

# 상온적층용 복합소재 특성 연구

## Wet-Layup Composite Material Characteristics Study

김인걸(충남대학교), 김진원\*(한국항공우주연구원), 안석민

### 1. 서론

항공기용 복합재는 최신 대형 기종인 보잉 7E7은 구조물에서 50%를 넘어선 것으로 알려지고 있다.

소형기용으로는 Experimental급 항공기에 사용하는 복합소재는 품질이 균일하지 않은 단점에도 불구하고 경험적으로 충분한 신뢰성을 바탕으로 광범위하게 사용되고 있으며, 복합소재를 사용하는 소형항공기가 일반화되었다.

상온적층용 방식은 작업시 먼지가 날리고 악취가 나고 건강에 좋지 않은 영향이 있으나 저렴하고 보관이 쉬운 장점으로 널리 사용되고 있다.

항공우주연구원은 비행체에 적용 가능한 국산 복합재의 개발을 추진하여 현재 전기체 구조시험을 진행 중이다.

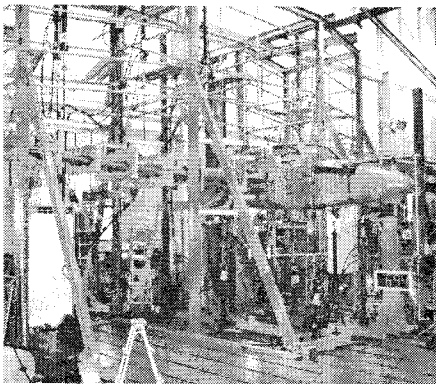


그림 114 항공기 삼면도

국산화 품목은 유리섬유와 에폭시, 폼(Foam)으로 나누어 진행하였다. 유리섬유와 폼은 실기에 적용하기로 하였으나 에폭시는 고온특성 불량으로 적용을 보류한 상태이다.

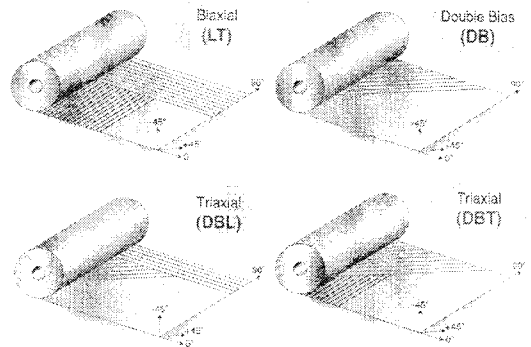


그림 115 상온 적층용 유리섬유 분류

DB(Double Bias) 유리섬유는 기존 국산 생산 제품을 항공용으로 사용할 수 있는가의 적합성 여부에 초점을 두었다. 이 소재는 [+45/-45]의 2장의 일방향 유리섬유를 겹쳐서 유리섬유로 띄엄띄엄 엮어놓은 Stitched 방식이다 [그림 ?]. 또한 스파 캡에 많이 사용되는 일방향 글라스 L450도 올이 풀어지지 않도록 Stitch가 되어있는 상태에서 제작을 하여 물성시험을 수행하였다.

사용량이 많지 않은 다음의 소재는 국산화 계획에서 제외하였다.

- 평직(Plain Weave) : 섬유 올이 조밀한 소재로 연료탱크에서 누설을 방지용으로 사용
- 주자직(5-Harness) : 통상 BID-Glass 로 불린다. 이차 본딩용이나 곡면이 심한 부위는 이것을 사용하여야 Debonding 방지나 곡면형상 유지가 가능하다.
- 일방향 Carbon 소재
- TRIAX 소재 : 이 소재는 [+45/0/-45]의 3

장의 일방향소재를 엮어 놓은 것으로 준등방성(Quasi-isotropic) 특성을 나타낸다. 이 소재는 세 번에 나누어 할 작업을 한 번에 끝낼 수 있는 장점이 있으나 필요 없는 부분까지 적층을 과도하게 할 가능성이 있다.

2. 시편 제작 방법

적층(hand-layup or wet layup) 방법을 통한 시편의 제작과정을 살펴보면, 바닥판(base plate)에 이형제 역할을 하도록 폴리에틸렌수지를 깔고 주체(resin)와 경화제(hardener)를 배합한 에폭시수지를 이용하여 원자재 섬유를 각 시험방법에 따라 방향 및 적층수를 다르게 하여 적층하였다. 상온 경화된 시편판은 4~5개 시편으로 절단되는데, 먼저 만능인장시험기(UTM)의 그립(grip)에 물리는 곳의 파괴 및 집중하중을 막기 위하여 탭(tab)을 부착한 후 수압절단(water-jet)으로 절단하였다[그림 2~?].

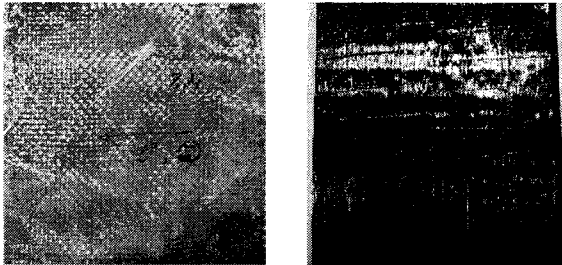


그림 116 상온 경화된 시편판재(좌:GI/Ep, 우:Gr/Ep)

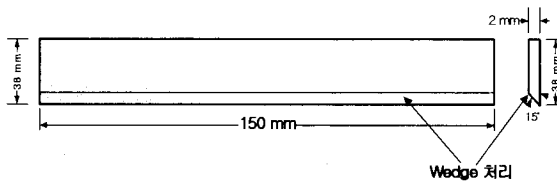


그림 117 시편 glass-tab

표 1은 시편 시험의 종류 및 조합을 나타내고 있다. 표에서 숫자는 시편의 개수를 나타낸다. 각종 재료의 외산과 국산의 다양한 조합을 통하여 특성을 비교할 수 있도록 하였다. 중요하지 않은 적층 각도 조합은 가능한 시험에서 제외하였다. Ez-epoxy는 외산으로 국산의 SC 계열과 비교 대상이다.

표 60 시험방법과 섬유종류 별 다른 시편 종류

	시험방법		인장시험			굽곡 시험	압축 시험	기타	Epoxy		
	재료	Spec	0°	90°	± 45°	0°	0°				
적층판 (외산)	GI/Ep	UD	RA7715	3	3	3		전대 시험결과 비교용	EZ Epoxy		
		BID	RA7725		3	3					
		DB	DB170			3					
	Gr/Ep	UD	01-06300	3							
적층판 (국산)	GI/Ep	DB	DB400		3		3		4 ply	SC-80	
					3		3			8 ply	SC-60
					3		3			8 ply	SC-60
					3		3			4 ply	SC-80
적층판 (외제) +Epoxy (국산)	GI/Ep	BID	RA7725	3		3		4 ply	SC-60		
샌드위치판	GI/Ep	BID	RA7725				3	3	Diviny Cell BlueFoam	EZ Epoxy	

에폭시는 상온경화이므로 고온 특성이 중요하지는 않으나, 대량 생산을 염두에 둘 경우에는 빠른 경화를 위하여 오븐에서 60℃ 온도 정도에서 경화를 시키면 강도 향상으로 고품질을 얻을 수 있다.

신규 개발한 에폭시 SC-60-2 는 적층 몰드용으로 Tool 용 글라스와 함께 사용하여 몰드를 만들어 적용한 결과 120℃ 고온에서도 변형이 발생하지 않았다.

1) 인장 시험시편(적층판) 제작

[ASTM D3039-76] 표준에 따른 인장시편은 RA7715(glass, UD)와 EZ-Epoxy(상온경화수지), 01-6200(carbon, UD)와 EZ-Epoxy, DB400(glass, DB)와 SC-60(상온), DB600(glass, DB)와 SC-80(상온) 및 RA7725(glass, BID)와 SC-60을 이용하여 제작하였다. 0°시편은 8 ply, 90°시편은 16 ply를 적층하였고 시편의 두께 변화는 전체 두께의 ±2% 이내로 하였으며, 시편의 가공은 미리 탭을 붙인 판재를 수압절단하였다. 시편의 변형률 측정을 위해 게이지 길이가 5mm이고 120Ω, Gage Factor 2.11인 직교로제트형 스트레인 게이지(Kyowa, KFG-5-120-C1-11L1M2R)를 시편의 중앙부에 부착했다. 0°시편의 경우 [ASTM C3039-76]에서는 시편의 폭(width)을 12.7 mm로 권장하고 있으나 스트레인게이지 부착을 위해 25.4mm로 수정 제작하였다.

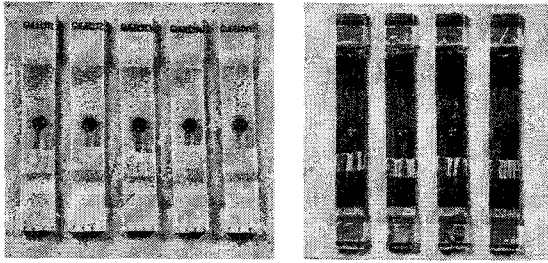


그림 118 시편 제작

2) 전단 시험시편(적층판) 제작

전단시험에는  $[\pm 45]_s$  적층판 시험, 비김축 적층판 시험, 레일 전단시험, 비틀림 시험 등 4종류가 일반적으로 사용되는데, 여기서는  $[\pm 45]_s$  적층판 시험을 위해 8 ply 적층판 ( $[(45/-45/45/-45)]_s$ ) 을 사용하였다 ([ASTM D3518-76]). 사용된 재료는 인장시편과 동일하다.

3) 굽힘 및 압축 시험시편(샌드위치판) 제작

복합재료 구조물의 설계 데이터를 구하는 목적보다는 재료의 품질검증이나 제어를 위한 특성값을 구하는데 주로 쓰이는 굽힘시험[ASTM C393-62]에는 3점 굽힘법과 4점 굽힘법이 있는데, 여기서는 3점 굽힘시험(three point bending test)을 위한 0°방향시편을 심재(core)의 상하면에 유리섬유로 4 ply씩 적층하였다. 사용된 심재는 Diviny-Cell foam과 Blue foam을 이용하였다.

3. 시험 장치 및 방법

1) 인장/전단 시험

인장시험을 위해 MTS사의 10톤 용량인 MTS810을 이용하여, 시편에 작용하는 인장력과 변위를 측정하였다. 시편에는 KYOWA사의 게이지 길이가 5mm이고 120Ω인 직교의 스트레인 게이지를 부착하고, 길이방향의 연신률 측정을 위해 신장계(extensometer, gauge length : 38mm)를 이용하였다. 스트레인게이지로부터 길이방향과 수직방향의 스트레인(strain,  $\epsilon_x, \epsilon_y$ )을 얻기 위해 NI사의 SCXI1200과 LabVIEW를 이용한 DAQ시스템을 이용하였으며, 인장시험시 하중속도는 2mm/min 으로 하였다.(그림 ?)

2) 전단 시험

$[\pm 45]_s$  적층판을 이용한 전단시험을 위해 인장시험에서와 같은 10톤 용량의 MTS810을 이용하여 축방향 하중(axial force)과 축방향 변위(axial displacement)를 구하였고, NI사의 SCXI1200과 LabVIEW를 이용하여 스트레인게이지로부터 길이방향과 수직방향의 변형률을 획득했다.

3) 굽힘시험

굽힘시험은 [ASTM D799-71]표준에 따라 3점 굽힘시험의 경우를 수행하였다 [?]. [ASTM D799-71]에서 유리섬유 복합재료의 경우 L/h의 값이 16이 되도록 추천하고 있으므로, 제작된 시편의 평균 높이(h)인 13mm를 기준으로 시편의 받침점 간격(span length) L을 200mm로 하였다.(그림 ?~?)

4) 압축시험(그림 ?)

압축시험은 다른 기계적 특성시험보다 측정하기 어려워 다양한 시편과 지그의 형태가 연구되어 왔는데, 압축시험치구(jig)를 사용하여 시편이나 치구의 조그마한 기하학적 변화로 하중 축과 시편축의 불일치가 생기는 것을 방지하고 시편의 옆면이 불확실하게 지지되어 좌굴(buckling)에 의한 파괴를 최소화하도록 하였다. 복합재료의 기계적 특성 값을 측정하기 위해 직교의 스트레인 게이지를 앞과 뒷면에 각각 부착하여 변형률을 측정하였으며 사용한 시험기는 MTS810의 25ton 로드셀을 이용하였다.

4. 시험 결과

1) 인장, 전단 시험

시편시험은 상온(20°), 상대 습도 60%, 하중속도 2mm/min 조건하에서 수행되었다. 복합재료의 특성시험 중에서 가장 대표적이고 기본적인 시험인 인장시험에서는 인장하중에 대한 복합재료의 탄성계수, 강도, 포아송비, 파단연신률 값 등을 구하였다.

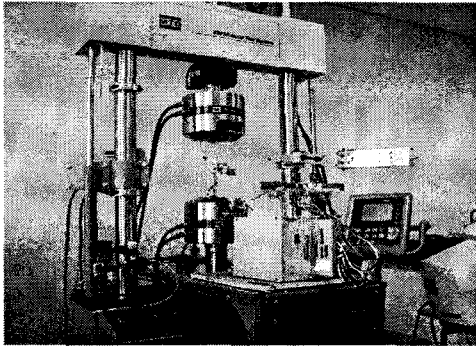


그림 119 인장 시험기

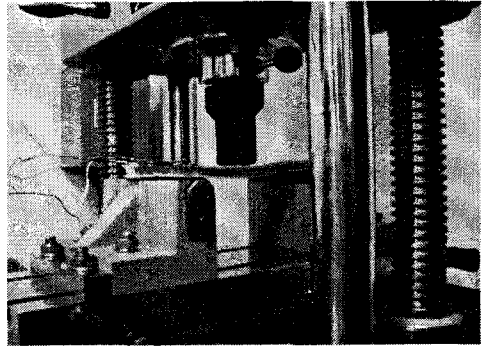


그림 122 굽힘 시험기

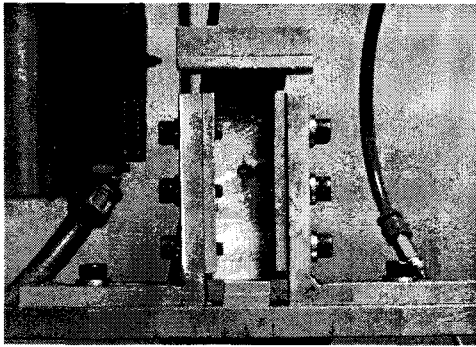


그림 120 압축 시험기

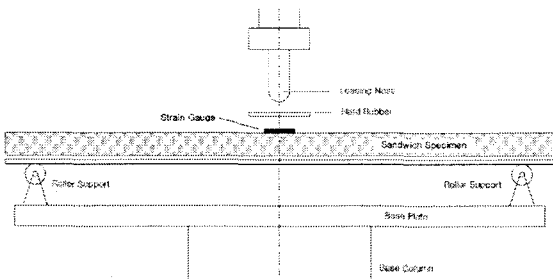


그림 121 3점 굽힘시험 장치도

응력  $\sigma$ 는 하중을 시편의 단면으로 나눈 값이며, 축방향 응력의 최대값으로 인장강도(strength)를 구하였다. 응력-변형률 곡선(stress-strain)의 초기 선형구간(시험에서는 500~5000 $\mu^2$  구간)내에서 응력과 변형률의 비  $E_1(=\sigma_1/\epsilon_1)$ , 축방향 변형률과 축의 수직방향 변형률인 포아송비(Poisson's ratio)  $\nu_{12}(=\epsilon_2/\epsilon_1)$ 을 구하였다. 마찬가지로, 90°방향 인장시편 시험의 선형구간에서 인장강도  $\sigma_2^T$ 와 90°방향의 탄성계수  $E_2$ 를 구하였다. 기존의 외산인 Ez-epoxy의 물성치를 갖는 에폭시인 국산 SC-80은 강도는 비슷하게 측정이 되었으나 고온 특성이 불량하여 개선을 시도 중이다. SC-60-2는 몰드에 적용한 에폭시로 고온 특성이 양호하다.

시험은 ASTM 규격에 따라 8 ply 또는 16ply를 적층하여 인장시편을 만들었으며 Kyowa사의 복합재료 시험용 스트레인게이지인 KFG-5-120-D16-11N15C2를 사용하여 포아송 비를, Extensometer로는 변형량을 측정하였다.

그림 ??는 일방향 탄소 섬유인 인장 시험 결과를 보여준다. 복합재료와 에폭시의 조합은 Gr/Ep -UD,01-6200(외산), 0° / EZ-Epoxy(외산)이며 Wet Layup으로 적층을 하여 적층각을 정확히 일치시키기 어려운 상태임에도 충분히 비교적 선형적인

응력-변형률을 나타낸다.

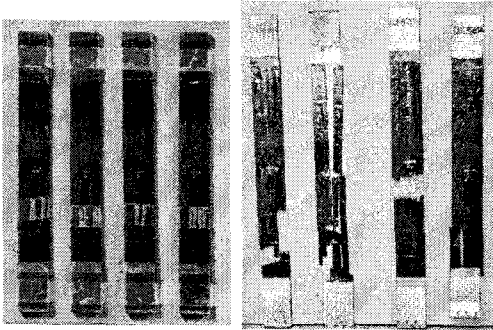


그림 123 일방향 카본 시편시험 전후 사진

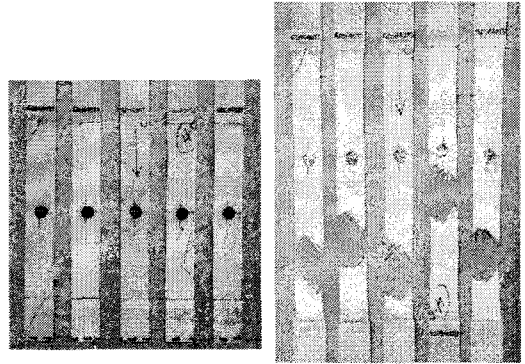


그림 125 시편 시험 전후 사진

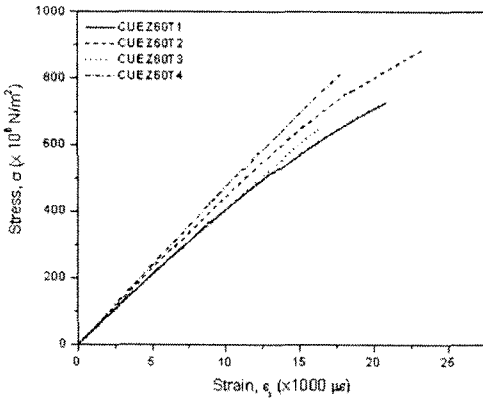


그림 124  $\sigma$ - $\epsilon$  곡선

그림 7-7는 45도 일방향 유리섬유 2장이 겹쳐진 소재의 시험 결과를 보여준다. 복합재료와 에폭시의 조합은 GI/Ep - DB, DB400(국산), 0° / SC-60(국산) 이다. 이 시편은 소재의 전단 특성을 측정하기 위하여 알기위하여 실시하였으며 대단히 비선형적인 모습으로 파단에 이르기까지 대단히 큰 연신률을 보여주고 있다.

이것은 Classical Laminate Theory로 해석을 할 때에 심각한 오류를 야기할 수도 있으므로 이에 대한 충분한 이해가 필요하다. 즉, NASTRAN 등을 이용하여 등의 구조해석을 수행하면 실제로는 주변의 0° 섬유가 하중의 대부분을 받는데도 불구하고 45° 섬유가 하중을 분담하는 것으로 해석이 되기 때문에 불필요하게 많은 적층을 많이 할 수도 있다.

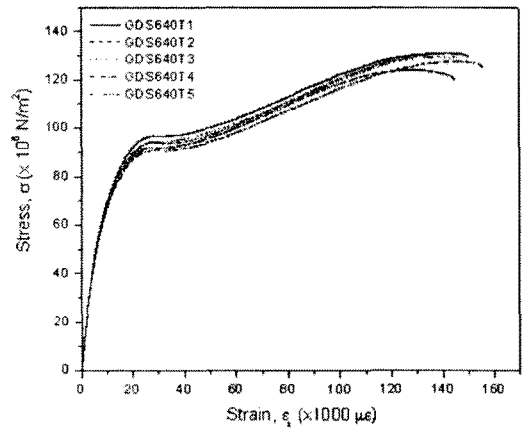


그림 126  $\sigma$ - $\epsilon$  곡선

표 7는 시편의 탄성률, 강도 및 변형률을 나타내며, 하중 방향과 45° 방향 적층이 들어있는 시편은 파단 변형률이 대단히 크게 나옴을 알 수 있다.

외산 DB-170 수입대체품인 DB600 결과와 비교하면, 국산이 더 우수한 것으로 나타나고 있다. DB400은 414g/m<sup>2</sup> 으로 DB600 614 g/m<sup>2</sup> 보다 가격이 상대적으로 비싸나, 단위면적당 가볍고 구조강도도 높으므로 외용으로 사용하면 좋을 것이다.

표 61 시편 시험 결과

시편방법	각 종류의 기계적 특성											
	재료	Spec.	Modulus (GPa)			Strength (MPa)				Failure Strain (%)		
			$E_1$	$E_2$	$G_{12}$	$\sigma_{11}^U$	$\sigma_{11}^L$	$\sigma_{22}$	$\sigma_{33}$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\gamma_{12}$
적층판 (외산)	UC	RA7715/	25.8	8.01	1.02	471	47.1	27.3	1.93	0.912	-	-
		EZ-Epoxy	(1.580)	(0.587)	(0.151)	(46.6)	(1.526)	(2.89)	(0.679)	(0.042)	-	-
	G/Ep	RA7725/	-	19.3	2.22	-	301	46.5	-	2.42	-	-
		EZ-Epoxy	-	(0.519)	(0.0436)	-	(21.8)	(2.62)	-	(0.194)	-	-
	OB	EZ-Epoxy	-	-	2.41	-	-	47.5	-	-	-	-
		EZ-Epoxy	-	-	(0.506)	-	-	(1.744)	-	-	-	-
적층판 (국산)	G/Ep	DI-R22V/	70.9	-	-	771	-	-	1.97	-	-	
		EZ-Epoxy	(11.12)	-	-	(160.3)	-	-	(3.508)	-	-	
	DB	DE400/	8.06	-	-	126	-	-	15.0	-	-	
		SC-60	(0.107)	-	-	(4.04)	-	-	(0.534)	-	-	
	G/Ep	DB	DE400/	7.98	-	-	133	-	-	26.2	-	-
		SC-60	(0.129)	-	-	(7.94)	-	-	(2.00)	-	-	
적층판 (외산+국산)	G/Ep	RA7725/	17.13	-	2.82	259	-	52.8	2.09	-	-	
		SC-60	(1.130)	-	(0.212)	(8.23)	-	(2.90)	(2.41)	-	-	

( ) : standard deviation

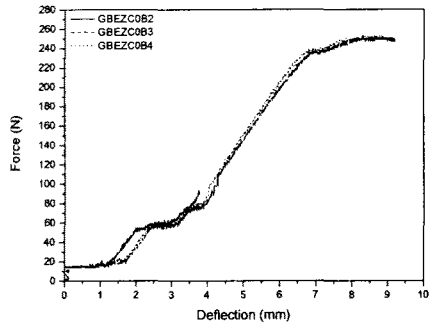


그림 128 GI/Ep : RA7725(외산, BiD)/EZ-Epoxy(외산), Diviny-Cell foam 굽힘 시험 시편의 p- $\delta$ 곡선

2) 굽힘 시험

그림 ?는 각각 샌드위치판 시편과 시험 모습을 나타내며, 그림 ?~?은 하중과 변위 곡선을 나타낸다.

굽힘 시험에서는 우수한 강도를 가지는 Viviny-Cell 쪽이 특성이 좋음을 알 수 있으며, Blue Foam은 데이터가 약간씩 흔들리는 것으로 보아 내부적으로 약간씩 Debonding 현상이 진행되고 있는 것으로 판단된다.

3) 압축 시험

그림 ?~?은 압축시의 변위도를 나타내고 있다. 인장시에 비하여 강도 저하가 발생하고 있음을 알 수 있어, 항공기에 적용시에는 좌굴현상을 없애도록 보강재와 함께 사용하는 것이 바람직할 것이다.

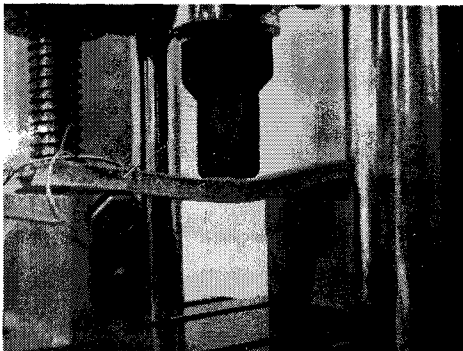


그림 127 샌드위치판 시험

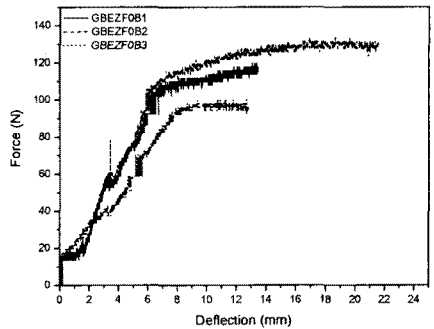


그림 129 GI/Ep:RA7725(외산,BiD)/EZ-Epoxy (외산), Blue foam 굽힘시험의 p- $\delta$ 곡선

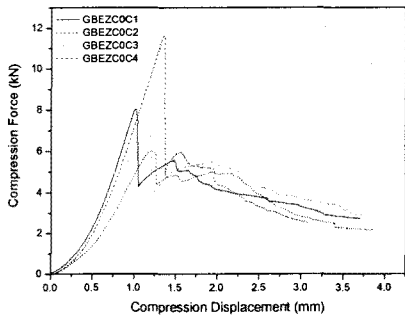


그림 130 GI/Ep : RA7725(외산,BiD) / EZ-Epoxy(외산), Diviny-Cell foam 압축시험의 p- $\delta$ 곡선

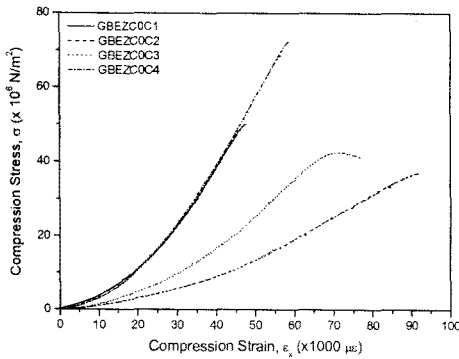


그림 131 GI/Ep : RA7725(외산,BiD) / EZ-Epoxy(외산), Diviny-Cell foam 압축시험의  $\sigma$ - $\epsilon$ 곡선

5. 결론

소형항공기용 국산 복합소재에 대한 시편 물성 시험을 수행하였다. 인장시험, 전단시험, 굽힘 시험, 압축시험 등을 통하여 국산 복합재 기본 물성 시험에 대한 방법 및 절차확립을 체계화 하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 직교이방성 인장시험의 시험결과  $E_1 V_{21} = E_2 V_{12}$  조건을 잘 만족하고 있어 시험의 신뢰도를 확인할 수 있었다.
- 동일한 외산 유리섬유(RA7725)에 외산 수지(EZ-Epoxy)와 국산 수지(SC-60)를 각각 사용하여 제작한 시편의 물성치는 국산 수지가 외산에 비하여 전단탄성계수는 18%, 전단강도는 16% 높게 측정되었다.
- 국산 유리섬유(DB600)와 국산 수지, SC-60, SC-80을 각각 사용한 복합재의 물성치는 인장 탄성계수나 인장강도는 수지의 종류에 관계없이 비슷한 값을 보이나 파단 변형률은 SC-60을 사용한 시편이 40% 정도 높은 값을 나타내었다.
- 국산수지(SC-60)와 국산 유리섬유(DB400, DB600)를 사용하여 제작한 시편의 경우 인장 특성은 DB400의 경우가 DB600보다 우수하였고 전단특성은 DB600이 우수하였다.

- 평직형태의 국산 유리섬유(DB400, DB600)의  $\pm 45^\circ$  전단시험결과 15% 이상의 파단변형률이 관찰되었으며 이는 평직의 특성상 큰 변형을 유발할 수 있으나 섬유들 사이에 수지가 충분히 함침 되지 않았을 경우에도 발생할 수 있으므로 이에 대한 대책을 고려해야한다.
- GI/Ep(RA7725/Ez-Epoxy)의 압축강성도는 같은 종류의 인장강성도와 유사한 값을 가지나 압축강도는 인장강도의 20% 정도로 낮게 측정되었다.
- 본 시험에서 얻은 강도는 극한 강도값을 취하였지만 설계/해석시에는 금속재료의 Yield Strength 와 같이 응력-변형률 곡선에서 선형구간의 경계부분의 값을 강도로 사용하는 것이 안전적인 측면에서 바람직하다고 생각된다.

본 연구에서 사용된 상온용 국산 복합재료는 외산재료의 기계적 특성과 유사하거나 향상된 물성 특성을 보여주므로 외산재료를 대체할 수 있다고 판단된다.

후기

본 연구는 산업자원부의 “4인승 선미익 경항공기 수출모델 개발” 과제에 의거 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] 전의진, 최신복합재료, 교학사, 1989.  
 [2] ASTM D3039-76 인장시험 규격  
 [4] ASTM D351-76 전단시험 규격  
 [4] ASTM C393-62 샌드위치시험 규격  
 [5] Aircraft Spruce & Specialty Co., Catalogue, Chapter CM  
 [6] 반디호 복합재료 항공기 구조 재료 특성 시험, 한국항공우주연구소 내부 메모, 1997. 12.  
 [7] 한동주, 홍창선, “포움심재를 갖는 샌드위치 보의 재료 기계적 성질 및 굽힘 국소좌굴에 관한 연구”, 한국항공우주학회지 제 31권, 5호, pp. 44-54, 2003.