

가균열 모델을 이용한 섬유강화 금속적층재의 층간분리 평가법

송삼홍[†] · 김철웅^{*}

(2003년 7월 10일 접수, 2003년 11월 28일 심사완료)

Evaluation of Delamination for Fiber Reinforced Metal Laminates Using a Pseudo Crack Model

Sam-Hong Song and Cheol-Woong Kim

Key Words: Fiber Reinforced Metal Laminates(섬유강화 금속적층재, FRMLs), Crack Growth Rate(균열성장률, da/dN), Stress Intensity Factor Range(응력확대계수 범위, ΔK), Pseudo Crack Model(가균열 모델, PCM), Crack Energy Consumption Rate(균열에너지 소비율, E_{crack}), Delamination Energy Consumption Rate(층간분리에너지 소비율, E_{del})

Abstract

If Fiber Reinforced Metal Laminates(FRMLs) were delaminated, the decrease of stiffness and fiber bridging effect would result in the sudden aggravation of fatigue characteristics. It was reported that the delamination of FRMLs resulted from the crack of metal layers and that it depended on the crack growth. While cracks were made in FRMLs containing a saw-cuts under fatigue loading, cracks could be produced or not in FRMLs with circular holes under the same condition. When the FRMLs with the circular holes produce not the crack but the delamination, it is not possible to analyze it by the conventional fracture parameters expressed as the function of the crack. And so, this research suggests a new analytical model of the delamination to make the comparison of the delamination behavior possible whenever the cracks occur or not. Therefore, a new analytical model called Pseudo Crack Model(PCM) was suggested to compare the delaminations whether cracks were made or not. The relationship between the crack energy consumption rate(E_{crack}) and the delamination energy consumption rate(E_{del}) was discussed and it was also known that the effect of E_{del} was larger than that of E_{crack} .

기호설명

- A_D : 층간분리 면적
- a_p : 가균열
- E_{total} : 총에너지 소비율
- E_{crack} : 균열에너지 소비율
- E_{del} : 층간분리에너지 소비율
- N_D : 층간분리 진전력

1. 서론

항공기 구조용 재료로 사용되는 섬유강화 금속 적층재(Fiber Reinforced Metal Laminates, 이하 FRMLs)는 알루미늄층과 고강도 섬유층이 적층된 하이브리드 복합재료이다. 이와 같은 FRMLs가 항공기의 오랜 운항으로 피로하중에 장시간 노출 될 경우, FRMLs의 알루미늄층과 섬유층 사이에서는 층간분리가 발생할 가능성이 동일재끼리 적층된 복합재료에 비해 현저히 높다. FRMLs에 층간분리가 존재하면 강성계수가 저하될 뿐만 아니라, 섬유가교효과를 약화시켜 피로특성이 급격히 나빠진다. 따라서 FRMLs의 층간분리 거동에 대

[†] 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과
E-mail : shsong@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3353 FAX : (02)921-8532

^{*} 회원, 고려대학교 공학기술연구소 및
인덕대학 기계시스템

한 연구는 매우 중요하다. 일반적으로 FRMLs의 층간분리는 알루미늄층의 균열에 의해 야기되며 균열성장에 의존적이라는 보고가 기존 연구의 결과이다.^(1~6) 이러한 결과는 대부분 소컷(saw-cut) 노치를 내제한 시험편에서 나타나는 피로거동 현상이므로 하중형태에 관계없이 층간분리는 항상 균열과 의존적인 관계를 나타낸다. 그러나, FRMLs가 주로 적용되는 항공기 구조에서는 리벳팅과 같은 원공노치가 많이 분포하므로 원공노치에 대한 연구 또한 절실하다. 원공노치는 기하학적 형상의 차이로 인해 소컷노치와는 상이한 피로거동을 보인다.⁽⁷⁾ 예를 들어 동일하중 조건에서 소컷노치재에 항상 균열이 발생하더라도 원공노치재는 Fig. 1과 같이 균열이 발생하는 경우와 발생하지 않는 경우가 나타날 수 있다.⁽⁴⁾ 이러한 현상은 원공노치가 소컷노치에 비해 노치주위의 최대응력 값이 1/4에 불과한 이유도 있지만, 부하초기 층간분리 메커니즘에 지대한 영향을 받기 때문이다. 피로하중이 가해진 원공노치재에 균열이 발생하지 않는 경우, 비파괴검사를 거치지 않는다면 결함이 없는 온전한 재료로 간주하기 쉽다. 균열이 존재하지 않고 층간분리만 발생하는 FRMLs(Fig. 1의 case (II))의 피로거동은 $a-N$ 관계 및 $da/dN-\Delta K$ 관계와 같은 균열의 함수관계인 파라미터와의 적용이 불가능해진다. 또한, FRMLs의 재료특성에 적합하게 개선된 Marissen⁽⁸⁾의 ΔK_{fn} 모델, Takamatsu 등⁽⁹⁾의 ΔK_{exp} 모델, Toi⁽¹⁰⁾가 제안

한 β_b 이론, Glyn Lawcock 등⁽¹¹⁾이 제안한 유효균열 성장모델(ECGM) 등의 적용이 모두 불가능해진다.

따라서 본 연구에서는 균열이 발생하는 층간분리와 발생하지 않는 층간분리의 비교평가가 가능한 새로운 층간분리 해석모델을 제안하였다. 즉, 균열이 존재하지 않는 층간분리 거동을 균열이 존재할 때와 상응시킬 수 있는 가균열 모델(Pseudo Crack Model, PCM)을 제안하였다. 그리고 총에너지 소비율(E_{total}) 중에서 균열에너지 소비율(E_{crack})과 층간분리에너지 소비율($E_{del.}$)과의 관계를 고찰해 보았다. 그 접근 방법은 다음과 같다. 1) 균열이 존재하는 소컷재와 원공재의 $da/dN-\Delta K$ 관계의 평가, 2) 균열이 존재하는 원공재 및 균열이 존재하지 않는 원공재의 피로거동 비교, 3) 가균열 모델(PCM)의 제안 및 이를 통한 E_{crack} 과 $E_{del.}$ 의 관계해석이다.

2. FRMLs 시험편 제작 및 실험방법

2.1 FRMLs 시험편 제작

FRMLs 시험편은 Fig. 2와 같이 Al5052 판재와 단방향(UD) 아라미드 섬유/에폭시 프리프레그(Prepreg)를 3/2의 형태로 적층하였다. 노치의 형상은 소컷을 가공한 FRMLs(Fig. 2 (a), 이하 소컷재)와 원공을 가공한 FRMLs(Fig. 2 (b), 이하 원

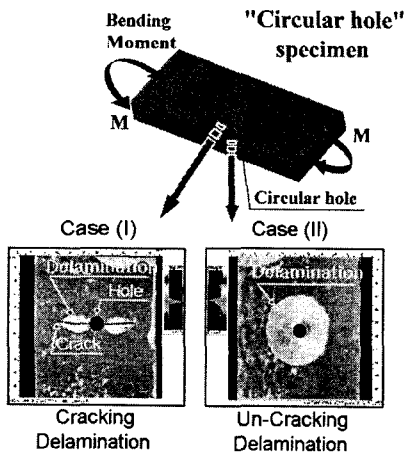


Fig. 1 The cracking delamination and un-cracking delamination behavior in FRMLs containing a circular hole under bending moment

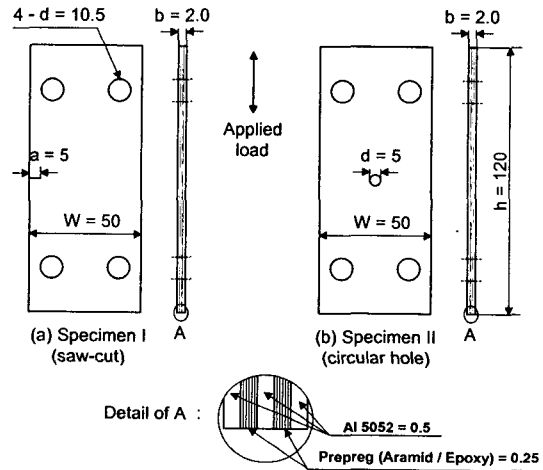


Fig. 2 Geometries of FRMLs containing (a) saw-cut specimen and (b) circular hole specimen (unit : mm)

공재)로 구분하였다. 소켓 길이는 $a = 5 \text{ mm}$ 이고, 원공 지름은 $d = 5 \text{ mm}$ 이다.

2.2 피로시험 방법

본 연구에 사용된 피로시험기는 굽힘 및 비틀림 피로시험기(TB-10B, Shimadzu Co.)이다. 최대 모멘트 진폭은 $98 \text{ N}\cdot\text{m}$, $\text{RPM} = 2 \times 10^3$, 33.3 Hz , 응력비(R) = -1 이다. 하중형태는 반복-굽힘 모멘트($M = 4.9 \text{ N}\cdot\text{m}$)를 가하였다. 피로균열 관찰은 접안 이동측미계를 이용하여 100 배율로 관찰하였다. FRMLs의 층간분리 영역은 C-스캔(Mi-SCOPE exla, Hitachi Co.) 이미지를 이용하여 형상과 면적 등을 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 균열이 존재하는 소켓재 및 원공재의 $da/dN-\Delta K$ 관계

FRMLs에 소켓 또는 원공 형태의 노치가 내재되어 있는 경우, 기하학적 형상의 차이로 인하여 노치주위 응력분포 및 최대응력 값은 큰 차이를 보인다. 이와 같이 FRMLs의 노치형상에 따른 응력분포 차이는 평균응력 크라이테리언(Average Stress Criterion, 이하 ASC) 모델⁽¹⁾을 이용하여 평가할 수 있다. 송과 김⁽⁴⁾은 ASC 모델을 이용하여 FRMLs의 소켓재와 원공재를 비교·평가한 결과, 소켓재가 원공재보다 최대응력 값이 약 4배정도 높게 나타난다고 보고하였다. 이 같은 차이는 소켓재와 원공재의 피로수명에도 지대한 영향을 미친다. 소켓재는 원공재보다 균열성장 속도가 빠르게 나타나며, 특정응력 레벨에서 소켓재가 항상 균열이 발생하더라도 원공재에서는 균열이 발생하지 않는 경우도 나타난다. 실제로 본 연구에서 원공재의 경우, $M = 4.9 \text{ N}\cdot\text{m}$ 이상에서는 균열이 발생하는 경우가 주류를 이루었고, $M = 4.9 \text{ N}\cdot\text{m}$ 이하에서는 균열이 발생하지 않는 경우가 주류를 이루었다. 그리고, 임계값에 해당되는 $4.9 \text{ N}\cdot\text{m}$ 일 때는 균열이 발생하는 경우와 발생하지 않는 경우가 동시에 나타났다. 균열이 존재하는 경우의 소켓재와 원공재는 Fig. 3 및 Fig. 4와 같이 피로거동의 비교평가가 가능하다. Fig. 3은 소켓재와 균열이 발생한 원공재의 균열 길이(a)와 사이클(N)의 관계를 나타낸 그래프이다. 소켓재에 비해 원공재의 피로수명이 약 3.7배정도 향상되

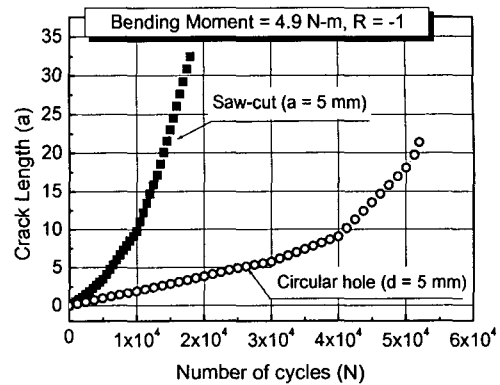


Fig. 3 Relationship between crack length (a) and number of cycles (N) in FRMLs containing a saw-cut and circular hole

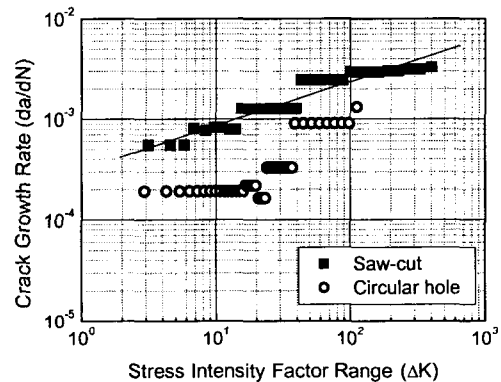


Fig. 4 Relationship between crack growth rate (da/dN) and stress intensity factor range(ΔK) in FRMLs containing a saw-cut and circular hole

있음을 알 수 있다. Fig. 4는 Fig. 3의 결과를 이용하여 응력확대계수범위(ΔK)와 균열성장률(da/dN)의 관계를 나타낸 그래프이다. 부하초기와 후기의 기울기 차이는 있지만 전체적으로 소켓재가 원공재보다 균열성장률이 높게 분포함을 알 수 있다. 이와 같이 소켓재 및 원공재에 균열이 발생하는 경우에는 $a-N$ 관계 및 $da/dN-\Delta K$ 관계를 이용하여 피로거동을 비교·평가할 수 있다.

3.2 균열이 존재하는 원공재 및 균열이 존재하지 않는 원공재의 피로거동 평가법

3.2.1 기존 평가법의 문제점

앞 절에서 언급한 바와 같이 소켓재 및 원공재에 균열이 존재하는 경우에는 균열을 파라미터로

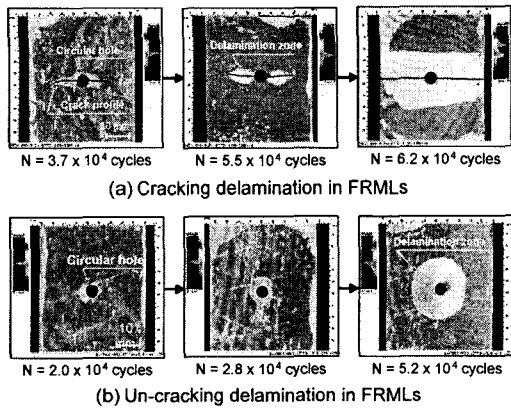


Fig. 5 Ultrasonic C-scan images of crack propagation and delamination behavior in case of (a) Cracking delamination, (b) Un-cracking delamination

한 $a-N$ 관계 및 $da/dN-\Delta K$ 관계를 이용하여 소켓재와 원공재의 피로거동 차이를 비교·평가할 수 있다. 그러나, $M = 4.9 \text{ N-m}$ 이하일 때와 같이 원공재에 균열이 발생하지 않는 경우가 나타나면 소켓재와 원공재의 피로거동의 객관적 비교평가가 불가능해진다. 왜냐하면 이 경우 원공재는 균열과 같은 파라미터를 사용할 수 없기 때문이다. 따라서 이러한 경우의 피로거동 평가를 가능하게 하기 위해서는 균열이 발생하거나 발생하지 않는 경우 모두 공통적으로 나타나는 현상을 인자로 활용해야 한다. 따라서 본 연구에서는 공통적으로 존재하는 인자를 활용하고자 균열이 존재하는 원공재와 균열이 존재하지 않는 원공재를 각각 C-scan 이미지 촬영을 하고 그 결과를 분석해 보았다. Fig. 5는 4.9 N-m 의 동일하중 조건에서 균열을 동반한 층간분리(Fig. 5(a))와 균열을 동반하지 않은 층간분리(Fig. 5(b))를 나타낸 C-스캔 이미지이다. 기존의 FRMLs의 층간분리 연구 결과^(1~5)에서는 대부분 균열과 층간분리의 의존적 관계를 중심으로 연구가 진행되어 왔다. 하지만 균열이 발생하지 않아도 Fig. 5(b)와 같이 층간분리가 발생할 수 있다. 따라서, 균열이 존재하는 층간분리 거동과 균열이 존재하지 않는 층간분리 거동을 상호비교하기 위해서는 층간분리의 성장 거동 특성을 인자로 하는 새로운 모델의 제안이 필요하다.

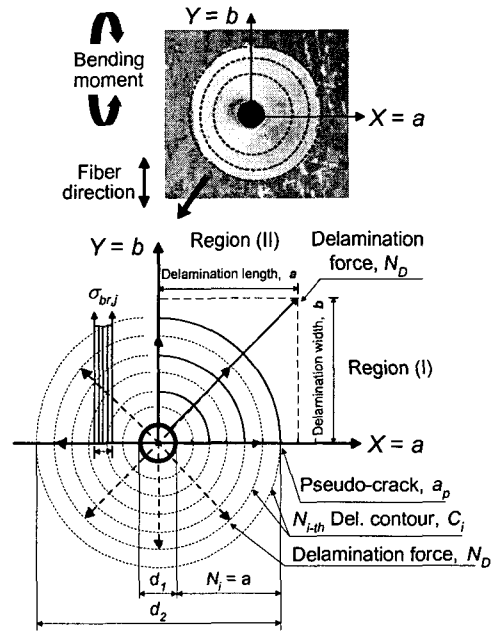


Fig. 6 Pseudo Crack Model (PCM) for the un-cracking delamination in FRMLs

3.2.2 가균열 모델을 이용한 FRMLs 원공재의 피로거동 평가법

본 연구에서는 동일하중이 가해지는 원공재에 균열이 존재하는 층간분리와 균열이 존재하지 않는 층간분리가 발생할 때, 피로거동을 비교평가하기 위해 상당균열(equivalent crack)과 같은 가균열(pseudo crack) 모델을 제안해 보았다. 가균열 모델은 균열이 존재하지 않는 층간분리인 Fig. 5 (b)의 거동을 기반으로 하여 Fig. 6과 같이 모델링하였다. 그리고, 다음과 같이 가정하였다. 1) Y 방향으로 반복하중이 작용할 때 가균열은 X 방향으로 진전한다. 2) 원공 중심으로부터 가균열 선단까지를 반지름으로 하는 진원의 면적에서 원공의 면적을 뺀 값이 층간분리 면적이다. 3) 본 모델에서 층간분리는 균열의 영향이 존재하지 않으므로 층간분리 길이(a)와 층간분리 폭(b)의 관계는 항상 $a = b$ 인 관계를 나타낸다. 4) 가균열의 성장거동은 균열이 존재하는 원공재에서의 균열 거동과 유사한 거동을 보인다. 이상의 가정은 균열이 존재하지 않는 층간분리 거동을 균열이 존재하는 경우에 상응시키고, 층간분리에 대한 균열의 영향력은 배제시킨 것이다. 따라서 가균열

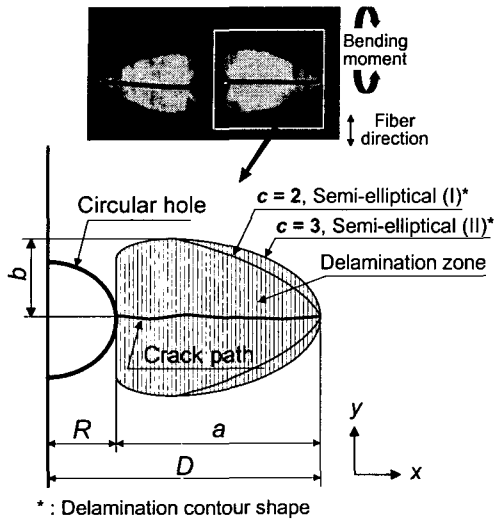


Fig. 7 Cracking delamination model in FRMLs containing a circular hole

모델의 장점은 균열이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우의 층간분리 거동을 비교하여, 역으로 균열진전에 필요한 에너지 소비율을 유추할 수 있다는 것이다. Fig. 7은 균열이 존재하는 원공재의 층간분리 모델을 나타낸 것이다. 원공을 중심으로 좌우대칭형이므로 한쪽만을 고려하였다. 층간분리는 반타원형이고 균열길이를 반장축(a), 층간분리 폭을 반단축(b)이라고 했을 때, 반타원형의 면적이 층간분리 면적에 해당된다. 균열이 존재하지 않는 원공재의 층간분리(Fig. 6의 가균열 모델)와 균열이 존재하는 원공재의 층간분리(Fig. 7의 층간분리 모델)에 동일한 외력이 작용했다면, 에너지 보존법칙에 의해 두 경우 모두 동일한 에너지를 소비했다고 할 수 있다. 동일한 부하 조건에서 균열이 존재하지 않은 경우의 층간분리 면적이 균열이 존재하는 경우의 층간분리 면적보다 더 크다. 그 이유는 균열진전에 일부 소비해야 할 에너지를 모두 층간분리성장에만 소비했기 때문이다. 따라서, 균열이 존재하는 층간분리에서의 실제 균열길이(a)와 균열이 존재하지 않는 층간분리에서의 가균열길이(a_p)가 동일하게 진전한다고 가정하고, 두 경우의 층간분리 면적(A_D)에 대한 차를 구하면 균열이 존재하는 층간분리에서의 균열진전에 소비된 에너지, 즉, 균열에너지 소비율(crack energy consumption rate, E_{crack})을 구할

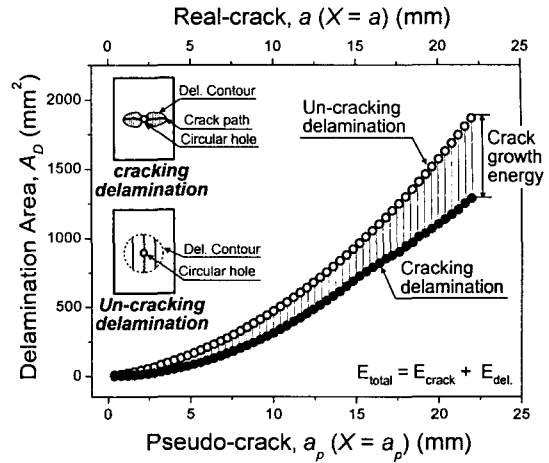


Fig. 8 Relationship among the real crack (a) pseudo crack (a_p) and delamination area (A_D) using the pseudo crack model

수 있다. 이상의 내용을 정리하면 식 (1) 및 식 (2)와 같다.

$$E_{1total} = E_{crack} + E_{1del} \tag{1}$$

$$E_{2total} = E_{2del} \tag{2}$$

여기서, E_{1total} 은 균열이 존재하는 층간분리 거동에서의 전체에너지 소비율(total energy consumption rate)이고, E_{2total} 은 균열이 존재하지 않는 층간분리 거동에서의 전체에너지 소비율이다. 또한, E_{crack} 은 균열에너지 소비율이고, E_{1del} , E_{2del} 은 각각 균열이 존재할 때와 존재하지 않을 때의 층간분리에너지 소비율이다. 따라서, 식 (1)과 같이 균열이 존재하는 층간분리 거동에서의 전체에너지 소비율(E_{1total})은 균열에너지 소비율(E_{crack})과 층간분리에너지 소비율(E_{1del})의 합과 같고, 식 (2)와 같이 균열이 존재하지 않는 층간분리 거동에서의 전체에너지 소비율(E_{2total})은 균열이 존재하지 않는 층간분리에너지 소비율(E_{2del})과 같다. 따라서 식 (1) = 식 (2)라고 하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{crack} = E_{2del} - E_{1del} \tag{3}$$

층간분리에너지 소비율(E_{1del} , E_{2del})을 층간분리 면적(A_D)의 크기와 비례하다고 가정하면, 식 (3)에서 균열에너지 소비율(E_{crack})은 Fig. 8의 빗금친 영역과 같아진다. Fig. 8은 실제균열 길이(a)와 가

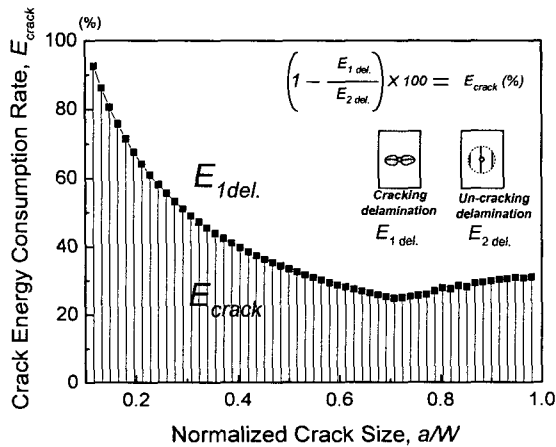


Fig. 9 Relationship between normalized crack size (a/W) and crack energy consumption rate (E_{crack}) in case of cracking delamination

균열길이(a_p)를 같다고 했을 때, 균열이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우의 층간분리 면적 차이를 나타낸 그래프이다. 균열이 존재하지 않는 경우의 층간분리 면적이 균열이 존재하는 층간분리 면적보다 크게 나타났다. 또한, 균열길이가 증가할수록 그 차이는 더욱 커져갔다. 식 (1) ~ (3)에 의해 이 빗금친 영역을 균열을 형성하는데 필요한 에너지, 즉 균열에너지 소비율(E_{crack})과 같다고 할 수 있다. Fig. 8에서 빗금친영역(E_{crack})은 a/W 가 증가할수록 서서히 증가했다. 그러나, Fig. 8을 이용하여 전체에너지 소비율(E_{1total}) 중 E_{crack} 과 $E_{1del.}$ 이 차지하는 비율의 변화를 파악하기에는 한계가 있다. 따라서, E_{1total} 에서 E_{crack} 이 차지하는 비율을 알기 위해 식 (3)을 변형하면 식 (4)와 같다.

$$\left(1 - \frac{E_{1del.}}{E_{2del.}}\right) \times 100 = E_{crack} (\%) \quad (4)$$

식 (4)를 이용하여 Fig. 9와 같이 나타내보았다. Fig. 9는 균열이 있는 층간분리의 총에너지 소비율(E_{1total}) 중에서 E_{crack} (빗금친영역)과 $E_{1del.}$ 이 차지하는 비율의 변화를 나타낸 그래프이다. E_{crack} 은 부하초기부터 중기까지는 꾸준히 감소하며, E_{crack} 과 $E_{1del.}$ 이 같아지는 시기는 $a/W = 0.3$ 정도일 때임을 알 수 있다. Fig. 8과 Fig. 9를 종합적으로 비교해보면 다음과 같다. Fig. 8에서 균열이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우의 층간분리의 면적의 차이(빗금친영역)는 부하후기로 갈수록 편차가 심해

진다. 왜냐하면 균열이 존재하지 않는 층간분리에서 전체에너지 소비율(E_{2total})은 $E_{2total} = E_{2del.}$ 가 되므로 E_{crack} 에 해당되는 에너지를 모두 $E_{2del.}$ 의 형태로 환원하여 소비할 수 있었기 때문이다. 그리고 부하가 진행될수록 이러한 메커니즘은 더욱 용이해져서 $E_{2del.}$ 은 더욱 증가하게 되고, 층간분리 면적은 편차가 심해진 것으로 판단된다. 또한, 부하가 진행될수록 층간분리 면적(A_D)의 증가속도는 기하급수적으로 증가하기 때문에 부하후기 층간분리 면적의 증가 속도는 상승하는 것으로 판단된다. 한편, Fig. 9와 같이 균열이 존재하는 층간분리의 경우, 부하초기에는 E_{crack} 의 비율이 절대적으로 크지만, 이후 꾸준히 감소하다가 $a/W = 0.3$ 이후부터는 $E_{1del.}$ 의 비율이 E_{crack} 의 비율보다 더 커지게 됨을 알 수 있다. 그 이유는 리가먼트가 줄어들수록 균열의 진전이 용이해지므로 균열에너지 소비율(E_{crack})은 꾸준히 작아지게 되고, 상대적으로 층간분리 거동은 부하가 진행될수록 기하급수적 면적증가를 보이므로 $E_{1del.}$ 의 비율이 커지게 되기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 균열이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우의 섬유강화 금속적층재(FRMLs)의 층간분리 거동을 비교·평가하고자 가균열 모델(Pseudo Crack Model, PCM)을 제안하였다. 그리고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 균열이 존재하지 않는 경우에도 층간분리가 발생할 수 있다. FRMLs 원공재에서 균열이 존재하는 경우의 층간분리가 균열의 영향으로 타원형을 나타낸 반면, 균열이 존재하지 않는 층간분리는 원공을 중심으로 진원의 형태를 나타냈다.
- (2) 가균열 모델(PCM)을 이용하여 균열이 존재하는 층간분리에서의 실제 균열길이(a)와 균열이 존재하지 않는 층간분리에서의 가균열길이(a_p)가 동일하다고 가정하고 두 경우의 층간분리 면적(A_D)에 대한 차를 구하면 균열에너지 소비율(E_{crack})을 구할 수 있다.
- (3) 가균열 모델(PCM)에서 균열이 존재하는 층간분리에서의 총에너지 소비율(E_{1total})과 균열이 존재하지 않는 층간분리에서의 총에너지 소비율(E_{2total})은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_{1total} = E_{crack} + E_{1del}, \quad E_{2total} = E_{2del}$$

따라서 $E_{1total} = E_{2total}$ 이라고 하면 다음과 같다.

$$E_{crack} = E_{2del} - E_{1del}$$

(4) 균열이 존재하는 층간분리의 전체에너지 소비율(E_{1total}) 중 E_{crack} 과 E_{1del} 이 차지하는 비율의 변화를 파악하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\left(1 - \frac{E_{1del}}{E_{2del}}\right) \times 100 = E_{crack} (\%)$$

위의 식을 이용한 결과, 부하초기에는 E_{crack} 의 비율이 절대적으로 크지만, 이후 꾸준히 감소하다가 $a/W = 0.3$ 이후부터는 E_{1del} 의 비율이 E_{crack} 의 비율보다 더 커지게 됨을 알 수 있다. 그 이유는 리가먼트가 줄어들수록 균열의 진전이 용이해지므로 균열에너지 소비율(E_{crack})은 꾸준히 작아지게 되고, 상대적으로 층간분리 거동은 부하가 진행될수록 기하급수적 면적증가를 보이므로 E_{1del} 의 비율이 커지게 되기 때문이다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Glyn Lawcock, Lin Ye and Yiu-Wing Mai, 1997, "Progressive Damage and Residual Strength of a Carbon Fiber Reinforced Metal Laminates," *Journal of Composite Materials*, Vol. 31, No. 8, pp. 762~787.
- (2) Akbar Afaghi-Khatibi and Lin Ye, 1997, "Residual Strength Simulation of Fiber Reinforced Metal Laminates Containing a Circular Hole," *Journal of Composite Materials*, Vol. 31, No. 19, pp. 1884~1904.
- (3) 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.
- (4) 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 -," *Transaction of the KSME, A*, Vol. 27, No. 1, pp. 58~65.
- (5) 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," *Transaction of the KSME, A*, Vol. 27, No. 2, pp. 317~326.
- (6) Jin-Ho Hwang and Woon-Bong Hwang, 1999, "Effect of Crack Propagation Directions on the Interlaminar Fracture Toughness of Carbon/Epoxy Composite Materials," *Transaction of the KSME, A*, Vol. 23, No. 6, pp. 1026~1038.
- (7) Huh J. S., Hwang W. B., Park H. C., and Han K. S., 1996, "Fatigue Life Prediction of Circular Notched CFRP Laminates," *Transaction of the KSME, A*, Vol. 20, No. 3, pp. 832~842.
- (8) Marissen R., 1988, "Fatigue Crack Growth in ARALL ; A Hybrid Aluminum-Aramid Composite Material," Ph. D. Thesis, Univ. of Delft, The Netherlands.
- (9) Takamatsu T., Shimikawa T., Matsumura T., Miyoshi Y., and Tanabe Y., 2002, "Evaluation of Fatigue Crack Growth Behavior of GLARE3 Fiber/metal Laminates Using a Compliance Method," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 37, No. 2, pp. 268~282.
- (10) Toi Y., 1995, "An Experimental Crack Growth Model for Fiber/metal Laminates," *18th Symposium of ICAF*, Melbourne, pp. 899~909.
- (11) Nuismer R. J., and Whitney J. M., 1975, "Uniaxial Failure of Composite Laminates Containing Stress Concentrations," *Fracture Mechanics of Composites, ASTM STP 593*, pp. 117~121.