

균열길이와 층간분리 폭의 관계를 이용한 하이브리드 복합재의 층간분리 거동 평가

송삼홍* · 김철웅*

(2003년 3월 29일 접수, 2003년 10월 20일 심사완료)

Evaluation of Delamination Behavior in Hybrid Composite Using the Crack Length and the Delamination Width

Sam-Hong Song and Cheol-Woong Kim

Key Words: Hybrid Composite(하이브리드 복합재), Glass Fiber/epoxy Laminate(유리섬유/에폭시 적층재), Delamination Width(층간분리 폭, b), Delamination Aspect Ratio(층간분리 종횡비, b/a), Delamination Area Rate(층간분리 면적률, $(A_D)_N/(A_D)_{All}$), Delamination Growth Rate(층간분리 성장률, dA_D/da), Delamination Shape Factor(층간분리 형상계수, f_S)

Abstract

Although the previous researches evaluated the fatigue behavior of glass fiber/epoxy laminates using the traditional fracture mechanism, their researches were not sufficient to do it: the damage zone of glass fiber/epoxy laminates was occurred at the delamination zone instead of the crack-metallic damages. Thus, previous researches were not applicable to the fatigue behavior of glass fiber/epoxy laminates. The major purpose of this study was to evaluate delamination behavior using the relationship between crack length and delamination width in hybrid composite material such as AI/GFRP laminate. The details of investigation were as follows : 1) Relationship between crack length and delamination width, 2) Relationship between delamination aspect ratio and delamination area rate, 3) Variation of delamination growth rate is attendant on delamination shape factors. The test results indicated that the delamination growth rate depends on delamination width delamination aspect ratio and delamination shape factors.

기호설명	dA_D/da : 층간분리 성장률
a : 균열 길이	
b : 층간분리 폭 길이	
$2c$: 층간분리 외곽선 길이	
b/a : 층간분리 종횡비	
A_D : 층간분리 면적	
f_S : 층간분리 형상계수	

1. 서론

AI/AFRP 적층재, AI/GFRP 적층재 등과 같은 하이브리드 복합재는 일반 금속재에 비해 매우 우수한 피로거동을 보인다.^(1~3) 그럼에도 불구하고 적용분야가 제한적일 수밖에 없는 이유는 금속층과 섬유/에폭시의 층간에서 발생하는 층간분리가 가장 큰 문제점으로 대두되기 때문이다. 이러한 층간분리는 금속층과 섬유/에폭시층간에서 이루어지는 섬유가교효과를 크게 저하시킨다. 따라서 본 저자들은 선행연구에서 이러한 층간분리

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과
 E-mail : shsong@korea.ac.kr
 TEL : (02)3290-3353 FAX : (02)921-8532
 * 회원, 고려대학교 공학기술연구소 및 인덕대학 기계시스템

거동을 중심으로 하이브리드 복합재(Al/AFRP 적층재, Al/GFRP 적층재)의 피로거동을 평가한 바 있다. 그 내용을 요약하면 다음과 같다. i) Al/AFRP 적층재에서 층간분리 형상은 균열 후방으로 넓게 확장되는 반타원 형태를 형성하며, 하중형태보다는 하중방향에 더 큰 영향을 받음을 알 수 있다.⁽⁶⁾ ii) Al/GFRP 소켓재는 특정응력에서 항상 균열이 발생하지만, Al/GFRP 원공재는 동일 조건에서 균열이 발생하는 경우와 발생하지 않는 경우가 나타났다. 그러나 모든 경우 층간분리는 형성되었다. 그 원인을 ASC 모델을 통하여 규명할 수 있었고, 섬유층의 적층배향과 노치 주위의 응력분포가 층간분리 형상을 바꾸는 중요한 인자임을 알 수 있었다.⁽⁷⁾ iii) 균열길이와 층간분리 면적의 관계는 일정한 규칙성을 갖는다. 그러나 사이클과 층간분리 면적의 관계는 불규칙적이다. 따라서 균열길이와 층간분리 면적의 관계를 이용하여 층간분리 성장을 평가하는 층간분리 성장률(dA_D/da)을 제안할 수 있었다. 또한, 섬유가교수정 인자(β_{fs})에 층간분리 효과를 고려한 섬유가교효과 인자(F_{BE})를 제안할 수 있었다.⁽⁸⁾ iv) 층간분리 확장방향과 확장속도를 평가하기 위한 인자로 층간분리 응력확대계수범위(ΔK_{Del})를 제안하였다. 또한, 적층배향이 비대칭구조일 때 커플링강성(B_{ii})이 증가하고 그로 인해 층간분리 성장이 빨라짐을 알았다.⁽⁹⁾ 이상의 연구결과를 통하여 하이브리드 복합재의 층간분리 거동을 거시적으로 평가할 수 있었다. 위의 연구내용을 종합해보면, 층간분리 거동을 제어하는 첫 번째 인자는 균열(a) 임을 알 수 있다. 그러나 층간분리의 거동이 균

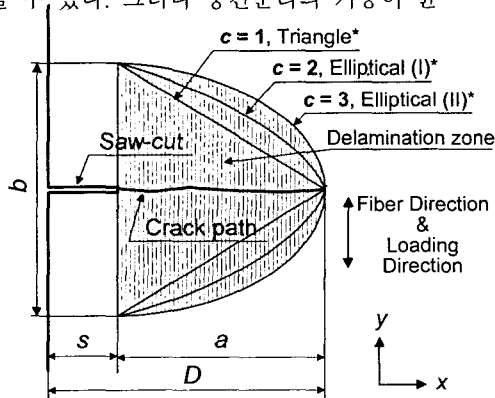
열에 의해서만 좌우되지는 않는다. Fig. 1에 제시한 바와 같이 층간분리 거동을 제어하는 두 번째 인자는 층간분리 폭(b)임을 알 수 있다. 그러나 이와 같은 균열길이(a)와 층간분리 폭(b)의 관계를 이용하여 층간분리 거동을 정량적으로 평가한 연구는 아직 찾아보기 힘들다.

따라서 본 연구에서는 균열길이와 층간분리 폭의 관계를 이용하여 층간분리 거동을 평가해보았다. 그 내용은 다음과 같다. 1) 균열길이와 층간분리 폭의 관계. 2) 층간분리 종횡비(b/a)와 층간분리 면적률($(A_D)/N(A_D)_{All}$)의 관계. 3) 층간분리 종횡비가 층간분리 형상계수(f_s)와 층간분리 성장률(dA_D/da)에 미치는 영향. 이상의 내용을 통하여 하이브리드 복합재의 층간분리 거동 평가에 필요한 새로운 인자들을 제안하고 적용결과들을 고찰해 보았다.

2. 하이브리드 복합재의 제작 및 실험 방법

2.1 하이브리드(Al/GFRP) 복합재의 제작

본 연구를 위해 제작한 하이브리드 복합재는 알루미늄 5052 시트와 단방향 유리섬유/에폭시 프리프레그(Prepreg)를 적층한 Al/GFRP 적층재이다. 알루미늄 5052 시트 2장 사이에 단방향 유리섬유/에폭시 프리프레그를 삽입한 2/1형태로 Al/GFRP 적층재를 제작하였다. 이때 선처리로 크롬산 아노다이징(Chromic acid anodizing) 처리를 수행하였다. 알루미늄 5052 시트와 단방향 유리섬유/에폭시 프리프레그의 기계적 특성은 Table 1, 2와 같다. 적층된 시험편은 핫-플레이트 프레스를 이용하여 경화하였다. 프리프레그 에폭시



* : Delamination contour shape

Fig. 1 Geometries of delamination zone

Table 1 Mechanical properties of Al5052 sheet

Alloy	Tensile strength (MPa)	Yielding strength (0.2% offset) (MPa)	Thickness (mm)
Al5052	283	228	0.5

Table 2 Mechanical properties of glass/epoxy prepreg

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

수지계의 Differential Scanning Calorimetry(DSC) 측정결과를 반영하여 경화 중 후가열 과정을 채택하였다. 따라서 화학적으로 더욱 안정적인 시험편을 제작할 수 있었다.

2.2 하이브리드(Al/GFRP) 복합재의 형상

본 연구에 사용된 하이브리드(Al/GFRP) 복합재의 형상은 Fig. 2와 같다. 휠커터를 이용하여 시험편의 하단부에 예비균열을 만들었다. 시험편의 물림부는 10.5 mm의 지름으로 4곳을 드릴링하였다. 유리섬유/에폭시 프리프레그의 두께 0.5 mm, 알루미늄 5052 시트의 두께 0.5 mm이므로 시험편의 총 두께는 2.0 mm이다.

2.3 피로시험 방법

피로시험은 굽힘 및 비틀림 피로시험기(TB-10, Shimadzu Co.)를 이용했다. 최대 모멘트는 98 N·m이며, 회전수는 2,000 rpm, 33.3 Hz이다. Al/GFRP 적층재는 인장-인장의 반복하중 조건에서는 매우 우수한 피로특성을 보인다. 반면, GFRP층이 압축강도에 약하기 때문에 인장-압축의 반복하중 조건에서는 피로특성이 현저히 저하한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 특성을 충분히 고려하기 위해 응력비(R)를 R = -1로 적용하

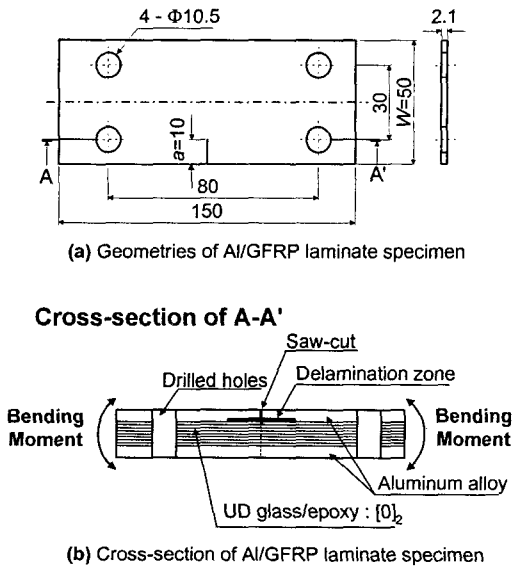


Fig. 2 Geometries of specimen and cross-section in Al/GFRP laminate

였다. 하중은 반복굽힘 모멘트 $M = 3.92 \text{ N}\cdot\text{m}$ 를 가하였다. 피로균열관찰은 접안 이동 측미계를 이용하여 100 배율에서 측정하였다. 또한, 알루미늄층과 유리섬유/에폭시층 사이에서 나타나는 층간분리 영역은 초음파 C-scan(Mi-SCOPE exla, Hitachi Co.)을 이용하여 해당 사이클의 층간분리 이미지를 촬영하였다. 이렇게 얻어진 이미지를 이용하여 층간분리 길이(a), 층간분리 폭(b), 층간분리 외곽선(c), 층간분리면적(A_b) 등의 값을 구하였다. 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위해 10개의 시험편을 실험하고 얻어진 평균값을 취하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 균열길이(a)와 층간분리 폭(b)의 관계

하이브리드(Al/GFRP) 복합재는 단일재 금속과 달리 사이클이 증가하여도 균열진전 속도의 급격한 변화가 나타나지 않는다.⁽⁶⁾ 또한, 부하후반 균열길이가 증가되고, 그로 인해 리가먼트가 감소되어도 부하초기와 거의 동일한 균열진전 속도를 보인다. 결국, Fig. 3과 같은 1차곡선 형태의 a-N 관계를 나타낸다. 이러한 현상은 섬유층의 응력 가교효과에 기인한다. 그러나 균열이 진전하면 알루미늄층과 유리섬유/에폭시층 사이에서는 층간분리영역이 발생, 성장한다. 층간분리는 사이클 수보다는 균열에 더 지대한 영향을 받는다.⁽⁸⁾ 따라서, 균열과 층간분리 사이에는 특정한 관계가 성립됨을 예측할 수 있다. Fig. 1에서와 같이 층

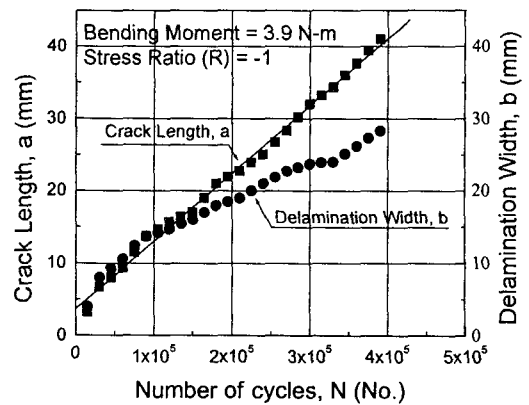


Fig. 3 Relationship among number of cycles, N, crack length, a and delamination width, b in Al/GFRP laminate

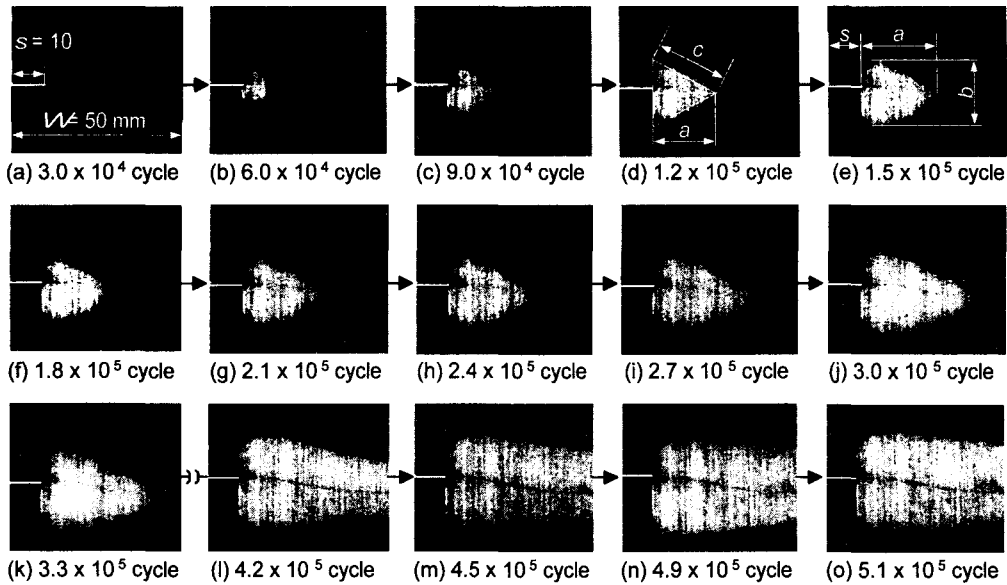


Fig. 4 Scan image of the delamination factors (a , b , c , A_D) in Al/GFRP laminate under cyclic bending moment

간분리 확장방향의 주축을 x , y 방향으로 할 때 x 방향에 해당되는 층간분리 길이는 균열길이와 일치함을 확인할 수 있었다. 그러므로 균열길이를 층간분리 길이로 적용하였다. 한편, y 방향에 해당되는 층간분리 폭(b)은 균열진전 방향과 수직인 방향으로 성장한다. 따라서 균열길이와 층간분리 폭의 관계를 이용하면 층간분리 거동에 대한 많은 정보를 얻을 수 있다. 예를 들어, 균열선단으로부터 층간분리 폭의 선단을 연결하면 층간분리 외곽선($2C$) 길이 및 층간분리 면적을 구할 수 있다. 그러나 층간분리 외곽선은 실험조건에 따라 Fig. 1과 같이 삼각형 ($c=1$), 타원형 I ($c=2$), 타원형 II ($c=3$)와 같이 다양하게 나타날 수 있다. 실제로는 삼각형과 타원형의 중간형태로 모호한 경우도 많다. 따라서 본 연구에서는 삼각형 모델($c=1$)로 적용하였다. 삼각형 모델을 적용하게 되면 균열길이와 층간분리 폭만으로 간단하게 외곽선 길이, 면적 등을 구할 수 있는 장점이 있다. 그러나 층간분리 폭의 직접적인 측정은 불가능하다. 따라서 층간분리 폭(b) 계산은 스캔 이미지를 이용하였다. 1.5×10^4 cycles 단위로 촬영된 층간분리 이미지를 이용해서 층간분리 폭을 실제거리로 환산해 적용하였다. Fig. 4는 층간분리 폭(b), 층간분리 외곽선 길이($2c$), 층간분리 면적(A_D) 등 층간

분리의 기본 요소의 측정을 위해 활용된 이미지를 3.0×10^4 cycles 단위로 나타낸 것이다. 본 연구에서는 층간분리 거동을 다음과 같은 가정을 통하여 단순화시켰다. 1) 균열과 층간분리 폭은 직선으로만 나타난다. 2) 층간분리 형태는 삼각형이다. 3) 균열을 중심으로 층간분리는 대칭을 이룬다. 이러한 가정 하에 Fig. 3과 Fig. 4를 이용하여 균열길이와 층간분리 폭의 관계를 규명해 보면 다음과 같다. Fig. 3에서 균열증가속도는 사이클 초기부터 후반까지 일정한 1차 곡선의 형태를 나타냈지만 층간분리 폭의 증가속도는 사이클이 증가될수록 저하되는 2차 곡선의 형태를 나타냈다. a 와 b 의 증가관계를 관찰하면, 초기부터 $N = 1.5 \times 10^5$ cycles까지는 $a = b$ 인 경향을 나타냈지만, $N = 1.5 \times 10^5$ cycles 이후부터는 $a > b$ 인 경향을 나타냈음을 알 수 있다. 층간분리 폭이 일정길이(약 18 mm)에 도달하면 이후부터는 성장속도가 느려진다. 이러한 현상은 Fig. 4 층간분리 이미지를 통해 관찰할 수 있다. Fig. 4 상단((a)~(e))은 $a = b$ 인 영역이고, 중간단((f)~(k))은 $a > b$ 인 영역이며, 하단((l)~(o))은 알루미늄층의 완전파단 후 층간분리 영역만 독립적으로 성장해 가는 영역이다. 알루미늄층의 완전파단으로 인해 균열진전이 종료되면 층간분리영역은 삼각형에서

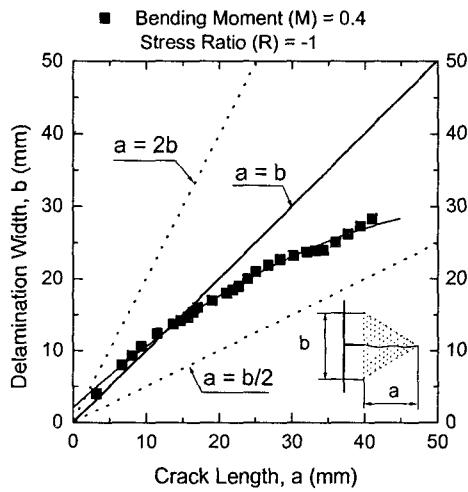


Fig. 5 Relationship between crack length, a and delamination width, b in Al/GFRP laminate under cyclic bending moment

사각형으로 점차 형태를 바꾼다. 이때 b 는 일정 상태이지만 층간분리 외곽선(c)은 확장해간다. 따라서, 균열진전 종료 후부터는 균열과 층간분리 면적의 관계로 구할 수 있는 층간분리성장률 (dA_D/da), 섬유가교효과인자(F_{BE}) 등⁽⁸⁾의 적용이 불가능하다. 그러므로 Fig. 3~Fig. 8의 그래프는 초기부터 균열진전 종료 때까지의 거동만을 적용하였다. 균열과 층간분리 폭의 관계를 더욱 구체적으로 관찰하기 위해 Fig. 5와 같이 제시하였다. a 와 b 의 관계는 초기 균열길이 0~20 mm ($a/W = 0.2 \sim 0.6$)일 때는 $a = b$ 선과 평행하게 진행하다가 이후 균열이 증가할수록 점차 $a > b$ 형태로 전환됨을 알 수 있다. 균열길이(a)가 20~30 mm ($a/W = 0.6 \sim 0.8$)일 때 층간분리 폭(b)은 균열길이의 80% 정도에 도달하고, 균열길이(a)가 30~40 mm ($a/W = 0.8 \sim 1.0$)일 때 층간분리 폭(b)은 균열길이(a)의 70% 정도에 도달하게 된다. 요약하면, 층간분리폭은 $a/W = 0.6$ 이상일 때부터 성장속도가 둔화되기 시작하고, 이후 $a/W = 0.8$ 이상일 때부터는 성장속도 둔화는 더욱 심해짐을 알 수 있다.

3.2 층간분리 종횡비(b/a)와 층간분리 면적률 $((A_D)_N/(A_D)_{All})$ 의 관계

앞 절에서 언급한 바와 같이 균열길이와 층간분리 폭의 관계는 사이클(N) 또는 정규 균열크기 (a/W)가 증가할수록 a 의 증가속도는 일정한데 비

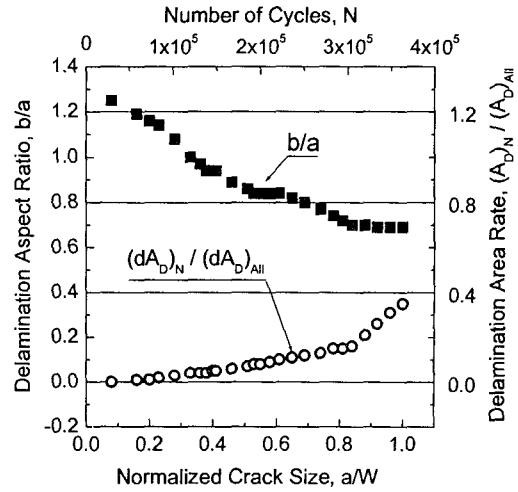


Fig. 6 Relationship among normalized crack size, a/W , delamination aspect ratio, b/a and delamination area ratio, $(A_D)_N/(A_D)_{All}$

해 b 의 증가속도는 감소하는 경향을 보임을 알 수 있었다. 따라서 본 절에서는 층간분리 길이방향(x 방향) 성장속도와 층간분리 폭방향(y 방향) 성장속도의 비를 구하고자, a 와 b 의 관계를 이용하여 층간분리 종횡비(b/a)라는 인자를 제안하였다. 또한, 층간분리를 관찰하는 전체 면적($(A_D)_{All}$)과 특정 사이클에서의 층간분리 면적($(A_D)_N$)의 비를 이용하여 층간분리 면적의 성장 속도를 구하고자, 층간분리 면적률($(A_D)_N/(A_D)_{All}$)이라는 인자를 제안해 보았다. Fig. 6은 정규균열크기(a/W)에 대한 층간분리 종횡비(b/a)의 관계 및 정규균열크기(a/W)에 대한 층간분리 면적률($(A_D)_N/(A_D)_{All}$)의 관계를 하나의 그래프로 나타낸 것이다. 층간분리 종횡비(b/a)는 a/W 가 증가할수록 거의 일정하게 감소한다. 그 이유는 3.1절에서와 같이 a/W 가 증가할수록 a 의 증가속도는 일정한데 비하여 b 의 증가속도는 서서히 감소하기 때문이다. 반면, 층간분리 면적률은 a/W 가 증가할수록 서서히 증가속도가 빨라진다. 그 원인은 a/W 가 증가할수록 b 의 증가속도는 감소하지만 a 의 증가속도는 a/W 에 관계없이 일정하므로 $(A_D)_N/(A_D)_{All}$ 은 꾸준히 증가한 것으로 보인다. 또한 b 의 증가속도가 산술급수적이거나 기하급수적이므로 $a/W = 0.8$ 이후 층간분리 면적이 급격히 증가함을 관찰할 수 있다. 한편, $(A_D)_N/(A_D)_{All}$ 의 값이 증가할수록 손상영역이 확장

되는 것이므로 균열진전 속도가 빨라질 것이라고 판단했으나 Fig. 3에 제시된 바와 같이 균열속도는 일정했다. 즉, 층간분리 면적크기가 균열속도를 좌우하는 인자는 아닌 것으로 판단된다.

3.3 층간분리 종횡비(b/a)가 층간분리 형상계수(f_s) 및 층간분리 성장률(dA_D/da)에 미치는 영향

3.2 절에서 a/W 가 증가할수록 b/a 값이 감소함을 알 수 있었다. 이러한 b/a 의 변화는 층간분리 형상계수(f_s) 및 층간분리 성장률(dA_D/da)을 결정하는데 중요한 변수로 작용할 것으로 판단된다. 따라서 본 절에서는 Song과 Kim⁽⁸⁾이 제안한 바 있는 층간분리 형상계수(f_s) 및 층간분리 성장률(dA_D/da)에 층간분리 종횡비(b/a)를 고려하면 어떤 변화가 나타날 것인지에 대해 고찰하고자 한다. 선행연구에서 층간분리 성장은 사이클보다는 균열에 더 의존적인 관계임을 확인할 수 있었다. 따라서 균열길이 증가에 대한 층간분리 면적 확장비율의 관계식을 층간분리 성장률(dA_D/da)이라 명명하고 식 (1)과 같이 제시하였다.

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

여기서, a 는 균열길이, A_D 는 층간분리 면적이다. A_D 에서 균열이 차지하는 면적은 미소하므로 고려하지 않았다. 또한, f_s 는 층간분리 형상계수이다. f_s 는 Fig. 1에 제시된 c 와 같이 층간분리 형태가 삼각형 ($c=1$)이거나 타원형I ($c=2$) 혹은 타원형II ($c=3$)인 경우에 따라 변화한다. 따라서 f_s 에 b/a 를 고려해 보면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} c = 1, f_{s1} &= \left(\frac{b}{a}\right) \left(1 - \frac{s}{D}\right) \\ c = 2, f_{s2} &= \left(\frac{b}{a}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{s}{D}\right)} \\ c = 3, f_{s3} &= \left(\frac{b}{a}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{s}{D}\right)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, b 는 층간분리 폭, s 는 소켓길이, D 는 소켓길이와 균열길이의 합이며, Fig. 1에 구체적으로 제시되어 있다. 또한, $c = 1, 2, 3$ 에서 삼각형 층간분리 형태일 때 $c = 1$, 타원형I 층간분리 형태일 때 $c = 2$, 타원형II 층간분리 형태일 때 $c = 3$ 을 적용했다. 이상의 식으로부터 구해진 f_s (f_{s1}, f_{s2}, f_{s3})가 a/W 의 증가에 따라 변화되는 양상을 고

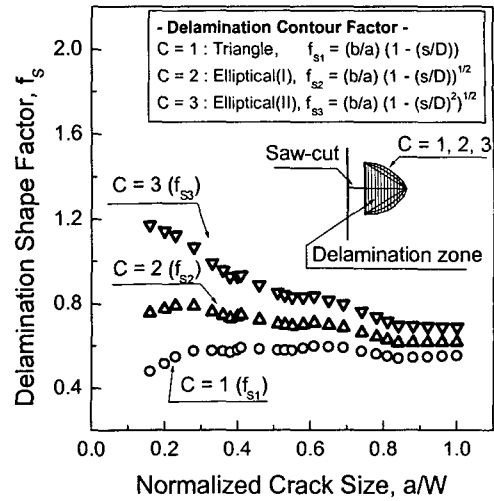


Fig. 7 Relationship between normalized crack size, a/W and three types delamination shape factors, f_{s1}, f_{s2}, f_{s3}

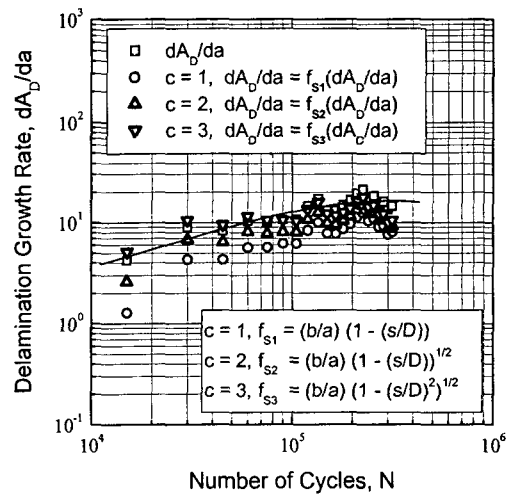


Fig. 8 Relationship between number of cycles, N and four types delamination growth rate, dA_D/da

찰하고자 Fig. 7과 같이 나타내었다. Fig. 7은 세 가지의 층간분리 형상계수(f_{s1}, f_{s2}, f_{s3})가 정규균열 크기(a/W)가 증가함에 따라 변화하는 경향을 관찰하기 위해 나타낸 그래프이다. Fig. 7에서 f_s 값은 타원형II(f_{s3}) > 타원형I(f_{s2}) > 삼각형(f_{s1}) 순서로 나타났다. 초기에 f_{s1} 과 f_{s3} 은 약 3배정도의 차이를 나타내지만, a/W 값이 증가할수록 그 편차가 서서히 감소함을 알 수 있다. 특히, $a/W =$

0.8 이상부터는 f_{S1} , f_{S2} , f_{S3} 의 변화는 거의 나타나지 않았고, 그 차이도 매우 작았다. 따라서 층간분리 형상이 층간분리 거동에 미치는 영향력은 초기에는 차이가 크게 나타나지만, 균열이 증가될수록 형상에 따른 영향력 차이가 점차로 작아짐을 알 수 있다.

이러한 세 가지 층간분리 형상계수(f_{S1} , f_{S2} , f_{S3})가 층간분리 성장률(dA_D/da) 거동에 미치는 영향을 고려해보기 위해 Fig. 8과 같은 그래프를 제시하였다. Fig. 8은 사이클 증가에 따른 층간분리 성장률 거동을 나타낸 그래프이다. dA_D/da 에 세 가지 f_S (f_{S1} , f_{S2} , f_{S3})를 고려한 경우와 f_S 를 고려하지 않은 경우로 나타났다. dA_D/da 에 f_S 를 고려한 경우가 dA_D/da 에 f_S 를 고려하지 않은 경우보다 전체적으로 dA_D/da 가 저하됨을 알 수 있다. 특히, 세 가지 f_S (f_{S1} , f_{S2} , f_{S3}) 중에서 f_{S1} 인 경우가 f_{S2} , f_{S3} 인 경우보다 dA_D/da 가 더 저하되었다. 즉, 삼각형의 층간분리 형태가 타원형의 층간분리 형태보다 dA_D/da 가 더 낮게 분포됨을 알 수 있다. 또한, 타원형 중에서도 f_{S2} 인 경우가 f_{S3} 인 경우보다 dA_D/da 값이 더 낮게 분포함을 알 수 있다. Fig. 7에서 f_{S1} , f_{S2} , f_{S3} 의 평균값을 구해보면 $f_{S1} = 0.57$, $f_{S2} = 0.70$, $f_{S3} = 0.87$ 이다. 이것을 Fig. 8과 비교해보면 다음과 같다. f_S 를 고려하지 않은 경우의 dA_D/da 와 f_S 를 고려한 경우의 dA_D/da 를 비교해보면, f_S 를 고려하지 않은 경우의 dA_D/da 를 100%라 할 때, f_{S1} 을 고려한 경우는 약 43% 정도, f_{S2} 를 고려한 경우는 약 30% 정도, f_{S3} 을 고려한 경우는 약 13% 정도의 dA_D/da 감소가 이루어졌음을 알 수 있다. 따라서 f_S 를 고려한 층간분리 성장률(dA_D/da)도 타원형II(f_{S3}) > 타원형I(f_{S2}) > 삼각형(f_{S1})의 순서임을 알 수 있다. Roebroeks 등⁽¹⁰⁾은 타원형의 층간분리 형상보다는 삼각형의 층간분리 형상이 섬유가교효과가 더 우수하다고 보고한 바 있다. 따라서, 섬유가교효과가 우수할수록 층간분리 성장률(dA_D/da)이 저하할 것이라고 판단되므로 타원형 층간분리 형상일 때보다 삼각형의 층간분리 형상일 때 dA_D/da 가 더 저하된다는 본 연구의 결과는 Roebroek의 연구결과와 잘 부합한다.

4. 결 론

본 연구에서는 균열길이와 층간분리 폭의 관계를 이용하여 하이브리드 복합재의 층간분리 거동

을 평가하였다. 그리고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) AI/GFRP 적층재의 균열(a)증가 속도는 사이클 초기부터 후반까지 일정한 1차 곡선 형태를 나타냈지만, 층간분리 폭(b) 증가 속도는 사이클이 증가될수록 저하되는 2차 곡선 형태를 나타냈다. 따라서, 균열길이와 층간분리 폭의 증가 관계는 사이클 초기에는 $a = b$ 의 관계를 유지하다가 사이클 중기 이후부터는 $a > b$ 인 관계를 나타냄을 알 수 있다.

(2) 층간분리 길이방향의 성장속도와 층간분리 폭방향의 성장속도 비를 구하고자 균열길이(a)와 층간분리 폭(b)의 관계를 이용하여 층간분리 종횡비(b/a)라는 인자를 제안하고 검토해 보았다. 그 결과, 층간분리 종횡비(b/a)는 정규균열크기(a/W)가 증가할수록 감소하였음을 알 수 있었다.

(3) 층간분리 면적의 성장 속도를 구하고자 층간분리 면적률($(A_D)N/(A_D)_{All}$)이라는 인자를 제안하고 검토해 보았다. 그 결과, 층간분리 면적률($(A_D)N/(A_D)_{All}$)은 a/W 가 증가할수록 증가속도가 빨라짐을 알 수 있었다.

(4) 층간분리 면적률($(A_D)N/(A_D)_{All}$)이 증가하면 손상영역의 확장으로 인해 균열진전속도는 더욱 빨라질 것으로 예상했으나 실제로는 부하초반부터 후반까지 거의 일정했다. 따라서 층간분리 면적크기가 균열속도를 좌우하는 인자는 아닌 것으로 판단된다.

(5) 층간분리 형태가 삼각형이거나 타원형일 때 층간분리 형상계수(f_S)는 변화한다. 층간분리 형상계수(f_S) 값은 타원형II(f_{S3}) > 타원형I(f_{S2}) > 삼각형(f_{S1}) 순으로 나타났다. 부하초기에는 f_{S1} , f_{S2} , f_{S3} 사이의 편차가 크게 나타났으나 균열이 증가될수록 그 편차가 줄어들고 값도 일정해져갔다. 따라서 층간분리 형상이 층간분리 거동에 미치는 영향력은 초기에는 차이가 크게 나타나지만, a/W 가 증가될수록 층간분리 형상에 따른 영향력 차이는 점차로 작아짐을 알 수 있다.

(6) 층간분리 형상계수(f_{S1} , f_{S2} , f_{S3})가 층간분리 성장률(dA_D/da) 거동에 미치는 영향을 고려해 본 결과, 삼각형의 층간분리 형태가 타원형의 층간분리 형태보다 dA_D/da 가 더 저하됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 삼각형 층간분리가 타원형 층간분리보다 섬유가교효과가 더 우수하다는 Roebroek의 연구결과와 잘 부합한다.

후기

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

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, The Netherlands.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) Yoon, H. K., Cheng, H. Y., Park, W. J. and Hue, C. W., 1995, "The Behavior of Crack Growth Rate for APAL and CPAL Patched with FRP Laminate in Aluminum Alloy Plate," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 19, No. 4, pp. 253~272.
- (5) Zhi-He Jin and Yiu-Wing Mai, 1997, "Residual Strength of an ARALL Laminate Containing a Crack," *Journal of Composite Materials*, Vol. 31, No. 8, pp. 746~761.
- (6) Sam-Hong Song and Cheol-Woong Kim, 2001, "The Delamination and Fatigue Crack Propagation Behavior in Al5052/AFRP Laminates Under Cyclic Bending Moment," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 25, No. 8, pp. 1277~1286.
- (7) Sam-Hong Song and Cheol-Woong Kim, 2003, "Fatigue Crack and Delamination Behavior in the Composite Material Containing a Saw-cut and Circular Hole (I) -Aramid Fiber Reinforced Metal Laminates-," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 27, No. 1, pp. 58~65.
- (8) Sam-Hong Song and Cheol-Woong Kim, 2003, "The Analysis of Fatigue Behavior Using the Delamination Growth Rate (dA_D/da) and Fiber Bridging Effect Factor (F_{BE}) in Al/GFRP Laminates," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 27, No. 2, pp. 317~326.
- (9) Sam-Hong Song and Cheol-Woong Kim, 2003, "Analysis of Delamination Behavior on the Stacking Sequence of Prosthetic Foot Keel in Glass Fiber Reinforced Laminates," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 27, No. 4, pp. 623~631.
- (10) Roebroeks, G. H. J. J., 1987, "Constant Amplitude Fatigue of ARALL-2 Laminates," Report LR-539, Dept. of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, Netherlands.