

벨마우스와 레이크를 이용한 대용량 유량 계측

김정우*

Large Scale Mass Flow Measurement Using Bellmouth and Rake

Jeongwoo Kim*

ABSTRACT

For an aerodynamic test facility, it is very important to get the precise measurement data of pressure, temperature and mass flow rate at the upstream to the test article. Hence, a new measurement method using a bellmouth and rakes was studied for the large scale system of which the corrected mass flow is between 5 kg/s and 8 kg/s. The bellmouth was designed by ISO standard for 0.5% accuracy, and the rakes were designed by using the equal area method. From the results of 9 test trials, it is found that the Reynolds number of rakes and the mass flow rate ratio can be simply formulated by an one-dimensional equation. The mass flow rate of rakes was calibrated by this equation. By the result of calibration, The maximum error rate was -0.507%, and the average error rate was -0.000274%.

초 록

공력학적 성능을 평가하는 대형 유동 시험장치에서 시험체 입구로 들어가는 유체의 압력, 온도, 유량 등은 시험체의 성능 계산에 필수적인 항목이므로, 이 값들을 정확하게 측정하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 벨마우스와 레이크를 사용하여 보정 유량 범위가 5 ~ 8 kg/s인 대용량 유량을 계측하는 방법을 연구하였다. 벨마우스는 ISO Standard를 따라 0.5% 정확도를 만족할 수 있도록 설계하였고, 레이크는 등면적으로 배치하도록 설계하였다. 총 9 회의 서로 다른 조건의 시험을 분석한 결과 레이크 레이놀즈 수와 유량값의 비가 1차 함수 관계에 있음을 확인하였고, 이 관계식을 이용하여 레이크의 유량값을 벨마우스의 값을 기준으로 최대 -0.507%, 평균 -0.000274% 오차율로 보정할 수 있었다.

Key Words: Duct Flow(덕트 유동), Mass Flow Rate(유량), Bellmouth(벨마우스), Rake(레이크), Calibration(보정), Corrected Mass Flow(보정 유량)

- D_{new} : Duct Diameter after Heat Expansion [m]
- A : Duct Area [m²]
- \dot{m} : Mass Flow Rate [kg/s]
- m_{corr} : Corrected Mass Flow Rate [kg/s]
- P : Static Pressure [Pa]
- P_t : Total Pressure [Pa]
- T : Static Temperature [K]
- T_t : Total Temperature [K]
- T_{metal} : Duct Metal Temperature [K]
- ρ : Static Density [kg/m³]
- μ : Viscosity [μ Pa · s]
- V : Velocity [m/s]
- a : Sonic Velocity [m/s]
- R : Gas Constant [kJ/(kg · K)]
- α : Thermal Expansion Coefficient [1/K]
- γ : Specific Heat Ratio
- C_d : Discharge Coefficient
- M : Mach Number
- Re : Reynolds Number
- BM : Bellmouth

Table 1. Comparison of Mass Flow Measurement Devices

	오리피스	벨마우스	레이크	임계 벤츄리 노즐
정확도	중	중상	중	상
전압력 강하	하 (전압력 강하 큼)	상	상	상
비용	상 (비용 저렴)	중	중	하

1. 서 론

공력학적 성능을 평가하는 대형 유동 시험장치에서 시험체 입구로 들어가는 유체의 압력, 온도, 유량 등은 시험체의 성능 계산에 필수적인 항목이므로, 이 값들을 정확하게 측정하는 것이 매우 중요하다.

압력과 온도는 센서를 이용하여 직접적으로 측정할 수 있고, 유량은 유량계를 설치하여 직접적으로 측정하거나 혹은 측정된 압력, 온도 등으로부터 간접적인 방식으로 계산해야하는 값이다. 덕트 내 유량을 계측하는 방법들의 각 특징을 Table 1에 정리하였다[1-5].

오리피스는 비용이 저렴하고 제작이 용이하지만, 전후 전압력 강하가 크고 정확도가 높지 않은 단점이 있다.

임계 벤츄리 노즐은 Table 1에 언급된 측정 방법 중 가장 정확하게 유량을 측정할 수 있지만, 비용이 고가이고 목에서 질식될 수 있는 유

동의 범위가 정해져 있어 넓은 유량 범위의 시험을 수행하기 어렵다는 단점이 있다.

벨마우스와 레이크를 사용한 유량 측정 방법에 대한 해외 연구 사례로 보정 유량 범위가 0.27 ~ 0.73 kg/s인 소유량 영역에 대한 연구 결과가 있다[6].

일반적으로 대용량 유동에서의 벨마우스 유량 측정 방법은 어려운 것으로 알려져 있다[7]. 또한 대용량 벨마우스 및 레이크를 교정할 수 있는 설비가 국내에는 없고, 해외 설비 이용시 비용이 아주 높다는 문제가 있다. 본 논문에서는 보정 유량 5 ~ 8 kg/s 급의 대용량 유량을 측정하기 위해서, 측정 정확도 0.5%가 확보되는 ISO Standard 규격의 벨마우스 유량계를 설계/제작하는 방법을 기술하였다. 또한 벨마우스 유량값을 기준으로 레이크 유량값을 보정하는 방법을 연구하였다. 추후 실제 시험시에는 레이크 유량계만을 사용할 계획이므로 Standard 규격의 벨마우스를 제작하여 참유량값을 확보한 이후 그 값을 기준으로 레이크 유량계의 유량값을 보정하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 본 론

21 벨마우스 설계

벨마우스 형상은 ISO Standard에 따라 Fig. 1과 같이 설계하였다[3].

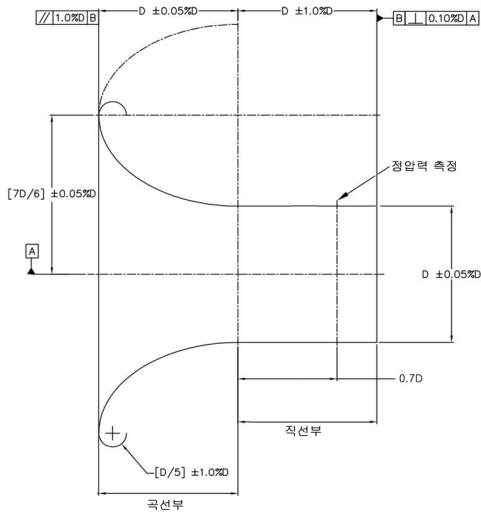


Fig. 1 Bellmouth Design

모든 수치는 벨마우스의 직경 D 를 기준으로 결정되며, 벨마우스 목을 기준으로 곡선부와 직선부로 구분하여 설계를 하였다. 직경 D 는 후방에 연결될 시험체의 직경과 동일하게 선정하였는데, 그 이유는 직경이 다를 경우 덕트가 확대-축소되는 과정에서 시험체에 유입되는 유동의 유질에 왜곡이 생길 수 있기 때문이다. 곡선부의 길이는 D 이고, 입구 반경은 $7/6 D$ 이다. 곡선의 형상은 장경이 $2D$, 단경이 $4/3 D$ 인 타원의 $1/4$ 곡선이며, 입구 끝은 직경이 $0.2 D$ 인 반원 형태로 말려있다. 벨마우스 목으로부터 $0.5 D$ 이상에서는 유동이 안정화 되므로[7, 8], 정압력 측정 지점은 목에서 $0.7 D$ 지점으로 결정하였다. 설계 수치를 반영한 3-D 모델링 결과는 Fig. 2와 같다.

주요부의 제작 공차는 제작 오차의 영향이 실제 유량에 미치는 오차가 0.05% 이하로 무시할 수 있는 크기로 진직도, 원통도, 평행도, 길이 공차, 표면조도 등을 결정하였다.

2.2 레이크 설계

레이크는 Fig. 3과 같이 설계하였다.

십자 형태의 레이크에 각 레이크 당 전압력 측정 지점 5 곳과 전온도 측정 지점 3 곳이 있으며, 덕트 중심에서도 전압력을 측정한다. 전압력과 전온도 측정 지점은 등면적으로 배치하여



Fig. 2 3-D Model of Bellmouth

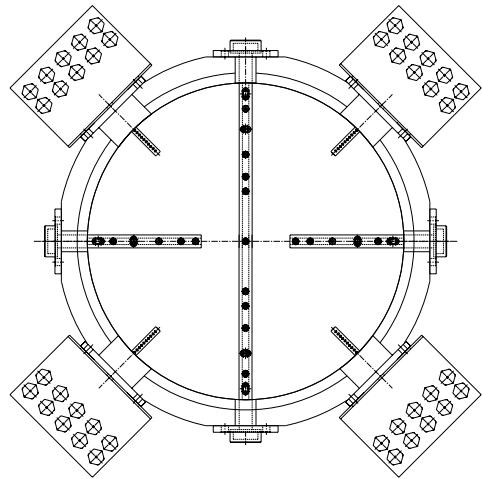


Fig. 3 Rake Design

측정 결과 분석시 각 위치에서의 측정값들의 산술평균만으로 대표 전압력과 전온도를 계산할 수 있게 하였다. 레이크는 앞뒤를 부드러운 쇠기 형태로 설계하여 유동 간섭을 최소화 하였다 (Fig. 4).

원주 방향으로 정압력 측정지점이 있고, 또한 경계층 압력을 측정하는 레이크를 별도로 설치하여 경계층 분석에 활용하였다. 내부 유동이 고온일 경우 금속 열팽창에 의한 덕트 내부 면적 변화로 유량이 변경되는 것을 교정할 수 있도록 덕트 표면 금속온도 측정도 수행하였다. 레이크의 측정위치를 Fig. 5에 표시하였다.

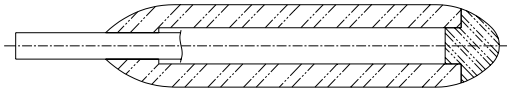


Fig. 4 Rake Design - Wedge

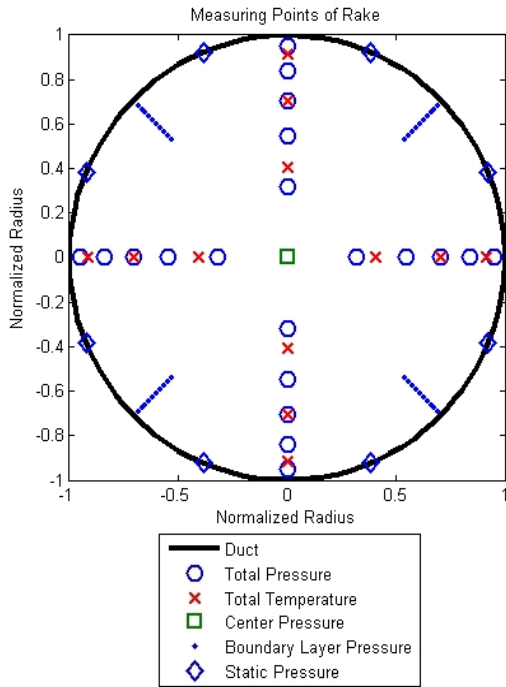


Fig. 5 Measuring Points of Rake

전압력과 전온도 등면적 배치는 Fig. 6과 같이 수행한다.

하나의 레이크 당 5개의 측정지점이 있는 것으로 가정하였을 때 덕트의 면적을 5 등분하는 지점을 찾는다(Fig. 6의 첫 번째 그림). A1 ~ A5로 명명된 각 부분은 총 면적의 1/5로 동일한 면적을 가진다. 레이크는 등면적으로 나눈 각 면적을 대표하는 지점에 하나씩 배치가 되는데, 주로 A1 ~ A5 각 면적을 다시 등면적으로 구분하는 지점에 위치한다. 즉 총 면적을 10 등분하였을 때 1/10, 3/10, 5/10, 7/10, 9/10 면적 지점이 레이크 측정 지점 R1, R2, R3, R4, R5가 된다(Fig. 6의 두 번째 그림).

따라서 n 개의 측정지점을 가지는 레이크를 등면적으로 설계할 경우 측정 지점의 위치는

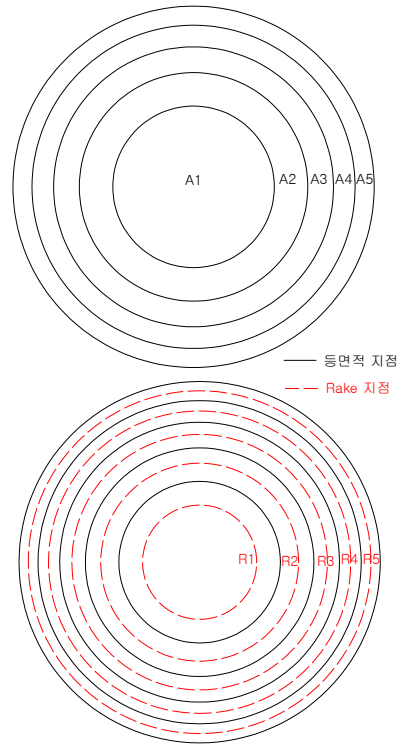


Fig. 6 Rake Design - Equal-Area

Table 2. Equal Area Locations of Total Pressure and Total Temperature

	전압력	전온도
1	0.316 R	0.408 R
2	0.548 R	0.707 R
3	0.707 R	0.913 R
4	0.837 R	
5	0.945 R	

Eq. 1과 같이 일반화할 수 있다.

$$\frac{2k-1}{2n} * A(k=1,2,3,\dots,n) \tag{1}$$

본 시험에서 전압력과 전온도는 레이크당 각각 5개, 3개씩 등면적으로 배치되었고, 중심점에서의 위치를 반지름 R로 표현한 값을 Table 2에 정리하였다.

23 필요 측정값 위치

유량을 구하기 위해 측정해야 하는 값을 Fig. 7에 표시하였다.

유량 계산에 필요한 값은 전압력, 정압력, 전 온도, 표면금속온도 등이다. 벨마우스의 경우 전압력은 정체실에서 측정하며, 정압력은 벨마우스 목에서 0.7 D 지점에서 측정한다. 벨마우스에 전 온도 및 표면금속온도를 측정하는 지점이 없으므로 이 두 값은 후방의 레이크에서 측정하는 값을 사용하였다. 레이크는 모든 측정값(전압력, 정압력, 전 온도, 표면금속온도)을 레이크 위치에서 측정한다. 각각의 측정 위치를 Table 3에 정리하였다.

24 유량 계산

유량을 계산하는 기본 식은 Eq. 2와 같다.

$$\dot{m} = C_d \rho A V \tag{2}$$

이 식은 아래의 식 변환 과정을 거쳐 Eq. 3의 형태로 최종 정리된다.

$$\begin{aligned} \dot{m} &= C_d \rho A V = C_d \frac{P A V}{RT} = C_d \frac{P A M a}{RT} \\ &= C_d \frac{P A M \sqrt{\gamma RT}}{RT} = C_d \sqrt{\frac{\gamma}{RT}} P A M \\ \therefore \dot{m} &= P_t C_d A \frac{\sqrt{\gamma}}{\sqrt{RT_t}} M \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{-\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \tag{3} \end{aligned}$$

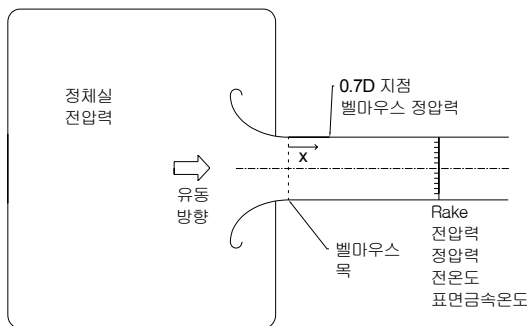


Fig. 7 Measuring Parameters

Equation 3에 사용되는 변수들을 계산하는 방법은 다음과 같다.

마하수 M은 등엔트로피 관계식을 사용하여 계산한다(Eq. 4).

$$\frac{P_t}{P} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \tag{4}$$

Equation 4의 공기 비열비 γ 는 일반적으로 1.4를 사용하지만, 정밀한 유량 계산을 위하여 온도 변화에 따른 비열비 보정을 다음 절차로 수행하였다. 비열비 γ 는 정온도가 높아질수록 Fig. 8과 같이 감소하는 것으로 알려져 있다[10].

마하수와 정온도의 등엔트로피 관계식은 아래와 같다.

$$\frac{T_t}{T} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \tag{5}$$

Table 3. Locations of Measurement Points

	벨마우스	레이크
전압력	정체실	레이크
정압력	벨마우스 목 - 0.7 D	레이크
전 온도	레이크	레이크
표면금속온도	레이크	레이크

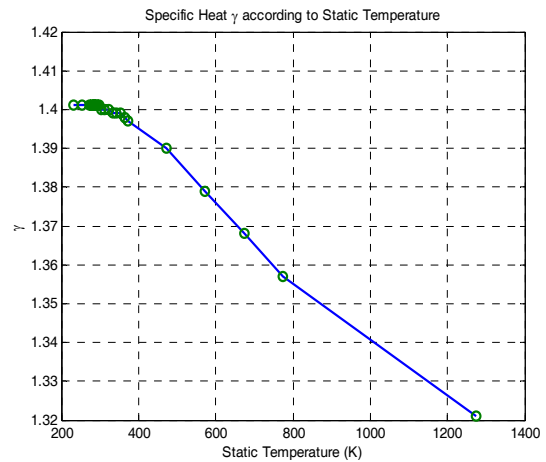


Fig. 8 Specific Heat according to Static Temperature

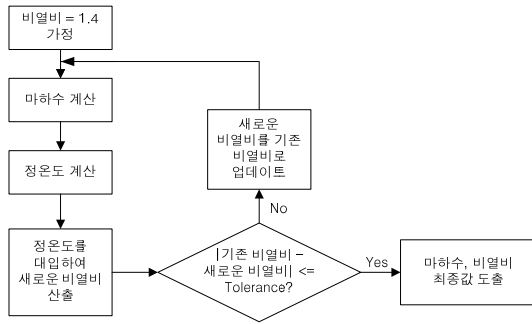


Fig. 9 Correction Scheme for Specific Heat Ratio

측정한 전온도, 마하수, 비열비, 정온도는 Eq. 5로 상호 종속되어 있으므로, 비열비 γ 값을 보정하기 위하여 Fig. 9의 절차대로 반복 계산을 수행한다.

내부 유동이 고온일 경우 덕트 열팽창에 의한 덕트 직경 변화로 변경되는 유량을 보정하여야 한다. 덕트 직경 변화는 금속의 시험 전 초기 온도를 288.15 K 으로 가정하였을 때, 다음 Eq. 6으로 구할 수 있다.

$$D_{new} = D \times (T_{metal} - 288.15) \times \alpha \quad (6)$$

덕트 면적 A는 D_{new} 를 사용하여 계산한다.

공기의 점도 μ 는 다음 Eq. 7의 Sutherland 점도 방정식으로 계산한다[11].

$$\mu = 18.27 \times 10^{-6} \times \frac{411.15}{T+120} \left(\frac{T}{291.15} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

레이놀즈 수 Re는 다음과 같이 계산 가능하다.

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \sqrt{\frac{\gamma}{RT}} \frac{PMD_{new}}{\mu} \quad (8)$$

C_d 는 레이크의 경우 1을 적용하고, 벨마우스의 경우 Re를 사용하여 다음 Eq. 9로 계산한다[3].

$$C_d = 0.9965 - 0.00653 \sqrt{\frac{10^6}{Re}} \quad (9)$$

Table 4. Test Condition

	m_{corr_BM}	Pt_BM*	Tt_Rake*	Re_BM*
1	8.033	0.432	0.491	0.944
2	8.046	0.813	0.786	1.000
3	8.033	0.378	0.481	0.847
4	8.046	0.830	0.810	0.984
5	7.871	0.290	0.479	0.641
6	4.881	1.000	0.690	0.898
7	7.904	0.211	0.703	0.292
8	5.084	0.710	0.958	0.430
9	4.881	0.153	0.597	0.156
10	5.084	0.323	1.000	0.184

* 전압력, 전온도, 레이놀즈수는 각각의 최고값으로 Normalize하여 표기하였음.

이상과 같이 구한 모든 변수들을 Eq. 3에 대입하여 유량 \dot{m} 을 계산할 수 있다.

2.5 시험 결과 분석

총 10 회의 시험을 수행하였고, 각각의 시험 조건을 Table 4에 정리하였다. 시험 조건은 순간적인 노이즈에 의한 영향을 최소화하기 위하여 10초간 일정하게 유지되는 구간에서의 값들의 산술평균으로 계산하였다.

보정 유량 m_{corr} 은 표준 대기 온도 (288.15 K), 표준 대기 압력 (101,325 Pa) 조건에서의 유량값으로, Eq. 3으로 구한 \dot{m} 에 Eq. 10을 적용하여 계산한다.[12, 13]

$$m_{corr} = \dot{m} \sqrt{\frac{T_t}{288.15}} \frac{101325}{P_t} \quad (10)$$

10 회의 시험 조건 중 유량이 가장 큰 4번 시험 조건에 대한 결과 그래프를 Fig. 10 ~ Fig. 14에 도시하였다.

Figure 10은 X축 방향의 전압력 분포를 나타낸다. 주 레이크의 일부는 경계층에 포함되어 있고, 이 값은 별도로 측정된 경계층 레이크에서의 전압력 값과 동일하게 측정됨을 알 수 있다.

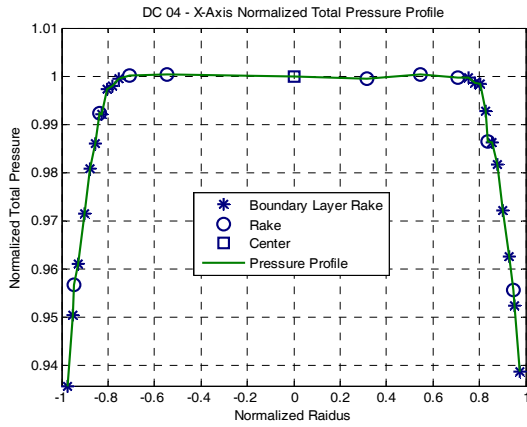


Fig. 10 Total Pressure Profile (X-Axis)

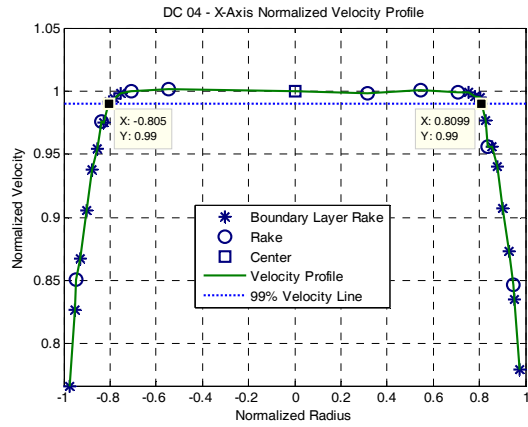


Fig. 12 Velocity Profile (X-Axis)

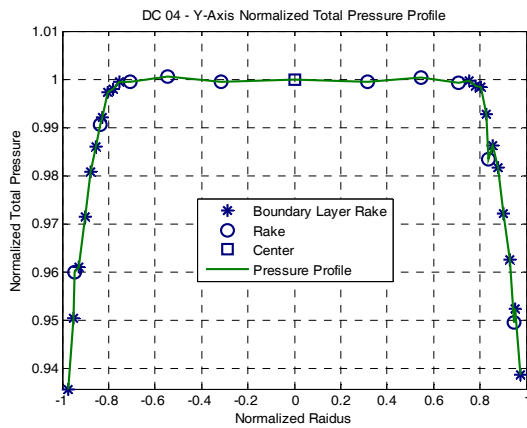


Fig. 11 Total Pressure Profile (Y-Axis)

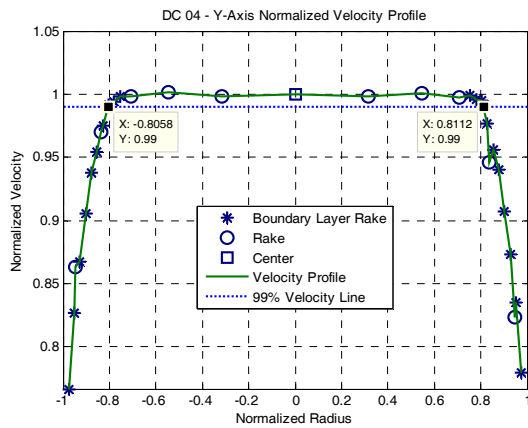


Fig. 13 Velocity Profile (Y-Axis)

Figure 11은 Y축 방향의 전압력 분포이다.

Figure 12는 X축 방향의 속도 분포이다. 속도는 Eq. 4를 이용하여 Eq. 11로 계산 가능하다.

$$V = \sqrt{\frac{2\gamma RT}{\gamma - 1} \left\{ \left(\frac{P_t}{P} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right\}} \quad (11)$$

경계층은 속도가 99%인 지점으로 정의되므로 [11] Fig. 12에 속도가 99%인 선을 삽입하였고, 그 결과 X축 방향의 경계층은 벽면에서부터 약 0.2 R 지점인 것을 확인할 수 있다.

Figure 13은 Y축 방향의 속도 분포이고, 역시 경계층은 벽면에서 약 0.2 R 지점까지 형성된

것을 알 수 있다.

Figure 14는 X축과 Y축의 전온도 분포이다. Y축 전온도 분포를 통해, 덕트 유동은 Y축 방향으로 온도 구배가 생기는 것을 확인할 수 있다. (아래쪽 차가운 공기, 위쪽 뜨거운 공기)

본 시험에서 비열비 반복 계산은 2번만에 수렴이 되었으며, 비열비 보정을 통해 마하수는 약 0.7% 증가하였고, (Fig. 15) 유량은 약 0.13% 감소하였다. (Fig. 16) 비열비 보정을 본 시험에 적용한 결과는 영향이 미미하지만 800 K 이상의 고온 시험 등에서는 비열비의 감소량이 커지므로 이러한 비열비 보정이 더욱 중요할 것으로 판단된다.

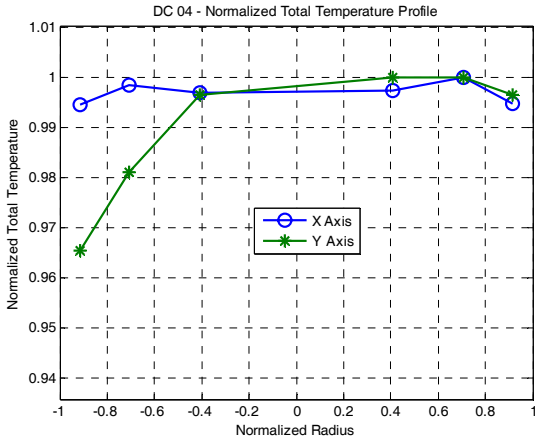


Fig. 14 Total Temperature Profile

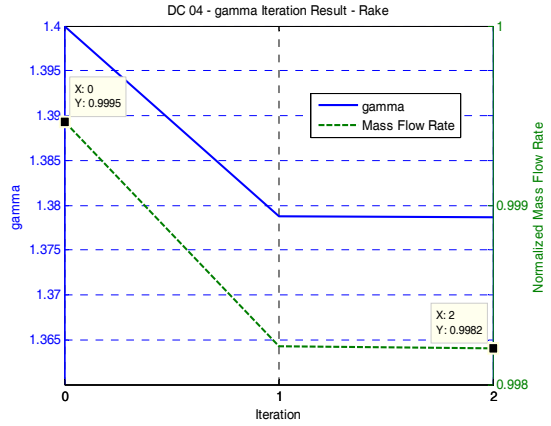


Fig. 16 gamma Iteration Result - Mass Flow Rate

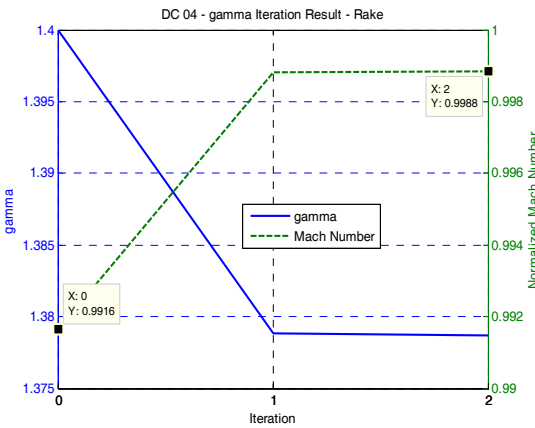


Fig. 15 gamma Iteration Result - Mach Number

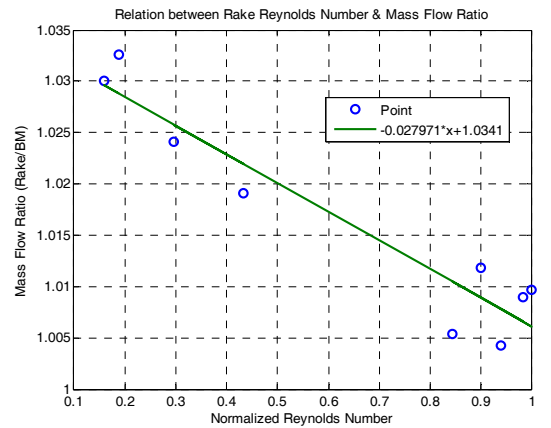


Fig. 17 Relation between Rake Reynolds Number & Mass Flow Rate Ratio

Table 5. Rake Reynolds Number and Mass Flow Rate Ratio (m_{Rake}/m_{BM})

시험	Re_Rake*	Mass Flow Rate Ratio
1	0.939	1.004
2	1.000	1.010
3	0.843	1.005
4	0.983	1.009
6	0.899	1.012
7	0.296	1.024
8	0.433	1.019
9	0.159	1.030
10	0.188	1.033

* 레이놀즈수를 최고값으로 Normalize하여 표기하였음.

각 시험을 분석한 결과 5번 시험에서는 계측에 오류가 있어 유량 분석에서 제외하였다. 5번 시험을 제외한 나머지 9개의 시험조건에서 벨마우스와 레이크에서의 유량을 각각 계산하여 비교한 결과 레이크 레이놀즈 수와 두 유량값의 비가 1차 함수 관계에 있음을 확인하였다(Table 5, Fig. 17).

즉 레이크의 레이놀즈수와 유량이 계산되면 Fig. 17에서 구한 1차 함수식에 레이놀즈수를 대입한 후 이 값으로 레이크 유량을 나누면 보정된 레이크의 유량값이 나오게 된다. 보정 절차를 Fig. 18에 정리하였다.

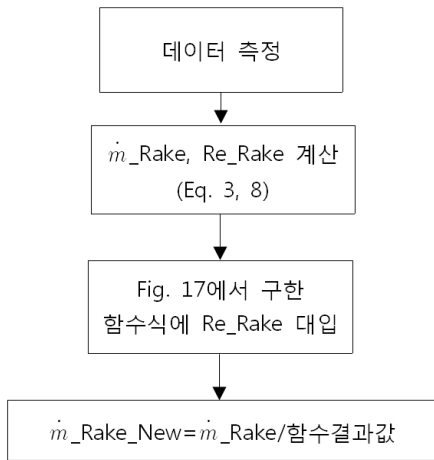


Fig. 18 Correction Procedure for Mass Flow Rate at the Rake

Table 6과 Fig. 19에 기존 레이크 유량값과 보정된 레이크 유량값의 오차율을 분석하였다. 오차율은 Eq. 12와 같이 벨마우스의 유량을 기준으로 정의하였다.

$$Error\ Rate\ (\%) = \frac{m_{Rake} - m_{BM}}{m_{BM}} \times 100 \quad (12)$$

보정 후 오차율은 최대값 -0.507%, 평균값 -0.000274%로 계산되었다.

3. 결 론

본 논문에서는 벨마우스와 레이크를 사용하여 대용량 유량을 측정하고, 벨마우스 유량값을 기준으로 레이크 유량값을 보정하는 방법을 연구하였다. 벨마우스는 ISO Standard를 따라 0.5% 정확도를 만족할 수 있도록 설계하는 방법에 대해 기술하였고, 레이크는 등면적으로 배치하도록 설계하여 간단하게 대표 전압력값과 전온도값을 구할 수 있는 방법을 기술하였다.

또한 유량 측정시 필요한 값들과 유량을 계산하는 방법에 대해 자세히 기술하였다. 이 유량 계산식에는 온도에 따른 비열비 변화, 금속 열팽창을 고려한 덕트 면적 변화 등을 고려하였고,

Table 6. Error Rate (Original & After-Calibration)

시험	오차율 (%) - 보정전	오차율 (%) - 보정후
1	0.428	-0.349
2	0.971	0.360
3	0.534	-0.507
4	0.894	0.237
6	1.179	0.285
7	2.411	-0.162
8	1.910	-0.278
9	3.005	0.042
10	3.261	0.370
최대값	3.261	-0.507
평균	1.621	-0.000274

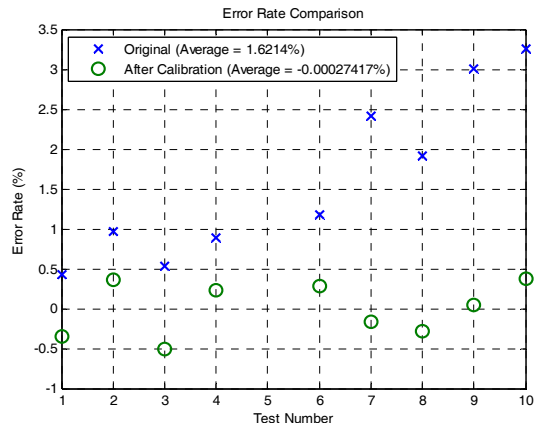


Fig. 19 Comparison of Error Rate (Original & After-Calibration)

벨마우스의 경우 ISO Standard를 참고하여 C_d 를 결정하였다.

총 9 회의 서로 다른 조건의 시험을 분석한 결과 레이크 레이놀즈 수와 유량값의 비가 1차 함수 관계에 있음을 확인하였고, 이 관계식을 이용하여 레이크의 유량값을 벨마우스의 값을 기준으로 최대 -0.507%, 평균 -0.000274% 오차율로 보정할 수 있었다.

일반적으로 대용량 벨마우스 및 레이크 교정 방법은 어렵고 많은 비용이 소요되므로 본 논문 내용을 통해 국내 교정용량의 범위를 벗어나는 대용량 유동 측정을 수행할 수 있다. 또한 도출한 관계식은 레이크의 레이놀즈수만의 함수이므로

로 추후 레이크만을 단독으로 사용한 시험에서도 유량값을 정밀하게 보정할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 기술표준원, "만관 상태의 원형 관로에 삽입된 차압 장치를 사용한 유량 측정 - 제1부 : 일반 원리 및 요구 사항," KS B ISO 5167-1, 2004
2. 기술표준원, "만관 상태의 원형 관로에 삽입된 차압 장치를 사용한 유량 측정 - 제2부 : 오리피스 판," KS B ISO 5167-2, 2004
3. 기술표준원, "만관 상태의 원형 관로에 삽입된 차압 장치를 사용한 유량 측정 - 제3부 : 노즐 및 벤투리 노즐," KS B ISO 5167-3, 2004
4. 기술표준원, "만관 상태의 원형 관로에 삽입된 차압 장치를 사용한 유량 측정 - 제4부 : 벤투리 튜브," KS B ISO 5167-4, 2004
5. 기술표준원, "임계 유동 벤투리 노즐을 사용한 가스 유량 측정," KS B ISO 9300, 2004
6. Stephen C. Smith, "Airflow Calibration of a Bellmouth Inlet for Measurement of Compressor Airflow in Turbine-Powered Propulsion Simulators," NASA TM 84399, November 1985
7. C. Lynn Sebourn, "Calculation of the Discharge Coefficient of Close-Coupled Bellmouth Flowmeters Installed in Propulsion Test Facilities," AIAA 2004-2732, June 2004
8. D. K. Beale, T. L. Hand, and C. L. Sebourn, "Development of a Bellmouth Airflow Measurement Technique for Turbine Engine Ground Test Facilities," AIAA 2011-3676, July 2001
9. AMES Research Staff, Equations, Tables, and Charts for Compressible Flow (Handbook), NACA-Report-1135, 1953
10. http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-ratio-d_602.html
11. Frank M. White, Fluid Mechanics 4th edition, McGRAW-HILL, 1999
12. http://en.wikipedia.org/wiki/Corrected_flow
13. <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/wcora.html>