

복합재 압력탱크의 스커트 조인트 설계를 위한 인자 연구

김철웅* · 홍창선** · 김천곤** · 박재성***

The Effects of Various Geometric Parameters on the Skirt Joint Design of Composite Pressure Tanks

Cheol-Ung Kim, Chang-Sun Hong, Chun-Gon Kim and Jae-Sung Park

Key Words: Composite Pressure Tank, Skirt Joint, FEM

Abstract

In this research, the design methods of the rocket joint parts were suggested. In the first section, nonlinear finite element analyses for joint parts of a composite pressure tank were performed. In the analyses, the detailed finite element modeling was performed and complex boundary conditions(contact problem, clamping force) were considered. Secondly, several guidelines for the design of joint parts were suggested. The parametric study for geometric design variables was performed. Finally, the parametric study result was categorized for the multi-joint part design of the axi-symmetric composite structure.

1. 서 론

로켓 발사체 개발을 위한 여러 분야 중에서 구조 분야의 경우에는 발사체의 특성상 충분한 payload 확보를 위해 경량화가 필수적이다. 무게를 절감하는 방법으로 최근에 활발히 연구가 진행되는 분야는 기존의 금속재료 구조물을 복합재료로 대체하려는 노력이다. 널리 사용되어 충분히 거동이 검증된 금속재료에 비해서 복합재료는 복잡한 기계적인 거동과 파손 메카니즘을 가지고 있으며, 다양한 설계 변수(적층각, 적층순서, 두께 등)들의 조절에 따라서 거동이 크게 변하므로 아직까지는 사용범위가 제한되어 있다. 특히, 최근에는 주로 금속재료로 제작되었던 산화제 탱크와 연료 탱크를 복합재료로 대체하는 연구가 활발히 진행

되고 있으며, 이러한 연구의 일환으로 본 연구에서는 로켓의 압력탱크 관련 스커트 체결부의 유한요소모델링 및 비선형 거동해석을 수행하였다. 스커트의 축대칭 성질을 이용하여 부분 상세 모델링을 수행하였으며, 해석에서는 접촉을 고려한 비선형 해석을 수행하였다. 또한, 볼트의 클램핑을 고려한 해석을 통해 클램핑의 효과가 스커트의 거동에 미치는 영향을 분석하였고, 이를 통하여 스커트 체결부의 거동해석을 위한 해석 기준을 정립하였다. 그리고, 이러한 상세 모델링 기술을 바탕으로 다양한 기하 설계변수의 값을 변화시키면서 해석을 수행하여 스커트 체결부의 거동을 분석하였다. 최종적으로 일반적인 스커트 체결부의 설계에 대한 일반적인 지침을 제안하였다.

2. 복합재 압력탱크의 스커트 조인트에 대한 거동 해석

2.1 모델

해석에 적용된 모델은 그림 1과 같은 KSR-III 3

* KAIST, 항공우주공학전공 대학원

** KAIST, 항공우주공학전공

*** KARI, 로켓구조/재료그룹

단 연소관 모델이다. KSR-III의 3단 연소관 모델은 일반적인 복합재 압력탱크와는 달리 실린더 부분이 매우 짧은 구형 모델이다. 특히, 전방돔과 후방돔의 개구부 반경이 틀린 비대칭 탱크로써, 스커트는 1, 2차 스커트에 모두 38 플라이가 와인딩되었다. 전체 섬유 와인딩 순서는 그림 1의 오른쪽 위에서 표시하였다. 그리고, 그림 1의 오른쪽 아래 부분은 스커트가 다른 구조물과 체결되기 위해서 컨넥터(connector)와 연결되는 개요를 나타내었다. 재료는 압력탱크 제작에 사용된 T800/Epoxy이고 물성은 표 1과 같다.

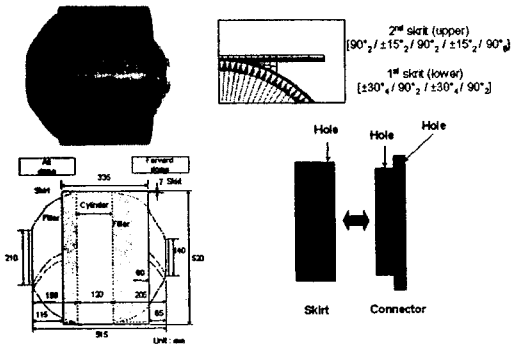


그림 1. KSR-III 3단 연소관 모델 및 스커트 체결의 개요

	T800/Epoxy
E_1	161.3 GPa
E_2, E_3	8.820 GPa
G_{12}, G_{13}	5.331 GPa
G_{23}	2.744 GPa
ν_{12}, ν_{13}	0.33
ν_{23}	0.45
Strength	$X_T = 2300$ MPa
ρ	1.5×10^{-6} kg/mm ³

표 1. T800/Epoxy의 물성치

그림 2는 스커트와 컨넥터가 연결된 전체 모델의 개요이다. 스커트의 원주 방향으로 볼트가 18개 설정된 것을 확인 할 수 있다. 또한, 컨넥터가 스커트의 안쪽부분으로 결합되어 체결되는 것을 확인 할 수 있다. 그림 3은 전체 유한요소모델 및 경계조건을 보여주는 그림이다. 경계조건으로는 먼저 반복경계조건을 적용하였다. 그리고, 볼트와 스커트, 스커트와 컨넥터, 컨넥터와 볼트 사이의 세 가지 접촉 영역에 모두 8개의 접촉 조건을 설정하

였다. 영역의 수보다 접촉 조건의 수가 많은 것은 해석에서의 수렴성을 향상시키기 위함이다.



그림 2. 스커트·컨넥터가 연결된 모델의 개요

하중 경계조건으로는 압력탱크의 자중 및 그에 따른 가속시의 중력하중을 고려한 하중을 스커트 끝단에 부여하였다. 부분 모델과 운용중의 최대 가속을 고려하여 인장과 압축에 대해서 각각 2kN의 하중을 부여하였다. 또한, 볼트의 클램핑 포스(clamping force)를 고려하였다. 클램핑 포스는 볼트의 체결에서 스커트 아래와 위 부분을 눌러주는 효과를 말하는데, 이를 고려하지 않으면 일반적인 핀 체결의 해석이 되기 때문이다. 클램핑 포스의 크기는 문헌[3]에서 조사한 29.3 MPa, 58.6 MPa를 각각 설정하였다. 마지막으로 실린더 부분의 반경 방향 변위에 의한 변위 경계조건을 설정하였다. 압력탱크가 내압을 받음으로 인하여 실린더 부분이 팽창하는 효과가 발생하게 되고, 이는 스커트 끝단의 반경방향 변위로 가해지게 된다. 따라서, 본 연구에서는 최대 작동 압력인 1000 psi에서의 반경 방향 변위 0.1 mm를 스커트 안쪽 끝단에 적용하여 해석을 수행하였다.

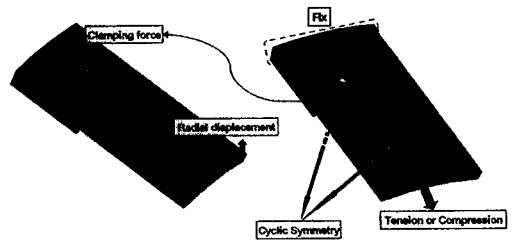


그림 3. 경계조건

3. 스커트 조인트의 설계 인자 연구

3.1 개요

일반적으로 원공이 있는 복합재 평판 볼트 조인트에 대해서 인자연구(parametric study)를 수행할 때에는 각 변수에 대한 bearing strength(P/Dt)와 shearing strength($P/2Et$)를 기준으로 한다.(단, P 는 inplane 하중, D 는 원공의 직경, E 는 끝단거리, t 는 평판 두께) 하지만, 스커트 조인트의 경우에는 형상이 원형이고, 경계조건도 상대적으로 복잡하기 때문에 같은 기준을 적용할 수 없다. 또한, 필라멘트 와인딩으로 제작된 구조물의 설계에서는 섬유가 모든 하중을 담당한다는 가정(netting theory)을 사용하기 때문에 섬유과단이 곧 최종과단을 의미하며, 이는 가장 중요한 응력 요소가 섬유방향의 응력임을 의미한다. 따라서, 스커트 조인트에 대해서 인자연구를 수행하기 위해서는 주어진 경계조건에 대해서 각 변수의 변화에 따른 최대 섬유방향 응력을 비교하는 것이 더욱 의미가 있다고 할 수 있다. 본 연구에서는 앞절에서의 복합재 압력탱크의 스커트 조인트에 대한 유한요소모델링을 바탕으로, 다양한 기하 설계 변수에 대한 인자연구를 수행하였다.

필라멘트 와인딩 된 압력탱크의 스커트 볼트 조인트(skirt bolted joint)에 영향을 미칠 수 있는 변수는 크게 네가지로 분류할 수 있다. 첫째는 재료 변수(material parameter)로써 섬유와 기지의 종류, 섬유 각도, 적층 순서 등이 이에 포함된다. 둘째는 기하 변수(geometry parameter)로써 원공의 위치, 크기, 배열, 개수 등이 포함된다. 셋째는 볼트 변수(fastener parameter)로써 fastener의 종류와 clamping 영역의 크기 및 clamping force 등이 포함된다. 넷째는 하중 변수(load parameter)로써 가해지는 하중의 종류와 방향 등이다.

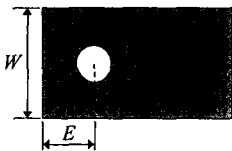


그림 4. 일반적인 볼트 조인트의 기하 설계 변수

그런데, 이렇게 많은 설계 변수를 모두 포함하여 조인트의 거동을 완벽하게 파악하고, 또, 이를

바탕으로 최적 설계를 수행하는 것은 사실상 불가능하고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 설계에서 가장 큰 비중을 차지하는 기하 변수(geometry parameter)를 인자연구의 주된 변수로 선택하였다. 또한, 기타 변수들에 대해서는 설계에 중요한 의미를 부여할 수 있는 변수들을 몇가지 선택하여 연구에 반영하였다. 선택된 주요 기하 변수로는 W (pitch distance), E (end distance), D (hole diameter)가 있으며, 이 설계 변수들은 원공의 위치와 크기를 의미한다.(그림 4) 또한, 본 연구의 경우에는 skirt가 축대칭 구조이기 때문에 W 는 끝 원공의 원주방향 개수를 의미하기도 한다. 따라서, 본 연구에서는 W 를 각도(degree) 단위로 설정하였으며, 모델의 반복대칭성(cyclic symmetry)을 만족시키기 위하여 가능한 부분 각도를 몇가지 선택하여 반영하였다.

3.2 수행 방법

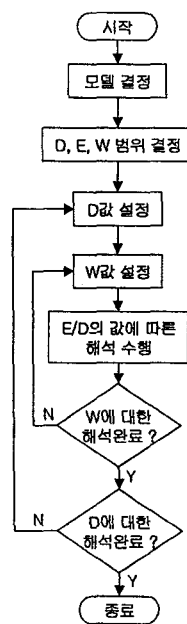


그림 5. 인자연구 수행 순서도

본 연구에서 수행한 인자연구의 방법을 그림 5에서 요약하였다. 여러 설계 변수에 대한 해석을 수행해야 하기 때문에 각 경우마다 유한요소모델링을 수행하는 것은 매우 비효율적이라 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 유한요소해석 전처리 프로그램인 PATRAN에서 지원하는 session 파일을 직접 수정하여 사용하였다. 그리고, 본 연구에서는 원공의 크기는 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm로 설정하였고, 끝단 거리는 해석 결과 정리의 편의성을 위하여 E/D 의 값이 각 경우에 대해서 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0이 되도록 설정하였다. 그리고, 부분 모델의 각도는 모델의 반복대칭성을 만족시키기 위하여 10° , 15° , 20° , 30° , 45° 로 설정을 하였다.

3.3 결과

원공의 크기(D) 변화가 최대 섬유방향 인장, 압축 응력값에 어떤 영향을 미치는지를 확인하기 위하여, W/D=3.75인 경우에 대하여 D의 변화에 따른 최대응력 변화를 해석해 보았다. 그림 6은 원공 크기의 변화에 따른 섬유 방향 최대인장응력 분포를 비교한 그래프이고, 그림 7은 원공 크기의 변화에 따른 섬유 방향 최대압축응력 분포를 비교한 그래프이다. 그 결과 인장과 압축 모두에 대해서 E/D의 값에 관계없이 D에 따라서 최대응력값이 대체적으로 선형적인 변화를 보임을 확인할 수 있다. 따라서, 원공의 크기 변화가 스커트 전체 거동에 비선형적인 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있었다.

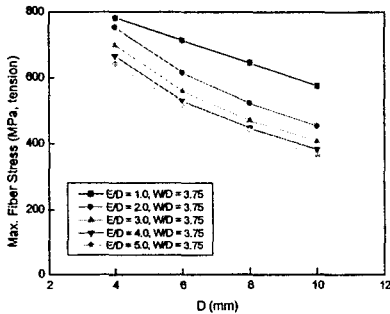


그림 6. D vs Max. fiber stress (tension)

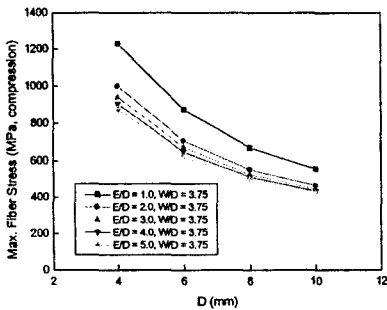


그림 7. D vs Max. fiber stress (compression)

4. 결론

축대칭 복합재료 볼트 체결부의 상세 거동해석 방법을 정립하였다. 특히, 필라멘트 와인딩 된 압력탱크의 스커트 체결부에 대한 상세 모델링 및

비선형 유한요소해석을 수행하였다. 그리고, 스커트 체결부의 다양한 기하 설계변수의 변화에 따른 구조물의 응력 변화를 데이터화하여 정리하였다. 발사체 체결부의 형상 설계는 선진국으로부터 기술 이전이나 문헌을 통한 충분한 자료 수집이 매우 어려운 분야이다. 따라서, 본 연구에서 제안된 스커트 체결부에 대한 설계 지침들은 향후 복합재료의 발사체로의 적용 연구에서 기초 자료로 사용될 수 있다. 특히, 산화제 탱크, 연료 탱크, 가압 탱크 등의 필라멘트 와인딩 된 탱크들의 스커트 조인트 부분을 포함하여, 발사체 외피와 탱크 사이 및 인터탱크(intertank) 구조들과의 체결 등에도 광범위하게 적용될 수 있다. 그리고, 정리된 설계 변수와 최대 응력 사이의 결과들은 일반적인 복합재료 축대칭 구조의 볼트 체결부 설계에서도 적용될 수 있다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원에서 지원하는 "인공위성 발사체 필수기술 연구"의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) S. Chutima and A. P. Blackie, "Effect of pitch distance, row spacing, end distance and bolt diameter on multi-fastened composite joints," *Composites, Part A*, vol. 27A, no. 2, pp. 105-110, 1996.
- (2) B. Okutan, Z. Asaln, R. Karakuzu, "A study of the effects of various geometric parameters on the failure strength of pin-loaded woven-glass-fiber reinforced epoxy laminate," *Composites Science and Technology*, vol. 61, pp. 1491-1497, 2001.
- (3) H. J. Park, "Effects of stacking sequence and clamping force on the bearing strengths of mechanically fastened joints in composite laminates," *Composite Structures*, vol. 53, pp. 213-221, 2001.