

하이브리드 복합재료의 섬유배향각이 피로균열 및 층간분리 거동의 관계에 미치는 영향

송삼홍[†] · 김철웅^{*}

(2003년 7월 24일 접수, 2001년 1월 9일 심사완료)

The Effect of Fiber Stacking Angle on the Relationship Between Fatigue Crack and Delamination Behavior in a Hybrid Composite Materials

Sam-Hong Song and Cheol-Woong Kim

Key Words: Hybrid Composite Materials(하이브리드 복합재료), Fatigue Crack(피로균열), Delamination(층간분리), Fiber Stacking Angle(섬유배향각), Crack Growth Rate(균열 성장률, da/dN), Stress Intensity Factor Range(응력확대계수범위, ΔK), Delamination Area(층간분리 면적, A_D), Fiber Bridging Effect(섬유가교효과)

Abstract

The hybrid composite material (Al/GFRP laminates) are applied to the fuselage and wing in a aircraft. Therefore, Al/GFRP laminates suffer from the cyclic bending moments. This study was to evaluate the effect of fiber stacking angle on the fatigue crack propagation and delamination behavior using the relationship between crack growth rate (da/dN) and stress intensity factor range (ΔK) in Al/GFRP laminates under cyclic bending moment. The variable delamination growth behavior in case of three different type of fiber orientations, i.e., [Al/0₂/Al], [Al/+45₂/Al] and [Al/90₂/Al] at the interface of Al layer and glass fiber layer was measured by ultrasonic C-scan images. As results of this study, It represent that the delamination shape should turns out to have more effective characteristics on the fiber stacking angle. The extension of the delamination zone in case of [Al/+45₂/Al] and [Al/90₂/Al] were not formed along the fatigue crack profile. The shape of delamination zone depend on fiber stacking angle and the variable type with the delamination contour decreased non-linearly toward the crack tip at the Al layer.

1. 서론

알루미늄 시트와 유리섬유강화 플라스틱(GFRP)을 적층한 하이브리드 복합재료(이하 Al/GFRP 적층재)는 기존에 항공기 재료로 사용되던 Al2024-T3 및 Al7075-T6에 비해 피로특성이 매우 우수하고 가볍다. 따라서 Al/GFRP 적층재는 최신 항

공기의 노치민감부나 피로하중을 많이 받는 요소에 적용하고 있다. 또한, Al/GFRP 적층재는 이방성 재료의 특성상 항공기 부품에 가해지는 하중 패턴에 따라 섬유배향각을 조절할 수 있는 장점이 있다. 기존의 CFRP, GFRP 및 AFRP 적층재의 섬유배향각에 따른 기계적 특성에 관련된 연구는 이미 다양하고 심층적으로 진행되어 왔다. 예를 들어, Choi와 Kinloch⁽¹⁾는 다방향 CFRP 적층 복합재료의 층간파괴거동 연구에서 수정된 선형해석법에 의해 적층조건에 따른 해석을 수행한 바 있다. Kim 등⁽²⁾은 CFRP와 AFRP를 적층시킨 복합재를 이용하여 적층배향에 따른 기계적 특성

[†] 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail : shsong@korea.ac.kr

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

^{*} 회원, 고려대학교 공학기술연구소 및
인덕대학 기계시스템

변화를 연구한 바 있다. Lee 등⁽³⁾은 최적화 모델과 설계보정계수 등을 사용하여 혼합 적층 복합재료판의 최적설계에 대한 연구를 수행한 바 있다. 또한, Song과 Kim⁽⁴⁾은 GFRP 적층재의 적층배향에 따른 피로균열 및 층간분리 거동을 대변형의 반복-굽힘 모멘트 하에서 수행한 바 있다. 한편, 하이브리드 복합재에 해당되는 Al/GFRP 적층재의 경우, 피로거동과 층간파괴에 대한 연구는 이미 다양하게 보고된 바 있으나 거의 대부분의 연구가 하중축과 섬유축이 평행한 단방향 Al/GFRP 적층재로 수행된 연구결과들이다. 따라서 섬유배향각에 따른 Al/GFRP 적층재의 피로거동 및 층간분리에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 세 가지 각도의 섬유배향을 갖는 Al/GFRP 적층재 ([Al. sheet/GFRP Prepreg/Al. sheet] ; [Al/0₂/Al], [Al/+45₂/Al] 및 [Al/90₂/Al])를 이용하여 반복-굽힘 모멘트 시험을 수행하고 섬유배향각에 따른 균열길이(a)와 피로수명(N)의 관계, 균열성장률(da/dN)과 응력확대계수범위(ΔK)의 관계를 고찰하였다. 수행된 세부적인 연구내용은 다음과 같다. 1) 섬유배향각에 따른 균열길이(a) 및 피로수명(N)의 관계. 2) 섬유배향각에 따른 층간분리거동. 3) 섬유배향각에 따른 균열성장률(da/dN)과 응력확대계수범위(ΔK)의 관계 고찰이다.

2. Al/GFRP 적층재의 제작 및 실험방법

2.1 Al/GFRP 적층재 제작

Al/GFRP 적층재는 Fig. 1과 같이 A15052 판재와 유리섬유(S-glass) 프리프레그(Prepreg)를 2/1의 형태로 적층하였다. 이때 선처리로 A15052의 접

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 A15052

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

착면을 크롬산 아노다이징(chromic acid anodizing) 처리하였다. GFRP 프리프레그는 Fig. 1(b)의 #2에 제시한 바와 같이 [0]₂, [+45]₂, [90]₂의 섬유배향각으로 알루미늄층과 적층하였다. 본 연구에 사용된 유리섬유의 기계적 특성은 Table 1과 같고 A15052의 기계적 특성은 Table 2와 같다. 적층된 시험편은 핫 플레이트-프레스를 이용하여 경화하였다. 화학적으로 안정된 시험편을 얻기 위해 프리프레그 수지계의 DSC 측정 결과를 반영하여 후가열 과정을 채택하였다.

2.2 Al/GFRP 시험편의 형상

Fig. 1(a)는 반복-굽힘 모멘트 시험에 사용된 Al/GFRP 적층재의 형상과 치수이다. 휠커터를 이용하여 시험편의 중앙 하단부에 예비균열($a = 10$ mm)을 만들고 시험편의 물림부는 10.5 mm의 지름으로 드릴링 하였다. Fig. 1(b)는 본 연구에 적

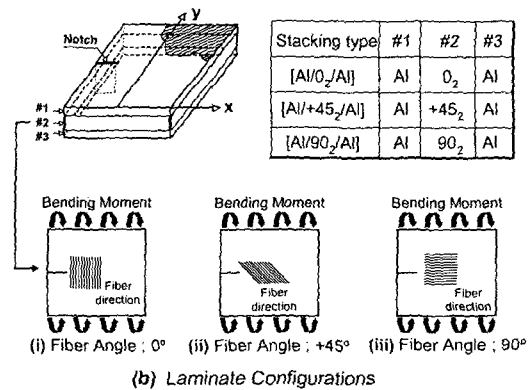
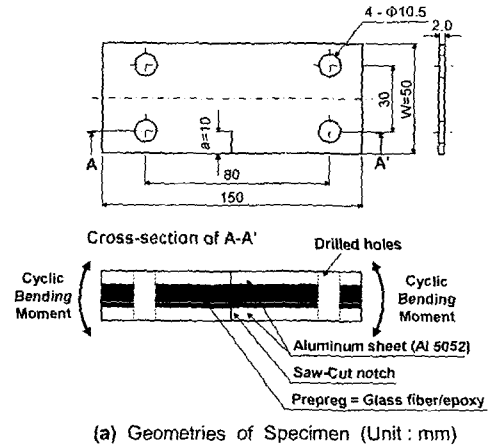


Fig. 1 Al/GFRP laminates specimen and three different laminate configurations

용된 시험편의 3가지 형태를 나타낸 것이다. 섬유 배향각을 각각 0° , $+45^\circ$, 90° 로 하여 [Al/0₂/Al], [Al/+45₂/Al] 및 [Al/90₂/Al]로 제작하였다.

2.3 피로시험 방법

본 실험에 사용된 시험기기는 굽힘 및 비틀림 피로시험기(TB-10, Shimadzu Co.)이다. 최대 모멘트는 98 N-m이며, 분당회전수는 2,000 rpm이고 33.3 Hz, 응력비(R) = -1이다. 하중은 반복 굽힘모멘트를 가하였고 모멘트 값을 4.9 N-m로 적용하였다. 피로균열 관찰은 접안 이동 측미계를 이용하여 100 배율로 피로균열을 관찰하였다. 또한, Al/GFRP 적층재의 층간분리영역은 초음파 C-스캔 이미지 촬영을 통하여 Fig. 1(b)의 #1과 #2의 경계면에서 발생하는 층간분리 영역의 형상과 면적, 섬유의 상태 및 파단 여부 등을 관찰하였다. 본 연구에서는 정량적인 결과를 도출하기 위해 동일조건에서 5개씩의 시험편을 사용하여 얻은 평균값을 실험결과에 적용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 섬유배향각에 따른 균열길이(a)와 피로수명(N)의 관계

Song과 Kim⁽⁵⁾은 Al/GFRP 적층재와 같은 섬유 강화 금속적층재에 반복하중이 작용할 때 섬유가 교호파로 인하여 알루미늄층의 균열확장은 저지되고 결과적으로 단일재 알루미늄에 비해 피로수명이 10배 이상 향상된다고 보고하였다. 한편, 굽힘 모멘트의 진폭크기가 피로수명에 미치는 영향에 관한 연구⁽⁶⁾에서 모멘트의 진폭이 증가할수록 피로수명은 단축되지만, 진폭간의 피로수명 차는 적어짐을 증명하였다. 또한, 단일금속재와 달리 부하초기부터 말기까지 일정한 균열진전속도가 나타난다고 보고하였다. 이러한 현상은 섬유가교효과에 기인한다. 그러나 피로하중 하에서 섬유가교효과를 방해하는 두 가지 인자가 있다. 첫째, 섬유층의 파단. 둘째, 층간분리현상이다. 섬유가교효과 메커니즘은 금속층에서 섬유층으로 응력분산을 야기시켜 금속층 균열선단의 K 값 감소를 촉진하는 현상이다. 그러나 섬유층의 파단은 금속층에서 섬유층으로의 응력분산을 원활하지 못하게 한다. 층간분리현상 또한 주기적인 계면전단응력에 의해 금속층과 섬유층의 경계면이 분리

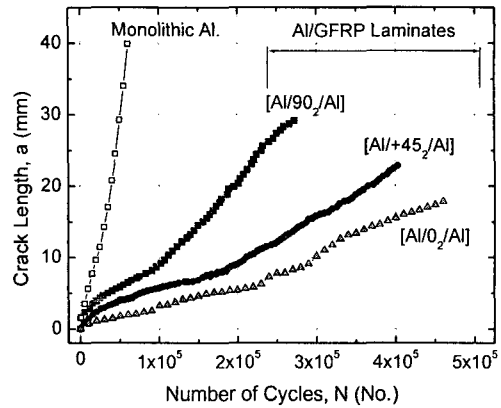


Fig. 2 The fatigue life due to the different fiber stacking angle in Al/GFRP laminates under cyclic bending moment

되는 현상으로 층간의 결합강도를 저하시키고 응력전달을 원활하지 못하게 한다. 본 연구에서는 이러한 두 가지 섬유가교효과 방해 인자 중에서 층간분리현상에 중점을 두었다. 따라서 섬유층 파단에 따른 영향을 배제하기 위해 섬유층 파단이 발생하지 않는 응력레벨(4.9 N-m)을 택하여 실험을 수행하였다. Fig. 2는 단일재 알루미늄과 3가지 섬유배향각에 따른 Al/GFRP 적층재의 균열길이(a)와 피로수명(N)의 관계를 나타낸 그래프이다. 단일재 알루미늄은 6×10^4 cycle의 짧은 피로수명을 보이는데 비하여 Al/GFRP 적층재는 전체적으로 2.8×10^5 cycle 이상의 긴 피로수명을 나타냈다. 그러나 섬유배향각에 따른 균열길이 증가속도는 큰 차이를 보인다. [Al/0₂/Al]인 경우는 사이클의 증가에 따라 거의 일정한 균열진전 양상을 보이며, 가장 안정적이고 긴 피로수명을 나타냈다. [Al/+45₂/Al]은 [Al/0₂/Al]인 경우에 비해 피로수명은 저하되었지만 [Al/0₂/Al]와 같이 안정적 피로거동을 나타냈다. 반면, [Al/90₂/Al]의 경우는 하중축과 섬유축이 수직을 이루고, 알루미늄층의 균열방향과 섬유방향이 평행하므로 섬유가교효과를 거의 기대할 수 없는 적층형태이다. 그러나, 단일재 알루미늄의 피로수명과 [Al/0₂/Al]의 피로수명의 중간정도의 수명을 나타냈다. 이 결과는 하중축과 섬유축이 수직관계인 [Al/90₂/Al]인 경우에도 미약하게 섬유가교효과가 나타났음을 보여준다. 이상의 결과를 층간응력 분포와 비교하기 위해 Fig. 3과 같이 제시하였다. Fig. 3은

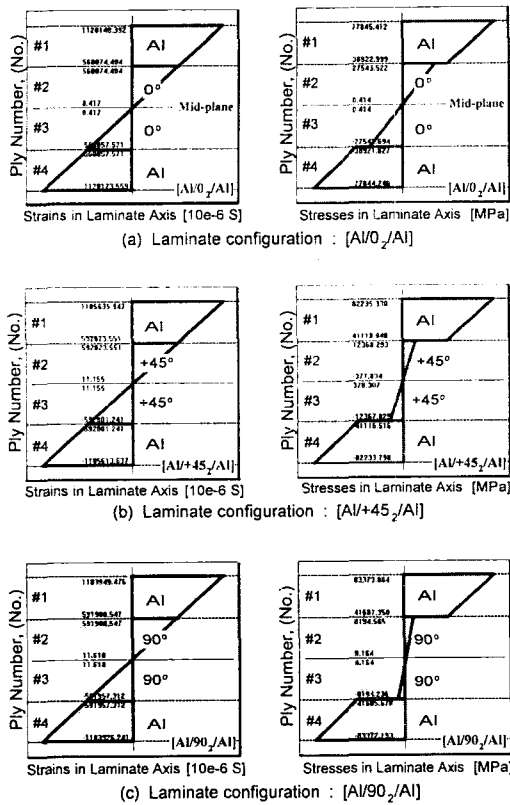


Fig. 3 Stresses and strains distribution on the stacking sequence $[Al/0_2/Al]$, $[Al/+45_2/Al]$ and $[Al/90_2/Al]$ calculate by the LACOM

Al/GFRP 적층재의 섬유배향각에 따른 층간의 응력 및 변형률의 분포를 고전적층이론(CLT)을 바탕으로 해석한 결과이다. 해석을 수행하기 위해 복합재료 해석 프로그램인 LACOM을 이용하였다. Fig. 3에서 층간응력 분포를 살펴보면 알 수 있듯이 $[Al/0_2/Al]$ 일 때 알루미늄층과 섬유층간의 응력구배가 가장 작게 나타났고, $[Al/90_2/Al]$ 일 때 가장 크게 나타났다. 따라서 $[Al/90_2/Al]$ 의 경우, 섬유층이 알루미늄층의 응력을 $[Al/0_2/Al]$, $[Al/+45_2/Al]$ 일 때에 비해 효과적으로 분담하지 못했고, 그로 인해 피로수명이 대폭 감소된 것으로 판단된다. 이러한 층간응력구배 차로 인한 피로수명의 감소원인은 Bucci 등⁷⁾의 보고에서와 같이 하중축과 섬유축 사이에 이루는 각이 증가될수록 피로수명은 저하된다는 내용과 연관된다. 또한 Song과 Kim⁴⁾이 보고한 바와 같이 $[0_2]$ 에 비해

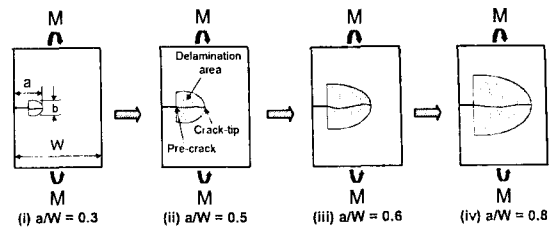


Fig. 4 Delamination extension type on the unidirectional Al/GFRP laminates under cyclic bending moment

$[+45_2]$, $[90_2]$ 일 때 하중방향에 대한 커플링강성(B_{ij}) 값이 크게 나타나기 때문에 $[+45_2]$, $[90_2]$ 인 경우, 부하가 진행될수록 피로에 취약한 불안정구조가 심화된다. 한편, Fig. 3에서 (b) $[Al/+45_2/Al]$ 과 (c) $[Al/90_2/Al]$ 간의 응력구배 차는 거의 비슷하다. 그러나 피로수명에 있어서 두 경우가 큰 차이를 보이는 이유는 섬유가교효과를 지배하는 층간분리의 거동과 밀접한 관련이 있는 것으로 생각된다.

3.2 섬유배향각에 따른 층간분리 거동

선행된 연구⁶⁾에서 단방향 섬유강화 금속적층재에 반복-굽힘 모멘트가 작용할 경우, Fig. 4와 같이 균열선단을 기준으로 균열후방에는 반타원형상으로 알루미늄층과 섬유층의 계면에 층간분리 영역이 발생하고, 이러한 층간분리 영역은 알루미늄층과 섬유층 사이에 불연속면을 형성하여 응력 전달을 저해하는 요인으로 작용한다고 보고하였다. 그리고, 이러한 현상을 균열성장률(da/dN)과 응력확대계수범위(ΔK)의 관계, 층간분리면적(A_D)과 사이클(M)의 관계 등을 이용하여 규명한 바 있다. 그러나 3.1절에서 언급한 바와 같이 섬유배향각에 따른 층간의 응력분포와 피로수명의 관계는 일정한 규칙성을 찾을 수가 없는데 이는 층간분리 거동이 섬유배향각에 절대적인 영향을 받기 때문이다. 본 연구에서는 섬유배향각에 따른 층간분리 거동을 고찰하고자 Fig. 5와 같은 C-스캔 이미지를 제시하였다. 선행된 연구⁸⁾에서 Fig. 5에 제시한 균열길이(a)와 층간분리 폭(b)의 관계를 검증하기 위해 층간분리 종횡비(b/a)를 제안하고 해석을 수행한 바 있다. Fig. 5(a) $[Al/0_2/Al]$ 의 경우, 선행된 연구결과⁶⁾와 같이 전형적인 Fig. 4의 거동을 나타냈다. 그러나 Fig. 5(b) $[Al/+45_2/Al]$, (c) $[Al/90_2/Al]$ 는 섬유배향각의 영향으로 $[Al/0_2/Al]$

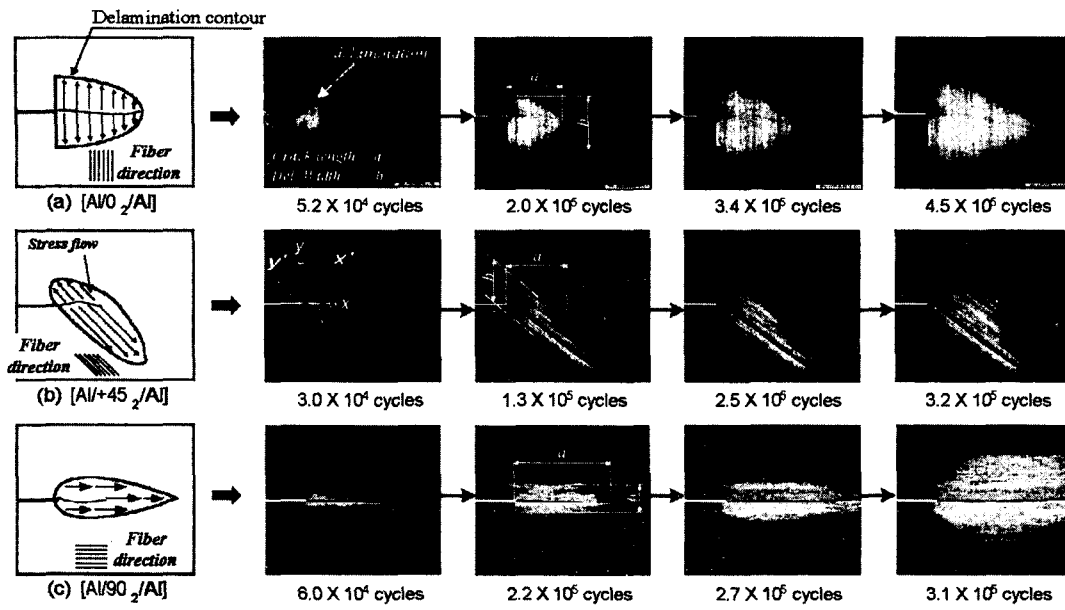
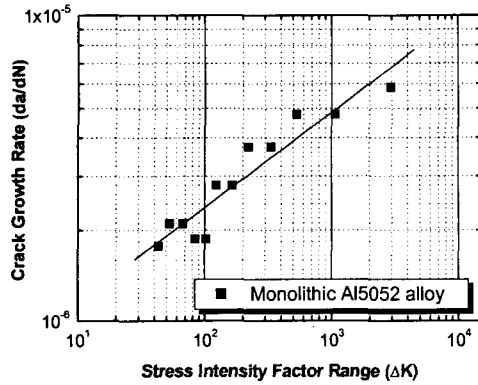


Fig. 5 Ultrasonic C-scan image of the delamination type on three different fiber orientations, i.e., $[Al/0_2/Al]$, $[Al/+45_2/Al]$ and $[Al/90_2/Al]$ in Al/GFRP laminates under cyclic bending moment

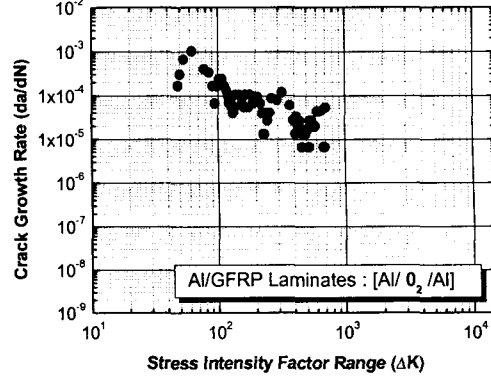
의 경우와 다른 층간분리 거동을 나타냈다. 알루미늄층 균열선단으로부터 섬유층으로의 응력전달은 섬유배향각을 따라 이루어졌고, 그 결과 층간분리 형상도 지대한 영향을 받았음을 알 수 있다. Fig. 5(a), (b)를 비교해 보면, (b) $[Al/+45_2/Al]$ 의 경우가 (a) $[Al/0_2/Al]$ 의 경우보다 층간분리 폭(b)이 작게 나타남을 알 수 있다. 그러므로 $[Al/0_2/Al]$ 의 경우가 $[Al/+45_2/Al]$ 의 경우보다 층간분리형성에 소비된 에너지가 더 많다고 할 수 있다. 반대로, $[Al/0_2/Al]$ 의 경우가 $[Al/+45_2/Al]$ 의 경우보다 균열진전에 소비되는 에너지의 양이 더 적다고 할 수 있다. 그 결과, $[Al/0_2/Al]$ 가 $[Al/+45_2/Al]$ 보다 피로수명이 더 길게 나타났음을 Fig. 2 그래프를 통해 관찰할 수 있었다. Fig. 5 좌측에 제시한 섬유배향각에 따른 응력전달에서 θ 의 관계를 살펴보면, θ 값이 증가할수록 층간분리 폭은 감소하고, $\theta = 90^\circ$ 일 때 최소가 됨을 알 수 있다. 따라서 이 경우, 대부분의 에너지가 균열진전에 소비되었으므로 이 경우 피로수명이 가장 짧았다고 판단된다. 그러나 층간분리 폭(b)만으로 Fig. 5(a), (b)를 비교하기에는 한계성이 있다. 왜냐하면 층간분리 폭(b)은 하중축과 섬유축이 평행하게 배열되어 있을 때만 균열거동에

의존적인 관계를 갖게 되고, 하중의 이력을 보여주는 척도가 되기 때문이다.⁽⁸⁾ 한편, Roebroeks⁽⁹⁾는 균열선단 후방으로부터 약간 떨어진 곳에서 층간분리가 시작된다고 보고하였고, Marissen⁽¹⁰⁾은 균열선단에서의 층간분리는 변위의 경감을 허용하기 때문에 섬유층에 약간의 부가적인 압축응력만 발생한다고 보고하였는데, 이는 모두 하중축과 섬유축이 평행한 경우에만 성립되는 이론들이다. 따라서, 이상의 메커니즘은 Fig. 5(b), (c)에는 적합하지 않다. 하중축과 섬유축이 평행하지 않을 경우 층간분리 거동은 균열거동에 비의존적인 관계를 나타내고, 두 축이 이루는 각이 증가할수록 섬유가교효과는 저하된다. 따라서 섬유배향각에 따른 층간분리 폭(b)의 거동은 Fig. 5(a)와는 다른 메커니즘으로 성장하므로 Roebroeks과 Marissen의 보고는 섬유축과 하중축이 평행한 경우에 국한된다고 할 수 있다.

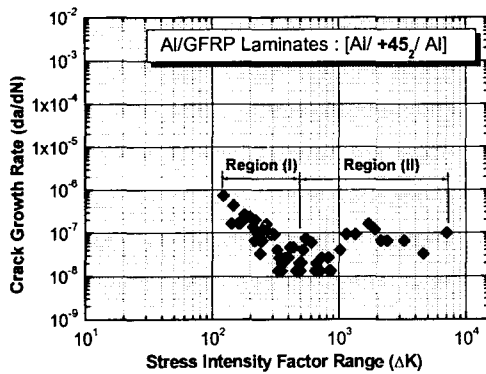
이상의 내용을 정리하면 다음과 같다. 1) 섬유축과 하중축이 평행한 경우(Fig. 5(a))는 층간분리 거동은 균열거동에 영향을 받는 의존적인 관계가 성립되지만, 섬유축과 하중축이 평행하지 않은 경우(Fig. 5(b),(c))는 균열과 층간분리 거동은 비의존적 관계가 된다. 2) Fig. 5(b),(c)의 경우,



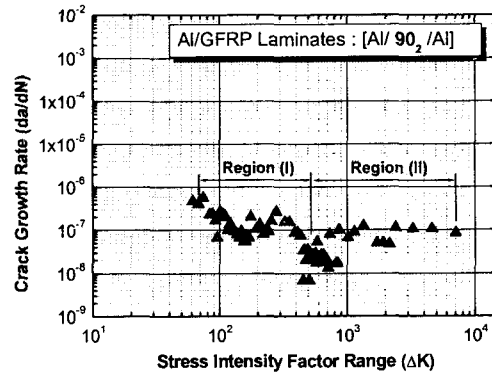
(a) Monolithic Al5052 alloy



(b) Al/GFRP laminates : [Al/0₂/Al]



(c) Al/GFRP laminates : [Al/+45₂/Al]



(d) Al/GFRP laminates : [Al/90₂/Al]

Fig. 6 Relationship between crack growth rate (da/dN) and stress intensity factor range (ΔK) in monolithic Al5052 sheet and Al/GFRP laminate under cyclic bending moment at 4.9 N-m

오히려 섬유배향각이 층간분리거동에 절대적인 영향을 미친다. 따라서, 기존 연구⁽⁸⁻¹⁰⁾에서 고려해 온 균열길이(a)와 층간분리 폭(b)의 관계는 적용할 수 없다. 섬유축과 하중축이 이루는 각이 섬유가교효과에 미치는 영향에 대한 정량적인 연구가 추후에 이루어져야 한다.

3.3 섬유배향각에 따른 균열성장률(da/dN)과 응력확대계수범위(ΔK)의 관계

Al/GFRP 적층재의 피로거동은 층간의 응력분포와 섬유배향각에 따른 층간분리 거동에 지대한 영향을 받음을 3.1절과 3.2절을 통하여 알 수 있었다. 따라서 본 절에서는 섬유배향각이 균열성장률(da/dN)과 응력확대계수범위(ΔK)에 어떠한 영향을 미치는지 구체적으로 고찰해보고자 한다. Fig. 6(a)에 제시한 바와 같이 단일재 알루미늄은 Paris 식을 만족하는 선형적인 형태를 나타냈

다. 그러나 Al/GFRP 적층재는 섬유배향각에 따라 다소 다른 경향을 나타냈다. [Al/0₂/Al]의 경우(Fig. 6(b)), 부하가 지속될수록 균열성장률은 서서히 감소하는 경향을 나타냈다. [Al/+45₂/Al] 및 [Al/90₂/Al]의 경우(Fig. 6(c), (d))는 부하초기 균열성장률이 감소하다가 부하중기 이후 약간 증가하는 경향을 나타냈다. 이러한 경향은 Takamatsu 등⁽¹¹⁾의 연구결과와 비교·검토해 볼 필요가 있다. Takamatsu 등은 인장-압축을 받는 [Al/0₂/Al] 적층재의 da/dN - ΔK 의 관계에서, 부하초기 균열성장률이 감소하는 구간(영역I)과 부하후반 균열성장률이 증가하는 구간(영역II)으로 구분하였다. 영역II가 균열성장률이 증가하는 이유는 부하후기 섬유의 파단이 발생했기 때문에 알루미늄층에서 섬유층으로 응력전달이 용이하지 못한 것이라고 보고하였다. 본 연구에서는 섬유의 파단은 발생하지 않았다. 따라서 Fig. 6(b), (c), (d)와 같은 경향

이 나타난 이유를 섬유배향각에 따른 층간응력 분포 및 층간분리 거동과 연계해 보면 다음과 같다. $[Al/0_2/Al]$ 의 경우, 균열성장률이 점차로 저하되는 이유는 Fig. 3(a)에 제시한 바와 같이 변형률 및 응력의 분포가 대칭을 이루고 있고, 알루미늄층과 섬유층간의 응력구배가 적어서 응력전달이 매우 우수하게 나타났기 때문이다. 또한, 커플링강성도 부하의 진행에 관계없이 $B_{ij} = 0$ 를 나타내므로 적층재 앞뒷면의 균열양상은 거의 같게 나타났다. 따라서 일정 에너지를 층간분리성장에 소비할 수 있었고 그로 인해 안정적인 섬유가교효과를 유도할 수 있어서 균열성장률은 꾸준히 감소된 것이라고 판단된다. 그러나 $[Al/+45_2/Al]$ 와 $[Al/90_2/Al]$ 의 경우는 Fig. 3(b), (c)에 제시한 바와 같이 알루미늄층과 섬유층간에 응력구배가 심하다. 또한, 부하가 진행되고 균열이 진전될수록 커플링강성(B_{ij})이 증가하는 적층구조이다. 커플링 강성증가는 적층재의 비대칭화를 심화시키고 그로 인해 적층재의 앞뒷면 균열진전거동은 큰 차이를 나타냈다. 한편, Fig. 6(c) $[Al/+45_2/Al]$, (d) $[Al/90_2/Al]$ 의 경우, 부하중기 이후 균열성장률이 약간의 증가추세를 나타내는 이유는 다음과 같다. 1) 하중방향과 평행한 섬유배향각이 존재하지 않기 때문에 섬유가교효과가 저하된다. 2) 따라서, 균열거동과 층간분리거동은 비의존적인 관계가 된다. 3) 균열 증가는 하중방향에 수직인 방향으로 증가하지만 층간분리 증가는 섬유방향으로 증가를 지속하므로 부하가 진행될수록 균열선단과 층간분리선단의 거리가 멀어져 상호영향력은 $[Al/0_2/Al]$ 에 비해 매우 미약해진다. 4) 층간분리영역이 균열선단을 앞서는 경우가 발생할 때도 있다. 따라서 이 경우 균열주위에서의 섬유가교효과는 급격히 저하된다. 이상의 메커니즘이 복합적으로 발생하여 Fig. 6(c) $[Al/+45_2/Al]$, (d) $[Al/90_2/Al]$ 의 경우에 부하중기 이후 균열성장률이 서서히 증가하는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 하이브리드 복합재(Al/GFRP 적층재)의 섬유배향각이 피로균열 및 층간분리 거동의 관계에 미치는 영향에 대해 고찰하기 위해 피로시험을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 섬유배향각에 따른 피로수명(N)은 $[Al/0_2/Al] > [Al/+45_2/Al] > [Al/90_2/Al]$ 의 순으로 나타났다. $[Al/90_2/Al]$ 의 경우 하중축과 섬유축이 수직을 이루므로 섬유가교효과를 거의 기대할 수 없는 적층형태지만 미약하게 섬유가교효과가 나타났음을 층간응력분포 해석을 통하여 평가할 수 있었다.

(2) 섬유배향각에 따른 층간분리 거동에서 섬유축과 하중축이 평행한 경우, 층간분리 거동은 균열거동에 영향을 받는 의존적인 관계가 성립되지만, 섬유축과 하중축이 평행하지 않은 경우, 균열과 층간분리 거동은 비의존적 관계가 되며, 오히려 섬유배향각이 층간분리거동에 절대적인 영향을 미친다. 따라서 이 경우, 균열길이(a)와 층간분리 폭(b)의 관계는 적용할 수 없다.

(3) 섬유배향각에 따른 균열성장률(da/dN)과 응력확대계수범위(ΔK)의 관계에서 $[Al/0_2/Al]$ 의 경우, 부하가 지속될수록 균열성장률은 서서히 감소하는 경향을 나타냈고 $[Al/+45_2/Al]$, $[Al/90_2/Al]$ 의 경우, 부하초기 균열성장률이 감소하다가 부하중기 이후 약간 증가하는 경향을 나타냈다.

(4) $[Al/0_2/Al]$ 의 경우, 균열성장률이 점차로 저하되는 이유는 층간의 응력구배가 적어서 응력전달이 매우 우수하게 나타났기 때문이고, 커플링강성도 부하의 진행에 관계없이 $B_{ij} = 0$ 를 나타냈기 때문에 균열성장률은 꾸준히 감소된 것이라고 판단된다. 그러나 $[Al/+45_2/Al]$ 와 $[Al/90_2/Al]$ 의 경우와 같이 섬유축과 하중축이 평행하지 않은 경우는 층간 응력구배가 크고, 균열이 진전될수록 커플링강성(B_{ij})이 증가하기 때문에 부하중기 이후 균열성장률이 약간 증가하는 추세를 나타냈다.

(5) $[Al/+45_2/Al]$, $[Al/90_2/Al]$ 와 같이 하중축과 섬유축이 평행하지 않은 경우, 균열은 하중방향에 수직인 방향으로 증가하지만 층간분리는 섬유방향으로 증가하므로 부하가 진행될수록 균열선단과 층간분리선단의 거리가 멀어져 상호영향력은 매우 미약해진다. 따라서 이 경우 균열주위에서의 섬유가교효과는 급격히 저하된다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Choi, N. S. and Kinloch, A. J., 1998, "Delamination Behavior of Multidirectional Laminates under the Mode I Loading," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 22, No. 3, pp. 611~623.
- (2) Kim, C., Kang, T. J., Yook, J. I. and Park, J. K., 1995, "Effect of the Intraply Hybridization on the Mechanical Properties of Kevlar/Spectra Woven Laminated Composite," *Journal of the KSCM*, Vol. 8, No. 3, pp. 25~35.
- (3) Lee, Y. S., Lee, Y. W. and Na, M. S., 1990, "Optimal Design of Hybrid Laminated Composite Plates," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 14, No. 6, pp. 1391~1407.
- (4) 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.
- (5) Sam-Hong Song and Cheol-Woong Kim, 2000, "The Influence of Resin Mixture Ratio for the Use of Prepreg on the Fatigue Behavior Properties in FRMLs," *KSPE International Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 33~41.
- (6) Sam-Hong Song and Cheol-Woong Kim, 2003, "The Fatigue Behavior and Delamination Properties in Fiber Reinforced Aramid Laminates -Case (I) AFRP/Al Laminates-," *KSME International Journal*, Vol. 17, No. 3, pp. 343~349.
- (7) Bucci, R. J., Mueller, L. N., Vogelesang, L. B. and Gunnink, J. W., 1989, *Treatise on Material Science and Technique*, Vol. 31, No. 295
- (8) Sam-Hong Song and Cheol-Woong Kim, 2004, "Evaluation of Delamination Behavior in Hybrid Composite Using the Relationship Between Crack Length and Delamination Width," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 28, No. 1, pp. 55~62.
- (9) Roebroeks, G. H. J. J., 1986, "Observations on Cyclic Delamination in ARALL Under Fatigue Loading," *Report LR-496*, Dept. of Aerospace Eng., Delft Univ. of Tech., Netherlands.
- (10) 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.
- (11) 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.