

프리프레그 제작용 에폭시 수지·경화제·경화촉진제 혼합비 변화에 따른 FRMLs의 피로거동 특성

송삼홍[†] · 김철웅^{*}

(2000년 4월 28일 접수, 2001년 2월 22일 심사완료)

The Mixture Ratio Effect of Epoxy Resin, Curing Agent and Accelerator on the Fatigue Behavior of FRMLs

Sam-Hong Song and Cheol-Woong Kim

Key Words: Fiber Reinforced Metal Laminates(FRMLs : 섬유강화금속적층재), Prepreg(프리프레그), Epoxy Resin(에폭시 수지), Curing Agent(경화제), Accelerator(경화촉진제), Resin Mixture Ratio(수지 혼합비), Stress Intensity Factor Range(ΔK : 응력확대계수 범위), Fatigue Crack Growth Rate(da/dN : 피로균열 성장률)

Abstract

Fiber reinforced metal laminates(FRMLs) are new types of hybrid materials. FRMLs consists of high strength metal(Al 5052-H34) and laminated fiber with structural adhesive bond. The mixture ratio effect of epoxy resin·curing agent·accelerator on the fatigue behavior of FRMLs was investigated in this study. The epoxy, diglycidylether of bisphenol A(DGEBA), was cured by methylene dianiline(MDA) with or without an accelerator(K-54). Eight different kinds of resin mixture ratios were selected for the test ; five kinds of FRMLs(1) and three others of FRMLs(2). The relationship between da/dN and ΔK with variation of resin mixture ratio was studied. FRMLs(1) and FRMLs(2) indicated approximately 2 times and 2.2 times more improved maximum bending strengths in comparison with those of Al 5052-H34. The resin mixture ratio <1:1> in case of FRMLs(1) indicated the maximum fatigue life, while the resin mixture ratio <1:1:0.2> in case of FRMLs(2) indicated the maximum fatigue life. As results, FRMLs(2) turned out to have more effective characteristics on the fatigue properties and the bending strength than those of FRMLs(1).

1. 서론

섬유강화적층재는 기지재와 강화재로 구성되어 있다. 기지재는 크게 열경화성 수지와 열가소성 수지로 구분되며, 열경화성 수지는 주로 에폭시 수지가 사용된다. 또한, 강화재는 고분자 섬유가

사용된다. 기지재는 외부로부터 강화재를 보호하고 구조물의 형상을 유지하는 역할을 한다. 강화재로 사용되는 고분자 섬유의 경우, 외부요소(외력, 열, 수분, 화학적 반응 등)에 대해 불안정하게 반응하므로 섬유강화적층재에 있어서 외부요소에 대한 기지재의 저항성은 매우 중요한 인자이다.^(1,2) 특히, 외부로부터 낮은 반복하중을 받을 때에는 주로 기지재가 하중을 지탱하므로 그 기계적 성질이 매우 중요하며, 파괴진진양상에 결정적인 영향을 미친다.^(3,4)

섬유강화적층재의 기계적 특성은 강화재와 기

[†] 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail : shsong@mail.korea.ac.kr

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

^{*} 회원, 고려대학교 대학원 기계공학과

지재의 중간물성을 나타낸다는 혼합법칙에 의해 설명되어진다.⁽⁶⁻⁷⁾ 따라서 섬유강화적층재의 기계적 특성을 향상시키기 위해서는 우수한 강화재의 개발에 못지 않게 기지재의 연구도 중요하다.

최근 프리프레그(prepreg)를 이용한 복합재료의 제작은 주로 상용화된 프리프레그를 구입해서 복합재를 제작하고 있는 실정이다. 또한, 국내의 경우, 기지재의 혼합비에 따른 기계적 특성 연구는 일정 단계까지 진행되었으나 피로균열진전 거동에 관한 연구는 아직 미진한 상태이다. 특히, 에폭시 수지계의 혼합비 변화가 재료의 피로균열진전 거동과 굽힘강도에 미치는 영향에 관한 정량적인 연구는 아직 보고된 바가 없다. 또한, 본 연구에서 사용된 기지재인 비스페놀 A계 에폭시 수지(epoxy resin of bisphenol A type)와 아민계 경화제(curing agent of amine type)는 범용적이고 경제적인 재료라서 실용가치가 높다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 섬유강화적층재의 제작에 사용되는 프리프레그 제작용 에폭시 수지, 경화제, 경화촉진제를 이용하여 여러 가지 수지 혼합비의 프리프레그를 제작하고 시험편을 만들었다. 그리고 수지 혼합비가 굽힘강도에 미치는 영향, 수지 혼합비가 피로수명 거동에 미치는 영향, 응력확대계수범위(ΔK)에 미치는 영향, 피로균열성장률(da/dN)에 미치는 영향 그리고 응력확대계수범위(ΔK)와 피로균열성장률(da/dN)의 관계에 미치는 영향 등을 실험을 통하여 고찰해 보았다.

2. 수지 혼합비에 따른 시험편 제작

2.1 섬유강화고속적층재 제작

2.1.1 혼합비별 수지 용액 제작

사용된 에폭시 수지는 열경화성 에폭시 수지인 비스페놀 A계 수지(diglycidylether of bisphenol A(DGEBA)type, YD-128, KUKDO Chemical)이다. 또한, 에폭시 수지의 경화반응을 촉진시키고 화학적으로 안정된 반응을 유도하기 위한 경화제로는 메틸렌 디아닐린(methylene dianiline, MDA-150, KUKDO Chemical)을 사용했고, 경화의 촉매역할을 하는 경화촉진제로는 방향성 3급 아민계에 속하는 트리스(디메틸아미노 메틸) 페놀(tris(dimethyl amino methyl) phenol, K-54, KUKDO Chemical)을 사용했다. 이상과 같이 열거한 에폭시 수지, 경화

제, 경화촉진제를 이용하여 총 8가지의 혼합비로 분류하여 수지용액을 제작했는데 에폭시 수지와 경화제의 혼합비를 5가지의 수지 혼합비로 분류하였고 에폭시 수지, 경화제, 경화촉진제의 혼합비를 3가지의 수지 혼합비로 분류하였다. 이처럼 수지용액의 제작을 크게 에폭시 수지와 경화제를 혼합하여 수지용액을 만드는 방법과 에폭시 수지와 경화제 및 경화촉진제를 혼합하여 만드는 방법으로 분류한 이유는 경화촉진제가 첨가된 시편과 첨가되지 않은 시편의 굽힘강도와 피로특성을 비교해서 경화촉진제의 첨가에 따른 기계적 특성 변화를 정량적으로 연구하기 위함이다. 또한, 가장 우수한 기계적 강도를 갖는 최적의 수지 혼합비를 조사하기 위해서 전자는 에폭시 수지와 경화제의 이상적인 당량비인 <1:1>에 경화제 함량을 25%씩 증감시켜 5가지 수지 혼합비의 수지용액을 제작하였고, 후자는 전자의 수지 혼합비 <1:1>에 경화촉진제를 10, 20, 30%로 증가시켜서 3가지 수지용액을 제작하였다. 이때 에폭시와 경화제, 경화촉진제의 함량은 당량비를 부피비로 환산하여 적용하였다.

수지 용액 제작 시 열경화성 에폭시 수지로 사용된 YD-128과 경화촉진제로 사용된 K-54는 점도가 높은 액상이나 경화제로 사용된 MDA-150은 반고상(semi-solid)이기 때문에 80°C에서 액상으로 용융시킨 후 혼합해야 한다. 또한 K-54는 첨가량의 미세한 차이에 의해 경화반응이 급진적으로 일어나게 되며 이에 따라 가사시간이 단축되고 고열이 발생하게 되므로 특별한 주의를 요한다.

2.1.2 프리프레그 제작

프리프레그란 Preimpregnate의 약자로 섬유층에 수지용액이 B-stage 상태로 함침되어 있는 형태를 말한다. 프리프레그의 제작에 사용된 강화재료는 아라미드 섬유(aramid fiber : Twaron®, type-2200, AKZO-NOBEL Co.)를 사용했다. 본 실험에 적용된 아라미드 섬유의 원단두께는 1.0 mm에 해당되며, 기계적 특성은 Table 1과 같다.

2.1.1 항에 언급한 8가지 혼합비의 수지용액을 각각 단방향 아라미드 섬유에 함침시켰다. 수지함침은 레진베스를 사용하는 방법이 일반적이거나 수지함침물을 정확히 조절하기가 힘들기 때문에 계산에 의해 측정된 수지량을 비이커를 이용해서 직접 수지에 함침시키는 직접함침법을 이용했다. 이때 수지함침률은 45%로 적용했다.

Table 1 Mechanical properties of Twaron® 2200

Tensile modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Density (g/cm ³)	Coeff. of thermal expansion (10 ⁻⁶ /K)	Filament diameter (μm)
115	3150	2.6	1.44	-3.5	12

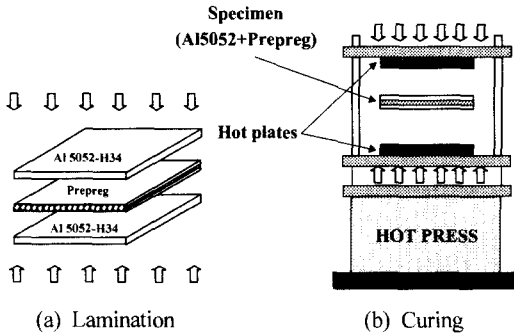


Fig. 1 Schematic of FRMLs manufacture

2.1.3 적층

8가지 수지 혼합비에 의해 제작된 각각의 프리프레그를 두께가 0.5 mm인 알루미늄 판재(Al 5052-H34)와 2/1의 형태로 섬유방향과 압연방향이 일치되게 적층했다. 적층형태는 Fig. 1(a)와 같다. 이때, 프리프레그와 알루미늄 판재와의 집착력을 향상시키기 위해 알루미늄 표면을 압연방향으로 연마했다. 적층된 시험편의 두께는 2.0 mm이다.

Fig. 1(a)에 제시한 형태와 같이 프리프레그와 알루미늄 판재가 적층된 복합재를 섬유강화금속 적층재(Fiber Reinforced Metal Laminates, FRMLs)라고 하는데 에폭시 수지와 경화제를 5가지 혼합비율로 제작한 섬유강화금속적층재를 FRMLs(1)이라고 명명했고, 에폭시와 경화제, 경화촉진제를 3가지의 혼합비율로 제작한 섬유강화금속적층재를 FRMLs(2)라고 명명했다.

Table 2는 FRMLs(1)의 제작을 위해 적용된 에폭시 수지와 경화제의 5가지 혼합비율을 나타낸 것이고 Table 3은 FRMLs(2)의 제작을 위해 적용된 에폭시 수지와 경화제, 경화촉진제의 3가지 혼합비율을 나타낸 것이다. Table 2와 Table 3에서 부피비 계산에 적용된 에폭시수지(YD-128)와 경화제(MDA-150), 경화촉진제(K-54)의 분자량은 각각 368 g/mol, 169 g/mol, 265 g/mol 이고, 비중은 각각 1.18, 1.13, 0.97이다.

Table 2 Resin mixture ratio system of FRMLs(1)

Factor Name	Component	Equivalence ratio	Volume ratio [#]	Thickness (mm)	Index
FRMLs (1)	Al 5052-H34	-	-	0.5	A
	Matrix of prepreg [*]	1 : 0.50	311.9 : 74.8	1.0	B
		1 : 0.75	311.9 : 112.2	1.0	C
		1 : 1.00	311.9 : 149.6	1.0	D
		1 : 1.25	311.9 : 187.0	1.0	E
		1 : 1.50	311.9 : 224.4	1.0	F

[#] Matrix of prepreg = Epoxy resin + Curing agent

^{**} Volume ratio = (Molecular weight / Specific gravity) × Equivalence ratio

Table 3 Resin mixture ratio system of FRMLs(2)

Factor Name	Component	Equivalence ratio	Volume ratio	Thickness (mm)	Index
FRMLs (2)	Al 5052-H34	-	-	0.5	A
	Matrix of prepreg [*]	1 : 1 : 0.1 ^{**}	311.9 : 149.6 : 37.9	1.0	G
		1 : 1 : 0.2 ^{**}	311.9 : 149.6 : 75.8	1.0	H
		1 : 1 : 0.3 ^{**}	311.9 : 149.6 : 113.8	1.0	I

^{*} Matrix of prepreg = Epoxy resin + Curing agent + Accelerator

^{**} 10, 20, 30% of epoxy content

2.1.4 경화

Fig. 1(b)와 같이 핫-프레스를 이용하여 경화시켰다. 경화반응에 의하여 에폭시 수지의 분자 사이에는 가교결합이 일어나서 분자량이 증가하며 3차원의 망상구조로 변화한다. FRMLs는 서로 다른 이중재료인 알루미늄과 아라미드 섬유의 결합이므로 경화 시에 두 재료에는 서로 다른 열팽창계수와 잔류응력 때문에 변형이 발생한다. 특히 아라미드 섬유의 경우, 섬유방향의 열팽창계수와 섬유직각방향의 열팽창계수가 무려 35배 이상 차이가 난다. 경화 후 냉각이 진행된다면 섬유층은 잔류압축응력이 작용하고, 알루미늄층은 잔류인장응력이 발생한다. 따라서 경화 후 변형을 방지

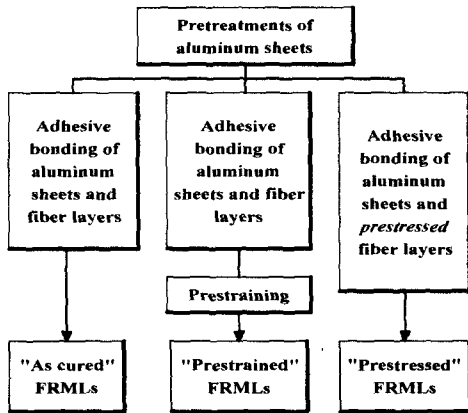


Fig. 2 Flow chart of pre-treatment in FRMLs

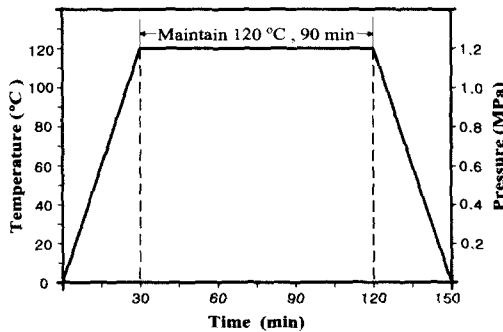
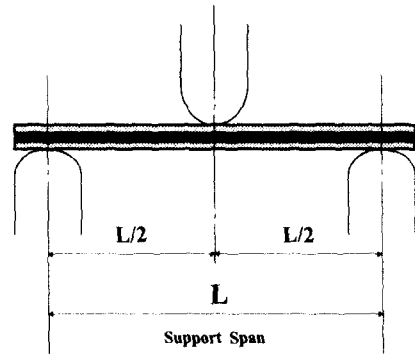


Fig. 3 Curing cycle of FRMLs(1) and FRMLs(2)

하고 잔류응력 체계를 보완하기 위해 FRMLs에 프리-스트레인을 가하거나 서냉시간을 길게 하는 방법이 있다. Fig. 2는 FRMLs의 제작시 적용되는 세 가지의 선처리 조건을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 상용화된 프리프레그를 이용하여 FRMLs를 제작한 경우와 본 실험방법으로 제작한 프리프레그를 이용하여 FRMLs를 제작한 경우를 비교해 보았다. 그 결과, 전자의 경우, 오토크레이브 (autoclave) 성형 후 FRMLs의 변형을 관찰할 수 있었지만, 후자의 경우, FRMLs는 경화 후 변형을 관찰할 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 프리-스트레인을 가하지 않은(as cured) 제조 공정을 택하였다. Fig. 3은 FRMLs(1)과 FRMLs(2) 시험편의 경화시 적용하였던 경화사이클을 나타낸 그림이다. AKZO사의 추천 사이클인 120°C의 온도로 90분간 경화하였고 이때의 압력은 1.2 MPa이다. 예열시간 30분, 서냉시간 30분으로 하였다. 따라서 화학적으로 안정된 시험편을 제작할 수 있었다.



Note : Maximum Radius Support = 1.5 Times Specimen Depth
 Maximum Radius Loading Nose = 4 Times Specimen Depth
 Nominal Specimen Depth (mm) ; 2
 Specimen Width (mm) ; 25
 Specimen Length (mm) ; 50
 Support Span (mm) ; 32

Fig. 4 Schematic of loading nose and support on 3-point loading in FRMLs

3. 실험

3.1 3점 굽힘시험

Fig. 4에 나타난 형태와 같이 수지 혼합비에 따라 제작된 FRMLs(1), FRMLs(2)의 중앙에 집중하중을 가하여 최대굽힘강도를 조사했다. 실험은 ASTM D 790M-95⁽⁸⁾에 기초하여 수행하였고 실험장비는 만능재료 시험기(DDS-10T, Shimadzu Co.)를 사용하였다.

3.2 피로균열전파 시험

Fig. 5는 피로균열전파시험에 사용된 CCT 시험편의 형상이다. 시험편은 중앙에 지름 3mm의 원공노치를 낸 후 예리한 톱날을 이용하여 원공에서 양방향으로 13.5mm의 인공노치를 만들었다. 실험은 ASTM E 647-95⁽⁹⁾를 기초로 수행하였다. 작용하중은 ASTM B 209-95⁽¹⁰⁾에 제시된 Al 5052-H34의 항복강도인 180MPa의 45%를 적용하였다. 따라서 최대응력은 81MPa이다. 또한 최소응력은 8.1MPa를 적용하였으므로 응력비는 0.1이다. 그리고 파형은 10Hz의 정현파이다.

식 (1)은 CCT 시험편의 균열선단에 작용하는 응력확대계수범위(ΔK)를 계산하는 식이며 $f(a/W)$ 는 CCT 시험편의 형상계수이다.⁽¹¹⁾ 피로균열성장률(da/dN)은 시컨트 법을 이용하여 구하였다.

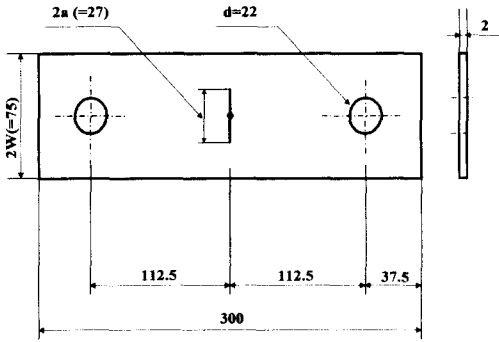


Fig. 5 Shape of CCT specimen (unit : mm)

$$\Delta K = f(a/W) \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

여기서,

$$f(a/W) = \sqrt{\frac{\pi a}{4W} \sec \frac{\pi a}{2W} \left[1 - 0.025 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 0.06 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right]}$$

실험장치는 유압식 피로시험기(EHF-ED 10-20L, Shimadzu Co.)를 사용했다. 반복하중에 의해 인공노치로부터 진전되는 균열길이의 변화량을 접안식 이동현미경을 이용하여 1×10^3 cycle 증가마다 측정하였다. 균열진전은 시험편 중앙에서 양방향으로 거의 동일하게 진전함을 관찰할 수 있었고 양방향의 균열길이를 측정한 후 평균값을 취하였다. 섬유는 적층형태가 주응력방향의 법선 방향이므로 직선에 가까운 균열진전을 관찰할 수 있었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 굽힘강도에 영향을 주는 수지 혼합비

Fig. 6은 수지 혼합비에 따른 최대굽힘강도를 나타낸 것이다. 동일 두께의 Al 5052-H34와 FRMLs(1)을 비교해보면, FRMLs(1)이 Al 5052-H34보다 약 2배의 굽힘강도 증가가 발생했음을 알 수 있고, 동일 두께의 Al 5052-H34와 FRMLs(2)를 비교해보면, FRMLs(2)가 Al 5052-H34보다 약 2.2배의 굽힘강도 증가가 발생했음을 알 수 있다.

경화촉진제가 첨가된 FRMLs(2)가 경화촉진제가 첨가되지 않은 FRMLs(1)보다 10%정도의 굽힘

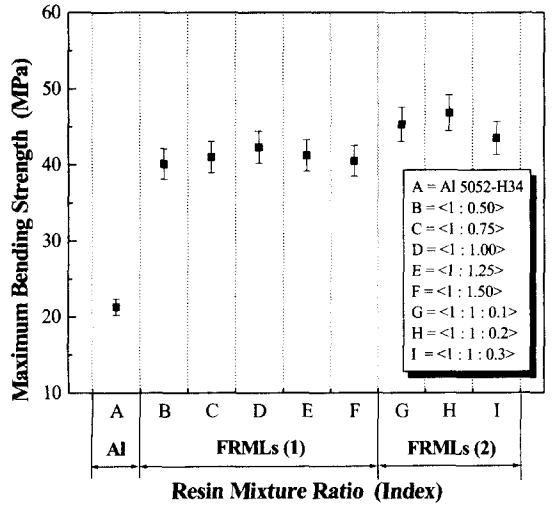


Fig. 6 Result of three-point bending test

강도 향상이 발생하였다. 따라서 경화촉진제의 첨가가 굽힘강도의 증가를 야기함을 알 수 있었고, 제조공정의 시간단축과 경화의 촉매역할을 할뿐만 아니라 시험편의 굽힘강도 특성도 크게 향상시킴을 알 수 있다.

또한, FRMLs(1)에서 최대굽힘강도는 수지혼합비 <1:1>이 가장 우수하였으나 수지 혼합비별로 경화제의 함량에 따른 굽힘강도의 변동폭은 그리 크지 않다. FRMLs(2)에서 경화촉진제의 함량증가와 최대굽힘강도는 비례적인 관계를 나타내지 않는다. 또한, 수지혼합비 <1:1:0.2>일 때 가장 우수한 굽힘강도를 나타내었고 수지혼합비 <1:1:0.3>일 때에는 오히려 굽힘강도가 저하됨을 볼 수 있다. 즉, 최적의 경화촉진제의 함량은 예측수지 함량기준으로 20%임을 알 수 있었다.

4.2 수지 혼합비에 따른 피로수명

Fig. 7은 사이클에 대한 피로균열진전특성을 나타내는 그래프이다. Fig. 7의 (a), (b)를 비교해보면 FRMLs(2)가 FRMLs(1)보다 더욱 우수한 피로특성을 나타냄을 볼 수 있다. 동일 두께의 Al 5052-H34와 FRMLs(1)을 비교해보면, FRMLs(1)이 Al 5052-H34보다 무려 7배에서 14배까지 피로수명이 향상됨을 알 수 있다. 이는 알루미늄층에 비해 강한 인장강도를 갖는 섬유층이 계면을 통해 알루미늄층의 균열단함을 유발하므로 Al 5052-H34와 같이 일정 사이클 이상에서 나타나는

빠른 균열진전은 발생하지 않았기 때문이다.⁽¹²⁾ 또한 섬유층은 균열에 의해 손상되지 않은 상태로 남아 알루미늄층 균열선단의 주요부분에서 응력을 전달받아 균열선단에서의 응력확대계수와 COD를 감소시킨다. 그러므로 균열성장률은 저하된다. 이와 같은 현상은 섬유층이 알루미늄층의 균열진전을 가교하므로 균열 진전이 저하된다는 섬유가교 효과로 설명할 수 있다.

Fig. 7(a)의 FRMLs(1)에서 수지 혼합비 <1:0.5>, <1:0.75>, <1:1>, <1:1.25>, <1:1.5>에 따른 균열진전거동을 살펴보면 2×10^4 cycle까지는 비슷한 양상을 나타내지만 3×10^4 cycle부터는 균열진전속도의 현저한 차이가 난다. 전체적으로 수지 혼합비 <1:1>이 가장 우수한 피로거동을 보였고, 가장 낮은 피로거동을 보이는 <1:0.5>와 비교했을 때 약 6×10^4 cycle 이상 피로수명이 향상됨을 볼 수 있었다. 한편, Fig. 7(b)에서 수지 혼합비 <1:1:0.1>, <1:1:0.2>, <1:1:0.3>의 균열진전 양상도

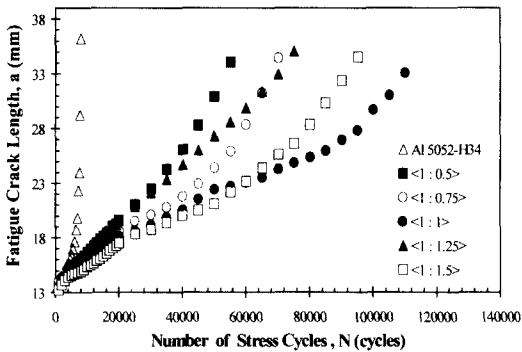
Fig. 7(a)와 유사하나 더 긴 피로수명을 보인다. 동일 두께의 Al 5052-H34와 FRMLs(2)를 비교해 보면 FRMLs(2)가 Al 5052-H34보다 무려 13배에서 18배까지 피로수명이 향상됨을 알 수 있다. FRMLs(2)의 경우, 8×10^4 cycle 이상에서 수지 혼합비에 따른 균열진전속도에 차이를 보이기 시작하는데 수지 혼합비 <1:1:0.2>가 가장 안정적인 균열진전 양상을 보였다. 수지 혼합비 <1:1:0.2>와 <1:1:0.3> 사이에 경화촉진제의 함량 10% 차이에 따라 대략 4×10^4 cycle 정도의 피로수명의 차이가 발생함을 알 수 있었다.

또한, FRMLs(2)는 FRMLs(1)의 수지 혼합비 <1:1>에 경화촉진제를 10, 20, 30% 첨가한 것이므로 FRMLs(1)의 <1:1>과 FRMLs(2)를 비교해볼 필요가 있다. FRMLs(2)의 <1:1:0.1>은 FRMLs(1)의 <1:1>과 거의 유사한 경향을 보인다. 따라서 에폭시 수지에 경화촉진제 10% 첨가는 피로균열전파특성의 향상에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 그러나 경화촉진제 20% 첨가 시에는 뚜렷한 피로균열전파 특성의 향상을 볼 수 있고 경화촉진제의 30% 첨가 시에는 오히려 피로균열진전이 급진적으로 일어난다.

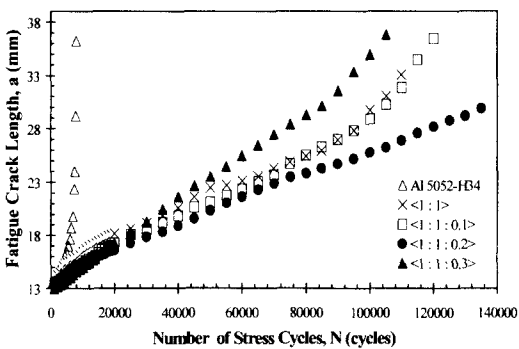
FRMLs(2)의 제작공정에서 30% 이상의 과도한 경화촉진제의 혼합은 프리프레그의 경화를 급속하게 진행시켜 상온에서 경화가 진행된다. 따라서 알루미늄과 프리프레그의 계면결합력을 저하시키고 층간박리를 유발하는 원인이 된다. 이러한 층간박리는 주기적인 계면전단응력에 의해 균열 주위에서 계면결합 강도를 약화시키고 섬유가교 메커니즘의 효과를 저하시킨다. 결국, 수지 혼합비 <1:1:0.3>은 <1:1:0.2>보다 현저한 피로수명 저하를 발생시켰다. Roebroeks⁽¹³⁾은 층간박리가 균열선단에서 약간 거리가 떨어진 곳에서 시작된다고 주장하였다.

4.3 Δ K에 영향을 주는 수지 혼합비

Fig. 8은 사이클과 응력확대계수범위(Δ K)와의 관계를 나타낸 그래프이다. Fig. 8(a)에서 수지 혼합비 <1:0.5>, <1:0.75>, <1:1.25>인 경우, 4×10^4 cycle까지의 Δ K값은 거의 차이를 보이지 않는다. 사이클의 증가에 따라 Δ K도 서서히 증가함을 볼 수 있고, 5×10^4 cycle 이상에서 급격한 증가를 보인다. 균열 선단에 분포하는 Δ K값은 수지 혼합비 <1:1>이 가장 작은 값을 보인다.

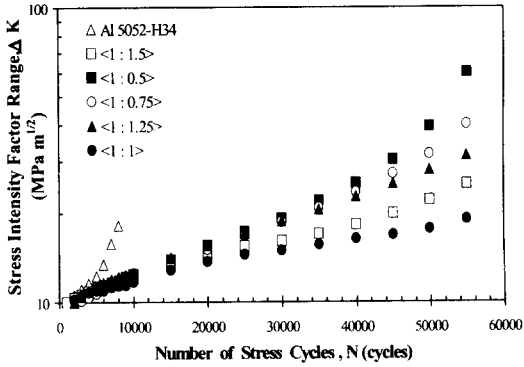


(a) Al 5052-H34 and FRMLs(1)

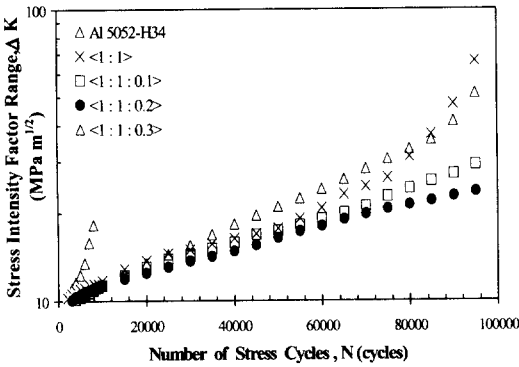


(b) Al 5052-H34 and FRMLs(2)

Fig. 7 Relationship between fatigue crack length and number of stress cycles under fatigue loading



(a) Al 5052-H34 and FRMLs(1)



(b) Al 5052-H34 and FRMLs(2)

Fig. 8 Relationship between ΔK and number of cycles under fatigue loading

가장 우수한 피로특성을 보이는 수지 혼합비 <1:1>과 가장 낮은 피로특성을 보이는 <1:0.5>는 ΔK 값이 $40 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 차이가 나타남을 알 수 있다.

Fig. 8(b)에서 수지 혼합비 <1:1:0.1>과 <1:1:0.2>는 Fig. 8(a)에 비해서 ΔK 의 변화가 작게 나타난다. 따라서 FRMLs(2)가 FRMLs(1)보다 파괴인성이 크다는 사실을 알 수 있다. 또한, Fig. 8(b)에서 FRMLs(1)의 <1:1>과 FRMLs(2)를 비교해보면 수지 혼합비 <1:1>과 <1:1:0.1>의 ΔK 값이 비슷한 경향을 보이거나 5×10^4 cycle 이상부터 차이를 보이기 시작하고 사이클이 증가할수록 <1:1>의 기울기가 심해진다. 이상의 결과로 경화촉진제는 균열선단에 작용하는 응력확대계수의 범위를 낮추는 인자로 작용할 수 있다고 생각할 수 있다. 다시 말해서 경화촉진제로 인해 증가한 계면결합력은 피로균열의 안정된 진전을 유도하고 피로수

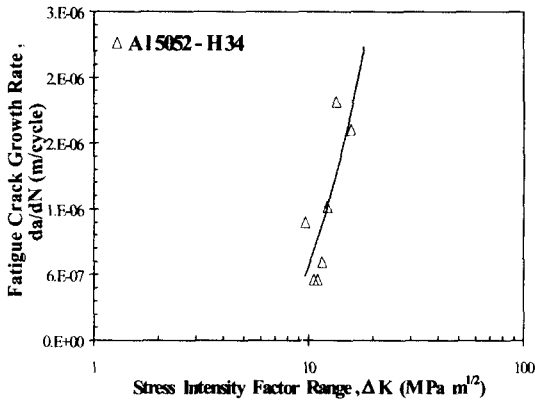
명을 증가시킨다. 그러나 경화제는 30% 이상 첨가했을 경우(<1:1:0.3>) 피로균열진전특성에 악영향을 미친다. 또한, <1:1:0.3>의 ΔK 값은 사이클이 증가할수록 <1:1:0.2>와 <1:1:0.1>보다 현저하게 증가한다.

4.4 da/dN과 ΔK 의 관계에 영향을 주는 수지혼합비

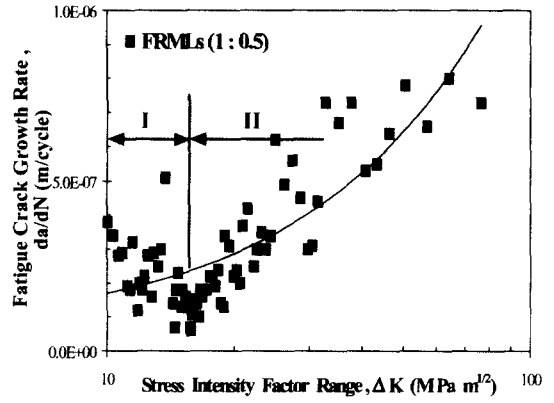
Fig. 9(a)는 Al 5052-H34의 피로균열성장률(da/dN)과 응력확대계수범위(ΔK)의 관계를 나타낸 그래프이다. Fig. 9(b)~(f)는 FRMLs(1)의 피로균열성장률(da/dN)과 응력확대계수범위(ΔK)의 관계를 나타낸 그래프이다. 이들을 비교해보면 FRMLs(1)은 Al 5052-H34에 비해 데이터의 분산이 심하게 나타나고, 양 축에 로그-로그 좌표를 취하여도 비선형적인 곡선이 나타남을 볼 수 있다. 또한, FRMLs(1)은 초기균열시에 피로균열성장률이 저하하는 특이한 현상을 볼 수 있는데 이는 일반 금속재료에서 볼 수 없는 현상으로 균열 초기에 섬유가교효과가 크게 작용하기 때문이다.

Takamatsu 등⁽¹⁴⁾은 Al/GFRP로 제작된 CCT 시험편을 이용하여 da/dN 과 ΔK 의 관계에서 피로균열 성장의 형태를 두 개의 영역으로 구분하였다. 영역 I은 파단되지 않은 섬유에 의해 가교효과가 증가하여 알루미늄층의 피로균열성장률(da/dN)이 감소하는 구간이고, 영역 II는 누적된 반복하중에 의한 섬유의 파단과 균열진전에 따른 층간분리 영역의 확장으로 섬유가교효과가 감소하고 피로균열성장률은 증가하는 구간이라고 보고하였다.

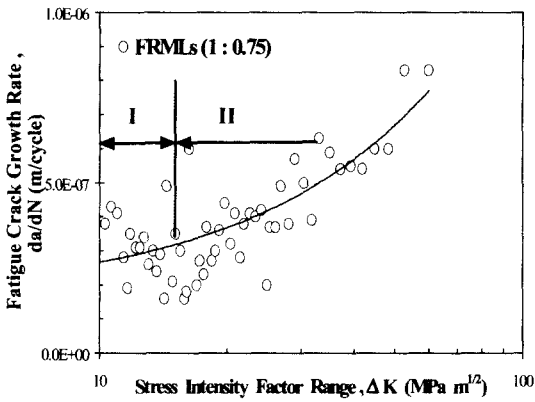
본 연구에서도 수지 혼합비 <1:0.5>, <1:0.75>, <1:1.5>에서 영역 I 과 영역 II의 구간이 형성되었다. 수지 혼합비가 이상적인 당량비인 <1:1>에 근접할수록 영역 I 과 영역 II의 기울기 편차가 완화되고 구분이 모호해짐을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 계면결합력이 증가할수록 피로균열성장률은 일정하고, 균열후기에 발생하는 섬유가교효과의 저하와 층간분리영역의 확장에 대한 저항력이 커졌기 때문이라고 생각된다. 따라서 이러한 섬유가교 메커니즘과 층간분리영역의 확장은 비선형적 곡선형태로 나타나며, $da/dN = C(\Delta K)^m$ 의 직접적인 적용은 어려울 것으로 생각된다. 이러한 섬유강화고속 적층재의 경우, 다른 파라미터의 적용이나 수정된 Paris 법칙이 필요하다고 판단된다.



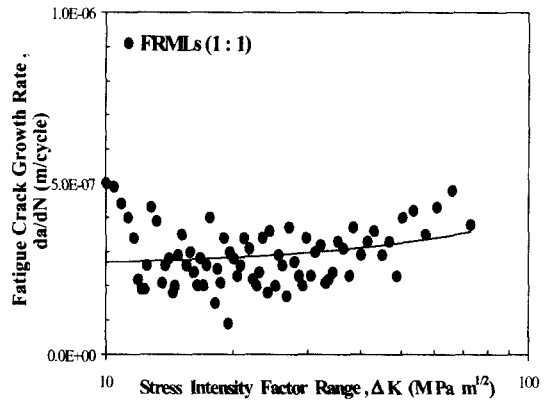
(a) Al 5052-H34



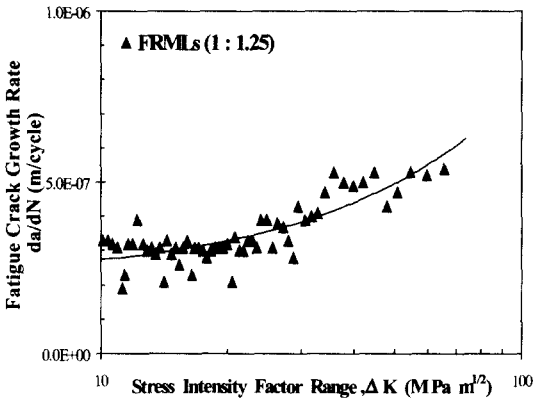
(b) Resin mixture ratio <1:0.5>



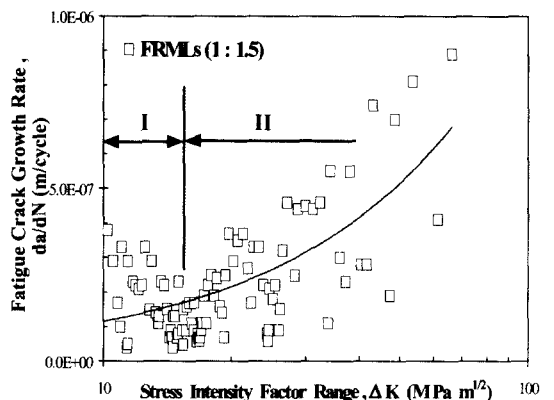
(c) Resin mixture ratio <1:0.75>



(d) Resin mixture ratio <1:1>

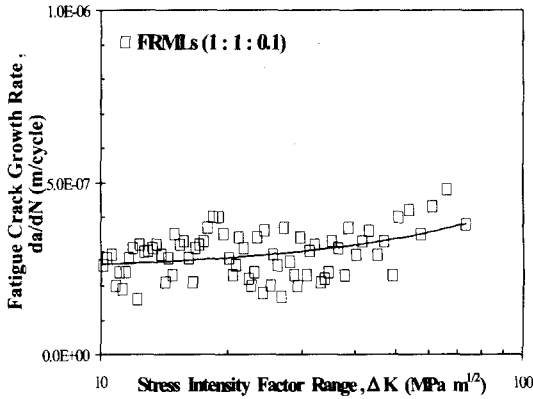


(e) Resin mixture ratio <1:1.25>

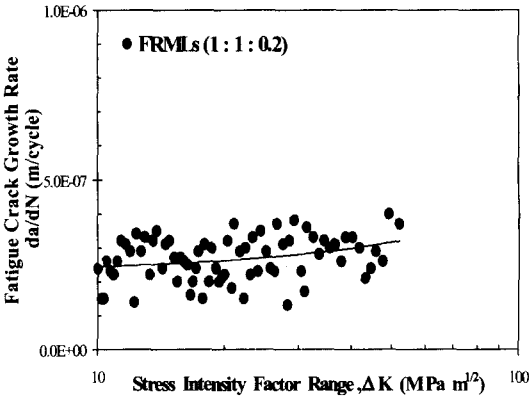


(f) Resin mixture ratio <1:1.5>

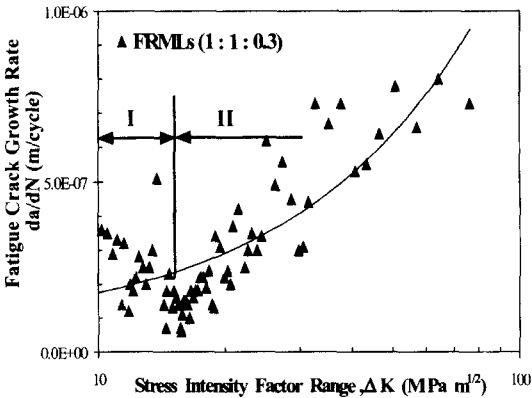
Fig. 9 Relationship between fatigue crack growth rate(da/dN) and stress intensity factor range(ΔK) under fatigue loading in FRMLs(1)



(a) Resin mixture ratio <1:1:0.1>



(b) Resin mixture ratio <1:1:0.2>



(c) Resin mixture ratio <1:1:0.3>

Fig. 10 Relationship between fatigue crack growth rate(da/dN) and stress intensity factor range (Δ K) under fatigue loading in FRMLs(2)

또한, 수지 혼합비에 따른 데이터의 분산을 살펴보면 수지 혼합비별로 큰 차이가 나타남을 볼 수 있다. 분산이 심할수록 섬유층과 알루미늄층의 접착강도가 균일하지 않음을 뜻한다. 즉, 외력에 의해 전달된 에너지가 알루미늄층에서 계면을 통해 섬유층에 전달되어 탄성에너지의 형태로 저장되어야 하는데 계면간의 결합이 불안정할 경우 외력에 의해 전달된 에너지는 섬유층에 전달되지 못하고 알루미늄층의 균열이 진전하는데 소비되므로 균열진전속도는 증가하게 된다. 그리고 균열진전방향과 섬유방향은 직교하므로 계면결합력이 우수할수록 섬유가교 효과는 증대된다. 따라서 가장 완전한 기울기를 보이는 수지 혼합비 <1:1>이 가장 이상적인 수지 혼합비임을 알 수 있다.

한편 아라미드 섬유와 에폭시 수지의 불량한 함침은 압축하중 작용시 섬유좌굴의 원인이 된다.¹⁵⁾ 따라서 경화촉진제의 과다사용은 섬유와 에폭시의 함침시간을 단축하므로 섬유좌굴의 원인이 된다. 그러나 본 연구에서는 섬유의 좌굴현상은 관찰할 수 없었다.

Fig. 10은 FRMLs(2)의 피로균열성장률(da/dN)과 응력확대계수범위(Δ K)의 관계를 나타낸 그래프이다. 그래프의 기울기를 관찰해 볼 때, 전체적으로 FRMLs(2)가 FRMLs(1)보다 느린 균열성장을 하는 것을 볼 수 있다. 곡선의 기울기가 가장 완전한 수지 혼합비 <1:1:0.2>가 가장 최적의 피로 파괴특성을 보였고 <1:1:0.3>은 기울기가 급증함을 볼 수 있는데 이는 경화촉진제의 30% 이상 첨가 시에는 오히려 피로특성이 떨어짐을 의미한다.

FRMLs(2)를 피로균열성장률 관점에서 비교해보면 FRMLs(1)과 비슷한 양상을 보이나, 수지 혼합비 <1:1:0.1>, <1:1:0.2>에서 영역 I, II의 구분이 모호하다. 즉, 균열초기와 균열후기의 피로균열진전속도가 거의 동일했음을 알 수 있다. 계면간의 결합력 증가로 인한 층간분리영역의 감소가 이러한 현상을 야기한 것으로 생각된다. 또한, FRMLs(1)에서의 수지 혼합비 <1:0.5>, <1:0.75>, <1:1.5>와 FRMLs(2)의 <1:1:0.3>은 비슷한 형태의 데이터 분산을 보인다. 이는 최적의 수지 혼합비를 보인 FRMLs(1)의 <1:1>과 FRMLs(2)의 <1:1:0.2>를 제외한 수지 혼합비에서는 사이클이 증가할수록 da/dN의 변화가 더 가속된다고 할 수 있다. 피로균열성장률은 최적의 수지 혼합비를 나타낸

FRMLs(1)의 <1:1>과 FRMLs(2)의 <1:1:0.2>를 제외한 수지 혼합비에서 증가함을 볼 수 있다.

전체적으로 보면, 수지 혼합비에 따른 응력확대계수범위(ΔK)는 유사한 값을 보였으나, 피로균열성장률(da/dN)은 수지 혼합비에 따라 큰 차이를 보였다. FRMLs(1)에서 수지 혼합비 <1:1>이 가장 낮은 피로균열성장률 값을 보였고, FRMLs(2)에서 수지 혼합비 <1:1:0.2>는 <1:1:0.1>, <1:1:0.3>보다 ΔK 값이 $20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 낮아졌다.

5. 결론

본 논문에서는 프리프레그의 수지 혼합비가 섬유강화금속적층재(FRMLs)의 피로균열진전 특성과 굽힘강도에 미치는 영향을 실험을 통하여 정량적으로 알아보았다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 수지 혼합비에 따른 굽힘강도를 비교해 본 결과, FRMLs(1)에서 수지 혼합비 <1:1>은 Al 5052-H34보다 2배의 굽힘강도 증가가 나타났고, FRMLs(2)에서 수지 혼합비 <1:1:0.2>는 2.2배의 굽힘강도 증가가 나타났다.

(2) 피로수명은 FRMLs(1)에서 수지 혼합비 <1:1>이 가장 우수하였고, FRMLs(2)에서 수지 혼합비 <1:1:0.2>가 가장 우수하였으며, <1:1>보다 16%의 피로수명 향상이 나타났다.

(3) FRMLs(1)과 FRMLs(2)에서 수지 혼합비에 따른 응력확대계수범위(ΔK)는 유사한 값을 보였으나 피로균열성장률(da/dN)은 큰 차이를 보였다. 그 이유는 수지 혼합비에 따른 계면 결합력의 차이로 인한 응력전달의 용이성에 기인한다.

(4) da/dN 과 ΔK 의 관계에서 FRMLs는 균열초기에 섬유가교효과 증대로 인한 da/dN 감소를 보였고, 균열후기에 섬유가교효과 저하와 층간분리 영역 증가로 인한 da/dN 증가를 보였다.

(5) da/dN 과 ΔK 의 관계에서 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 의 적용은 불가능하며 수정된 Paris 법칙이나 다른 파라미터의 도입이 필요하다.

참고문헌

(1) Strong, A. B., 1989, "Fundamentals of Composites Manufacturing : Materials Method and Applications,"

SME, Vol. 11, pp. 71~77.
 (2) Knox, C. E., 1982, *Handbook of Composite*(G. Lubin Ed.), Van Nostrand Reinhold, New York.
 (3) Moon, C. K., Kim, J. H. and Mater, J., 1997, *Composite Polymers*, Sci. Vol. 7(5), pp. 425~434.
 (4) Moon, C. K. and Ocean, J., 1996, *Engineering and Technology*, Vol. 10(1), pp. 5~7.
 (5) Miller, B., Muri, P. and Rebenfeld, L., 1987, "Advanced Polymer in Aircraft," *Comp. Sci. Tech.*, Vol. 28, pp. 17~20.
 (6) Glyn Lawcock, Lin Ye and Yiu-Wing Mai, 1995, "Novel Fiber Reinforced Metal Laminate for Aerospace Applications - A Review, Part I - Background & General Mechanical Properties," *SAMPE Journal*, Vol. 31, No. 1, pp. 23~31.
 (7) Lim, S. H., Ha, C. S. and Cho, W. J., 1992, "Short Aramid Fiber Reinforced Epoxy Composites-2. Effect of Curing Acceleration of Epoxy Matrix and Mechanical Properties of Aramid Fiber Reinforced Epoxy Composite," *Polymer (Korea)*, Vol. 16, No. 2, pp. 216~224.
 (8) *Annual Books of ASTM Standards*, 1995, "Standard Method for Flexural Properties of Reinforced Plastics and Electrical Insulating Material [Metric]," D 790 M.
 (9) *Annual Books of ASTM Standards*, 1995, "Standard Test Method for Measurement Fatigue Crack Growth Rates," Vol. 15.03, E 647.
 (10) *Annual Books of ASTM Standards*, 1995, "Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate," B 209.
 (11) Anderson, T. L., 1994, *Fracture Mechanics - Fundamentals & Applications*, Second Edition, *CRC Press*, p. 63.
 (12) Elber, E., 1970, "The Significance of Fatigue Crack Closure in Composite," *ASTM STP 486*, pp. 230~242.
 (13) Roebroeks, G. H. J. J., 1986, "Observations on Cyclic Delamination in ARALL Under Fatigue Loading," *Report LR-496*, Dept. of Aerospace Eng. Delft University of Technology.
 (14) Tohru Takamatsu, Takashi Matsumura, Norio Ogura, Toshiyuki Shimokawa, Yoshiaki Kakuta, 1999, "Fatigue Crack Growth Properties of GLARE3-5/4 Fiber/metal Laminates," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 63, pp. 253~272.
 (15) Su, K. B., 1989, "Advances in Thermoplastic Matrix Composite Materials," Ed. N. Newaz, *ASTM STP 1044*, p. 279.