論文

3차원 브레이드에 의한 복합재료의 인장 성질에 관한 연구

이준석* · 강태진*

On the Tensile Properties of 3-D Braided Composite

Joon-Seok Lee* and Tae-Jin Kang*

ABSTRACT

A mechanical tensile model for the three-dimensional braided composite preforms produced by the 4-step process is presented. The yarn path in the analytical model was considered as composing of straight and bending portions in the unit cell. An analysis of load-extension behavior based on the force and energy methods was made to calculated the modulus of a three-dimensional braided preforms and its composites. The effects of yarn orientation angle, preform dimensions, and yarn volume fraction on the tensile modulus of three-dimensional braided preforms and composites are theoretically predicted and compared with experimental results.

요 약

4단계 공정에 의하여 만들어진 3차원 브레이드 보강 섬유물에 대한 역학적 모델을 제시하였다. 이 역학적 모델에서는 보강 섬유물의 기본 단위를 직선 부분과 굽힘 부분으로 이루어져 있다고 가정하였다. 그리하여 3차원 브레이드 보강 섬유물 및 복합재료의 탄성계수를 예측하기 위하여 하중-신장 거동의 분석에 force method와 energy method를 적용하였다. 이때 보강 섬유의 배향각이 변함에 따라 섬유부피 분율도 변하게 되므로 3차원 브레이드에 의한 복합재료의 탄성계수는 배향각의 함수라는 것을 이론적으로 예측하였다. 그리고 보강 섬유의 배향각, 보강 섬유물 단면의 크기, 섬유부피 분율의 변화에 따라 인장성질이 어떤 영향을 미치는가를 이론적으로 예측하였으며 실험치와 비교하였다.

* 정회원, 서울대학교 섬유공학과

Ⅰ. 서 론

여러 소재로 만든 복합재료 중에서도 FRP(Fiber Reinforced Plastics)는 비강도, 비강성을 유지하면서 경량화를 기할 수 있다는 장점때문에 유효한 기능을 발휘하는 재료로써 그 용도는 일반 스포츠 용품에서부터 해양 산업과 항공우주 산업등에 응용되어지는 고성능 구조물에 이르기까지 광범위하게 사용되고 있다. 현재 FRP에 사용되고 있는 보강 섬유물로는 2축 또는 3축 제직물(bi-or tri-axial weaving), 위입 편포(weft-inserted knitting), 필라멘트 와인딩(filament winding), 부직포(non-woven), 브레이드(braiding), 3차원 제직물(3-D weaving) 또는 3차원 브레이드(3-D braiding)등이 있다. 위의 여러 보강 섬유물 중에서 3차원 브레이드 보강 섬유물이 갖는 장점을 보면 다음과 같다.

(1) 실을 목적에 맞게 배열하여서 4단계 브레이드 과정을 적절히 변형시킴으로써, 여러가지 단면의 보강 섬유물을 제작할 수 있다. Ko와 Scardino[1], 또 Popper와 McConnell[2]은 여러 단면 형태의 3차원 브레이드 보강 섬유물의 제조기술에 대해서 소개한 바 있다.

(2) 기존의 적층 복합재료(laminate composite)나 2차원 복합재료는 두께 방향으로 실이 교차되어 있지 않기 때문에 적층의 층간이 약하므로 큰 피로강도와 충격강도가 요구되는 구조물에서는 불충분한 반면에 3차원 브레이드 복합재료는 두께 방향으로 실이 교차되어 있기 때문에 적층의 층간 균열전파를 방지하므로 2차원 적층 보강 섬유물 보다 damage tolelance가 좋고 피로 수명(fatigue life)이 길다[2]. Mayadas, Pastore와 Ko[3]는 스더치 직물 복합재료, 3축 직물 복합재료, 3차원 브레이드 복합재료의 인장 성질과 전단 성질을 비교 연구하였다. 그 결과에 의하면 브레이드 복합재료가 3가지 시편 중에서 가장 큰 파단강도, 탄성계수, 전단강도를 가지며 가장 큰 절단 신장을 보인다고 보고하였다. 본 연구에서 다루는 3차원 브레이드에 의한 복합재료는 Popper와 McConnell[2]등이 연구한 1 사이클 2단계 공정(2-step process)으로 제작할 수 있는 3차원 브레이드와 구별하여 불리는 4단계 공정(4-step process)으로 제작한 3차원 브레이드 보강 섬유물의 복합재료에 대하여 연구하였다. 4단계 3차원 브레이드 보강 섬유물에 의해 만들어진 복합재료에 대한 역학적 성질 및 구조해석에 관하여는 이미 몇편의 논문이 발표되었다. Yang, Ma, Chou [4, 5] 등은 3차원 보강 섬유물로 만들어진 복합재료의 탄성에 대한 이론적인 예측을 하기 위하여 3차원 섬유 구조물에 대한 2가지 모델, 즉 Inter lock cell과 Fiber inclination model을 제시하였다. 첫번째 것은 에너지 해석 방법으로 탄성을 예측하였으며, 두번째 것은 기본단위(unit cell)를 4개의 다른 방향으로 기울어져 있는 일출 방향성 단층(unidirectional lamina)의 집합체로 가정한 것이다. 그래서 이 기본단위의 탄성거동 해석을 위하여 고전적인 적층 해석 방법을 변형하여 생각하였다. 또한 Ko와 Pastore[6]등은 평균 코사인(average cosine) 개념을 도입하여 3차원 브레이드 복합재료의 기하학적 모델을 제시하였으며 이것을 기초로 하여 복합재료의 인장강도를 예측하였다. 한편 Ko[7]는 4단계 3차원 브레이드 복합재료의 섬유 부피 분율과 브레이드를 구성하는 실의 배향각이 복합재료의 강도와 탄성계수에 미치는 영향에 대해서 예측한 바 있다. 또한 실험 논문으로써 Macander[8]등은 4단계 공정으로 만들수 있는 1×1, 3×1, 1×1×1/2F 등 여러가지 패턴의 3차원 브레이드 복합재료에 대해서 인장성질, 굽힘성질, 전단성질 등을 측정하였는데, 위의 세가지 패턴 중에서 3×1이 가장 좋은 인장성질을 가지며, 1×1×1/2F가 가장 좋은 굽힘성질을 갖는다고 보고하였다. 또한 3차원 브레이드 복합재료의 각 변에 존재하는 굽어진 실의 효과를 보기 위하여 하나는 각변을 절단시키고 다른 하나는 각변을 자르지 않고 그대로 실험하여 그 결과를 보고하였다.

본 연구에서는 4단계 3차원 브레이드의 탄성거동을 예측하기 위하여 energy method를 이용하여 초기 탄성계수를 예측할 수 있는 모델을 제시하였고 이 결과를 실험치와 비교하기 위하여 3차원 브레이딩 장치를 설계, 제작하여 여러가지 단면의 시편을 제작 성형하여 측정치와 비교하였다. 본 실험에서 제작한 시편은 4단계 공정으로 만들 수 있는 3차원 브레이드의 여러가지 패턴 중에서 1×1 패턴에 의한

3차원 브레이드 구조물에 국한하였다.

II. 3차원 브레이드 보강 섬유물의 역학적 모델

3차원 브레이드 보강 섬유물은 직교 이방성인 물질로서, 실이 내부에서 대칭적으로 각기 다른 4방향으로 교차되어 있으며, 각 변에서는 대칭적으로 굽어져 다시 내부로 들어가게 된다. 위와 같은 사실로부터 3차원 브레이드 보강 섬유물을 내부와 각변부로 나누어서 단순화한 모델을 Fig. 1과 같이 보였다. Fig. 1. a는 내부에 있는 실로써 실이 브레이드 내부에서 4방향으로 교차되어 직선으로 브레이딩 되는 모양을 단순화 하여 보인 기본단위이고, Fig. 1. b는 브레이드 표면에 있는 실이 굽어져 다시 내부로 들어가는 것을 보인 기본단위이다. Fig. 1. b에서 보인 기본단위의 크기는 Fig. 1. a에 보인 기본단위의 반이고 들어가 있는 실의 길이는 모두 같다고 가정하였다. 이 때 실제 공정에서는 구조물의 축 방향으로 장력을 가한 상태에서 3차원 브레이드 보강 섬유물을 제작하므로, Fig. 1. a에서 4개의 실은 X-Y 방향으로 재밍되어 있고, Fig. 1. b에서도 굽어져 있는 부분이 Fig. 1. a에 교차되어 있는 부분과 재밍되어 있음을 알 수 있다. 그러므로 Fig. 1은 임계각 보다 작은 배향각을 가진 상태에서의 단순화한 모델이며 Fig. 1 b에서 2개의 굴곡점은 서로 재밍되어 있다고 가정하였다.

Fig. 1. a의 구조물은 축방향으로만 인장력을 받는다고 가정하고 Mohr circle을 이용하여 단순해석 방법으로 구한 탄성계수를 취하였다. 이 때 $E_{f,s}$는 구조물내에 있는 직선으로 된 실 부분의 탄성계수이고 $E_{y,t}$는 브레이드를 구성하는 실의 탄성계수이다.

$$E_{f,s} = E_{y,t}\cos^2 r \quad \cdots\cdots (1)$$

Fig. 1. b 모델의 탄성계수는 에너지 방법(Energy method)를 이용하여 구하였다. 에너지 방법[9]을 적용하기 위하여 3차원 브레이드 보강 섬유물을 이루는 실은 다음과 같은 성질을 가진다고 가정한다.

(a) 3차원 보강 섬유물이 인장력을 받아 변형될 때 실 사이에서 발생하는 힘 때문에 실은 압축력을 받게 된다. 실제 3차원 보강 섬유물에서 압축력은 실이 접촉되어 있는 부분에 분포하지만 본 연구에서는 점하중(point force)을 받는다고 가정한다. 이 때 실 사이의 압축력을 V라고 하면, V를 다음과 같이 생각할 수 있다.

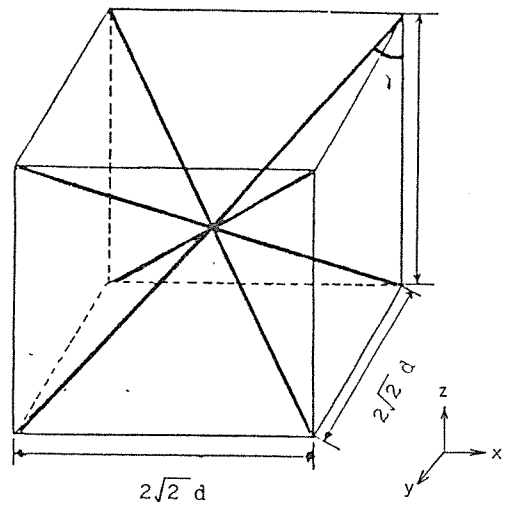

Fig. 1 (a) A simple model of straight part in 3-D braided preform

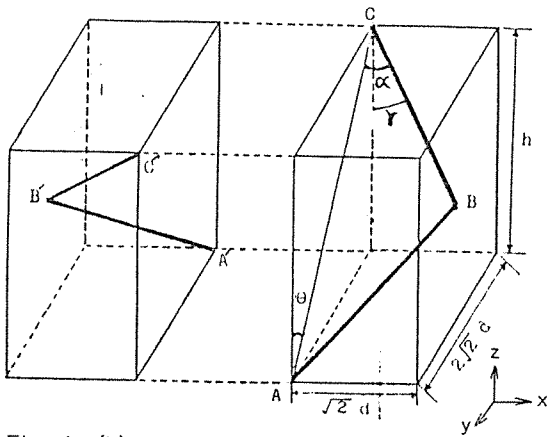

Fig. 1 (b) A simple model of bending prat in 3-D braide preform

$$V = \mu \varepsilon_d \quad \cdots\cdots (2)$$

여기서 $\varepsilon_d \cdot d$는 힘 V가 작용할 때 발생하는 실지름의 변화이고 μ는 압축강성이다.

그러면 이때 압축력에 의해 발생하는 변형에너지, U_c는 다음과 같다.

$$U_c=\frac{V^2d}{2\mu} \quad \cdots\cdots(3)$$

(b) 굽힘강성 B를 가진 실이 굽어져 있을 때 실의 단위 길이당의 변형에너지는 다음과 같다.

$$U_B=\frac{M^2}{2B} \quad \cdots\cdots(4)$$

여기서 M은 굽힘 모우멘트이다.

III. 역학적 모델의 변형에너지가 인장거동에 미치는 영향

단면적이 $\frac{\pi}{4}d^2 \sec\alpha$인 실에 응력 σ가 실의 축방향 AC 또는 A'C' 방향으로 가해져서 실이 변형된다고 하면 실에 작용하는 인장력 f는 다음과 같다.

$$f_1=\frac{\pi}{4}d_1^2 \sec\alpha_1\sigma_1 \quad \cdots\cdots(5)$$

$$f_2=\frac{\pi}{4}d_2^2 \sec\alpha_2\sigma_2 \quad \cdots\cdots(6)$$

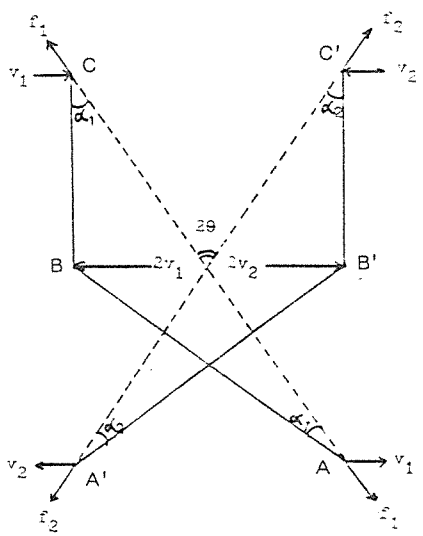

Fig. 2 A simole model of bending part in 3-D braided preform

Fig. 2는 Fig. 1. b에서 보인 실에 작용하는 힘을 보인 자유물체도이다. Fig. 1. b와 같은 3차원 브레이드의 기본단위가 변형될 때, 실의 접촉점 사이에서의 접촉힘 $2v_1$과 $2v_2$가 BB'에서 생기게 된다. 힘의 평형을 고려한다면 $v_1=v_2$이지만 일단은 기호를 분리해 놓는 것이 편리하다.

A점에서 실에 생기는 인장력과 전단력은 Fig. 2에서와 같이 f_1과 v_1으로 분리시킬 수 있다.

적은 변형이라 가정하면, AB에서 A로부터 s거리에 있는 곳에서의 굽힘 모우멘트는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$M=(f_1\sin\alpha_1-v_1\cos\alpha_1)s \quad \cdots\cdots(7)$$

그러므로 AB에서 굽힘에 의한 변형에너지는 다음과 같이 된다.

$$U_{B_1}=\frac{1}{2B_1}\int_0^{\frac{l_1}{2}}(f_1\sin\alpha_1-v_1\cos\alpha_1)^2s^2ds \quad \cdots\cdots(8)$$

다시 (8)식을 적분하면

$$U_{B_1}=\frac{l_1^3}{48B_1}(f_1\sin\alpha_1-v_1\cos\alpha_1)^2 \quad \cdots\cdots(9)$$

이 된다.

그러므로 기본단위에서 굽힘에 의하여 생기는 전체 변형에너지는 다음과 같다.

$$U_B=\frac{l_1^3}{24B_1}(f_1\sin\alpha_1-v_1\cos\alpha_1)^2+\frac{l_2^3}{24B_2}(f_2\sin\alpha_2-v_2\cos\alpha_2)^2 \quad \cdots\cdots(10)$$

굽혀진 곳에서 발생하는 또 하나의 변형에너지는 실 자체의 압축에 의한 것이며 이것의 전체 압축 변형에너지는 다음과 같다.

$$U_c=\frac{2v_1^2d_1}{\mu_1}+\frac{2v_2^2d_2}{\mu_2} \quad \cdots\cdots(11)$$

그러므로 실이 굽혀진 곳에서 생기는 전체 변형에너지는

$$U_T=U_B+U_c \quad \cdots\cdots(12)$$

이다.

이때 실의 접촉점에 작용하는 힘 $2v_1$과 $2v_2$가 작용하는 점은 두개의 실이 재밍된 점과 일치한다.

$$\frac{1}{2}(t_1-d_1)=\frac{1}{2}(d_2-t_2) \quad \cdots\cdots (13)$$

3차원 브레이드 보강 섬유물이 변형될 때 그 폭은 변하게 되지만 재밍된 상태가 계속 유지된다면 그 변화량은 같게 된다.

δ 는 χ 의 변화량을 나타낸다면

$$\delta(t_1-d_1)=\delta(d_2-t_2)$$

또는 $\delta(t_1-d_1)+\delta(t_2-d_2)=0$ ····· (14)

이다.

여기서 Castigliano 이론[10]을 적용하면

$$\delta(t_1-d_1)/2=\partial U_T/\partial(2v_1) \quad \cdots\cdots (15)$$

$$\delta(t_2-d_2)/2=\partial U_T/\partial(2v_2) \quad \cdots\cdots (16)$$

그러므로

$$\frac{\partial U_T}{\partial v_1}+\frac{\partial U_T}{\partial v_2}=0 \quad \cdots\cdots (17)$$

가 된다.

(12)식을 v_1과 v_2에 의해 미분하여 정리하면 다음과 같다.

$$\sum_{i=1,2}\left\{-\frac{l_i^3(f_i\sin\alpha_i-v_i\cos\alpha_1)\cos\alpha_i}{12B_i}+\frac{4v_id_i}{\mu_i}\right\}=0 \quad \cdots\cdots (18)$$

이때 $v_1=v_2=v$ 이므로 (18)식을 v에 관하여 정리하면 다음과 같다.

$$v=\frac{\sum_{i=1,2}\left\{\frac{l_i^3f_i\sin\alpha_i\cos\alpha_i}{12B_i}\right\}}{\sum_{i=1,2}\left\{\frac{l_i^3\cos^2\alpha_i}{12B_i}+\frac{4d_i}{\mu_i}\right\}} \quad \cdots\cdots (19)$$

다음으로 실의 축방향으로의 인장은 $\varepsilon_1=\delta P_2/P_2$ 이다.

여기에 Castigliano 이론을 적용하면 다음과 같다.

$$\varepsilon_1P_2=\delta P_2=\frac{\partial U_T}{\partial f_1} \quad \cdots\cdots (20)$$

(18)식을 f_1에 관하여 미분하여 정리하면 다음과 같다.

$$\varepsilon_1P_2=\frac{l_1^3(f_1\sin\alpha_1-v_1\cos\alpha_1)\sin\alpha_1}{12B_1} \quad \cdots\cdots (21)$$

(21)식에 (19)식 v를 대입하고 (5)식 f_1을 대입하면 다음과 같다.

$$\varepsilon_1=Q/R \quad \cdots\cdots (22)$$

여기에서

$$Q=\frac{\pi}{4}d_1^2\sec\alpha_1\sigma_1\times\left\{\frac{l_1^3l_2^3\sin^2\alpha_1\cos^2\alpha_1}{144B_1B_2}+\frac{l_1^3\sin^2\alpha_1}{12B_1}\times\left(\frac{4d_1}{\mu_1}+\frac{4d_2}{\mu_2}\right)\right\}-\frac{\pi}{4}d_2^2\sec\alpha_2\sigma_2\times\frac{l_1^3l_2^3\sin\alpha_1\cos\alpha_1\sin\alpha_2\cos\alpha_2}{144B_1B_2}$$

$$R=P_2\sum_{i=1,2}\left(\frac{l_i^3\cos^2\theta_i}{12B_i}+\frac{4d_i}{\mu_i}\right)$$

(22)식에서 한쪽 방향으로만 인장력을 준다면 $f_2=0$이다. 또한 같은 실로 3차원 브레이드 보강 섬유물을 제작하면 이때에 2개의 실에 대한 변수가 같게 되므로 $d_1=d_2=d$, $l_1=l_2=l$, $\alpha_1=\alpha_2=\alpha$, $\beta_1=\beta_2=\beta$, $\mu_1=\mu_2=\mu$ 가 되어 식(22)을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\varepsilon_1=\frac{\frac{\pi}{4}d^2\sec\alpha\,\sigma\left(\frac{l^6\sin^2\alpha\cos^2\alpha}{144B^2}+\frac{2l^3d\sin^2\alpha}{3B\mu}\right)}{2P\left(\frac{l^3\cos^2\alpha}{12B}+\frac{4d}{\mu}\right)} \quad \cdots\cdots (23)$$

그러므로 굽혀진 실에 대한 축 방향으로의 탄성계수는 다음과 같이 계산된다.

$$E_1=\frac{2P\left(\frac{l^3\cos^2\alpha}{12B}+\frac{4d}{\mu}\right)}{\frac{\pi}{4}d^2\sec\alpha\left(\frac{l^6\sin^2\alpha\cos^2\alpha}{144B^2}+\frac{2l^3d\sin^2\alpha}{3B\mu}\right)} \quad \cdots\cdots (24)$$

이 때 Fig. 3은 Fig. 1에 보인 기본단위 내의 실이 배향각 γ와 굽힘각 α의 관계를 보인 그림이다.

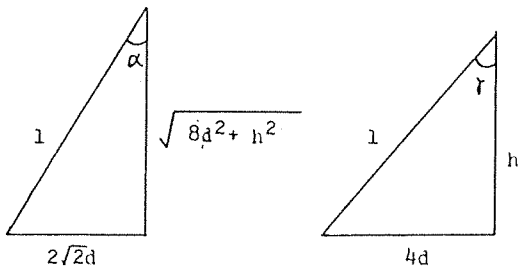

Fig. 3 Relation between orientation angle and bending algle

위 Fig. 3의 관계로부터 l, p, α를 d와 γ를 써서 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$l=4d\,\mathrm{cosec}\ r \quad \cdots\cdots(25)$$

$$p=2\sqrt{2}d\sqrt{2\cot^2 r+1} \quad \cdots\cdots(26)$$

$$\sin^2\alpha=\frac{1}{2}\sin^2 r \quad \cdots\cdots(27)$$

$$\cos^2\alpha=\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\cos^2 r \quad \cdots\cdots(28)$$

또한

$$B=A_y^2 E_b \quad \cdots\cdots(29)$$

$$\mu=A_y E_{t,c} \quad \cdots\cdots(30)$$

여기에서 A_y ; cross-section area of the yarn

E_b ; bending modulus

$E_{t,c}$; transverse compressional modulus

(25)~(30)의 관계로부터 식(24)를 다시 정리하면 탄성계수는 다음과 같이 계산된다.

$$E_1=\frac{3\pi\sin r\sqrt{4\cot^2 r+2}}{8\sec\alpha}\left\{1-\frac{\pi E_b}{8\csc r(2\csc^2 r-1)E_{t,c}+2\pi E_b}\right\}E_b \quad \cdots\cdots(31)$$

E_1은 3차원 브레이드를 구성하는 실이 굽혀진 방향 AC 또는 A′C′ 방향으로의 탄성계수이다. 이것을 3차원 브레이드 보강 섬유물 축방향의 탄성계수로 변환시켜야 한다. 3차원 브레이드 보강 섬유물에서 굽어진 실은 축방향과 θ만큼 기울어져 있으므로 여기에 대칭 적층 복합재료(symmetric angle ply laminate composite)의 이론을 여기에 적용한다 [11].

그러면 3차원 브레이드 보강 섬유물의 굽혀진 실에 의해 인장방향으로 기여하는 탄성계수 $E_{f,b}$는 다음과 같다.

$$E_{f,b}=\left(\frac{3}{8}+\frac{1}{2}\cos 2\theta+\frac{1}{8}\cos 4\theta\right)E_1\times\frac{\sec\alpha}{\sec r} \quad \cdots\cdots(32)$$

이때 표면각 θ와 배향각 γ의 관계는 $\sqrt{2}\tan\theta=\tan\gamma$이므로 이 관계를 이용하여 (32)식을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$E_{f,b}=\left(\frac{2}{\tan^2 r+2}\right)^2 E_1\times\frac{\sec\alpha}{\sec r} \quad \cdots\cdots(33)$$

그러므로 임계각보다 작은 배향각을 가진 3차원 브레이드 보강 섬유물만의 탄성계수 E_f는 참고문헌 [13]에 의한 식과 (1), (33)식을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$E_f=E_{f,s}+\frac{2(m+n-2)}{N}E_{f,b} \quad \text{for } r\le 60° \quad (34)$$

또한 임계각 보다 큰 배향각을 가진 3차원 브레이드 보강 섬유물은 Z축으로만 재밍되어 있음에 따라서 Fig. 1.b의 모델에서 굽힘거동과 압축거동을 고려하지 않아도 된다. 그러므로 임계각 보다 큰 배향각을 가진 3차원 브레이드 보강 섬유물만의 탄성계수 E_f는 식(1)만을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$E_f=\cos^2 r\,E_{x,t} \quad \text{for } r>60° \quad \cdots\cdots(35)$$

이때 3차원 브레이드 복합재료의 인장계수를 단순혼합법칙[13]을 이용하여 구하면 복합재료의 탄성계수 E_c는 다음과 같다. 이때 E_m은 기지물질의 탄성계수이다.

$$E_c = E_f \cdot V_y + E_m (1 - V_y) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (36)$$

(36)식에 임계각 보다 작은 배향각을 가질 때와 큰 배향각을 가질 때를 구분하여 참고문헌[13]의 섬유부피 분율에 관한 식과 (1), (34) 및 (1), (35)식을 각 경우에 따라 대입하여 구하면 3차원 브레이드 복합재료의 탄성계수는 다음과 같다.

$$E_c = \{\cos^2 r E_{y,t} + \frac{2(m+n-2)}{N}\left(\frac{2}{\tan^2 r + 2}\right)^2 \left(\frac{3\pi \sin r \sqrt{4\cot^2 r + 2}}{8 \sec r}\right) \times \left(1 - \frac{\pi E_b}{8 \csc r (2\csc^2 r - 1) E_{tc} + 2\pi E_b}\right) E_b\} \times \frac{\pi}{8} \sec r + \left(1 - \frac{\pi}{8} \sec r\right) E_m \quad \text{for } r \leq 60° \quad \cdots\cdots (37)$$

$$E_c = \cos^2 r E_{y,t} \times \frac{\pi}{2} \cos r + \left(1 - \frac{\pi}{2} \cos r\right) E_m \quad \text{for } r > 60° \quad \cdots\cdots\cdots (38)$$

IV. 실 험

IV—1. 시 료

복합재료의 성형에 사용된 섬유물질은 2840 데니어, 1333 필라멘트, 무연의 다섬도사인 Kevlar 49를 사용하였으며 Kevlar 49 하나의 필라멘트 물성은 다음과 같다.

지름 : 0.0129mm
밀도 : 1.44g/cm³
탄성계수 : 34.8GPa
굽힘계수 : 29.4GPa
압축계수 : 0.16GPa

기지물질로서는 범용 에폭시 수지(IPCO 2434)를 사용하였고, 복합재료 성형시 에폭시 수지를 경화시키기 위해 경화제로는 IPCO 2347을 사용하였으며, IV-3의 성형조건으로 성형한 후의 물성은 다음과 같다.

밀도 : 1.12g/cm³
인장계수 : 1.32GPa

그리고 성형시 에폭시 수지가 압축 성형틀에 압착되는 것을 방지하기 위하여 MS-136 이형제(miller-stephenson chemical company, Inc., U.S.A.)를 사용하였다.

IV—2. 3차원 브레이딩 장치

3차원 브레이드 보강 섬유물을 만들기 위하여 Fig. 4의 브레이딩 장치를 제작하였으며, 3차원 브레이드 보강 섬유물을 성형하기 위하여 50mm×25mm×200mm 크기의 압축 성형틀을 제작하였다.

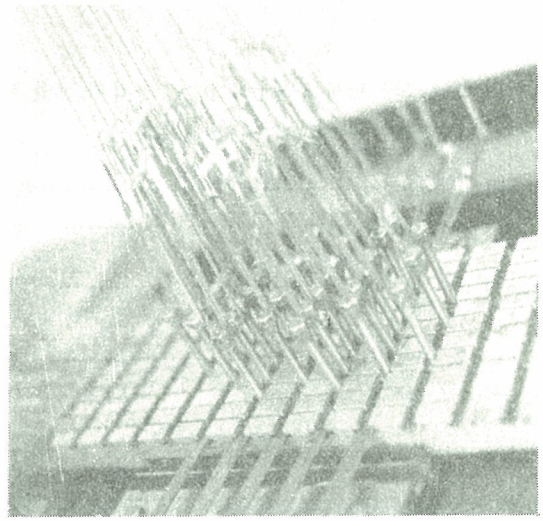

Fig. 4 3-D braiding machine constructed in this study

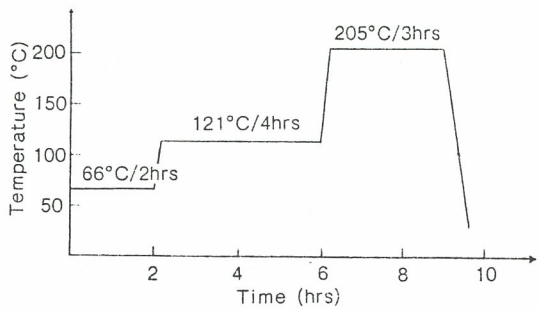

Fig. 5 Cure cycle

IV-3. 성형조건

에폭시 수지와 경화제의 무게 비율은 100 : 7.5로 하여 Fig. 5에 보인 성형조건으로 3차원 브레이드 복합재료를 성형하였다.

이때 첫 단계와 두번째 단계는 성형틀을 이용하여 통풍건조기(Mechamical Covection Oven)에서 성형-건조하였으며 세번째 단계는 건기조(Electric high muffle furnace)에서 건조하여 성형하였다.

IV-4. 3차원 브레이드 보강 섬유물의 차수 및 표면각 측정

3차원 브레이드 보강 섬유물의 두께나 폭은 배향각에 관계없이 실이 배열되어지면 크기는 일정하다. 그래서 본 실험에서는 브레이드 장치를 제작된 3차원 브레이드 보강 섬유물을 장치에 매달려 있는 상태에서 두께와 폭을 측정하였다. 또한 표면각은 Projection를 이용하여 측정하였는데 Projectina에 나타난 시편의 형태는 Fig. 6과 같다.

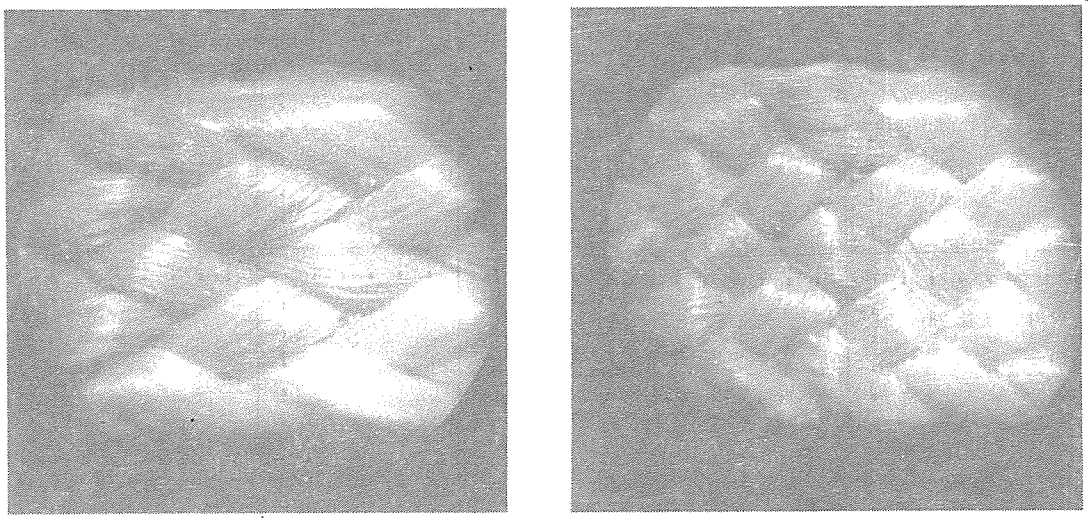

Fig. 6 Projectina photographs of the surface of 3-D braided preforms

IV-5. 인장실험

3차원 브레이드 보강 섬유물만의 인장실험은 시편의 양끝에 사포(200)를 붙여 인장 시험기의 jaw에서 시편이 미끄러져 빠지는 것을 방지하였으며, 3차원 브레이드 복합재료의 인장실험은 Fig. 7과 같이 ASTM D 3039-76의 방법에 준하여 하였다[14, 15].

이렇게 준비한 3차원 브레이드 보강 섬유물 및 복합재료를 INSTRON Model 1125로 측정하였으며, 이때 챠트 속도는 10mm/min, Cross head 속도는 1mm/min로 하였다.

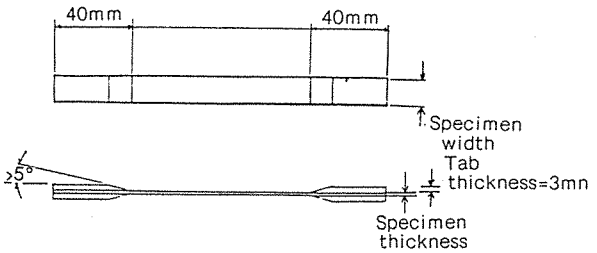

Fig. 7 Tensile test specimen

V. 결과 및 고찰

2차원 적층 복합재료의 파괴는 기지의 균열, 강화 섬유와 기지의 접착분리, 강화 섬유의 파단등과 같은 여러가지 파괴현상들이 복합적으로 결합되어 발생하며 강화섬유를 가로지르는 섬유의 횡방향 파단, 단층을 가로지르는 층내 파단, 그리고 단층과 단층 사이의 경계면에서 발생하는 층간 파단 등으로 구분된다. 특히 강화 섬유보다 훨씬 낮은 하중지지 능력을 가진 층간면은 적층구조물에서 가장 취약한 부분으로 재료 자체가 갖는 취성등의 영향과 결부되어 급작스러운 균열진전을 유발한 가능성을 내재하고 있다. 그러나 3차원 브레이드 복합재료는 두께 방향으로 섬유가 교차되어 있어서 적층의 층간 파단이 발생하지 않음에 따라서 하중에 대해서 수직방향으로 쪼개지지 않은 상태로 파단된다. Fig. 8은 3차원 브레이드 복합재료의 파단된 모습을 보여준 사진이다.

Fig. 9~Fig. 14는 각기 다른 단면을 가진 3차원 브레이드 보강 섬유물 및 복합재료에 대해서 배향각을 달리하였을 때에 인장거동에 미치는 영향에 대해서 이론값과 실험값을 비교하여 나타낸 그림이다. 이때 배향각이 클 때는 보강 섬유의 단면이 이형

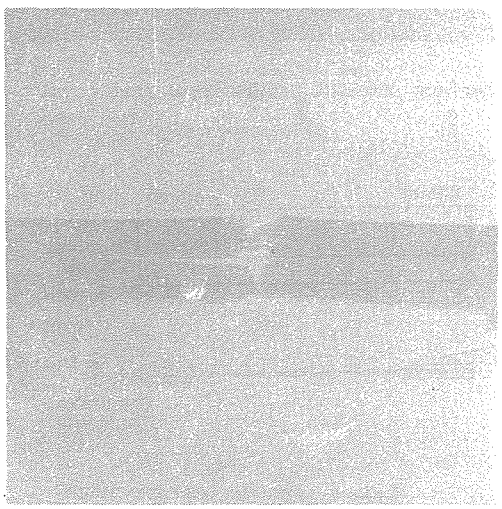

Fig. 8 photograph of specimen showing ultimate failure of 3-D braided composite under longitudinally tensile loads

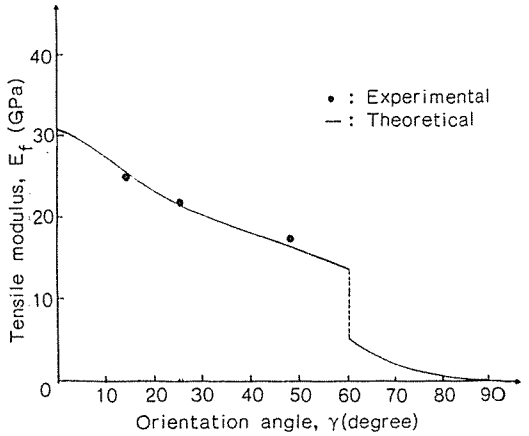

Fig. 9 Effect of yarn orientation angle on tensile modulus of three dimensional braided 2x6 slab preform

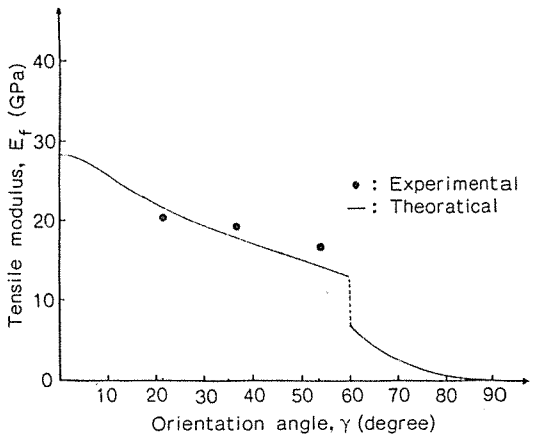

Fig. 10 Effect of yarn orientation angle on tensile modulus of three dimensional braided 3x5 slab preform

단면으로 변함에 따라서 섬유 부피 분율에 대한 이론값 보다 측정값이 커짐에 따라 탄성계수 역시 이론값 보다 큰 값을 갖는다고 예측할 수 있다.

또한 Fig. 9~Fig. 14에서의 이론값은 Macander[8] 등이 각 변의 효과를 알아보기 위하여 실험한 결과와 잘 일치한다. Macander의 실험 논문에 의하면 각 변에 굽어져 있는 실이 인장거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 각 변을 자른 시편과 각 변을 자르지 않은 시편에 대한 인장거동을 실험한 결과 각 변을 자른 시편의 인장성질이 50% 감소함을

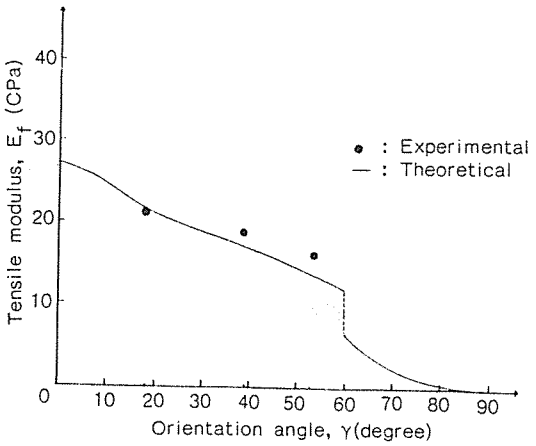

Fig. 11 Effect of yarn orientation angle on tesile modulus on three dimensional braided 4x5 slab preform

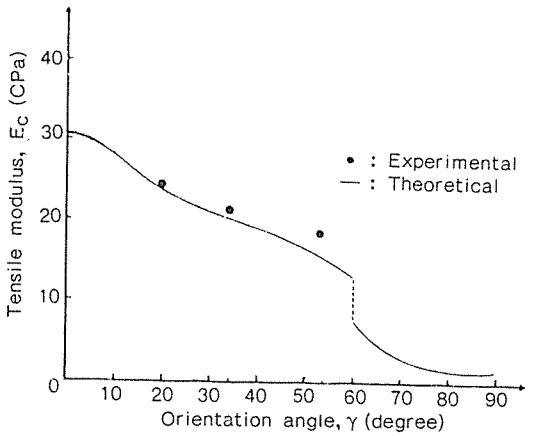

Fig. 12 Effect of yarn orientation angle on tensile modulus of three dimensional braided 2x5 slab composite

보인다고 보고하였다. 그런데 Macander가 실험한 시편의 크기와 배향각에 비추어 볼 때 본 이론에서도 각 변의 효과를 고려하지 않는다면 50% 정도의 감소가 있음을 알 수 있다. 또한 기존의 2차원 복합재료를 설계할 때 배향각과 부피 분율이 독립변수로 작용하지만 3차원 브레이드 보강 섬유물을 제작할 때 배향각이 변함에 따라서 부피 분율도 변하게 되므로 인장거동에 영향을 주는 요소는 단지 배향각에 의해서 결정될 수 있다고 말할 수 있다.

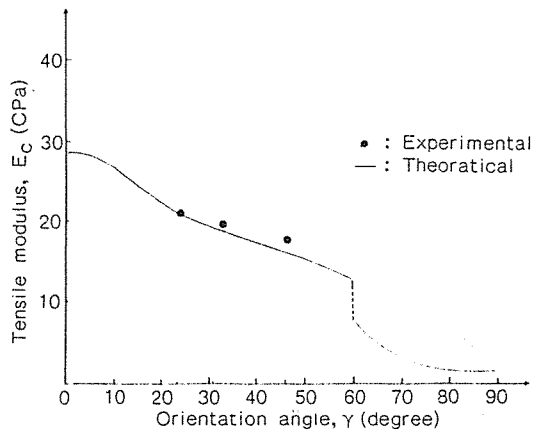

Fig. 13 Effect of yarn orientation angle on tensile modulus of three dimensional braided 3x5 slab composite

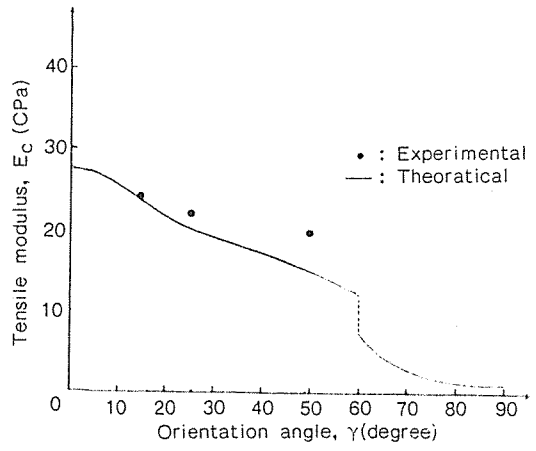

Fig. 14 Effect of yarn orientation angle on tensile modulus of three dimensional braided 4x5 slab composite

VI. 결 론

4단계 공정 3차원 브레이드 보강 섬유물을 구성하는 실의 배향각 변화 및 단면의 크기의 변화가 브레이드 인장 성질에 미치는 영향을 규명하기 위하여 여러 단면의 4단계 1×1 패턴 3차원 브레이드 보강 섬유물 및 복합재료를 여러 배향각에 대해서 인장실험을 하여 이론치와 비교한 결과 다음과 같은 결론

을 얻었다. 3차원 브레이드 보강 섬유물 및 복합재료의 인장 특성은 2차원 보강 섬유물 및 복합재료와는 달리 배향각만의 함수라는 것을 이론적으로 구해내었으며, 단면의 크기가 작을 때나 각 변의 길이에 대한 비율 λ 가 작을수록 인장성질이 좋아지며, 각 변의 효과가 매우 큼을 이론적으로 제시하였다.

후 기

본 연구는 1988년도 문교부 첨단공학(신소재 분야) 연구비 지원으로 이루어진 것으로 문교부 당국에 깊은 감사를 드리는 바입니다.

참고문헌

1. F.K. Ko and F.L. Scardino, Magnaweave Multi-Dimensional Fabrics; Structure, Properties and End Uses, Texfile Technology Forum, 1982.
2. P. Popper and R. McConnell, A New 3-D Braid for Integrated Parts Manufacturing and Imporved Delamination Resistance -The 2-Step Process, 32nd International SAMPE Symposium and Exhibition, 1983, p.92.
3. A. Mayadas, C. Postore and F.K. Ko, Tensile and Shear Properties of Composites by Various Reinforcement Concepts, 30th National SAMPE Symposium, March 1985, pp.1284-1293.
4. C. Ma, J. Yang and T. Chou, Elastic Stiffness of Three-Dimensional Braided Textile Structural Composites, ASTM STP 893, Composite Materials; Testing and Design, American Society for Testing Materials, Philadelphia, 1986, pp.404~421.
5. J. Yang, C. Ma and T. Chou, Fiber Inclination Model of Three-Dimensional Textile Structural Composites, Journal of Composite Materials, Vol. 20, September 1986, pp. 472~483.
6. F.K. Ko and C.M. Pastore, Structure and Properties of an Integrated 3-D Fabric for Structural Composites, Recent Advances in Composites in the United State and Japan, ASTM STP 864, 1983.
7. F.K. Ko, Tensile Strength and Modulus of a Three-Dimensional Braid Composite, Composite Materials; Testing and Design(Seventh Conference), ASTM STP 893, Philadelphia 1986, pp.392~403.
8. Macander, A.B., Crane, R.M., and Camponeshi, Jr. E. T., Fabrication and Mechanical Properties of Multi-dimensionally(X-D) Braided Composite Materials, Composite Materials; pp. 422~443.
9. G.A.V. Leaf and K.H. Kandil, The Initial Load-Extension Behavior of Plain-Woven Fabrics, Journal of Textile Institute 71, 1981, pp.1~7.
10. T.Y. Yang, "Finite Element Structural Analysis", Prentice-Hall, Inc., 1986, pp.54 ~63.
11. S.W. Tsai and H.T. Hahn, "Introduction to Composite Materials", Technic Publishing Co., 1980, pp.115~164.
12. 이준석, 강태진, 3차원 브레이드 보강 섬유물의 기하학적 구조에 관한 연구, 한국 섬유공학회지, 준비중.
13. R.M. Jones, "Mechanics of Composite Materials", Scripta Book Co., 1975, pp.31 -84.
14. Leif A. Carlsson and R.B. Pipes, "Experimental Characterization of Advanced Composite Materials" Prentice-Hall, New Jersey, 1986, pp.55-65.
15. Annual Book of ASTM Standard, Tensile Properties of Fiber-Resin Composites, American Society for Testing and Materials Philadelphia, 1979, pp.740-745.