

소형 소닉 노즐의 유출계수에 관한 실험적 연구

차지선* · 박경암** · 최용문** · 최해만** · 윤복현*

An Experimental Study on the Discharge Coefficients of Small Sonic Nozzles

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

Key Words: Sonic Nozzle(소닉 노즐), Throat Diameter(목 직경), Discharge Coefficient(유출계수)

ABSTRACT

Small sonic nozzles (throat diameter 0.28~4.48 mm) were tested in the gas flow standard system. This standard system is composed of two bell provers and 5 column piston provers, compressor, filters, and dehumidifier. The discharge coefficients of small sonic nozzles are obtained and correlated as a function of throat Reynolds numbers with 0.316% uncertainty at a confidence level 95%. The tested high Reynolds number was the lower limit of ISO 9300 specifications. The data are useful as data base for revision of ISO 9300.

1. 서 론

반도체, 의학, 화학 공업, 환경 분야등 다양한 분야에서 미소 질량 유량 측정의 필요성이 증대되어지고 있다. 특히 우주, 항공 가스 산업계에서는 정확한 가스 유동을 측정 및 제어를 위해 여러 유량계 중 소닉 노즐의 사용 범위를 급속히 넓혀가고 있다. 소닉 노즐은 최대 유동량 측정 범위가 입구측 압력 변화 범위 내에서 제한을 받기 때문에 넓은 유동율 범위에서 소닉 노즐을 사용하기 위해서는 노즐목의 구경이 각각 다른 노즐을 다수 사용해야 하는 단점이 있으나, 노즐을 통과하는 질량 유량이 노즐 하류측에서 발생하는 유동 교란이나 압력 변동에 영향을 받지 않고 일정하게 유지되며 유량 계산을 위해서 노즐 상류 측의 온도 압력

만 측정하면 되는 장점이 있다. 또한 용이한 작동과 이동, 높은 효율성과 재현도, 높은 불확도 등으로 사용 범위가 확대되고 있다. 이 소형 소닉 노즐은 가정용 가스미터, 면적식 유량계등 거래용, 생산 공정, 연구에 사용되는 많은 유량계를 교정하는 기준 유량계로 사용되고 있으며 국가 교정 검사 기관에서도 기준 유량계로 사용되고 있다. 소닉 노즐을 기준 유량계로 사용하기 위해서는 기체 유량 표준 시스템을 사용하여 유출 계수(Cd, discharge coefficient)를 구해야 한다. 이론적인 질량 유동율과 실제 질량 유동율은 차이가 있으며 그 비가 유출계수이다. 소닉 노즐에서 발생하는 유동 특성은 이상 기체 1차원 등엔트로피(isentropic) 유동 방정식을 사용하여 이론적으로 예측할 수 있다.

Hillbrath⁽¹⁾와 ISO 9300⁽²⁾은 소닉 노즐의 유출 계수를 레이놀즈 수의 함수로 정리하였다. ISO 9300의 Toroidal throat Venturi 노즐과 Cylindrical throat Venturi 노즐은 Grace & Lapple⁽³⁾, Kastner et al.⁽⁴⁾에 의해 유출 계수에 대해 연구되었고 실제 질량 유동율이 이론 질량 유동

* 목포대학교 기계공학과

** 한국표준과학연구원 유체유동그룹

E-mail : mingky72@hanmail.net

율에 접근함을 발표하였다.

Startford⁽⁵⁾는 곡물 반경이 노즐 목 직경의 2배 근처에서는 경계층이 층류에서 난류로 천이가 일어날 때 유출 계수의 변화가 적어 소닉 노즐의 최적 곡물 반경은 노즐 목 직경의 2배라 하였다. Sparkes⁽⁶⁾는 Startford가 제안한 형상으로 소닉 노즐을 제작하여 유출 계수가 Red=106 일 경우 $0.995 \pm 0.25\%$, Red=107 이면 $0.9965 \pm 0.2\%$ 임을 발표했다.

본 연구는 소형 소닉 노즐의 특성에 관한 미흡한 연구를 보충하고 ISO 9300의 보완에 필요한 데이터를 확보하는 데에 의의가 있다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1. 실험 장치

소닉 노즐의 유출 계수를 측정하는 시스템(Fig. 1)은 한국표준과학연구원에 설치되어 있다. 한국표준과학연구원에 설치된 상압기체 표준유량시스템인 피스톤 푸루버, 벨 푸루버를 사용하였으며 이 실험 장치는 공기 압축기, 저장탱크, 공기필터, 건조기, 압력조절밸브, 백금저항온도계, 압력계, Universal counter 및 소닉노즐 패키지로 구성되어 있다.

압축기는 1대이며 출력은 30 hp(22 kw), 공기 토출량은 $3.1 \text{ m}^3/\text{min}$, 압축 방식은 Screw 회전형 1단 압축이고 냉각방식은 공냉식이다. 토출 관경은 32 mm이며 공기 필터, 오일 필터, 전단 필터가 부착되어 있다.

압축공기는 냉동식 공기 건조기와 흡착식 공기 건조기에서 계습 및 불순물 입자를 제거한다. 압축기로부터 약 38°C 의 고온 다습한 압축 공기가 냉동식 공기 건조기 입구로 들어와 노점 4°C 이하로 냉각되며 응축수는 외기로 배출된다. 포화 공기 처리량은 $4.25 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 이며, 허용 압력은 1.05 MPa 이고 냉각 방식은 공냉식이다. 흡착식 공기 건조기는 공기 중에 포함된 미세한 유분, 수분, $5 \mu\text{m}$ 이상의 입자를 제거한다. 공기건조기를 거친 노점 -60°C 의 건조 압축공기는 4 m^3 의 저장 탱크에 저장된다. 저장 탱크의 허용압력은 1 MPa 이며 소닉 노즐 입구의 압축 공기 온도 안정화를 위해 실내에 직경 100 mm, 길이 6 m, 0.0471 m^3 의 온도 안정관 10개가 병렬로 연결되어 있다.

소닉 노즐 실험 관로에 공기 질량 유량을 안정적으로 제어하기 위하여 압력 조절기를 1차 압력조정에 1대와 2차 압력조정에 2대를 설치하였다.

소닉 노즐 패키지는 Fig. 2와 같으며 ISO 9300에서 제안한 규정을 기초로 제작하였다. 노즐 상류 500 mm 지점에 정체 온도 측정을 위한 백금 저항 온도계를 설치

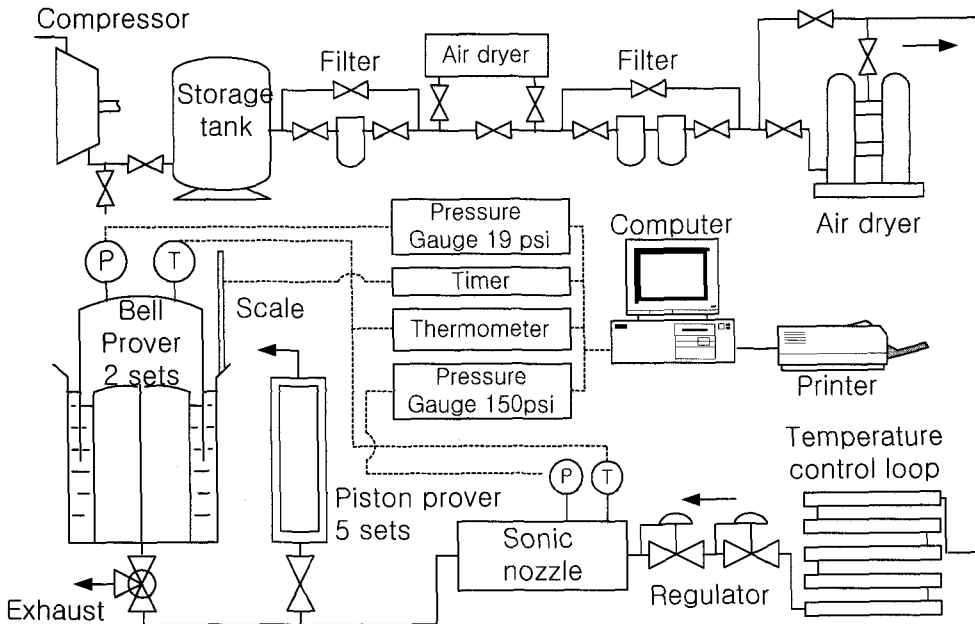


Fig. 1 Schematic diagram of gas flow measurement standard system

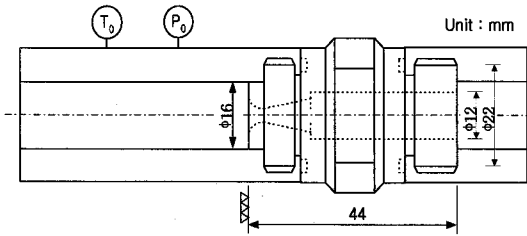


Fig. 2 Sonic nozzle package

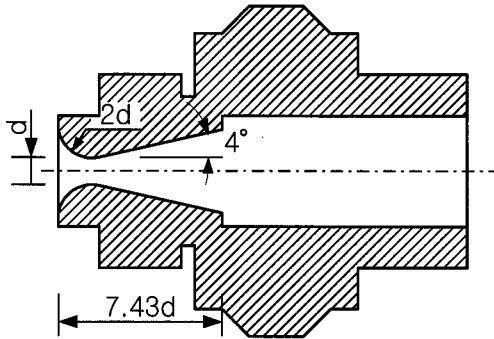


Fig. 3 Sonic nozzle shape

하였고, 노즐 상류 1 D 지점에서 정체 압력을 측정하였다.

Fig. 3은 시험 관로 내에 설치되는 소닉 노즐의 상세도이며, ISO 9300에 기초하여 제작하였다. 유동율은 노즐 목 직경 d를 변화시키면 조절이 가능하다. 시험 관로를 통과한 공기는 푸루버에 의해서 부피가 측정된다.

2.2. 실험 방법

소닉 노즐을 통과하는 기체의 조성이 일정하면 질량 유동율을 변화시키는 가장 효과적인 방법은 소닉 노즐 목 단면적을 변화시키는 것이며, 단면적비를 2의 배수로 하는 노즐들을 조합하면 유동율의 변화를 연속적으로 시킬 수 있다.

ISO 9300에 따라 설계된 목 직경 0.28 mm부터 4.48 mm까지인 소닉 노즐 9종류를 가지고 교정 및 특성 실험한 노즐 총 개수는 43개이다. 이는 모두 한국표준과학연구원에서 제작한 것이며 1 set 9개는 연구원에 있으며 나머지는 타 회사에서 보유하고 있으며 기준 유량계로 사용중이다.

소닉노즐은 직경 100 mm의 단관에서 정체 압력을 최저 0.2 MPa에서 최대 0.65 MPa까지 실험 가능하고 반복성을 확인하기 위해 3회 반복 실험하였다. 수집은 60초

이상하였으며 목직경 0.28 mm부터 0.4 mm까지는 피스톤 푸루버로, 0.56 mm부터 4.48 mm까지는 벨 푸루버로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

목 직경 0.28 mm, 0.4 mm, 0.56 mm, 0.8 mm, 1.12 mm, 1.6 mm, 2.24 mm, 3.2 mm, 4.48 mm인 9종류 43개의 소닉 노즐들을 실험하였으며 유출 계수는 Fig. 4와 같다. Fig. 4의 데이터들은 ISO 9300과 다른 경향을 보이고 있는데 이것은 소닉 노즐 목직경 측정에 사용된 투영기의 측정 불확도가 2 μm으로 목직경 측정 정확도가 떨어지기 때문이다. 노즐 목직경이 0.28 mm 경우에 불확도는 ±0.7%이다. Fig. 4에서 4.48 mm만이 ISO 9300과 같은 경향을 보인다. 유출 계수는 레이놀즈 수의 함수이므로 같은 레이놀즈 수에서 유출 계수는 같아야 한다. 따라서 목 직경을 약간 조정하면 같은 레이놀즈 수에서 유출 계수를 같게 할 수 있으며 이 조정된 목 직경이 정확한 값이라고 추측된다.

이와 같이 목 직경을 조정하여 유출 계수를 레이놀즈 수의 함수로 구할 수 있다. 목 직경 4.48 mm의 유출 계수는 한국표준과학연구원에서 이전에 실험한 결과⁽⁷⁾와 일치하고, ISO 9300값과도 일치하므로 4.48 mm의 유출 계수의 경향과 일치하게 3.2 mm의 목 직경을 조정하고 목 직경 3.2 mm의 조정된 유출 계수의 경향에 맞추어 2.24 mm의 목 직경을 조정하였다.

이와 같이 목 직경이 작아지는 순서로 목 직경을 조정하여 나타낸 것이 Fig. 5이다. 목 직경의 측정값과 조정된 목 직경, 즉 Fig. 4와 Fig. 5에서 사용한 목 직경은

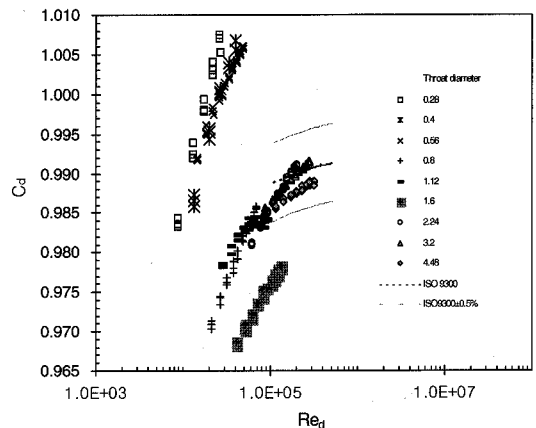


Fig. 4 Discharge coefficients as a function of Reynolds number

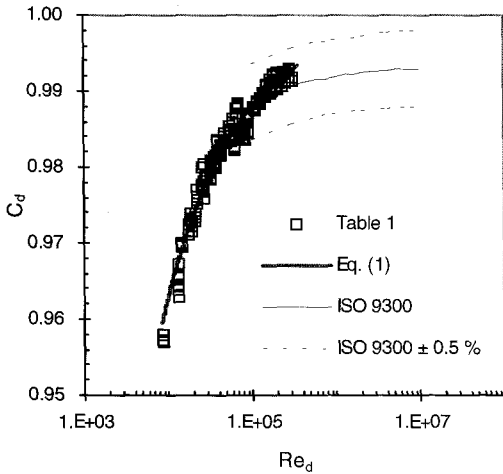


Fig. 5 Discharge coefficients using modified throat diameters (9 nozzles)

Table 1 Modified sonic nozzle throat diameters

Design d(mm)	measured d (mm) used in Fig. 4	modified d (mm) used in Fig. 5
0.28	0.3372	0.3418
0.40	0.5110	0.5171
0.56	0.5708	0.5773
0.80	0.8441	0.8430
1.12	1.1159	1.1156
1.60	1.6316	1.6215
2.24	2.4102	2.4285
3.20	3.3455	3.3385
4.48	4.4624	4.4559

Table 2 Modified sonic nozzle throat diameters

Design d (mm)	modified d*(mm)			
	K. Co.	J. Co.	HL. Co.	E. Co.
0.28	0.3610	0.3420	0.4495	0.3680
0.40	0.5556	0.5281	0.5181	0.5632
0.56	0.6029	0.5907	0.6082	0.5561
0.80	0.7598	0.7902	0.7651	0.7275
1.12	1.1165	1.1241	1.1468	1.1080
1.60	1.6561	1.6405	1.6251	1.6663
2.24	2.3285	2.2603	2.3170	2.3325
3.20	3.2653	3.3115	3.2565	
4.48	4.4523	4.4630	4.4628	

경은 Table 1에 비교되어 있다.

Fig. 5의 유출 계수를 이론적으로 제시된 $Re_d^{-0.5}$ 의 1차 함수의 상관식은 95% 신뢰도 구간에서 다음 식과 같다.

$$C_d = 0.9995 - 3.6601 Re_d^{-0.5}$$

uncertainty : $\pm 0.316\%$ (1)

$Re_d^{-0.5}$ 의 계수가 ISO 9300에서 제시한 1.525보다 큰 3.3436으로 Re_d 가 작아지면 유출 계수가 급격한 강하 현상을 보인다.

작은 소닉 노즐들의 목 직경을 정확히 측정하는 것이 어려우므로 교정 검사 기관에서 사용할 소닉 노즐은 제작시 주어진 공칭 목 직경을 수정하여 식 (1)에 유출 계수를 맞추어 조정된 목 직경이 Table 2이며 유출 계수는 Fig. 6과 같다. 식 (1)과 조정된 목 직경을 사용한 유출 계수의 편차는 95% 신뢰도 구간에서 $\pm 0.316\%$ 이다. 따라서 식 (1)을 사용하면 목 직경을 정확히 측정하지 않아도 목 직경을 상당히 정확하게 얻을 수 있다.

Fig. 7은 식 (1)과 Amberg⁽⁸⁾, Brain and Macdonald⁽⁹⁾와 Nakao et al.⁽¹⁰⁾, Miralles⁽¹¹⁾의 결과를 비교한 것이다.

Nakao등은 $9.0 \times 10^2 \leq Re_d \leq 4.4 \times 10^3$ 의 범위에서 실험을 수행하여 본 논문에서 다루지 못한 영역의 데이터를 얻었으며 다만 같은 목 직경을 가진 본 실험의 노즐들에 비해 레이놀즈 수가 낮은 것은 시스템의 가스 유동 발생 방법의 차이 때문이다. 본 실험은 Blow-down 방법으로 노즐 상류 압력이 0.2MPa이상이고 노즐

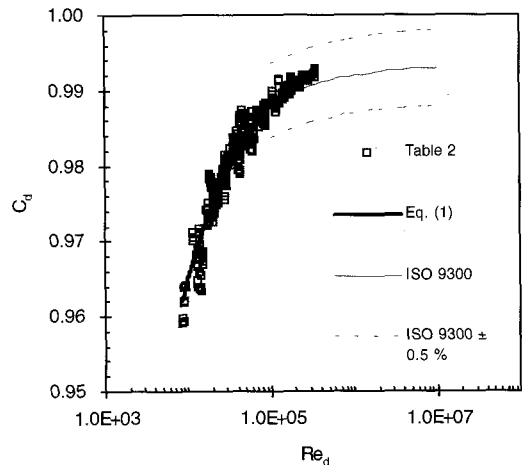


Fig. 6 Discharge coefficients using modified throat diameters (43 nozzles)

후단 압력이 대기압임에 비하여 Nakao등은 노즐 상류 압력이 0.1 MPa이고 노즐 후단이 진공으로 유지하는 흡입 방법으로 실험하였다. 따라서 같은 크기의 노즐을 사용하여도 레이놀즈 수의 범위가 다르다. Amberg의 노즐은 목 직경 0.15 mm부터 1.37 mm까지의 17종류이다. 데이터들은 본 실험과 같은 레이놀즈 수 범위에서 유출 계수 변화 경향이 같으며 본 실험보다 큰 레이놀즈 수 범위에서도 유출 계수 변화 기울기는 같음을 확인할 수 있다.

Brain and Macdonald는 ±0.3% 오차를 가진 실험 시스템으로 $3.1 \times 10^5 \leq Re_d \leq 8.7 \times 10^5$ 범위에서 실험했다. $Re_d \geq 105$ 인 경우 ISO 9300과는 ±0.4% 이내에서 일치하며 본 실험의 데이터들보다 큰 레이놀즈 수 범위에서 데이터가 위치한다.

Miralles는 확대부가 없는 목 직경 1.165 mm, 1.555 mm, 2.080 mm 소닉 노즐로 실험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 7에서 본 실험의 결과와 비교하였다.

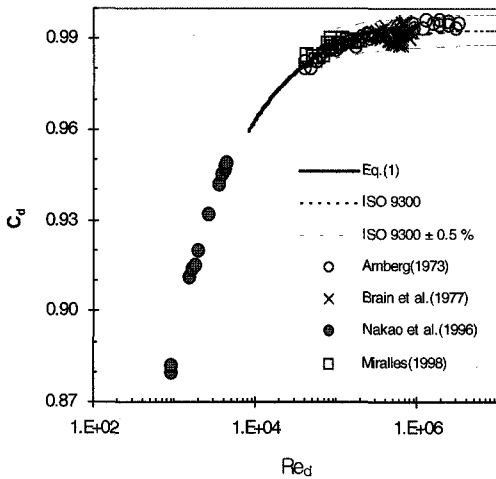


Fig. 7 Comparison with published data

Table 3에 Fig. 7에 비교한 실험 결과들의 유출 계수식이 비교되어져 있다. 식 (1)과 발표된 다른 데이터의 경향은 잘 일치하며 식 (1)에서 예측한 목 직경의 타당성이 검증된다.

본 실험의 결과와 Nakao등의 실험 데이터를 종합하면 ISO 9300 범위보다 낮은 레이놀즈 수에서 유출 계수 경향을 알 수 있으며 이미 발표된 실험 데이터들과의 비교로 본 실험결과의 일반성이 확인됨을 알 수 있다.

ISO 9300에서 제시한 유출 계수의 식은 $10^5 \leq Re_d \leq 10^7$ 범위이므로 레이놀즈 수가 10^5 보다 낮은 영역을 포함시키거나 레이놀즈 수의 영역별로 유출 계수의 식을 정리하여 국제적으로 인정을 받기 위한 연구가 앞으로 진행되어야 한다.

4. 결론

한국표준과학연구원에 설치되어 있는 상압 기체 표준 유량 시스템을 사용하여 ISO 9300에 따라 제작된 목 직경 0.28 mm~4.48 mm 9종류 43개 소닉 노즐 유동 특성을 고찰하였다.

소닉 노즐 유출 계수는 ISO 9300 범위인 레이놀즈 수 105 근처에서 ±0.37% 일치함을 보이며, ISO 9300에 제안된 형식으로 유출 계수를 레이놀즈 수의 상관식 ($C_d = 0.9995 - 3.6601 Re_d^{-0.5}$)으로 나타내었다. 본 실험 데이터의 상관식은 문헌상의 데이터들과 같은 경향을 보여 본 실험 결과의 일반성을 확인하였으며 ISO 9300 범위 밖인 레이놀즈 수 103~105에서 유출 계수에 관한 경향을 제안하였다.

이 데이터는 ISO 9300을 추가 보완하는데 기초 자료로 활용될 수 있을 것이라 기대된다.

Table 3 Comparison with published correlations of Cd

Laboratory	Nozzle throat (mm)	Cd	Red	Deviation from ISO 9300 (Red ≥ 10 ⁵)
Fig. 5	Table 1	$0.9995 - 3.6601 Re_d^{-0.5}$	$8.5 \times 10^3 \leq Re_d \leq 3.1 \times 10^5$	±0.37 %
Amberg	0.15~1.37	$0.99738 - 3.3058 Re_d^{-0.5}$	$4.1 \times 10^4 \leq Re_d \leq 3.4 \times 10^6$	±0.5 %
Brain and Macdonalde	1.260~3.823	$0.99692 - 6.2453 Re_d^{-0.5}$	$3.1 \times 10^5 \leq Re_d \leq 8.7 \times 10^5$	±0.4 %
Nakao, Yokoi and Takamoto	0.5 0.3	$1.007 - 3.195 Re_{th}^{-0.5}$ $1.006 - 3.783 Re_{th}^{-0.5}$	$9.0 \times 10^2 \leq Re_d \leq 4.4 \times 10^3$	-
Miralles	1.165 1.555 2.08	$0.996473 - 2.673217 Re_d^{-0.5}$	$4.0 \times 10^4 \leq Re_d \leq 2.0 \times 10^5$	±0.3 %

참고문헌

- (1) H. E. Hillbrath, 1981, "The Critical Flow Venturi 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.
- (2) ISO 9300, 1990, Measurement of Gas Flow by means of Critical Flow venturi Nozzles.
- (3) H. P. Grace and C. E Lapple, 1951, "Discharge coefficients of Small Diameter Orifice and Flow Nozzles", Transactions of the ASME, Vol 73, pp. 639~637.
- (4) L. J. Kastner, T. J. Williams and R. A.Sowden, 1964, "Critical flow Nozzle Meter and its Application to the Measurement of Mass Flow rate in Steady and Pulsating Streams of Gas", Journal of Mechanical Engineering Society, Vol. 6, pp. 88~98.
- (5) B. S. Stratford, 1964, "The Calculation of the Discharge Coefficient of Profiled Choked Nozzles and the Optimum Profile for Absolute Air Flow Measurement", Journal of the Royal Aeronautical Society, Vol. 68, pp. 237~245.
- (6) D. W. Sparkes, 1968, "A Standard choked nozzles for absolute calibration of air flow meters", Journal of Royal Aeronautical society, Vol. 72, pp. 335~338.
- (7) Yong Moon Choi, kyung Am Park, Joel Thomas Park, Hae Man Choi, Seung O. Park, 1999, "Interference effects of three sonic nozzles of different throat diameters in the same meter tube", Flow Measurement and Instrumentation 10, pp 175~181
- (8) B. T. Arnberg, C. L. Britton and W. F. Seidl, 1973, "Discharge Coefficient Correlations for Circular Arc Venturi Flow meters at Critical (Sonic) Flow", ASME, paper No. 73-WA/FM-8.
- (9) T. J. S Brain and L. M Macdonald, 1977, "Evaluation of the performance of small scale critical flow venturis using the NEL gravimetric gas flow standard test facility", Fluid Flow Measurement in the mid 1970s, HMSO, Edinburgh, pp. 103~125.
- (10) Shinichi Nakao, Yoshikazu Yokoi, Masaki Takamoto, 1996, "Development of a calibration facility for small mass flow rates of gas and uncertainty of a sonic venturi transfer standard", National Research Laboratory of Metrology, Flow Meas., Instrum., Vol 7, pp. 77~83.
- (11) B. T. Miralles, 1998, "On the experimental determination of the discharge coefficient of sonic nozzles for Reynolds numbers from $4 \cdot 10^4$ to $2 \cdot 10^5$ ", Flowmeco, pp. 227~232.