

## 화염편 모델을 이용한 하이브리드 로켓의 연소과정 해석

임재범\* · 김용모\*\* · 윤명원\*\*\*

### Flamelet Modeling for Combustion Processes of Hybrid Rocket Engine

Jaebum Lim\*, Yongmo Kim\*\*, Myungwon Yoon\*\*\*

**Keywords :** Flamelet Modeling, Regression rate, Turbulent Nonpremixed Flames, Hybrid Rocket Engine

#### Abstract

Hybrid propulsion systems provide many advantages in terms of stable operation and safety. However, classical hybrid rocket motors have lower fuel regression rate and combustion efficiency compared to solid propellant rocket motor. Accordingly, the recent research efforts are focused on the improvement of engine efficiency and regression rate in the hybrid rocket engine. The present study has numerically investigated the combustion processes in the hybrid rocket engine. The turbulent combustion is represented by the flamelet model and Low Reynolds number k-ε turbulent model is employed to reduce the uncertainties for convective heat transfer near solid fuel surface having strong blowing effect. Based on numerical results, the detailed discussions have been made for the effects of oxygen injection methods and oxygen injection flow rate on flame structure and regression rate in the vortex hybrid rocket engines

#### 1. 서론

하이브리드 로켓은 기존의 고체 및 액체 로켓과 달리 연료는 고체로 만들어 로켓 모터 케이스에 넣어 놓고 액체 산화제를 고체 연료에 분사 시켜 연소시키는 로켓으로써 기존의 로켓에 비하여 연소 안정성, 엔진 운전 그리고 고체 연료 취급 상에 있어서 많은 이점을 가지고 있다. 그러나, 기존의 하이브리드 로켓 엔진은 고체 추진 로켓에 비하여 낮은 연료 regression rate과 연소 효율을 가지는 단점이 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 지난 수년간 하이브리드 엔진에서 연료의 regression rate 특성 및 엔진 성능 향상을 위한 연구가 계속되어 왔으며 최근에 엔진의 체적 규제를 경감시키고 연료의 regression rate을 향상시키기 위하여 선화유동을 이용하는 하이브리드 로켓 엔진들이 제안되고 있다. 이러한 선화유동을 가지는 하이브리드 로켓은 고체연료 그레이드에 평행하게 유입되는 기존의 하이브리드 로켓에 비하여 고체 연료 벽면에서의 대류열전달 현저하게 증가하게 되어 아주 높은 고체연료의 regression rate을 얻을 수 있는 이점이 있다.

본 연구에서는 선화 유동을 갖는 하이브리드 로켓 엔진에서 화염편 모델(flamelet modeling)을 이용하여 산화제의 유입위치, 그리고 선화유동의 형성 방식이 하이브리드 로켓의 연소특성 및 regression rate에 미치는 영향을 해석하였다.

#### 2. 수치 모델

##### 2.1 지배 방정식

##### 연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0$$

##### 운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) =$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_t) \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right)$$

##### 에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h) =$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \frac{\mu}{\sigma} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial q_j^{rad}}{\partial x_j} + \Phi + \Delta h_{comb} \dot{\omega}_{fu}$$

여기서,  $h = C_p T + \frac{1}{2} u_i u_i$

##### Low-Reynolds Number k-ε Turbulent Model

대부분의 난류 모델은 높은 레이놀즈 유동영역에 적용할 수 있으며 벽면 경계조건으로 벽함수 법을 이용한다. 그러나, 낮은 레이놀즈 수를 갖는 유동, 박리 유동, 열 및 물질전달을 가지는 벽면의 흐르는 유동장에 대해서는 벽함수법이 적절하지 않다. 따라서 분자 점성에 영향을 받는 얇은 점성저층까지 확대 적용할 수 있는 모델이 필요하다. 이러한 상황을 고려하기 위해서 본 연구에서는 난류 운동 에너지와 그 소산율에 대하여 Low-Reynolds number k-ε 난류 모델을 적용하였다.

\* 한양대학교 대학원, lim771027@hanmail.net

\*\* 한양대학교 기계공학부, ymkim@hanyang.ac.kr

\*\*\* 국방과학연구소

고체연료내부의 열전도

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)$$

여기서,  $\alpha$  는 CH4의 열확산계수이며  $\rho_c$  는 연료의 밀도이다.  $C_c$  은 연료의 비열을 나타낸다.

## 2.2 고체연료와 가스장의 경계면의 경계조건

질량보존

$$(\rho v)_g = -\rho_c r_b$$

에너지 보존

$$-\lambda_g \left( \frac{dT}{dr} \right)_g - q_{flux}^{Rad} = \rho_c r_b L_v - \lambda_s \left( \frac{dT}{dr} \right)_s$$

여기서,  $L_v$  은 CH4 연료의 잠열이다.

$r_b = A \exp\left(-\frac{E_a}{R_u T_s}\right)$  여기서  $r_b$  는 regression rate 이며  $E_a$  는 활성화 에너지이다.

## 2.3 복사 열전달 모델

복사 열유속의 발산은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot q_{rad} = a(4\pi I_b(T) - \int_{4\pi} I(\vec{s}, \vec{\Omega}) d\Omega)$$

$$\frac{dI(\vec{s}, \vec{\Omega})}{ds} + (a + \sigma_s) I(\vec{s}, \vec{\Omega}) = a I_b(T) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} I(\vec{s}, \vec{\Omega}') \Phi(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}') d\Omega'$$

## 3. 연소 모델

### 3.1 비단열 확률밀도함수 접근법

본 연구에서의 연소모델의 근본적인 접근은 유동과 화학반응을 분리하여 접근하는 것이며 이로 인해 혼합분율(mixture fraction)로 명명되는 화학반응에 독립적인 보존 스칼라를 도입할 수 있다. 열손실이 고려되어야 되는 경우에는 혼합분율만이 아니라 엔탈피 손실변수 접근법을 이용하여야 하며 아래와 같이 정의 되어진다.

$$\zeta = \frac{h - h_{min}}{h_{ad} - h_{min}} = \frac{h - h_{min}}{U(Z)}$$

여기에서  $h_{ad}$  는 단열상태의 엔탈피 그리고  $h_{min}$  은 순간적으로 주위의 온도로 냉각되었을 때의 엔탈피로서 혼합물의 최저 엔탈피를 나타낸다. 따라서 엔탈피 손실변수  $\zeta$  는 복사 또는 대류에 의한 국부 열손실들을 나타낸다.

### 3.2 연료와 압력에 따른 순산소 화염의 구조

Fig 2에서 혼합분율 좌표계에서 메탄/순산소 화염구조를 압력에 따라 도시하였다. 해석결과에 보는 바와 같이 순산소 화염의 경우에는 압력을 증가시킬수록 화염온도가 현저히 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 특성은 고압상태로 될수록 chemical dissociation과 chemical dissociation에 의한 흡열반응이

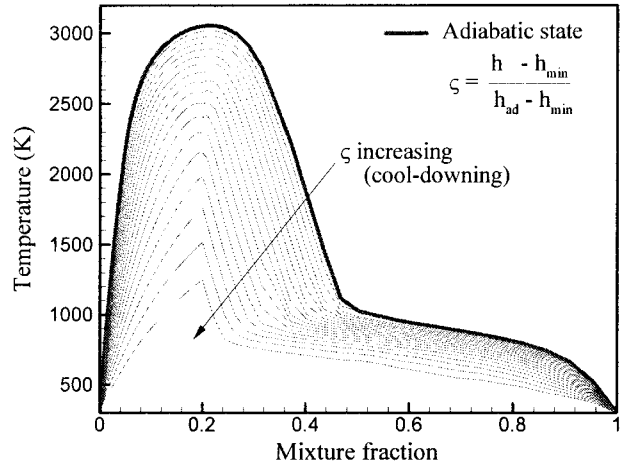


Figure 1. Non-adiabatic equilibrium library for  $CH_4 - O_2$  chemistry

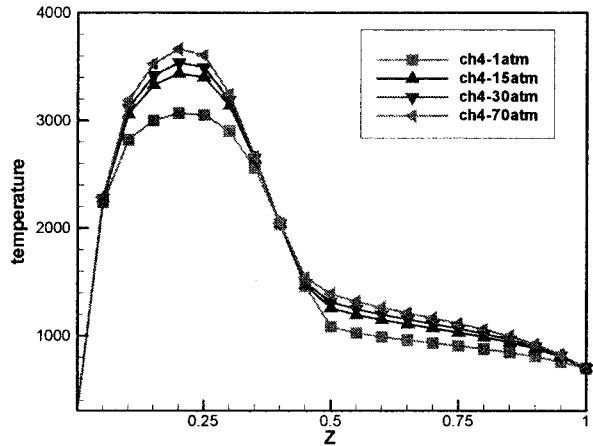


Figure 2. Effects of pressure on CH4/O2 flame structure

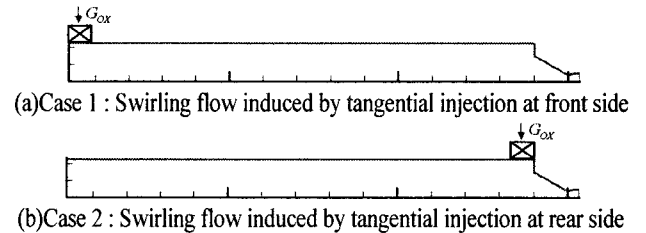


Figure 3 Configurations of Hybrid motor with swirling oxygen flow

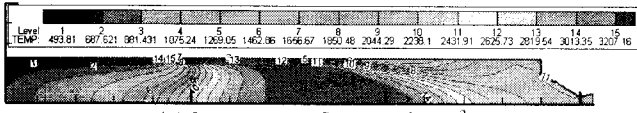
크게 감소하게 되어 화학반응의 완성도와 화염온도가 크게 증가하게 된다.

## 4. 결과 및 해석

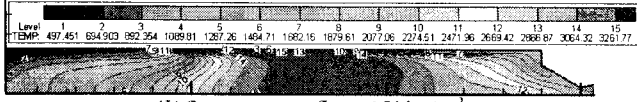
본 연구에 사용된 격자 수는 축 방향으로 155개, 반경방향으로 40개이며 일정한 격자간격을 이용하지 않고 벽면쪽과 급격한 속도 구배를 가지는 영역에서 격자를 밀집 시켰다.

Motor 앞쪽과 뒤쪽에서 접선 방향으로 산화제가 유입되는 경우에 대해 각각 해석했으며 Fig.3은 각각의 경우의 형상을 보여준다. 본 연구에서는 분출 각을  $7^\circ$  를 이용하였고 접선 방향의 분출속도, 선회속도는 다음과 같은 식으로 계산된다.

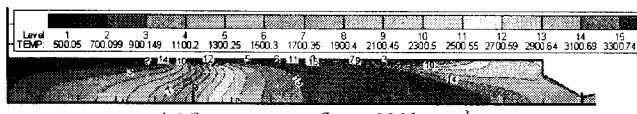
$$V_t = \sqrt{\frac{V_{Tot}^2}{1 + \tan^2 \alpha}}, \quad V_n = V_{Tot} \tan \alpha$$



(a) Oxygen mass flux =  $100 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$

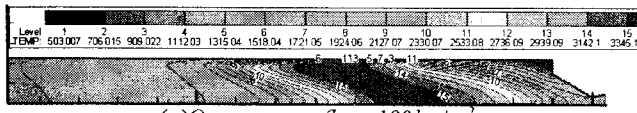


(b) Oxygen mass flux =  $150 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$

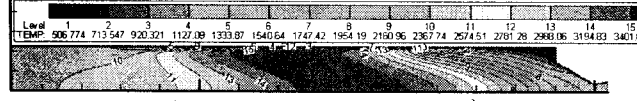


(c) Oxygen mass flux =  $200 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$

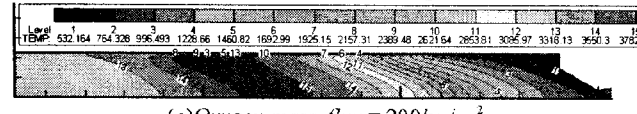
Figure 4 Temperature field (Case1)



(a) Oxygen mass flux =  $100 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$



(b) Oxygen mass flux =  $150 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$



(c) Oxygen mass flux =  $200 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$

Figure 5: Temperature field (Case2)

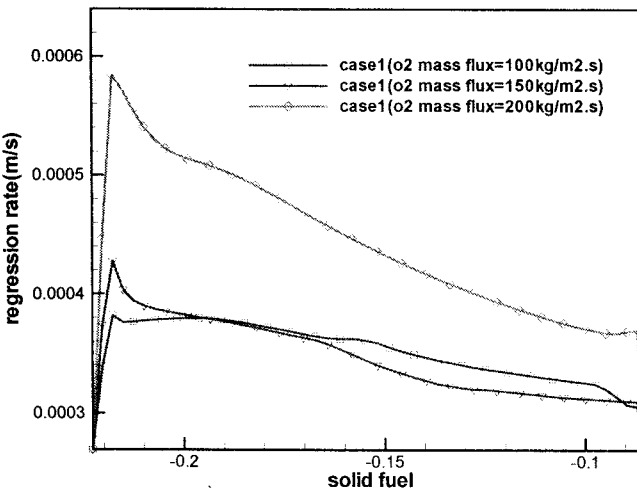


Figure 6: Regression rate along the solid fuel (Case1)

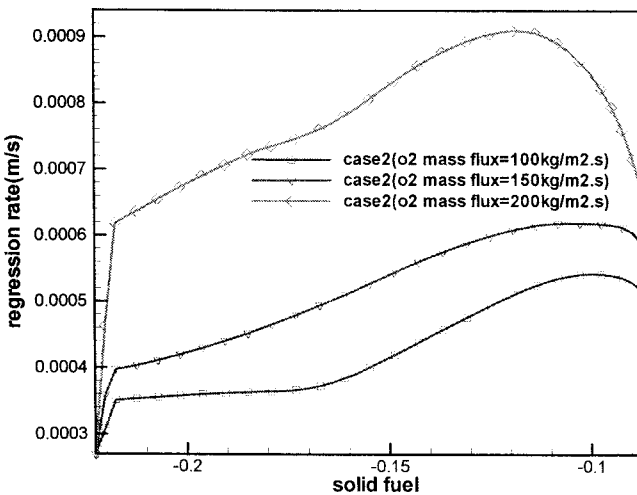


Figure 7: Regression rate along the solid fuel (Case2)

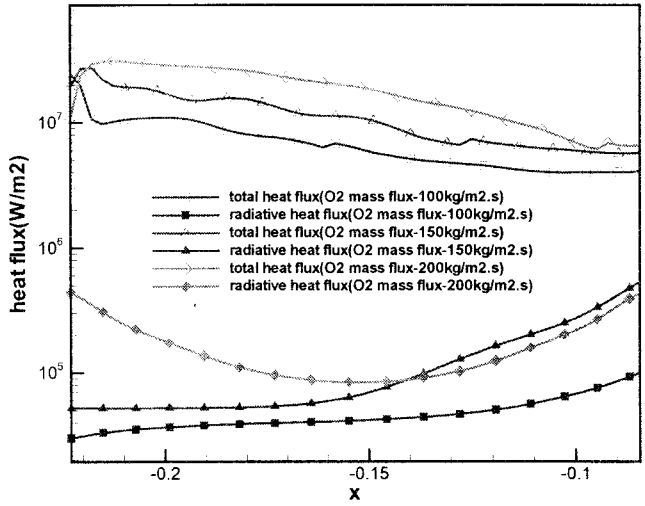


Figure 8: Heat flux along the solid propellant surface (Case1)

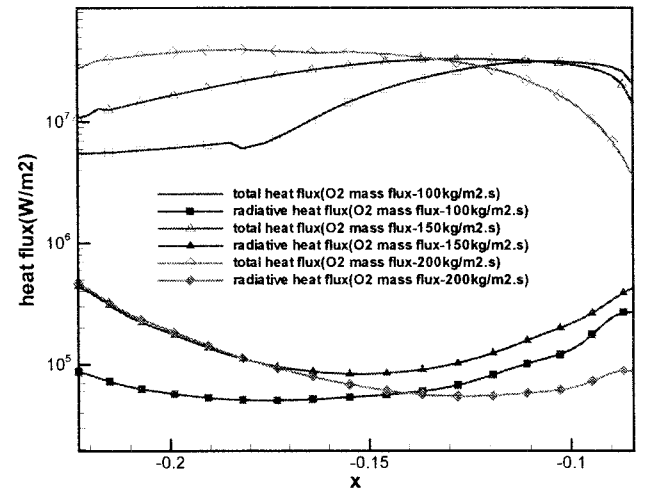


Figure 9: Heat flux along the solid propellant surface (Case2)

Fig.4와 Fig.5에서 산화제 유입 조건에 따른 하이브리드 로켓의 연소실 내부의 온도분포를 도시하였다. 산화제를 모터 전반부에 포트를 이용하여 접선방향으로 유입시켜 선회유동을 발생시키는 Case1의 경우 산화제의 유량을 증가시킬 경우 고온 화염장이 연소실 후반부에 전체적으로 형성됨을 알 수 있다. 또한 산화제의 유량이 증가 할수록 연소실 전반부의 저온 영역이 증가됨을 볼 수 있는데, 이것은 산화제의 유입 온도(300K)와 낮은 온도의 연료가스(900K)가 화염장에 영향을 끼쳐 저온영역이 발생된 것이다. 연소장의 후반부에서도 화염 온도가 낮은 것을 볼 수 있는데 이것은 산화제의 유량이 적을 경우 산화제의 급격한 고갈로 인해 연소가 제대로 이루어 지지 않았기 때문이다. 이에 반해서 산화제를 모터 후반부의 포트를 이용하여 접선방향으로 유입시켜 선회유동을 발생시키는 Case2의 경우 강한 역류에 의해 고온연소 생성물들을 연소실 전반부로 수송하고 다시 후류로 나가기 때문에 화염 온도가 증가하게 되어 고체 연료에 대류 및 복사열전달이 증가하고 고체 연료의 regression rate을 증가시키게 된다. 연소실 전반부의 온도가 상대적으로 낮은 것은 Case1과 마찬가지로 산화제가 급격히 고갈되어 연소가 제대로 이루어지지 않았기 때문이며 또한 낮은 온도(900K)의 연료가스와 혼합이 되어 급격히 온도가 낮아진 것으로 보인다.

Fig.6과 Fig.7에서는 산화제의 주입조건에 따른 하이브리드 로켓 연소장에서 고체연료의 regression rate을 나타내었다.

Case2의 경우 산화제가 연소실 전단부 쪽으로 역류되어 반사되었다가 중심 축을 따라 유동이 모터의 후단부 쪽으로 빠져나가기 때문에 Case1 보다 고체연료의 후류 부로 갈수록 큰 regression rate를 나타내고 있다. Case1의 경우 산화제의 유량이 증가할수록 regression rate이 증가하였고 연료 후반부로 갈수록 감소하는 경향을 볼 수가 있는데 이는 후반부로 갈수록 산화제가 고갈되기 때문인 것으로 보인다. Regression rate의 최적화된 값을 찾기 위해 추후 연구에서 다양한 조건에서의 산화제의 유량을 가지고 연구할 필요가 있다. Case2의 경우도 마찬가지로 산화제의 유량이 증가 할수록 regression rate값이 증가하였고 Case1과 마찬가지로 산화제의 고갈로 인해 전반부에서 regression rate 값이 감소하는 경향을 보였다.

Fig.8과 Fig.9에서는 고체 연료 벽면에서의 열유속 분포를 보여준다. Total 열유속 값은 복사 열유속값과 전도에 의한 열유속 값의 합이다. 고체 추진체 벽면을 따라 전도 열유속이 복사 열유속보다 큰 값을 가짐을 알 수 있다. Case1의 경우 산화제의 유량이 증가 할수록 열유속 값이 높아지는 것을 볼 수 있으며 전반부에서 낮은 값을 갖는 것은 산화제의 영향으로 낮은 연소온도를 갖기 때문이다. Case2의 경우 전반부에서 산화제의 유량이 증가할수록 열유속값이 증가하였고 이는 Fig.5에서 보는 것처럼, 산화제의 유량이 증가하면 전반부에서 화염의 온도가 증가하기 때문이다. 산화제의 유량이  $200kg/m^2 \cdot s$  일 경우 열유속 값이 후반부에서 현저히 낮아지는 것을 볼 수 있는데 이것 또한 산화제의 속도와 강한 swirl 작용으로 인해 고체벽면 근처에서 낮은 온도를 가지므로 상대적으로 낮은 열유속 값을 갖는다.

## 5. 결론

1. 선회 유동의 영향으로 난류혼합과 반응기체의 체류시간이 현저히 증가된다. 이로 인해 고온의 화염장이 형성되고 고체연료의 대류 및 복사 열전달율이 증대되어 고체연료의 열분해가 효과적으로 이루어진다.

2. 산화제를 모터 상단의 포트를 이용하여 접선방향으로 유입시켜 선회 유동을 발생시키는 Case1의 경우 고온 화염장이 연소실 하단에 형성되는 반면 산화제를 모터 하단의 포트에 이용하여 접선방향으로 유입시켜 선회유동을 발생시키는 Case2의 경우 강한 역류로 인해 고온연소 생성물들을 연소실 전반부로 수송하고 다시 연소실 하단으로 빠져나가기 때문에 연소실 상단을 포함한 전영역의 온도가 증가한다. 또한 산소 유량을 증가시킬 경우 화염온도가 증가하며 case1은 화염이 연소실 하단부로 밀려나며 노즐 부분의 온도가 증가하는 것을 볼 수 있었고 case2의 경우는 연소실 상단부로 밀려가면서 노즐 부분에서의 온도가 현저히 떨어지는 것을 확인 할 수 있었다.

3. 산화제의 유량을 변화시키면서 regression rate을 계산한 결과 Case1과 2에서 산화제의 유량을 증가 시킬 경우 regression rate 값이 증가함을 알 수 있었고 추후 연구에서 가장 최적화된 regression rate값을 얻기 위해 다양한 조건의 산화제 유량을 가지고 연구 할 필요가 있다.

4. Case1과 Case2의 경우 연소실 내부의 넓은 영역에서 산화제가 급격히 연소 되어 고갈 되는 특성을 볼 수 있는데 Case2의 경우 유입된 산화제가 일부분 노즐 쪽으로 유출되게 된다. 추후 산화제의 가장 적절한 분출 각에 대해서 연구할 필요가

있다.

## 참고문헌

- [1] Hoojung Kim, Yongmo Kim, 2001, "Numerical Modeling for Combustion Processes of Hybrid Rocket", AIAA Propulsion Meeting Paper
- [2] Nagle, J. and Strickland-Constable, R.F., 1962, Proc. Fifth Carbon Conf., vol. 1, pp.154-164
- [3] Chang, K.C., Hsieh, W.D. and Chen, C.S., 1995, "A Modified Low-Reynolds-Number Turbulence Model Applicable to Recirculating Flow in Pipe Expansion", Journal of Fluid Engineering, vol.117, pp.417-423
- [4] Chiaverini, M.J., Harting, G.C., Lu, Y.C., Kuo, K.K., Peretz, A., Jones, S., Wygle, B., and Arves, J.P., 1997, "Pyrolysis Behavior of Hybrid Rocket Solid Fuels Under Rapid Heating Conditions", AIAA 97-3078, Seattle.
- [5] Hiroyasu, H. and Nishida, K., 1989, "Simplified Three Dimensional Modeling of Mixture Formation and Combustion in a DI Diesel Engine", SAE Technical Paper 890269
- [6] Belardini, P., Bertoli, C., Ciajolo, A., D'Anna, A. and DelGiacomo, N., 1992, "Three Dimensional Calculations of DI Diesel Engine Combustion and Comparison with In-Cylinder Sampling Valve Data", SAE Technical Paper 922225
- [7] Dua, S.S., and Cheng, P., 1973, "Multi-Dimensional Radiative Transfer in Nonisothermal Bounding Walls", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.18, pp.245-259
- [8] <http://www.ca.sandia.gov/tdf/Workshop/Submodels.html>
- [9] Kent, J.H. and Honnery, D.R., 1990, "A soot Formation Rate Map for a Laminar Ethylene Diffusion Flame", Combustion and Flame, vol. 79, pp.287-298
- [10] Chakravarthy, S.R., and Osher, S., 1985, AIAA-85-0363, 23<sup>rd</sup> Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV
- [11] Kim, Y.M., Chen, C.P., Ziebarth, J.P., and Chen, Y.S., 1994, Numerical Heat and Transfer, vol.25, pp.21-42
- [12] Knuth, W.J., Gramer, D.J., Chiaverini, M.J., Sauer, J.A., Whitesands, R.H., and Dill, R.A., 1998, "Preliminary CFD Analysis of the Vortex Hybrid Rocket Chamber and Nozzle Flow Field", AIAA98-35193, Cleveland
- [13] <http://www.ukrocketman.com/rocketry/hybridscience.shtml>
- [14] Philmon George, S Krishnan, 2001, "Fuel Regression Rate in Hydroxyl-Terminated-Polybutadiene/Gaseous-Oxygen Hybrid Rocket Motor", Journal of Propulsion and Power, Vol.17
- [15] Hanan Bedir, James S.T'ien, 1998, "A Computational Study of Flame Radiation in PMMA Diffusion Flames Including Fuel Vapor Participation", The combustion Institute, 27th Symposium
- [16] Ramagopal Ananth, Chuka C. Ndubizu, P.A. Tatem, 2003, "Burning rate distributions for boundary layer flow combustion of a PMMA plate in forced flow", Combustion and Flame 135
- [17] M. Boccatera, D. Lentini, 2004, "Thermochemical closure for high-speed flows", Acta Astronautica 55, pp.965-976
- [18] Gunhong Kim, Yongmo Kim, 2005, "Non-Adiabatic Flamelet Modeling for Combustion Processes of Oxy-Natural Gas Flame", Journal of Mechanical Science and Technology (KSME Int. J.), Vol.19, No.9, pp.1781-1789