

선회수와 리세스 길이가 초임계상태 케로신/액체산소 이중 와류 동축형 분사기의 화염구조에 미치는 영향 해석

박상운* · 김태훈* · 김용모*†

Effects of Swirl number and Recess length on Flame Structure of Supercritical Kerosene/LOx Double Swirl Coaxial Injector

Sangwoon Park*, Taehoon Kim*, Yongmo Kim*†

ABSTRACT

This study has been mainly motivated to numerically model the supercritical mixing and combustion processes encountered in the liquid propellant rocket engines. In the present approach, turbulence is represented by the extended k-e model. To account for the real fluid effects, the propellant mixture properties are calculated by using generalized cubic equation of state. In order to realistically represent the turbulence-chemistry interaction in the turbulent nonpremixed flames, the flamelet approach based on the real fluid flamelet library has been adopted. Based on numerical results, the detailed discussions are made for the effects of swirl number on flame structure of supercritical kerosene/LOx double swirl coaxial injector.

Key Words : Supercritical combustion, Flamelet model, Real fluid effect, Generalized cubic equation of state, Liquid rocket injector, Kerosene

최근 자동차 및 항공엔진, 로켓과 같은 기관에서는 열효율과 시스템의 조밀화를 위해서 점점 더 작동 압력을 높여서 사용을 하고 있다. 특히 로켓엔진의 경우 연소실 압력이 초임계압까지 올라감에 따라 연소실의 크기가 줄어들고, 노즐비율이 증가하는 등 엔진성능을 향상시킬 수가 있다.[1] 이러한 초임계압력의 영역에서는 기존의 아임계 영역과는 다른 유체의 특성을 보여주는데, 열역학적 물성치와 수송 물성치들이 기체와 액체의 특성을 동시에 가지게 된다. 특히 압력은 초임계압력 이상이고, 온도는 임계온도 이하인 초월임계 영역에서는 유체의 표면장력이 사라지게 되어 기체처럼 거동하며, 용해도는 기체와 비슷하며 밀도와 열전도도는 액체와 비슷한 값을 가지는 특성을 보여주게 된다. 따라서 이러한 초임계 영역에서의 비예혼합 연소는 추진제의 미립화, 액적분열, 기화되는 일련의 아임계 연소특성이 사라지고 난류 확산과 높은 밀도 구배, 이상기체로부터 벗어난 열역학적 및 수송 물성치들에

의하여 지배된다.

여기에 케로신의 경우에는 일반적인 메탄이나 수소와 달리 동축 진단 분사기는 사용되지 않는다. 대신 동축와류 분사기를 사용하여 케로신이나 산화제에 강한 와류를 만들어 각운동량을 증가시켜 추진제의 혼합을 가속시킨다.

따라서 본 연구에서는 초임계 상태에서 케로신/액체산소 이중 와류 동축형 분사기의 화염구조에 선회수와 리세스 길이가 어떠한 영향을 미치는지를 실제유체의 특성을 고려한 모델을 사용하여 수치적으로 실험하여 살펴보았다.

본 연구에서는 로켓엔진 내 고압의 초임계 연소를 모사하기 위하여 기존의 화염편 모델을 통하여 검증된 난류 연소모델에 초임계 유체의 물성치를 generalized cubic equation[2]을 적용하여 개선하였다. 내부에너지, 엔탈피, 정압 비열과 같은 열역학적 물성치들은 기본적으로 열역학적 이론을 바탕으로 generalized cubic equation을 사용하여 이상기체 상태를 벗어난 정도를 고려하여 초임계 상태의 값을 개선하였다. 여기에서는 화확종 및 혼합물의 점성, 열전도 계수와 같은 수송 물성치의 모델로 Chung, Ely, Hanley 그리고 Takahasi의 모델을 사용하여 초임계 상태인 유체의 수송물성치를 다루었다.

* 한양대학교 기계공학부
† 연락저자, ymkim@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0428 FAX : (02)-2220-0339

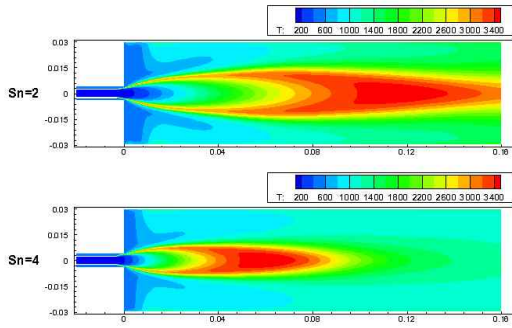


Fig. 1 Predicted temperature contours for two swirl numbers ($Sn=2.0, 4.0$)

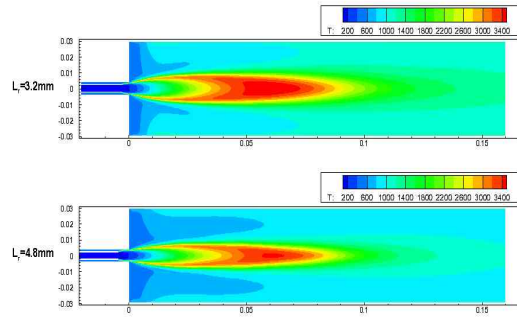


Fig. 4 Predicted temperature contours for two recess lengths ($Lr=3.2mm, 4.8mm$)

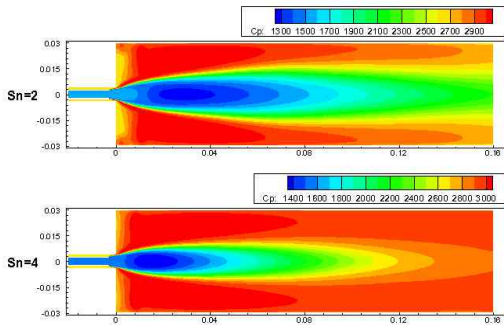


Fig. 2 Predicted contours of constant-pressure specific heat for two swirl number ($Sn=2.0, 4.0$)

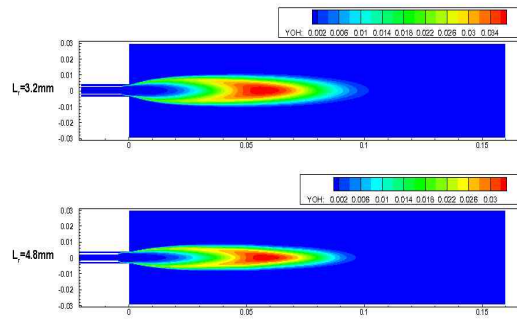


Fig. 5 Predicted contours of OH mass fraction for two recess length ($Lr=3.2mm, 4.8mm$)

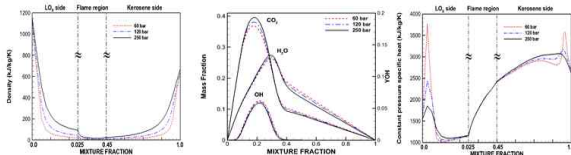


Fig.3 Local flame structures as a function of mixture fraction for three pressures (60bar, 120bar, 250 bar)

난류 확산 화염은 1차원의 구조를 가지는 층류 화염편들의 집합체로 볼 수 있는데 이 때 난류 유동은 화염편들을 신장시키거나 주름지게 함으로서 화염편 내부에서 분자 단위의 물질 및 열 확산을 지배하고 비평형 화학반응에 영향을 미치게 된다. 국소화염구조로서 층류화염편은 대항류 확산화염해석으로부터 구하거나, Peters 변환에 의하여 유도되는 화염편 방정식을 통해서 해석할 수 있다.[3]

본 수치실험에서는 분사기의 중심부 노즐에서 액체산소가 100K의 온도로 질량유량이 0.286kg/s로 들어오고, 동축의 바깥쪽 노즐에서는 450K의 온도로 케로신이 질량유량 0.116kg/s의 조건으로 들어온다. 각각의 노즐에서는 같은 선

회수를 가지고 들어오는데 본 실험에서는 선회수가 각각 2와 4를 선정하였다. 가운데 노즐의 안쪽 바깥쪽 지름은 각각 4.10mm와 5.30mm이고 동축의 바깥쪽 노즐의 지름은 8.10mm이다. 작동 압력은 250기압으로 유지하였다.

Fig. 1에 온도에 대한 수치해석 결과를 나타내었다. 그림을 살펴보면 선회수가 2인 경우에는 최고 온도를 가지는 위치가 축방향으로 약 0.11m인 지점에서 나타나지만, 선회수가 4인 경우에는 최고 온도가 축방향으로 약 0.06m에서 나타난다는 것을 확인할 수 있다. 이는 노즐 안쪽에서 와류가 걸려서 나오게 되면 노즐 벽면이 없어지는 위치로부터 반경 방향으로의 운동량을 갖게 되는데 이로 인하여 산화제와 연료의 혼합 과정이 더 빠르고 활발하게 일어난다는 것을 의미한다. 그렇기 때문에 선회수가 높아질수록 결국에는 혼합을 더 빨리 시킨다는 것을 의미한다.

Fig. 2에는 정압비열을 나타내었다. 기존의 동축 분사기 연소에서는 액체산소가 가운데에서 나와 온도가 올라감에 따라 pseudo-boiling 영향이 나타나게 되는데 이는 화염장 안에서 높은 정압비열이 나타나기 때문이다. 하지만 동축 와류형 분사기의 경우에는 정압비열의 높은 값이 화염의 바깥쪽에서 생성되기 때문에 이 경우에는 pseudo-boiling효과가 나타나지 않음을 알 수 있

다. 따라서 이 경우에는 와류가 화염의 형성에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Fig. 3에 국부화염구조를 혼합분률에 대한 함수로 나타내었다. 압력이 높아짐에 따라 정압비열의 값이 크게 변화하는 것을 확인할 수 있다.

동축와류 분사기의 경우 와류수뿐만이 아니라 리세스 길이에 의해서도 연료와 산화제의 혼합특성이 영향을 받게 된다. 이에 대한 영향을 알아보기 위하여 동일한 조건에서 리세스 길이가 각각 3.2mm인 경우와 4.8mm인 경우에 대한 수치실험을 행하였다. 리세스의 길이가 길어진다는 것은 화염장으로 들어오기 전에 더 많은 혼합이 이루어진다는 것을 의미한다. 따라서 리세스의 길이가 증가함에 따라 더 좁은 영역에서 화학반응이 일어나게 되는데 이는 Fig. 4에서 확인할 수가 있다. 그림을 살펴보면 화염의 길이 자체에는 크게 영향을 주지는 않았지만 반경방향으로 더 얇은 영역에서 화학반응이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 화염 영역에 대해 좀 더 자세히 살펴보기 위하여 Fig. 6에 OH 질량분률에 대한 결과를 나타내었다. 화염영역부근에서 집중적으로 생성되는 OH 라디칼로부터 리세스 길이가 증가할수록 화염이 더 좁은 영역에서 생성된다는 것을 다시 확인할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업 (NSL, National Space Lab) 으로부터 지원받아 수행 되었습니다 (No.20120009100).

참고 문헌

- [1] Sutton G. P., "History of liquid propellant rocket engines", American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [2] Seong-Ku Kim, Hwan-Seok Choi, Yongmo Kim, "Thermodynamic modeling based on a generalized cubic equation of state for kerosene/LOx rocket combustion", Combustion and Flame, Vol. 159, 2012, pp.1351-1365
- [3] Peters, N. (2000) Turbulent Combustion,, Cambridge University press