

技術論文

## 입구덕트 공기유량 및 압력손실 예측방법

이보화\*<sup>†</sup> · 이경재\* · 양수석\*\*

### The Prediction of Air Flow and Pressure Loss at Inlet Duct

BoHwa Lee\*<sup>†</sup> · KyungJae Lee\* · SooSeok Yang\*\*

#### ABSTRACT

The purpose of this paper was to address the methodology of the air flow measurement using duct mach number that was considered area-weighted average obtained by total, static pressure and temperature measured at engine inlet duct. Without installing boundary rake, the prediction of air flow measurement was discussed. Actual air flow measurement and pressure value using pressure loss through inlet seal were described to improve the reliability and operability of altitude engine test facility.

#### 초 록

본 논문에서는 엔진고공환경 시험설비의 엔진 입구 덕트에서 측정된 전압력과 정압력 및 전온도를 통해 실시간으로 공기유량을 계산하고, 압력프로파일을 이용하여 경계층 레이크를 장착하지 않았을 경우에도 공기유량을 예측할 수 있는 방법을 기술하였다. 또한, 엔진입구배관에 걸친 덕트 연결부를 통한 압력손실을 예측하고, 이를 통해 공기유량을 보정함으로써, 고공환경시험설비에서의 공기유량측정의 신뢰도를 향상시키고 설비유지측면에서의 운용성을 보고자 하였다.

Key Words: Altitude Engine Test Facility(엔진고공환경 시험설비), Duct mach number(덕트 마하 수), Airflow(공기유량), Pressure loss(압력손실), Rake(레이크)

#### 1. 서 론

한국항공우주연구원에서 보유중인 엔진고공환

경시험설비(AETF)는 1999년 설치 이래로 국제 표준에 부합한 측정체계의 구축, 군사규격 등에서 요구하는 다양한 시험기술을 개발하여 시험 항목을 확대하고, 시험설비의 측정 정확도 및 신뢰성을 검증함으로써 세계적으로 인증 받고자 노력하고 있다. 이 중 AETF에서의 공기공급시스템은 크게 입구공기여과기, 압축기, 공기건조기,

접수일 2009. 8. 17, 수정완료일 2009. 12. 20, 게재확정일 2010. 1. 4

\* 정회원, 한국항공우주연구원 추진기관팀

\*\* 종신회원, 한국항공우주연구원 추진기관팀

<sup>†</sup> 교신저자, E-mail: bhlee@kari.re.kr

유량계, 안정실(Stilling chamber) 등으로 구성되어 있다[1].

안정실 전단에서 공기유량 측정을 위해 아음속 벤투리 유량계를 사용하고 있으며, 공기유량이 측정된 공기는 안정실로 들어와서 유질이 균일해진 후 벨 마우스(Bell mouth)를 통해 엔진으로 공급된다. 엔진 입구 덕트는 엔진의 전후 방향으로 자유롭게 움직일 수 있도록 슬라이딩 덕트로 연결되어 있다. Fig. 1과 같이 엔진성능의 기초가 되는 엔진입구 덕트의 측정단면에서 측정변수의 의미에 대한 일관성을 유지하고자 벨 마우스에서부터 엔진입구까지의 엔진입구 덕트는 그 직경과 엔진과의 위치에 따라 각각 슬라이딩 덕트(Sliding duct), 01, 02, 05, 09 section으로 구분하였다.

벤투리 유량계에서 측정하는 공기유량은 벤투리 유량계용 절대 압력계(1 포인트), 벤투리 유량계용 차압계(1 포인트), 벤투리 유량계용 온도계(1 포인트)를 사용해서 계산해오고 있다[2]. 그러나 이 방법으로는 엔진으로 공기가 유입되기 직전인 덕트 내 벽면의 마찰이나 각종 측정 레이크(Rake)에 의한 유동 분포 왜곡을 고려할 수 없으며, 안정실에서부터 슬라이딩 덕트, 01, 02 section에 이르기까지 공기 누설에 의한 압력손실로 인해 엔진으로 공급되는 실제 공기유량을 정확히 측정하기가 힘든 문제점이 있다. 따라서 공기유량 측정에 대한 개선 및 보완하기 위해서는 엔진입구 덕트 내 반경 방향의 압력 분포를 레이크를 통하여 측정하고, 그 결과를 사용하여 공기유량을 계산하는 방법을 채택해야 하며, 이

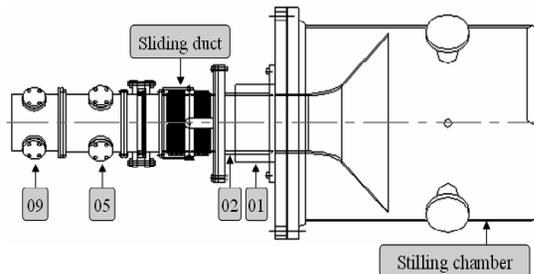


Fig. 1 Engine Inlet Duct

는 주요 엔진성능을 결정하는 공기유량을 안정실 전단에서 뿐만 아니라 엔진입구에서도 측정함으로써 측정값의 신뢰성을 확보할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 더미엔진(dummy engine)을 장착하고 공기유량을 2kg/s에서 10kg/s까지 2kg/s단위로 변화시키면서 05 section에 장착된 전압력 레이크, 온도 레이크, 경계층 레이크를 이용하여 측정된 압력과 온도로부터 계산한 덕트 마하수를 통해 실시간으로 공기유량을 계산하는 방법과 덕트 마하수의 함수인 유량계수( $C_f$ )를 이용하여 경계층 레이크를 장착하지 않고도 공기유량을 측정할 수 있는 방법을 기술하였다.

또한, 05 section에서 측정된 공기유량을 기준으로 05 section에서 안정실까지, 그리고 09 section까지의 엔진입구배관에 걸친 덕트 연결부(Inlet seal)를 통한 압력손실을 예측하고, 이를 통해 공기유량을 보정함으로써, 고공환경시험설비에서의 측정값의 신뢰도 향상시키고 설비유지 측면에서 운용성을 보고자 하였다[3].

## 2. 공기유량 측정

### 2.1 엔진 입구 덕트에 장착된 레이크

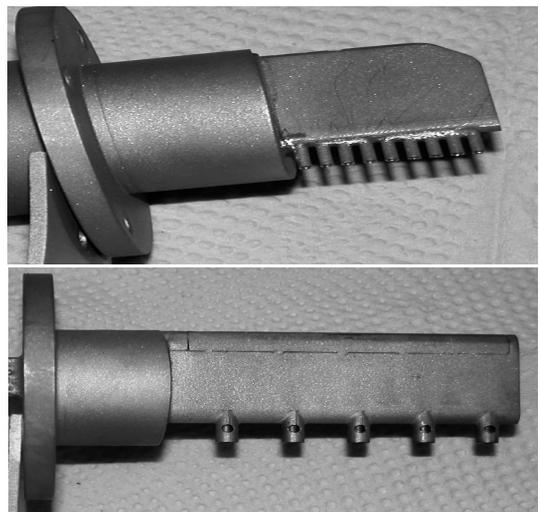


Fig. 2 Boundary rake & Pressure rake

Figure 2는 공기유량을 계산하기 위해 사용된 경계층 레이크(위)와 전압력 레이크(아래)이다. 안정실에서 05 section까지 거리는 1,828mm이며, 05 section에서 09 section까지 거리는 354mm이다.

안정실에는 원주방향으로 4개의 전압력측정 프로브가 설치되어 있다. 05 section 덕트의 반경은 132mm이고, 12시에서 시계방향으로 전압력-경계층-온도레이크 순서로 각각 3개씩 설치되어 있으며, 정압력은 9군데에서 측정한다. Fig. 3은 05

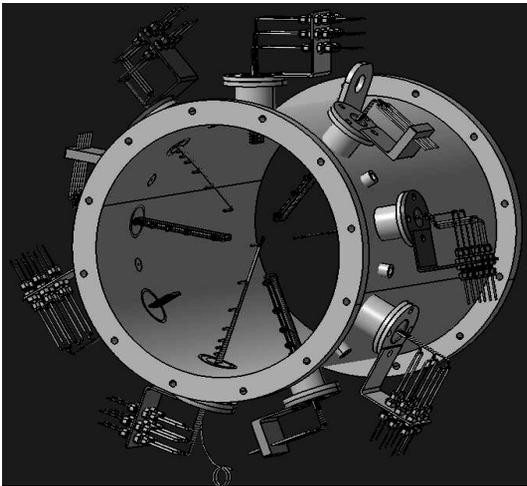


Fig. 3 05 section duct & Pressure, Temperature, Boundary Rakes

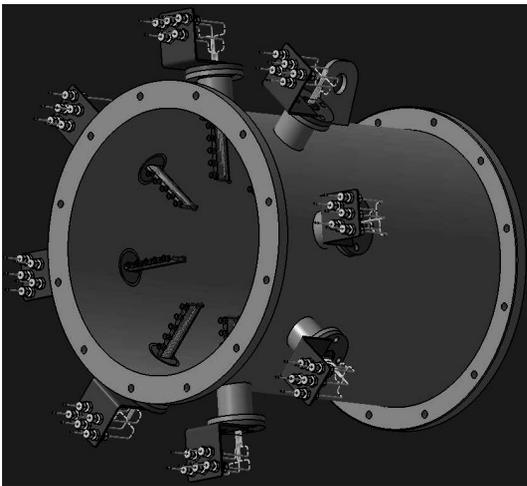


Fig. 4 09 section duct & Pressure rakes

section duct와 장착된 레이크이며 그림은 상류에서 하류를 본 것이다. 엔진의 노즈콘 위치의 09 section 덕트는 5개의 프로브를 갖는 전압력 레이크가 원주방향으로 45°의 각도로 8개 장착되어 엔진 흡입구 직전에서의 압력을 측정한다. Fig. 4는 09 section duct와 장착된 레이크이며 그림은 상류에서 하류를 본 것이다.

2.2 공기유량 계산 순서

05 section에서 각각의 레이크를 통해 얻은 온도, 전압력 측정을 통해 공기유량 WA05는 다음의 순서로 구할 수 있다.

경계층 레이크와 전압력 레이크의 각각의 프로브에서 측정된 전압력  $P_{05_{x\_avg}}$ 은 동일한 반경에서 측정된 3개의 산술평균하여 얻은 압력값이며 각 지점에서 덕트 마하수는 아래와 같다.

$$M_{05_{x\_Duct}} = \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1} \left( \left( \frac{P_{05_{x\_avg}}}{PS_{05\_avg}} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right)} \quad (1)$$

Equation 1에서 PS05\_avg는 정압력의 산술평균이다. 이로부터 가장 가까운 두 프로브 사이의 덕트 마하수는 두 프로브사이의 면적을 대표한다고 할 수 있다. 경계층 레이크와 전압력

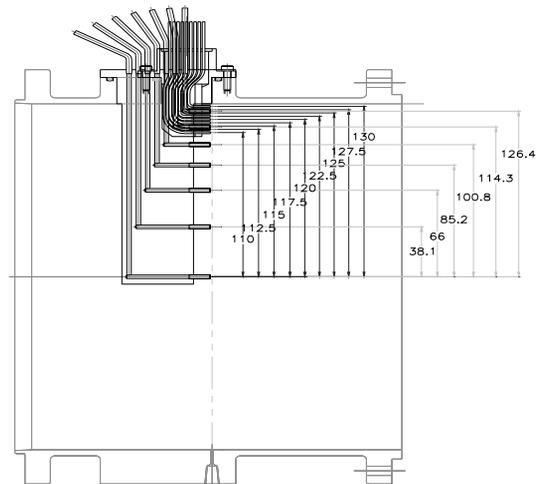


Fig. 5 Location of pressure probe

Table 1. The location of probes

프로브 이름	프로브 위치	두 프로브 사이의 덕트마하수	전체면적에 대한 비
MD17	132.0		
MD16	130.0	0.5*(MD16+MD17)	0.0301
MD15	127.5	0.5*(MD15+MD16)	0.0369
MD14	126.4	0.5*(MD14+MD15)	0.0160
MD13	125.0	0.5*(MD13+MD14)	0.0202
MD12	122.5	0.5*(MD12+MD13)	0.0355
MD11	120.0	0.5*(MD11+MD12)	0.0348
MD10	117.5	0.5*(MD10+MD11)	0.0341
MD09	115.0	0.5*(MD09+MD10)	0.0334
MD08	114.3	0.5*(MD08+MD09)	0.0092
MD07	112.5	0.5*(MD07+MD08)	0.0234
MD06	110.0	0.5*(MD06+MD07)	0.0319
MD05	100.8	0.5*(MD05+MD06)	0.1113
MD04	85.2	0.5*(MD04+MD05)	0.1665
MD03	66.0	0.5*(MD03+MD04)	0.1666
MD02	38.1	0.5*(MD02+MD03)	0.2500
MD01	CL	0.5*(MD01+MD02)	0.0833

레이크의 프로브가 위치하는 반경은 Fig. 5와 같고, 각 프로브가 대표하는 위치와 전체 면적에 대한 비는 Table 1과 같다.

이로부터 면적 가중 평균(area-weighted average)한 덕트 마하수  $MD\_P05AW_{avg}$ 를 구할 수 있다.

05 section 정온도  $TS05[degK]$ 는 온도레이크를 통해 측정된 전온도[degK]와 덕트 마하수로부터 다음 Eq. 2와 같이 구해진다.

$$TS05 = \frac{TS05\_AVG + 273.15}{\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} MD\_P05AW_{avg}^2\right)} \quad (2)$$

음속  $SS05 [m/s]$ 는 정온도로부터 구할 수 있다.

$$SS05 = \sqrt{\gamma \times R \times TS05} \quad (3)$$

05 section 공기유속  $V05 [m/s]$ 는 덕트 마하수와 음속으로부터 구해진다.

$$V05 = MD\_P05AW_{avg}^2 \times SS05 \quad (4)$$

공기유량  $WA05[kg/s]$ 는 Eq. 5와 같다.

$$WA05 = \rho_{05} \times A \times V05 \quad (5)$$

따라서  $WA05$ 를 구하기 위해서는 05 section에서의 면적, 정압력, 정온도, 덕트마하수가 필요함을 알 수 있고, 다음과 같은 가정을 통해 구할 수 있다.

- (1)  $R=287$ ,  $\gamma=1.4$ 인 상수이다.
- (2) 정압력은 축 방향(유동 방향)으로만 변하며, 반경 방향에는 관계없이 일정하다.
- (3) 벽면에서의 덕트 마하수는 0이다.
- (4) 반경 방향 한 지점을 대표하는 압력값은 원주 방향으로 장착된 3개의 레이크의 산술평균값을 사용한다.[4]

2.3 경계층 레이크 없이 공기유량계산

Figure 6에서 다양한 공기유량에서 05 section 덕트 반경에 따른 덕트 마하수의 변화가 보여주

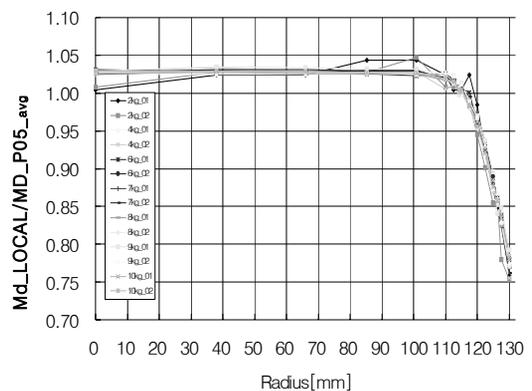


Fig. 6 Duct Mach No. ratio at 05 section duct

는 것과 같이, 덕트 내의 압력분포는 벽면효과 및 대류열전달의 영향으로 인해 반경방향의 분포를 갖게 된다. 벽면근처에서의 압력 프로파일의 영향을 고려하여 공기유량을 측정하기 위해 경계층 레이크를 사용하는데 AETF에서는 벽면 근처에서의 압력분포를 자세히 보기위해 Fig. 4와 같이 1.2mm 직경으로 2mm 간격의 9개의 프로브를 갖는 경계층 레이크를 장착하여 사용하고 있다. 이러한 경계층 레이크는 벽면근처에서의 압력 프로파일을 보여주는 좋은 수단인기는 하지만, 작은 직경으로 인해 이물질이 끼여 막히는 등의 문제가 발생할 경우 정확한 공기유량을 측정하는 데는 한계가 있다.

따라서 경계층 레이크를 장착했을 경우와 장착하지 않았을 경우의 덕트 마하수를 이용하면 덕트 마하수의 함수인  $C_f$  값을 구할 수 있고, 이 값과 실험 보정값을 사용하면 경계층 레이크 없이도 공기유량을 계산할 수 있다. 즉,  $C_f$ 는 Eq. 6과 같이 구할 수 있다.

$$C_f = \frac{MD\_P05\_avg}{MD\_P05AW\_avg} \quad (6)$$

$MD\_P05\_avg$ 는 경계층 레이크를 제외한 전압력 레이크의 각 프로브에서 측정된 압력으로부터 구한 덕트 마하수를 산술평균한 것이고, 경계층 레이크와 전압력 레이크를 통해 측정된 압력

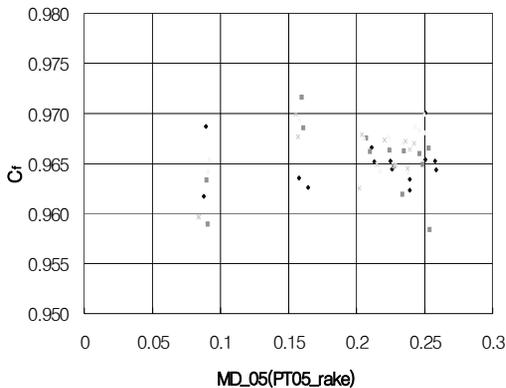


Fig. 7 Flow coefficient  $C_f$

으로부터 면적가중평균해서  $MD\_P05AW\_avg$ 를 얻는다. 덕트 마하수의 변화에 따른  $C_f$  값은 Fig. 7을 통해 0.965임을 알 수 있다. 경계층 레이크를 장착했을 경우와 경계층 레이크 없이  $C_f$  값을 이용하여 측정된 공기유량의 값은 Fig. 8과 같이 최대공기유량 9.73kg/s에서 0.45kg/s의 차이를 보임을 알 수 있고, 전 영역에서 평균 0.29kg/s의 차이를 보인다. 이를 통해 경계층 레이크 없이 계산한 공기유량은 그대로 사용하면 안되고 보정이 필요함을 알 수 있고 이를 보정하여 얻은 실험보정값은 Fig. 9와 같다. 따라서,  $C_f$  값과 실험보정값을 통해 경계층 레이크 없이도 비교적 정확한 공기유량을 구할 수 있음을 알 수 있다[5].

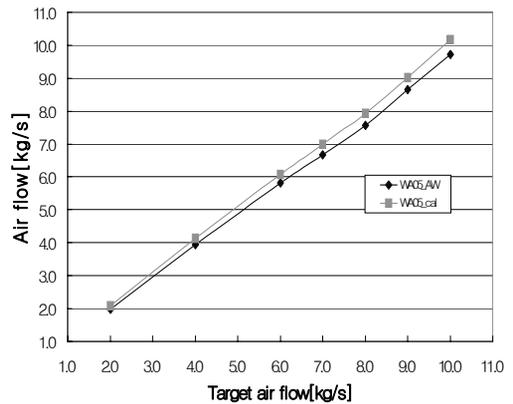


Fig. 8 Air Flow variation

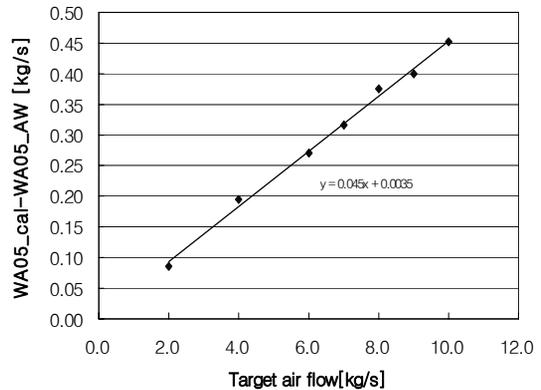


Fig. 9 Flow coefficient  $C_f$

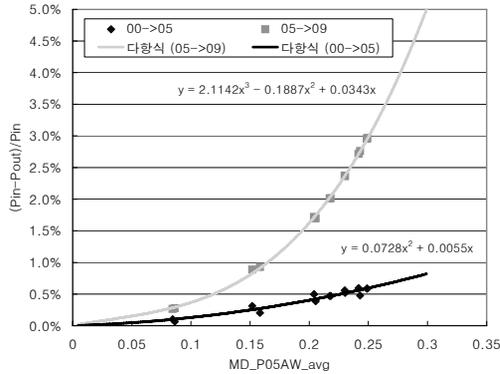
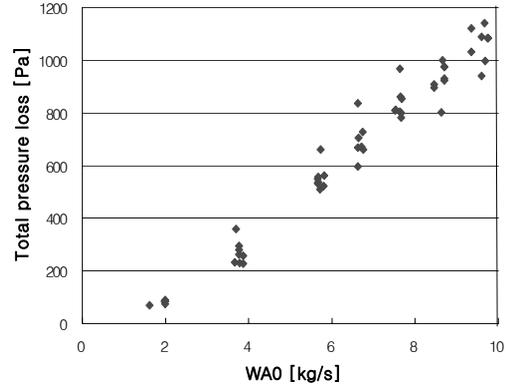
Fig. 10 Flow coefficient  $C_f$ 

Fig. 11 Pressure Loss

### 3. 압력손실 예측

#### 3.1 압력손실 예측방법

05section에서 09section까지의 압력손실이 어느 정도인지를 안다면, 09section에 압력레이크를 장착하지 않아도 09section에서의 압력값을 아래의 과정을 통해 예측할 수 있다.

$PT05_{avg-cal}$ 는 05section에서의 정압력과 덕트 마하수로부터 등엔트로피 과정으로 계산으로 구할 수 있다.

$$PT05_{avg-cal} = PS05_{avg} \times (1 + 0.2 \times MD\_P05AW_{avg}^2)^{3.5} \quad (7)$$

압력손실  $P_{loss}$ 는 아래와 같이 정의한다.

$$P_{loss} = \frac{(PT05_{avg-cal} - PT09_{avg})}{PT05_{avg-cal}} \quad (8)$$

여기서  $PT09_{avg}$ 는 09section 레이크에서 측정된 압력값의 산술평균값이다.

$MD\_P05AW_{avg}$ 의 변화에 따른  $P_{loss}$ 를 그래프로 그리면 Fig. 10과 같다.

05section에서 09section까지  $P_{loss09}$ 는

$$P_{loss09} = 2.1142 \times MD\_P05AW_{avg}^3 - 0.1887 \times MD\_P05AW_{avg}^2 + 0.0343 \times MD\_P05AW_{avg} \quad (9)$$

이므로,

$$PT09_{avg} = PT05_{avg-cal} \times (1 - P_{loss}) \quad (10)$$

로부터 구할 수 있다. 이와 같은 방법으로 안정실에서 05section까지의 압력손실  $P_{loss00}$ 을 고려해보면

$$P_{loss00} = 0.0728 \times MD\_P05AW_{avg}^2 + 0.0055 \times MD\_P05AW_{avg} \quad (11)$$

로부터 계산할 수 있다.

압력손실을 예측할 수 있는 또 다른 방법으로 는 다음과 같다. 안정실에서 측정된 전압력인  $PT00$ 과 측정단면 05 section에서 측정된 전압력  $PT05$  사이의 관계를 정립하기 위하여, 여러 차례의 입구배관 압력손실 측정결과와 엔진시험에서 측정된 결과를 종합하여 측정단면 05까지의 압력손실을 산정하였다.

Figure 11은 안정실과 05 section에서 측정된 압력의 차를 압력손실로 보고 이에 대한 측정결과를 나타낸다. 여기에서 pressure loss factor는

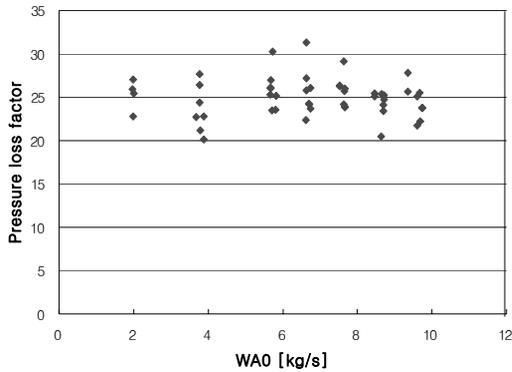


Fig. 12 Pressure Loss Factor

전압력 차이를 배관내의 동압력으로 나눈 값으로 수식으로 표현하면 Eq. 12와 같으며 이를 Fig. 12에 나타내었다. 사용된 단위로는 압력(PT00, PT05, PS02)은 Pa, 온도(T00)는 degK, 안정실에서 벤투리 유량계로 측정된 유량(WA0)은 kg/sec이고, 기체상수(R)은 287 J/kg/degK을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \text{Pressure Loss Factor} &= \frac{PT00 - PT05}{WA0^2 / \rho} \quad (12) \\ &= \frac{(PT00 - PT05) \times PS02}{R \times T00 \times WA0^2} \end{aligned}$$

Figure 12에 나타낸 49개의 데이터로 구한 pressure loss factor의 평균은 24.954이며, 편차는 2.2로 평균의 8.8%이다. 이와 같은 결과로부터 PT05와 PT00의 관계식을 다음과 같이 정의할 수 있으며 이를 실제 실험에서 측정된 값을 직접 사용할 수 있도록 정리하면 Eq. 13과 같다.

$$PT05 = PT00 - 7161.655 \times \frac{TT00 \times WA0^2}{PS02} \quad (13)$$

동일한 방법으로 안정실에서 측정된 압력 PT00과 09 section에서 측정된 압력 PT09의 관계식을 구하면 Eq. 14와 같음을 알 수 있었다.

$$PT09 = PT00 - 35186.657 \times \frac{TT00 \times WA0^2}{PS02} \quad (14)$$

측정단면 05 section에 장착된 rake의 압력손실과 측정단면 05부터 엔진입구까지의 압력손실을 산정하기 위해 측정단면 05 section과 09 section에 레이크를 모두 장착하고 압력손실을 측정하고, 이 결과를 측정단면 09 section에만 레이크를 장착한 결과와 비교함으로써 측정단면 05 section의 레이크 압력손실을 예측하였다. 측정단면 05 section까지의 압력손실을 산정한 과정과 동일한 방법으로 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

$$05 \text{ section rake loss} = 7835 \times \frac{TT00 \times WA0^2}{PS02} \quad (15)$$

엔진 입구 덕트로 공급되는 공기유량의 압력손실 측정에 대한 여러 접근 방법을 통해 엔진고공환경시험설비의 입구 덕트에서의 공기유량 측정의 신뢰성 및 안정성 등을 실시간으로 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 더미엔진(dummy engine)을 장착하고 공기유량을 2kg/s에서 10kg/s까지 2kg/s단위로 변화시키면서 05 section에 장착된 전압력 레이크, 경계층 레이크, 온도 레이크를 이용하여 입구 덕트 유량을 실시간으로 계산할 수 있는 방법을 제시하였다.

또한, 측정된 05 section에서의 압력 프로파일을 이용하여 경계층 레이크를 장착했을 경우와 장착하지 않았을 경우의 덕트 마하수를 이용하면 덕트 마하수의 함수인 유량계수 C값을 구할 수 있으므로 이를 이용해 경계층 레이크를 장착하지 않았을 경우에도 공기유량을 측정할 수 있는 방법을 기술하였다. 유량계수가 0.965임을 이용하여 계산한 공기유량은 최대 공기유량인 9.73kg

/s에서 0.45kg/s 차이가 남을 알 수 있었고 이를 통해 경계층 레이크 없이 계산한 공기유량은 보정이 필요함을 알 수 있었다.

05 section에서 09 section까지의 압력손실을 이용하여 09 section에서의 압력 손실량을 예측하는 방법을 나타내었고 최대 2.97%의 손실이 있음을 확인하였다. 그리고 안정실에서 엔진입구까지의 pressure loss factor를 정리하였으며 레이크가 장착되지 않았을 경우의 압력손실도 예측할 수 있음을 알 수 있었다. 공기유량 측정 및 압력손실에 대한 여러 다양한 방법을 사용하여 접근함으로써 고공시험설비의 공기유량 측정값의 신뢰성 및 안정성 그리고 설비유지측면에서의 운용성을 보고자 하였다.

#### 참 고 문 헌

1. 이진근, 김춘택, 양수석, 이대성 “고공 환경 엔진 시험,” 한국추진공학회지, 제9권 4호, 2005, pp.104-111
2. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices-Part 1, ISO5167-1, 1991-12-15
3. 한국항공우주연구원, "비행체 추진기관 고공 성능시험의 신뢰도 향상과 비정상상태 시험 기술에 관한 연구“, 2004
4. AGARD, "Uniform Engine Testing Program Phase I "
5. Robert W. Fox, Alan T. McDonald, Pilip J. Pritchard., "Introduction to fluid mechanics", 1934, pp.162