 10, p. 322~330.
- (4) Roebroeks, G. H. J. J., 1987, "Constant Amplitude Fatigue of ARALL-2 Laminates," Report LR-539, Dept. of Aerospace Engineering, Delft University of Technology.
- (5) 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.
- (6) Sam-Hong Song and Cheol-Woong Kim, 2001, "The Delamination and Fatigue Crack Propagation Behavior in Al5052/AFRP Laminates Under Cyclic Bending Moment," *Transaction of the KSME, A*, Vol. 25, No. 8, pp. 1277~1286.
- (7) 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.
- (8) Toi, Y., 1995, "An Experimental Crack Growth Model for Fiber/metal Laminates," *Proceedings of the Eighteen Symposium of ICAF*, Melbourne, Australia, pp. 899~909.