

저온환경에서 복합재료 핀 연결부의 Bearing 강도에 관한 연구

허남일* · 이상연* · 김재훈** · 이영신** · 사정우* · 조승연* · 임기학* · 오영국* · 최창호* ·
도철진* · 권면* · 이경수*

A Study of Bearing Strength on Composite Pinned-Joint at Low Temperature

N.I. Her, S.Y. Lee, J.H. Kim, Y.S. Lee, J.W. Sa, S. Cho, K.H. Im, Y.K. Oh, C.H. Choi,
C.J. Do, M. Kwon, G.S. Lee

Key Words : Carbon Fiber Reinforced Plastic(탄소섬유강화 복합재료), Failure criteria(파손기준), Pinned-joint(핀 연결부), Damage progressive modeling(손상진전모델링)

Abstract

Fundamental failure mode in a laminated composite pinned-joint is proposed to assess damage resulting from stress concentration in the plate. The joint area is a region with stress concentrations thus a complicated stress state exists. The modeling of damage in a laminated composite pinned-joint presents many difficulties because of the complexity of the failure process. In order to model progressive from initial to final, finite element methods are used rather than closed form stress analyses. Failure analysis must be a logical combination of suitable failure criteria and appropriate material properties degradation rules. In this study, the material properties which were obtained in previous study, the preparing process of the bearing strength test for a pinned joint CFRP composite plate subjected to in-plane loading at low temperature, and the FEM result of progressive damage model using ANSYS program are summarized to assess the structural safety of CFRP plate used in the magnetic supporting post of KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research).

기호설명

- σ_b : Bearing strength (Pa)
- P : Bearing load at 4% hole deformation (N)
- D : Bearing hole diameter (m)
- T : Specimen thickness (m)
- L : Specimen length (m)
- W : Specimen width (m)
- E : Edge distance(m)
- S_x : Longitudinal tensile stress (Pa)
- S_y : Transverse tensile stress (Pa)
- S_s : Shear strength in each layer (Pa)
- X_c : Longitudinal compressive strength (Pa)
- X_t : Longitudinal tensile strength (Pa)
- Y_c : Transverse compressive strength (Pa)
- Y_t : Transverse tensile strength (Pa)
- S_c : Shear strength (Pa)

1. 서 론

복합재료의 볼트 또는 핀 체결부에 대한 연구는 항공 및 선박 구조물의 복합재료 체결에 대한 일반적인 기술로 많은 관심을 모아오고 있다. 이 체결 구조는 50% 이상의 하중전달 능력의 변화를 가져올 수 있는 것으로 보고되고 있으며, 특히 복합재료는 재료의 이방성 때문에, 핀 연결부의 강도와 파손 특성이 등방성의 경우에 비해 매우 다른 특성을 지니게 된다.

핀 연결부의 파손은 초기 손상이 시작되어 하중이 증가함에 따라 복합재료 내부에 손상이 증가되어 발생되며, 손상 정도와 파손모드는 재료종류, 적층각, 적층재 두께, 연결부 형상, 하중조건 등에 따라 결정될 수 있다.

복합재료 핀 연결부에 대한 실험적 연구는 일반적으로 Figure 1 과 같이 net-tension, shear-out, bearing 의 3 가지 기본 연결부 파손모드에 대해

* 한국기초과학지원연구원

** 충남대학교

수행되어 왔다. 이 파손모드 중 처음 두 모드는 인장 및 전단응력을 초과하는 연결부의 완전 파단을 나타내며, bearing 은 압축파손과 관계가 있다. 그리고 bearing 모드에서 파손된 연결부의 강도와 거동은 연결부의 형상, 와셔 크기, 볼트 강성, 체결압력에 매우 민감한 것으로 나타났다.

복합재료 핀 연결부에 대한 해석적 연구는 주로 유한요소법을 사용하여 진행되어 왔으며, 실험적 연구에서의 3 가지 파손모드와 bearing 강도를 다양한 복합재료 파손기준에 대하여 수행하였다. 이때 주로 사용된 해석방법은 초기파손 이후 손상된 유한요소의 강성을 감소시켜 주어 약화된 손상부의 강성이 하중증가에 따른 응력해석에서 반복적으로 작용할 수 있도록 프로그래밍하는 손상진전모델링 기법과 hole 주위의 일정 거리를 나타내는 특성곡선에서 파손된 유한요소의 각도위치에 따라 파손모드 및 bearing 강도를 구하는 방법이 있다. Jung⁽¹⁾은 직교이방성 및 등방성판의 핀 연결부 응력해석을 수행하였고, Blackie⁽²⁾은 I-DEAS 를 사용하여 multi-fastened 복합판의 핀 연결부에서 응력분포를 계산하였다. Scaler⁽³⁾은 ANSYS 를 사용하여 복합재료 핀 연결부의 clearance 와 간섭효과를 연구하였으며, Xiao⁽⁴⁾는 MARC-K6 를 사용하여 핀과 hole 의 마찰력을 고려한 3-D 비선형 해석을 수행하였다. Oh⁽⁵⁾는 hybrid composite 의 최적 볼트 연결부 설계를 위해 다양한 적층각에 대한 bearing 실험과 ANSYS 를 이용한 최초 파단하중을 구하였다. Chang⁽⁶⁾은 2-D 유한요소 프로그램을 사용하여 hole 주위 특성곡선에서 발생된 파손하중으로부터 bearing 강도를 구하였고 파손 각도에 따라 파손모드를 구분하였다. Kallmeyer⁽⁷⁾는 2-D 유한요소프로그램을 이용한 손상진전모델을 개발하여 상온 및 고온에서 복합재료 핀 연결부의 bearing 강도해석을 수행하였고, Lessard⁽⁸⁾는 같은 기법을 사용한 선형과 비선형 2-D 유한요소해석 프로그램을 개발하여 복합재료의 bearing 파손 메커니즘을 분석하였다. Camanho⁽⁹⁾는 ABAQUS 를 이용한 3-D 손상진전모델을 사용하여 복합재료 연결부의 bearing 강도해석을 수행하였다.

이같이 실험과 해석을 통해 복합재료 볼트 및 핀 연결부의 bearing 거동에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으나, 현재까지 이 체결부의 bearing 거동을 해석할 만한 이론해는 개발되지 않았으며, bearing 파손 메커니즘을 기본적으로 규명하는 일은 매우 중요한 것으로 인식되고 있다.

본 논문에서 다루고자 하는 저온에서 복합재료 핀 연결부 bearing 강도 특성은 최근 개발되고 있

는 KSTAR 핵융합 실험장치에 초전도자석 지지구조물 설계에 적용되고 있다. 이 지지구조물은 액체헬륨 온도(4.5 K)에서 동작되며, 초전도자석의 하중을 지지할 수 있는 높은 구조강도와 저온에서 낮은 열전달 특성을 갖는 CFRP plate 가 핀으로 연결된 구조를 하고 있다. 현재까지 CFRP 의 저온물성 연구는 극히 미미한 상태이며, 핀 연결부의 bearing 강도에 대한 연구도 거의 수행되지 않았다.

따라서 본 논문에서는 KSTAR 장치의 초전도자석 지지구조물에 사용되는 CFRP plate 의 구조강도 평가에 필요한 저온기계적물성시험 결과와 현재 준비중인 저온에서 복합재료 핀 연결부의 bearing 강도시험 내용을 정리하였다. 그리고 bearing 강도 시험 결과의 비교검증을 목적으로 본 연구에서 개발중인 ANSYS 를 이용한 손상진전모델 프로그램의 적합성을 기존 연구의 실험결과와 비교를 통해 검증하였다.

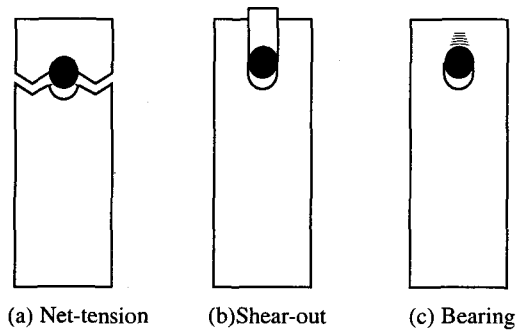


Fig. 1 Failure mechanism for the pinned-joint composite.

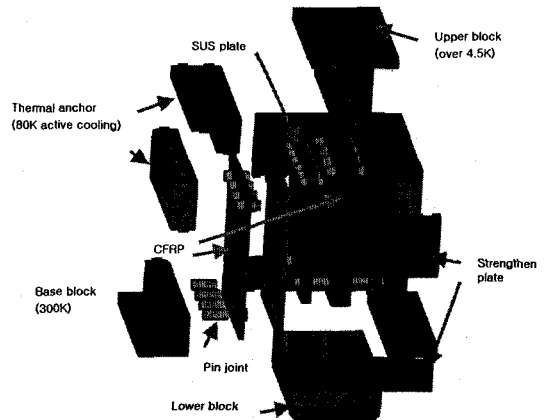


Fig. 2 Configuration of magnet supporting post

2. CFRP 저온기계물성

2.1 시편제작

KSTAR 핵융합 실험장치의 초전도자석구조물 지지각 설계에 적용된 CFRP 복합재료의 상온(24℃) 및 저온(-76℃, -196℃)에서 기계적물성 특성을 ASTM 규격에 따라 인장시험, 압축시험, In-plane shear 시험, Inter-laminar shear 시험을 통하여 고찰하였다. 사용된 CFRP 복합재료는 (주)한국화이버에서 제작한 두께는 0.27mm 의 HPW193/RS3232 이며, Table 1 과 같은 적층특성을 같은 시편이 각 실험온도에 대하여 5 개씩 제작되었다. Figure 2 는 이 재료의 성형조건을 나타낸 것이다.

Table 1 ASTM code and lay-up pattern of the CFRP specimen

Test	Lay-up pattern	ASTM code
Tension	[0/90] _{6S}	D3090
Compression	[0/90] _{7S}	D369
In-plane shear	[±45] _{6S}	D3581
Inter-laminar shear	[0/90] _{17S}	D2344

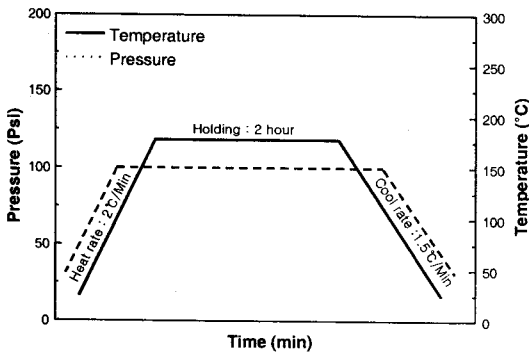


Fig. 3 Curing cycle of the CFRP specimen

2.2 시험방법

UTM 만능재료시험기, 온도 및 strain 측정장치로 실험장치를 구성하였으며, 실험용기의 열 손실을 줄이기 위해 스티로폼을 단열재로 사용하였고, 냉매의 누수 방지를 위하여 비닐용기를 사용하였다. 실험온도 -76℃는 드라이아이스와 에틸알콜을 혼합하여 만들었으며, -196℃는 액체질소(LN2)를 사용하였다. 실험온도는 K-type thermocouple 을 사용하여 측정되었고, 시험편 전체가 실험온도로 열적

평형을 이루도록 시험편을 냉매에 완전히 담근 후 시험하였다.

2.3 시험결과

인장강도의 경우 실험온도 24℃, -76℃, -196℃에 대하여 평균값이 각각 614.26 MPa, 456.95 MPa, 371.74 MPa 이었으며, 실험온도 24℃를 기준으로 -76℃는 25.61%, -196℃는 39.48%가 감소하였다. 인장탄성계수의 경우 실험온도 24℃, -76℃, -196℃에 대해서 평균값이 각각 66.73 GPa, 64.15 GPa, 70.86 GPa 이었고 24℃를 기준으로 -76℃는 3.86% 감소, -196℃는 6.19% 증가하였으나 대체적으로 유사한 값을 나타내고 있다.

압축강도의 경우 실험온도 24℃, -76℃, -196℃에 대하여 평균값이 각각 502.19 MPa, 676.51 MPa, 771.68 MPa 이었으며, 실험온도 24℃를 기준으로 -76℃는 34.71%, -196℃는 53.66%가 증가하였다. 압축 탄성계수의 경우 실험온도 24℃, -76℃, -196℃에 대해서 평균값이 각각 54.38 GPa, 54.07 GPa, 57.07 GPa 이었고 24℃를 기준으로 -76℃는 0.57% 감소, -196℃는 4.96%증가하고 있었으며 액체질소 환경에서만 약간 증가되나 전체적으로 저온에서 크게 영향을 받지 않았다.

전단탄성계수는 실험온도 24℃, -76℃, -196℃에 대해서 평균값이 각각 4.20 GPa, 5.39 GPa, 7.33 GPa 이었고, 24℃를 기준으로 -76℃는 28.33%, -196℃는 74.52% 증가하였다.

층간 전단강도는 실험온도 24℃, -76℃, -196℃에 대하여 평균값이 각각 78.71 MPa, 84.97 MPa, 80.95 MPa 이었고, 24℃를 기준으로 -76℃는 7.95% 증가, -196℃는 2.84% 감소하였으나 저온에서 온도변화에 따라 영향이 크지 않은 것으로 나타났다.

각각의 시험종류 및 실험온도에 대한 기계적 물성의 평균값을 Table 2 에 나타내었다.

Table 2 Mechanical properties of the CFRP specimen

Property	Temperature(°C)		
	24	-76	-196
Tensile strength(MPa)	614	457	372
T. Young's modulus(GPa)	67	64	71
Compressive strength(MPa)	502	677	772
C. Young's modulus(GPa)	54	54	57
In-plane shear modulus(GPa)	4.2	5.4	7.3
Inter-laminar shear s.(MPa)	79	85	81
Poisson's ratio	0.09	0.08	0.08

4. 유한요소해석

4.1 파손기준

복합재료에는 여러 가지 파손이론이 적용될 수 있으며, 본 연구에서는 ANSYS 응력해석 결과의 파손판정을 위해 식(2), (4), (6), (8)과 같은 Lessard⁽⁸⁾의 하중 방향에 따른 matrix 와 fiber 파손 기준을 사용하였다.

Matrix tension failure mode

$$\left(\frac{S_y}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{S_s}{S_c}\right)^2 > 1, S_y > 0 \quad (2)$$

$$[E_x, E_y, E_s, \nu_x, \nu_y] \Rightarrow [E_x, AE_y, E_s, \nu_x, B\nu_y] \quad (3)$$

Matrix compression failure mode

$$\left(\frac{S_y}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{S_s}{S_c}\right)^2 > 1, S_y < 0 \quad (4)$$

$$[E_x, E_y, E_s, \nu_x, \nu_y] \Rightarrow [E_x, AE_y, E_s, \nu_x, B\nu_y] \quad (5)$$

Fiber tension failure mode

$$\left(\frac{S_x}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{S_s}{S_c}\right)^2 > 1, S_x > 0 \quad (6)$$

$$[E_x, E_y, E_s, \nu_x, \nu_y] \Rightarrow [AE_x, AE_y, AE_s, B\nu_x, B\nu_y] \quad (7)$$

Fiber compression failure mode

$$\left(\frac{S_x}{X_c}\right)^2 > 1, S_x < 0 \quad (8)$$

$$[E_x, E_y, E_s, \nu_x, \nu_y] \Rightarrow [AE_x, AE_y, AE_s, B\nu_x, B\nu_y] \quad (9)$$

4.2 손상진전모델링

유한요소법을 이용한 손상진전모델링 기법은 복합재료 핀 연결부의 bearing 강도 해석에 널리 이용되는 방법으로서, 본 연구에서는 Figure 7 과 같은 손상진전모델 알고리즘을 사용하였다. 복합재료의 파손기준에 따라 파손이 발생된 요소의 강성을 작게 변화시켜주어, 반복되는 응력해석에서 약화된 강성을 갖도록 하였으며, 하중이 증가하여 파손된 요소가 많아짐에 따라 hole 의 변형량이 비선형적으로 증가하도록 프로그래밍하였다. 그리고 파손된 유한요소의 강성 저하를 위해 식(3), (5), (7), (9)와 같이, 임의의 Modulus multiplier A 와 Poisson's ratio multiplier B 를 사용하였다. 재료의 종류와 적층 형상, 시험환경, 요소 조밀도 등에 따라 이 multiplier 는 달라질 것으로 예상되며, 앞으로 이 손상진전모델을 좀더 개선하여 현재 준비중에 있는 bearing 시험결과와의 비교 뿐만 아니라 다양한 경우의 해석에 적용할 예정이다.

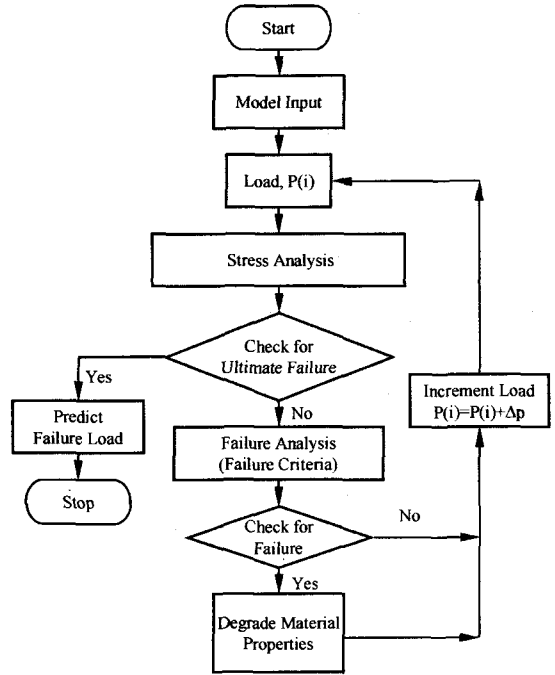


Fig. 7 Algorithm for progressive damage modeling of the pinned-jointed problem

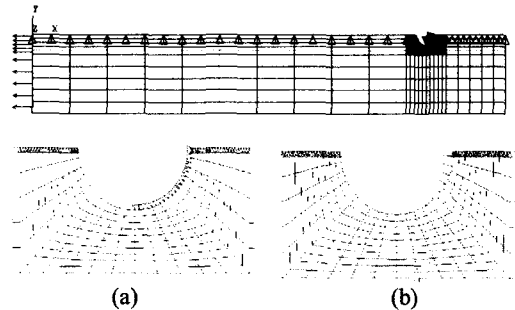


Fig. 8 FEM model with boundary condition for pinned-jointed problem (a) edge uniform load, (b) hole cosine load

4.3 해석결과

먼저 하중 경계조건의 타당성 검증을 위해 등방성 재료에 대한 hole 주위의 응력분포 해석을 Figure 8의 edge loading 과 hole loading 경계조건에 대해 수행하였으며, Figure 9와 같이 Jung⁽¹⁾의 이론결과와 잘 일치함을 확인하였다. 손상진전모델을 이용한 bearing 응력해석은 Figure 8의 edge loading 을 받는 경우에 대해 수행하였다. A, B 가 1, 0.5, 0.25, 0.1 이며 matrix 와 fiber 의 파손기준 식(2), (4), (6), (8)을 적용한 경우와 A, B 가 0.1 이며 fiber 만

3. Bearing 강도시험

3.1 시편제작

상온 및 저온에서 CFRP 복합재료 핀 연결부의 bearing 강도 시험을 위해 ASTM D935 규격을 근거로 Figure 4와 같은 형상의 시편과 Figure 5와 같은 시험용 지그를 제작하였다. 시편 제작에 사용된 복합재료는 앞 절에서 설명한 저온기계물성 시험시편과 같은 것으로서, 동일한 성형조건에서 제작되었다. Figure 6은 본 시험을 위해 제작한 대표적인 시편의 형상을 나타낸 것이며, hole의 직경과 두께가 일정할 때 bearing 시험의 3가지 파손 모드 관찰을 위해 Table 3과 같이 E/D와 W/D에 대해 다양한 형상비를 갖도록 시편을 제작하였다. 적층각의 종류는 2가지이며, 시편 제작시 특히 주의를 요했던 사항은 시편의 hole 제작공차로서, 제작된 시편 모두 공차를 만족하는 것으로 판단되었다.

3.2 시험방법

복합재료의 bearing 강도시험 방법은 ASTM 규격에 명시되어 있다. Figure 5와 같이 fixture에 시편을 고정된 후 인장시험기에서 하중을 가하게 되며, 시편의 hole 변형이 hole 직경의 4%가 되는 시험기 하중과 시편의 두께, hole의 직경을 식(1)에 대입하여 bearing 강도를 구하게 된다. 시험의 정밀도를 높이기 위해 hole 변형량의 정확한 측정이 요구되며, 본 시험에서는 strain gauge를 hole이 없는 부분에 부착하여 hole 시편 자체의 변형량을 고려할 생각이다. 본 연구에서는 상온시험 이외에 저온(-76℃, -196℃)에서 시험을 준비 중에 있으며, 저온기계물성시험 때와 같은 장비를 사용할 예정이다.

$$s_b = \frac{P}{TD} \quad (1)$$

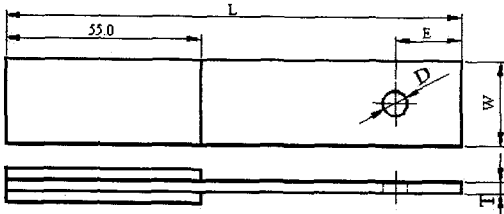


Fig. 4 Configuration of the bearing test specimen

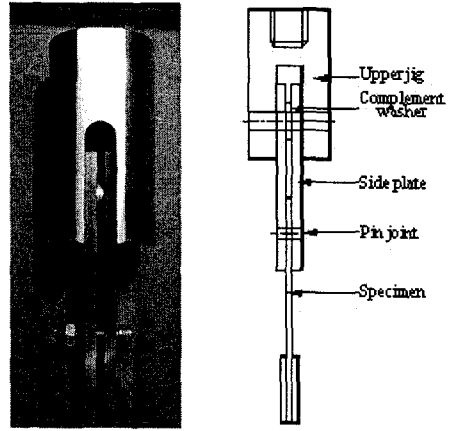


Fig. 5 Configuration of the bearing test fixture

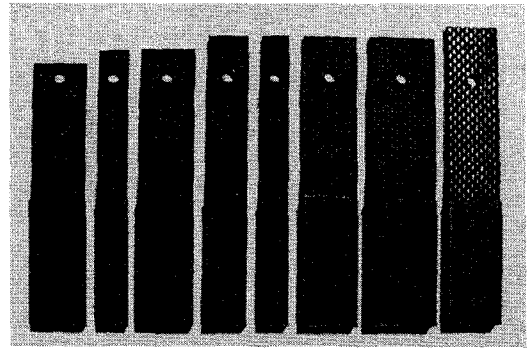


Fig. 6 Photograph of the bearing test specimens

Table 3 The number of bearing test specimen and shape ratio

E/D \ W/D	1.0	2.0	3.0	4.0
2.0	-	-	9 ^a	-
2.2	-	9 ^a , 9 ^b (KSTAR)	-	-
3.0	-	-	9 ^a	-
4.0	9 ^a	9 ^a	9 ^a , 9 ^b (ASTM)	18 ^a
5.0	-	-	9 ^a	-

^a : Lay-up pattern [0/90]_{6s}

^b : Lay-up Pattern [±45]_{6s}

D : Hole diameter(6.0mm)

T : Specimen thickness(2.7mm)

E/D : The ratio of edge distance and hole diameter

W/D : The ratio of specimen width and hole diameter

의 파손기준 식(6), (8)을 적용한 경우를 이전의 실험결과⁽⁷⁾와 비교하였다. 대체로 A, B가 0.1과 0.25 사이에서 실험 결과와 유사할 것으로 예측되었다. 그리고 해석 결과와 실험과의 차이는 사용된 유한요소해석 모델에서 판과 hole 주위의 마찰력을 무시하였고, 조밀한 요소분할의 문제점, 재료의 파손특성이 잘 고려되지 않은 A, B 값 선정에 있을 것으로 생각된다.

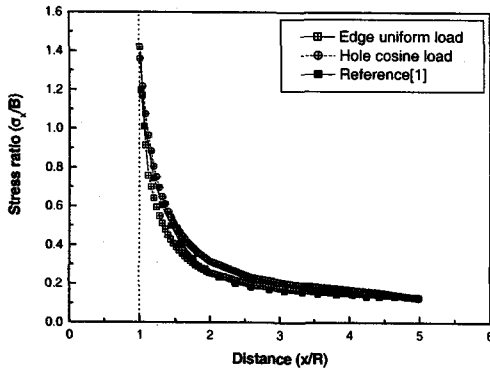


Fig. 9 The stress along the x-axis in an isotropic of finite width containing a loaded hole. Comparison of the present FEM results with the theoretical results given by Jung⁽¹⁾

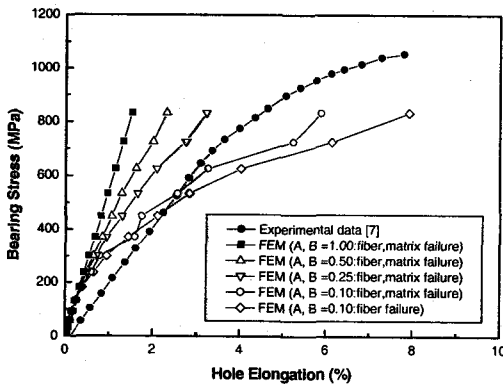


Fig. 10 The bearing stress and hole elongation of the pinned-joint composite. Comparison of the present FEM results with the experimental results given by Kallmeyer⁽⁷⁾

5. 결 론

본 연구에서는 KSTAR 핵융합장치의 초전도자석 지지구조물에 사용되는 저온에서 CFRP 복합재료의 핀 연결부의 bearing 강도 평가를 위해, 기

수행된 저온에서의 기계물성시험 결과와 현재 준비중인 저온에서의 bearing 강도시험 내용을 정리하였다. 그리고 저온 bearing 강도실험 결과의 비교와 KSTAR 장치의 초전도자석 지지각 설계에 응용하기 위해 ANSYS를 이용한 손상진전모델을 개발하여 응용 가능성을 검토하였다. 제한된 범위 내에서 기존의 연구 결과와 비교한 결과, 본 연구에서 개발한 손상진전모델을 마찰에 의한 비선형성과 재료의 파손특성을 좀더 고려하여 개선할 경우 응용성이 높을 것으로 기대되었다.

후 기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 특정연구사업(KSTAR Project)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) D. Jung, 1977, "Stress Around Pin-Loaded Holes in Elastically Orthotropic or Isotropic Plates", Journal of Composite Materials, Vol. 11, pp. 313-331.
- (2) A. P. Blackie and S. Chutima, 1996, "Stress Distribution in Multi-Fastened Composite Plates", Composite Structure, Vol. 43, pp. 427-436.
- (3) F. L. Scaler and G. L. Cloud, 1998, "A Study on the Effect of Clearance and Interference Fits in a Pin-Loaded Cross-Ply FRP Laminate", Journal of Composite Materials, Vol. 32, No. 8, pp. 783-802.
- (4) Y. Xiao, W. X. Wang, Y. Takao, and T. Ishikawa, 2000, "The Effective Friction Coefficient of a Laminate Composite, and Analysis of Pin-Loaded Plates", Journal of Composite Materials, Vol. 34, No. 01, pp. 69-87.
- (5) J. H. Oh, Y. G. Kim, and D. G. Lee, 1997, "Optimum Bolt Joint for Hybrid Composite Materials", Composite Structures, Vol. 38, No. 4, pp. 329-341.
- (6) F. K. Chang, R. A. Scott, and G. S. Springer, 1982, "Strength of Mechanically Fastened Composite Joints", Journal of Composite Materials, Vol. 16, pp. 470-494.
- (7) A. R. Kallmeyer and R. I. Stephens, 1999, "A Finite Modeling for Predicting Time Dependent Deformations and Damage Accumulation in Laminated Composite Bolted Joints", Journal of Composite Materials, Vol. 33, No. 9, pp. 749-826.
- (8) L. B. Lessard and M. M. Shokrieh, 1995, "Two-Dimensional Modeling of Composite Pinned Joint Failure", Journal of Composite Materials, Vol. 29, No. 5, pp. 671-697.
- (9) P. P. Camanho and F. L. Matthews, 1999, "A Damage Model for Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates", Journal of Composite Materials, Vol. 33, No. 24, pp. 2247-2280.