

케로신 동축 와류형 분사기의 정상 및 비정상 상태 화염구조 해석

한상훈* · 김성구* · 김종규* · 최환석*

The steady and unsteady state computations on the flame structure for a Kerosene coaxial swirl injector

Sanghoon Han* · Seong-Ku Kim* · Jonggyu Kim* · Hwan-Seok Choi*

ABSTRACT

Numerical simulations of the steady and unsteady state were conducted for a coaxial swirl injector with Kerosene fuel. Non-premixed equilibrium model based on chemical equilibrium assumption was used as turbulence-chemistry interaction model. As an equations of state, SRK(Soave-Redlich-Kwong) EOS was applied to deal with the behavior of real fluid in a high pressure condition. Through the steady and unsteady computations, mean values of steady and time-averaged unsteady state were compared on the temperature and OH mass fraction and it was shown that the flame structure of steady state was different to that of time-averaged unsteady state.

초 록

케로신을 연료로 하는 동축 스윙 분사기에 대해 정상 상태 및 비정상 상태의 연소 해석을 수행하였다. 난류연소 모델로 화학평형 상태로 가정하는 Non-premixed equilibrium 모델을 이용하였고, 고압의 조건에서 실제유체의 거동을 다룰 수 있도록 상태방정식으로 SRK(Soave-Redlich-Kwong) 상태방정식을 적용하였다. 해석을 통해 온도분포, OH 질량분율 등 정상 상태의 계산 결과와 시간 평균된 비정상 상태의 계산 결과를 비교하였고, 이들 간의 화염 구조가 서로 상이함을 확인할 수 있었다.

Key Words: Rocket injector(로켓 분사기), Non-premixed flame(비에혼합 화염), Kerosene(케로신), Gas-liquid injector(기체-액체 분사기), Steady(정상), Unsteady(비정상)

1. 서 론

최근 전산유체역학(CFD)과 계산 자원의 비약

적인 발달에 따라 미국을 비롯한 로켓 개발 선진국에서는 액체로켓 엔진의 분사기(Injector) 설계를 위해 해석적인 방법을 이용한 연구들이 시도되고 있다.[1-4] 그러나 현재까지 다양한 형상의 분사기에 대해 전산해석을 이용한 결과들을 비교할 수 있는 실험 데이터가 충분히 제공되지

* 한국항공우주연구원 연소기팀

† 교신저자, E-mail: airshhan@kari.re.kr

않고 있고, 체계적인 검증 방법도 확립되지 않은 상황이다. 하지만 로켓 분사기의 연소 현상에 대한 정확한 물리적 모델들이 개발되고 고성능의 병렬 클러스터를 일반 사용자들도 쉽게 이용할 수 있는 환경이 조성됨에 따라 기존의 난류연소 유동장 해석에 주로 사용되었던 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes)모델 외에 LES(Large Eddy Simulation), DES(Detached Eddy Simulation)와 같이 대용량 계산을 요하는 난류 모델이 연소 유동장 해석에 많이 적용되는 추세를 보이고 있다. 한편, 난류연소 현상을 고려한 로켓 분사기 해석의 경우 정상 상태로 계산된 평균값과 시간 평균된 비정상 상태의 계산 결과를 비교할 때 화염구조 및 유동 패턴 등이 다르고 비정상 상태의 해석 결과가 실험치와 유사하다는 연구들이 보고되고 있다.[2,3] 그러나 이들 연구는 주로 수소를 연료로 하는 전단 분사기를 다루고 있으며, 한국형발사체(KSLV-II)와 같이 케로신(Kerosene)을 연료로 하고 스월 형태로 분사되는 분사기에 대한 해석 연구는 몇몇의 문헌 외에는 거의 없는 실정이다.[5] 현재 항공우주연구원에서 개발 중인 분사기는 동축 스월형 액체(케로신)-액체(산소) 분사기로 앞서 언급된 동축 전단형 기체(수소)-액체(산소) 분사기들 보다 수치 해석 측면에서 고려해야 할 물리 모델의 난이도가 증가한다. 따라서 본 연구에서는 동축 스월형 액체(케로신)-액체(산소) 분사기 해석에 앞서 항공우주연구원에서 기초적으로 연구, 개발 중인 다단 연소 사이클이 적용된 동축 기체제트(산화제과잉 예연소기체)-액체스월(케로신) 분사기에 대해 해석을 수행하였다.[6] 계산의 효율성을 고려하여 난류모델은 k- ϵ RANS 모델을 이용하였고, 난류연소 모델은 Non-premixed equilibrium 모델을 적용하였다. 정상 상태와 비정상 상태의 해석을 수행하여 그 결과를 비교하였다.

2. 수치 및 물리적 모델링

본 연구에서는 상용 해석툴인 ANSYS/Fluent Ver.13을 이용하였다. 지배방정식으로 스월을 고

려한 2차원 축대칭 Navier-Stokes 방정식을 이용하였고, 수치기법으로는 Fluent에서 제공하는 압력기반(Pressure-based) 기법 중의 하나인 Coupled 기법을 적용하였다. 시간 및 공간에 대해 모두 2차 정확도로 계산하였다. 난류 모델은 RANS 모델의 한 종류로 Standard wall function을 사용한 RNG k- ϵ 모델을 이용하였다. 난류 연소 모델로는 Non-premixed equilibrium model을 적용하였다. 본 연구에서 연료로는 상온에서 액체인 케로신이 사용되고 산화제로는 산화제 과잉 예연소기체가 사용되기 때문에 액체와 기체의 물리적 상태량을 다루 수 있는 실제유체 상태방정식인 SRK(Soave-Redlich-Kwong) 방정식을 적용하였다. 화학반응 모델로 분사기 챔버 내부는 고온, 고압의 상태이기 때문에 화학평형상태로 가정하였고 19화합종 (H₂CCCH, C₄H, C₄H₂, C₃H₂, C₂H, CH₃, H₂CCCCH, HO₂, C₂H₂, H, O, OH, CH₄, H₂, H₂, CO, H₂O, CO₂, O₂, JET-A(Kerosene))을 고려하였다. 연료과잉 영역에서의 화학평형 조성은 Fluent의 RFL 옵션을 이용하여 조정할 수 있도록 하였다. 난류와 화학반응의 섭동은 β 함수를 이용한 확률밀도함수로 모델링 되었다. 해석 대상으로 선정한 기체제트-액체스월 분사기는 Fig. 1과 같은 형태이고 리세스 수는 2.5인 분사기를 사용하였다. 연료와 산화제 입구에서는 질량 유량 조건을 주었고, 연료인 케로신(T=355K)은 0.059 kg/s, 예연소 산화제 과잉 기체(T=579K)는 0.202 kg/s이 공급토록 하였다. 연료 입구에서는 스월 형태로 케로신이 공급되기 때문에 공급된 질량유량을 기하학적 형상을 고려하여 반경방향과 스월 방향으로 나누어 분배하였다. 벽면의 경계조건으로는 단열 경계조건, 노즐 출구에서는 초음속 유동조건을 적용하였다.



Fig. 1 Configuration of G-L injector

3. 계산결과

3.1 Steady RANS 유동해석 결과

Figure 2는 정상 상태의 해석 결과로 화염이 액체 케로신과 기체 산소의 경계면을 따라 축방향으로 점진적으로 퍼지는 현상을 볼 수 있다. 화염 길이는 매우 길게 형성되어 노즐 목 근방에서 닫히는 결과를 보이고, 화염 두께의 경우 얇게 형성되다 챔버 끝단에 이르러서야 확산되어 두텁게 되는 결과를 보인다. 화염 길이가 노즐 목 근방까지 발달하는 것은 정상적으로 타당하지 못한 결과로 보이며, 이러한 화염 분포 및 유동 특성은 Lian 등이 동축 전단 기체산소, 기체수소 분사기(PSU-RCM1)에 대해 해석한 결과와 유사한 경향을 보이고 있다.[3] Fig. 3은 Streamline(유선)과 OH의 질량 분율을 나타낸 것으로 챔버 중심축에서 큰 모멘텀에 의해 예연소 기체는 빠져나가고 챔버 후단의 축소부 영역에서 재순환 유동이 생성되어 전방 분사면까지 순환하는 것을 볼 수 있고, 다른 하나의 재순환 유동이 챔버 전방부근에서 중앙부까지 발달되어 있는 것을 볼 수 있다.

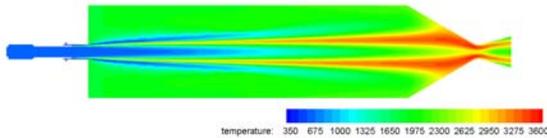


Fig. 2 Temperature contours by Steady RANS

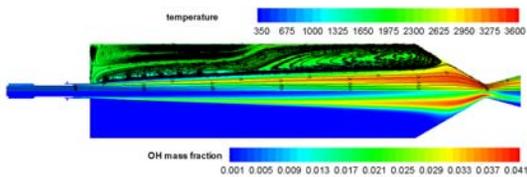


Fig. 3 Streamlines and OH mass fraction contours by Steady RANS

3.2 Unsteady RANS 유동 해석 결과

Figure 4, 5, 6은 비정상 해석에 의한 시간 경과에 따른 연소 유동장의 온도 분포를 나타낸 것이다. 약 0.4초 이후 초기 상태의 에러치들이

빠져나가고 0.005초의 간격으로 주기적인 패턴을 갖는 온도 분포가 형성되었다. Fig. 7과 Fig. 8은 주기성을 고려하여 시간 평균된 온도 분포장과 Streamline, OH 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 비정상 해석을 통해 시간 평균된 연소 유동장은 Fig. 2와 Fig. 3의 정상 해석 결과와 확연히 차이가 남을 알 수 있다. 화염이 챔버의 내부에서 닫히며, 챔버 내에 전체적으로 고온의 영역이 형성됨을 볼 수 있다. 재순환 영역은 정상 결과에서와 유사하게 챔버 끝단의 축소부 부근에서 형성되어 크게 순환하는 재순환 유동과 챔버 전방 코너에서 재순환하는 유동이 형성된다. 챔버 전방의 재순환 유동은 정상 유동에서 생성된 것에 비해 작게 형성되는데, 이와 같은 재순환 유동 패턴은 동축 전단 분사기를 대상으로 Tucker나 Menon이 수행한 것과 유사한 결과를 보였다.[2,4]

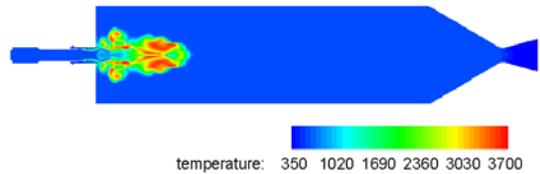


Fig. 4 Temperature contours by Unsteady RANS at time = 3 msec

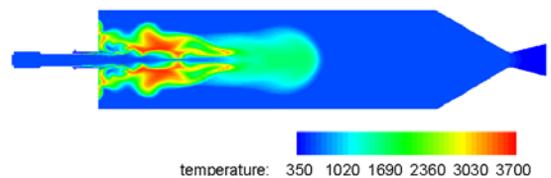


Fig. 5 Temperature contours by Unsteady RANS at time = 24 msec

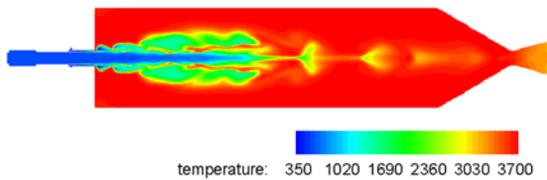


Fig. 6 Temperature contours by Unsteady RANS at time = 0.6 sec

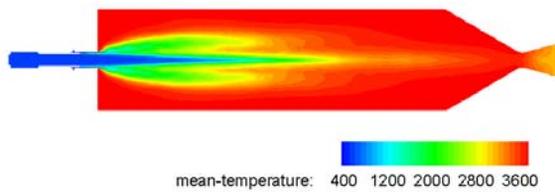


Fig. 7 Time-averaged temperature contours by Unsteady RANS

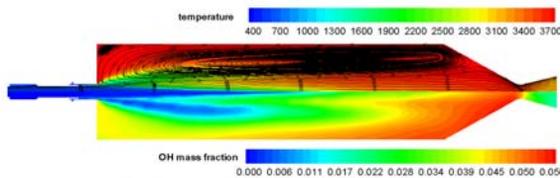


Fig. 8 Streamlines and OH mass fraction contours by time-averaged Unsteady RANS

4. 결론

본 연구에서는 산화제 파잉 예연소 기체-액체 케로신 동축 와류형 분사기에 대한 정상 상태와 비정상 상태의 해석을 수행하였다. 정상 상태의 해석 결과와 비정상 상태의 시간 평균된 결과를 비교하여 연소 유동장의 화염구조가 서로 상이함을 볼 수 있었다. 특히, 정상 상태의 해석 결과는 정성적으로 비물리적인 것으로 판단되었다. 본 연구는 실제 실험과 비교할 수 있는 데이터가 제공되지 않고, 2차원 축대칭을 가정한 계산으로 정량적으로 결과를 신뢰하기에는 무리가 있다. 그러나 비정상 상태로 계산하여 평균된 화염구조는 선행 연구자들의 결과와 유사함을

확인하여 정성적으로 타당함을 볼 수 있었다. 향후, 신뢰성 있는 동축 스윙 분사기 해석을 위해서는 3차원을 고려한 비정상 상태의 계산을 수행해야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. Tucker et.al, "An Approach to Improved Credibility of CFD Simulations for Rocket Injector Design", AIAA paper 2007-5572, 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Cincinnati, OH, 8-11 July 2007.
2. Tucker et.al, "Validation of High-Fidelity CFD Simulation for Rocket Injector Design," AIAA paper 2008-5226, 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Hartford, CT, 21-23 July 2008.
3. Lian, C., and Merkle, C.L., "Contrast between steady and time-averaged unsteady combustion simulations," Computers and Fluids, Vol.44, 2011, PP.328-338
4. Masquelet, M., and Menon, S., "Large-Eddy Simulation of Flame-Turbulence Interactions in a Shear Coaxial Injector," Journal of Propulsion and Powers, Vol. 26, 2010, PP.924-935
5. Jun-young Heo et. al, "Numerical Study for Kerosen/LOx Supercritical Mixing Characteristics of a Swirl Injector," AIAA paper 2012-1266, 50th AIAA Aerospace Science Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Nashville, Tennessee, Jan. 9-12, 2012.
6. 김종규, 한영민, 최환석, 윤영빈, "고압조건에서 기체-액체 분사기의 리세스에 따른 분무 특성 연구," 한국추진공학회 춘계학술대회, 2011.