

극저온 지지구조물을 위한 CFRP 적층판의 핀 체결부 강도특성 연구

허남일, 김재훈*, 이영신*, 김학근, 박주식, 권면
한국기초과학지원연구원, 충남대학교*

A Study on the Strength Characteristics of the Pin Jointed CFRP Composites for Cryogenic Supporting Structure

N.I. Her, J.H. Kim*, Y.S. Lee*, H.K. Kim, J.S. Bak, M. Kwon
Korea Basic Science Institute, Chungnam National University*

hni@comp.kbsi.re.kr

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 this study, the effect on the bearing strength of the pin jointed Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) composites for magnet support structure of KSTAR tokamak with various parameters such as edge distance to diameter, width to diameter, and the temperature of 23°C, -76°C, and -196°C was examined by comparing the experimental results with finite element analysis.

1. 서 론

복합재료의 핀 또는 볼트 체결부 강도에 대한 연구는 복합재료가 많이 사용되는 항공 및 선박 구조물의 복합재료 체결부 설계기술로서 신소재 개발과 극한 환경에서 복합재료 사용이 증가함에 따라 관심이 더욱 높아지고 있다. 복합재료 체결부는 재료의 이방성 특성으로 인하여 체결부의 강도와 파손특성이 등방성 재료에 비하여 매우 다른 특성을 지니게 되며, 설계방법에 따라 구조 강도에 큰 영향을 미칠 수 있다. 복합재료 체결부의 파손은 초기손상이 시작되어 하중이 증가함에 따라 재료 내부에 손상이 증가하여 발생되며, 종국에는 체결부의 파단을 초래할 수 있다. 체결부의 손상정도와 파손모드는 재료종류, 적층각, 연결부 형상, 체결압력 등의 체결조건과 관계되며, 그 동안 많은 실험과 해석을 통해 체결부의 베어링 거동에 대한 연구가 진행되어 왔다. 그러나, 현재까지 이 체결부의 거동을 해석할 만한

이론해는 개발되지 않았으며, 주로 실험결과를 설계에 적용하고 있다.

복합재료 핀 체결부에 대한 실험적 연구는 일반적으로 Fig. 1과 같이 인장파손, 전단파손, 베어링 파손의 3가지 파손모드에 대해 수행되어 왔으며, 인장파손과 전단파손의 경우 완전파단되어 갑작스런 구조물의 붕괴를 유발시킬 수 있는 경우이며, 베어링 파손의 경우 시핀이 완전히 파단되기 이전에 체결부의 홀 주위가 파손되어 구조물의 붕괴는 발생하지 않더라도 더 이상 구조물로서의 역할을 상실하게 되는 경우이다. 복합재료 핀 체결부에 대한 해석적 연구는 주로 유한요소법을 사용하고 있으며, 최근 손상진전 모델링 기법을 사용하여 실험결과와의 비교 및 복합재료의 다양한 변수에 대한 해석이 활발히 진행되고 있다.

현재 개발중인 KSTAR 핵융합 실험장치에서는 -269°C의 초전도자석 구조물 지지를 위해 CFRP 적층판을 이용한 극저온 지지구조물 설계가 진행되고 있다[1-3]. 이 구조물은 Fig. 2와 같이 CFRP 적층판이 핀으로 체결된 구조를 하고 있으며, 체결부는 23°C, -196°C, -269°C의 온도조건에 놓이게 된다. CFRP 적층판은 GFRP 적층판에 비해 높은 기계적 강도와 극저온에서 낮은 열전도 특성을 갖고 있기 때문에 최근 극저온 구조물의 지지구조물 구조재료로 사용되고 있으며, 현재까지 주로 항공구조물과 같은 상온 구조물에 널리 사용되어 왔다. 이 때문에 CFRP에 대한 극저온에서 재료물성 연구와 핀 체결부의 강도연구가 극히 미미한 실정이고, KSTAR 장치를 위한 CFRP 재료의 경우도 극저온에서 이 같은 체결부 강도특성에 대한 연구가 전무한 상태이다.

본 연구에서는 KSTAR 핵융합 실험장치의 초전도자석구조물 지지각 설계에 적용된 CFRP 복합재료의 핀 체결부의 상온 및 극저온에서 베어링 강도특성 연구를 시험과 유한요소법을 통하여 고찰하였으며, 지지각 설계 보안을 위한 기초자료로 활용할 예정이다.

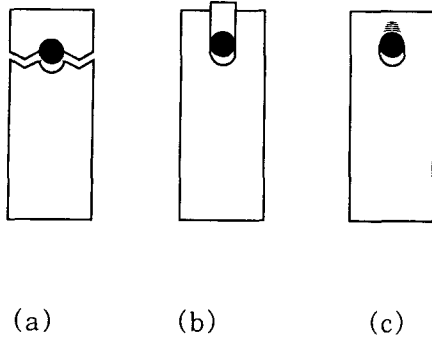


Fig. 1. Failure mechanism for the pin jointed composites. (a) Net tension, (b) Shear out, (c) Bearing

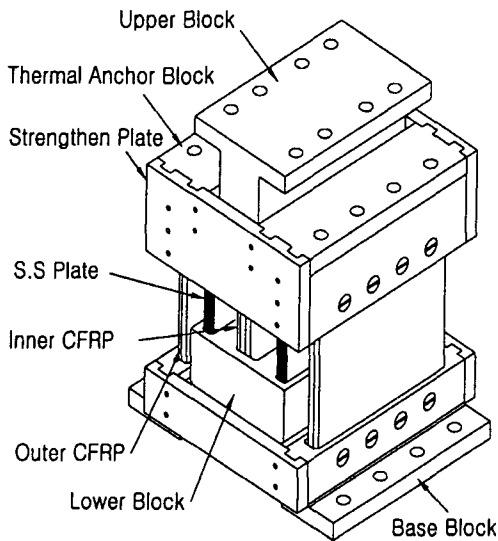


Fig. 2. Configuration of the supporting post for KSTAR tokamak

2. 베어링 강도시험

2.1 시편제작

상온 및 저온에서 CFRP 적층판의 핀 체결부 베어링 강도 시험을 위하여 ASTM D935 규격을 근거로 Fig. 3과 같은 형상의 시편과 Fig. 4와 같은 시험용 지그를 제작하였다. 시편 제작에 사용된 복합재료는 (주)한국화이버에서 생산한 HPW193/RS3232이며, Fig. 5는 제작된 시편의 대표적인 형상을 나타낸 것이다. 시편 홀의 직경과 두께가 일정할 때 체결부의 형상비에 따른 베어링 강도 변화를 시험하기 위하여 다양한 크기의 E/D와 W/D를 갖는 시편을 제작하였다.

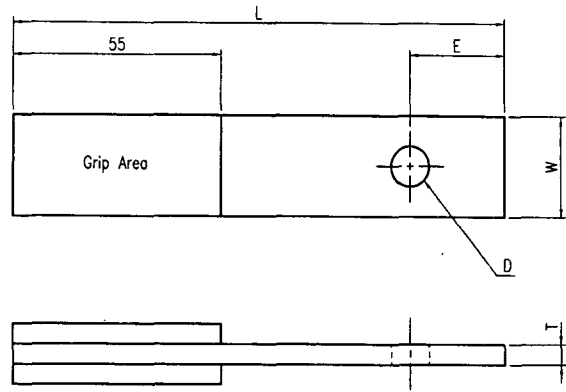


Fig. 3. Configuration of the bearing test specimen

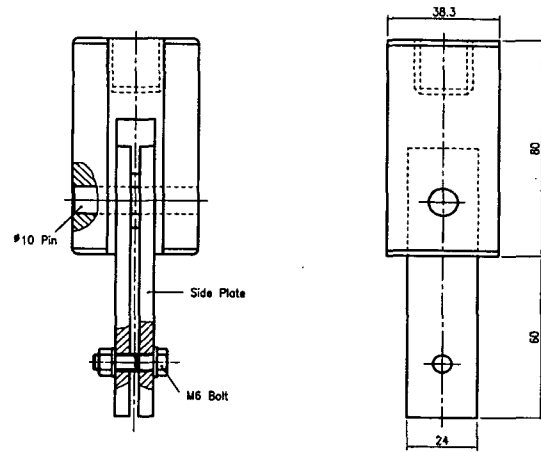


Fig. 4. Configuration of the bearing test fixture

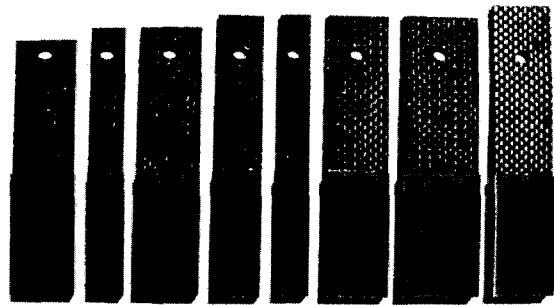


Fig. 5. Photograph of the bearing test specimens

2.2 실험방법

상온조건에서 복합재료의 베어링 강도시험법은 ASTM에 규정되어 있으나, 저온에서의 시험방법은 규정되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 상온의 시험법에 시편의 저온 분위기 형성을 위한 스티로폴 용기와 변위측정 장치를 구성하여 시험하였다. 먼저 핀 체결부의 형상비에 따른 최대 베어링강도를 구하기 위하여 변위계와 스트레인 게이지를 부착하지 않고 시험을 실시하였으

며, 만능재료시험기에서 기록되는 하중-변위선도와 시편의 파손형상 관찰하였다. 베어링 파손(또는 베어링 항복)이 발생한 시편의 경우에 대하여 홀의 변형이 홀 직경의 4%가 되는 베어링 항복 강도를 시험하였다. 4% 홀 변형을 측정하기 위하여 시편의 하부와 핀 체결부 사이에 변위계를 부착하였고, 스트레인 게이지를 시편에 부착하였다. 변위계에서는 홀과 시편 사이에서의 변위가 기록되었고, 이 값과 스트레인 게이지의 변위 차로부터 홀의 순수 변위를 계산하였다. 체결부의 베어링 강도는 식 (1)과 같이 작용하중을 시편두께와 홀 직경의 곱으로 나누어 계산하였다.

$$\sigma_b = \frac{P}{DT} \quad (1)$$

3. 유한요소해석

3.1 손상진전모델링

베어링 강도시험 결과의 비교를 위하여 ANSYS 코드를 사용한 Fig. 6과 같은 손상진전모델을 개발하여 강도해석을 수행하였다. 복합재료 핀 체결부에 하중을 점차로 증가시킬 때, 임의의 하중에서 파손기준을 초과하는 요소가 발생되고, 이 요소의 강성을 임의로 감소시켜주어 임계파손이 발생할 때까지 강성이 저하된 요소 수가 증가하도록 프로그램 하였다. 강성이 저하된 요소 수가 많을수록 변형이 증가하게 되어 파손이 진행되는 현상을 구현할 수 있다. 파손

기준으로 Yamada-Sun이 제안한 (2)식을 사용하였으며, 이 기준은 적층판의 파손이 진행될 때 층간분리가 미리 발생하여 판의 두께 방향으로 구조강성이 존재하지 않는다는 가정에 근거한 것이다. 파손기준에 따라 파손이 발생한 요소는 (3)식과 같이 표준시편의 실험결과와 근사한 특성을 구현할 수 있는 임의의 모듈러스 연산자(A)를 사용하여 요소의 강성을 저하시켰다.

$$\left(\frac{\sigma_x}{S_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{XY}}\right)^2 \geq 1 \quad (2)$$

$$[E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}] \Rightarrow [AE_1, AE_2, AG_{12}, \nu_{12}] \quad (3)$$

3.2 모듈러스 연산자

형상비가 E/D=3, W/D=4인 시편의 상온 시험 결과를 기준으로 손상진전모델의 모듈러스 연산자(A)를 결정하였다. 본 해석모델에서는 연산자가 0.2 일 때 실험결과와 가장 잘 일치하고 있었으며, 모든 유한요소해석에서 0.2를 사용하여 계산을 수행하였다.

해석에 사용된 CFRP의 상온 및 -76°C, -196°C 물성은 실험을 통하여 구한 값이며[4], -269°C에서의 물성은 온도에 따른 물성실험 결과를 확장하여 구하였다.

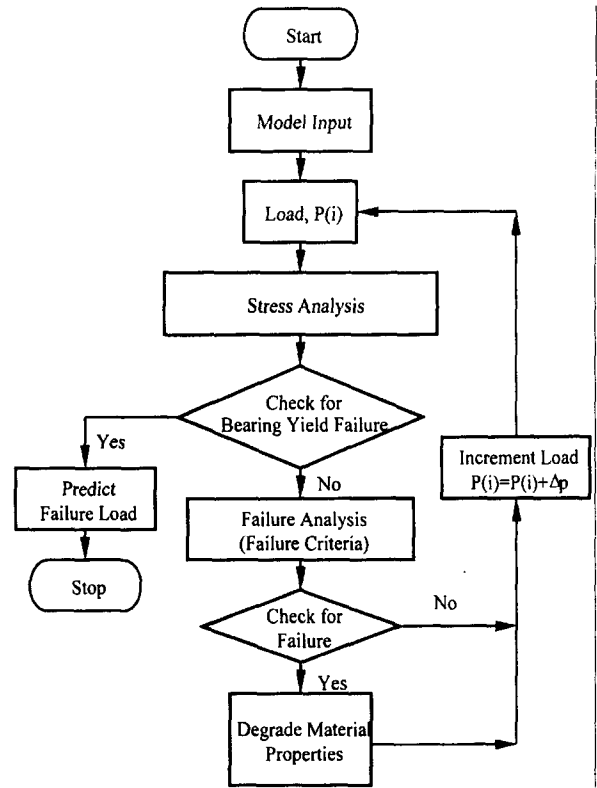


Fig. 6. Algorithm for progressive damage modeling of the pin jointed problem

4. 결과 및 고찰

4.1 최대 베어링강도

최대 베어링 강도는 온도와 기하매개변수에 따라 Fig. 7과 Fig. 8과 같은 특성을 보였다. E/D=1인 경우 전단파손이 발생하였고, E/D=2 또는 W/D=2인 경우 인장파손이 발생하였다. W/D=3, E/D=3 이상인 경우 베어링 항복 이후에 인장파손이 발생하였다. 이러한 현상은 핀 체결부의 형상비가 임의의 값 이하에서는 베어링 파손이 발생하기 전에 전단이나 인장파손에 의해 낮은 강도에서 파손이 발생할 수 있고, 임의의 값 이상에서는 아무리 큰 형상비를 갖는 경우에도 체결부의 강도 향상을 크게 기대할 수 없다는 것을 나타내는 것이다. 저온에서의 강도는 상온에서의 강도보다 증가하였으며, 극저온으로 갈수록 온도의 영향이 감소하는 특성을 보였다.

4.1 베어링 항복강도

홀의 변형이 4% 발생될 경우의 베어링 항복 강도 시험결과와 유한요소해석 결과를 Fig. 9와 Fig.10에 나타내었다. 대체적으로 유한요소해석 결과가 실험결과보다 높게 계산되었으며, -269°C에서의 해석결과는 -196°C의 해석결과와 비교하여 강도 증가가 크지 않았고, 이로부터 -269°C 조건의 핀 체결부 설계시 -196°C 저온시험 강도를 사용할 수 있을 것으로 예측되었다.

5. 결 론

KSTAR 극저온 지지구조물에 사용되는 CFRP 적층판의 핀 체결부의 베어링 강도특성을 체결부의 강도시험과 유한요소해석을 통하여 고찰하였다. ASTM 시험법에 근거하여 체결부의 기하 매개변수와 온도조건(상온 및 저온)에서 핀 체결부의 베어링 강도 영향을 시험하였고, 손상진전모델링 기법을 사용한 유한요소해석 결과와 비교하였으며, 본 연구에 사용된 CFRP에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. CFRP 적층판의 핀 체결부 강도는 체결부의 형상비에 큰 영향을 받으며, 본 연구에서 사용한 재료의 경우 $E/D=3$, $W/D=3$ 이상인 경우 형상비가 강도에 미치는 영향이 작다.
2. 저온이 CFRP 적층판의 핀 체결부 강도에 미치는 영향은 형상비가 증가할수록 증가하다가 베어링 파손 이후에는 큰 차이를 보이지 않는다.
3. 상온에서 극저온으로 갈수록 베어링 강도는 증가하는 특성을 보이며, 극저온으로 갈수록 온도의 영향은 감소한다.
4. 해석에 의한 -196°C 와 -269°C 에서의 미미한 베어링 강도 차이로부터, -269°C 온도조건인 복합재료 핀 체결부 설계시 -196°C 에서 실험 강도를 사용할 수 있을 것으로 예측되었다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] Y.S. Lee, N.I. Her, "Structural Design of the Superconducting Magnet Supporting Post", 4th International Congress on Thermal Stresses, Osaka, Japan, pp. 441- 444, 2001.
- [2] Y.K. Oh, et al., "KSTAR Magnet Structure Design", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, pp. 2006-2069, 2001.
- [3] N.I. Her et al., "Structural Safety Assessment Under the Low Temperature of KSTAR Superconducting Magnet Supporting Post", Cryogenics, Vol. 41, pp. 15-20, 2001.
- [4] 허남일, 사정우, 조승연, 도철진, 오영국, 최창호, 권면, 이경수, 이상연, 김재훈, "탄소섬유/에폭시 복합적층판에 대한 저온에서의 기계적특성 실험평가", 2001년도 한국초전도 저온공학회 학술대회 논문집, pp. 41-44, 2001.

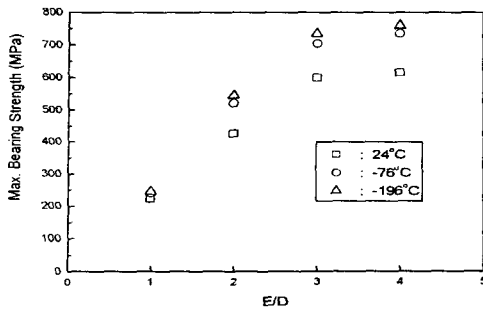


Fig. 7. Variation of maximum bearing strength with $W/D=4$, $E/D=1$ to 4

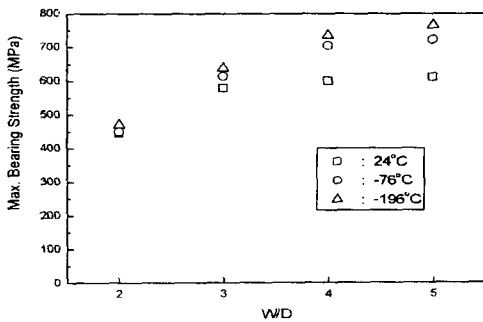


Fig. 8. Variation of maximum bearing strength with $E/D=3$, $W/D=2$ to 5

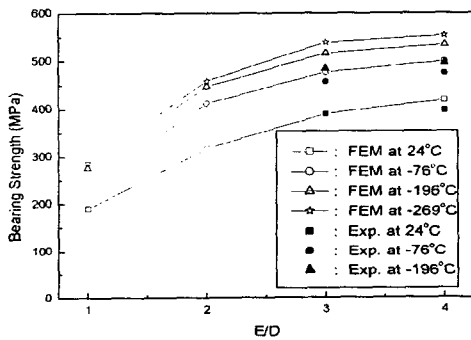


Fig. 9. Comparison of the bearing strength at 4% hole deformation with $W/D=4$, $E/D=1$ to 4

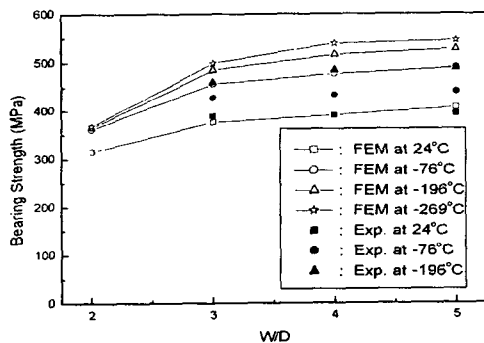


Fig. 10. Comparison of the bearing strength at 4% hole deformation with $E/D=3$, $W/D=2$ to 5