

케로신 연료과잉 예연소기의 연소가스 물성치 예측

손민* · 서민교* · 구자예**†

Prediction of Burnt Gas Properties for Kerosene Fuel-rich Preburner

Min Son* · Minkyoo Seo* · Jaye Koo**†

ABSTRACT

A Fuel-rich preburner using kerosene fuel is operated in a non-equilibrium condition and a prediction of burnt-gas properties is not easy from a chemical equilibrium analysis. A premixed counter-flow flame analysis was conducted for the prediction of burnt-gas properties. JP10 was selected for a representative kerosene fuel and a non-equilibrium combustion analysis was accomplished in supercritical condition using UC San Diego reaction mechanism. The premixed counter-flow flame was assumed for stationary and stable flame, and the temperature result in present study was overestimated rather than the experimental results from Huzel. From the difference of the temperature result, other properties, heat capacity, specific heat ratio and molecular weight had some differences against the experimental results. Moreover, the present results was more similar to the experimental results than those of the equilibrium analysis.

초 록

케로신을 연료로 사용하는 연료 과잉 예연소기는 비평형 연소반응을 하며, 화학평형 해석으로는 정확한 연소가스 물성치 예측이 쉽지 않다. 본 연구에서는 연소 가스 물성치 예측을 위해, 예혼합 대향류 화염 해석을 수행하였다. 케로신 연료의 대표 물성치로 JP10을 선정하였으며, UC San Diego 반응 메커니즘을 사용하여 초임계 조건에서 비평형 연소해석을 수행하였다. 안정적인 화염 확보를 위해 예혼합 추진제의 대향류 화염을 가정하였으며, Huzel의 실험 결과에 비해 온도가 높게 예측 되었다. 이에 따라 비열, 비열비, 분자량 결과에서 차이를 보였으나 화학평형 결과에 비해 실험값과 더 유사한 경향을 보였다.

Key Words: Fuel-rich(연료 과잉), Preburner(예연소기), Non-equilibrium Combustion(비평형 연소), Counter-flow Flame(대향류 화염)

* 한국항공대학교 대학원, 항공우주 및 기계공학과

** 한국항공대학교, 항공우주 및 기계공학부

† 교신저자, E-mail: jykoo@kau.ac.kr

1. 서 론

단계연소 사이클 액체로켓엔진은 가스발생기 사이클 엔진과 달리 약 150 기압의 고압에서 동작하는 예연소기를 사용한다. 예연소기는 터빈 입구의 온도 제약에 의해 연료 과잉 또는 산화제 과잉 조건에서 구동되며, 터빈을 설계함에 있어 예연소기에서 분사되는 연소 가스의 물성치 예측은 필수적이다. 예연소기의 구동 조건은 비평형 연소반응으로써 화학평형해석으로는 연소 후 가스의 물성치 예측이 어렵다.

Heubner[1]는 화학평형기법을 이용하여 메탄과 RP-1에 대한 다양한 결과를 실험과 비교하였으나 실험과 다소 큰 오차가 발생하였다. Foelsche[2]는 perfectly stirred reactor(PSR) 모델을 이용하여 연료 과잉 조건에서 예혼합된 케로신 계열 연료의 비평형 연소해석을 수행하였으며, 추가적으로 spalding이 제안한 액적기화모델을 사용하여 실험에서 도출된 화학종 분포와 유사한 수치적 결과를 얻었다. 국내에서는 유정민과 이창진[3,4]에 의해 Foelsche가 제안한 기법[2]과 Dagaut가 개발한 화학반응 메커니즘[5]을 이용하여 비평형 연소 온도 및 화학종이 실험[6]과 상당히 일치하는 결과를 얻었다. 하지만 Foelsche와 유정민 외[3,4]의 결과는 실제 예연소기와 달린 낮은 압력조건에서 수행되었다. 예연소기는 150 기압정도의 조건에서 동작하는데 이와 같은 고압 및 고온 조건은 초임계 조건(supercritical condition)으로써 일반적으로 액체와 기체의 두 가지 특성을 모두 지닌 초임계 유체(supercritical fluid)로써 다루어진다.

따라서 고온, 고압의 예연소기를 모델링함에 있어 초임계 조건이 고려되어야 한다. 본 연구에서는 초임계 조건을 고려한 비평형 연소 해석을 통해 연소후 가스 물성치를 도출하여, 실험 결과 및 화학평형해석 결과와 비교하고자 한다.

2. 해석 방법

연소 해석에 있어서는 안정된 화염확보가 필수적이며 이에 Foelsche는 PSR 모델을 이용하였

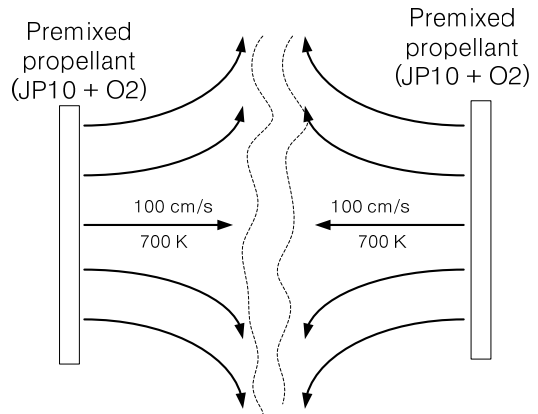


Fig. 1 Schematic of Premixed Counter-flow Flame

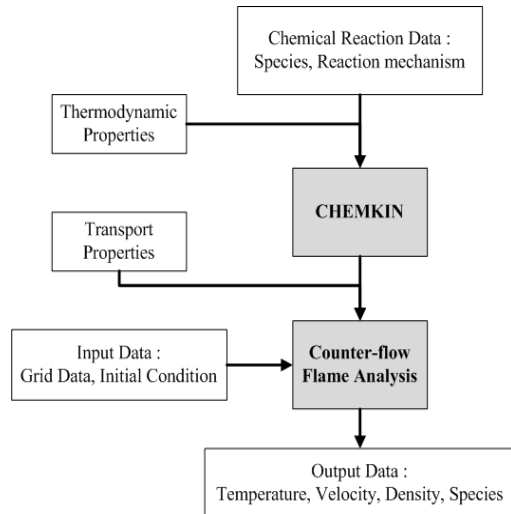


Fig. 2 Flowchart of Counter-flow Flame Analysis

으나 이는 실제 유동특성이 반영되지 않은 모델이다. 초임계 상태에서는 기체상태방정식으로써 유체를 다룰 수 있으며, 본 연구에서는 유동특성이 고려되며 쉽게 정지된 화염을 확보할 수 있도록 대향류로 분사되는 예혼합 추진제에 대해 해석하였다.

대향류 화염은 Fig. 1에 나타내었고 해석과정은 Fig. 2와 같다. 케로신 연료는 JP10의 물성치를 이용하였으며 UC San Diego에서 제안된 JP10과 산소 반응 메커니즘[7]을 적용하였다.

3. 해석 결과

연료와 산화제의 혼합비가 700 K 초기 온도와 150기압의 주위 압력조건에서 각각 100 cm/s의

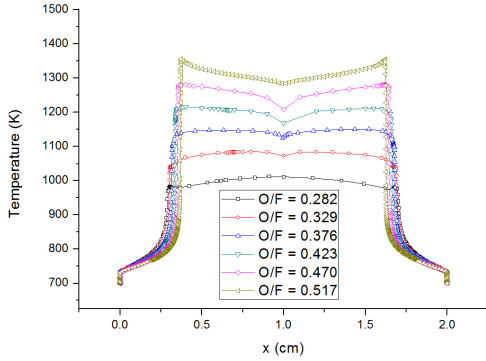
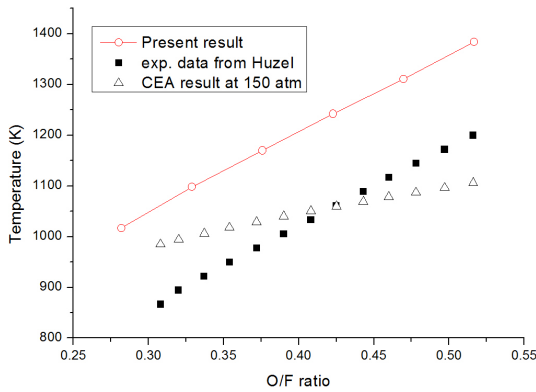


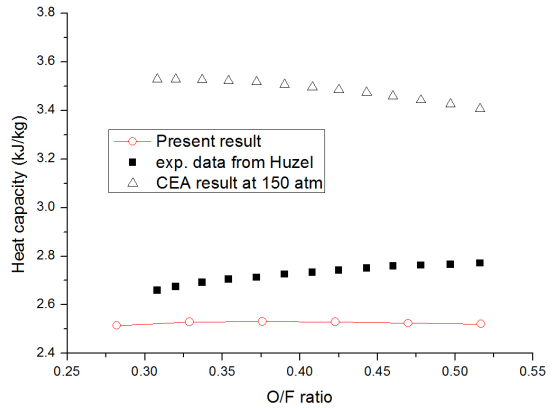
Fig. 3 Temperature Distribution between Two Injection Post Sides

속도로 분사될 때, 혼합비(O/F) 약 0.282~0.517 조건에서 해석을 수행하였다. 대항류 해석결과 양쪽의 분사면 사이의 온도분포는 Fig. 3와 같이 혼합비가 증가할수록 평균 온도가 높은 결과를 보였으며, 대체적으로 혼합비가 높을수록 화염이 늦게 발달하는 현상을 보였다.

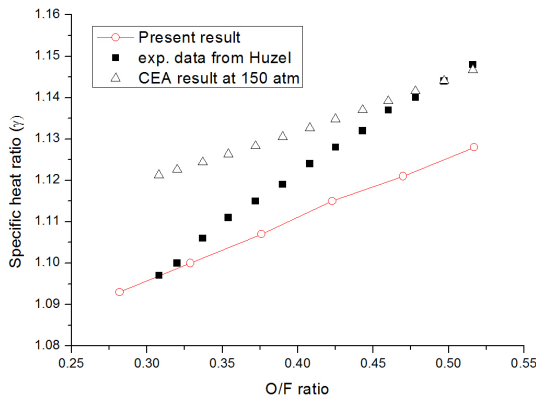
Figure 3의 온도분포에서 OH 활성기가 가장 높게 나타난 위치, 즉 화염면 근처의 물성치를 대표 물성치로 선정하여 Huzel[8]의 실험 결과 및 CEA[9]를 이용한 화학평형해석 결과와 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 해석 결과, 온도는 평형해석 결과가 더 실험치에 근접하나 정성적으로 보았을 때 본 연구의 결과가 더 유사한 경향을 띄는 것을 볼 수 있다. 특히 혼합물의 비열 및 분자량 예측에서 화학평형 결과보다 훨씬 실



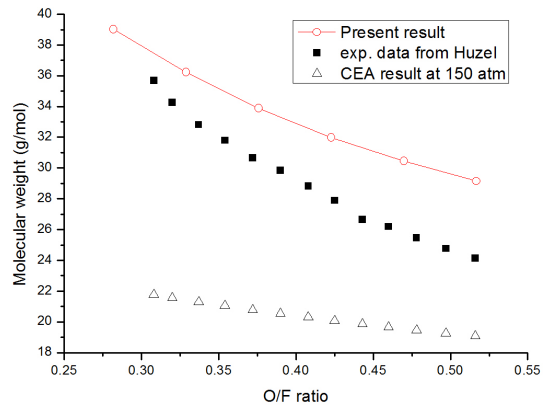
(a) Temperature



(b) Heat Capacity



(c) Specific Heat Ratio



(d) Molecular Weight

Fig. 4 Comparison of Burnt-gas Properties from Huzel[7], CEA and Present Study

험 결과에 근접한 데이터를 얻었다.

높게 예측된 온도 결과에 의해 다른 물성치들이 영향을 받아 다소 차이가 나는 것으로 보인다. 높게 예측된 온도의 원인으로는 높게 가정된 초기 온도에 의해 발생한 것으로 생각되지만, 초임계 조건을 유지하기 위해서는 임계온도 이상인 조건에서만 해석이 타당하다. 따라서 실제 예연소기에 분사되는 낮은 온도 조건에서부터 가열되는 과정이 추가로 고려되어야 함을 보여준다.

4. 결 론

케로신을 연료로하는 연료과잉 예연소기내의 물성치 예측을 위해 초임계 조건에서 비평형 연소해석을 수행하였다. 안정적으로 화염을 유지할 수 있는 대향류 분사를 통해 정지된 화염을 얻었으며 화염면 근처의 대표 물성치를 실험값 및 평형 해석 결과와 비교하였다. 그 결과, 평형 해석에 비해 실험값과 더 유사한 경향을 보였으나 높은 온도 예측으로 인해 물성치 예측에 다소 차이를 보였다. 높은 온도의 원인은 높게 가정된 초기 혼합물의 온도에 따른 것으로 보이며, 실제 예연소기에 분사되는 낮은 온도부터의 가열과정에 대한 고려가 필요할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

1. Heubner, A. W., "High Pressure LOX/Hydrocarbon Preburner Injector Investigation," AIAA-82-1153, 1982
2. Robert O. Foelsche, Joseph M. Keen and Wayne C. Solomon, "Nonequilibrium Combustion Model for Fuel-Rich Gas Generators," Journal of Propulsion and Power, Vol. 10, No. 4, 1994, pp.461-472
3. 유정민, 이창진, "농후 연소 가스발생기의 비평형 연소 화학반응 모델링," 한국항공우주학회지, 제 34권, 제 7호, 2006. pp.89-96
4. Jungmin Yu and Changjin Lee, "Prediction of Non-Equilibrium Kinetics of Fuel-Rich Kerosene/LOX Combustion in Gas Generator," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 21, 2007, pp.1271-1283
5. Dagaut, P., "On the Kinetics of Hydrocarbons Oxidation from Natural Gas to Kerosene and Diesel Fuel," Journal of Physical Chemistry and Chemical Physics, Vol. 4, pp.2079-2094, 2002
6. Lawver, B. R., "Testinf of Fuel/Oxidizer-Rich, High-pressure Preburners," NASA CR-165609, 1982
7. <http://web.eng.ucsd.edu/mae/groups/combustion/mechanism.html>
8. Dieter K. Huzel and David H. Huang, Morden Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines, AIAA, 1992
9. Sanford Gordon and Bonnie J. McBride, "Computer Program for Calculation Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications," NASA RP-1311