

# 돔 형상에 따른 연소관의 구조 특성 및 안전성 평가

고희영\* · 신광복†\*\* · 김원훈\*\*\* · 구송회\*\*\*

## An Evaluation of Structural Characteristics and Integrity for Rocket Motor Case according to Dome Types

Hee-Young Ko\* · Kwang-Bok Shin†\*\* · Won-Hoon Kim\*\*\* · Song-Hoe Koo\*\*\*

### ABSTRACT

Elastic-Plastic structural analysis was performed to evaluate structural characteristic and integrity for rocket motor case of solid propulsion system. The structural analyses were compared and evaluated using the simplified 2-D axisymmetric model and 3-D full model for rocket motor case with torispherical dome type. And pre-tension load for bolt model was considered in structural analysis. The results of displacement and stress for the simplified 2-D axisymmetric model and 3-D full model were in an good agreement with each other. Therefore, the simplified 2-D axisymmetric model for rocket motor case was recommended to verify quickly the structural integrity and save the modeling and calculating time in initial design stage. Also, the structural characteristic and integrity for rocket motor case according to 5 dome types was evaluated to select the optimal dome shape.

### 초 록

고체 연료 추진기관의 연소관에 대한 구조 특성 및 안전성을 평가하기 위해 탄소성 구조해석을 수행하였다. 기본 모델인 토리구형(torispherical) 돔 형상을 갖는 연소관에 대해 2차원 축대칭 모델과 3차원 전체 모델에 대해 구조 해석을 비교 평가하였으며, 볼트 모델에 대한 체결력이 고려되었다. 이때, 단순화된 2차원 축대칭 모델과 3차원 전체 모델의 응력과 변위에 대한 해석 결과가 잘 일치함을 확인하였다. 따라서 연소관의 초기 설계단계에서 빠른 구조 안전성 검증과 모델링 및 해석 시간의 절감을 위해 단순화된 2차원 축대칭 모델이 추천된다. 또한, 최적의 돔 형상을 선택하기 위해 5가지 돔 형상에 따른 연소관에 대해 구조 특성 및 안전성을 평가하였다.

Key Words: Rocket Motor Case(연소관), Elastic-Plastic Structural Analysis(탄소성 구조해석), Axisymmetric Model(축대칭 모델), Pre-tension Load(체결력)

\* 한밭대학교 기계설계공학과, 대학원  
\*\* † 교신저자, 한밭대학교 기계설계공학과  
E-mail : shin955@hanbat.ac.kr  
Tel : (042)821-1156 Fax : (042)821-1587  
\*\*\* 국방과학연구소

### 1. 서 론

로켓, 미사일, 발사체 등에 사용되는 고체연료

추진기관 부품인 연소관은 작동시에 고온 고압이 작용한다. 이때 구조물의 무게는 성능과 직결하는 중요한 요인이 되므로 구조 안전성 평가와 더불어 경량화에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 이러한 연소관은 돔(dome)부와 실린더(cylinder)부로 구성되며, 돔 형상의 변화에 따라 특성의 차이를 갖는다. 이때, 돔 형상은 내압에 대해 구조적으로 안전한 상태에서 내부체적은 높이고 무게는 최소화해야 한다. 이에 각 돔 형상변화에 따른 3차원 모델을 통하여 체적, 무게 등의 특성치를 비교하고 가해지는 내압에 의한 연소관의 변형 및 구조 강도를 평가하기 위한 탄소성 구조해석을 수행해야 한다[1-2]. 또한 연소관에 적용되는 체결볼트는 체결력(pre-tension load)을 고려하여 구조 해석 상에 실제 볼트에 발생하는 응력 분포 및 변형 형상을 모사해야 한다[3].

본 연구에서는 고체 추진기관에 적용된 연소관의 돔 형상에 따른 특성 비교 및 탄소성 구조해석을 수행하였다. 이때, 돔 형상은 5가지를 고려하였으며, ASME의 압력 용기 설계기준에 따라 최적의 두께를 적용하였다. 3차원 모델링은 CATIA v5를 활용하여 수행하여 무게 및 내부체적을 비교하였고, 내압에 의한 탄소성 구조해석은 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하여 연소관에 발생하는 변형 및 응력 결과를 확인하였다.

## 2. 적용 재질 및 돔 형상 정의

### 2.1 적용 재질

연소관에 사용된 재질은 AISI 4130이며, Table 1에 재료의 물성을 나타내었다.

Table 1. Material Properties of AISI 4130

Density (kg/m <sup>3</sup> )	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield strength (MPa)
7,850	200	0.3	1,086

### 2.2 돔 형상 정의

Fig. 1은 연소관의 단면 형상을 보여주고 있다.

이때, 연소관의 돔에 적용된 형상은 토리구형(torispherical), 반구형(hemispherical), 평면형(flat)과 타원형(elliptical)이며, 타원형은 장축(a)과 단축(b)의 비율이 1.4와 2.0인 2가지 경우를 적용하였다. 돔의 설계는 재료의 항복응력을 기준으로 안전계수가 1.3인 경우를 기준으로 하여, ASME의 압력용기 설계 기준에서 제공하는 막판(membrane) 기준식을 사용하여 최적의 두께를 구하였다[4].

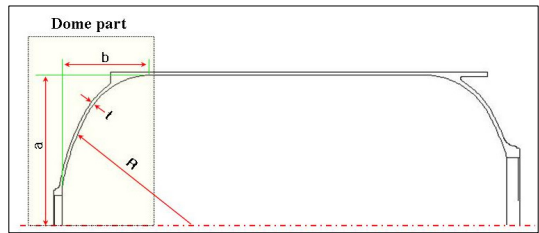


Fig. 1 Configuration of Rocket Motor Case

## 3. 연소관의 탄소성 해석

### 3.1 유한요소 모델링 및 경계조건

일반적으로 연소관과 같은 구조물은 중심축을 기준으로 회전이 가능한 축대칭 모델로서 구조해석 시에 2차원 축대칭 모델이 적용된다. 반면, 연소관의 상부와 하부에 적용되는 체결볼트 등을 고려한 해석 수행에 있어서는 Fig. 2와 같이 볼트가 중심축을 기준으로 일정하게 등 간격으로 적용되므로 축대칭 모델을 적용하는데 어려움이 있다. 그러나 초기 설계단계에서의 효율성을 높이기 위해 실제 형상은 2차원 축대칭 모델이 아니지만 체결볼트 부분을 축대칭으로 고려하여 구조해석을 수행하였고, 실제 형상이 적용된 3차원 전체 모델과 해석 결과를 비교하여 오차를 확인 하였다.

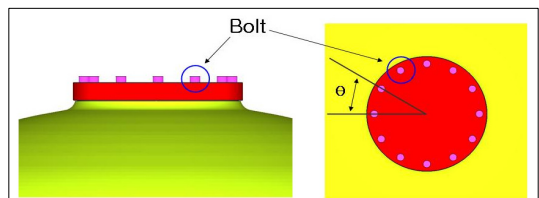
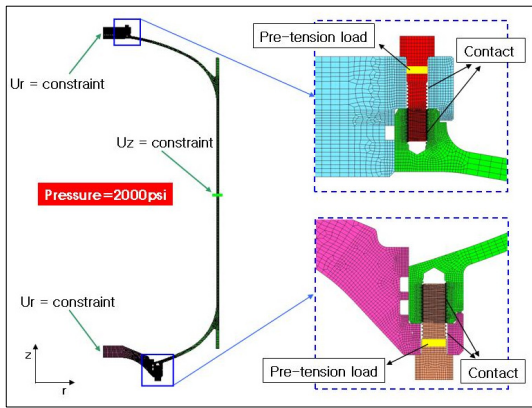
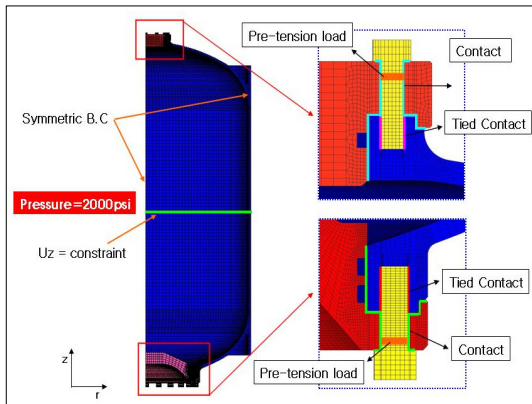


Fig. 2 Configuration of the Bolt Model

Fig. 3은 해석에 적용된 2차원 축대칭 모델과 3차원 1/4 대칭 모델 및 각각의 경계조건을 보여준다. 해석 모델은 연소관과 상부와 하부의 치구, 체결 볼트를 각각 모델링하여 적용하였으며, 각 부분은 마찰계수가 적용된 접촉 조건을 부여하였다. 이때, 2차원 축대칭 모델에서는 볼트의 나선산이 실제로 고려된 형상을 그대로 모델링하여 접촉 조건을 부여하였다. 반면, 3차원 솔리드 모델은 해석의 수렴성 시간과 모델링 시간의 단축을 위해 볼트 나선산을 생략하고 접촉면에 타이드 접촉 조건(tied contact)을 부여하였다.



(a) 2D-axisymmetric Model



(b) 3D-solid Model

Fig. 3 Finite Element Model and Boundary Condition

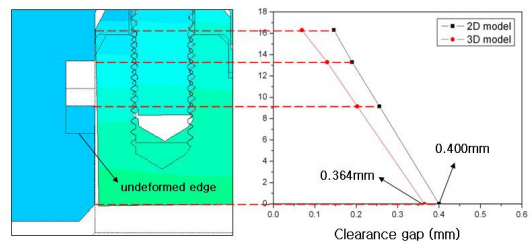
또한, 볼트의 체결력을 적용하여 이에 따른 거동을 고려하였으며, 2차원 축대칭 모델에서는 실

제 볼트 때문에 축대칭이 아니므로, 볼트 모델의 단면적 비율을 고려하여 근사적으로 적용하였다. 식(1)은 체결력과 체결 토크와의 관계식을 보여주며, 이때 토크 계수는 마찰계수에 의해 결정된다.

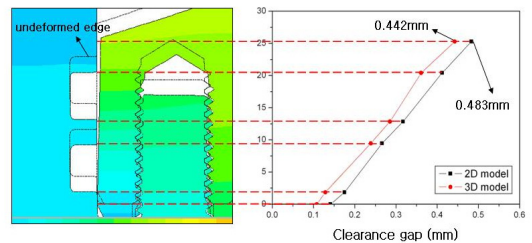
$$F = \frac{T}{k \times d} \quad (1)$$

여기서, F는 체결력, T는 체결 토크, k는 토크 계수, d는 볼트의 호칭 직경을 나타낸다.

3.2 2차원 축대칭 모델과 3차원 전체 모델의 결과 비교  
토리구형 돔 형상을 갖는 연소관의 2차원 축대칭 모델과 3차원 솔리드 모델에 대해 각각 탄소성 구조해석을 수행하였으며, 이때 발생하는 변형 및 응력 결과를 비교하였다.



(a) Top Contact Surface



(b) Bottom Contact Surface

Fig. 4 Comparison of Sealing Performance in Contact Surface

Fig. 4는 연소관의 내압에 따른 상부와 하부의 O-링 부위에서 발생하는 조립 틈새의 변형량을 그래프로 나타낸 것이다. 이때, 최대 변형량은 상부의 2차원 축대칭 모델에서 0.4 mm, 3차원 모델에

서 0.364 mm가 발생하여 9.9%의 오차를 보였고, 하부에서는 2차원 축대칭 모델에서 0.483 mm, 3차원 모델에서 0.442 mm가 발생하여 9.3%의 오차를 보였다. O-링부의 변형 결과에서 2차원 축대칭 모델의 변형량이 전체적으로 크게 나타났으나, 이는 축대칭 모델에서는 볼트가 체결되는 홀의 나선산과 실제 형상을 묘사하지 못한 이유로 판단된다.

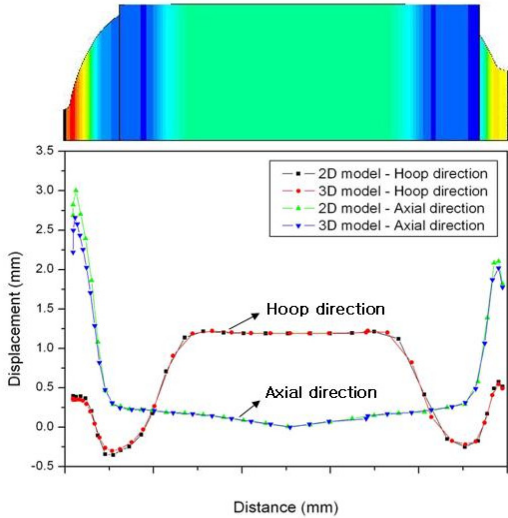


Fig. 5 Comparison of Hoop and Axial Displacement for 2D Axisymmetric Model and 3D Model

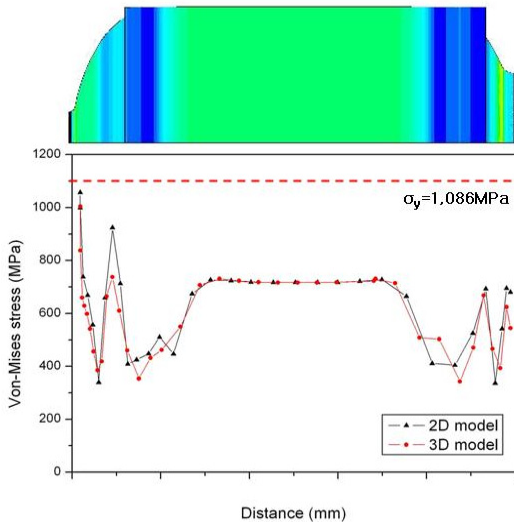


Fig. 6 Comparison of Distribution of Von-Mises stress for 2D Axisymmetric Model and 3D Model

Fig. 5는 연소관의 원주방향(hoop direction)과 축방향(axial direction)에 대한 변형량을 도식적으로 나타낸 그래프이다. 이때, 원주방향의 최대 변형은 2차원 모델에서 1.217 mm, 3차원 모델에서 1.221 mm가 발생하여 0.3%의 오차를 보였으며, 축방향의 최대 변형은 2차원 모델에서 3.004 mm, 3차원 모델에서 2.661 mm가 발생하여 12.9%의 오차를 보였다.

Fig. 6은 연소관에 발생하는 Von-Mises 응력 분포를 나타낸 그래프이다. 이때, 최대 응력은 2차원 모델에서 1,057 MPa, 3차원 모델에서 1,005 MPa가 발생하여 5.2%의 오차를 보였으며, 항복강도 값인 1,086 MPa 보다 작게 나타나 구조적으로 안전한 것으로 확인되었다.

2차원 축대칭 모델과 3차원 솔리드 모델의 탄소성 구조해석에 대한 변형과 응력 결과의 비교를 통하여 전체적으로 거동이 잘 일치함을 확인하였다. 따라서 볼트가 고려된 연소관의 돔 형상 변화에 따른 특성 및 구조적 안전성 평가에 대한 초기 설계단계에 있어서 2차원 축대칭 모델을 사용하여 모델링 및 해석 시간의 단축을 통한 효율성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.3 돔 형상에 따른 탄소성 구조해석 결과

Table 2는 돔 형상 변화에 따른 특성치를 CATIA v5를 이용하여 구한 것으로, 연소관의 내부 체적과 무게를 보여준다. 이때, 가장 높은 내부체적은 평면형 돔에서  $3.22 \times 10^8 \text{ kg/m}^3$ 으로 타나났으며, 무게는 타원형(장축/단축비=2.0) 돔에서 164.32 kg으로 가장 가볍게 나타났다.

Table 2. Characteristics of Dome Type

Dome type	Volume (m <sup>3</sup> )	Weigth (kg)
Torispherical	3.11X10 <sup>8</sup>	174.88
Hemispherical	3.05X10 <sup>8</sup>	166.30
Elliptical(1.4)	3.13X10 <sup>8</sup>	171.33
Elliptical(2.0)	2.95X10 <sup>8</sup>	164.32
Flat	3.22X10 <sup>8</sup>	277.46

( ) : 장축/단축의 비

Fig. 7은 돔 형상에 따른 원주방향 변형과 축 방향 변형을 나타낸 것으로, 돔 부분에서의 변형은 반구형에 가까울수록 변형이 적게 발생함을 확인하였고, 평면형에서는 가장 크게 발생하여 축 방향으로 7.928 mm가 발생함을 확인하였다. 이는 반구형 돔에 가해지는 내압은 균일한 분포로 작용된 반면, 평면형에서는 내압이 축 방향으로 집중되어 적용된 이유로 판단된다.

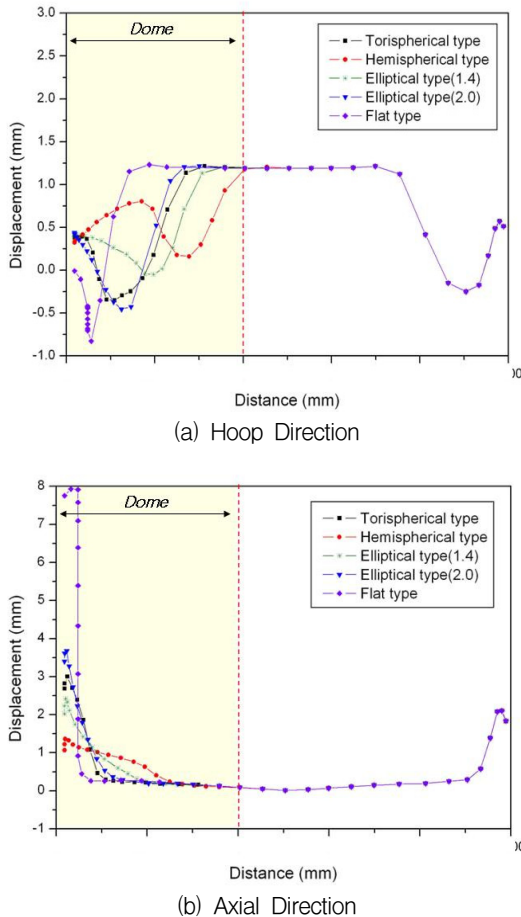


Fig. 7 Hoop and Axial Displacement for Dome Type

Fig. 8은 돔 형상에 따른 Von-Mises 응력 분포를 나타낸 것으로, 돔 부분에서의 응력 분포 역시 반구형에 가까울수록 응력이 낮게 나타남을 확인하였다. 이때, 평면형에서는 돔과 실린더가 만나는 모서리 부위에서 응력집중 등이 발생하여 항복강도 이상인 1,210 MPa의 응력 결과가 나타났다.

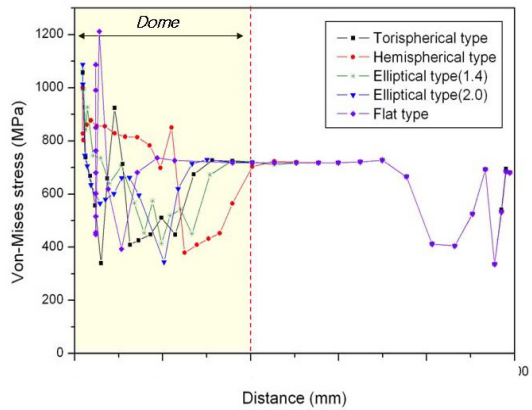


Fig. 8 Distribution of Von-Mises Stress for Dome Type

연소관의 돔 형상 변화에 따른 특성치 및 구조해석에 의한 변형 및 안전성 평가에서 돔 형상은 반구형에 근접 할수록 변형 및 응력이 낮게 나타났으며, 내부 체적은 평면형이 가장 높았고, 무게는 타원형(장축/단축비=2.0)에서 가장 가벼운 특성을 보였다. 이때, 구조적으로 안전성이 높은 반구형은 제작성에 어려움이 있으며, 이를 보완하기 위해 내부 체적과 무게에 대한 특성을 높이면서 제작성이 함께 고려된 토리구형이나 타원형 등이 제안되어 많이 사용되고 있다. 본 연구에서 연소관의 기본 돔 형상으로 적용된 토리구형은 탄소성 구조해석을 통하여 구조적으로 안전함을 확인하였다. 이때 내부 체적은 5가지 돔 형상 중에 3번째로 큰 값을 가지며 가장 큰 내부 체적을 갖는 평면형에 비해 3.4% 작게 나타났으며, 무게는 2번째로 큰 값을 가지며, 가장 가벼운 타원형(장축/단축비=2.0)에 비해 6.4% 높게 나타났다.

#### 4. 결 론

본 논문은 돔 형상 변화에 따른 연소관의 구조 특성 및 안전성 평가에 대해 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 볼트가 고려된 토리구형 돔 형상을 갖는 2

차원 축대칭 모델과 3차원 모델의 탄소성 구조해석을 통하여 변형 및 응력 분포 결과들을 비교하였고 비교적 잘 일치함을 확인하였다. 따라서 초기설계단계 시에 축대칭 모델을 사용하여 모델링 및 해석 시간의 효율성을 높일 수 있다.

- (2) 2차원 축대칭 모델에서의 볼트의 체결력은 볼트 모델의 단면적 비율을 고려하여 근사적으로 적용되었으며, 3차원 모델의 구조 해석 결과와 잘 일치함을 확인하였다.
- (3) 5가지 돔 형상에 따른 3차원 모델링을 수행하였고, 이를 통해 내부 체적 및 무게에 대한 특성치를 비교하였다. 또한 탄소성 구조 해석을 통하여 변형 및 응력 분포를 확인하였으며, 이때 집중응력이 발생한 평면형 돔 형상을 제외한 나머지 돔 형상들은 구조적으로 안전함을 확인하였다.

후 기

본 논문은 국방과학연구소의 “연소관의 구조 안전성 해석 및 평가” 과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 이영신, 조원만, 이방업, 구송희, “압력 용기 도움의 형상 및 두께 변화에 따른 비선형 응력해석”, 대한기계학회, 제 17권, 10호, pp. 2634~2645, 1993.
2. 백태현, 정태진, 이종길, “정수압을 받는 축대칭 철두체 원추형 압력용기의 응력해석”, 한국정밀공학회지, 제 9권, 4호, pp. 118~125, 1992.
3. 이부운, 김태완, “원자력 발전소용 압력용기의 볼트 연결 조립부 구조설계를 위한 3차원 접촉 응력 해석”, 한국정밀공학회지, 제 16권, 4호, pp. 122~128, 1999.
4. ASME, Pressure vessel design HDBK.