

노치형태 변화에 따른 Al/AFRP 적층재의 층간분리거동

송삼홍* · 김철웅**

Variation of Notch Shape on the Delamination Zone Behavior in Al/AFRP Laminates

Sam-Hong Song and Cheol-Woong Kim

Key Words: Al/AFRP Laminates(알루미늄/아라미드 섬유 강화 적층재), Cyclic-Bending Moment(반복-굽힘 모멘트), Saw-Cut(소컷), Circular Hole(원공), Delamination Zone(층간분리 영역), C-Scan(C-스캔),

Abstract

Aluminum/Aramid Fiber Reinforced Plastic(Al/AFRP) laminates are applied to the fuselage-wing intersection. The main objective of this study was to evaluate the delamination zone behavior of Al/AFRP with a saw-cut and circular hole using average stress criterion and the effect of notch geometry. Mechanical tests were carried out to determine the cyclic-bending moment and delamination zone observed ultrasonic C-scan pictures. In case of Al/AFRP containing saw-cut specimen, the shape and size of the delamination zone formed along the fatigue crack. However, in case of Al/AFRP containing circular hole specimen, the shape and size of delamination zone formed two types. first type, delamination zone formed along the fatigue crack. Second type, not observed fatigue crack. Therefore, delamination zone was formed dependently of the circular hole shape.

1. 서 론

알루미늄/아라미드 섬유 강화(Al/AFRP) 적층재는 피로특성이 우수한 복합재료이다. 따라서 피로에 민감한 구조인 항공기의 동체, 저익, 동체-날개 연결부 등에 사용된다.⁽¹⁾ 특히, 동체-날개 연결부는 다른 요소와의 접합을 위한 커팅과 원공 등의 다양한 노치 성형이 이루어진다. 동체-날개 연결부에서의 노치는 항공기 운항 중 피로와 반복되는 굽힘모멘트에 의해 균열발생의 원인이 된다. 반복-굽힘 모멘트 하에서의 균열진전은 Fig. 1과 같이 Al/AFRP 적층재에서 층간분리를 동반한다.

최근의 Al/AFRP 적층재 층간분리에 대한 연구를 살펴보면 다음과 같다. Marissen⁽²⁾은 피로균열 진전과 층간분리 영역의 성장이 상호의존적임을 증명하고 균열성장거동 계산을 위한 모델을 제시했다. Lin 등⁽³⁾과 Macheret 등⁽⁴⁾은 삼각형의 층간분리 형상이 타원형의 층간분리 형상보다 섬유가 교효과가 더 우수하다고 하였고, Guo 등⁽⁵⁾은 층간분리영역의 크기와 형상은 소컷(saw-cut)에 지대한 영향을 받는다고 보고하였다. 또한, 김 등⁽⁶⁾과 Song 등^(7,8)은 기지재의 수지혼합비가 섬유강화적층재의 피로균열전파거동에 지대한 영향을 미침을 증명하였다. 그 후 송 등⁽⁹⁾은 최적의 수지혼합비로 제작된 Al/AFRP 적층재를 이용하여 반복-굽힘 모멘트의 진폭의 크기에 따른 피로균열 전파와 층간분리영역의 관계를 연구한 결과, Fig. 2와 같은 층간분리 모델을 제시하였다. 또한, 토이(Toi) 모델, 섬유가교수정인자(β_m) 등의 파라미

* 고려대학교 기계공학과

** 고려대학교 대학원 기계공학과

터를 이용하여 층간분리 현상을 규명하였다. 그러나, 이상 일련의 층간분리 연구는 모두 소켓을 내재한 Al/AFRP 적층재(이하, 소켓재)의 연구 결과이다. 그러나, 실제로 항공기에서 적용되는 Al/AFRP 적층재의 노치 형태는 다양하다. 대표적인 노치형상으로는 원공(circular hole)의 형태가 있다.

최근, Akbar Afaghi-Khatibi 등⁽¹⁰⁾은 원공을 내재한 Al/AFRP 적층재(이하, 원공재)의 유효균열성장모델(effective crack growth model, ECGM)을 제시한바 있다. 또한, Glyn Lawcock 등⁽¹¹⁾은 Al/CFRP에 소켓 및 원공을 가공하여 시험편을 제작하고 ASC(average stress criterion) 이론을 바탕으로 인장강도, 잔류응력 분포, 층간분리현상 등을 노치형상에 따라 비교한 바 있다.

이상 일련의 연구들을 종합해 본 결과, 다음과 같은 의문점을 제시할 수 있었다.

첫째, 반복-굽힘 모멘트를 받는 Al/AFRP 적층

재의 층간분리거동에 ASC 모델의 적용이 가능한가? 둘째, 반복-굽힘 모멘트 하에서 소켓재와 원공재의 균열진전 양상 및 층간분리거동은 어떤 차이를 나타낼까? 셋째, 층간분리거동과 유한요소해석결과는 잘 일치하는가?

이상의 의문점을 검토하기 위해 본 연구에서는 다음과 같은 내용을 고찰해 보기로 하였다.

첫째, ASC 모델을 이용한 Al/AFRP 적층재의 노치형상에 따른 응력분포. 둘째, 소켓재와 원공재의 층간분리 거동 비교. 셋째, 층간분리거동과 유한요소해석 결과 비교 등이다.

2. 실험

2.1 Al/AFRP 적층재 제작 및 시험편 형상

Al/AFRP 적층재는 Al5052에 아라미드 섬유를 3/2의 형태로 적층하였다. 이때 아라미드 섬유에 함침된 기지의 제작은 Song 등^(7,8)이 제안한 수지 혼합비(에폭시 수지:경화제:경화촉진제의 당량비)인 <1:1:0.2>를 택하였으며 Table 1과 같다. 노치형상은 소켓과 원공의 형태로 구분하였다. 소켓길이 $a = 5, 10 \text{ mm}$ 와 원공지름 $d = 5, 10 \text{ mm}$ 로 적용하였다. 노치의 형태와 크기에 따른 시험편의 형상은 Fig. 3과 같다.

2.2 실험방법

본 실험에 사용된 시험기는 굽힘 및 비틀림 피로시험기(TB-10, Shimadzu Co.)이다. 최대 모멘트 진폭은 98 N-m이며, 분당회전수는 2000 rpm이고 33.3 Hz, $R = -1$ 이다. 하중의 형태는 반복-굽힘 모멘트를 가하였고 모멘트 값을 4.9 N-m로 적용하였다. 피로균열 관찰은 접안 이동 측미계를 이

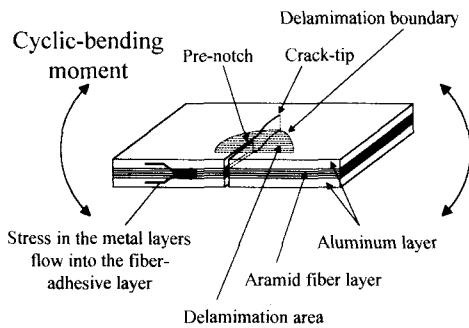


Fig. 1 Schematic of delamination zone shape in the Al/AFRP laminates containing saw-cut under cyclic-bending moment

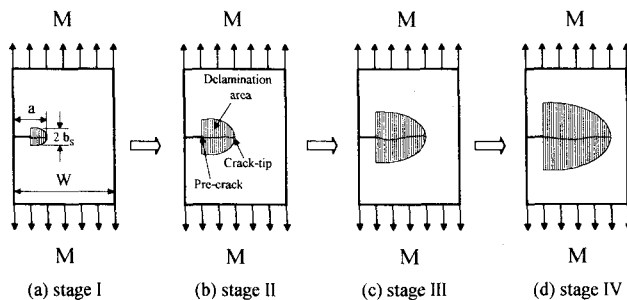


Fig. 2 Relationship between crack growth and delamination extension in the Al/AFRP laminates under cyclic bending moment



(e) Ultrasonic C-scan picture(stage IV)

Table 1 Component and the mixture ratio of Al/AFRP

Factor Name	Component	Mixture ratio [#]		Thickness (mm)
		Equivalence ratio	Volume ratio**	
Al/AFRP	Al5052	-	-	0.5
	Prepreg*	1 : 1 : 0.2 ^{##}	312 : 150 : 76	0.3

* Prepreg = matrix(epoxy resin + curing agent + accelerator) + aramid fiber

** Volume ratio = (molecular weight / specific gravity) × equivalence ratio

Mixture ratio = epoxy : curing agent : accelerator

20 % of epoxy content

용하였고 100배의 배율로 피로균열을 관찰하였다. 또한, Al/AFRP 적층재의 층간분리영역은 C-scan(Mi-SCOPE exla, Hitachi Co.) 촬영을 이용하여 노치의 형상 및 크기에 따른 층간분리 영역의 형상과 면적, 섬유상태 및 파단여부 등을 관찰하였다.

3. ASC 모델을 이용한 Al/AFRP 적층재 노치 주위의 응력평가

Al/AFRP 적층재에 반복하중이 작용할 때 노치 주위에 작용하는 응력분포의 계산은 Whitney⁽¹²⁾와 Nuismer⁽¹³⁾가 제안한 평균응력계산법(average stress criterion, ASC)을 적용하였다. 평균응력계산법은 직교이방성의 적층복합재에서 노치 주위의 응력분포를 계산할 수 있는 방법이다. 또한, 노치의 형상 및 크기의 변화에 따른 응력분포를 예측할 수 있다. 균열이 내재된 노치 주위에서의 평균응력은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\sigma_0 = \frac{1}{a_0} \int_R^{R+a_0} \sigma_y(x, 0) dx \quad (1)$$

여기서, σ_0 는 평균응력이고 a_0 는 실험에서 측정된 균열길이이다. 그리고 $\sigma_y(x, 0)$ 는 노치가 존재하는 x축에서의 법선응력을 나타내는 것이다.

또한, 노치의 형상이 원공의 형태일 때의 결합이 주위의 응력분포는 식 (2)와 같이 표현된다.

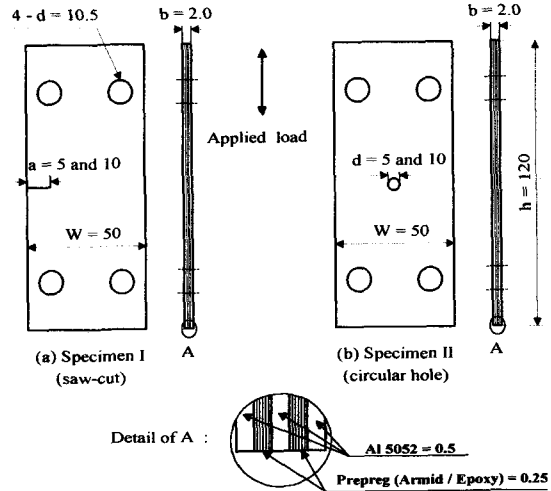


Fig. 3 Shape of Al/AFRP laminates specimen (a) saw-cut (b) circular hole

$$\sigma_y(x, 0) = \left\{ 2 + \left(\frac{R}{x}\right)^2 + 3\left(\frac{R}{x}\right)^4 - (K_T^\infty - 3)\left[5\left(\frac{R}{x}\right)^6 - 7\left(\frac{R}{x}\right)^8\right] \right\} \frac{\sigma_N^\infty}{2} \quad (2)$$

여기서, R은 원공의 반지름이고 x는 원공의 지름(d)과 균열길이(a₀)를 합한 길이이다. 또한, σ_N^∞ 는 시험편 전체에 작용하는 응력이다. K_T^∞ 는 식 (3)과 같이 표현되는데 본 실험에 적용된 시험편의 섬유배열은 단방향이므로 $K_T^\infty = 1$ 이다.

$$K_T^\infty = 1 + \sqrt{\frac{2}{A_{11}} \left(\sqrt{A_{11}A_{22} - A_{12}^2} + \frac{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}{2A_{66}} \right)} \quad (3)$$

여기서, A_{ij} 는 직교이방성 재료의 적층배열에 따른 적층판의 개수이다. 또한, 노치의 형상이 소켓 형태일 때, 노치 주위의 응력분포는 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_y(x, 0) = K_I \frac{x}{\sqrt{\pi a(x^2 - a^2)}} \quad (4)$$

여기서, a는 소켓 길이에 해당되고 K_I 은 응력확대계수이다. K_I 은 식 (5)에 의해 구할 수 있다.

$$K_I = \sigma_N Y\left(\frac{a}{W}\right) \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

여기서, $Y\left(\frac{a}{W}\right)$ 는 식 (6)에 의해서 구할 수 있다.

$$Y\left(\frac{a}{W}\right) = \sqrt{\frac{w}{\pi a} \tan\left(\frac{\pi a}{W}\right)} \quad (6)$$

이상의 ASC 모델을 이용하여 소켓재와 원공재에 균열이 진전할 때 노치의 크기와 형상에 따라 변화하는 노치 주위의 응력분포 변화를 예측해 보았다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 AI/AFRP 적층재의 노치형상에 따른 응력분포
노치형상이 소켓일 때와 원공일 때의 응력분포를 예측하기 위하여 식(1)~(6)에 의해 계산된 노치 주위의 응력분포를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)는 소켓길이에 따른 응력분포를 나타낸 그래프이고, Fig. 3(b)는 원공의 반지름 크기에 따른 응력분포를 나타낸 그래프이다. Fig. 3(a)의 경우, 응력집중은 소켓의 선단에 걸리고 소켓의 길이가 짧아질수록 소켓선단 응력집중 구배가 커짐을 알 수 있다. 또한, Fig. 3(b)의 경우, 응력집중은 원공의 양 끝단에 걸리고 원공의 반지름 크기가 작아질수록 원공에 인접한 응력집중 구배가 커짐을

알 수 있었다. 이러한 소켓과 원공의 응력 분포는 반복-굽힘 모멘트가 작용하는 AI/AFRP 적층재에서 알루미늄층의 균열진전 양상에 지대한 영향을 미칠 것으로 판단된다. 응력구배가 완만할수록 균열발생 가능성은 작아진다. 따라서 소켓재에 비해 원공재의 균열발생 가능성은 상대적으로 작다. 다시 말해서, 특정 응력수준에서 소켓재에 균열이 발생했다더라도 원공재에서는 균열이 발생할 수도 있고 발생하지 않을 수도 있다. 균열이 발생하지 않은 경우, 균열형성에 소비되어야 할 에너지는 다른 형태로 소비될 것이며 이 에너지는 결국 층간분리영역 형성에 소비될 것이라고 생각된다. 또한, 노치의 형상에 따른 균열의 거동은 결과적으로 층간분리 거동에 지대한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

4.2 소켓재와 원공노치재의 층간분리거동 비교

송 등⁽⁹⁾은 소켓을 내재한 AI/AFRP 적층재(소켓재)에 반복-굽힘 모멘트가 작용할 때의 피로균열 전파와 층간분리영역의 관계를 규명한 바 있다.

그리고 Fig. 2와 같은 모델을 제시하였다. 소켓재는 특정 응력 및 사이클에서 항상 균열이 발생하였고 균열진전은 층간분리현상을 야기하였다. 층간분리 현상은 균열의 후방에서 넓게 퍼지는 형상이었다. 그러나 노치의 크기나 형상이 달라지면 4.1절에서 언급한 바와 같이 노치주위의 응력분포도 달라지고 이로 인해 균열 및 층간분리의 거동이 달라질 것이다.

Fig. 4는 균열이 진전함에 따라 층간분리 영역이 균열후방에 확장되어 가는 양상을 C-scan을

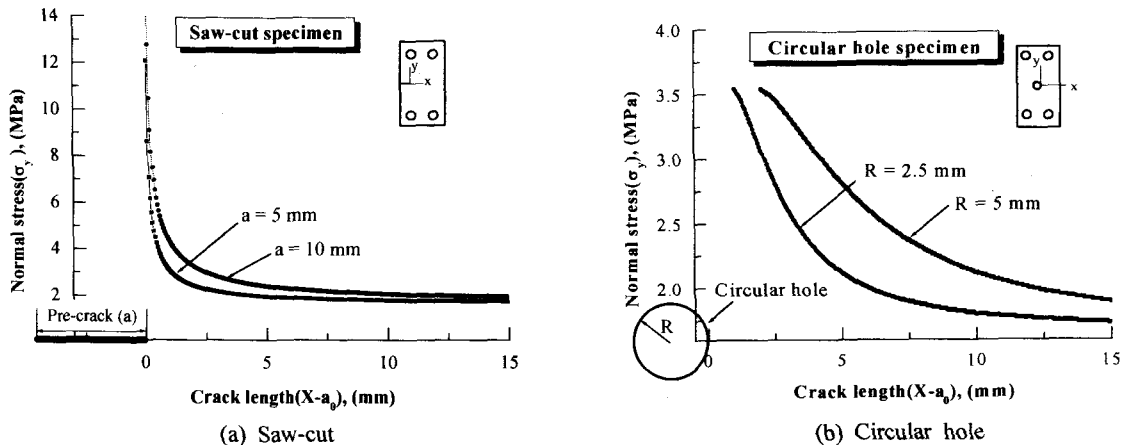


Fig. 3 Normal stress distribution(σ_y) in AI/AFRP laminates containing a saw-cut and circular hole

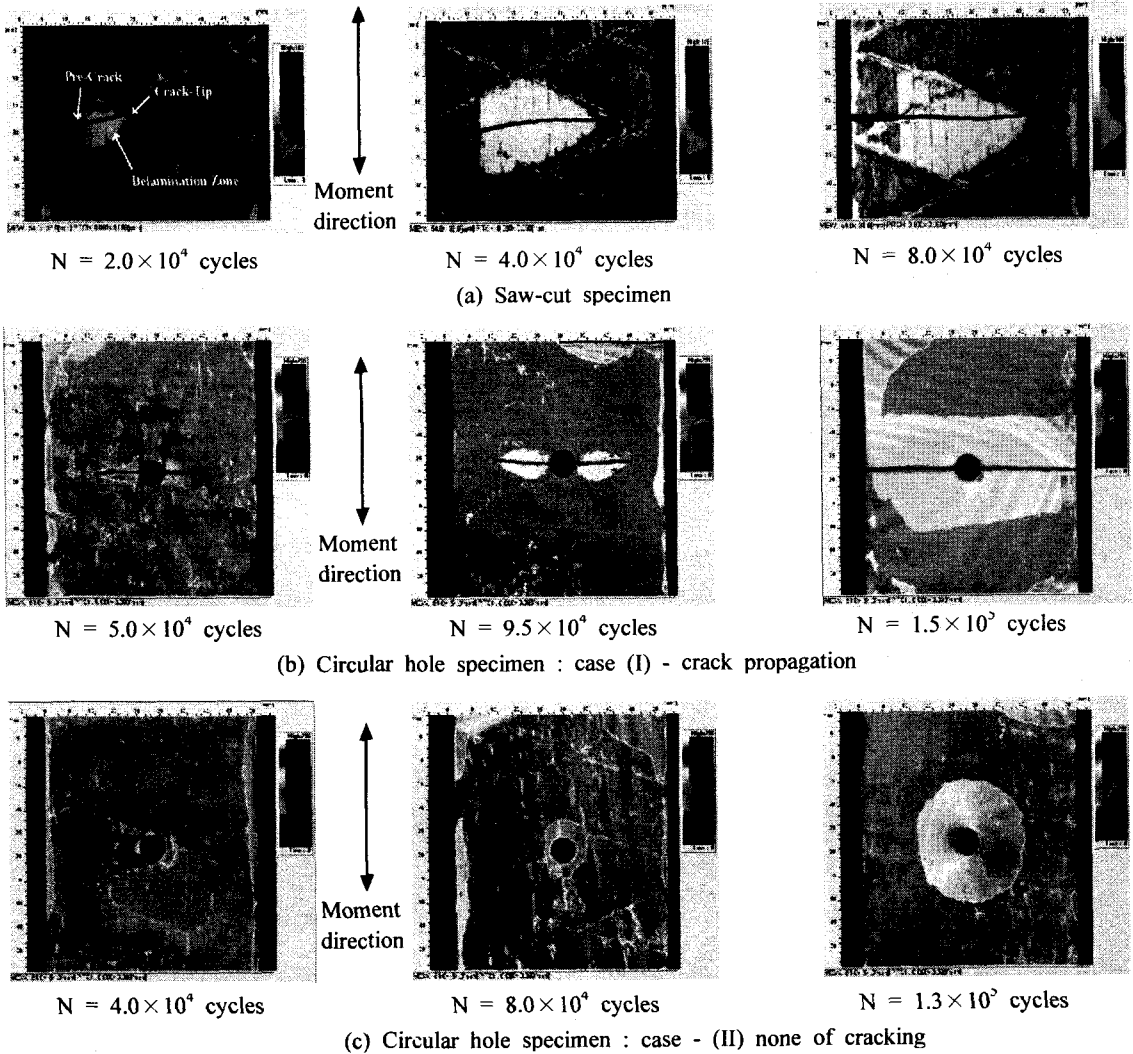


Fig. 4 Ultrasonic C-scan pictures of the shape of crack and delamination in the Al/AFRP under cyclic bending moment of 4.9 N-m (a) saw-cut, (b) circular hole : case (I), (c) circular hole : case (II)

이용하여 단계적으로 촬영한 사진이다. Fig. 4(a)는 소켓재의 균열진전과 이에 따른 층간분리영역의 확장을 나타낸 것이고 Fig. 4(b), (c)는 원공재의 균열진전 및 층간분리 영역 확장을 나타낸 것이다. 소켓재(Fig. 4(a))는 항상 균열이 발생하였고 층간분리영역이 균열후방에서 반타원형으로 형성되었으나 원공재(Fig. 4(b), (c))는 두 가지 양상이 나타났다. 앞 절에서 언급한 바와 같이 원공재는 특정응력에서 균열이 발생할 수도 있고, 발생하지 않을 수도 있다. Fig. 4(b)는 균열이 발생한 경우를 나타낸 것이고, Fig. 4(c)는 균열이 발생하지

않은 경우를 나타낸 것이다. 특히, Fig. 4(c)는 균열의 발생 없이 사이클 증가에 따라 층간분리 영역만 확장해 나간 모습이다.

기존의 연구결과^(1~13)들은 모두가 균열진전과 이에 따른 층간분리현상의 관계에 초점을 맞추어 연구가 진행되어왔다. 즉, 균열의 진전은 층간분리를 야기하며 층간분리는 균열거동에 의존적이라는 것이다. 그러나 본 연구결과와 원공재의 경우, 균열발생 없이 층간분리영역만 확장되는 경우도 발생한다는 것을 알 수 있었다. 또한, 층간분리영역이 확장되는 방향도 섬유방향이나 하중방향

에 큰 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 즉, 원공을 중심으로 모든 방향으로 균일하게 층간분리영역이 확장되었음을 Fig. 4(c)를 통하여 관찰할 수 있다. 이러한 기구는 Lin 등⁽³⁾과 Macheret 등⁽⁴⁾이 제안한 소켓재에서의 삼각형 또는 타원형 층간분리형상과 송 등⁽⁹⁾이 제안한 반타원 모델과 대별된다. 기존의 연구결과에서 층간분리 형상은 균열의 진전방향과 섬유방향, 하중방향에 지대한 영향을 받는다는 공통점이 있다. 그런 점에서 Fig. 4(c)와 같은 양상은 특별한 의미를 제시한다. Fig. 4(c)는 알루미늄 층에서 균열이 전혀 발생하지 않았으므로 외관상으로는 손상이 없는 재료로 판단될 소지가 있다. C-scan 촬영을 통해서만 손상영역(층간분리영역)을 관찰할 수 있다. 또한, 부하초기에 균열이 발생하지 않으면 원공주위의 응력은 층간분리영역을 형성하고 확장하는데 소모된다.

소켓재의 층간분리거동의 경우, 층간분리영역이 항상 균열 중심에서 하중방향으로 넓게 퍼져듯이 원공재의 층간분리거동의 경우에서도 원공이 균열의 다른 형태라고 가정했을 때, 원공을 중심으로 고르게 퍼져나가는 양상 자체는 동일한 메커니즘이라고 판단된다. 단, 소켓재와 원공재에서의 층간분리영역의 형태가 달라지는 이유는 노치의 기하학적 형상에 지대한 영향을 받기 때문이다. 즉, 균열(일종의 노치라 가정)은 반복-굽힘 모멘트에 의해 지속적으로 성장하기 때문에 구간별 균열발생 시점을 기준으로 사이클이 증가할수록 층간분리영역의 폭이 증가한다. 따라서 반타원의 형태를 나타낸다. 원공재에서의 원공은 부하 시작부터 끝까지 일정한 형태를 유지하기 때문에 원공을 중심으로 모든 방향에 고르게 퍼져나간 형태인 것이다. 결과적으로 층간분리영역의 형태를 좌우하는 인자는 하중방향과 섬유 방향보다는 노치의 형상이 더 지대한 영향을 미치는 인자라고 판단된다. 그러나 균열이 없는 원공재(Fig. 4(c))가 소켓재에 비해 하중방향과 섬유방향에 영향을 덜 받은 이유는 좀 더 검토되어야 할 것 같다.

층간분리 면적 증가율은 사이클 증가에 따른 균열길이 증가 속도와 밀접한 관련이 있다. Fig. 5는 소켓재와 균열이 발생한 원공재의 사이클과 균열길이의 관계를 나타낸 그래프이다. 원공재에 비해 소켓재의 균열성장속도가 월등히 높음을 알

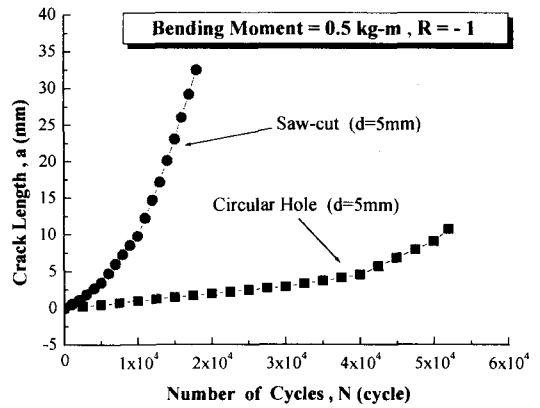


Fig. 5 Relationship between crack length(a) and number of cycles(N) in AFRP laminates containing a saw-cut and circular hole

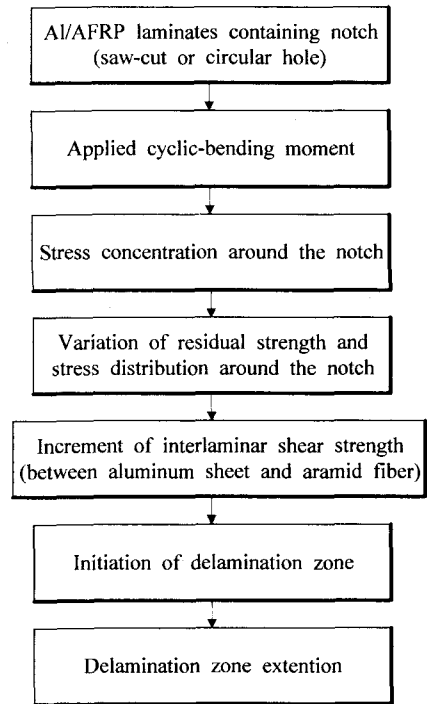


Fig. 6 Flow chart of delamination zone mechanism in the Al/AFRP laminates containing saw-cut or circular hole.

수 있었다. 균열성장속도가 빠를수록 층간분리영역의 확장속도도 빨라진다. 따라서 동일 사이클 수에서 층간분리면적은 소켓재가 원공재보다 더 넓게 나타난다.

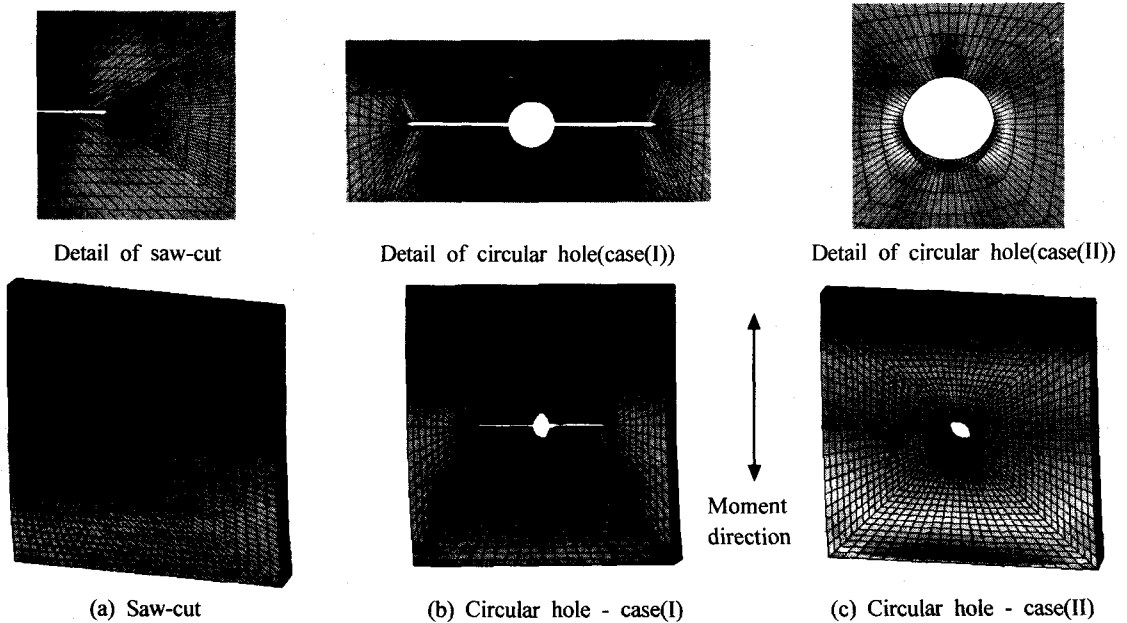


Fig. 7 Simulation of stress distribution and deformation under cyclic bending moment in Al/AFRP laminates containing a saw-cut and circular hole. (a) saw-cut (b) circular hole - case(I) (c) circular hole - case(II)

본 절에서 언급한 내용을 종합해 본 결과, 다음과 같은 절차에 의해 층간분리영역이 발생 및 성장함을 알 수 있다. 첫째, 반복하중에 의해 응력집중 발생. 둘째, 응력집중으로 인한 알루미늄층과 섬유층의 잔류응력 및 응력분포 변화. 셋째, 응력분포 변화가 계면에서의 층간전단강도를 증가. 넷째, 층간전단강도증가로 인한 층간분리영역 발생. 다섯째, 반복하중에 의한 층간분리영역 확장 순이다. 이러한 층간분리 메커니즘을 Fig. 6과 같은 순서도로 나타내었다.

4.3 층간분리 거동과 유한요소 해석 결과 비교

Al/AFRP 적층재에서 알루미늄층 노치 주위의 응력분포가 층간분리영역에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 Fig. 7과 같이 나타내었다. Fig. 7은 알루미늄층의 노치주위에 작용하는 응력분포를 유한요소해석 프로그램을 이용하여 나타낸 것이다. 소켓재(Fig. 7(a))와 균열이 발생한 원공재(Fig. 7(b))의 경우 공통적으로 균열선단에서 국부적으로 응력이 집중되었음을 관찰할 수 있다. 그러나 균열이 발생하지 않은 원공재(Fig. 7(c))의 경우, 응력 분포가 보다 광범위하게 이루어졌으며 원공을 중심으로 상하좌우로 고르게 응력이 분포되었

음을 볼 수 있다. 노치형상은 응력분포를 변화시켰으며 그러한 알루미늄층의 응력분포는 결과적으로 Fig. 4에 제시한 바와 같은 층간분리영역 형성에 크게 작용했음을 알 수 있다.

아라미드 섬유층은 직교이방성이지만 알루미늄층과 접촉하고 있으므로 거의 동일한 형태의 하중 및 노치 영향을 받았을 것이라고 판단된다. 또한, 노치 형상에 따른 알루미늄층의 응력분포는 잔류응력 부호가 다른 아라미드 섬유층에 영향을 주었으며 이로 인해 층간전단강도는 증가하고 서로 부호가 다른 잔류응력의 차이가 심화되어 층간분리를 유발했을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 Al/AFRP 적층재에 반복-굽힘 모멘트가 작용할 때, 노치의 형상이 층간분리거동에 미치는 영향을 고찰해 보았다. 그리고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) Al/AFRP 적층재의 노치형상에 따른 응력분포를 고찰하기 위해 ASC(average stress criterion) 모델을 적용한 결과, 소켓재는 균열길이가 짧을수록 소켓 주위의 응력구배가 심화되고, 원공재

는 원공지름이 작아질수록 원공 주위의 응력구배가 심화되었다.

(2) 피로균열전파와 층간분리영역의 관계를 살펴보면, 소켓재의 경우, 특정응력 하에서 항상 균열이 발생하고 균열후방에 층간분리영역이 확장되어 가는 형상이 나타났으나, 원공재의 경우, 특정응력 하에서 균열이 발생하는 경우와 발생하지 않는 경우가 나타났다.

(3) 원공재에서 균열이 발생한 경우의 층간분리 거동은 균열에 의존적이며, 소켓재와 유사한 메커니즘에 의해 층간분리영역이 확장되어 갔으나, 균열이 발생하지 않은 경우는 노치의 형상과 그에 따른 응력분포가 층간분리영역 확장에 지대한 영향을 미쳤다.

(4) 균열성장속도가 빠를수록 층간분리영역의 확장속도도 빨라진다. 따라서 동일 사이클 수에서의 층간분리면적은 소켓재가 원공재보다 더 넓다.

(5) 종합해 보면, 층간분리 영역은 균열이 존재하는 경우 균열에 의존적이지만 균열이 존재하지 않는 경우, 노치형상이 미치는 영향이 하중방향과 섬유방향이 미치는 영향보다 더 지대함을 알 수 있다.

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) Lin C. T., Kao P. W. and Yang F. S., 1991, *Composite*, Vol. 2, p. 135.
- (4) Macheret J., Teply J. L. and Winter E. F. M., 1989, *Polymer Composites*, Vol. 10, p. 322.
- (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) 김철웅, 손세원, 1999, "수지혼합비가 FRMLs의 피로균열전파거동과 기계적 성질에 미치는 영향에 관한 연구," *한국정밀공학회지*, 제16권, 제8호, pp. 149~154.
- (7) Song Sam-Hong and Kim Cheol-Woong, 2000, "The Influence of Resin Mixture Ratio for the Use of Prepreg on the Fatigue Behavior Properties in FRMLs," *International Journal of KSPE*, Vol. 1, No. 1, pp. 33~41.
- (8) 송삼홍, 김철웅, 2001, "프리프레그 제작용 에폭시 수지·경화제·경화촉진제 혼합비 변화에 따른 FRMLs의 피로거동특성," *대한기계학회논문집 A권*, 제25권, 제4호, pp. 592~601.
- (9) 송삼홍, 김철웅, 2001, "반복-굽힘 모멘트의 진폭에 따른 Al5052/FRP 적층재의 층간분리영역과 피로균열진전 거동," *대한기계학회논문집 A권*, 제25권, 제8호, pp. 1277~1286.
- (10) 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.
- (11) Glyn Lawcock, Lin Ye and Yiu-Wing Mai, 1997, "Progressive Damage and Residual Strength of a Carbon Fiber Reinforced Metal Laminate," *Journal of Composite Materials*, Vol. 31, No. 8, pp. 762~787.
- (12) Whitney J. M. and Nuismer R. J., 1974, "Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations," *Journal of Composite Materials*, Vol. 8, p. 253.
- (13) Nuismer R. J. and Whitney J. M., 1975, "Uniaxial Failure of Composite Laminates Containing Stress Concentrations," *Fracture Mechanics of Composites*, ASTM STP 593, p. 117.