

Technical Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2013.17.6.113>

## 발사체 연소기용 산화제 개폐밸브의 핵심요소 기술 개발

김도형<sup>a</sup> · 홍문근<sup>b,\*</sup> · 박재성<sup>b</sup> · 이수용<sup>b</sup>

### Study for the Development of a Main Oxidizer Shut-off Valve for Liquid Rocket Engines

Dohyung Kim<sup>a</sup> · Moongeun Hong<sup>b,\*</sup> · Jaesung Park<sup>b</sup> · Soo Yong Lee<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Part#3 Aerospace R&D Center, Aerospace Division, Hanwha TechM, Korea

<sup>b</sup>KSLV-II R&D Program Executive Office, Korea Aerospace Research Institute, Korea

\*Corresponding author. E-mail: [conquet@kari.re.kr](mailto:conquet@kari.re.kr)

#### ABSTRACT

A main oxidizer shut-off valve (MOV) controls the supply of cryogenic liquid oxygen to the combustion chamber of liquid rocket engines by on/off operations. The main subjects to be introduced are not only the valve transient response during valve on/off procedures but also the characteristics of pneumatic and seat/poppet parts as core technologies in the development of the MOV, which is expected to be adopted for the Korea Space Launch Vehicle II. It is shown that the analytical prediction of the transient valve travel is in good agreement with experimental results. Friction and elastic forces on the valve moving part are quantitatively evaluated by structural analysis.

#### 초 록

발사체 연소기용 산화제 개폐밸브는 비교적 간단한 개폐 작동을 통해, 액체산소를 연소기에 공급 또는 차단한다. 고압, 고유량, 극저온의 액체산소를 운용 유체로 사용할 뿐만 아니라, 설계유량 대비 밸브 차압 또한 낮아야 하는 상당히 까다로운 개발요구조건을 가지고 있다. 본 논문에서는 현재 개발 중인 연소기용 산화제 개폐밸브의 밸브 과도 응답과 같은 기본적인 밸브 특성과 함께, 밸브 성능을 좌우하는 핵심 부분이라고 할 수 있는 밸브 공압 구동부 및 포핏/시트부의 개발 내용을 소개하였다. 밸브의 과도 응답 특성 해석 결과가 시험 측정결과와 매우 잘 일치하는 것을 확인하였으며, 구동 공압부 및 포핏/시트부 구조해석을 통해 밸브 무빙파트의 접촉면 반발력과 마찰력을 정량적으로 평가하였다.

Key Words: Main Oxidizer Shut-off Valve(산화제 개폐밸브), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Valve Travel(밸브 행정), Seat(시트), Poppet(포핏)

Received 4 December 2012 / Revised 27 October 2013 / Accepted 3 November 2013

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers  
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548 / <http://journal.kspe.org>

[이 논문은 한국추진공학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 22-23, 여수 디오션리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

발사체 연소기용 산화제 개폐밸브는 간단한 개폐 작동을 통해, 연소기에 액체산소를 공급 및 차단하는 기능을 하며, 포핏 및 글로브 밸브, 볼 밸브, 버터플라이 밸브 등 다양한 타입의 밸브들이 발사체 연소기용 산화제 개폐밸브로 사용되고 있다. 한편 한국형 발사체에 사용될 산화제 개폐밸브 타입은 기존의 관련 기술 활용성 및 개발 효율성 등에 대한 긴밀한 검토를 통해, 헬륨의 구동압력으로 작동하되 밸브 개방 이후에는 운용 유체의 압력만으로 밸브 개폐가 가능한 자체유지타입(self-sustainable) 포핏 밸브로 최종 결정된 이후, 해당 밸브 개발을 지속적으로 진행해 오고 있다.

발사체에 적용되는 연소기용 산화제 개폐밸브의 개발요구조건은 일반 산업용 극저온용 개폐밸브에 비해 상대적으로 매우 까다롭다. 산화제 개폐밸브는 고압, 고유량의 극저온 액체산소가 운용 유체이기 때문에, 상온뿐만 아니라 기본적으로 고압의 극저온 환경에서도 매우 적은 누설 기준을 만족해야 하는 등 상당한 수준의 성능을 충실히 구현하여야 하며, 밸브 자체에 의한 수력학적 손실을 최소화하여야 할 뿐만 아니라, 동시에 매우 작은 밸브 크기와 적은 밸브 무게를 요구한다[1-4].

따라서 이와 같은 까다로운 개발요구조건을 만족시키기 위해서, 다양한 공학적 측면에서 연구 개발이 진행되어야만 한다. 우선, 극저온 취성이 우수하면서, 열팽창률은 상대적으로 작고, 연성 및 강도가 동시에 우수한 재질 선정이 필수적이다. 또한 엔진 점화 시나리오의 유연성을 확보하기 위해, 매우 넓은 운용 범위에서도 밸브가 정상 작동할 수 있도록 설계되어야 하는데, 이는 밸브 무빙파트(moving part, 운동부)에 작용하는 다양한 힘들에 대한 기본적인 분석이 필요한 부분이다. 밸브 특성에 대한 보다 치밀하고 면밀한 이해를 위해서는 밸브의 과도 응답에 대한 충분한 이해가 필요한데, 이러한 이해는 밸브의 다양한 주요 부품 즉 콜러, 피스톤, 시트, 포핏에 대한 형태적이고 구조적인 분석이 선행되어야 가능하다. 무빙파트는 작동성과 함께 필연적으로 기밀이라는 특성을 가지고 있기 때문에,

힘이나 형태에 관련된 구조적인 해석 이전에 해당 부품의 기밀성능을 우선 만족시킬 수 있는 설계 기술을 기본적인 토대로 뒷받침해주어야 한다.

유량계수, 밸브 전체의 구조적 안정성 등 다양한 다른 개발요구조건들이 있지만, 연소기용 산화제 개폐밸브 개발 내용을 소개하는 본 논문에서는 두 가지 부분에 대한 내용만을 우선 다루기로 한다. 이 두 가지는 현재까지의 개발 경험을 통해 연구 개발 난이도가 상대적으로 높다고 판단되는 부분으로써, 밸브의 과도 특성과 구동 공압부 및 포핏/시트부 등 작동 기밀부의 구조해석이다. Fig. 1에서 현재 개발 중인 연소기용 산화제 개폐밸브의 특성을 보여주는 개략도를 확인할 수 있는데, 검은색으로 표시된 부분이 밸브의 개폐에 관여되는 무빙파트를, 원으로 표기된 부분이 구동 공압부와 포핏/시트부를 나타낸다. 2절에서 밸브 과도 응답에 대한 내용을 간단히 다루고, 3절에서 구동공압부 및 포핏/시트부 연구개발 내용을 정리하도록 한다.

## 2. 밸브 과도 응답

로켓 엔진의 시동 및 종료 특성은 산화제 개폐밸브의 작동 동안에 연소기 안으로 유입되는 산화제 유량 특성과 밀접하게 연관되어 있기 때문에, 밸브 개폐 시의 밸브 무빙파트의 과도 응

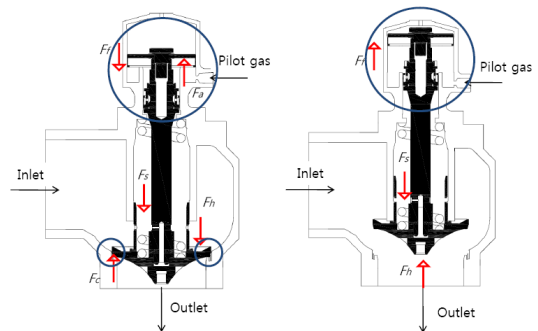


Fig. 1 Schematic of a main oxidizer shut-off valve (arrows: action forces on the moving part).

답 즉 밸브 행정(valve travel) 해석은 엔진 시동 및 연소 종료 특성 해석에 필수적인 부분이라고 볼 수 있다. 밸브 무빙파트의 운동방정식의 해를 구함으로써 간단히 밸브 행정을 해석할 수 있다. 밸브 무빙파트에 작용하는 힘들은 Fig. 1에서 확인할 수 있는데,  $F_a$ 는 공압에 의한 힘을 나타내며,  $F_f$ 와  $F_s$ 는 각각 공압부 마찰력과 스프링력을 의미한다.  $F_h$ 는 운용유체의 압력 분포에 의해 밸브 무빙파트에 가해지는 힘을 나타낸다. 밸브 개폐 시의 보다 자세한 힘에 대한 설명 및 해석은 참고문헌 [5]에서 찾아볼 수 있다.

한 예로 밸브 개방 시 밸브 무빙파트의 운동방정식은 Eq. 1과 같이 세 개의 미분방정식으로 나타낼 수 있으며,  $x(t)$ 와  $m(t)$ 은 각각 밸브 행정과 공압부에 채워지는 구동가스의 무게를 의미한다.

$$X = [x(t) \quad \dot{x}(t) \quad m(t)]^T \quad (1)$$

$$X' = \begin{cases} \begin{cases} 0 & \text{for stop condition} \\ \dot{x}(t) & \text{for moving condition} \end{cases} \\ \frac{1}{M}(F_a - F_f - F_s + F_h) \\ \begin{cases} \frac{A_c P}{\sqrt{RT/\gamma}} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} & \text{for } \frac{P_a}{P} < \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \frac{A_c P/R}{\sqrt{T/2c_p}} \left(\frac{P_a}{P}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_a}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} & \text{for } \frac{P_a}{P} \geq \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases} \end{cases}$$

$$X(0) = \left[ 0 \quad 0 \quad \frac{0.1 V_0}{RT} \right]^T, \text{ initial conditions}$$

Eq. 1의 두 번째 미분방정식은 밸브 무빙파트의 운동방정식이므로써,  $M$ 은 무빙파트의 무게를 의미한다. 한편 Eq. 1의 세 번째 미분방정식은 공압부에 채워지는 구동가스의 질량을 계산하기 위한 것으로써,  $\gamma$ ,  $c_p$ ,  $R$ ,  $T$ 는 각각 구동가스의 비열비, 비열상수, 기체상수와 온도를 나타낸다.  $A_c$ 는 구동가스 공급라인의 오리피스 면적을 의미하며,  $P$ 와  $P_a$ 는 각각 구동가스 공급압력과 공압부 내부압력을 나타낸다. 따라서  $P$ 와  $P_a$ 의 압력비 조건에 따라 구동가스의 질유량을 계산하였다.

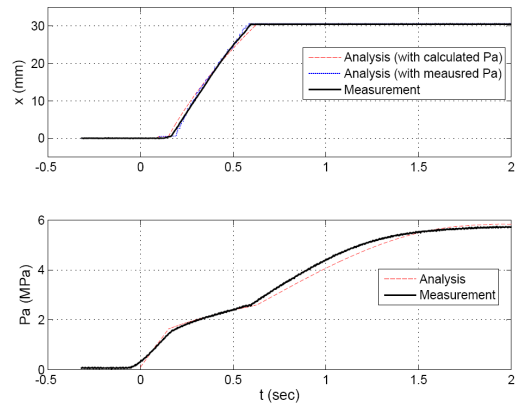


Fig. 2 Evolution of valve travel and pneumatic pressure during the valve opening.

Eq. 1을 Runge-Kutta 4차 방정식으로 구한 미분방정식의 해와 실제 시험을 통해 측정된 공압 및 밸브 행정과의 비교는 Fig. 2에 나타내었다. 공압부 구동가스로는 질소를 사용하였으며, 공압부 압력과 밸브 행정은 각각 Sensys사 압력센서와 RDP Electronics사의 변위측정기(ACT2000A 모델)로 측정하였다. 한편, 시험의 편의성을 고려하여 운용유체가 없는 상황( $F_h=0$ )에서 시험을 수행하였으며, 밸브 행정을 계산하기 위해 공압부 압력은 Eq. 1을 직접 이용하여 계산한 값과 시험을 통해 측정된 압력값을 각각 사용하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 밸브 행정 및 공압부 압력에 대한 계산값이 측정된 시험 결과와 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 한편, 보다 정확한 밸브 행정 예측을 위해서는 밸브 행정 위치별 운용 유체에 의한 힘의 변화, 공압 및 코팅 조건에 따른 공압부 마찰력 해석, 그리고 시트와 포켓의 형태와 재질에 시트의 반발력 등 밸브 무빙파트에 작용하는 힘에 대한 보다 자세한 해석과 측정이 필요하다.

### 3. 작동 기밀부 개발

밸브 무빙파트의 작동 기밀부는 로드의 양쪽 끝부분으로 이해할 수 있는데, 한 쪽 끝부분은 공압에 의해 작동하는 공압부로서 콜러와 피스

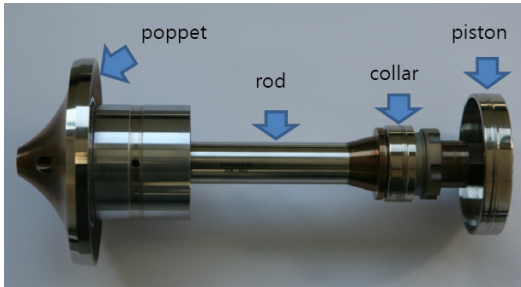


Fig. 3 Valve moving part and principal leakage parts.

톤이 밸브 몸체와 강제 끼워 맞춤에 의해 금속대 금속 접촉을 하며, 다른 한 쪽 끝부분은 시트와 접촉하면서 밸브의 실제적인 개폐를 결정짓는 포핏이다. 해당 부분들은 Fig. 3에서 확인할 수 있다.

### 3.1 공압부 개발

밸브의 공압부는 밸브 몸체와 금속대 금속면으로 접촉하고 있는 콜러와 피스톤이라는 부품으로 구성되어 있다. 접촉면에서 기본적으로 기밀을 유지하여야 하며, 동시에 적절한 수준의 마찰력이 발생하여야 한다. 밸브 내벽 몸체에는 고강도 코팅을 적용하고, 콜러 및 피스톤 접촉면에는 기밀 및 윤활 성능이 우수한 금속을 코팅하는데, 일반적으로 적용되는 금, 아연, 니켈-보론의 세 가지 코팅 방법을 적용하여 기밀 및 작동 성능을 확인하였다. 러시아 우주발사체용 액체로켓 엔진용 극저온 밸브의 몸체 소재로 널리 사용되고 있는 3X12HTMTPY와 유사한 기계적 특성을 가지면서, 국내에 수급 가능한 대표적인 소재로는 15-5PH (H1150-M)와 A-286 (AMS 5737) 등이 있다. 15-5PH는 극저온 취성이 높으나, 열팽창율이 작은 장점이 있는 반면 A-286은 반대로 열팽창율이 높으나, 극저온에서 취성이 낮은 장점을 지니고 있다. 세 가지 소재에 대해 피스톤 및 콜러 변형에 따른 반발력 해석을 수행하였으며, 금, 아연, 니켈-보론 코팅을 적용하여 기밀 및 작동 성능을 확인하기 위한 시험에서는 A-286를 피스톤과 콜러의 소재로 사용하였다.

우선 콜러 및 피스톤 접촉에 의해 발생하는 마찰력 수준을 예측하기 위해 구조해석을 수행

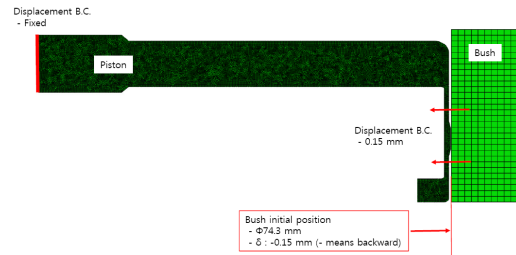


Fig. 4 Structural analysis conditions for the prediction of reaction force on the piston.

하였는데, 구조해석 모델은 Fig. 4와 같다. 축대칭 요소를 사용하였으며 부쉬와 피스톤 간에는 hard contact 조건을 부가하였고, 소성거동에 따른 재료 비선형성을 고려하였다. 피스톤 및 콜러를 고정하고 밸브 몸체인 부쉬를 강제 끼워 맞춤 수준까지 이동시키면서 콜러 및 피스톤 접촉에 의한 반발력 변화를 계산하였다.

피스톤과 콜러의 접촉면을 통해 작용하는 반발력은 03X12HTMTPY 재질의 경우, 각각 대략 4250 N과 3400 N으로 계산되었는데, 경험을 통해 짐작되는 마찰력 수준(~1650 N)을 고려할 경우, 피스톤 및 콜러의 마찰계수는 대략 0.2 수준으로 예측된다. 한편, 피스톤 및 콜러의 접촉하는 부분에서의 두께 변화를 통해 마찰력 조절이 가능하지만, 기밀 성능 확보를 위해서는 반드시 충분한 반발력을 지녀야 한다. 해석 과정을 통해, 피스톤 및 콜러의 단위 길이당 반발력은 각각 14.2~18.3 N/mm, 17.5~26.3 N/mm인 것으로 예상된다. 따라서 기밀 성능 확보를 위해 대략 15~20 N/mm 수준의 반발력이 필요할 것으로 짐작된다.

Fig. 5는 세 가지 재질에 대해 억지 끼워맞춤 정도에 따른 피스톤의 반발력 변화를 예측한 것이다. 초기 유한요소 모델상의 0.05 mm 간격을 부쉬가 이동한 후 피스톤과 접촉이 발생하면 그에 따라 반경방향 반발력이 증가한다. 접촉되는 변위량과 반력은 선형적으로 증가하며 과도한 변형에 따른 비선형 거동 이후에 피스톤의 아래 부분이 부쉬와 접촉하며 반발력이 크게 증가하는 거동을 보인다. 설계에 의해 의도된 간섭량은 0.1 mm이고 그 구간에서 피스톤은 탄성 변형을

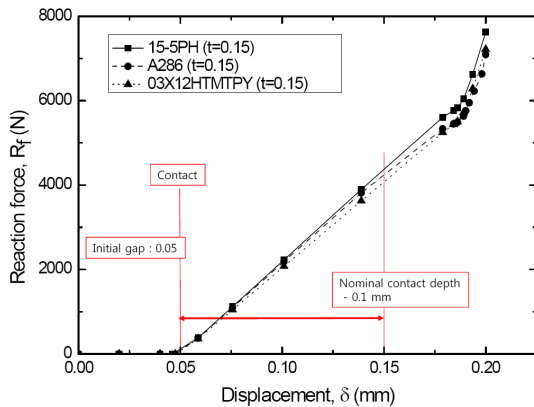


Fig. 5 Evolution of reaction force according to the displacement of the bush.

한다. 제작 공차에 따라 실제 간섭량을 예측할 수 있고 그에 따른 반발력이 기밀 성능에 충분한지 확인할 수 있다.

한편, 공압부는 기밀 성능뿐만 아니라 밸브 행정의 원활한 작동성을 보장하여야 한다. 마찰력에 의해 발생하는 열과 구동가스의 공압으로 인해 마찰력의 변화가 발생하게 되며, 급기야는 정지마찰계수가 운동마찰계수에 비해 과도하게 증가하면서 밸브 행정의 끼임현상(jamming)이 발생하게 된다. 운동마찰계수에 비해 매우 높은 정지마찰계수에 의해 높은 공압 상태에서 정지되어 있던 공압부가 움직이기 시작하면 공압부 부피가 급격히 증가하게 되어 공압이 순간적으로 떨어지고 결국 공압부 움직임이 멈추게 된다. 아연 도금의 경우는 밸브의 작동 횟수가 증가하면서, 그리고 니켈-보론 도금은 밸브 초기 작동 구간에서 이러한 밸브 행정의 끼임 현상이 나타났다. 이와는 대조적으로 금도금을 적용한 공압부의 경우, 밸브 작동 횟수에 상관없이 다른 도금에 비해 상대적으로 매우 부드러운 밸브 행정을 보임으로써, 금속대 금속면에서의 기밀 및 윤활 특성이 매우 우수하다는 것을 확인하였다.

### 3.2 시트부 개발

시트부는 포핏과 시트가 접촉하여 밸브가 닫혀있는 동안에는 운용 유체가 누설되지 않도록 해야 하는 기밀 성능과 함께, 밸브가 개방되었다

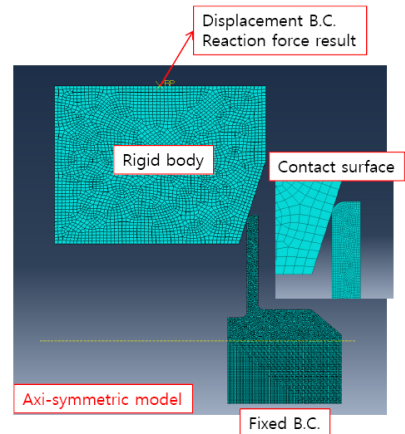


Fig. 6 Structural analysis conditions for the prediction of reaction force on the poppet.

가 닫힐 때에는 포핏이 매우 강하게 시트에 충격을 주면서 안착되기 때문에 구조적 안정성이 동시에 보장되어야 한다. 또한 포핏과 접촉하는 동안에는 변형된 시트 형태에 지속적으로 포핏으로 반발력이 전달되는데, 이 반발력은 밸브의 개방 특성에 영향을 미칠 수밖에 없다. 따라서 시트의 구조적 변형 특성 및 반발력 해석은 시트부 개발에 필수적인 부분이라고 할 수 있다. 러시아 로켓 엔진용 극저온 산화제 개폐밸브 시트 소재로는 07X21Г7AH5가 널리 사용되고 있으며, 국내에 수급 가능한 유사 소재로는 XM-11, XM-17, XM-18, XM-19 등이 있다. 07X21Г7AH5 오스테나이트 계열의 스테인리스 스틸로써 보통의 오스테나이트 스테인리스 스틸(STS 316 등)에 비해 강도가 2배가량 높으면서도 연성 또한 우수한 특성을 지니고 있다.

Fig. 6에서 시트부 해석에 사용된 구조해석 모델을 확인할 수 있으며, 고려된 시트의 재질은 07X21Г7AH5와 XM-19이다. 축대칭 요소를 사용하여 시트와 포핏 간에는 hard contact, frictionless 접촉 조건을 부가하였다. 포핏은 강체요소로 가정하며 시트 소재의 소성변형에 따른 재료 비선형성을 고려하였다. 포핏을 해석 초기에 시트와 접촉시키고 아래 방향으로 설계된 0.6 mm 변위 경계조건을 부가하여 반발력을 계산하였다. 시트의 소성 잔류 변형에 따라 초기

접촉하였던 포핏과 시트는 1회 해석 이후에 간격이 발생한다. 반복 작동에 따른 간격과 반발력 변화를 확인하기 위하여 해석 종료 시점의 변형 형상을 기준으로 반복 해석을 수행하였다. 2번째 해석 시 시트 내부의 잔류 응력을 제거하지 않으면 반복에 따른 추가 소성 변형과 반발력 변화가 발생하지 않으므로 2번째 해석 초기에 잔류 응력을 제거하였다. 5회 반복 해석을 수행하여 포핏과 시트간의 간격과 반발력 변화를 계산하였다. 시트 두께 0.6 mm인 07X21Γ7AH5 재질의 경우, 초기 변형 및 5회 작동 후, 수직방향 반발력이 1237 N으로써, 포핏에 작용하는 반발력은 대략 1284 N이며, 따라서 단위 길이당 반발력은 3.8 N/mm이다. 만약 시트 재질을 XM-19로 변경할 경우, 시트 두께를 0.5 mm로 수정함으로써 비슷한 수준의 반발력, 즉 5회 작동 후 반발력 1286 N을 얻을 수 있는 것으로 확인되었다.

시트 소성 변형을 위해서는 링과 포핏 간의 초기 간격, 즉 소성 변형을 위한 초기 변위가 결정되어야 하는데, 소성 변형을 위한 변위 해석 결과, XM-19 재질의 경우, 초기 변위가 최대 0.7 mm를 넘지 말아야 하는 것으로 해석되었다. 만일 초기 간격이 커지는 경우, 시트의 과도한 변형과 시트 끝단의 라운드 형태적 특성에 의해 시트의 반발력이 급격히 감소하게 되어 결과적으로 기밀 성능이 현저하게 떨어지게 된다. 초기 간격 변화에 따른 시트의 반발력 변화는 Fig. 7에서 확인할 수 있다. 시트와 포핏의 간섭량이 증가할수록 선형적으로 축방향 반발력이 증가한다. 설계에 의해 의도된 0.6 mm 간섭량에서는 선형적인 관계를 보이지만, 간섭이 더욱 증가하게 되면 시트 아래 부분에 과도한 변형이 발생하여 비선형적인 거동을 보인다. 시트의 형상이 과도한 변형에 따라 포핏의 경사면과 비슷한 각도로 평행해지면 더 이상 축방향으로 반력을 발생시키지 못하는 상태가 발생하고 반발력이 급격히 저하된다. 따라서 설계 및 제작공차를 통해 포핏의 축방향 변위를 제한하여 기밀 유지에 필요한 수준으로 반발력이 유지되도록 해야 한다.

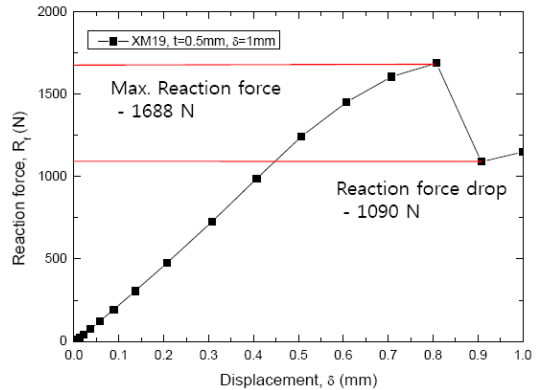


Fig. 7 Evolution of reaction force of the seat according to the poppet displacement.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 발사체 연소기용 산화제 개폐 밸브의 개발과 관련하여 주요핵심기술이라고 판단되는, 밸브 행정과 연관된 밸브 과도 특성과 함께 공압부 및 시트부로 대표되는 구동 기밀부에 대한 개발 내용을 소개하고자 하였다. 밸브의 과도 특성 해석 결과가 시험 측정결과와 매우 잘 일치하는 것을 확인하였으며, 구동 공압부 및 포핏/시트부 구조해석을 통해 접촉면 반발력 등 밸브 설계에 필요한 자료를 정량적으로 획득하였다. 또한 공압부 도금 재질별 특성과 시트 재질 강도 변화에 설계 내용을 간단히 소개하였다.

산업용 극저온 개폐밸브와는 달리, 매우 높은 수준의 개발요구조건이 요구되는 발사체용 산화제 개폐밸브를 개발하기 위해서는 각종 재질, 구조, 수리학 등 다양한 공학적 측면에서의 치밀한 접근이 필수적인 부분이라 할 수 있다. 지금까지 개발 내용을 견고한 토대로 하여, 아직 부족한 부분들에 대한 보다 면밀한 공학적 접근과 해석, 그리고 시험 검증을 통해 연소기용 산화제 개폐 밸브의 성공적인 개발을 기대한다.

#### References

1. Park, H., Bae, Y., Jang, K., Lee, S., Hong, M. and Lee, S.Y., "Development of a Main Oxidizer Shut-off Valve for Liquid Rocket Engine," *60th International Astronautical Congress*, Daejeon, Korea, Oct. 2-9, 2009.
2. Jeon, J., Hong, M., Kim, H. and Lee, S.Y., "A Study on the Force Balance of a Main Oxidizer shutoff Valve," *Journal of the Korean Society of Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 37, No. 8, pp. 812-818, 2009.
3. Hong, M., "Study on the Improvement in  $C_v$  of a Main Oxidizer shut-off Valve," *Aerospace Engineering and Technology*, Vol. 8, No. 2, pp. 140-148, 2009.
4. Bae, Y., Kim, D., Hong, M., Lee, S.Y. and Jang, K., "Study on the Performance Improvement of a Main Oxidizer shut-off Valve," *Aerospace Engineering and Technology*, Vol. 9, No. 2, pp. 63-72, 2010.
5. Lee, H. and Hong, M., "On the Valve Travel of a Main Oxidizer Shut-off Valve," *5th International Symposium on Fluid Machinery and Fluids Engineering*, Jeju, Korea, Oct. 24-27, 2012.