

End-Burning 연소기의 충돌형 산화제 주입기 배열에 따른 유동장내 온도분포 및 연소경향에 관한 수치적 연구

A Numerical Study on Combustion Characteristics and the Temperature Field of End-Burning Combustor using Impinging Oxidizer Distribution

민문기*, 윤창진, 김진곤, 문희장(한국항공대학교)

1. 서 론

하이브리드 로켓이란 고체 로켓과 액체 로켓의 장점을 두루 갖춘 로켓이다. 하이브리드 로켓은 산화제의 유량 조절을 통해 액체 로켓의 장점인 엔진의 추력 조절, shut down 및 restart가 가능하다. 또한 고체연료의 주성분이 C, H, O로 구성되어 있어 완전 연소 시 독성 물질이 배출되지 않아 환경 친화적이며, 경제적이다. 작동 방법이 쉬운 고체 로켓의 장점도 갖는다. 그러나 일반적으로 하이브리드 로켓은 낮은 고체 연료의 후퇴율 \dot{r} (regression rate)과 연소 중 O/F비 변화로 연소조건이 변화는 단점을 지니고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 연소 중 연소면적이 일정한 End-burning 하이브리드 추진 시스템이 고안되었다.

End-burning 하이브리드 추진 시스템은 큰 추력 보다는 안정적인 추력이 요구될 때 사용하는 시스템으로 연소실 내부 체적의 90%이상을 고체 연료로 채울 수 있어 일반적으로 고체 연료를 사용하는 연소기에 비해 연소 시간을 증가시킬 수 있다. 연소실 내의 반응 유동장은 산화제의 유입 특성에 따라 변화되는 특징을 갖는다. 이러한 특성에 기인하여 산화제 주입기의 배열 변화를 통해 연소기내 유동장을 제어할 수 있다[1]. End-burning type 하이브리드 로켓 연소실 내부 반응유동장의 해석은 최적의 연소실 설계와 성능 향상을 위해 상당히 중요한 연구 분야로 사료된다. 이를 위해 본 연구에서는 O/F비가 일정한 End-burning type 하이브리드 연소기의 효율 향상을 위해 산화제 주입기 위치 및 연소실 형상 변화에 따른 유동장내 온도분포 및 연소경향에 관한 특성을 수치적으로 해석해 보았다.

2. 본 론

2.1 연구목적 및 내용

하이브리드 추진 시스템을 기존의 액체, 고체 추진 시스템으로 대체하기에는 낮은 고체연료 후퇴율과 O/F비 변화의 단점 때문에 적합하지 않다. O/F비의 변화는 연소가 진행됨에 따라 표면적이 증가되고 그에 따라 고체 연료가 기화되어 생기는 연료 가스의 발생량이 증가하여 O/F비가 감소하기 때문에 발생한다. 이런 문제를 해결하기 위해서 End-burning형태의 일정한 연소 단면적을 갖는 하이브리드 추진 시스템에 관한 연구를 진행하게 되었다. 본 연구에서는 실제 실험에서 사용된 고체 연료 대신에 Polymer 계열의 고체 연료를 열분해 시켰을 때 생성되는 주요성분인 프로판으로 가정하여 계산을 수행하였다[2].

2.2 연소실 형상 및 작동 조건

연소실 형상은 한국항공대 로켓 추진연구실에서 실험을 하고 있는 End-burning 하이브리드 로켓 연소기[5]의 개략도는 Fig. 1의 그림과 같으며 반응 유동장에 대한 수치 해석을 하기 위해 연료면, 연소실과 노즐 벽면을 경계로 닫힌 유동장을 단순화하면 Fig. 2와 같은 형태의 모델을 적용할 수 있다[1,3,4].

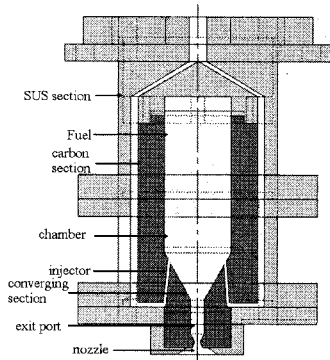


Fig. 1 Lab-scale End-burning hybrid 연소실 개략도

Fig. 2의 모델들은 연소실의 산화제가 chamber 하단에서 상단으로 impinging된 형상에 변화를 주어 수치해석을 한 후 각 case에 대해 분석하였다.

case 1은 연료의 끝단의 중심부에 산화제가 공급되기 위해 z 축 방향으로 24.5° 각도를 주어 설계하였다. case 2는 case1의 타입에 스웰의 영향을 보기 위해 주입기를 x축으로 14.7° 각도를 주어 혼합 효율을 증대 시킬 수 있도록 설계되었다.

case 3은 converging 영역과 chamber 영역이 교차 하는 지점에 step형상을 주어 converging 영역의 직경을 줄어 유동의 교란을 발생하여 mixing을 높이기 위해 설계하였다. case 4는 case 3의 타입에 스웰의 영향을 보기 위해 주입기를 x축으로 14.7° 각도를 주어 혼합 효율을 증대 시킬 수 있도록 설계되었다.

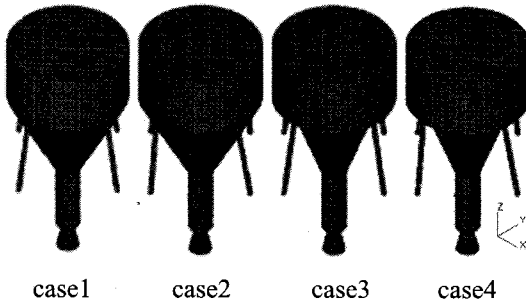


Fig. 2 연소실 각 case 형상

연소실 내부의 복잡한 반응선회 유동장을 해석하기 위해 3차원 형상으로 모델링하였다. 계산 격자는 wall function의 적용을 위해 벽면 근처에 2겹의 layer mesh를 생성하며 벽면은 단열 및 non-slip 조건을 설정하였다. 내부는

정육면체 형상을 갖는 trimmed mesh를 이용하여 약 50만여 개의 격자를 생성하였다. 본 연구에서의 모든 case에 대해, 윗면은 고체로 채워져 있으며, 수치 계산 시에는 기화된 연료의 Inlet boundary로 설정하였다. 4개의 산화제 주입기를 통해 연소실로 기체 산소가 공급되며, O/F 비는 일정하게 유지하면서 주입기 형상의 위치 변화에 따른 각 case에 대해 연구를 수행하였다.

2.3 지배 방정식 및 수치해법

End-Burning 연소기 내 반응 유동장은 확산 화염의 영역에 대한 단순화된 수치해석을 위해 복사 열전달을 무시하고 벽면 단열 조건을 설정한 3차원 난류 연소 유동장으로 가정하였다. 연소실 내부의 연소 유동장 해석을 위해 밀도가 중평균(Favre Averaging)을 사용한 RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) 공식과 High-Reynolds number $k-\epsilon$ 난류 모델을 이용하여 난류에너지와 난류 소산항을 계산하였다. 또한, 유동장의 정밀해석과 유한 화학반응 (finite rate chemistry)을 고려하기 위해 범용 열·유동해석 코드를 사용하였고 화학 반응 메카니즘은 CEA code (Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications)[5]를 이용하여 관여되는 화학종간의 화학 평형을 가정하였다. 혼합분율(mixture fraction) f 의 1차 및 2차 모멘트는 식(1)과 같이 정의되며 혼합분율 f 의 1차 및 2차 모멘트 \overline{f} 와 $\overline{f^2}$ 의 전달방정식을 계산하였다. \overline{f} 와 $\overline{f^2}$ 의 전달방정식은 각각 (2)과 (3)와 같다.

$$\tilde{f} = \frac{m_f}{m_f + m_o}, \quad \tilde{f}^2 = \overline{(f - \tilde{f})^2}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho \tilde{f}) = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \tilde{u}_j \tilde{f} - (\rho D_j + \frac{\mu_t}{\sigma_f}) \frac{\partial \tilde{f}}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho \tilde{f}^2) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \tilde{u}_j \tilde{f}^2 - (\rho D_j + \frac{\mu_t}{\sigma_f}) \frac{\partial \tilde{f}^2}{\partial x_j} \right] = \frac{2\mu_t}{\sigma_f} \left(\frac{\partial \tilde{f}}{\partial x_j} \right)^2 - C_D \rho \frac{\epsilon}{k} \tilde{f}^2 \quad (3)$$

\sqrt{g} : determinant of metric tensor

$$C_D = 2.0, \quad \sigma_g = \sigma_f$$

또한, 난류 연소 효과와 유한화학 반응을 동시에 고려할 수 있는 확률밀도함수(PDF: Probability Density Function) 모델을 도입하였다. 화학반응은 프로판(C_3H_8)과 기체 상태의 산소(GOX)가 반응하여 CO_2 , H_2O , OH , H , CO , H_2 를 생성하는 연소로 가정하여 SIMPLE method를 사용한 정상 상태 반응 유동장을 모사하였다.

3. 결과 해석

3.1 impinging type 주입기 형상 유동장의 해석

impinging 주입기 형상 변화에 따른 난류 혼합 특성과 반응유동장의 해석을 위해 온도장 및 혼합분율 \tilde{f} 을 분석하였다. Fig 3과 Fig 4의 결과는 case 1의 결과이다. 다른 case의 온도장과 혼합분율의 결과는 case 1과 유사한 결과로 3.2절에서 비교분석을 하겠다.

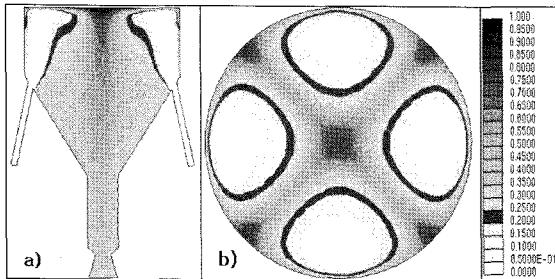


Fig. 3 case 1의 혼합 분율 분포도

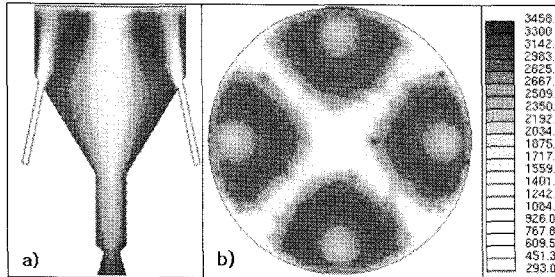


Fig. 4 case 1의 온도 분포도

Fig. 3a)과 Fig. 4a)은 중심축을 지나는 단면을 나타내며 Fig. 3b)과 Fig. 4b)은 z 축을 기준으로 연소기 상부로부터 3.0mm 떨어진 91.5mm 지점에서 혼합분율 및 온도장을 나타낸다.

Fig 3의 혼합 분율 분포도를 나타내고 있으며 연료 중심부에서는 이론 혼합 분율 보다

높은 값을 가진 유체가 중심부를 통해 빠져나가는 유동을 알 수 있다.

Fig. 4b)는 연소실 상부에서 고온영역이 형성됨을 알 수 있다. 또한 연소실 상부에 전반적으로 고르게 고온부를 형성하므로 연소 시 균일한 O/F 비를 가질 것으로 판단된다. 또한 Fig. 4a)의 온도 분포도를 보면 양 벽면 및 노즐 부위까지 고온부가 형성됨을 볼 수 있다.

3.2 주입기 형상 변화에 따른 비교 분석

Fig. 5의 속도 분포는 스웰 유동이 없는 case 1과 case 3의 속도 분포나 스웰 유동이 있는 case 2와 case 4의 속도 성분분포가 유사하게 나타난다. 여기서 (-)는 방향을 의미한다. Fig. 6과 Fig. 7의 온도분포도 및 혼합분율은 스웰 유동이 있는 case 2와 case4는 이론 혼합분율인 0.216의 값을 가지는 영역이 폭넓게 형성되며 이 영역이 고온부를 형성하는 영역과 일치하는 형상을 보여준다.

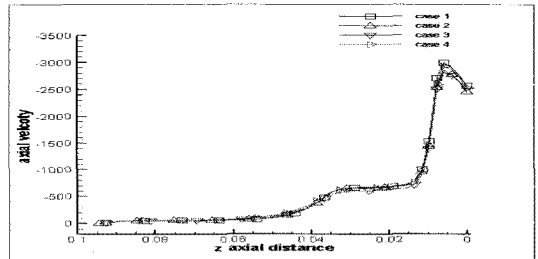


Fig. 5 연소실 중심부에서 z 축 방향의 속도 성분

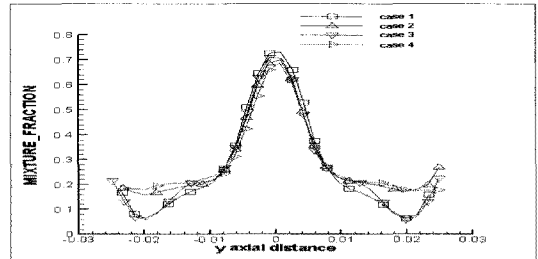


Fig. 6 z축의 91.5mm 지점에서의 혼합분율 비교

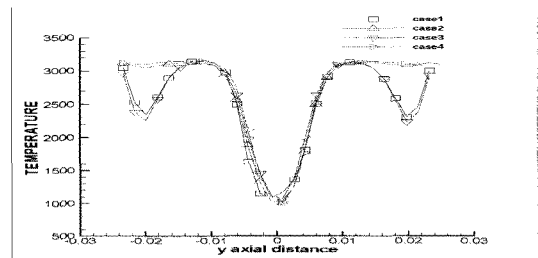


Fig. 7 z축의 91.5mm 지점에서의 온도분포 비교

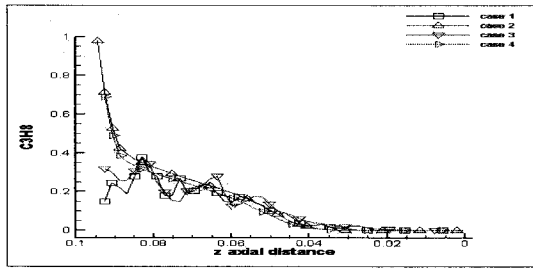


Fig. 8 연소실 중심부에서 z 축 방향의 연료분포

Fig. 8은 출구 방향으로 나가면서 미연 연료가 빠져나가는 양을 확인할 수 있다. 모든 case들의 결과는 비슷하였다. 상류에서는 스월 유동이 있는 case 2와 case 4의 경우가 스월 유동이 없는 case 1과 case 3의 경우와 큰 차이가 발생하지만 하류에서 case 2와 case 4의 경우나 case 1과 case 3의 경우가 비슷한 크기로 감소함에 따라 case 2와 case 4의 경우가 case 1과 case 3의 경우보다 스월 유동으로 인한 mixing 효과가 크다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

실제 End-Burning impinging type 연소기를 모델링 하여 동일한 조건 하에서 계산하여 주입기 형상 변화에 따른 연소실 반응 유동장 특성을 분석하였다.

1. 동일 형상 모델에서 스월 유동이 있는 case 2, 4가 mixing 영향으로 연소실 내부에서 폭 넓은 고온부를 형성한다.

2. 스월 유동이 있는 case 2와 case 4는 스월 유동이 없는 case 1과 case 3에 비해 미연의 가스가 연소실 중심부로 빠져 나가는 현상이 감소하였다. 스월 유동의 영향으로 mixing이 향상되어 미연 가스가 중심부로 빠져 나가는 현상을 감소시켰다고 판단된다.

3. 스월 유동이 있는 case 2와 case 4는 연소실 중심부에서 벽면에 이르기 까지 넓은 이론 혼합분율 영역을 가진다. 이러한 이유로 인해 벽면 근처에서 고온부가 형성된 만큼 연소기 재질의 선정 및 냉각문제가 대두될 것으로 판단된다.

주입기 형상과 O/F 비에 의한 End-Burning type Hybrid 로켓의 최적화 설계를 위해 고체 연료의 기화 현상과 반응 유동장에 대한 실질적인 연구가 필요하다고 판단된다. 추후 스월 상수에 의한 난류 강도와 고체 연료의 기화 가스를 이용한 실험 결과를 토대로 수치 해석을 통한 실험의 정량적 해석이 뒤따라야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] Cho, S. C., "Numerical Analysis of Turbulent Flame Propagation Speed using PDF Method and Application to 3-Dimensional Combustion Field", M. S. Dissertation, Dept. of Aerospace and Mechanical engineering, Hankuk Aviation Univ., 2005

[2] W. S. Cha, "Thermo-Degradation Kinetics of Polyethylene", Vol. 10, No. 3, May 1999, 432~437, J. Korean Ind. Eng. Chem.

[3] Lee, S. C., "The Study on Combustion Characteristic with the various Injectors and Fuels for End-burning Hybrid Rocket", M. S. Dissertation, Dept. of Aerospace and Mechanical engineering, Hankuk Aviation Univ., 2006

[4] S.J.Kim, J.K.Kim, J.Y.Koo, H.J.Moon, S. C.Cho, et. al., "The Study on Combustion Characteristic of End-burning Hybrid Rocket Engine", 2004 KSAS Spring Conference, pp. 625-628, 2004

[5] Star-CD Methodology Manual, Ver. 3.20, CD adapco Group, 2004