

액체로켓엔진 연소시험설비에서의 캐비테이션 벤츄리 유량공급 특성

강동혁^a · 안규복^b · 임병직^a · 한상훈^a · 최환석^a · 서성현^c · 김홍집^{d,*}

Flow Control Characteristics of Cavitating Venturi in a Liquid Rocket Engine Test Facility

Donghyuk Kang^a · Kyubok Ahn^b · Byoungjik Lim^a · Sanghoon Han^a ·
Hwan-Seok Choi^a · Seonghyeon Seo^c · Hongjip Kim^{d,*}

^aCombustion Chamber Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea

^bSchool of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Korea

^cSchool of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Korea

^dSchool of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Korea

*Corresponding author. E-mail: khongjip@cnu.ac.kr

ABSTRACT

The flow rate control of a cavitating venturi has been investigated with downstream pressure variation. A set of cavitating venturies for a liquid rocket engine thrust chamber firing test facility have been designed and manufactured. The flow characteristics of the cavitating venturies have been analyzed by experimental and computational methods. Results showed that constant mass flow rate condition was established by the cavitation inside the venturi. However, upstream pressure less than the actual design pressure of the cavitating venturi could not supply a constant flow rate.

초 록

본 연구에서는 하류의 압력 변동이 있을 때 캐비테이션 벤츄리에 의한 유량 제어 성능을 평가하였다. 이를 위해 액체로켓엔진 연소시험설비에 적용할 캐비테이션 벤츄리를 설계, 제작하였다. 캐비테이션 벤츄리에 대한 실험과 수치해석을 수행하여 유량 특성을 분석한 결과 캐비테이션 벤츄리는 캐비테이션이 발생하는 영역에서 일정한 유량을 공급하는 것이 입증되었다. 그러나 실제공급압력이 설계압력보다 작을 경우 캐비테이션 벤츄리의 기능을 하지 못해 유량을 일정하게 공급할 수 없는 구간을 알 수 있었다.

Key Words: Cavitating Venturi(캐비테이션 벤츄리), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Rocket Engine Test Facility(연소시험설비), Discharge Coefficient(유출계수)

- A_{up} : Upstream area
- C_d : Discharge coefficient
- $C_{d_{w.c}}$: Discharge coefficient with cavitation
- $C_{d_{w.o.c}}$: Discharge coefficient without cavitation
- D_{in} : Upstream diameter
- D_t : Nozzle throat diameter
- DR : Divergence Ratio
- K_f : Flow coefficient ($Q/\sqrt{P_{up}-P_{down}}$)
- L_{in} : Upstream length
- L_{out} : Down stream length
- L_t : Nozzle throat length
- \dot{m}_c : Choked mass flow
- \dot{m}_{nc} : Non-choked mass flow rate
- m_{ideal} : Ideal mass flow rate
- m_{real} : Actual mass flow rate
- P_{down} : Downstream pressure
- P_{up} : Upstream pressure
- P_{ratio} : Pressure ratio (P_{down}/P_{up})
- P_t : Cavitating venturi throat pressure
- P_v : Vapor pressure
- Q_v : Volume flow rate
- T_{up} : Upstream temperature
- V_{up} : Upstream velocity
- V_t : Cavitating venturi throat velocity

1. 서 론

액체로켓엔진의 추진 장치는 추력을 발생시키는 엔진과 추진제 공급 장치로 구성되는데, 추진제 공급 장치는 추진제 공급량을 일정하게 유지하여 안정적인 연소를 이루고 원하는 추력을 발생시키는 역할을 한다. 액체로켓엔진의 시험 시, 점화과정에서 연소실 압력은 대기압에서 설계압력까지 넓은 영역에서 변화하며, 연소불안정 현상과 같은 원치 않은 현상이 발생할 때에도 큰 압력 변동을 겪을 수 있다. 따라서 설비 측면에서는 넓은 압력 범위와 압력 진동 조건에서도 안정적인 유량 공급이 가능하도록 하여야 한다. 또한 작은 양의 유량을 공급해야 하는 단일추진제나 하이브리드 로켓의 경우에도, 연소실 압력

과 상관없이 일정한 유량을 공급하여야 한다. 이런 목적을 이루기 위해 로켓엔진 시험설비에서 널리 사용되는 것이 캐비테이션 벤츄리(Cavitating venturi)이다[1,2]. 캐비테이션 벤츄리는 상류의 압력에만 영향을 받음으로써, 연소 초기의 Hard start에서도 유량 변화를 방지하고, 이상 연소에 의한 연소실 압력 변동과 이에 따른 추진제 공급 변화를 방지한다. 일정한 유량을 공급하기 위해서는 캐비테이션 벤츄리의 목(Throat)에서 공동현상(Cavitation)이 발생하는 것이 중요한데 이는 상하류의 압력차, 유량, 목 직경 등의 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있다[3].

로켓엔진 시스템이나 로켓엔진 연소시험설비는 정상적인 상태를 기준으로 설계된다. 그러나 점화초기에는 연소실 압력이 대기압 상태로서 추진제의 공급유량은 설계치 이상으로 되기 때문에 추진제 과잉공급으로 인해 Hard-start가 발생하여 설비나 개발시제에 치명적인 손상을 줄 수 있다. 본 연구에서는 연소초기의 Hard-start를 방지하고, 안정된 연소를 위해 일정한 유량을 공급할 수 있는 캐비테이션 벤츄리를 설계, 제작하였다. 캐비테이션 벤츄리의 성능을 확인하기 위하여 연소시험을 수행하고, 추가적으로 유동해석을 통해 실제 실험결과와 비교하였다. 먼저 캐비테이션 발생에 대한 유동해석을 수행하여 사용된 벤츄리 전후의 압력차와 이에 따른 유량관계를 확인하였다. 다음으로 이를 연소시험에서의 결과와 비교하여 사용된 캐비테이션 벤츄리의 특성을 파악하고자 하였다. 이를 통해 얻어지는 본 연구의 결과들은 향후 구축될 추력기 수준으로부터 고추력 엔진까지 다양한 규모의 연소시험 설비에 적용할 수 있는 유량 공급용 캐비테이션 벤츄리에 대하여 설계자료를 정립하기 위한 데이터로 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

2. 이론적 배경

2.1 캐비테이션 수

캐비테이션 수는 Eq. 1과 같이, 상하류 유동의

압력차 대비 상류 압력과 공동 압력(증기압)의 차이로 정의된다.

$$\sigma = \frac{P_{up} - P_v}{P_{up} - P_{down}} \quad (1)$$

높은 캐비테이션 수에서는 캐비테이션 벤투리의 목 근처에서 캐비테이션이 발생한 반면에, 낮은 캐비테이션 수에서는 캐비테이션 벤투리의 목에서 어느 정도 떨어진 위치에서 캐비테이션이 발생하는 것으로 알려져 있다[4].

2.2 기본 방정식

액체는 비압축성 유체로 밀도 변화가 크지 않아 이의 변화가 유량 측정에 미치는 영향을 무시할 수 있다. 따라서 질량 보존식과 베르누이 방정식으로부터 벤투리 출구에서의 속도 V_t 와 유량 Q 는 Eq. 2와 같이 표현된다.

$$V_t = \frac{1}{\sqrt{1 - (A_t/A_{up})^2}} \sqrt{\frac{2(P_{up} - P_t)}{\rho}} \quad (2)$$

부피유량은 유속에 단면적을 곱하면 Eq. 3과 같이 표현된다.

$$Q_v = \frac{A_t}{\sqrt{1 - (A_t/A_{up})^2}} \sqrt{\frac{2(P_{up} - P_t)}{\rho}} \quad (3)$$

여기서 $(P_{up} - P_t)$ 는 단면 A_{up} 과 A_t 사이의 압력차이(차압)를 나타낸다. 실제 차압식 유량계에서 측정되는 부피 유량은 유체의 마찰, 수축부의 불일치 등 이상적인 가정 조건들과 차이가 있기 때문에 실제 유량을 구하기 위해서는 교정 작업을 통하여 얻어지는 유출계수(discharge coefficient, C_d)라는 개념을 도입하여야 하며 이를 통하여 Eq. 3을 다시 쓰면 Eq. 4와 같다.

$$Q_v = C_d A_t \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (4)$$

따라서 벤투리 목에서 캐비테이션이 발생하여 질식된(Choked) 유량은 Eq. 5와 같다.

$$\dot{m}_c = C_d A_t \sqrt{2\rho\{P_{up} - P_v(T_{up})\}} \quad (5)$$

Eq. 5와 같이 유량은 상류부분의 절대 압력에 의해 고정되며, 하류부분의 압력변화가 발생하여도 전혀 영향을 미치지 않게 되는데, 이는 하류부분의 압력이 변화하더라도 유량을 일정하게 공급하는 것이 가능함을 보여준다.

캐비테이션 벤투리는 벤투리 목에서 증기로 변화된 유체가 벤투리의 확장부에서 응축하게 되는데 질식된 조건에서의 유량은 Eq. 5와 같이 나타낼 수 있는 반면에, 비질식된 조건에서의 유량은 압력 강하에 의해 Eq. 6과 같다.

$$\dot{m}_{nc} = C_d A_t \sqrt{2\rho(P_{up} - P_{down})} \quad (6)$$

실험결과 비교를 위해 유출계수(Discharge coefficient, C_d)와 유량계수(Flow coefficient, K_f)를 사용하는데 이 때 유량계수는 기하학적 형상이 고정된 상태에서 정량적인 비교가 가능한 인자로서, 주로 실험에 의해 구해지며, 본 논문에서의 K_f 은 Eq. 7과 같이 정의된다.

$$K_f = \frac{Q_v}{\sqrt{P_{up} - P_{down}}} \quad (7)$$

3. 캐비테이션 벤투리 설계 및 제작

캐비테이션 벤투리는 벤투리 하부의 압력이 벤투리 상부 압력의 85~90%보다 작으면 목 부분에서 캐비테이션이 발생되며, 질식 상태에 도달하여 하류 측의 압력이 변해도 유량은 변하지 않는 특성이 있다[5,6]. Cavitating venturi 설계의 주요인자로 Venturi 입구 직경, Venturi throat 직경, Convergence angle과 Divergence angle 등이 있으며, 주요인자 중에서도 특히 유체가 Venturi throat에 도달했을 때 순간적으로 Cavitation이 발생할 수 있도록 Throat 직경을 설계하는 것이 매우 중요하다. 제작된 Cavitating venturi 주요 설계 인자는 Table 1과 같다.

Table 1. Design property of cavitating venturi.

Name	Value
LOx Temperature (K)	90
Fuel Temperature (K)	288.15
LOx Density (kg/m ³)	1158
Fuel Density (kg/m ³)	796.66
LOx Vapor Pressure (bar)	0.892
Fuel Vapor Pressure (bar)	9.96E-04
Recovery Coefficient	0.85
Discharge Coefficient	0.93
Convergence angle(α)	37°
Divergence angle(β)	5°
Divergence Ratio($DR = L_{out} / D_t$)	2.75
Diameter (mm)	20

Table 2. Specifications of cavitating venturi.

Name	Fuel	LOx
D_t (mm)	4.35	7.23
L_{in} (mm)	10.38	8.47
L_{out} (mm)	43.51	72.34
L_t (mm)	6	9
Diameter (mm)	20	20
Convergence angle(α)	37°	
Divergence angle(β)	5°	

캐비테이션 벤츄리의 목은 Eq. 8을 사용하여 목 면적을 구한 후 D_t 를 산출하였다. L_{in} , L_{out} , D_{out} 은 Eq. 9, 10을 사용하였다. 본 실험에 사용한 캐비테이션 벤츄리의 규격을 Table 2에, 제작된 벤츄리 중 연료용 캐비테이션 벤츄리를 Fig. 1에 나타내었다.

$$A_{th} = \frac{\dot{m}_c}{C_d \sqrt{2\rho\{P_{up} - P_v(T_{up})\}}} \quad (8)$$

$$L_{in} = \frac{D_{in} - D_t}{2 \tan \alpha} \quad (9)$$

$$L_{out} = \frac{D_{out} - D_t}{2 \tan \beta}, \quad D_{out} = D_t \cdot DR \quad (10)$$

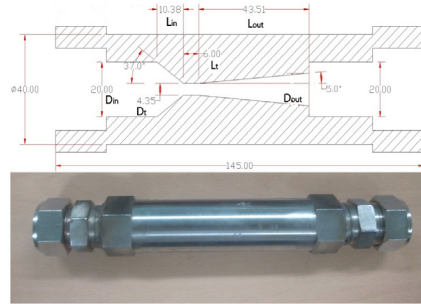


Fig. 1 Fuel cavitating venturi.

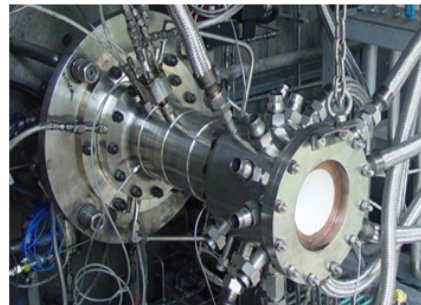


Fig. 2 Sub-scale combustor.

본 논문에 사용한 연소기 하드웨어(Fig. 2)는 추력 30톤급의 축소형 모델로 정격 조건에서 연소압력 52.5 bar, 산화제 유량 4.42 kg/sec, 연료 유량 1.59 kg/sec, O/F ratio 2.44이다. 연소시험은 두 개의 수평형 로켓엔진 연소시험설비(Rocket Engine Test Facility(RETF), model Rocket Engine Test Facility(mRETF))에서 수행되었고, 연소시험 조건으로 압력, 유량, 혼합비 등은 시험설비에 상관없이 동일한 조건에서 연소시험을 수행하였다[7,8]. 실험 데이터를 계측하기 위해 캐비테이션 벤츄리의 전, 후단에 온도센서와 압력센서를 설치하고 터빈유량계와 질량유량계를 설치하여 유량을 측정하였다.

4. 캐비테이션 벤츄리 유동 수치 해석

4.1 수치기법

캐비테이션 벤츄리의 유동해석을 위해 열유동 해석 상용패키지인 ANSYS/Fluent Ver.13을 사

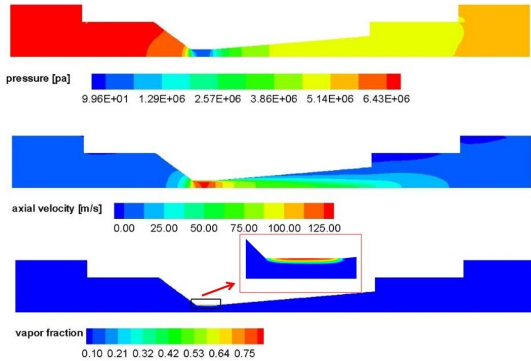


Fig. 3 CFD results of fuel cavitating venturi ($P_{ratio} = 0.79$).

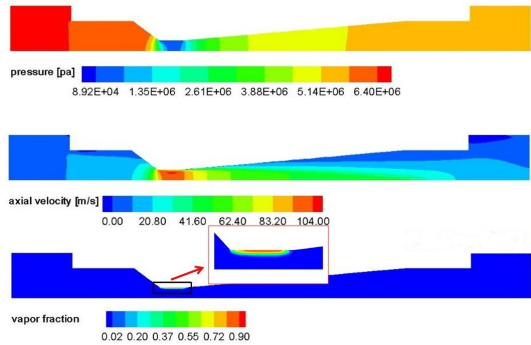


Fig. 4 CFD results of LOx cavitating venturi ($P_{ratio} = 0.82$).

용하였다[9]. 캐비테이션 현상은 기체-액체 다상 유동 특징이 나타나는 물리적 현상이므로 ANSYS/Fluent의 다상유동 모델 중의 하나인 Mixture modeling 방법을 이용하였고, 캐비테이션 모델링으로 Schnerr-sauer 모델이 적용되었다[10]. 해석은 난류를 고려한 2차원 축대칭 정상 상태의 모델로 가정하여 계산하였다. 수치기법은 압력기반 기법(Pressure-based solver)의 일종인 Coupled 기법을 이용하였다. 공간정확도 향상을 위해 2차 Upwind 기법과 2차 중심차분법의 하이브리드 기법인 Quick scheme이 적용되었다. 난류 모델로는 2-방정식 난류 모델인 Standard wall function을 사용한 Realizable $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다[9]. 연료용 캐비테이션 벤투리에 사용된 격자수는 6,410개이고, 산화제용 캐비테이션 벤투리에 사용된 격자수는 6,000개 이다.

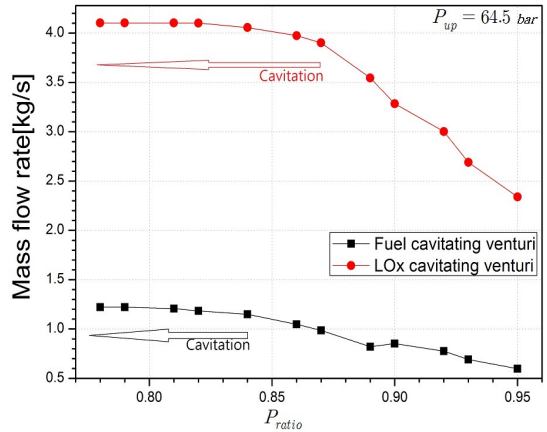


Fig. 5 Mass flow rate of LOx & fuel cavitating venturi.

4.2 수치해석 결과

수치 해석은 P_{ratio} 를 0.78부터 0.95까지 변화시키면서 수행하였다. P_{ratio} 가 0.95인 경우 입구와 출구의 압력차가 크지 않아 목 부근에서 압력이 증기압 이하로 내려가지 않기 때문에 연료용 캐비테이션 벤투리와 산화제용 캐비테이션 벤투리 모두 캐비테이션이 발생되지 않았다. 연료용 캐비테이션 벤투리는 $P_{ratio} = 0.84$, 산화제용 캐비테이션 벤투리는 0.87에서 국부적으로 유동이 급격히 팽창되는 목 부근에서 압력이 증기압 이하로 감소되어 캐비테이션이 발생하기 시작하는데, 그 영역은 매우 한정적이며 대부분의 영역에서는 아직까지 액체의 상을 유지하고 있다.

Fig. 3은 $P_{ratio} = 0.79$ 일 때 연료용 캐비테이션 벤투리의 수치해석 결과이며, Fig. 4는 $P_{ratio} = 0.82$ 일 때 산화제용 캐비테이션 벤투리의 수치해석 결과를 나타낸 것으로 입구와 출구의 압력차가 크기 때문에 노즐 목 부근의 팽창영역에서 압력이 증기압 이하로 낮아진 것을 볼 수 있으며 이에 따라 유속도 증가함을 알 수 있다.

Fig. 5는 P_{up} 압력을 64.5 bar로 고정하고 P_{down} 압력은 61.5 bar로 시작하여 50.5 bar까지 압력을 변화시켜 P_{ratio} 에 따른 질량 유량의 수치해석 결과를 그래프로 나타내었다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 P_{ratio} 가 작아짐에 따라 질량 유량이 증가하는 것을 알 수 있고, 캐비테이션이 발생하는 P_{ratio} 부터 그 기울기가 완만해짐을

Fig. 5에서 확인할 수 있다. 특히, 연료용 캐비테이션 벤츄리는 $P_{ratio} \leq 0.79$, 산화제용 캐비테이션 벤츄리는 $P_{ratio} \leq 0.82$ 에서는 질량 유량율이 일정해지는 것으로 예측된다. 해석결과 연료유량과 산화제 유량은 각각 1.22 kg/s, 4.10 kg/s로 실험에서 도출된 연료 유량 1.59 kg/s, 산화제 유량 4.41 kg/s과 다소 차이가 발생하는데, 이것은 캐비테이션 모델링의 정확도에 따라 좌우될 수 있을 것으로 판단되며 더욱 정확한 계산을 위해서는 다양한 캐비테이션 모델들을 테스트해볼 필요가 있을 것으로 사료된다. 그러나 본 논문의 해석을 통해 일정 P_{ratio} 이하에서 캐비테이션이 발생하였을 시 질량 유량율이 일정해지는 일반적인 현상을 정성적으로 확인할 수 있었다.

5. 실험 결과

5.1 연료용 캐비테이션 벤츄리 시험결과

Fig. 6은 RETF와 mRETF에서 실험한 결과로 K_f 값과 C_d 값을 비교한 그래프이다. 연료용 캐비테이션 벤츄리의 경우 P_{ratio} 가 0.62에서 0.86까지 증가함에 따라 K_f 값과 $C_{d_{wac}}$ 는 선형적으로 증가하여 0.55, 2.2 정도의 값을 나타낸다. $C_{d_{w.c}}$ 값은 K_f 값과 $C_{d_{wac}}$ 와는 달리 P_{ratio} 의 증가와 상관없이 약 0.83의 값을 유지한다. $C_{d_{wac}}$ 값이 P_{ratio} 에 따라 증가하는 것은 캐비테이션이 발생한 조건에서 Eq. 8을 이용하여 C_d 값을 구했기 때문으로, 캐비테이션이 발생한 경우 Eq. 7을 이용하여 벤츄리 목 부분의 증기압을 사용해야 하는 결과를 단적으로 보여준다.

mRETF에서는 P_{ratio} 가 0.62에서 0.86까지 증가함에 따라 K_f 값과 $C_{d_{wac}}$ 는 선형적으로 증가하여 각각 0.44, 1.58 정도의 값을 나타낸다. $C_{d_{wac}}$ 값은 K_f 값과 $C_{d_{wac}}$ 과는 달리 P_{ratio} 의 증가와 상관없이 약 0.83의 값을 유지하는 것을 확인하였다. P_{ratio} 가 일정 값 이상으로 증가하면 $C_{d_{wac}}$ 는 다시 감소하는 경향을 산화제 벤츄리 시험에서 확인하였기 때문에 연료용 벤츄리 시험은 P_{ratio} 0.85이상

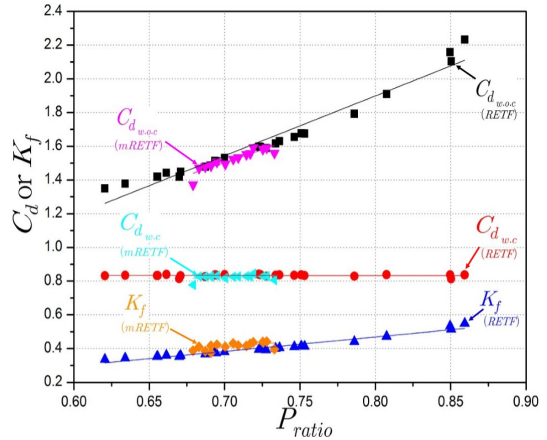


Fig. 6 Test result fuel cavitating venturi.

에서 시험을 수행하지 않았다. RETF와 mRETF에서 연료용 캐비테이션 벤츄리를 각각 실험한 결과 $C_{d_{wac}}$ 값은 0.83으로 예측되었고, K_f 값과 $C_{d_{wac}}$ 값은 P_{ratio} 가 0.62에서 0.86까지 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 동일한 결과를 확인할 수 있었다. 이상의 결과를 종합해 볼 때 동일한 시험조건에서는 시험설비와 관계없이 연료용 캐비테이션 벤츄리 4.35 mm의 임계 압력비 (critical P_{ratio})는 0.86이 되는 것을 알 수 있었다.

5.2 산화제용 캐비테이션 벤츄리 시험결과

Fig. 7은 RETF와 mRETF에서 실험한 결과로 K_f 값과 C_d 값을 비교한 그래프이다. 산화제용 캐비테이션 벤츄리의 경우 P_{ratio} 가 0.75에서 0.84까지 증가함에 따라 K_f 값과 $C_{d_{wac}}$ 는 선형적으로 증가하여 각각 1.05, 1.8 정도의 값에 도달하지만, P_{ratio} 가 0.84 이상으로 증가하면 $C_{d_{wac}}$ 는 다시 감소하는 경향을 나타낸다. $C_{d_{wac}}$ 값은 P_{ratio} 가 0.75에서 0.84의 범위에서 0.74로 거의 변화가 없지만, P_{ratio} 가 0.84 이상으로 증가하면 $C_{d_{wac}}$ 는 감소하는 결과를 보이고 있다. $C_{d_{wac}}$ 값이 P_{ratio} 에 따라 증가하는 것은 캐비테이션이 발생한 조건에서 Eq. 8을 사용하였기 때문이다. 또한 P_{ratio} 가 0.84 이상에서 $C_{d_{wac}}$ 값이 감소하는 것은 캐비테이션이 소멸됨으로서 캐비테이션 벤츄리의 기능을 하지 못해 감소하는 일반적인 경향을 나타낸다.

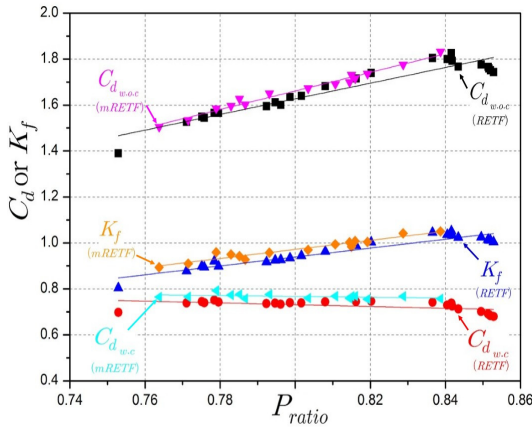


Fig. 7 Test result LOx cavitating venturi.

mRETF에서는 P_{ratio} 가 0.76에서 0.84까지 증가함에 따라 K_f 값과 $C_{d_{wacc}}$ 는 선형적으로 증가하여 각각 1.0, 1.83의 값을 나타낸다. $C_{d_{wacc}}$ 의 값은 K_f 값과 $C_{d_{wacc}}$ 과는 달리 0.76에서 0.84의 범위에서 약 0.76으로 거의 변화가 없는 것을 확인하였다.

산화제용 캐비테이션 벤튜리의 실험결과 RETF와 mRETF에서 각각 $C_{d_{wacc}}$ 값은 0.74와 0.76으로 계측되었고, K_f 값과 $C_{d_{wacc}}$ 값은 P_{ratio} 가 0.75에서 0.84까지 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 동일한 결과를 확인할 수 있었다. 또한 mRETF에서 P_{ratio} 가 0.84 이상에서 시험한 결과가 없기 때문에 K_f , $C_{d_{wacc}}$, $C_{d_{wacc}}$ 의 값이 감소하는 경향을 보이지 않았지만, P_{ratio} 가 0.84이상에서 시험을 할 경우 RETF에서 시험한 결과에서 알 수 있듯이 K_f , $C_{d_{wacc}}$, $C_{d_{wacc}}$ 의 값이 감소할 것으로 판단된다. 따라서 이상의 결과를 종합해 볼 때 동일한 시험조건에서 시험설비와 관계없이 산화제용 캐비테이션 벤튜리 7.233 mm의 임계 압력비 (critical P_{ratio})는 0.84임을 알 수 있다.

6. 결 론

- 1) 산화제용 캐비테이션 벤튜리 7.233 mm의 임계 압력비(critical P_{ratio})는 0.84이며, 연료용 캐비테이션 벤튜리 4.35 mm의 임계

압력비 (critical P_{ratio})는 0.86이며, 이러한 특성은 벤튜리 내부에서의 캐비테이션 발생과 밀접한 관련이 있으며, 설계 확정을 위해 이에 대한 확인이 필요하다.

- 2) 산화제용 캐비테이션 벤튜리 7.233 mm의 $C_{d_{wacc}}$ 와 K_f 값은 P_{ratio} 가 증가함에 따라 점점 증가하는 현상을 확인할 수 있었으며, 이는 캐비테이션 벤튜리 후단 압력이 임계 압력 보다 높아 질식이 되지 않아 과도한 유량이 흐른 것으로 판단된다. 이러한 현상은 연료용 캐비테이션 벤튜리 4.35 mm의 실험결과에서도 동일하게 관찰되었다.
- 3) 산화제용 캐비테이션 벤튜리와 연료용 캐비테이션 벤튜리를 RETF와 mRETF에서 각각 실험한 결과 유사한 유량특성을 나타내었다.
- 4) 설계, 제작한 캐비테이션 벤튜리들은 캐비테이션이 발생하는 영역에서 일정한 유량을 공급하는 것이 입증되었다. 그러나 실제 공급압력이 설계압력보다 작을 경우 P_{ratio} 가 증가함에 따라 캐비테이션 벤튜리의 기능을 하지 못해 유량을 일정하게 공급할 수 없는 구간을 알 수 있었다. 따라서 캐비테이션 벤튜리는 로켓엔진 연소시험설비와 같이 압력 강하량이 16% 이상인 시스템에서 매우 효과적일 것으로 판단된다.

References

1. Randall, L.N., "Rocket Applications of the Cavitating Venturi", *Journal of the American Rocket Society*, Vol. 22, No. 1, pp. 28-38, 1952.
2. Ghassemi, H. and Fasih, H.F., "Application of small size cavitating venturi as flow controller and flow meter," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 22, No. 5, pp. 406-412, 2011.
3. Yazici, B., "Numerical & Experimental Investigation of Flow Through a Cavitation

- Venturi," *Recent Advances in Space Technologies*, pp. 236-241, 2007.
4. Kumar, P.S. and Pandit, A.B., "Modeling Hydrodynamic Cavitation," *Chemical Engineering & Technology*, Vol. 22, No. 12, pp. 1017-1027, 1999.
 5. Xu, C., Heister, D. and Field, R., "Modeling Cavitating Venturi Flows," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 18, No. 6, pp. 1227-1234, 2002.
 6. Ulas, A., "Passive Flow Control in Liquid-Propellant Rocket Engines with Cavitating Venturi," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 17, pp. 93-97, 2006.
 7. Kim, S.H., Lim, B.J., Han, Y.M., Seol, W.S., Lee, S.Y. and Moon, I.Y., "LOx/Kerosene Sub-scale LRE Firing Test Facility", *Proceedings of The KSPE Fall Conference*, pp. 166-169, 2004.
 8. Kang, D.H., Lim, B.J., Moon, I.Y., Seo, S.H., Han, Y.M. and Choi, H.S., "Operation and Maintenance Techniques for Liquid Rocket Combustor Ground Firing Test Facility", *Journal of the Korea Society of Propulsion Engineers*, Vol. 11, No. 3, pp. 43-49, 2007.
 9. ANSYS Fluent Ver. 13 manual reference.
 10. Schnerr, G.H. and Sauer, J., "Physical and Numerical Modeling of Unsteady Cavitation Dynamics," *In Fourth International Conference on Multiphase Flow*, New Orleans, USA, 2001.