[논 문] 한국재료학회지
Korean Journal of Materials Research
Vol. 4, No. 3 (1994)

브레이드 복합재료의 원공의 크기와 분포가 재료강도에 미치는 영향

이 경 우 · 강 태 진
서울대학교 섬유고분자공학과

The Effect of Circular Hole Size and Distribution on Strength of Braided Composite

Kyung-Woo Lee, Tae-Jin Kang
Dept. of Fiber & Polymer Science, Seoul National University

초 록 S2-유리 섬유/폴리에스터 브레이드 복합재료에서 원공의 크기 및 원공간 거리 변화가 인장성질, 핀하중 인장성질, 굽힘성질에 미치는 영향을 연구하였다. 원공의 크기에 따른 복합재료의 인장강도의 저하는 Whitney와 Nuismer에 의해 제시된 이론값과 대체로 일치함을 보여주었으며 이때의 특성길이(d_0)는 브레이드 복합재료는 약 1.6mm, 직물 적층 복합재료는 약 1.8mm가 되었다. 브레이드 복합재료의 원공간 거리 변화에 따른 인장강도의 변화는 두 원공 중심 사이의 거리가 원공 지름의 4배 이상이면 원공간 상호작용이 없었다. 원공의 중심과 측면간 거리에 따른 인장강도의 변화는 원공의 중심과 측면간 거리가 원공 지름의 3배 이상일 때 상호작용이 없었다. 핀하중 인장실험에서 브레이드 복합재료와 직물 적층 복합재료 모두 핀의 지름이 증가함에 따라 Bearing Stength는 감소하였다.

Abstract The effect of hole size and hole-to-hole distance in the braided and laminated composite was studied in terms of tensile strength, pin bearing strength, and flexural strength of S2-glass fiber braided polyester. The tensile strength reduction with hole size was well fitted with the Whitney and Nuismer's prediction for the laminated composite. The characteristic distance was measured to be about 1.6mm for braided composite and 1.8mm for laminated one. The effect of distance between the centers of two circular holes on tensile strength was negligible when the distance between these two holes was larger than 4 times of the diameter of circular hole for both braided and laminated composite. The side effect was diminished when the center of hole was located 3 times farther than the diameter of the hole. The pin bearing strengths was decreased with the size of pin hole for both braided and laminated composite.

1. 서 론

대부분의 구조물은 전체가 하나의 부품으로 이루어지는 것이 아니라 여러가지 부품이 조립되어 전체 구조물의 형상을 이루게 된다. 복합재료 구조물의 제작시 부품의 결합을 위해 기계적인 접합(Mechanical joints)과 접착에 의한 접합(Bonded joints)이 널리 사용되고 있는바, 기계적인 접합은 기질(Substrates)의 손상없이 파손된 부분의 교체가 쉽고, 표면처리가 필요 없으며, 연경상태(Joint quality)를 손쉽게 점검할 수 있는 반면 원공(Circular Hole)에 의한 기질의 강도저하, 연결 재료에 의한 구조물의 중량 증가, 연결재료의 부식 등의 단점이 있다. 접착에 의한 접합은 하중 전달을 넓은 범위에 걸쳐 분산시킬 수 있고, 기질에 구멍을 뚫을 필요가 없고, 연결 재료에 의한 구조물의 중량 증가가 적다는 장점이 있으나 온도나 습도등의 주위 환경에 영향을 많이 받으며 연결 상태의 점검이 어렵고, 파손된 부분의 교체가 쉽지 않다는 단점이 있다[1].

기계적인 접합은 보울트나 리벳을 사용하기 위하여 기질에 원공(Circular hole)을 뚫게 된다. 원공을 뚫게 됨에 따라 보강섬유의 절단과 원공 주위의 응력집중으로 인하여 재료의 강도 저하가 일어나게 된다. 원공의 크기와 원공간 거리에 따른 재료의 강도 변화는 복합재료 구조물의 설계시 매우 중요한 자료가 된다. 이제까지 원공의 크기와 원공간 거리에 따른 재료의 강도 변화에 대한 연구가 활발히

진행되어 왔으나 그 대상은 대부분 적층 복합재료(Laminated composites)였다.

본 연구에서는 S2-유리 섬유/폴리에스터 브레이드 복합재료(Braided composites)에 대하여 원공의 크기 및 원공간 거리를 변화시키면서 인장 강도를 측정하여 원공간 상호 작용이 없는 최소의 원공간 거리를 거리를 구하였으며, 원공과 측면간의 상호작용이 없는 최소의 거리도 구하였다. 핀(Pin)하중을 받는 조인트에서의 강도를 알아보기 위하여 Bearing strength를 측정하였다. 또한 S2-유리 섬유/폴리에스터 직물 적층 복합재료에 대해서도 같은 실험을 하여 브레이드 복합재료와 직물 적층 복합재료의 강도를 비교하였다.

2. 이 론

Whitney와 Nuismer는 노치(Notch)가 있는 적층 복합재료의 강도를 예측하기 위한 Point stress criterion과 Average stress criterion라는 두가지의 stress criteria를 제안했다[2~4].

Point stress criterion에 따르면 Hole의 끝부분에서 인장 방향에 수직으로 일정한 거리 만큼 떨어진곳(특성거리 : d_0)에서의 인장 방향 응력이 노치없는 재료의 강도와 같을 때 재료의 파괴가 일어난다는 것이며 여기에 원공에 대한 유한폭 보정계수[5]를 고려하여 노치없는 재료의 강도에 대한 노치있는 재료의 강도비인 강도저하비(Strength reduction ratio)로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_{Ut}}=\frac{2}{\{2+\lambda_1^2+3\lambda_1^4-(K_T^{\infty}-3)(5\lambda_1^6-7\lambda_1^8)\}}\cdot\frac{3(1-2R/W)}{\{2+(1-2R/W)^3\}} \quad (1)$$

여기에서 σ_{Ut} = 노치없는 재료의 인장강도

σ_N = 노치있는 재료의 인장강도

W = 시험편 폭

K_T^{∞} = 무한평판에서의 응력집중계수

R = 원공의 반지름

$$\lambda_1=\frac{R}{R+d_0}$$

$$\frac{3(1-2R/W)}{\{2+(1-2R/W)^3\}}$$

= 유한폭 보정계수

특성 길이(d_0)는 원공 크기가 다른 시편에 대한 인장강도를 측정하면 결정할 수 있다. Whitney와 Nuismer는 특성 길이(d_0)를 원공의 반지름에 관계없는 상수로 가정했다.

3. 실 험

3-1 실험 재료

본 연구를 위한 브레이드 복합재료와 직물 적층 복합재료의 보강재료는 Owens-Coring사의 S2-glass fiber를 사용하였으며 기지물질은 불포화 폴리에스터 수지(iso-type)를 Base resin으로 하여 폴리에스터 수지 93wt.%, 경화제로 Dially phthalate(DAP) 7.0.wt.%, 개시제로 Benzoyl peroxide(BPO) 1.0wt.%를 사용하였다. 도포되는 기지물질의 양은 복합재료 성형 후 시편 무게의 30wt.%가 되도록 처리하였다. 보강재와 기지물질의 기본물성은 Table 1과 같다. 브레이드 복합재료는 10×2 Slab의

Table 1. Physical Properties of S2-glass fiber and Polyester resin

Properties	S2-glass fiber	Polyester resin
Density(g/cm^3)	2.46	1.25
Tensile Modulus(GPa)	86.81	4.5
Tensile Strength(MPa)	4.58	0.02
Elongation(%)	5.40	3.3
Fabric System	Plain weave	—

크기로 4-step 1×1 rectangular shape braided preform을 제작하여 Mold에 넣어 열성형기(Hot press)에서 성형하였으며, 직물 적층 복합재료는 직물상 강화형은 평직(Plain weave)으로 구성되었으며 6장의 Woven roving prepreg를 적층하여 열성형기에서 성형하였다. 브레이드 복합재료와 직물 적층 복합재료는 두께는 3mm로 하였으며, 섬유부피분율(Fiber volume fraction : V_f)은 모두 55%로 조절하였다. 이들의 기본 물성은 Table 2와 같다. Drilling machine을 사용하여 시편에 원공(Hole)을 만드는데 가공시 마찰열에 의한

Table 2. Physical Properties of Braided and Woven Laminated Composite

Properties	Braided Composite	Woven Laminated Composite
Density(g/cm^3)	1.91	1.90
Tensile Modulus(GPa)	11.0	7.5
Tensile Strength(MPa)	1020	535
Flexural Modulus(GPa)	15	11
Flexural Strength(MPa)	297	213

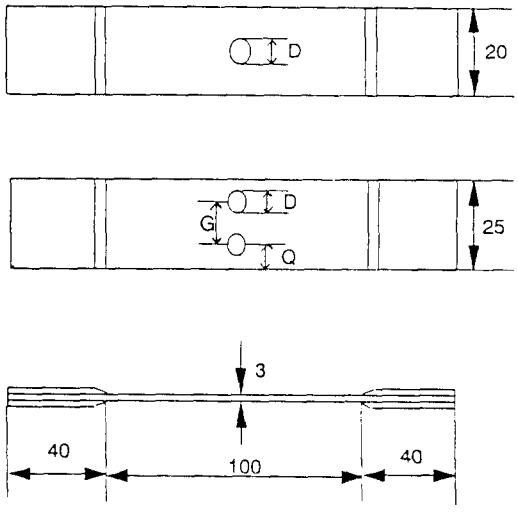

Fig. 1. Configuration of tensile test specimen (unit : mm)

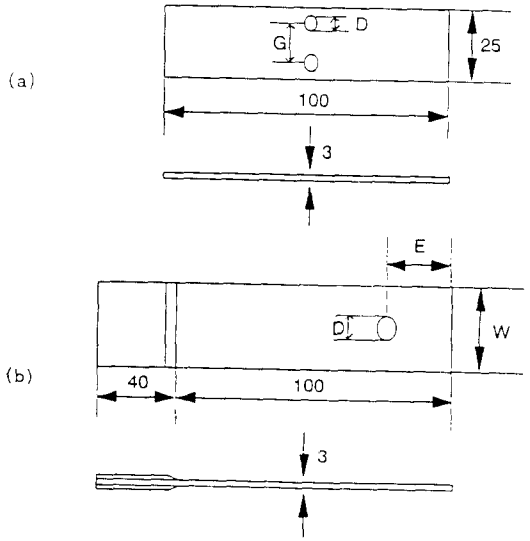

Fig. 2. Configuration of specimen(unit : mm)
(a) Flexural test specimen
(b) Bearing load test specimen

손상을 받지 않도록 물을 뿌리면서 하였다. 제작된 인장과굽힘을 위한 시편은 Fig. 1과 Fig. 2에 보인 바와 같다.

3-2. 인장 및 굽힘 실험

재료의 인장강도를 ASTM D3039-3076방법에 의해 Cross head speed를 2mm/min로 Instron에서 실험하였다.

3-3. 굽힘 실험

재료의 굽힘 강도를 ASTM D709-84a 방법에 의해 4점 굽힘 실험을 하였다. Cross head speed는 1.3mm/min이고 지지길이는 80mm였으며 Shimazu사의 UTM autograph에서 실험하였다. 굽힘 강도는 식 (2)에 의하여 구하였다.

$$\text{굽힘 강도} = \frac{3PL}{4bt^2} \quad (\text{Pa}) \tag{2}$$

여기에서 P = 재료가 받는 최대하중(N)
L = 시험편의 지지길이(m)
b = 시험편의 폭(m)
t = 시험편의 두께(m)

3-4. 핀하중 인장 실험

재료의 Bearing strength Cross head speed를 0.5mm/min로 Instron에서 실험하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 원공의 크기와 분포에 따른 인장 강도 변화

시험편(폭 W = 20mm)에 원공의 크기를 0, 2, 3, 4, 5, 6mm로 변화시키면서 원공의 크기에 따른 인장강도의 변화를 브레이드 복합재료는 Fig. 3에 나타내었고, 직물 적층 복합재료는 Fig. 4에 나타내었다.

브레이드 복합재료의 경우 특성길이(d_0)를 1.6mm로 하면 Whitney와 Nuismer에 의하여 제시된 이론값과 실험값이 대체적으로 일치함을 알 수 있다. 이로부터 Whitney와 Nuismer에 의하여 제시된 이론이 브레이드 복합재료에서도 적용될 수 있음을 알 수 있다. 직물 적층 복합재료의 경우에도 특성길이(d_0)를 1.8mm로 하면 이론값과 실험값이 대체적으로 일치함을 알 수 있다. hole radius가 3mm이상에서부터 이론값과 실험값의 차이가 나는데 이는 특성길이를 원공의 반지름에 관계없는 상수로 가정한 이론의 한계와 보정계수의 사용범위의 초과에서 기인한다고 여겨진다. 즉 유한폭 보정계수는 $2R/W \leq 1/3$의 범위에서

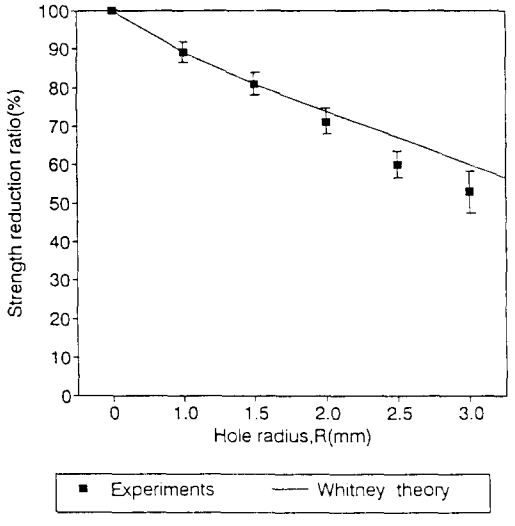

Fig. 3. Effect of hole size on tensile strength of braided composite(W=20mm)

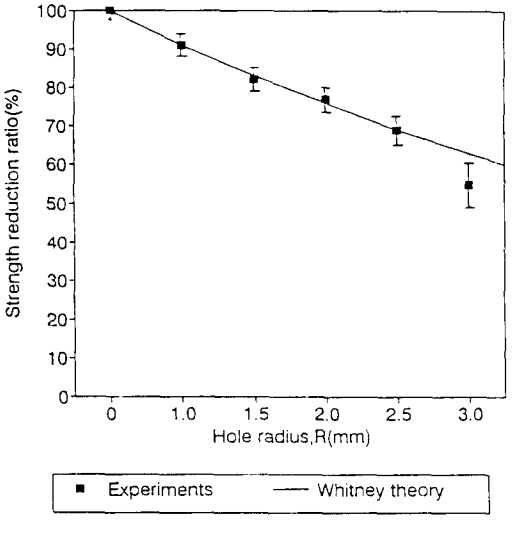

Fig. 4. Effect of hole size on tensile strength of woven laminated composite(W=20mm)

유효하기 때문이다[5].

브레이드 복합재료와 직물 적층 복합재료의 특성길이(d_0)의 차이는 보강섬유의 조직 차이에 기인한다고 여겨진다. 브레이드 복합재료와 직물 적층 복합재료의 원공 크기에 따른 강도 저하비(Strength Reduction Ratio)는 거의 같은 값을 나타내었다. 따라서 브레이드 복합재료나 직물 적층 복합재료 모두 노치 효과가 거의 같음을 알 수 있다.

시험편(폭 W=25mm)에 원공의 크기가 2mm와 3mm인 경우에 대하여 원공간 거리에 따른 인장강도의 변화를 원공의 지름(D)에 대한 원공중심간 거리(G)의 비인 G/D(Hole distance ratio)를 변수로 Fig. 5, 6에 나타내었다.

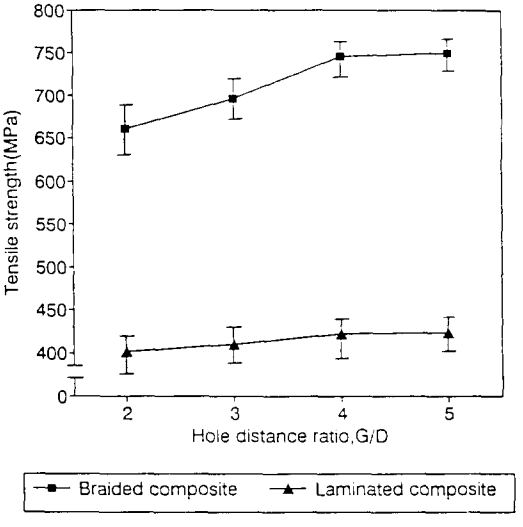

Fig. 5. Effect of G/D on tensile strength of braided and woven laminated composite(D=2mm, W=25mm)

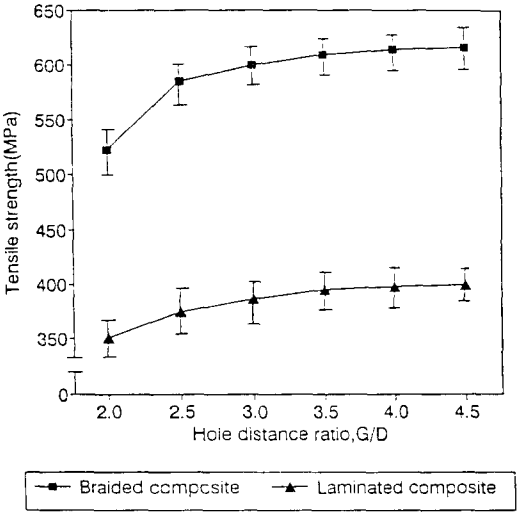

Fig. 6. Effect of G/D on tensile strength of braided and woven laminated composite(D=3mm, W=25mm)

이론적으로 원공주위의 응력 분포면에서 보면 브레이드 복합재료와 직물 적층 복합재료 모두 G/D가 3 이상이 되면 두 원공간 상호작용이 거의 없어야 하나 실제 실험값은 원공의 크기가 2mm인 경우 G/D가 4 이상이 되

어야, 즉 두 원공 중심 사이의 거리가 원공의 지름의 4배 이상이 되어야 브레이드 복합재료와 직물 적층 복합재료 모두 원공간 상호 작용이 없었다.

이론값과 실험값의 차이는 시편에 원공을 뚫을 때 시편이 받은 손상등 실험오차와 특성길이(d_0)를 원공의 반지름에 관계없는 상수라고 가정한 이론의 한계로부터 생긴 것이라 여겨진다.

원공의 크기가 3mm인 경우 G/D가 3.5이상이 되어야, 즉 두 원공 중심 사이의 거리가 원공의 지름의 3.5배 이상이 되어야 브레이드 복합재료와 직물 적층 복합재료 모두 원공간 상호 작용이 없음을 알 수 있다.

시험편(폭 W=25mm)에 원공의 크기가 2mm인 경우에 대하여 원공의 중심과 측면간 거리에 따른 인장강도의 변화를 원공의 지름(D)에 대한 원공의 중심과 측면간의 거리(Q)의 비 Q/D(Side distance ratio)를 변수로 Fig. 7에 나타내었다.

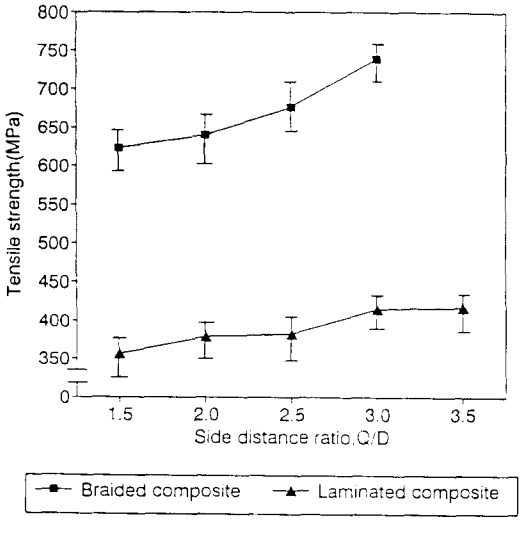

Fig. 7. Effect of Q/D on tensile strength of braided and woven laminated composite(D=2mm, W=25mm)

원공의 크기가 2mm인 경우 Q/D가 3이상이면, 즉 원공의 중심과 측면사이의 거리가 원공 지름의 3배 이상이 되면 브레이드 복합재료와 직물 적층 복합재료 모두 원공과 측면사이에 상호작용이 없음을 알 수 있다.

4-2. 원공의 크기와 분포에 따른 굽힘 강도 변화

원공의 크기가 2mm와 3mm인 경우에 대하여 원공간 거리에 따른 4점 굽힘강도의 변화를 Fig. 8, 9에 나타내었다.

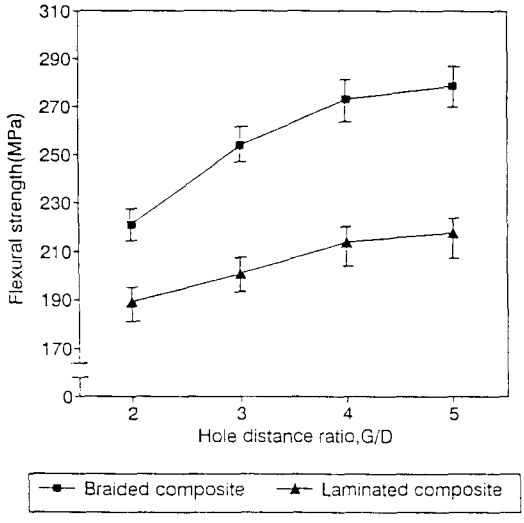

Fig. 8. Effect of G/D on 4-point flexural strength of braided and woven laminated composite(D=2mm, W=20mm)

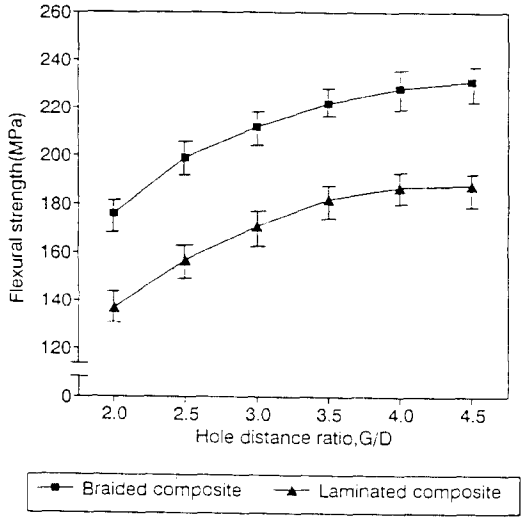

Fig. 9. Effect of G/D on 4-point flexural strength of braided and Woven laminated composite(D=3mm, W=25mm)

원공의 크기가 2mm와 3mm인 경우, 4점 굽힘강도는 G/D가 4이상이면 즉 두 원공 중심 사이의 거리가 원공 지름의 4배 이상이면 브레이드 복합재료와 직물 적층 복합재료 모두 원공간 상호 작용이 없음을 알 수 있다.

4-3. 원공의 크기에 따른 핀하중 인강 강도 변화

핀의 지름을 3, 4, 5, 6mm로 변화시키면서

핀의 크기에 따른 Bearing Strength의 변화를 Fig. 10에 나타내었다.

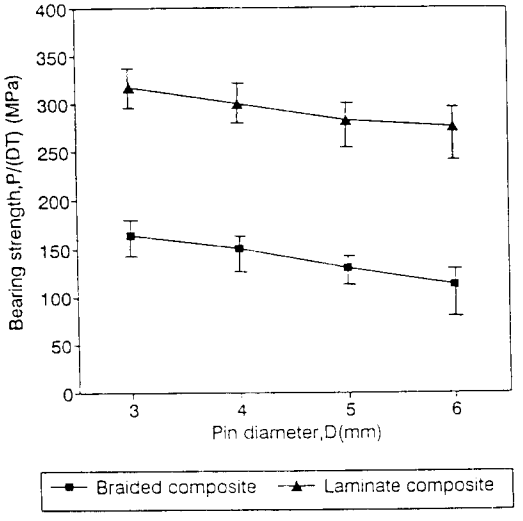

Fig. 10. Effect of pin size on bearing strength of braided and woven laminated composite

브레이드 복합재료와 직물 적층 복합재료 모두 원공의 지름(D)에 대한 시편의 주변(Edge)에서 원공의 중심간의 거리(E)의 비인 E/D를 3으로 일정하게 할 때 Bearing Strength는 핀의 지름이 증가함에 따라 감소하였다. 핀의 크기에 따라서 직물 적층 복합재료의 Bearing Strength가 브레이드 복합재료의 Bearing Strength보다 약 2배의 높은 값을 나타내었다. 이는 브레이드 복합재료에서는 직물 적층 복합재료와는 달리 핀이 섬유속 사이를 미끄러져 빠져나오는 것을 방지하는 90° 방향의 보강 섬유의 갯수가 적기 때문으로 여겨진다.

5. 결 론

원공의 크기에 따른 인장강도의 저하는 브레이드 복합재료의 경우 특성길이(d_0)를 1.6mm로 하면 Whitney와 Nuismer에 의하여 제시된 이론값과 실험값이 대체적으로 일치함을 보여 주었다. 이로부터 Whitney와 Nuismer에 의하여 제시된 이론이 브레이드 복합재료에서도 적용될 수 있음을 보여 주었다. 직물 적층 복합재료의 경우 특성길이(d_0)를 1.8mm로 하면 이론값과 실험값이 대체적으로 일치함을 보여 주었다. 브레이드 복합재료와 직물 적층 복합재료의 원공 크기에 따른 강도 저하비(Strength Reduction Ratio)는 거의 같은 값을 나타내었다. 따라서 브레이드 복합재료나 직물 적층 복합재료 모두 원공에 의한 노치(Notch) 효과가 거의 같다는 것을 알 수 있었다. 원공간 거리에 따른 인장강도를 측정한 결과 두 원공 중심 사이의 거리가 원공 지름의 4배 이상이면 브레이드 복합재료와 직물 적층 복합재료 모두 원공간 상호 작용이 없음을 알 수 있었다. 원공의 중심과 측면간 거리에 따른 인장강도를 측정한 결과 원공의 중심과 측면사이의 거리가 원공지름의 3배 이상이 되면 브레이드 복합재료와 직물 적층 복합재료 모두 원공과 측면사이에 상호작용이 없음을 알 수 있었다. 원공간 거리에 따른 4점 굽힘강도를 측정한 결과 두 원공 중심 사이의 거리가 원공지름의 4배 이상이면 브레이드 복합재료와 직물 적층 복합재료 모두 원공간 상호 작용이 없음을 알 수 있었다.

핀하중 인장실험에서 브레이드 복합재료와 직물 적층 복합재료 모두 핀의 지름이 증가함에 따라 Bearing Strength는 감소하였으나 핀의 크기에 따라 직물 적층 복합재료의 Bearing Strength가 브레이드 복합재료의 Bearing Strength보다 약 2배의 높은 값을 나타내었다.

후 기

본 연구는 91년도 한국과학재단 특정기초연구지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. P.K. Mallick, Fiber-Reinforced Composites, Marcel Dekker, Inc, 1988
2. J.M. Whitney and R.J. Nuismer, ASTM STP 593, pp.117 (1975)
3. J.M. Whitney and R.J. Nuismer, J. Composite Materials, Vol. 8, pp.253 (1974)
4. H.J. Konish and J.M. Whitney, J. Composite Materials, Vol. 9, pp.157 (1975)
5. R.E. Peterson, Stress Concentration Factors, John Wiley & Sons, New York, 1974