

〈논 문〉

탄소섬유강화 복합재료 강도데이터의 통계적 특성에 관한 연구

김선진* · 이상국* · 남기우** · 오세규*

(1995년 4월 24일 접수)

A Study on Statistical Nature of CFRP Strength Data

Seon-Jin Kim, Sang-Guk Lee, Ki-Woo Nam and Sae-Kyoo Oh

Key Words : Carbon Fiber Reinforced Plastics(CFRP : 탄소섬유강화 복합재료), Weibull Distribution(Weibull 분포), Fracture Toughness(파괴인성치), Tensile Strength(인장강도), Statistical Nature(통계적 특성)

Abstract

An investigation was conducted to study the statistical nature of tensile strength and static fracture toughness of carbon fiber reinforced plastics(CFRP) materials. A good understanding of statistical aspects of strength data is essential for the successful application of such materials because these composites unpossess material uniformity as compared with conventional metallic materials. In this paper, a statistical approach based on Weibull distribution was applied to the test data to evaluate the dispersion in the tensile strength and static fracture toughness by the change of stacking method and test temperature of the CFRP materials.

1. 서 론

최근 공업용 재료로서 주목받고 있는 탄소섬유강화 복합재료(carbon fiber reinforced plastics)는 비탄성률, 비강도가 높고, 특히 내약품성, 내마모성, 경량성 및 절연성 등이 우수한 많은 성질을 가지고 있어 우주개발, 항공기 부품, 스포츠용품, 수송기기관계 등의 분야에서 다양하게 이용되고 있다.^(1,2) 이와 같이 섬유강화 복합재료가 각종 산업 분야에서 널리 사용됨에 따라 재료의 성능 향상과 더불어 재료의 신뢰성 평가는 실용화에 있어서 대단히 중요한 과제라 아니할 수 없다. 이에 대해 현재 복합재료의 성능 향상을 위하여 기계적 성질에

대한 실험적 데이터가 많이 보고되고 있는 실정이다.⁽³⁾ 그러나 이들에 대한 신뢰성 평가에 필요한 강도데이터의 확률분포에 관한 연구는 그리 많지 않다. 복합재료의 경우, 강화형태에 불구하고 인장강도는 Weibull 분포 또는 정규분포로 나타내고 있으며 일반적으로 산포가 크다.⁽³⁾ 이것은 섬유파단, 매트릭스 파단, 계면파괴 등 손상형태가 복잡한 것이 하나의 원인이라 생각할 수 있다. 그러므로 복합재료의 강도평가나 강도설계에 있어서 신뢰성 공학적 취급이 중요한 의의를 가지고 있다고 할 수 있다. 현재 복합재료 분야에서도 Weibull의 최소치 확률이론⁽⁵⁻⁷⁾이 널리 사용되고 있다. 이와 관련한 연구로는 Tenn⁽⁶⁾이 탄소섬유강화 에폭시수지의 인장강도의 분포를 Weibull 확률지상에 나타낸 것을 시초로 Whitney, Maekawa 등의 연구가 있지만,⁽⁹⁾ 특히 적층방법에 따른 인장강도, 섬유방향

*회원, 부산수산대학교 기계공학과

**회원, 부산수산대학교 재료공학과

에 따른 파괴인성치 및 온도변화에 따른 파괴인성치 등 적층방법에 따른 강도데이터의 종합적인 확률분포의 해석에 관한 연구는 거의 없다.

따라서, 본 연구에서는 CFRP에 대해서 인장시험 및 파괴인성시험을 행하고, 적층방법에 따른 인장강도의 분포특성과 섬유배향각이 파괴인성치의 분포에 미치는 영향 및 온도변화에 따른 파괴인성치의 확률분포를 검토하여 재료의 개발 및 신뢰성평가의 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 인장시험

본 연구에서 사용된 시험편은 일방향강화 탄소섬유/에폭시 수지의 프리프레그(국내 K사 CU250 NS)를 적층 성형하여 제작하였으며, 사용된 섬유 및 프리프레그의 기계적 특성 및 기하학적 형상은 Table 1과 같다. 준비된 프리프레그를 0°방향 2 ply 및 90°방향 2 ply로 하여 대칭으로 한(이하 $[0_2/90_2]_s$ 로 표기) 및 0°방향 1 ply 및 90°방향 1 ply로 하여 두번 대칭으로 한(이하 $[0/90]_{2s}$ 로 표기) 8 ply를 적층한 후, 프레스 성형기에서 섬유의 중량비가 53 wt%가 되도록 Table 2 및 Table 3과 같은 적층순서 및 가압방법에 따라 성형하였다. 성형된 탄소섬유 복합재료의 적층판은 다이아몬드 휠톱을 사용하여 Fig. 1의 (a)와 같은 형상과 치수로 인장시험편을 가공한 후, AW106+HV953V접착제를 이용하여 양단에 알루미늄 탭(tab)을 부착하였다. 탄소섬유 복합재료의 성형시 성형압력을 여러 단계로 변화시켜 성형압력이 강도에 미치는 영향을

고찰하기 위해, 이들 각각에 대한 인장시험을 수행하였다. 인장시험은 최대하중 5 ton의 유압식 정적 시험기를 이용하였고, 인장시험시 시험속도(cross-head speed)는 0.5 mm/min로 일정하게 유지하였다.

2.2 파괴인성시험

파괴인성시험편의 제작방법은 2.1의 인장시험편과 동일하나, 성형압력은 초기압력 20 kgf/cm², 성형유지 압력 200 kgf/cm²으로 하였다. 적층방법중 섬유배향에 따른 파괴인성의 분포특성을 평가하기 위하여 다음과 같은 적층판을 제작하였다.

- (1) $[0_2/90_2]_s$
- (2) $[0/90]_{2s}$

여기서, (1), (2)와 같은 적층판의 적층방법에서 섬유배향각 θ 는 0°, 15°, 30°, 45°로 하였으며 이들 적층판을 Fig. 2에 나타낸다. 성형된 탄소섬유 복합재료 적층판은 Fig. 1의 (b)와 같이 ASTM E-399-78에 의거하여 표준형 콤팩트 인장(compact tension, CT) 시험편으로 가공하였으며, 노치 선단에 정밀절단기를 이용하여 길이 2 mm, 폭 0.2 mm의 인공 노치를 내었다. 응력확대계수는 아래와 같은 식 (1)에 의해 평가하였다. 여기서, $F_I(\zeta)$ 는 균열길이에 따른 보정계수이다.

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} \cdot F_I(\zeta) \quad (1)$$

$$F_I(\zeta) = 4.55 - 40.32\zeta + 414.7\zeta^2 - 1698\zeta^3 + 3781\zeta^4 - 4287\zeta^5 + 2017\zeta^6 \quad (2)$$

여기서, P 는 하중, B 는 판두께, W 는 시험편 폭,

Table 1 The properties and geometric shape of carbon fiber and prepreg

Property	Unit	Carbon fiber	Prepreg
Tensile strength	MPa	5,096	1,764
Tensile elastic modulus	MPa	298,900	135,543
Elongation	%	1.7	-
Density	kg/m ³	1.76×10^{-4}	-
Filament count		12,000	-
Filament diameter	μm	5	-
Resin content	wt %	-	$36 \pm 2\%$
Carbon fiber weight	kg/m ²	-	0.25

a 는 균열길이를 각각 나타낸다.

실제로 행해지고 있는 복합재료의 파괴인성 평가는 복합재료가 거시적으로 균질 등방성으로 간주되거나 균열길이가 강화재의 손상영역보다 대단히 큰 경우에는 식 (1)과 같은 등방성의 응력확대계수 K_I 에 대한 계산식이 이용되고 있다. 파괴인성치 K_{Ic} 는 초기균열을 가공한 시험편의 하중-변위선도로부터 구해지는 변수로서 하중-변위곡선이 최대하중까지 선형성을 유지하면 최대하중을 이용하여 결정되고 있다.⁽¹⁰⁾

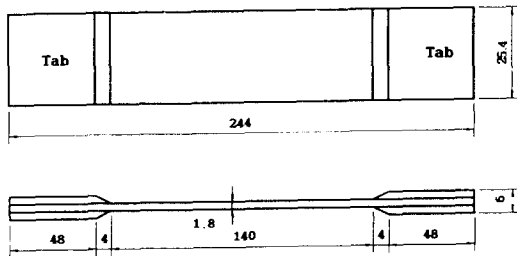
본 연구에서는 Fig. 3과 같이 최대하중까지 선형성을 유지하지 못하는 경우에는 Fig. 3(a)와 같이 균열발생으로 인한 pop-in 발생점의 하중 및 Fig. 3(b)와 같이 초기의 기울기 5%선을 연장하여 하

Table 2 Staking and pressurizing method sequence

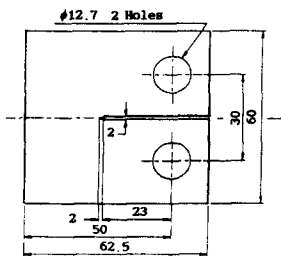
Stacking method Pressure (kgf/cm ²)	[O ₂ /9O ₂] _s	[O/9O] _{2s}
20 → 40 → 80 → 120 → 160 → 200	①	②
20 → 50 → 100 → 150 → 200	③	④
20 → 100 → 200	⑤	⑥
20 → 200	⑦ ⑨	⑧ ⑩

Table 3 Stacking and pressurizing method sequence

Stacking sequence Pressure (kgf/cm ²)	10	10 → 50	20 → 150	20 → 200	20 → 250	20 → 300
[O ₂ /9O ₂] _s	Ⓐ	Ⓒ	Ⓔ	Ⓖ	Ⓘ	Ⓚ
[O/9O] _{2s}	Ⓑ	Ⓓ	Ⓛ	Ⓢ	Ⓩ	Ⓜ

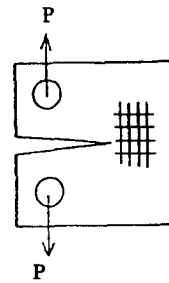


(a)

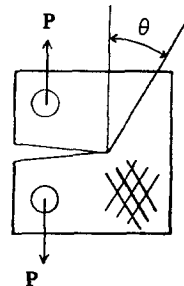


(b)

Fig. 1 Shape and dimension of tensile specimen(a), compact specimen(b)



(a) Rectangle cross laminates



(b) Angle cross laminates

Fig. 2 Shape of rectangle cross and angle cross laminates

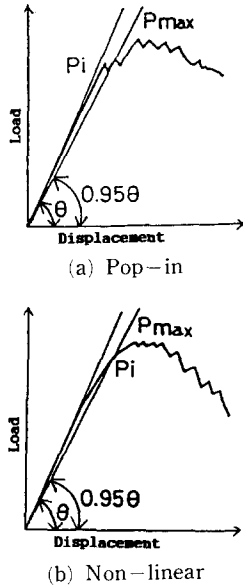


Fig. 3 Load-displacement curve during fracture toughness test

중-변위선과 만나는 점의 하중 P_i 를 식 (1)의 P 에 대입하여 파괴인성치 K_{Ic} 를 구하였다. 1), 2)의 두 종류의 시험편에 대하여 섬유배향각은 $\theta=0^\circ$ 로 하여 식 (1) 및 Fig. 3에 의해 파괴인성치를 구하였다. 탄소섬유 복합재료 적층판에 사용된 기지수지의 유리전이온도(glass transition temperature) T_g 는 자유감쇄형 점탄성 측정장치를 이용하여 측정하였으며, 유리전이온도는 141°C 로 나타났다.

파괴인성시험시의 시험속도는 상온(15°C)의 경우 0.5 mm/min , 50°C 이상의 온도의 경우 1.0 mm/min 로 하였다. 또한, 시험편의 고온분위기 조성을 위한 온도조절은 가열 band(100V), K-type 열전대(RE-40) 및 슬라이닥스 전압조정기(정격용량 5KVA , $0\sim 130\text{V}$) 등이 사용되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장강도의 분포특성

Fig. 4는 Table 2와 같은 가압방법으로 변화시켜 형성한 탄소섬유 복합재료 시험편에 대한 인장시험의 결과이다. 횡축의 번호는 Table 2의 적층방법 및 가압방법에 따른 일련번호를 나타낸 것으로 가압단계수가 감소함에 따라 인장강도는 증가하는 경향을 나타내었다. 인장강도의 산포는 정성적으로

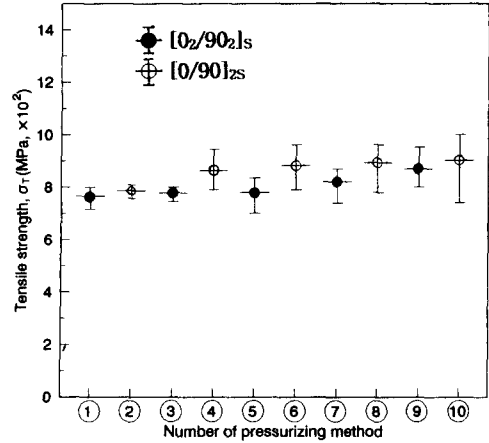


Fig. 4 Tensile strength for $[0_2/90_2]_s$ and $[0/90]_{2s}$ specimen

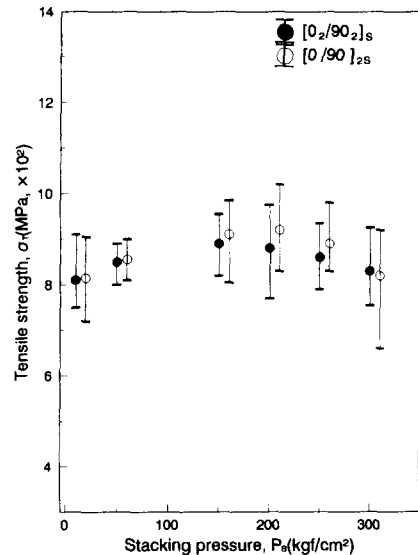


Fig. 5 Relationship between tensile strength and stacking pressure

$[0/90]_{2s}$ 시험편 쪽이 $[0_2/90_2]_s$ 시험편 보다 높게 나타났다. 이와 같은 가압방법에 따른 강도 차이는 다단계 가압의 경우, 성형유지압력 이하의 낮은 압력으로 여러번 가압함으로써 각 층간의 다소 불완전한 접합계면의 형성에 의한 것으로 생각된다. 그리고, 접합계면의 공극(void) 함유를 최소화시키는 방법으로 다단계 가압은 적절하지 못하여 오히려 강도가 저하됨을 알 수 있었다. $[0_2/90_2]_s$ 시험편에 비해 $[0/90]_{2s}$ 시험편의 강도가 비교적 높은 것은 적층구조에 있어서 인장부하시 $[0/90]_{2s}$ 쪽이 주하

중방향인 수직응력에 의한 계면의 전단강도 증가와 섬유층의 엉킴현상 등에 의한 영향에 기인된 것으로 사료된다. 따라서, Table 2와 같은 가압단계 변화에 따른 실험에서는 단단계 방법(성형 초기압력 20 kgf/cm², 성형 유지압력 200 kgf/cm²)이 강도를 향상시킴을 알 수 있었다. Fig. 4에서 9와 10은 Table 2에서와 같이 각각 7, 8과 동일한 조건이지만 실제로 본 조건에서 강도가 높게 되는가를 확인하기 위하여 동일조건에서 한번 더 실험을 행하여 나타낸 것이다. 또한 200 kgf/cm²전후에서의 단단계에 의한 시험편의 강도를 조사하기 위하여 Table 3와 같은 단단계 가압방법으로 성형유지압력을 여러가지로 변화시켜 [0₂/90₂]_s 및 [0/90]_{2s} 시험편에 대해 인장시험한 결과를 Fig. 5에 나타낸다. Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 성형유지압력이 증가함에 따라 강도가 증가하나, 150~200

kgf/cm²의 압력에서 가장 높은 값을 나타낸 후, 250 kgf/cm² 이상에서 감소하는 경향을 나타내어 단단계 가압방법중 양 시험편 모두 초기성형유지압력 20 kgf/cm², 성형유지 압력 150~200 kgf/cm² 일때가 최적조건임을 알 수 있었다.

본 연구에서의 강도에 대한 산포는 2-parameter Weibull 분포⁽⁴⁾를 이용하여 해석하였다. 그 확률밀도함수와 확률분포함수는 다음 식과 같다.

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (3)$$

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (4)$$

여기서, α , β 는 각각 형상계수(shape parameter)와 척도계수(scale parameter)를 의미한다.

Fig. 6 및 Fig. 7은 탄소섬유 복합재료의 단단계 및 단단계 가압방법으로 성형한 Fig. 4 및 Fig. 5의

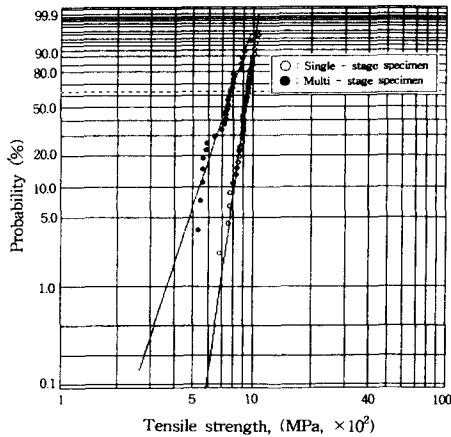


Fig. 6 Weibull plots of tensile strength for [0₂/90₂]_s specimen

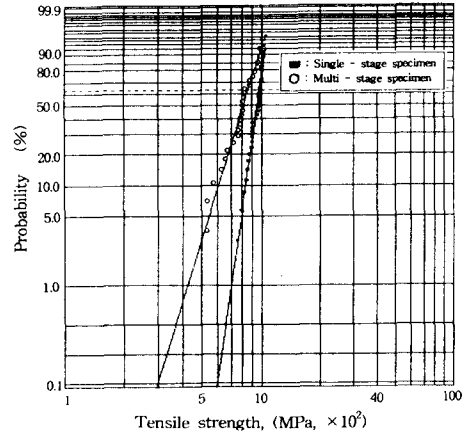


Fig. 7 Weibull plots of fracture toughness for [0/90]_{2s} specimen

Table 4 Statistical properties of tensile strength

Specimen	[O ₂ /9O ₂] _s		[O/9O] _{2s}	
	Single	Multi	Single	Multi
Number of sample	45	26	34	27
Sample mean (MPa)	911	728	943	799
Standard deviation (MPa)	76.0	123.5	74	133.1
Coefficient of variation (%)	8.3	16.9	7.8	16.7
Weibull distribution parameter	α	15.0	6.1	14.0
	β	940	780	980

전체 시험편에 대한 인장시험에 의해 얻어진 강도 값의 신뢰성 평가를 위해 적층방법에 따른 인장강도의 데이터를 식 (4)의 2-parameter Weibull 분포로 나타낸 것이다. 또한, Table 4은 그들에 대한 통계적 데이터와 분포의 파라미터를 나타낸 것이다. 분포의 누적확률은 평균순위법으로 구하였다. 이들 강도의 분포는 2-parameter Weibull 분포(실선)를 따르고 있음을 알 수 있다. 단단계(single-stage)의 경우가 다단계(multi-stage)의 경우보다 분포가 적음을 쉽게 알 수 있고 평균 인장강도는 높음을 알 수 있다. 형상계수는 단단과 다단의 경우 모두 시험편에 관계없이 비슷한 값을 가지고 있으나 인장강도의 평균치는 $[0/90]_{2s}$ 시험편 쪽이 약간 높게 나타났다.

3.2 섬유배향각에 따른 파괴인성치의 분포특성

Fig. 8 및 Fig. 9는 각각 $[0_2/90_2]_s$ 와 $[0/90]_{2s}$ 시험편의 섬유배향각 θ 를 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 로 변화

시킨 CT 시험편에 대한 파괴인성치를 2모수 Weibull 분포로 나타낸 것이다. Table 5와 Table 6은 섬유배향각에 따른 파괴인성치의 결과이다. 이 들에서 알 수 있듯이, 양 시험편 모두 섬유배향각 θ 가 증가함에 따라 파괴인성치는 감소하는 경향을 보이고 있으나, $[0/90]_{2s}$ 시험편의 45° 에서는 다소 증가하는 경향이였다. θ 가 0° 인 경우가 가장 높은 파괴인성치를 나타내었다. 따라서, 적층방법에 관계없이 모두 θ 가 0° 인 경우가 가장 높은 파괴인성치를 얻을 수 있었는데, 이와 같이 섬유배향각 θ 의 증가에 따른 파괴인성의 감소경향은 배열된 섬유가 주하중방향과 경사를 가짐으로써 축방향의 응력에 대한 저항력 약화에 기인하는 것으로 사료된다. 이에 대해 Kageyama 등⁽¹¹⁾은 하중증가에 따라 축방향의 인장력과 면내굽힘하중을 동시에 받는 인장하중의 경우는 섬유배향각의 변화에 따라 인장강도 변화가 크나, 파괴인성시험시의 CT시험에 가해지는 하중은 면내굽힘하중이 지배적이므로 섬유

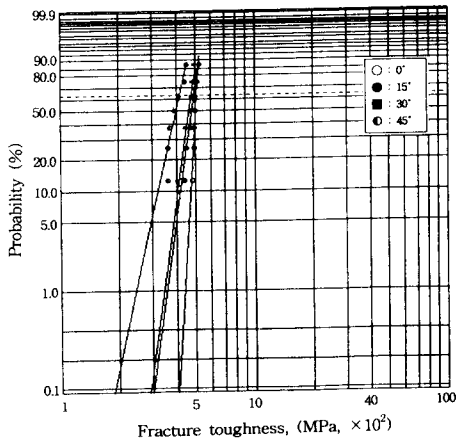


Fig. 8 Weibull plots of fracture toughness for $[0_2/90_2]_s$ specimen

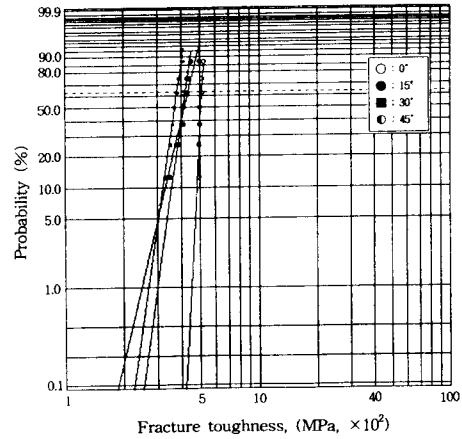


Fig. 9 Weibull plots of fracture toughness for $[0/90]_{2s}$ specimen

Table 5 Statistical properties of fracture toughness ($[0_2/90_2]_s$)

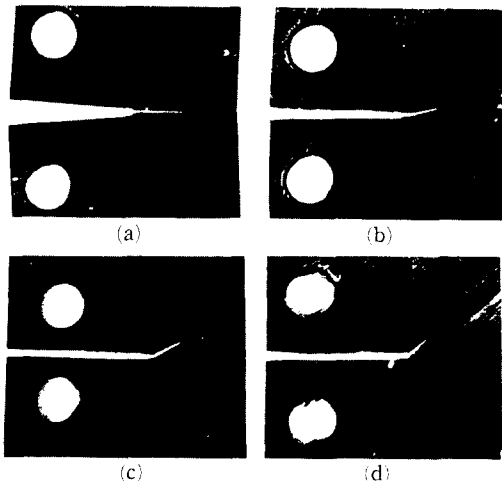
Direction of fiber, θ		0°	15°	30°	45°
Number of sample		7	7	7	7
Sample mean (MPa)		498.0	475.7	456.0	397
Standard deviation (MPa)		12.45	25.5	28.7	34.5
Coefficient of variation (%)		2.5	5.4	6.2	8.7
Weibull distribution parameter	α	32.0	14.4	14.2	8.7
	β	505	490	474	414

Table 6 Statistical properties of fracture toughness ($[0/90]_{2s}$)

Direction of fiber, θ		0°	15°	30°	45°
Number of sample		7	7	7	7
Sample mean (MPa)		503	414	370	407
Standard deviation (MPa)		10.3	46.5	24.4	29.1
Coefficient of variation (%)		2.0	11.2	6.6	7.1
Weibull distribution parameter	α	35.1	8.2	13.6	13.8
	β	510	434	380	420

배향각의 의존성이 없음을 보고한바 있다. 그러나, 본 연구의 파괴인성시험 결과에 의하면, 섬유배향각의 의존성이 확인되었으며 다양한 섬유배향에 의해 파괴인성치를 변화시킬 수 있을 것으로 예측된다. 한편 θ 가 증가하면 파괴인성치의 변동계수도 증가함을 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 $[0/90]_{2s}$ 시험편의 섬유배향각이 15에서는 11.2%로 다소 높은 경향을 얻었다. 한편, 2종류 시험편의 경우에 파괴인성치를 비교해 보면, $[0_2/90_2]_s$ 의 경우가 $[0/90]_{2s}$ 보다 다소 높은 파괴인성치를 가짐을 알 수 있다. 이는 단위층을 2개층씩 적층시킨 쪽이 1개층씩 적층한 시험편 보다 층간박리(delamination)가 용이하기 때문에 응력집중이 감소되어 파괴인성은 증가하는 것으로 생각된다.

Fig. 10은 시험편의 섬유배향각이 0°, 15°, 30°, 45°인 CT시험편에 대하여 파괴인성시험 중에 일정

**Fig. 10** Fracture shape of specimen after fracture toughness test

하중까지 부하시킨 후, 하중을 제거했을 때의 파단 사진이다. 이 그림에서 섬유배향각 θ 가 0인 경우, 균열은 섬유종방향에 직각으로 진전됨을 알 수 있었고, 전단변형에 의한 파괴없이 시편 모두가 평면 파괴를 보여주고 있다. 그러나 θ 가 15°, 30°, 40°인 시험편은 표면층에 섬유배향으로 균열이 진전됨을 알 수 있었다. 이는 하중방향은 모드 I이지만 균열선단에서 전단응력이 발생하여 균열을 경사지게 하는 것에 기인한다고 추정해 볼 수 있다.

3.3 시험온도에 따른 파괴인성치의 분포 특성

$[0/90]_{2s}$ 적층판의 시험편에 대한 파괴인성시험 결과 얻어진 시험온도에 대한 파괴인성치 K_{Ic} 의 분포를 Fig. 11에 나타내었다. Table 7은 파괴인성치 시험의 결과를 정리한 것이며, 2모수 Weibull 분포의 파라미터도 함께 나타내었다. 이들로부터 알

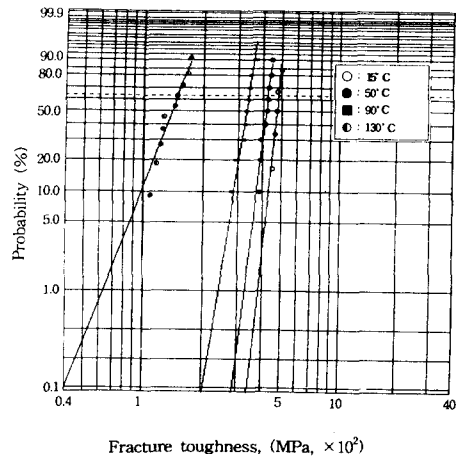
**Fig. 11** Weibull plots of fracture toughness for $[0/90]_{2s}$ specimen

Table 7 Statistical properties of fracture toughness ($[0/90]_{2s}$)

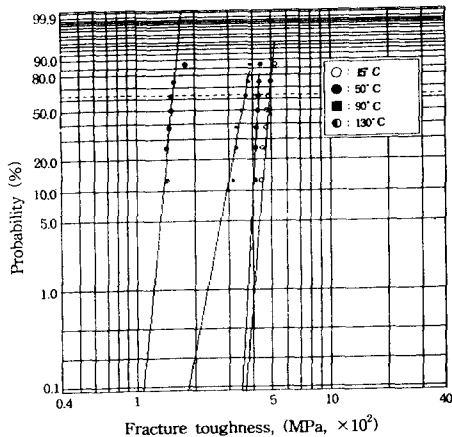
Test temperature		15°C	50°C	90°C	130°C
Number of sample		5	9	9	10
Sample mean (MPa)		472	416	327	139
Standard deviation (MPa)		16.9	20.0	26.3	21.0
Coefficient of variation (%)		3.6	4.8	8.0	15.0
Weibull distribution parameter	α	20.8	17.8	13.7	5.4
	β	480	425	338	149

Table 8 Statistical properties of fracture toughness ($[0_2/90_2]_s$)

Test temperature		15°C	50°C	90°C	130°C
Number of sample		6	7	7	7
Sample mean (MPa)		483	425	351	154
Standard deviation (MPa)		15.0	9.1	26.0	11.0
Coefficient of variation (%)		3.1	2.1	7.4	7.2
Weibull distribution parameter	α	23.3	34.5	10.5	19.5
	β	493	431	364	155

수 있듯이, 시험온도가 상승함에 따라 파괴인성치는 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 유리전이온도 T_g 근방의 온도인 130°C에서는 큰 폭으로 감소하였다. 한편, 이들의 변동계수는 온도상승과 함께 증가하는 경향이였다.

Fig. 12는 $[0_2/90_2]_s$ 시험편에 대한 파괴인성시험

**Fig. 12** Weibull plots of fracture toughness for $[0_2/90_2]_s$ specimen

의 결과 얻어진 시험온도에 대한 파괴인성치 K_c 의 분포를 나타낸 것이다. 그리고 Table 8은 그 결과를 정리한 것이며, 2모수 Weibull 분포의 파라미터도 함께 나타내었다. Fig. 11과 동일한 양상으로 시험온도의 상승에 따라 파괴인성치는 온도에 의존하여 크게 감소하는 경향이였다. 한편, 변동계수도 온도 상승과 함께 증가하는 경향이냐 그 비율은 $[0/90]_{2s}$ 의 것보다 떨어짐을 알 수 있었다. 따라서, 각 시험편에 있어서도 온도변화에 따라 변형 및 파괴기구가 밀접한 관계를 가지는 것으로 판단할 수 있다. 그러므로, 광범위한 온도 범위에서 탄소섬유 복합재료의 변형이나 파괴거동을 관찰하여 고온 분위기의 구조재로 실용화 되려면 탄소섬유의 파괴거동본질은 물론 그 강도분포의 특징을 명확히 하여야 함과 동시에 탄소섬유 복합재료에 함침되는 수지의 유리전이온도를 상승시키는 방향으로 연구 및 개발이 병행되어야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 CFRP에 대하여 인장시험 및 파

파괴인성시험을 행하고, 적층방법에 따른 인장강도의 분포특성과 섬유배향각이 파괴인성치의 분포에 미치는 영향 및 온도변화에 따른 파괴인성치의 통계적 특성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 인장강도의 분포는 2-parameter Weibull 분포에 따름을 알 수 있었다. 단단계 가압 시험편의 경우가 다단계 가압 시험편의 경우보다 분포가 좁으며 평균 인장강도는 크게 나타났다.

(2) $[0/90]_{2s}$ 의 시험편이 $[0_2/90_2]_s$ 의 시험편보다 인장강도가 크게 나타났으며, 형상계수는 시험편에 관계없이 비슷한 값을 보였다.

(3) 파괴인성치의 분포도 2-parameter Weibull 분포에 따름을 알 수 있었고, 섬유배향각이 증가함에 따라 넓게 분포하는 경향이였다.

(4) 시험온도가 상승함에 따라 파괴인성치는 감소하는 경향을 나타내었으며, 특히 $[0/90]_{2s}$ 시험편의 Weibull 분포의 형상계수는 감소하는 경향이였다.

참고문헌

- (1) Amijima, S. and Tanimoto, T., 1974, "Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Plastics," *J. Soc. Mat. Sci.*, Japan, Vol. 23, No. 254, pp. 72~80.
- (2) Reifsnider, K. L., 1982, "Damage in Composite Materials," *ASTM STP 775*.
- (3) Maekawa, Z., Tanimoto, T. and Okabe, N., 1993, "Reliability Evaluation of Advanced Materials," *J. Soc. Mat. Sci.*, Japan, Vol. 42, pp. 1350~1356.
- (4) Nishijima, S., Sakai, T. and Tokaji, K., 1993, "Statistical Property of Material Strength," *J. Soc. Mat. Sci.*, Japan, Vol. 42, No. 478, pp. 888~895.
- (5) Weibull, W., 1951, "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability," *ASME J. Applied Mech.*, Vol. 18, pp. 293~297.
- (6) Coleman, B. D., 1958, "On the Strength of Classical Fibers and Fibre Bundles," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 7, pp. 60~70.
- (7) Harlow, D. G. and Phoenix, S. L., 1981, "Probability Distributions for the Strength of Composites Materials," *Int. J. Fract.*, Vol. 17, pp. 347~372.
- (8) Tenn, L. F., 1981, "Statistical Analysis of Fibrous Composites Strength Data," *ASTM STP 734*.
- (9) 前川 善一郎, 1988, "材料強度の統計的性質," *機械の研究*, Vol. 40, No. 10, pp. 1157~1165.
- (10) Moon C. K., 1989, Ph. D. Thesis, Tokyo Institute of Technology.
- (11) Kageyama, K., Nonake S., Shimamura S. and Fukuda S., 1984, "Fracture Toughness and Acoustic Emission of Carbon-Cloth/Epoxy Composites," *JSME (Part A)*, Vol. 50, No. 454, pp. 1260~1268.