

## 캐비테이션 벤튜리의 유량제어 성능

Performance of Flow Rate Control of a Cavitating Venturi

조원국<sup>1)\*</sup>, 문윤완<sup>1)</sup>, 김영목<sup>1)</sup>

Won Kook Cho, Yoon Wan Moon, Young-Mog Kim

Characteristics of flow rate control has been studied for a cavitating venturi adopted in a liquid rocket propellant feed system. Numerical simulation has been performed to give about 10% discrepancy of mass flow rate to the experimental data for cavitating flow regime. Mass flow rate is confirmed to be saturated for pressure difference higher than  $3 \times 10^5 \text{pa}$  when the upstream pressure is fixed to  $22.8 \times 10^5 \text{pa}$  and the downstream pressure is varied. The evaporation amount depends substantially to non-condensable gas concentration. However the mass flow rate characteristic is relatively insensitive to the mass fraction of non-condensable gas. So it is reduced by only 2% when the non-condensable gas concentration is increased from 1.5PPM to 150PPM. From the previous comparison the expansions of the non-condensable gas and the evaporation of liquid are verified to have same effect to pressure recovery.

**Key words** : Cavitating venturi (캐비테이션 벤튜리), Flow rate control (유량 제어), Liquid rocket (액체 로켓), Propellant feed system (추진제 공급계), CFD-ACE

### 1. 서 론

액체로켓의 추진 장치는 추력을 발생시키는 엔진과 추진제 공급장치로 구성된다. 추진제 공급장치는 추진제 공급량을 일정하게 유지하여 안정적인 연소를 이루고 원하는 추력을 발생시킨다. 이를 위해서는 유량을 측정하고 이를 다시 유량 공급에 반영하는 제어 장치가 필요하다. 그러나 이러한 장치는 부피와 무게 측면에서 바람직하지 않으며 액체로켓인 KSR-III (Korea Sounding Rocket III)[1,2]는 고압의 가압 가스 하류에 압력 조절 장치를 두어 추진제의 공급 압력을 일정하게 유지하고 다시 엔진 상류에 캐비테이션 벤튜리를 두어 추진제의 유량을 제어하는 방식을 채택하고 있다. 캐비테이션 벤튜리는 하류의 압력 변동에 영향을 받지 않는 유량을 공급하며 안정성, 재연성 및 정확성에서 장점

을 가지며 구동 부위가 없어 신뢰도가 높다. 또한 배관에 간단하게 장착 가능하며 무게가 가볍다는 점이 캐비테이션 벤튜리의 가장 큰 장점이다. 일반적인 기계 장치의 경우, 캐비테이션에 의한 소재의 부식이 심각한 문제가 되지만 로켓

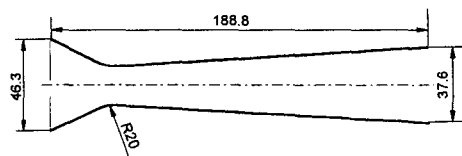


Fig. 1 Geometry of cavitating venturi.

엔진의 경우, 작동 시간이 최대 수 분에 불과하므로 이러한 현상은 문제가 되지 않는다.

벤튜리의 형상은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 유로의 면적이 좁아졌다 다시 넓어지는 형상을 기본으로 한다. 이는 벤튜리 목에서 유체의 정압

<sup>1)</sup> 한국항공우주연구원, 로켓엔진연구그룹

을 감소시키기 위한 것이며 확대부의 경사는 완만하게 하여 유동 손실을 최소화하도록 한다. 벤튜리의 목 부분에서 정압이 최소가 되며 이때 압력이 작동 유체의 증기압 이하가 되면 액체가 기화하여 공동이 형성된다. 이러한 기화 현상에 의하여 유체의 밀도는 (액체의)  $10^{-3}$  이하로 떨어지며 압축성 유동에서와 같은 초킹 현상이 발생한다. 이로 인하여 상황에서 하류의 압력이 더 이상 낮아지더라도 유량이 증가하지 않는 유량 제어 특성을 가지게 된다. 이러한 현상은 오리피스에서도 동일하게 발생하며 이에 대한 다수의 연구가 문헌[3,4]에 보고되어 있으나 벤튜리에 관한 연구[5,6]는 상대적으로 적고 특히, 유량과 압력 강하에 관한 정량적인 관계는 개발자가 확보해야 하는 상황이다. 이에 본 연구에서는 하류의 압력 변동이 있을 때 벤튜리에 의한 유량 제어 성능을 평가하고자 하며 이를 위하여 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서 구한 벤튜리에서의 압력과 유량에 관한 정량적인 관계는 벤튜리의 유량 제어 기능을 확인하기에 충분하며 또한 벤튜리가 장착된 시스템을 설계하기 위해 필수적인 자료라 하겠다.

## 2. 해석방법

수치해석에는 상용 코드인 CFD-ACE 6.4[7]를 사용하였다. 지배 방정식은 비압축성 유동에 대한 Navier-Stokes 방정식이며 표준  $k-\epsilon$  모델을 사용하여 난류 해석을 하였다. 식 (1)-(5)는 연속 방정식, 운동량 보존식, 난류 변수에 관한 보존식을 나타낸다.

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{v}) \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{V} k) = \rho P - \rho \epsilon + \nabla \cdot (\Gamma_k \nabla k) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \epsilon) = & C_1 \frac{\rho P \epsilon}{k} \\ & - C_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k} + \nabla \cdot (\Gamma_\epsilon \nabla \epsilon) \end{aligned} \quad (5)$$

위 식에서  $\mathbf{V}$ 는 속도벡터를 나타내며  $u, v, p, k, \epsilon$ 은 각각 축방향 속도, 반경방향 속도, 압력, 난류 운동에너지, 난류 소산률을 나타낸다.  $\mu, \Gamma_k, \Gamma_\epsilon$ 은 각각 점성계수, 난류 운동에너지의 확산계수, 난류 소산률의 확산계수를 나타내며,  $P$ 는 난류 운동에너지의 생성항을 나타낸다.  $C_1, C_2$ 는 경험 상수로서 각각 1.44, 1.92의 값이 적용되었다. 물성치는 온도 300K의 물이 적용되었다.

액체 내에서의 공동 발생은 식 (6)과 같이 증기 상태의 질량비  $f$ 에 대한 보존식을 이용하여 예측하였다.

$$\nabla(\rho \mathbf{V} f) = \nabla(\Gamma \nabla f) + R_e - R_c \quad (6)$$

위 식에서 생성항과 소멸항은 다음과 같이 구성된다. 이 관계식은 단일 기포에 대한 1차원 성장 모형인 단순화된 Rayleigh-Plesset 방정식[8]에서 유도된 것이다.

$$R_e = C_e \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \left( \frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_l} \right)^{0.5} (1-f)$$

$$R_c = C_c \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \left( \frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_l} \right)^{0.5} f$$

위의 관계식에서  $V_{ch}$ 는 특성속도로서 난류유동의 경우  $\sqrt{k}$ 의 값을 가지며[7],  $p_v$ 는 주어진 온도에서의 포화 압력을 나타내며 온도 300K에서 3530Pa이다. 액상과 기상에 대한 밀도는 각각  $\rho_l, \rho_v$ 로 표기하였고  $1000\text{kg/m}^3$ 과  $0.0258\text{kg/m}^3$ 이 적용되었다.  $\sigma$ 는 표면장력을 나타내며

0.0717 N/m의 값을 가진다. 하첨자  $l, v$ 는 각각 액체, 증기 상태의 변수를 나타낸다. 경험 상수  $C_p$ 와  $C_c$ 는 각각 기화/응축되는 양에 관계되며 0.02와 0.01[7]의 값을 가진다.

혼합물의 밀도는 식 (7)로 구한다. 이때 액상과 기상에 대한 각각의 밀도는 일정한 것으로 가정하였다.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{f_v}{\rho_v} + \frac{f_g}{\rho_g} + \frac{1 - f_v - f_g}{\rho_l} \quad (7)$$

비응축 기체 (non-condensable gas)에 관한 변수는 하첨자  $g$ 로 표기하였고  $\rho_g$ 는 공기의 밀도로서 이상기체 방정식으로 구하며 별도의 언급이 없을 경우,  $f_g = 15\text{PPM}$ 의 고정된 농도를 가진다.

구해진 결과를 해석하기에는 체적비를 이용하는 것이 이해하기 쉬우며 체적비  $\alpha$ 는 식 (8)-(10)을 이용하여 구한다.

$$\alpha_v = f_v \frac{\rho}{\rho_v} \quad (8)$$

$$\alpha_g = f_g \frac{\rho}{\rho_g} \quad (9)$$

$$\alpha_l = 1 - \alpha_v - \alpha_g \quad (10)$$

기상체적비는 증기의 체적비와 비응축 기체의 체적비를 포함하므로  $\alpha = \alpha_v + \alpha_g$ 로 구한다.

압력처리는 SIMPLEC 알고리즘이 사용되었고 대류항 차분은 상류도식을 적용하였다. 수렴 판정은 잔류항이 초기값의  $10^{-3}$ 보다 작아질 때로 설정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

PTA-I의 연료는 등유 계통인 Jet-A1이며 실매질을 사용한 운용에 앞서 물을 이용한 수류시험이 수행되었다. 수치해석은 벤투리 전후의 배관이 포함되어 있지 않으며 벤투리 상류의 압력은  $22.8 \times 10^5 \text{pa}$ 이다. 계산 격자는  $90 \times 30$ 의 미소체

적으로 구성되며 수 차례의 시행착오를 통하여 수치해의 정량적인 변동이 없는 최소 수준임을 확인하였다.

Fig. 2는 벤투리 전후단의 압력차에 대한 유량의 변화를 나타낸다. 그림에서 사각형으로 표시한 값은 벤투리 이외의 다른 부품에서의 압력손실이 포함된 것이며 삼각형으로 표시한 벤투리에서의 압력 차이는 다음의 일반적인 관계식을 이용하여 보정한 것이다.

$$\Delta p = (K_v + K_R) \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (11)$$

위 식에서 속도  $u$ 는 벤투리 상류의 평균 유속을 나타내며  $K_v$ 와  $K_R$ 는 각각 벤투리와 나머지 부분에서의 손실계수를 나타낸다.  $K_R$ 은 4.4로 실험[9]으로 구한 값이다. 그러나 식 (11)은 일반적인 유동에 적용 가능한 관계식이므로 캐비테이션이 발생할 경우 적용할 수 없으며 이러한 차이는 캐비테이션 구간에 존재하는 오차의 원인으로 생각된다. 해석 방법에 따른 유량 차이는 압력차가 작은 경우 오차를 보이지 않는 반면 압력차가 큰 조건에서 대략 10%의 차이를 보인다. 높은 압력차에서 실험[10]과 해석 결과가 유량 차이를 보이는 것은 실험 장치의 경우 벤투리 상류의 압력을 일정하게 맞출 수 없고 정확한 보정 역시 용이하지 않기 때문이며 높은 압력차 조건에서 수치해석의 경계 조건과 비교하

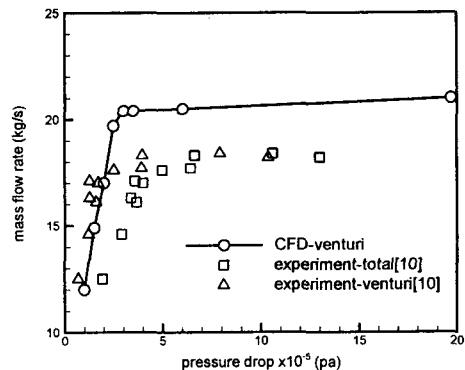


Fig. 2 Mass flow rate vs. pressure drop.

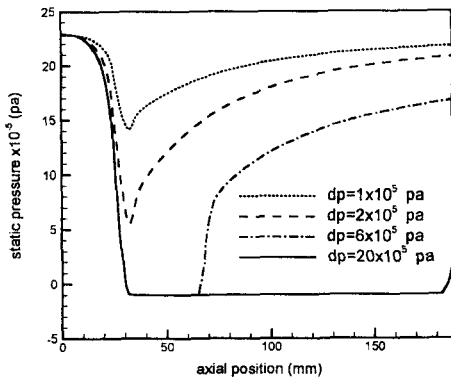


Fig. 3 Distribution of pressure on the cavitating venturi wall as a function of axial position.

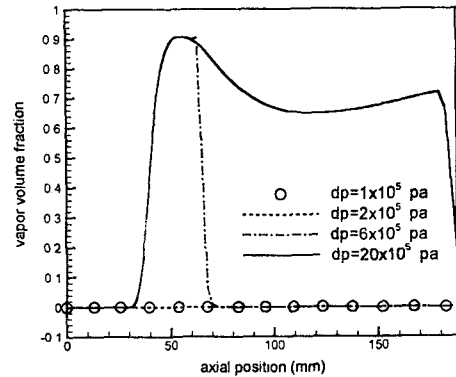


Fig. 4 Distribution of vapor volume fraction on the cavitating venturi wall along axial position.

면 수 기압 낮은 것으로 추정된다. 그러나 PTA-I의 고유 목적이 벤튜리나 밸브 등 특정 단품의 특성 해석이 아닌 관계로 이에 대한 정량적인 평가는 이루어지지 않았다.

유량은 일반적으로 압력차의 1/2 제곱에 비례하지만 압력차  $3 \times 10^5 \text{ pa}$ 을 전후해서 유량이 더 이상 압력차에 비례하지 않는 것이 수치해석과 실험 결과에서 공통적으로 관측된다. 이로써 본 연구에서 다룬 벤튜리가 유량 제어 특성을 가지는 것이 확인되었으며 보다 정량적으로 말하자면 입구 압력  $22.8 \times 10^5 \text{ pa}$ 에서 하류의 압력과 관계없이 유량이  $20 \text{ kg/s}$ 로 제한된다. 이러한 결과는 벤튜리를 이용하여 유량제어 장치를 구성할 수 있음을 확인해주는 것이며 그림의 압력-유량 관계는 액체 로켓의 추진제 공급계를 개발하기 위해서 필수적인 자료이다. 하류의 압력에 영향을 받지 않는 이러한 유량 특성은 일정 수준 이상의 압력차에서 액체가 기화하는 캐비테이션에 의한 것으로 동일한 현상이 오리피스[3,4]에서 발생하는 것으로 보고되었다. 이렇게 벤튜리를 통과하는 유량이 제한되는 것은 작동 유체의 상 변화 과정에서 발생하는 압력 손실에 기인한다. 벤튜리 목에서 유속이 증가하면서 유체의 정압이 동압으로 전환되고 정압이 증기압 이하가 되면 액체가 기화하면서 작동 유체는 액체와 기체

가 혼합된 이상 유동의 형태로 변화한다. 이러한 기체 상태의 유체는 벤튜리 목을 지나 압력이 회복되는 구간에서 다시 액체로 환원되는데 이러한 현상이 압력 회복을 저해하며 결과적으로 전체적인 압력 손실 증가로 나타난다.

벤튜리 벽에서의 압력분포를 Fig. 3에 도시하였다. 그림에 표시한 압력은 대기압에 대한 상대 압력이며 증기압은  $-0.978 \times 10^5 \text{ pa}$ 로 표시된다. 작은 압력차 ( $\Delta p = 1, 2 \times 10^5 \text{ pa}$ )에서 압력분포는 비압축성 유동의 그것과 동일하다. 유동이 가속되는 벤튜리 목부근에서 압력이 급격히 떨어지며 이후 확대부에서 서서히 회복된다. 반면에 압력차  $6 \times 10^5 \text{ pa}$ 에서 벤튜리 목 이후 약 35mm 구간에서 압력이 일정하게 유지되며 이후 급속히 상승한다. 이는 압력이 낮은 영역에서 캐비테이션이 발생하기 때문이며 캐비테이션이 존재하는 영역에서 압력은 증기압 수준으로 일정하게 유지된다. 또한 압력차가  $20 \times 10^5 \text{ pa}$ 로 커진 경우, 벤튜리 목 이후의 전영역이 증기압으로 유지된다.

축방향에 대한 증기분율의 변화 (Fig. 4)에서 증기압이 유지되는 구간에서 캐비테이션이 존재하는 것을 확인된다. 압력차  $6 \times 10^5 \text{ pa}$ 에서 목 부근에 기포가 형성되며 압력이 증기압 이상으로 회복된 이후에 기포가 소멸된다. 압력차가  $20 \times 10^5 \text{ pa}$ 로 증가하면 벤튜리 목 이후에 증기상태

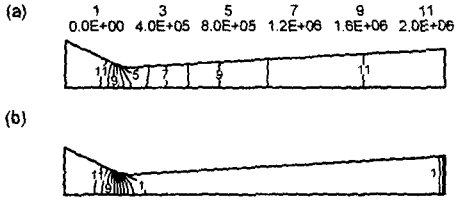


Fig. 5 Isobars; (a)  $dp=2 \times 10^5$  pa, (b)  $dp=20 \times 10^5$  pa.

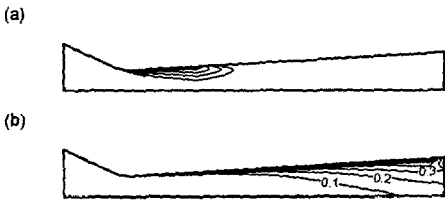


Fig. 6 Vapor volume fraction; (a)  $dp=6 \times 10^5$  pa, (b)  $dp=20 \times 10^5$  pa.

가 계속 존재한다. 이러한 경향은 Fig. 5, 6에서 한눈에 확인된다. 압력차가 작을 경우, 목 부근에 최소 압력이 형성되지만 압력차가 커지면 벤츄리 목 이후의 전 영역이 동일한 압력으로 유지된다. 캐비테이션의 발생으로 최소 압력이 증기압 수준으로 유지되므로 캐비테이션을 고려하지 않는 단상 유동 (single-phase flow)에서 볼 수 있는 음압은 형성되지 않는다. 캐비테이션이 발생하는 유동에서 최소 압력은 음압보다 작아지지 않으므로 단상 유동의 그것 보다 높게 유지되는 반면 압력 손실은 보다 크게 나타난다. 그러나 이러한 특정 조건에서 압력 강하가 커지는 것은 손실의 개념이 아닌 유량 제어란 측면에서 유용성을 가지며 이러한 특성을 정성적/정량적으로 확인하는 것이 본 연구의 목적이기도 하다.

Fig. 6의 그림 (a)에서 가장 바깥쪽 증기체적 분율은 0.0001을 나타내며 이후 10배씩 증가된 값을 나타낸다. 그림 (b)의 경우, 증기분율을 그림에 표기하였다. 압력차가 작은 그림 (a)의 경우, 실질적으로 증기가 존재하는 곳은 매우 작은 영역에 국한된다. 그림에서 압력차가 클 경우, 벤츄리 내부에 캐비테이션이 차지하는 공간이 확대되어 벤츄리 전 영역에 캐비테이션이 존재하며 출구까지 이어진다. 액체 로켓엔진의 연소

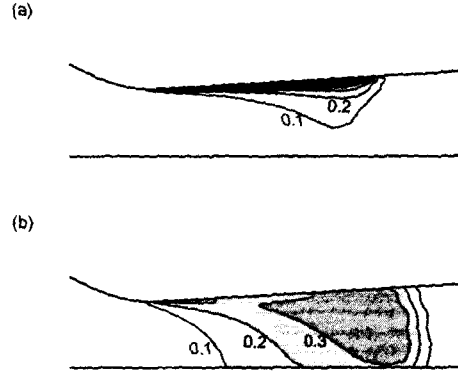


Fig. 7 Distribution of total volume fraction: the effect of non-condensable gas mass fraction for the pressure drop of  $6 \times 10^5$  pa; (a)  $f_g=15$  PPM, (b)  $f_g=150$  PPM.

시, 증기 상태의 추진제가 연소실로 공급되는 것은 안정적인 연소라는 측면에서 바람직하지 않으므로 벤츄리를 통과한 이후 추진제는 충분한 압력 회복 구간을 거쳐서 모두 액체 상태로 환원되어야 한다. 이러한 내용은 본 연구의 범위를 넘어선 것이며 별도의 연구 주제로서 충분할 것이다.

벤츄리 입구로 공급되는 유체의 상태는 캐비테이션이 발생하는 정도에 큰 영향을 미칠 것이며 이러한 조건은 난류 강도, 불순물 농도, 비응축 기체의 농도 등을 포함한다. 순수한 물의 인장 강도는 1000 기압[8] 수준이며 이는 불순물이나 비응축 기체가 포함되지 않은 물이 캐비테이션을 일으키기 위해서는 -1000 기압의 음압이 형성되어야 한다는 것을 의미한다. 그러나 완벽하게 순수한 물은 공학적인 목적으로 사용되지 않을 뿐 아니라 이러한 내용은 본 연구의 범위를 넘어선 것이므로 더 이상의 토의는 생략한다. 다만 앞서의 언급은 이러한 요소들이 캐비테이션 발생에 있어 매우 중요하다는 점을 상기시키기 위한 것이다. 본 연구에서는 가장 중요한 영향을 미칠 것으로 사료되는 비응축 기체의 농도가 캐비테이션 발생에 미치는 영향을 예측하였다. 불순물 농도 역시 중요한 영향을 가질 것으로



로 예상되나 본 연구에서 사용한 수치해석 모형에 불순물의 영향은 포함되어 있지 않으므로 이에 대한 연구는 생략하였다.

Fig. 7은 압력차  $6 \times 10^5 \text{pa}$ 에서 비응축 기체의 농도 변화에 따른 기상체적분율을 도시한 것이다. 여기에서 기상체적분율이란 증기와 비응축 기체의 체적분율을 더한 것이다. 그림 (a)에서 기상체적분율은 Fig. 6의 (a)와 비교하면 대칭축 방향으로 약간 더 확대된 모습이다. 그러나  $f_g=150\text{PPM}$ 의 경우, 증기가 거의 발생하지 않으며 기상체적분율 역시 전혀 다른 분포를 보인다. 이는 비응축 기체의 팽창에서 그 이유를 찾을 수 있다. 즉, 증기가 발생할 구간인 압력이 낮은 영역에서 비응축 기체가 팽창하면서 증기가 발생할 요인을 없애기 때문이며 이는 유체의 밀도 변화에 증기가 발생하는 것과 유사한 영향을 가진다. 그러나 증기와 비응축 기체의 가장 큰 차이는 증기의 경우 생성되는 영역이 한정되어 있다는 것이다. 이들 두 현상은 모두 압력 회복을 저해하는 특징을 가지며 압력 손실이라는 측면에서 정량적으로도 비슷한 크기를 가져 약 2% 유량 차이를 가진다.

#### 4. 결 론

액체로켓 추진제 공급계에서 캐비테이션 벤튜리에 의한 유량 제어 기능을 확인하였다. 벤튜리 상류의 압력을 일정하게 유지하면서 하류의 압력을 감소시킬 경우, 일정한 압력차에 이르러 유량이 더 이상 증가하지 않았다. 이러한 현상의 정량적인 특성을 수치해석과 실험을 통하여 제시하였으며 상류 압력을  $22.8 \times 10^5 \text{pa}$ 로 고정하였을 때 압력차가  $3 \times 10^5 \text{pa}$  이상이 되면 유량이 고정되었다. 벤튜리의 유량제어 특성은 목 부근에서 발생하는 캐비테이션에 의한 것임을 확인하였다. 수치해석과 실험을 수행한 결과 유량 차이는 캐비테이션이 발생하는 높은 압력차 조건에서 10% 수준이었다. 이의 원인은 벤튜리 상류의 압력조건이 서로 다르기 때문인 것으로 분석되며 벤튜리 상류의 압력 조건을 보다 정확하게

일치시킬 경우 이러한 오차는 없어질 것으로 판단된다. 벤튜리로 유입되는 액체에 포함된 비응축 기체의 농도가 변화할 경우 벤튜리 내부의 기상체적분율의 분포는 많이 변화하였으나 유량은 거의 변동이 없었으며 비응축 기체의 농도가  $f_g=1.5\text{PPM}$ 에서  $f_g=150\text{PPM}$ 으로 증가할 경우 유량은 약 2%만이 감소하였다. 이는 비응축 기체와 증기가 모두 유체의 밀도를 감소시키고 압력 회복을 저해하는 동일한 영향을 가지기 때문이다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부에서 시행한 특정연구개발사업인 "KSR-III 개발사업" 연구 결과의 일부입니다.

#### 참고문헌

- [1] 채연석 외, 3단형 과학로켓 개발 사업(IV) 제 1권, 과학기술부, 2001.
- [2] 권오성, 정영석, 조인현, 정태규, 정동호, 제 17회 한국추진공학회 학술대회논문초록집, pp.1-2, 2001.
- [3] Numachi, F., Yamabe, M., and Oba, R., *J. Basic Engng.*, v82, pp.1-10, 1960.
- [4] W.H. Nurick, *J. Fluids Eng.*, v98, pp.681-687, 1976.
- [5] P.S. Kumar and A.B. Pandit, *Chem. Eng. Technol.*, v22 pp.1017-1027, 1999.
- [6] 조원국, 정영석, 2000 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp.318-324, 2000.
- [7] *CFD-ACE v6.4 manual*, 2001.
- [8] F.R. Young, *Cavitation*, McGraw-Hill, 1989.
- [9] 권오성 외, TN-기관-01-12, 한국항공우주연구원, 2001.
- [10] 조원국, 문윤완, 권오성, 조인현, 액체로켓 추진제 공급계에서 캐비테이션 벤튜리의 유량 제어 특성, 한국항공우주학회지 심사증, 2002.