

## 항공기 구조물에서 FRP를 이용한 보강부재의 피로수명에 대한 연구

박 원 조\* · 허 정 원\*\* · 이 광 영\*  
(97년 5월 17일 접수)

### A Study on Fatigue Life of Aluminum Plate Reinforced with FRP in Aircraft Structure

Won-Jo Park\* · Chung-Weon Hur\*\* · Kwang-Young Lee\*

**Key Words** : AFRP(Aramid Fiber Reinforcement Plastics: 아라미드 복합재료), Hybrid-Composite(하이브리드 복합재료), APAL(Aramid Patched ALuminum alloy: 아라미드보강 알루미늄재), Fatigue Life(피로수명), Orientation(접착방위)

#### Abstract

A Al2024-T3 plate has been reinforced with AFRP to be a Hybrid-Composite, APAL. The fatigue life of the APAL has been investigated. The effects of bonding surface, numbers of AFRP bonded and AFRP orientation on fatigue life have been compared with Al2024-T3 plate. Fatigue life of APAL has been remarkably increased compared with that of Al2024-T3 plate. The fatigue life has depended on bonding surface and AFRP orientation, but no relationship could be found with numbers of AFRP laminates

#### 1. 서 론

복합재료는 기존의 금속재료에 비하여 비강도, 비강성뿐만 아니라 여러 가지 우수한 특성으로 인하여 1960년대 이후로 항공·우주용 구조물에 다양하게 이용되어 왔다.

복합재료 중에서 특히, 섬유강화 복합재료가 가장 많이 이용되고 있으며, 이를 응용한 연구 중에

서 항공기 기존 구조물의 취약부위의 보강, 생산과정 중에 발생할 가능성이 있는 결함부위의 보강과 실제 운항 중인 항공기에서 발생하는 각종 손상부위 수리에 대한 보다 저렴하고 신속하며 효과적인 수리 방법에 대한 관심이 계속되고 있다. 이 방법은 고강성의 복합재료를 필요한 부위의 금속부품 표면에 선택적으로 접합하는 기술이다.<sup>1) 3)</sup>

저자들은 균열이 발생한 Al2024-T3 판재에 균

\* 정회원 경상대학교 해양과학대학 선박기계공학과

\*\* 정회원 현대우주항공(주) 중앙연구소 선임연구원

열 저지용 AFRP를 접착한 시험편을 이용한 균열 전파시험에서, AFRP 접착에 의해서 균열전파속도가 현저히 억제되며, 기존의  $\Delta K$ 를 이용하여 균열 전파속도를 정리하면 균열이 성장할수록 균열전파속도는 감소하는 경향이 있음을 보고함<sup>4) 6)</sup>으로써, APAL재 형태의 재료가 기 균열이 존재하는 Al판재의 균열전파속도를 감소시키는 유용한 방법임을 확인하였다.

그러나 항공기의 개발과정 또는 사용중에 발견하게 되는 설계기준(Design Criteria)을 만족하지 못하는 취약부위 등을 APAL재 형태로 보강하고자 할 경우에 필요한 APAL재의 정적강도 및 피로강도에 대한 연구자료는 매우 중요하다. 그러나 이와 관련된 연구는 아직 없으며 많은 자료의 데이터베이스가 요망되고 있다.

본 연구에서는 Al2024-T3 판재에 AFRP 라미네이트가 보강된 APAL재의 피로수명 실험을 실시하여 APAL재의 피로수명에 미치는 적층면, 적층수 및 적층방위의 영향을 조사하였다.

## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1 시험편

Fig. 1은 피로수명 시험편의 형상과 치수를 나타낸다. 실험에 사용한 피로수명 시험편은 두께 6.6mm의 Al 2024-T3 판재를 L-T 방향으로 채취하고, 양 표면에 아라미드/에폭시 섬유 강화 복합재료(이하 AFRP : Aramid Fiber Reinforcement Plastics) 프리프랙을 오토클레이브로 큐어링하여 Al 2024-T3

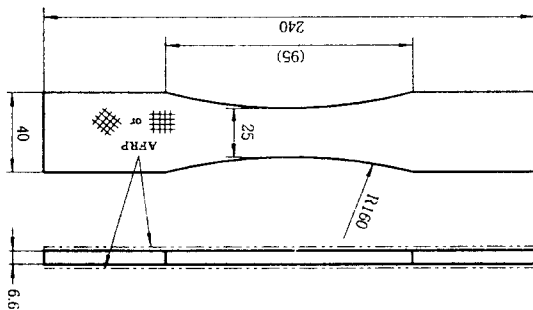


Fig. 1 Configuration and dimension of fatigue test specimens for APAL materials

판재가 AFRP 라미네이트를 보강된 형태이며, 이 재료를 편의상 AFRP/Aluminum 하이브리드 복합재료 APAL(Aramid Patched ALuminum alloy)재로 명명하였다.

시험편 제작에 사용한 Al 2024-T3 판재의 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of Al 2024-T3 aluminum alloy (wt.%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.11	0.23	4.46	0.58	1.44	0.04	0.03	0.02	Bal.

Table 2 Mechanical properties of Al 2024-T3 aluminum alloy

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
360	500	18.3	146.5	2.8

Al 판재 보강에 이용한 아라미드/에폭시 프리프랙은 (주)한국화이버에서 제조한 제품명 HK285/RS1222이며, 이 AFRP 프리프랙을 사용하여 Al 판재에 큐어링 시스템에 의해 보강하였다. 패치재로 사용한 AFRP의 기계적 성질은 ASTM D 3039 규정에 의해 실험하였다. 이 AFRP의 물리적 성질은 Table 3에, 기계적 성질은 Table 4에 나타내었다.

Table 3 Physical properties of aramid/epoxy prepreg (HK 285/RS 1222)

Density	1.35 g/cm <sup>3</sup>
Volatile content	0.28 %
Fiber content	52.17 %
Resin flow (at 0.35 MPa)	28.72 %
Gel time (at 135 ± 1C°)	4 min 48 sec

Table 4 Mechanical properties of aramid/epoxy laminate (HK 285/RS 1222)

Properties	Fiber pattern Warp(0°) (MPa)	Fill(90°) (MPa)	±45° (MPa)
Tensile strength	567.50	512.41	227.01
Tensile modulus	30×10 <sup>3</sup>	31×10 <sup>3</sup>	5×10 <sup>3</sup>
Compression strength	224.14	227.59	-
Compression modulus	29×10 <sup>3</sup>	29×10 <sup>3</sup>	-
Flexural strength	513.79	510.35	-
Interlaminar shear strength	63.45	-	-

피로수명 시험편 및 AFRP 시험편 제작을 위한 오토클레이브 큐어링 조건은 Fig. 2에 나타내었다.

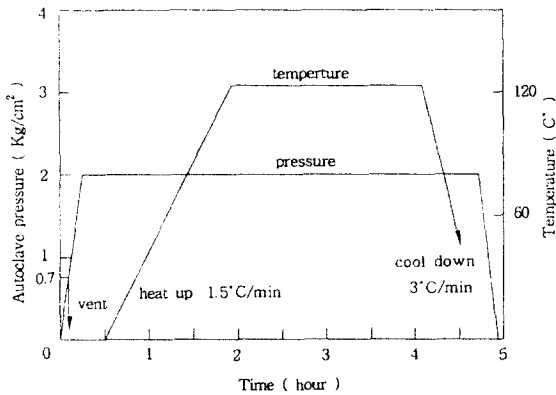


Fig. 2 Diagram of autoclave curing procedure

실험에 사용한 APAL재 피로수명 시험편은 AFRP의 경사(Warp) 방향이 하중 방향 (0°)인, APAL 0°/90°재, 경사 방향과 위사(Fill) 방향이 하중 방향에 각각 ±45°인 APAL ±45°재, Al 2024-T3 시험편의 단면에 접합한 APAL SS (Single Side)재 및 양면에 접합한 APAL DS (Double Side)재, 1 층(Ply) 접합한 APAL 1P재 및 2 층으로 접합한 APAL 2P재 등으로 구분하였고 모두 5 종류를 준비하였으며, 시험편의 제작상태와 각각의 기호를 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Abbreviation for kinds of APAL specimens.

Abbreviation	Orientation	Surface	Ply No.
APAL 0/90-SS-1P	0° / 90°	single-side	1
APAL 0/90-SS-2P	"	"	2
APAL 0/90-DS-1P	"	"	1
APAL 0/90-DS-2P	"	"	2
APAL ±45-SS-2P	"	"	2

## 2.2 실험방법

피로실험은 ASTM D 3470 규정을 참조하였고, 하중제어는 인장-인장의 편진 피로시험이었으며, 최소하중은 0(zero)로 고정하는 응력비 R=0 상태에서 최대하중의 크기로 실험응력을 조절하였다. APAL재 응력 산출을 위한 시험편 공칭단면적은 최소 Al 2024-T3 판재의 단면적만을 고려하였다.

하중파형은 정현파, 주파수는 15Hz로 실험을 실시하였다. 피로한도는 반복수 N = 2×10<sup>6</sup> cycle 에 파괴되지 않는 응력으로 결정하였다.

본 실험에 사용한 시험기는 MTS 10톤 용량, 컴퓨터 제어 유압서보식 재료실험기이다.

## 3. 실험결과

Table 6은 Al 2024-T3재와 전체 APAL재 시험편의 피로수명 시험 결과를 표시한 것이다. APAL재의 각 시험편은 AFRP 라미네이트의 적층면, 적층수 및 적층방위에 따라서 인장강도가 동일하지 않으므로 시험편마다 각기 다른 실험 응력을 사용하였으며, 각 실험 응력에서 2 개의 시험편을 사용하여 실험하고 시간강도는 결과치를 평균하여 취하였다.

Fig. 3는 Al 2024-T3재 및 전체 APAL재의 응력별 피로파괴 반복수를 나타낸다. Al 2024-T3재와 전체 APAL재의 피로강도를 비교하면, 전체 APAL재의 경우가 Al 2024-T3재에 비해서 전반적으로 증가한 결과를 나타낸다. 여기에서 피로한도 (fatigue limit : N<sub>f</sub> = 2×10<sup>6</sup> cycle)를 비교하면, Al 2024-T3재의 피로한도는 σ<sub>f</sub>≈130 MPa 를 나타내며, APAL재 중에서 APAL 0/90-DS-2P재는 σ<sub>f</sub>≈

Table 6 The results of fatigue life test in Al 2024-T3 and APAL

Specimen		Test No	1	2	3	4	5	6	
		$\sigma$ (MPa)	$N_f$ (cycle)	$\sigma$ (MPa)	$N_f$ (cycle)	$\sigma$ (MPa)	$N_f$ (cycle)	$\sigma$ (MPa)	$N_f$ (cycle)
Al 2024-T3	⊕	$\sigma$ (MPa)	270	245	190	170	150	130	
		$N_f$ (cycle)	$1.3 \times 10^5$	$1.9 \times 10^5$	$2.65 \times 10^5$	$6.0 \times 10^5$	$1.4 \times 10^6$	$2.7 \times 10^6$	
APAL 0/90-SS-1P	○	$\sigma$ (MPa)	260	220	190	180	170		
		$N_f$ (cycle)	$1.8 \times 10^5$	$3.0 \times 10^5$	$8.0 \times 10^5$	$1.6 \times 10^6$	$2.45 \times 10^6$		
APAL 0/90-SS-2P	□	$\sigma$ (MPa)	250	210	200	180			
		$N_f$ (cycle)	$1.89 \times 10^5$	$4.2 \times 10^5$	$7.5 \times 10^5$	$2.66 \times 10^6$			
APAL ±45-SS-2P	☆	$\sigma$ (MPa)	270	240	210	190	160		
		$N_f$ (cycle)	$1.48 \times 10^5$	$2.5 \times 10^5$	$5.0 \times 10^5$	$1.1 \times 10^6$	$2.1 \times 10^6$		
APAL 0/90-DS-1P	△	$\sigma$ (MPa)	270	240	220	210	200		
		$N_f$ (cycle)	$1.3 \times 10^5$	$2.2 \times 10^5$	$4.5 \times 10^5$	$8.0 \times 10^5$	$2.0 \times 10^6$		
APAL 0/90-DS-2P	◇	$\sigma$ (MPa)	280	240	220	210	200		
		$N_f$ (cycle)	$1.38 \times 10^5$	$2.3 \times 10^5$	$5.5 \times 10^5$	$1.1 \times 10^6$	$2.2 \times 10^6$		

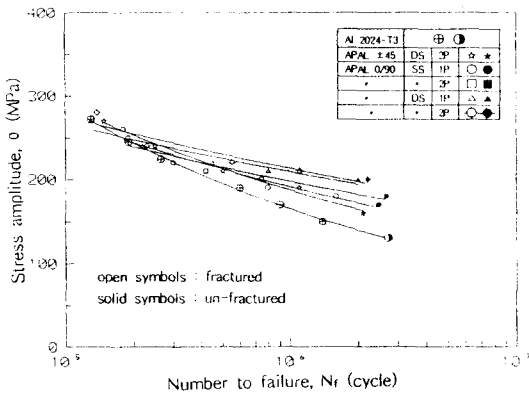


Fig. 3 Relationship between stress amplitude and number to failure

200 MPa 를 나타내고 있어서, 결과적으로 APAL 재 0/90-DS-2P재의 피로한도는 Al 2024-T3재에 비해서 최대로 약 55% 상승하였다. 또한, 실험 응력  $\sigma=200$  MPa를 기준으로 피로수명을 비교하면, Al 2024-T3재는  $N_f = 4.4 \times 10^5$  cycle 이고, APAL

0/90-DS-2P재는  $N_f = 2.0 \times 10^6$  cycle 이어서 약 4 배 이상의 피로수명을 나타낸다.

APAL재가 Al 2024-T3재에 비해서 전반적으로 피로강도가 증가하는 이유는 표면에 접촉된 AFRP 라미네이트로 인하여 Al 2024-T3 판재 표면의 변형이 구속되기 때문이라 사료된다. 즉, 외부 하중에 대한 공칭응력은 동일하지만 Al 2024-T3 판재 표면의 변형량이 작아져서 결과적으로 판재에 작용하는 실제 응력은 감소한 효과를 나타내는 것이다.

Fig. 3에서 피로강도에 미치는 양면과 단일면에 대한 적층면의 영향을 조사하기 위하여 APAL-SS재와 APAL-DS재를 비교하면, 양면 접촉인 APAL 0/90-DS 1P 및 2P 재 피로강도가 단일면 접촉인 APAL 0/90-SS 1P 및 2P 재 경우보다 각각 크다는 것을 명확히 알 수 있다. 특히 APAL 0/90-DS-1P재와 APAL 0/90-SS-2P재의 결과를 비교하면, APAL 0/90-DS-1P재 피로강도가 APAL 0/90-SS-2P재 경우보다 크게 나타난다. 두 경우에서 접촉면은 단일면과 양면으로 다르지만 보강된

AFRP 라미네이트는 모두가 동일하게 2층인 APAL재임에도 피로수명은 다르다는 것이다. 따라서 APAL재에서 피로강도는 접착면의 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3에서 적층수 영향을 조사하기 위하여 실험 결과를 구분하여 나타내었다. Fig. 4는 APAL 0/90-SS 1P재 및 2P재 시험편을 구분하여 응력 크기와 반복수 관계를 나타내었다. 피로한도는 APAL 0/90-SS-2P재가  $\sigma \approx 170$  MPa 이고, APAL 0/90-SS-1P재가  $\sigma \approx 180$  MPa 로 나타나서 AFRP 라미네이트 적층수에 따른 피로한도의 차이는 극히 미소하였다. 또한, Fig. 6은 APAL-DS 1P재 및 2P재 시험편을 구분하여 응력크기와 반복수의 관계를 나타내었다. APAL 0/90-DS재의 피로한도는 APAL 0/90-DS-1P재 및 APAL 0/90-DS-2P재 모두  $\sigma \approx 200$  MPa 를 나타내어서 역시 AFRP 라미네이트 적층수에 따른 피로한도의 차이는 발견되지 않았다. 따라서 Fig. 4 및 Fig. 5의 결과로부터 APAL재의 피로강도는 AFRP 라미네이트 적층수의 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

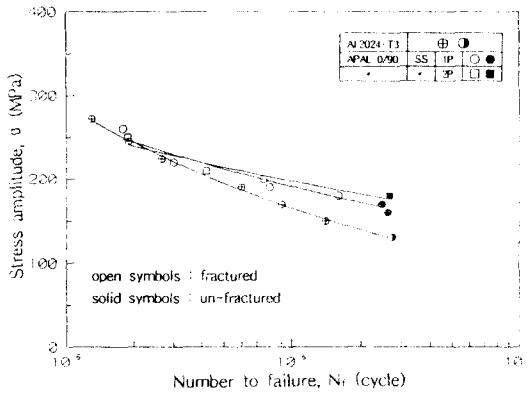


Fig. 4 Relationship between stress amplitude and number to failure in APAL-SS specimen

상기 Fig. 3~5에서 기술한 바와 같이 APAL재 피로강도는 접착면에 영향을 받지만, 접착수에는 영향을 받지 않는다. 상기의 결과를 종합하면, APAL재 피로강도가 AFRP 라미네이트의 적층수에 영향을 받기 보다는 AI2024-T3 판재와 AFRP 라미네이트 계면에 존재하는 에폭시수지의 영향을

크게 받는다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 APAL재 인장강도에 미치는 접착면 및 접착수의 영향을 연구 보고한 저자의 연구<sup>7)</sup>에서 APAL재의 인장강도는 접착면의 영향을 받고 접착수의 영향은 크게 받지 않는 결과<sup>7)</sup>와 유사하며, 상기 논문에서 APAL재 인장강도 평가에 만족한 결과를 보여준 복합법칙(Law of mixture)은 APAL재 피로강도 평가에도 적용할 수 있으므로, APAL재의 인장강도와 피로강도를 향상시키는 강화기구가 강구되어야 한다.

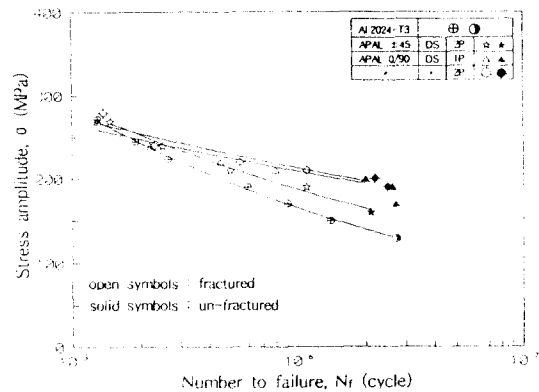


Fig. 5 Relationship between stress amplitude and number to failure in APAL-DS specimen

Fig. 6에서 피로강도에 미치는 적층방위의 영향을 추가하기 위하여, APAL 0/90-DS-2P재와 APAL ±45-DS-2P재의 결과를 비교하여 보면, APAL 0/90-DS-2P재의 피로강도가 APAL ±45-DS-2P재의 경우보다 대체로 크게 나타난다. 이는 APAL재의 피로강도가 적층방위의 영향을 받는다는 것이다. 즉, APAL재 피로강도는 AI/AFP 계면 에폭시수지의 절대적인 물성치에 의존하는 것이 아니라 AFRP 라미네이트의 물성치에 따른 에폭시수지 물성치에 의존하는 것을 의미한다.

위에서 기술한 APAL재 피로강도에 대한 접착면, 접착수 및 접착방위의 결과를 종합적으로 검토하면, APAL재 피로강도는 AFRP 라미네이트의 접착조건에 영향을 받는 것이 아니라 AI 2024-T3 판재와 AFRP 라미네이트의 층간에 존재하는 에폭시수지의 영향을 받는 것으로 사료된다. AFRP 라미

네이트 접착방법에 따라 에폭시수지의 Al 2024-T3 판재 표면에 대한 변형구속 능력이 변화함을 의미한다.

APAL재에서 AFRP 라미네이트의 Al 2024-T3 판재의 변형에 대한 구속효과는 AFRP 라미네이트의 적층수보다 Al/AFRP 계면의 층간전단강도에 큰 영향을 받는다고 생각한다. 이것은 Al/AF계 층간전단강도가 적층수에 관계 없이 거의 일정함을 보고한 연구결과<sup>6)</sup>에서 간접적으로 확인할 수 있다. 즉, Al/AF계 층간전단강도가 AFRP 라미네이트 적층수에 관계없이 일정한 결과와 피로수명이 적층수에 관계 없이 일정한 결과는 층간전단강도와 피로수명이 동일하게 Al/AF계면에 존재하는 에폭시수지의 영향을 받는다는 것을 의미한다.

그리고 Fig. 3~5에서 APAL재의 피로거동을 Al 2024-T3재와 비교하면, APAL재의 피로강도는 저응력 영역에서 Al 2024-T3재에 비해서 상당히 증대하지만, 고응력 영역에서는 Al 2024-T3재와 별 차이 없이 근사하게 나타난다. 이러한 거동을 상세히 모델링하여 나타낸 것이 Fig. 6이다. 여기에서 표시한 A, B 점은 APAL재의 피로강도가 Al 2024-T3재의 피로강도 케도를 벗어나서 Al 2024-T3재보다 피로강도가 증가하기 시작하는 천이점의 응력크기를 표시한 것이다.

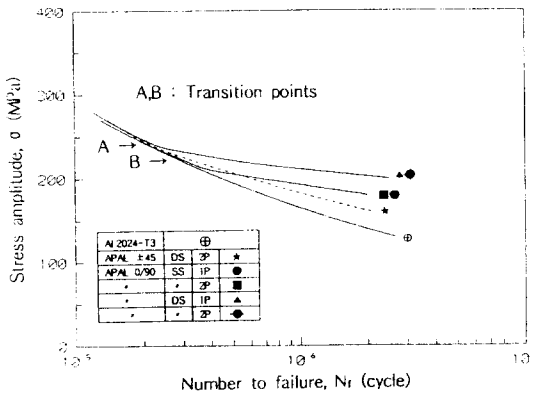


Fig. 6 Schematic illustration for composition of fatigue life between Al 2024-T3 and APAL

Fig. 6에 표시된 A, B 점을 천이점으로 기준하여 이보다 응력이 작은 경우에 APAL재 피로강도는

Al 2024-T3재보다 크게 나타나지만, 응력이 큰 경우에 APAL재 피로강도는 Al 2024-T3재와 거의 동일하게 나타난다. 이러한 응력범위에 따른 거동은 고응력 영역에서는 Al/AFRP 계면의 응력이 국부적으로 계면전단강도(Interlaminar shear strength)의 범위를 초과하기 때문에 AFRP 라미네이트가 Al 2024-T3 판재의 변형을 더 이상 구속하지 못하는 결과라 생각된다. 즉, 저응력 영역에서는 계면의 응력이 작기 때문에 AFRP 라미네이트가 Al 2024-T3 판재의 변형을 구속하는 효과가 나타나지만, 고응력 영역에서는 Al/AFRP 계면의 응력이 크기 때문에 Al 2024-T3 판재의 변형에 대한 AFRP 라미네이트의 구속 효과가 나타나지 않는 것이다. Fig. 6에서 A 점은 APAL 0/90-DS 1재 및 2재인 경우의 천이점을 표시하고, B 점은 APAL 0/90-SS 1재 및 2재인 경우를 표시한다. Fig. 4에서 APAL 0/90-DS재의 천이점은 적층수에 관계 없이  $\sigma \approx 240$  MPa 이고, Fig. 5에서 APAL 0/90-SS재의 경우는 역시 적층수에 관계 없이  $\sigma \approx 210$  MPa를 나타내고 있어서 천이점이 적층수에 관계없이 적층면에만 의존함을 보이고 있다. 이러한 결과는 APAL재의 피로강도는 적층면의 영향을 받지만, 적층수의 영향은 크게 받지 않음을 알았다.

#### 4. 결 론

Al2024-T3 판재에 AFRP 라미네이트가 보강된 APAL재의 피로수명 실험을 통하여 피로수명에 미치는 적층면, 적층수 및 적층방위의 영향을 조사한 결과는 다음과 같다.

1. APAL재의 피로강도는 Al2024-T3판재에 비해서 크게 증가하였다.
2. APAL재의 피로강도는 AFRP 접착면(단일면, 양면) 및 접착방위(0°/90°, ±45°)에 의존하지만, AFRP 접착수에는 거의 의존하지 않았다.
3. APAL재의 피로강도를 Al2024-T3판재와 비교하면, 저응력에서는 Al2024-T3판재에 비해서 APAL재의 피로강도가 증가하였으나 고응력에서는 증가없이 비슷한 거동을 나타냈다.

## 후 기

이 논문은 1996년도 경상대학교 연구장학재단 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 여러분에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) Marissen R., "FLIGHT SIMULATION BEHAVIOR OF ARAMID REINFORCED ALUMINUM LAMINATES(ARALL)", Engineering Fracture mechanics, Vol. 19, No. 2, pp.261~277, 1984
- 2) "항공산업동향", 대한항공 항공우주사업본부 한국항공기술연구원, 1991 10/12, pp.119~133, 1991
- 3) Davidson D. L. and Austin L. K., "Fatigue Crack Growth through ARALL -4 at Ambient Temperature", Fatigue Engng Mater. Struct., Vol. 14, No. 10, pp.939~951, 1991
- 4) S. W. Oh, H. K. Yoon, W. J. Park, K. B. Lee and C. W. Hue, "The Effect of Bridging on Fatigue Crack Growth Behavior in Aramid Patched Aluminum Alloy", J. of KSME, Vol. 8, No. 1, pp.375~384, 1994
- 5) S. W. Oh, W. J. Park, H. K. Yoon, K. G. Lee and K. B. Lee, "Effect of Stress Ratio and Fiber Orientation on Fatigue Crack Growth Behavior in APAL", Proc. of Special Offshore Symposium China (SOSC-94/Pacoms-94), Beijing China, pp.269~286, 1994
- 6) 오세욱, 박원조, 윤한기, 허정원, "FRP 본당한 알루미늄판재의 피로균열 저항성에 관한 연구", 대한용접학회논문집, 제12권, 제4호, pp.117~126, 1994
- 7) 박원조, "AFRP/Aluminum 하이브리드 복합재료의 정적 및 피로특성에 관한 연구", 동아대학교 박사학위논문, pp.33~38, 1994
- 8) 박원조, 허정원, "항공기 구조물 Metal-Composite Bonding부의 FEM을 이용한 전단강도 해석", 경상대학교 논문집, 제14집, 제2호, pp.153~159, 1995