

## Al 7075/CFRP 다적층 하이브리드 복합재료의 피로수명에 대한 연구

윤한기\* · 김연겸\*\* · 박준수\*\* · 이경봉\*\*  
(96년 6월 21일 접수)

### A Study on Fatigue Life of Al 7075/CFRP Multilayered Hybrid Composite Materials

Han-Ki Yoon\* · Youn-Kyoum Kim\*\* · Joon-Soo Park\*\* · Kyung-Bong Lee\*\*

**Key Words :** Al/CFRP multilayered hybrid composite(알루미늄/복합재료 다적층 하이브리드 복합재료), CFRP volume fraction(CFRP 체적율), Fiber orientation(섬유배열방향), Fatigue life (피로수명), Failure mechanism(파손기구)

### Abstract

In this research, to develop the Al 7075/CFRP multilayered hybrid composites, CRALL(Carbon Reinforced aluminum laminate) specimens were processed by autoclave curing system that curing temperature, time, surface pretreatment condition of aluminum were constant. And the fatigue life and failure mechanism on CFRP volume fraction and fiber orientation of CRALL specimens were investigated. A fatigue life was greatly influenced by effect of CFRP fiber volume fraction but it was less effected than those of fiber orientation. The fatigue failure arised from interface delamination of CFRP and aluminum sheet after shear fracture of aluminum layer. The failure mechanism is assumed that the aluminum laminates which divide the CFRP into many thin layers tend to arrest the failure propagation.

### 1. 서론

Aluminum/섬유강화 복합재료를 다적층한 하이브리드 복합재료는 차세대 경량화 복합재료로 주

목받고 있으며, 자동차, 고속전철 및 항공산업 등에 응용범위가 점차 넓어지고 있다. 그러나 이들 재료는 금속과 복합재료의 복합적인 구조적 특성 때문에 제작과정에서 발생하는 여러 가지 변수들

\* 동의대학교 공과대학 기계설계학과  
\*\* 동의대학교 대학원 기계설계학과

에 의해 기계적특성은 피로수명에 많은 영향을 받는다. 최근 이러한 문제점을 해결하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 이들 연구 중 Brief 와 Skiest<sup>1)</sup>는 접착본딩 전에 알루미늄소재의 표면처리는 초기의 고접착강도 뿐만 아니라 피로수명에 대한 내구성을 주기 때문에 전처리 기술 개발의 중요성을 강조하고 있다. Roderrick<sup>2)</sup>은 Al 판재에 Boron/Epoxy를 접착제로 보강한 복합재료의 피로 실험에서 피로강도가 우수하다는 것을 보고하였고, Marissen<sup>3)-5)</sup>은 2mm 두께 Al 7075-T6 재에 0.45mm 두께의 Aramid 섬유와 접착제 두께 0.6mm를 적층 결합한 ARALL을 개발하여 Flight simulation loading 의 거동에 있어서 피로수명이 우수함을 입증하였으며, ARALL재를 제작시 알루미늄과 복합재료의 두께가 얇은 것이 박리현상이 적게 나타난다는 것을 보고하였다. 그리고 Ritchie 등<sup>6)</sup>은 ARALL 재를 사용하면 고강도 Al 합금에 비해서 50%수준까지 경량화 시킬 수 있고, 밀도도 15-20% 정도로 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라, 강도도 약 60%까지 향상시킬 수 있다는 경이적인 보고를 하고 있다. Yamazaki 등<sup>7)</sup>은 Al/Epoxy moulded 접착부의 피로강도와 계면의 피로에 의한 박리문제를 보고하였다. Haga 등<sup>8),9)</sup>은 Al/CFRP 다적층 하이브리드 복합재료의 인장특성 및 굽힘특성을 보고하고 있다.

국내에서는 손 등<sup>10)</sup>이 HERALL과 ARALL재의 외부인화기구해석에 대하여 최근 보고하였다. 윤 등<sup>11)-13)</sup>은 알루미늄 판재에 AFRP와 CFRP를 양 측면에 접착하여 제조한 APAL과 CRAL재의 피로 균열전파거동에 대한 연구를 통하여 피로균열저항이 우수하다고 보고하고 있다.

이러한 연구배경에서 알루미늄박판과 섬유강화 복합재료의 다적층에 의한 하이브리드 복합재료의 국내개발은 첨단산업기계 등의 경량화를 위하여 시급한 과제로 생각된다. 그러나 이들 재료의 제조 과정 및 그들 특성평가는 제조과정에 따른 변수가 매우 많기 때문에 체계적인 집중연구가 요망되고 있다.

본 연구에서는 Al 7075/CFRP다적층 하이브리드 복합재료, CRALL(Carbon reinforced aluminum laminate)를 개발하기 위한 초기의 단계로 알루미늄박판의 표면전처리조건과 큐어링 온도 및 접착큐어링 유지시간을 일정하게 한 조건에서 CRALL시험편을 제작한 후, 제작된 시험편의 CFRP 체적율과 섬유배열방향이 피로수명에 미치는 영향을 조사하고, 이들 파괴기구를 규명하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1. 소재

Al 7075/CFRP 다적층 하이브리드 복합재료 (CRALL) 시편 제작에 사용된 소재는 알루미늄 합금 Al 7075-T6 (QQ-A-250/13E) 과 탄소섬유 강화 CFRP(Torayca M40)를 사용하였으며, 알루미늄 합금의 화학적 조성은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition of Al 7075-T6 sheet metal (Wt.%)

Element Material	Zn	Mg	Cu	Cr	Mn	Fe	Si	Ti	Al
Al 7075-T6	5.1~6.1	2.1~2.9	1.2~2.0	0.18~0.35	0.30	0.50	0.40	0.20	re.

알루미늄합금은 미국 Alclad사 제품으로 두께 0.4mm의 얇은 박판으로 판 표면에 aclading 한 QQ-A-250/13E로 통용되는 제품이며, T6처리는 판재의 용체화 처리후 인공시효처리한 것이다. 다적층재로 사용한 탄소강화섬유의 두께는 0.15mm, 섬유배열방향은 UD [ 0° /90° ] 와 [ ±45° ] 를 사용하였으며, 사용된 기지재는 modified epoxy 250°F #2560을 사용하였다. 이들 재료의 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Table 2 Mechanical properties of selected carbon fibers and aluminum sheet

Properties/class	CFRP		Epoxy 250 ° F	Al 7075-T6
	0° /90°	±45°	#2560	Alclad 7075
Ultimate tensile strength (MPa)	1027	230	55 ~ 120	483
Yield strength (MPa)	-	-	-	414
Modulus (GPa)	80	32	3.1 ~ 4.7	71
Strain to failure (%)	1.0	4.5	2.0 ~ 3.5	12
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.85	1.85	1.1 ~1.25	2.79

2.2. 전처리공정 및 접착

알루미늄 판의 전처리는 알루미나 Grit-blasting 후, Chromic acid anodizing (CAA) 에칭공정을 실시하였다. CAA 공정은 8wt. % 크롬산 (CrO<sub>3</sub>) 수용액에 1.5g/l 알루미늄, 0.06g/l Cu 를 용존시키고, 온도를 33~37℃로 유지시킨 후 초기에 2분간 8볼트로 상승시키고 다음 8분간 40볼트로 올린 후, 총 30분간 40볼트를 유지하였다. 다음 5분간은 2볼트씩 단계적으로 상승시켜 50볼트로 유지한 후 5분을 Anodizing 한 후 접착공정에 들어갔다. 접착전단강도는 Anodizing온도의 상승에 따라 증가되는 경향이 있음을 전보<sup>15)</sup>에서 관찰하였고, 본 실험에서는 Anodizing온도를 50℃로 처리한 후 CRALL 시험편의 접착공정에 들어갔

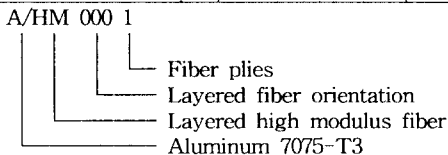
다. 접착공정은 준비된 프리프레그(prepreg) UD [ 0° /90° ] 와 [ ±45° ] 를 순서대로 플라이 수를 달리하여 적층한 후, 오토클리브(autoclave)에서 성형하였다. 성형조건은 3℃/min 의 승온속도로 130℃까지 승온한 후, 압력 0.343 MPa 의 압력 하에서 1시간 30분 동안 유지하였다. 성형이 완료된 후, 시편의 휨을 방지하기 위해 압력을 유지한 상태에서 2℃/min의 냉각속도로 서서히 상온까지 냉각하였다.

2.3. 적층구성

CRALL재의 적층구성은 Table 3과 같이 CFRP 체적율을 달리하였으며, 섬유배열방향을 [ 0° /90° ] [ ±45° ] 로 다음과 같이 변화시키면서 적층하였다.

Table 3 Area and volume fraction of Al 7075/CFRP multilayered hybrid composite

Specimen	Measured thickness (mm)			Volume fraction	
	t <sub>Al</sub>	t <sub>CFRP</sub>	t <sub>tot</sub>	V <sub>Al</sub>	V <sub>CFRP</sub>
A/HM 0001	1.60	0.45	2.05	0.78	0.22
A/HM 0003	1.60	1.35	2.95	0.54	0.46
A/HM 0005	1.60	2.25	3.85	0.42	0.58
A/HM 4441	1.60	0.90	2.50	0.64	0.36
A/HM 4442	1.60	1.80	3.4	0.47	0.53
A/HM 0401	1.60	0.60	2.2	0.73	0.27



#### 2.4. 피로수명시험

피로수명시험편은 Fig. 1과 같이 제작하였다. 피로수명시험은 유압피로시험기(MTS model 810 용

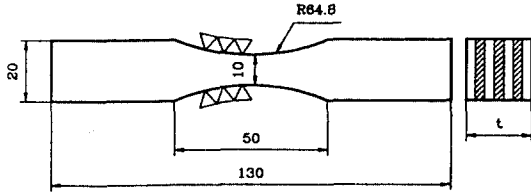


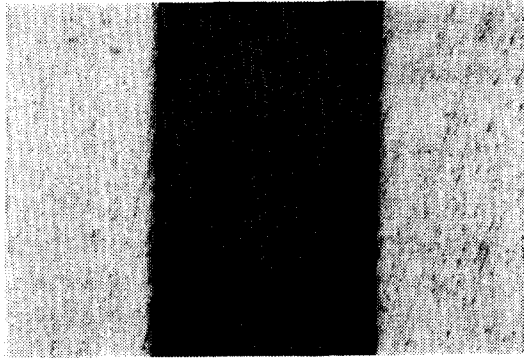
Fig. 1 Shape of fatigue life test specimen

량 10 ton)를 이용하였으며, 정현파로 반복응력속도 10 Hz, 응력비  $R = 0$ 으로 실험하였다. 실험의 응력은 CRALL재의 체적율에 따른 단면으로 계산하였으며 피로파손기구를 조사하기 위해서 화상시스템 KSM-SII를 사용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 접착면의 구조해석

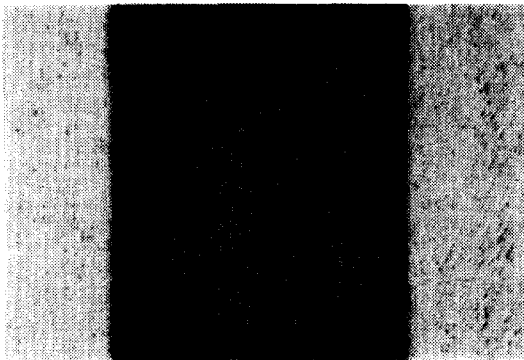
Table 3의 조건으로 제작된 시험편중,  $[0^\circ/90^\circ]$  방향재를 적층한 A/HM 0001재와 A/HM 0005재



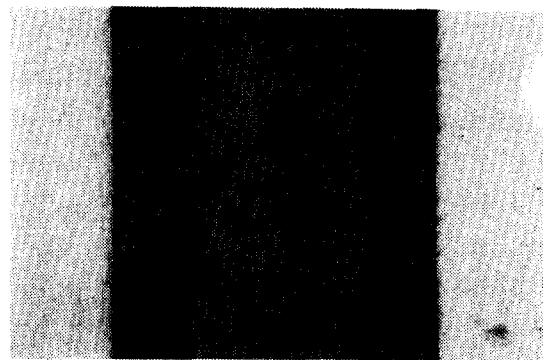
(a) A/HM 0001  
(VCFRP 0.22)



(b) A/HM 0005  
(VCFRP 0.58)

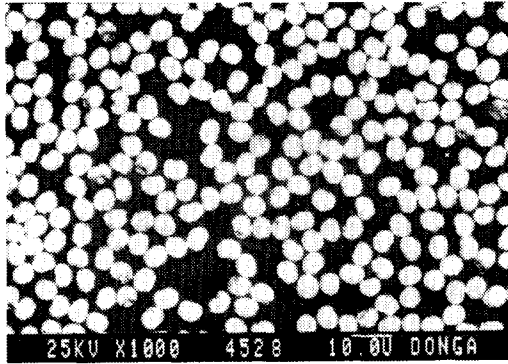


(c) A/HM 4441  
(VCFRP 0.36)

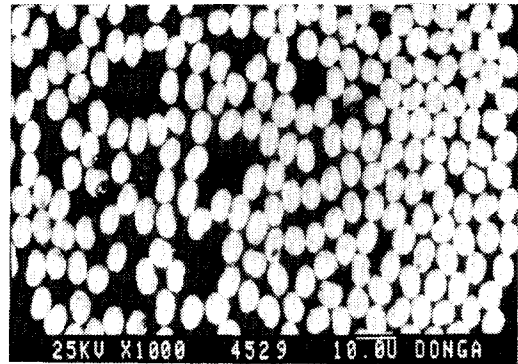


(d) A/HM 4442  
(VCFRP 0.58)

Fig. 2 Macroscopic appearances for side of multilayered hybrid composite with various CFRP volume fraction and fiber orientation ( $\times 50$ )



(a) CFRP 0° / 90°



(b) CFRP 45°

Fig. 3. SEM photographs of CFRP fiber orientation

및  $[\pm 45^\circ]$  방향재를 적층한 A/HM 4441재, A/HM 4442재의 측면을 금속현미경  $[\times 50]$  으로 관찰한 사진을 Fig. 2에 나타내었다. 이들 결과와 각 시험편의 체적율을 Table 3에 표시한 것과 비교 확인하기 위해서 섬유배열방향의 전단면을 SEM으로 관찰한 사진을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 (a)는 0°/90° 방향재의 섬유형상을 나타내며 섬유단면이 원형으로 나타나 있다. (b)는  $\pm 45^\circ$  CFRP의 단면이며 섬유단면이 타원형으로 나타나고 있다. 이들결과 시험편의 제작은 신뢰성을 갖고 있음

을 확인하였다.

### 3.2. 피로에 미치는 섬유체적율 영향

피로수명시험은 Al 7075/CFRP 다적층 하이브리드 복합재료(CRALL)의 개발에 관한 기초적 자료 및 Marissen의 연구결과를 검토하기 위해서 피로수명에 미치는 적층수, 즉 섬유의 체적율의 영향을 조사하였다. Table 4에 섬유의 체적율과 배열방향을 달리한 각 시험편의 피로수명시험결과를 표시

Table 4 The results of fatigue test in CFRP(M40)/Al 7075 hybrid composite (CRALL)

Specimen \ Step.		1	2	3	4	5
A/HM 0001	$\sigma$ (MPa)	288	245	241	232	149
	$N_f$ (cycle)	$1.50 \times 10^4$	$1.02 \times 10^5$	$1.14 \times 10^5$	$1.60 \times 10^5$	$1.62 \times 10^6$
A/HM 0005	$\sigma$ (MPa)	190	181	145	118	76
	$N_f$ (cycle)	$4.00 \times 10^4$	$4.60 \times 10^4$	$1.60 \times 10^5$	$4.60 \times 10^5$	$1.70 \times 10^6$
A/HM 4441	$\sigma$ (MPa)	280	260	229	208	150
	$N_f$ (cycle)	$5.10 \times 10^4$	$9.20 \times 10^4$	$2.00 \times 10^5$	$3.90 \times 10^5$	$1.50 \times 10^6$
A/HM 4442	$\sigma$ (MPa)	205	168	135	110	93
	$N_f$ (cycle)	$4.40 \times 10^4$	$1.20 \times 10^5$	$3.12 \times 10^5$	$6.00 \times 10^5$	$1.80 \times 10^6$
A/HM 0401	$\sigma$ (MPa)	340	289	250	173	148
	$N_f$ (cycle)	$1.50 \times 10^4$	$3.70 \times 10^4$	$9.00 \times 10^4$	$1.00 \times 10^6$	$1.50 \times 10^6$

Step. 1, 2, 3, 4, fractured,  
Step. 5, un-fractured

하였다. CRALL재의 섬유체적율과 배열방향에 따라 강도는 복합법칙의 간편식 (1)식을 사용하였다.

$$\sigma_{HB} = \sigma_{CFRP}V_{CFRP} + \sigma_{Al}V_{Al} \quad (1)$$

각 실험응력에서 2개의 시험편을 사용하여 실험하였으며, 피로한도는 편의상  $1.2 \times 10^6$ 으로 하였으며 이 영역에서 파괴되지 않은 것은 ●→ 표시를 하였다. Fig. 4는 적층재 CFRP의 섬유배열방향을 0°/90°로 하고 섬유의 체적율 CFRP를 0.22, 0.58로 한 A/HM 0001과 A/HM 0005 시험편의 응력진폭과 피로파손반복회전수를 나타낸 것이다. 피로강도는 체적율이 0.22인 경우, 149MPa이며 0.58재에서는 76MPa이다. 따라서, 피로강도는 0.22재가 0.58재보다 약 96% 증가한 결과가 나타났다. 여기서 실험응력  $\sigma = 181\text{MPa}$ 을 기준으로 피로수명을 비교하면  $V_{CFRP}$  0.22재는  $N_f = 8.0 \times 10^5$  이고 0.58재는  $N_f = 4.6 \times 10^4$ 이므로 0.22재가 0.58재보다 약 17.4배 이상의 피로수명을 나타내었다. 이와 같은 피로수명 증가원인은 CFRP의 기계적성질이 Al재에 전달되기 전에 계면손상이 발생되어 여기서의 응력집중에 의하여 발생된 것으로 추정되기 때문에 체적비가 적은 것이 응력집중에 의한 계면손상이 적기 때문으로 생각된다.

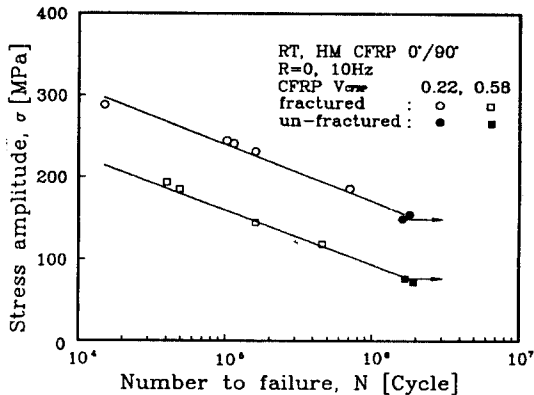


Fig. 4 Relationship between stress amplitude and number to failure for effect of fiber volume fraction in Al 7075/CFRP 0°/90° multilayered hybrid composite

로 하고 체적율  $V_{CFRP}$  0.36과 0.53으로 한 응력크기와 피로파손반복수를 나타낸 것이다. 여기서도 섬유체적율이 적은 것이 큰 것보다 피로강도는 61.3% 크게 나타났으며, 피로수명은  $\sigma = 168\text{MPa}$ 의 경우, 8.3배정도 향상되었다. 섬유의 체적율을 크게 하면 피로수명강도가 낮아짐으로 섬유체적율을 적게하는 것이 피로수명에 효과적인 것으로 생각된다. 이것은 Marissen등<sup>4)</sup>이 보고한 ARALL재의 제작시 알루미늄판과 복합재료의 두께가 얇은 것이 debonding이 적고 피로수명을 향상시킬 수 있다는 결론과 같은 경향이다.

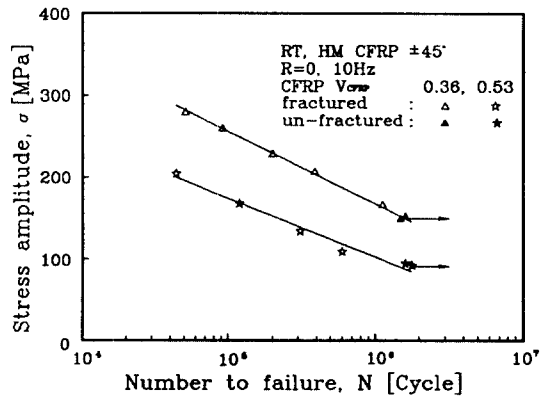


Fig. 5 Relationship between stress amplitude and number to failure for effect of fiber volume fraction in Al 7075/CFRP ±45° multilayered hybrid composite

### 3.3. 피로수명에 미치는 섬유배열방향의 영향

섬유배열방향의 영향을 규명하기 위해서 섬유배열방향을 0°/90°로 적층한 A/HM 0001재와 ±45°로 적층한 A/HM 4441재 및 양측에 0°/90°로 하고 중앙에 ±45°로 적층한 A/HM 0401재를 대상으로 피로수명시험하였다. 이 결과를 Fig. 6에 표시하였다.

피로한도는 A/HM 0001재가  $\sigma = 149\text{MPa}$ 이고 A/HM 4441재가  $\sigma = 150\text{MPa}$ 이며 A/HM 0401재가  $\sigma = 148\text{MPa}$ 으로 나타났다. 각 시험편에서 적층재의 섬유배열방향의 영향이 피로한도에 미치는 영향은 극히 미소하였다. 그리고 저응력 범위에서는 이 영향이 거의 없으며 피로파손 반복회전

Fig. 5는 적층재 CFRP의 섬유배열방향을 ±45°

수  $N_f = 6 \times 10^5$  범위에서 양 재료 공히 피로파괴 응력이 비슷하게 나타났다. 반면, 고응력에서는  $0^\circ/90^\circ | \pm 45^\circ | 0^\circ/90^\circ$ 로 혼합적층된 A/HM 0401 재가  $\pm 45^\circ$  A/HM 4441재 및  $0^\circ/90^\circ$ A/HM 0001재 보다 피로수명이 약간 높게 나타났다. 이 결과는 Murakami 등<sup>14)</sup>의 순수평직포 CFRP재의 피로시험에서 CFRP의 섬유배열방향  $0^\circ/90^\circ$ 재가  $\pm 45^\circ$ 재보다 피로수명이 약간 높다는 보고를 하고 있으나 본 실험의 하이브리드재에서는 거의 동일한 결과를 나타내며, 고응력에서  $0^\circ/90^\circ | \pm 45^\circ | 0^\circ/90^\circ$ 로 혼합적층된 재료가 가장 크고  $\pm 45^\circ$  및  $0^\circ/90^\circ$ 는 거의 비슷한 양상으로 나타나고 있다.

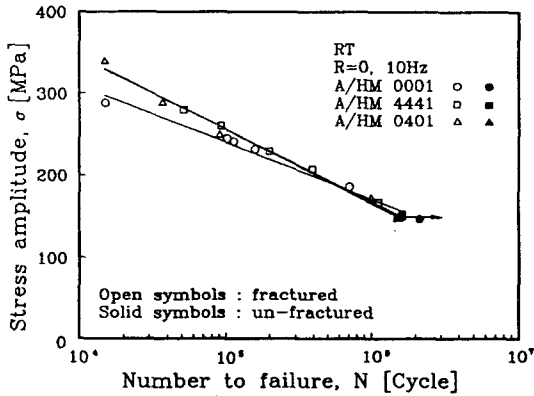


Fig. 6 Relationship between stress amplitude and number to failure for effect of fiber orientation in low volume fraction

CFRP 적층체적율  $V_f$ 를 0.58과 0.53으로 한 경우, 섬유배열방향의 영향을 조사하기 위해서  $V_f = 0.58$ 인 A/HM 0005재와  $V_f = 0.53$ 인 A/HM 4442재의 응력과 반복회수의 관계를 Fig. 7에 표시하였다. 고응력 범위와 저응력 범위에서도 섬유배열방향의 영향은 크게 나타나지 않았다.  $\pm 45^\circ$  A/HM 4442재가  $0^\circ/90^\circ$  A/HM 0005재 보다 피로수명이 약간 크게 나타났다. 이 결과들을 종합하면 본 시험편과 같은 적층 하이브리드 복합재는 섬유배열 방향보다는 적층재의 체적율에 의한 영향이 큰 것을 알 수 있다. 이것은 피로파괴의 기구에서도 관찰할 수 있지만 알루미늄의 파괴이후에 CFRP적층재가 파손됨에 따라 섬유배열방향이 알루미늄

판재의 변형을 구속하는 구동력에 큰 영향을 주지 못함을 의미한다. 그리고 CFRP 라미네이트가 알루미늄판재의 변형에 대한 구속효과는 Al/CFRP 계면의 층간 전단강도와 계면 박리(debonding)에 큰 영향을 받는다는 보고<sup>3,5)</sup>와 같이 피로수명을 증대시키기 위해서는 Al/CFRP 계면의 전단강도를 좋게 하는 제조공정의 문제점들이 선행되고, CFRP의 적층체적율을 최소화하는 최적조건을 규명해야한다.

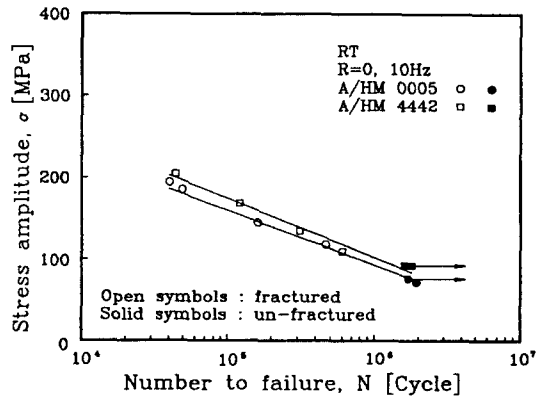


Fig. 7 Relationship between stress amplitude and number to failure for effect of fiber orientation in high volume fraction

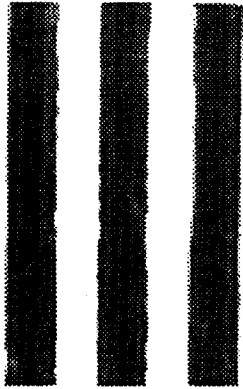
### 3.4. 파손기구의 해석

피로파손에 의한 박리(debonding)와 층간분리(delamination) 현상을 관찰하기 위해서 각시험편들을 일정응력하에서 초기 층간분리가 일어나는 단계와 초기 박리, 초기 알루미늄의 균열발생 및 진전, CFRP 파손단계를 화상 시스템에 의하여 측면에서 관찰한 결과를 Table 5에 정리하였다.

초기 층간분리가 일어나는 시기는 각 재료마다 미소한 차이는 있으나 파단까지 걸리는 전체반복수의 약 60%정도에서 A/HM 0001재와 A/HM 4441재, 4442재 및 A/HM 0401재에서 관찰되었다. 알루미늄의 초기 균열발생 및 진전은 약 70%정도에서 일어났고, 알루미늄과 CFRP가 접착된 계면에서의 박리 현상과 최종파단으로 이어지는 파손 기구 등을 관찰할 수 있었다. 그리고  $0^\circ/90^\circ$  경우

Table 5 The results of initiation delaminate and aluminum/CFRP failure in stress level  $\sigma_{HB} = 243$  MPa

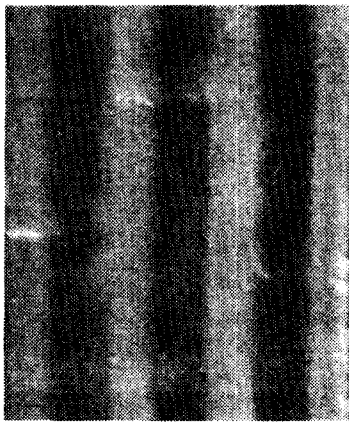
Failure properties		Specimens	A/HM 0001	A/HM 0005	A/HM 4441	A/HM 4442	A/HM 0401
		$V_{CFRP}$	0.22	0.58	0.36	0.53	0.27
Cycle of failure	$N_f$		$1.2 \times 10^5$	$4.9 \times 10^4$	$1.2 \times 10^5$	$6.5 \times 10^4$	$1.15 \times 10^5$
First delaminate occurrence stage	$N_i$		$7.6 \times 10^4$	$4.3 \times 10^4$	$7.0 \times 10^4$	$4.3 \times 10^4$	$7.0 \times 10^4$
	$N_i/N_f$		63%	88%	60%	66%	69%
Aluminum first failure stage	$N_2$		$8.9 \times 10^4$	$4.7 \times 10^4$	$7.8 \times 10^4$	$4.3 \times 10^4$	$8.1 \times 10^4$
	$N_2/N_f$		74%	96%	65%	67%	70%
CFRP failure stage	$N_3$		$9.5 \times 10^4$	$4.8 \times 10^4$	$8.1 \times 10^4$	$5.8 \times 10^4$	$8.5 \times 10^4$
	$N_3/N_f$		79%	97%	70%	89%	74%



(a)  $N_1 = 7.6 \times 10^4$   $\frac{N_i}{N_f} = 63\%$



(b)  $N_2 = 8.98 \times 10^4$   $\frac{N_i}{N_f} = 74\%$



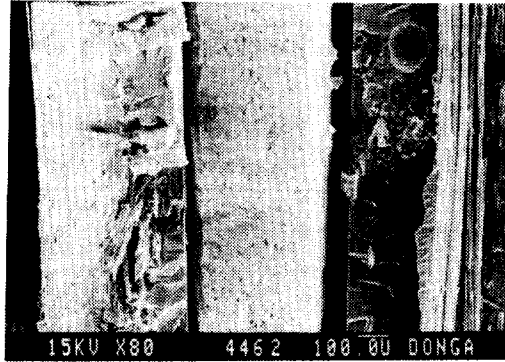
(c)  $N_3 = 9.5 \times 10^4$   $\frac{N_i}{N_f} = 79\%$



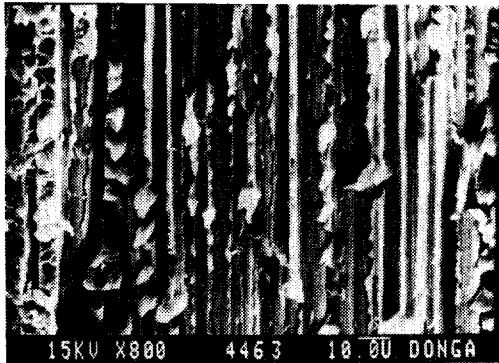
(d)  $N_f = 1.2 \times 10^5$  fractured

Fig. 8 Macroscopic appearance of initiation delamination and aluminum/CFRP failure in A/HM 0001 specimen

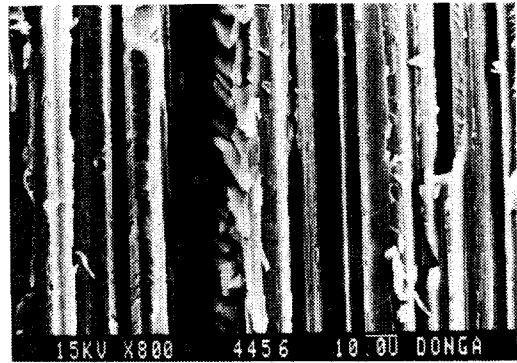




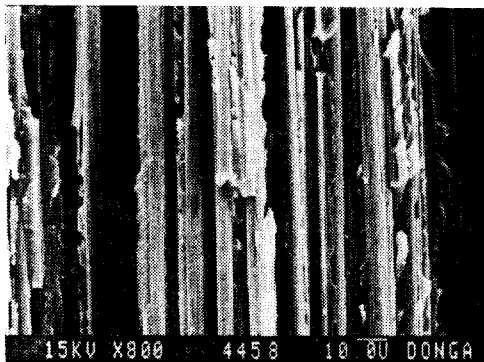
$\pm 45^\circ$  Al  $0^\circ/90^\circ$   
(a) A/HM 0401,  $V_{CFRP}$  0.27



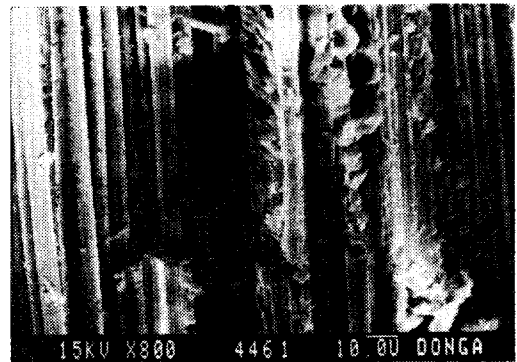
(b)  $\pm 45^\circ$  (1 ply)



(c)  $0^\circ/90^\circ$  (1 ply)



(d)  $\pm 45^\circ$  (2 plies)



(e)  $0^\circ/90^\circ$  (5 plies)

Fig. 9 SEM Micrographs showing a fracture surface of fatigue life test (a) A/HM 0401 specimen ( $\times 80$ ) (b) CFRP orientation  $\pm 45^\circ$ , 1 ply ( $\times 800$ ) (c)  $0^\circ/90^\circ$ , 1 ply ( $\times 800$ ) (d)  $\pm 45^\circ$  (2 plies) (e)  $0^\circ/90^\circ$  (5 plies)

CFRP 체적율이 큰 A/HM 0005재는 95%이상에서 동시파손이 진행되었다. 이들 결과들 중  $\sigma = 243\text{MPa}$ 일 때 A/HM 0001재의 화상시스템에 의한 측면파손형상을 순간영상사진으로 관찰한 것을 Fig. 8에 나타내었다. 여기서 흰색부분은 알루미늄박판이며, 적색부분이 CFRP 적층섬유의 단면이다. (a)는 CFRP 적층섬유단면의 초기 층간분리가 관찰된 사진이며, (b)는  $N_1 = 8.9 \times 10^4$ , 파단수명 74%의 화상사진으로 가장 우측 알루미늄판에서 초기 마이크로 균열이 관찰되고 있으며, (c)는  $N_2 = 9.5 \times 10^4$ , 파단수명 79%에서 각 알루미늄박판에서는 균열이 진전되고, CFRP 적층판에서 마이크로 균열이 관찰되며, (d)는  $N_3 = 1.2 \times 10^5$ 에서 완전 파단되는 모습이다. 다른 시험편에서도 이와 유사한 파손기구를 관찰할 수 있었다.

Fig. 8에서 CFRP 적층섬유단면에서 초기 층간분리가 생기고, 알루미늄판의 미소균열 발생성장에 이어 알루미늄판과 CFRP의 계면 박리에 따라 CFRP의 최종파단이 일어남을 시험편 측면의 거시적 파손기구에서 관찰할 수 있고, 이들의 미시적 파손기구는 Fig. 9에 나타내었다. (a)는  $\pm 45^\circ$  CFRP의 양측에  $0^\circ/90^\circ$ 를 적층한 A/HM 0401재의 80배 확대한 사진이다. 여기서 알루미늄층을 기준으로 좌측은  $\pm 45^\circ$  CFRP층, 우측은  $0^\circ/90^\circ$  CFRP층을 나타내며, (b)에서는  $\pm 45^\circ$  CFRP 1 ply의 미시구조를 800배 확대하였으며, (c)에서는  $0^\circ/90^\circ$  CFRP 1 ply를 800배 확대한 SEM 사진이다. (b)와 (c)를 비교하면 섬유배열방향에 따라 CFRP의 파괴양상이 다르며  $\pm 45^\circ$  CFRP재는 수지에 파괴양상의 요철이 심하게 나타났다. 이는 수지와 섬유적층사이에 층간분리로 생각된다.

(d)는  $\pm 45^\circ$  CFRP의 2 ply재, (e)는  $0^\circ/90^\circ$  CFRP의 5 ply재의 800배 SEM사진이다. (b)에 비해 (d)는  $\pm 45^\circ$  CFRP의 체적율을 크게 한 경우로서 층간분리가 크게 나타났다. (c)에 비해 (e)는  $0^\circ/90^\circ$  CFRP의 체적율을 크게 한 경우로서 섬유의 전단 파손이 나타나면서 층간분리가 많이 나타나고 있다. 이러한 현상 때문에 피로수명에 미치는 섬유체적율의 영향이 크게 나타났다고 생각되며 섬유배열방향이 피로수명에 미치는 영향은 미시적

으로 명확히 관찰되지 않았다.

이와 같이 알루미늄판의 초기파괴에도 불구하고 CFRP의 고강도에 의한 균열지연효과 때문에 피로수명이 향상되는 결과는 Rosen의 누적약화모델<sup>16)</sup>과 유사한 것으로 생각되며 CFRP의 체적율을 적게 하면 알루미늄과의 층간간격이 좁아지므로 강화효과가 증대되어 피로수명을 향상시킬 수 있는 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

Al 7075/CFRP 다적층 하이브리드 복합재료 CRALL재 개발을 위한 알루미늄박판의 표면 전처리와 접착 큐어링온도 및 시간을 일정하게 한 CRALL재의 피로수명에 미치는 CFRP의 체적율 및 섬유배열의 영향을 규명하고 이들 파괴기구를 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1.  $0^\circ/90^\circ$  CFRP의 체적율이 0.22인 CRALL재의 피로강도는 0.58재보다 약 96% 크게 나타났으며,  $\sigma = 180\text{MPa}$  경우 0.22재의 피로수명은 0.58재보다 17.4배 크게 나타났다.  $\pm 45^\circ$  CFRP의 경우 체적율 0.36재의 피로강도는 0.53재보다 61%크게 나타났으며, 피로수명도 8.3배 크게 나타났다. CFRP의 체적율 감소에 따라 CRALL재의 피로수명은 향상되며 이는 Marissen의 결과와 일치하였다.
2. CRALL재의 CFRP 섬유체적율을 유사하게 한 경우, 섬유배열방향  $0^\circ/90^\circ$  재와  $\pm 45^\circ$  재의 피로수명은 거의 동일하므로 섬유배열방향의 영향이 크게 나타나지 않았다.
3. CRALL재의 측면에서 본 거시적 파손기구는 CFRP 적층섬유단면에서 초기 층간분리가 생기고 알루미늄판에 미소균열이 발생성장하여 Al/CFRP 계면 박리와 함께 CFRP의 최종파괴로 진행되었다. 미시적 파손기구는 CFRP 체적율의 크기에 따라 층간분리 및 박리 현상의 차이가 나므로 CFRP의 체적율을 적게하면 알루미늄과의 층간간격이 좁아지고 강화효과가 증대되므로 피로수명을 향상시킬 수 있는 기구로 생각된다.

## 후 기

본 연구는 1995년도 한국과학재단의 연구비(핵심연구 과제번호 951-1001-081-1)에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) Brief A. and Skeist I., Adhesive Age, 26 (6), p. 12, 1983
- 2) Roderrick G., "Propagation on Aluminum Sheets Reinforced with Boron-Epoxy", University Annn Arbor, Maxhingan, U.S.A/London, University, Ph.D, 1978
- 3) Marissen R., "Fatigue Mechanism in ARALL, A Fatigue Resistant Hybrid Aluminum Aramid Composite Material", Fatigue, 87, Proc. 3rd Int. Cont. on Fatigue Threshold, Vol. 3, pp. 1271~1279, EMAS Ltd. Warley, U.K., 1987
- 4) Marissen R., "Flight Simulation Behavior Aramid Reinforced Aluminum Laminates (ARALL)", Eng. Fracture Mechanics, 19, pp. 261~277, 1984
- 5) Marissen R., "Fatigue Crack Growth Prediction in Aramid Reinforced Aluminum Laminates(ARALL)", ICAS and AIAA, pp. 801~807, 1986
- 6) Ritchie R. O., Yu W. and Bucci R. J., "Fatigue Crack Propagation in ARALL Laminates", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 32, No. 3, pp. 361~377, 1989
- 7) 山崎以春, 千葉知夫, 市川以知郎, "Al/Epoxy モールド斷手の疲勞強度", 日本機械學會誌, 第35卷, 第389号, pp. 158~164, 1985
- 8) 芳我攻, 木村捻, "Al/CFRP 多層積層ハイブリッド複合材料の引張特性", 日本機械學會誌, 第35卷, 第399号, pp. 1411~141, 1986
- 9) 芳我攻, 木村捻, "Al/CFRP 多層積層ハイブリッド複合材料の曲特性", 日本機械學會誌, 第37卷, 第423号, pp. 1403~1409, 1986
- 10) Sohn S. W., Jang J. W., Hong S. H. and Lee Y. B., "Analysis of Extrinsic Toughening Mechanisms in HERALL and ARALL, Proc. of Asian Pacific Conference for Fracture and Strength '96, pp. 435~439, 1996
- 11) Yoon H. K., Oh S. W., Park W. J., Lee K. B. and Hue C. W., "The Effect of Bridging on Fatigue Crack Growth Behavior in Aramid Patched Aluminum Alloy(APAL)", J. of KSME, Vol. 8, No. 4, pp. 375~384, 1994
- 12) 윤한기, 오세욱, 박원조, 허정원, "AFRP본딩에 의한 알루미늄 판재의 피로균열전파저항에 대한 연구", 대한용접학회지, 제12권, 제4호, pp. 117~126, 1994
- 13) 윤한기, 정해용, 박원조, 허정원, "알루미늄합금 판재에 FRP라미네이트를 보강한 APAL 및 CPAL재의 균열전파속도거동", 대한기계학회 논문집, 제19권, 제4호, pp. 1013~1022, 1995
- 14) 村上理一, 山中啓史, 日本機械學會論文集 A編, 第59卷, 第560号, pp. 883~889, 1993
- 15) Yoon H. K., Lee K. B. and Oh S. W., "Strength Evaluation on Al 7075/CFRP Multilayered Hybrid Composite Material", Proc. of Asian Pacific Conference for Fracture and Strength '96, pp. 497~497, 1996
- 16) Hull D., 官八奇裕夫, 池上皓三, 金原動譯, 複合材料入門, p. 115, 1993