

---

# 탄소/에폭시 복합재료 구조물의 기계적 결합에 대한 강도 예측

김기범\*, 이미나, 공창덕(조선대학교)

## Strength Prediction of Mechanically Fastened Carbon/Epoxy Joints

K. B. Kim\*, M. N. Lee and C. D. Kong

---

Keywords : Bearing Failure(베어링 파괴), Stress Concentration(응력집중), Composite(복합재료), Fastened Joints, FEM(유한요소법), Failure criterion (파괴 기준)

### ABSTRACT

An investigation was performed to study the predicting the joint strength of mechanical fasteners. Bearing failure is most important failure mode for designing joint. So in this study, the prediction method in consideration with bearing failure was chosen. In the proposed method, the characteristic length is combined with the Yamada-Sun failure criterion, Tsai-Hill failure criterion and characteristic length for Tension and Compression is determined from investigation. Especially the length of compression is determined from the "bearing failure test" that newly conceived to take bearing failure into consideration. The proposed prediction method was applied to quasi-isotropic carbon/epoxy joint showing net-tension and bearing failure experimentally. Good agreement was found between the predicted and experimental result for each joint geometry.

### 초 록

본 연구에서는 탄소/에폭시 복합재료의 기계적 결합부의 결합강도 예측을 위한 구조해석과 실험을 수행했다. 복합재료 구조물의 결합부 설계에 있어 베어링파괴는 대단히 중요한 파괴형태 중 하나이다. 그래서 베어링 파괴를 해석적으로 예측하고 실험적으로 확인하였다. 순수인장 파괴(Net Tension Failure)와 베어링 파괴(Bearing Failure) 실험을 위해서 각각 두 가지 형상의 시편을 선택했다. 기계적 결합강도 예측에 사용된 방법은 특성길이(Characteristic Length)법과 연관된 Yamada-Sun 파괴기준(Failure Criterion)과 Tsai-Hill 최대일 이론이다. 그리고 인장특성길이와 압축특성길이는 실험을 통하여 얻어지며, 특히 압축특성길이 결정은 최근에 착안된 베어링파괴 실험으로부터 결정됐다. 위와 같은 예측 방법을 준등방성(Quasi - Isotropic) Carbon/ Epoxy HT245/RS3232에 적용하였다. 연구결과, 이론적인 복합재료 파괴예측이 실험결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

## 1. 서론

오래 전부터 복합재료의 이점이 대두되면서 복합재료를 이용한 구조물들의 숫자가 크게 증가되고 있다. 그러나 복합재료가 가지는 우수한 기계적 특성에도 불구하고 전체구조물을 구성하는 금속재료구조, 또는 다른 복합재료 구조와의 효과적인 결합이 뒷받침되지 못한다면 제 성능을 발휘하지 못하게 된다.[16] 최근에는 복합재료 구조물 성형에 있어 섬유강화 복합재료의 연속성을 유지하는 공작법이 많이 개발되고 있지만, 형상과 기능이 복잡한 구조물을 제작하기 위해서는 서로 다른 두 구조물 부품을 결합하는 공정을 필연적으로 거쳐야 한다.[15] 이런 측면에서 기계적인 방법으로 결합된 구조물 결합 부위의 강도예측은 복합재료 구조물 설계과정에서 필수적으로 수행되어야 한다. 이러한 기계적 결합(Mechanically Fastened Joints)의 강도예측에 대한 여러 가지 방법이 제안되었다.[1-7]

그 중 주요한 예측방법으로는 두 개의 실험적 인자(Parameter)를 포함하는 혼합형태의 파손이론(Failure Theories)이 있다. Waszczak와 Cruse[5]는 최대응력 파손기준(Maximum Stress Failure Criterion)을 사용하여 결합부위 강도를 예측하였다. 그리고 Oplinger and Gandhi[6]는 Hoffman Criterion을 사용했다. 그러나 이들의 예측 결과는 실험에 의한 강도보다 작게 나타나는 경향을 보였다. Whitney와 Nuisner [8]는 점응력법(Point Stress)과 평균응력법(Average Stress Method)법을 제안했다. 이 예측법은 종종 2변수모델(Two-Parameter Model)로 불려진다. 그 이유는 강도가 실험적으로 결정된 두 개의 변수 항으로 표현되기 때문이다. 요컨대 하중방향 응력 ( $\sigma_y$ )이 홀 가장자리(Hole Edge)에서  $d_0$  만큼 떨어진 곳에서 평판(Unnotched Laminate)의 강도( $\sigma_0$ )와 일치하게 되면 비로소 파괴가 발생된다는 이론이다. 여기서 평판강도( $\sigma_0$ )와  $d_0$ 가 실험적으로 결정되어질 인자(Parameter)이다. 길이 ( $d_0$ )를 특성길이(Characteristic Length)라 한다. 이것은 하중과 같은 방향의 인장 응력만을 고려하였으므로 다른 종류의 전단 응력 항과는 상호관계가 없다고 가정된 것이다. Chang, et al. [1-3]은 기계적 결합

(Mechanical Joint) 해석을 위해 Tsai-Wu와 같은 인장, 전단이 동시에 고려된 파괴기준을 사용하였다. 이 접근 방법은 평균응력기준안(Average Stress Criterion Formulation)에 나타나는  $\sigma_0$ 의 크기에 기준을 둔 특성길이(Characteristic Length)가 Yamada-Sun Criterion [9,10]과 연관된 방법이다.

파손기준들은 점진적인 하중증가에 따라 시험된다. 만약, 시편에 파괴가 나타나지 않는다면 연속적으로 다음 단계의 하중을 가하게 된다. 파손이 나타나는 경우에는 파손층의 기계적 물성치들이 파손모드에 적당한 물성치 저하율에 따라 감소하게 된다. 시편에 나타나는 응력들은 같은 하중에서 재 분포되어 최종 파괴에 이를 때까지 이 과정은 계속하게 된다. 파손이 시편 가장자리까지 이르게 되고, 하중이 파손면적에 더 이상 재 분포되지 못하게 되면 비로소 파괴를 의미한다. 이 두 가지 상태는 최종적인 파괴상태를 의미한다.[15]

이 외의 다른 몇 가지 강도예측방법이 제안되기도 했다. 하지만 어떠한 경우라도 베어링(Bearing) 파손모드는 여러 파괴 모드중 중요한 위치를 차지하고 있음이 명백하다. 본 연구에서 베어링 파괴강도 예측에 사용된 방법은 인장과 압축에 대한 각각의 특성길이와 Yamada-Sun파손기준과 Tsai-Hill에 의한 복합적인 방법을 따른다. 인장에 있어 특성길이는 Whitney and Nuisner가 제안한 인장실험에 의해 결정된다. 압축특성길이는 최근에 새롭게 고려되는 베어링 파손실험을 통하여 결정된다.[15] 이와 같이 제안된 예측 방법은 준등방성(Quasi-Isotropic) Carbon/Epoxy HT245/RS3232 시편에 적용되며, 순수인장과 베어링 파손 실험이 수행된다.

## 2. 결합부위 시편과 실험결과

예측에 사용된 시편은 HT245/RS3232[45/0/-45/90]s로서 Prepreg Layer의 가온가압 Curing성형된 것이다.((주)한국화이버) 결합부위의 형상은 Fig.1에 도시된 바와 같다. 시편의 두께( $t$ )는 1.3mm와 3.8mm이며 8층과 24층으로 구성됐다. 62% 탄소섬유 체적분율(Carbonfiber Volume Fraction)을 가진다.

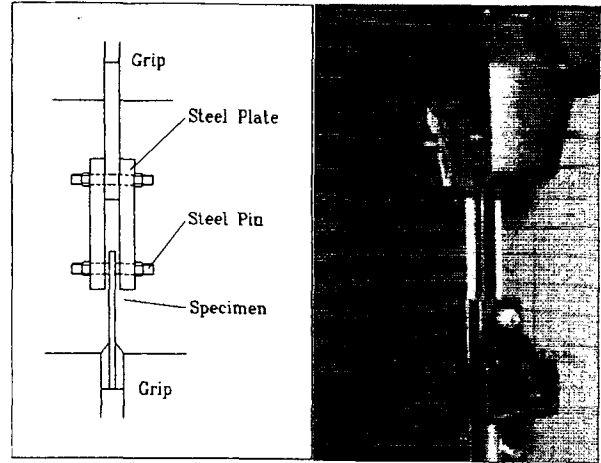
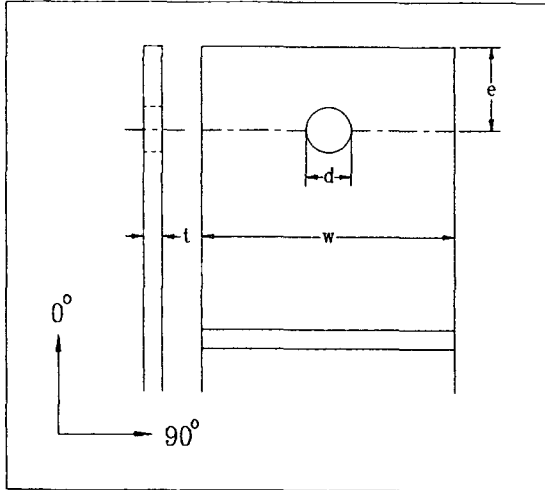


Fig. 2 The Set-up of Double-lap Joint Test.

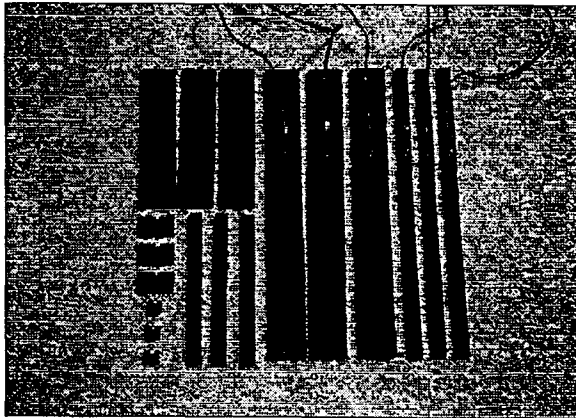


Fig.1 (a)Schematic and (b)Picture of Specimen Configuration

구멍 직경( $d$ )은 6.35mm이며,  $w/d=2$ ,  $e/d=2$ 인 ( $2w2e$ )시편과  $w/d=6$ ,  $e/d=2$ 인 ( $6w2e$ )시편이 사용되었다. 여기서  $w$ 는 시편의 폭이며,  $e$ 는 구멍 중심에서 시편의 길이방향 가장자리까지의 거리를 의미한다. 사용될 2중겹침 결합 시편(Double-lap Joint)은 Fig. 2와 같다. 시편은 2개의 평평한 금속판 사이에 위치한다. 그리고 강철 핀(Steel Pin)에 의해 결합된다. 이때 조임 토크(Tightening Torque)는 무시한다. 인장실험은 Instron Universal Testing Machine (Type 4510)에서 수행하였고 인장 시험은 1.27mm/min, 압축실험은 0.1mm/min의 Head Speed로 설정하였다. Fig.3에  $2w2e$ 와  $6w2e$ 시편의 순수인장과 베어링 실험에 의해 파괴된 형상이 보인다.

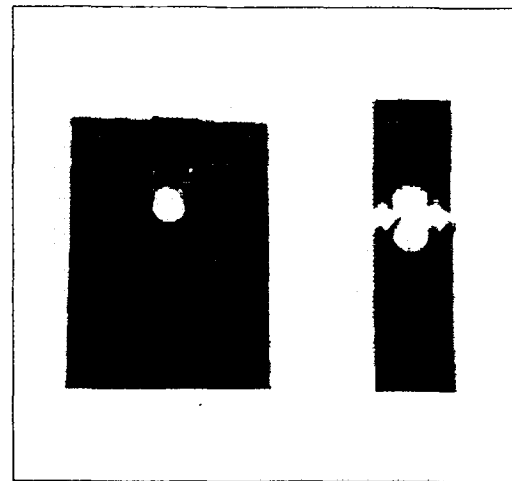


Fig. 3 Failure Modes for each Specimen.

실험에서 얻어진 하중변위선도는 Fig 4에 나타나 있다. 최대하중은  $5w2e$  시편에서  $2w2e$ 시편보다 높은 값이 나타남을 알 수 있다. 순수인장 시험에서는 시편이 파괴됨과 동시에 작용하중이 최대치에서 '영(Zero)'으로 떨어지지만 베어링 파괴실험에선 초기파괴 이후에도 저항력을 가지고 있음을 볼 수 있다. 그래서 복합재료 결합부위에는 베어링 파손모드가 강도와 안정성 면에서 보다 양호하다는 것을 알 수 있다. 하지만 베어링파손을 나타내는 결합부위에 대한 강도예측방법은 아직까지 정확히 일반화되지 않은 실정이다.

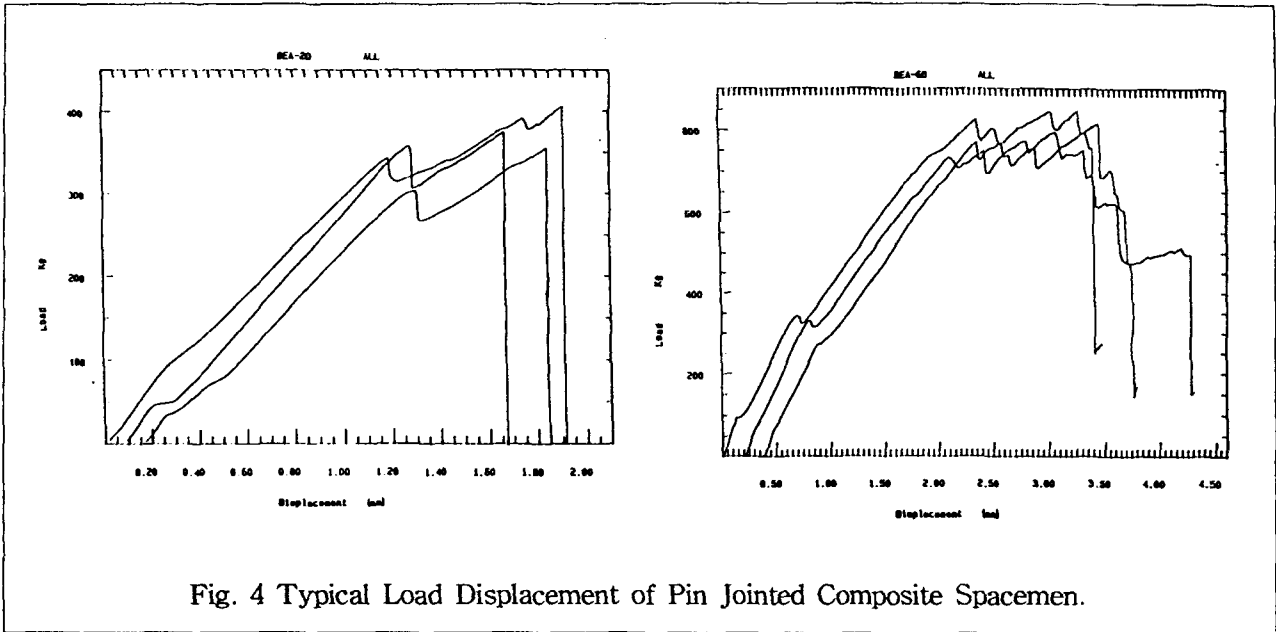


Fig. 4 Typical Load Displacement of Pin Jointed Composite Specimen.

3. 강도예측방법

3.1 제안된 강도예측 방법의 개요

Fig.5에 제안된 베어링 강도 예측방법의 흐름도가 나타나 있다. 본 연구에서의 주요 사항 중 하나는 압축에 있어서의 특성길이 정의방법에 있다. 본 연구에서 사용한 파손기준은 Yamada -Sun 파손기준[9,10]과 Tsai-Hill 파손기준이다.[17]

그리고 특성길이는 PSC(Point Stress Criterion) 정의를[8] 이용하였다. 이것은 베어링강도 예측에 중요한 부분을 차지한다.

Bearing Failure Test	FEM Stress Analysis	Tensile Test with a Hole
Point Stress Criterion		Point Stress Criterion
Characteristic Length for Compression (Roc)	Stress Distribution in each Ply	Characteristic Length for Tension (Rot)
Application of Failure Criterion Yamada-Sun Criterion or, Tsai-Hill Criterion + Characteristic Curve		

Fig. 5 Flow Chart of The Mechanically Fastened Joint Strength Prediction Method.

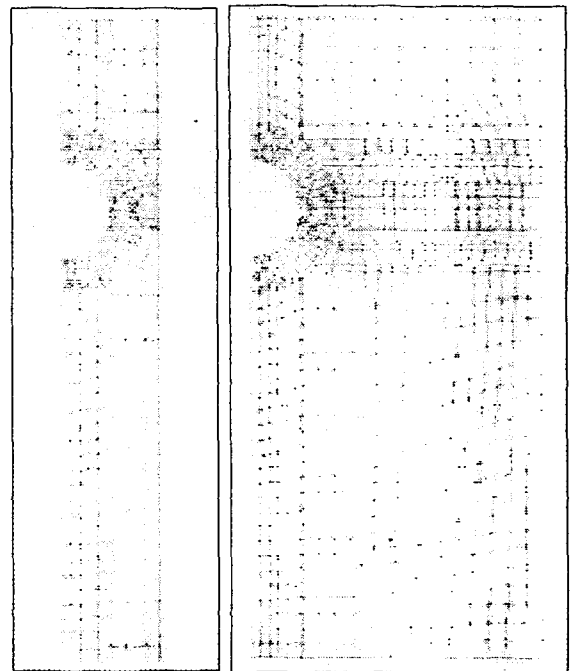


Fig. 5 FEM Division of Mechanical Joints.

Table 1. Material Properties of HT245 /RS3232 Quasi-isotropic Joints. [45/0/-45/90]s

Elastic Modules	$E_x$	88.3 E+9 (Pa)
Shear Modules	$G_{xy}$	17.54 E+9 (Pa)
Poisson's Ratio	$\nu_{xy}$	0.32
Tensile Strength	$\sigma_0$	435.5 E+6 (Pa)

Table 2. Ply Material Properties of HT245/RS3232.

Longitudinal Modules	$E_l$	119.2 E+9 (Pa)
Transverse Modules	$E_t$	2.908 E+9 (Pa)
Shear Modules	$G_{lt}$	6.86 E+9 (Pa)
Poisson's Ratio	$\nu_{lt}$	0.3
Longitudinal Tensile Strength	FXT	1.93 E+9 (Pa)
Longitudinal Compressible Strength	FXC	1.48 E+9 (Pa)
Transverse Tensile Strength	FYT	50.2 E+6 (Pa)
Transverse Compressible Strength	FYC	286.4 E+6 (Pa)
Shear Strength	$F_s$	120.6 E+6 (Pa)
Fiber Volume Fraction	$V_f$	62 %

### 3.2 기계적 결합부위의 유한요소법을 통한 응력해석

본 연구의 각 적층판 Stress해석은 유한요소 프로그램(NISA II)을 사용하였다. Fig.5는 사용된 FEM Mesh형상이다. 사용된 요소는 3차원 쉘 요소이고 각 요소당 4개의 절점을 가진다.[18] 2w2e시편과 6w2e시편 모델의 총 요소수는 각각 637개, 1280개이고 총노드수는 719개, 1375개이다. 준등방성(Quasi-Isotropic) HT245 /RS3232 [45/0/-45/90]s의 물성치는 Table 1.과 같다. 그리고 FEM해석은 결합부위의 대칭성을 고려하여 반쪽만을 모델링 하였다. 전단편에 해당되는 부분은 핀 하중을 Cosine 함수로 분포시켜 작용시켰다. 각 층의 물성치는 Table 2. 와 같다. FEM에 의해 해석된 각층의 응력분포도는 섬유를 기준으로 축 방향응력과 전단 응력의 분포이다. 파괴기준은 이 응력 분포를 적용하여 뒤에 거론될 것이다.

### 3.3 인장특성길이

본 연구에서 인장에 대한 특성길이는 구멍을 지닌 인장 시편에 PSC(Point Stress Criterion)이 적용되어 결정된다. 홀을 지닌 인장시편의 점응력 기준은 Whitney and Nuismer [8]에 의해 제안됐다. Fig.9는 인장특성길이에 대한 PSC의 정의를 나타내고 있다. 이와 같은 파괴기준에 의한 파손은 하중방향 인장응력( $\sigma_y$ )이 Unnotched Laminate Strength( $\sigma_0$ )와 구멍 가장자리로부터  $R_{OT}$  만큼의 거리에서 같아질 때 파괴가 나타나며, 이때의  $R_{OT}$ 를 인장특성길이라 한다. 본 연구에서는 Hole을 지닌 적층판의 파괴하중( $P_{NT}$ ) 측정과 파괴하중( $P_{NT}$ ) 작용시의 응력분포를 계산하여  $R_{OT}$ 를 결정한다. 실험할 적층판 시편의 적층순서는 [45/0/-45/90]s이다. 파괴강도( $P_{NT}$ )는 시편의 인장시험에 의해 얻어진다. FEM응력해석은 파괴하중  $P_{nt}$ 의 작용 상태에서 인장응력  $\sigma_y$ 분포를 찾기 위해 수행된다. 경계조건은 윗면에 균일등분포하중( $P_m$ )이 작

용하고 홀(Hole)측면은 Roller Hinge Fixing되고  
아랫면은 Hinged Fixing이다.

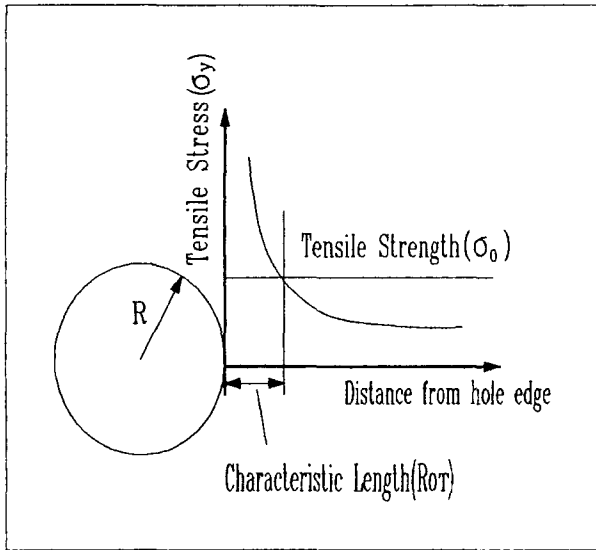
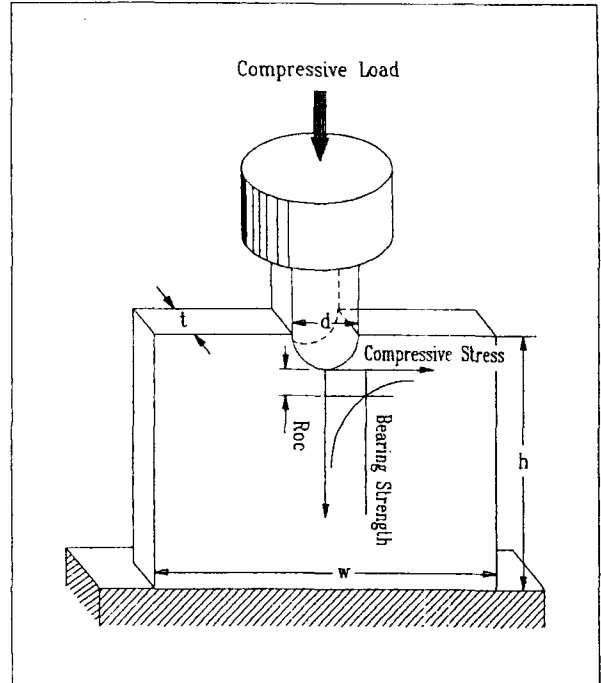


Fig. 6 Description of Point Stress Criterion for Ror

Fig. 5의 A-A' 단면에서  $P_{nt}$  작용시의 인장 응력 분포를 구한다. 이때,  $R_{ot}$  (특성길이)는 인장응력  $\sigma_y$ 가 Unnotched Laminate Strength ( $\sigma_0$ )와 교차하는 곳에서의 구멍가장자리까지의 거리에 의해 결정된다.

### 3.4 압축특성길이 (Characteristic length of Compress)

압축특성길이 ( $R_{oc}$ )는 Chang, et al. [1]의 hole을 가지는 시편의 압축실험에 의해서 결정방법과는 다른 방법을 사용한다. Chang, et al. [1] 실험에서 나타난 hole 주위의 응력분포는 기계적 결합의 응력분포와는 다른 특성을 보인다. 그래서 본 연구에서는 Fig. 7에 보여지는 것처럼 새롭게 고안된 베어링 파손시험을 통하여  $R_{oc}$ 를 도출하였다.[15] 시편은 6.35mm 지름의 반구멍(Half Hole)을 가지는 형상이다. 압축하중은 강철 Jig(6mm Diameter)에 의해 가해진다. 이 테스트는 Cross Head Speed를 0.1mm/min로 실험하였다. 시편형상은  $2w \times 2h$  ( $w/d = 2, h/d = 2$ )와  $6w \times 2h$  ( $w/d =$



6,  $h/d = 2$ )의 두가지를 고려하였다.

Fig. 7 Schematic of Bearing Failure Test and Description of  $R_{oc}$ .

본 연구에서 베어링 파괴하중 ( $P_B$ )은 베어링 파손 시험에 의해 측정된다. 그리고 베어링 강도 ( $\sigma_b$ )는 파괴하중( $P_B$ )을  $d \cdot t$ 로 나누어서 얻어진다. PSC는 베어링 파손시험을 적용시켜 압축특성길이를 얻을 수 있다.[3][15]

Fig 7에서 볼 수 있듯이 PSC는 베어링 파손에 맞게 변형하여 적용되며 하중방향의 압축응력이 어느 특정거리  $R_{oc}$ 에서 베어링 강도( $\sigma_b$ )와 같은 점에서 파손이 발생하며 이때 이점에서 구멍 가장자리까지의 거리를 압축특성길이  $R_{oc}$ 라 한다.[3][15] 본 연구에서는 베어링 파괴강도  $P_B$  작용시의 응력 분포를 FEM해석에 의해 얻었으며 그 결과를 토대로  $R_{oc}$ 도 결정했다. 기계적 물성치는 Table 1의 내용을 사용했다.  $P_B$ 가  $5w \times 2h$  시편에 작용되었을 때의 압축응력분포를 보이고 있고 압축특성길이 ( $R_{oc}$ )는 압축응력  $\sigma_c$ 가 베어링 파괴응력( $\sigma_b$ )와 같아지는 점에서 구멍 가장자리까지의 거리로 결정된다.

Table 3. Comparison of Obtained Strength and Characteristic Length.[0<sub>2</sub>/45<sub>2</sub>/ 90<sub>2</sub>/-45<sub>2</sub>]s

Geometry	Average P <sub>NT</sub> [KN]	Average P <sub>B</sub> [KN]	Rot[mm]		Roc[mm]	
			Ref. Results	Present	Ref. Results	Present
w/d = 2, e/d = 2	7.16	5.96	0.558	0.54	0.938	0.74
w/d = 5, e/d = 2	36.54	7.01	2.500	2.46	0.725	0.53

Table 4. Summary of Obtained Strength and Characteristic Length.[45/0/-45/90]s

Geometry	Average P <sub>NT</sub> [KN]	Average P <sub>B</sub> [KN]	Rot[mm]	Roc[mm]
w/d = 2, e/d = 2	3.434	8.64	0.45	1.05
w/d = 6, e/d = 2	16.480	9.50	3.00	1.30

인장, 압축 상황에서의 각각의 특성길이 Table 3, 4에 정리되어 있다. 위 결과에 따르면 압축특성 길이 (Roc)는 인장특성길이 (Rot)보다 짧은 경향을 나타낸다. Chang, et al.의 (T300 /sp286)[1]를 사용한 보고서에서는 Roc가 Rot 보다 길다고 보고되고 있으며, 본 연구와 같은 방법을 채택한 Hiroyuki Hamada et al.[15]의 보고의 내용과는 유사한 경향을 나타낸다.

### 3.5 파괴기준

본 연구에서는 Yamada - Sun 파손기준과 Tsai-Hill 파손기준이 적용되었다. 이 파손기준은 전단응력 ( $\tau_{tt}$ )와 섬유방향응력 ( $\sigma_i$ )등이 고려된 적층파손(Laminate Failure)에 제안된 기준인 Quadratic이론이다.

$$\left(\frac{\sigma_i}{X}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{tt}}{S}\right)^2 = e^2 \quad e \geq 1 : \text{failure} \quad \text{---(1)}$$

$\sigma_i$  = Longitudinal Stress Along the Fibers

X = Longitudinal Tensile Strength of Ply

$\tau_{tt}$  = Shear Stress Along the Fibers

S = The Rail Shear Strength

$$\left(\frac{\sigma_i}{X}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_i \sigma_t}{X^2}\right) + \left(\frac{\sigma_t}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{tt}}{S}\right)^2 = e^2 \quad \text{---(2)}$$

$\sigma_t$  = Transverse Stress Along the Fibers

Y = Transverse Strength Along the Fibers

먼저, 첫 번째 관계식은 Yamada - Sun 파손기준로서 시편을 구성하고 있는 모드 적층(Lamina)가 섬유방향을 따라 파괴(Crack)되어 파괴된다는 가정 하에 세워진 식이다. 적층판 파괴의 마지막 단계이다. 그래서 횡응력(Transverse Stress,  $\sigma_y$ )는 무시 될 수 있다. 레일전단강도(Rail Shear Strength)는 단층의 전단강도보다 보통 큰 값을 가진다. 그리고 그것은 바로 옆적층판에 의해 지지되는 지지물에 대해 계산해야 한다. 식(1)에서 알 수 있듯이 e와 1이 같거나 크면 파괴가 나타남을 의미한다. 그리고 두 번째 관계식은 Tsai-Hill 파손기준으로 횡응력( $\sigma_y$ )도 고려된다. 각 층(Ply) 물성치는 (HT245 /RS3232) Table 2.와 같다. 파괴는 e가 1보다 크거나 같게 되면 나타나게 된다. 해석적인 파괴예측은 각 층에서 특성 곡선 위의 어느 점에서나 e가 1보다 크거나 같게 되면 나타

나게 된다. 이 특성곡선은 식(3)와 같이 특정 지어진다. [1]

$$r_c(\theta) = \frac{d}{2} + R_{or} + (R_{oc} - R_{or}) \cos \theta \quad --(3)$$

Fig 8은 특성길이 각각 Rot와 Roc일 때 특성곡선의 형태를 보이고 있다. 그래서 특성곡선을 따라 e값이 1과 크거나 같은가를 평가할 필요가 있다. 그래서  $1 \geq e$ 인 점들이 나타나면 그 점의  $\theta_{fail}$ 을 확인하여 그곳에서의 파괴모드를 평가할 수 있게 된다. 위 방법은 Chang, et al. [1]에 의해 제안되었다

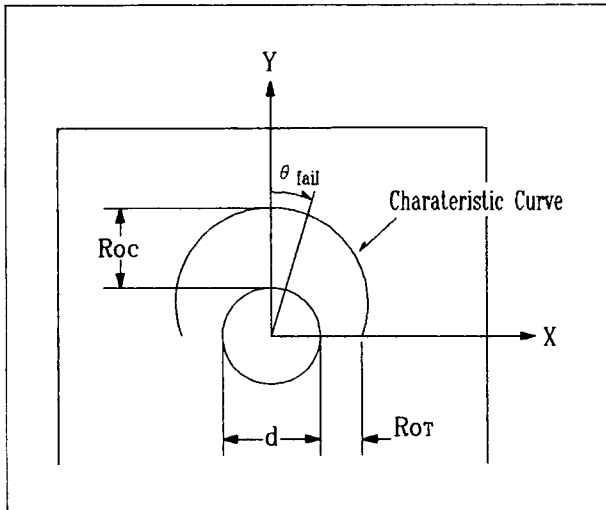


Fig. 8 Description of Characteristic Curve.

- $0^\circ < \theta_{fail} < 15^\circ$  : Bearing failure
- $30^\circ < \theta_{fail} < 60^\circ$  : Shear-out failure --(4)
- $75^\circ < \theta_{fail} < 90^\circ$  : Net - Tension failure

$\theta_{fail}$ 의 정의되지 않는 중간 위치에서는 주위에 있는 두 모드가 중첩되게 나타난다.

#### 4. 파손강도 예측결과

위와 같은 이론과 계산에 따른 결합부위강도 예측결과와 Fig. 9,10과 같다. 이 그림에서 각 파손이론에 따라 1보다 큰 구간을 확인할 수 있으며 그 구간이 특성곡선(Characteristic Curve)위에 도달한 지점들이 파괴가 예상되는 지점이다. 실험을 통한 파손결과와 이론 예측결과는 Table 5.에 나타나 있

다. 비교적 정확한 예측을 할 수 있음을 알 수 있다. 먼저 2w2d 시편인 경우에는  $45^\circ, -45^\circ$  층에서 파손영역이 특성곡선 위에 나타남을 알 수 있다. 그리고  $\theta_{fail}$ 는  $90^\circ$  전후이다. 그 결과로서 2w2e 시편의 경우 하중(Pnt)에서 순수인장(Net-Tension) 파손이 나타남을 예측할 수 있다. 실제 실험을 통한 결과에서도 하중(Pnt)에서 Fig. 3과 같이 순수 인장파손이 나타났다.

6w2e 시편은 하중(PB)에서  $45^\circ, -45^\circ, 0^\circ, 90^\circ$ 의 모든 층에서 파손이 예측되는 결과가 도출되었다.  $\theta_{fail}$ 은  $90^\circ$ 층을 제외한 모든 층에서  $0^\circ-15^\circ$ 내에 존재하므로 베어링 파손이 예상되며 동시에  $0^\circ, 90^\circ$  층에서는 Shear-Out 파손도 예상된다. 6w2e 시편의 실험결과 하중(PB)에서 베어링 파손과 Shear-Out 파손이 중첩돼서 나타남을 알 수 있다. 마지막으로 Tsai-Hill 파손기준에 의한 강도예측은 Yamada-Sun 파손기준 예측치와 유사한 결과를 얻을 수 있으며, 상대적으로 등고선(Contour)이 매우 촘촘하게 분포됨을 확인할 수 있다.

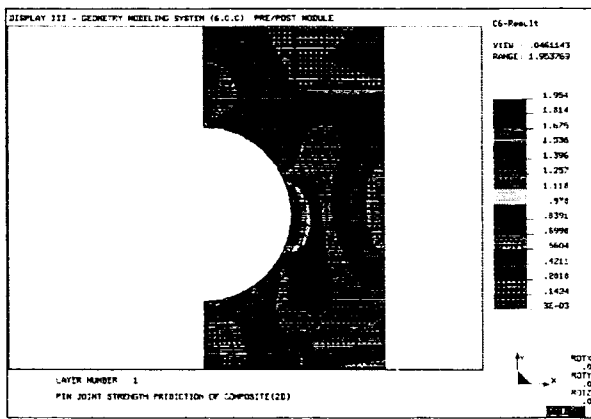
#### 5. 결론

본 연구에서는 복합재료의 기계적 결합 부위에 대한 강도예측해석과 실험을 수행하였다. 그 결과 해석에 의한 파괴강도 예측이 실험결과와 잘 일치함을 확인하였다. 먼저 실험과 준등방성으로 가정 한 해석에서 각각의 특성길이(Characteristic Length)를 결정하였으며, Yamada-Sun 파손기준 또는 Tsai-Hill 파손기준과 연계한 복합재료 핀 결합부위(Pin Joint)에 대한 강도예측을 수행하였다. 그리고 파손모드를 결정하는 방법으로는 Chang et. al이 제시한 방법을 사용하였다. 이론적인 강도 예측치는 실험결과와 잘 일치함을 확인하였다.

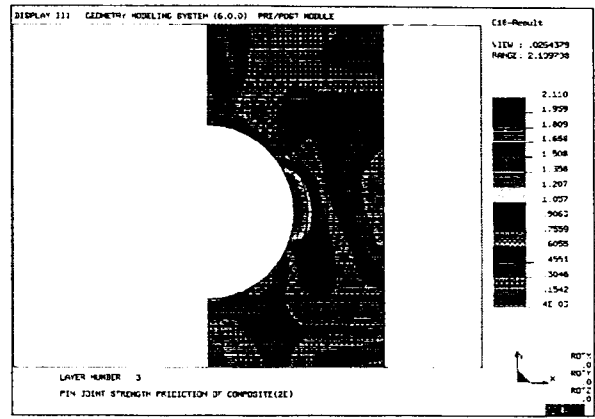


Table 4. Comparison Between Experimental and Predicted Results.

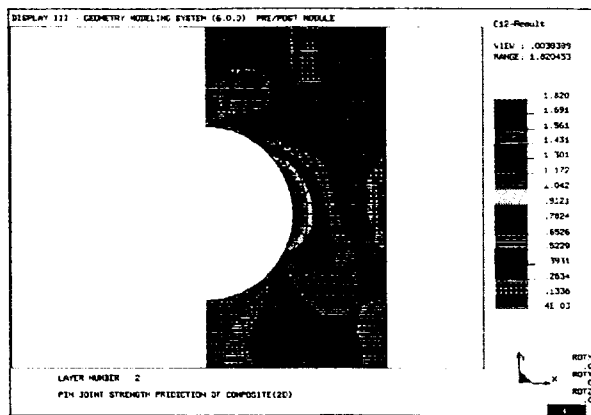
Geometry	$P_{fail}$ [kN]	Failure Mode		
		Experimental	Predicted	
			Yamada-Sun	Tsai-Hill
2w2e	3.68	Net-Tension Failure	Net-Tension Failure	-
6w2e	8.00	Bearing+Shear-out Failure	Bearing+Shear-out Failure	Bearing+Shear-out Failure



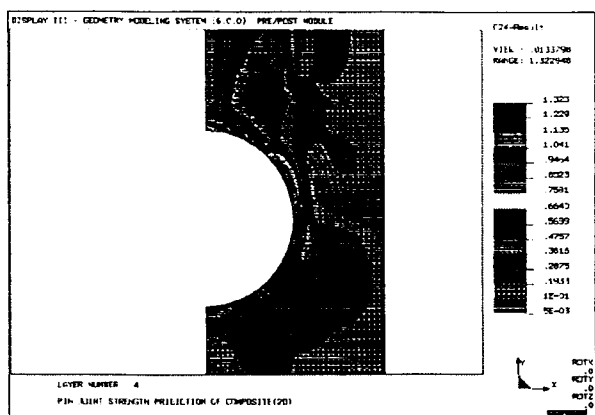
(a) 45° Layer



(c) -45° Layer

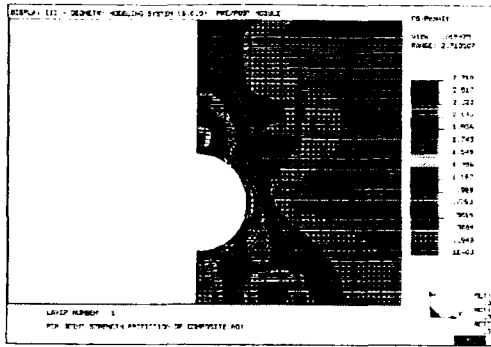


(b) 0° Layer

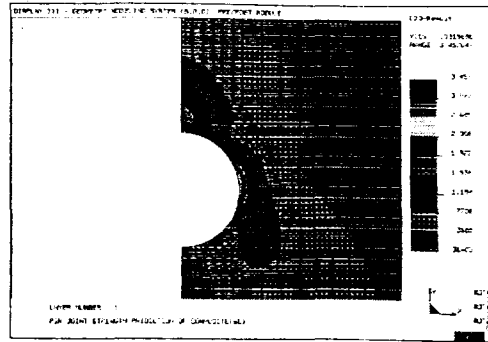


(d) 90° Layer

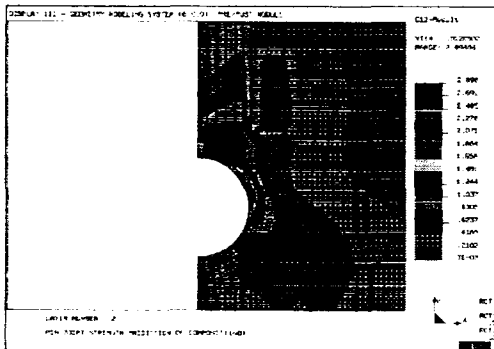
Fig. 9 Analytically Failure Map at  $P_c$  2w2e.  
(Ymada-Sun Failure Criterion)



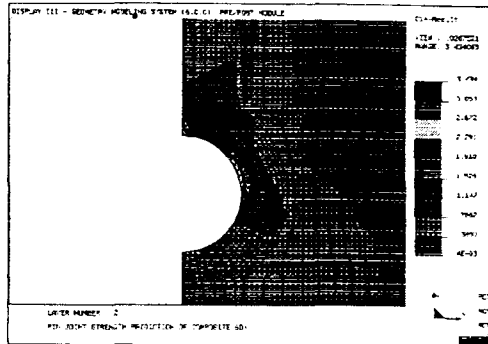
(1-a) 45° Layer



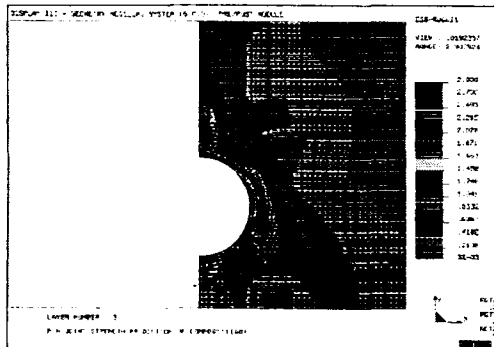
(2-a) 45° Layer



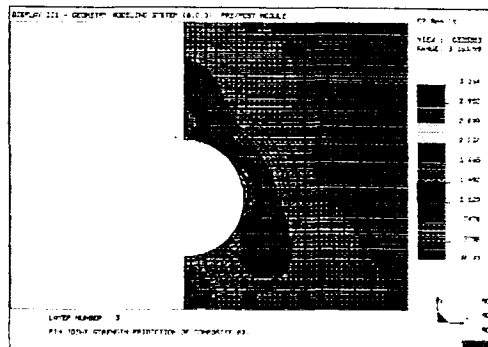
(1-b) 0° Layer



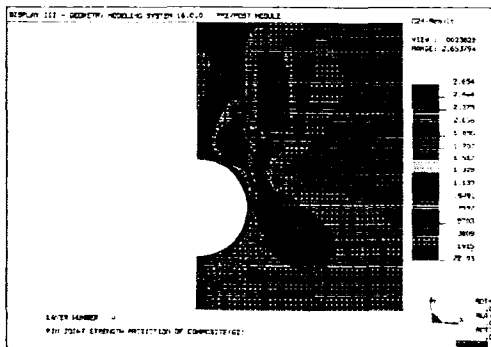
(2-b) 0° Layer



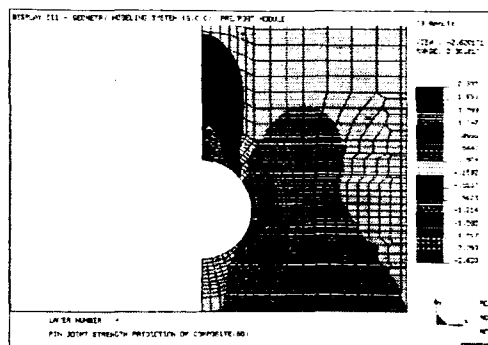
(1-c) -45° Layer



(2-c) -45° Layer



(1-d) 90° Layer



(2-d) 90° Layer

Fig. 10 Analytically Failure Map at Pc 6w2e.

(1) Ymada-Sun Failure Criterion,

(2) Tsai-Hill Failure Criterion

## REFERENCES

1. Chang, F. K., R. A. Scott and G. S. Springer. 1982. "Strength of Mechanically Fastened Composite Joints." *J. of Composite Materials*, 16:470.
2. Chang, F. K., R. A. Scott and G. S. Springer. 1984. "Failure Strength of Nonlinearly Elastic Composite Laminates Containing a Pin Loaded Hole." *J. of Composite Materials*, 18:464.
3. Chang, F. K., R. A. Scott and G. S. Springer. 1984. "The Effect of Laminate Configuration on Characteristic Lengths and Rail Shear Strength." *J. of Composite Materials*, 18:290.
4. Agarwal, B. L. 1980. "Static Strength Prediction of Bolted Joint in Composite Material." *AIAA Journal*, 18(11):1371.
5. Waszczak, J. P. and T. A. Cruse 1971. "Failure Mode and Strength Prediction of Anisotropic Bolt Bearing Specimens." *J. of Composite Materials*, 5:242
6. Oplinger, D. W. and D. R. Gandhi. 1974. "Analytical Studies of Structural Performance in Mechanically Fastened Fiber-Reinforced Plastics." in *Proceeding of the Army Symposium on Solid Mechanics, 1974: The Role of Mechanics in Design Structural Joints*, Army Materials and Mechanics Research Center, AMMRC MS 74-8, p. 211.
7. Lessard, L. B. and M. M. Shokrieh. 1995. "Two-Dimensional Modeling of Composite Pinned Joint Failure." *J. of Composite Materials*, 29(5).
8. Whitney, J. M. and R. J. Nuismer. 1974. "Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentration." *J. of Composite Materials*, 8:253.
9. Yamada, S. E. and C. T. Sun. 1978. "Analysis of Laminate Strength and Its Distribution." *J. of Composite Materials*, 12:275.
10. Sun, C. T. and S. E. Yamada. 1978. "Strength Distribution of a Unidirectional Fiber Composite." *J. of Composite Materials*, 12:169.
11. Tan, S. C. 1991. "A Progressive Failure Model for Composite Laminates Containing Openings." *J. of Composite Materials*, 25:556.
12. Chang, F. K. and L. B. Lessard. 1991. "Damage Tolerance of Laminated Composite Containing an Open Hole and Subjected to Compressive Loadings: Part I-Analysis." *J. of Composite Materials*, 2:2.
13. Hamada, H. Z. Maekawa and T. Tamura. 1990. "Strength Prediction of the Failure Strength of Mechanically Fastened FRP Joints." *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers A*, 56(523):74.
14. Hamada, H., Z. Maekawa, A. Yokoyama, T. Tamura, H. Yonehara, M. Shinobu and T. Hirano. 1988. *Progress in Acoustic Emission IV*, The Japanese Society for Non-Destructive Inspection, p. 702.
15. Hiroyuki Hamada et al. "Strength Prediction of Mechanically Fastened Quasi-Isotropic Carbon/Epoxy Joints." *J. of Composite Materials*, 30/14:1597.
16. 김주덕 역 "첨단재료기술편람" 지능계발
17. 이대길 저 "복합재료 역학 및 가공론" 성안당
18. EMRC, "NISA II. User's Manual", Version 5.2, 1992