

기체 유량 측정에서 몬테 카를로 모사를 이용한 측정불확도 평가

이대성[†] · 양인영* · 김춘택* · 양수석*
(2002년 7월 24일 접수, 2003년 10월 2일 심사완료)

Uncertainty Assessment Using Monte Carlo Simulation in Gas Flow Measurement

Daesung Lee, Inyoung Yang, Chuntaek Kim and Sooseok Yang

Key Words: Measurement(측정), Uncertainty(불확도), Monte Carlo Simulation(몬테 카를로 모사), Gas Flow(기체 유량), Sensitivity Coefficient(감도 계수)

Abstract

Monte Carlo simulation(MC) method was used as an uncertainty assessment tool for gas flow measurement in this paper. Uncertainty sources for gas flow measurement were analyzed, and probability distribution characteristics of each source were discussed. Detailed MC methodology was described including the effect of the number of simulation. The uncertainty result was compared with that of the conventional sensitivity coefficient method, and it was revealed that the results were different from each other for this particular gas flow measurement case of which the modelling equation was nonlinear. The MC was comparatively simple, convenient and accurate as an uncertainty assessment method, especially in cases of complex, nonlinear measurement modelling equations. It was noted that the uncertainty assessment method should be selected carefully according to the mathematical characteristics of the measurement.

기호설명

C_p, C_v : 정압/정적 비열(specific heat)
 D : 배관 지름(duct diameter)
 M : 마하 수(Mach number)
 MW : 분자량(molecular weight)
 m : 평균값(mean value)
 n : 측정 횟수(number of measurement)
 R, R_u : 기체 상수(gas constant)
 s : 표준 편차(standard deviation)

V : 유동 속도(flow velocity)
 W_A : 공기 유량(airflow)
 γ : 비열비(specific heat ratio)
 ρ : 밀도(density)

아래 첨자

con : 변환에 의한 값
 g : 게이지 값
 p : 압력이 일정한 과정에서의 값
 r : 참조값
 S : 정적(static)
 s : 공간적 불균일성에 의한 값
 T : 정체(total)
 t : 시간적 불균일성에 의한 값
 v : 부피가 일정한 과정에서의 값

[†] 책임저자, 회원, 한국항공우주연구원 항공기술실

E-mail : dslee@kari.re.kr

TEL : (042)860-2330 FAX : (042)860-2626

* 한국항공우주연구원 항공기술실 항공추진그룹

1. 서론

측정에 있어서 측정불확도 분석의 중요성이 강조되기 시작한 것은 그리 오래된 일은 아니다. 그러나 국제표준협회(ISO)에서 “측정 불확도 표현 지침(Guide to the expression of uncertainty in measurement; GUM)⁽¹⁾을 발간하여 표준으로 삼은 이후로 세계적으로 교정, 시험, 검사 분야에서 이루어지는 모든 측정 행위에는 반드시 측정불확도 분석이 수반되어야 한다는 인식이 빠르게 확산되고 있다. 또한 측정 시스템을 구성하는 단계에서도 측정불확도를 분석하여야 요구되는 수준에 맞는 측정시스템을 구성할 수 있다.

측정불확도를 평가하는 방법으로는 문헌 (1)에서 제시한 감도 계수(sensitivity coefficient)를 이용한 방법이 종래에 가장 보편적으로 사용되어 왔으나, 이 외에도 행렬을 이용한 방법, 몬테 카를로 모사를 이용한 방법 등이 존재한다. 감도 계수를 이용한 방법은 컴퓨터의 보조가 필요 없고, 간단한 수학적 모델에 적용하기에 가장 손쉬운 방법이지만, 다음과 같은 몇 가지 이유로 인해 보다 실제에 가까운 모델을 사용하기에는 한계가 있다고 판단된다.

- (1) 이 방법에 사용되는 불확도 전파의 법칙이 본질적으로 테일러 전개(Taylor expansion)의 1차 근사식이다.
- (2) 감도 계수를 계산하는 과정에서 편미분 계산이 까다로워 근사식을 이용하여야 한다.
- (3) 반복 계산(iteration)이 들어가는 모델 식을 처리하기 어렵다.
- (4) 측정에 대한 수학적 모델이 복잡한 경우 불확도 전파의 법칙을 이용한 계산이 매우 복잡해진다.

이에 반해 몬테 카를로 모사법(Monte Carlo Simulation; MC)은 컴퓨터에 많이 의존하는 방법으로, 종래의 방법에 비해 다음과 같은 경우에 적용하기에 유리한 것으로 알려져 있다.⁽²⁾

- (1) 측정의 입력값·출력값의 개수가 많은 경우
- (2) 측정의 수학적 모델이 비선형이어서 감도 계수를 계산할 때 편미분의 2차항까지 고려해야 하는 경우
- (3) 측정불확도가 커서 선형성 가정이 성립할 수 없는 경우
- (4) 측정의 수학적 모델이 복잡한 경우

따라서 최근에는 간단한 모델 식에 대하여 이 MC를 적용하여 측정불확도를 평가함으로써 모델 식의 성질과 측정불확도의 거동의 상관관계를 밝히는 연구가 시도되고 있다.⁽²⁻⁴⁾

본 논문에서는 기체 유량 측정을 예로 들어 MC를 적용한 측정불확도 분석을 수행함으로써, 이 방법이 종래의 방법에 비해 어떤 장점을 갖고 있는지, 또한 이 기법을 기계공학 측정 분야에 적용할 수 있는 가능성이 있는지를 알아보고자 하였다.

2. 측정 과정

본 연구에서는 한국항공우주연구원 항공추진그룹에서 운영 중인 엔진고공환경성능시험설비(이하 AETF)의 공기 유량 측정 시스템을 연구 대상으로 삼았다. 엔진 성능 시험에 있어서 엔진 입구의 공기 유량 측정은 가장 중요한 부분의 하나로서, 종래에 저자 일동은 이에 대한 측정불확도 평가 연구를 GUM에서 제시된 종래의 방법으로 수행해왔다.⁽⁵⁻⁷⁾

그러나 기체 유량 측정은 측정 모델식이 비선형이고 복잡하며 입력량의 개수도 많은 등 앞서 논의한 MC가 유리한 면이 많은 것으로 판단하였으며, 따라서 본 연구에서는 이 측정불확도를 MC를 이용한 방법으로 평가함으로써 종래의 방법에 의한 결과와 비교하였다.

AETF에서는 공식적으로 아음속 벤추리 유량계를 이용한 공기 유량 측정 시스템을 사용하고 있으며,⁽⁸⁾ 이 측정 시스템에 대한 중복 확인(redundancy check)을 위해 전압-정압 튜브(pitot-static tube)를 이용한 방법을 동시에 사용하고 있다. 본 연구에서는 이 전압-정압 튜브를 이용한 방법에 대하여 측정불확도 평가를 수행하였다.

2.1 측정의 수학적 모델

전압-정압 튜브를 이용한 기체 유량 계산 방법은 다음 식 (1)을 바탕으로 한다.

$$W_A = \rho VA \quad (1)$$

측정불확도 평가에서는 수학적 모델을 만드는 데 있어서 직접적으로 측정되는 값들에 관하여

만드는 것이 매우 중요하다. V 는 직접적으로 측정되는 값이 아니며, 기체의 전압력 및 정압력으로부터 간접적으로 계산된다. 즉,

$$V = \sqrt{\frac{2(P_T - P_S)}{\rho}} \quad (2)$$

따라서, 식 (1)은 식 (3)과 같이 변형된다.

$$W_A = \sqrt{2\rho(P_T - P_S)}A \quad (3)$$

그런데 ρ 는 정압력 및 정온도로부터 계산된다.

$$\rho = \frac{P_S}{RT_S} \quad (4)$$

A 역시 배관 지름의 측정값 D 로부터 간접적으로 계산된다고 할 수 있다.

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (5)$$

또한 본 AETF의 경우, P_T 및 P_S 역시 직접적으로 측정되지는 않으며, 게이지 압력 $P_{T,g}$ 및 $P_{S,g}$ 와 대기압 P_r 을 측정하여 다음과 같은 식으로 계산한다.

$$P_T = P_{T,g} + P_r, \quad P_S = P_{S,g} + P_r \quad (6)$$

한편, 식 (4)에서의 T_S 역시 직접적으로 계산되지 않고 식 (7)로 계산되므로,

$$T_S = \frac{T_T}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2} \quad (7)$$

최종적으로 W_A 의 계산식은 식 (8)과 같다.

$$W_A = \sqrt{2 \frac{P_S}{RT_T} \left(\frac{P_T}{P_S} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} (P_T - P_S) \frac{\pi}{4} D^2} \quad (8)$$

식 (8)에서의 P_T 및 P_S 역시 마찬가지로 위의 식 (6)으로부터 계산되어야 한다. 식 (8)에서 확인할 수 있는 것처럼 W_A 는 π 를 제외한 모든 인자에 대해 비선형 함수이며, 특히 γ 에 대해서는 지수 함수 관계에 있다.

2.2 측정 요소 및 측정 장비

앞에서 기술한 측정의 수학적 모델에 따라 공기 유량 계산을 위하여 직접적으로 측정되는 측정 요소(입력량)는 8개로 정리된다. 이 각각의 측정 요소에 대한 측정 장비를 정리하면 table 1과 같다. π , R 및 γ 는 실제 측정 요소가 아닌 수학적/물리적 상수이지만, 이 값들을 측정에 반영하는 데 불확도 요소가 따르게 되므로 table 1에 함께 정리하였다.

3. 측정불확도 요인 분석

측정불확도 요인 분석은 측정불확도 평가의 가장 핵심이 되는 단계인 동시에 가장 체계화하기 어려운 단계로서 장기간에 걸친 연구의 노하우가 축적되어야 하는 부분이다.

본 연구의 대상인 AETF 공기 유량 측정 시스템의 측정불확도 요인에 대해서는 문헌 (5)~(7)에서 자세하게 논의하였는데, MC의 적용과 관련된 부분을 부연하면 다음과 같다.

3.1 측정기기의 소급성에 관한 불확도

$P_{T,g}$, $P_{S,g}$, P_r , T_T 및 D 를 측정하는 데 사용하는 측정기기들은 국제공인교정기관에서 교정하여 소급성을 유지하고 있다. 이러한 소급성 유지에는 불확도가 수반되는데, 각 측정기기의 교정성적서를 바탕으로 소급성에 관한 불확도를 표준불확도로 환산하여 사용하였다. 특히 P_r 및

Table 1 Measured parameters for airflow calculation at AETF

Parameter	Apparatus	Description
$P_{T,g}$	PSI 9816	
$P_{S,g}$	PSI 9816	
P_r	Setra 270 w/ HP VXI E1413C	
T_T	K-type thermocouple w/ HP VXI E1413C	
D	Vernier Calipus	
π	from theory	3.1416
R	from theory	287.05
γ	from theory	1.4

T_T 는 측정 센서의 출력값을 A/D 변환기에서 변환하는 과정이 존재하므로, 센서 소급성 및 A/D 변환기 소급성을 모두 고려하여 합성하였다.

3.2 시간적 불균일성에 의한 불확도

$P_{T,g}$, $P_{S,g}$, P_n , T_T 의 경우, 이상적으로 이 측정 인자들의 값은 시간에 무관하게 일정해야 하지만, 실제 상황에서는 미세한 변동(fluctuation)이 존재하며, 결과적으로 공기 유량에도 변동을 주게 되어 시간적 불균일성에 의한 불확도가 존재한다. AETF에서는 이 불균일성을 고려하기 위하여 초당 10회씩 5초 동안 측정을 실시하여 그 평균값을 대표값으로 사용하고 있다. 시간적 불균일성에 의한 불확도는 측정값의 시간적 분포의 평균의 표준편차 (s/\sqrt{n})가 된다.

3.3 공간적 불균일성에 의한 불확도

이상적으로 $P_{T,g}$, T_T 및 $P_{S,g}$ 는 주어진 단면에서 일정하여야 한다. 그러나 실제로는 배관 내의 벽면 효과 및 대류 열전달에 의해 $P_{T,g}$ 및 T_T 가 반경 방향의 분포를 가지며, $P_{S,g}$ 역시 유동의 불균일성으로 인하여 일정하지 않아 공간적 불균일성에 의한 불확도가 존재한다. AETF에서는 이러한 현상을 고려하기 위하여 $P_{T,g}$ 의 경우 단면상에서 42개 지점, T_T 는 15개 지점, $P_{S,g}$ 는 4개 지점에서 측정한 평균값을 사용하고 있다. 공간적 불균일성에 의한 불확도는 각 측정 지점 별로 시간적 평균한 값의 평균의 표준편차 (s/\sqrt{n})가 된다.

3.4 기존의 측정값 도입에 관한 불확도

본 공기 유량 측정 시스템에 있어서 대부분의 측정은 실시간으로 이루어지나, 배관의 지름(D)은 최초로 배관 제작 시에 측정된 값을 인용하여 사용하고 있다. 이러한 인용에 대해서는 종래에 알려진 대로 마지막 유효 숫자의 반범위로 측정 불확도를 평가하였다.

3.5 상수(Constant) 도입에 의한 불확도

기체역학적 물리량의 측정에 관한 측정불확도 해석에서는 많은 경우 기체역학 상수가 도입된다. 본 측정에 있어서도 π , R , γ 의 세 가지 물리량을 위 Table 1과 같이 근사하여 상수로 취급

하였다. 지금까지 측정불확도에 관한 많은 문헌들이 이 상수 도입에 수반되는 불확도에 대하여 전혀 언급하지 않고 있으나, 본 연구에서는 이를 불확도 요인으로 포함하여 평가하였다. 이 때 본 연구에서 도입된 세 가지 상수는 불확도 평가와 관련하여 그 성격이 구분된다.

(1) π 의 경우는 그 참값이 수학적으로 정의되어 상수로서 고정되어 있고 매우 높은 정밀도로 알려져 있으므로 이 참값과의 비교를 통해 불확도를 평가할 수 있다. 혹은 더 나아가서, 인용하는 유효숫자의 개수를 늘임으로써 그 불확도를 무시할 수 있는 수준까지 줄일 수 있다. 여기에서는 $\pi=3.1416$ 으로 인용하였으며, 이때 오차는 최대한으로 평가해도 0.0003% 이내이므로 이를 무시하였다.

(2) γ 의 정의는 $\gamma=C_p/C_v$ 인데, C_p 및 C_v 는 환경 조건(특히 온도)에 대한 함수이며, 이 함수 형태도 근사식이 된다. 따라서 환경 조건에 의한 변화를 무시한다면 그것이 불확도 요인이 되며, 환경 조건을 고려하는 경우라 해도 그 참값을 정확하게 평가할 수 없어 불확도 요인이 된다. 따라서 그 불확도를 위 π 의 경우와 같은 방법으로 비교할 수 없다. 본 연구에서는 γ 를 Table 1에서 제시한 수치로 인용하고, 현재 γ 를 평가함에 있어서 일반적으로 받아들여지고 있는 방법⁽⁸⁾으로부터 가능한 참값의 범위를 최대한으로 산정한 후, 이 범위와 비교해 불확도를 평가하였다.

(3) R 의 정의는 $R=R_u/MW$ 으로서, R_u 및 MW 에 관해서는 근사값만이 주어진다. 그러나 R 은 γ 처럼 온도의 함수는 아니다. 본 연구에서는 R 을 Table 1에서 제시한 수치로 인용하고, 마지막 유효숫자의 반범위로 측정불확도를 평가하였다.

이상과 같은 불확도 요소의 요인 계통도를 Fig. 1에 나타내었다.

4. 시험 및 몬테 카를로 모사

4.1 엔진 성능 시험

본 연구에서는 소형 터보제트 엔진을 대상으로 성능 시험을 수행하였으며, 이 과정에서 측정된 엔진 입구 공기 유량 데이터에 대하여 측정불확도 평가를 수행하였다. 성능 시험 조건은 $M=0.7$,

지상 고도, 표준 대기 조건으로 하였다. 시험 결과는 50회 반복 측정한 데이터를 평균하여 도출하였다.

4.2 확률 분포 함수

앞서 논의한 측정불확도 요인 중 측정기의 소급성, 공간적 불균일성, 시간적 불균일성에 의한 입력량의 확률 분포는 정규 분포로 주어진다. 정

규 분포의 평균 및 표준 편차는, 측정기의 소급성에 의한 부분은 교정 성적서 상의 값을 인용하며, 공간적/시간적 불균일성에 의한 부분은 실제 엔진 성능 시험 데이터의 평균 및 표준 편차를 사용하였다. 이러한 정규 분포의 경우, 다음 식 (9)와 같은 Box-Muller 방법을 사용,⁽⁹⁾ 정규 분포를 가지는 난수를 발생하여 모사하였다.

$$x_1 = RA(0, 1), \quad x_2 = RA(0, 1)$$

$$z_1 = s \times \sqrt{-2 \ln x_1} \times \cos(2\pi x_2) + m$$

$$z_2 = s \times \sqrt{-2 \ln x_2} \times \cos(2\pi x_1) + m \quad (9)$$

여기에서 $RA(0, 1)$ 은 0과 1 사이에서 직사각형 분포를 가지는 난수를 뜻하며 ANSI C의 난수 발생 함수를 사용하였다.⁽⁹⁾ 이 때 z_1 및 z_2 는 정규 분포 난수가 된다.

위 3.4절에서와 같이 기존 값을 인용한 경우 입력량의 확률 분포는 최대값과 최소값의 범위가 주어지는 직사각형 분포로 가정할 수 있다. 즉 지름 D 의 데이터는 식 (10)과 같이 모사하게 된다.

$$D = L \times \{RA(0, 1) - 0.5 + m \quad (10)$$

여기에서 L 은 최대값과 최소값의 범위이다.

그 외의 상수(R 및 γ)는 앞 장에서 논의한 대로 적절히 가정한 참값의 범위와 비교하여 그 범

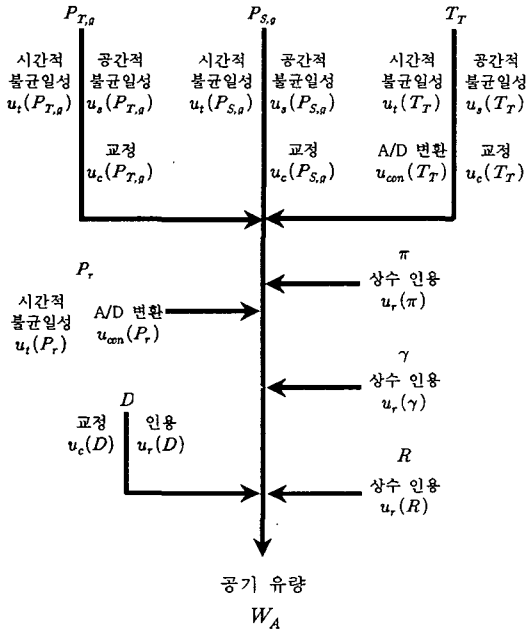
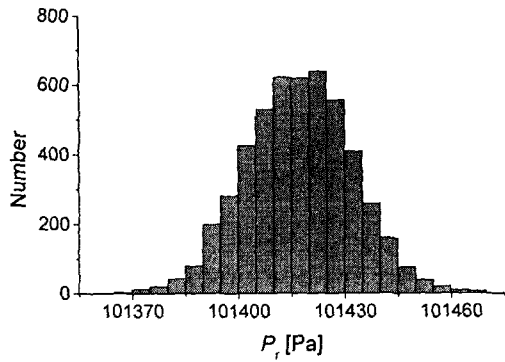


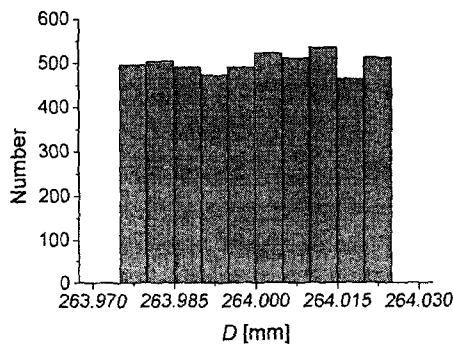
Fig. 1 A schematic of uncertainty components

Table 2 Uncertainty components for gas flow measurement ((N) : normal distribution, (R) : rectangular distribution, figures are standard deviations for normal distributions, full ranges for rectangular ones)

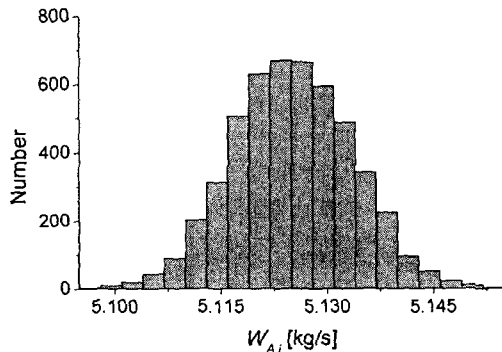
Uncertainty components Inputs	Traceability	Spatial non-uniformity	Temporal non-uniformity	Quoting from other meas.	Quoting as constants	Combined uncertainty
	(N)	(N)	(N)	(R)	(R)	
$P_{T,g}$ [Pa]	51.71	74.55	10.24	0	0	91.30
$P_{S,g}$ [Pa]	51.71	49.31	32.25	0	0	78.39
P_r [Pa]	15.0	0	0.6099	0	0	15.01
T_T [°C]	1.0	2.490	0.09170	0	0	2.685
D [m]	0(neglecting)	0	0	0.05×10^{-3}	0	0.05×10^{-3}
π	0	0	0	0	0(neglecting)	0
R [J/kg · K]	0	0	0	0	0.005	0.005
γ	0	0	0	0	0.00277	0.00277



(a) P_r (Normal distribution)



(b) D (rectangular distribution)



(c) $W_{A,i}$ (calculated from simulation data)

Fig. 2 Monte-Carlo simulation results (using intrinsic random number generation function of ANSI C, 5,000 simulations)

위 안에서 직사각형 분포로 가정하였으며, 역시 식 (10)으로 모사하였다.

Table 2에 각 입력량에 대한 측정불확도 요소, 각 요소별 확률 분포 형태 및 불확도 수치를 정

리하였다.

Fig. 2는 이러한 과정에 의한 MC의 예를 나타낸 것인데, Fig. 2(a)는 P_r 에 관한 모사 결과로서 시험 결과에 의해 평균 101,417.1 Pa, 표준 편차 15.01 Pa인 정규 분포를 모사하였으며, Fig. 2(b)는 D 에 관한 모사 결과로서 평균 264 mm, 범위 0.05 mm인 직사각형 분포를 모사하였다. Fig. 2(c)는 모사된 각 요소 데이터로부터 계산한 공기 유량 W_A 의 분포이다.

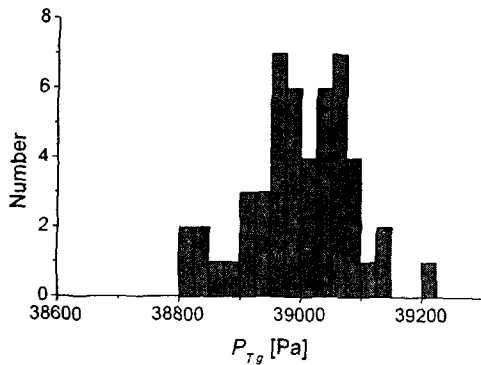
4.3 몬테 카를로 모사 횟수

앞에서 논의한 대로 MC에 의하여 모사된 데이터의 표준 편차는 해당 입력량의 실제 표준 편차 (교정 성적서 및 시험 데이터의 표준 편차 혹은 그 합성)를 그대로 모사하여야 한다. 그러나 MC의 횟수가 너무 적은 경우 모사된 각 입력량 데이터의 표준 편차가 실제 목표했던 값과 일치하지 않게 된다.

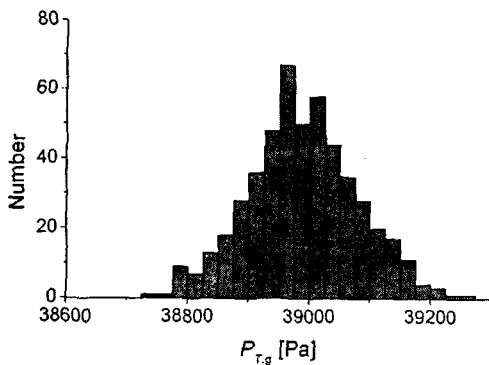
Fig. 3은 $P_{T,g}$ 의 경우를 예로 들어 MC 회수에 따라 모사값 집합의 표준 편차가 어떻게 달라지는지를 모사해본 결과이다. 실제 시험 데이터에서 $P_{T,g}$ 는 91.3 Pa의 표준 편차를 보였다(Table 2). 그러나 MC에서는, 50회 모사에서 $s(P_{T,g}) = 86.7$ Pa, 500회 모사에서 89.0 Pa, 5,000회 모사에서는 90.7 Pa로 나타났다. 따라서 목표로 했던 표준 편차와의 차이를 1% 이내로 하기 위해서는 5,000회 이상 모사하여야 하는 것으로 나타났으며, 본 연구에서도 5,000회의 모사 횟수를 사용하였다.

5. 측정불확도 평가 결과

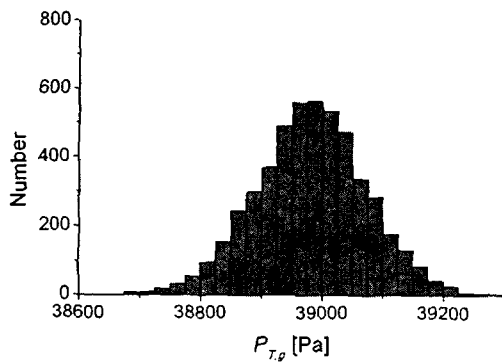
이상에서 논의한 것과 같은 방법으로 항공기용 엔진의 성능 시험 과정에서 엔진 입구 공기 유량 측정에 대한 측정불확도를 평가하였다. 공기 유량의 결과값은 5,000개 모사값(Fig. 2(c))의 평균을 취하였고, 표준불확도로는 표준 편차를 사용하였으며, 확장불확도는 포함 인자 $k=2$ 를 사용하여 계산하였다. Table 3은 종래의 감도 계수를 이용한 방법으로 분석한 측정불확도와 MC로 분석한 측정불확도를 정리하여 나타낸 것이다. MC에 의한 결과를 종래의 방법에 의한 결과와 비교해 볼 때,



(a) 50 simulations($s=86.7$ Pa)



(b) 500 simulations($s=89.0$ Pa)



(c) 5,000 simulations($s=90.7$ Pa)

Fig. 3 MC results for $P_{T,g}$ with various numbers of simulation

5,000회의 모사에 의해서 평균이 0.0008% 이내로 근사되었으며, 이것은 측정불확도의 크기를 기준으로 비교해 볼 때 무시할 수 있는 차이인 것으로 판단되었다. 한편 확장불확도에 대해서는 MC가 0.1% 정도 낮게 평가하였다. 이는 앞서 언

Table 3 Statistical properties and uncertainties of measured and simulated airflow data

	Traditional method	MC
Average $\overline{W_A}$	5.12514 kg/s	5.12518 kg/s
Standard uncertainty $u(W_A)$	0.0131 kg/s	0.0105 kg/s
Expanded uncertainty $U(W_A)$	0.0263 kg/s	0.0210 kg/s
Expanded uncertainty $U(W_A)$ [%]	0.513 %	0.410 %

급한 것과 같이 종래의 방법이 도입하는 몇 가지 근사법(비선형 모델식에 대한 감도 계수 근사, 불확도 전파 법칙에서의 테일러 급수 1차 근사) 때문에 생긴 오차로 판단된다. Basil과 Jamieson의 연구⁽²⁾를 보면 $Q_T = Q_A + Q_B$ 와 같은 선형적이고 간단한 식에서는 두 방법에 의한 불확도 결과가 각각 0.705%, 0.707%로 거의 일치하는 데 반하여 기체 밀도를 계산하는 비선형적인 모델식에서는 불확도 결과가 0.52%, 0.60%로 다소 차이를 보인다고 하였다.

6. 결론

본 연구에서는 기체 유량 측정에 대해 몬테 카를로 모사(MC)를 이용한 측정 불확도 분석 방법을 도입하여 종래의 감도 계수를 이용한 방법과 비교하였다. 여기에서 특히,

(1) 기존의 측정값을 인용하는 행위에 의한 불확도 요인, 상수(constant) 도입에 의한 불확도 요인 등 여러 가지 불확도 요인을 MC에 도입하는 방법을 논의하였다.

(2) 측정불확도 평가에 있어서 종래의 감도 계수 이용 방법과 MC를 비교하여 논의하였고, 기체 유량 측정과 같은 비선형 모델식에 대해서는 그 결과에 차이가 있음을 보였다.

(3) MC를 적용함에 있어서 모사 횟수가 불확도 평가에 미치는 영향과 적절한 모사 횟수의 선택에 대하여 논의하였다.

결론적으로 측정불확도 요인을 적절히 분석하고 각 요인에 대한 확률 분포 모델과 모사 횟수

를 적절히 선택하면 MC가 종래의 방법을 대체할 수 있음을 확인하였다. 또한 불확도를 평가하고자 하는 대상 측정 시스템의 모델에 따라 불확도 평가 방법을 신중히 선택해야 함을 알았다.

향후 항공기용 엔진의 추력 측정(공기 유량 측정 과정도 포함됨)에 있어서도 MC에 의한 측정 불확도 평가를 수행하는 것이 과제로 남아 있으며, 여기에 본 연구에서 제시한 방법을 그대로 도입하여 확장할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업의 지원을 받아 수행된 연구의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

- (1) ISO, 1993, "Guide to the expression of uncertainty in measurements.
- (2) Martin Basil & Andrew Jamieson, 1999, "Uncertainty of Complex Systems by Monte Carlo Simulation," *Measurement & Control*, Vol. 32.
- (3) L. Coughlan, M. Basil & P. Cox, 2000,

"System Uncertainty Modelling using Monte Carlo Simulation," *Measurement & Control*, Vol. 33

- (4) Christos E. Papadopoulos & Hoi Yeung, 2001, "Uncertainty estimation and Monte Carlo simulation method," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 12.
- (5) Minsoo Yoon, Sooseok Yang & Daesung Lee, 2001, "Uncertainty Analysis of Altitude Performance of a Gas Turbine Engine," *J. KSAS*, Vol. 29, No. 1.
- (6) Yongmin Jun, Inyoung Yang, Samsik Nam, Chuntaek Kim, Sooseok Yang & Daesung Lee, 2002, "Small Turbojet Engine Test and Uncertainty Analysis," *Proc. KSAS Annual Conference*.
- (7) Daesung Lee, Inyoung Yang, Yongmin Jun, Chuntaek Kim & Sooseok Yang, 2002, "Improving the Measurement Uncertainty of Altitude Test Facility for Gas Turbine Engines," *J. KSME*, Vol. 26, No. 11.
- (8) Walsh, Philip P. & Fletcher, Paul, 1998, "Gas Turbine Performance," Blackwell science, p. 115.
- (9) Press, William H., Teukolsky, Saul A., Vetterling, William T., Flannery, Brian P., 1992, "Numerical Recipes in C," Cambridge university press, pp. 288-290.