

보강된 복합재료 셸구조물에 대한 좌굴후 해석모듈의 특성분석

오세희*·김천곤**·김광수***

Characteristic analysis for postbuckling analysis modules of stiffened composites shell structure

Se Hee Oh*, Chun Gon Kim** and Kwang Soo Kim***

Abstract

The characteristics of the buckling analysis module for stiffened composite structures were studied in this paper. Composite stiffened structures have geometrical asymmetry and material properties asymmetry. Due to these reason, postbuckling analysis was essential and the characteristics of postbuckling analysis modules for ABAQUS were researched. Static analysis module was considered. By considering the material nonlinearity, progressive failure mechanism was applied and buckling strength was estimated.

Key Words: Postbuckling, Progressive failure

1. 서론

복합재료는 비강성과 비강도가 우수하다는 특성으로 인하여 활용도가 증가하고 있다. 구조설계관점에서 단점으로도 작용하는 복합재료의 이방성은 많이 해결되었으나 여전히 구조물의 좌굴 특성과 같이 복잡한 구조물에서는 큰 어려움으로 존재한다. 복합재료의 이방성과 계산량의 문제로 인하여 구조물의 설계 관점에서 선형좌굴해석을 수행하는 연구가 많이 수행되었다. 그러나 구조의 효율성을 향상시키기 위하여 구조의 파손과 좌굴을 허용하는 설계관점이 점차적으로 도입됨에 따라 구조물의 좌굴후 거동을 해석하는 연구가 많이 수행되고 있다.

특히 보강재가 부착된 구조물은 국소적으로 발생하는 좌굴이 보강재로 인하여 전체 좌굴로 확

산되지 않으므로 구조물 전체의 좌굴모드와 매우 큰 차이점이 발생한다. 따라서 구조물 전체에 발생하는 좌굴을 관찰하기 위해서는 좌굴후 거동에 대한 특성을 분석하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 해석적인 관점에서 특성을 살펴 보았으며, ABAQUS를 사용하여 해석을 수행하였다. 좌굴후 거동을 해석할 수 있도록 ABAQUS에서 제공하는 모듈들에 대하여 해석을 수행하고 구조최적화에 효율적으로 사용할 수 있도록 각 모듈의 특성을 분석하였다.

2. 보강재 좌굴특성 분석

구조물의 좌굴을 평가하는 방법은 크게 구조강성만을 기초로 하여 좌굴이 발생하기 전의 선형좌굴해석과 좌굴이 발생한 이후의 거동을 평가하는 좌굴후 거동 해석기법이 있다. 선형좌굴해석은 빠르게 결과를 얻을 수 있으나 형상이나 역학적인 대칭성이 보장되는 구조에만 결과에 대한 신뢰도가 높으므로 일반적인 구조물에 대한 좌굴 해석으로는 많이 사용되지 않는다[1]. 특히 보강

* 한국과학기술원

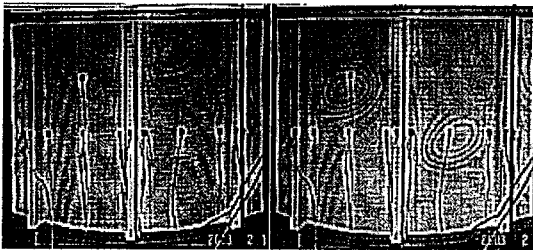
** 한국과학기술원

*** 한국항공우주연구원

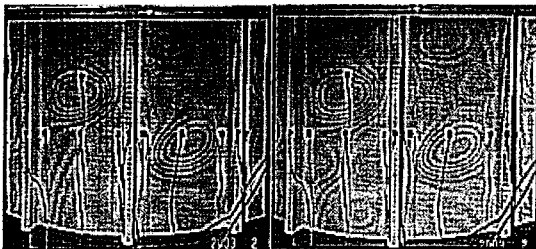
재가 부착된 비대칭 형상의 복합재 평판 구조물의 경우에는 재료물성에 대한 대칭성마저 보장되지 않으므로 좌굴후 거동에 대한 특성분석이 필수적이다.

2.1 실험적 접근

한국항공우주연구원(KARI)에서 KSLV 발사체의 동체구조물로 개발중인 복합재 보강평판에 대한 좌굴특성을 살펴봄으로써 설계의 기준으로 사용하기 적합한 각 해석모델의 특성을 분석하였다.



(a) 80 KN (b) 88 KN



(c) 105 KN (d) 112 KN

그림 1. 좌굴모드 및 하중(실험결과)

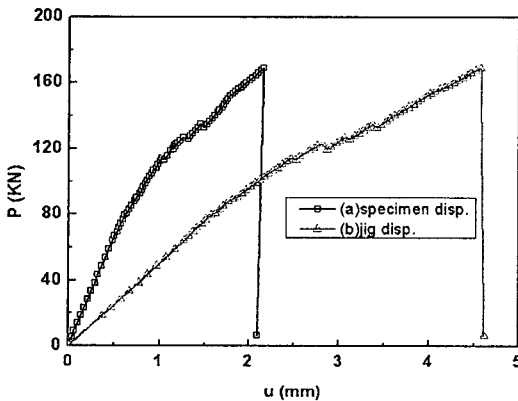


그림 2. P-u 곡선(실험결과)

그림 1.은 KARI에서 수행한 좌굴실험의 좌굴 모드와 하중을 나타내고 있다. 실험관찰은 모아

레(moire) 기법을 사용하여 관찰하였으며, 보강재 사이의 스킨부분에서 큰 변형이 발생하는 시점별로 좌굴모드가 변화함을 확인할 수 있다. 그림 2는 부과하중(P)과 하중부과방향의 변위(u)간의 관계를 나타내고 있다. (b)는 시험치구의 변위를 나타낸 것이다. (b)에는 시험치구의 변형과 시편의 변형이 포함되어 있으므로 매우 큰 변위가 발생한다. 따라서 (a)에는 시험치구의 변형을 제외한 시편의 변위를 나타내었다. 그러나 (a)또한 시험치구의 변형을 정확히 제거하였다고 보기에는 문제점이 있으므로 실제 시편의 변위는 (a)와 (b)사이에서 존재할 것으로 예상된다.

2.2 해석적 접근

그림 2.는 해석모델의 형상과 경계조건을 나타내고 있다. 원통형 셀 구조물에 3개의 모자형(hat type)보강재가 부착된 구조물이다. 해석에 사용된 재료물성은 표 1.에 나타내었다.

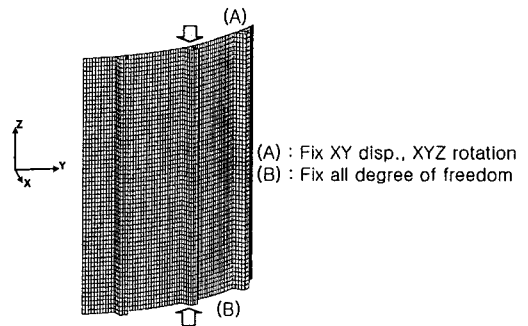


그림 2. 해석 모델과 경계조건

표 1. 재료의 기계적 물성(HT145/RS1222)

Modulus		Strength			
E ₁	122 GPa	S _{1T}	2445 MPa	S _{1C}	860 MPa
E ₂	8.9 GPa	S _{2T}	41.5 MPa	S _{2C}	125 MPa
G ₁₂	4.7 GPa	S ₁₂	90.7 Mpa		
ν ₁₂	0.335				

2.2.1 선형좌굴해석

그림 3은 해석모델의 선형좌굴해석 결과를 나타내고 있다. 실험결과와는 다르게 시편 측면부의 자유단에만 국소적인 변위가 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 또한 좁은 하중범위내에 매우 유사한 모드가 대칭적으로 발생하였다. 이는 구

조물의 국소적인 변형으로 실험에서 나타난 구조물의 좌굴이라고 평가하기 힘든 결과이다.

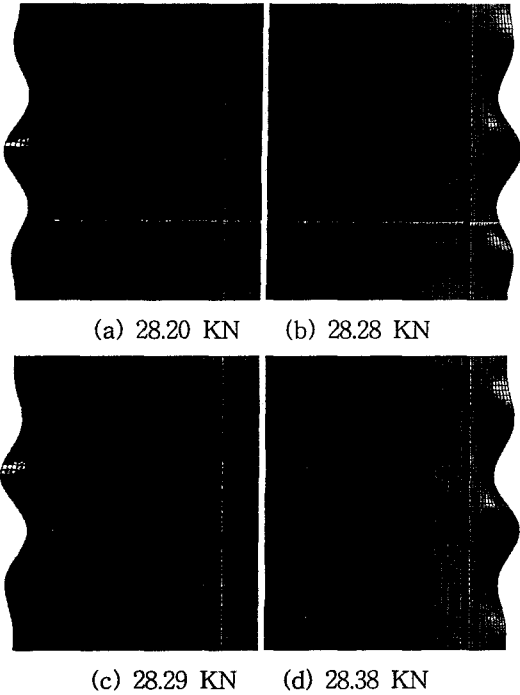


그림 3. 선형좌굴해석모드

2.2.2 비선형 좌굴후 거동해석

선형좌굴해석은 구조물의 기하학적 형상이나 하중의 부과방향등의 대칭성이 보장되는 경우에만 매우 제한적으로 사용가능함을 살펴보았다. 이의 보완점으로 좌굴후 거동해석에 대한 필요성이 제기되었다. 구조물의 좌굴후 거동해석은 오랜 연구주제였으며 그 기법 또한 많이 개발되어 있다. 그 중에서 ABAQUS에서 제공하는 기법들에 대하여 특성을 살펴보았다.

구조물의 좌굴강도를 구하기 위하여 기하학적 비선형성과 함께 재료비선형성을 고려하기 위하여 점진적인 파손기법을 적용하였다. 파손판단 기준은 응력 파손기준과 Tsai-Wu 파손기준을 적용하였고 면내파손만을 고려하였다[2].

2.2.2.1 Riks 방법

구조물의 좌굴후 거동해석에서 가장 중요한 것은 순간적으로 발생하는 구조불안정성이다. 이를 묘사하기 위한 하나의 방법으로 제안된 것이 Riks방법이다. 이는 Crisfield[3], Ramm[4], Powell[5]등에 의하여 정립되었다. 순간적으로 구

조물에 변화가 발생할 경우에는 구조물의 변형률에너지가 다른 에너지로 변화하게 된다. 그러나 Riks 방법은 변형률에너지의 보존을 기반으로 정립되어 순간적인 변화에 대한 적응성이 낮다.

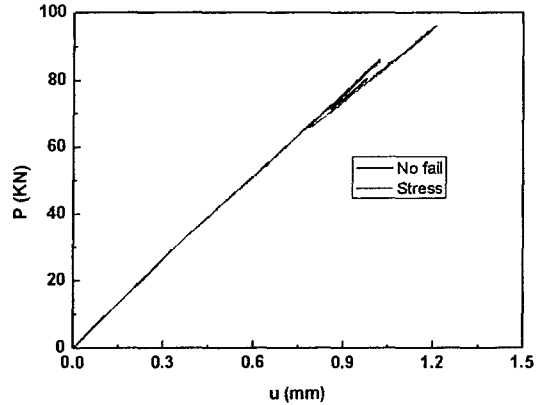


그림 4. P-u 곡선(Riks 방법)

그림 4는 Riks 방법을 사용하여 해석한 경우의 P-u 곡선 결과이다. 최초좌굴이 발생하는 시점에서 매우 많은 계산이 반복적으로 수행되고 snap-through 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그리고 초기 좌굴모드에서 해석이 수렴을 하지 못하고 중단한 것을 확인할 수 있다. 실제 관점에서 보강재가 부착된 구조물에 대한 Riks 방법의 적용은 수렴성의 일관성에서 문제가 발생할 수도 있다. 단일 외피만 존재하는 구조물에 비하여 보강재가 부착된 구조물은 좌굴에 연관되는 인자의 수가 크게 증가하고 파손원리가 복잡해지므로 변형률에너지의 보존을 필요로 하는 Riks 방법의 적용은 많은 어려움이 존재한다.

2.2.2.2 Stabilize 방법

복합재료 구조물에서 좌굴후 발생하는 불안정한 현상은 좌굴모드의 변화와 함께 발생하는 재료파손이다. 구조물에 순간적인 변화가 발생하면 구조물 내의 변형률에너지는 보존이 되지 않는다. 따라서 고전적인 Riks 방법등을 사용하여 변형률에너지가 보존되는 해석방법은 적합하지 않을 수도 있다. 이를 위하여 ABAQUS에서 제공되는 Stabilize 방법을 사용하여 특성을 분석하였다. Stabilize 방법은 구조물에 변화가 발생할 경우 변형률에너지를 감쇠시켜서 구조물의 변형이 유발되기 쉬운 방향으로 해석을 진행시킨다.

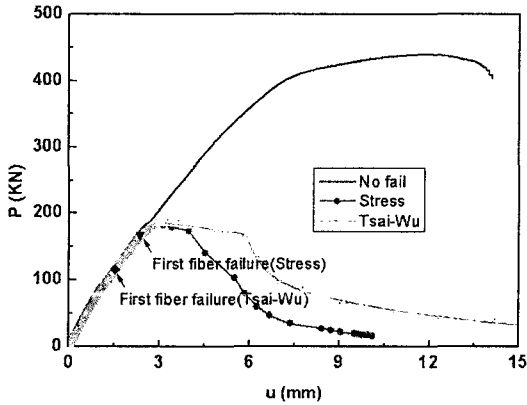


그림 5. P-u 곡선(Stabilize 방법)

그림 5는 Stabilize 방법을 사용한 해석결과이다. 재료 파손을 고려하지 않은 경우는 매우 높은 좌굴강도를 예측하는 반면 재료의 파손을 고려한 경우에는 절반 정도의 강도를 예측하는 것을 확인할 수 있다.

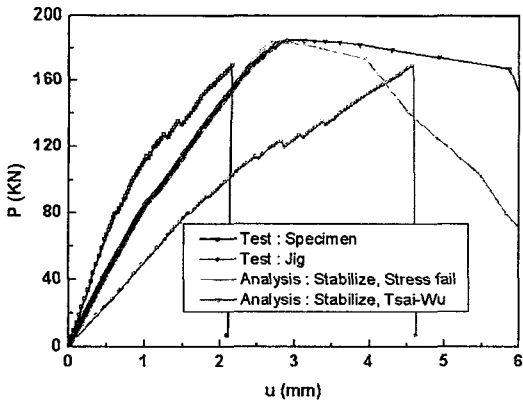


그림 6. P-u 곡선(실험 & 해석)

그림 6은 해석결과와 실험결과의 P-u 곡선을 비교하고 있다. 실험강도는 169 KN이고 응력파손기준해석은 183 KN, Tsai-Wu파손기준해석은 185 KN으로 나타났다. 전체적인 좌굴거동이나 파손강도가 실험치와 매우 유사한 경향임을 확인할 수 있다.

4. 결론

구조설계 관점에서 보강재가 부착된 복합재 구조물의 좌굴거동을 복합재료 구조물에서 좌굴거동 해석모델의 특성을 분석하였다. 선형좌굴해석

의 한계점으로 인하여 좌굴후 거동해석의 필요성을 실감하였고, 좌굴후 거동에서 발생하는 순간적인 불안정성을 안정화시키는 방법으로 구조감쇠를 적용하여 구조물 내의 변형률에너지를 감쇠시키는 방법이 수렴성에서 우수한 특성을 나타내는 것을 확인하였다. 기하학적 비선형성과 함께 재료비선형성을 고려한 해석의 경우 실험결과와 유사한 특성을 나타내는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원의 소형위성발사체개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) O.C. Zienkiewicz and R.L. Taylor, "The Finite Element Method, 4th Edition" McGraw Hill, 1991.
- (2) 오세희, 강지호, 김천근, "소형위성 발사체 구조물의 효율적인 좌굴후 거동 해석모델" 제 4회 우주발사체기술 심포지움, 2003.
- (3) M. A. Crisfield, "A Fast Incremental/Iteration Solution Procedure that Handles 'Snap - Through'," Computers and Structures, vol. 13, pp. 55 -62, 1981.
- (4) E. Ramm, "Strategies for Tracing the Nonlinear Response Near Limit Points," Nonlinear Finite Element Analysis in Structural Mechanics, Edited by E. Wunderlich, E. Stein, and K. J. Bathe, Springer-Verlag, Berlin, 1981.
- (5) G. Powell and J. Simons, "Improved Iterative Strategy for Nonlinear Structures," International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 17, pp. 1455-1467, 1981.