

## 엔진 고공 시험에서 공기 유량 측정용 벤투리 파이프의 제작 및 측정 불확도 분석

양인영\*\* · 오중환\*\*

### Manufacture and Measurement Uncertainty Analysis of a Venturi Pipe for Airflow Measurement in Altitude Engine Test

Inyoung Yang\*\*, Joong-Hwan Oh\*\*

Key Words : Gas turbine engine(가스 터빈 엔진), Altitude engine test(엔진 고공 시험), Venturi flowmeter(벤투리 유량계), Measurement uncertainty(측정 불확도)

#### ABSTRACT

Design, manufacture and calibration procedures of a venturi pipe flowmeter for airflow measurement in altitude engine test were discussed. Altitude engine test using venturi pipe was given as an example. The venturi was designed per the ISO standard of ISO5167, and was intended to include the entire airflow range in the test envelope of the gas turbine engine. Measurement uncertainty analysis was performed in the design procedure to investigate the effect of venturi geometry and sensor specification upon the measurement uncertainty. Manufacturing process was designed to minimize the deviation from the geometry of design. Calibration was performed to get the relationship between the discharge coefficient and the pipe Reynolds number. Then the uncertainty was assessed again using real data acquired during engine test. Through these procedures, it was possible to maintain the uncertainty of airflow measurement under 1% for most of the operating envelope of the gas turbine engine. The discharge coefficient of the venturi pipe showed agreement with the value suggested in the ISO standard ISO5167-4 within 0.6%.

#### 1. 서 론

항공용 가스 터빈 엔진의 고공시험에서 가장 중요한 측정 인자 중의 하나는 엔진이 흡입하는 공기의 유량이다. 이에 더해 엔진에 의해 압축된 공기의 일부를 추출(bleed)하는 경우, 이 추출 공기의 유량도 중요한 측정 인자가 된다.

공기 유량을 측정하는 방법은 여러 가지가 있으나, 항공용 엔진의 고공시험과 관련한 공기 유량 측정의 특성, 즉 고유량(수~수십 kg/s)을 측정하여야 한다는 점, 측정 공기의 온도 변화가 크다는 점(영하 수십~영상 수백 °C), 측정 장치에 의한 압력 손실이 적어야 한다는 점 등의 이유로 인해 벨마우스(bellmouth)형이나 벤투리 파이프(venturi pipe)형의 차압식 유량계를 가장 널리 사용한다. 벤투리 파이프 유량계

를 사용할 경우 공기 유량은 식 (1)로 계산한다.<sup>(1)</sup>

$$q_m = \frac{C_d}{\sqrt{1-\beta^4}} \epsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p p_1} \quad (1)$$

벤투리 파이프 유량계는 문헌 (1)의 방법 및 기준에 따라 제작하면 해당 문헌에 제시된 측정 불확도를 가지는 것으로 가정할 수 있다. 또한 벤투리 파이프 유량계를 이용한 공기 유량 측정의 측정 불확도를 분석한 기존 연구도 있다<sup>(2)</sup>. 본 연구에서는 이에 더하여 벤투리 파이프 유량계의 설계, 제작, 교정의 전 과정에서 벤투리 형상, 사용하는 센서 및 데이터 획득 장치, 교정 방법 등 각 설계 인자가 측정 불확도에 미치는 영향을 파악하여 설계에 미리 반영하는 것이 가능한지 살펴보고자 하였다. 또한 측정 불확도 목표값이 제한 조건인 경우, 설계 인자간 상호 연관성에 대하여도 밝히고자 하였다.

본 논문에서는 엔진고공시험설비를 사용한 실제 항공용 가스 터빈 엔진 시험을 예로 들어 기술하였다. Fig. 1은 본 시험

\* 한국항공우주연구원 항공엔진팀

\*\* 한국항공우주연구원 추진기관팀

† 교신저자, E-mail : iyyang@kari.re.kr

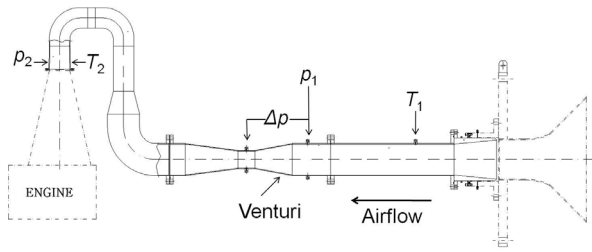


Fig. 1 Schematic of airflow measurement using venturi pipe flowmeter in altitude engine test

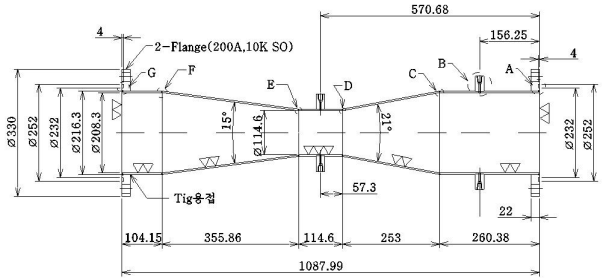


Fig. 3 Geometry of venturi pipe (mm)

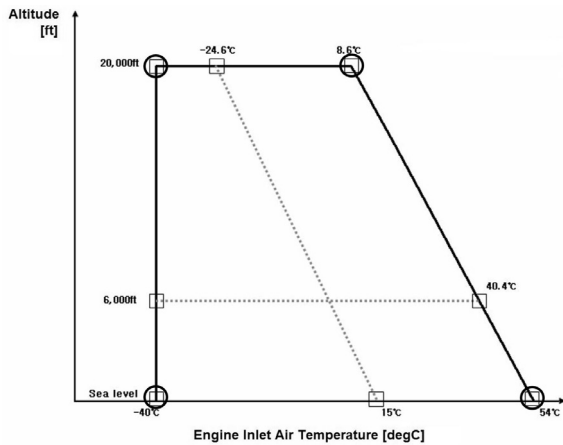


Fig. 2 Engine operating envelope (solid line), points of performance tests (square), and corner points (circle)

에서 사용한 엔진 흡입 공기 유량 측정용 유량계의 개략도를 나타낸 것이다. 이 시험에서는 엔진 흡입 공기 유량 및 추출 공기 유량을 벤투리 파이프 유량계를 사용하여 측정하였으며, 본 논문에서는 흡입 공기 유량 측정만을 논의하였다.

## 2. 설계

### 2.1. 유량계 사용 범위

유량계는 시험하고자 하는 비행 조건 범위 내에서의 공기 유량을 모두 포함하도록 측정 범위를 결정하여야 한다. 본 연구의 경우, 엔진의 시험 조건 범위는 Fig. 2와 같으며, 모든 범위에서 엔진 흡입 공기의 속도는 0이다. 실제 시험은 Fig. 2에 표시된 8개 조건에서 수행되었으며, 각 시험 조건에서 엔진의 최대 출력 조건(max. power; MP)과 무부하 조건(no load; NL)의 데이터를 획득하였다. 본 논문에서는 Fig. 2에 원으로 표시한 4개 경계점에서의 데이터만을 논의하였다.

각 시험 조건에 해당하는 공기 유량은 고공시험을 실제 수행하여야 알 수 있으므로, 본 연구에서는 엔진 성능을 해석적으로 예측하여 공기 유량 범위를 예측하고, 여기에 마진을 더하여 유량계 설계에 필요한 유량 측정 범위를 도출하였다.

### 2.2. 벤투리 파이프의 주요 치수 선정

벤투리 파이프의 주요 치수는 문헌 (1) 및 (3)을 따라 결정하였다. 벤투리 파이프의 설계에 있어서 가장 기본적인 인자는 배관 내경(pipe diameter,  $D$ ) 및 목 내경(throat diameter,  $d$ )이다. 이 인자들은 유량계가 측정할 수 있는 유량 범위를 직접적으로 결정한다. 뿐만 아니라 이 인자들에 따라 벤투리에서 발생하는 차압  $\Delta p$ 가 유량에 대해 결정되므로, 차압계의 선정, 나아가 유량 측정 불확도에도 영향을 미친다. 또한 이 치수들을 결정하는 데에는 벤투리 파이프의 제작, 교정, 설치 등 기계적인 사항들도 고려하여야 한다. 이 외에 확장부의 각도나 입구 실린더의 길이, 압력 태핑의 개수 및 치수 등도 모두 주요 치수에 해당한다. 벤투리 파이프의 주요 치수 결정 과정은 아래와 같으며, 설계된 벤투리 파이프의 주요 치수를 Fig. 3에 나타내었다.

$D$ 의 결정에 있어서는, 파이프 레이놀즈 수(pipe Reynolds number)  $Re_D$ 가 너무 작거나 큰 경우 유출 계수(discharge coefficient)  $C_d$ 의 산포가 커지므로<sup>(1)</sup> 측정 필요 범위 내에서  $2 \times 10^5 < Re_D < 2 \times 10^6$ 이 되도록  $D$ 를 결정하였다. 또한 지름비  $\beta (= d/D)$ 가  $0.4 < \beta < 0.75$ 이면서 0.4 및 0.75에 너무 가깝지 않은 값이 되도록 하였다<sup>(1)</sup>. 지름비는 또한  $d$ 와도 관련이 있으므로 필요한 경우  $d$ 와  $D$ 를 반복 계산으로 결정하여야 한다. 또한 벤투리 파이프는 설치 환경에 따라 상류에 확보하여야 하는 직관의 길이가  $D$ 의 배수로 정해지므로<sup>(1)</sup>, 같은 설치 환경에서는  $D$ 가 작을수록 확보해야 하는 직관 길이도 짧아져 설치 측면에서 유리하다. 여기에서는 위와 같은 사항들을 고려하여  $D = 208.3$  mm로 정하였다.

$d$ 는, 위에서 언급한 대로  $0.5 < \beta < 0.65$  범위에서 결정하고자 하였다.  $D$ 를 최대한 작게 결정하고자 할 경우  $\beta$ 도 작다면 벤투리에서의 차압이 너무 커지게 된다. 반면  $\beta$ 가 커서 벤투리에 의한 차압이 너무 작으면 벤투리 입구 압력을 제어하는 데에 불편함이 있다. 여기에서는  $d = 114.6$  mm로 정하였다.

그 외의 치수들은 다음과 같이 선정하였다. 확장부 각도는  $7 \sim 15^\circ$ 에서 정해야 하는데<sup>(1)</sup>, 설치 조건을 고려,  $15^\circ$ 로 결정하여 벤투리를 최대한 짧게 하되,  $-0.5^\circ$ 의 공차를 주었다. 압력 탭은 4개로 하였고, 압력 탭으로부터 압력 측정 계기로 연결되는 압력 튜브는 “삼중-T” 배열로 연결하도록 하였으

Table 1 Calculation result of major venturi parameters

	0 kft/-40℃		0 kft/54℃		20 kft/-40℃		20 kft/8.6℃	
	MP	NL	MP	NL	MP	NL	MP	NL
Airflow*	1.323	1.289	0.823	0.774	0.608	0.592	0.464	0.446
$p_2$ [kPa]	101.33	101.33	101.33	101.33	46.56	46.56	46.56	46.56
$T_2$ [K]	233.2	233.2	327.2	327.2	233.2	233.2	281.8	281.8
$p_1$ [kPa]	103.27	103.18	102.55	102.43	47.71	47.65	47.43	47.37
$\rho_1$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1.543	1.542	1.092	1.091	0.713	0.712	0.586	0.586
$Re_D/10^6$	0.827	0.806	0.394	0.371	0.380	0.370	0.249	0.240
$\Delta p$ [Pa]	13761	13086	6881	6063	6339	5944	4236	3905
$\frac{p_1 - \Delta p}{p_1}$	0.8668	0.8732	0.9329	0.9408	0.8671	0.8753	0.9107	0.9175
$\epsilon$	0.9174	0.9215	0.9588	0.9637	0.9176	0.9228	0.9450	0.9493

\* Airflow values are relative to a reference.

며<sup>(3)</sup>, 튜브 내 단면적은 25 mm<sup>2</sup>로 결정하였다<sup>(1)</sup>.

### 2.3. 차압 범위 예측

벤투리의 형상을 결정한 후, 식 (1)을 사용하여 각 시험 조건에서의  $\Delta p$ 를 예측하였으며, 그 결과를 Table 1에 제시하였다. 전체 시험 영역에서 벤투리에 의한 차압  $\Delta p=3.91\sim 13.8$  kPaD로, 최대/최소 차압 비는 3.53:1이었다.

$\Delta p$ 를 계산하는 데 필요한 공기 유량 데이터는 위 2.1절에서와 같이 엔진 성능 해석 결과를 사용하였으며, Table 1에는 기준 조건에 대한 상대값으로 표시하였다. 또한  $C_d$ 도 설계 단계 추정값  $C_d=0.995$ 를 사용하였다. 이로 인해 설계 단계에서의  $\Delta p$  추정값은 실제 값과 약간 다를 수 있으나, 설계에 영향을 미칠 정도의 크기는 아니다.

한편, 식 (1)에는 벤투리 상류에서의 압력 및 온도 조건( $p_1$ ,  $T_1$ )이 사용되는데, 엔진의 시험 조건은 벤투리 하류(즉 엔진 입구)에서의 압력 및 온도( $p_2$ ,  $T_2$ )로 정의되므로, 설계 단계에서 정해진 것은  $p_2$ ,  $T_2$  뿐이다. 따라서 설계 시에는  $p_2$ ,  $T_2$ 가 시험 조건으로서 주어졌을 때  $p_1$ ,  $T_1$ 을 예측하는 것이 필요하다. 온도의 경우는 단열 조건을 가정하여  $T_1 = T_2$ 으로 하였다. 압력은 벤투리 및 기타 배관에 의한 압력 손실  $p_{loss}$ 를 계산하여  $p_1 = p_2 + p_{loss}$ 로 계산하였다. 벤투리에 의한 압력 손실에 대해서는 문헌 (1)보다 문헌 (4)에 더 상세히 기술되어 있어 이를 참조하였다. 계산 결과 벤투리에 의한 압력 손실은 조건에 따라 0.8~2 kPa로 계산되었다. 본 계산에서는 3개의 곡관(Fig. 1 참조)에 의한 압력 손실은 무시하였으며, 보다 정확한  $p_{loss}$ 를 얻기 위해서는 이를 포함하여야 한다.

### 2.4. 센서 선정

본 벤투리 파이프 유량계를 사용하는 데 필요한 센서는  $p_1$ ,  $T_1$ ,  $\Delta p$ 용 압력계, 온도계, 차압계 각 1조씩이다. 센서의

측정 범위는 엔진 시험 조건에 의해 주어지는 센서 운용 압력 및 온도를 고려하고, Table 1에서 계산한 차압 범위를 고려하여 결정하였다. 결과적으로  $p_1$  센서는 0~200 kPaA,  $T_1$  센서는 -70~200 ℃,  $\Delta p$  센서는 0~30 kPaD의 범위로 하였다.

전체 시험 영역에서 공기 질량 유량의 최대/최소 비는 2.97:1인데, 부피 유량의 최대/최소 비가 1.26:1 밖에 되지 않아 차압의 최대/최소 비가 3.53:1 밖에 되지 않는다. 가스 터빈 엔진은 그 운전 특성상 질량 유량이 적은 고고도(high altitude) 영역에서는 공기의 밀도도 낮으므로, 측정 가능한 최대/최소 유량비가 크지 않은 차압식 유량계도 엔진고공시험에 충분히 사용 가능함을 알 수 있다.

### 2.5. 측정 불확도 분석

센서 선정 시 사전에 공기 유량의 측정 불확도를 분석함으로써 선정된 센서의 full scale 및 정밀도가 적절한지를 판단하였다. 측정 불확도 분석은 식 (2)를 따라 수행하였다. 이는 문헌 (3)의 식을 사용하되, 이 중  $\delta\rho_1/\rho_1$  항을 벤투리 상류 공기 밀도  $\rho_1$ 을 구하는 식  $\rho_1 = p_1/(R \cdot T_1)$ 에 합성 불확도(combined uncertainty)<sup>(5)</sup>를 구하는 식을 적용하여 대체한 것이다.

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = \text{sqrt} \left[ \left( \frac{\delta C_d}{C_d} \right)^2 + \left( \frac{\delta \epsilon}{\epsilon} \right)^2 + \left( \frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right) \left( \frac{\delta D}{D} \right)^2 + \left( \frac{2}{1-\beta^4} \right) \left( \frac{\delta d}{d} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{\delta \Delta p}{\Delta p} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{\delta p_1}{p_1} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{\delta T_1}{T_1} \right)^2 \right] \quad (2)$$

각 인자의 불확도( $\delta C_d$ ,  $\delta \epsilon$  등) 산출법은 다음과 같다.  $\delta C_d$ 는 실제 벤투리를 제작, 교정한 후에 교정 결과에 의해 주어지므로, 설계 단계에서는 유사한 타 교정 사례를 참고하여  $\delta C_d=0.5\%$ 로 가정하였다.  $\delta D$  및  $\delta d$ 는 벤투리 제작 후 직접 측정하는 과정에서 도출하므로 우선은 공히 예측값 0.1 mm를 사용하였다. 팽창 인자(expansion factor)  $\epsilon$ 의 측정 불확도  $\delta \epsilon$ 은 식 (3)으로 계산하였다.<sup>(1)</sup>

$$\frac{\delta \epsilon}{\epsilon} = (0.04 + \beta^8) \frac{\Delta p}{p_1} \quad (3)$$

$\Delta p$ 는 트랜스미터(측정 불확도 0.065 %FS) → 신호 조절기(0.2 %FS) → A/D 변환기(0.128 %FS)를 거쳐 측정되므로,  $\delta \Delta p$ 는 이 3개 기기에 대해 제품 규격서 상에 제시된 측정 불확도를 합성하여 계산하였다.  $p_1$ 은  $\Delta p$ 와 동일한 방법으로 측정되며, 각 기기의 측정 불확도는  $\Delta p$ 용 기기들과 동일하다.  $T_1$ 은 위 두 인자들에 비해 센서(RTD)의 불확도(1.3 ℃)가 추가된다. 이상과 같이 산정한 각 측정 인자의 불확도로부터 유량 측정 불확도를 평가한 결과는 Table 2와 같으며,  $\delta q_m/q_m$ 은 시험 조건에 따라 0.86~1.27%이었다.

Table 2 Uncertainty assessment of each parameters (design data)

	0 kft/-40℃		0 kft/54℃		20 kft/-40℃		20 kft/8.6℃	
	MP	NL	MP	NL	MP	NL	MP	NL
$\delta p$ [Pa]	492.4	492.4	492.4	492.4	492.4	492.4	492.4	492.4
$\delta \Delta p$ [Pa]	73.9	73.9	73.9	73.9	73.9	73.9	73.9	73.9
$\delta T$ [K]	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15
$\delta d$ [mm]	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
$\delta D$ [mm]	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
$\delta C_d$	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
$\delta \epsilon$	0.0059	0.0057	0.0031	0.0028	0.0059	0.0056	0.0041	0.0038
$\delta q_m / q_m$ [%]	0.91	0.90	0.86	0.89	1.14	1.14	1.23	1.27

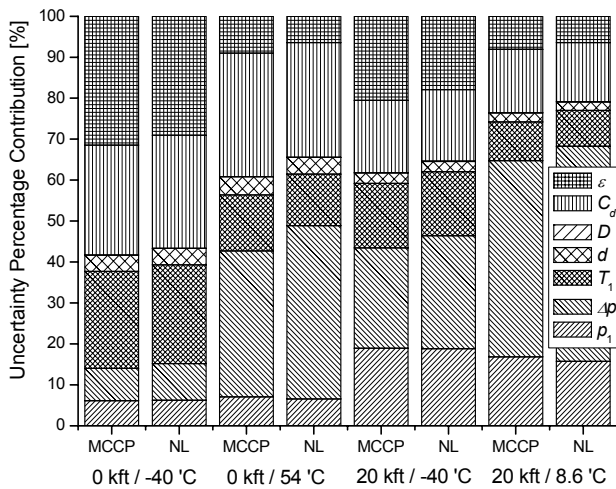


Fig. 4 Uncertainty percentage contributions of each parameters

각 시험 조건에서 각 측정 인자의 측정 불확도가 공기 유량의 측정 불확도에서 차지하는 비율(uncertainty percentage contribution; UPC)을 Fig. 4에 나타내었다. 저유량에서는  $\Delta p$ , 고유량에서는  $\epsilon$ 가 가장 큰 불확도 요인이며,  $C_d$ 는 유량에 관계없이 큰 비중을 차지한다. 다음으로  $p_1$ 은 저유량에서 최대 18%,  $T_1$ 은 고유량에서 최대 22%의 UPC를 가진다.  $d$ 는 0.1mm의 불확도로 측정하면 최대 UPC 4% 이내로서 전체 측정 불확도에 큰 영향이 없으며,  $D$ 도 같은 불확도로 측정할 경우 영향이 미미하다.

### 2.6. 측정 불확도를 고려한 설계 방향

여기에서는 전체 시험 영역에서  $\delta q_m / q_m < 1\%$ 를 설계 목표로 하였다. 이 경우, 목표를 초과하는 조건은 저유량 조건이므로(Table 2의 음영 부분) 저유량에서의 UPC가 큰  $\Delta p$  및  $p_1$  센서를 개선하여 측정 불확도 개선을 시도하는 것이 타당하다.  $\Delta p$  센서의 full scale을 30 kPaD에서 20 kPaD로 줄이고

$\Delta p$  및  $p_1$  측정용 신호 조절기의 측정 불확도를 0.2%FS에서 0.1%FS로 줄이면 전체 불확도가 0.69~0.96%로 개선된다.  $T_1$  센서의 경우도 유사한 방법으로 측정 불확도를 향상시킬 수 있으나, 저유량에서의 측정 불확도에는 큰 영향이 없다.

$C_d$ 의 경우, 측정 불확도는 교정에만 연관되므로 향상된 불확도로 교정을 실시하여야 한다.  $\epsilon$ 의 경우에는 식 (3)과 같이 측정 불확도가  $\beta$ 의 8제곱에 비례하므로,  $\beta$ 가 작을 경우 UPC의 개선은 크다. 예를 들어  $\beta$ 를 0.55에서 0.4로 낮출 경우 UPC는 9~39%에서 6~31%로 낮아진다. 그러나  $\epsilon$ 은 고유량에서 UPC가 크므로, 문제가 되는 저유량에서의 측정 불확도 개선에는 큰 도움이 되지 않는다. 또한  $\beta$ 를 작게 하기 위해서는  $D$ 가 커져야 하므로 앞서 2.2절에서 논의한  $D$ 의 제한 조건을 고려하여야 한다.

### 3. 제작 및 치수 측정

설계된 벤투리 파이프는 길이가 1m가 넘으므로, 제작은 7개 조각(입구 실린더부, 수축부, 목, 확장부, 출구 실린더부, 입·출구 플랜지부)으로 나누어 기계 가공으로 제작한 후 용접하였다. 용접에 의해 치수가 바뀌거나 내부 표면에 영향을 미치지 않도록 용접 부위를 모따기한 후 용접하였고, 용접 후 다시 내부 표면을 NC 기계 가공하였다.

압력 탭은 문헌 (1)의 5.4.3절 요구조건을 만족하도록 파이프 표면에 자리파기를 한 후 어댑터를 용접하고, 그 후 압력 홀(hole)을 뚫었다.

입·출구 플랜지는 배관을 플랜지에 완전히 삽입하여 용접한 후 용접 부위를 기계 가공함으로써 플랜지와 배관 사이의 연결 부위에 틈이 생기지 않도록 하였다. 또한 플랜지 및 이 플랜지와 연결되는 상·하류 연결 배관에 키 홈을 가공하여 배관 체결 시 모든 배관 중심선이 1mm 이내로 정렬되도록 하였다.

제작이 설계대로 되었는지를 확인하기 위하여 제작 후 치수 측정을 수행하였다. 특히  $D$  및  $d$ 의 측정은 유량 데이터에 직접적인 영향을 미치므로 매우 중요하다. 측정 항목 및 기준은 문헌 (1)에 제시된 값을 최소한의 기준으로 삼되, 기계가공으로 달성할 수 있는 실질적인 가공 오차가 더 작은 경우에는 이를 반영하여 결정하였다. Table 3에 결정된 측정 항목, 기준 및 측정 방법을 제시하였다. 문헌 (1)에 정의된 항목은 가능한 모두 측정하고자 하였으며, 표면 거칠기나 곡률 반경은 기술적 한계로 측정할 수 없었으나, 기계 가공의 특성상 이 항목들은 충분히 기준 이내에 있는 것으로 판단되었다.

Table 3 Geometry criteria and measurement methods

Parameter	Criteria	Method	
pipe inner diameter( $D$ )	$208.3 \pm 0.2$ mm	cylinder gage	measured at 5 points as defined in ref. (1)
throat inner diameter( $d$ )	$114.60 \pm 0.05$ mm		
no. of pressure taps	4 at upstream, 4 at throat	visual inspection	
length of inlet pipe	$260.38 \pm 0.5$ mm	indirect measurement from the inputs of NC machining	
convergent angle	$21 \pm 0.5^\circ$		
length of throat	$114.6 \pm 1.5$ mm		
divergent angle	$15 - 0.5^\circ$		
roughness	$< 0.01$ mm	no measurement	
$p_1$ taps axial position	$104.15 \pm 5$ mm from the converging part	vernier calipers	
$\Delta p$ taps axial position	$57.3 \pm 1$ mm from the converging part	vernier calipers	
curvature radius $R_1$	$< 25$ mm ( $\approx 0$ )	no measurement	
curvature radius $R_2$	$< 12$ mm ( $\approx 0$ )	no measurement	
align of convergent section and throat	N/A	visual inspection	
finish of pressure taps	No burr	visual inspection	
geometry of pressure tapping	ID.	$> 4$ mm	vernier calipers
	length	$> 20$ mm	vernier calipers
	shape	circular	inserting a rod
position of pressure tapping	position	Axis must cross the axis of venturi pipe.	inserting a rod
	direction	perpendicular mutually	inserting a rod

### 4. 교정

벤투리 파이프의  $C_d$ 는  $Re_D$ 의 함수이므로<sup>(1)</sup>, 교정 결과도  $Re_D$ 대  $C_d$ 의 데이터로 제시된다. 벤투리 교정은 한국표준과 학연구원에 의뢰하여 수행하였으며, 해당 기관의 기준 소닉 노즐(sonic nozzle)을 표준기로 사용하였다. 표준기의 불확도는 95% 신뢰 수준에서 0.2%이다. 벤투리 교정 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5의 곡선은 교정 데이터를 3차 다항식으로 추정한 것이다.  $Re_D = 3.5 \times 10^5 \sim 8 \times 10^5$ 의 범위에서  $C_d$ 는 0.989~0.995이며,  $Re_D$ 가 증가할수록  $C_d$ 도 증가한다. 문헌 (1)에서는 벤투리를 해당 문헌의 기준대로 제작할 경우  $Re_D = 2 \times 10^5 \sim 10^6$  범위에서  $C_d = 0.995$ 이며 그 불확도는  $\pm 1\%$ 라고 하였는데, 본 벤투리의 경우 교정에 의한  $C_d$ 는 해당 문헌과 최대 0.6%의 차이를 보였다.

한편, 문헌 (1)에서는 기계가공형 수축부를 가진 벤투리의 경우  $C_d$ 가  $Re_D$ 보다는  $Re_d$ 의 함수일 가능성이 더 크다고 하였다. 본 교정 데이터에 대해  $Re_d$ 의 함수로 유출 계수를 그

리면 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 실선은 문헌 (1)에 제시된  $Re_d$  대 유출 계수의 데이터이다. 문헌 (1)의 데이터와 비교하여 유출 계수가 대체로 크게 나타나기는 하나 전반적인 경향은 일치하며, 차이도 약 0.6% 이내로서, 문헌 (1)에 제시된 값(1.0~1.5%)보다 작았다.

Fig. 5에 나타난 것과 같이 교정 범위는  $Re_D = 3.5 \times 10^5 \sim 8 \times 10^5$ 으로, 사용 범위  $Re_D = 2.4 \times 10^5 \sim 8.3 \times 10^5$ 를 모두 포함하지 못하였다. 이는 앞서 2.4절에서도 논의했듯이 실제 엔진 시험에서는 엔진 작동 특성상 주어진 레이놀즈 수 범위에서 차압 변화가 크지 않은 데 비해 교정 표준기의 공기 공급 장치는 이런 변화를 모사하지 않았으므로, 높은 레이놀즈 수에서는 차압이 커서 선정된 차압계로 측정이 불가능하고, 낮은 레이놀즈 수에서는 차압이 작아서 측정 불확도가 너무 커지기 때문이다. 높은 레이놀즈 수에 대해서는 큰 full scale을 가진  $\Delta p$  센서를 선정함으로써 교정이 가능하도록 할 수 있으나, 앞서 2.5절 및 2.6절에서 논의한 것처럼  $\Delta p$  센서의 full scale은 공기 유량 측정 불확도에 큰 영향을 미치므로 이를 고려하여야 한다. 본 연구의 경우, 절충하여  $\Delta p$  센서의 full scale을 30 kPaD로 최종 결정하였다.

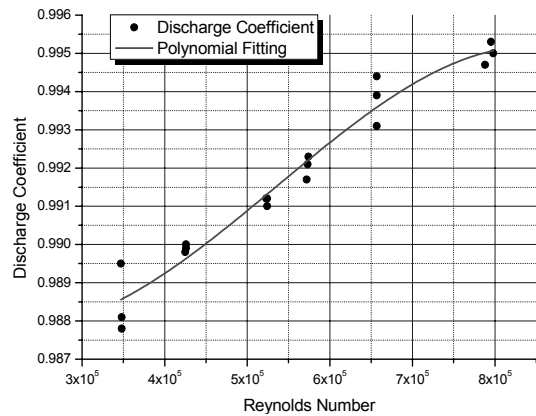


Fig. 5 Venturi calibration result (in terms of  $Re_D$ )

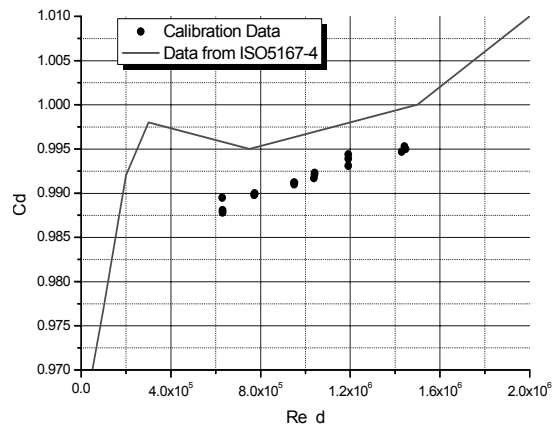


Fig. 6 Comparison of calibration data with that of reference (1)

### 5. 사용 단계에서의 측정 불확도 재평가

앞서 2.5절에서는 설계 단계에서 측정 불확도를 분석하기 위하여 일부 인자의 불확도를 임의로 가정하거나 제품 규격서의 데이터를 사용하여 B형 방법<sup>(5)</sup>으로 평가하였다. 사용 단계에서는 모든 인자에 대하여 실제 교정 데이터를 사용할 수 있고, A형 방법<sup>(5)</sup>을 사용함으로써 원인 미상의 불확도까지 모두 포함시킬 수 있다.

사용 단계에서의 불확도 평가에 사용되는 식은 앞서 2.5절에서 사용한 식 (2)와 동일하며, 다만 각 인자의 불확도 평가 방법만 달라진다.  $\delta C_d$ 는 실제 교정 성적서 상의 값(0.21%)을 사용하였고,  $\delta D$  및  $\delta d$ 도 실제 측정 과정에서 산출된 값을 사용하였다.  $\delta p_1$ ,  $\delta \Delta p$  및  $\delta T_1$ 은 교정에 수반되는 불확도와 실제 측정에서의 산포(표준 편차)에 의한 불확도를 합성하였다. 실제 측정에서 데이터의 산포는  $p_1$ 의 경우 30~40 Pa,  $\Delta p$ 는 20~25 Pa,  $T_1$ 은 0.1~0.5 °C 정도로, 교정에 수반되는 불확도에 비해 영향이 크지 않았다. 다만, 본 엔진고공시험설비는 설비 제어 시스템의 특성상 고고도에서 저주파수(약 0.2 Hz)의 압력 oscillation이 있는 것이 이미 알려져 있어<sup>(2)</sup>, 위의 산포 산정 시에는 그 영향을 제외하였다.  $\delta \epsilon$ 은 2.5절에서와 동일한 방법으로 계산하되, 실제  $\Delta p$  및  $p_1$ 의 측정값을 사용하였다.

사용 단계에서의 측정 불확도 평가 결과는 Table 4에 나타내었다. 전체 영역에서 공기 유량의 측정 불확도는 0.56~1.04%로 평가되었다. 가장 유량이 적은 20 kft / 8.6 °C 조건 중 NL 조건을 제외하고는 모든 조건에서 목표인 1.00% 이내를 달성하였다.

### 6. 결 론

본 논문에서는 엔진고공시험에 있어서 중요한 성능 인자인 엔진 흡입 공기 유량을 측정하기 위한 벤투리 파이프 유량계의 설계, 제작, 교정 과정과 설계 단계 및 사용 단계

Table 4 Uncertainty of each parameters (real test data)

	0 kft/-40°C		0 kft/54°C		20 kft/-40°C		20 kft/8.6°C	
	MP	NL	MP	NL	MP	NL	MP	NL
$\delta p_1$ [Pa]	476.2	476.2	476.1	476.1	476.2	476.2	476.6	476.6
$\delta \Delta p$ [Pa]	53.1	53.1	53.4	53.4	53.9	53.9	54.8	54.8
$\delta T_1$ [K]	1.90	1.90	1.89	1.89	1.94	1.94	1.89	1.89
$\delta d$ [mm]	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
$\delta D$ [mm]	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
$\delta C_d$	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021
$\delta \epsilon$	0.0034	0.0034	0.0024	0.0023	0.0033	0.0032	0.0029	0.0027
$\delta q_m / q_m$ [%]	0.56	0.56	0.59	0.60	0.92	0.95	1.00	1.04

에서의 측정 불확도 분석에 관하여 실제 예를 들어 기술하였다. 이로써 각 설계 인자가 벤투리 파이프 유량계의 측정 불확도에 미치는 영향을 정량화하고, 이러한 영향의 상호 연관성을 밝히며, 달성 가능한 측정 불확도를 추정하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 벤투리 파이프 유량계는 측정 가능한 유량 범위가 작은 것으로 알려져 있으나, 엔진고공시험의 경우에는 비행 조건이 변화하더라도 부피 유량에는 큰 변화가 없으므로 벤투리 파이프 유량계를 사용하는 것이 가능하였다.
- 2) 공기 유량계의 측정 불확도를 유지하기 위해 가장 중요한 인자는  $\Delta p$ 의 측정 불확도이며, 가능한 작은 full scale의 센서를 사용하는 것이 유리하나, 교정 시에는 큰 full scale이 필요한 경우가 있으므로 절충이 필요하였다.
- 3) 주어진 비행 영역 및 운전 조건에서의 가스 터빈 엔진 고공시험의 경우, 벤투리 파이프 유량계 시스템에 사용되는 센서의 full scale 및 측정 불확도를 적절히 선택하고 교정을 철저히 수행함으로써 전체 사용 영역 내에서 공기 유량 측정 불확도 1% 이내를 달성하는 것이 가능하였다(1개 조건 제외).
- 4) ISO5167-4를 준수하여 설계하고 제작 과정을 철저히 관리함으로써 ISO5167-4에 제시된 유출 계수와의 차이가 0.6% 이내인 벤투리 파이프 유량계를 제작할 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 KHP 민군겸용 핵심구성품 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- (1) ISO, 2003, "Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full-Part4: Venturi tubes," ISO5167-4:2003.
- (2) 이대성, 양인영, 전용민, 김춘택, 양수석, 2002, "가스터빈 엔진 고공성능시험설비의 측정불확도 개선," 대한기계학회논문집 B권, 제26권 제11호, pp. 1496~1502.
- (3) ISO, 2003, "Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full-Part1: General principles and requirements," ISO5167-1:2003.
- (4) ASME, 1989, "Measurement of fluid flow in pipes using orifice, nozzle, and venturi", ASME MFC-3M-1989.
- (5) ISO/IEC, 2008, "Uncertainty of measurement-Part3: Guide to the expression of uncertainty in measurement," ISO/IEC guide 98-3.