

# 인공위성 추진계통 관로내의 수격효과에 관한 실험적 연구

권기철\*·이은상\*·박상민\*\*·강신재\*\*\*·노병준\*\*\*

## An Experimental Study on Water-Hammer Effect for Spacecraft Propulsion System

Ki-chul Kwon, Eun-sang Lee, Sang-min Park Shin-jae Kang and Byung-joon Rho

**Key Words:** Water-hammer(수격), Maximum peak pressure(최고압력), Propellant feed system(추진제 공급시스템)

### Abstract

This paper presents the water-hammer effect due to the rapid opening and closing of isolation valve and thruster valve in the spacecraft propulsion system. The single propellant feed system was modeled to investigate the maximum peak pressure due to the water-hammer effect. The test parameters are tank supply pressure, shape and throat length of orifice and line length. Kerosene was used as the inert simulant propellant liquid instead of hydrazine. As downstream line length after isolation valve increased from 1.5 to 2.5m, the maximum line-filling water-hammer peak pressure decreased, but the average time interval between peak pressures increased. The maximum line-filling water-hammer peak pressure with orifice was lower than without orifice, and the maximum line-filling water-hammer peak pressure with orifice at the back of isolation valve was lower than with orifice in front of isolation valve. Without orifice, the maximum water-hammer peak pressure due to the rapid opening and closing of the thruster valve was about 126% of tank supply pressure. With orifice, it decreased. As orifice throat length increased, it decreased. The maximum water-hammer peak pressure due to the rapid closing of the thruster valve with converging-diverging orifice was lower than normal orifice. It was found that the orifice as a means of pressure drop was very effective to reduce the water hammer peak pressure at the thruster valve. The results of this study can be used for the design of spacecraft liquid propulsion feed system.

### 1. 서 론

인공위성의 자세제어를 위해 사용되는 추진제는 추진제탱크로부터 관로와 밸브를 통하여 추력기 연소실에 공급되며, 연소실에 공급되는 추진제를 단속하기 위하여 추력기 내의 밸브는 매우 짧은 시간동안 유동차단동작을 수행하고 이로 인하여 공급관내의 압력은 비정상상태가 된다. 이때의 유동 관성력 및 연료자체의 압축성에 의하여 수격(water-hammer)현상이 발생하는데, 그 최고압력이 추력기밸브가 견딜 수 있는 제한압력보

다 높은 경우에는 추력기밸브 등 연료공급계통의 파손을 유발한다. 또한, 비정상 압력파에 의해 추력기로의 유량공급이 불안정하게 되면, 균일한 추력을 발생하는데 지장을 초래하게 된다. 실제로 LANDSAT 6의 경우 이와 같은 수격효과에 의하여 추력기에 파열이 발생하여 위성체 전체를 손실한 바 있다. 따라서, 수격효과에 의한 최고압력(Maximum peak pressure)을 줄이기 위해 일반적으로 사용되는 오리피스 효과 및 연료공급계통 관로 내의 비정상상태 압력파 등의 수력학적 특성을 명확하게 규명해야 할 필요가 있다.

Yaggi[1], Prickett[2]등은 가압된 추진제가 채워져 있는 상류와 추진제가 없는 하류를 차단밸브(PIV:Propellant Isolation Valve)가 분리시키고 있으며 밸브를 짧은 시간동안 개방하여 액체가 진공 및 배압이 존재하는 하류로 이동하면서 발생하는

\* 전북대학교 대학원

\*\* 전주공업대학 정밀기계과

\*\*\* 전북대학교 기계항공시스템공학부

수격효과를 액주이론(Liquid Column Theory)을 이용하여 해석하였고, 조[3]등은 추진제를 일종의 비압축성 액체덩어리로 가정하는 강체액주이론(Rigid Liquid Column Theory)을 사용하여 하류관로 끝단에서의 최고압력을 예측하였으며, 장[4]은 하류관로의 압력상태, 길이 및 엘보우 형상, 그리고 탱크공급압력이 최고압력에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구에서는, 차단밸브가 열릴 때 추력기밸브 직전에서 나타나는 비정상상태의 수격학적 특성과 차단밸브가 없고 추진제가 탱크에서 관로를 통해 추력기밸브까지 가득 차 있는 상태에서, 연소 개시 및 종료시의 순간적인 추력기밸브의 개폐로 인해 발생하는 수격현상에 의한 최고압력을 줄이기 위한 관로내 오리피스의 유·무 및 오리피스의 형상, 오리피스의 위치변화에 따라 나타나는 수격효과와 감쇠정도를 고찰하였다.

## 2. 실험장치구성 및 실험조건

### 2.1 실험장치

인공위성 추진제 공급관로 내의 수격현상은 두 가지 경우에 발생하게 되는데 이를 Fig. 1에 나타내었다. 첫째는 위성이 처음으로 추진할 때만 발생하는 것으로, 추력기밸브가 닫혀있는 상태에서 차단밸브가 급격히 열리면 추진제는 추력기밸브까지 이동하면서 진공이나 대기압 상태의 관내에 순간적으로 비정상상태의 유동을 형성하면서 발생하게 된다(Fig. 1 (a)). 이때의 수격현상에 의한 압력은 식(1)의 형태로 결정되어진다.

$$P_{wh} = V \times a \times d / g \quad (1)$$

여기서, V는 추진제가 추력기밸브와 충돌할 때의 속도, d는 추진제의 밀도, g는 중력상수(gravitational constant)이고 a는 파의 속도(wave speed)이다. 파의 속도는 추진제의 압축성, 관의 탄성력(elasticity), 관 직경 및 두께, 추진제 속에 포함된 기체의 체적 등에 의해 결정되어진다.

식(1)에 의한 최고압력이 추력기밸브가 견딜 수 있는 제한압력보다 높을 경우 추력기밸브를 파손시키게 된다.

둘째는 위성이 임무를 다할 때까지 계속해서 발생하는 것으로, 차단밸브가 열려있고 추진제가

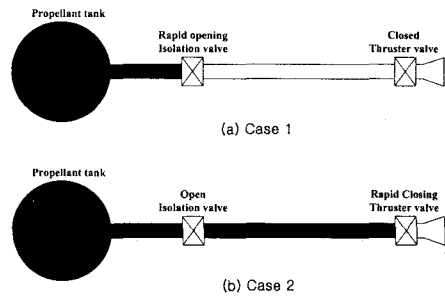


Fig. 1. Schematic of configuration model causing waterhammer.

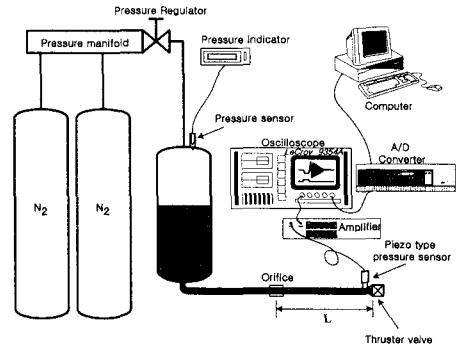


Fig. 2. A Schematic of waterhammer test setup.

추력기밸브까지 채워져 있는 상태에서 추력기밸브를 급격히 열었다 닫을 때 발생하게 된다(Fig. 1 (b)). 이때의 수격현상에 의한 압력은 관의 초기압력(P)과 식(1)에 의한 압력(Pwh)의 합으로 나타난다.

$$P_{wh,t} = P + P_{wh} \quad (2)$$

인공위성 추진제의 연료공급계통에서 발생하는 수격(water hammer)현상에 대한 지배적인 변수로는 연료탱크압력, 공급관의 조도, 내경, 두께, 재질, 추력기밸브의 차단반응시간, 오리피스의 형상 및 내경 등이 있는데, 본 연구에서는 연료탱크압력, 오리피스 형상에 따라 나타나는 비정상 수격학적 특성을 고찰하기 위하여 Fig. 2과 같이 실험장치를 구성하였다.

추진제탱크에 들어있는 추진제는 질소가스에 의해 150~350 psia의 압력으로 가압되어 추력기밸브까지 연결되어있는 추진제 공급관에 채워진다. 추진제탱크의 압력은 추진제탱크와 질소탱크

사이에 설치된 Pressure regulator에 의해 실험이 수행되는 동안 일정하게 유지된다. 오리피스(Orifice)는 추진제 공급관내에 설치되며, 추력기밸브(Thruster valve)로부터 오리피스가 위치하는 곳까지의 거리를 L이라 한다. 추력기밸브 직전에 설치된 동압센서(Piezoelectric dynamic pressure transducer)에 의해, 순간적인 밸브 개폐시에 나타나는 비정상적인 압력파를 측정하고, 이를 증폭기(Charge amplifier)를 통해 증폭하고 A/D 변환기를 통해 컴퓨터에 전송한다. Table 1에 동압센서의 특성값을 나타내었다.

본 연구에 사용된 차단밸브는 오리피스 직경이 2.5 mm이며, 추력기밸브의 오리피스 직경은 0.8 mm이다. 추력기밸브의 유량계수는  $C_d=0.275$ 이다.

### 2.2 실험조건

추진제 관로내의 비정상 유동특성을 Table 2에 제시된 파라미터들에 대하여 고찰하였다. 모의 추진제로 Kerosene을 사용하였고, 추진제탱크의 공급압력이 150, 200, 250, 300, 350psia이다. 차단밸브가 열릴 때 추력기밸브 직전에서 나타나는 비정상 압력파를 측정하기 위하여, 350psia의 추진제탱크압력하에서 공급관 길이, 오리피스의 유·무 및 차단밸브와 오리피스의 위치를 변화시켰다. 또한, 오리피스와 추력기밸브 사이의 거리 L과 오리피스 형상 및 throat 길이를 변화시켜가면서 추력기밸브의 개폐시에 나타나는 최고압력과 비정상 압력전도를 측정하였다. 기준이 되는 공급관의 전장은 2.5m이며, 재질은 스테인레스이다. 오리피스의 단면형상 및 throat 길이에 대한 영향을 알아보기 위하여 Fig. 3에 도시된 4개의 오리피스를 제작하고 실험을 수행하였다. 오리피스 No.1 과 No.2는 입구와 출구가 60°로 수축·확대되는 형태이며, 오리피스의 throat 길이는 각각 2mm와 4mm이고, 내경은 2mm이다. 반면에 오리피스 No.3 와 No.4는 수축·확대되는 부분이 없이 2mm와 4mm의 throat 길이를 가지며, 내경은 2mm이다. 오리피스 안에 60°로 수축·확대되는 테이퍼 가공에 대한 어려움 등으로 인해 오리피스 내경을 2mm로 정하였다.

### 3. 결 과

Fig. 4는 차단밸브 이후 공급관의 길이 즉, 하

Table 1. Technical Data of piezoelectric dynamic pressure transducer

Parameter	Value
Type	7061B(KISTLER)
Range	0~250 bar
Sensitivity	-80 pC/bar
Natural frequency	45 kHz
Linearity(all ranges)	$\leq \pm 0.5$ %FSO
Operating temperature range	-50~350 °C

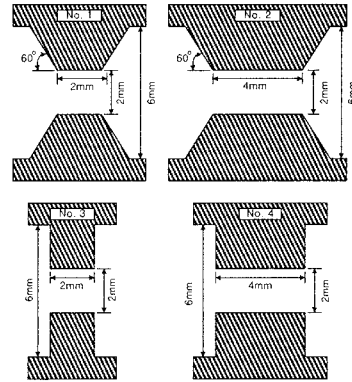


Fig. 3. Cross-sections of orifice.

Table 2. Test Parameters

Parameter	Values
Tank supply pressure(psia)	150, 200, 250, 300, 350
L(m)	1.5, 2.0
Line length(m)	1.5, 2.0, 2.5
Shape of orifice	No.1, No.2, No.3, No.4

류관로의 길이가 1.5m, 2.0m 및 2.5m일 때, 차단밸브가 열린 후 추력기밸브 직전에서 나타나는 비정상 압력파를 나타낸 것이다. 추진제 공급관내에 오리피스를 설치하지 않았으며, 공급관에는 대기압 상태의 공기가 들어있다. 추력기밸브 직전에서의 최고압력(Maximum peak pressure)은 423~417 psia로 공급관의 길이가 길어짐에 따라 약간 감소하였으나 그 차이는 크지 않았다. 그러나, Peak 압력에서 그 다음 Peak 압력이 나타날 때까지 걸리는 시간은 약 42.4, 50.9, 60.9msec로 나타났다.

Fig. 5은 추진제 공급관내에 대기압 상태의 공기가 채워져 있는 상황일 때, 공급관내에 오리피스를 설치하지 않은 경우, No.4 오리피스와 차단

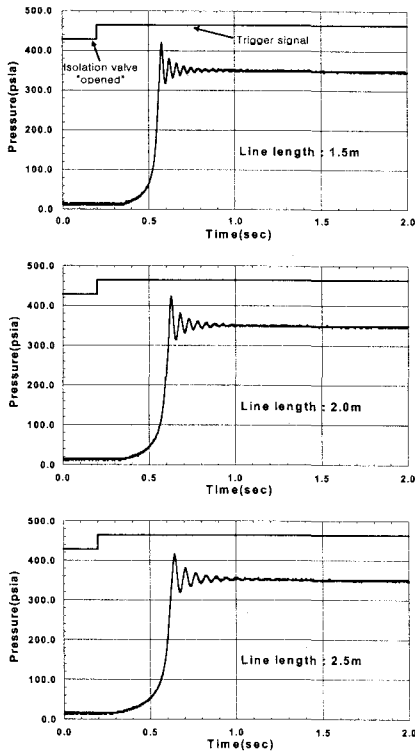


Fig. 4. Line-Filling pressure traces at 350 psia tank pressure with different downstream line length. (without orifice)

밸브를 추력기밸브로부터 1.5m, 2.0m 위치에 설치한 경우, 반대로 No.4 오리피스와 차단밸브를 2.0m, 1.5m 위치에 설치한 경우에 대해서, 차단밸브가 열릴 때 추력기밸브 직전에서 나타나는 비정상 압력파를 나타낸 것이다. 오리피스를 추력기밸브로부터 1.5m 위치에 설치한 경우의 최고압력은 392psia로 가장 작은 값을 가지며, 오리피스를 2.0m 위치에 설치한 경우의 최고압력은 403 psia로 약간 상승하였으며, 오리피스를 설치하지 않은 경우의 최고압력은 424psia로 가장 큰 값을 가진다. 위의 결과에서 알 수 있듯이 오리피스를 설치한 경우의 최고압력이 설치하지 않은 경우보다 작은 것으로 보아, 관내에 설치된 오리피스가 수격현상에 의한 최고압력을 감소시키는 작용을 한다는 것을 알 수 있다. 또한, 오리피스를 차단밸브이후에 설치하는 것이(추진제탱크 쪽에서 볼 때), 차단밸브이전에 설치하는 것보다 최고압력이 작게 나타나는 것은 추진제가 오리피스를 통과할

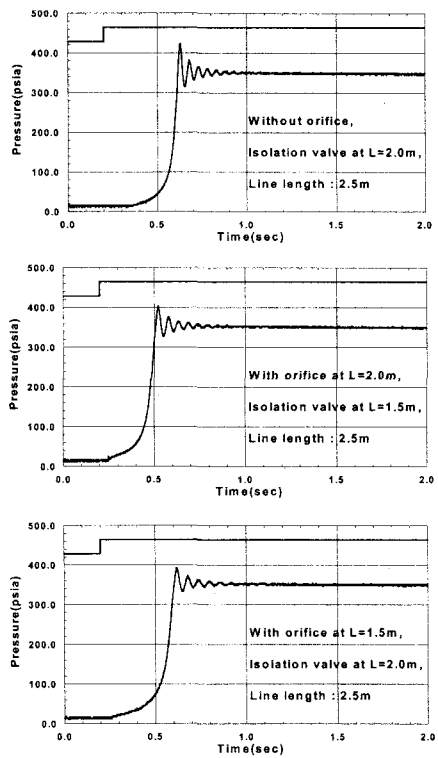


Fig. 5. Line-Filling pressure traces at 350psia tank pressure with No.4 orifice and without orifice.

때 일어나는 Cavitation현상에 의해 발생하는 Bubble의 위치와 관련이 있을 것으로 보인다. Peak 압력과 그 다음 Peak 압력사이의 시간( $T$ )은 오리피스가 차단밸브 이후에 설치된 경우가 59.3msec로 가장 크며, 오리피스를 차단밸브이전에 설치한 경우에는 55.6msec, 오리피스를 설치하지 않은 경우에는 51msec로 가장 작은 값을 가지는 것으로 나타났다.

공급관의 길이에 따라 추력기밸브 개폐시 나타나는 비정상 압력파를 Fig. 6에 나타내었다. 오리피스와 차단밸브를 설치하지 않았으며 추진제탱크 압력은 350psia이고 공급관의 길이를 1.5~2.5m까지 변화시켰다. 추력기밸브가 열릴 때부터 닫힐 때까지의 시간은 250msec이다. Fig. 7를 보면, 공급관의 길이가 증가할수록 최고압력이 418 psia에서 438psia로 증가하는 것을 볼 수 있다. 추력기밸브가 닫히면 추진제는 더 이상 진행할 수 없게 되는데, 밸브가 닫힘과 동시에 추진제의 유

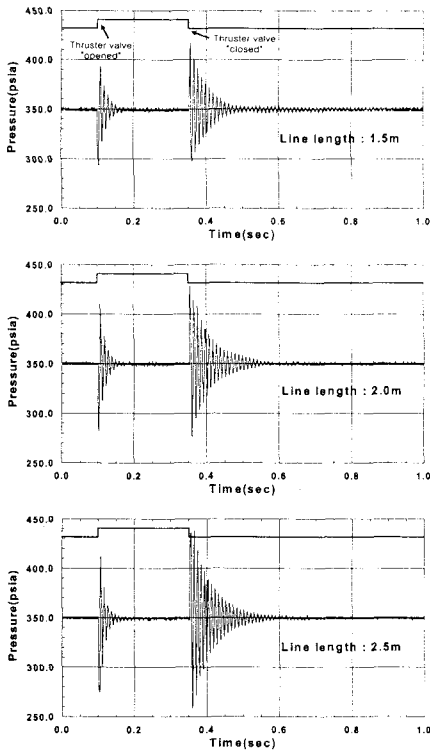
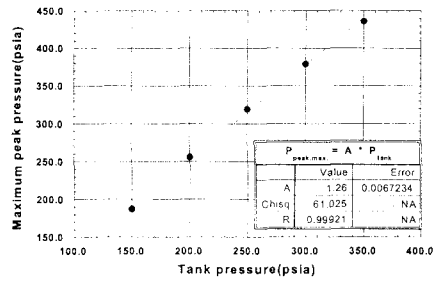


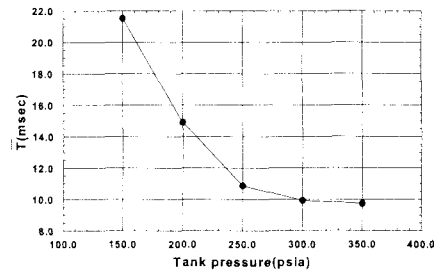
Fig. 6. Pressure traces at 350psia tank pressure with different line length. (without orifice and isolation valve)

동이 멈추지 못하기 때문에 작지만 추가적인 추진제가 관내에 유입되게 된다. 이때, 관내의 추진제는 압축되고, 결과적으로 압력을 증가시킨다. 공급관의 길이가 증가할수록 최고압력이 증가하는 것은 추가적인 추진제의 유입량이 많아졌기 때문일 것으로 생각된다. 추력기 밸브가 닫힐 때만 비정상 압력파가 나타나는 것이 아니라 밸브가 열릴 때에도 비정상 압력파가 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 솔레노이드 밸브가 열리는 동작이 불안정하기 때문이며, 거의 모든 솔레노이드 밸브에 나타난다.

Fig. 7은 추진제탱크압력에 따라 추력기밸브를 열고 닫을 때 나타나는 비정상 압력파를 나타낸 것이다. 오리피스와 차단밸브를 설치하지 않았으며 공급관의 길이는 2.5m이다. 추진제탱크압력이 증가할수록 최고압력은 증가하며, 이 값은 추진제탱크압력의 약 126%의 값을 가진다. Peak 압력과 그 다음 Peak 압력사이의 시간( $\bar{T}$ )은 탱크압력이 높을수록 짧아지며, 높은 탱크압력일수록 압



(a) Maximum peak pressure



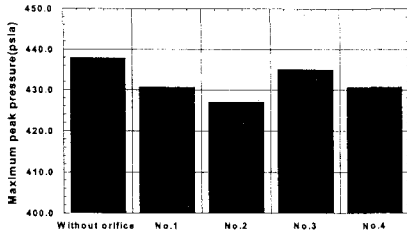
(b) Time intervals between peak pressures

Fig. 7. Maximum peak pressures and time intervals between peak pressures with different tank pressures. (without orifice and isolation valve)

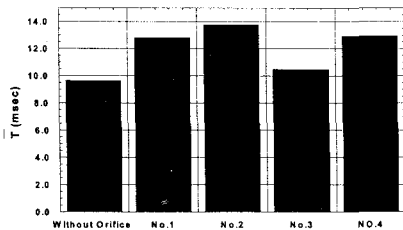
력의 증가에 의한  $\bar{T}$ 의 감소량은 작아진다.

Fig. 8은 오리피스의 형상에 따라 나타나는 비정상 압력파를 나타낸 것이다. 오리피스는 추력기밸브로부터 2.0m 떨어진 위치에 설치되었다. 오리피스를 설치하지 않은 경우의 최고압력이 436psia로 가장 높게 나타났으며, 오리피스 throat 길이가 4mm이며 입구와 출구가 60°로 수축·확대되는 No. 2 인 경우에 427psia로 가장 작았다. 오리피스 throat 길이가 4mm인 No.2와 No. 4의 최고압력이 오리피스 throat 길이가 2mm인 No. 1과 No. 3의 최고압력보다 작은 값을 가지는 것으로 나타났다. 또한, 동일한 오리피스 throat 길이일 때 입구와 출구가 60°로 수축·확대되는 No.1과 No.2의 최고압력이 No.3와 No.4의 최고압력보다 작았다. 오리피스 throat 길이와 입·출구의 형상에 따라 최고압력이 달라지는 것은 추진제가 오리피스를 통과할 때의 유동손실과 Cavitation 현상의 영향으로 생각된다. Peak 압력사이의 시간( $\bar{T}$ )은 최고압력과 정반대의 경향을 보인다. 즉  $\bar{T}$ 가 길

수록 최고압력은 감소한다고 할 수 있다. 위의 결과에서 알 수 있듯이, 추진제가 오리피스 통과 할 때의 유동손실에 의한 추력 변화가 인공위성의 추진에 미치는 영향이 크지 않다면, 오리피스의 throat 길이를 길게 하는 것이 더 효과적으로 최고압력을 감소시킬 수 있을 것으로 생각된다.



(a) Maximum peak pressure



(b) Time intervals between peak pressures

Fig. 8. Maximum peak pressures and time intervals between peak pressures with different orifices and without orifice. (at 350psia tank pressure)

#### 4. 결 론

인공위성 추진제 공급관로 내의 수격현상에 대한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 차단밸브 이후의 공급관내에 대기압 상태의 공기가 들어있는 상태일 때, 차단밸브가 급격히 열리면서 발생하는 수격현상에 의한 최고압력은 본 연구의 공급관 길이 범위내에서 423~417psia로 공급관의 길이 즉, 하류관로의 길이가 길어짐에 따라 미소하게 감소하였으나 감소량은 크지 않았다. 그러나, Peak 압력사이의 시간( $\bar{T}$ )은 길어지고 있다.

2. 차단밸브 이후의 공급관내에 대기압 상태의 공기가 들어있는 상태일 때, 차단밸브가 열리면서 발생하는 수격현상에 의한 최고압력은 공급관내에 오리피스를 설치하였을 경우가 설치하지 않았을 경우보다 작은 값을 가지며, 차단밸브보다 오리피스를 추력기밸브쪽에 가깝게 설치하는 경우가 반대인 경우보다 최고압력이 작게 나타났다.

3. 추력기밸브의 급격한 개폐시에 나타나는 수격현상에 의한 최고압력은 공급관의 길이가 길어질수록 큰 값을 가진다. 오리피스 throat 길이가 길 때, 최고압력은 감소하며, 최고압력이 높을수록 Peak 압력사이의 시간( $\bar{T}$ )은 짧아진다. 오리피스를 설치하지 않았을 경우의 수격현상에 의한 최고압력은 탱크압력의 약 126%정도의 값을 가지는 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

- (1) Yaggi, K. L., 1984, "Analysis of Propellant Flow into Evacuated and Pressurized Line," AIAA Paper 84-1346.
- (2) Prickett, R. P., 1988, Mayer, E., and Hermel, J., "Water Hammer in a Spacecraft Propellant Feed System," AIAA Paper 88-2920.
- (3) 조창열, 장영근, 1999, "인공위성 추진시스템 관로 내의 수격효과 해석," 한국항공우주학회지, 제 27권, 제 1호, pp. 99-105.
- (4) 장영근, 1998, "위성 추진시스템에서의 수격현상에 대한 실험적 연구," 한국항공우주학회지, 제 26권, 제 8호, pp. 130-138.