

# 하이브리드 로켓에서의 초기 포트직경을 고려한 산화제 유속과 고체연료 유속과의 관계에 관한 연구

이정표\* · 조성봉\* · 윤상규\* · 박수향\* · 송나영\* · 김기훈\* · 조정태\* · 성홍계\*\* · 문희장\*\* · 김진곤\*\*

## A Study on Relation between the Fuel Mass Flux and the Oxidizer Mass Flux with the Initial Port Diameter in Hybrid Rocket

Jungpyo Lee\* · Sung Bong Cho\* · Sang-Kyu Yoon\* · Su-Hayng Park\* · Na-Young Song\* · Gihun Kim\* · Jungtae Cho\* · Hong-Gye Sung\*\*, Heejang Moon\*\* · Jin-Kon Kim\*\*

### ABSTRACT

Fuel mass flux was experienced with a function of the oxidizer mass flux using initial port area of solid fuel, in stead of regression rate correlation which shows combustion characteristic in hybrid propulsion. The burning rate could be easily obtained by using the oxidizer mass flux of initial port area without iteration, and fuel configuration could be designed simply. In this experiments PE was used as fuel, GOX was used as oxidizer. A variation of mass flux of solid fuel with port area is considered by changing the burning time. In the case of approximate 0.5 for an exponent of oxidizer mass flux, using the fuel mass flux correlation is more suitable than regression rate correlation in hybrid propulsion.

### 초 록

하이브리드 추진에서 연소특성을 나타내는 후퇴율 식을 초기 포트면적으로 나눈 산화제 유속이 고려된 고체연료 유속의 관계식으로 표현하였다. 초기 포트면적을 고려한 산화제 유속을 이용하여 반복 수행 없이 연소율을 쉽게 구할 수 있었고, 고체연료 유속 관계식으로 연료 형상을 간단히 설계할 수 있는 기법에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구의 실험에서는 연료로 PE, 산화제로 GOX를 사용하였으며, 연소시간을 다양하게 하여 포트면적 변화에 따른 유속의 변화를 고려하였다. 하이브리드 추진에서, 산화제 유속의 지수가 0.5에 근접할 경우 후퇴율 관계식 보다는 고체연료 유속 관계식을 사용하는 것이 더 적합함을 확인하였다.

Key Words : Hybrid Rocket(하이브리드 로켓), Regression Rate(후퇴율), Propellant Mass Flux(추진제 유속), Oxidizer Mass Flux(산화제 유속), Fuel Mass Flux(고체연료 유속), O/F Ratio(O/F비)

### 1. 서 론

고체연료의 후퇴율은 하이브리드 연소기를 설계할 때 중요한 변수이며, 추진제(산화제 + 연료) 유속에 의존 된다. 지금까지 많은 연구자들이 후퇴율과 추진제 유속의 관계식을 찾기 위해

\* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부  
연락처, E-mail: jkkim@kau.ac.kr

노력해 왔으며, 식(1)과 같은 후퇴율과 추진제 유속의 관계식이 가장 일반적으로 사용되고 있다[1,2,3,4]. 연료 축방향으로의 후퇴율 변화는 비교적 작기 때문에 추진제 유속이 후퇴율에 가장 크게 영향을 미치고, 또한 연소되는 연료의 양은 산화제 공급량에 비해 작기 때문에 일반적으로 추진제 유속을 산화제 유속으로 대체하여 사용하고 있다[3, 4]. 포트직경에 기초한 산화제의 평균 유속의 정의는 식(2)와 같다[5]. 그러나 식(2)를 이용하여 후퇴율을 구하기 위해서는 반복 계산이 수행되어야 하는 어려움이 있다. 본 연구에서는 반복 수행이 필요 없는 식(3)과 같은 초기 포트면적을 고려한 산화제 유속을 후퇴율 관계식에 적용하여 타당성을 확인하고, 또한 초기 포트면적을 고려한 산화제 유속과 고체연료 유속 관계식으로 간단하게 연료 형상을 구할 수 있는 기법을 도출하였다.

$$\dot{r} = aG^n x^m \quad (1)$$

$$G_{ox.A_{av}} = \frac{\dot{m}_{ox}}{\frac{\pi}{4} \left( \frac{D_i + D_f}{2} \right)^2} \quad (2)$$

$$G_{ox.A_i} = \frac{\dot{m}_{ox}}{\frac{\pi}{4} D_i^2} \quad (3)$$

## 2. 본 론

### 2.1 고체연료 유속 관계식

본 연구에 사용된 하이브리드 연소 실험 장치는 점화 시스템, 연소기 시스템, 산화제 공급 시스템, 데이터 획득 및 제어 시스템의 네 부분으로 구성되어 있다. 실험 조건은 Table 1과 같다 [6].

Figure. 1은 본 연구에서 수행된 실험 결과로서 연소시간을 변화시켰을 경우, 평균 포트면적을 고려한 추진제 유속과 산화제 유속, 그리고 초기 포트면적을 고려한 산화제 유속에 대한 후퇴율의 관계를 나타낸 것이다. 원통형 형상의 연료 그래인은 연소가 진행됨에 따라 연소면적이 넓어지게 되고, 화염에서 연료 표면으로의 단위

면적당 열전달량은 감소되어 후퇴율은 감소한다 [6].

평균 포트면적을 고려한 추진제 및 산화제 유속은 연소가 진행됨에 따라 포트 면적의 변화를 고려하기 때문에, 연소시간의 증가에 따른 후퇴율의 감소를 표현할 수 있는 반면, 초기 포트면적을 이용한 산화제 유속 변수로는 연소시간에 따른 후퇴율 감소를 설명하기 어렵다.

Table 1. Specification of the Combustion Test

Oxidizer	Gas Oxygen
Solid Fuel	PE
Length	200 mm
Port Diameter	15 mm
Burning Time	2, 4, 6, 12, 14, 16 sec
Oxidizer Supply Range	9.5 ~ 43.61 g/sec

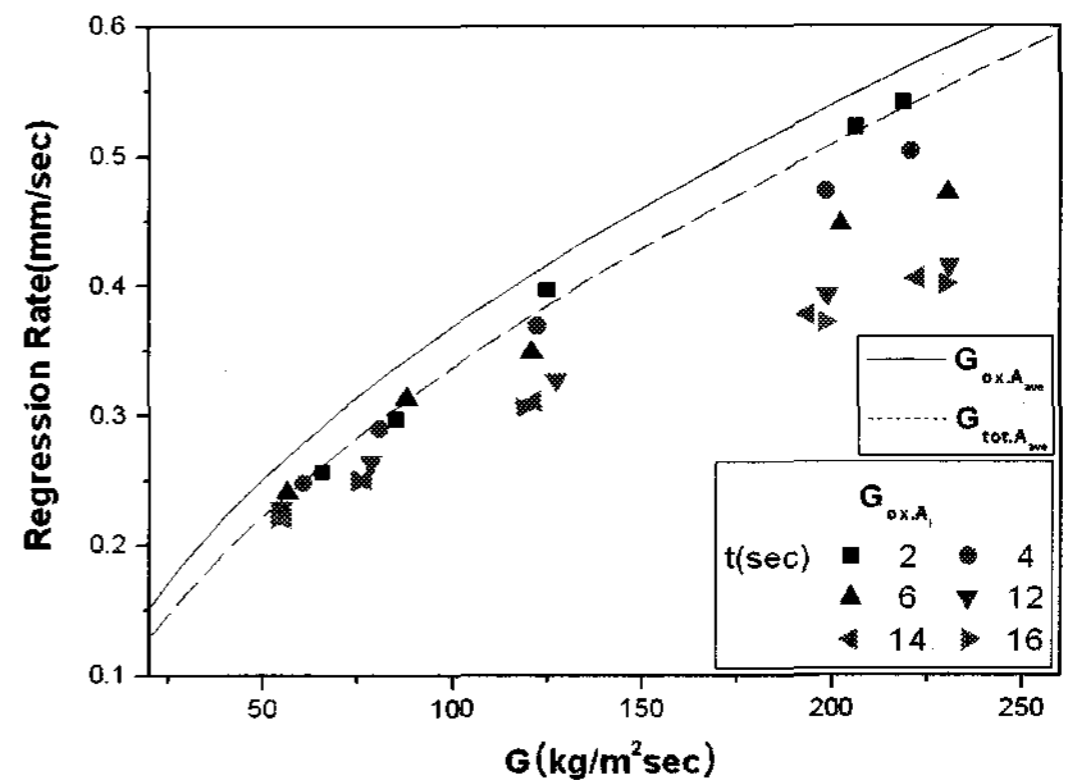


Fig. 1 Regression Rate Behavior on the Mass Flux

평균 포트면적을 고려한 추진제 유속으로 나타낸 후퇴율과 평균 포트면적을 고려한 산화제 유속으로 나타낸 후퇴율은 Fig. 1의 전체 유속구간에서 평균 약 8%의 차이를 보이고 있기 때문에, 추진제 유속을 산화제 유속으로 대체하기에 적합하다. 그리고 연료 축방향으로의 후퇴율 차이는 무시할 수 있기 때문에, 식(1)의 후퇴율 관계식을 식(4)와 같이 나타낸다. 본 연구의 실험에서 얻은 a는 0.029이고, n은 0.55이다. 식(4)에서 평균 포트면적으로 나눈 산화제 유속을 초기 포트면적으로 나눈 산화제 유속으로 나타내면

식(5)와 같고, 식(5)의 각 변에  $\rho \frac{A_{g,ave}}{A_{g,i}}$  을 각각 곱하면, 좌변의 후퇴율은 고체연료의 연소 질량유속으로 나타낼 수 있고, 식(6)과 같다.  $A_{g,i}$  는 연소 전의 연료 그레인 면적이고,  $A_{g,ave}$  는 연소 전·후의 연료 그레인 평균면적이다.  $D_i$  와  $D_f$  는 각각 연소 전·후의 연료 포트 직경이다.

$$\bar{r} = a G_{ox,A_i}^m \quad (a : 0.029, n : 0.55) \quad (4)$$

$$\bar{r} = 4^n a G_{ox,A_i}^m \left(1 + \frac{D_f}{D_i}\right)^{-2n} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \bar{m}_f'' &= 2^{2n-1} \rho a G_{ox,A_i}^m \left(1 + \frac{D_f}{D_i}\right)^{1-2n} \\ &= a' G_{ox,A_i}^m \left(1 + \frac{D_f}{D_i}\right)^{1-2n} \end{aligned} \quad (6)$$

평균 포트면적을 고려한 산화제 유속으로 구한 후퇴율 값과 초기 포트면적을 고려한 산화제 유속으로 구한 후퇴율 값의 비는 식(7)과 같고, 고체연료 유속 값과 초기 포트면적을 고려한 산화제 유속의 관계식의 비는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\bar{r}}{a G_{ox,A_i}^m} = 4^n \left(1 + \frac{D_f}{D_i}\right)^{-2n} = f_1(D_f/D_i) \quad (7)$$

$$\frac{\bar{m}_f''}{a' G_{ox,A_i}^m} = \left(1 + \frac{D_f}{D_i}\right)^{1-2n} = f_2(D_f/D_i) \quad (8)$$

Figure. 2는  $D_f/D_i$  에 대해 식(7), (8)의  $f_1(D_f/D_i)$  와  $f_2(D_f/D_i)$  를 각각 나타낸 것이다.  $f_1(D_f/D_i)$  의 값은  $D_f/D_i$  가 증가할수록, 즉 연소가 진행됨에 따라 포트 직경이 증가하면서 평균 포트면적을 고려한 산화제 유속으로 구한 후퇴율 값과 초기 포트직경으로 나눈 산화제 유속으로 구한 후퇴율 값의 차이가 커지는 반면,  $f_2(D_f/D_i)$  의 값은 Fig. 2의 모든  $D_f/D_i$  범위에서 0.9 이상으로 차이가 크지 않음을 확인할 수 있다. 본 연구에서의 산화제 유속 지수  $n$  값은

0.55로, 식(8)에서 보는 바와 같이 직경변화에 대한 영향이 작아지게 된다.  $n$  값이 0.5 이라면,  $f_2(D_f/D_i)$  의 값은 1로 직경변화에 대한 영향이 없어진다. 대부분의 폴리머 연료의 경우 산화제 유속의 지수 값이 0.5에 근접한다[6]. 따라서 폴리머 연료를 적용하는 하이브리드 연소기를 설계 시, 반복 수행이 요구되는 평균 포트면적을 고려한 산화제 유속-후퇴율 관계식을 이용하기 보다는, 초기 포트면적을 고려한 산화제 유속-고체연료 유속의 관계식을 사용하는 것이 더 적합하다고 사료된다.

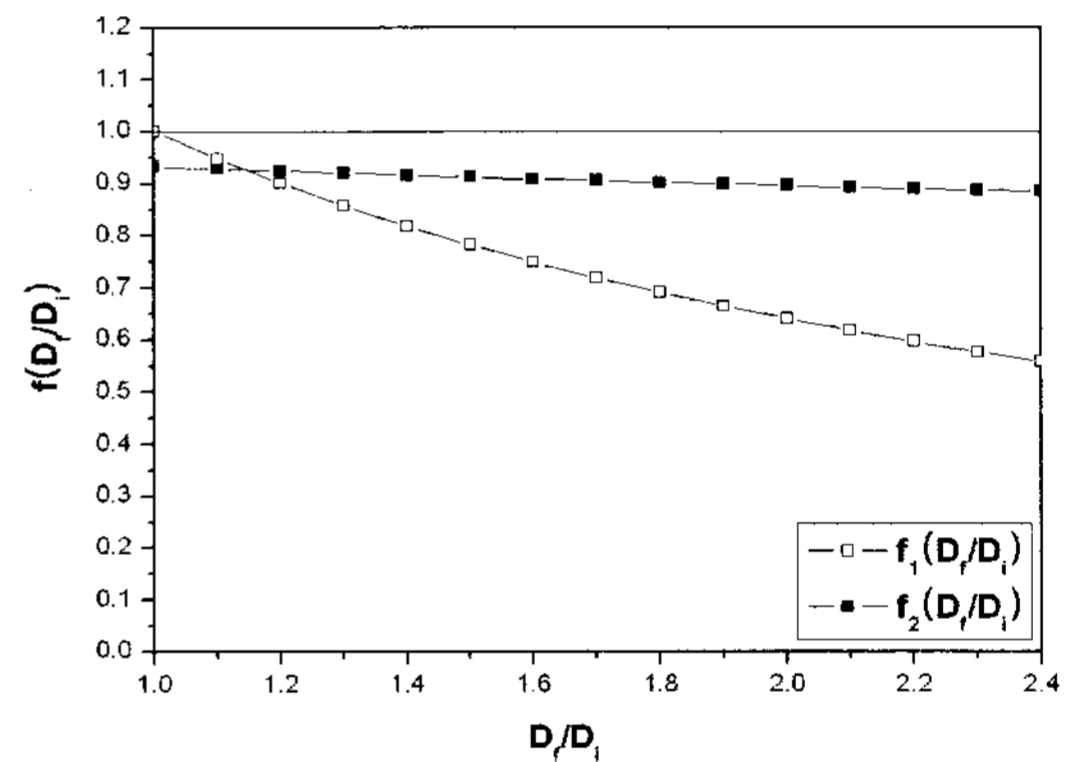


Fig. 2 Effect of the  $D_f/D_i$  on the Regression Rate and the Fuel Mass Flux based on the  $G_{ox,A_i}$

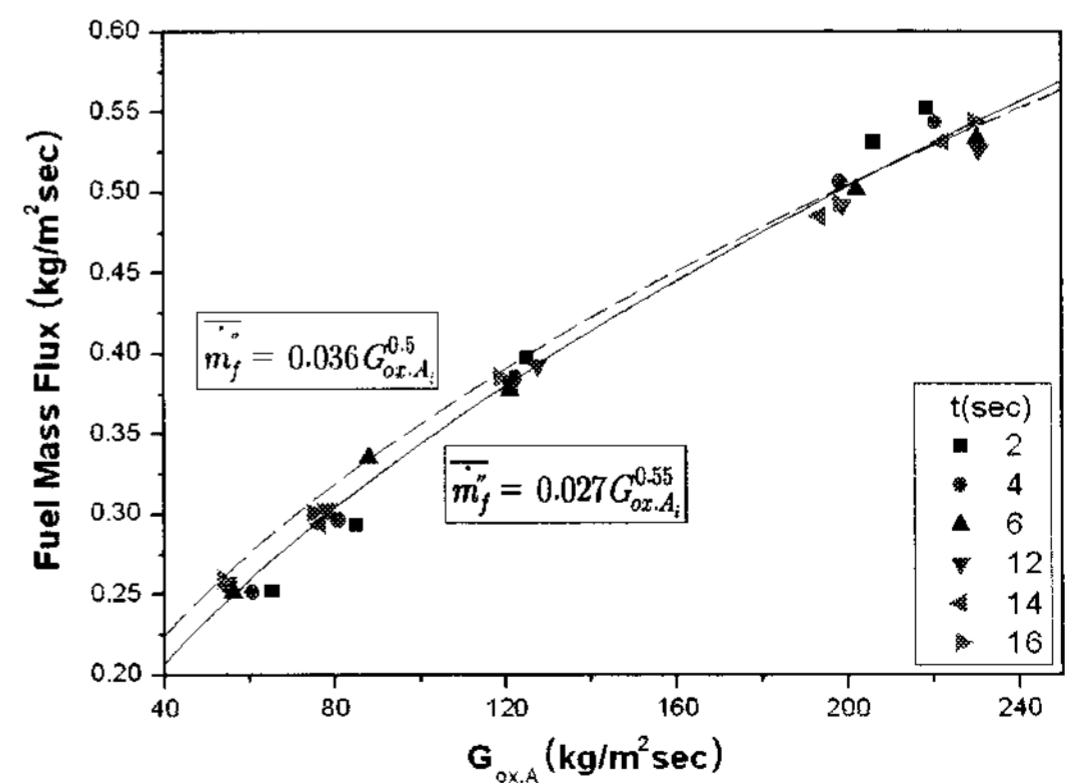


Fig. 3 Fuel Mass Flux on the Oxidizer Mass Flux,  $G_{ox,A_i}$

Figure. 3은 초기 포트면적을 고려한 산화제 유속과 고체연료 유속의 관계를 나타낸 것이다. 식(4)의 지수 값(0.55)을 이용하여 나타낸 고체연료 유속관계식과 실험 데이터가 평균제곱오차가 3.4 % 내로 잘 맞음을 확인 할 수 있고, Fig. 1에서와 달리 연소시간의 증가에 따른 포트면적의 증가에 대해서도 산화제 유속-고체연료 유속의 관계식으로 연소특성을 잘 표현하고 있다. 직경 변화에 대한 영향이 없는  $n=0.5$ 일 경우의 고체연료 유속 관계식을 Fig. 3에 같이 나타내었고, 실험 데이터와 큰 차이 없음을 확인할 수 있다.

### 2.2 고체연료 형상 설계

초기 포트면적을 고려한 산화제 유속과 고체연료 유속의 관계식을 이용하여 고체연료 형상을 간단하게 설계할 수 있다. 연료와 산화제로 PE/GOX를 사용한 고체연료 유속 실험식 식(9)를 이용해 식(10)을 유도할 수 있다.

$$\dot{m}_f = 0.027 G_{ox-A_i}^{0.55} \quad (9)$$

$$O/F = 10.32 \dot{m}_{ox}^{0.45} \frac{D_i^{0.1}}{L} \quad (10)$$

식(10)은 O/F, 산화제 유량, 연료 형상(L, D)의 관계를 나타내는 식으로, 산화제 유량과 O/F비가 설정되면 고체연료의 형상을 설계할 수 있음을 의미한다.

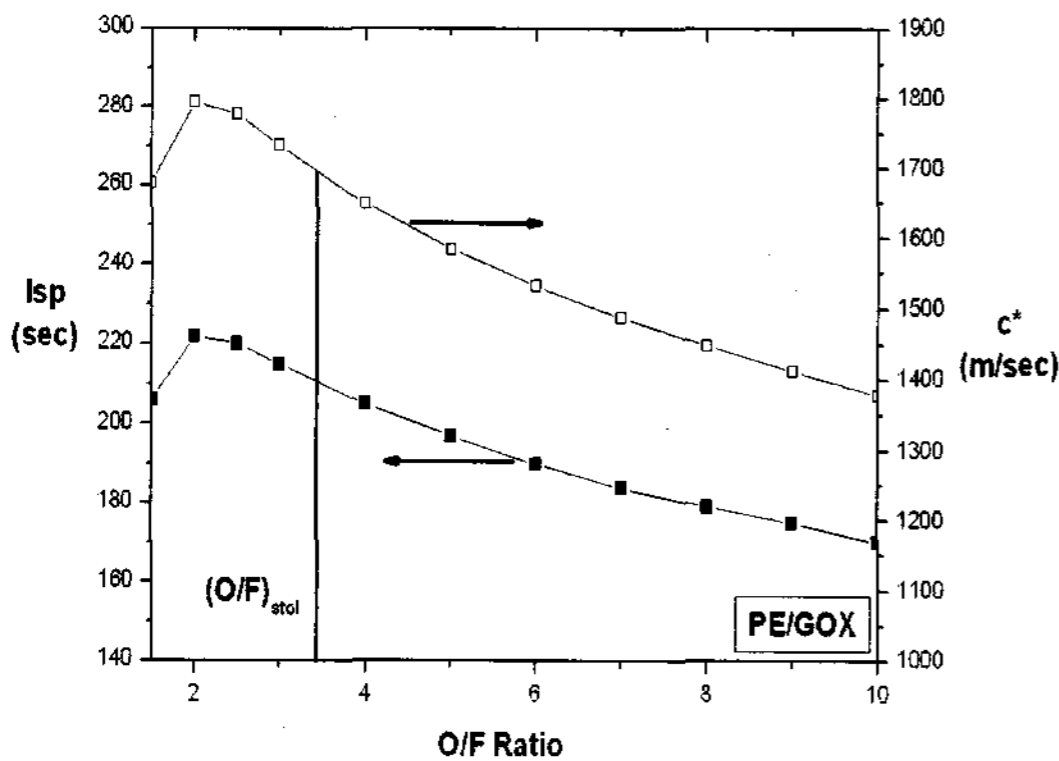


Fig. 4 Isp and  $c^*$  on the O/F Ratio ( $p_c : 8 \text{ bar}$ )

Fig. 4는 연료와 산화제로 PE/GOX를 적용했을 경우, O/F비에 따른  $I_{sp}$ 와  $c^*$ 를 CEA code를 이용하여 나타낸 것이고, 로켓추진 성능을 나타내는  $I_{sp}$ 와  $c^*$ 의 최적 O/F비는 2 근처임을 확인할 수 있다. 하이브리드 추진제 PE/GOX의  $(O/F)_{stol}$ 비는 3.43이고, 본 연구에서는  $(O/F)_{stol}$ 비 이하구간에서 연소반응이 일어나기 어렵다고 판단해, 최적 O/F비를 3.5로 설정하였다.

그러나 다공포트 그레인 모터에서  $(O/F)_{stol}$ 비 이하에서 연소반응이 일어난다는 연구결과가 있어, 본 연구의 L/D비 보다 큰 L/D비에서는 농후연소가 발생할 수 있다고 예측된다.

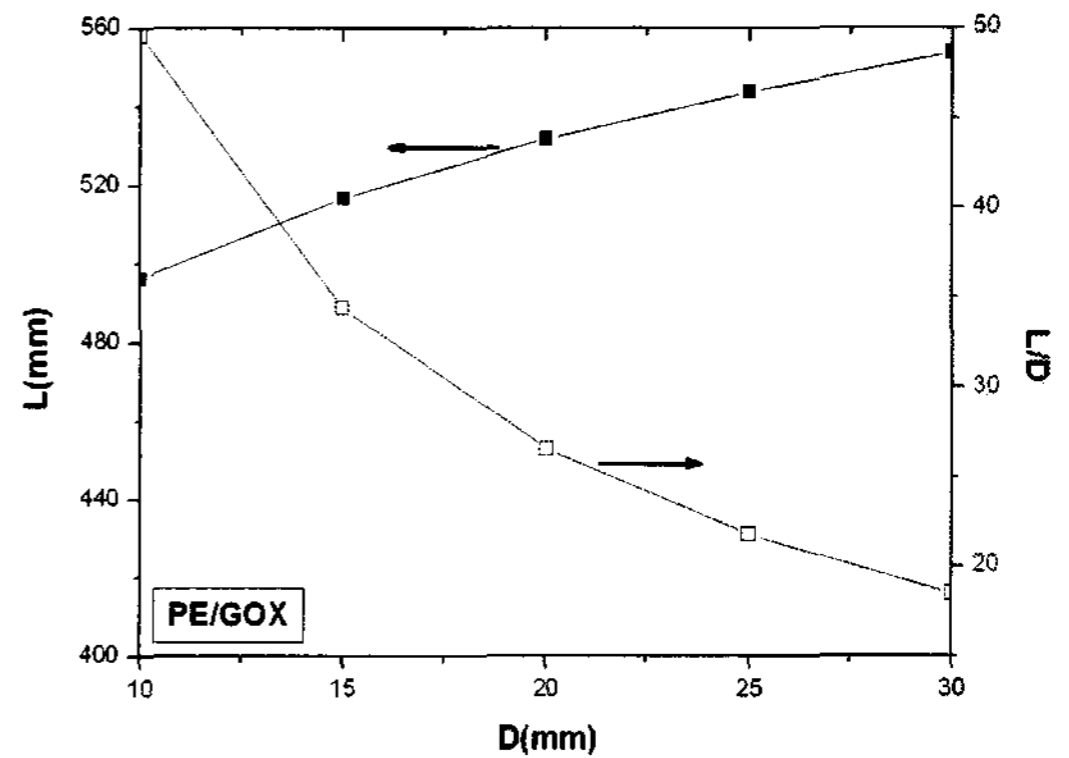


Fig. 5 Length vs Diameter of the Fuel ( $\dot{m}_{ox} : 0.053 \text{ kg/s}$ ,  $O/F : 3.5$ ,  $a : 0.027$ , and  $n : 0.55$ )

Figure. 5는 O/F비가 3.5, 산화제 유량이 0.053 kg/s 일 경우에 고체연료의 직경과 길이의 관계를 나타낸 것이다. 동일한 산화제 유량 조건에서 O/F비를 3.5가 되게 하기 위해서는 연료 포트직경이 커질수록 연료 길이가 길어져야 하고, 이는 포트직경이 커질수록 연소되는 연료의 양이 줄어들음을 의미한다. 하지만 포트직경의 증가에 비해 연료 길이의 증가는 작기 때문에 포트직경이 증가할수록 L/D비는 작아짐을 확인할 수 있다.

### 3. 결 론

- 하이브리드 연소에서 초기 포트면적이 고려된 산화제 유속과 고체연료 유속의 관계식을 사용하여, 반복 수행 없이 연소율을 구할 수 있었고, 고체연료 형상 설계를 간단히 할 수 있었다.
- 동일한 산화제 유량에서 동일한 O/F비를 나타내기 위해서는 포트직경이 커질수록 연료길이는 길어져야 하지만, L/D비는 작아짐을 확인했다.
- 산화제 유속의 지수값이 0.5에 근접할 경우에는, 후퇴율 관계식 보다 다루기 쉬운 고체연료 유속 관계식을 사용하는 것이 적합하다고 사료된다.

### 후 기

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

### 참 고 문 헌

1. Marxman, G. A., Wooldridge, C. E., and Muzzy, R. J., "Fundamentals of Hybrid Boundary Layer Combustion", Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 15, AIAA, New York, 1964, pp. 485 - 522.
2. G. A. Marxman and M. Gilbert, "Turbulent Boundary Layer Combustion in the Hybrid Rocket", 9th Sym. Combustion, The Combustion inst. 1963
3. Sutton, P. G., and Biblarz, O., "Rocket Propulsion Elements," John Wiley & Sons, Inc., Seventh Ed., 2000
4. Ronald W. Humble, "Space propulsion analysis and design", pp371-380
5. M. Arif Karabeyoglu, Brian J. Cantwell, and Greg Zilliac, "Development of Scalable Space-Time Averaged Regression Rate Expressions for Hybrid Rockets", JPP, Vol. 23, No. 4
6. 이정표, "Single-Port Hybrid Rocket Motor의 물질전달 수를 고려한 고체연료 연소율에 관한 연구", 한국항공대 석사학위논문, 2007년