

수지 혼합비가 FRMLs의 피로균열전파거동과 기계적 성질에 미치는 영향에 관한 연구

김철웅*, 손세원**

Study on the Effect of Resin Mixture Ratios on the Fatigue Crack Propagation Behavior and Mechanical Property in a FRMLs

Cheol Woong Kim*, Se Won Sohn**

ABSTRACT

FRMLs(Fiber Reinforced Metal Laminates) is a new type of hybrid materials. FRMLs consists of high strength metal and fiber which are laminated using a structural adhesive bond(epoxy resin). The effect of resin mixture ratios on the fatigue crack propagation behavior and mechanical property of Aramid fiber reinforced aluminum composites was investigated. The epoxy, diglycidylether of bisphenol A(DGEBA) was cured with methylene dianiline(MDA) with or without accelerator(K-54).

Eight kinds of resin mixture ratio were tested for the experiment ; five kinds of FRMLs(1)(epoxy & curing agent) and three kinds of FRMLs(2)(epoxy & curing agent & accelerator). FRMLs(2) have a more effective characteristics on the fatigue crack propagation behavior and mechanical property than FRMLs(1).

Key Words : FRMLs(Fiber Reinforced Metal Laminates, 섬유강화복합재료), Prepreg(프리프레그), Matrix Resin (매트릭스 수지), Resin Mixture Ratio(수지혼합비), DGEBA(디글리시딜 에테르 비스페놀 A), Stress Intensity Factor(응력확대계수, K), Fatigue Crack Growth Rate(피로 균열 성장률, da/dN), Stress Intensity Factor Range(응력확대계수 범위, ΔK)

1. 서론

복합재료는 강화재와 매트릭스 수지로 구성되어 있다. 복합재료의 물성은 흔히 강화재와 매트릭스 수지의 중간물성을 나타낸다는 혼합법칙(rule of mixture)에 의해 설명된다^(1,2). 그러나 실제 상황에서는 이 혼합법칙을 따르지 않는 경우가 자주 발생하며 이는 복합재료의 물성이 매트릭스와 강화재 사

이의 계면결합력에 의해 상당한 영향을 받기 때문이다^(3,4). 복합재료의 계면은 외부에서 가해지는 피로, 응력, 변형 등을 섬유로 전달하고 강화재의 균일성과 연속성을 향상시켜 주게 된다. 따라서 계면결합력의 향상을 통해서 복합재료의 기계적 물성을 크게 향상시킬 수 있다⁽⁵⁻⁷⁾. 본 논문에서 사용된 재료로 아라미드 섬유(Twaron(type-2200), AKZO-NOBEL)에 열경화성 에폭시수지인 diglycidylether of bisphenol

* 건국대학교 대학원 기계설계학과

** 건국대학교 기계설계학과

A형(DGEBA, YD-128, 국도화학(주))과 경화제로 사용된 methylene dianiline(MDA-150)의 혼합비율에 따른 계면접착력의 차이를 비교하여 최적의 함량비를 구하였고, 또한 이상적인 당량비(當量比)인 epoxy/amine 혼합물의 당량비가 <1:1> 일 때의 조건에서 촉진제로 첨가된 tris (dimethylamino methyl) phenol(K-54)을 다른 함량(에폭시 함량기준 10%, 20%, 30%)으로 첨가하여 더욱 우수한 접착력을 나타내는 촉진제와 함량의 최적치를 구하여 보았다^(8,9).

각기 다른 당량비로 제작된 프리프레그(prepreg)를 알루미늄합금(Al 5052-H34)과 적층한 후 hot-press를 이용하여 경화시켰다. 이와 같은 과정으로 제작한 시편을 굽힘 시험(bending test), 피로균열전파 시험(fatigue crack propagation test)을 통하여 수지 혼합비에 따른 계면접착력과 피로균열전파 특성을 조사하고 가장 우수한 기계적 강도를 갖는 수지 혼합비를 알아보았다.

2. 실험

2.1 FRMLs 제작

에폭시 수지(epoxy resin)와 경화제(curing agent)를 Table 1과 같은 5가지 비율로 혼합비를 달리하여 當量比(mole 比)를 기준으로 혼합하였다. 이를 FRMLs(1)이라 칭한다.

Table 1 Mixture Ratio System of Epoxy and Curing Agent

Epoxy + Curing Agent (Equivalence ratio)	Epoxy + Curing Agent (Volume ratio)
1 : 0.50	311.9 : 74.80
1 : 0.75	311.9 : 112.2
1 : 1.00	311.9 : 149.6
1 : 1.25	311.9 : 187.0
1 : 1.50	311.9 : 224.4

Table 1에서와 같은 혼합비로 제작된 FRMLs 시편에서 이론적 접착강도가 가장 우수한 <1:1> 혼합비의 epoxy/amine에 촉진제(K-54)를 에폭시 기준으로 10, 20, 30% 함량으로 첨가하여 혼합하였다. 이를 FRMLs(2)라 하며 Table 2와 같다.

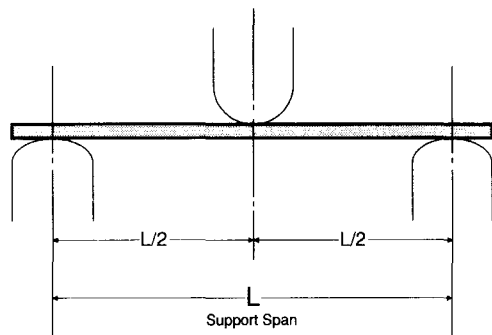
Table 2 Mixture Ratio System of Epoxy and Curing Agent and Accelerator

Epoxy + Curing Agent + Accelerator (Equivalence ratio)	Epoxy + Curing Agent + Accelerator (Volume ratio)
1 : 1 : 0.1 [*]	311.9 : 149.6 : 37.9
1 : 1 : 0.2 [*]	311.9 : 149.6 : 75.8
1 : 1 : 0.3 [*]	311.9 : 149.6 : 113.8

* Epoxy Standardize 10, 20, 30%

2.2 3점 굽힘시험

3점 굽힘 시험은 적층 또는 적층하지 않은 고강도 복합재료의 굴곡특성을 결정하는 실험으로 재료를 직사각형 바(Bar)의 형태로 모델링하여 단순보의 중앙에 집중하중을 가하면서 재료의 굽힘강도를 측정하는 실험이다. ASTM D 790M-93을 기초로 시편을 제작하고 만능 재료 시험기(universal testing machine, Shimadzu DDS-10T)를 이용하여 실험하였으며 시편의 형상은 Fig. 1과 같다.



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
 Rate of Cross-head Motion (Procedure A , mm/min [^]) ; 0.85

Fig. 1 Loading Nose and Support Diagram Three-point Loading

2.3 피로균열전파시험

피로균열전파시험은 ASTM E 647-95⁽¹⁰⁾를 기초로 Fig. 2와 같은 CCT(center cracked tension)시편을 제

작하고 실험을 수행하였다. ASTM B 209에 제시된 Al 5052-H34의 항복강도인 180MPa의 45%를 적용하여 최대응력을 81MPa로 하였고 최대응력에 대한 최소응력의 비인 응력비를 0.1로 하였다. 따라서 최소응력은 8.1MPa이다. 파형은 10Hz의 Sine波를 주었다.

식(1)은 CCT 시험편에 대하여 응력확대계수범위(ΔK)를 계산하는 식이며 $f(a/W)$ 는 CCT 시험편의 형상계수이다⁽¹¹⁾.

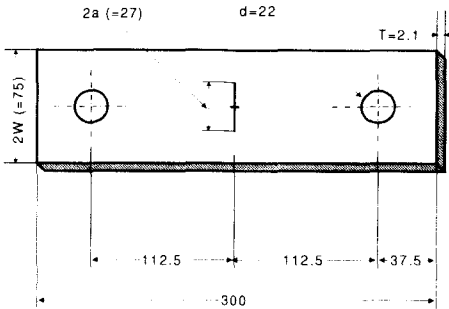


Fig. 2 CCT(center cracked tension) Specimen

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

여기서,

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

Fig. 3은 피로균열전파시험에 사용된 Shimadzu社의 10 ton 용량의 피로시험기(Model : EHF-ED 10-20L)의 그립(grip)과 CCT 시험편, 크랙의 진전을 측정하기 위한 Travelling Microscope 이다.



Fig. 3 Grip & Travelling Microscope

3. 실험결과 및 고찰

3.1 3점 굽힘 시험

Fig. 4는 수지 혼합비를 달리한 시편의 3점 굽힘 시험 결과에서 최대굽힘강도를 나타낸 것이다.

동일한 두께의 Al 5052-H34의 경우 굽힘강도가 213N을 나타낸다. 이로써 FRMLs(1)(epoxy/amine (1:0.5~1:1.5))의 경우 동일한 두께의 Al 5052-H34보다 200N 정도의 굽힘강도 향상이 있었고, 촉진제를 사용한 FRMLs(2)의 경우 Al 5052-H34보다 굽힘강도가 240N 정도 향상됨을 알 수 있다. 또한 FRMLs(2)에서 수지혼합비 <1:1:0.2>의 경우, 최대굽힘강도가 465.5N으로 가장 우수한 강도를 나타냈다.

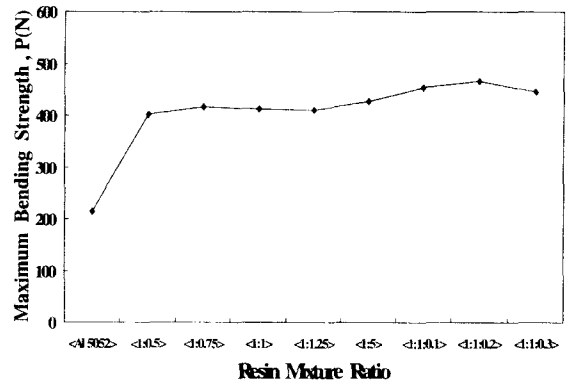


Fig. 4 Result of Three-point Bending Test

3.2 피로균열전파시험

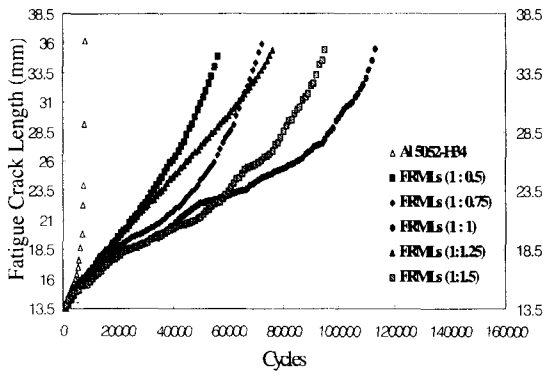
Al 5052-H34와 각각 다른 수지혼합비의 FRMLs의 피로균열전파시험 결과를 반복수(cycles)에 대한 피로균열길이를 나타내면 Fig. 5의 (a), (b)와 같다. 또한 Fig. 6의 (a), (b)는 반복수(cycle)에 대한 응력확대계수범위(ΔK)를 나타낸 그래프이다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 Al 5052-H34에 비해 FRMLs(1)이 피로수명이 10배 이상 우수함을 알 수 있고, FRMLs의 경우 크랙진전을 aramid fiber가 크랙을 브리징(bridging)함으로써 크랙의 진전이 저하된다는 크랙-브리징 효과(crack-bridging effect)로 설명될 수 있다⁽¹²⁾.

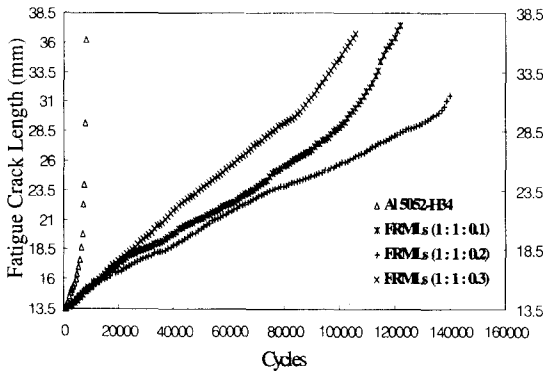
수지혼합비 <1:0.75> 와 <1:1>사이에서는 무려 6.0×10^4 cycle 이상의 피로수명이 차이가 난다. 또한 촉진제가 첨가된 FRMLs(2)는 FRMLs(1)에서 가장 높은 피로수명을 보이는 <1:1>의 경우보다

우수한 피로수명을 보여주고 있다. FRMLs(2)인 Fig. 5 (b)의 경우 FRMLs(1)인 Fig. 5 (a)보다 전반적으로 4.0×10^4 cycle 이상의 피로수명 향상이 있었음을 알 수 있다. 여기에서도 축진제의 함량에 따라 수지혼합비 <1:1:0.3>과 <1:1:0.2>사이에서는 대략 4.0×10^4 cycle 정도의 피로수명의 차이가 발생함을 알 수 있다.

Fig. 6 (a)는 $0 \sim 5.5 \times 10^4$ cycle 구간에서의 응력 확대계수범위(ΔK)를 나타낸 것이고 (b)는 $0 \sim 9.8 \times 10^4$ cycle 구간에서의 응력 확대계수범위(ΔK)를 나타낸 것이다.



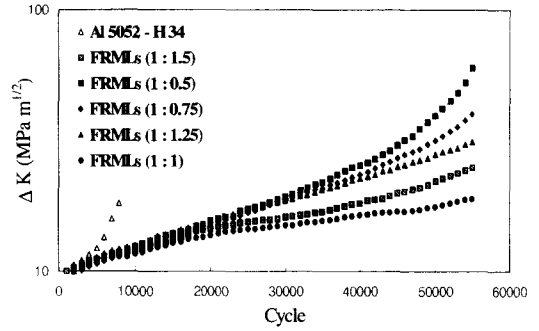
(a) Al 5052-H34 & FRMLs (1)



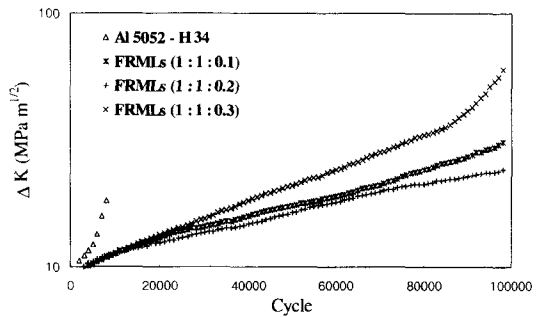
(b) Al 5052-H34 & FRMLs (2)

Fig. 5 Result of Fatigue Crack Propagation Test (1)

Fig. 6 (a)에서 가장 우수한 피로특성을 보이는 수지혼합비 <1:1>과 가장 낮은 피로특성을 보이는 수지혼합비 <1:0.5>는 ΔK 값이 $40 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 차이가 남을 알 수 있고 (b)에서 가장 우수한 수지혼합비 <1:1:0.2>와 가장 저조한 수지혼합비 <1:1:0.3>은 ΔK 가 $30 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 차이가 남을 알 수 있다.

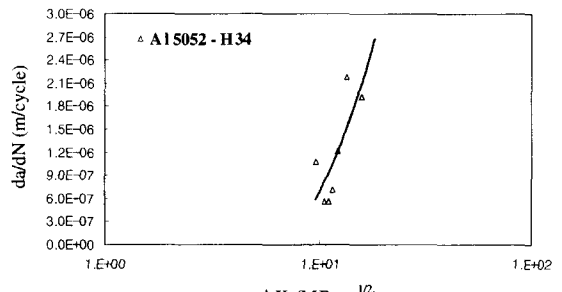


(a) Al 5052-H34 & FRMLs(1)

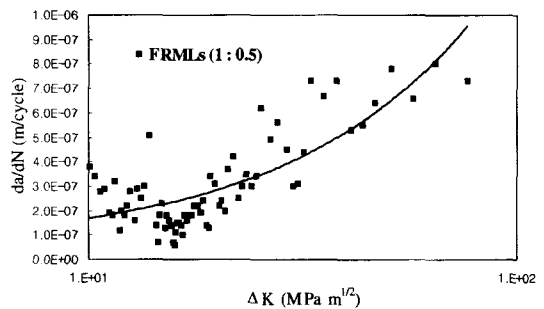


(b) Al 5052-H34 & FRMLs(2)

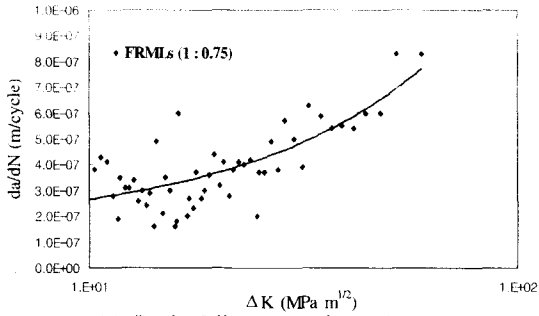
Fig. 6 Result of Fatigue Crack Propagation Test (2)



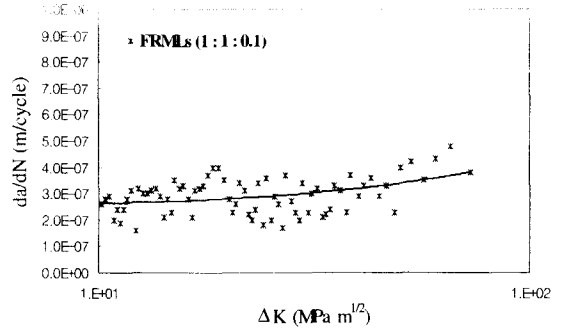
(a) Al 5052-H34



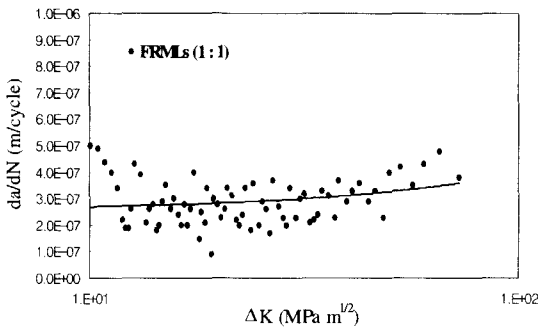
(b) Resin Mixture Ratio <1:0.5>



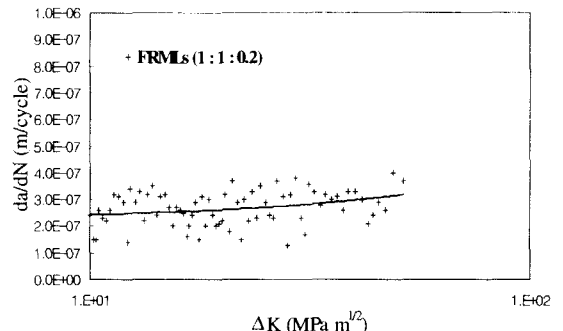
(c) Resin Mixture Ratio <1 : 0.75>



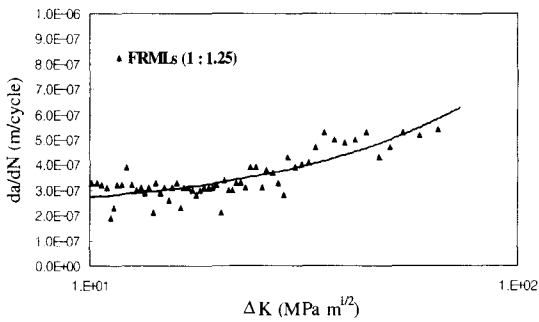
(g) Resin Mixture Ratio <1 : 1 : 0.1>



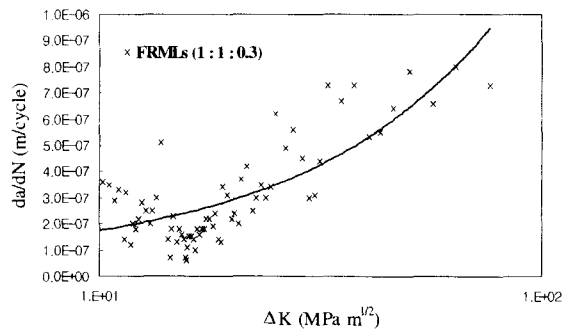
(d) Resin Mixture Ratio <1 : 1>



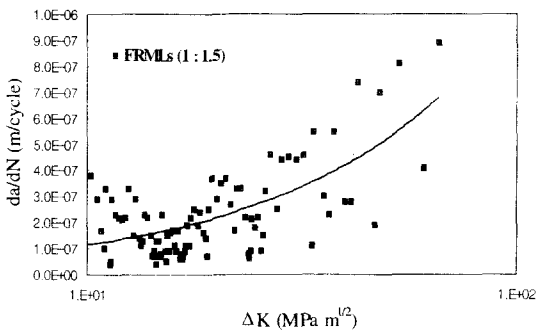
(h) Resin Mixture Ratio <1 : 1 : 0.2>



(e) Resin Mixture Ratio <1 : 1.25>



(i) Resin Mixture Ratio <1 : 1 : 0.3>



(f) Resin Mixture Ratio <1 : 1.5>

Fig. 7 Result of Fatigue Crack Propagation Test (3)

Fig. 7은 Fig. 5에서의 싸이클(N)과 크랙 길이(a)의 관계를 이용하여 Al 5052-H34와 각기 다른 수지혼합비의 FRMLs를 피로균열 성장률(da/dN)과 응력확대계수범위(ΔK)의 관계로 나타낸 것이다. FRMLs(2)((g)~(i))의 경우, FRMLs(1)((b)~(f))보다 기울기가 감소(<1:1:0.3> 제외)하므로 같은 ΔK 에서 느린 진진률로 균열이 진전하는 것을 알 수 있다. 수지혼합비 <1:1:0.2>에서 가장 최적의 피로파괴특

성을 보였고 <1:1:0.3>에서는 오히려 기울기가 급증하므로 경화축진제의 함량이 에폭시 기준 30% 이상 첨가 시에는 오히려 피로특성이 떨어짐을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 아라미드 섬유(aramid fiber)와 알루미늄 합금(Al 5052-H34)를 적층한 복합재(FRMLs)에서 수지의 혼합비가 FRMLs의 기계적 성질 및 피로균열전파거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 굽힘시험과 피로균열전파시험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 굽힘시험 결과 동일 두께의 Al 5052-H34에 비하여 FRMLs(1)의 경우 약 2배의 강도 향상이 발생했고, FRMLs(2)의 경우 약 2.2배의 강도향상이 발생했다.
- (2) 피로균열전파시험 결과 FRMLs의 경우 알루미늄 합금과 달리 크랙-브리징 효과(crack-bridging effect)에 의해 크랙의 진전을 저하시킬 뿐만 아니라 화이버(fiber)에 의해 시편의 완전한 파단은 발생하지 않는다.
- (3) 피로균열전파시험에서 FRMLs(1)의 경우, 수지혼합비 <1:1>에서 최적의 피로파괴특성을 보였고 FRMLs(2)의 경우 <1:1:0.2>에서 가장 최적의 피로파괴특성을 보였는데, 경화축진제의 최적 함유비율은 에폭시 수지 기준 20% 임을 알 수 있었고, 전체적으로 FRMLs(2)가 FRMLs(1)보다 16%의 피로균열전파거동의 향상을 보였다.
- (4) 피로균열진전률(da/dN)은 FRMLs(1)이 FRMLs(2)보다 더 큰 기울기를 보였다.

참고문헌

1. A. B. Strong, "Fundamentals of Composites Manufacturing : Materials, Method, and Applications," SME, Vol. 11, pp. 71-77, 1989.
2. C. E. Knox, "Handbook of Composite"(G. Lubin Ed.), van Nostrand Reinhold, New York, 1882.
3. A. Proctor and P. M. A. Sherwood, "Carbon," Vol. 21, pp. 53, 1983.
4. J. B. Donnet and P. Ehrburger, "Carbon," Vol.

- 15, pp. 143, 1973.
5. C. K. Moon and J. H. Kim, J. Mater. Sci. Vol. 7(5), pp. 425~434, 1997.
6. C. K. Moon, J. Ocean, "Engineering and Technology," Vol. 10(1), pp. 5~7, 1996.
7. B. Miller, P. Muri, and L. Rebenfeld, Comp. Sci., Tech., Vol. 28, pp.17~20, 1987.
8. Glyn Lawcock, Lin Ye, and Yiu-Wing Mai, "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, 1995.
9. S. H. Lim, C. S. Ha, and W. J. Cho, "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, 1992.
10. "Standard Test Method for Measurement Fatigue Crack Growth Rates," Annual Book of ASTM Standard, Vol. 15.03, E 647-95, 1995.
11. T. L. Anderson, "Fracture Mechanics - fundamentals & Applications," Second Edition, CRC Press, pp.63, 1994.
12. E. Elber, "The Significance of Fatigue Crack Closure in Fatigue," ASTM STP 486, pp. 230~242, 1970.