

論文

엔진 고도 시험의 측정 신뢰성 평가

이진근*, 양인영*, 양수석*,곽재수**

Reliability of Measurement Estimation in Altitude Engine Test

Jinkun Lee*, Inyoung Yang*, Sooseok Yang*, and Jae Su Kwak**

ABSTRACT

The altitude engine test is a sort of engine performance tests carried out to measure the performance of a engine at the simulated altitude and flight speed environments prior to that at the flight test. During the performance test of a engine, various values such as pressures and temperatures at different positions, air flow rate, fuel flow rate, and the load by thrust are measured. These measured values are used to derive the representative performance values such as the net thrust and the specific fuel consumption through a momentum equation. Hence each of the measured values has certain effects on the total uncertainty of the performance values. In this paper, the combined standard uncertainties of the performance variables at the engine test were estimated by the uncertainty analysis of the measurement values and the repeatability and reproducibility of the altitude test measurement were assessed by the analysis of variation on the repeated test data with different operator groups.

Key Words : 측정신뢰성(Reliability of Measurement), 측정불확도(Uncertainty of Measurement), 분산분석(ANOVA), 엔진 고도 시험(Altitude Engine Test)

1. 서 론

측정결과의 신뢰성을 나타내기 위하여 지금까지는 오차, 정확도, 정밀도, 불확도 등의 여러 가지 용어들이 사용되어 왔으나, 분야에 따라 표현 방법이 달라서 통일된 지침이 필요하게 되었으며 1993년 국제표준화기구(ISO)에서 측정불확도 표현 지침서(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)가 발행된 후, 이 지침서에 따라

서 측정불확도를 구하고 표현하는 방법이 많은 분야에 확산되어 사용되고 있다[1].

한국항공우주연구원 항공추진국가지정연구실에서는 2003년 ISO 17025 인정 및 ISO 9001 인증을 획득하였으며 이를 계기로 국제표준화기구의 지침에 따라 고공환경 엔진시험의 시험결과에 대한 불확도 추정을 수행하고 있다[2].

고공환경 엔진시험은 모사된 고도 및 비행속도 환경에서의 엔진 성능을 측정하기 위한 것으로서 위험도가 높은 개발 엔진의 비행 성능 시험에 선행하여 실제 비행 환경을 모사한 고도, 속도 환경에서 정확한 엔진의 성능 값 도출을 목적으로 하고 있으며 성능 값 도출을 위해 다양한 압력 및 온도, 공기유량, 연료유량 및 작용력 등

* 한국항공우주연구원 항공추진그룹

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
교신저자, jskwak@hau.ac.kr
경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

을 측정하고 이러한 측정값들을 운동량 방정식 등에 적용하여 순추력 및 비연료소모율을 구하고 있다[3].

고공환경 엔진성능시험에서 시험 결과의 신뢰성을 나타내기 위해서는 시험의 정확도, 반복성 또는 재현성을 대표적인 척도로 사용하고 있다.

본 논문에서는 시험 결과의 정확도를 나타내기 위해 측정불확도 분석을 수행한 결과와 고공환경 엔진시험의 반복성 및 재현성을 위하여 적용되는 시험 기법에 대한 설명, 그리고 시험에 참여한 서로 다른 그룹간의 시험결과에 대한 재현성을 보장하기 위해 적용된 분산분석 기법에 대하여 기술하였다.

2. 본 론

2.1 측정 불확도 분석

고공환경 엔진성능 시험에서는 터보제트 및 터보팬 엔진과 같은 가스터빈 엔진의 추력과 단위 추력 및 시간당 사용된 연료량을 나타내는 비연료소모율이 주요 성능변수로 사용된다.

엔진의 연료소모량은 엔진에 유입되는 연료 라인에 유량계를 사용하면 간단히 측정되나 엔진의 추력은 노즐에서 분출되는 고온 고속의 제트 속도 분포를 정확히 측정하는 것이 어렵기 때문에 로드셀에 가해지는 힘을 측정하여 추력값을 산출하게 된다.

엔진 입구 덕트는 안정실(stilling chamber), 벨 마우스 및 슬라이딩 덕트로 구성되어 있으며 엔진 정렬 방향으로 슬라이딩 덕트가 자유롭게 움직일 수 있도록 되어 있어 이면을 기준으로 엔진 성능 측정 계산을 위한 제어체적(control volume) 구성하게 된다.

엔진의 추력 측정 과정은 단계적으로 이루어진다. 첫 번째로 엔진이 장착된 시험대(test bed)에 설치된 로드셀이 측정하는 작용력(F_M)을 측정한다. 이 작용력은 시험대에 엔진을 장착함으로써 발생하는 부과하중(F_T : tare load)을 보정한 것이다. 두 번째로 제어체적에 대한 운동량 방정식을 이용하여 흡입구 덕트에 작용하는 램항력 및 압력항력을 보정하여, 엔진 노즐의 출구단면에 작용하는 총추력(F_G : gross thrust)를 산출하게 된다. 마지막으로 총추력에서 비행자유류의 공기 유입에 의한 램항력을 제거하여 엔진의 순추력(F_N : net thrust) 값을 산출해 낸다.

엔진의 총추력 계산을 위한 운동량 방정식은

식(1)과 같이 계산되며 제어체적 내에서 항력을 계산하기 위하여 Fig. 1에서와 같이 변수명의 하첨자로 측정위치를 구분하고 있다[4,5].

$$F_G = F_M + F_T + W_{A01} V_{05} + (P_{S02} - P_{S0}) A_{i01} + (P_{S01} - P_{S0}) (A_{o01} - A_{i01}) \quad (1)$$

$$F_N = F_G - W_{A01} V_{\infty} \quad (2)$$

$$SFC = W_f / F_N \quad (3)$$

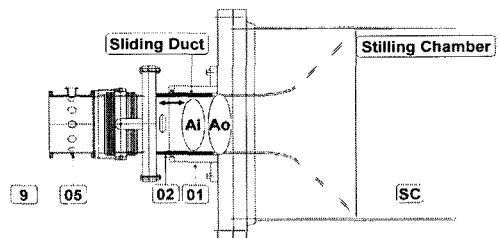


Fig. 1 Inlet duct configuration

[변수명]

P : 압력, T : 온도, W : 유량, A : 단면적

[하첨자]

S 정압 또는 정온도

T 전압 또는 전온도

A 공기

f 연료

[위치]

i 덕트 입구

o 덕트 출구

AM 유량계

SC 안정실

01 고정 덕트

02 슬라이딩 덕트

05 엔진 입구 덕트

9 엔진 외부 환경(시험부)

총추력 계산에 사용된 흡입 공기 유량은 시험설비에 장착된 벤추리 형식의 유량계(venturi meter)에 의해 구해지며, 측정식은 식(4)와 같다.

본 벤추리(venturi) 유량계는 벤추리 형상에 따른 전압손실 값을 이용하여 유량을 산출해낸다. 공기 유량 계산식에 사용되는 측정값들은 전압, 전압손실, 전온도, 벤추리 목 직경, 유로 직경 등이 있다[6].

$$W_{A01} = \frac{\pi d^2}{4} C_d Y \sqrt{\frac{2\rho\Delta P}{1-\beta^2}} \quad (4)$$

실제 데이터의 측정에는 다양한 불확도의 원인들이 있으나 본 연구에서는 외관상 같은 조건이지만 반복적인 측정에서 일어나는 변동과 기기의 분해능 또는 검출 한계를 측정불확도의 주요 원인으로 규정하고 불확도 평가를 수행하였다.

불확도 성분의 평가는 반복 측정된 값들에 대하여 통계학에서 사용되는 표본 표준편차를 분산의 추정값으로 계산하는 A형 불확도 평가(Type A evaluation of uncertainty)와 이미 알려진 정보를 통하여 추정 표준편차를 구하는 B형 불확도 평가(Type B evaluation of uncertainty)로 구분하여 측정값들에 대한 표준불확도를 산출하였다[1].

A형 표준불확도는 측정값들의 50회 샘플링에 대하여 표본평균의 표준편차로 구하였다.

엔진 시험에 사용되는 측정시스템의 샘플링 주파수는 10Hz이며 50회의 샘플링을 통하여 5초간의 측정값을 수집하므로 A형 표준불확도는 시험설비의 자동제어에 의한 약 2~4초 간격의 섭동 주기를 포함하게 된다.

B형 표준불확도는 알려진 기기의 분해능 또는 검출한계를 통하여 산정하였으며 표준불확도(standard uncertainty)는 A형 표준불확도와 B형 표준불확도의 합성 분산에 대한 제곱평균으로 구하였다. 표 1은 이들 측정값의 평균 및 측정불확도 추정 결과를 보여준다.

위와 같이 추정된 측정값들의 표준불확도를 이용하여 공기유량에 대한 합성표준불확도(combined standard uncertainty)를 먼저 구하고, 공기유량을 포함한 다른 측정값들을 입력량으로 하는 순추력과 비연료소모율의 합성표준불확도를 계산하였다.

상관관계가 없는 입력량의 합성표준불확도는 다음 식과 같이 계산된다.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2 \quad (5)$$

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \approx \frac{\Delta f}{\Delta x_i} = \frac{f(1.01x_i) - f(x_i)}{1.01x_i - x_i} \quad (6)$$

여기서 $u(x_i)$ = 표준불확도,
 $u_c(y)$ = 합성표준불확도
 c_i = 감도계수

표 1 Uncertainty estimation of variables

variables	unit	A type	B type	u(x)
P_{am}	Pa	1.296	3.534	3.764
ΔP_{am}	Pa	1.156	2.036e-1	1.173
T_{am}	K	6.547e-3	2.000e-1	2.001e-1
d	m	-	1.443e-5	1.443e-5
D	m	-	1.443e-5	1.443e-5
C_d	-	-	3.637e-3	3.637e-3
P_{s01}	Pa	1.772	3.000e+1	3.005e+1
P_{s02}	Pa	2.113	3.000e+1	3.007e+1
P_{T05}	Pa	2.843e-1	3.000e+1	3.000e+1
P_{s05}	Pa	7.985	3.000e+1	3.104e+1
T_{T05}	K	1.627e-3	1.200e-1	1.200e-1
P_{s0}	Pa	6.937e+1	3.000e+1	7.558e+1
F_M	N	2.442	1.768	3.015
A_{t01}	m ²	-	2.000e-5	2.000E-5
A_{t01}	m ²	-	2.000e-5	2.000E-5
P_{TSC}	Pa	3.879	3.000e+1	3.025e+1
T_{TSC}	K	1.123e-3	2.000e-2	2.003e-2
W_f	kg/hr	7.595e-2	2.100	2.101

공기유량 계산식 (4)에서 Y, ρ, β 등은 압력, 온도, 목(throat) 직경, 관(pipe) 직경 등의 함수이므로 W_{A01} 은 식(7)과 같이 형태로 표현된다.

$$W_{A,01} = f(P_{am}, \Delta P_{am}, T_{am}, D, d, C_d) \quad (7)$$

공기유량의 입력변수 중 목 직경과 관 직경은 A형 불확도를 평가하지 않았으며 B형 불확도는 측정 장치인 버니어 캘리퍼스 분해능 0.05mm의 반범위(half range)를 오차로 산정하여 구하였다.

벤추리 유량계의 형상계수인 C_d 도 A형 불확도는 평가하지 않았으며 B형 불확도는 최대 오차 0.63% (포함인자 $k=2$, 95.45% 신뢰수준 구간)의 반범위를 오차로 산정하여 구하였다.

압력과 온도와 같은 측정된 입력값의 불확도는 이미 계산된 표 1의 값을 사용하였다.

표 2는 공기유량 계산에 사용된 입력값들의 감도계수와 불확도 그리고 식(5)에 의해 계산된 공기유량의 합성표준불확도를 보여준다.

위와 같이 구한 공기유량의 합성표준불확도는 공기유량의 B형 표준불확도가 된다.

공기유량의 A형 표준불확도는 식(4)에 의하여 계산된 공기유량의 50회 반복측정 결과가 되며 공기유량은 다시 순추력을 계산하기 위한 입력변수로 사용되었다.

표 2 Combined standard uncertainty of W_{A01}

input	sensitivity coeff.	uncertainty	percentage
P_{am}	2.648e-5	3.764	0.0027
ΔP_{am}	7.697e-4	1.173	0.0259
T_{am}	1.139e-2	2.001e-1	0.0633
d	5.243e+1	1.443e-5	0.0052
D	4.019e-1	1.443e-5	0.0019
C_d	7.234	3.637e-3	-
W_{A01}		2.642e-2	0.3653

표 3 Combined standard uncertainty of F_V

input	sensitivity coeff.	uncertainty	percentage
W_{A01}	139.1335	2.642e-2	0.3653
P_{S01}	0.0105	3.005e+1	0.0220
P_{S02}	0.054640	3.007e+1	0.0224
P_{T05}	0.049441	3.000e+1	0.0214
P_{S05}	0.047436	3.104e+1	0.0234
T_{T05}	1.129692	1.200e-1	0.0380
P_{S9}	0.040467	7.558e+1	0.0746
F_M	1.000	3.015	0.4126
A_{i01}	2.273e+3	2.000e-5	0.0362
A_{o01}	3.535e+4	2.000e-5	0.0304
P_{TSC}	1.764e-2	3.025e+1	0.0215
T_{TSC}	2.729	2.003e-2	0.0063
F_V		5.0909	0.2646

표 4 Combined standard uncertainty of SFC

input	sensitivity coeff.	uncertainty	percentage
W_f	5.198e-4	2.101	0.6973
F_V	8.062e-5	5.091	0.2646
SFC		0.001167	0.7449

총추력, 순추력 및 비연료소모율에 대한 합성 표준불확도 또한 위와 같은 방식으로 산출하였으며 표 3과 표 4는 순추력 및 비연료소모율에 대한 입력량들의 감도계수와 불확도를 보여준다.

엔진 시험은 해면고도 표준대기 상태에서 비행속도가 마하수 0.7 인 엔진 순항 조건에 대하여 수행되었으며 상기 불확도 분석결과는 이러한 시험조건에서 순추력 및 비연료소모율에 대한 합성표준불확도를 보여주고 있다.

엔진의 시험조건이 바뀌면 시험 설비의 반응 특성에 따라 측정값들의 분포에 의해 결정되는 A형 표준불확도 값들이 바뀌게 되므로 시험조건

에 따라 엔진 성능 변수의 합성표준불확도 값은 다시 산출되어야 한다.

2.2 확장불확도 분석

측정량의 합리적인 추정값이 이루는 분포의 대부분을 포함할 것으로 기대되는 구간을 정의하기 위한 확장불확도는 식(8)과 같이 결정된다.

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (8)$$

여기서, U = 확장불확도,
 k = 포함인자

포함인자를 구하기 위해서는 합성표준불확도의 유효자유도를 측정하여야 하며 유효자유도는 Welch-Satterthwaite식인 식(9)을 이용하여 추정하였다[1].

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{[c_i u(x_i)]^4}{\nu_i}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (9)$$

여기서, ν_{eff} = 유효자유도
 ν_i = $u(x_i)$ 의 자유도

입력변수의 자유도는 A형 평가로 불확도를 추정하였을 경우 표본 집단의 자유도가 되고 B형 평가로 불확도를 추정하였을 경우 식(10)에 의해 구해진다[1].

$$\begin{aligned} \nu_i &\approx \frac{1}{2} \frac{u(x_i)^2}{\sigma(u(x_i))^2} \approx \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} \right]^{-2} \\ &\approx \frac{1}{2} \left(\frac{100}{R} \right)^2 \end{aligned} \quad (10)$$

표 5, 6, 7은 각각 공기유량, 순추력 및 비연료소모율에 대한 자유도 계산 결과를 보여준다.

주요 성능 변수에 대한 유효자유도가 산정되면 확장불확도를 계산하며 유효자유도가 100보다 충분히 큰 값이므로 95.45%의 신뢰수준에서 포함인자 $k=2$ 를 산정할 수 있다. 이에 따라, 순추력과 비연료소모율의 확장불확도는 아래와 같이 구해지며 측정값에 대한 확장불확도는 각각 0.53%, 1.49%에 해당한다.

$$U_{F_V} = k \cdot u_{F_V} = 2 \times 5.090953 = 10.181906$$

$$(\nu_{eff.F_N} = 315 \gg 100)$$

$$U_{SFC} = k \cdot u_{SFC} = 2 \times 0.001167 = 0.002334$$

$$(\nu_{eff.SFC} = 258 \gg 100)$$

표 5 Degree of freedom of W_{A01}

DOF	variable	A type	B type
ν_i	P_{am}	49	200*
	ΔP_{am}	49	200*
	T_{am}	49	200*
	d	N/A	∞^{**}
	D	N/A	∞^{**}
	C_d	N/A	∞^{**}
ν_{eff}	W_{A01}	3307427	

표 6 Degree of freedom of F_N

DOF	variable	A type	B type
ν_i	W_{A01}	49	3307427
	P_{S01}	199	200*
	P_{S02}	199	200*
	P_{T05}	2099	200*
	P_{S05}	199	200*
	T_{T05}	399	200*
	P_{S0}	49	200*
	F_M	49	200*
	A_{i01}	N/A	∞^{**}
	A_{o01}	N/A	∞^{**}
	P_{TSC}	199	200*
	T_{TSC}	199	200*
ν_{eff}	W_{A01}	315	

표 7 Degree of freedom of SFC

DOF	variable	A type	B type
ν_i	W_f	49	200*
	F_M	N/A	315
ν_{eff}	SFC	258	

2.3 반복성 및 재현성 시험기법

고공환경엔진시험은 고도조건에서 일정한 속도로 비행하고 있는 항공용 엔진의 정적 성능을 평가하기 위한 것으로 다양한 제어 밸브들을 통해 고도 비행 환경을 모사한다.

시험환경을 설정하기 위해서는 상기 제어 밸

브들을 모두 제어할 수행하여 엔진 입구의 전압력, 전온도 및 시험부 정압을 조절하고 있다.

이 경우 외부의 교란이 없어도 주기적으로 제어밸브들이 피드백 제어를 수행함으로 인하여 2~4초 사이의 주기를 갖는 시험설비측정값의 진동(oscillation)이 발생할 수 있다. 특히 엔진 입구 온도 모사과정에 배관이 충분히 예열되어 정상상태에 이르기까지 지속적인 온도제어가 이루어지게 된다. 이러한 압력, 온도 제어는 시험설비 반응특성에 따라 시험설정 환경의 불확실성을 증가시킬 수 있으나, 시험조건을 충분한 시간동안 유지시키면 안정적이고 재현성을 갖는 시험조건을 설정할 수 있게 한다.

시험결과의 정확도를 높이기 위해서는 자동 제어를 통해 시험조건이 완전히 안정화 된 후 피드백 제어를 수동 제어로 전환하는 방법을 사용할 수 있다. 이 경우 더 이상 피드백 제어가 일어나지 않으므로 정밀도와 연속 측정 반복성이 높아지게 되나 국부적인 교란에 시험조건이 미세한 변화가 발생될 수 있어 지속적으로 시험 조건을 감시하지 않는 한 반복성이 떨어지는 단점이 있다.

2.4 분산분석 기법을 통한 비교속련도시험 분석

앞 절에서 언급한 재현성 시험기법을 사용하여도 시험자 집단이 다를 경우 시험결과의 재현성을 보장하기는 어렵게 된다.

엔진시험에는 총 5명의 시험자가 참여하며 각각 시험 총괄, 설비 제어, 데이터 획득시스템 제어, 엔진 성능 제어, 시험부 모니터링의 역할을 분담하고 있다.

시험자 집단이 바뀌어 동일한 시험을 수행할 경우에도 엔진 성능의 재현성이 보장되는지 여부를 판단하기 위해 본 연구실에서는 주기적으로 비교속련도시험을 실시하고 있으며 분산분석을 통하여 시험결과의 동일성을 평가하고 있다.

표 8과 표 9는 재현성을 보장하기 위한 자동 제어 시험절차를 따르는 상태에서 구성원이 서로 다른 두 팀을 이루어 각 시험 당 200회씩 샘플링하고 평균값을 구하는 시험을 21회 수행한 시험 결과이다.

분산분석 결과에 대하여 유의수준 5%로 귀무가설 검정을 수행하면 팀에 대한 P 값(p value)은 0.05보다 크므로 두 팀의 결과는 차이가 없다고 볼 수 있으며 샘플에 대한 P 값은 0.05보다 작으므로 샘플링 결과는 서로 다르다고 볼 수 있다.

표 8 Comparison test result

Sampling	Team A*	Team B*
1	5310.0	5244.5
2	5377.1	5369.5
3	5383.8	5312.2
4	5254.0	5249.0
5	5361.4	5346.1
6	5266.8	5233.4
7	5366.6	5342.1
8	5255.9	5314.8
9	5327.3	5229.1
10	5372.3	5346.7
11	5292.7	5260.5
12	5262.0	5236.1
13	5380.9	5375.6
14	5318.6	5301.8
15	5230.7	5261.6
16	5352.5	5361.6
17	5248.0	5376.4
18	5372.1	5300.0
19	5264.0	5272.9
20	5287.3	5360.4
21	5367.1	5299.5
Average	5316.6	5304.3
Std. eviation	53.0	51.4

* 보안상의 이유로 임의로 정수배한 수치임

표 9 Two-way ANOVA result

Source	DF	SS	MS	F	P
Team	1	172	172	1.10	0.307
Sample	20	8974	449	2.86	0.012
Error	20	3140	157		
Total	41	12286			

이는 자동제어 시험절차를 따를 경우 외부환경의 변화에 대한 민감도가 상대적으로 낮아지게 되어 두 팀의 시험결과에 대한 재현성이 높아지게 되나 이에 반하여 자동제어에 의한 입력변수들의 장주기 진동으로 입력 값들의 분포범위가 넓어지게 되어 시험 결과의 정밀도는 다소 떨어지게 되는 것을 보여준다.

3. 결론

한국항공우주연구원에서 수행하고 있는 고공환경 엔진시험의 신뢰성 평가를 위하여 주요 엔진 성능 측정 변수에 대한 측정불확도 분석과 분산분석을 수행하였다. 측정불확도 분석 결과 엔진의 순추력과 비연료소모율에 대하여 1% 대의 비교적 높은 측정불확도를 갖는 것을 확인하였으며 분산분석 수행결과 엔진 성능 시험의 재현성을 보장하는 시험절차의 적용 유무에 따라 정밀도와 재현성이 서로 절충관계에 있는 것을 확인할 수 있었다.

이에 따라, 정밀도와 재현성을 모두 일정 수준 이상으로 높이기 위한 연구가 향후 수행되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 고공환경 엔진시험의 신뢰도 평가를 위한 분석 방법을 제시하였으며 이 방법은 시험의 목적과 특성에 맞게 다양한 시험절차를 개발하고 활용하여 원하는 시험결과를 도출하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 과학기술부에서 지원한 국가지정연구실과제의 연구 내용 중 일부입니다.

참고문헌

- [1] 한국교정시험기관인정기구, 2002, 측정결과의 불확도 추정 및 표현을 위한 지침
- [2] 이진근, 김춘택, 차봉준, 양수석, 이대성, 2003, "KOLAS 및 ISO 9001 품질경영시스템 구축", 유체기계공업학회지, 제6권 4호, pp. 66~69.
- [3] 윤민수, 양수석, 이대성, 2001, "가스터빈엔진의 고공환경 성능의 측정불확도 분석", 항공우주학회지, 제29권 1호, pp. 128~133.
- [4] 전용민, 양인영, 남삼식, 김춘택, 양수석, 이대성, 2002, "소형 터보제트 엔진 시험 및 불확도 분석", 한국항공우주학회지, 제30권 5호, pp. 118~126.
- [5] Y. Jun, et al., 2004, "Uncertainty Analysis and Improvement of an Altitude Test Facility for Small Jet Engines", KSAS International Journal, Vol. 5, No. 1, pp. 46~56.
- [6] 이대성 외, 2003, "기체유량 측정에서 몬테카를로 모사를 이용한 측정불확도 평가", 대한기계학회지, 제27권 12호, pp. 1758~1765.