

# 브레이딩 \*

이 준 석

영남대학교 섬유패션학부 부교수

## 1. 서 론

브레이딩(brading)은 간단하고 유용하게 사용될 수 있는 섬유공정중의 하나이며 브레이드 구조물은 높은 비틀림 강성과 높은 damage tolerance를 가지고 있는 장점을 가지고 있다. 브레이드 구조물을 이용하여 복잡한 형태의 재료를 만드는 기술은 복합재료 프리프레그(prepreg)를 만드는 공정을 변형하여 생산할 수 있다. 2차원 브레이드 구조물에서 3차원 브레이드 구조물로 확대는 높은 내충격성을 가지면서 복합재료 구조물을 형상 그대로 만들 수 있는 장점을 살릴 수 있다.

브레이드 제조 방법은 둘 또는 그 이상의 종류의 실이 일체형 구조를 형성하도록 사선방향으로 교차시킨

다. 브레이드 구조물은 형성되는 과정이나 실이 interlace되는 방법에서 직물 또는 편물과는 매우 다르다. 이에 대한 자세한 사항을 Table 1과 Figure 1에 직물, 편물, 브레이드에 대한 것을 비교하였다.

브레이드 구조물 및 제조 방법은 filament winding과 많은 유사점을 가지고 있다. 일반 실, 프리프레그 실, tape, tow 등이 모두 사용될 수 있고, filament winding처럼 다양한 형태로 만들 수 있으며, 섬유 배향각이나 섬유 부피분율을 변화를 주어 맨드릴이

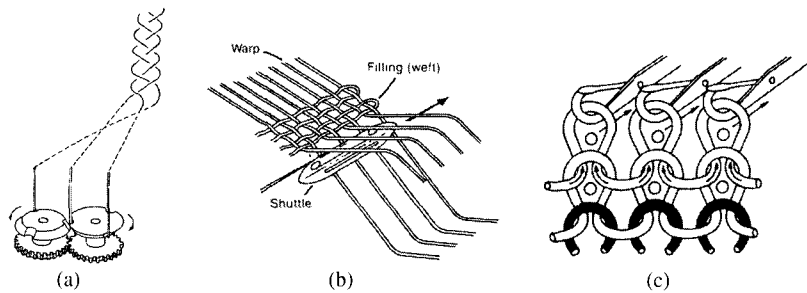


Figure 1. Fabric techniques; (a) braided, (b) woven, (c) knitted.

Table 1. A comparison of fabric formation techniques

	Braiding	Weaving	Knitting
Basic direction of yarn introduction	One(machine direction)	Two(0°/90°) (warp and fill)	One(0° or 90°) (warp or fill)
Basic formation technique	Intertwining (position displacement)	Interlacing (by selective insertion of 90° yarn into 0° yarn system)	Interlooping (by drawing loops of yarns over previous loops)

\*Frank K. Ko, Engineered Materials Handbook, COMPOSITES, "Braiding", pp.519-528, ASM International, 1987.

나 회전하는 구조물 위에 브레이딩할 수 있다. 반면에 브레이딩 제조방법은 filament winding처럼 높은 섬유부피분율을 가지는 구조물을 만들 수는 없지만 필라멘트 와인드 프리폼보다 훨씬 복잡한 형태(예리한 곡률)의 구조물을 만들 수 있다. 또한 브레이딩사가 교차되면서 만들어지는 구조는 높은 구조적 일체성을 부여하여 주고, 따라서 취급하기가 용이하고 다른 재료와 결합하기 쉬우며 손상저항이 매우 강한 특성을 가지고 있다. 필라멘트 와인드 구조물은 hoop( $90^\circ$ ) 방향으로 보강효과를 보이는 반면에 3축 보강(tri-axial) 브레이딩의 경우에는 longitudinal( $0^\circ$ ) 방향으로 보강효과를 줄 수 있다. McDonnell Douglas사에서 수행한 연구에 따르면 브레이딩 복합재료를 만드는 비용이 노동력 감소와 디자인의 단순화에 의하여 필라멘트 와인드 복합재료를 만드는 비용의 56%가 소요된다고 보고하였다 [1]. 3차원 브레이딩 복합재료를 사용하면 필라멘트 와인드 복합재료나 레이업 복합재료에서 발생하는 층간 파괴현상을 방지할 수 있을 뿐만 아니라 라미네이트 복합재료의 낮은 층간 성질을 방지할 수 있다.

브레이딩 제조방법은 가장 오래된 섬유제품 제조 방법 중 하나이다. 브레이딩 구조물은 조그마한 장식용에서부터 고중량에 견딜 수 있는 로프까지 매우 많은 특화된 적용분야에서 사용되어져 왔다. 최근에는 봉합사에서부터 고압에 견딜 수 있는 호스의 보강재료로 사용되고 있다. 브레이딩 구조물은 높은 비틀림강도와 굽힘강도, 높은 마찰저항이 요구되어지는 곳에 사용되어져 왔다. 반면에 브레이딩 구조물은 폭 방향으로 물성이 약하고 낮은 생산성때문에 아직까지도 직물, 편물, 부직포와 같이 널리 사용되지 못한 것도 사실이다. 과거로부터 브레이딩 구조물을 섬유제품 또는 의류로 많이 사용하지 않았기 때문에 브레이딩 구조물 및 브레이딩에 대한 연구나 저서들도 매우 미약한 편이다. 1930년대에 수공예 작품으로 브레이딩 구조물에 대하여 언급한 출판물[3]이 있고, 1940년대에 W. J.

Hamburger가 브레이딩을 공업적 구조물로 처음 다루었으며[4], 여기에서 브레이딩 구조물의 성능에 관계한 기하학적 요소에 대하여 언급하였다. 1950년대에 D. Brunnschweiler가 tubular 브레이딩 구조물의 제조과정, 기하학, 인장성질 등에 대한 언급을 하였다[5,6]. 1960년대 초에 W. A. Donglass가 브레이딩 기계 및 제조공정에 대한 책자를 발표하였으며[7], 독일에서 브레이딩 구조물의 공정인자와 관련하여 브레이딩 제조 기술의 발전에 대한 책자가 발행되었다[8,9]. Ciba-Geigy에서는 브레이딩 제조에 대한 역사적 발전과 브레이딩 구조물의 응용분야 및 제조방법에 대한 책자를 발간하였다[10]. 하지만 1970년대 후반부까지는 브레이딩 구조물에 대하여 공학적 접근이 철저하게 이루어지지 않았으며 1977년에 McDonnell Douglas사의 연구원이 일체형 구조물을 생산하는데 생산비를 절감할 수 있는 복합재료 프리폼으로 브레이딩 구조물을 사용할 수 있다고 보고하였다[11], 이와 비슷한 시기에 Phoenix사가 tubular 브레이딩 구조물의 구조역학에 대한 첫번째 논문을 발표하였으며[12], C. W. Evans는 압력호스에 대한 브레이딩 구조물과 브레이딩 제조공법에 대한 연구논문을 발표하였다[13]. 1980년대부터 브레이딩 구조물에 대한 연구의 대부분은 복합재료와 연관된 것이었다[1,11,14,15]. 3차원 브레이딩 제조공법에 대한 지대한 관심을 가지면서 많은 연구를 하기 시작하였으며 층간 분리 문제라는 관점과 원하는 형태 그대로 제작할 수 있는 가능성에 대한 관점에서 3차원 브레이딩에 대한 연구논문이 적용분야[16], 제조공정 연구와 기하학적 구조[17], 구조분석[20], 물성분석[19] 등에 관하여 본격적으로 발표되었다. 위에서 브레이딩 구조물과 브레이딩 제조공법에 대한 문헌을 시대적으로 간략히 언급하였다. 브레이딩 구조물은 브레이딩 구조물만이 갖는 유일한 성질의 구조 복합재료(structural composite)에 대한 기술적 요구와 브레이딩 기계와 브레이딩 제조공법에 대한 소프트웨어적인 발전에 대한 기술적 요구에 의하여 복합재료 산업에 커다

란 인기를 얻게 되었다. 일체형 구조물과 원하는 구조물 형태로 생산할 수 있는 브레이드 제조공법 두가지 장점은 좀 더 큰 직경을 가진 브레이딩 제조기술로 확대되었고 훨씬 복잡한 형태의 맨드럴위에서 브레이딩할 수 있는 매우 복잡한 기술로 발전하였으며 CAD/CAM을 사용하도록 하였다. 본고에서는 브레이딩 분류, 제조과정, 브레이드 구조물, 복합재료로 각광 받고 브레이드 구조물의 물성에 대하여 언급하고자 한다.

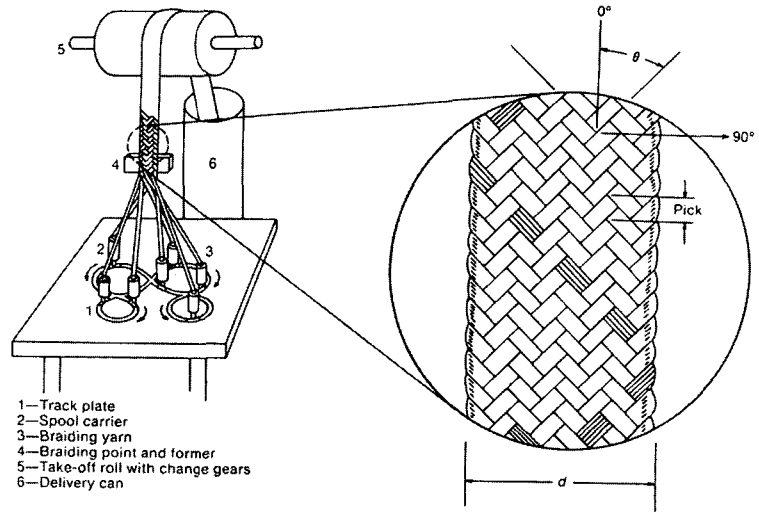


Figure 2. Flat braider and braid.

## 2. 브레이딩 분류

브레이딩 제조에 대한 가장 장점중의 하나는 매우 단순하다는 것이다. 전형적인 브레이딩 기계 (Figure 2)는 트랙 플레이트, 스푼 캐리어, 브레이드 형성구간, 권취 롤러로 구성되어 있다. 몇몇 브레이딩 기계에서는 브레이드사에 균일한 장력이 걸리도록 하기 위하여 reversing ring이 사용되기도 한다. 브레이드 구조물에 대한 기하학은 브레이딩각,  $\theta$ 로 정의될 수 있으며 이 브레이딩각은 2개의 브레이드사가 교차되면서 이루는 각의 절반이다. 브레이드 구조물의 견고도는 브레이드사가 교차되는 빈도수에 영향을 받는다. 이러한 빈도수는 교차되는 두점 사이의 거리와 관계되어 있으며 이를 pick spacing으로 정의를 내린다. flat 또는 tubular 브레이드 구조물의 폭은  $d$ 로 정의된다. track plate는 캐리어가 정해진 길을 움직일 수 있도록 지지해주며 캐리어의 움직임은 horn 기어 등과 같은 기구에 의해서 결정되고 캐리어는 브레이드사의 장력조절과 트랙을 도는 실패키지를 운반하는 역할을 한다. 이렇게 짜여진 브레이드는 정해진 속도로 권취 롤러에 의해 이송된다. 이 때 이미 캐리어의 갯수와 권취속도가

결정되었다면, 브레이딩각과 브레이드 구조물에 직경은 변화를 줄 수 있다. 또한 브레이딩하고자 하는 방향은 상황에 따라 바꾸어 줄 수 있다. 즉 수직 방향이나 수평방향이 때에 따라 가능한데, 큰 맨드럴에 브레이딩을 할 경우에는 수평방향의 브레이딩이 필요하다. 브레이딩 방향으로의 보강이 필요할 경우 브레이드사 사이에  $0^\circ \pm \theta$  배향각을 가진 제 3의 실을 집어 넣음으로써(3축) 브레이드를 만들 수 있다. 브레이드사 3개의 두께보다 더 두꺼운 구조물이 요구되어지는 경우에는 원하는 두께의 브레이드 구조물을 만들기 위하여 여러층의 브레이드 구조물을 브레이드할 수 있다. 두께 방향으로의 높은 보강효과를 얻기 위하여서는 multiple track braiding, pin braiding 또는 3차원 브레이딩 방법으로 일체형 브레이드 구조물을 만들 수 있다. 캐리어의 동작은 적극적 가이드 메커니즘 혹은 자카드 제어 메커니즘을 통한 곡선의 트랙 패턴이나 직각 트랙패턴을 따라 움직이게 할 수 있다. 자카드 브레이딩은 각기 다른 패턴으로 움직이는 브레이드사를 그룹화함으로써 가능하다.

Table 2에서 브레이드 구조물의 분류와 이에 대한 기준을 보이고 있다. 표현의 통일성을 위하여 제

Table 2. Braiding classifications

Parameter	Levels		
	Yarn axes	Biaxial	Traixal
Dimension of braid	Two-dimensional	Two-dimensional	Three-dimensional
Shaping	Formed shape		Net shape
Direction of braiding	Horizontal	Vertical	Inverted vertical
Construction of braid	1/1	2/2	3/3
Control mechanism for carrier motion	Positive		Jacquard
Braiding	Circular	Flat	Jacquard, Special

3번째 삽입되는 브레이드사가 있건 없건간에 두가지 브레이드사를 가지는 브레이드 구조물은 2차원 브레이드 구조물로 하기로 한다. 세가지 혹은 더 많은 종류의 브레이드사를 가졌으며 일체형 브레이드 구조를 형성하는 브레이딩 시스템은 잘 알려진 바와 같이 3차원 브레이드 구조물로 하기로 한다.

내는 응용분야는 의료용, 레저용, 군대, 항공분야 등에 사용되어지고 있으며 이들을 Table 3에 보이고 있다.

2.1. 2차원 브레이딩

2차원 브레이드를 제조하는 방법은 현재까지 많이 정립되었고 브레이드기는 3개의 캐리어로부터 144개의 캐리어를 가진 것을 생산하고 있으며 이를 가지고 브레이드 구조물 제조회사에서는 브레이드 프리폼을 생산하거나 브레이드 복합재료를 개발하는데 사용하고 있다. 이러한 제조회사에서 생산해

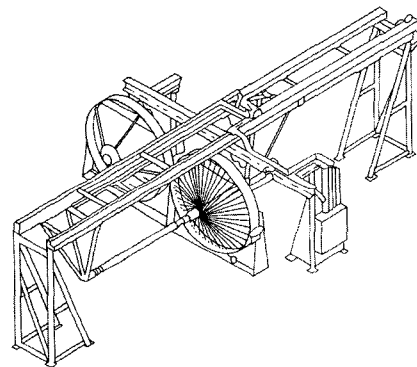


Figure 3. Braiding machine, 144-carrier horizontal model.

Table 3. Applications of braided fabrics and composites

Aircraft interiors	Jet engine spinner	Rocket motor casing
Aircraft propellers	Lightweight bridge structures	Rolling ferrel drum
Artificial limbs, tendons, bone	Lightweight submersibles	Rotor blades
Automotive parts	Machine parts	Ski poles
Boats	Military equipment	Skis
Boat masts	Model aircraft	Space struts
Bridge components	Net shape rigid armor	Spar and blades
Chemical containers	Personal armor	Sport cars
Drive shafts	Pressure vessels	Squash rackets
Elbow fittings	Pacing canoes	Stiffened panels
Fishing rods	Racing cars(structural panels)	Stocks for high jumping
Frame of airplane seats	Racing sculls and catamarans	Surfboats
Glider	Radar dishes	Tennis rackets
Glider airplanes	Radomes	Wind generator propellers and
Golf clubs	Record brushes	D-spars
Hang-glider frames	Robot arms and fingers	X-ray tables
Hockey and ice hockey sticks	Rocket launcher	

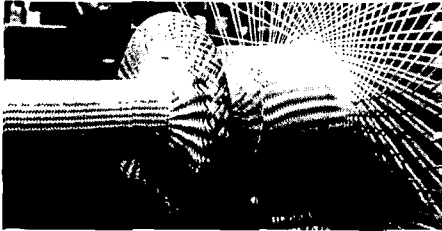


Figure 4. Formation of fiberglass preform for composite coupling shaft.



Figure 5. Braided fiberglass car chassis.

Figure 3은 144개의 캐리어를 가진 수평형 브레이드기를 보이고 있으며 2축 또는 3축 브레이딩이 모두 가능하다. 복잡한 구조물을 형성하는데 브레이딩 기계의 유용성을 Figure 4에 보이고 있다. Figure 5는 경주용차 차시를 브레이딩한 것을 보이고 있다.

**지배방정식:** 복합재료의 기계적 거동은 섬유 배향성, 섬유성질, 섬유 부피분율, 기지재 성질 등에 의존한다. 복합재료에 브레이드 구조물을 사용하여 디자인하고 제조하려면 브레이드 프리폼을 제조하는 공정변수를 섬유부피분율과 기하학적 구조로 함수화하는 것이 필요하다. 섬유부피분율은 전체 브레이드사의 갯수와 브레이드사의 배향각과 관계가 있고 섬유의 기하학은 섬유의 배향각과 최종 형태와 관련지어질 수 있다. 2차원 브레이딩기는 실제 형태의 복합재료 프리폼을 제조할 수 장점을 가지고 있다. 맨드럴을 사용하면 복합재료 형태의 프리폼이 형성되고 섬유 부피분율은 사용된 브레이드사의 배향각과 섬유가 차지하는 부피에 의하여 결정된다. 섬유부피분율은 주어진 브레이드 프리폼의 단면에

있는 전체 실의 면적에 의하여 결정되며 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$A_m = A_y \times N_y / \cos\theta \quad (1)$$

여기에서,  $A_m$  : 브레이드 프리폼의 단면적

$A_y$  : 브레이드사의 단면적

$N_y$  : 브레이드사의 갯수

( $M \times$ 플라이수,  $M$ : 캐리어수)

$\theta$  : 맨드럴축에 대한 브레이드사의 배향각  
그러므로 섬유부피분율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_f = A_m / A_c \quad (2)$$

여기에서,  $V_f$  : 섬유부피분율

$A_c$  : 복합재료의 단면적

$A_m$  : 브레이드 프리폼의 단면적

만약, 일정 단면적의 복합재료와 정해진 브레이드사, 섬유 부피분율이 요구된다면 브레이드 구조물은 플라이수와 브레이드사의 배향각에 의하여 설계될 수 있다. 이러한 설계에 대한 변수와의 관계는 다음과 같다.

$$\cos\theta = M N_{ply} A_y / (V_f A_c) \quad (3)$$

여기에서,  $N_{ply}$  : 플라이수

그러므로 설계는 플라이수에 의해 결정된다. Figure 6은 각기 다른 플라이수에서 고정된  $A_y$ 와  $N_y$ 일 때 브레이딩각( $\theta$ )과 섬유 부피분율( $V_f$ )과의 관계를 보이고 있다. 요약해서 브레이드 복합재료에서 브레이딩 제조 변수는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

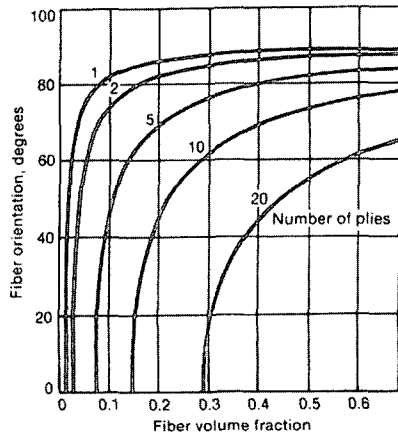
$$\begin{aligned} d_o &= M N_{ply} A_y / (\pi T V_f \cos\theta) + T \\ d_i &= M N_{ply} A_y / (\pi T V_f \cos\theta) - T \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서,  $d_o$  : 브레이드 복합재료의 외경

$d_i$  : 브레이드 복합재료의 내경

$T$  : 브레이드 복합재료의 두께

(4)식에 의하면 어떤 주어진 브레이드 복합재료의 직경을 가진 것을 생산하기 위하여 브레이딩각, 섬



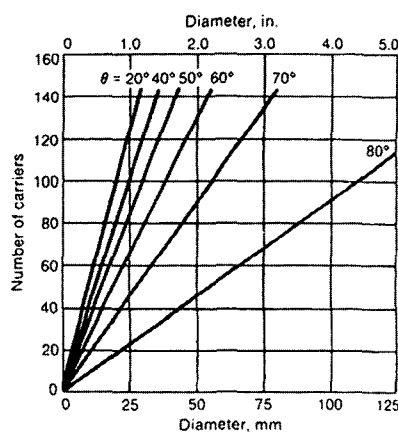
**Figure 6.** Relationship of fiber orientation to fiber volume fraction for varying number of plies; 24 carrier, 12K graphite, 80×3 mm(3.125×0.125 in).

유부피분율, 플라이수가 캐리어 갯수에 미치는 영향을 쉽게 계산할 수 있다.

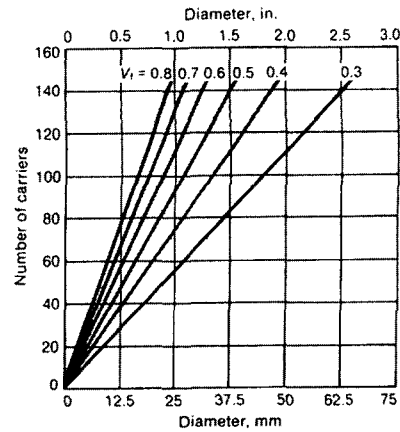
다음과 같은 경우가 예가 될 수 있다.

- 브레이드사의 단면적,  $A_b = 48.1 \times 10^{-4} \text{cm}^2$
- 복합재료의 두께,  $T = 0.318 \text{mm}$
- 섬유부피분율,  $V_f = 0.50$
- 플라이수,  $N_{ply} = 2$
- 브레이드 각,  $\theta = 45^\circ$

Figure 7에서 Figure 9까지는 이러한 공정변수간

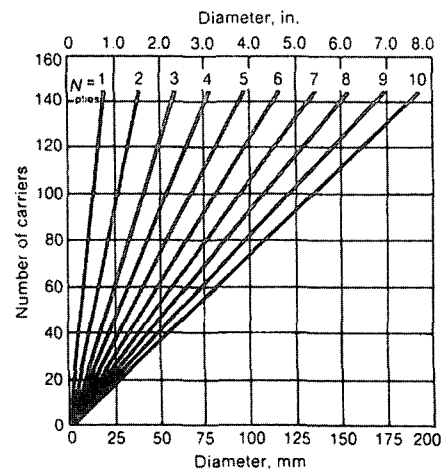


**Figure 7.** Effect of braid angle on processing parameters to form a graphite tubular braided fabric preform with 50 vol% fiber; two-ply, 12 K graphite, 3.2 mm(0.125 in) thick.



**Figure 8.** Effect of fiber volume fraction on processing parameters to form a graphite.

의 상관관계를 설명해 주고 있다. 5 cm 직경의 브레이드 복합재료를 생산해내는데 24개의 캐리어로부터 144개의 캐리어를 가진 브레이딩기 모두 가능하다. 하지만 이렇게 만들어진 브레이드 복합재료의 브레이딩각과 브레이드 구조물의 두께는 변하게 될 것이다. 반면에 브레이딩각이 만드는데 가장 중요한 요소라면 위와 같이 여러 가지의 브레이딩기



**Figure 9.** Effect of number of plies on processing parameters of braided graphite tubular fabric with 50 vol% fiber; two-ply, 12 K graphite, 3.2 mm(0.125 in) thick, 45% braid angle.

를 가지고 5 cm 직경의 브레이드 프리폼을 생산해 내는데 플라이 수에 변화를 주어야 한다. 따라서, 캐리어수가 많을수록 훨씬 넓은 범위의 직경을 가진 브레이드 구조물을 생산해 낼 수 있다. 따라서 브레이드 복합재료의 응용에 대한 요구가 커지면서 계속적으로 캐리어수가 많은 브레이딩기를 제조하는 방향으로 가고 있다.

브레이딩각( $\theta$ ), 브레이드 직경( $d$ ), 캐리어수( $M$ )간의 정적인 상관관계 뿐만 아니라 브레이기 공정변수인 배향각( $\theta$ )와 브레이드 직경( $d$ )와의 동적 상관관계의 정립도 필요하다. 특히, 맨드럴위에 수평식 브레이딩을 하는 경우에는 이러한 상관관계가 더욱 의미가 있다. 복잡한 형태를 가진 구조물을 위한 CAM의 경우에 제어해야 할 파라미터는 권취/회전 비율( $R$ )이다. 이 숫자는 캐리어의 1회전에 대한 맨드럴을 트래버스하는 거리를 뜻한다.

그러므로 주어진 맨드럴 직경에 대해서  $\theta$ 와  $R$ 의 관계는 다음과 같다.

$$d = R \tan \theta / \pi \quad (5)$$

그러므로 적절한 브레이딩각(이것으로부터 원하는 섬유부피분율로 얻을 수 있음)을 유지하고자 할 경우에 브레이딩기는 어느 정해진 권취/회전비  $R$ 을 고정해야만 한다. Figure 10은 맨드럴의 직경과 권

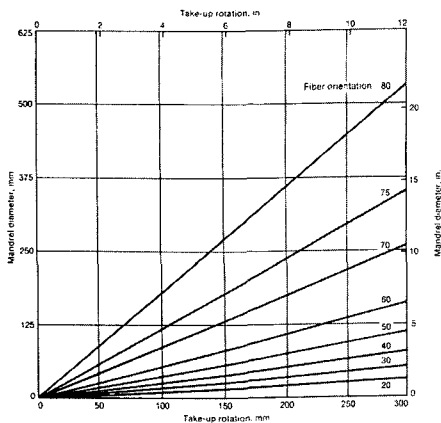


Figure 10. Relationship between mandrel diameter and take-up rotation ratio.

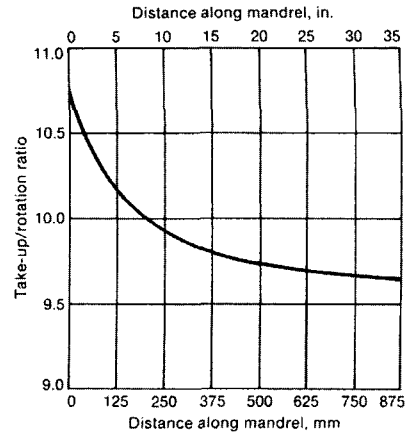


Figure 11. Take-up rotation ratio as a function of length along a truncated conical mandrel to maintain constant fiber orientation and fiber volume fraction.

취/회전비와의 상관성에 대하여 보여주고 있다. 만약 맨드럴이 불규칙적인 형태를 갖고 있다면  $R$ 이 모니터링되면서 맨드럴의 길이를 따라  $R$ 이 수정되도록 할 수 있다.

맨드럴의 반경과 권취속도를 안다면 컨트롤러는 새로운  $R$ 값을 정할 수 있다. Figure 11은 맨드럴의 길이를 따른 함수로 원뿔형 맨드럴에 대한  $R$ 값을 보이고 있다. 이러한 방법으로의 브레이딩기 조작은 어떠한 임의의 복잡한 형태의 브레이드 구조물 일지라도 정해진 섬유부피분율을 가질 수 있도록 하여 줄 수 있다.

## 2.2. 3차원 브레이딩

3차원 브레이딩은 2차원 브레이딩 방법을 확대한 것으로 일체형 브레이드 구조물을 형성하기 위하여 2 또는 그 보다 많은 브레이딩 동작을 가진 브레이드 시스템을 90° 교차시키거나 서로 엮어서 구조물을 만들어 낸다. 3차원 브레이딩의 가장 잘 알려진 예로 horn gear를 정사각 배열을 하여 3 또는 그 이상의 그룹의 브레이드사가 서로 엮이도록 하여 브레이드 구조물을 만들 수 있다(Figure 12).

3차원 브레이드 복합재료의 연구가 1950년대말에 항공우주 응용분야의 하나인 로켓모터 부품과

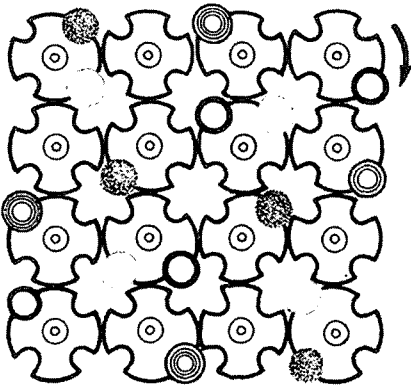


Figure 12. Horn gear set-up for square braiding.

같은 다축보강 복합재료를 제작하기 위하여 시작되었다. General Electric[20]에 의해 제안된 Omniweave와 Societe Europeene de Propulsion[21]에 의해 제안된 SCLOUDID가 새로 개발된 예이다. 위의 3차원 브레이딩 방법은 기존의 2차원 브레이딩 방법에 비하여 캐리어가 최종 브레이드 구조물의 기하학적 형태를 바꾸는 방법에서만 다르다. 2차원 스퀘어 브레이딩기에서는 캐리어가 연속적으로 움직이지만 3차원 브레이딩기에서는 캐리어가 간헐적으로 변함 없이 움직이며 이는 컴퓨터 제어를 채택하기에 적합하게 되어 있다. Drexel 대학과 Atlantic Research Corporation에서 제안한 track and column 3차원 브레이딩기는 Maistre 방법과 매우 유사하다. R. A. Florentine[22]가 제안한 방법과 비슷하게 Figure 13은 원형 또는 직각 브레이드판으로 만든 두가지 기본적인 3차원 브레이딩기의 개요도를 보여주고 있다.

캐리어의 X, Y(또는 r,  $\theta$ ) 좌표를 변환시키는 기

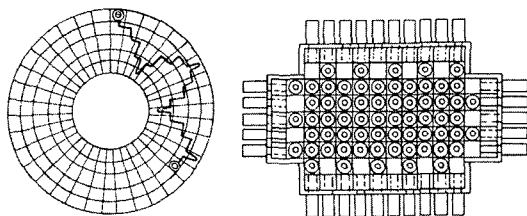


Figure 13. Circular and rectangular three-dimensional braiding machines.

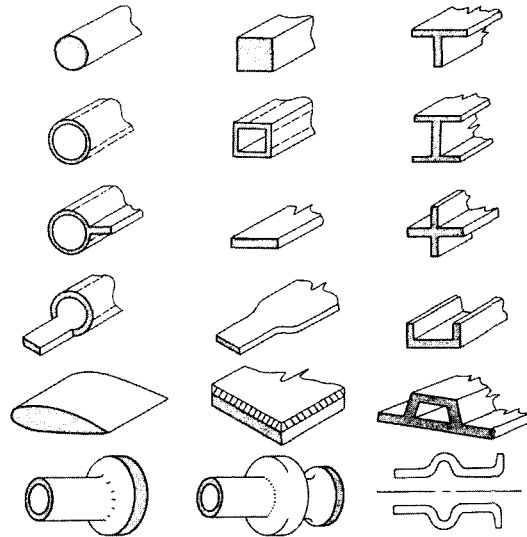


Figure 14. Net shape structures produced by three-dimensional braiding.

본 브레이딩 조작 다음에 compacting 운동에 의하여 3차원 브레이드 구조물을 만들게 된다. 단면의 형상은 캐리어의 적절한 배치와 함께 적절한 캐리어의 움직임을 조합하여 이를 수 있다.

3차원 브레이딩 시스템은 Figure 14에서 볼 수 있듯이 매우 복잡한 형태의 두껍거나 얇은 구조물을 생산해 낼 수 있다. 적절한 브레이드사의 굵기를 선택함으로써 원하는 두께의 브레이드 구조물을 얻을 수 있다. 브레이드 배향각을 조절할 수 있으며 원하면 0° longitudinal 강화를 위하여 axial 브레이드사를 추가할 수 있다. 이 시스템이 아직 완전 자동화를 이루지는 못하였지만 이 분야에서 광범위한 분석 연구가 수행되어졌고 생산공정과 관련된 최종 3차원 브레이드구조물 형태와의 관계를 위한 모델로 정립되었다.

**지배 방정식:** 3차원 브레이드 복합재료를 위한 3차원 브레이드 프리폼 제조 공정 개발은 2가지 기본 개념에 있다. 3차원 브레이드 구조물의 기하학적 정량화와 섬유부피분을 결정, 위의 두가지와 함께 섬유와 지지재의 성질을 안다면 3차원 브레이드 프리



폼은 목적에 맞게 만들어 질 수 있다. 복합재료의 역학적 분석은 섬유와 성질, 배열 방법, 배향도, 섬유부피분율을 이용한 정량화된 구조물의 성질에 의존하게 된다. 위의 언급한 변수와 관련된 조성방정식에 관한 표현은 다음과 같다.

**3차원 브레이드 구조물 기하학의 정량화:** 3차원 브레이드에 대한 기하학적 모델과 방법을 확립하기 위하여서도 구조 내에 있는 브레이드사의 배향각을 정의내리는 것이 필요하다. 이것은 거시적 단위 격자를 정의내리는 것과 함께 해야 한다. 단위 격자의 높이, 폭, 두께 등의 파라미터를 W, V, U라 할 때 브레이드의 형태로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$W = (U^2 + V^2)^{1/2} / \tan\theta \quad (6)$$

여기에서,  $\theta$  : 브레이드 구조물 내부에 대각선으로 배향된 브레이드사의 배향각

W : 단위격자의 높이, 브레이드 구조물의 pick 사이의 거리

식 (6)의 관계를 가지고 원하는 브레이드 배향각( $\theta$ )을 만들기 위하여 필요한 pick space를 결정할 수 있게 해준다.

**섬유부피분율:** 복합재료는 미리 결정되어진 배향각과 섬유부피분율에 의하여 만들어지기 때문에 3차원 브레이드 복합재료의 섬유부피분율을 예측할 수 있는 것은 매우 바람직하다. 주어진 섬유 부피분율은 3차원 브레이드 구조물을 만들 때 섬유 부피분율은 다음과 같이 정의 내릴 수 있다.

$$V_f = V_y / V_c \quad (7)$$

여기에서,  $V_y$  : 브레이드사의 부피

$V_c$  : 복합재료의 부피

식 (7)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$V_f = N_y L_y A_y / (L_c A_c) \quad (8)$$

여기에서,  $N_y$  : 브레이드 구조물에 있는 총 브레이드사의 수

드사의 수

$L_y$  : 각 브레이드사의 길이

$A_y$  : 각 브레이드사의 단면적

$L_c$  : 복합재료의 길이

$A_c$  : 복합재료의 단면적

테니어의 정의로부터 실의 단면적은 다음과 같은 관계에 있다.

$$A_y = D_y / (9 \times 10^{-5} \times \rho) \quad (9)$$

여기에서,  $\rho$  : 섬유의 밀도( $g/cm^3$ )

$D_y$  : 실의 선밀도(denier)

삼각함수로부터 우리는 다음과 같은 관계를 세울 수 있다.

$$W = V / \tan\theta' \quad (10)$$

여기에서,  $\theta'$  : 브레이드사의 표면각

(10)식을 위에서 정의한 브레이드 배향각( $\theta$ )와 결합시키면

$$\tan\theta = (1+k^2)^{1/2} \tan\theta' / k \quad (11)$$

여기에서,  $k$  : x축 움직임에 대한 y축 움직임에 대한 비

(11)식을 다른 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\theta = \tan^{-1} (1+k^2)^{1/2} \tan\theta' / k \quad (12)$$

위에서 결정한 관계식으로부터 주어진 섬유 부피분율로 원하는 3차원 브레이드 구조물을 만드는데 필요한 총 브레이드사의 갯수를 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$N_y = V_f A_c \rho 9 \times 10^{-5} \cos\theta / D_y \quad (13)$$

여기에서,  $A_c$  : 복합재료의 단면적( $cm^2$ )

$\rho$  : 섬유의 밀도( $g/cm^3$ )

$D_y$  : 섬유의 선밀도(denier)

$\theta$  : 브레이드 복합재료 내부의 배향각

$N_y$  : 브레이드 복합재료에 있는 총 브레이드사의 갯수

섬유밀도, 브레이드사의 선밀도, 브레이드 표면 각을 안다면 (13)식을 이용하여 주어진 섬유부피분율과 단면적에 대해서 브레이드 구조물을 만드는 데 필요한 총 브레이드사의 갯수를 구할 수 있다. 주어진 구조물에 대한 이를 수 있는 최대 섬유부피분율은 섬유의 형태 및 구조물의 형태에 좌우된다. 둥근 단면을 가진 섬유인 경우 최대 섬유부피분율  $V_f$ 는 섬유가 일축방향으로 배열되어 있는 경우에  $\pi/2\sqrt{3} = 0.906$ 가 되고 섬유의 단면이 원형이 아닌 경우에는 더욱 큰 섬유부피분율을 이를 수 있다. 하지만 구성하는 실이 3차원 시스템으로 될 때를 분석해 보면 최대한 이를 수 있는 섬유부피분율은 급격히 감소한다. 3차원 브레이드 단위격자에서 이를 수 있는 최대 섬유부피분율은  $\pi \times \sqrt{\frac{3}{8}} = 0.681$ 이다. 이것은 섬유 또는 브레이드사의 변형이 없다면 최대의 섬유부피분율은 68%를 이룬다는 것을 뜻한다.

### 3. 브레이드 복합재료의 성질

브레이드 복합재료의 물성은 일방향 복합재료나 직물 lay-up 복합재료처럼 잘 규명되어 있지 않으며 2차원 브레이드 복합재료에 있어서의 대부분의 연구는 tubular 브레이드에 국한되어 있고, 3차원 브

레이드 복합재료의 경우에는 현재 학계 및 정부연구소에 국한되어 data base가 축적되고 있다. 2차원 및 3차원 브레이드 복합재료는 구조물 형태로 만들 수 있는 장점에 더하여 높은 내충격성과 충격에 의해 손상된 부위가 극히 작다는 점이다.

#### 3.1. 2차원 브레이드 복합재료

D. E. Flinchbaugh[23]의 연구에 의하면 S-2 유리 섬유-에폭시 tubular 브레이드 복합재료의 인장강도는 낮은 밀도를 가진 스틸의 인장강도와 비슷한 값을 보이고 있으며 이에 대한 결과를 Table 4에 나타내었다.

이 복합재료의 밀도는  $1.66\text{g/cm}^3$ 이며 섬유부피분율은 75%이다. T. Tsiang 등[24]의 연구에 의하면 3축 브레이드 탄소-에폭시 복합재료에 관한 물성은 Table 5에 나타난 바와 같이 브레이드 복합재료의 hoop 탄성계수는 브레이드 각에 매우 민감하며 길이 방향에 있어서 3축 브레이드 복합재료의 경우  $0^\circ$  방향의 브레이드사가 있어서 브레이딩각에 덜 민감함을 보인다고 보고하였다. 또한  $0^\circ$  방향으로의 브레이드사는 브레이드 복합재료의 압축강도를 향상한다고 보고하였다. D. Brookstein과 T. Tsiang[25]는 브레이드 구조물에 기계로 천공을 하는 것보다는 open hole로 브레이딩하는 것이 강도 유지에 크

Table 4. Properties of two-dimensional braided S-2 fiberglass-epoxy composites

Braid angle, degree	Tensile strength				Compressive					
	Hoop		Long		Hoop		Long		In-plane	Shear
	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi		
89°	1320	192	21	3	700	102	220	32	55	8
86.75°	1250	182	83	12	380	55	100	14	75	11
82.50°	1030	149	-	-	330	48	-	-	-	-
78°	730	106	-	-	275	40	-	-	-	-

Table 5. Properties of triaxial braided graphite-epoxy composites

Braid angle, degree	Vf %	ELT		E <sub>LC</sub>		E <sub>HT</sub>		V <sub>LHT</sub>	V <sub>LHC</sub>	V <sub>HLT</sub>
		GPa	106psi	GPa	10 <sup>6</sup> psi	Gpa	10 <sup>6</sup> psi			
45°	33.8	61.4	8.9	62.7	9.1	6.8	0.98	0.56	0.64	0.044
63°	29.3	49.0	7.1	49.6	7.2	15.2	2.20	0.43	0.45	0.088
80°	56.3	-	-	52.4	7.6	43.6	6.32	-	0.13	0.110

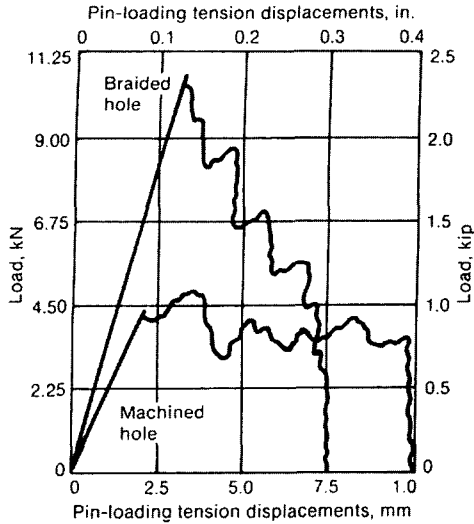


Figure 15. Strength improvement of braided hole.

게 기여한다는 보고를 하였다.

### 3.2. 3차원 브레이드 복합재료

1983년부터 3차원 브레이드 복합재료의 본격적인 연구가 시작되었다. 처음 미국 정부로부터 연구 자금을 받아서 시작하였으며 이 연구에서 수행된 3차원 브레이드 복합재료는 고분자, 금속, 세라믹 기지재 복합재료 뿐만 아니라 탄소/탄소 복합재료에 대한 연구도 수행되어 졌다. 3차원 브레이드 복합

재료의 기계적 물성에 대한 가장 심도 깊은 연구 중에 하나는 A. B. Macande 등[26]에 의해 수행되었다. 이 연구에서 3차원 브레이드 구조물의 가장자리의 영향과 3차원 브레이드 구조물의 공정 변화에 따른 물성 변화를 인장, 압축, 굽힘, 전단 실험을 행하여 관찰하였다. 그 결과 가장자리를 자른 시편과 자르지 않은 시편과는 크나 큰 물성변화를 보였다. Table 6에서 보듯이 탄소-에폭시 복합재료의 인장강도는 약 60%정도나 감소하였다. axial yarn(0°)이 들어간 경우에는 인장강도의 감소가 50% 미만으로 나타났다. 따라서 3차원 브레이드 복합재료를 제조할 때에 표면에 있는 브레이드사의 파손이 발생하지 않도록 해야 한다는 것을 지적하였다. Table 6에서 브레이드 제조 방법 변화에 따른 물성의 영향을 볼 수 있는데 제조 방법에 따라 브레이딩각에 차이가 생기게 된다. 1×1 제조방법과 1×3 제조방법은 브레이드사 표면 배향각이 20°와 12°로 차이가 생기게 되고 따라서 인장성질은 661.9 MPa에서 965.3 MPa로 증가하게 된다.

Table 7은 브레이드사의 굽기에 따른 물성변화를 보이고 있는데 브레이드사의 굽기가 굽을수록 3차원 브레이드 복합재료의 인장강도와 인장탄성계수 값은 증가함을 보이고 있다. 이는 브레이드사의 굽기에 따라 브레이드 배향각이 변함에 기인한 것으

Table 6. Three-dimensional braided graphite-epoxy composite property data

Property(a)	Fiber type and braid pattern					
	T300(b), 1×1 (uncut)	T300, 1×1 (cut)	T300, 3×1 (uncut)	T300, 3×1 (cut)	T300, 1×1×1/2 fixed(uncut)	T300, 1×1×1/2 fixed(cut)
V <sub>f</sub> , %	68	68	68	68	68	68
Tensile strength, MPa(ksi)	665.6(96.5)	228.7(33.2)	970.5(140.8)	363.7(52.7)	790.6(114.7)	4,507(68.9)
Elastic modulus, GPa(10 <sup>6</sup> psi)	97.8(14.2)	50.5(7.3)	126.4(18.3)	76.4(11.1)	117.4(17.0)	82.4(12.0)
Compressive strength, MPa(ksi)	—	179.5(26.0)	—	226.4(32.8)	—	385.4(55.9)
Compressive modulus, GPa(10 <sup>6</sup> psi)	—	38.7(5.6)	—	56.6(8.2)	—	80.8(11.7)
Flexural strength, MPa(ksi)	813.5(118)	465.2(67.5)	647.2(93.9)	508.1(73.3)	816.0(12.5)	632.7(91.8)
Flexural modulus, GPa(ksi)	77.5(11.2)	34.1(4.9)	85.4(12.4)	54.9(8.0)	86.4(12.5)	60.8(8.8)
Poisson's ratio	0.875	1.36	0.566	0.806	0.986	0.667
apparent fiber angle	±20°	±20°	±12°	±12°	±15°	±12°

(a) Tension and compression specimens were tabbed at grip ends. (b) T300 graphite yarn, 30,000 tow.

1×1.3×1 and 1×1×11-braid patterns with uncut and cut edges.

**Table 7.** Three-dimensional braided graphite-epoxy composite properties as a function of braid pattern

property	Fiber type and braid pattern						
	AS-4, 3K 1×1	AS-4, 6K 1×1	Celion, 6K 1×1	AS-4, 12K 1×1	Celion, 12K 1×1	T300 30K 1×1	T300 Eight harness satin fabric
$V_f, \%$	68	68	56	68	68	68	65
Tensile strength, MPa(ksi)	736.8 (106.8)	841.4 (122.0)	857.7 (124.4)	1067.2 (154 790)	1219.8 (176 910)	665.6 (96 530)	517.1 (75 000)
Elastic modulus, Gpa( $10^6$ psi)	83.5 (12.1)	119.3 (17.3)	87.8 (12.7)	114.7 (16.6)	113.1 (16.4)	97.8 (14.2)	73.8 (10.7)
Compressive strength, MPa(ksi)	114.8 (16.6)	126.0 (18.2)	71.4 (10.3)	121.4 (17 600)	7104 (10 350)	-	69.0 (10 000)
Compressive modulus, GPa( $10^6$ psi)	0.945	1.051	0.968	0.980	0.874	-	0.045
Flexural strength, MPa(ksi)	885.3 (128.4)	739.8 (107.3)	-	1068.3 (154 210)	-	813.5 (117 990)	689.5 (100 00)
Flexural modulus, GPa(ksi)	84.5 (12.3)	95.2 (13.8)	-	1385.2 (20.1)	-	77.5 (11.2)	65.5 (9.5)
Poisson's ratio	$\pm 19^\circ$	$\pm 15^\circ$	$\pm 15^\circ$	$\pm 13^\circ$	$\pm 17.5^\circ$	$\pm 20^\circ$	$0^\circ$

Uncut specimens, 25.4mm(1 in.) wide including comparative data for a laminated fabric composite. Tensile specimens were tabbed with 1.6mm(1/16in.) thick, 25.4mm(1in.) × 63.5mm(2-1/2 in.) glass reinforced plastic tapered tabs at grip ends. Celion 6K and 12K specimens had cut edges for the short-beam shear tests only.

로써 굽기가 굽어질수록 브레이드사의 크립률이 줄어들게 되어 높은 강도와 탄성계수를 갖게 된다. Table 6과 7에서 보듯이 3차원 브레이드 복합재료의 강도와 탄성계수가 0°/90° 직물 라미네이트 복합재료보다 훨씬 우수한 반면 포아슨비가 훨씬 커 0.67에서 1.36까지의 분포를 보이고 있다. 이것은 90° 방향의 물성이 매우 나쁨을 뜻하는 것으로 이를 보강하기 위하여 90° 브레이드사를 10 vol% 첨가하였을 때 포아슨 비가 0.27로 낮아짐을 관찰하였다. 반면 강도와 탄성계수 면에서도 1250 MPa과 100 GPa에서 100 MPa과 90 GPa로 낮아진 값을 보였다.

**파손 저항성:** L .W. Gause 등[27]은 3차원 브레이드 복합재료의 손상저항능력에 대한 것을 분석하였다. 그는 3차원 브레이드 복합재료와 준등방성 복합재료에 드릴 구멍 실험을 행하였다. 결과는 3차원 브레이드 복합재료의 경우 드릴 구멍에 대하여 원래 강도의 90%를 유지한 반면 준등방성 복합재

료의 경우 50%의 강도 저하 발생함을 관찰하였다 (Table 8). 또한 graphite-epoxy 복합재료의 충격손상정도가 매우 작음을 보였다. F. Ko는 유라-에폭시 복합재료[28]와 탄소-PEEK 복합재료[29]에 대하여 비슷한 연구를 수행하였다.

Table 9에서 보듯이 낙하충격실험에서 라미네이트 복합재료보다 3차원 유라-에폭시 브레이드 복합재료가 훨씬 높은 개시에너지와 전파에너지를 흡수하는 능력을 보였다. 탄소-PEEK 열가소성 복합재료에 대한 연구에서 충격 후 압축강도 실험에 대한 결과를 Figure 16에 보이고 있는데 일방향 lay-up 탄소-PEEK 복합재료보다 3차원 브레이드 복합재료의 물성이 훨씬 적게 감소함을 보였으며 매우 주목할 사항은 2가지 시편간의 충격손상면적의 차이이다. 3차원 브레이드 복합재료의 충격손상면적은 라미네이트 복합재료에 비해서 훨씬 적음을 관찰하였다(Figure 17).

#### 4. 결 론

Table 8. Static test summary

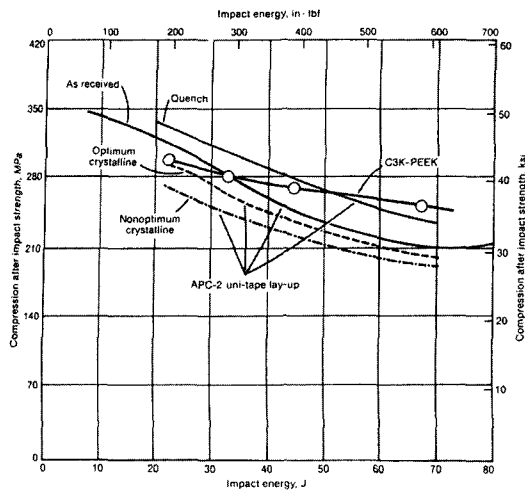
	C12K/3501 1 × 1 braid		24-ply AS/3501 (42/50/8)		C12K/3501 (1 × 1) 1/2 fixed	
	Mean	C.V.	Mean	C.V.	Mean	C.V.
Longitudinal ultimate tensile strength, $F_{11}^u$ , Mpa(ksi)	667.9 (96.8)	9.3%	910.1 (132.0)	7.4%	749.5 (108.7)	6.1%
Transverse ultimate tensile strength, $F_{22}^u$ , Mpa(ksi)	34.5 (5.0)	10.0%	416.5 (60.4)	9.6%	22.8 (3.3)	19.5%
Longitudinal ultimate compressive tensile strength, $F_{11}^c$ , Mpa(ksi)	428.2 (62.1)	14.5%	420.0 (60.9)	16.0%	473.0 (68.6)	17.6%
Longitudinal tensile modulus, $E_{11}^t$ , Gpa( $10^6$ ksi)	9.3 (13.1)	19.5%	65.5 (9.5)	2.8%	106.2 (15.4)	12.3%
Transverse tensile modulus, $E_{22}^t$ , Gpa( $10^6$ ksi)	10.3 (1.5)	9.7%	31.0 (4.5)	13.6%	9.7 (1.4)	9.7%
Longitudinal compressive modulus, $E_{11}^c$ , Gpa( $10^6$ ksi)	75.8 (11.0)	21.8%	60.7 (8.8)	5.8%	93.1 (13.5)	19.8%
Longitudinal Poisson's ratio, $\nu_{12}$	1.06	51%	0.42	-	0.81	21.2%
Transverse Poisson's ratio, $\nu_{21}$	0.067	6.7%	0.225	2.8%	0.04	44.9%
Ultimate longitudinal strain, $\epsilon_{11}^u$	0.00773	13.8%	0.01393	7.9%	0.00733	10.8%
Ultimate compressive strain, $\epsilon_{11}^c$	0.00640	10.2%	0.00711	20.4%	0.00533	15.7%
Ultimate transverse strain, $\epsilon_{22}^u$	0.00324	9.7%	0.01474	5.5%	0.00249	21.3%
Longitudinal ultimate tensile strength, $F_{11}^u$ , Mpa(ksi)(D=0.25)G	660.5 (95.8)	11.7%	444.7 (64.5)	2.3%	646.8 (93.8)	9.7%
Longitudinal ultimate tensile strength, $F_{11}^u$ , Mpa(ksi)(D=0.25)N	881.2 (127.8)	11.7%	593.0 (86.0)	2.3%	862.6 (125.1)	9.2%
Longitudinal ultimate compressive strength, $F_{11}^c$ , Mpa(ksi)(D=0.25)G	313.7 (45.5)	12.2%	402.7 (58.4)	6.1%	316.5 (45.9)	11.6%
Longitudinal ultimate compressive strength, $F_{11}^c$ , Mpa(ksi)(D=0.25)N	417.8 (60.6)	12.2%	536.4 (77.8)	6.1%	422.0 (61.2)	11.6%
Compressive bearing strength, $F_{br}^c$ , Mpa(ksi)(D=0.25)	335.1 (48.6)	3.8%	577.1 (83.7)	9.5%	362.0 (52.5)	15.3%
Tensile bearing strength, $F_{br}^t$ , Mpa(ksi)(D=0.25)	182.7 (26.5)	6.7%	677.1 (98.2)	5.5%	282.7 (41.0)	21.0%

$\epsilon/D = 2.5$   
Note: G, gross stress. N, net stress

Table 9. Instrumented impact properties of E-glass reinforced composites

Sample	$E_i$		$E_p$		Ductility index	$E_m$		$\sigma_m$		$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	t	
	J	ft · lbf	J	ft · lbf		J	ft · lbf	kPa	psi		mm	in.
105 1 × 1 × 1	237.4	175.2	649.0	478.7	2.732	237.5	175.21	1589	230.4	1.93	12.7	0.5
106 1 × 1 × 1(L)(a)	162.1	119.6	739.3	545.3	4.558	162.2	119.64	2146	311.2	1.96	13.1	0.516
107 1 × 1 × 1(L)	290.8	214.5	575.9	424.8	1.981	290.8	214.48	2725	395.2	1.99	17.1	0.675
108 XYZ	358.9	264.9	508.0	374.7	1.415	359.2	264.9	2559	371.2	2.10	12.7	0.5
201 XYZ	235.9	174.1	385.6	284.4	1.634	621.6	458.46	1704	247.2	1.99	11.1	0.437
202 Satin weave	50.4	37.2	384.9	283.9	7.631	387.5	285.82	3464	502.4	2.10	12.7	0.5
203 Plain weave	38.4	28.3	466.7	344.2	12.161	391.0	288.4	3166	459.2	2.05	12.7	0.5

(a) Sample split in two

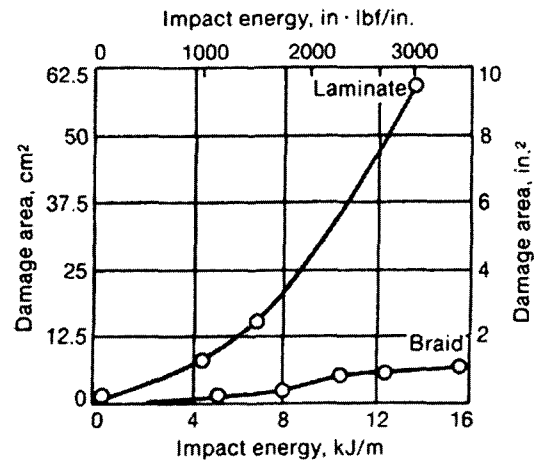


**Figure 16.** Effect of impact energy level on compression after impact strength for three-dimensional braid comingled and laminated carbon-PEEK composites.

브레이드 구조물은 사용되는 곳이 특수한 곳에 한정되어 있지만 브레이드 구조물만의 특성이 다른 섬유구조물(직물, 편물, 부직포)과는 매우 다르기 때문에 고유한 물성을 가진 제품으로 특화시켜 개발하기에 적합하다. 섬유를 이용하지 않더라도 강선이나 금속재료를 이용한 브레이드 제품도 널리 사용되고 있으며 브레이드 구조물을 복합재료에 적용하면 사용가능한 분야는 무궁무진하다고 말할 수 있다. 우리나라의 섬유산업도 기존의 대량으로 생산해 낼 수 있는 섬유제품보다는 좀 더 특화되고 기술이 요구되어지는 산업용 섬유소재의 개발에 박차를 가할 때가 되었고 그 일환으로 브레이드 구조물에 대한 연구와 산업이 산업용 소재로 발전하기를 기대한다.

### 참고 문헌

1. L. R. Sanders, "Braiding-A Mechanical Means of Composite Fabrication", *SAMPE Q.*, pp.38-44(1977).
2. F. K. Ko, "Atkins and Pearce Handbook of Industrial Braids", to be published.
3. C. A. Belash, "Braiding and Knotting for Amateurs", The Beacon Handicraft Series, The Beacon Press, 1936



**Figure 17.** Effect of impact energy on damage area of three-dimensional braid comingled and laminated carbon-PEEK composites.

4. W. J. Hamburger, "Effect of Yarn Elongation on Parachute Fabric Strength", *Rayon Textile Monthly*, March and May, (1942).
5. D. Brunnschweiler, "Braids and Braiding", *J. Textile Ind.*, **44**, p.666(1953).
6. D. Brunnschweiler, "The Structure and Tensile Properties of Braids", *J. Textile Ind.*, **45**, pp.T55-87(1954).
7. W. A. Douglass, "Braiding and Braiding Machinery", Centrex Publishing, 1964.
8. F. Goseberg, "The Construction of Braided Goods", *Band-und Flechtindustrie*, **2**, pp.65-72(1969).
9. F. Goseberg, "Training Material Instructional Aid-Textile Technology-Machine Braids", All Textile Employers Association, 1981.
10. W. Weber, The Calculation of Round Braid, *Band-und Flechtindustrie*, **1** Part I, pp. 17-31; **3**, Part II, pp.109-119(1969).
11. R. J. Post, "Braiding Composites-Adapting the Process for the Mass Production of Aerospace Components", in Proceedings of the 22nd National SAMPE Symposium and Exhibition, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, pp.486-503(1977).
12. S. L. Phoenix, "Mechanical Response of a Tubular braided Cable with Elastic Core", *Textile Res. J.*, pp.81-91(1977).
13. C. W. Evans, "Hose Technology", 2nd Ed., Applied Science, 1979.
14. J. B. Carter, "Fabrication Techniques of Tubular Structures from Braided Preimpregnated Rovings", Paper EM85-100 Presented at Composites in Manufacturing 4, Society of Mechanical Engineers, 1985.

15. B. D. Haggard and D. E. Flinchbaugh, "Braided Structures for Launchers and Rocket Motor Cases", Paper Presented at JANNAFS and MBS/CMCS Subcommittee Meeting, MDAC/Titusville, Nov 1984.
16. R. A. Florentine, "Magnawirl's Integally Woven Marine Propeller - The Magnaweave Process Extended to Circular Parts", in Proceedings of the 38th Annual Conferene, Society of the Plastics Industry, Feb 1981.
17. F. K. Ko and C. M. Pastore, "Structure and Properties of an Integrated 3-D Fabric for Structural Composites", Special Technical Testing Publication 864, American Society for Testing and Materials, pp.428-439(1985).
18. A. Majidi, J. M. Yang, and T. W. Chou, "Mechanical Behavior of Three Dimensional Woven Fiber composites", in Proceeding of the International Conference on Composite Materials V, 1985.
19. C. Croon, "Braided Fabrics : Properties and Applications", in 19th National SAMPE Symposium, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, March 1984.
20. E. R. Stover, W. C. Mark, I. Marfowitz, and W. Mueller, "Preparation of of an Omniweave-Reinforced Carbon-Carbon Cylinder as a Candidate for Evaluation in the Advanced het Shield Screening Program". AFML-TR-70-283, March 1971.
21. M. A. Maistre, "Construction of a Three Dimensional Structure", *German Patent*, P23016968, 1973.
22. R. A. Florentine, "Apparatus for Weaving a Three Dimensional Article", *U.S. Patent*, 4,312,261, Jan 1982.
23. D. E. Flinchbaugh, "Bradede Composite Structures", Paper Presented at the Composites Material Conference, Dover, Aug 1985.
24. T. Tsiang, D. Brookstein, and J. Dent, "Mechanical Characterization of Braided Graphite/Epoxy Cylinders", in Proceedings of the 29th national SAMPE Symposium, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, p.880(1984).
25. D. Brookstein and T. Tsiang, "Load-Deformation Behavior of Composite Cylinders with Integally Formed Braided and Machined Holes", *J. Compos. Mater.*, **19**, p.477(1985).
26. A. B. Macander, R. M. Crane, and E. T. Camponeschi in "Fabrication and Mechanical properties of Multidimensionally(X-D) Braided Composite Materials", *Composite Materials : Testing and Design(Seventh Conference)* STP 893, (J. M. Whitney Ed.), American Society for Testing and Materials, pp.422-443(1986).
27. L. W. Gause and J. Alper, "Mechanical Characterization of Magnaweave Braided Composites", Paper Presented at the Mechanics of Composites Review, Air Force Materials Laboratory, Oct 1983.
28. F. Ko and D. Hartman, "Impact Behavior of 2-D and 3-D Glass/Epoxy Composites", *SAMPE J.*, July/August, pp.26-29(1986).
29. F. K. Ko, H. Chou, and E. Ying, "Damage Tolerance of 3-D Braided Comingled Carbon/PEEK Composites", in Proceedings of the Advanced Composites Conference, 1986.
30. S. S. Yau, T. W. Chu, and F. K. Ko, "Flexural and Axial Compressive Failures of Three Dimensionally Braided Composite I-Beams", *Composites*, **17**(3), (1986).

약 력



이 준 석

1994. 서울대학교 섬유고분자공학과(박사)  
 1995. North Carolina State University 연구원  
 1996. 영남대학교 섬유패션학부 부교수  
 2000~현재. 지역협력 연구센터(RRC) 부장  
 2002~현재. 섬유기계연구센터 연구본부장  
 2003~현재. 섬유·외류 연구정보센터 (RICTA) 부소장  
 (712-749) 경상북도 경산시 대동 214-1  
 전화 : 053)810-2774. Fax: 053)811-2735  
 e-mail: leejs@yu.ac.kr