

수작업/상온경화시킨 일방향 Glass/Epoxy 시편의 압축강도

이종원*, 김진원**

Compressive Strength of Unidirectional Glass/Epoxy Specimens Processed by Wet Lay-up at Room Temperature

Jong-Won Lee*, Jin-Won Kim**

Abstract

The present study provides the compressive design allowable of a unidirectional glass/epoxy composite laminate processed by wet lay-up at room temperature. The compressive strength values measured from 39 specimens have been assumed to follow the two-parameter Weibull distribution. Following the statistical guidelines provided by MIL-HDBK-17F, the B-basis and A-basis values of the aforementioned laminate are found to be 82.6% and 65.9%, of the mean compressive strength, respectively. The B-basis value is then discounted further at 50% for the in-situ application on the main wing spar caps of an experimental canard aircraft.

초 록

본 연구에서는 상온에서 수작업으로 함침/경화시킨 일 방향 glass/epoxy 복합재료 적층판의 설계압축강도 값을 제시하고 있다. 총 39개의 시편으로부터 측정된 압축강도 값은 two-parameter Weibull 분포를 따른다고 가정하였다. MIL-HDBK-17F에 제시된 방법과 절차에 따라 동일형상의 복합재료 시편에 대해 구한 B-Basis 값과 A-Basis값은 각각 평균 압축강도의 82.6% 및 65.9%로 확인되었다. 항공기 주익의 스파 Cap에 동일 복합재료를 적용할 경우를 고려하여 B-base 값의 50%를 설계압축강도 값으로 산정하였다.

키워드 : 압축강도(Compressive Strength), 일 방향(Unidirectional), Weibull Distribution(와이불 분포)

1. 서 론

1986년 말 무착륙/무급유 세계일주 비행에 성공했던 Voyager[1] 등을 비롯한 다수의 실험용 항공기의 주/부 구조물에는 다양한 종류의 수작업/상온경화 복합재료가 광범위하게 적용되어

왔다. 다품종 소량의 시제품을 만드는 경우, 수작업으로 상온 경화시킨 복합재료는 고온/가압성형용 Prepreg에 비해 비용측면에서는 유리하지만 품질을 일정하게 유지하기 힘들다는 단점을 갖는다. 또한 소재조합에 따른 충분한 시험자료가 누적되어 있지 않으므로, 동일한 소재와 적층순서에 대해서도 새로운 항공구조물을 개발할 때 마

* 세부계통그룹/twinbee@kari.re.kr

** 세부계통그룹/jintting@kari.re.kr

다 설계허용강도를 매번 다시 결정해야 한다.

이런 현실을 고려하면, MIL-HDBK-17F[2]에서 제시하고 있는 방법과 절차에 따라 수작업/상온 경화 복합재료의 설계허용강도를 결정하는 것이 현재로는 가장 무난하다고 판단된다.

시편으로부터의 측정값을 Weibull 분포로 가정할 때, 시편의 개수가 극단적으로 소량이 아니라면 참고문헌[2]로 구한 설계허용강도는 Doty[3]로 구한 값보다 높으며, Whitehead[4]로 구한 값보다 낮다. 참고문헌[2], [3] 및 [4]에 따른 B-basis 값과 A-basis 값은 신뢰수준을 95%로 할 때 각각 식(1-1), (1-2) 및 (1-3)과 같다.

$$\begin{aligned} B_M &= \hat{\alpha} (-\ln 0.90)^{1/\beta} \exp\left(\frac{-V_B}{\beta\sqrt{n}}\right) \\ A_M &= \hat{\alpha} (-\ln 0.99)^{1/\beta} \exp\left(\frac{-V_A}{\beta\sqrt{n}}\right) \end{aligned} \quad (1-1)$$

$$\begin{aligned} B_D &= \hat{\alpha} (-\ln 0.90)^{1/\beta} \left(\frac{2n}{X_{2n,0.05}^2}\right)^{1/\beta} \\ A_D &= \hat{\alpha} (-\ln 0.99)^{1/\beta} \left(\frac{2n}{X_{2n,0.05}^2}\right)^{1/\beta} \end{aligned} \quad (1-2)$$

$$\begin{aligned} B_W &= \hat{\alpha} (-\ln 0.90)^{1/\beta} \left(\frac{2n}{X_{2n,0.05}^2}\right)^{1/\beta} \\ A_W &= \hat{\alpha} (-\ln 0.99)^{1/\beta} \left(\frac{2n}{X_{2n,0.05}^2}\right)^{1/\beta} \end{aligned} \quad (1-3)$$

Weibull 분포의 확률밀도함수와 그에 대한 Log 가능도 함수는 각각 식(2) 및 (3)과 같다.

$$f(T; \alpha, \beta) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{T}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{T}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (2)$$

$$\Lambda = \ln L = \sum_{i=1}^n \ln f(T_i; \alpha, \beta) \quad (3)$$

식(3)를 최대화시키는 α 와 β 의 값은 식(4)를 만족하는 $\hat{\alpha}$ 와 $\hat{\beta}$ 이다.

$$\left.\frac{\partial \Lambda}{\partial \alpha}\right|_{\alpha=\hat{\alpha}} = 0, \quad \left.\frac{\partial \Lambda}{\partial \beta}\right|_{\beta=\hat{\beta}} = 0 \quad (4)$$

식(2)와 식(3)을 식(4)에 대입해 정리하면,

$$\hat{\alpha} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i^\beta\right)^{1/\beta} \quad (5)$$

$$-\frac{n}{\beta} + \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{T_i}{\hat{\alpha}}\right) - \sum_{i=1}^n \left(\frac{T_i}{\hat{\alpha}}\right)^\beta \ln\left(\frac{T_i}{\hat{\alpha}}\right) = 0 \quad (6)$$

식(6)에 식(5)를 대입해 정리하면,

$$-\frac{n}{\beta} + \sum_{i=1}^n \ln T_i - \frac{n \sum_{i=1}^n T_i^\beta \ln T_i}{\sum_{i=1}^n T_i^\beta} = 0 \quad (7)$$

n 개의 측정값 T_i 가 주어졌을 때 $\hat{\beta}$ 의 값은 식(7)로부터 시행착오에 의한 반복계산으로 구해진다. 그렇게 구한 $\hat{\beta}$ 의 값을 식(5)에 대입하면 $\hat{\alpha}$ 의 값이 결정된다.

2. 본 론

2.1 압축시험용 시편

한국항공우주연구원에서 개발 중인 실험용 항공기 주 날개 Spar Cap은 일 방향 S-Glass에 상온경화 Epoxy를 수작업으로 함침 시켜 제작되고 있다. 표 1과 같은 해당 소재조합의 압축 설계허용강도를 결정하기 위하여 폭 305mm에 길이 445mm인 적층판을 제작하였다.

표 1. RAW MATERIALS

Fiber	Owens-Corning Fiberglass S-2 Glass UD Weight \approx 0.304 kgf/m ² t \approx 0.3 mm, Dry
Matrix	E-Z 10 Epoxy Resin E-Z 83 Hardener Pot Life @ 25oC = 2hrs Tg = 91oC PC, Tg = 66oC RT Elongation = 3.5%

총 10장의 일 방향 S-Glass를 수작업으로 적층하여 상온에서 24시간 동안 가경화시킨 후 65oC

에서 2시간 정도 Post-Curing시켰다. 이렇게 만든 한 장의 적층판으로부터 총39개의 시편을 Water Jet 절단기로 잘라내어 13개씩 3개조로 식별번호를 부여하였다. 고온성형용 Prepreg Glass Fabric으로 별도로 제작한 Tab을 각각의 시편 양단에 양면으로 접착시킨 후 양쪽의 Tab 면이 가능한 한 평행이 되도록 사포로 가공하였다. 완성된 시편의 치수는 표 2와 같다.

표 2. 시편 형상

Fiber Volume Fraction	0.42~0.48
Length	144~146 mm
Tab Length	64~66 mm
Width	20.67~20.87 mm
Thickness	2.64~3.28 mm
No. of Plys	10

2.2 압축시험 결과

참고문헌[2]에서 제시된 방법과 절차에 따라 분당 1mm의 속도로 압축시험을 수행한 결과, 39개의 시편 모두가 Acceptable Failure Mode[5]의 범주에 속하는 압축파단 형상을 보였다.

Set-to-Set Variation을 모사하기 위해 13개의 시편으로 이루어진 각각의 조별로 압축강도 측정값을 순서대로 배열하고 통계처리를 하였다. 시편 개수의 영향을 모사하기 위해 39개의 시편 전체에 대해서도 동일한 계산과정을 반복하여 그 결과를 표 3에 수록하였다.

표 3. 압축시험 결과

First Set		Second Set		Third Set	
No.	T_C (MPa)	No.	T_C (MPa)	No.	T_C (MPa)
11	360.6	16	381.2	37	356.7
02	379.8	14	397.7	29	359.1
12	407.8	19	414.5	33	411.6
05	429.7	26	426.8	31	418.4
08	433.5	23	430.0	39	432.3
01	444.3	24	431.1	36	439.7
13	447.1	17	433.3	34	446.2
10	463.7	18	434.0	32	451.1
03	472.1	15	437.0	28	451.8
04	474.1	25	446.3	35	454.3
07	486.2	22	461.9	27	482.9
06	490.1	20	465.7	38	486.1
09	492.6	21	473.0	30	522.3
$O.S.L. = 0.57$		$O.S.L. = 0.40$		$O.S.L. = 0.492$	
$T_C = 444.738$		$T_C = 433.269$		$T_C = 439.423$	
$B = 351.844$		$B = 365.457$		$B = 322.230$	
$A = 270.572$		$A = 302.499$		$A = 229.048$	
$s^2 = 41.889$		$s^2 = 25.852$		$s^2 = 46.598$	
$\hat{\alpha} = 462.109$		$\hat{\alpha} = 444.696$		$\hat{\alpha} = 459.227$	
$\hat{\beta} = 14.488$		$\hat{\beta} = 20.127$		$\hat{\beta} = 11.148$	
Total	No. of Specimens = 39, $O.S.L. = 0.523$				
	$T_C = 439.144$, $B = 362.644$, $A = 289$				
$s^2 = 38.385$, $\hat{\alpha} = 456.057$, $\hat{\beta} = 13.197$					

표 3에서 조별로 관찰된 유의확률(p-Value 또는 Observed Significance Level, 이하 O.S.L.)과 전체 시편에 대한 O.S.L.은 모두 참고문헌[2]에서 제시한 유의수준 값 0.05보다 크므로 Weibull 분포로 가정해도 무방함을 알 수 있다.

2.3 DATA PLOTTING

시편으로부터 측정된 압축강도의 Plotting에는 다양한 방법[6]이 있으나, 본 연구에서는 식(8)과 같이 수식의 표현이 비교적 간단하면서도 정확도가 상당히 높은 Benard[7]의 Approximate Median Rank Method를 적용하였다.

$$F_i = \frac{i-0.3}{n+0.4}, \quad n = 13 \text{ or } 39 \quad (8)$$

표 3과 식(8)로부터 각각의 조별 측정값에 대하여 좌표값 (F_i, T_i)을 구하였다. 그림 1(a), 1(b) 및 1(c)에 각각의 좌표값을 기호로 표시하고, 실선으로 그려진 조별 Weibull 누적확률분포 함수와 비교하였다. 측정값 전체에 대해서도 동일한 방식으로 좌표값과 누적확률분포함수를 계

산하고 그 결과를 그림 1(d)로 나타내었다.

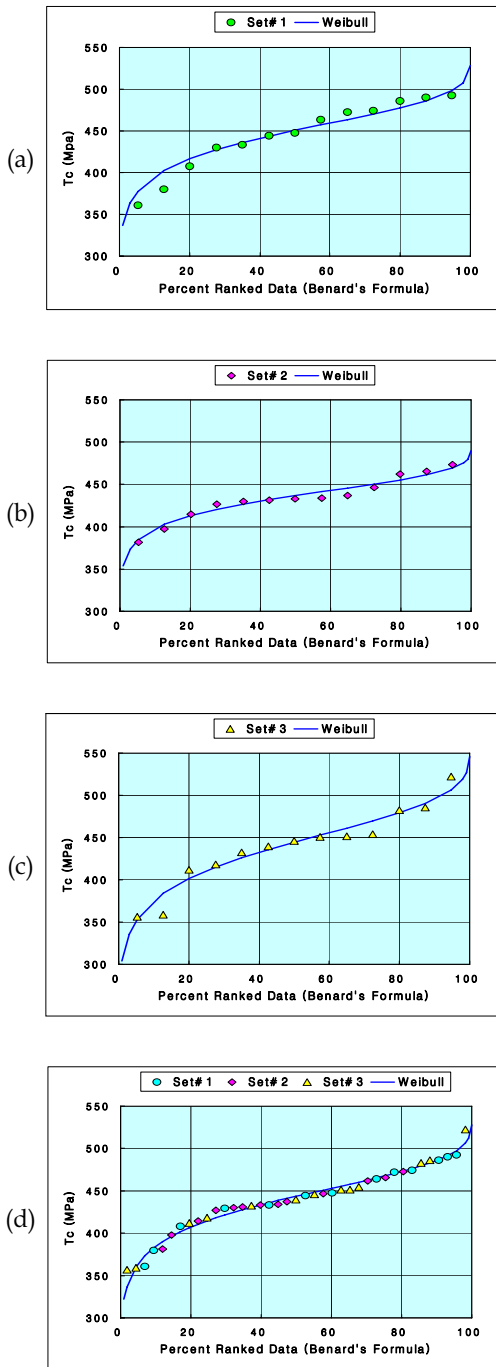


그림 1. Probability Plotting

그림 1의 실선은 Weibull 누적확률분포함수의 역함수이며 식(9)와 같이 연속함수로 주어진다.

$$T = \frac{\{-\ln[1-F(T)]\}^{1/\beta}}{\hat{\alpha}} \quad (9)$$

그림 1에서 측정값을 나타내는 조별 기호들의 수직축 좌표값은 표 3에서의 T_c 이고 수평축 좌표값은 식(8)로 구한 것이며, 조별 실선은 별도의 독립적 계산식인 식(9)로 구한 것이다.

2.4 SET-TO-SET VARIATION

표 3에서 보는 바와 같이 각각 13개의 측정값으로 이루어진 3개조 중에서 산술평균은 제2조가 제일 낮음에도 불구하고 B-Basis 값과 A-Basis 값은 제2조가 제일 높다. 이는 제2조의 분산이 확연하게 낮은 값을 보였기 때문인 것으로 추정되며, 표 1의 소재조합을 적용한다고 가정할 때 시편의 압축강도를 일정하게 유지시키는 노력만으로도 압축 설계허용강도를 B-Basis인 경우 약 10% 정도, A-Basis인 경우 약 20% 정도 증가시킬 수 있음을 의미한다.

2.5 시편 수량의 영향

한편, 표 3에서 39개의 시편 전체로부터 구한 B-Basis 값과 A-Basis 값은 제2조의 값보다는 낮지만 제1조 및 제3조의 값보다는 높다. 이는 식(1-1), 식(1-2) 및 식(1-3)이 나타내고 있는 바와 같이, 시편의 품질수준을 그대로 두고 단순히 시편의 개수만 증가시켜도 B-Basis 값과 A-Basis 값을 어느 정도 높일 수 있음을 시사하고 있다.

시편의 개수가 설계허용강도에 미치는 영향을 정량적으로 살펴보기 위해 $\hat{\beta} = 13.197$ 인 경우에 대해 식(1-1), (1-2) 및 (1-3)으로부터 n 의 값을 증가시키면서 B-basis와 A-Basis 값을 구하여 그림 2에 그 결과를 비교하였다.

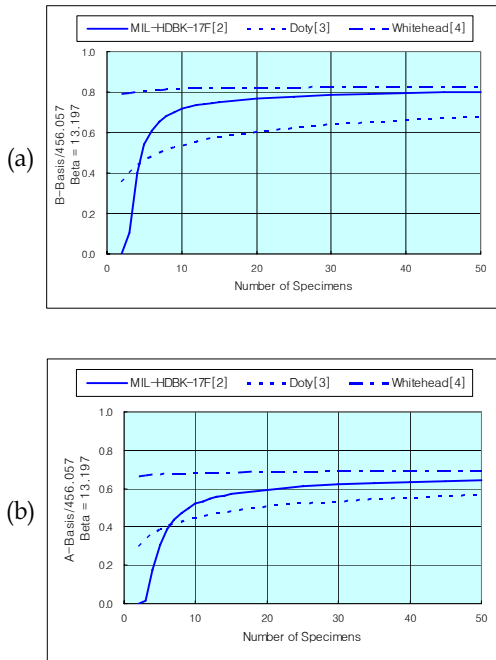


그림 2. Normalized Design Allowable

그림 2의 실선이 보여주는 바와 같이 시편의 개수가 10개 이하이면 식(1-1)에 따라 구한 설계 허용강도는 급격히 감소한다. 따라서 참고문헌[2]의 방법으로 설계허용강도를 결정하고자 하는 경우에는 시편의 개수가 최소한 10개 이상이어야 함을 알 수 있다.

반면에, 식(1-2)와 식(1-3)으로 구한 설계허용강도는 시편의 개수가 10개 이하라도 그 값이 급격하게 감소하지는 않는다. 그러나 참고문헌[3]에 따른 식(1-2)는 식(1-1)에 비해 너무 낮은 값의 설계허용강도를 준다는 단점을 지니며, 참고문헌[4]에 따른 식(1-3)은 시편의 개수가 하나 또는 둘인 극단적인 경우에도 설계허용강도의 감소가 너무 미미하여 보수적인 설계에 적합하지 않다는 단점을 지닌다.

3. 결 론

본 연구에서는 수작업으로 적층하여 상온 경화시킨 일 방향 Glass/Epoxy의 압축 설계허용강

도를 결정하는 일련의 과정과 결과를 제시하였다.

참고문헌들을 비교한 결과, 참고문헌[2]에서 제시하고 있는 방법과 절차에 따르는 것이 가장 무난한 것으로 확인되었다.

총 39개의 시편에서 얻은 압축강도 측정값을 Weibull 분포로 가정하고 MIL-HDBK-17-1F에 따라 B-Basis와 A-Basis를 구하였으며, 그 값은 각각 압축강도 산술평균의 82.6%(362.6 Mpa)와 65.9% (289.4 Mpa) 수준이었다.

한국항공우주연구원에서 개발 중인 실험용 항공기의 Spar Cap은 본 연구와 동일한 소재조합으로 제작되고 있으며, 제작공정의 불확실성 등을 고려하여 B-basis값의 절반인 181.3 Mpa를 Spar Cap 실물의 압축 설계허용강도로 추천하고 있다.

참 고 문 헌

1. Rutan Voyager, Smithsonian Air and Space Museum, <http://www.nasm.si.edu>.
2. Composite Materials Handbook - Volume 1, Polymer Matrix Composites, Guidelines for Characterization of Structural Materials, MIL-HDBK-17-1F Volume 1 of 5, Department of Defense U.S.A., 17 June 2002.
3. L. A. Doty, Reliability for the Technologies, 2nd Edition, ISBN 0-8311-1169-0, Industrial Press Inc., 1989, pp. 127~128.
4. R. S. Whitehead, H. P. Kan, R. Cordero, and E. S. Saether, Certification testing methodology for composite structures, Volume 1 & Volume 2, NADC-87042-60, Warminster, Pa.: Naval Air Development Center, 1987, Volume 1 pp. 8.
5. D3410/D3410M-95 Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading, ASTM, Volume 15.03, Issued November 2000, pp. 13.
6. C. Liu, "A Comparison Between the Weibull

and Lognormal Models Used to Analyse Reliability Data," Ph. D. Thesis, Department of Manufacturing Engineering and Operations Management, University of Nottingham, August 1997, pp. 113.

7. C. R. Mischke, "A Distribution-Independent Plotting Rule for Ordered Failures," An ASME Publication 79-DET-112, ASME, September 1979, pp. 3.