

섬유강화 복합재료에서 결함의 보강재에 의한 강도 평가⁺

이 문 철* · 최 영 근* · 이 택 순**

(1994년 1월 30일 접수)

The Strength Evaluation of Reinforced Flaw by Stiffener in Woven Fiber Reinforced Composite Plates

Moon-Chul Lee* · Young-Geun Choi* · Taik-Soon Lee**

Key Words : Open Hole(원공), Woven Composite Materials(직물복합재료), Ultimate Strength(극한강도), Strength Reduction Factor(강도 감소 계수), Notched Strength(노치강도)

Abstract

The use of advanced composite materials has grown in recent years in aerospace and other structures. Out of various kinds of repairing methods the one selected for this study is an idealized case which simulates a situation where a damaged laminate has been repaired by drilling a hole and thereafter plugging the hole with reinforcement. Two types of reinforcement are investigated : adhesively bonded plug reinforcement or snug-fit unbonded plug in the hole. For each case of reinforcement, four different sizes of hole diameter and three types of reinforcing material(steel, aluminum, plexiglass) are employed for investigation.

The experiment are mainly forced on the evaluation of ultimate strength of laminate with reinforced hole in comparison to its counterpart with the open hole.

1. 서 론

섬유강화 플라스틱(fiber reinforced plastic) 복합재료는 구조물의 중량경감과 높은 비강성, 비강도등의 우수한 기계적 성질을 나타내므로 최근 항공기 구조물, 자동차 및 선박, 스포츠-레저용

품, 대규모 회로기관 및 정밀측정기기등에 그 사용이 증가되고 있다. 그뿐 아니라 여러가지 산업분야에서 응용가능한 다양한 기능과 광범위한 물성범위 즉 고강도, 비강성, 내구성, 내피로특성, 내열성, 내마모성, 전도성, 절연성, 방열성, 내식성, 방사선 투과성등 재료의 특성을 열거할 수 없을 만큼 광범위한 기능소재이다. 또한 복합재

+ 1993년도 대한기계학회 추계학술대회 발표(1993. 11)

* 영남대학교 공과대학 기계공학과 대학원

** 정희원, 영남대학교 공과대학 기계공학과

료에 있어서는 요구되는 성질에 따라 물성의 설계가 가능하며 종래의 재료로서는 달성하지 못했던 특성 발현 및 응용이 가능하여 그 응용 범위가 무한하다고 볼 수 있다.

그리고 이 재료가 사용된 구조물의 유지와 보수는 제작자뿐만 아니라 사용자들도 많은 관심을 가지고 있다. 모든 수리방법들은 수리된 재료의 강도에측에 관심이 집중된다. 본 연구에서는 시험편에 손상된 적층판과 같은 상황을 이상화하여 드릴로 원공을 뚫고 그 후에 원공(open hole)을 막아 보강시킨다. 이때 보강물의 재료를 달리하여 원공이 보강된 시험편의 원공과 보강재의 접촉면의 파괴기구를 파면 사진을 통하여 고찰한다.

그리고 보강 되지않은 원공이 있는 시험편과 보강된 시험편의 강도를 비교하여 섬유강화 복합재료의 결합에 대한 강도 향상을 꾀하는 기술적 설계에 많은 정보를 제공하고 적절한 보강물의 개발과 보강기술의 향상에 기여하고자 한다.

2. 시험편 제작 및 실험방법

본 연구에서 사용한 시험편의 재료는 한국 화이바(주)에서 제작된 탄소섬유/에폭시(Carbon/Epoxy)복합재료로서, 이의 기계적 특성 및 화학적 성분은 Table 1, 2와 같다. 시험편은 섬유방향이 하중 방향에 대하여 $0^\circ/90^\circ$ 가 되도록 저속 다이아몬드 휠 커터를 사용하여 채취하였다. 시험편 형상은 Fig. 1과 같으며, 원공은 드릴을 사용하여 판폭에 대한 원공 직경의 비 ($2R/W$)가 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, (2.54, 5.08, 10.16, 15.24mm)의 4종류이며, 원공의 손상을 막기위해 시험편의 양편에 알루미늄판을 붙여서 뚫고자 하는 치수보다 적은 지름의 드릴을 사용하고 마지막 적당한 크기의 드릴을 사용하여 가공하였다. 또한 보강재는 정밀가공하여 가공에 의한 강도저하를 최소화 하였으며, 복합재료 보다 강성이 큰 강과 강성이 비슷한 알루미늄, 강성이 적은 플렉시 유리(plexiglass)를 보강재로 사용한다.

사용된 시험기는 인스트론사(Instron, Model NO 1332)유압식 만능 시험기 이다. 시험속도는 0.5mm/min로 하고 파단될 때까지 하중을 가하였

다. 시험 도중에 하중과 변위는 A/D변환기를 통해 개인용 컴퓨터에 10Hz의 속도로 받아 들었다.

하중의 형태는 인장과 압축 두가지 형태로 수행하였다. 시험편은 유압 그립(hydraulic grip)과 본 실험실에서 직접 제작된 그립을 사용하여 장착하였다. 특히 압축 시험시에는 좌굴(buckling)을 방지하기 위해 시험편 양편에 유지구를 부착하였다. 시험편 유지구의 형상은 Fig. 2와 같다.

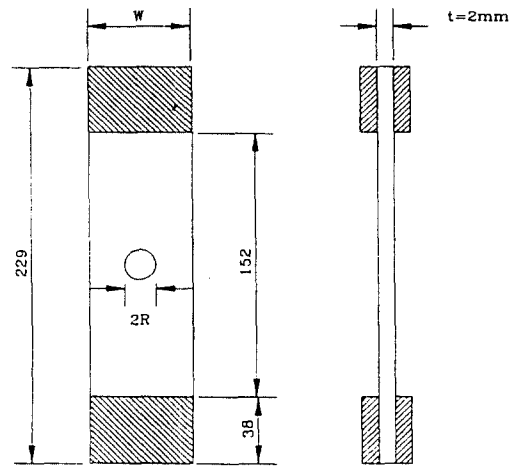


Fig. 1 Configuration of test specimen.

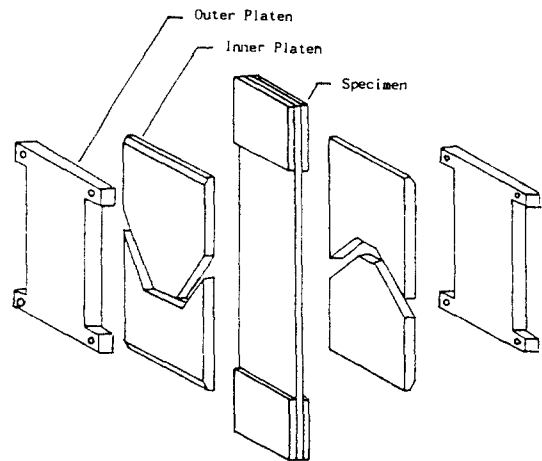


Fig. 2 Exploded view of face-supported fixture.

Table 1. Mechanical properties of carbon/epoxy composite material(HC3319/RS1222)

Wet resin content	39±2% (Wt.)
Volatile content	1.0% (Wt.)
Fiber weight/area	193±8g/m ²
Resin flow	1.0±0.2%

Table 2. Chemical composition of carbon/epoxy composite material(HC3319/RS1222)

Ultimate Tensile Strength	1027 Mpa
Young's Modulus	63.1 Gpa
Compressive Strength	730 Mpa
Poisson's Ratio	0.04

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 접착재를 사용하지 않은 경우의 강화

본 연구에서는 강도 감소계수(strength reduction factor : SRF)를 사용하여 보강효과를 고찰하였다. SRF의 정의는 다음과 같다.

$$SRF = \frac{\text{보강 되었을 때 또는 되지 않았을 때의 노치강도}}{\text{노치가 없을 때의 강도}}$$

3.1.1 인장시험 결과

원공(open hole)과 보강재를 사용한 시험편을 비교해 보면 다음과 같다. 알루미늄 보강재를 사용한 경우에서 5mm이상인 경우에는 5-12%의 강도 향상을 보였으나 2.54mm에서는 강도 향상이 없었다. 이것은 인장 하중에서 복합재와 강화재 사이에 상호작용의 정도가 매우 적기 때문인 것으로 사료된다.

Fig.3을 살펴보면 플렉시유리의 경우 강도의 증가가 없음을 알 수 있다. 이것은 플렉시유리의 강성이 시험편과 비교할 때 너무 낮기 때문이며 원공에 작용되는 하중에 대한 상호작용은 아닌 것으로 판단된다. 대부분의 플렉시유리 보강재는 시험편이 파단되었을 때 모두 파괴되었다.

강의 경우에는 2.54와 5mm의 보강효과는 알루

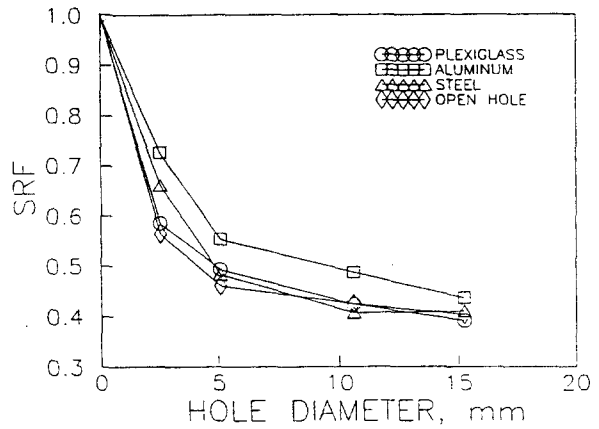


Fig.3 Comparison of SRF among all unbonded inclusions and open hole(t=2mm, tension).

미늄의 경우에서와 유사한 결과를 보였다. 그러나 그보다 더 큰 원공에서는 알루미늄에서 보다 보강효과가 적었다. 이것은 강이 시험편보다 강성이 훨씬 높기 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 알루미늄으로 보강된 시험편은 원공과 비교할 때 강도감소계수가 증가된 반면에 강과 플렉시유리로 보강된 시험편은 강도의 증가가 없었다. 이것은 복합재와 보강재의 탄성계수의 차이 때문으로 판단된다. 아울러 시험편의 두께와 시험편의 게이지 길이가 강도감소계수에 어떤 영향을 미치는가를 조사하기 위하여 위의 실험치와 비교하여 본 결과(Fig. 4, 5) 두께와 게이지 길이는 강도감소계수에 영향을 미치는 인자가 아님을 알 수 있었다.

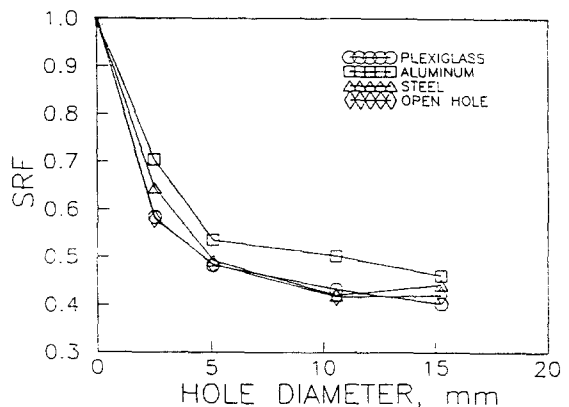


Fig.4 Comparison of SRF among all unbonded inclusions and open hole(t=4mm, tension).

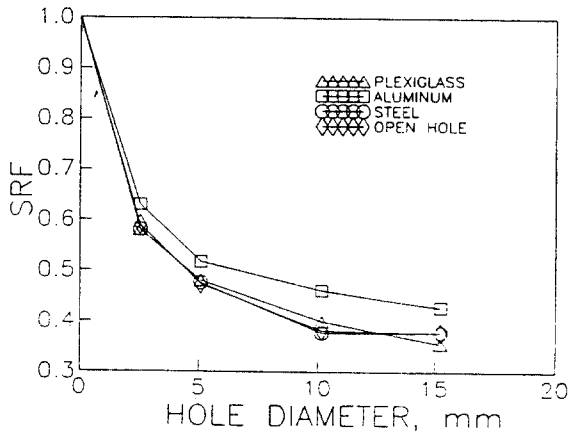


Fig. 5 Comparison of SRF among all unbonded inclusions and open hole(t=2mm, gage length=102mm, tension).

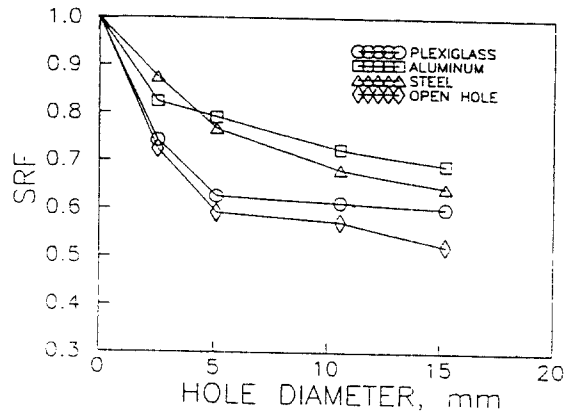


Fig. 6 Comparison of SRF among all unbonded inclusions and open hole(t=4mm, compression).

3. 1. 2 압축시험 결과

인장에서의와 같이 알루미늄은 상당한 강도향상을 보였다. 2.54mm의 경우에서는 강화영역이 매우 적기때문에 다른 경우보다 상대적으로 강도향상이 적었다. 15mm원공의 경우에는 22.3%의 증가를 나타냈다. 그리고 플렉시유리의 경우에는 보강효과가 적었다. 이는 두 재료간의 강성의 현저한 차이로 판단된다. 강 의 경우는 알루미늄의 경우에서의와 같이 많은 강도향상을 보였다. 또한 강화재와 원공의 상호작용이 많은 압축하중의 경우가 인장 하중에 비하여 강도향상이 현저했다. 압축하중이 작용될 시에는 일반적으로 좌굴현상이 일어나므로 시험편에 유지구를 부착시키거나 시험편의 게이지 길이를 적게한다.

본 실험에서는 좌굴 방지를 위해 유지구를 직접 제작하여 부착 시켰다. 이때 좌굴현상을 규명하기 위해 두께와 시험편의 게이지길이를 각각 달리하여 실험하였다.

Fig. 6은 시험편의 두께를 달리했을때의 결과이고 Fig. 7은 게이지 길이를 달리 했을때의 결과인데 동일 조건하에서는 실험 결과가 거의 일치하였으므로 좌굴현상이 없었다고 사료되며 아울러 시험편의 길이 및 두께는 강도 감소 계수(SRF)에 영향을 주지 않음을 알 수 있었다.

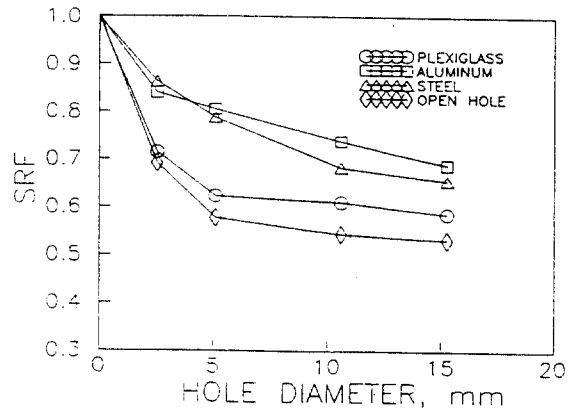


Fig. 7 Comparison of SRE among all unbonded inclusions and open hole(t=2mm, gage length=102mm, compression).

3. 2 접착재를 사용한 경우의 강화

본 실험에 사용된 접착재는 에폭시(epoxy)접착재(E : 1.92GPa, v : 0.4)를 사용 하였다. 보강재와 원공사이의 접착층의 두께는 0.1mm로 하였다.

인장실험의 결과인 Fig. 8에서 알 수 있듯이 원공과 비교할 때 어떠한 보강재의 크기에서도 강도의 향상은 없다.

압축실험의 결과인 Fig. 9을 살펴 보면 접착제를 사용하지 않은 경우의 압축실험(Fig. 10)보다 강도의 향상이 크게 증가된 것을 알 수 있다. 그리고 원공의 크기가 클수록 강도의 증가는 크다.

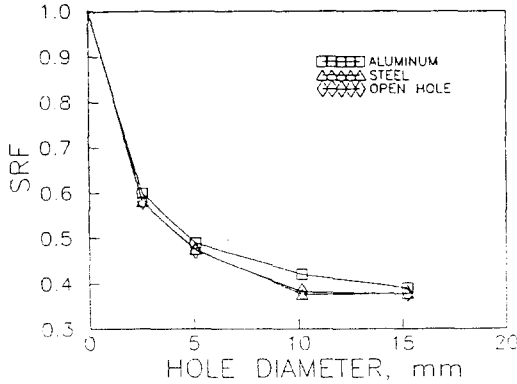


Fig. 8 Comparison of SRF among all bonded inclusions and open hole(t=2mm, tension).

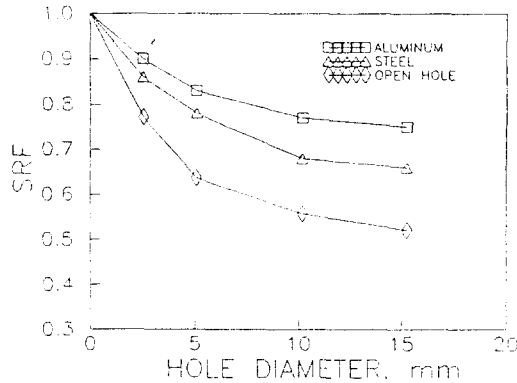


Fig. 9 Comparison of SRF among all bonded inclusions and open hole(t=2mm, compression).

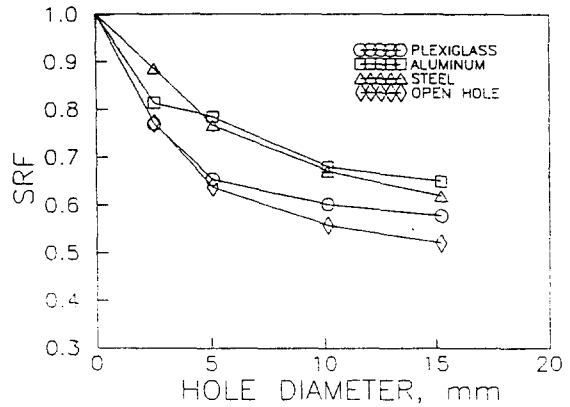


Fig. 10 Comparison of SRF among all unbonded inclusions and open hole(t=2mm, compression).

4. 파괴 메카니즘

4.1 주선전자현미경(SEM) 관찰

Fig. 11의 (a)는 0°/90° 시험편의 최대인장 응력이 작용하는 0° 방향의 섬유에서 인발 및 섬유의 뽑힘 현상과 같은 심한 파손을 유발하였고 90° 방향의 섬유에서는 스플리팅(splitting)현상 및 섬유와 모재의 분리(debonding)현상을 뚜렷하게 볼 수 있다.

(b) 그림은 순수인장응력이 걸리는 부분에서 시험편을 채취하여 관찰 하였는데 모재의 변형없이 섬유의 뽑힘을 볼 수 있으며, 섬유의 분리가 뚜렷이 보이고 있다. 이것은 열가소성복합재료의 섬유와 기지간의 접합강도가 매우 낮기 때문이다.

섬유의 파괴는 전형적인 취성 파괴현상을 나타내고 있다.

(c) 그림은 원공 주위의 최대전단 응력이 걸리는 부분의 파단면 사진으로서 기지(matrix)의 심한 손상이 관찰되었다. 광학 현미경의 관찰에 의하면 이 부분에서 균열이 생성되어 최종파단에 이르렀다.

(d)는 압축 하중을 받을때의 원공 주위의 파단면 양상으로서 섬유가 풍부한 영역에서의 섬유의 심한 파손을 보여주고 있다.

(e) 그림에서는 섬유와 섬유의 분리자국과 핵클이 보인다. 핵클표시는 섬유와 기지 사이의 취성파괴에 의해 발생하는 것이 아니고 섬유와

기지사이에서의 전단 항복(shear yielding)에 의해 발생하는 것으로 사료된다.

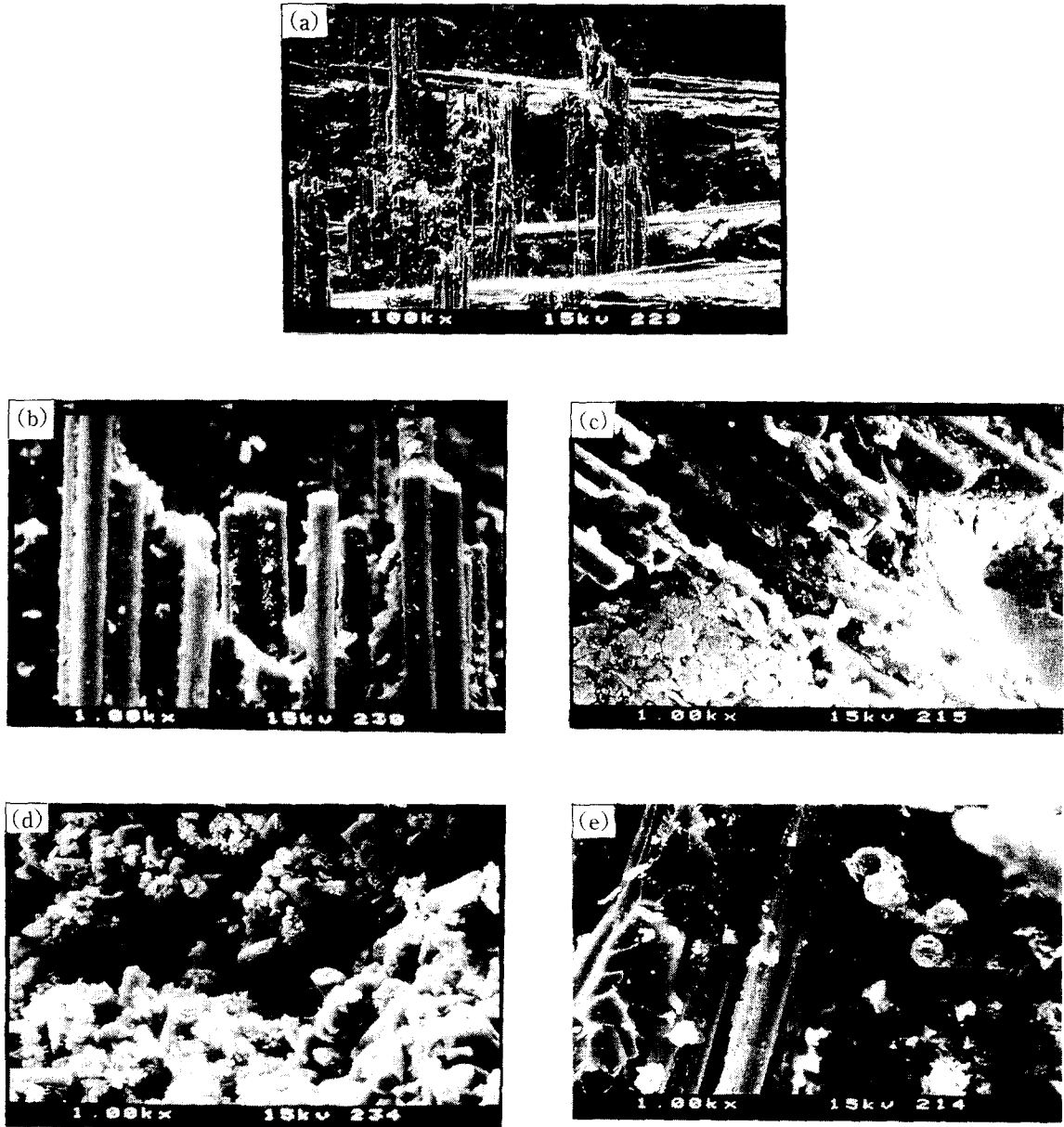


Fig. 11 The fractograph of fracture surface.

4.2 유한요소(FEM) 해석

원공노치 주위의 응력 분포를 알아 보기 위해 유한요소법을 이용한 해석을 하였다. 모델의 대칭성을 고려하여 1/4만을 해석하였으며, Fig. 12은 해석 모델의 요소분할을 도시한 것이다. 요소(element)의 개수는 512개이며 절점(node)의 개수는 1497개이다. Fig. 13, 15, 17은 각각 원공, 알루미늄, 강으로 보강했을때 인장하중에서의 응력 분포를 보여주고 있다. Fig. 13과 14는 원공일때 아무런 보강이나 구속이 가해지지 않고 있기 때문에 인장 혹은 압축응력을 받을때 원공 주위에서 응력집중이 걸리고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 15은 알루미늄 보강재를 사용하였을때, 인장하중에서의 응력 분포이다. 이 그림에서 원공에서 가장자리에 걸리든 응력집중이 보강재로 분산되어 가장자리 부분은 응력이 가장 적게 걸리는 부분이 되었다는 것을 알 수 있다.

Fig. 16은 알루미늄 보강재를 사용했을 경우의 압축하중에서의 응력 분포이다. 이 그림의 특징은 응력 분포가 전체적으로 등분포 양상을 띄는 것으로 미루어 보아 보강 효과가 실험에서 보여진 것과 같이 가장 큰 것으로 사료된다.

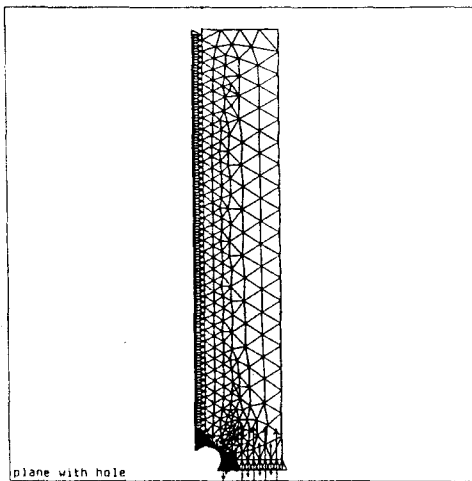


Fig. 12 Finite Element Mesh of Test Specimen. (open hole)

Fig. 17은 시험편 보다 강성이 훨씬 큰 강(steel) 보강재를 사용했을때 인장 하중에서의 응력 분포로서 이 그림에서도 원공에 걸리든 응력이 보강재로 분산되기는 하였으나 보강재 부분의 응력집중이 알루미늄으로 보강했을때 보다 증가하였다.

Fig. 18은 보강재를 강을 사용했을때 압축하중에서의 응력 분포이다. 보강효과가 인장에서 보다는 좋으나 모재와 강성의 차이가 심하여 계면 주위에서 응력집중이 걸리고 있다. 각각의 경우를 비교 했을때 모재와 가장 강성이 비슷한 알루미늄으로 보강된 시험편에서 원공 주위의 응력분산이 두드러졌다.

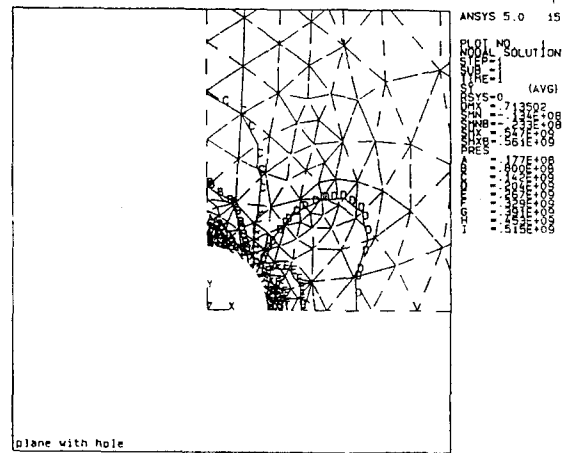


Fig. 13 Distribution of stress in the vicinity of circular hole.(tension, open hole)

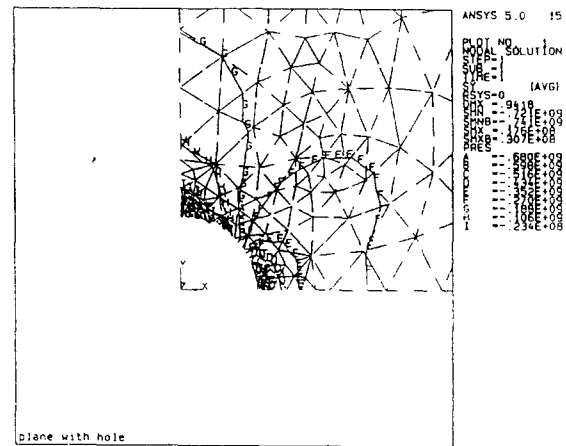


Fig. 14 Distribution of stress in the vicinity of circular hole.(compression, open hole)

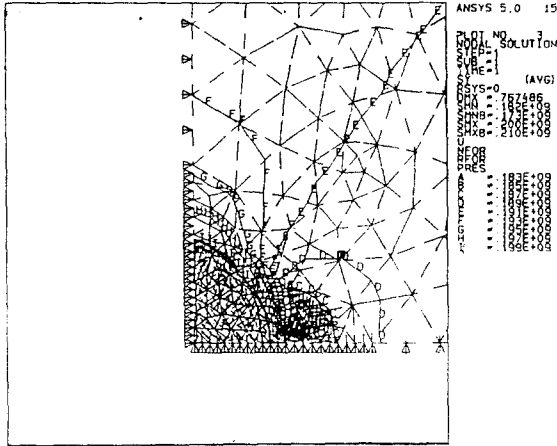


Fig. 15 Distribution of stress in the vicinity of circular hole.(tension, aluminum)

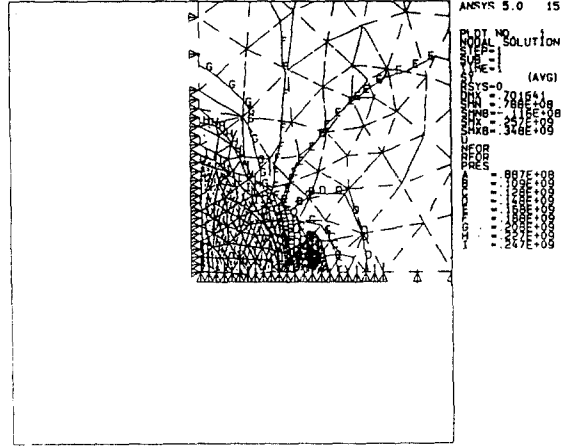


Fig. 17 Distribution of stress in the vicinity of circular hole.(tension, steel)

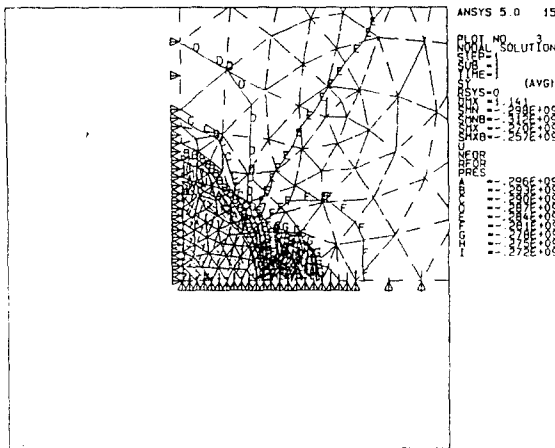


Fig. 16 Distribution of stress in the vicinity of circular hole.(compression, aluminum)

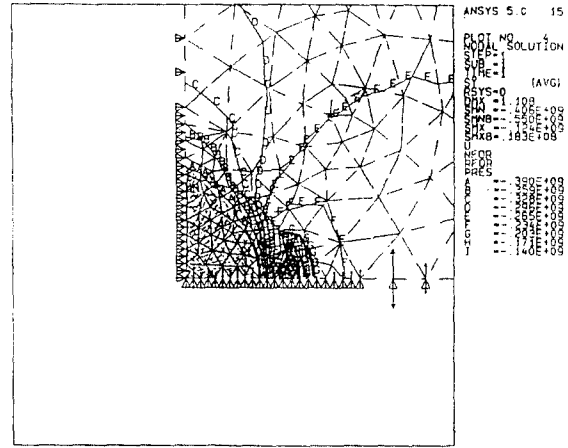


Fig. 18 Distribution of stress in the vicinity of circular hole.(compression, steel)

5. 결 론

이상의 실험결과를 종합해 보면 다음과 같다.
(1) 강화된 모든 시험편에서 강도의 증가가 있었으며, 특히 압축 하중에서 강성이 가장 유사한 알루미늄으로 강화된 시험편에서 원공(open hole)과 비교할 때 가장 큰 강도향상을 보였다.

- (2) 강은 압축하중에서 보강효과가 알루미늄과 비슷하나 인장 하중에서는 보강효과가 거의 없었다.
- (3) 시험편의 두께와 시험편의 게이지 길이는 강도감소계수(SRF)에 거의 영향을 미치지 않았다.
- (4) 접착재를 사용한 인장시험에서는 접착된 부분의 파단으로 인해 강도의 증가가 없었다.

완전한 접착이 이루어 진다면 접착재를 사용하지 않은 경우보다 강도의 향상이 기대된다.

(5) 파단면 관찰을 통해 0°방향에서 섬유와 인발 및 심한 파손이 일어났고 90°방향에서는 섬유와 모재의 분리현상이 나타났다.

(6) 유한요소해석과 실험 결과는 정성적인 일치 결과를 보였다.

참 고 문 헌

- 1) Awerbuch, J. and M. S. Madhukar. "Notched Strength of Composite Laminates : Prediction and Experiments-A Review", Journal of Reinforced plastics and Composite. 4(1985)
- 2) Kocher. L. H. and S. L. Cross. "Reinforced Cutouys in Graphite Composite Structure." Composite Materials ASTM STP 497. pp.382 (1972).
- 3) O'Neill. S. S. Asymmetric Reinforcement of a Qussi-Isotropic Gr/Ep Plates Containing a Circular Hole. MS thesis. Naval Post Graduate School, Monterey. CA(1982)
- 4) Pickett. D.H. and P.D. Sullivan. Analysis of Symmetrical Reinforcement of QussiIsotropic Gr/Ep Plates with a Circular Cutoutunder Uniaxial Tension Loading. MS thesis, NPGS. Monterey, CA(December 1983).
- 5) Tan, S.C. and S.W.Tasai. Notched Strength. Composites Dsign, 3rd Edition(1987).
- 6) E. Gail Guynn., Walter L. Bradley., "A Detailed Investigation of the Micromechanism of Compressive Failure in Open Hole Composite Laminates", J-Composite materials, Vol. 23, pp. 497-504(1988)
- 7) Mark J. Shuart., 1989, "An Analysis of Shear Failure Mechanisms for Compression-Loaded [$\pm \theta$]s Laminates," J-Composite materials, Vol. 23, pp. 251-263