

금속 실을 이용한 터보펌프 체결부 설계

윤석환* · 전성민* · 김진한*

Design of Joints Using Metal Seals in Turbopump

Suk-Hwan Yoon*[†] · Seong Min Jeon* · Jinhan Kim*

ABSTRACT

Turbopump is typically an assembly of rotors and casings, and there are a number of joints between them. Every joint should be leak-proof, so there is always a seal to accomplish the goal. Among various seals, metal seals are advantageous in that they are robust at high pressure, and at wide range of temperature. On the other hand, they require very high tightening forces, so that flanges, bolts and nuts should be carefully designed to ensure structural integrity and to prevent detrimental yielding of components. In this study, flange joints using conical seals made of stainless steel, solid flat metal seals made of copper and metal C-seals made of Inconel 718 were structurally designed and analyzed, considering both initial tightening and operating conditions.

Key Words : Turbopump, Liquid Rocket Engine, Seal, Metal Seal, Contact Analysis, Finite Element Analysis

1. 서 론

세계 각국의 여러 우주발사체 실패 사례에서 볼 수 있듯이 액체로켓엔진에서 산화제와 연료 두 매질의 예기치 않은 누설 및 혼합은 폭발로 이어질 수 있으므로 모든 구간에서 안정적으로 기밀을 유지하는 것이 매우 중요하다. 엔진의 핵심 구성품으로서 연료와 산화제를 가압하여 연소실로 공급하는 터보펌프는 극저온, 고압, 고온, 고회전수의 열악한 환경 조건에서 안전하게 작동하여야 하므로 적절한 구조 설계와 누설

방지 설계가 필수적이며 이에 따른 실의 중요성이 매우 높은 곳이다[1-4].

실은 소재별, 형태별, 기능별로 여러 종류로 구분이 가능하며, 한국형발사체용 터보펌프에서도 다양한 실이 사용되고 있으나 극저온부 및 고온부에는 주로 금속 소재의 실이 사용된다. 금속 실은 고무나 테프론과 같은 비금속 실에 비하여 높은 압력에서의 기밀을 보장할 수 있으며 모재와의 열 팽창율을 고려하여 사용하면 극저온 및 고온에서도 사용이 가능한 장점이 있다. 금속 실의 단면 형태도 다양하게 사용되고 있으며, 극저온부에는 스테인리스강 소재의 코니컬 실(conical seal)이 사용되고 있고 고온부에는 구리 소재의 금속 평판 실(solid metal

[†]2014년 2월 14일 접수 ~ 2014년 3월 21일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원

연락처, E-mail: shyoon@kari.re.kr

seal) 및 내열강 소재의 C형 실이 사용되고 있다[5-7].

이와 같은 장점으로 인해 금속 실이 많이 사용되고 있으나 금속 실은 특유의 높은 강성으로 인하여 기밀을 달성하기 위해서는 높은 수준의 실 표면 접촉압력이 요구된다. 이러한 목적을 달성하기 위해서 플랜지 연결부의 플랜지 형상 및 플랜지 소재, 그리고 볼트와 너트 등의 체결요소들은 충분한 구조적 강도를 확보하여야 하며, 지나친 무게 증가를 방지하기 위하여 구조해석을 통한 최적화 및 결과의 철저한 검증이 필수적이다.

본 연구에서는 터보펌프에 사용되는 금속 실 중 코니컬 실, 평판 실 및 C형 실에 대한 체결과정을 모사하여 유한요소 접촉해석을 수행하였으며, 2차원 접촉해석을 통하여 플랜지 및 실 실 캐비티의 전반적인 구조적 건전성을 검토하였고 3차원 접촉해석을 통하여 체결요소들의 개별 체결력 크기 및 체결요소 간격의 적절성을 검토하였다.

2. 2차원 접촉해석

2.1 해석 형상 및 방법

먼저 해석에서 고려한 세 종류의 금속 실 및 해당 실을 삽입하기 위한 캐비티의 형태를 Fig. 1에 나타내었다. 좌상부터 시계방향으로 각각 코니컬 실, 평판 실 그리고 C형 실의 형태를 나타내고 있으며, 각각의 실에 적절한 형태와 치수의 실 캐비티를 같이 표시하였다. 세 그림 모두 가로 화살표 방향으로 플랜지가 압축되면서 조립된다.

해석 시 하중으로 실제 모델에 적용된 체결요소, 즉 볼트와 너트 치수 및 소재의 강도를 고려하여 표준 체결 토크를 계산하였고, 해당 체결 토크에 따른 체결요소의 개당 체결 축력을 계산하였으며 이를 고려하여 두 케이싱의 밀착을 위한 하중으로 모델링 하였다. 이 과정에서 설정된 체결 축력 하중으로 두 케이싱 접촉면의

밀착이 일어나지 않을 경우, 체결요소 크기 및 개수의 재조정을 통하여 체결 축력을 증가시켜 주었다.

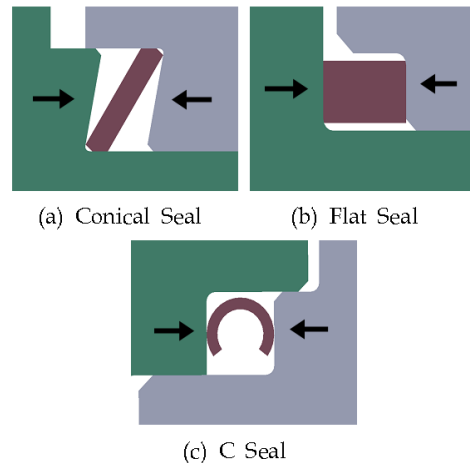


Fig. 1 Metal Seals Considered in the Analysis (Conical Seal, Flat Seal and C Seal)

해당 체결 과정의 모사를 통하여 체결력이 적절한지, 실 캐비티나 근처 플랜지 형상에 소성 변형이 발생하지 않는지, 그리고 실 표면에 충분한 수준의 접촉압력이 발생하는 지 조사하였으며, 이후 내부에 작동유체에 의한 압력이 발생하였을 때의 응력 및 접촉압력의 변화를 관찰하였다.

2.2 해석결과

접촉해석을 통하여 기본적으로 응력분포를 조사하게 되며, 이후 실제 실이 누설방지 기능을 할 수 있는지의 여부는 접촉압력분포의 조사를 통하여 이루어진다. 실이나 가스켓의 누설 여부를 예측하는 기법은 오래전부터 관련 연구자들의 주된 관심이었으며, 오늘날 플랜지 설계 규격에서 흔히 사용하는 가스켓 팩터(gasket factor)는 1942년의 미국 ASME 코드에서 등장하였다. 가스켓 팩터를 이용한 계산 방법은 주로 초기 체결 및 작동 압력 하에서 일정 수준 이상의 가스켓 압축 응력을 보장할 수 있는 방법으로서의 개념으로 보는 것이 타당하며, 이 방법

으로 누설 유무를 직접적으로 판단하는 것은 매우 조심스러운 접근을 요한다. 이후 가스켓 팩터를 이용한 방법에 끊임없이 개선이 요구되었고, 1974년에 미국 Pressure Vessel Research Council(PVRC)의 주도로 새로운 방법을 개발하기 위한 프로그램이 시작되었다. 당시의 가스켓 팩터를 뛰어넘는 방법과 함께 보다 심도 깊은 가스켓 연결부의 이해가 요구되었으며, 이 프로그램의 결과로 개발된 PVRC방법은 ASME 보일러 및 압력용기 규격에서 기존 방법의 효과적인 대안으로 대두되고 있다. 그러나 본 연구에서는 효과적이고 빠른 개발을 위하여 기존 방법을 기준으로 충분한 안전계수를 고려하여 안정적인 기밀 여부를 판단하고자 하였다[8-9].

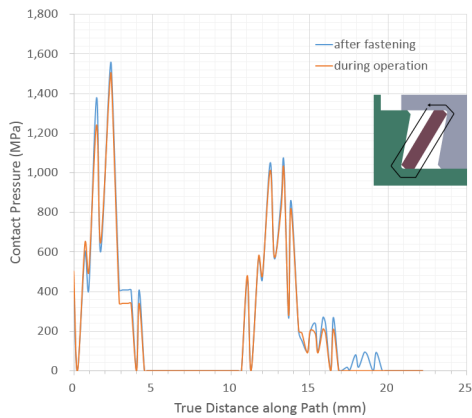


Fig. 2 Distribution of Contact Pressure along the Conical Seal Surface

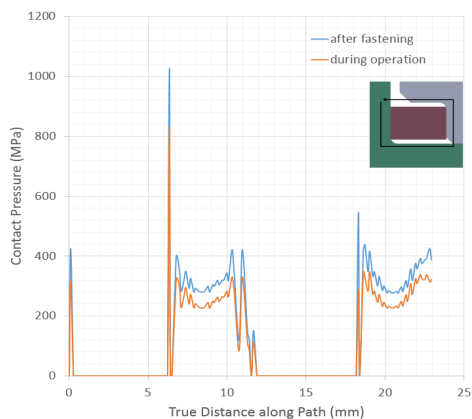


Fig. 3 Distribution of Contact Pressure along the Flat Seal Surface

Figure 2, 3은 실 단면에서 좌측 상단 기준점을 기준으로 하여 시계방향으로 표면에서의 접촉압력 분포를 그래프로 나타낸 것이다. Figure 2는 코니컬 실, Fig. 3은 평판 실을 나타내며, 각각 접촉지점에서 높은 수준의 접촉압력을 달성하는 것으로 나타났다. 두 결과 모두 운전 중 내부압력이 가해지면 소폭의 접촉압력 하락이 발생하고 있으나, 규격에 의한 기준 접촉압력으로서 스테인리스강 소재 코니컬 실은 약 196.5 MPa, 그리고 구리 소재 평판 실은 약 400 MPa 수준을 만족하는 것으로 나타났다.

Figure 4는 C형 실 적용부에 대한 접촉압력분포를 나타내고 있다. C형 실은 접촉부위가 명확하고 좁으므로 분포를 그래프로 표현하기 보다는 그림에서 범례와 함께 나타내는 것이 효과적이라고 판단되었다. C형 실은 표준규격을 찾기가 어려우므로 실 제작업체에서 추천하는 단위 길이당 체결축력을 하중으로 적용하였으며 이때 얻어진 400 MPa 근방의 접촉압력을 추천압력으로 파악하였다. C형 실의 경우에도 마찬가지로 우측 그림과 같이 체결 후 내부압력이 분포하게 되면 접촉압력의 하락이 발생하나 감소량은 약 8.2% 정도로 크지 않은 것으로 나타났다.

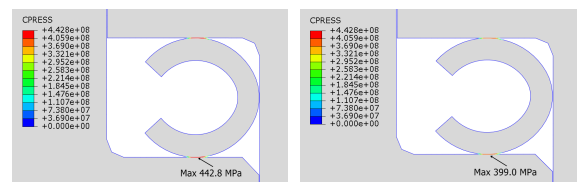


Fig. 4 Distribution of Contact Pressure along the C Seal Surface After Assembly(Left) and During the Operation(Right)

3. 3차원 접촉해석

3.1 해석 형상 및 방법

앞 절에서 다루었던 금속 실 중 C형 실은 다른 실에 비하여 적은 체결력을 요하므로 플랜지 두께나 체결요소의 크기 및 개수를 줄일 수 있어 플랜지의 경량화에 유리하다. 다만 플랜지의

두께가 지나치게 얇으면 체결요소 근처에서는 밀착이 일어나고 있으나 내부 실 부분은 밀착면이 분리되는 플랜지 로테이션(flange rotation) 현상이 일어날 수 있으며, 체결요소의 간격이 지나치게 넓어지면 체결요소 근처에서는 밀착이 일어나고 먼 곳에서는 밀착되지 않는 플랜지 보우잉(flange bowing) 현상이 일어나 누설의 원인이 되므로 플랜지 두께 및 체결요소의 배치, 내부압력 및 소재 등에 대한 종합적인 최적화가 이루어져야 한다[10]. 이러한 형상 요소 중 플랜지 두께 등은 앞 절의 2차원 해석에서 충분히 고려 가능하지만 체결요소의 간격에 따라 원주 방향으로 편차가 생기는 접촉압력의 분포는 3차원 접촉해석을 수행하여야 파악이 가능하다.

이에 따라 Fig. 1의 C형 실 플랜지에서 체결요소의 개수를 결정하기 위하여 해석 모델을 3차원으로 확장하였다. 다만 3차원 접촉해석은 매우 높은 해석비용을 요구하므로 이를 최소화하기 위하여 조립되는 양쪽 플랜지가 좌우대칭이라고 가정하여 C실의 허리 중간면을 기준으로 대칭모델 해석을 수행하였다. 이렇게 1/2로 모델링된 3차원 모델을 Fig. 5에 나타내었다. 해당 플랜지의 외경은 약 240mm 이며, 스테드 볼트들의 PCD(Pitch Circle Diameter)는 약 230mm 이고 볼트의 크기는 M6으로 선정하였다. 그림은 볼트 개수가 36개일 때의 형상이며, 이 때 볼트 사이의 각도는 10도이고, 해석은 각도 20도짜리 주기 대칭 절편을 만들어 진행하였다.

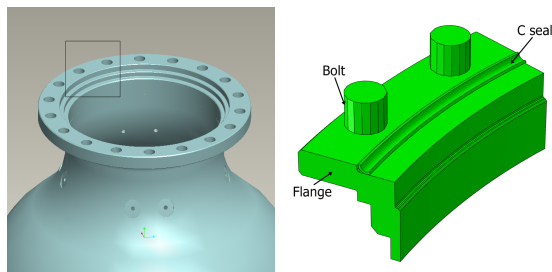


Fig. 5 3-Dimensional Model of C Seal Contact Analysis

이 때 실과 플랜지 사이 면에 접촉 조건을 설정하고, 실 중앙 대칭면을 구속 후 모델링된 볼

트 내부에 체결 축력을 설정하여 볼트 길이가 줄어들도록 하면 실제 체결과 거의 같은 조건을 부여할 수 있다.

3.2 해석 결과

해석결과로서, Fig. 6에 접촉압력 분포의 한 예를 나타내었다. 접촉압력 분포를 확인하기 쉽도록 조립체 모델에서 실을 건너내고 접촉면을 확대하여 살펴보았다. Figure 6의 3차원 모델에서는 볼트와의 거리에 따라서 접촉압력이 변하는 양상이 육안으로 잘 확인되지 않고 있지만, 실제 접촉면을 따라 원주방향으로 접촉압력의 변화를 Fig. 7~9에서 그래프로 나타내 보면 그 관계를 잘 알 수 있다. 이를 위하여 볼트 개수를 여러 수준으로 조절하여 해석을 수행하였는데, 볼트 개수 45개, 36개, 24개의 세 수준으로 진행하였다. 볼트 개수 45개는 플랜지와 실의 종류가 정확히 일치하진 않으나 NASA의 설계 문서에서 권장하는 값에 가장 근접한 개수이며, 36개와 24개는 설계 및 제작이 편리한 개수로 선정하여 해석을 진행하였다.

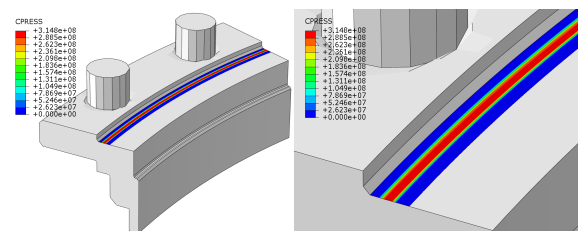


Fig. 6 Distribution of Contact Pressure after Assembly

해석 결과로서, 실 접촉 부위의 원주 방향 길이에 따른 접촉압력의 분포를 그래프로 나타내었으며, 다음 일련의 그림에 그래프를 표기하였다. 그래프의 곡선 중 푸른색이 체결 직후, 붉은색이 운전 중 내부압력에 의하여 접촉압력이 감소된 상태를 나타낸다. 모든 결과에서 두 개의 스테드 볼트 주변에서 접촉압력의 최대치를 나타내고 있으며, 스테드 볼트와 멀어질수록 접촉압력이 감소하는 것을 확인하였다.

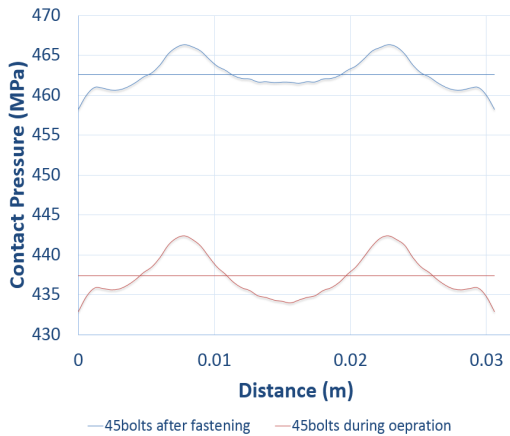


Fig. 7 Contact Pressure along the Seal Contact Line (45 bolts)

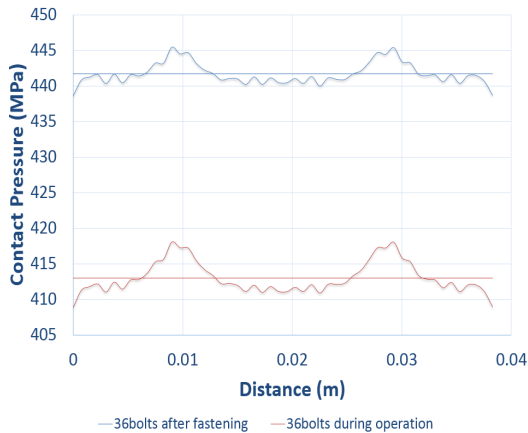


Fig. 8 Contact Pressure along the Seal Contact Line (36 bolts)

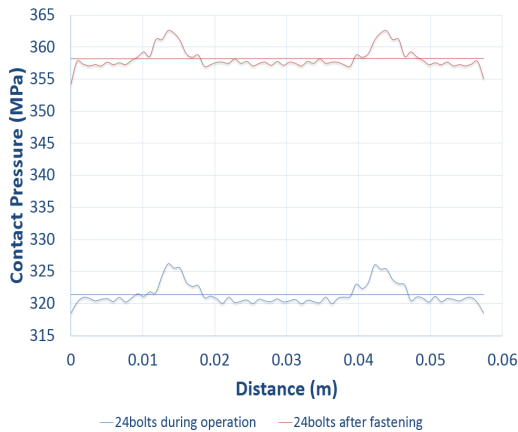


Fig. 9 Contact Pressure along the Seal Contact Line (24 bolts)

다음 그림은 해석을 수행한 볼트 개수의 세 가지 조건에서 평균 접촉압력을 비교한 그래프이다. 앞서 수행한 2차원 접촉 해석에서 실 제조업체에서 추천하는 평균 체결력에 의한 평균 접촉압력은 작동 중 약 400 MPa 수준임을 파악하였는데, 결론적으로 볼트 개수 45개와 36개는 이 수준을 상회하지만, 볼트 개수 24개는 이 수준에 미달하는 것을 알 수 있었다.

볼트 개수 증가의 긍정적인 효과는 Fig. 11에서도 확인할 수 있는데, 체결 직후 접촉압력과 비교하여 운전 중 내부압력에 의하여 얼마나 접촉압력의 손실이 발생하는가의 여부를 나타낸 결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 볼트 배열이 촘촘할수록 내부압력에 의하여 접촉압력이 감소하는 양이 줄어들어 운전 중 충분한 기밀을 보장할 수 있을 것으로 유추할 수 있다.

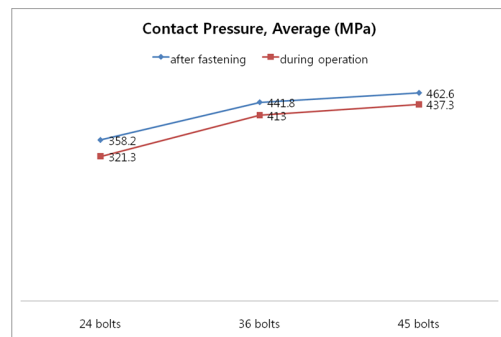


Fig. 10 Average Contact Pressure according to the number of bolts

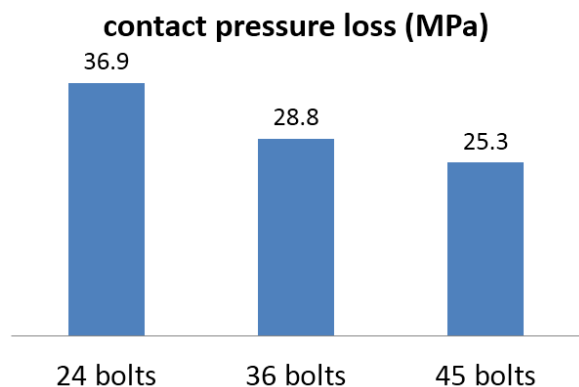


Fig. 11 Loss of Contact Pressure during the Operation according to the number of bolts

4. 결 론

터보펌프에서 사용되는 세 종류의 금속 실에 대한 접촉해석을 수행하였다. 코니컬 실, 평판 실 및 C형 실에 대하여 2차원 접촉해석을 통하여 실, 실 캐비티 및 플랜지의 구조적 건전성을 검토하였고 접촉압력을 구하여 압력용기 규정에서 추천하는 접촉압력 수준과 비교하였다. 접촉해석은 체결요소에 맞추어 설계된 체결 토크 및 이에 따른 체결 축력을 고려하여 수행하였으며, 체결을 상정한 해석 외에도 이후 내부에 작동유체에 의한 압력이 발생하였을 때에 대한 해석을 수행하여 운전 중 건전한 체결 유지 및 누설 방지를 달성할 수 있도록 하였다. 한편 C형 실은 전체적인 플랜지의 중량을 줄이기 위하여 3차원 접촉해석을 수행하여 최소의 접촉압력을 유지하기 위한 적절한 체결요소의 개수를 구하였으며 이를 통하여 구조적으로 건전하면서도 경량화된 플랜지 체결부를 설계할 수 있는 방법을 확립하였다.

참 고 문 헌

- [1] Kim, J., Lee, E. S., Choi, C. H. and Jeon, S. M., "Current Status of Turbopump Development in Korea Aerospace Research Institute," International Astronautical Congress(IAC-04-S.P.17), 2004
- [2] 김진한, 홍순삼, 정은환, 최창호, 전성민, "30톤급 액체로켓엔진용 터보펌프 개발현황," 한국추진공학회 추계학술대회 논문집, 2005, pp.375-383
- [3] Kim, J., Hong, S. S., Jeong, E. H., Choi, C. H. and Jeon, S. M., "Development of a Turbopump for a 30 Ton Class Engine," 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA Paper 2007-55516, 2007
- [4] 김진한, "국내 터보펌프 개발 현황," 한국추진공학회지, 제12권, 제5호, 2008, pp.73-78
- [5] 윤석환, 전성민, 김진한, "액체로켓 터보펌프 벌류트 케이싱의 파열시험," 유체기계저널, 제14권, 제4호, 2011, pp.12-18
- [6] 윤석환, 전성민, 김진한, "액체로켓 터보펌프 벌류트 케이싱의 구조설계 및 시험," 한국추진공학회 추계학술대회 논문집, 2010, pp.775-776
- [7] 윤석환, 전성민, 김진한, "터보펌프 케이싱의 구조해석 및 측정," 항공우주기술, 제5권, 제2호, 2006, pp.174-180
- [8] "Unfired Pressure Vessels - Part 3: Design," British Standard, BS EN 13445-3:2002, 2004, pp.597-633
- [9] Rao, K. R., "Companion Guide to the ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Volume 2, Second Edition: Criteria and Commentary on Select Aspects of the Boiler & Pressure Vessel and Piping Codes", ASME, Chapter 40, 2006, pp.8-9
- [10] Huzel, D. K. and Huang, D. H., "Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines," Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol.147, 1992, pp.314-319