

## 論文

## 하이브리드 로켓 모터에 대한 연소 실험 측정 불확도

김수중\*, 문희장\*\*, 김진곤\*\*

## Combustion Experiment Measurement Uncertainty for Hybrid Rocket Motor

Soo-Jong Kim\*, Hee-Jang Moon\*\* and Jin-Kon Kim\*\*

## ABSTRACT

In this study, the measurement uncertainty of combustion experimental system and experimental parameters for hybrid rocket were evaluated by B type evaluation method. The measurement uncertainty of all experimental parameters was lower than 3%. The highest value of expanded uncertainty was characteristic velocity efficiency with 2.83% and the expanded uncertainty of regression rate which is the design and performance parameter was indicated to 0.03%. These results shown that the reliability of hybrid combustion system was located within allowed limits.

**Key Words** : Measurement Uncertainty(측정 불확도), Combustion Experiment(연소 실험), Hybrid Rocket(하이브리드 로켓), Regression rate(후퇴율), 특성 속도(Characteristic Velocity)

## 1. 서 론

항공우주공학 및 항공운항 분야의 많은 연구에서는 복잡 다양한 물리적 현상을 해석하기 위해 이론을 바탕으로 한 다양한 해석적, 수치적 접근법을 사용하여 실제 물리 현상을 예측 가능하게 하는 일반화된 결과들을 제시한다. 이러한 결과들은 적절한 공학 기기를 사용하여 실험을 수행하고 도출된 실험값과의 비교를 통해 이론 모델의 신뢰성을 검증하게 된다. 따라서 실험값의 정확도는 모든 공학 분야에서 매우 중요하게 다루어지고 있다.

실험 연구에서 실험 변수의 측정을 위해 사용하는 기기는 고유의 오차를 가지고 있으며 이 때

의 오차는 참값에서 벗어난 정도를 나타내나 실험에서의 참값을 알기는 현실적으로 어려우므로 측정값의 불확실한 정도를 추정하여 측정 불확도(uncertainty)를 도출함으로써 실험에서 측정값의 신뢰수준을 나타낸다.

측정 시스템의 불확도는 센서부, 신호 변환부, 신호 수집부에서 주로 발생하게 되는데 불확도의 평가는 측정을 여러 번 반복하여 통계적으로 처리하는 A형 평가와 측정대상의 변화와 관련된 다양한 정보를 근거로 하여 추정하는 방법인 B형 평가가 있으며 일반적으로 측정 기기의 제조자가 제공한 규격, 성적서, 참고문헌의 불확도 등을 바탕으로 추정한다[1]. 따라서 실제 동일한 조건에서 여러 번의 실험을 수행하기 어려운 경우는 B형 평가가 보다 효과적인 방법이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 경제성, 안전성 등의 장점[2]을 가져 많은 연구가 이루어지고 있는 하이브리드 로켓에 대한 연소 실험을 수행하여 실험에서 사용되고 있는 다양한 측정 기기들의 측정

2010년 12월 30일 접수~2011년 3월 10일 심사완료

\* 한국항공대학교 항공우주산업기술연구소

\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

연락처, E-mail : jkkim@kau.ac.kr

경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

불확도를 B형 평가 방법을 통해 1차적으로 도출하고 이를 바탕으로 하이브리드 로켓의 연소 특성과 추진 성능을 나타내는 변수들의 측정 불확도를 최종적으로 도출하여 연소 실험의 신뢰성을 평가하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 실험장치 및 실험변수

#### 2.1.1 실험장치 및 측정기기

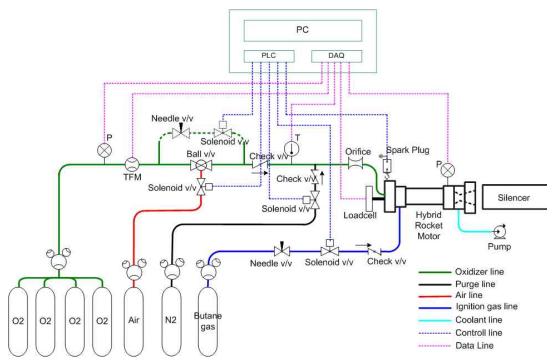


Fig. 1 하이브리드 연소 실험장치의 개략도

본 연구의 실험에서는 하이브리드 로켓 연소 실험장치를 Fig. 1과 같이 구성하였다[3]. 실험에 사용된 산화제는 상용 실린더에 약 120 kgf/cm<sup>2</sup>의 압력으로 충전된 기체 산소를 사용하였으며 Sponsler 사의 TFM(turbine flow meter)을 이용해 공급된 산화제의 체적 유량을 측정하고 산화제 공급 배관에 장착한 압력센서와 열전대(thermocouple)로 산화제 공급 압력과 온도를 측정하였다. 실험의 전 과정은 PLC(program logic control)를 통해 자동 제어되며 National Instrument 사의 DAQ 보드와 LabVIEW 프로그램을 이용하여 각 센서로부터의 데이터를 4.0kHz로 획득하였다. Lab-scale 연소기는 저항이 작은 LM 가이드 위에 장착하여 저항을 최소화 하였으며, CAS사의 로드셀을 이용하여 추력을 측정하였다. 연소기의 후방 연소실에는 고 분해능을 가지는 Kistler 사의 압전 방식의 압력 센서를 장착하여 연소실 압력을 측정하였다. 또한, 연료의 연소 전·후 무게 측정을 위해 미세전자저울을 사용하였다.

### 2.1.2 실험변수 및 DRE(data reduction equation)

후퇴율(regression rate)은 고체연료의 연료 표면에 대해 수직 방향으로 타들어가는 속도로 정의되며 하이브리드 로켓의 중요한 설계 및 성능 변수이다. 하이브리드 로켓에서 후퇴율은 산화제 질량 유속에 따라 조절되므로 일반적으로 산화제 질량 유속에 대한 함수로 나타낸다. 다양한 산화제 질량 유속 조건에서 수행된 연소 실험을 통해 도출되는 후퇴율 관계식은 연소 시간과 연료 길이에 대한 평균값인 시공간 평균화된 식으로 Eq. (1)과 같이 나타낸다.

$$\bar{r} = a \bar{G}_o^n \quad (1)$$

여기서, a는 후퇴율 상수, n은 후퇴율 지수로 산화제 질량 유속에 대한 고체연료 후퇴율의 의존성과 민감도를 나타내는 값이다. 산화제 질량 유속에 대한 후퇴율 관계식의 시공간 평균화는 고체연료의 후퇴율이 축방향에 따라 균일하다는 가정과 Eq. (2)를 통해 구한 시간 평균 산화제 질량 유속을 사용함으로써 이루어진다. 평균 산화제 질량 유속은 그레인 포트(grain port) 단면적을 연소 전·후 그레인 포트의 평균 직경으로 적용하고 연소중 공급된 산화제 공급 유량을 시간 평균하여 구하게 된다.

$$\bar{G}_o = \frac{\int_0^{t_b} \dot{m}_o dt}{t_b} = \frac{\bar{m}_o}{\frac{\pi}{4} \left( \frac{D_i + D_f}{2} \right)^2} = \frac{\bar{m}_o}{\frac{\pi}{4} \bar{D}^2} \quad (2)$$



(연소 전 연료 형상) (연소 후 연료 형상)

Fig. 2 하이브리드 로켓의 고체 연료 단면 형상

Equation (2)에서  $D_i$ 와  $D_f$ 는 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 각각 고체연료 포트의 연소 전·후 직경을 나타낸다. 평균화된 후퇴율은 Eq. (3)~(5)와 같이 연소 전·후 연료의 무게를 측정하여 체적 변화율을 도출하고 최종적으로 포트 직경의 변화율을 구한다.

$$\Delta m_f = \rho_f \Delta V_f = \frac{\rho_f \pi (D_f^2 - D_i^2) L_f}{4} \quad (3)$$

$$D_f = \left[ \left( \frac{4 \Delta m_f}{\pi \rho_f L_f} \right) + D_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\bar{r} = \frac{D_f - D_i}{2t_b} \quad (5)$$

하이브리드 로켓의 연소 효율은 연소실 압력과 추력 측정값에 기초한 특성속도와 비추력을 통해 나타내며 열화학평형 코드인 CEA[4]를 이용하여 도출한 이론값과 비교하여 연소 효율을 계산한다. 실험 특성속도와 특성속도 효율은 Eq. (6), (7)과 같이 나타내며, 실험 비추력과 비추력 효율은 Eq. (8), (9)와 같이 계산한다.

$$C_{\text{exp}}^* = \frac{A_t \int_0^{t_b} P_c dt}{\int_0^{t_b} \dot{m}_o dt + \Delta m_f} \quad (6)$$

$$\eta_{c^*} = \frac{C_{\text{exp}}^*}{C_{\text{theo}}^*} \quad (7)$$

$$Isp_{\text{exp}} = \frac{\int_0^{t_b} F dt}{g_0 \left( \int_0^{t_b} \dot{m}_o dt + \Delta m_f \right)} \quad (8)$$

$$\eta_{Isp} = \frac{Isp_{\text{exp}}}{Isp_{\text{theo}}} \quad (9)$$

## 2.2 측정 불확도 계산

### 2.2.1 B형 평가 측정 불확도의 수학적 모델

B형 평가에서는 대부분의 기대값이 일정구간 내에서 같은 확률로 존재한다는 균등분포(uniform distribution)에 근거하며 B형 표준불확도( $U_B$ )는 Eq. (10)~(12)와 같이 구한다[1].

$$\bar{X}_i = \frac{b+a}{2} \quad (10)$$

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{12}}(b-a) \quad (11)$$

$$U_B = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

여기서, a, b는 일반적인 오차 범위 표현에서의 ±값을 나타낸다.

B형 평가에서 표준 불확도의 결합은 입력 변수가 서로 독립적인 경우와 종속적인 경우로 구분하여 얻을 수 있는데 본 연구에서와 같이 독립적인 경우, 합성표준불확도( $U_c$ )는 합성분산의 제곱근의 형태로 Eq. (13), (14)와 같이 나타낸다.

$$U_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (13)$$

$$U_c(y) = \left[ (C_1 u_1(y))^2 + (C_2 u_2(y))^2 + \dots + (C_n u_n(y))^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

$f(x)$  : 측정 변수의 확률밀도 함수

$u(x_i)$  : 표준불확도

$\frac{\partial f}{\partial x_i} = C_i$  : 감도계수

이와 같은 변수들의 합성 불확도를 이용해 후퇴율, 연소 효율식과 같은 DRE의 합성 불확도를 계산하는 과정에서는 각 변수들의 불확도가 결합, 확장되어 최종 변수값의 불확도를 증가시킨다. 이러한 불확도의 전파는 각 DRE의 값을 구하는데 활용되는 변수들에 대한 합성 불확도의 제곱합의 제곱근(RSS, root sum of squares) 형태로 계산될 수 있다[5].

$$U_R = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\xi_i U_{x_i})^2} \quad (15)$$

Eq. (15)에서  $\xi_i$ 는 DRE의 불확도 전과와 관련된 감도지표로서 보다 정확한 계산을 위해서는 고차 편미분을 수행하거나 몬테카를로 모사 등을 적용하여야 하나 계산이 매우 복잡해진다. 일반적으로 감도지표에 대해서는 DRE의 1차 편미분을 적용하는 것으로도 충분한 확률적 추정값으로 고려될 수 있는 것으로 알려져 있다[6]. 따라서 이러한 점을 고려하여 한 예로써 산화제 질량 유속에 대한 불확도를 구하는 식을 나타내 보면 Eq. (16)과 같다.

$$\frac{U_{\overline{G_o}}}{\overline{G_o}} = \left[ \sum_{i=1}^5 \left( \frac{x_i}{\overline{G_o}} \frac{\partial \overline{G_o}}{\partial x_i} \right)^2 \left( \frac{U_{x_i}}{x_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

한편, 합성표준불확도는 엄격한 의미의 측정불확도로서 보다 일반화되고 실질적인 의미를 갖는 확장 불확도( $U$ )가 보다 많이 활용된다. 이러한 확장 불확도는 신뢰수준과 자유도에 따라 결정되는 보상계수(coverage factor)  $k$ 를 이용하여 Eq.

(17)과 같이 나타낸다.

$$U = k U_c \quad (17)$$

상호 독립적인 변수에 대한 확장 불확도를 구하기 위해 Welch-Satterthwaite 공식으로부터 유효자유도를 Eq. (18)과 같이 구할 수 있다.

$$\nu_{eff} = \frac{U_c^4(y)}{\sum_{i=0}^n \frac{C_i^4 u^4(x_i)}{\nu_i}} \quad (18)$$

B형 표준불확도의 자유도를  $\infty$ 로 가정하면 합성 유효자유도는 Eq. (19)와 같다[7].

$$\nu_{eff} = \frac{U_c^4}{\frac{u^4(x_1)}{\infty} + \frac{u^4(x_2)}{\infty} + \dots + \frac{u^4(x_n)}{\infty}} = \infty \quad (19)$$

합성 유효자유도가  $\infty$ 이므로 신뢰수준 95.5%에서  $t$  분포에 의해 결정되는 보상계수  $k$ 는 2.0

Table 1. 하이브리드 연소 실험에 사용된 측정기기의 오차

| Measurement parameter  | Measurement devices      | Manufacturer / Model                 | Error(%) |                   |
|--|--------------------------|--------------------------------------|----------|-------------------|
|  |                          |                                      | Sensor   | DAQ (read/offset) |
| Force( $F$ )   | Load-cell                | CAS / BCA-30L                        | 0.03     | 0.54/0.55         |
|  | Transmitter              | CAS / LCT-1420                       | 0.025    |                   |
| Fuel mass( $m_f$ )   | Electronic scale         | SETRA / EL-2000S                     | 0.02     | -                 |
| Oxidizer volume flow rate ( $\dot{V}_{ox}$ )                   | Turbine flow meter       | SPONSLER / SP3/8-CB-PH7-A-4X         | 1        | 0.54/0.55         |
|  | Transmitter              | SPONSLER / SP712-2                   | 0.3      |                   |
| Oxidizer temperature (at upstream of the orifice) ( $T_{ox}$ ) | Thermo couple            | K-type                               | 0.4      | 0.54/0.55         |
|  | Convertor                | Shinho systems / PRI-3000            | 0.2      |                   |
| Oxidizer pressure (at upstream of the orifice) ( $P_{ox}$ )    | Pressure transducer      | ROSEMOUNT / 3051S                    | 0.15     | 0.54/0.55         |
| Chamber pressure ( $P_c$ )                                     | Pressure transducer      | Kistler / 6061B                      | 0.5      | 0.6/0.38          |
|  | Amplifier                | Kistler / 5015A                      | 0.5      |                   |
| Data acquisition device  | DAQ board / Module       | National Instruments / NI-9203, 9215 |          |                   |
|  | Terminal block / Chassis | cDAQ-9172                            |          |                   |

이 된다. 따라서 확장 불확도는 Eq. (20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U = 2.0U_c \quad (20)$$

본 연구에서는 각 실험 조건에서 1회의 실험만을 수행하였으므로 B형 표준불확도와 확장 불확도를 구하였다. B형 불확도의 계산을 위해 실험에 사용된 측정 기기와 각 기기가 갖는 고유의 측정 오차 범위를 Table 1에 정리해 나타내었다.

Table 2. 측정불확도 해석을 위한 세부 변수

| Exp. Parameter | Independent parameter (Measured) |          |                |       |       |     |       | Dependent parameter (Calculated) |             |           |       |
|----------------|----------------------------------|----------|----------------|-------|-------|-----|-------|----------------------------------|-------------|-----------|-------|
|                | $T_{ox}$                         | $P_{ox}$ | $\dot{V}_{ox}$ | $m_i$ | $m_f$ | $F$ | $P_c$ | $\dot{m}_{ox}$                   | $\dot{m}_f$ | $\bar{D}$ | $O/F$ |
| $\bar{D}$      |                                  |          |                | 1     | 1     |     |       |                                  |             |           |       |
| $\dot{m}_{ox}$ | 1                                | 1        | 1              |       |       |     |       |                                  |             |           |       |
| $\dot{m}_f$    |                                  |          |                | 1     | 1     |     |       |                                  |             |           |       |
| $\bar{r}$      |                                  |          |                | 1     | 1     |     |       |                                  |             |           |       |
| $\bar{G}_o$    |                                  |          |                |       |       |     |       | 1                                |             | 1         |       |
| $O/F$          |                                  |          |                |       |       |     |       | 1                                | 1           |           |       |
| $c_{exp}^*$    |                                  |          |                |       |       |     | 1     | 1                                | 1           |           |       |
| $Isp_{exp}$    |                                  |          |                |       |       | 1   |       | 1                                | 1           |           |       |
| $\eta_{c^*}$   |                                  |          |                |       |       |     | 2     | 1                                | 1           |           | 1     |
| $\eta_{Isp}$   |                                  |          |                |       |       | 1   | 1     | 1                                | 1           |           | 1     |

B형 불확도를 계산하기 위해 실험기기를 사용해 1차적으로 측정하는 독립 변수들과 이를 이용해 계산되는 종속변수를 파악하였고 하이브리드 연소 실험의 연소 특성 및 추진 성능을 나타내는 실험 변수와의 관계를 Table 2에 나타내었다. Table 2에서의 지시값은 Eq. (1)~(9)를 이용해 얻어지는 실험 변수를 구하기 위해 사용하는 독립, 종속 변수들의 계산 차수(order)를 나타낸 것으로 이러한 세부 변수들 간의 함수 관계표는 감도 계수 계산의 어려움을 배제하여 불확도의 계산을 단순화하는데 목적이 있다. 감도 계수는 측정 변수가 영향을 미치는 정도를 나타내는 계수로 감도 계수의 일반적인 계산 과정은 편미분 형태로 나타나 이를 해결하기 위해 근사식을 적용하여야 하며 반복 계산이 필요한 경우 수학적 모델의 처리가 매우 어렵다[8]. 본 연구에서는 각 센서로부터 측정된 값이 모두 독립적인 것으로

취급하여 감도 계수를 모두 1로 가정하고 Table 2의 함수 관계를 고려한 가중치를 부여함으로써 단순화된 측정 불확도를 도출하였다.

2.2.2 B형 평가 측정 불확도의 해석 결과

Table 3은 Table 1과 2를 활용하여 구한 측정 불확도의 결과로서 하이브리드 로켓의 연소 특성과 추진 성능을 나타낼 수 있는 대표적 실험 변수들에 대한 B형 합성표준불확도와 확장 불확도를 나타낸 것이다.

Table 3. 연소 실험 변수의 측정 불확도

| Experimental parameters & Uncertainties |           |                          |              |           |                          |
|---|-----------|--------------------------|--------------|-----------|--------------------------|
|   | $U_c(\%)$ | $U(\%)$<br>( $k = 2.0$ ) |              | $U_c(\%)$ | $U(\%)$<br>( $k = 2.0$ ) |
| $T_{ox}$                                | 0.51      | 1.03                     | $\bar{r}$    | 0.02      | 0.03                     |
| $P_{ox}$                                | 0.45      | 0.91                     | $\bar{G}_o$  | 0.82      | 1.64                     |
| $\dot{V}_{ox}$                          | 0.45      | 0.89                     | $O/F$        | 0.82      | 1.64                     |
| $m_i$                                   | 0.01      | 0.02                     | $c_{exp}^*$  | 1.00      | 2.0                      |
| $m_f$                                   | 0.01      | 0.02                     | $Isp_{exp}$  | 0.93      | 1.86                     |
| $F$                                     | 0.45      | 0.89                     | $\eta_{c^*}$ | 1.42      | <b>2.83</b>              |
| $P_c$                                   | 0.58      | 1.16                     | $\eta_{Isp}$ | 1.37      | 2.74                     |

측정 불확도의 해석 결과 하이브리드 연소 실험에서 사용하는 주요 실험 변수들의 측정 불확도는 모두 3% 이내로 나타났으며 가장 큰 불확도를 가지는 변수는 특성속도 효율로서 2.83%의 확장 불확도를 가지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 특성속도 효율의 경우 계측기기를 통해 측정된 독립 변수가 가지는 불확도와 독립 변수에 영향을 받는 종속 변수의 불확도를 다중 합성하여 도출한 결과이기 때문으로 유사한 절차를 거쳐 결정되는 비추력 효율 또한 2.74의 상대적으로 큰 확장 불확도를 가짐을 알 수 있다. 하이브리드 로켓의 대표적 설계 변수이자 성능 변수인 후퇴율은 0.03%의 매우 작은 확장 불확도를 나타내었는데 이는 Eq. (4)에서 알 수 있듯이 후퇴율 계산에서 고려되는 연료 그레이н 포트의 연소 후 직경이 미세전자저울로 계측한 연료 무게만을 고려함으로써 도출되므로 매우 작은 불확도를 보임을 알 수 있다.

## 2.3 불확도를 고려한 실험 변수 결과

### 2.3.1 후퇴율

본 연구의 하이브리드 연소 실험에는 서로 다른 연소 특성을 보이는 용융성, 비용융성의 두 가지 종류의 연료군을 사용하였다. 용융성 연료군으로는 파라핀/LDPE의 혼합비가 다른 세 가지 종류의 연료(PR100, PR95PE05, PR90PE10)를 사용하였고 비용융성 연료군으로는 두 가지 종류의 연료(HDPE, HTPB)를 사용하여 후퇴율을 비교하였다. 산화제로는 모두 기체 산소를 사용하였다. 비용융성 연료는 고체연료 표면에서 대부분 기화를 통해서 연소가 이루어져 후퇴율이 느린 반면 용융성 연료는 연소 시 고체연료 표면에서 기화와 함께 액적 유입이 발생하여 비용융성 연료에 비해 매우 빠른 후퇴율을 보인다[3].

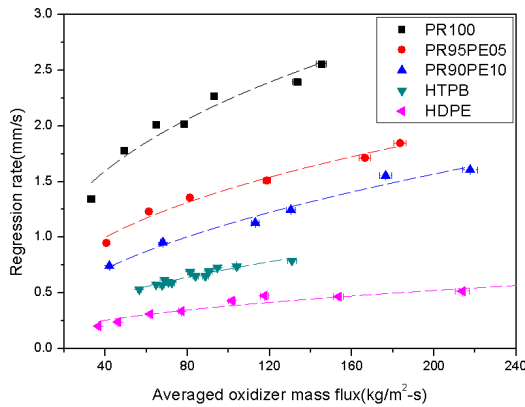


Fig. 3 산화제 질량 유속에 대한 후퇴율

이러한 후퇴율의 큰 차이는 산화제 질량 유속에 따른 두 가지 종류의 연료군, 5가지 연료에 대한 후퇴율을 비교한 Fig. 3의 결과에서도 확인할 수 있는데 후퇴율에 대해 0.03%의 확장 불확도와 산화제 유속에 대해 1.64%의 확장 불확도를 적용한 결과에서 상대적으로 빠른 후퇴율을 가지는 용융성 연료의 경우에서도 오차 막대 (error bar)로 표시한 불확도의 범위가 매우 작아 각 연료의 후퇴율 차이를 명확히 파악할 수 있었다.

### 2.3.2 특성속도 및 특성속도 효율

Fig. 4는 O/F 비에 따른 특성속도를 나타낸 결과로 용융성 연료군의 특성속도와 비용융성 연

료군의 특성속도 분포가 비교적 큰 차이를 보이고 용융성 연료군에서의 세 종류의 연료들의 특성속도는 유사한 범위에 존재함을 알 수 있다. 특성속도와 O/F 비의 확장 불확도가 각각 2.0%, 1.64%이나 불확도를 반영한 절대값의 차가 크지 않아 각 연료의 특성속도 비교는 가능하였다. 반면 Fig. 5에서 나타낸 O/F 비에 따른 특성속도 효율의 경우 특성속도 효율의 확장 불확도가 2.83%로 모든 실험 변수 중 가장 크게 나타났고 연소 효율을 나타내는 절대 값의 범위가 크지 않아 비교적 큰 불확도 범위를 나타냄을 알 수 있다. 용융성, 비용융성 연료군은 구분되어 비교가 가능하였으나 용융성 연료군인 PR100, PR95PE05, PR90PE10 연료들 간의 비교는 어려움을 알 수 있다. 따라서 특성속도 효율의 경우 측정 불확도를 줄이기 위해 특성속도 효율 계산과 관련된 보다 정밀한 측정 기기를 활용해야 할 것으로 판단된다.

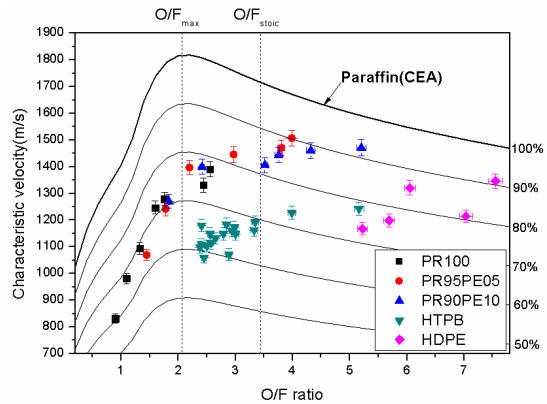


Fig. 4 O/F 비에 대한 특성속도

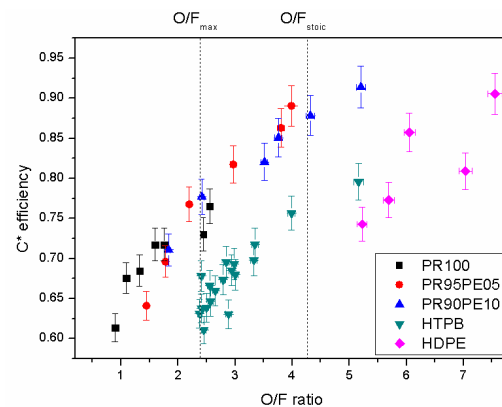


Fig. 5 O/F 비에 대한 특성속도 효율

### 2.3.3 비추력 및 비추력 효율

Fig. 6과 Fig. 7은 비추력과 비추력 효율을 O/F 비에 대해 나타낸 것으로 Fig. 4와 Fig. 5의 특성속도와 특성속도 효율 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 2.74%의 비교적 큰 확장 불확도와 작은 절대값 범위를 가지는 비추력 효율의 비교에서 용융성 연료들을 사용한 경우 세 종류의 연료 모두 특성속도 효율 보다는 불확도 범위가 작게 나타났지만 여전히 불확도 범위 내에 존재하여 연료간의 정확한 비교는 어려움을 알 수 있었다. 따라서 비추력 효율의 불확도 추정과 관계된 측정기기의 정밀도를 보다 높여 비추력 효율의 불확도를 줄여야 보다 정확한 비교가 가능할 것으로 판단된다.

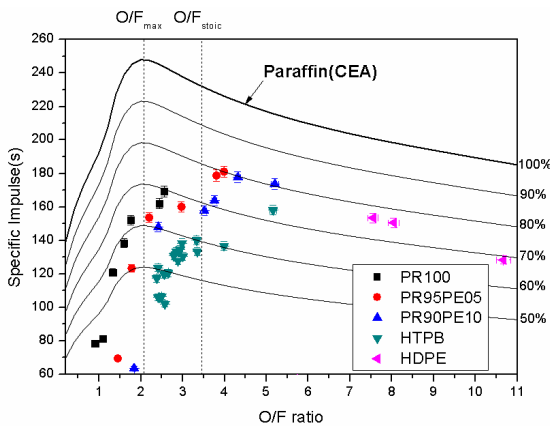


Fig. 6 O/F 비에 대한 비추력

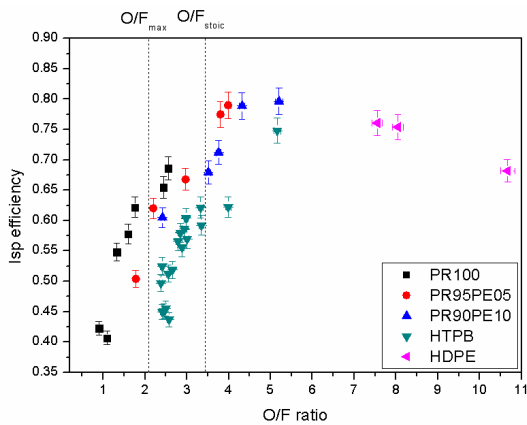


Fig. 7 O/F 비에 대한 비추력 효율

### 3. 결 론

본 연구에서는 안전성, 경제성 등의 장점을 가져 많은 연구가 이루어지고 있는 하이브리드 로켓에 대한 연소 실험 장치의 측정 불확도를 B형 평가 방법을 통해 도출하여 실험 변수들의 불확도를 평가하였다.

측정 불확도 해석 결과 하이브리드 연소 실험에서 사용하는 주요 실험 변수들의 측정 불확도는 모두 3% 이내로 나타났다. 가장 큰 불확도를 나타내는 변수는 특성속도 효율로서 2.83%의 확장 불확도를 나타냈으며 하이브리드 로켓의 대표적 설계 변수이자 성능 변수인 후퇴율은 0.03%의 매우 작은 확장 불확도를 나타냈다.

이러한 결과는 하이브리드 로켓 연소 실험에서 신뢰성 있는 실험 기기를 사용한 경우 허용 범위 내의 불확도를 가짐을 보여주었으나 특성속도 효율과 비추력 효율의 경우 확장 불확도가 커 유사한 연료군의 특성을 명확히 비교하기 어려웠다. 향후 연소 효율과 관련된 보다 정밀한 측정기기를 사용함으로써 용융성 고체연료의 연소 효율과 관련한 보다 명확한 비교가 가능할 것으로 사료된다.

### 후 기

"이 논문은 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행된 연구임(No. R0A-2007-000-10034-0(2007))."

### 참고문헌

- 1) 최주호, 홍성수, "압력 측정 시스템의 불확도 평가", 한국군사과학기술학회지, 제5권, 제1호, pp. 15-23, 2002.
- 2) 도규성, 윤창진, 문희장, 김진곤, "Multi-port 하이브리드 로켓 연소기에서 고온 산화제 유동에 의한 고체연료의 구조적 안전성에 대한 연구", 한국항공우항공학회지, 제15권, 제4호, 2007, pp.38-44
- 3) 김수중, 조정태, 이정표, 문희장, 성홍계, 김진곤, "Paraffin wax/LDPE 혼합 연료의 연소 특성에 관한 연구", 한국추진공학학회지, 제14권, 제2호, 2010, pp.29-38

- 4) Gordon, S., and McBride, B.J. 1976. "Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions, rocket performance, incident and reflected shocks, and Chapman-Jouguet detonations", NASA SP-273, Interim Revision, March
- 5) 김은중, 조수용, "터빈성능시험에서 측정변수의 불확도 파급에 관한 연구", 한국항공우주학회지, 제31권, 제8호, pp. 107-114, 2003.
- 6) Kiline, S. J. and McClintock, F. A. "Describing uncertainties in single-sample experiments," Mech. Eng., Jan., 1953, pp. 3-8.
- 7) 오화영, 문성환, 허환일, "하이브리드 로켓 산화제 유량제어 실험의 측정 불확도", 한국항공우주학회 추계학술대회, KSAS 04-2611, pp. 937-940, 2004.
- 8) 이대성, 양인영, 김춘택, 양수석, "기체 유량 측정에서 몬테 카를로 모사를 이용한 측정 불확도 평가", 대한기계학회논문집 B권, 제27권, 제12호, pp. 1758-1765, 2003.