韓國精密工學會 '96年度 秋季學術大會論文集 pp.908~912

ARALL재의 개발과 이의 파괴거동에 관한 연구
A Study on the Fatigue Behavior of ARALL and Manufacturing of ARALL Materials

손세원, 이두성(건국대), 장정원(일진 전기연구소), 홍성희(건국대 대학원)*
Se-Won Sohn, Doo-Sung Lee(Kon-Kuk Univ.),
Jeong-Won Jang(ILJIN Electric & Machinery R&D Lab.),
Sung-Hee Hong(Graduate School, Kon-Kuk Univ.)

ABSTRACT

FRMLs consist of thin sheets of high strength metal, which are laminated using a structural adhesive and high strength fibers. ARALL(Aramid-fiber Reinforced Aluminum alloy Laminates) of FRMLs is a new class of hybrid material. HERALL(Heracron Reinforced Aluminum Laminate) i.e. domestic ARALL is made of homemade aramid fibers, adhesives and adhesive technique. Domestic aramid fiber is Heracron manufactured by KOLON and domestic adhesive is epoxy resin manufactured by Han Kuk Fiber. In this study, Fatigue crack propagation behavior was examined in a 2024-T3 aluminum alloy/aramid-fiber epoxy 3/2 laminated composites, HERALL and ARALL®-2 LAMINATE comparing with 2024-T3 aluminum alloy. The extrinsic toughening mechanisms in HERALL and ARALL were examined, the crack bridging behavior of fibers was analyzed by new algorithm, which measures crack bridging stress, and the crack bridging zone length was measured.

Key Words : ARALL(Aramid-fiber Reinforced ALuminum-alloy Laminates), HERALL(HEracron-fiber Reinforced ALuminum-alloy Laminates), FRMLs(Fiber Reinforced Metal Laminates), Aramid(아라미드), Heracron(헤라크론), Crack-Breading(균열브리징), Crack-Closure(균열닫힘), PREPREG(프리프레그)

1. 서 론

항공기 설계시 대부분 알루미늄 합금을 사용하고 있다. 그러나 알루미늄 합금을 이용한 항공기 설계시 피로파괴가 제한인자로 작용한다. 이 문제를 해결하기 위해 네덜란드 Delft 기술대학의 Vogelesang과 Fokker 항공사는 아라미드 섬유로 강화한 프리프레그에 고강도 알루미늄 합금을 접착시킨 새로운 개념의 복합소재를 개발하여, FRMLs라 명명하였다. 이 신소재는 얇은 금속을 적층함으로써 피로저항성을 높인다는 점에 착안되었으며, 고강도 섬유가 피로하중하에서 금속층의 피로균열성장을 효과적으로 방해하여 더욱 피로저항성을 높일 수 있다. Delft 대학과 Fokker 항공사가 이 신개념의 복합소재를 최적화하였으며, 미국의 ALCOA사가 이를 상품화하여 이의 상표명을 ARALL®이라 명명하였다. ARALL을 항공기용 구조물에 사용할 경우, 고강도 알루미늄 합금보다 약 60%의 강도향상이 있고, 밀도는 15~20% 정도 감소시킬 수 있다.[1~8]

FRMLs의 피로저항 향상은 고강도 섬유의 균열브리징 영향에 기인한다. 접착층의 고강도 섬유가 균열브리징으로 작용하여 금속층의 균열열림을 저지한다. 이 균열브리징에 대한 연구가 대부분 섬유강화복합재료(Fiber Reinforced Composite Material)의 균열브리징에 국한되어 왔다.[9,10]

본 논문은 국산 아라미드 섬유인 헤라크론과 국산 수지로 제작한 HERALL의 피로저항성을 ARALL®-2 LAMINATE 및 알루미늄 합금과 비교하여 해석하였다. FRMLs의 외인성 강화기구인 균열브리징을 FRMLs와 FRMLs에 적층한 동일종류의 금속의 COD 차 이용하여 정량적으로 측정하였다. 또한 FRMLs에서 금속층의 균열을 브리징하고 있는 아라미드 섬유

의 영역을 실험을 통하여 측정하였다.

2. 섬유강화금속적층재 제작 및 피로실험

2.1 HERALL 제작

HERALL의 제작과정은 Fig. 1과 같다. Fig. 2와 같이 2장의 프리프레그와 3장의 알루미늄 합금판을 적층시킨 후 Autoclave에서 경화시켜 HERALL을 제작했다. 여기서 PREPREG로 코오롱 Heracron 섬유를 사용하였으며, 한국화이버의 수지를 사용하였다.

2.2 피로시험

본 연구에 사용된 재료의 기계적 특성은 Table 1과 같고, 피로시험은 Shimadzu 피로시험기를 사용하여, 최대응력 231.6MPa, 응력비 0.1, 10Hz Sine파 일정진폭하에서 수행하였다. 피로균열 길이는 이동식 현미경을 사용하여 측정하였고 균열성장속도(da/dN)은 Secant 법을 사용하여 해석하였다.

2.3 유효최대응력 측정

유효최대응력은 고강도 섬유의 균열브리징으로 인하여 균열성장에 실제로 영향을 준 유효응력으로 피로하중시 FRMLs와 알루미늄 합금의 COD차를 이용하여 유효최대응력을 측정하였다. 본 연구에서는 유효최대응력을 측정할 수 있는 새로운 알고리즘(Algorithm)을 채택하였다. 이 알고리즘은 FRMLs와 FRMLs에 적층한 동일종류의 금속에 같은 응력을 가하여 그때 발생하는 COD차로부터 유효최대응력을 측정하는 방법이다. Fig. 3과 같이 FRMLs와 FRMLs에 적층한 동일금속에 같은 응력을 가할 때 FRMLs와 FRMLs에 적층한 동일금속의 COD 차가 발생한다. 고강도 섬유로 균열브리징된 FRMLs가 FRMLs에 적층한 동일종류의 금속에 비해 COD가 작다. COD에 대한 응력 즉, COD－응력 선도를 FRMLs와 FRMLs에 적층한 동일종류의 금속에 대해 도시화하면 Fig. 4와 같다. 여기서, FRMLs의 COD가 최대일 때 FRMLs에 적층한 동일종류의 금속의 응력이 균열브리징으로 인한 유효최대응력이 된다. 본 연구에서는 COD 측정용 Gage를 시편중앙에 장착한 후, Fig. 5와 같은 실험장치를 이용하여 유효최대응력 측정실험을 수행하였다. HERALL, ARALL 및 2024-T3 알루미늄 합금에 최대응력 231.6 MPa, 응력비 0.1, 10Hz Sine파로 피로응력을 가하여 로드셀로부터 피로응력신호를, COD Gage로부터 COD Strain 신호를 PC로 받아들였다

2.4 균열브리징 영역 측정

균열브리징 영역은 섬유가 끊어지지 않고 균열을 브리징하고 있는 영역이다. 균열진전 하한계 ΔK_{th}에서 10^7번 피로시험후, 최대응력하에서 균열선단 후방 0.2mm까지 실톱을 사용하여 1mm간격으로 가공하였다. 균열진전 하한계 ΔK_{th} 측정은 ASTM E647-81에 기초하였으며, HERALL과 ARALL의 균열진전 하한계 ΔK_{th}는 모두 7.7 MPa · $m^{1/2}$이었다. 균열을 브리징하고 있는 섬유를 절단할 때 COD가 상승한다. 가공시, COD가 급격히 증가하는 부분부터 균열선단까지의 영역을 균열브리징영역으로 한다. 가공시 COD Gage로부터 COD 증가량을 PC로 기록하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 FRMLs와 알루미늄 합금의 피로균열진전 거동

일정응력진폭하에서 알루미늄 합금과 FRMLs의 피로시험결과는 Fig. 6 ~ 8과 같다. 알루미늄 합금의 피로균열진전속도가 FRMLs보다 매우 컸으며, FRMLs는 2024-T3 알루미늄 합금과 달리 시편의 균열진전이 완전히 완료된 후에도(37.5mm), 파단되지 않았다. 그러나 2024-T3 알루미늄 합금의 경우 갑자기 파단에 이르렀다. HERALL의 피로수명이 ARALL의 피로수명보다 다소 길었다.

4.2 최대유효응력

FRMLs에서 아라미드 섬유의 균열브리징 영향으로 최대응력이 감소한다. 실제로 금속층의 균열진전에 영향을 준 응력, 즉 유효최대응력은 Fig. 9 ~ 10과 같다. HERALL과 ARALL에 가한 최대응력은 231.63 MPa인데, Heracron과 Kevlar 49 섬유의 균열브리징으로 인해 금속층의 균열성장에 영향을 준 유효최대응력은 HERALL의 경우 163.67 MPa, ARALL의 경우 166 MPa이었다. HERALL은 Heracron의 균열브리징 영향으로 약 29.3%의 최대응력감소가 있었고, ARALL은 Kevlar 49의 균열브리징 영향으로 약 28.3%의 최대응력감소가 있었다. 헤라크론으로 강화한 HERALL의 최대응력 감소량이 케블라 49로 강화한 ARALL의 감소량보다 약1% 정도 컸다. 이는 HERALL의 균열브리징영향이 ARALL보다 컸음을 의미한다. 아라미드 섬유가 HERALL의 경우 최대응력의 29.3%를, ARALL의 경우 28.3%를 지탱하였음을 의미한다. 또한 균열닫힘 현상을 무시한다고 해도 HERALL의 경우 가한 피로응력의 약 67.4%, ARALL의 경우, 68.5%만이 금속층의 균열성장에 실제로 영향을 주었음을 의미한다.

4.3 균열브리징 영역

균열진전 하한계 ΔK_{th}에서 10^7번 피로시험후, 균열선단 후방 0.2mm까지 1mm 간격으로 가공해가며 COD Gage 출력신호를 측정한 결과, FRMLs의 균열브리징 영역은 Fig. 11 ~ 12와 같다. 그림에서 COD가 급격히 증가하는 부분부터 균열브리징 영역으로 HERALL의 균열브리징 영역길이는 균열선단에서 약 4mm이고, ARALL의 경우도 약 4mm였다. HERALL은 Heracron 섬유가 피로응력시 균열선단 후방 약 4mm까지 균열을 브리징하고 있고, ARALL의 경우도 약 4mm까지 균열을 브리징하고 있음을 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

5. 결 론

국산 아라미드섬유와 에폭시수지로 제작한 HERALL의 피로균열진전거동 및 균열브리징을 ARALL 및 2024-T3 알루미늄 합금과 비교실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) HERALL과 ARALL 모두 2024-T3 알루미늄 합금보다 우수한 피로특성을 보였다. 동일조건하에서 2024-T3 알루미늄 합금보다 HERALL은 50배, ARALL의 경우 46.4배 피로균열수명 향상이 있었다.
(2) FRMLs의 균열브리징으로 인한 최대응력의 감소는 HERALL이 최대응력의 약 29.3%, ARALL의 경우 약 28.3%였다.
(3) 금속층의 균열을 브리징하고 있는 영역은 국산의 HERALL과 ALCOA의 ARALL 모두 약 4mm였다.

참 고 문 헌

1. Glyn Lawcock, Lin Ye, and Yiu-Wing Mai, "Novel Fiber Reinforced Metal Laminates for Aerospace Applications - A Review, Part I - Background and General Mechanical Properties", SAMPE Journal, Vol. 31, No. 1, pp. 23-31, January/February 1995.
2. Glyn Lawcock and Lin Ye, "Novel Fiber Reinforced Metal Laminates for Aerospace Applications - A Review, Part II - Notched Strength and Fatigue Behavior", SAMPE Journal, Vol. 31, No. 3, pp. 67-75, May/June 1995.
3. R. Marissen, "Fatigue Crack Growth Predictions in Aramid Reinforced Aluminium Laminates (ARALL)", ICAS and AIAA, pp. 801-807, 1986.
4. R. Marissen, "Flight Simulation Behaviour of Aramid Reinforced Aluminium Laminates (ARALL)", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 19, No. 2, pp. 261-277, 1984.
5. Richard P. Gangloff, Robert S. Piascik, Dennis L. Dicus, and James C. Newman Jr, "Fatigue Crack Propagation in Aerospace Aluminum Alloys", Journal of Aircraft, Vol. 31, No. 3, pp. 720-729, 1994.
6. R. O. Ritchie, Weikang Yu and R. J. Bucci, "Fatigue Crack Propagation in ARALL® Laminates: Measurement of the Effect of Crack-Tip Shielding from Crack Bridging", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 32, No. 3, pp. 361-377, 1989.
7. Richard W. Hertzberg, Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, John Wiley & Sons, 1989.
8. Stuart M. Lee, International Encyclopedia of Composites, VCH, 1990.
9. D. B. Marshall, B. N. Cox, and A. G. Evans, "The Mechanics of Matrix Cracking in Brittle-Matrix Fiber Composites", Acta metall., Vol. 33, No. 11, pp. 2013-2021, 1985.
10. T. L. Anderson, Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications, CRC Press, 1991.

Table 1 FRMLs와 알루미늄의 기계적

기계적 특성	HERALL	ARALL	Al 2024-T3
극한 강도(MPa)	507.8	569.7	412.7
항복강도(MPa)	347.3	347.3	347.3
탄성계수(GPa)	67	64	72
포아송 비	0.32	0.32	0.24
연신율(%)	2	2.5	13.2

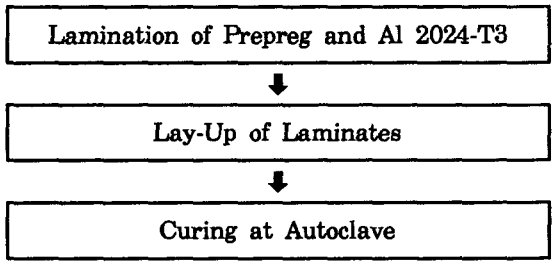

Fig. 1 HERALL의 제작공정

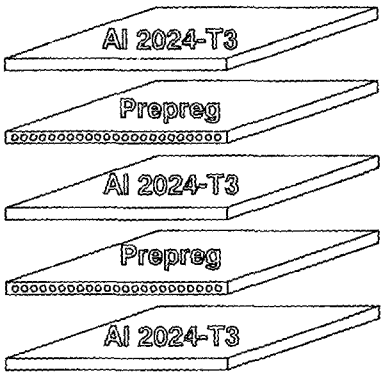

Fig. 2 프리프레그와 알루미늄 합금의 적층

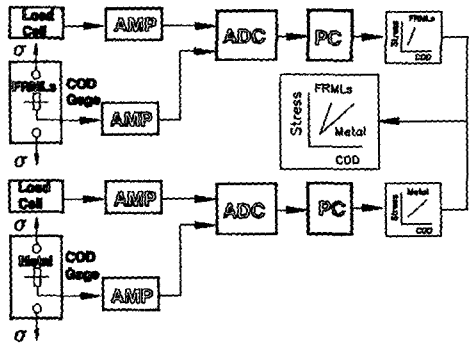

Fig. 5 실험장치

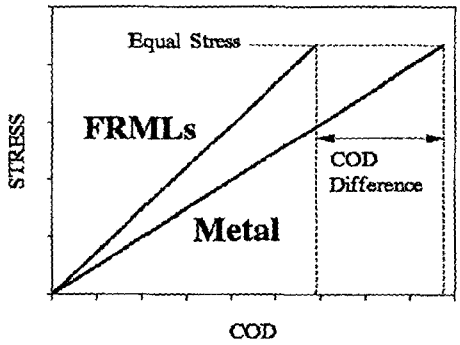

Fig. 3 동일응력하에서 FRMLs와 금속의 COD 차

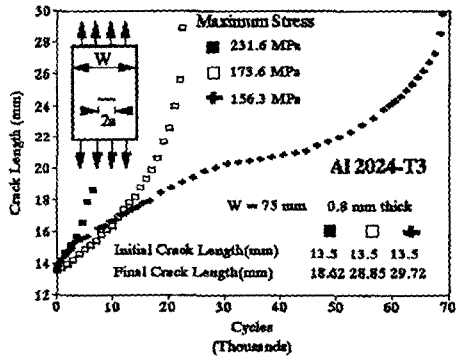

Fig. 6 피로싸이클수 vs 피로균열길이(Al2024-T3)

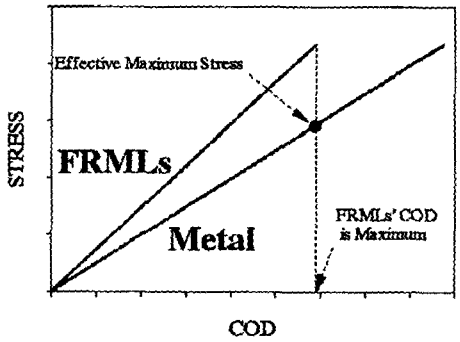

Fig. 4 최대유효응력

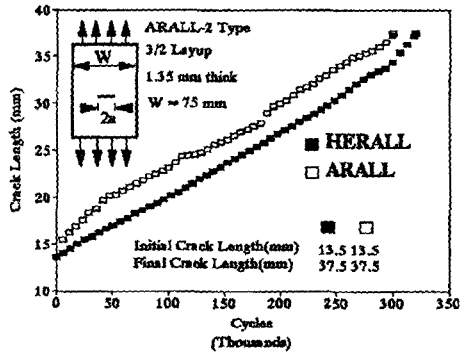

Fig. 7 피로싸이클수 vs 피로균열길이(FRMLs)

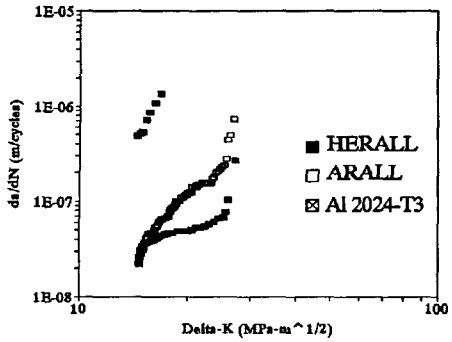

Fig. 8 응력확대계수 vs 균열성장속도

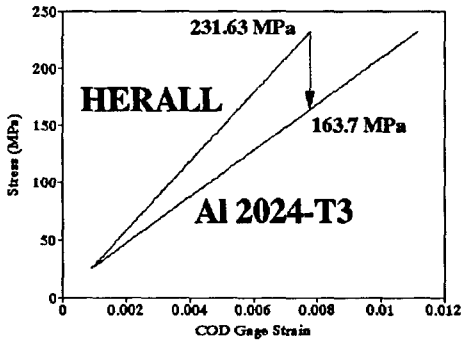

Fig. 9 유효최대응력(HERALL)

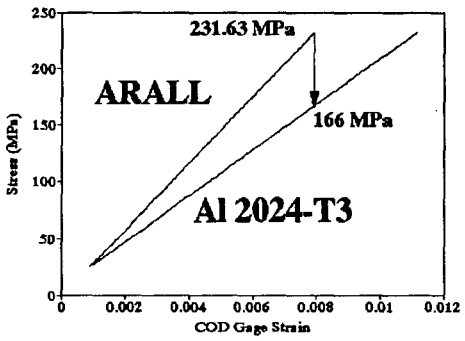

Fig. 10 유효최대응력(ARALL)

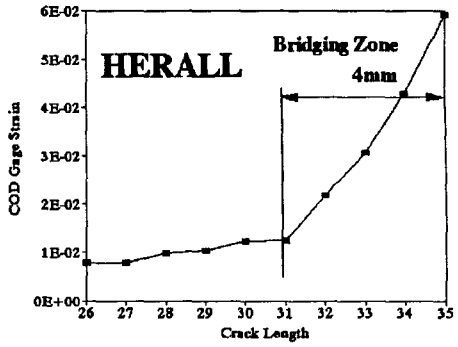

Fig. 11 균열브리징 영역길이(HERALL)

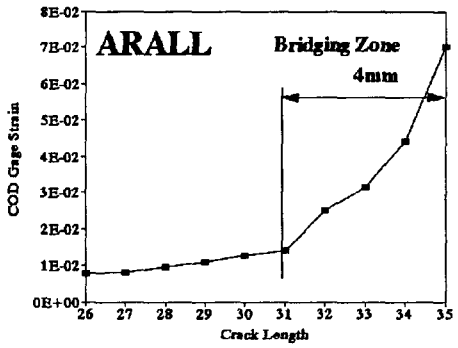

Fig. 12 균열브리징 영역길이(ARALL)