

Hashin 파손이론을 이용한 복합재 볼트체결부의 점진적 파손 해석 및 강도 예측

김성민* · 김평화* · 도성철* · 김형근** · 박정선***†

Progressive Failure Analysis and Strength Prediction based on Hashin Failure Criterion of Bolted Composite Joint

Seongmin Kim* · Pyunghwa Kim* · Sungchul Doh* · Hyounggun Kim** · Jungsun Park***†

ABSTRACT

In this paper, the progressive failure analysis of a bolted composite joint which is used in combustion tubes of projectiles and weapon systems is performed. Hashin's failure criterion is considered as fiber tensile failure mode, fiber compressive failure mode, matrix tensile failure mode, and matrix compressive failure mode for this analysis. And this criterion is used to make user subroutine, UMAT. Through the progressive failure analysis we predicted failure strength and compared failure strength with specimen test result.

초 록

본 논문에서는 발사체 및 무기체계의 연소관 등에 적용되고 있는 복합재의 볼트체결부에 대한 점진적 파손 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 Hashin 파손 판정식은 복합재 파손모드에 따라 섬유 인장 파손 모드(Fiber tensile failure mode), 섬유 압축 파손 모드(Fiber compressive failure mode), 기지 인장 파손 모드(Matrix tensile failure mode), 기지 압축 파손 모드(Matrix compressive failure mode)의 4가지 모드로 고려되었으며, 이를 이용해 user subroutine인 UMAT을 개발하였다. 점진적 파손 해석을 통해 복합재 볼트체결부에 대한 파손강도를 예측 하였으며, 이를 시편 시험 결과와 비교하였다.

Key Words: Progressive Failure Analysis(점진적 파손해석), Hashin Failure Criterion(Hashin 파손기준), Finite Element Analysis(유한요소해석), Bolted Composite Joint(복합재 볼트체결)

1. 서 론

발사체 등의 추진체에 사용되는 연소관은 경량화를 목적으로 하기 때문에 복합재가 사용되는 경우가 많다. 복합재의 체결방법에는 기계적 체결 방법과 접착 체결 방법으로 나뉘며 그 중 기계적 체결 방법은 재료에 구멍을 뚫어 볼트나

* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

** 국방과학연구소

*** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

† 교신저자, E-mail: jungsun@kau.ac.kr

리벳 등의 금속부품을 체결하는 방법이다. 금속 부품이 체결된 복합재에 하중에 가해지는 경우 일반적으로 복합재의 파손이 점진적으로 발생하므로 초기 파손만으로 강도를 정의하기 어려운 부분이 있다. 따라서 효율성 및 신뢰성 있는 해석을 필요로 하며, 이에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다. Buket okutan 등은 복합재 볼트체결부에 대한 유한요소해석 및 시험 결과를 비교하였으며[1], Jacob M. Hundley, Thomas hahn 은 Hashin 파손기준을 적용하여 복합재 볼트체결부에 대한 유한요소해석을 수행하였다[2].

본 논문에서는 복합재 볼트체결부의 점진적 파손해석을 위해 Hashin 파손 판정식을 적용한 user subroutine인 UMAT을 개발하였고, 이를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석 결과와 실제 시험 시험 결과를 비교하였으며 파손 하중 및 파손 모드의 유사한 결과를 얻었다.

2. 본 론

2.1 파손이론 및 UMAT

복합재 볼트 체결부의 파손은 초기 손상이 발생한 후 점진적으로 섬유 또는 수지가 파손되면서 최종적으로 완전히 파단 된다. 이러한 복합재의 초기 손상 여부는 Hashin 파손이론을 적용하여 판단할 수 있으며, 본 논문에서는 섬유 인장 파손 모드(Fiber tensile failure mode), 섬유 압축 파손 모드(Fiber compressive failure mode), 기지 인장 파손 모드(Matrix tensile failure mode), 기지 압축 파손 모드(Matrix compressive failure mode)의 4가지 파손모드를 고려하였다. 4가지 파손모드의 판정식은 다음과 같다.

- 섬유 인장 파손 모드($\epsilon_{11} > 0$)

$$f_{FT} = \left(\frac{\epsilon_{11}}{\epsilon_{11+is}} \right)^2 + \frac{1}{(\epsilon_{12+is})^2} (\epsilon_{12}^2 + \epsilon_{13}^2) \geq 1 \quad (1)$$

- 섬유 압축 파손 모드($\epsilon_{11} < 0$)

$$f_{FC} = \frac{-\epsilon_{11}}{\epsilon_{11-is}} \geq 1 \quad (2)$$

- 기지 인장 파손 모드($\epsilon_{22} + \epsilon_{33} > 0$)

$$f_{MT} = \frac{1}{(\epsilon_{22+is})^2} (\epsilon_{22} + \epsilon_{33})^2 + \frac{1}{(\epsilon_{12+is})^2} (\epsilon_{23}^2 + \epsilon_{12}^2 + \epsilon_{13}^2 - \epsilon_{22}\epsilon_{33}) \geq 1 \quad (3)$$

- 기지 압축 파손 모드($\epsilon_{22} + \epsilon_{33} < 0$)

$$f_{MC} = \frac{1}{\epsilon_{22-is}} \left[\left(\frac{\epsilon_{22-is}}{2\epsilon_{12+is}} \right)^2 - 1 \right] (\epsilon_{22} + \epsilon_{33}) + \frac{1}{(\epsilon_{12+is})^2} \left[\frac{\epsilon_{22}^2 + \epsilon_{33}^2}{2} + \epsilon_{23}^2 + \epsilon_{12}^2 + \epsilon_{13}^2 \right] \geq 1 \quad (4)$$

여기서 ϵ_{ij} 는 변형텐서, ϵ_{ij+is} 과 ϵ_{ij-is} 는 파손시의 인장 변형률과 압축 변형률을 의미한다. 재료는 각 모드의 판정식 중 1보다 크거나 같은 값을 갖는 판정식이 생기게 되면 해당 모드에서 초기 손상이 시작 된다.

UMAT은 Fig. 1의 순서도와 같이 Hashin 파손 판정식으로부터 구한 f_i 값들로 강성 저하 행렬 d_{ij} 를 구하고, 이를 통해 강성을 점진적으로 저하시켜 축소 강성 행렬 C_D 을 구한다. 최종적으로 구해진 C_D 를 이용하여 Jacobian 행렬식을 계산하는 과정이다.

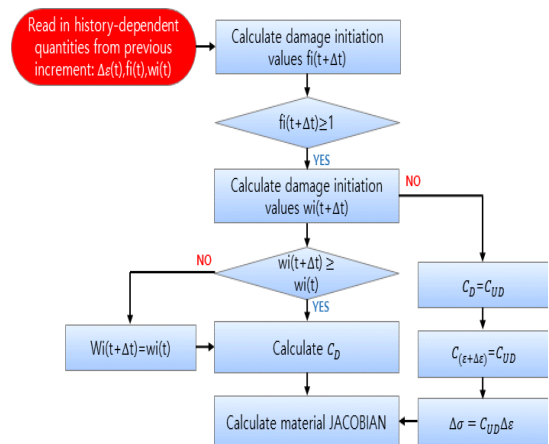


Fig. 1 UMAT Flow Chart

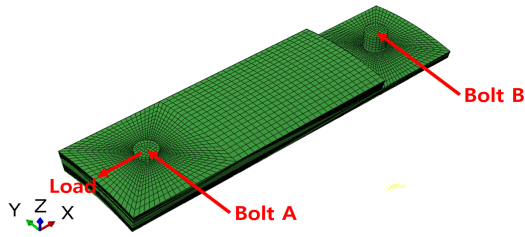


Fig. 2 Finite Element Model

2.2 시편 시험

본 연구에서는 원통형 복합재 구조물의 시편을 제작하여 하중시험을 수행하였다. 5개의 시편을 이용하여 시험을 진행하였으며, 최대 하중의 평균값은 5,625 N으로 측정되었다.

2.3 유한요소법을 이용한 점진적 파손해석

본 논문에서는 ABAQUS를 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소모델은 Fig. 2와 같고, 원통형 복합재 구조 모델로 곡률을 적용하였다. 복합재 판은 각 플라이 별로 적층 각을 적용하였다. Bolt A에는 y, z방향의 병진운동을 구속하는 경계조건과 x방향으로 Body Force 하중을 적용하였으며, Bolt B에는 3자유도 구속 경계조건을 적용하였다. 해석을 통해 구한 최대 하중은 5,897 N이며, 시편 시험과 비교하였을 때, 4.84%의 오차를 나타내었다. Fig. 5는 해석을 통해 얻은 4가지 파손모드 결과로써, 각 모드에서 판정식이 1보다 큰 값을 갖는 요소가 있어 파단이 발생했음을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 연구에서는 원통형 복합재 시편 시험 결과와 UMAT을 사용한 유한요소해석 결과를 비교하였다. Fig. 4는 시편 시험과 유한요소해석을 통한 변위-하중 선도이며, 두 선도의 최대 하중값이 4.84% 차이로 높은 정확도를 나타내었다. 본 연구를 통해 정립된 해석 기법 및 UMAT을 이용해 향후 복합재 연소관 개발에 활용할 수

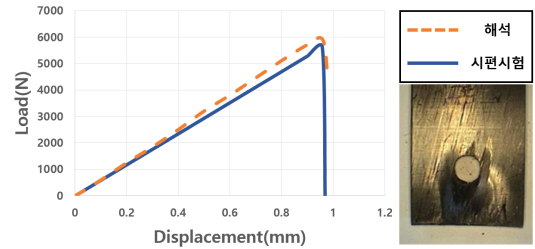


Fig. 4 Load-Displacement Curve and Specimen Result

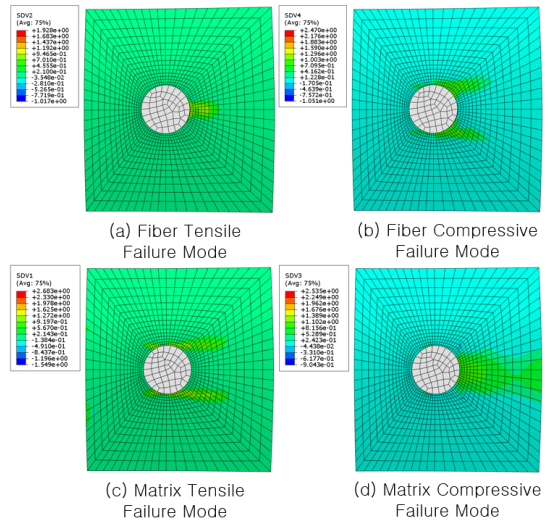


Fig. 5 Failure Mode

있을 것으로 보인다.

참 고 문 헌

1. Buket Okutan, Ramazan Karakuzu, "The strength of pinned joints in laminated composites," Department of Mechanical Engineering, Dokuz Eylul University, Turkey, 2002.
2. Jacob M. Hundley, H. Thomas Hahn, Jenn-Ming Yang and Andrew B. Facciano, "Three-dimensional progressive failure analysis of bolted titanium-graphite fiber metal laminate joints," Journal of Composite Materials 45(7) 751-769, 2010.