

# 층간분리 요소와 층간분리 성장의 관계

송삼홍<sup>†</sup> · 김철웅<sup>\*</sup> · 홍정화<sup>\*\*</sup> · 김태수<sup>\*\*\*</sup> · 황진우<sup>\*\*\*</sup>

## The Relationship Between Delamination Element and Delamination Growth

Sam-Hong Song, Cheol-Woong Kim, Jung-Hwa Hong, Tae-Soo Kim and Jin-Woo Hwang

**Key Words** : Fiber Reinforced Metal Laminates(섬유강화 금속적층재, FRMLs), Delamination Width(층간분리 폭,  $b$ ), Delamination Shape Factor(층간분리 형상계수,  $f_s$ ), Delamination Aspect Ratio(층간분리 종횡비,  $b/a$ ), Delamination Growth Rate(층간분리 성장률,  $dA_D/da$ )

### ABSTRACT

The investigation of delamination growth behavior in hybrid composite material such as FRMLs should be considered delamination growth rate,  $dA_D/da$  using the delamination shape factor,  $f_s$  instead of traditional fracture mechanics parameters. The main objective of this study is to evaluate the relationship between delamination element (i. e. delamination width,  $b$ , delamination contour,  $c$ , delamination shape factor,  $f_s$  and delamination growth rate,  $dA_D/da$ ) and delamination growth in FRMLs under cyclic bending moment. The delamination shape formed along the fatigue crack between aluminum layer and glass fiber/epoxy layer are measured by scanning method. The details of study are as follow : i) Relationship between crack length,  $a$  and delamination width,  $b$ . ii) Variation of delamination growth rate,  $dA_D/da$  was attendant on delamination shape factors,  $f_{S1}$ ,  $f_{S2}$ ,  $f_{S3}$ . The test result indicated the delamination growth behavior depends in delamination element such as delamination width,  $b$ , delamination shape factors,  $f_{S1}$ ,  $f_{S2}$ ,  $f_{S3}$ .

### 1. 서론

섬유강화 금속적층재(Fiber Reinforced Metal laminates, 이하 FRMLs)와 같은 하이브리드 복합재는 우수한 피로특성으로 인해 항공기, 선박, 대형 구조물 등에 유용하게 사용된다.<sup>(1-2)</sup> 그러나 아직까지 적용분야가 극히 제한적이다. 그 이유는 금속층과 섬유층의 경계에서 발생하는 층간분리가 큰 문제점으로 대두되기 때문이다. 이러한 층간분리는 섬유가교효과에 악영향을 미치고 재료의 전체적인 강도를 저하시킨다. 따라서, 송과 김<sup>(3-6)</sup>은

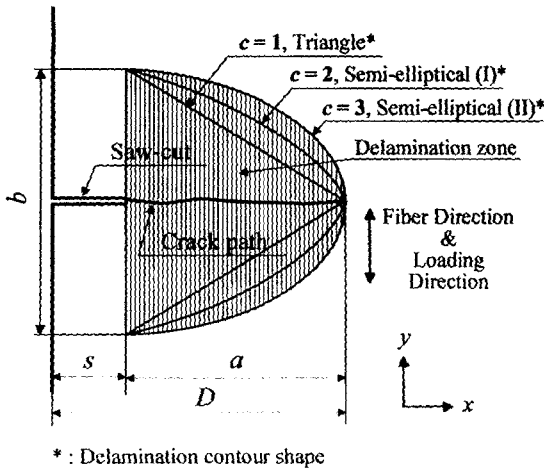
선행연구에서 이러한 층간분리 거동을 중심으로 FRMLs의 피로거동을 평가한 바 있다. 선행연구 내용을 종합해보면, FRMLs에서 층간분리 거동을 제어하는 첫번째 인자는 균열( $a$ )임을 알 수 있다. 그러나 층간분리 거동이 균열에 의해서만 좌우되지 않는다. Fig. 1에 제시한 바와 같이 층간분리 거동을 제어하는 두번째 인자는 층간분리 폭( $b$ )임을 알 수 있다. 균열길이와 층간분리 폭은 층간분리 형상을 결정짓는 중요한 인자이다. 그러나 이와 같이 층간분리 특성을 결정짓는 중요한 인자인 균열길이( $a$ )와 층간분리 폭( $b$ )의 관계가 층간분리 성장의 전반적인 거동에 미치는 영향에 관한 연구는 아직 보고된 바가 없다. 따라서, 본 연구에서는 균열길이( $a$ )와 층간분리 폭( $b$ )의 관계를 이용하여 층간분리 형상계수( $f_s$ )가 FRMLs의 층간분리 성장 거동에 미치는 영향을 고찰해보고자 한다.

<sup>†</sup> 고려대학교 기계공학과

<sup>\*</sup> 고려대학교 공학기술연구소

<sup>\*\*</sup> 재활공학연구소

<sup>\*\*\*</sup> 고려대학교 대학원 기계공학과



\* : Delamination contour shape  
**Fig. 1** Geometry of delamination zone in FRMLs

## 2. FRMLs의 제작 및 실험방법

### 2.1 FRMLs 시험편의 제작

본 연구에 적용된 FRMLs는 알루미늄 5052 시트 2장 사이에 단방향 유리섬유/에폭시 프리프레그(Prepreg)를 2/1로 삽입한 형태이다. 적층된 시험편은 핫-플레이트 프레스로 경화하였다. 경화과정 중 프리프레그 에폭시 수지계의 DSC 측정결과를 반영하여 후가열 과정을 별도로 채택하였다. 경화 후 다이아몬드 휠 커터와 드릴링 작업을 통하여 Fig. 2와 같은 시험편을 제작하였다.

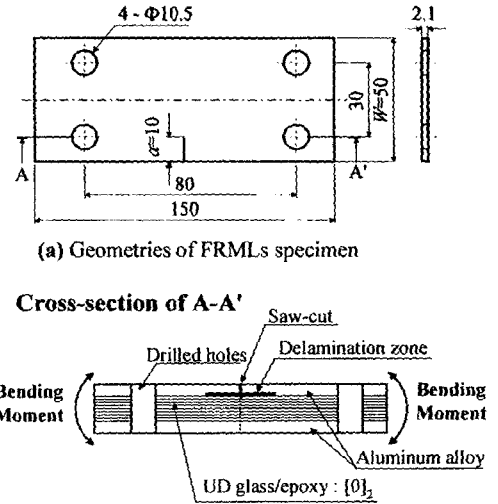
### 2.2 피로시험 방법

피로시험은 굽힘 및 비틀림 피로시험기를 이용하였다. 최대모멘트는 98 N-m이며, 회전수는 2000 RPM, 33.3 Hz이다. 응력비( $R$ )는 섬유층이 압축강도에 약한 점을 고려하여  $R = -1$ 로 적용하였다. 하중은 반복굽힘 모멘트  $M = 3.92$  N-m를 가하였다. 피로균열관찰은 접안 이동 측미계를 이용하여 100배율에서 측정하였다. 층간분리 영역의 관찰은 스캔 기법을 이용하여 해당 사이클마다 변화하는 층간분리 이미지를 이용하였다. 이 층간분리 이미지를 이용하여 층간분리 길이( $a$ ), 층간분리 폭( $b$ ), 층간분리 외곽선 길이( $2c$ ), 층간분리 면적( $A_D$ ) 등을 구하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 균열길이( $a$ )와 층간분리 폭( $b$ )의 관계

FRMLs는 섬유가교효과로 인해 일반 금속재와 달리 사이클 전체에 걸쳐 일정한 기울기를 나타낸다.<sup>(3)</sup> 따라서 Fig. 3과 같은 1차 곡선 형태의  $a-N$  관계를 나타낸다. 그러나 균열이 진전하면 균열



(a) Geometries of FRMLs specimen  
 Cross-section of A-A'  
 (b) Cross-section of FRMLs specimen  
**Fig. 2** Geometry of specimen and cross-section in FRMLs

후방으로 넓게 확장되는 형태의 층간분리 영역이 발생, 성장한다. Fig. 1에서  $x$  방향에 해당되는 층간분리 길이는 균열길이( $a$ )와 일치함을 확인할 수 있었다.  $y$  방향에 해당되는 층간분리 폭( $b$ )은 균열진전과 수직하게 성장해 간다. 따라서  $a$ 와  $b$ 의 관계를 이용하면 층간분리 거동에 관한 많은 정보를 얻을 수 있다. 그러나 층간분리 형상은 Fig. 1과 같이 삼각형 또는 반타원형의 형태로 나타날 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 4에 제시한 바와 같이 층간분리 형상이 삼각형과 반타원형의 중간형태를 나타낸다는 점을 감안하여 형태에 따른 모델 해석을 수행하였다. Fig. 3과 Fig. 4를 이용하여 균열길이와 층간분리 폭의 관계를 규명해 보면, Fig. 4(a)~(e) 구간인 초기부터  $N = 1.5 \times 10^5$  cycles까지는  $a = b$ 인 경향을 나타내지만, Fig. 4(f)~(l) 구간인  $N = 1.5 \times 10^5$  cycles 이후부터는  $a > b$ 인 경향을 나타낼 수 있다. 균열길이와 층간분리 폭의 관계를 더욱 구체적으로 관찰하기 위해 Fig. 5와 같이 제시하였다. Fig. 5에서  $a$ 가 0~20 mm ( $a/W = 0.2 \sim 0.6$ )일 때는  $a = b$  선과 평행하게 진행되다가 이후  $a > b$  형태로 전환된다.  $a$ 가 20~30 mm ( $a/W = 0.6 \sim 0.8$ )일 때  $b$ 는  $a$ 의 80% 정도에 도달하고,  $a$ 가 30~40 mm ( $a/W = 0.8 \sim 1.0$ )일 때  $b$ 는  $a$ 의 70% 정도에 도달하게 된다. 즉, 층간분리 폭은  $a/W = 0.6$  이상부터 성장속도가 둔화되기 시작하고,  $a/W = 0.8$  이상일 때부터는 둔화가 더욱 심화됨을 알 수 있다. 결과적으로 균열선단과 층간분리 폭의 선단간의 거리가 멀어질수록 균열선단의 응력분포에 대한 영향력이 감소되어 층간분리 폭의 성장속

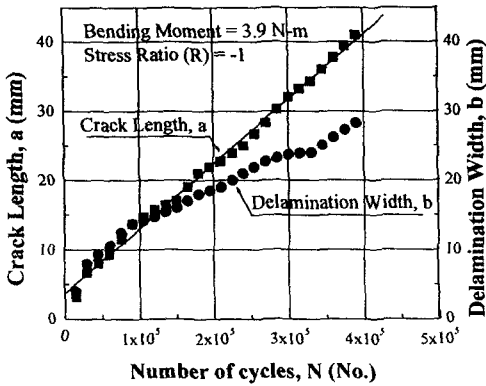


Fig. 3 Relationship among number of cycles,  $N$ , crack length,  $a$  and delamination width,  $b$  in FRMLs

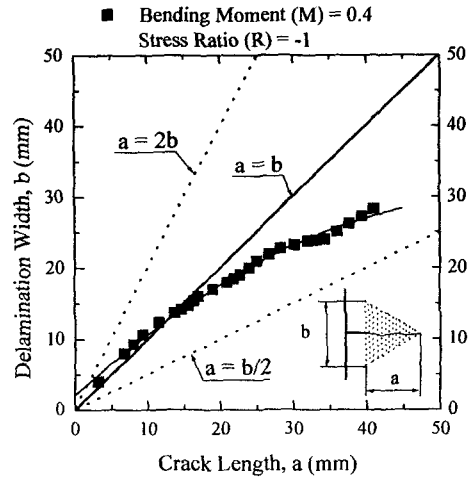


Fig. 5 Relationship between crack length,  $a$  and delamination width,  $b$  in FRMLs

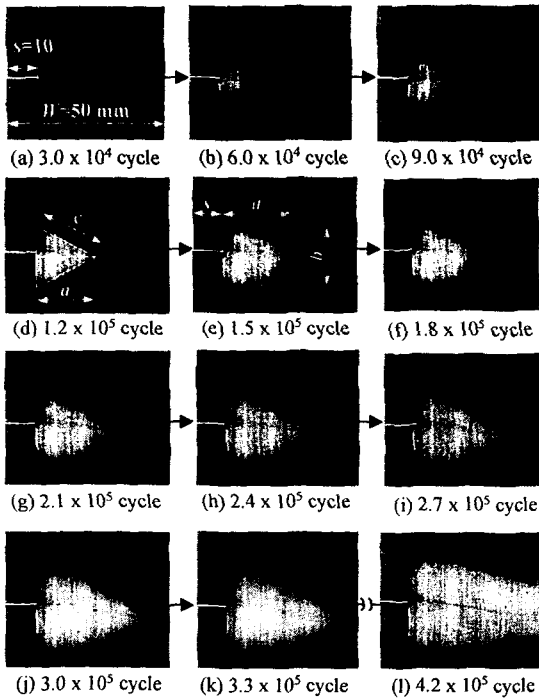


Fig. 4 Scan image of the delamination factors ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $A_D$ ) in FRMLs under cyclic bending moment

도는 점차로 저하됨을 알 수 있다. 이러한 거동은 또한 하중 방향과도 밀접한 관련이 있다.

### 3.2 층간분리 형상계수( $f_S$ )와 층간분리 성장률( $dA_D/da$ )의 관계

본 절에서는 층간분리 종횡비( $b/a$ )를 고려한 수정된 층간분리 형상계수( $f_S$ )를 이용하여 층간분리 형상이 층간분리 성장률( $dA_D/da$ )에 미치는 영향에 대해 고찰하고자 한다. 층간분리 성장은 사이클보다는 균열에 더 의존적이므로 식 (1)과 같다.<sup>(5)</sup>

$$\frac{dA_D}{da} = f_S \frac{(A_D)_N - (A_D)_{N-1}}{a_N - a_{N-1}} \quad (1)$$

여기서,  $a$ 는 균열길이,  $f_S$ 는 층간분리 형상계수,  $A_D$ 는 층간분리 면적이다.  $f_S$ 는 Fig. 1 c 처럼 층간분리 형상에 따라 분류되며, 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} c=1, \quad f_{S1} &= \left(\frac{b}{a}\right) \left(1 - \frac{s}{D}\right) \\ c=2, \quad f_{S2} &= \left(\frac{b}{a}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{s}{D}\right)} \\ c=3, \quad f_{S3} &= \left(\frac{b}{a}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{s}{D}\right)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $s$ 는 소켓길이,  $b$ 는 층간분리 폭,  $D$ 는 소켓 길이와 균열길이의 합이다. 이상의 식으로부터 구해진  $f_S$  ( $f_{S1}$ ,  $f_{S2}$ ,  $f_{S3}$ )가  $a/W$ 의 증가에 따라 변화되는 거동을 고찰하고자 Fig. 6 과 같이 나타내었다. Fig. 6 은 세 가지 층간분리 형상계수( $f_{S1}$ ,  $f_{S2}$ ,  $f_{S3}$ )가  $a/W$ 의 증가에 따라 변화되는 양상을 나타낸 그래프이다.  $f_S$  값은 반타원형 II( $f_{S3}$ ) > 반타원형 I( $f_{S2}$ ) > 삼각형 ( $f_{S1}$ ) 순으로 나타났다. 초기에는 편차가 심했으나 균열이 진행될수록 편차가 줄고, 값도 일정해져 갔다. 따라서, 층간분리 형상이 층간분리 거동에 미치는 영향력은 초기에는 형상에 따라 차이가 크게 나타나지만 균열이 진행될수록 그 차이가 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. 7 과 같은 그래프를 나타내었다. Fig. 7 은 사이클 증가에 따른  $dA_D/da$ 의 거동을 나타낸 그래프이다.  $dA_D/da$ 에  $f_S$ 를 고려한 경우가  $dA_D/da$ 에  $f_S$ 를 고려하지 않

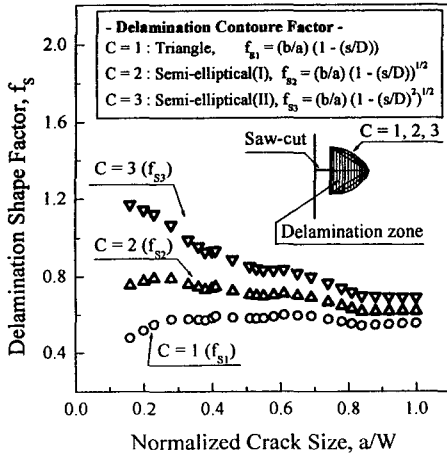


Fig. 6 Relationship between normalized crack size,  $a/W$  and three types delamination shape factors,  $f_{S1}$ ,  $f_{S2}$ ,  $f_{S3}$

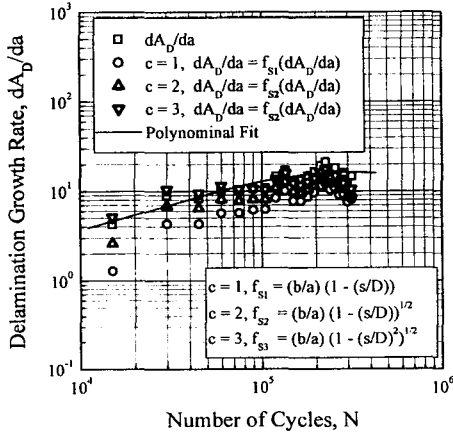


Fig. 7 Relationship between number of cycles,  $N$  and four types delamination growth rate,  $dA_D/da$

은 경우보다 전체적으로  $dA_D/da$  가 저하했음을 알 수 있다. 또한,  $f_S$  중에서 삼각형의 형태( $f_{S1}$ )가 반타원형의 형태( $f_{S2}$ ,  $f_{S3}$ )보다  $dA_D/da$  가 더 낮게 분포됨을 관찰할 수 있다. 이러한 결과는 삼각형 층간분리가 반타원형 층간분리보다 섬유가교효과가 더 우수하다는 Roebroek<sup>(7)</sup>의 연구결과와 잘 부합한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) FRMLs의 균열( $a$ )증가 속도는 사이클 초기부터 후반까지 일정한 기울기를 나타냈지만, 층간분리 폭( $b$ )의 증가속도는 사이클 초기에는  $a = b$ 의 거동을 유지하다가 사이클 중기 이후부터  $a > b$ 의 거동을 보였다.
- (2) 층간분리 형태에 따라 층간분리 형상계수( $f_S$ )

가 변화한다. 층간분리 형상계수는 반타원형 II ( $f_{S3}$ ) > 반타원형 I ( $f_{S2}$ ) > 삼각형 ( $f_{S1}$ ) 순으로 나타났다. 초기에는  $f_{S1}$ ,  $f_{S2}$ ,  $f_{S3}$  간의 편차가 심했으나 균열이 진행될수록 편차가 줄고, 값도 일정해져 갔다. 따라서, 층간분리 형상이 층간분리 거동에 미치는 영향력은 초기에는 차이가 크게 나타나지만 균열이 진행될수록 그 차이가 작아짐을 알 수 있다.

(3) 층간분리 형상계수( $f_S$ )가 층간분리 성장률( $dA_D/da$ ) 거동에 미치는 영향을 고려해 본 결과, 삼각형의 층간분리가 반타원형의 층간분리보다 층간분리 성장률( $dA_D/da$ )이 더 저하됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 삼각형 층간분리가 반타원형 층간분리보다 섬유가교효과가 더 우수하다는 Roebroek의 연구결과와 잘 부합한다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

- (1) Marissen, R., "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, 1988.
- (2) Zhi-He Jin and Yiu-Wing Mai, "Residual Strength of an ARALL Laminate Containing a Crack," *Journal of Composite Materials*, Vol. 31, No. 8, 1997, pp. 746~761.
- (3) 송삼홍, 김철웅, "반복-굽힘 모멘트의 진폭에 따른 A15052/AFRP 적층재의 층간분리 영역과 피로균열진전 거동," 대한기계학회논문집 A 권, 제 25 권, 제 8 호, 2001, pp. 1277~1286.
- (4) 송삼홍, 김철웅, "소켓 및 원공 주위의 피로균열 형태변화와 층간분리 거동 (I) - 아라미드섬유 강화 금속적층재의 경우 -," 대한기계학회논문집 A 권, 제 27 권, 제 1 호, 2003, pp. 58~65.
- (5) 송삼홍, 김철웅, "층간분리성장률( $dA_D/da$ )과 섬유가교효과인자( $F_{BE}$ )를 이용한 A1/GFRP 적층재의 피로거동 해석," 대한기계학회논문집 A 권, 제 27 권, 제 2 호, 2003, pp. 317~326.
- (6) 송삼홍, 김철웅, "인공발(Prosthetic Foot) 스포링용 유리섬유강화 적층재의 적층배향에 따른 층간분리거동 해석," 대한기계학회논문집 A 권, 제 27 권, 제 4 호, 2003, pp. 623~631.
- (7) 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.