

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2015.19.4.001>

캐비테이션 벤츄리의 유동 특성에 대한 실험적 연구

윤원재^a · 안규복^{a,*}

An Experimental Study on Flow Characteristics of Cavitation Venturi

Wonjae Yoon^a · Kyubok Ahn^{a,*}

^aSchool of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Korea

*Corresponding author. E-mail: kbahn@cbnu.ac.kr

ABSTRACT

A cavitation venturi is a device that allows a liquid flow rate to be fixed or locked independent of a downstream pressure and has been successfully used in a liquid rocket engine system which requires a stable propellant flow rate. In the present research, four cavitation venturis which have same dimensions except for converging inlet angle and diverging outlet angle, were designed and manufactured. Flow rates through each venturi and upstream/downstream pressures were measured by changing the pressures. From the experimental data, the discharge coefficients and critical pressure ratios were calculated for each venturi. It was found that the inlet and outlet angles of the cavitation venturi affected the discharge coefficient, and the outlet angle influenced on the critical pressure ratio.

초 록

캐비테이션 벤츄리는 후단 압력에 상관없이 액체의 유량을 일정하게 유지시켜주는 장치로, 일정한 추진제 유량의 공급을 필요로 하는 액체로켓엔진 시스템에 성공적으로 사용되고 있다. 본 연구에서는 축소되는 유입각과 팽창하는 출구각 만이 다른 네 개의 캐비테이션 벤츄리를 설계, 제작하였다. 압력을 변경시켜가며 벤츄리를 통과하는 유량과 전/후단의 압력을 측정하였다. 실험결과로부터 각 벤츄리에 대한 유량계수와 임계 압력비를 계산하였다. 캐비테이션 벤츄리의 입구각과 출구각은 유량계수에 영향을 주었으며, 출구각은 임계 압력비에도 영향을 주는 것을 확인하였다.

Key Words: Cavitation Venturi(캐비테이션 벤츄리), Cold-flow Test(수류실험), Discharge Coefficient(유량계수), Critical Pressure Ratio(임계 압력비)

Received 17 June 2015 / Revised 6 July 2015 / Accepted 10 July 2015
Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

Nomenclature

A_t : throat area of cavitation venturi

| | |
|-------------------|--|
| A_{up} | : upstream area of cavitation venturi |
| Cd | : discharge coefficient |
| Cd_c | : discharge coefficient with cavitation |
| Cd_{nc} | : discharge coefficient without cavitation |
| \dot{m}_c | : mass flow rate with cavitation |
| \dot{m}_{nc} | : mass flow rate without cavitation |
| \dot{m}_{ideal} | : ideal mass flow rate |
| \dot{m}_{real} | : actual mass flow rate |
| P_{down} | : downstream pressure |
| P_r | : pressure ratio |
| P_t | : pressure at cavitation venturi throat |
| P_{up} | : upstream pressure |
| P_v | : vapor pressure |
| V_t | : velocity at cavitation venturi throat |
| Q | : volume flow rate |
| Q_r | : volume flow rate ratio |
| ρ | : liquid density |

1. 서 론

캐비테이션 벤츄리는 수축 및 팽창하는 노즐 목에서 공동이 발생하는 원리를 이용한 유체장치이다. 공동이 발생하면서 노즐 목을 통과하는 유체의 유량이 후단 압력에 상관없이 일정해지는 원리를 이용하여 유체 시스템의 유량제어에 사용된다[1]. Brennen[2]과 Kieffer[3] 등은 물과 수증기의 혼합물에서 음속이 수십 m/s로 낮아짐을 확인하였으며, 캐비테이션 벤츄리에서도 공동이 발생함에 따라 이상(two-phase) 유체의 속도가 음속에 도달하고 결국 유량이 질식된다고 설명되고 있다[4].

노즐 목에서 공동이 발생하기 위해서는 벤츄리 전/후단의 압력 차이(혹은 압력비)가 일정 값 이상이 되어야 한다. 벤츄리에서 송출되는 유량에 영향을 주는 요소는 전/후단의 압력과 노즐 목의 단면적, 벤츄리의 형상에서 오는 손실 밖에 없으므로, 유량제어를 위해 추가적인 동력이 요구되지 않으며 진동 등의 주변 환경에도 크게 영향을 받지 않고 유량제어를 할 수 있는 장점이 있다.

공동 현상은 장기적인 관점에서 캐비테이션 벤츄리에 손상을 줄 수 있지만 상대적으로 작은 크기, 간단한 구조 등의 장점으로 인해 짧은 시간동안 정밀한 유량제어가 요구되는 액체로켓엔진 시스템에 널리 사용되어 왔다[5-7]. 특히 액체로켓엔진 시스템은 압력과 유량이 정상적인 상태를 기준으로 설계되나, 점화초기에는 연소실 압력이 대기압 상태이기 때문에 유량제어를 위해 오리피스스를 사용하게 되면 추진체가 과잉 공급될 수 있는 위험이 존재하게 된다[8].

외국문헌들[9,10]을 살펴보면 액체로켓 개발 초기부터 캐비테이션 벤츄리 특성에 대해 상당한 연구를 수행하였음을 확인할 수 있으며, 최근에도 연구결과가 지속적으로 발표되고 있다[5,11]. 액체로켓엔진 시스템에서의 캐비테이션 벤츄리에 대한 국내의 논문은 두세 편[6,7,12] 밖에 찾아볼 수 없을 정도로 매우 부족한 편이다. 이는 그동안 외국의 자료를 활용하는 정도만으로도 캐비테이션 벤츄리를 설계, 제작, 활용하는데 어려움이 없었던 점도 있지만, 세밀한 연구를 수행할 만큼 노력을 하지 않은 점도 간과할 수 없다.

본 연구에서는 캐비테이션 벤츄리의 입구각과 출구각을 변수로, 이에 따른 벤츄리의 유량제어 특성을 살펴보았다. 이를 위해 입구각과 출구각이 다른 네 개의 캐비테이션 벤츄리를 설계, 제작하였으며, 벤츄리 전/후단의 압력을 변화시켜가며 수류실험을 수행하였다.

2. 이론적 배경

이상적인 오리피스나 노즐에서의 유량은 다음과 같은 식으로 전개된다.

$$\dot{m}_{ideal} = \rho Q = \rho A_t V = A_t \sqrt{2\rho(P_{up} - P_{down})} \quad (1)$$

하지만 마찰손실 등으로 인하여 실제 측정되는 유량은 이보다 작기 때문에 일반적으로 유량계수의 개념을 도입하여 다음과 같은 식이 사용된다.

$$\dot{m}_{real} = Cd A_t \sqrt{2\rho(P_{up} - P_{down})} \quad (2)$$

질량 보존식과 베르누이 방정식으로부터 벤츄리 목에서의 속도는 다음과 같이 표현된다. 여기서 $(A_t/A_{up})^2 \approx 0$ (현재 조건에서는 0.03)이기 때문에 일반적으로 첫 번째 항은 무시된다.

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

캐비테이션 벤츄리의 작동조건에 따라 공동이 발생할 수도 혹은 하지 않을 수도 있기 때문에 각각의 경우에 따라 다음과 같은 식이 일반적으로 사용된다.

$$\dot{m}_c = Cd_c A_t \sqrt{2\rho(P_{up} - P_v)} \quad (4)$$

$$\dot{m}_{nc} = Cd_{nc} A_t \sqrt{2\rho(P_{up} - P_{down})} \quad (5)$$

또한 벤츄리에서 공동의 발생 한계는 다음과 같은 전/후단 압력과 액체의 수증기압의 함수로 표현되어 나타난다.

$$P_r = \frac{P_{down} - P_v}{P_{up} - P_v} \approx \frac{P_{down}}{P_{up}} \quad (\because P_v \ll P_{down} \text{ or } P_{up}) \quad (6)$$

캐비테이션 벤츄리에 대한 이론적 수식들은 참고문헌[1,5,7]에 보다 자세하게 정리되어 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 캐비테이션 벤츄리

본 연구에 사용된 4개의 캐비테이션 벤츄리 사진 및 첫 번째 벤츄리의 도면을 Fig. 1에 제시하였다. 각 벤츄리들은 외형 크기, 노즐 목의 길이와 직경이 같으며, 입구각과 출구각만을 변경시켜서 제작하였다. 노즐 목의 직경과 길이는 모두 2 mm이며, 입구부와 출구부의 직경은 4.82 mm로 양 끝단에 직경 4.82 mm를 갖는 male

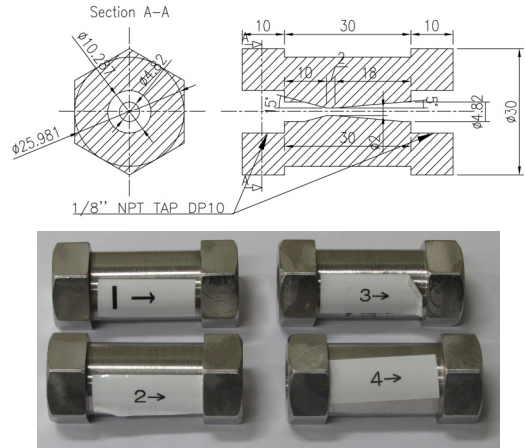


Fig. 1 Design and photographs of the cavitation venturis.

Table 1. Specification of the cavitation venturis.

| Item # | Inlet Angle (°) | Outlet Angle (°) |
|--------|-----------------|------------------|
| CV1 | 15 | 5 |
| CV2 | 30 | 5 |
| CV3 | 45 | 5 |
| CV4 | 30 | 10 |

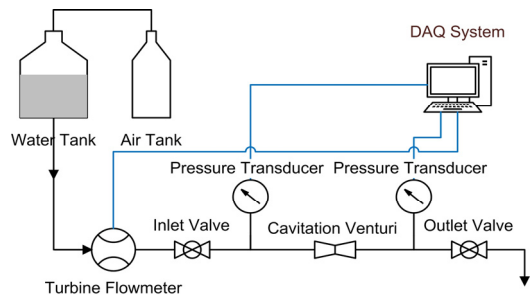


Fig. 2 Schematic of the test system.

connector가 연결될 수 있도록 하였다. 각 벤츄리에서 노즐 목의 위치는 동일하며, 벤츄리의 입구각과 출구각의 변화에 따라 입구와 출구의 straight 길이가 변하게 된다. 각 벤츄리의 형상 차이를 Table 1에 나타내었다. CV1에서 CV3까지는 출구각을 동일하게 5°로 설정하고 입구각을 증가시켰으며, CV4는 CV2와 동일한 입구각

에서 출구각에 변화를 주었다.

3.2 실험장치

실험유체로는 10°C의 물이 사용되었으며, 이때의 증기압 및 밀도는 각각 0.012 bar, 999.7 kg/m³이다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸다. 용기에 저장된 물은 고압 공기탱크에 설치된 레귤레이터에 의해 조절된 압력으로 가압되어 벤츄리로 공급되었다. 압력과 유량 측정을 위해, 벤츄리 전/후단에 압력계(Sensys, PSHD)를, 입구 밸브 전단에 터빈 유량계(KOMETER, NK-250)를 설치하였다. 측정된 데이터는 NI Compact-DAQ를 이용하여 수집되었다.

3.3 실험조건 및 방법

캐비테이션 벤츄리의 수류실험은 물탱크 가압 압력(레귤레이터) 기준으로 3 bar에서 10 bar까지 수행되었다. Fig. 2의 출구 밸브를 닫은 상태에서 물탱크부터 출구 밸브 전단까지 가압을 한 후 needle valve인 출구 밸브를 천천히 열어, full-open이 되면 실험을 종료하였다. 실험은 동일 가압조건에서 두 번씩 수행되었다.

4. 결 과

4.1 유량계수

CV1 벤츄리를 이용한 수류실험 결과를 Fig. 3에 도시하였다. 초기 10.5 bar 정도로 가압된 상태에서 출구 밸브를 서서히 열면 전/후단 압력이 모두 감소하며 유량은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이때 전단 압력의 감소는 유량 증가에 따른 동압의 증가와 배관 마찰손실 등에 기인한 것이다. 8초 정도에서 전단 압력이 9 bar, 후단 압력이 5.5 bar 정도가 되면, 더 이상 후단 압력을 낮추더라도 유량이 증가하지 않고 질식된 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 공동이 발생한 조건에서 전단 압력 변화에 따른 각 벤츄리의 유량 변화를 나타낸다. Eq. 4에서와 같이 유량 변화는 전단 압력의 제

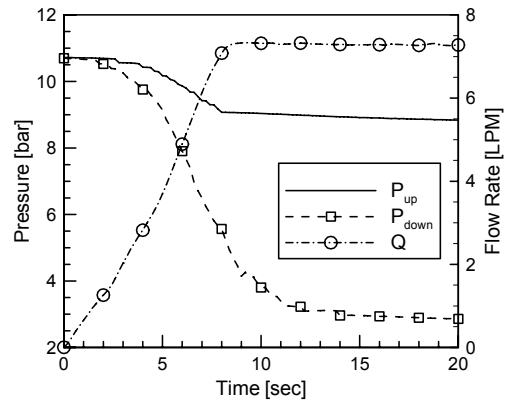


Fig. 3 Typical static pressures and mass flow rate for the CV1.

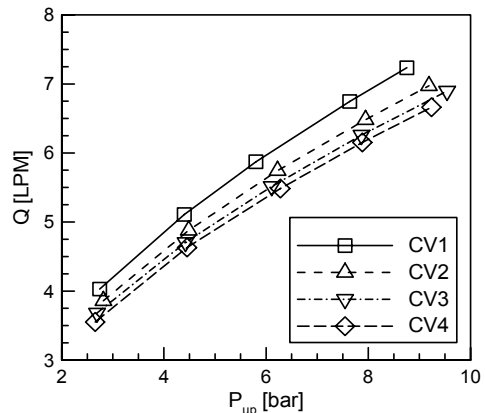


Fig. 4 Volume flow rates of each venturi as a function of P_{up} under cavitation.

곱근에 비례하기 때문에, 4개의 벤츄리 모두 전단 압력이 증가함에 따라 유량이 증가함을 확인할 수 있다.

캐비테이션 벤츄리의 유입각, 출구각에 따른 유량계수 특성을 살펴보기 위해 공동이 발생한 조건에서 Eq. 4를 이용하여 전단 압력에 따른 각 벤츄리의 유량계수를 계산하였다. 계산된 유량계수를 Fig. 5에 나타내었으며, 유입각, 출구각에 따라 유량계수 값이 차이가 남을 확인할 수 있었다.

동일 압력조건에서 유량 차이를 살펴보면, 입구각이 작을수록 유량이 많았으며, 입구각이 같은 CV2, CV4를 비교한 결과 출구각이 커진

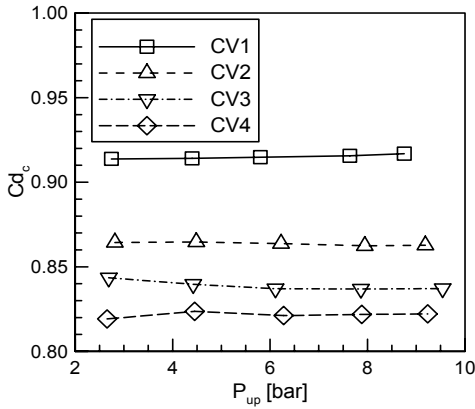


Fig. 5 Discharge coefficients of each venturi as a function of P_{up} under cavitation.

CV4가 유량이 더 적어졌다. 이러한 결과로부터 유량계수 또한 입구각, 출구각이 커지게 되면 작아지는 것을 알 수 있다. 이를 통해 입구각 및 출구각이 동일 압력조건에서 캐비테이션 벤츄리의 유량계수 성능에 상당한 영향을 준다는 것을 확인할 수 있었다. 사실 이는 예측 가능한 결과로 입구각과 출구각이 증가함에 따라 파이프 유동에서 잘 알려진 국부 손실(local loss)이 증가하기 때문이다[13]. 다만 흥미로운 점은 CV2 기준으로 입구각이 30° 에서 45° 로 증가하는 것보다 출구각이 5° 에서 10° 로 증가하는 것이 더 큰 유량계수 감소 효과를 유발하였다. 이로부터 기존 자료들[1,5,7]에서 출구각을 입구각 보다 작게 하는 이유를 짐작할 수 있다.

4.2 임계 압력비

캐비테이션 벤츄리의 유량제어 특성 중에 임계 압력비는 중요한 의미를 갖는다. 임계 압력비가 클수록 동일한 전단 압력조건에서 더 높은 후단 압력에서도 일정한 유량을 보낼 수가 있기 때문이다. CV1 벤츄리의 전단 압력에 따른 압력비 대 유량비(주어진 압력비에서의 유량/가장 작은 압력비에서의 유량)의 결과를 Fig. 6에, 동일한 전단 압력 9 bar에서의 각 캐비테이션 벤츄리의 압력비 대 유량비의 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이때 전단 압력은 소수점 첫째자리에서 반올림한 값을 의미한다.

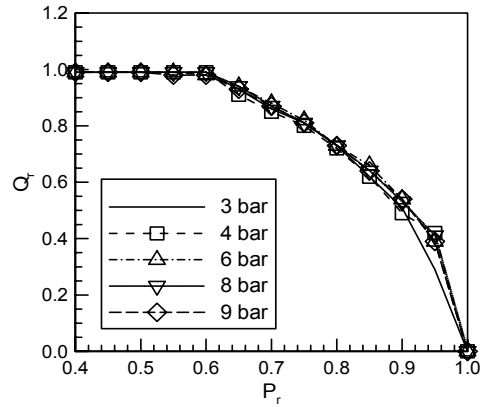


Fig. 6 Data of Q_r and P_r with respect to P_{up} for the CV1.

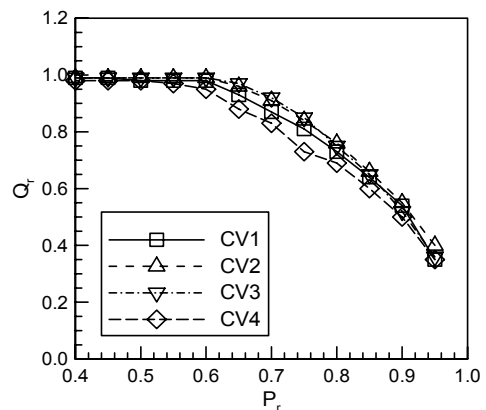


Fig. 7 Data of Q_r and P_r for each cavitation venturi at $P_{up} = 9$ bar.

Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 임계 압력비는 전단 압력에 상관없이 0.6으로 일정하며, 그래프의 경향성 또한 거의 동일함을 알 수 있었다. 동일한 형상 조건에서는 전단 압력에 상관없이 캐비테이션이 발생하는 임계 압력비가 일정하다고 판단할 수 있다. Fig. 7로부터 출구각이 같을 경우 임계 압력비는 입구각에 영향을 받지 않지만, 입구각이 클수록 떨어지는 기울기는 조금 완만해짐을 알 수 있었다. 이와는 달리 CV2와 CV4의 결과를 비교해보면, 입구각이 같더라도 출구각이 5° 에서 10° 로 증가하면 임계 압력비는 0.6에서 0.45로 크게 감소함을 확인할 수 있었다. 압력비가 임계 압력비 보다 커지게 되면 유량이

서서히 작아지기 때문에 임계 압력비는 Q_r 이 0.99 보다 작아지는 시점을 기준으로 하였다.

5. 결 론

캐비테이션 벤츄리의 입구각과 출구각에 따른 유량제어 특성을 살펴보기 위해 네 가지 벤츄리를 제작하여 수류실험을 수행하였다. 유량계수는 입구각과 출구각이 작을수록 커지는 결과가 나타났다으며, 출구각에 조금 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 임계 압력비는 본 연구의 형상 변화 조건에서는 입구각에 영향을 받지 않았지만 출구각의 작은 증가에는 매우 크게 감소함을 확인하였다. 향후에는 본 연구결과를 분석하기 위해 아크릴로 제작된 벤츄리의 수류실험과 Fluent를 이용한 수치해석이 수행될 예정이다.

후 기

본 논문은 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2014R1A1A1002057, NRF-2015M1A3A3A02011346)을 받아서 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Ghassemi, H. and Fasih, H.F., "Application of Small Size Cavitating Venturi as Flow Controller and Flow Meter," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 22, Issue 5, pp. 406-412, 2011.
- Brennen, C.E., *Cavitation and Bubble Dynamics*, Oxford Engineering Science Series, Oxford, UK, 1995.
- Kieffer, S.W., "Sound Speed in Liquid-Gas Mixtures: Water-Air and Water-Steam," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 82, No. 20, pp. 2895-2904, 1977.
- Ashrafizadeh, S.M. and Ghassemi, H., "Experimental and Numerical Investigation on the Performance of Small-Sized Cavitating Venturis," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 42, pp. 6-15, 2015.
- Ulas, A., "Passive Flow Control in Liquid-Propellant Rocket Engines with Cavitating Venturi," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 17, Issue 2, pp. 93-97, 2006.
- Kang, D., Ahn, K., Lim, B., Han, S., Choi, H.S., Seo, S. and Kim, H., "Flow Control Characteristics of the Cavitating Venturi," *Proceedings of the 2013 KSPE Spring Conference*, Busan, Korea, pp. 139-146, May 2013.
- Kang, D., Ahn, K., Lim, B., Han, S., Choi, H.S., Seo, S. and Kim, H., "Flow Control Characteristics of Cavitating Venturi in a Liquid Rocket Engine Test Facility," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 18, No. 3, pp. 84-91, 2014.
- Ahn, K., Han, Y.M., Seo, S. and Choi, H.W., "Effects of Injector Recess and Chamber Pressure on Combustion Characteristics of Liquid-Liquid Swirl Coaxial Injectors," *Combustion Science and Technology*, Vol. 183, Issue 3, pp. 252-270, 2011.
- Randall, L.N., "Rocket Applications of the Cavitating Venturi," *Journal of the American Rocket Society*, Vol. 22, No. 1, pp. 28-38, 1952.
- Fox, Z., "Cavitating Venturis and Sonic Nozzles," *National Conference on Fluid Power*, Chicago, USA, pp. 127-133, Oct. 1977.
- Xu, C. and Heister, S.D., "Modeling Cavitating Venturi Flows," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 18, No. 6, pp. 1227-1234, 2002.

-
12. Cho, W.K., Moon, Y.W., Kwon, O.S. and Cho, I.H., "Flow Rate Control Characteristics of a Cavitating Venturi in a Liquid Rocket Propellant Feed System," *The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 30, No. 6, pp. 46-52, 2002.
13. Idelchik, I.E., *Handbook of Hydraulic Resistance*, 3th ed., Begell House, Danbury, USA, 1996.