

## 액체 로켓엔진의 분사기 유출 특성

조원국\*, 류철성\*, 김영목\*

### Injector Discharge Characteristics of Liquid Rocket Engine

Won Kook Cho\*, Chul-Sung Ryu\*, Young-Mog Kim\*

#### ABSTRACT

The discharge characteristics of the oxidizer injector of liquid rocket engine were investigated. The discharge performance was obtained numerically which agreed quantitatively with the measured data. The discharge coefficient is proportional to the cavitation number for cavitating flow and constant for non-cavitating flow. The Reynolds number, however, affects little the discharge coefficient. The discharge coefficient decreased slightly as the Reynolds number increased because the friction loss decreased relatively at high Reynolds number flow.

#### 초 록

액체 로켓엔진의 산화제 분사기에 대한 유출 특성을 고찰하였다. 공동 유동 영역에서 유출 특성에 대한 수치해석 결과를 구하였으며 실험 결과와 비교하여 정량적인 정확성을 확인하였다. 유출계수는 공동 유동의 경우, 공동 수에 비례하였고 공동이 발생하지 않을 경우, 공동 수의 영향을 받지 않았다. 반면에 레이놀즈 수는 유출계수에 큰 영향을 미치지 않았다. 레이놀즈 수가 증가하면 유출계수는 약간 증가하였으며 이는 마찰 손실의 상대적인 감소로 풀이된다.

#### 1. 서 론

분사기는 액체 상태의 작동유체에 높은 압력 차를 주어 미립화하는 장치로 정의할 수 있다. 이러한 분사기의 쓰임은 매우 다양하여 액체 로켓엔진, 내연기관, 스프레이 도포, 분사 냉각 등에 사용된다.

분사기에서의 차압과 유량과의 관계는 설계에 가장 기본적인 자료로서 60-70년대[1]에 상당한

연구가 이루어졌으며 현재까지도 지속적인 연구가 수행되고 있다. 초기 연구는 유량과 압력 손실에 관한 것이 주류를 이루었으며 이러한 자료는 분사기 설계 최적화에 활용되었다. 이후 새로운 연구 분야로서 공동 발생과 분사 성능에 관한 주제가 제시되었다. 액체 로켓엔진에서 분사기 차압은 최소 수 기압에 이를 정도로 매우 크며 배압이 충분히 높지 않을 경우 분사기 내부에서 공동이 발생한다[2]. 공동은 분사기 출구

\* 정회원, 한국항공우주연구원(Korea Aerospace Research Institute)

까지 이어질 수 있으며 분사기에서의 압력 손실과 분사기의 분무 성능에 큰 영향을 미친다. 공동이 발생하면 압력 손실이 증가하며 분무 균일성도 저하된다[2]. 로켓 엔진의 경우 연소 조건에서 분사기의 배압, 즉 연소실 압력은 매우 높으므로 설계조건에서는 분사기에서 공동이 발생하지 않는다. 그러나 연소 초기 연소실 압력이 충분히 발달하기 전이나 대기압에서 수행되는 수류시험에서는 공동 발생이 예상된다. 특히 액체 로켓엔진[3]의 분사기에 대한 수류시험의 경우 분사기 하류가 대기압 조건이므로 공동 유동 영역에서 분사기 유출 특성에 대한 연구는 수류시험의 합격 조건을 설정과 운용에 있어 가장 기본적인 사항이라 하겠다.

수치해석에 의한 유동 해석은 분사기 내부의 상세한 유동 정보를 얻는데 유용하지만 관련 연구가 거의 보고되지 않았고 특히, 수치 해석에 의한 유출 특성의 정량적인 자료는 전무한 실정이다. 이에 본 연구에서는 분사기 유출 특성에 대한 수치해석과 실험을 병행하여 분사기 성능에 대한 공동 발생의 영향을 평가하고자 한다.

## 2. 연구내용

### 2.1 실험적 연구

실험에는 분사기를 통과하는 유량과 분사기 상류의 압력을 측정하여 유출 계수를 구하였다. 사용된 작동유체는 상온의 물이며 Fig. 1은 실험 장치의 개략도를 나타낸다. 분사기를 통과한 유체는 탱크에 모여 무게가 측정된다. 로드 셀과 압력 센서의 측정 오차는 분사기의 가공오차 이하이며 분사기 오리피스의 가공 오차는 0.5% 이하이다. 상류의 물은 고압 질소로 가압되며 측정 시간에 앞서 12-20초 동안 압력 조절 시간을 가진다. 측정시간 동안 압력 변동의 정규표준편차는 0.3% 이하이며 압력 변동이 심한 과도기가 지난 후 측정을 수행한다. Fig. 2는 분사

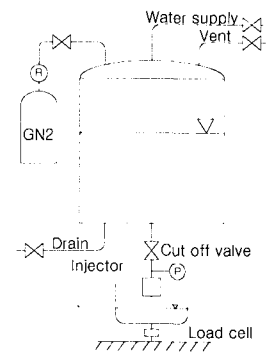


Fig. 1 Schematic of experimental setup.

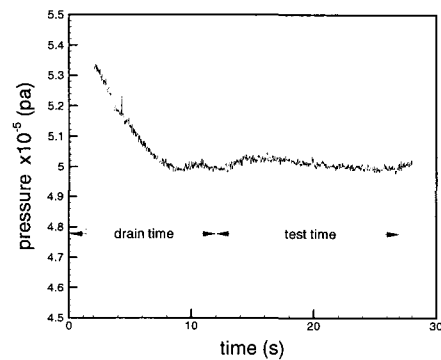


Fig. 2 Distribution of upstream pressure as a function of time for  $Re=5.3 \times 10^4$ .

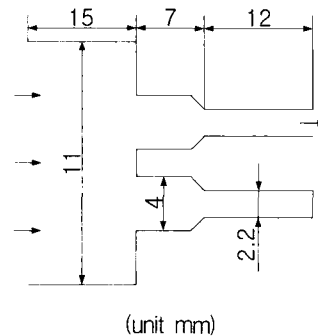


Fig. 3 Sketch of injector

기 상류 저수조에서 시간에 따른 압력 변화를 나타내며 측정 위치는 분사기 입구 직전이다. 밸브를 연후 약 9초 이후에 압력이 안정해진다.

Table 1 Description of variables and material properties.

Variable	Value	Unit	Description
$\rho_l$	1000	kg/m <sup>3</sup>	liquid density
$\rho_v$	0.02558	"	vapor density
$\rho_g$	$= P/RT$	"	non-condensable gas density (air)
$f_g$	15	PPM	mass fraction of non-condensable gas
$p_v$	-	Pa	vapor pressure
$\mu$	1.0	mPa·s	dynamic viscosity
$\sigma$	0.0717	N/m	surface tension
$V_{ch}$	-	m/s	characteristic velocity
$C_e$	0.02	-	phase change rate coefficient for evaporation
$C_c$	0.01	-	phase change rate coefficient for condensation

분사기의 모습은 Fig. 3에 도시하였다. 분사공의 직경이 길이에 비하여 매우 작기 때문에 Fig. 3의 그림은 실제 비율대로 작성되지 않았다. 두 개의 분사공이 평행하게 구성되어 있으며 한쪽을 막고 하나의 유로에 대해서 교대로 시험을 수행한다. 실험 결과로서 측정 시간, 유량, 상류 압력이 얻어지며 압력에 대하여 통계 자료가 함께 주어진다.

## 2.2 해석적 연구

수치해석은 상용 코드인 CFD-ACE 6.4를 사용하여 수행되었다. 지배 방정식은 비압축성 유동에 대한 Navier-Stokes 방정식이며 표준  $k-\epsilon$  모델을 사용하여 난류 해석을 하였다. 수치해석 모형은 축대칭 2차원으로 분사기 실험 장치와 같은 면적 축소비를 가진다. Fig. 4는 축대칭 해석에 사용된 형상을 나타낸다.

액체 내에서의 공동 발생은 식 (1)과 같이 기체 상태의 질량비  $f$ 에 대한 보존식을 이용하여 예측하였다.

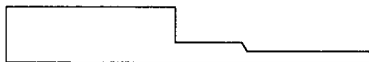


Fig. 4 Geometry of the injector for axisymmetric CFD analysis.

$$\nabla(\rho \mathbf{V}f) = \nabla(\Gamma \nabla f) + R_e - R_c \quad (1)$$

위 식에서  $f$ 는 증기 상태의 질량비를 나타내며  $\mathbf{V}$ 는 속도 벡터,  $\Gamma$ 는 확산계수를 나타낸다. 식 (1)에서 생성항  $R_e$ 와 소멸항  $R_c$ 는 다음과 같이 구성된다. 이 관계식은 단일 기포에 대한 1차원 성장 모형인 레일리 방정식[6]을 단순화한 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 사용된 변수와 물성치는 Table 1에 정리되어 있다. 하첨자  $l$ ,  $v$ ,  $g$ 는 각각 액체, 기체, 응축되지 않는 용존기체 (non-condensable gas)를 나타낸다. 용존기체로서 공기가 적용되었으며 밀도 계산에는 이상기체 방정식이 사용되었다.

혼합물의 밀도는 식 (2)로 구한다. 이때 액상과 기상에 대한 각각의 밀도는 일정한 것으로 가정하였다.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{f_v}{\rho_v} + \frac{f_g}{\rho_g} + \frac{1 - f_v - f_g}{\rho_l} \quad (2)$$

구해진 결과를 해석하기에는 체적비,  $\alpha$ 를 이용하는 것이 이해하기 쉬우며 체적비는 식 (3)-(5)를 이용하여 구한다.

$$\alpha_v = f_v \frac{\rho}{\rho_v} \quad (3)$$

$$\alpha_g = f_g \frac{\rho}{\rho_g} \quad (4)$$

$$\alpha_l = 1 - \alpha_v - \alpha_g \quad (5)$$

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

압력처리는 SIMPLEX 알고리즘이 사용되었고 대류항 차분은 2차 상류도식을 적용하였다. 난류변수와 기상질량비는 안정성이 높은 상류도식이 사용되었다. 이는 이들 방정식에 대해서는 유동에 의한 전달량보다 생성항에 의한 영향이 크다는 사실을 고려한 것이다. 수렴 판정은 유수가 초기값의  $10^{-3}$ 보다 작아질 때로 설정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

실험은 상온의 물을 작동유체로 하여 수행되었으며 수치해석 역시 실험과의 비교를 위하여 같은 물성치가 적용되었다. 참고로 액체 로켓엔진의 작동유체는 비등점 부근의 액체산소이다. 공동 유동에서 레이놀즈 수와 공동 수가 가장 중요한 무차원 인자이며 이들 무차원 수에 대한 유동특성은 다른 물성의 유체에 대해서도 적용된다. 본 연구에서는 상기 두 인자가 분사기의 유출 특성에 미치는 영향을 관찰하였다.

분사기 출구의 환경은 액체나 기체일 수 있으며 유량 특성은 두 경우 모두 좋은 결과를 주는 것으로 알려져 있다[5]. 그러나 배기 환경이 기체인 경우가 실제 연소실을 더욱 유사하게 모사하며 본 실험에서 분사기 출구 배압은 대기압이다.

Table 2는 유량과 분사기 차압과의 관계를 나타낸다. 여기에서 레이놀즈 수  $Re$ 는 분사공의

Table 2 Pressure drop through injector orifice.

$Re \times 10^4$	4.3	5.3	6.1	REMARK
	3.27	5.23	7.27	cavitating flow
$\Delta p \times 10^5$ (pa)	3.22	4.67	6.11	non-cavitating
	3.00	5.01	7.02	experiment

직경과 평균 분사속도를 기준으로 정의되었다. 공동이 발생하지 않는 조건에서의 수치해석 결과는 실험결과에 비하여 압력 손실이 작게 예측되는 것을 알 수 있다. 단  $Re=4.3 \times 10^4$ 인 경우에 대해서 수치해석 결과가 실험 결과의 압력 손실이 크며 이러한 경향은 공동 발생의 고려에 무관하다. 이는 수치해석에서 오류확산에 의하여 유동 손실이 과대 예측된 것으로 풀이된다. 또한 공동 발생이 유출 특성에 영향을 미치지 않는 것은 공동의 크기가 작아 전체적인 유동 특성에 큰 영향을 주지 않았기 때문이다. Table 2의  $Re=4.3 \times 10^4$ 인 조건은 배압이 압력차의 약 1/3에 해당하는 것으로 공동이 발생하기 시작하는 단계로 볼 수 있다. Huzel과 Huang[5]은 공동 발생 조건 배압으로 압력차의 1/2이하를 제시하고 있으며 이는 본 연구 결과와 비슷한 정도이다. 유량이 많은 높은 레이놀즈 수 조건

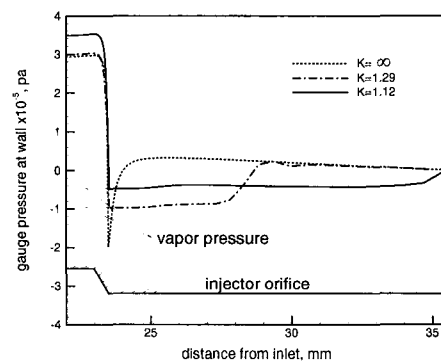


Fig. 5 Pressure distributions at injector wall as a function of axial position for  $Re=4.3 \times 10^4$ .

에서는 공동 발생을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 수치해석 결과가 많은 차이를 나타내며 레이놀즈 수  $Re=5.3 \times 10^4$  이후에 본격적인 영향이 있다. 공동 발생을 고려한 해석 결과는 실험 결과와 비교하여 약 0.2~0.3 기압의 일정한 차이를 가지는 반면 공동 발생을 무시한 해석은 실험 결과와 많은 차이를 보이며 유량이 많아질수록 차이도 커진다.

각기 다른 유동 조건에 대하여 분사기 벽면에서의 압력 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 출구의 배압이 대기압으로 고정되어 있으며 증기압은 아래에 제시한 공동 수 (cavitation number)의 정의를 이용하여 구할 수 있다.

$$K = \frac{P_{in} - p_v}{P_{in} - p_b} \quad (6)$$

여기에서  $p_b$ 는 분사기 출구에서의 정압을 나타내며,  $p_v$ 와  $P_{in}$ 은 포화증기압과 입구에서의 전압을 나타낸다. 식 (6)의 공동 수는 정압과 동압의 비를 의미하며 분사가 정압, 분모가 동압이므로 공동 수가 작아지면 공동 형성이 보다 쉬워지는 것을 의미한다. 문헌에 따라 약간씩 다른 정의가 사용되기도 하나 근본적으로는 같은 의미를 가지며 본 연구에서는 Nurick[2]이 제시한 식을 사용하였다.

공동이 발생하지 않는 조건에서 분사기 축소부를 지나면서 압력이 급격하게 낮아져 수 기압의 음압을 가진다. 이는 순도가 매우 높은 액체에서 발생할 수 있는 현상이며 참고로 순수한 물의 이론 인장강도는 1000기압 수준이며 이는 1000기압의 음압에서 공동이 발생하는 것을 의미한다. 그러나 일반적인 순도를 가지는 물의 경우 이러한 음압은 형성되지 않으며 포화증기압 부근에서 액체가 파열되어 공동이 형성된다. 이에 대한 논의는 본 연구의 범위를 넘어선 것으로 자세한 내용은 Young[6]의 저서를 참고하기 바란다.

흔히 접하는 보통 순도의 액체에서는 포화 증기압까지 압력이 내려갈 경우 쉽게 공동이 형성된다. 이는 액체 내에 존재하는 용존기체나 입

자 등의 영향으로 알려져 있다. Fig. 5에서 공동 유동의 경우 축소부에서 일정한 압력이 유지되며 이 곳의 압력은 포화 증기압과 같은 수준이다. 그림에 표시된 압력은 대기압에 대한 상대 압력이므로 출구에서 0이 유지되고 포화 증기압은 공동 수에 의하여 결정된다. 공동 수  $K=1.29$ 인 경우 축소 유로 중간에 공동이 소멸되어 압력이 급격히 회복되는 구간이 존재하며 이 경우 압력 손실은 공동이 발생하지 않을 때와 비슷한 값을 가진다. 반면에 출구까지 공동이 유지되는  $K=1.12$ 인 조건은 큰 압력 손실을 가진다. 액체 내에 형성된 기포가 전체 유동장을 변화시키고 압력 회복을 방해하며[7] 이는 분사기의 압력 손실 증가로 이어진다.

공동이 발생에 의한 유량 특성의 변화는 공동 수와 유출계수와의 관계로 설명할 수 있다. 유출계수는 다음과 같이 정의된다.

$$C_d = \frac{Q}{A_{exit} \sqrt{2\Delta p/\rho}} \quad (7)$$

위 식에서  $Q$ 은 분사공을 지나는 유량을 나타내며,  $A_{exit}$ 는 분사공 출구의 면적,  $\Delta p$ 는 분사기에서의 압력강하를,  $\rho$ 는 작동유체의 밀도를 나타낸다.

공동 수와 유출계수와의 관계를 Fig. 6에 도시하였다. 유출계수는 레이놀즈 수에 따라 급격

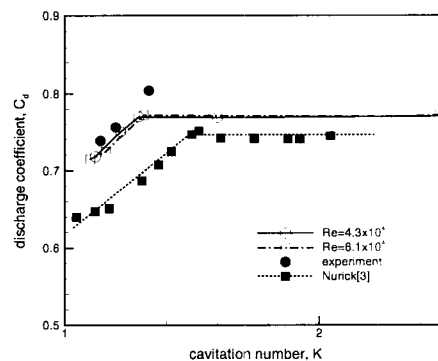


Fig. 6 Variation of discharge coefficient as a function of cavitation number.

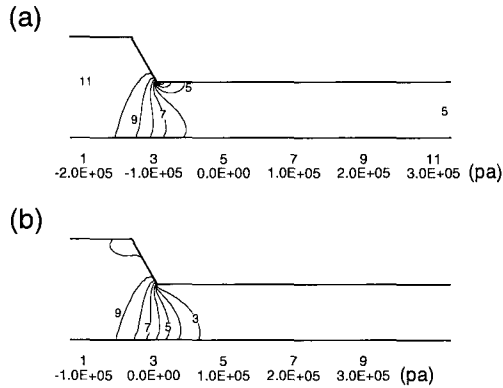


Fig. 7 Isobars for  $Re=4.3 \times 10^4$ ; (a) non-cavitating flow, (b) cavitating flow for  $K=1.12$ .

하게 변화하지 않는 특성을 가지므로 공동이 발생하지 않을 경우 공동 수에 대하여 변하지 않는 수평한 구간이 존재한다. 본 연구에 적용된 분사기의 경우 공동 수 1.1~1.2 사이에서 공동이 발생하기 시작하는 것으로 생각된다. 공동수가 이보다 작아질 경우 공동 형성이 본격화되며 유출계수는 공동 수에 비례하는 특성을 보인다. 보다 정확하게 말하자면, 유출계수가 공동수의 1/2 제곱에 비례[2]하는 것으로 보고되어 있다. 그러나 본 연구에서 다른 공동 수의 범위가 넓지 않아 그림 상에서는 확인하기 어렵다. 공동 발생과 압력 손실과의 이러한 관계는 분사기의 축소부가 오리피스와 유사한 역할을 하여 상류압력이 일정할 경우 배압 감소에 따라 유량이 증가하는 것을 방지하는 유량 제어 특성[2,7]이 있는 것을 시사한다. 이러한 현상은 점화 초기에 많은 유량이 흘러나오는 것을 방지하므로 안정적인 점화에 기여할 것이다. 그러나 설계점에서 공동이 형성된다면 이는 압력 손실을 증가시키는 것 이외에도 추진제의 미립화 특성[2]에도 영향을 주므로 주의해야 한다. 공동 수와 유출계수와의 관계에서 수치해석과 실험 결과가 동일한 특성을 보이는 것을 확인할 수 있고 기존의 연구 결과와 비교하여도 같은 특성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 공동 수  $K=1.4$  부근에서 실험 결과와 수치해석 결과와의 차이가 큰



Fig. 8 Distributions of vapour volume fraction for  $K=1.29$ .

데 이는 압력센서의 측정범위 문제로 사료되며 역시 같은 이유로 공동 수에 대하여 유출계수가 수평한 구간의 측정이 이루어지지 못하였다.

공동이 발생하는 구간,  $K \approx 1.3$ 에서 실험 결과와 수치해석 결과의 유출계수 차이는 4% 정도이다. 또한 이러한 차이는 공동 발생이 심해지는 조건에서 줄어들며  $K < 1.2$  영역에서 두 결과의 차이는 1% 내외에 그친다. 이러한 오차의 원인은 분사기의 배압이 외부 환경에 영향을 받기 때문인 것으로 생각되며 보다 정밀한 시험을 위해서는 배압이 일정하게 유지되어야 할 것이다.

본 연구에서 사용한 분사기의 유출계수가 Nurick[2]의 결과보다 큰데 이는 다음의 두 가지 이유에서 연유한다. 즉, 본 연구의 분사기는 직경비 0.2로써 Nurick이 사용한 0.083보다 크고 중간에 2단 축소되어 압력 손실을 줄일 수 있기 때문이다.

Fig. 7은 등압선 분포를 나타내며 압력의 단위는 Pa이다. 공동을 고려하지 않은 결과에서 축소부에서의 압력 감소는 유동의 가속과 관련된 것이며 공동 유동에서는 이러한 저압부가 형성되지 않는다. 공동 유동에서는 음압이 형성되지 않으므로 국소적으로는 공동 유동에서의 압력분포가 높게 유지된다. 그러나  $K \rightarrow \infty$  조건의 경우, 축소부 이후 압력이 빠른 속도로 회복되거나 공동 유동의 경우 그렇지 못하다. 즉, 공동 유동의 경우, 축소부 근방을 제외한 대부분의 하류 영역에서 포화 증기압 수준의 압력이 유지되는데 이는 액체의 흐름에 기화된 증기가 존재하기 때문이다. 반면에 공동이 발생하지 않을 경우, 출구압과 같은 수준의 압력이 형성된다.

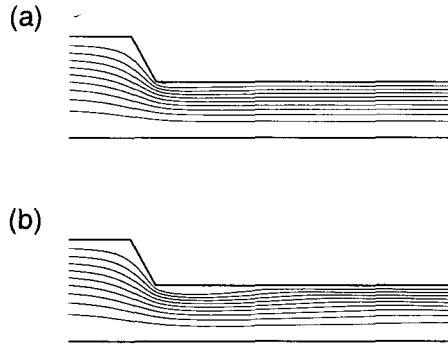


Fig. 9 Streamlines for  $Re=4.3 \times 10^4$ ;  
 (a) non-cavitating flow,  
 (b) cavitating flow for  $K=1.12$ .

유로의 단면적 변화가 없는 직선 구간에서 마찰 손실만이 있으므로 이 구간에서 압력의 변화는 완만하게 감소하는 경향을 가진다. 이러한 특징은 앞서 보인 축 방향으로의 압력분포나 유출계수 특성에서 보다 정량적으로 확인된다.

분사기에의 차압이 증가할 경우 공동 수가 작아지며 이는 공동 발생이 보다 쉬워진다는 것을 의미한다. 분사기 내부에 형성되는 기상체적비의 분포는 Fig. 8과 같으며 이때 유동 조건은 레이놀즈 수  $Re=4.3 \times 10^4$ , 공동 수  $K=1.29$ 이다. 그림에서 등고선의 1간격은 기상체적분률 0.1을 나타낸다. Fig. 7의 압력이 낮은 영역에서 발생한 기포가 하류로 가면서 압력회복에 따라 소멸된다. 기포가 가장 많이 발생하는 위치는 최소 압력 위치보다 약간 하류이며 이는 대류의 영향으로 풀이된다.

공동 발생은 액체의 기화를 의미하며 이러한 현상은 작동 유체의 부피 증가를 수반한다. 이에 따라서 유동 역시 영향을 받게 되며 Fig. 9는 이러한 결과를 나타낸다. 공동이 발생할 경우, 유로 축소부에서 유체가 팽창하여 유동이 유로 중심부로 치우친다. 반면에 공동이 발생하지 않는 유동에서는 유로와 평행한 유동을 가진다.

분사기의 유출 특성은 본 연구에서 고려한 레이놀즈 수나 공동 수 이외에도 분사공의 직경

비, 모따기, 곡률 등에 의하여 크게 달라지므로 이들 변수를 포함하는 연구가 지속되어야 할 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 액체 로켓엔진의 산화제 분사기의 유출 특성을 실험 및 해석적 측면에서 고찰하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다:

- 1) 수치해석에 의한 분사기의 유출 특성은 실험 결과와 비교적 잘 일치하였다.
- 2) 높은 압력차에서 유출계수가 저하되는 특성을 보였으며 이는 가속 구간에서 압력 저하에 따른 공동 발생에 의한 것으로 확인되었다.
- 3) 유출계수는 공동이 발생하는 조건에서 공동수에 비례하고 공동이 발생하지 않는 조건에서는 공동수에 영향을 받지 않았다.
- 4) 레이놀즈 수는 유출특성에 큰 영향을 미치지 않으며 레이놀즈 수가 증가하면 유출계수가 약간 증가하였다.

#### 후기

본 연구는 과학기술부에서 시행한 특정연구개발사업인 “KSR-III 개발사업” 연구결과의 일부임을 밝힙니다.

#### 참고 문헌

1. *Liquid rocket engine injectors*, NASA SP-8089, 1976.
2. W.H. Nurick, Orifice cavitation and its effect on spray mixing, *J. Fluids Eng.*, Vol.98, pp.681-687, 1976.
3. 채연석 외, 3단형 과학로켓 개발 사업(III) 제 1권, 과학기술부, 2000.

4. *CFD-ACE v6.4 manual*, 2001.
5. D.K. Huzel and D.H. Huang, *Modern engineering for design of liquid-propellant rocket engines*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1992.
6. F.R. Young, *Cavitation*, McGraw-Hill, 1989.
7. F. Numachi, M. Yamabe, and R. Oba, Cavitation effect on the discharge coefficient of the sharp-edged orifice plate, *J. Basic Eng.* Vol.82, pp.1-10, 1960.