

Al 6061/AFRP 하이브리드 복합재료의 강도특성에 미치는 내후성 영향

윤한기* · 김연겸** · 차영준**
(97년 8월 4일 접수)

Effect of Sunshine Treatment on Strength in Al 6061/AFRP Hybrid Composite

Han-Ki Yoon* · Youn-Kyoum Kim** · Young-Jun Cha**

Key Words : Tensile and shear strength(인장 · 전단강도), Sunshine treatment(내후성처리), Aramid patched aluminum alloy(알루미늄 합금에 아라미드 섬유 접착 복합재료, APAL)

Abstract

This research is to evaluate the effect of sunshine treatment on the strength in the Al 6061/AFRP hybrid composite(APAL). APAL specimens were processed by autoclave curing system under the constant condition of curing temperature, time and aluminum surface pretreatment. Aramid patched aluminum alloy can be widely used for the repair of the damage part of the aircraft.

The tensile strength of the sunshine treated APAL 2P and 6P composite is 14%, 22% smaller than that of the non-treated material. The interlaminar shear strength of the APAL specimens for the adhesive length of 5mm is 24% higher than that of the APAL for the adhesive length of 10mm. In the case of APAL DS 1P material, interlaminar shear strength of the specimen which was sunshine treated for 200 hours is 21% smaller than that of the non-treated material while interlaminar shear strength of the specimen which was immersed in a 70°C fresh water for 1200 hours decreases by 75.7%.

1. 서 론

항공기 부재로 사용되는 Al합금의 손상부위나 미소균열이 존재할 때, 이를 수리하는 방법으로 패

치재 복합재료를 접착하는 방법이 최근 선진국에서 많이 사용되고 있다. 이러한 수리방법은 기존 알루미늄합금 패치재를 사용한 보강수리 방법보다 응력집중, 내피로성 복합재료 선택 및 간단한 수리

* 동의대학교 기계공학과

** 동의대학교 대학원

공정 등의 잇점을 갖고 있다.¹²⁾ 그러나, 패치재로 사용되는 섬유강화 복합재 AFRP, CFRP, GFRP, BFRP 등은 장시간 기후환경에 노출되어 있기 때문에 환경변화에 의한 내후성 영향 등이 중요한 변수로 생각된다.

Daviden 등³⁾은 ARALL-4재의 피로균열성장에 미치는 온도환경의 영향에 대하여 연구하였으며 MTL-HDBK 377⁴⁾에서는 항공기 구조물의 수리에 사용되는 접착조건을 제시하고 있다. Wang⁵⁾은 PEEK 폴리머재의 파괴인성과 환경영향을 연구하였으며, Larry 등⁶⁾은 GFRP재의 충격에너지에 미치는 해수의 영향을 보고하였다.

최근 국내에서도 김 등⁷⁾은 케블복합재의 습도환경에 대한 기계적특성 평가를 하였으며 김 등⁸⁾은 CFRP 복합재료의 층간파괴인성치에 미치는 수분의 영향에 대하여 연구하였다. 윤 등은 AFRP와 CFRP를 알루미늄에 접착한 하이브리드 복합재료의 피로 균열전파저항과 균열전파속도기동에 대해서 보고하였다.^{9) 11)} 그러나 알루미늄판에 접착한 복합재료의 실제 사용환경을 가정한 조건에서 강도특성평가의 연구는 국내에 아직 발표되고 있지 않으며, 이 분야 연구의 자료축적이 시급한 과제로 생각된다.

본 연구에서는 6061 알루미늄 합금판 양측면에 아라미드 섬유강화 복합재료 AFRP (0°/90°)를 접합한 하이브리드 복합재료(Aramid patched aluminum alloy, APAL)를 제작하여 인장시험편과 전단강도시험편을 제작하였다. 이 시험편을 내후성 시험기에서 200시간동안 내후성처리(Sunshine treatment)한 것과 sunshine처리후 70℃ 담수에서 1200시간 침투시킨 시험편의 인장 및 전단강도시험을 실시하여, APAL재의 강도특성에 미치는 내후성 영향을 규명하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1. 시험편 재료

하이브리드 복합재료(hybrid composite materials)는 2가지 이상의 강화재료로 강화시킨것으로 복합재료의 하이브리드화 개념은 아직 계통적으로 체계화되어 있지 않은 실정이나 편의상 Fig.1과 같이 분류한다.

Type D는 화이버 이외의 재료(예를 들면 알루

미늄, 티타늄 등의 금속재)에 패치재를 한측면·양측면에 접착한 형태이다. 본 실험에서는 Type D 모델을 선택하여 시험편을 제작하였다.

시험편에 사용한 하이브리드 복합재료는 Al 6061 판재의 측면에 아라미드 섬유강화 복합재료(이하 AFRP : aramid fiber reinforcement plastics)를 보강한 형태이며, 아라미드/에폭시프리프레그 (aramid/epoxy prepreg)을 측면에 부착하고 경화하여 접착한 것이다. 이 재료를 편의상 Aluminum/AFRP 하이브리드 복합재료 (Aramid Patched Aluminum alloy, APAL)재로 명명하였다.

APAL재의 제작에 사용한 알루미늄 판재는 6061 알루미늄 합금이며, 이 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같으며, 기계적 성질은 Table 2와 같다.

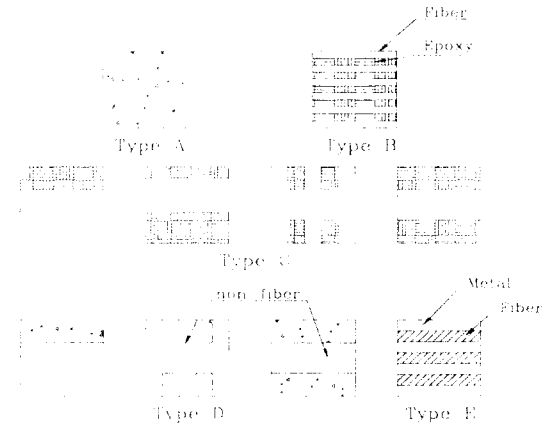


Fig. 1 Schematic diagrams of hybrid type - all end view

Table 1 Chemical compositions of Al 6061 aluminum alloy (wt.%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Pb	Al
0.53	0.43	0.30	0.08	0.94	0.18	0.09	0.01	0.005	Bal.

Table 2 Mechanical properties of Al 6061 aluminum alloy

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)	Density (g/cm ³)
285	310	20	143	2.7

패치재의 아라미드/에폭시 프리프랙은 (주)한국하이바에서 제조한 제품명 HK285/RS1222이다. 이는 미국의 Dupon사에서 생산된 케플라 49(kevlar 49) 섬유 0° 및 90° 로 배열되어 3단제직(twill 2.2 weave)형태로 직조되어 있는 케플라 제직포 #285를 RS1222 에폭시 수지 기지(epoxy resin matrix)에 함침시키고 건조시킨 케플라 49 프리프랙이다.

프리프랙은 FRP 제품의 원재료처럼 취급되는 성형의 기본 반제품이며 완성된 프리프랙 테이프(prepreg tape)의 AFRP의 두께는 0.3mm 이었다.

Table 3에 AFRP의 물리적 성질과 Table 4에 기계적 성질을 각각 나타내었다.

Table 3에 표시한 휘발성분 함유율(volatile content)과 섬유 함유율(fiber content)은 ASTM D 3530 규정과 ASTM D 3171 (3529) 규정을 기준으로 측정하였으며, 레진 유동(regin flow)은 ASTM D 3531, 겔 시간(gel time)은 3532규정을 기준으로 측정하였다.

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

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

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

Properties	Fiber pattern	Warp(0°) (MPa)	Fill(90°) (MPa)
Tensile strength		568	512
Tensile modulus		30×10 ³	31×10 ³
Compression strength		224	228
Compression modulus		29×10 ³	29×10 ³
Flexural strength		514	510
Interlaminar shear strength		64	

2.2. 접착방법

Al 6061 판재의 양면에 샌드 브래스트 (sand

blast) 작업을 하여 표면에 요철을 형성 시킨 후, 표면을 깨끗하게 닦아내고, 프리프랙을 목적하는 방향, 형태 및 치수로 절단하여 Al 6061 판재 표면에 부착하며, Fig. 2와 같이 오토클레이브(Autoclave)에서 작업한다.

Fig. 3은 오토클레이브 (Autoclave)를 이용한 경화과정을 표시하였다.

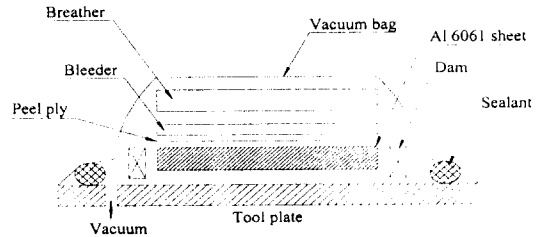


Fig. 2 Schematic illustration of bagging system

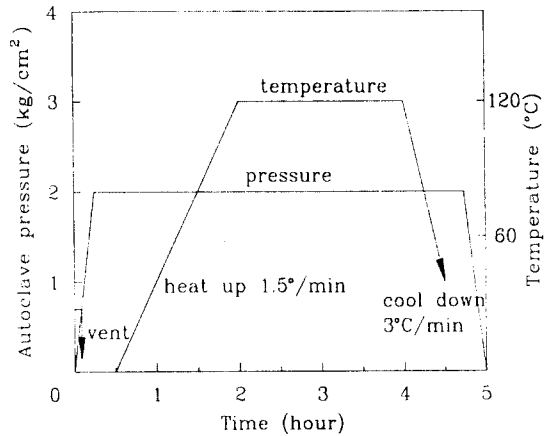


Fig. 3 Diagram of autoclave curing procedure

2.3. 시험편 가공

Fig. 4는 APAL 재의 인장 강도를 측정하기 위하여 사용한 인장 시험편의 형상과 치수를 표시하였다. 두께 6.6mm인 Al 6061 판재를 L-T 방향으로 채취하여 인장시험편의 형태로 가공하고 앞에서 기술한 방법으로 접착하여 AFRP/Al 하이브리드 복합재료 APAL재 시험편을 제작하였다.

실험에 사용한 APAL재 인장시험편의 종류는 AFRP의 경사 방향은 하중 방향이 0°이며 위사방

향이 90°인 APAL 0°/90°재이며, 패치재의 두께를 달리하여 2플라이와 6플라이를 접합한 APAL SS 2P재와 APAL SS 6P로 분류하였다.

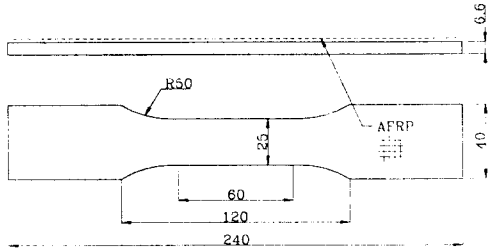


Fig. 4 Configuration of tensile specimen for APAL materials

Fig. 5는 Al 6061 판재와 AFRP 라미네이트 계면의 층간인장전단강도(shear strength)를 측정하기 위하여 사용한 시험편의 형상과 치수이다. 알루미늄판 2개를 맞대고 양측면에 AFRP 프리프래그를 접착하였으며 접착면의 길이를 5, 10mm로 하였다.

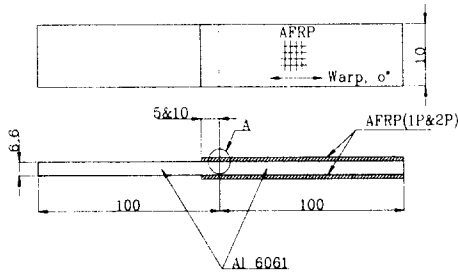


Fig. 5 Configuration and dimension of specimen for shear strength on APAL specimen

2.4. 실험장치 및 방법

APAL재의 인장강도와 전단강도에 미치는 내후성 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 사용한 내후성 처리 시험기는 도료, 안료 및 고분자 화합물의 촉진내후성 시험에 사용되는 시험기(ATLAS사 Carbon ARC lamp type, Weather - O - Meter)를

사용하였으며 밀폐된 실험챔버 내에서 온도와 습도를 일정하게 유지하고 아크 카본 방전에 의한 자외선 빛을 시료에 조사시켜 시료표면에 200시간 동안 sunshine처리를 실시하였다.

Fig. 6은 시험기 외형을 나타내며 Fig. 7은 시험기 내부도를 나타내었다.

실험챔버(test chamber) 안에 카본(carbon)봉을 교환하고, 시험챔버 내의 시험편 길이에 시험편을 걸고 온도 63℃, 습도 55%로 유지한 후 120~145볼트와 14~17암페어로 조절하여 실험을 실시하였다. 그리고 sunshine처리한 시험편의 일부를 70℃ 담수에서 1200시간 유지시켰다. 침투시킨 시험편의 수분흡수량 $M(t)$ %는 (1)식에서 구하였다.

$$M(t) = \frac{W_m - W_d}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

여기서 W_m 은 흡수후 수분이 포함된 시험편의 무게이며 W_d 는 건조상태의 시험편의 무게이다.

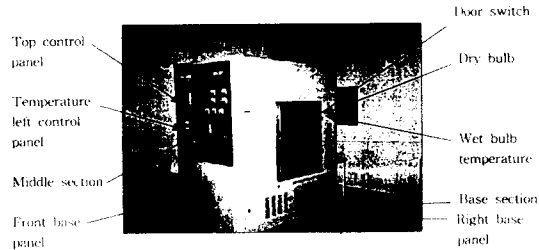


Fig. 6 Wether-O-Meter twin sunshine carbon ARC lamp type (ATLAS. Electric Co.) device

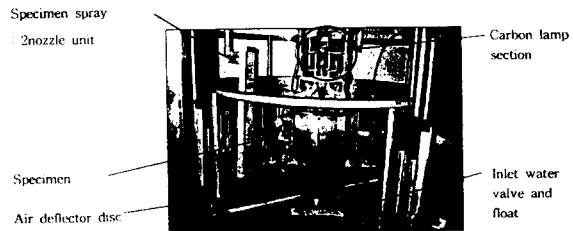


Fig. 7 View of the test chamber with the single-tier specimen rack

각각의 시험편의 인장강도와 전단강도는 컴퓨터

컨트롤 유압피로시험기(MTS Model 810, 10 ton)를 사용하여 시험하였다. 인장강도시험은 ASTM D 3039 규정¹²⁾에 따라 실시하였으며, 연신율계는 게이지길이 25mm를 사용하였으며 변위제어모드로 실험하고 크로스헤드 속도 0.5mm/min로 실험하였다. 각 조건당 3개의 시험편을 사용하여 얻어진 결과값의 평균값을 인장강도로 하였다. 층간전단강도시험은 ASTM D 3846 규정¹³⁾을 참고하였으며 양접착면적은 30×5mm, 30×10mm로 하였다. 실험기의 하중은 변위제어모드, 크로스헤드 속도는 0.1mm/min으로 하였으며 시험편의 결과는 3개 시험편의 결과를 평균하여 층간전단강도로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장강도에 미치는 내후성 영향

6061 알루미늄판재와 접착매체로 사용한 AFRP 0°/90°복합재료 및 이들 재료로 접합한 Al 6061/AFRP 하이브리드 복합재료 한층면 2 plies 혹은 6 plies 접합한 시험편을 APAL SS 2P와 SS 6P재라 하고 이들 재료의 응력-변형률 곡선을 Fig. 8에 나타내었다. 여기서 sunshine 처리하지 않은 APAL SS 2P의 인장강도는 하이브리드화에 사용한 모재 알루미늄합금 보다는 약 60% 크고 패치재로 사용한 AFRP재에 비해서는 약 29% 적게 나타났다. 패치재의 두께영향을 고찰하기 위해서 APAL재의 공칭응력은 Al 6061판재의 두께만으로 계산하였다.

APAL SS 2P와 APAL SS 6P재의 탄성율과 공칭응력선도는 거의 유사하며 최대강도는 약간 차이가 있으나, 이 결과 패치재 두께변화에 따른 강도향상은 크게 기대할 수 없으며 이는 Ratwani 등¹⁾의 보고와 유사한 경향이며 강도향상을 위한 접착조건과 접착방법의 개선이 추후 연구할 과제이나 본 실험에서는 동일한 한가지 조건에서 접합하였으므로 이들 재료의 강도는 2P와 6P의 경우 알루미늄 판재와 AFRP 접착계면조건이 APAL재의 전체적 강도를 지배할 것으로 생각된다.

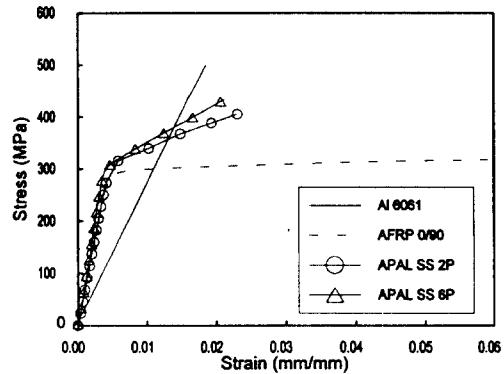


Fig. 8 Stress-strain curve of non-sunshine specimens

Fig. 9와 Fig. 10은 200시간 sunshine처리한 APAL재의 패치재 두께를 2P와 6P로 한 시험편의 응력-변형률 곡선이다.

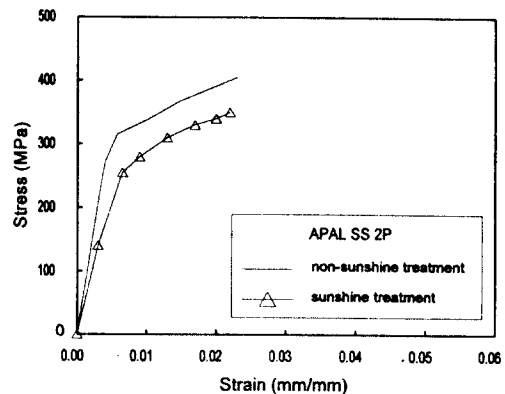


Fig. 9 Stress-displacement curve of sunshine treated APAL SS 2P specimens

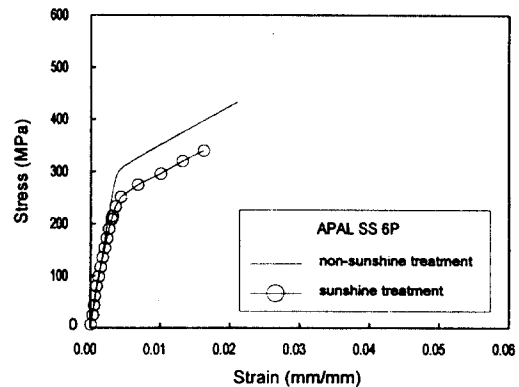


Fig. 10 Stress-displacement curve of sunshine treated APAL SS 6P specimens.

이 결과 알루미늄판의 단면적을 사용한 공칭응력은 sunshine 처리한 APAL 2P재의 값은 무처리재에 비해 14%정도 감소하였으며 APAL 6P재는 22% 감소하였다.

그리고 APAL재의 인장강도평가시, 알루미늄과 복합재료의 체적율을 거의 비슷하게 한 경우는 중량뿐만 아니라 체적율을 기준으로 한 인장강도의 크기가 매우 중요하므로, 이 경우에는 복합법칙(rule of mixture)에 의한 APAL재의 공칭단면적은 AI 6061판재와 AFRP 라미네이트의 단면적을 합한 전체 단면적을 사용해야 할 것이다. 이와 유사한 샌드위치(sand witch)형 복합재료는 복합법칙에 의한 이론적 강도계산은 연속수지강화 복합재료를 수지방향으로 평행하게 인장할 경우와 마찬가지로 식(2)와 같은 복합법칙(rule of mixture)을 권장하고 있다.

$$\sigma_{HA} = \sigma_{AI} \cdot V_{AI} + \sigma_{AFRP} \cdot V_{AFRP} \quad (2)$$

여기서, σ_{HS} 는 하이브리드재의 강도, σ_{AI} 및 σ_{AFRP} 는 알루미늄과 AFRP재의 강도, V_{AI} 와 V_{AFRP} 는 양재의 부피분율이다.

이러한 하이브리드 복합재료의 강화율(strengthening rate)은 복합법칙에 의해 계산된 이론강도의 값과 실험에서 얻어진 값의 비율로 표시하고 있으므로, 본 실험에 사용한 APAL 2P재와 APAL 6P재를 강화율로 비교하면 비처리재의 경우 패치재 AFRP 라미네이트의 적층수의 증가에 관계없이 강화율은 거의 같으며, sunshine처리재의 경우 강화율은 약간 떨어졌다. 여기서 AFRP재를 알루미늄판에 접합한 경우, 인장강도는 알루미늄판 두께를 일정하게 한 경우 AFRP의 두께가 증가할수록 증가한다고 생각되나 본 연구에서는 두께변화의 영향은 거의 없으며, sunshine처리의 효과는 크게 나타났다. 이들 시험의 결과는 Table 5와 같다.

Table 5 Mechanical properties of APAL according to number of ply

Specimen	Item	Tensile strength σ (MPa)		Strength rate σ_{uE}/σ_{uC} (%)	Rupture strain ϵ_r (%)
		Exp. σ_{uE}	Cal. σ_{uC}		
APAL SS-2P	non-sunshine	405	506	80	2.54
	sunshine	350		69	
APAL SS-6P	non-sunshine	433	514	84	2.25
	sunshine	340		66	

3.2 층간 전단강도에 미치는 내후성 영향

Fig. 11은 Sunshine 처리하지 않은 APAL DS 2P시험편에 대한 접착길이 5mm와 10mm로 하였을 때, 전단강도시험한 결과를 나타냈다. 시험편은 각각 5개를 사용하였으며 접착길이 5mm와 10mm의 평균 전단강도는 각각 33MPa 및 25MPa이다. 이 결과 접착길이가 짧은 것이 전단강도가 더 크게 나타났다. 이는 접착길이가 길고 접착 면적이 크게 되면 공칭하중은 증가하지만, 층간전단강도는 감소한다는 Kutche 등¹²⁾의 보고와 같은 경향이다. 이것은 응력집중현상이 APAL재의 금속/복합재료 계면의 가장자리에서 시작하여 초기 균열이 발생하고 하중이 증가함에 따라 균열은 층간계면을 따라 전파하기 때문이다. 이와 같은 파괴현상을 화상처리 시스템에서 관찰한 사진은 Fig. 12와 같다. 파괴 진행방향은 화살표 방향으로 진행되며 A점에서 응력 집중원이 되어 파괴가 시작되었다. 다음은 내후성 영향을 규명하기 위하여 접착길이를 5mm로 일정하게 하고 200시간 sunshine 처리한 APAL DS 2P재와 sunshine 처리후 70℃ 담수에 1200시간 침투시킨 경우 수분흡수율은 0.7%이며 이들 시험편과 무처리한 시험편의 전단강도-변위곡선의 결과는 Fig. 13에 나타내었다.

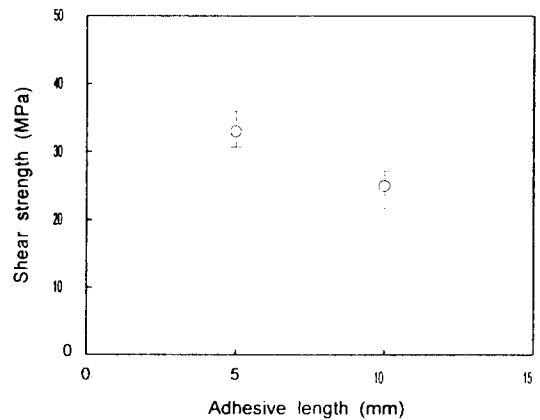


Fig. 11 Relationship between shear strength and adhesive length in APAL DS 2P specimen

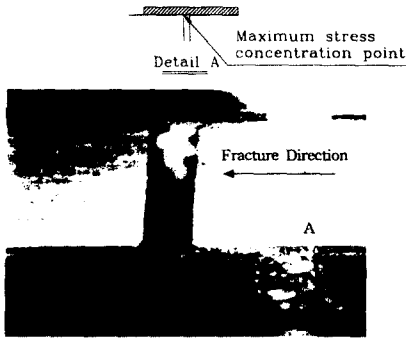


Fig. 12 Macroscopic appearance of fractured shear delamination and Al/AFRP failure in APAL shear strength test specimen

Fig. 12 Macroscopic appearance of fractured shear delamination and Al/AFRP failure in APAL shear strength test specimen

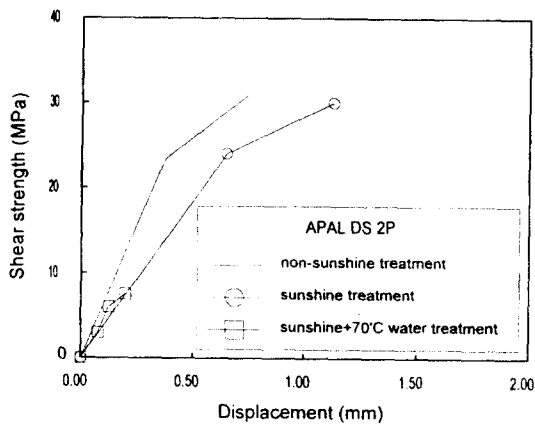


Fig. 13 Shear strength-displacement curve on APAL specimens with adhesive area $(2 \times 30 \times 5) \text{mm}^2$

실선은 무처리한 시험편의 결과이며 ○형은 200시간 sunshine 처리한 시험편이다. 그리고 □형은 200시간 sunshine 처리후 70°C 담수에 1200시간 침투한 시험편의 전단강도-변위곡선이다. 동일 조건에서 5개씩 실험한 결과 APAL DS 2P 시험편의 평균 전단강도와 시험조건변화에 따른 결과를 표시하면 Fig. 14와 같다. APAL DS 1P 시험편의 결과는 Fig. 15에 나타내었다. 이들 결과의 정량적인

값을 정리하여 Table 6에 나타내었다.

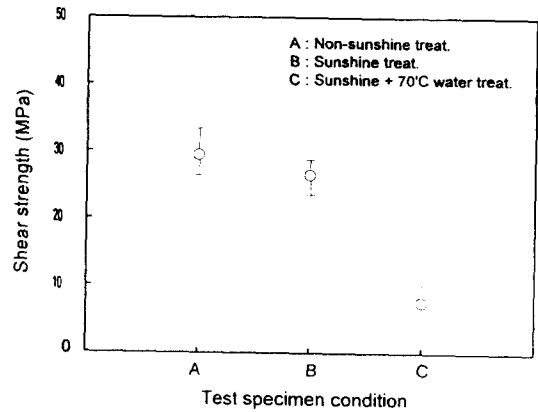


Fig. 14 Relationship between shear strength and test specimen condition in APAL DS 2P specimen

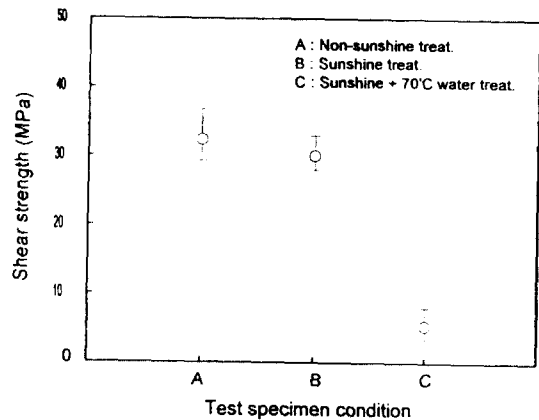


Fig. 15 Relationship between shear strength and test specimen condition in APAL DS 1P specimen

이결과를 종합하면 APAL DS 2P재의 200시간 sunshine 처리한 시험편의 전단강도는 무처리재에 비하여 약 27% 감소하며 sunshine 처리후 70°C담수에 1200시간 침투한 시험편은 무처리재에 비해서 약 79%감소하였다. 그리고 APAL DS 1P재의 경우 sunshine 처리재는 무처리재에 비해 21% 감소하였으며, sunshine처리후 70°C 담수에 1200시간 침투

한 시험편은 76% 감소하였다. 200시간 sunshine 처리한 시험편 1P재의 전단강도는 2P재에 비해 10% 정도 크며 200시간 sunshine 처리후, 담수 70℃에서, 1200시간 침투한 경우도 같은 경향이다. 따라서 패치재 두께에 따른 전단강도는 환경영향보다는 접착계면의 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

Table 6 Results of shear strength on APAL interlamina shear strength test

Properties		Adhesive length (mm)	Shear strength (MPa)	Fracture length (mm)
Specimens				
APAL DS 2P		5	33	0.78
Non-sunshine treatment		10	25	0.95
APAL DS Sunshine treatment	1P	5	26	-
	2P	5	24	1.25
APAL DS Sunshine + 70℃ water treatment	1P	5	8	-
	2P	5	7	-

4. 결 론

Al 6061 합금판의 인장 및 전단강도 시험편을 가공한 후 양측면에 아라미드 섬유강화 복합재료 AFRP (0°/90°)를 접합한, 하이브리드형 복합재료 (Aramid patched aluminum alloy, APAL)를 제작하였다. 이 시험편을 200시간 sunshine 처리한 것과 200시간 sunshine 처리후 70℃ 담수에서 1200시간 침투한 시험편으로 인장 및 층간전단강도 실험을 실시하여 강도 특성에 미치는 내후성 영향을 규명한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. APAL재의 패치재 AFRP의 두께증가는 인장강도와 전단강도를 향상시키는데 큰 영향이 없었다.
2. 200시간 Sunshine처리에 의한 APAL 2P재의 인장강도는 무처리재에 비해 약 14% 감소 하였으며 APAL 6P재는 22% 감소하였다.
3. 접합길이 5mm인 APAL재의 층간전단강도는 10mm보다 약 24% 크게 나타났다. 또한 APAL DS 1P재에 있어 무처리재에 비해 200시간 sunshine 처리한 시험편의 층간전단강도는 21% 감소하고 sunshine 처리후 70℃담수에서 1200시간 침투시킨 시험편의 전단강도는 76%감소

하였다.

4. APAL재 층간전단의 파괴기구는 알루미늄판과 AFRP 접합계면의 가장자리에서 응력 집중원이 생기며 이 균열은 Al 6061/AFRP의 층간계면을 따라 진전한다.

후 기

이 논문은 동의대학교 산업기술개발연구소 1997년도 학술연구조성비의 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Ratwani, M.M. and Labor, J.D., "Composite Patches for Metal Structure", Navy Contract N62269-79-0271, May, 1979
- 2) MTL-HDBK-337, "Military Standardization Handbook Adhesive Bonding Aerospace Structure Repair, 9-6, 1982
- 3) Davidson, D.L. and Austin, L.K., "Fatigue Crack Growth through ARALL-4 at the Ambient Temperature", Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., Vol. 14, No. 10, pp. 939-951, 1991
- 4) MTL-HDBK-377, "Military Standardization Handbook Adhesive Bonding Aerospace Structure Repair", 9-6, 1982
- 5) Wang, O., "Moisture Absorption and Fracture Toughness of PEEK Polymer and Graphite Fiber Reinforced PEEK", Journal of Composite Materials, Vol. 23, p. 434, 1989
- 6) Larry, H.S, Mark, L.K. and Maurice, F.A., "Effect of Seawater Immersion on the Impact Resistance of Glass Fiber Reinforced Epoxy Composite, Journal of Composite Materials, Vol. 26, No. 14, pp. 2118~2133, 1992
- 7) 김태우, 이재학, 이시영, "페놀 복합재의 습도 환경에 대한 기계적 특성 평가", 대한기계학회 1996년 춘계학술대회 논문집(A), pp. 135~139, 1986

- 8) 김형진, 김종훈, 고성위, 김엄기, "CFRP 복합재료의 층간파괴인성치에 미치는 수분의 영향", 한국해양공학회지, 제10권, 제4호, pp. 75~83, 1996 .
- 9) 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(APAL), J. of KSME, Vol. 8, No. 4, pp. 375~384, 1994
- 10) 윤한기, 오세욱, 박원조, 허정원, "AFRP 본딩에 의한 알루미늄 판재의 피로균열전파저항에 대한 연구", 대한용접학회지, 제12권, 제4호, pp. 117~126, 1994
- 11) 윤한기, 정해용, 박원조, 허정원, "알루미늄 합금판재에 FRP 라미네이트를 보강한 APAL 및 CPAL재의 균열전파속도거동", 대한기계학회 논문집, 제19권, 제4호, pp. 1013~1022, 1995
- 12) ASTM D 3039, "Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Resin Composites, 1995
- 13) ASTM D 3846, "Standard Test Method for In-Plane Shear Strength of Reinforced Plastics, 1995
- 14) Kutsche, D. and Hofer, K.E., "Feasibility of Joining Advanced Composite Flight Vehicle Structures", Technical Report, AFML-TR-68-391, 1969