

추진기관 기밀체결부의 형상설계변수에 따른 기밀조립 갭의 영향평가

김성은*† · 노영희* · 황태경*

Discussion on the Sealing Gap Behavior of Rocket Motor Connection with the Structural Design Parameters

Seong-eun Kim*† · Young-hee Ro*, Tae-kyung Hwang *

ABSTRACT

In this paper, we represented the structural design parameter effect on the sealing gap behavior of solid rocket motor case and nozzle connection under penetrated pressure through the sealing path between insulation rubber and the ablative FRP bonded on the inside convergent wall of nozzle. It is important to keep the good sealing capacity during all the combustion time of SRM. To achieve the crucial role of sealing system of SRM, designers must consider design factors for stable sealing clearance gap as the nearly unchanged initial design state as possible for sufficient compression rate of O-ring under sealing gap pressure.

초 록

본 논문은 추진기관 기밀체결부의 설계변수가 기밀조립부의 갭 거동과 오링의 기밀성능에 미치는 영향을 분석하고 효과적인 설계변수 설정 방안을 도출하였다. 체결부의 설계변수를 구성하는 요소로서 노즐 플랜지 두께, 체결볼트에 가하는 예비하중을 단계별로 변화하여 연소관 내압거동에 따른 기밀조립부 갭 벌어짐을 최소화하고 나아가서 기밀용 오링의 기밀성능을 효과적으로 유지할 수 있는 설계변수 조건을 평가함으로써 추진기관 연소관 노즐 기밀체결부의 효율적인 설계 방법론을 제시하였다.

Key Words: Pre-load(예비하중), Proof Load(보증하중), Compression Rate(압축률), Extrusion(압출)

1. 서 론

추진기관 금속연소관(Motor Case)과 노즐

(Nozzle)조립체의 체결설계는 금속끼리 직접 접촉하는 노즐 플랜지 구조물에 고강도 인장볼트를 장착하는 설계가 일반적인 방식이다. 특히, 추진제(Propellant) 연소 시 발생하는 높은 압력이 기밀조립부를 포함한 체결부 전체에 영향을 미치게 되므로 체결설계 시 여러 가지 설계변수

* 국방과학연구소

† 교신저자, E-mail: kkse139@add.re.kr

영향을 고려하여야 한다[1].

연소관 내부압력에 의한 구조적 거동 변위가 더해져서 기밀조립간극(Sealing Gap Clearance) 확장이 심해질 경우 오링의 압출과피(Extrusion Failure)로 이어져 추진기관 폭발을 유발할 수 있으므로 기밀체결설계에서 압력거동에 의한 기밀조립부의 갭벌어짐이 기밀성능에 악영향을 미치지 않도록 적정수준으로 유지하는 것이 중요하다[2].

본 논문에서는 추진기관 연소 시 발생하는 내부압력이 연소관 기밀체결부에 미치는 구조적 영향을 분석하였고, 기밀조립부에 침투한 압력에 의하여 벌어진 기밀갭 간극을 기밀용 오링에 작용하는 압력에 의한 압축력으로 발생하는 압출거동(Extrusion Behavior)에 의한 오링용 고무의 구조적 안전성에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 구조해석 모델 및 설계변수 구성

연소관 노즐 체결부 형상과 구조해석 모델을 Fig. 1에 제시하였고, 체결부 설계변수 구성 내용과 재료의 물성을 Table 1과 2에 요약하였다.

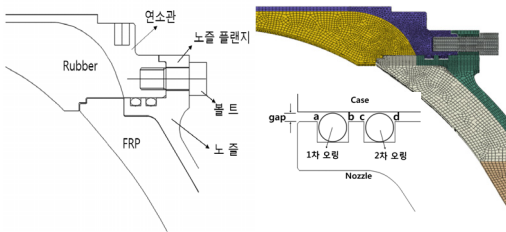


Fig. 1 O-Ring Flanged connection for Rocket Motor and Structural Analysis Model.

구조해석 모델은 추진기관의 구조적 거동을 모사하기 위하여 연소관/노즐체결부를 상세히 모델링하였다. 구조해석 프로그램은 상용코드인 ABAQUS/CAE를 활용하였으며, 접촉부를 고려한 기하학적 및 재료 비선형 탄소성해석을 수행하였다.

Table 1 Specification of Design Parameters

	설계변수	조 건
연소관	작용압력	1.758 kgf/mm ²
노즐	플랜지 두께	16.0 mm
볼트	강도등급	12.9 mm
	직경/체결수량	12.0/45ea
	최소인장하중	10500 kgf
	보증하중(M12)	8340 kgf
	안전 계수	1.5 ≤ S.F. ≤ 2.0

Table 2 Material Properties(Unit : kgf/mm²)

	탄성계수	항복강도	인장강도	포아송비
연소관	18980	201.2	207.4	0.28
노즐	20390	110.7	130.4	0.3
볼트	20390	112.7	131.3	0.3

3. 결과 분석

3.1 노즐 플랜지 두께 영향 분석

볼트 예비하중을 보증하중의 50%로 고정된 조건에서 플랜지 두께가 기밀조립부 갭과 볼트하중에 미치는 영향을 Fig. 2에 나타내었다. 갭 위치는 1차 오링 입구를 a, 1차오링 바닥 지점을 b, 2차 오링 입구를 c 그리고 2차오링 바닥 지점을 d로 표시하였다. 1차오링 입구부인 a 지점에서 갭벌어짐이 최대치를 나타내고 있고 2차 오링 바닥 지점인 d 지점으로 갈수록 갭벌어짐이 줄어들고 있다. 이 결과로부터 기밀조립부의 갭벌어짐 거동이 노즐 플랜지에 작용하는 회전변위 영향을 받고 있다는 것을 쉽게 알 수 있다. 3단계 플랜지 두께 중에서 가장 얇은 12.0mm와 두꺼운 20.0mm 일 때의 갭 벌어짐의 차이가 0.05mm로 약 10% 정도의 감소율을 보이고 있다. 플랜지 두께가 두꺼워지면서 체결부에 작용하는 모멘트하중에 의한 회전변위가 감소하는 결과를 보였고, 이러한 이유는 두께 증가가 플랜지의 변형에 대한 강성이 증가하여 기밀조립부로 전이되는 회전변위가 감소한 결과로 판단된다.

두께를 16.0에서 20.0으로 증가시켰을 때는 갭벌어짐 감소효과가 줄어들고 있다. 플랜지 두께는 부품의 무게 증가에 영향을 주지 않도록

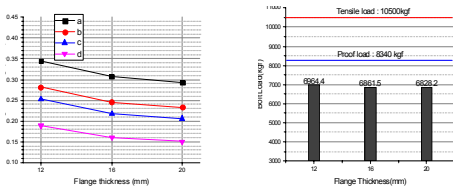


Fig 2. Flange thickness effects on the sealing gap deformation and bolt load variation.

적절히 설계하여야 하고, 볼트의 예비하중을 고정된 상태에서는 플랜지 두께 변화가 볼트하중에 주는 영향은 크지 않았다.

3.2 볼트 예비하중(pre-load) 영향 분석

플랜지에 작용하는 하중으로 연소관압력에 의하여 기밀조립부와 노즐축소부에 작용하는 하중에 의한 굽힘 모멘트 성분이 주된 영향을 미치고, 이로 인한 회전변위가 기밀조립부로 전이되어 조립갭을 벌리는 방향으로 작용하게 된다. 볼트에 가해지는 체결력을 증가시킬 경우 플랜지의 굽힘에 의한 변위를 줄여주는 영향이 줄어드는 경향을 보이는 것과 연관된다[3]. Fig. 3에서는 볼트의 예비하중과 내압에 의한 외력에 의한 볼트 작동하중변화를 예비하중 단계별로 나타내고 있다. 예비하중이 증가할수록 최고 압력단계(MEOP)에서 볼트 작동하중이 증가하므로 볼트 작동하중은 외력(External Force)과 예비하중의 합수라는 것을 알 수 있고, 볼트 작동하중은 외력의 일부와 볼트 예비하중을 더한 것과 같다.

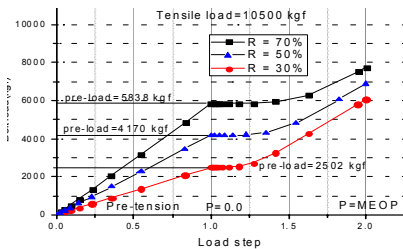


Fig 3. Variation of bolt load at different pre-load levels during the load step.

압력작용단계에서 볼트하중에서 비선형구간은 내압에 의한 외력 작용 시 볼트에 인장하중과 굽힘 하중이 동시에 작용함을 나타내고, 예비하중 수준이 증가하면서 인장하중이 작용하는 성분이 더 증가한다.

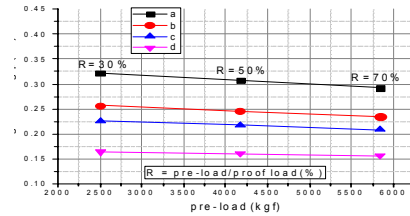


Fig 4. Variation of the sealing clearance gap deformation with the bolt pre-load level.

Fig. 4와 Fig. 5은 플랜지 두께를 16.0mm로 고정하고 볼트 예비하중을 3단계로 변화하여 작용하였을 때 기밀조립부 갭 벌어짐과 볼트하중에 미치는 영향을 보여주고 있다.

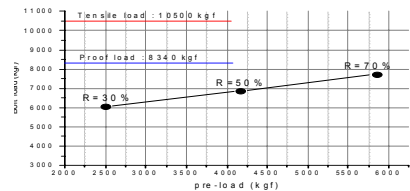


Fig 5. Variation of the operating load of the bolt with the bolt pre-load level.

기밀체결부에서 볼트의 체결력을 증가 시킬수록 기밀 조립부 갭 벌어짐을 비례적으로 줄일 수 있다. 볼트하중은 볼트에 가해지는 예비하중에 설계하중의 일부분이 합쳐져서 나타나므로 예비하중이 증가하면 볼트하중도 비례적으로 커지므로 볼트에 가하는 예비하중을 볼트의 구조적 안전성 범위 이내가 되도록 적절히 조절하여야 하는 한계점이 있다[4].

3.3 기밀용 오링 영향분석

3가지 예비하중을 보증하중의 30~70%범위로 가하였을 때 연소관/노즐 쪽의 변위를 압력 상

승 단계에 대하여 Fig. 6에 나타내었다. 기밀조립부에서 노즐쪽의 변위가 갭 벌어짐의 90%를 차지하고 있으므로 플랜지 체결부의 회전모멘트에 의한 거동이 기밀조립부의 기밀성능에 상당부분 영향을 미치고 있다. Fig. 7에서는 오링 장착 시 압축률이 22.7%에서 연소관 내압이 MEOP까지 상승하였을 때 압축률이 16% 정도까지 떨어지는 것을 볼 수 있다. 그림에서처럼 1차 오링 쪽(a, b지점)의 갭 벌어짐 양이 2차 오링 쪽(c, d지점)보다 더 크기 때문에 1차 오링 쪽의 압축률 저하수준이 2차 오링보다 더 높게 나타났고, 양호한 기밀성능을 유지하고 있음을 알 수 있다.

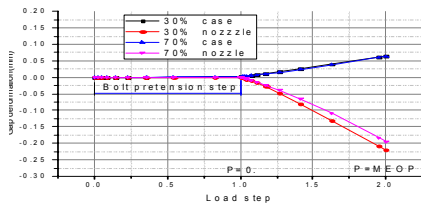


Fig 6. Sealing Gap deformation of case and nozzle with the bolt up and external load step.

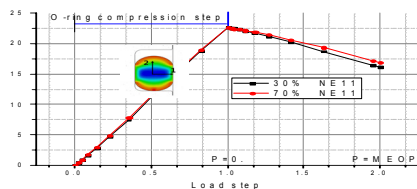


Fig 7. O-Ring compression rate with bolt pre-load level.

4. 결 론

추진기관 연소관 및 노즐 기밀체결부 상세 구조해석을 통하여 기밀조립부 조립갭 거동에 미치는 영향을 미치는 기밀체결부의 형상설계변수 효과를 정량적으로 평가하였고, 이러한 해석결과를 통하여 기밀체결부의 초기 조립갭 설정 수준에 추가하여 발생하는 연소관의 압력에 의한 기밀조립갭 벌어짐 거동을 효과적으로 제어함으로써 최종적으로 기밀성능의 건전성을 향상 시킬 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. R. W. Schneider, "Flat face flanges with metal-to-metal contact beyond the bolt circle", J. Eng. Power, Trans. ASME, pp. 82-88, 1968.
2. Allan, J. M., "Lessons learned but forgotten from the Space Shuttle Challenger Accident", AIAA 2004-5830, 2004.
3. Zhang Qingya, Sundong and Yang Guangsong, "Load-deformation analysis of O-ring flanged connection system for rocket motor", AIAA 2006-5246.
4. Grant M. Henson and Bryes A. Hornish, "An evaluation of common analysis methods for bolted joints in launch vehicles", AIAA 2010-3022.