

## 인공위성 추력기 작동에 따른 배관 내 유동해석

유명종\* · 김수겸\*\* · 이균호\*\*\* · 최준민\*\*\*\*

### A Fluid Analysis for Propellant Feed System as Thruster Valve Operation

Myoung-Jong Yu\*, Su-Kyum Kim\*\*, Kyun-Ho Lee\*\*\* and Joon-Min Choi\*\*\*\*

**Keywords :** Fluid Analysis(유동해석), Method of Characteristics(특성곡선기법), Propulsion System(추진시스템)

#### Abstract

Usual LEO satellite for earth observation use a blowdown hydrazine monopropellant propulsion system for attitude hold and orbit maintenance. For precision control, thruster valve has very short closing time, but this can cause water hammering and pressure surge. Since water hammering and pressure surge can cause damage of propulsion system and ununiform thrust, Thruster valve closing is one of the special concern during satellite propulsion system design. In this paper, an analysis for propellant feed system is conducted using the method of characteristics. The results represent water hammer effect is negligible even at the worst case and pressure surge can be decreased effectively with a trim orifice.

#### 1. 서론

위성에 자세제어용으로 사용되는 추력기에는 단일추진제 추력기, 이원추진제 추력기, 전기 추력기 등이 있고 이 중에서도 단일추진제 추력기는 저궤도 위성의 자세제어 및 궤도 조정용으로 널리 사용되고 있다. 위성용 추력기는 미세한 자세제어를 수행하기 위해 빠른 밸브 개폐속도를 가지고 있으므로 밸브 개폐를 통해 추진제 배관 내부에 압력진동이 발생할 가능성이 크다. 이러한 추진제의 압력진동은 추진시스템에 사용되는 정밀 부품에 충격을 가해 부품 손상을 일으킬 수 있고 진동하는 압력에 의해 불균일한 추력을 발생시켜 위성 제어의 정확도를 떨어뜨릴 수 있으므로 위성 설계시 반드시 고려해야하는 중요한 부분 중의 하나이다.[1-2]

본 논문에서는 특성방정식법을 이용하여 밸브 개폐에 의한 압력상승을 예측하고 위성 운용시 발생할 수 있는 다양한 조건에서의 해석을 수행하고 결과의 분석을 통해 추진제 배관 설계를 검증하였다.

#### 2. 해석 기법

1차원 비정상 유동에 대한 지배방정식인 연속방정식과 운동량방정식을 속도  $V$ 와 유압고도  $H$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$H_t + \frac{a^2 V_x}{g} = 0 \quad (1)$$

$$gH_x + V_t + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (2)$$

비정상 유동의 해석은 특성곡선기법을 이용하였고 (1)식과 (2)식을 특성곡선기법에 적합한 형태로 변환하면 식 (3)과 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$L_1 = H_t + \frac{a^2 V_x}{g} \quad (3)$$

$$L_2 = gH_x + V_t + \frac{fV|V|}{2D} \quad (4)$$

이들 방정식을 임의의 multiplier  $\lambda$ 를 사용하여 선형조합 후 정리하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$L = L_1 + \lambda L_2 \quad (5)$$

$$= \lambda \left[ H_x \frac{g}{\lambda} + H_t \right] + \left[ V_x \lambda \frac{a^2}{g} + V_t \right] + \frac{fV|V|}{2D} = 0$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{g}{\lambda} = \frac{\lambda a^2}{g} \Rightarrow \lambda = \pm \frac{g}{a} \quad (6)$$

$$\frac{dx}{dt} = \pm a \quad (7)$$

양과 음의  $\lambda$ 에 대하여 정리해 보면 다음과 같다.

$$C^+ \left\{ \begin{aligned} \frac{a}{g} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} &= 0 \\ \frac{dx}{dt} &= +a \end{aligned} \right. \quad (8)$$

---

\* 한국항공우주연구원 위성열/추진그룹, mjyu@kari.re.kr  
\*\* 한국항공우주연구원 위성열/추진그룹, skim@kari.re.kr  
\*\*\* 한국항공우주연구원 위성열/추진그룹, khlee@kari.re.kr  
\*\*\*\* 한국항공우주연구원 위성열/추진그룹, jmchoi@kari.re.kr

$$C \begin{cases} -\frac{a}{g} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = -a \end{cases} \quad (9)$$

정리된 방정식의 수치적분을 통해 유동의 속도와 압력을 구할 수 있다.[3]

### 3. 계산결과

저궤도 위성에서 주로 사용되는 단일추진제 추진시스템의 관로 형상은 다음과 같다. 그림에서 나타나는 것처럼 추진시스템의 관로는 추진제 탱크, 필터, 오리피스, 밸브 등으로 이루어져 있다.

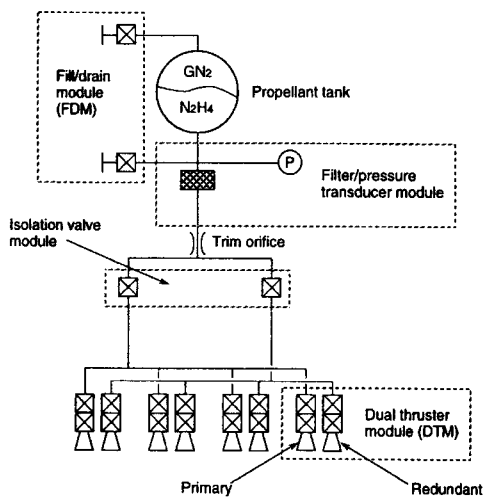


Fig. 1 Schematics of a LEO satellite propulsion subsystem

추진제 탱크와 추력기 밸브의 경계 조건은 같은 압력을 유지하는 reservoir로 가정하였다. 추진제 탱크의 압력은 최대 350psi에서 최소 65psi이고 추진제는 추력기를 통해 우주공간으로 배출되므로 추력기 밸브에서의 조건은 진공상태로 가정하였다. 추진제의 압력상승은 추력기의 폐쇄 시에 나타나고 실제 추력기 밸브의 폐쇄시간은 약 3-10ms이지만 본 해석에서는 최악의 경우로 폐쇄시간이 1ms인 경우를 가정하였다.[4-5]

압력진동을 최소화하기 위해서는 오리피스를 필터와 래칭밸브의 사이에 설치하였고 이에 대한 해석을 수행하였다. 오리피스를 적용하는 경우 압력진동의 지속시간이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있으며 결과는 Fig. 2에 나타나 있다.

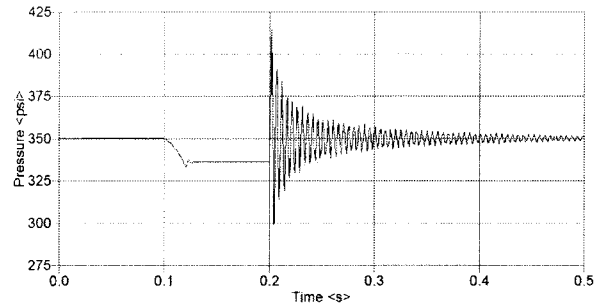


Fig. 2 Transient pressure at thruster valve inlet (1 msec valve closing)

### 4. 결론

본 논문에서는 저궤도 관측위성의 설계 검증에 필요한 추진제 관로 내의 유동해석에 대하여 기술하였다. 추력기 밸브의 개폐에 의해 발생하는 압력진동을 해석한 결과 폐쇄시간이 1ms인 최악의 경우에도 압력 상승이 약 430psi로 추진시스템 부품의 파손까지는 이어지지 않는 것을 확인할 수 있었고 오리피스를 통해 압력진동을 효과적으로 감쇄시킬 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] Molinsky, J., 1997, "WaterHammer Test of the SeaStar Hydrazine Propulsion System," AIAA-paper 97-3226.
- [2] Prickett, R. P., Mayer, E., and Hermel, J., 1992, "Water Hammer in a Spacecraft Propellant Feed System," Journal of Propulsion and Power, Vol.8, No.3, pp.592-597.
- [3] Wylie, E. B., and Streeter, V. L., 1993, "Fluid Transients in Systems," Prentice Hall
- [4] 2001, "KOMPSAT-2 Equipment Specification, 1-lbf Class Thruster Valve", K2-SP-460-007 EQ.
- [5] Chen, C., 1996, "KOMPSAT Propulsion Subsystem Steady-State and Transient Flow Analysis", IOC KOPSAT.96.460.013, TRW