

## 엔진 고공 시험에서 연료 유량 측정용 터빈 유량계의 측정 불확도 분석

양인영\*\*

### Measurement Uncertainty Analysis of a Turbine Flowmeter for Fuel Flow Measurement in Altitude Engine Test

Inyoung Yang\*\*

*Key Words* : Measurement uncertainty(측정 불확도), Gas turbine engine(가스 터빈 엔진), Altitude engine test(엔진 고공 시험), Turbine flowmeter(터빈 유량계), Sensitivity coefficient method(감도 계수법), Expanded uncertainty(확장 불확도)

#### ABSTRACT

Measurement uncertainty analysis of fuel flow using turbine flowmeter was performed for the case of altitude engine test. SAE ARP4990 was used as the fuel flow calculation procedure, as well as the mathematical model for the measurement uncertainty assessment. The assessment was performed using Sensitivity Coefficient Method. 11 parameters involved in the calculation of the flow rate were considered. For the given equipment setup, the measurement uncertainty of fuel flow was assessed in the range of 1.19~1.86% for high flow rate case, and 1.47~3.31% for low flow rate case. Fluctuation in frequency signal from the flowmeter had the largest influence on the fuel flow measurement uncertainty for most cases. Fuel temperature measurement had the largest for the case of low temperature and low flow rate. Calibration of  $K$ -factor and the interpolation of the calibration data also had large influence, especially for the case of very low temperature. Reference temperature, at which the reference viscosity of the sample fuel was measured, had relatively small contribution, but it became larger when the operating fuel temperature was far from reference temperature. Measurement of reference density had small contribution on the flow rate uncertainty. Fuel pressure and atmospheric pressure measurement had virtually no contribution on the flow rate uncertainty.

#### 1. 서론

항공용 가스 터빈 엔진의 고공 시험에서는 공기 유량, 엔진 출력과 더불어 엔진이 소모하는 연료 유량이 가장 중요한 측정 인자 중 하나이다. 연료 유량 측정에는 코리올리(Coriolis) 유량계나 터빈 유량계를 널리 사용한다. 특히 엔진 시동 시험의 경우 엔진이 시동 되는 기간 동안 초당 수십 회의 데이터 획득을 실시해야 하기 때문에, 반응 속도가 빠른 터빈 유량계를 주로 사용한다.

엔진 고공 시험은 일종의 환경시험으로서 엔진이 저온 및 고온 환경에 있을 때의 성능이나 시동 가능성을 평가하는 시

험이다. 따라서 엔진에 공급하는 연료 역시 엔진의 운용 온도 범위 내에서 특정한 온도로 조절하여 공급하게 된다. 유체는 이러한 온도 변화에 따라 밀도가 변화하는데, 코리올리 유량계의 경우는 밀도 변화와 무관하게 질량 유량을 측정할 수 있으나, 터빈 유량계는 부피 유량을 측정하는 기기이므로 질량 유량을 얻기 위해서는 이 밀도 변화를 보정하여야 한다. 또한 유체는 온도에 따라 점도 변화도 존재하며, 터빈 유량계는 이러한 유체의 점도 변화에 따른 보정도 필요하다.

본 연구에서는 JP-8을 연료로 사용하는 항공용 보조동력 장치(auxiliary power unit; APU)의 고공 성능 시험에서 이러한 터빈 유량계를 사용한 연료 유량 측정의 불확도를 평가하였다. 또한 유량 계산에 관여하는 각 입력량이 측정 불확도에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였으며, 이를 통하여 측

\* 한국항공우주연구원 항공엔진팀

† 교신저자, E-mail : iyyang@kari.re.kr

정 불확도 개선을 위한 방안을 제시하고자 하였다.

식 (1)의  $K_{op}$  계산을 위한  $\nu_{op}$  [cSt]는 식 (7)로 계산한다.

## 2. 연료 유량 측정 방법

$$\nu_{op} = \nu_{Top} \cdot C_{pfd} \quad (7)$$

### 2.1 유량 계산식

터빈 유량계를 사용한 유량 계산식은 SAE의 ARP4990<sup>(4)</sup>을 따랐다. 본 논문에서의 논의 전개를 위하여 식을 모두 인용하기로 한다. 실제 연료 유량  $W_{f,t}$  [kg/hr]는 식 (1)로 계산한다.

$$W_{f,t} = \frac{f}{K_{op}} \times (\rho_{ref} \cdot VCF \cdot C_{pfd}) \quad (1)$$

여기에서  $f$  [Hz]는 터빈 유량계에서 발생하는 신호의 주파수,  $\rho_{ref}$ 는 시료 측정 기준 조건에서의 유체 밀도이다.  $VCF$ 는 부피 보정 계수,  $C_{pfd}$ 는 밀도에 대한 압력 보정 계수,  $K_{op}$  [pulse/s/m<sup>3</sup>]은 운용 조건에서의  $K$  factor이다.  $K$  factor는  $f/\nu$ 의 함수(여기에서  $\nu$ 는 연료 점도)로서 교정에 의해 주어지며, 운용 조건에서의 점도  $\nu_{op}$ 를 계산하여 교정 데이터와 비교함으로써  $K_{op}$ 를 계산한다.

$VCF$  [-]는 식 (2)를 사용하여 계산한다.

$$VCF = \exp(-\alpha_{F, Tref} \cdot \Delta T \cdot (1 + 0.8 \cdot \alpha_{F, Tref} \cdot \Delta T)) \quad (2)$$

여기에서  $\Delta T$ 는 운용 온도  $T_{op}$  [°C]에서 시료의 밀도 측정 기준 온도  $T_{ref}$  [°C]를 뺀 차이이다.  $\alpha_{F, Tref}$  [1/°C]는  $T_{ref}$ 에서의 연료의 열팽창 계수로서 식 (3)으로 계산한다.

$$\alpha_{F, Tref} = K_0 / \rho_{ref}^2 + K_1 / \rho_{ref} \quad (3)$$

여기에서  $K_0$  [kg<sup>2</sup>/m<sup>6</sup>/°C] 및  $K_1$  [kg/m<sup>3</sup>/°C]은 물질에 따른 상수로, 본 연구에서는  $K_1 = 594.5418$ ,  $K_2 = 0$ 을 사용하였다.

식 (1)에서  $C_{pfd}$  [-]는 식 (4)를 사용하여 계산한다.

$$C_{pfd} = \frac{1 - F(p_{atm} - p_{eq})}{1 - F(p_{op} - p_{eq})} \quad (4)$$

여기에서  $F$  [1/bar]는 압축성 보정 계수,  $p_{eq}$  [bar]는 평형 압력으로, 각각 식 (5) 및 (6)으로 계산한다.

$$F = \frac{\exp\left(-1.62080 + \frac{2.1592}{10000} T_{op} + \frac{870960}{\rho_{ref}^2} + 4209.2 \frac{T_{op}}{\rho_{ref}^2}\right)}{10000} \quad (5)$$

$$p_{eq} = 0.010 \times 10^{6.284 - 1991.3 / (T_{op} + 273.15)} \quad (6)$$

여기에서  $\nu_{Top}$  [cSt]는 시료 온도  $T_{s1}$  [°C],  $T_{s2}$  [°C]에서 측정 한 시료 점도  $\nu_{s1}$  [cSt],  $\nu_{s2}$  [cSt]를 사용하여 운용 온도에서의 점도로 보정한 값이며, 식 (8)~(12)로 계산한다.

$$\nu_{Top} = Y_{Top} - \exp(-0.7487 - 3.295 Y_{Top} + 0.6119 Y_{Top}^2 - 0.3193 Y_{Top}^3) \quad (8)$$

여기에서,

$$Y_{Top} = 10^{10^{A-B \cdot \log(T_{op} + 273.15)} - 0.7} \quad (9)$$

$$A = \log(\log Z_{s1}) + B \log(T_{s1} + 273.15) \quad (10)$$

$$B = \log\left(\frac{\log Z_{s1}}{\log Z_{s2}}\right) \Bigg/ \log\left(\frac{T_{s2} + 273.15}{T_{s1} + 273.15}\right) \quad (11)$$

식 (10) 및 식 (11)에서,

$$Z_s = \nu_s + 0.7 + \exp(-1.47 - 1.84\nu_s - 0.51\nu_s^2) \quad (12)$$

식 (7)에서  $C_{pfd}$  [-]는 점도에 대한 압력 보정 계수로서 실험식 (13)으로 계산한다.

$$C_{pfd} = \frac{1}{C_{pfd}} \cdot 10^{\frac{(p_{op} - p_{atm})(-0.1479 + 0.58624\mu_s^{0.181})}{1000}} \quad (13)$$

여기에서  $p_{op}$  [bar]는 운용 압력,  $p_{atm}$  [bar]은 대기 압력이고,  $\mu_s$  [cP]는 운용 온도에서의 절대 점도로 식 (14)로 계산한다.

$$\mu_s = (\rho_{Top} / 1000) \cdot \nu_{Top} \quad (14)$$

여기에서  $\rho_{Top}$  [kg/m<sup>3</sup>]는  $T_{ref}$ 에서 측정 한 밀도  $\rho_{ref}$  [kg/m<sup>3</sup>]를 운용 온도에 대해 보정한 밀도로서 식 (15)로 계산한다.

$$\rho_{Top} = \rho_{ref} \cdot VCF \quad (15)$$

종합하면, 터빈 유량계를 이용한 유량 측정에서 유량 계산에 필요한 입력 인자는 총 11개이다. 즉, 유량계의  $K$  factor가 교정에 의해 주어져야 하고, 연료의 물성으로서 두 가지 기준 온도( $T_{s1}$ ,  $T_{s2}$ )에서의 점도( $\nu_{s1}$ ,  $\nu_{s2}$ )와 한 가지 기준 온도( $T_{ref}$ )에서의 밀도( $\rho_{ref}$ )가 연료 시료 측정에 의해 주어져야 한다. 이에 더하여 실제 유량 측정 시 터빈 유량계에서 발생하는 주파수 신호  $f$ 와 연료의 온도  $T_{op}$  및 압력  $p_{op}$ , 대기압

$p_{dm}$ 을 측정하여 입력 인자로 사용한다.

### 2.2 연료 물성 측정 및 터빈 유량계 교정

연료의 밀도 및 점도 측정과 터빈 유량계 교정은 외부 전문 기관에 의뢰하여 수행하였다. 밀도 및 점도 측정 결과는 Table 1과 같다. 터빈 유량계 교정은, 세 개의 점도(1, 3.2, 15.7 cSt)에서 부피 유량 대 주파수의 데이터를 획득하였다. 이 교정 데이터로 그린 universal viscosity curve(UVC)를 Fig. 1에 나타내었다. 이상적으로는 각각 다른 점도에서 측정된 데이터 set이 UVC 상에서 정확히 일치하여야 하나, Fig. 1에서 확인할 수 있는 것처럼 약간의 불일치가 존재한다.

본 연구에서는 각 점도별 데이터 set에서  $f/\nu$  값이 중첩되는 부분에 대해서는 인접하는 데이터들을 선형 내삽하고, 중첩되지 않는 부분에 대해서는 각 데이터 set을 그대로 사용하여 최종 UVC를 구성하였다. 이러한 교정 데이터 사용 과정은 측정 불확도를 유발하는 요인이 되는데, 그 정량적 평가는 3장에서 논의하였다.

### 2.3 측정 적용 예

터빈 유량계는 APU의 시동 시험에 적용되었다. APU가 시동될 때 JP-8 연료의 최대 질량 유량은 약 30 kg/hr이며,

유량계의 측정 가능 범위는 JP-8의 밀도를 800 kg/m<sup>3</sup>으로 가정할 때 약 37 kg/hr까지이다.

시동 시험 시 사용한 연료 공급 장치는 Fig. 2와 같은데, 탱크 내 연료를 가열 및 냉각 장치를 거쳐 순환시키면서 온도를 제어하고, 시동 시에는 3-way 밸브로 순환 배관을 차단하고 엔진 공급 배관으로 연료를 공급한다. 연료의 온도는 -40~+40 °C 범위 내에서 지정된 온도로 제어하였다. 연료의 압력은 별도로 제어하지는 않았으며, 연료 사용 조건에 따라 2.7~4.1 bar까지 변화하였다.

연료 유량 36 kg/hr 및 12 kg/hr에서, 각각 5개씩의 온도 조건에 대하여, 각 입력 인자의 값 및 앞선 2.1절 및 2.2절에서 설명한 과정에 의한 계산 결과의 예를 Table 2에 나타내었다. Table 2를 보면, 주어진 온도 범위에서 VCF의 변화량

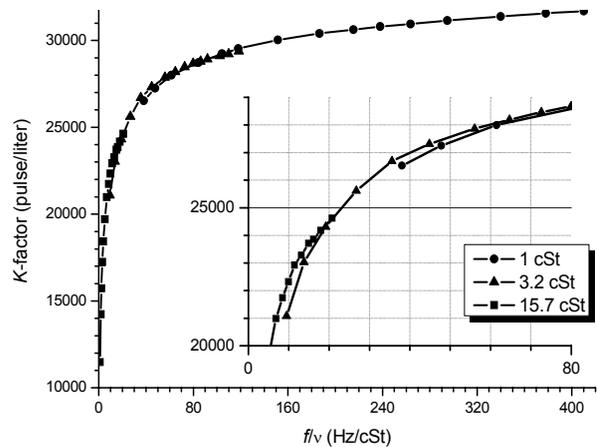


Fig. 1 Universal viscosity curve of the flowmeter

Table 1 Sampled fuel property (JP-8)

Property	Symbol	Value	Reference temperature
Density	$\rho_{ref}$	792.4 kg/m <sup>3</sup>	$T_{ref} = 15$ °C
Viscosity	$\nu_{s1}$	3.708 cSt	$T_{s1} = -20$ °C
	$\nu_{s2}$	7.171 cSt	$T_{s2} = -40$ °C

Table 2 Calculation data of fuel flow using turbine flowmeter

Name	Unit	Case01	Case02	Case03	Case04	Case05	Case06	Case07	Case08	Case09	Case10
$T_{op}$	°C	40	8.6	-20	-32	-40	40	8.6	-20	-32	-40
$\nu_{Top}$	cSt	1.169	1.926	3.708	5.363	7.171	1.169	1.926	3.708	5.363	7.171
$F$	-	1.0E-04	8.4E-05	6.9E-05	6.3E-05	6.0E-05	1.0E-04	8.4E-05	6.9E-05	6.3E-05	6.0E-05
$p_{eq}$	bar	8.4E-03	1.6E-03	2.6E-04	1.1E-04	5.5E-05	8.4E-03	1.6E-03	2.6E-04	1.1E-04	5.5E-05
$C_{pfd}$	-	0.99990	0.99991	0.99993	0.99994	0.99994	0.99990	0.99991	0.99993	0.99994	0.99994
$\alpha_{F,Tref}$	1/°C	9.5E-04									
$\Delta T$	°C	25	-6.4	-35	-47	-55	25	-6.4	-35	-47	-55
VCF	-	0.976	1.006	1.033	1.044	1.051	0.976	1.006	1.033	1.044	1.051
$\rho_{Top}$	kg/m <sup>3</sup>	773.5	797.2	818.4	827.1	833.0	773.5	797.2	818.4	827.1	833.0
$\mu_s$	cP	0.904	1.536	3.035	4.436	5.973	0.904	1.536	3.035	4.436	5.973
$C_{pfv}$	-	1.003	1.003	1.003	1.004	1.004	1.003	1.003	1.003	1.004	1.004
$\nu_{op}$	cSt	1.172	1.932	3.720	5.382	7.199	1.172	1.932	3.720	5.382	7.199
$f$	Hz	406.2	382.5	354.4	339.1	324.8	126.3	116.9	104.8	96.8	89.8
$f/\nu_{op}$	Hz/cSt	346.67	198.00	95.260	63.001	45.119	107.789	60.513	28.169	17.984	12.475
$K_{op}$	pulse/hr/l	31413	30491	29001	28045	27053	29305	27944	25727	24029	22435
$W_{f,t}$	kg/hr	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00

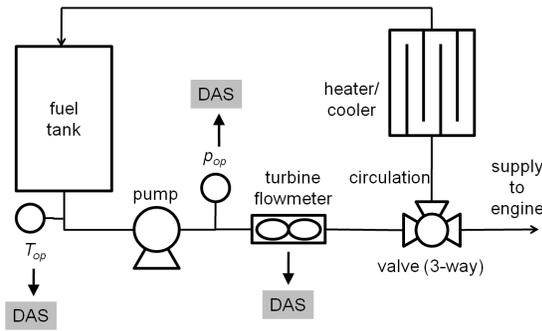


Fig. 2 Schematic diagram of fuel supply system

은 최대 7.5%로, 부피 보정이 측정값에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 반면  $C_{pfd}$ 의 변화량은 주어진 압력 범위에서 0.01% 미만,  $C_{pfv}$ 의 변화량은 0.2% 미만으로서, 연료 유량 측정에 압력 보정은 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

### 3. 측정 불확도 평가

#### 3.1 입력 인자별 표준 불확도 산정

2.1절에서 논의한 모델 식에 사용되는 모든 입력량은 측정 불확도의 요인이 된다<sup>(2)</sup>. 이에 더하여 계산 과정에서 사용된 식 (5), (6), (8), (12), (13)과 같은 실험식들을 도출하는 과정 자체도 측정 불확도의 요인이 되나, 여기에서는 이는 고려하지 않았다. 또한 식 (3)에서의  $K_0$ ,  $K_1$ 을 비롯한 각종 상수의 도입도 불확도 요인이 되나, 여기에서는 생략하였다. 결과적으로 본 연구에서는 11개의 유량 측정 입력 인자를 불확도 요인으로 도출하였다. 단,  $K$  factor의 불확도는 교정 데이터의 적용 과정에 대한 불확도와 교정 과정 자체의 불확도로 세분화하였다. 이 입력 인자에 대해 표준 불확도를 아래 기술한 과정에 의해 산정하였으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

$p_{op}$ 와  $f$ 의 표준 불확도는 실제 측정 데이터의 표준 편차를 이용하여 A형<sup>(2)</sup>으로 평가하였다.  $p_{op}$ 는 조건에 관계없이 표준 편차가 거의 일정하였으며,  $f$ 의 표준 편차는 온도의 영향은 거의 없으나 유량이 증가할수록 증가하여 유량 별로 표준 불확도를 다르게 산정하였다.  $T_{op}$ 는 실제 측정 데이터의 표준 편차(A형)에 더하여 천이 상태에서 센서의 반응 지연을 추가로 감안하였다(B형<sup>(2)</sup>).

시료 측정값 및 기준 조건인  $\rho_{ref}$ ,  $\nu_{s1}$ ,  $\nu_{s2}$ ,  $T_{ref}$ ,  $T_{s1}$ ,  $T_{s2}$ 는 측정 기관으로부터 불확도가 제공되지 않아, 통상적인 방법대로 성적서 상 마지막 유효 숫자의 범위의 절반을 “인용된 오차 범위”  $R(x)$ 로 정의<sup>(2)</sup>하는 B형 방법으로 평가하였다.  $p_{atm}$ 은 엔진 고도 시험에서 모사하는 고도에 따라 실제로 0.46~1.01 bar까지 변화하나, 본 연구에서는 1.01 bar의 상수로 가정하고 계산하였다. 따라서 최대 오차 0.55 bar를  $R(p_{atm})$ 으로 가정하고, 이 가정이 측정 불확도에 미치는 영

Table 3 Standard uncertainties of measurement uncertainty elements

Parameter	distribution	Range $R(x)$	Std. uncert. $u(x)$
$T_{op}$	normal	-	1.1 °C
$\nu_{s1}$	rectangular	0.0005 cSt	$R/\sqrt{3}$
$\nu_{s2}$	rectangular	0.0005 cSt	$R/\sqrt{3}$
$T_{s1}$	rectangular	0.5 °C	$R/\sqrt{3}$
$T_{s2}$	rectangular	0.5 °C	$R/\sqrt{3}$
$p_{op}$	normal	-	0.3 bar
$p_{atm}$	rectangular	0.55 bar	$R/\sqrt{3}$
$\rho_{ref}$	rectangular	0.05 kg/m <sup>3</sup>	$R/\sqrt{3}$
$T_{ref}$	rectangular	0.5 °C	$R/\sqrt{3}$
$f$	normal	-	2.3 Hz (high flow) 0.9 Hz (low flow)
$K_{op}$	1	Refer to sec. 3.1	$R/\sqrt{3}$
	2	normal	-

향을 평가하였다.

교정 데이터의 적용 과정에 의한 불확도는 다음과 같이 B형 방법으로 평가하였다. 2.2절과 같은 과정에 의해 구성된 UVC를  $K_{con}$ 이라고 하고, 각 점도별 curve set을  $K_{orig,i}$  ( $i=1, 2, 3$ )이라고 할 때, UVC 상의  $f/\nu$ 가 중첩되는 구간에 대하여, 모든 교정점에서 각각  $\max(\text{abs}(K_{con}(f/\nu) - K_{orig,i}(f/\nu)))$  ( $i=1, 2, 3$ )를 구하고, 이를 curve fitting하여  $R_1(K_{op})$ 으로 정의하였다. 결과적으로  $R_1(K_{op})$ 은 식 (16)과 같이 계산된다. 식 (16)에 나타난  $f/\nu$ 의 중첩 구간 이외에는  $R_1(K_{op})=0$ 인 것으로 적용하였다.

$$R_1(K_{op}) = \begin{cases} 3.3047 \cdot (f/\nu)^2 - 147.67 \cdot (f/\nu) + 1656.9 & \text{for } 9.466 \leq f/\nu \leq 20.77 \\ 0.062565 \cdot (f/\nu)^2 - 10.802 \cdot (f/\nu) + 487.31 & \text{for } 38.08 \leq f/\nu \leq 118.6 \end{cases} \quad (16)$$

교정 과정 자체에 수반되는 불확도  $u_2(K_{op})$ 에 대해서는, 교정 성적서 상의 불확도 0.11%를 표준 불확도로 간주하였다(B형).

한편 인용된 오차 범위  $R(x)$ 가 주어진 위 인자들의 경우, 별도로 명시되지 않은 한 사각형 확률 분포를 지닌 것으로 가정하여야 하므로, 각 인자의 표준 불확도  $u(x)$ 는  $R(x)/\sqrt{3}$ 이다<sup>(2)</sup>.

#### 3.2 불확도 합성 및 확장 불확도 평가

본 연구에서는 불확도 합성 방법으로서 널리 사용되는 감도 계수법(sensitivity coefficient method; SCM)을 사용하였다. SCM은 입력량 각각에 대한 표준 불확도를 산정하고 감도 계수를 구한 후 합성하여 합성 불확도를 구한다<sup>(2)</sup>. 감도 계수는 측정 모델 식을 편미분하여 구하는데, 해석적으로 미

Table 4 Expanded uncertainty of the fuel flow measurement

$W_{f,t} = 36 \text{ kg/hr}$					
Case #	01	02	03	04	05
$U(W_{f,t})$ [%]	1.19	1.25	1.41	1.63	1.86
$W_{f,t} = 12 \text{ kg/hr}$					
Case #	06	07	08	09	10
$U(W_{f,t})$ [%]	1.47	1.59	1.83	2.21	3.31

분할 수 없는 경우에는 모델 식의 테일러 전개식의 1차 항만을 사용하는 근사법을 사용한다<sup>(3)</sup>. 본 연구에서도 측정 인자의 값 변화 1% 당 측정 목표값의 변화(1% jitter)로서 감도 계수를 정의하여 사용하였다.

확장 불확도는  $U(W_{f,t}) = k \cdot u(W_{f,t})$ 로 하였으며, 여기에서 포함 인자  $k$ 는 유효 자유도와 더불어<sup>(2)</sup> 불확도 중 사각형 분포를 갖는 입력량에 기인한 부분과 표준 분포를 갖는 입력량에 기인한 부분의 비율을 고려하여<sup>(4)</sup>  $k=2$ 로 산정하였다. 유량 측정의 확장 불확도 평가 결과는 Table 4에 나타난 것과 같이 시험 조건 범위 내에서 1.19~3.31%였다. 고유량보다 저유량의 경우, 또 고온보다 저온의 경우 측정 불확도가 증가하는 것으로 나타났다.

감도 계수 계산 시 근사에 의한 오차를 살펴보기 위해 0.1% jitter를 사용하거나 테일러 전개를 2차 항까지 계산해 본 결과, 합성 불확도 결과값의 차이는 크지 않았으며, 전체적인 경향에는 차이가 없었다. 이에 대하여 보다 상세한 연구를 위해서는 몬테 카를로 모사법을 사용한 불확도 합성 방법<sup>(5)</sup>으로 불확도 평가를 수행하고 그 결과와 비교하여야 할 것으로 판단된다.

### 3.3 불확도 기여도 분석

각 입력 인자의 불확도 기여도(uncertainty percentage contribution; UPC)를 계산한 결과를 Table 5에 나타내었다. 각 인자의 UPC를 분석함으로써 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

(1) Case10을 제외한 모든 경우에 대해  $f$ 의 UPC가 가장 컸으며, 20.7~83.7%로 계산되었다.  $f$  측정 데이터의 산포는 터빈 유량계의 설치 상태 외에 연료 공급 장치(Fig. 2)나 APU 내 연료 시스템의 기계적 상태 등의 영향을 받으며, 따라서  $f$ 에 기인한 측정 불확도를 줄이기 위해서는 이러한 기계적 안정성을 높여야 한다.

(2)  $UPC(T_{op})$ 는 두 번째로 큰 인자로, 저온일수록 증가하여 case05에서 43.8%, case10에서 49.8%였다.

(3)  $UPC_1(K_{op})$ 는 저유량, 저온일수록 크게 증가하여, case05에서 8.66%, case10에서 26.7%로 나타났다.  $K$  factor는  $f/\nu$ 의 값이 작을 때  $f/\nu$  값에 매우 민감하기 때문에, 교정 시 이 영역에서의 교정을 철저히 수행하여야  $UPC_1(K_{op})$ 을 줄일

Table 5 Uncertainty percentage contribution of each parameters [%]

(a)  $W_{f,t} = 36 \text{ kg/hr}$

Case #	01	02	03	04	05
$T_{op}$	10.2	10.8	24.7	36.3	43.8
$\nu_{s1}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$\nu_{s2}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$T_{s1}$	2.69	1.78	1.21	0.15	0.00
$T_{s2}$	1.27	0.37	0.00	0.22	1.56
$p_{op}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$p_{atm}$	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01
$\rho_{ref}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$T_{ref}$	0.23	0.19	0.13	0.10	0.07
$f$	82.1	83.7	70.9	59.4	44.4
$K_{op}$	1	0.00	0.00	1.96	8.66
	2	3.51	3.16	2.47	1.85

(b)  $W_{f,t} = 12 \text{ kg/hr}$

Case #	06	07	08	09	10
$T_{op}$	10.0	19.0	24.4	47.3	49.8
$\nu_{s1}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$\nu_{s2}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$T_{s1}$	3.72	2.33	0.83	0.50	0.00
$T_{s2}$	2.08	1.26	0.00	0.76	2.35
$p_{op}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$p_{atm}$	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
$\rho_{ref}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$T_{ref}$	0.15	0.12	0.08	0.05	0.02
$f$	79.9	72.7	73.2	48.0	20.7
$K_{op}$	1	1.83	2.70	2.37	26.7
	2	2.29	1.94	1.47	1.01

수 있다.  $UPC_2(K_{op})$ 는 최대 3.51%로 큰 영향이 없었다.

(4)  $\nu_{s1}, \nu_{s2}$ 의 경우,  $R(\nu_s) = 0.0005 \text{ cSt}$ 이면 유량 측정에 영향이 없는 것으로 나타났다. 점도는 동일한 JP-8 연료라 할 지라도 연료 제조 조건에 따라 크게 달라지는데, 시료의 점도 측정이 부정확하여  $R(\nu_s) = 1 \text{ cSt}$ 가 되는 경우  $U(W_{f,t}) = 2.05 \sim 5.24\%$ 까지 증가하므로 연료 제조 조건별로 점도를 시료 측정하는 것이 필수적임을 알 수 있었다.

(5)  $T_{s1}, T_{s2}$ 는  $R(T_s) = 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 불확도를 가정할 때  $UPC(T_s)$ 가 최대 3.7%로, 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 또한,  $T_{op}$ 가  $T_{s1}$  및  $T_{s2}$ 와 멀어질수록  $UPC(T_s)$ 가 증가하며, 따라서 애초에 연료 점도의 시료 측정 시에  $T_{s1}$  및  $T_{s2}$ 를  $T_{op}$  범위의 상한 및 하한으로 결정하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있었다.  $T_{ref}$ 는  $R(T_{ref}) = 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 측정할 경우 영향이 작

았다.

(6) 기준 밀도는  $R(\rho_{ref}) = 0.05 \text{ kg/m}^3$ 로 측정하는 경우 영향이 없었다. 또한  $R(\rho_{ref}) = 1 \text{ kg/m}^3$ 이 되더라도  $UPC(\rho_{ref})$ 는 최대 1.6%에 불과하며, 실제  $U(W_{f,t})$ 도 증가하지 않아, 이 정도 값도 무방한 것으로 나타났다.

(7) 연료 압력은  $R(p_{op}) = 0.3 \text{ bar}$ 로 측정하여도 무방하며,  $p_{atm}$ 도 1.01 bar의 상수로 가정해도 영향이 없는 것으로 나타나, 압력 측정이 연료 유량 측정에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 터빈 유량계를 사용한 연료 유량 측정에서 측정 불확도를 평가하였으며, 각 인자가 측정 불확도에 미치는 영향을 분석하였다. 이로부터 다음 결론을 도출하였다.

- (1) 터빈 유량계의 연료 유량 측정 불확도에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 유량계 주파수 데이터의 산포이다.
- (2) 터빈 유량계는 저온일수록 연료 온도의 측정 불확도의 영향이 커진다.
- (3)  $K$  factor의 교정 불확도는  $f/\nu$ 의 값이 작을 때 측정에 큰 영향이 있는 것으로 나타났다.  $K$  factor 교정의 경우, 반복 교정을 통하여 불확도를 개선하여야 한다.
- (4) 연료의 점도는 반드시 시료 측정하여 점도의 정확도를 제고하여야 하며, 시료 측정 시의 기준 온도는 사용하고자 하는 온도 범위 전체를 포함하도록 하는 것이 필

요하다.

- (5) 연료 압력 및 대기압 측정은 유량 측정에 큰 영향을 미치지 않는다.

#### 후 기

본 연구는 KHP 민군겸용 핵심구성품 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) SAE, 1997, "Turbine flowmeter fuel flow calculations," ARP4990
- (2) ISO/IEC, 2008, "Uncertainty of measurement - Part3: Guide to the expression of uncertainty in measurement," ISO/IEC guide 98-3
- (3) H. W. Coleman & W. G. Steele, 1999, "Experimentation and uncertainty analysis for engineers," John Wiley & Sons
- (4) United Kingdom accreditation service, 2007, "The expression of uncertainty and confidence in measurement," UKAS M3003
- (5) ISO/IEC, 2008, "Uncertainty of measurement-Part3: Guide to the expression of uncertainty in measurement, supplement 1: Propagation of distributions using a Monte Carlo method," ISO/IEC guide 98-3/suppl. 1