

# 인공위성 자세제어를 위한 Direct Acting 정밀 유량 제어 밸브내의 유동해석

배영우\* · 오주영 · 이재우(건국대학교) · 이성택(한화)\*\* 변영환\*\*\*(건국대학교)

## Flow Analysis in Precision Control Valve for Satellite Attitude Control

Young-Woo Bae\* · Ju-Young Oh · Jae-Woo Lee · Sung-Taek Lee\*\* Yung-Hwan Byun\*\*\*

### ABSTRACT

The precision control valve flow of satellite attitude control device was analyzed in this paper. Then, force of flow in valve was calculated for plunger surface. We made an offer about basic data for optimal plunger design.

### 초 록

본 논문에서는 인공위성 소형추력기의 핵심 부품인 유량제어용 밸브내의 유동현상을 해석하였다. 이를 바탕으로 밸브 내에서 직접적인 유량 제어를 담당하는 Plunger에 작용하는 힘을 계산하였고, Plunger의 개폐에 소요되는 힘을 최소화 시키는 밸브의 설계시에 필요한 기초 자료를 제공하였다.

Key Words: Satellite(인공위성), Valve(밸브), Thruster(추력기), Computational Fluid Dynamics(전산유체해석), Pulse(맥동)

### 1. 서 론

우주 추진 시스템(Space Propulsion System)중 궤도진입·궤도 조정·자세제어를 위한 추진력을 제공하는 위성체 추진이 있다. 이 중 인공위성에 쓰이는 소형 추력기는 일반적으로 직선운동을 하기위해 단일 추력기를 사용하지만 특별한 목적이나 자세제어를 위해서는 두 개로 이루어진 추력기 짝을 이용하여 반복적인 Pulse 추력을 발생하여 제어를 한다. 그러나 Pulse의 간격을 줄이면 미세한 각도 또는 거리의 제어는 가능하나 원하는 설계추력이 발생하기까지 일정한 시간이 걸리기 때문에 전체적인 추력기의 성능은 악화되는 특징이 나타나게 된다. 따라서 추력실의 압력, 연소온도, 노즐을 통한 팽창 등의 과정이 설계한대로 최적 조건에서 작동되지 못하게 된다. 추력기가 정상상태에서 작동되면 이론값의 92%정도의 Specific Impulse를 나타내며 0.1초의 간격을 갖는 Pulse 추력의 경우 75~88%

\* 건국대학교 항공우주공학과

\*\* 주식회사 한화

\*\*\* 건국대학교 항공우주공학과

연락처, E-mail: yhbyun@konkuk.ac.kr

정도이나, 간격이 0.01초인 Pulse 추력은 이론값의 50%이하로 추력 성능이 악화된다고 알려져 있다. 밸브 내에서 유량 제어의 핵심 역할을 하는 Plunger의 형상은 밸브의 성능과 직접적인 연관을 갖는다. 이러한 Plunger의 형상 변화에 따른 밸브내의 유동은 매우 복잡한 현상을 보이며, 유동의 복잡한 현상은 Plunger의 계폐에 필요한 힘을 결정하게 된다. Plunger의 계폐에 소요되는 힘을 최소화 하는 것은 인공위성과 같은 우주선의 수명과 직접적인 연관을 가지게 되므로, 본 연구에서는 Plunger 기본형상에 대해 Unsteady Motion으로 움직이는 밸브내에서 Plunger에 작용하는 힘을 계산하였고, 기본형상에 대한 해석 수행 후 Plunger형상 변화에 따른 유동 변화를 계산하여 Plunger를 설계하는데 있어서 기초적인 자료를 제공하고자 하였다.

## 2. 본 문

### 2.1 지배 방정식 및 수치해석 방법

본 해석에서는 CFDRC사의 상용프로그램인 CFD-ACE를 사용하였다. 밸브내의 유동을 해석하기 위하여 다음과 같은 3차원 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{E}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial y} + \frac{\partial \vec{G}}{\partial z} = \frac{\partial \vec{E}_v}{\partial x} + \frac{\partial \vec{F}_v}{\partial y} + \frac{\partial \vec{G}_v}{\partial z}$$

위의 식에서 보존변수  $\vec{Q}$  및 각 플럭스 벡터들은 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{Q} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \end{bmatrix}, \vec{E} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \end{bmatrix},$$

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \end{bmatrix}, \vec{G} = \begin{bmatrix} \rho w \\ \rho uw \\ \rho vw \\ \rho w^2 + p \end{bmatrix}$$

$$\vec{E}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix}, \vec{F}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{yx} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix}, \vec{G}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{zx} \\ \tau_{zy} \\ \tau_{zz} \end{bmatrix}$$

$$\tau_{ij} = \tau_{ji} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \tau_{ii} = \lambda (\nabla \cdot u) + 2\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$$

이 식에서  $\rho$ 는 밀도를,  $u, v, w$ 는 속도성분을,  $p$ 는 압력을,  $e_i$ 는 단위 질량당 에너지를 나타내며, Calorically Perfect Gas 가정을 이용하였다.

또한 이차 점성계수  $\lambda$ 는 동 점성계수  $\mu$ 와 Bulk Viscosity  $\mu'$ 으로부터  $\lambda = \mu' - \frac{2}{3}\mu$ 로 계산되는데 Stokes의 가정에 따라  $\mu' = 0$ 으로 놓으면 이차 점성계수는  $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$ 로 구해진다.

본 연구에 사용된 Solver는 Conjugate Gradient Squared(CGS) + Preconditioning 이며, 삼차원 공간에서 1차 정확도를 가지는 가장 안정적인 First-Order Upwind Scheme을 사용하였다.

### 2.2 Grid Deformation 모듈

Unsteady Motion의 해석을 위해 Grid Deformation 모듈을 사용하였는데 Flow와 Stress Module이 커플링되어 있는 경우, Stress Module은 고체영역의 Grid Deformation을 Grid Deformation Module은 유체영역의 Grid Deformation을 지배하는 특징이 있다. 본 계산에서는 Plunger에 걸리는 Force를 구하기 위하여 Plunger는 Rigid Body로 가정하였고, 따라서 Solid영역에는 Mesh를 생성하지 않았다.

### 2.3 Momentum Resistance Model

유량 제어 밸브의 기본 형상에 포함되어 있는 Screen에 의한 효과를 반영하기 위하여 MRM (Momentum Resistance Model)을 사용한다. MRM은 계산 영역이 Grid Resolution보다 적을 경우 효과적으로 적용될 수 있으며, Porous Media, Perforated Plates, Screen같은 모델을 모사할 때 유용하게 쓰인다. CFD-ACE에 포함되어 있는 모델의 기능으로는 다른 Resistance Coefficient를 각각의 방향으로 효과를 줄 수 있으며 Anisotropic효과 또한 줄 수 있다. 2차원, 3차원 각각에 모두 적용할 수 있다.

$$\nabla P = \rho \left( \frac{[K_l]}{2\beta} \right) \cdot \vec{V}$$

여기서,  $[K_l]$ 은 MRM의 선형 Coefficient Matrix를 나타내며,  $\beta$ 는 Porosity Factor를 나타낸다.

#### 2.4 해석 결과

계산 조건은 다음과 같다.

- dimension: X(m)0~0.06279 Y(m)0~0.00624  
Z(m)-0.00625 ~ 0.00625
- operation fluid : water
- outlet fixed pressure : 394.9psi
- temperature : 300K
- total No. of cell : 271865
- screen : 20% open area, 500mesh
- Navier-stokes , turbulent model (k-e)

결과 Pressure Drop 은 2.887psi 이다.

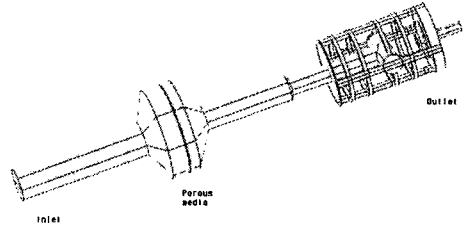


Fig 2 Model

#### 2.5 Transient 해석 결과

Transient 해석에 사용된 Grid Deformation 기능은 Boundary가 움직임에 따라 기존에 형성되어 있는 격자계가 변형을 하여 움직임을 구현해 내는 방식이므로 이미 격자계가 구성된 공간

상에서만 형상을 움직여 해석한다. 또한 Plunger

Table 1 Force for Plunger

	Pressure force (N)			Shear force (N)		
	X-direction	Y-direction	Z-direction	X-direction	Y-direction	Z-direction
①	-4.38E+01	N.A	N.A	3.61E-06	-7.79E-05	-1.87E-06
②	-2.17E+01	N.A	N.A	-2.99E-06	-6.66E-05	4.36E-08
③	-2.32E+00	N.A	N.A	2.57E-06	-2.03E-05	9.31E-09
④	N.A	-4.96E+00	-5.03E+00	1.46E-05	-2.31E-07	7.86E-07
⑤	-8.36E-08	-4.69E+00	-3.77E+00	2.15E-07	2.12E-05	3.02E-05
⑥	N.A	5.69E+00	5.69E+00	-9.85E-07	9.48E-07	1.76E-08

Total force act on plunger	Pressure force (N)			Shear force (N)		
	X-direction	Y-direction	Z-direction	X-direction	Y-direction	Z-direction
	-8.40E+01	1.99E+01	-3.07E-04	5.16E-04	1.43E-04	1.47E-06

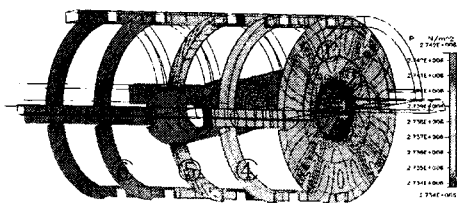


Fig 1 Pressure Distribution

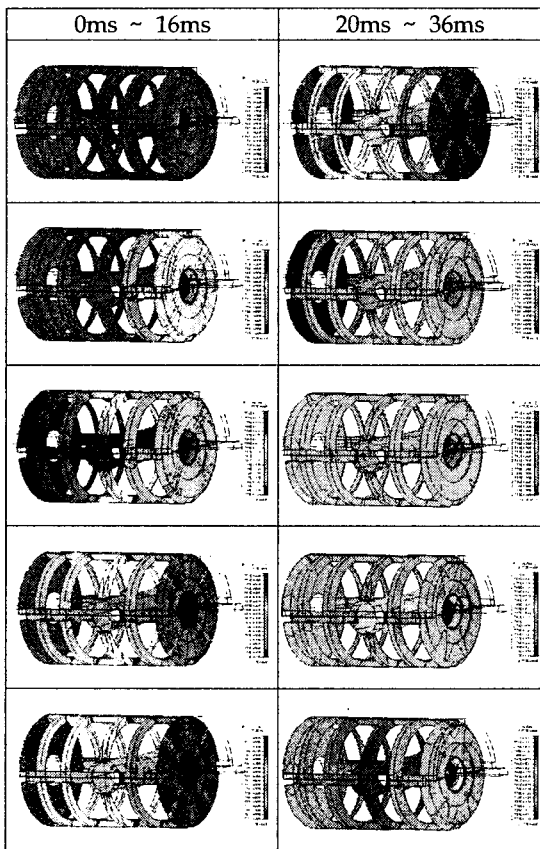
Mass Flow를 0.002268kg/s 로 고정하였으며, 그

의 움직임에 따라 뒷부분 공간과 앞부분 공간을 완전히 열린 상태와 완전히 닫힌 상태로 구현하는 것은 형성된 격자계의 Boundary 움직임을 통하여 완전히 소멸 시킬 수 없기 때문에 Transient 연산에 포함시킬 수 없었다. 결과적으로 본 형상과 같은 Valve의 개폐 현상을 100% 구현하지 못하는 문제에 따라 Negative Volume 이 발생하지 않는 한도에서 Moving 영역을 결정 하였고, 그 영역은 Plunger의 전체 이

동 거리의 90%로 산정 하였다. 즉 Transient 연산은 Valve가 10% 열린 상태부터, 90% 열린 상태까지의 범위에 대하여 수행 되었다.

Plunger의 Response Time은 20ms로 설정 하였고, Valve가 Closed 되었을 때를 시작점으로 하여, Open 되었다가 다시 Closed될 때 까지를 1 Cycle로 하여 연산을 수행하였다. 계산 결과는 총 시간(40ms)을 10등분 한 간격마다 한번씩 작성되었다.

Table 2 The change of the force according to the time



### 3. 결 론

본 논문에서는 인공위성의 자세제어를 위한 소형추력기의 핵심 부품인 유량제어용 밸브내의 유동현상을 수치적으로 해석하였다. 인공위성의

수명과도 깊은 관련이 있는 자세제어 밸브의 수명은 밸브 내에서 직접적인 유량 제어를 담당하는 Plunger에 걸리는 힘의 집중에 따라 틀려질 수 있다. 또한 최소한의 힘으로 작동시킬수 있도록 Plunger의 각 부분에 작용하는 힘을 계산하였으며, Plunger의 개폐에 소요되는 힘을 최소화 시키는 밸브의 설계시에 필요한 기초 자료를 제공하였다.

### 4. 향후 계획.

Full baseline model에 대한 연산 및 force 산출 하여 전체적인 계산을 거쳐 보다 정확한 수치해석 결과를 도출하고, 또한 Plunger의 형상에 따른 유동저항(Force) 특성을 파악하여 Plunger 형상 최적화에 대한 기초 수치해석을 실시하는 것을 향후 계획으로 한다.

### 참 고 문 헌

1. Stone, William C. "Fast variable-amplitude cold gas thruster," Journal of Spacecraft and Rockets. Vol. 32, No. 2, 1995.
2. 최진철, 윤효철, 강신재, "인공위성에 사용되는 추진연료의 비정상 유동특성에 관한 실험적 연구," 한국추진공학회지 제4권, 제2호, 2000.
3. 강신재, 노병준, 이지근, "축대칭 2차원 모델 흡기밸브의 정상 흡입유동 특성에 관한 실험적 연구," 한국항공우학회지 제23권, 제4호, 1995.
4. 노병준, 윤석주, 강신재, 구점섭, "밸브분상의 난류충돌 혼합유동 연구," 한국항공우학회지 제17권, 제2호, 1989.
5. Eugene J. Manganiello, Michael F. Valerino and Robert H. Essig, "SEA-Level Performance tests of a 22-inch Diameter Pulse-Jet Engine at Various Simulated Ram Pressures," Naca Memorandum Wartime Report, 1945.