

技術論文

극저온 고압 배관용 구형 플랜지 개발

문일윤\* · 문인상\* · 유재한\* · 이수용\*\*†

Development of the Spherical Flange Used in a Cryogenic High Pressure Pipe

Il Yoon Moon\* · Insang Moon\* · Jaehan Yoo\* · Soo Young Lee\*\*†

ABSTRACT

The spherical flange was designed to apply to a cryogenic high pressure pipe of a liquid rocket engine. It is designed that the spherical flange is able to be assembled and kept airtight up to 2.5° of the axial misalignment between the combined components. It increases the degree of freedom of the engine assembly. The spherical flange is composed of a ball and socket joint, a metal seal, spherical type bolts and washers. The prototype was verified by leak test at the room temperature and the cryogenic temperature. Additionally the strength test and the destructive test were performed at the room temperature.

초 록

액체 로켓 엔진의 극저온 고압 배관에 사용할 목적으로 구형 플랜지를 설계하였다. 설계된 구형 플랜지는 결합 부품 간 중심축에 최대 2.5°의 오차가 있어도 플랜지 조립이 가능하며 기밀을 유지할 수 있어 엔진 조립 자유도를 증가 시킬 수 있다. 구형 플랜지는 볼, 소켓 형태의 결합부와 금속 실, 구형 볼트와 와셔로 구성되어 있다. 구형 플랜지 시제품을 제작하여 상온 기밀시험, 극저온 기밀시험, 상온 강도시험, 상온 파괴시험을 수행하여 성능을 검증하였다.

Key Words: Spherical Flange(구형 플랜지), Metal Seal(금속 실), Engine Feeding System(엔진 공급계), Cryogenic Propellant(극저온 추진제), Liquid Rocket Engine(액체 로켓 엔진)

1. 서 론

액체 로켓 엔진의 추진제 공급계 중 터보펌프와 연소기를 연결하는 엔진 공급계에는 대구경 고압 배관이 사용된다. 대구경 고압 배관의 경우 배관자체의 강성에 의해 굽힘이 불가능하기 때문에 배관 제작이나 엔진 조립 시 발생하는 오차를 보상해 줄 수 있는 부분이 필요하다[1]. 이러한 기능을 수행하기 위해 호스나 벨로우즈 같

접수일 2011. 5. 6, 수정완료일 2011. 6. 9, 게재확정일 2011. 6. 14

\* 정회원, 한국항공우주연구원 발사체미래기술팀

\*\* 종신회원, 한국항공우주연구원 발사체미래기술팀

† 교신저자, E-mail: sylee@kari.re.kr

[이 논문은 한국추진공학회 2011년도 춘계학술대회(2011. 4. 28-29, 현대로템(주) 기술연구소) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

은 유연 배관이 사용되어 왔다[2]. 로켓엔진 고성능화에 따라 연소압력이 증가하는 추세이며 이에 따라 추진제 공급압력도 증가하고 있어 호스나 벨로우즈 같은 유연 배관의 개발과 적용에도 어려움이 커지고 있다. 우주개발 선진국의 경우 엔진 공급계에서 상대적으로 무겁고 파손위험이 많은 호스나 벨로우즈를 대신할 수 있는 조인트를 개발하여 지상시험용 로켓엔진에 적용하고 있다.

본 논문에서는 엔진 공급계 극저온 산화제 주배관과 개폐밸브, 터보펌프와의 연결에 사용할 목적으로 결합 부품 간 최대 2.5°의 축 중심 오차가 있어도 조립과 기밀이 가능한 구형 플랜지(Spherical Flange)를 설계하고 시제품을 제작하여 성능을 검증하였다.

2. 구형 플랜지 설계

2.1 기본설계

구형 플랜지는 Fig. 1에서와 같이 구형 돌출부를 갖는 수 플랜지, 구형의 안내면을 갖는 암 플랜지, 금속 실(Seal), 플랜지 체결을 위한 볼트와 와셔로 구성된다.

구형 플랜지는 암 플랜지의 구형 안내면을 따라 구형 돌출부를 갖는 수 플랜지가 중심축의 반경 방향으로 회전이 가능하여 결합 부품 간 중심축이 불일치하더라도 조립이 가능한 구조로 되어 있다. 극저온 산화제인 액체산소에 대하여 기밀을 유지할 수 있도록 금속 소재의 실을 사용하였다. 금속 실은 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 플랜지와 5곳에서 접촉하여 기밀을 유지할 수 있도록 되어 있다. 구형 플랜지는 축 정렬 불일치 상태에서 조립되더라도 기밀을 유지할 수 있도록 구형(Spherical)의 볼트와 와셔를 사용하여 결속력의 평형을 유지할 수 있도록 하였다. 설계된 구형 플랜지는 결합부품 간 축 정렬이 불일치한 상태에서도 플랜지 결합이 가능하도록 설계되어 있어 엔진 공급계 결합 자유도를 증가시켜 벨로우즈를 대체할 수 있다.

구형 플랜지는 액체산소를 작동유체로 하여

최대 예상 작동 압력(MEOP) 10 MPa, 배관내경 96 mm, 최대 2.5°의 허용 체결 각도 등의 설계요구조건을 토대로 설계되었다.

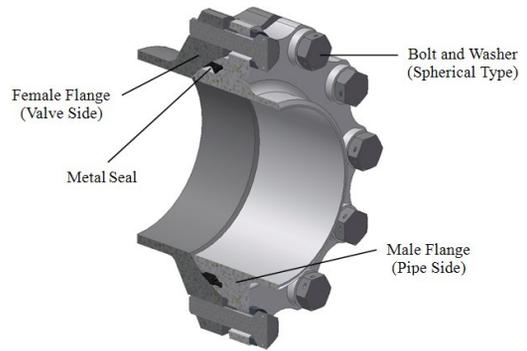


Fig. 1 Spherical Flange Configuration

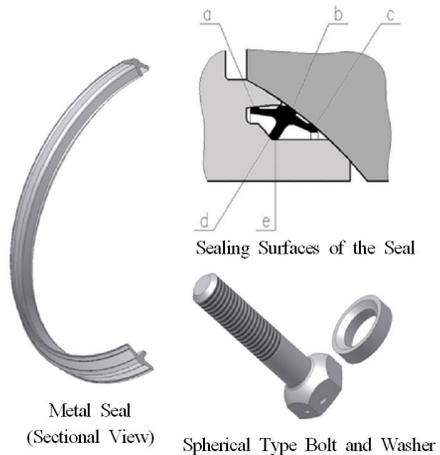


Fig. 2 Metal Seal, Bolt and Washer

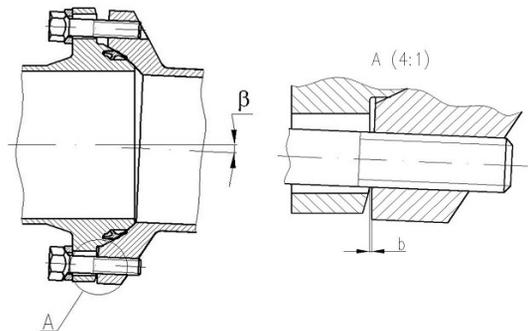


Fig. 3 Limits of the Angular Alignment in the Spherical Flange

## 2.2 소재 선정

구형 플랜지에서 수 플랜지는 배관에, 암 플랜지는 연소기 산화제 개폐밸브나 터보펌프 산화제 출구에 적용된다. 따라서 수 플랜지는 배관소재, 암 플랜지는 연소기 산화제 개폐밸브와 터보펌프 산화제 출구 소재와의 용접성을 고려하여 소재를 선택하여야 한다. 수 플랜지의 소재는 배관 소재로 고려중인 INCONEL 718을 선정하였으며 암 플랜지는 연소기 산화제 개폐밸브와 터보펌프 산화제 출구 소재로 고려중인 A-286을 선정하여 용접에 문제가 없도록 하였다.

금속 실의 경우 플랜지 소재보다 경도가 낮은 소재를 사용하여야 한다. 실 소재의 경도가 플랜지 소재의 경도 보다 높은 경우 플랜지에 브리넬링(Brinelling)을 야기하여 플랜지를 재사용할 수 없게 된다.

극저온 환경에서 기밀을 유지하기 위해 결합 부품간의 선형 변형률의 차이가 30%를 초과하지 않는 것이 유리하다. 엔진공급계 극저온 산화제 용 실로 추천되는 SUS 316L과 SUS 321을 선정하였다[3, 4]. 체결용 볼트와 와서는 수 플랜지 소재와 동일한 INCONEL 718을 선정하였다.

## 2.3 구조설계 및 해석

구형 플랜지는 최대 작동 압력에서 플랜지 체결에 필요한 체결력으로부터 1개 볼트에 필요한 체결력과 체결 토오크를 계산하여 설계 하였으며 최대 예상 작동 압력과 작동 온도, 파괴압력 조건에서 유한 요소 해석을 수행하였다.

구형 플랜지 체결력은 Eq. 1과 같이 계산한다.

$$Q_{tight} = k \frac{\pi D_{gm}^2}{4} P_{MEOP} \quad (1)$$

$Q_{tight}$  - Clamping Force of Flange;

$D_{gm}$  - Mean Diameter of Seal;

$k$  - Tightening Coefficient;

$P_{meop}$  - Max Expectation Operating Pressure.

볼트 1개당 체결력은 Eq. 2와 같이 계산한다.

$$Q_0 = \frac{Q_{tight}}{z} \quad (2)$$

$Q_0$  - Clamping Force per Bolt;

$z$  - Number of Bolt.

스터드 볼트 체결 토오크는 Eq. 3과 같이 계산한다.

$$M_{tight} = M_{th} + M_f \quad (3)$$

$M_{tight}$  - Clamping Torque of Stud Bolt;

$M_{th}$  - Thread Frictional Moment;

$M_f$  - End Face Friction Moment.

Equation 3의 나사산 마찰에 의한 모멘트는 Eq. 4와 같이 계산한다.

$$M_{th} = Q_0 \frac{d_2}{2} \left( \frac{s}{\pi d_2} + \mu_{th} \right) \quad (4)$$

$d_2$  - Effective Thread Diameter;

$s$  - Thread Pitch;

$\mu_{th}$  - Thread's Friction Coefficient.

Equation 3의 나사머리 모멘트는 Eq. 5와 같이 계산한다.

$$M_f = \mu_f Q_0 R_f \quad (5)$$

$\mu_f$  - End Face Friction Coefficient;

$R_f$  - Frictional Radius.

Equation 5의 구형 볼트 나사머리의 마찰반경은 Eq. 6과 같이 계산한다.

$$R_f = \frac{4r}{D^2 - d_o^2} \left( \gamma r^2 + b \frac{d_o}{2} - c \frac{D}{2} \right) \quad (6)$$

$D$  - Diameter of Nut Seat;

$d_o$  - Diameter of Hole;

$\gamma$  - Friction Cone's Angle;

$r$  - Radius of Spherical Friction Surface;

$b, c$  - distance between friction diameter and center of sphere, respectively.

암 플랜지가 A-286이고 수 플랜지, 볼트, 와셔가 INCONEL 718인 경우에 열팽창 계수가

A-286이 더 커서 극저온에서 체결력 저하로 기밀 성능 저하가 예상된다. 따라서 극저온에서 열수축에 따른 체결력 저하를 보상할 만큼 체결력을 높여 증가시키는 방안을 생각해 볼 수 있다.

A-286과 INCONEL 718의 극저온 열팽창 계수 차이는  $2.7 \times 10^{-6}/K$  이며 온도 저하가 203 K라 가정하면 변형율의 열수축 변형율은  $5.48 \times 10^{-4}$  이다. 이에 강성값 216 MPa를 곱하면 118 MPa의 상온에서 축방향 응력 증가가 필요하다. 이는 상온에서 기밀유지를 위해 계산된 볼트 체결력의 5%에 해당한다. 따라서 상온에서 계산된 체결력에 5% 높은 체결력으로 볼트를 체결하면 극저온에서도 기밀 성능 저하가 없을 것으로 판단된다. 이러한 설계는 극저온 기밀시험으로 검증될 수 있다.

유한 요소 구조 해석은 상용 프로그램인 Abaqus v6.9를 사용하였고 3차원 2차 솔리드 요소가 사용되었다. 해석 모델은 대칭성을 고려하여 1/24 모델이 사용되었으며 내압과 내압에 의한 분리력 하중, 볼트 체결력, 온도에 따른 물성 변화가 고려되었다. 고려된 비선형성은 재질 비선형성인 소성과 볼트와 와셔 사이의 접촉 비선형성이 있다. 설계된 플랜지에 대하여 최대 예상 운영 압력(MEOP) 조건과 파단압력(Burst Pressure) 조건에서 안전계수를 계산하였다. 최대 예상 운영 압력 조건에서는 극저온 항복 및 인장 강도 기준으로, MEOP의 두 배의 압력인 파단 조건에서는 상온 기준으로 안전계수를 구하였다. 구조 해석 결과 운용 조건에서 항복이 발생하지 않았으며 INCONEL 718의 극저온 항복 강도에 대하여 1.34의 안전계수를, A-286에 극저온 항복 강도에 대하여 1.48의 안전계수를 가진다. A-286의 1.48 안전계수 이상의 항복 부위는 압 플랜지 목 부분에서 발생한 것을 볼 수 있는데 실제 산화제 개폐 밸브에 적용될 경우 플랜지 목 부분은 제거 되어 밸브에 직접 연결되므로 문제가 되지 않는다.

여기에 나타내지 않았지만 파단 조건에서의 구조해석 결과, 최대 응력은 볼트 중간 부분에서 나타나며 최대 응력이 상온 인장 강도보다 작아 파단은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

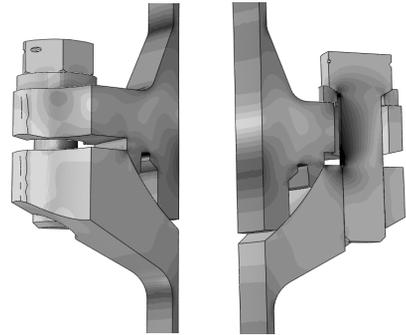


Fig. 4 Equivalent Stress at the Max Expectation Operating Pressure

### 3. 시제품 제작 및 성능시험

#### 3.1 시제품 제작

구조해석을 토대로 시제품을 제작하여 성능시험을 통해 설계를 검증하였다. 메탈 실은 SUS 316L과 SUS 321로 제작하였다.

SUS 321의 경우 규격상의 항복강도나 인장강도가 SUS 316L에 비해 다소 커 유리하나 기계적 물성은 전반적으로 유사하며 경도는 두 소재 모두 플랜지 소재인 A-286과 INCONEL 718에 비하여 작다. 메탈 실에는 구리 코팅 후 은 코팅을 하여 사용하였다. 이러한 코팅은 마찰 계수를 줄여주는 동시에 표면 거칠기에 대한 특별한 관리 없이 높은 기밀 성능을 유지할 수 있게 한다.

구형의 볼트와 와셔에는 황화몰리브덴 코팅을



Fig. 5 Prototype of the Spherical Flange

하여 마찰력 감소를 통해 체결과 분리가 용이하도록 하였다.

### 3.2 성능시험

제작된 구형 플랜지의 성능평가를 위해 상온 기밀시험, 극저온 기밀시험, 상온 내압시험(Proof Test), 상온 파괴강도시험(Burst Test)이 수행되었다. 각각의 시험조건과 사용유체를 Table 1에 정리하였다. 개발규격으로 상온 및 극저온 기밀시험에서 누설이 없어야 하며 상온 내압시험에서 플랜지 영구변형이 없어야 한다. 또한 상온 파괴강도시험에서 플랜지 파손이 없어야 한다.

플랜지는 분리 및 체결을 통한 재사용 시에도 기밀을 유지할 수 있어야 하기 때문에 1개의 플랜지를 사용하여 모든 시험을 수행하여 기밀성능 변화여부를 검증할 수 있도록 하였다.

1차 성능시험은 SUS 316L 실을 사용하여 플랜지간 중심축이 일치하게 조립하여 수행하였다.

상온 내압시험 전 후로 볼트길이를 마이크로미터로 측정하였다. 시험 전 후 볼트 길이변화가 없는 것으로 보아 볼트의 항복이 발생하지 않은 것으로 판단된다. 상온 내압시험 결과 압력이 유지되고 가압유체인 물이 외부로 새어나오지 않음을 확인하였다. 상온 기밀시험 시 압력 강하량 측정뿐 아니라 가압가스인 헬륨의 누설량을 정량적으로 계측하기 위해 Fig. 6과 같이 수중포집장치를 사용하여 시험하였다.

20분간의 상온 기밀시험 결과 압력이 유지됨을 확인할 수 있었으며 버블도 관찰되지 않아 기밀성능을 만족함을 확인 하였다. 극저온 기밀

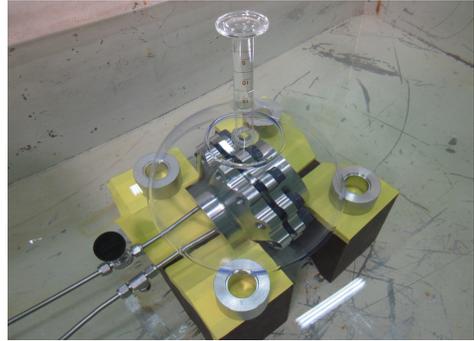


Fig. 6 Leak Test by the Underwater Gas Collection



Fig. 7 Leak Test at the Cryogenic Temperature

시험은 플랜지를 액화질소에 담근 후 플랜지 내부를 헬륨으로 가압하여 내부 압력이 안정화되면 가압을 중지하고 압력 강하량을 측정하는 방식으로 수행하였다. 내부 압력이 안정화 된 후 20분간 압력 강하량을 측정한 결과 압력이 일정히 유지되어 극저온에서도 기밀성능이 유지됨을 확인할 수 있었으며 이러한 시험방법이 유효함을 확인할 수 있었다. 상온 기밀시험과 극저온 기밀시험 후 수행된 상온 강도시험과 상온 파괴강도시험에서 모두 개발규격을 만족시켰다.

1차 시험에서 사용된 SUS 316L 실을 SUS 321로 교체하여 2차 시험을 수행하였으며 시험 결과 모두 개발규격을 만족함을 확인하였다.

제작된 구형 플랜지의 경우 일반 플랜지와 달리 대응하는 압, 수 플랜지간 체결 중심축이 설계상의 최대 체결 한계각 내에서 임의의 각도로 조립 될 수 있다. 따라서 대응하는 플랜지 간 중심축을 일치하게 하여 조립한 경우 뿐 아니라

Table 1. Test Conditions

Test Item	Working Fluid	Test Pressure
Leak Test at the Room Temp.	He	11 MPa
Leak Test at the Cryogenic Temp.	He, LN <sub>2</sub>	11 MPa
Proof Test at the Room Temp.	Water	15 MPa
Burst Test at the Room Temp.	Water	20 MPa

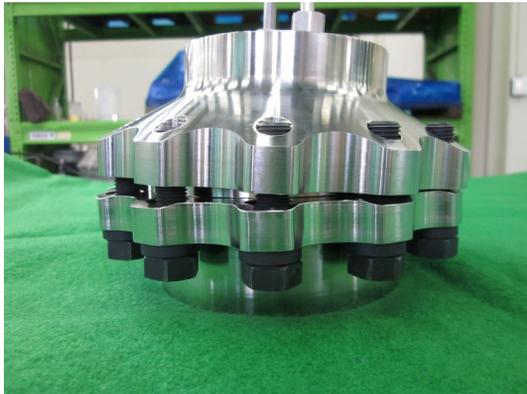


Fig. 8 The Maximum Angle Assembly of the Spherical Flange



Fig. 9 Surface of the Metal Seal and Guide Plane of the Female Flange after Tests

Table 2. Test Results of Spherical Flange

Test Item	On Axis		Off Axis (2.5°)
	SUS 316L	SUS 321	SUS 321
Leak Test at the Room Temp.	No Leakage	No Leakage	No Leakage
Leak Test at the Cryogenic Temp.	No Leakage	No Leakage	No Leakage
Proof Test at the Room Temp.	Pass	Pass	Pass
Burst Test at the Room Temp.	Pass	Pass	Pass

최대 체결 한계각으로 조립하여 기밀성능 변화 여부를 검증하여야 한다.

3차 시험은 SUS 321 실을 사용하여 Fig. 8과 같이 최대 허용 조립각으로 구형 플랜지를 조립

한 후 1, 2차 시험과 동일한 시험을 수행하였으며 모두 개발규격을 만족함을 확인할 수 있었다.

시험 종료 후 Fig. 9와 같이 구형 플랜지를 분리하여 미리 준비한 게이지 확인한 결과 브리넬 링이 발생하지 않았음을 확인할 수 있었다.

INCONEL 718, A-286의 플랜지에 SUS 316L, SUS 321은 실 소재로 적합한 것으로 판단된다.

구형 플랜지 개발을 위해 수행된 시험의 결과를 Table 2에 정리하였다.

#### 4. 결 론

액체 로켓 엔진에서 극저온 산화제 고압 배관과 개폐밸브, 터보펌프와의 연결에 사용할 목적으로 구형 플랜지를 설계, 제작하여 기밀시험과 강도시험을 통해 성능을 검증하였다. 개발된 구형 플랜지는 결합 부품 간 중심축이 최대 2.5° 불일치하더라도 플랜지 조립이 가능하며 기밀을 유지할 수 있다. 구형 플랜지는 엔진 조립 자유도를 증가시켜 엔진 제작 및 조립 시 발생하는 오차를 보상해주는 기능을 하는 호스나 벨로우즈 같은 유연배관을 대체할 수 있다. 개발된 구형 플랜지는 엔진 개발단계인 지상시험용 로켓 엔진에 유용하게 사용될 수 있다.

#### 참 고 문 헌

1. 문일윤, 유재한, 문인상, "액체로켓엔진 액체 산소 고압 배관부 기본설계," 한국추진공학회 2009년도 추계학술대회 논문집, 2009, pp.107-110
2. Huzel, DK. and Huang, DH., Modern Engineering for Design of Liquid-propellant Rocket Engines, AIAA, Vol. 147, 1992, pp.305-343
3. "Liquid Rocket Lines, Bellows, Flexible Hoses and Filters," NASA SP-8123, 1977
4. Design and Test of Marman "Conoseal" Joint, NASA REPT. 10074, 1967