

음속 노즐의 임계 압력비에 대한 저 레이놀즈수의 영향

최용문* · 박경암* · 차지선** · 최해만* · 윤복현***
(2000년 5월 22일 접수)

Evaluation of Critical Pressure Ratios Sonic Nozzle at Low Reynolds Numbers

Yong Moon Choi, Kyung-Am Park, Tsi Sun Cha, Hae Man Choi,
and Bok Hyun Yoon

Key Words: Sonic Nozzle(음속 노즐), Critical Pressure Ratio(임계 압력비), Area Ratio(단면적 비)

Abstract

A sonic nozzle is used as a reference flow meter in the area of gas flow rate measurement. The critical pressure ratio of sonic nozzle is an important factor in maintaining its operating condition. ISO9300 suggested the critical pressure ratio of sonic nozzle as a function of area ratio. In this study, 13 sonic nozzles were made by the design of ISO9300 with different half diffuser angles of 2° to 8° and throat diameters of 0.28 to 4.48 mm. The test results of half diffuser angle below 8° are quite similar to those of ISO9300. On the other hand, the critical pressure ratio for the nozzle of 8° decreases by 5.5% in comparison with ISO9300. However, ISO9300 does not predict the critical pressure ratio at lower Reynolds numbers than 10⁵. Therefore, it is found that it is a better way for the flow of low Reynolds number to express the critical pressure ratio of sonic nozzle as a function of Reynolds numbers than using area ratios. A correlation equation of critical pressure ratio is introduced with uncertainty ±3.2 % at 95 % confidence level.

1. 서론

음속 노즐은 축소 확대 노즐로서 기체 유량 측정용 기준으로 사용되고 있으며 ISO9300:1990⁽¹⁾에 표준 형태와 유출 계수 및 사용 조건이 제시되어 있다. ISO9300에 제시된 유출계수는 불확도 ±0.5%로 사용할 수 있는 레이놀즈수(Re_d) 범위는 10⁵~10⁷까지이다.

음속 노즐은 하류 압력이 임계 압력보다 낮은

상태로 사용할 경우 목에서 질식이 발생되며 이때 질량 유량(q_m)은 상류의 정체 압력(P₀)과 정체 온도를 측정하면 일차원 isentropic 이상기체 방정식을 사용하여 계산할 수 있다. 이 질량 유량은 하류 조건에 관계없이 일정하다. 이때 임계압력비는 노즐 목 단면적(A_{th})과 확대부 단면적(A_{exit})의 비로 표현된다.

따라서 음속 노즐의 임계 압력비(P_{cr})는 확대부의 확대각과 길이에 영향을 받게 된다. 음속 노즐의 임계 압력비는 음속 노즐의 유출계수 확인하는 실험이나 실제 현장 운영 조건에 영향을 주게된다.^(2,3)따라서 가능한 큰 임계 압력비를 유지하는 것이 중요하다. ISO9300에는 표준 음속 노즐에 대한 임계 압력비를 단면적 비(A_{exit}/A_{th})

* 회원, 한국표준과학연구원

E-mail : kapark@kriss.re.kr

TEL : (042)868-5315 FAX : (042)868-5028

** 한국표준과학연구원

*** 회원, 목포대학교 기계공학과

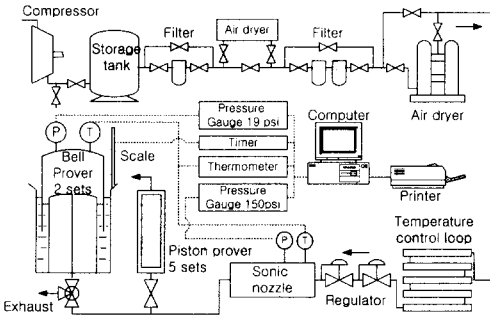


Fig. 1 Schematic diagram of gas flow measurement standard system

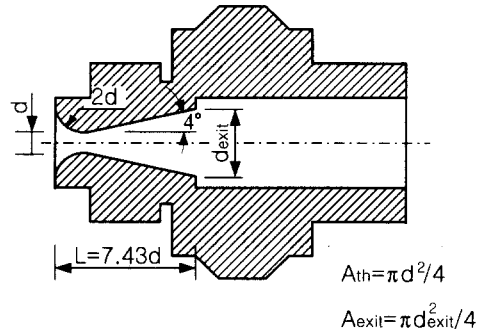


Fig. 2 Schematic diagram of sonic nozzle

로 제시하고 있으며 기준값은 일차원 isentropic 이상기체 조건을 사용하고 있다.

ISO9300에는 확대부 각도를 2° ~6° 로 제한하고 있는데 이는 각도가 커지면서 확대부에서 발생하는 압력 손실을 억제하는데 목적이 있다. 그러나 지금까지 확대 각도 변화에 의한 음속 노즐의 특성 변화는 자세히 발표된 내용이 없다. Brain and Reid⁽⁴⁾는 목 직경(d)이 다른 여러 개의 음속 노즐을 가공하여 단면적 비를 변화시켜 임계 압력비를 측정하였다. 실험에 사용한 음속 노즐의 목 직경은 약 1 mm~14 mm인데 확대부의 단면적 비가 2.2 이상이면 임계 압력비가 0.95로 일정하였다. 그들의 결과는 Hillbrath et al.⁽⁵⁾이 이상기체에 관한 임계 압력비를 사용하여 실제 노즐의 임계 압력비를 계산하기 위한 결과와 잘 일치하였으나 목 직경이 1.26 mm이고 단면적 비가 39인 경우에는 임계 압력비가 감소하였다.

Hillbrath et al.⁽⁵⁾은 확대부 각도가 6° 이상이고 레이놀즈수가 4×10⁴이하인 경우에 임계 압력비가 크게 감소함을 관찰하였고 확대부 각도가 3° 인 경우에는 발생하지 않았다. Nakao et al.⁽⁶⁾는 질소, 알곤, 및 이산화탄소를 사용하여 레이놀즈수 40~3×10⁴ 범위에서 실험한 결과를 발표하였다.

본 연구에서는 ISO9300에 제시된 임계 압력비가 레이놀즈수 10⁵~10⁷까지이므로 그 이하에서 음속 노즐의 임계 압력비 변화를 확인하였으며 확대부 각도를 변화시켜 실험하였다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 실험에 사용한 장치의 개략도이다. 압축기에 의해 약 0.8 MPa로 압축된 공기는 2단계의 건조와 필터를 거쳐서 이슬점 온도는 약 -40℃로 유지된다. 음속 노즐 전단에는 압력 조절기가 설치되어 음속 노즐 전단의 정체 압력을 일정하게 유지하며 압력과 온도 센서로 정체 온도와 압력(P₀)을 측정한다. 음속 노즐의 후단에 밸브를 설치하여 후단압(P_b)을 조절하여 전후압력비(P_b/P₀)를 변화시킨다. 음속 노즐 상류의 압력을 0.25~0.6 MPa로 변화시키며, 벨 푸루버를 사용하여 질량 유량을 확인하였다. 벨 푸루버는 이중 원통으로 구성되어 있으며 내부로 유입되는 공기에 의해 외통이 상승된다. 외통의 내부 단면적은 정밀 π-tape을 사용하여 측정되어 있으며 상승 높이는 불확도 5 μm인 리니어 스케일을 사용하여 측정한다. 공기 수집 시간은 외통 지지부에 부착한 광학 센서를 사용하여 타이머로 측정한다. 또한 부피 유량을 질량 유량으로 환산하기 위하여 벨 푸루버 내부의 압력과 온도를 측정하였다.

실험은 음속 노즐 하류 압력을 대기압부터 상류 압력까지 변화시키며 각 하류 압력에서 질량 유량을 측정하였다. 예상되는 임계 압력비 근처에서는 하류 압력을 미세하게 변화시켜 정확한 임계 압력비를 측정할 수 있도록 하였다.

음속 노즐의 하류 압력이 임계 압력에 도달하기 전까지는 음속 노즐을 통과하는 질량 유량은 일정하지만 임계 압력에 도달하면 질량 유량은

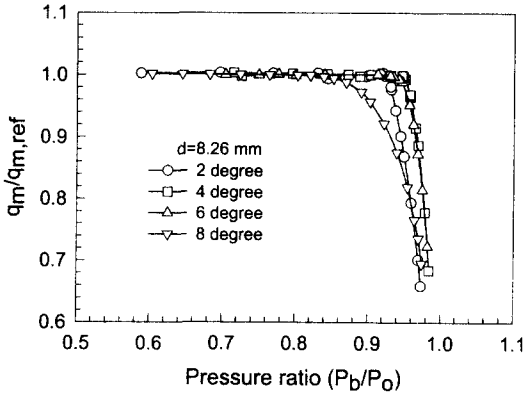


Fig. 3 Effect of diffuser angle on the mass flow rate

급격히 감소한다. 질량 유량이 급격히 감소하는 지점을 임계 압력 도달 지점으로 판단하였다.

본 실험에 사용한 벨 푸루버 시스템의 유량 측정 불확도가 ±0.2 %이므로 하류 압력이 대기압인 상태의 질량 유량을 기준으로 질량 유량비 ($q_m/q_{m,ref}$)가 0.998에서 0.997로 떨어지는 지점의 압력비를 임계 압력비로 결정하였다.

실험에 사용한 음속 노즐은 목 직경이 0.28 mm부터 8.26 mm까지 총 13개이다. 기본 설계는 ISO9300에 제시된 Toroidal Critical Venturi 설계 값을 적용하였으며 Fig. 2와 같이 가공하여 실험 배관에 설치할 수 있도록 하였다. 노즐 유입구는 목 직경의 2배인 반경으로 가공되었으며 확대부의 확대 반각은 0.28 mm부터 4.48 mm까지는 4°이며 확대부 길이는 목 직경을 기준으로 같은 배수의 값을 사용하였기 때문에 단면적 비는 3.35로 일정하다. 목 직경이 평균 8.26 mm인 음속 노즐 4개는 Fig. 2와는 외양이 다르나 기본 설계값은 동일하다. 확대부의 확대 반각은 2° ~ 8°로 변화시켜 가공하였으며 단면적 비는 약 2.4 ~ 7.5로 변화된다.

실험을 시작하기 전에 최대 유동을 근처에서 전체 시스템을 가동하여 벨 푸루버 및 시험관 내부의 온도를 일정하게 유지하도록 하였다.

3. 실험결과

Fig. 3은 목 직경이 8.26 mm인 노즐을 확대부

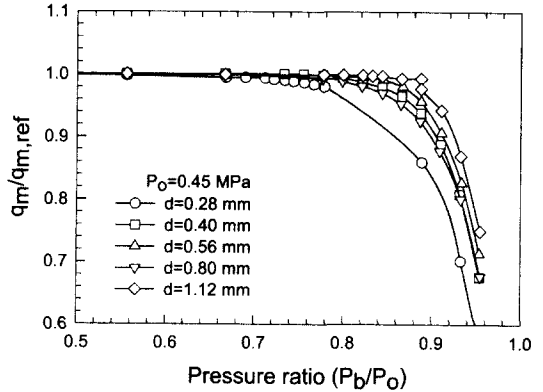


Fig. 4 Variation of mass flow rate with back pressure ($d \leq 1.12$ mm)

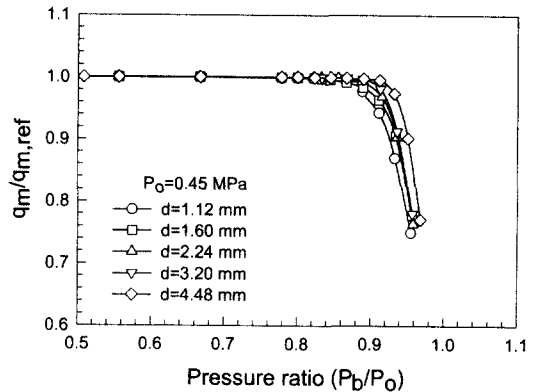


Fig. 5 Variation of mass flow rate with back pressure ($d \geq 1.12$ mm)

각도를 2° ~ 8°로 가공하여 음속 노즐 전후 압력비를 변화시켜 실험한 결과이다. 음속 노즐 전단의 정체압력은 0.8 MPa로 일정하였으며 후단압이 대기압일 때 질량 유량을 기준으로 결과를 정리하였다. 확대부 반각이 2° ~ 6°인 경우에는 임계 압력비가 0.92 이상이며 Brain and Reid⁽⁴⁾의 결과와 일치하고 있다. 그러나 반각이 8°인 경우에는 임계 압력비가 0.85이다. 이러한 현상은 확대부의 급속한 단면적 팽창에 의해 발생하는 박리로 인해 유동 단면적이 축소되기 때문이라고 생각된다. 따라서 다른 확대 각도에서는 임계 압력비 이후에 질량 유동율이 급격히 감소하지만 8°에서는 서서히 질량 유동율이 감소하는 현상이 관측되고 있다.

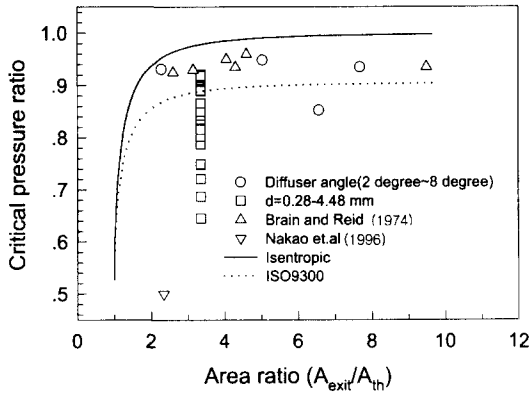


Fig. 6 Test results of critical pressure ratio

Fig. 4는 목 직경 0.28 mm부터 1.12 mm까지 5개 음속 노즐의 압력비 변화에 대한 질량 유량의 변화 결과이다. 노즐의 정체 압력은 0.45 MPa로 일정하게 유지하여 실험하였다. 질량 유량 변화를 기준으로 판단한 임계 압력비는 0.70~0.83까지 변화된다. 임계 유동 상태에서 목 직경이 커짐에 따라 임계 유동이 유지되는 압력비가 증가함을 알 수 있다. 정체 압력이 일정할 때 목 직경이 작아지면 임계 압력비가 낮아지며, 임계 압력비 근처에서 질량 유동을 변화의 기울기가 완만해짐을 볼 수 있는데 이것은 질량 유동이 임계 압력비 근처에서 점진적으로 감소함을 의미한다.

Fig. 4에서 목 직경 0.8 mm인 경우 레이놀즈수는 약 4.7×10^4 이며 1.12 mm에서는 6.3×10^4 이다. Fig. 5에는 목 직경 1.12 mm에서 4.48 mm 음속 노즐의 실험 결과를 나타내었다.

Fig. 5에서 목 직경이 커짐에 따라서, 즉 레이놀즈수가 커짐에 따라 임계 압력비도 0.83에서 0.89로 커짐을 알 수 있으며 임계 압력 근처에서 질량 유동율의 변화 기울기는 거의 일정함을 확인하였다.

Fig. 6은 음속 노즐의 임계 압력비를 단면적 비에 따라 나타낸 것이다. 일반적으로 임계 압력비는 단면적 비의 함수로 표현되며 ISO9300에는 isentropic 상태의 임계 압력비를 기준으로 표현되어 있다. 앞에서 언급하였듯이 $d=0.28 \sim 4.48$ mm 음속 노즐의 임계 압력비는 단면적 비가 동일하지만 다른 값을 나타낸다. 레이놀즈수에 의

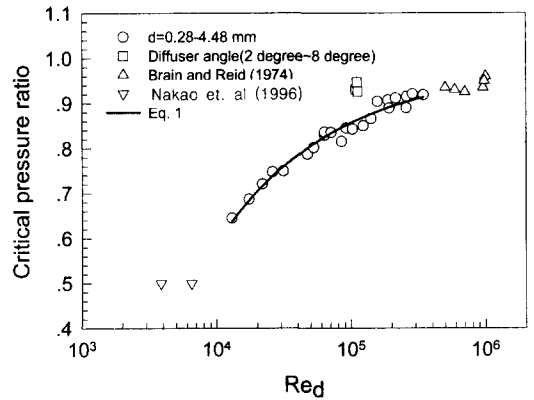


Fig. 7 Critical pressure ratio vs. Red

한 영향을 정확히 파악하기 위하여 정체 압력을 0.3 MPa에서 0.6 MPa까지 변화시켜 실험하였다.

Fig. 6에서 확대부의 각도가 2°~6°인 경우에는 임계 압력비에 별 영향을 미치지 않았으나 8°에서는 isentropic 이론값과 -14.3%, ISO9300과는 -5.5%의 차이를 나타내었다.

Brain and Reid⁽⁴⁾는 단면적 비 4.3, 3.15, 2.6, 9.5, 4.6, 4.05로 하여 실험한 결과 임계 압력비 $0.94 \pm 1\%$ 를 보여 단면적 비 변화가 임계 압력비에 큰 영향을 미치지 않음을 보인다. Nakao et al⁽⁶⁾는 노즐 단면적 비 2.34로 임계 압력비 0.5를 가지며 다른 실험의 비슷한 목 직경비를 가진 데이터와 연관성을 보이지 않는다. 본 실험에서 사용한 4.48 mm 이하 음속 노즐의 확대부는 4°이하 목 직경에 따라 등 엔트로피와 9.04~28.1%, ISO9300과는 -0.17~20.8%의 오차를 보이며, 단면적 비에 관계없이 임계 압력비가 변화함을 볼 수 있다.

여러 실험의 데이터들을 분석한 결과 임계 압력비에 영향을 미치는 변수는 레이놀즈수가 작아지면 단면적 비보다는 목 직경의 영향이 더 큰 것으로 판단된다. 따라서 단면적 비로는 낮은 레이놀즈수에서 음속 노즐의 임계 압력비를 표현할 수 없으므로 임계 압력비와 노즐 목에서 레이놀즈수의 관계를 정리하여 나타낸 것이 Fig. 7이다.

Fig. 7에 나타낸 데이터는 목 직경 4.48 mm 이하 음속 노즐을 사용하여 정체 압력을 0.3 MPa부터 0.6 MPa까지 0.1 MPa 간격으로 하여 실험한

결과이다. Fig. 7에 나타낸 실선은 실험 결과를 레이놀즈수의 함수로 정리한 결과이며 관계식은 다음과 같다. 식 (1)의 95% 신뢰구간에서 불확도는 $\pm 3.2\%$ 이다.

$$P_{cr} = 0.9801 - 39.046 \times Re_d^{-0.5} \quad (1)$$

여기서, P_{cr} 은 임계 압력비이다. 임계 유동 상태에서 음속 노즐의 임계 압력비는 레이놀즈수 $1.2 \times 10^4 \leq Re_d \leq 3.4 \times 10^5$ 범위에서 Re_d 가 커짐에 따라 증가한다. 또한, $Re_d = 1.5 \times 10^5$ 이상에서 임계 압력비는 0.9로 수렴하려는 경향을 보인다. 본 실험에서 측정된 가장 작은 임계 압력비는 0.65이다. 음속 노즐 목 직경이 작아지고 레이놀즈수가 작아짐에 따라서 임계 압력비도 작아지는 것은 음속 노즐의 입구와 확대부에 형성되는 경계층의 두께가 목 직경에 비해 상대적으로 커지는 것에 원인이 있다고 생각된다. Nakao et al.⁽⁶⁾과 Brain and Reid⁽⁴⁾의 실험 결과도 본 실험 결과의 변화 방향에 위치함을 알 수 있다.

4. 결 론

확대부 각도를 $2^\circ \sim 8^\circ$ 로 변화시켜 제작한 음속 노즐과 목 직경이 4.48 mm 이하인 소형 음속 노즐을 사용하여 임계 압력비를 실험하였다.

확대부 각도는 ISO9300에 제시된 $2^\circ \sim 6^\circ$ 범위에서는 임계 압력비에 별다른 영향을 미치지 않았으며 측정된 임계 압력비는 ISO9300이나 Brain and Reid⁽⁴⁾의 결과와 일치하였다. 그러나 확대부 각도가 8° 인 경우에는 0.85의 낮은 값을 나타냈으며 급격한 확대에 의한 유동 박리에 의한 영향으로 생각된다.

목 직경이 4.48 mm 이하인 소형 음속 노즐을 사용하여 임계 압력비를 측정할 결과는 같은 단면적비라도 레이놀즈수에 따라서 임계 압력비가 크게 변화하는 것을 발견하였다. 따라서 레이

놀즈수가 10^5 이하인 경우에는 단면적 비를 사용한 ISO9300의 임계 압력비 계산식보다는 레이놀즈수로 정리된 식 (1)을 사용하는 것이 노즐 목에서 임계 유동을 유지하는데 도움이 된다고 생각된다.

식 (1)을 사용하여 임계 압력비를 계산하여 사용할 경우에는 레이놀즈수 10^5 이상에서는 급격한 질량 유동을 감소가 발생하지만 10^5 이하에서는 임계 압력비 전후에서 완만한 기울기로 질량 유동율이 변화함을 주목해야 한다. 따라서 식 (1)로 계산된 임계 압력비에 충분한 안전 계수를 곱하여 사용하는 것이 바람직하다.

참고문헌

- (1) ISO 9300, 1990, Measurement of Gas Flow by means of Critical Flow Venturi Nozzles.
- (2) 박경암, 1994, "임계음속노즐의 입구형상이 유출 계수에 미치는 영향," 대한기계학회, 제18권 제3호 pp. 701~706.
- (3) 유성연, 이상윤, 박경암, 1996, "소닉노즐의 유출 계수에 영향을 미치는 인자에 관한 연구," 대한기계학회, 제20권 제12호 pp. 4027~4035.
- (4) Brain, T. and Reid, J., 1974, "Operating Characteristics of Circular Arc Critical Flow Venturies," Nation Engineering Laboratory Report 564.
- (5) Hillbrath, H. E., 1981, "The Critical Flow Ventury an Update, Flow: Its Measurement and Control in Science and Industry," Edited by W.W Durgin, Instrument Society of America, Vol. 2, pp. 407 ~420.
- (6) Nakao, S., Yokoi, Y., and Takamoto, M., 1996, "Development of a Calibration facility for Small mass flow rates of Gas and Uncertainty of a Sonic Venturi Transfer Standard," Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 7, pp. 77~83.