

論文

C형 및 중공 탄소섬유 보강재의 특성 평가

심환보* · 최용재* · 이영석* · 이종일* · 이보성*

Evaluation of C-type and Hollow Carbon Fibers as Reinforcements

H.B. Shim*, Y.J. Choi*, Y.S. Lee*, J.I. Lee* and B.S. Rhee*

ABSTRACT

This paper discussed the role and the effect of C and hollow-type carbon fibers as the reinforcement materials.

The geometries and properties of reinforcement fiber play a very important role in the behavior of the composite materials. Because of their geometric form, C and hollow-type carbon fibers can improve not only its own mechanical properties but also those of the composite materials reinforced with these fibers. In the case of hollow carbon fiber its high torsional rigidity would retard the buckling failure of the composites under compressive loading. And C-type carbon fiber will improve interfacial binding force which solve a delamination, playing a great part in the mechanical properties of fiber reinforced composite materials because it can provide larger interfacial area than round or hollow carbon fiber.

So, this experiment has been made to compare the mechanical properties and frequency characteristics for the UD-epoxy composite materials reinforced with round, C-type or hollow carbon fiber. The results are summarized following as:

1. Although a high molding pressure(40Kg/cm²), numerous micro-tunnels of Hol-CF/EP composites were kept intact.
2. In C-CF/EP composite materials, matrix resin was impartially contributed to a curved area of C-type carbon fiber and had a good wettability. Also, C-CF/EP with HOL-CF reveals better properties than that of R-CF/EP.
3. Damping effects of C-CF/EP and HOL-CF/EP showed about 1.5 times greater value than that of R-CF.

기호설명

F_r = 굽곡강도	ρ = 밀도	d_2 = C형섬유의 외측 상당직경
η, ϵ = 형태계수	d_o = 중공섬유의 외경	A = 섬유의 단면적
E = 탄성률(굽곡)	d_i = 중공섬유의 내경	D = C형섬유의 열림각
t = 섬유 두께	d_1 = C형섬유의 내측 상당직경	L = 섬유길이

* 충남대학교 화학공학과

SA=접촉 표면적(모재-섬유)비	G = 탄성률(비틀림)	하첨자
ξ =반경비	I_p =극 2차 모멘트	R =원형섬유,
CA=섬유의 접촉 표면적	T =비틀림 강성	H =중공형섬유,
		C =C형섬유

초 록

지금까지 섬유강화 복합재료에서 강화 섬유는 그 단면 형태가 원형이 일반적이었다. 본 고에서는 보강섬유로서 비원형인 C형과 중공형 섬유를 에폭시에 보강하여, 이들 섬유에 대한 보강효과와 역할에 대해 실험하였다. 실험 결과 중공형 탄소섬유를 보강한 바 높은 성형압력에도 수많은 미세 중공들이 그대로 유지되었고, 원형 보강재 보다 높은 기계적 물성치를 나타냈다. 이로 인해 단열 및 고강도 초경량을 요하는 구조물에 응용이 가능하며, 중공을 이용한 물질 분리에도 응용이 가능하리라 보여진다.

한편, C형 보강재가 가장 우수한 특성을 보였다. 이는 비원형 섬유를 보강재로 사용함으로써 고성능 복합재의 제조가 가능함을 입증하여 주는 것이다.

1. 서 론

최근 첨단 복합재료(Advanced Composite Materials)란 개념이 우주, 항공등 첨단 기술 분야에서 주목을 끌고있다. 복합재료라 함은 두종류 이상의 재료를 물리·화학적으로 일체화시켜 단일 재료로는 얻을 수 없는 특성을 갖도록 된 인공재료이다. 이는 재료의 요구 성능에 따라 창출 가능함을 뜻한다. 그래서 우주 및 항공기 구조물, 스포츠용품, 여러가지 공업용 자재로 크게 호응을 얻고 있다[1,2]. 이러한 복합재료는 대개 외부응력을 전해주고, 분산시켜주는 보강섬유와 이들 섬유에 응력을 전해주고 보강섬유를 고정해줌으로서 외부의 환경으로부터 섬유를 보호해주는 매트릭스 그리고 보강섬유와 매트릭스의 계면, 세부분으로 대별할 수 있으며 이들 상호간의 특성에 좌우된다. 물성에 특히 영향을 미치는 것은 보강섬유의 성능과 이들 보강섬유의 뛰어난 성능을 최대한도로 발휘하게 해 주는 Interface 상태라 할 수 있다. 복합재료의 역사와 더불어 발전해 오게된 보강섬유들은 그들 나름대로의 장단점을 지니고 있다. 초기 보강섬유로서 유리섬유가 등장했다. 현재에도 제조 비용등의 잇점때문에 이들 섬유의 사용은 계속되고 있다. 그러나 낮은 탄성을 때문에 구조재에 대한 용도로는 제한을 받고 있다. 또한 고분자 보강섬유의 대표적인 것으로 아라미드 섬유는 인장, 탄성을, 진

동흡수성 그리고 인성 등에 있어서는 뛰어난 특성을 갖고 있으나 아라미드 섬유와 고분자 매트릭스의 조합은 습기에 대한 저항성이 떨어지기 때문에 강도를 저하시키고, 햇빛 노출에 약점을 내포하고 있다. 한편 이러한 모든 섬유의 단점을 보완해 주는 가장 균형 있는 물성을 보이는 것이 PAN계 탄소섬유이다[3]. 이와 같은 탄소섬유의 전구체로서 PAN계와 더불어 개발된 Pitch계도 있다. 이중 PAN계 탄소섬유가 Pitch계 탄소섬유보다 탄성을 제외한 여러 물성치에서 우위를 보이고 있다. 그러나 현 시점에서 Pitch계 탄소섬유에 대한 관심이 많아지는 것은 PAN계 탄소섬유 보다 낮은 원료생산비용, 높은 탄소수율 등의 잇점때문이다. 게다가 섬유의 단면 Geometry와 미세구조 등을 보완하는 새로운 공정기술을 이용한다면 Pitch계 탄소섬유의 특성 균형은 어느정도 이루어질 수 있기 때문이다[4]. Hollow형 및 비원형 보강섬유가 특성의 균형을 이룰 수 있는 가장 좋은 접근 방법으로 여러 실험결과 나타났다. 재료 구조역학적 측면에서 봐도 hollow형 탄소섬유는 복합재료 설계에 여러가지 잇점을 가지고 있다. 이방성(Mesophase)인 경우 hollow 및 C-형 탄소섬유와 미세구조적 측면으로 볼때 압축하는 동안에 축 방향 분자 배향을 극대화할 수 있음으로 압축특성(Compressive property), 인성특성(Toughening property)을 보완할 수 있다. 최초로 등장하게된 중공 탄소섬유는 K.H.

Geigle[5]과 G. Niederstadt[6]에 의해 PAN계 섬유를 산화 탄화함으로써 제조되었으며, 이들을 이용한 복합재에 대한 부분적인 연구가 이루어져, 그 가능성을 예측하였다. 또한 충남대학교, 미국의 Clemson 대학, 독일의 Karlsruhe 대학에 의한 공동연구로 C형을 포함한 핏치계 비원형 탄소섬유와 중공 탄소 섬유 자체에 대한 많은 연구들이 진행되고 있으며, 결과로 일반 원형 탄소섬유에 비해 우수한 물성을 보였다[7~9]. 이와 같은 섬유 단면의 기하학적 형태는 섬유자체의 특성향상을 이룰 수 있을 뿐 아니라, 이들을 보강재로 할 경우 매트릭스와의 조합으로 기존의 원형 탄소섬유 보강 복합재에 비해 물성의 상승을 예측할 수 있다. 또한 중공으로 인한 중량 감소로 중량을 중요시하는 구조재, 중공으로의 공기 유통으로 단열재의 효과도 기대할 수 있을 뿐 아니라 물질분리 등에도 응용될 수 있을 것이다. 한편 C형 섬유에 대한 장점으로서 확장된 반응 표면적을 통해서 복합재료 파단에서 일반적으로 직면하게 되는 damage인 계면균열(Interfacial cracking)을 어느정도 극복할 수 있으며, 외부응력을 쉽게 흡수하여 섬유에 전달함으로써 최종 복합재의 물성을 향상시킬 수가 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 핏치계 원형, C형 및 hollow형 탄소섬유를 제조하여 접착력이 좋고 열수축에 의한 결함이 거의 없어 보강섬유의 특성을 최대한 나타내 줄 수 있는 에폭시를 기지재(matrix)로 택하여 이와 같은 기하학적 모양을 한 탄소섬유 강화 에폭시 복합재를 만들어 굴곡강도, 굴곡탄성률, 층간 전단강도(ILSS), 충격강도 등의 기계적 특성과 진동특성등을 측정하고, 파괴 거동을 관찰함으로써 보강효과를 평가하였다.

2. 이론적 고찰

2-1. 등방성 탄소섬유 (Isotropic carbon fiber)

섬유강화 고분자 복합재(Fiber Reinforced Plastic, FRP)의 최종 물성을 좌우하는 것은 monofilament의 물성이라 할 수 있다. Monofilament의 물성치는 이들로 보강된 복합재의 물성을 대략적으로 예상할 수

있게 해 준다. 본 난에서는 보강재로 사용된 원형, 중공형, 그리고 C형에 대한 구조적인 장단점과 물성을 이론 및 SEM사진등 여러 현상에 근거하여 비교 예상하였다.

2-1-1. 원형과 중공형 탄소섬유의 굴곡강도

일반적으로 물체의 강성(Rigidity)은 부피변화를 동반하지않는 형태변화에 대한 저항성을 말하는 것으로 섬유를 단위곡률 반경만큼 굽히는데 필요한 Moment를 굴곡강도(Flexural Rigidity)이라 한다. 이 굴곡특성은 (1)과 같은 식에 의해 표현된다[10~12].

$$F_I = \frac{\eta E t^3}{4\pi\rho} \times 10^{-5} \text{ [gfc}m^2\text{]} \dots\dots\dots (1)$$

식(1)에 근거하여 중공과 원형 탄소섬유를 비교하여 보자. 여기서 탄성률(E)는 중공 및 원형섬유 모두 동일한 성분 원소 및 구조로된 섬유이므로 같은 값을 갖고, 섬도(t)와 밀도(ρ) 역시 같은 값을 가지므로 굴곡 강도는 형태계수(η)에만 의존하게 된다. 즉, 동일한 단면적을 갖는 중공과 원형 탄소섬유의 굴곡 강도는 다음 (2)식과 같은 관계를 갖는다.

$$\frac{F_{Hr}}{F_{Rr}} \propto \left(\frac{d_o^4 - d_i^4}{d_o} \right) / \sqrt{(d_o^2 - d_i^2)^3} \dots\dots\dots (2)$$

만약 여기서 d_o = 50μm, 그리고 d_i = 40μm라 하면, F_{Hr}/F_{Rr} = 2.73으로서 중공형 섬유가 원형섬유보다 2.73배의 Moment를 더 받을 수 있다는 것을 나타내 준다.

2-1-2. 보강재로서 C형 탄소섬유




섬유강화 복합재료에서 응력전달(load transfer), 횡(transverse) 그리고 전단(shear) 특성은 기지재와 보강재 간의 계면특성에 크게 의존한다. 계면에서 존재할 수 있는 결합으로는 ①Chemical bond, ②Electrical bond 그리고 ③Mechanical bond의 3가지 형태로 존재한다. 이러한 계면 결합(interfacial bond)은 복합재의 강도(composite strength), 파단양상(mode of failure), 영률(Young's modulus), 층간 전단강도(interlamina shear strength), 압축강도(Compressive strength), 그리고 임계 섬유 길이

(critical fiber length)등에 영향을 줄 수 있다[13].

본 실험에서 ①, ②항의 결합은 같은 재질의 보강재, 기지재에서 동일하기 때문에 단지 ③항의 Mechanical bond 경우에 대해서만 생각해 보았다. C형 탄소섬유 보강재의 경우 원형 탄소섬유보다 반응 표면적의 증가로 보다 큰 계면 결합력을 유지함으로써 효과적인 응력전달이 가능해질 것이다.

Table 1은 매트릭스와 섬유의 접촉 표면적 계산을 위한 같은 단면적을 갖는 원형과 C형 및 중공 탄소섬유의 모식도이다. 이의 매트릭스와의 실제적인 접촉면적과 예상되는 응력 전달능(load transfer capacity)을 원형 탄소섬유와 비교하여 계산하기 위해[14] 우선, (1)C형 섬유의 열림각(D)이 90°이고, (2)원형과 C형의 단면적이 같으며, (3)섬유와 매트릭스의 접촉이 이상적이라 가정했을 때, C형과 원형섬유의 접촉 표면적의 비(Specific Area, SA)는

Table 1. Theoretical properties of round, hollow and C-type isotropic carbon fibers

			
Flexural strength	1	-	2.73 ^(A)
Contact area	1	2.72 ^(B)	-
Torsional rigidity	1	-	4.56 ^(C)

- Length of fiber : L
- (A)(C) : $A_R = A_{RH}$ $d_o/d_i = 1.25$
- (B) : $A_R = A_C$ $d_2/d_1 = 1.25$, $D = 90^\circ$

$$SA = \frac{CA_C}{CA_R} = \frac{\{3\pi L(d_2 + d_1)/4 + L(d_2 - d_1)\}}{\{3\pi L(d_2^2 - d_1^2)\}^{0.5}/2} \dots \dots (3)$$

여기서 $\xi = d_2/d_1$ 라 하고 식(3)를 정리하면

$$SA = \frac{3\pi(\xi + 1) + 4(\xi - 1)}{2\pi\{3(\xi^2 - 1)\}^{0.5}} \dots \dots \dots (4)$$

내경에 대한 외경의 직경비, $\xi = 1.25$ 이면 $SA = CA_C/CA_R = 2.72$ 로 C형 섬유의 경우가 원형섬유에 비해 접촉면적이 2.72배 큰 값을 가지므로 Pressure (Flexural Strength, stress) = Force(Load)/Area의

관계식에서도 알 수 있듯이 C형 섬유보강재의 경우 동일한 force에 대해 보다 효과적인 응력(stress) 전달 기구가 형성될 것이다. C형 탄소섬유 보강재는 고분자 매트릭스와의 보다 큰 계면 제공으로 접착력을 향상시켜 고강도 복합재의 제조가 가능할 것이다.

2-1-3. 원형과 중공형 탄소섬유의 비틀림 강도

섬유의 비틀림 강성은 섬유의 꼬임에 대한 저항을 말한다. 굽힘강성을 탄성계수로 부터 계산할 수 있는 것과 같이 비틀림 강성은 전단계수(shear modulus)로 부터 계산 가능하다[10, 11]. 다음은 등방성 재료에 대한 비틀림 강도식을 나타내고 있다.

$$\tau = \frac{\epsilon G t^2}{2\pi r} \times 10^{-5} \text{ [g/cm}^2\text{]} \dots \dots \dots (5)$$

t는 섬도로써 원형섬유와 중공섬유의 단면적이 같으면 동일한 값을 갖는다. 또한 같은 재질이므로 탄성률, G도 같다. 그러므로 $\tau \propto \epsilon$ 이고 ϵ 는 형태 계수로서 중공탄소섬유인 경우, $\epsilon_H = \pi(d_o^4 - d_i^4)/32d_o$ 이며, 원형인 경우 $\epsilon_R = \pi d^3/32$ 이므로 굽힘 강성 비교치에서와 마찬가지로 동일한 단면적을 가질 때

$\tau_H/\tau_R = 2.73$ 으로 중공 섬유가 원형 섬유보다 2.73배 큰 비틀림 moment(torsional strength, torque)를 받을 수 있다.

비틀림에 대한 강도와는 별도로 비틀림 각의 크기가 문제가 될 경우가 있다. 즉, 단위 비틀림 각에 대한 Moment(torsional strength, 剛性), T는 극 2차 Moment, I_p 로 비교하면 된다. 단 중공과 원형섬유의 단면이 같다고 가정하면, 중공섬유인 경우, $I_{pH} = (\pi/32)(d_o^4 - d_i^4)$, 원형인 경우 $I_{pR} = (\pi/32)d^4$ 이며, 여기서 $d_o = 50$, $d_i = 40$ 이면 $T_H/T_R = 4.56$ 으로 비틀림 剛性(torsional rigidity, T)은 중공섬유가 원형섬유보다 4.56배 더 크다. 즉, 중공과 원형 탄소섬유가 같은 비틀림 각을 가질때 섬유에 작용하는 비틀림력을 효율적으로 받을 수 있는 것이 중공 탄소섬유이다. 이로써 중공섬유는 비틀림을 받는 재료의 보강재로 효과가 클 것이다. 이들 2-1-1, 2-1-2 그리고 2-1-3의 내용을 정리하면 Table 1과 같다.

이상과 같이 등방성(Isotropic) 원형, 중공형 및 C형 탄소섬유에 대한 여러가지 물성을 쉽게 비교할 수 있다.

3. 실험재료 및 방법

3-1. 재료

본 실험에 사용된 수지는 국도화학(주)의 2관능기를 갖는 범용 YD-128에폭시 수지에 경화제로는 방향족

1차 아민인 1,3-phenylenediamine(MPDA)을 사용하였으며, 보강섬유는 핏치계 등방성 탄소섬유로서 유공(주)의 석유납사잔유(Naphta cracking bottom oil, NCB oil)로 부터 열처리된 핏치로부터 제조되었으며, 그 형태는 원형, C형 그리고 중공의 탄소섬유며, 물성은 Table 2와 같다.

Table 2. Characteristics of carbon fibers used to epoxy system

	T.S[Kgf/mm ²]	T.M[ton/mm ²]	T.R[GN/m ²]	Density[g/cm ³]	Diameter[μm ²]	CS [μm ²]
R-CF	95	5.5	5.1	1.65	22	379
H-CF	110	10.2	12.5	1.65	34(20)	593
C-CF	102	6.2	12.1	1.65	27(11)	358

* T.S : tensile strength, T.M : tensile modulus, T.R : torsional rigidity, C.S : cross-sectional area, The Open degree of C-CF : 90°

3-2. 탄소섬유 강화 복합재의 제조

3-2-1. 프리프레그 제조

보강재가 단섬유로 제조되었기 때문에 시편의 물성을 정확히 얻기 위해서 프리프레그 제조시 많은 주의를 필요로 하지 않으면 안된다. 원형, 중공형 그리고 C형 섬유 각각의 물성을 비교하기 위하여 같은 무게로 천칭한 후, 섬유의 양단에 인장을 주어 일방향을 유지하도록 한 다음, 원료 YD-128 에폭시 수지에 경화제인 m-phenylenediamine을 당량비로 배합하였으며, 희석제로 MEK를 사용하여 수지의 함침이 용이하도록 하였다. 이렇게 배합된 수지를 소형 brush를 이용하여 일정하게 배열된 섬유에 함침시켜 80°C로 유지하고 있는 oven에 20분 정도 정착하여 solvent를 휘발시키는 동시에 함침된 수지를 반경화(B-stage)시켜 제조하였다.

3-2-2. 성형경화

경화조건을 찾기 위해서 위에서 제조한 프리프레그의 수지를 추출하여 DSC로 분석해본 결과 50~80°C 부근에서 발열반응(exothermic reaction), 즉 경화반응이 시작되어 150~160°C 부근에서 가장 격렬함을 보였다. 또한 성형압력 시기는 RFS-II에 의한 Rheology 특성을 분석한 결과 대략 65°C 근처

에서 가장 활발한 유동 특성을 보였다. 이상의 data로부터 8 ply를 150 × 50mm의 molder에 적층하여 hot-press에 의해 최적 점도를 보이는 65°C에서 40 Kgf/cm²의 압력을 가해 80°C, 150°C에서 각각 1시간씩 성형하여 2mm 두께의 복합시편을 얻었다.

3-3. 복합재의 물성

A. 굴곡시험(Flexural test) : ASTM D 790에 의해 diamond wire cutter로 60 × 10 × 2mm의 크기로 시편을 제작하여 2mm/min의 Cross head speed로 3 point bending법에 의해 측정 계산되었다.

B. 층간 전단강도(ILSS) : 전단강도는 ASTM D 2344에 의거하여 20 × 10 × 2mm의 크기로 시편을 만들어 span 길이를 10mm로 하고 위와 같은 방법으로 test 하였다.

C. 충격강도(Impact strength, IS) : 시편의 크기는 6cm × 1cm × 0.2cm로 제작하였으며, 측정은 미국의 TINUS OLSEN을 사용하여 노치를 내지않은 시편에 pendulum-type hammer를 낙하시켜 작용된 에너지와 시편의 두께로서 계산되었다.

D. 밀도측정 : 원형, 중공형 그리고 C형 보강재의 겉보기 밀도를 측정하였다.

E. 진동특성 : Round형, C형 또는 hollow형으로 각각 보강된 복합재에 대한 진동특성은 ONI-SOKI

CF-920 MINI FFT-ANALYZER를 통하여 확인했고, 사용된 시편의 크기는 150 × 50 × 2[mm], 주파수 범위는 0-500[Hz]등의 조건이었으며 시편의 지지 방법은 외팔보(cantilever)의 형태를 취했다. 그리고 감쇠 계수(damping factor)의 계산은 구해진 전달 함수(transfer function)에 근거하여 “3dB 감소법”에 의해 계산되었다.

3-3-1. 현미경 관찰

DS-130, 전자현미경(scanning electronic microscope)으로 각 섬유보강재의 횡중 파단면의 매트릭스 파괴거동 및 C형 보강재의 경우 계면의 상태와 중공인 경우 tunnel 유지여부를 관찰하기 위해서 시편을 gold coating하여 촬영하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 기계적 물성

Table 3는 각각의 섬유로 보강된 복합재의 정적특성 분석결과이다. 3가지 기하학적인 모양(원형, 중공형, C형)을 갖는 섬유 각각의 특성을 비교하기 위해 동일한 무게를 칭량한 후 복합 시편을 제조하였다. 그 결과 중공 탄소섬유의 경우 약 9%의 무게 감량을 보였다.

Table 4(a)은 Intsrton testing machine에 의해

측정된 굴곡강도(Flexural strength) 비교치를 나타내는 것인데 원형(round) 탄소섬유를 보강했을 때 보다 C형, 중공형 탄소섬유를 보강한 경우가 각각 평균 2.5배, 2배 큰 굴곡강도(flexural strength)를 보이는 것으로 나타났다. 그리고 Table 4(b)는 굴곡 탄성률(Flexural modulus) 결과치인데 중공 및 C형이 원형 보강재보다 각각 1.8배, 2배 더 높은 것으로 나타났다. 이는 2장의 이론적 배경에서의 계산 결과에서도 나타나듯이 C형, 중공형(hollow) 탄소섬유 모두 원형 탄소섬유에 비해 더 큰 굴곡강도를 갖기 때문일 것이다. 그리고 C형 보강재가 더 큰 굴곡강도를 보인 것은 C형 섬유 굴곡면으로 매트릭스 수지가 고루 분포되어 서로간의 응력 보완 작용이 있기 때문인 것으로 판단된다. 또한 원형섬유 보강의 경우 보다 매트릭스와의 많은 계면공유로 인해 효과적으로 힘을 전달해줄 수 있기 때문일 것이다.

본 실험은 등방성 탄소섬유(Isotropic carbon fiber)에 대해서만 이루어졌지만 위와 같은 물성들은 섬유내의 분자 구조적 영향으로 이방성(Anisotropic, Mesophase) 탄소섬유를 사용함으로써 명확하고 분명한 특성 상승 효과를 기대할 수 있을 것이다. 특히 C형을 포함한 비원형 및 중공형 탄소섬유의 미세구조는 이방성 섬유의 특성을 한층 더 높일 수 있다.

Table 4(c)에서는 short beam test에 의해 측정된 원형, C형, 그리고 중공형에 대한 계면 강도(interfacial strength)값을 비교하여 나타내고 있다. 복

Table 3. Static analysis of epoxy composites reinforced with Round, hollow or C-CF

Fiber type	Fiber weight[g]	CF/EP weight [g]	CF/EP density[g/cm ³]	Fiber mass fraction
R-CF/EP	15	21.565	1.438	0.696
C-CF/EP	15	22.283	1.486	0.673
H-CF/EP	15	20.072	1.338	0.747

Table 4. Mechanical properties of epoxy composites reinforced with round, hollow and C-type isotropic carbon fibers(comparison values to R-CF/Ep)

Reinforcements	F.S ^(a) (MPa)	F.M ^(b) (GPa)	ILSS ^(c) (MPa)	TFS ^(d) (MPa)	I.S ^(e) (Kgcm/cm ²)
R-CF	127 (1)	0.98 (1)	8.85 (1)	8.3 (1)	9.5 (1)
C-CF	277 (2.18)	2.19 (2.24)	13.9 (1.57)	15.3 (1.84)	21.6 (2.27)
R-CF	236 (1.86)	1.96 (2)	7.39 (0.84)	6.18 (0.75)	13.3 (1.4)

합재의 결합으로 가장 빈번하게 접하게 되는 문제점이 계면 결합(interfacial defect)이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 섬유 표면의 화학적으로 처리하는 방법으로 산화법, 전기 화학적 방법, 그리고 표면 사이징 등의 3가지 기술적 수단을 이용하고 있다. 이들 중 전자의 두 방법은 섬유 표면의 활성화로 표면에 결합을 유발하게 된다. 이로 인해 보강섬유의 물성이 약화되거나, 매트릭스와의 과도한 화학결합으로 계면(interphase)의 상태가 취약해질 우려가 있다. 그리고 후자의 표면 사이징은 여러가지 공정상의 문제를 내포하고 있다.

그래서 본 연구에서는 계면의 효과를 기대할 수 있는 새로운 방법으로 비교적 확장된 표면적을 갖는 C형 탄소섬유를 에폭시 수지에 보강하여 계면에 대한 효과를 실험하였다. 그 결과는 중공형 보다는 원형 섬유를 보강한 경우가 약간 높은 것으로 나타났는데 이는 중공형이 작은 aspect ratio를 갖기 때문인 것으로 보이며, 같은 계면 현상을 보이고 있는 원형, 중공형 탄소섬유 보강재에 비해 C형 탄소섬유 보강재는 보다 큰 층간 전단력을 보였다. 이는 C형 탄소섬유가 이론적 고풍의 접촉면적 비교에서 계산된 것에서 알 수 있듯이 약 2.7배의 층간 마찰계면(Interfacial friction area)을 형성할 수 있기 때문인 것으로 판단된다. 이와같이 보다 향상된 층간 전

단력(ILSS)값은 섬유강화 복합재료에서 흔히 직면하게 되는 계면 균열(Interfacial cracking)의 문제를 화학적 계면처리 없이, 물리적인 계면작용 부여, 즉 C형 섬유를 포함한 비원형 탄소섬유를 보강함으로써 계면현상(interfacial phenomena)을 개선할 수 있다는 것을 의미하며 파괴 거동시 계면에서의 에너지 감소로 파괴 인성(toughness)치를 높이는 결과를 가져올 수 있을 것이다. 층간 전단강도와 같은 개념으로 Table 4(d)의 횡 굴곡강도(Transverse flexural strength) 비교치에서도 일반 원형 탄소 섬유 보강의 경우보다 큰 계면을 유지하고 있는 C형 탄소 섬유보강의 경우가 우수한 특성을 보였다. Table 1(e)의 충격강도치 역시 C형과 중공형 탄소 섬유를 보강한 경우가 우수한 값을 보였다. 이와 같은 특성은 위의 여러가지 특성치 해석과 동일하게 생각된다.

4-2. 현미경 관찰

C형 탄소섬유는 섬유자체의 물성 향상을 위한 하나의 형태 변화로서도 중요하지만 고분자 수지, ceramic 기지 강화 복합재료로서 그 역할을 기대해 볼만하다. Fig.1(a)에서 보듯이 C형 섬유의 축을 따라 파여있는 형상에서도 예상하여 볼 수 있듯이 이러한

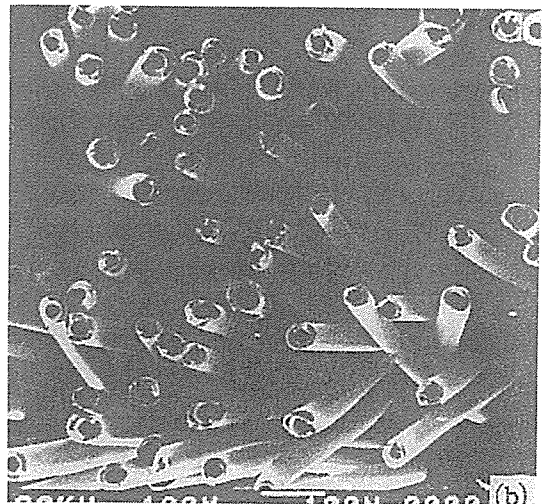
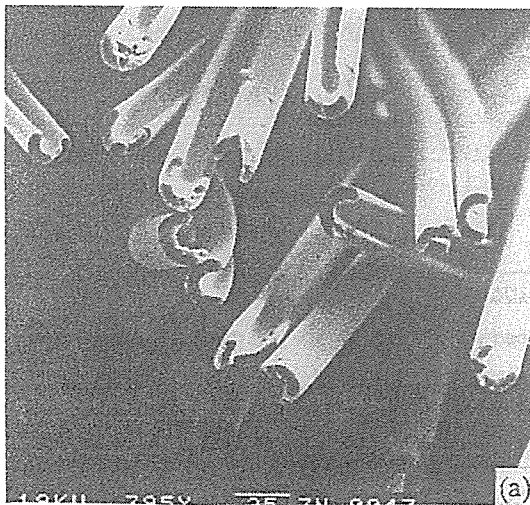


Fig. 1. SEM photos of (a) C-type and (b) Hollow-type carbon fiber bundles.

굴곡면이 매트릭스와 상호 작용으로 인해 복합화 시섬유와 매트릭스 자체만의 혼합 특성만을 나타내는 것이 아니라 계면력 보강의 계면 상승 효과로 최종적인 복합재 물성 향상에 크게 기여할 것이다. 또한 C형 탄소섬유를 CVD 등의 기술적 방법, 표면 산화 저항막 및 매트릭스와의 표면 활성기 도입 코팅으로 고강도, 초고온용 Ceramic 기지 복합재료로의 응용도 가능할 것이다.

Fig. 2는 C형 및 중공형 탄소섬유 보강 에폭시 복합재의 횡단면(transverse cross-sectional area)의 전자 현미경(SEM) 사진이다. C형 탄소섬유는 그의 표면 주름(surface corrugation), 굴곡면(curved area)에 이르기까지 수지의 분포가 고르게 이루어졌으며 계면(interface)의 접촉 양상이 양호한 것을 알 수 있다. 이러한 보강재와 기지재의 우수한 접합은 보강재의 성능을 최대한 나타낼 수 있을 것이다. 일단 섬유강화 복합재료의 보다 강인한 물성은 외부의 응력을 최대한 도로 보강재로 전달해 주어야 한다. 그러기 위해서는 기지재에서 받아들여진 응력을 보강재 쪽으로 보다 효과적으로 집중시켜 주어야 한다. 이러한 응력 전달 메카니즘으로 볼 때 비원형 섬유 보강재는 기지재와 관계하는 표면적이 원형 섬유에 비해 상대적으로 크므로 응력 흡수를 최대로 할 수 있다. 한편 파괴시에도 같은 계면 현상을 보이고 있는 원형 및 중공형 섬유는 기지재와의 pull-out 현상을 보이고 있는 반면, 비원형인 C형 탄소섬유 보강재의 파단면은 Fig. 2(c)에서도 볼 수 있듯이 매트릭스의 파단과 섬유의 파단이 동시에 일어나고 있으며, Fig. 2(b, d, f)의 SEM 사진을 비교했을 때 가장 복잡한 파단면을 나타내고 있는 것으로도 C형 탄소섬유 강화의 영향을 예상해 볼 수 있다. 중공형과 원형 보다는 C형이 복잡한 파괴 메카니즘(failure mechanism)을 나타내고 있다. 이것은 기지재와 보강섬유간에 응력 전달(stress transfer)의 정도 차이를 나타내는 것으로 보인다. 즉, C형 섬유의 횡 파단 전자 현미경(SEM) 사진에서처럼 섬유 축을 따라 섬유의 굴곡면에 의해 점유되었던 수지가 물고기 비늘 모양처럼 파괴된 균열 양상은 섬유와 기지재의 보다 증진된 접착력(adhesive force)을 암시하는 것이며, 또한 보강섬유로의 효과적 응력전달을 보여주는 것이고, 매트릭스와의

강한 비 결합력(specific binding force)으로 인해 섬유의 pull-out 현상이 거의 보이지 않는 것으로 판단된다.

한편 중공 탄소섬유 보강재의 경우 높은 성형압력(40Kgt/cm²)에도 중공 섬유의 수많은 미세 tunnel이 그대로 유지되었으며(Fig. 2(e)) 이는 차후에 활성화된 중공 탄소섬유(activated hollow carbon fiber)를 다공성 탄소 기지에 보강하여 고분자 중공 사막(polymer hollow mambrane)의 응용에서 처럼 물질분리 filter로도 사용할 수 있을 것으로 예상된다. 그리고 중공 섬유의 유통기공으로 단열벽(isolated wall)의 효과도 기대할 수 있으며, 비중이 작고 고강도인 측면으로 중량을 중요시하는 구조재로도 응용이 가능할 것이다.

4-3. 진동특성(Characteristics of frequency)

구조재에 대한 감쇠능(damping capacity)은 진동하에서 작동하는 성분, 기구, 기계를 설계할 때 다른 물리 역학적 특성들과 함께 고려해 주어야 하는 중요한 인자중의 하나이다. 감쇠재료(damping materials)에 대한 응용면은 현대적 기술 진보의 3가지 문제에 크게 제한을 받고 있다. 첫째로 뜻하지않은 진동 그리고 이로 인한 재료파괴의 가속화 위험등을 초래하는 최신의 기계와 power unit의 동적 구조부문의 초 고속화 부품의 등장이다. 만약 강도 특성이 비슷하다면 감쇠능(damping capacity)이 높은 것이 구조재로 유리하다. 들쭉는 빠른 기계 부품으로 설계, 제작된 곳의 진동으로 인한 기계적 물성의 저하이다. 세째로는 초고속화 기계에서 발생될 우려가 깊은 것이 소음의 문제이다[15]. 재료의 내부 마찰, 감쇠(damping)는 기계적 진동에너지를 분산, 감쇠시키는 고체의 능력이다. 기계적 에너지 분산이란 어떤 물체(구조)에 외력이 작용했을 때의 힘을 약화시킨다는 것을 의미하는 것이다. 섬유강화 고분자 재료에서 가장 중요한 damping mechanism은 다음 4가지 형태로서 나타난다[15].

- (1). 기지재(matrix)와 섬유의 점탄성적인 거동에 의한 damping

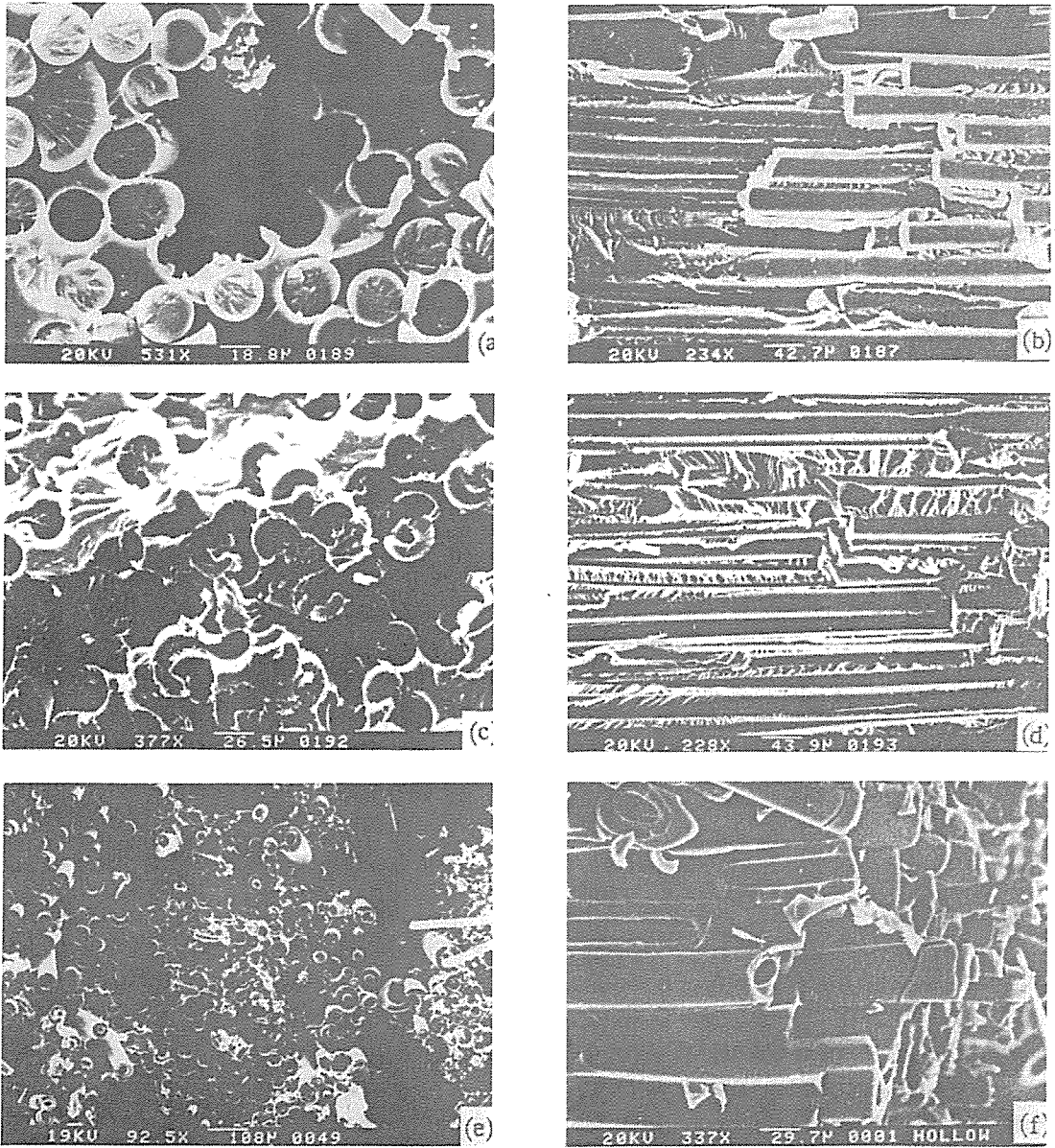


Fig.2. Fracture surface of epoxy composites reinforced with round, hollow or C-type carbon fibers.

Vertical	Horizontal	
(a)	(b)	: Round-CF Reinforced
(c)	(d)	: C-CF Reinforced
(e)	(f)	: Hol-CF Reinforced

(ㄴ). 압축응력(compressive stress) 영역에서 인장 응력(tensile stress) 영역의 반복적인 열흐름에 기인하는 thermoelastic damping

(ㄷ). 섬유와 기지재의 접착되지 못한(unbonded) 영역에서 미끄럼에 기인하는 Coulomb friction에 의한 damping

(ㄹ). composites내에 crack과 delamination 영역에서 발생되는 분산에 의한 damping

이와 같이 다양하고 복잡한 메카니즘을 갖는 재

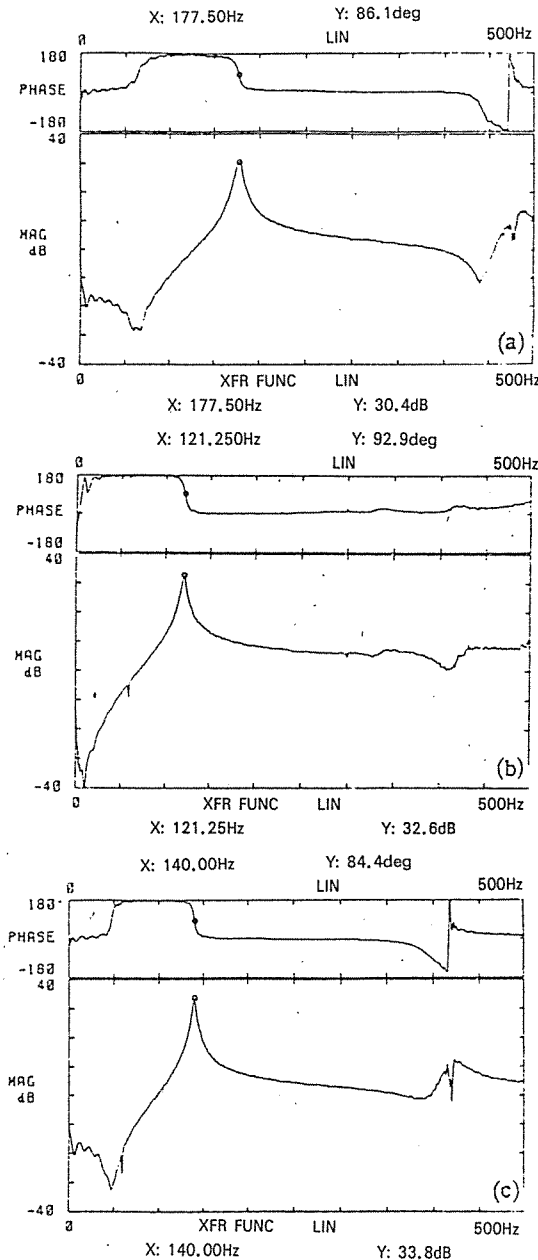


Fig. 3. Transfer function of epoxy composites reinforced with (a) R-CF, (b) Hollow-CF or C-type CF measured by FFT-analyzer.

료에서 damping 효과를 통제한다는 것은 기술적으로 아주 섬세하고 어려운 작업이다. Ronald F. Gibson[16]는 damping의 최적화를 ①섬유와 기지재의 혼성화(hybridization) 개념 도입, ②적층시 섬유의 배향(lamina orientation), 그리고 ③적층순서(stacking sequence)등을 통해서 damping 효과를 제안했다. 그러나 본 실험에서는 섬유 단면의 기하학적인 형태, 즉 C형, 중공형 섬유를 보강했을 때 나타나는 damping효과를 비교하였다. 따라서 이들 섬유 보강재의 진동 특성을 규명하기 위해서 FFT-analyzer를 이용하여 이들 섬유보강재의 진동특성을 시험 확인한 입출력의 전달함수(transfer function)결과를 Fig.3 (a, b, c)에 나타내고 있다. 이 전달함수를 근거로해 “3dB 감소법”에 의해 계산된 damping factor를 Table 5에 나타내고 있다. 이 결과에서 보듯이 hollow형 탄소섬유 보강재가 round 탄소섬유 보강재보다 대략 1.5배 더 큰 값을 나타냈는데 이는 중공 섬유의 hole로 공기의 유동에 의한 점성 저항에 관한 것이며, C형 섬유 보강재도 역시 1.5배 높은 값을 보였는데 이것은 C형 섬유의 매트릭스 수지와외의 보다 넓은 계면제공으로 외부충격에 대한 흡수능(adsorption capability)이 뛰어나기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 핏치계 등방성 중공, C형 그리고 원형 탄소섬유를 제조하였다. 이들 섬유 각각을 열 수축 및 계면에서의 결합등이 가장 적다고 판단되는 에폭시 수지에 복합화하였다. 이들 비원형 및 중공 탄소섬유를 보강한 에폭시 복합체에 대한 기계적 물성 및 진동특성 등을 비교하였다. 이러한 보강섬유의 형태적 요인이 고분자·탄소·세라믹 기지 등의 보강재로서 미치는 효과와 역할에 대해 연구하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 중공 탄소섬유를 보강한 경우 40Kgf/cm²의 높은 성형 압력에도 수많은 미세 tunnel을 그대로 유지하였으며, 이러한 결과는 경량화재로서 뿐아니라 고분자 중공 사막의 응용에서 처럼 다공성 탄소 기지에 복합화 함으로서 물질 분리, 단열 재료, 유기전지, 전

극재료등에 응용될 수 있으리라 본다.

2. C형 섬유 보강시 C형의 굴곡면(curved area)에 이르기까지 수지의 분포가 고르게 이루어 졌으며, 중공섬유 보강재의 경우와 더불어 일반적인 원형섬유보강의 경우보다 향상된 기계적 물성을 얻을 수 있었다. 또한 C형 탄소섬유의 경우 섬유자체의 우수한 강도와 기지재와의 우수한 조합능력에 고온 산화 저항막 도입 방법으로 Ceramic 등의 고강도, 초고온용 복합재의 강화재로 용도를 기대해 볼만 하다. ($M_f \approx 70\%$ 로 일정)

㉠ C-CF/EP와 H-CF/EP 복합재는 R-CF/EP계에 비해 약 2배 정도 더 큰 Flexural Strngnth를 보였다.

㉡ Interlamina Shear Strength는 C형 강화 복합재가 원형, 중공형 강화 복합재보다 약 1.5배 더 높은 값을 보였다.

㉢ Flexural Modulus 값은 원형을 보강했을 때에 비해 중공 및 C형을 보강했을때 각각 2배, 2.3배 향상되었다.

㉣ 충격강도에 있어서도 C형 섬유를 복합화한 것이 원형 및 중공형 섬유를 보강한 것 보다 약 2배 정도 강한 것으로 나타났다.

3. 재료의 피로수명(fatigue life), 인성(toughness), 충격(impact) 그리고 마찰·마모계수(wear, friction coefficient)와 같은 많은 기계적 특성과 깊은 관계를 갖는 감쇠계수(damping factor) 결과치에 있어서도 C형과 중공형 탄소섬유 보강재의 경우가 원형 보강재의 경우보다 큰 값을 보였다.

㉤ 원형 보강재보다 약 1.5배 큰 감쇠계수(damping factor, loss factor)를 보였다.

참 고 문 헌

1. 겸지사, "high-tech 사전" (신소재), 1989, pp 78-95.
2. 최정철, 박익민, "복합재료", 반도출판사, 1990, pp 1-12.
3. John Delmonte, John T. Hoggatt, Clayton A. May, "Fiber-Reinforced Epoxy Composites", Epoxy Resins (Chemistry and Technology 2nd ed.), 1988, pp 885-894.

4. D.D. Edie, E. Fitzer, W. Metzler, B.S. Rhee, "Procedings verbundwerk", 1991, M8.1-8.14.

5. K.H. Geigl, "Studien zur Oberflächenchemie von Kohenstoff-Hohlfaser, Dissertation", Universitat Karlsruhe/Germany, 1979.

6. G. Niederstadt, "The Potential of Hollow Fiber Reinforcement in CFRP for Design of Light Weight Structures", Z. Flugwiss, Weltraumforsch, vol.8, 1981, No.1, pp 30-36.

7. E.G. Stoner, D.D. Edie, J.M. Kennedy, "Mechanical Properties of Non-circular Pitch-based Carbon Fiber", High-Temperature High-Pressure, vol.22, 1990, pp.

8. B.S. Rhee, "New Developments with Pitch-Based Carbon Fiber", High-Temperature High-Pressure, vol.22, 1990, pp 267-274.

9. B.S. Rhee, S.K. Ryu, S.J. In, J.P. Kim, Y.G. Jo, "Mechanical Properties of C and Hollow Carbon Fiber According to the Fiber Thickness", Proceedings of Twentieth Bianual Conference on Carbon, Santa Babara, 1991, pp 306-307.

10. 김상용, 장동호, 최영화, "섬유 물리학", 1982, pp 106-211.

11. 최 학, "재료의 강도", 1978, pp 74-76, 103-115.

12. W.E. Morton, "Physical Properties of Textile Fibers", JOHN WILEY & SONS NEW YORK, pp 399-418.

13. K. Wolf, R.E. Forners, J.D. Memory, and R.D. Gibert, "A Review of Interfacial Phenomena in Graphite Fiber Composites," Chem. and Phys. of Carbon, vol.18, 1982, pp 93-138.

14. 심환보, "중공 및 C형 탄소섬유 강화 에폭시 복합재의 제조 및 특성 비교", 충남대학교 공학석사 학위논문, 1993.

15. Michael B. Bever, "Encyclopedia of Materials Science and Engineering", vol.3, The MIT Press, 1986, pp 2127.

16. Ronald F. Gibson, "Damping Characteristics of Composite Materials and Structures", ASM International, 1990, pp 441-449.