

研究論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2013.17.3.021>초임계 압력하의 기체수소-액체산소 화염에 대한
난류모형을 이용한 해석에서 수치기법 평가

김원현* · 박태선**†

An Evaluation of Numerical Schemes in a RANS-based
Simulation for Gaseous Hydrogen/Liquid Oxygen Flames
at Supercritical Pressure

Won Hyun Kim* · Tae Seon Park**†

ABSTRACT

Turbulent flow and thermal fields of gaseous hydrogen/liquid oxygen flames at supercritical pressure are investigated by turbulence models. The modified Soave-Redlich-Kwong (SRK) EOS is implemented into the flamelet model to realize real-fluid combustions. For supercritical fluid flows, the modified pressure-velocity-density coupling are introduced. Based on the algorithm, the relative performance of six convection schemes and the predictions of four turbulence models are compared. The selected turbulence models are needed to be modified to consider various characteristics of real-fluid combustions.

초 록

초임계조건인 기체수소/액체산소 화염의 난류유동 및 온도장에 대해 난류모형을 이용한 해석이 수행되었다. 실제유체의 연소유동을 해석하기 위하여 화염편모형에 SRK 상태방정식이 도입되었다. 수정된 압력-속도-밀도 연계알고리즘이 초임계유동에 적용되었다. 수정된 알고리즘을 토대로 6개의 대류항 차분법과 4개의 난류모형의 상대적인 성능비교가 이루어졌다. 선택된 난류모형들은 실제유체 연소유동의 다양한 특징을 고려하기 위해서 수정이 필요함을 나타내었다.

Key Words: Supercritical Pressure(초임계압력), Turbulence Model(난류모형), Real-Fluid Flamelet(실체유체 화염편), Real-Fluid Equation of State(실체유체 상태방정식), Non-Premixed Flame(비예혼합화염), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진)

접수일 2012. 11. 28, 수정완료일 2013. 3. 20, 게재확정일 2013. 3. 26

* 학생회원, 경북대학교 기계공학부

** 종신회원, 경북대학교 기계공학부

† 교신저자, E-mail: tsparkjp@knu.ac.kr

[이 논문은 한국추진공학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 22-23, 여수 디오션리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

고성능의 액체로켓엔진을 개발하기 위한 설계 도구로서 초임계조건인 연소해석은 많은 관심의

대상이 되고 있다. 초임계조건에서 분사기가 작동될 때 액체제트는 표면장력과 증발잠열의 감소로 액상과 기상을 구별하기 어려운 상태가 된다. 따라서 단상(single phase)의 유체해석에 활용되어온 수치해석 방법들을 적용할 수 있는 장점이 존재하게 된다.

문헌조사에 의하면 액체연료의 미립화와 분열 과정을 고려하지 않아도 되는 장점이 있지만 초임계조건에서의 연소해석은 아직 초보적인 단계로 생각된다[1-4]. 이러한 조건에 대한 해석은 일반적인 연소과정과 달리 단상의 조건이지만 밀도, 엔탈피, 비열계수 등이 해석영역내에서 액체와 기체의 물성치가 공존하기 때문에 연료와 산화제의 혼합정도에 따라 물성치가 급격하게 변화하여 수치불안정을 초래하게 된다. 따라서 고차 정확도의 차분법과 시간적분법 등을 적용하는데 많은 어려움이 발생된다.

Schmitt 등[1]은 인공감쇄항이 도입된 외재적인 해석방법을 이용하여 초임계조건에서의 수소-산소 분사기에 대한 수치해석결과를 보여주었고, Cutrone 등[2]은 예조건화기법이 도입된 밀도기반 알고리즘에 flamelet-progress-variable 방법을 제안하였다. 그들은 고압조건에서 연소해석은 실제유체 효과와 화학반응에 대한 접근방법이 매우 중요함을 지적하였다. 한편 Kim 등[3]은 층류 화염편 모델을 이용하여 기체수소/액체산소 화염에 대하여 실제유체 상태방정식의 영향을 살펴보고왔다. 이러한 연구들은 각각의 해석대상에서 좋은 결과를 보여주고 있지만 보편적으로 확립된 해석방법을 제시하고 있지는 않다. 따라서 초임계 조건 및 연소유동의 해석에 대한 안정적인 해석방법의 확립을 위해 관련연구가 많이 진행될 필요가 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 압력기반 알고리즘을 이용하여 초임계조건에 대한 효율적인 연소해석기법을 확립하기 위한 기초연구로서 해석알고리즘을 결정하고 초임계연소유동에 대한 대류차분법과 난류모델의 영향을 살펴보고자 한다. 여러 유동에 많이 활용되어온 PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators)알고리즘[5-7]을 선택하여 실제유체기반의 연소해석에 대해 수정형태를 적

용하고자 한다. 또한, 초임계조건에 대한 연소해석은 유동장, 열전달, 화학종의 농도 등의 변화에 커다란 영향을 주는 난류모델의 형태에 크게 의존하게 된다. 따라서 해석의 성공여부는 초임계조건에서 난류모델의 효율성에 달려있다고 생각할 수 있다. 그러므로 유동장해석에 일반적으로 사용되는 난류모델을 선택하여 효율성을 검토하고자 한다.

2. 지배방정식 및 해석방법

2.1 난류모델

보편적인 2-방정식 모델중에 Launder and Spalding (SKE)[8], Yang and Shih (YS)[9], Abe et al. (AKN)[10], Park et al. (KEF)[11] 등이 선택되었다. 그 중에서 $k-\epsilon-f_\mu$ 모델[11]의 방정식을 간략하게 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{\rho}k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho}u_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \bar{\rho}\epsilon \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho}\epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho}u_j \epsilon}{\partial x_j} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{\epsilon 1}^* P_k - C_{\epsilon 2} f_2 \bar{\rho}\epsilon}{T} \\ & + C_{\epsilon 3} (1 - f_w) \mu \omega_t \left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_k} \right)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

참고문헌[8-11]을 통하여 지배방정식등과 관련된 정보를 확인할 수 있기 때문에 모델형태에 대한 자세한 기술은 생략하기로 한다.

2.2 실제유체 화염편 모델

실제유체기반의 연소해석은 여러 방법이 가능하겠지만 본 연구에서는 Li 등[12]의 19개 반응식과 8개의 화학종(H_2 , O_2 , H , O , OH , HO_2 , H_2O , H_2O_2)에 근거한 실제유체 화염편 모델[3, 4]을 이용하였다. Soave-Redlich-Kwong (SRK) 상태방정식[13]을 이용하여 초임계조건에서의 물성치에 실제유체 효과가 고려되었다.

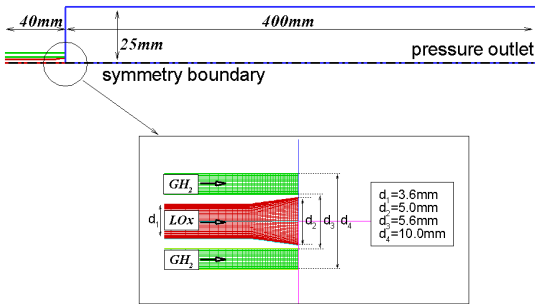


Fig. 1 Computational domain and grid system for the RCM-3 injector

혼합분율(\bar{Z})과 혼합분율의 섭동(\bar{Z}'^2)에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{Z}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u_j \bar{Z}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{Z1}} \right) \frac{\partial \bar{Z}}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{Z}'^2}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u_j \bar{Z}'^2}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{Z2}} \right) \frac{\partial \bar{Z}'^2}{\partial x_j} \right] + 2 \frac{\mu_t}{\sigma_{Z2}} \frac{\partial \bar{Z}}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{Z}}{\partial x_i} - 2 \bar{\rho} \frac{\epsilon}{k} \bar{Z}'^2 \quad (4)$$

이렇게 얻어진 \bar{Z} 와 \bar{Z}'^2 그리고 스칼라소산율 (scalar dissipation rate)을 이용하여 질량분율과 물성치 등이 얻어진다. 해석 전에 미리 설정한 압력, 엔탈피 등의 일정범위에 대해 다중확률밀도함수에 의해 가중된 적분을 이용하여 Lookup table을 구축하고 다차원 보간을 통해 난류섭동에 의한 영향을 물성치에 고려하게 된다. 이러한 해석과정은 Kim 등[3, 4]의 연구에서 자세히 살펴볼 수 있다.

2.3 해석방법

차분법의 영향을 살펴보기 위하여 1차 정확도의 상류차분법 (Upwind)[14], 2차 정확도의 상류차분법 (SOU)[14], 2차 중심차분법 (CD2)[14], 2차 정확도의 hybrid linear parabolic interpolation (HLPA)[15], 3차 정확도의 quadratic upwind-weighted interpolation (QUICK)[16], 2차 정확도의 compact scheme (Compact)[17]을 적용하여

대류항이 차분화되었다. 연소유동장은 여러방정식들이 연성되어 나타나기 때문에 하향이완계수 등을 통한 정상해석은 수렴성에 많은 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 해석의 안정성을 확보하기 위하여 모든 계산은 비정상 (unsteady) 해석이 수행되었다[7]. 시간중분과 관련된 CFL수는 1보다 작으면 안정성이 확보되지만 0.5로 유지하였다. 초기 가정된 유동장의 오류를 제거하기 위해 대류시간 $200d/U_0$ 동안 계산이 수행된 후에 $500d/U_0$ 동안 시간평균이 취해졌다 (d 는 액체산소노즐직경).

3. 결과 및 토의

초임계 조건의 동축분사기 (RCM-3 [18-19])가 해석대상으로 선택되었다. RCM-3는 Fig. 1과 같이 중앙에는 85 K의 극저온 액체산소가 4.35 m/s (0.1 g/s)로 분사되고 바깥 쪽 환형 유로를 통해서 287 K의 기체수소가 236 m/s (0.07 g/s)로 분사된다. 이때 연소실의 압력은 60 bar이다.

해석 알고리즘의 형태는 연소유동과 압축성 유동에 적용되어지는 방법들이 가능하겠지만 예비연구로 반복법에 근거한 SIMPLE계열의 몇몇 기존연구들을 적용한 결과 수렴된 해를 얻는데 실패하였다. 따라서 본 연구에서는 비정상해석을 근거로 압축성유동으로 확장이 가능한 PISO알고리즘[5-7]을 선택하였다. Crank-Nicolson법을 이용한 PISO알고리즘의 압력수정방정식은 다음과 같다[7].

$$\frac{\beta^n p'}{dt} + \frac{\partial (u_i^* \beta^n p')}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(I_p^n \frac{\partial p'}{\partial x_i} \right) = - \frac{\partial (\rho^* u_i^*)}{\partial x_i} - \frac{\rho^* - \rho^n}{dt} \quad (5)$$

여기서 지수 n 은 이전시간, $*$ 는 현재, ρ 는 밀도, $p' = p^* - p^n$, $I_p = \rho/A_p$, β 는 밀도수정과 압력수정의 관계를 나타낸다. A_p 는 이산화된 운동량 방정식의 대각요소를 나타낸다. 이상기체방정식의 경우 $\beta = 1/RT$ 이고 실제유체상태방정식을 이용할 경우 $\beta = \gamma/c^2$ 로 표현된다. γ 는 비열비,

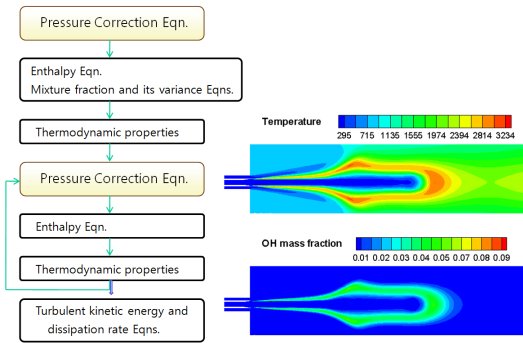


Fig. 2 Flowchart of the PISO-1 algorithm for real fluids and distributions of temperature and OH mass fraction for the RCM3 case

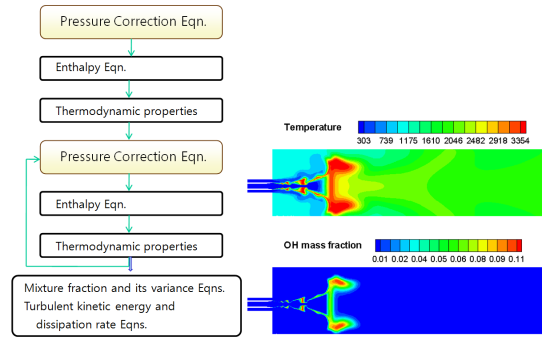


Fig. 3 Flowchart of the PISO-2 algorithm for real fluids and distributions of temperature and OH mass fraction for the RCM3 case

c 는 음속을 나타낸다. 실제유체에서 물성치 변화에 의한 압력-속도-밀도의 연계를 강화하기 위하여 Park[7]의 연구와 유사한 형태로 압력수정 방정식 풀이과정이 수정되었다. 여기서 예측단계는 기존의 PISO알고리즘[5, 6]과 동일하다. 첫 번째 방법 (PISO-1)에 대한 압력수정방정식의 풀이과정은 다음과 같다.

(1) 압력수정방정식을 푼다

(2) 압력, 속도, 검사체적 표면의 속도를 수정한다.

(3) 엔탈피, 혼합분율과 혼합분율의 섭동 방정식을 푼다.

(4) 상태방정식을 통한 밀도, 물성치 등을 수정한다.

이러한 (1)-(4) 수정자 단계를 수렴할 때까지 반복 계산한다.

22400개의 검사체적 수를 가진 격자계에서 SRK 상태방정식과 SKE모델을 이용하여 RCM-3에 대한 해석이 수행되었다. Fig. 2는 PISO-1을

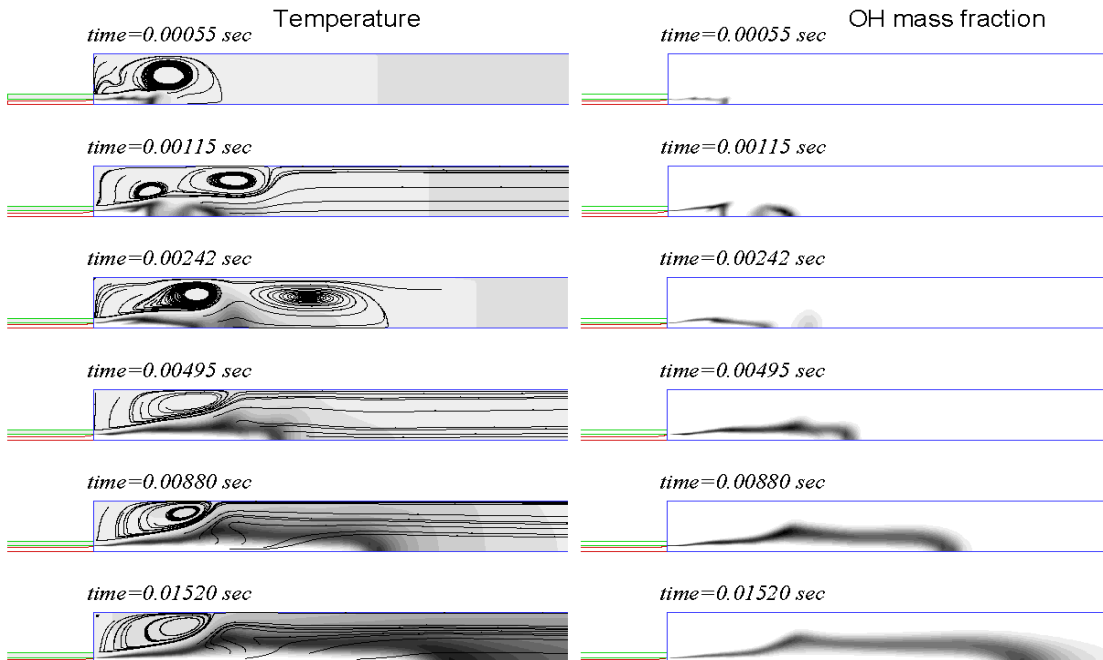


Fig. 4 Time evolution of temperature, streamlines and OH mass fraction (PISO-1)

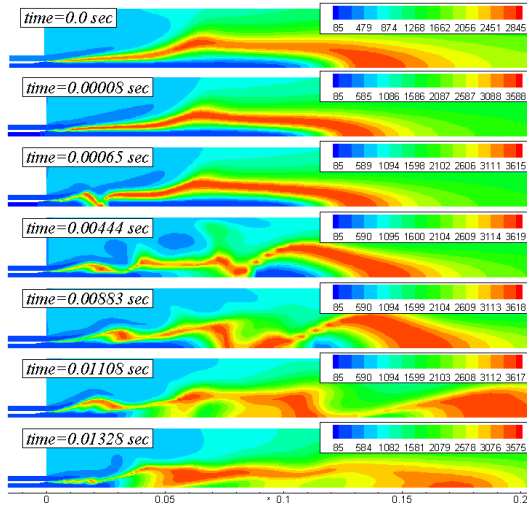


Fig. 5 Time evolution of temperature by the PISO-2 method with the solution of the PISO-1 method as a initial condition

이용한 결과이다. 온도분포와 OH 질량분율의 분포를 보면 전체적으로 안정적인 화염이 형성되고 있다. PISO-1의 효율성을 비교하기 위하여 압력수정방정식의 풀이과정을 다음과 같이 변경하였다(PISO-2).

- (1) 압력수정방정식을 푼다
 - (2) 압력, 속도, 검사체적 표면의 속도를 수정한다.
 - (3) 엔탈피 방정식을 푼다.
 - (4) 상태방정식을 통한 밀도, 물성치 등을 수정한다.
- 이러한 (1)-(4) 수정자 단계를 수렴할 때까지 반복 계산한다.
- (5) 혼합분율과 혼합분율의 섭동 방정식을 푼다.

PISO-1과의 차이점은 압력수정방정식을 푸는데 엔탈피방정식만 관여하고 다른 방정식은 압력방정식을 수렴시킨 후에 해석한다는 것이다. Fig. 3의 결과를 보면 화염의 형태가 PISO-1과 달리 매우 불안정한 형태를 보여주고 있다. 압력-속도-밀도의 연계가 다르게 반영되어 얻어진 결과로 생각된다. 즉, 연소유동장에 PISO-1의 형태가 적합할 것으로 생각된다.

Figure 4는 PISO-1을 이용한 온도와 OH 질량분율에 대한 순간적인 분포의 시간변화를 보여주고 있다. 초기의 불안정한 분포가 시간이 지날

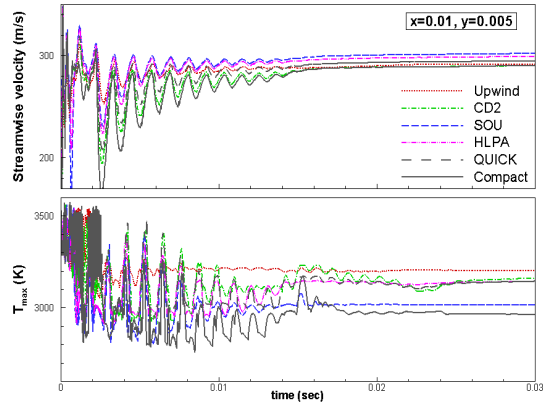


Fig. 6 Time histories of the streamwise velocity and maximum temperature

수록 안정화되어 가는 모습을 볼 수 있다. 연속식을 만족하지 않는 가동된 유동장과 재순환유동의 발달이 중첩되어 불안정한 구조를 유발하고 있지만 난류모델의 계산이기 때문에 점진적으로 안정화된 형태로 접근해가는 것으로 생각된다.

Figure 5는 PISO-2의 방법의 불안정성에 초기 조건의 영향이 존재하는지를 살펴보기 위하여 PISO-1으로부터 얻어진 시간평균 결과를 초기조건을 이용하여 계산된 결과를 보여주고 있다. 시간이 지날수록 온도분포가 불안정한 형태로 발달되어 가고 있음을 알 수 있다. 최대온도 또한 시간이 지날수록 초기조건보다 높은 값을 보여주고 있다. 결과적으로 초기조건에 관계없이 초임계연소해석에 적합하지 않은 해석방법의 형태임을 알 수 있다. Figs. 2-5를 종합하면 압력기반 해석알고리즘을 이용한 초임계조건의 연소해석에서 압력수정방정식과 혼합분율방정식을 연계하는 방법이 알고리즘의 안정성에 매우 커다란 영향을 주고 있다는 것을 알 수 있다. 결론적으로 유체상태량의 변화와 관련이 깊은 엔탈피와 화학종의 농도에 관계된 혼합분율방정식이 압력수정방정식의 수렴과정에 직접 반영되어야 안정적인 해를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 이러한 결과는 추후 다른 연소문제에 대해 검증해석을 수행하여 확인할 필요가 있다.

초임계 연소유동에 대한 대류항차분법의 영향

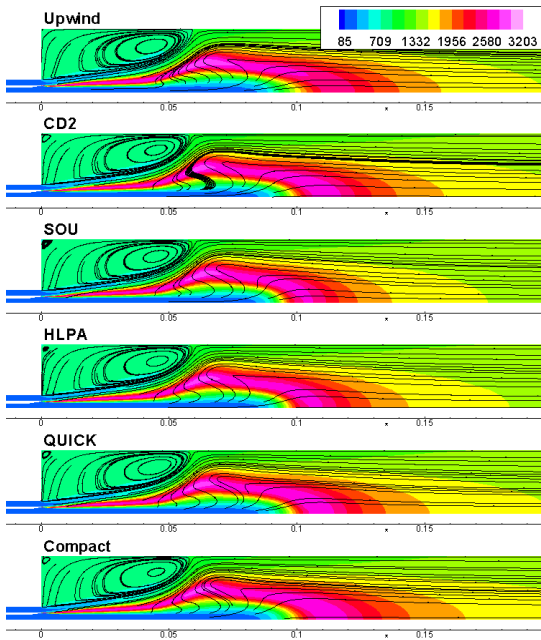


Fig. 7 Comparison of the predicted temperature and streamlines with different convection schemes (RCM3)

을 검토하기 위하여 Upwind[14], CD2[14], SOU[14], HPLA[15], QUICK[16], Compact[17] 등의 대류항 차분법을 이용한 해석이 수행되었다. Fig. 6은 관찰점 ($x=0.01, y=0.005$)에서 얻어진 주유동방향 속도와 최대온도의 시간변화를 보여주고 있다. 0.02초 이후 관찰점에서 속도는 차분법이 변하여도 비슷하게 예측되고 있지만 최대온도는 차분법에 따라 다른 값을 보여주고 있다. 차분법의 변화에 따른 온도분포와 유선분포를 Fig. 7에서 비교하고 있다. Fig. 8은 축중심 선상에서 축방향속도와 온도를 보여주고 있다. Figs. 7-8에서 보면 화염의 길이는 많은 차이가 없지만 최대온도 이후의 영역은 대류항 차분법에 영향을 받아 다르게 분포하고 있다. 상류차분법 계열인 Upwind[14], SOU[14], HPLA[15], QUICK[16], 등은 중심차분법 계열인 CD2[14]와 Compact[17] 보다 온도분포에서 많은 차이를 보이고 있다. 중심차분법 계열이 좀 더 일관성이 있는 것으로 판단되고 상류차분법은 차분법의 정확도에 많은 영향을 받는 것으로 판단된다.

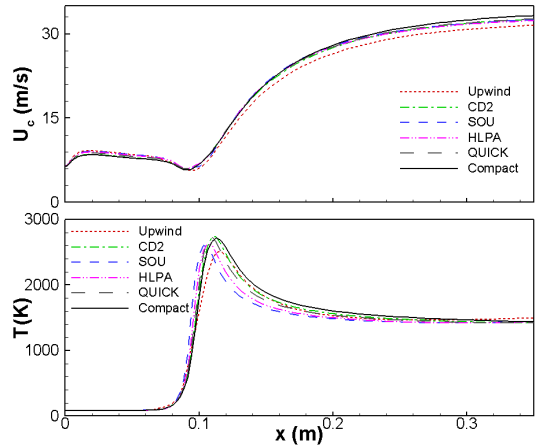


Fig. 8 Comparison of the predicted streamwise velocity and temperature with different convection schemes (RCM3)

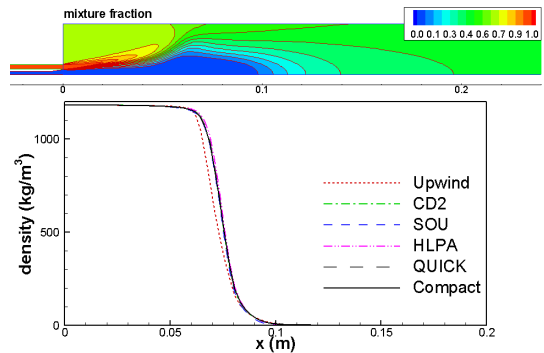


Fig. 9 Comparison of the predicted density with different convection schemes and mixture fraction (RCM3)

Figure 9는 혼합분율분포와 축중심선상의 밀도분포를 보여주고 있다. 액체산소-기체수소의 반응이 증가하면서 혼합분율은 주유동방향으로 감소하는 경향으로 보여주게 되는데 이런 화학종의 변화에 밀도변화 또한 의존하게 된다. 그림에서 보면 1차 정확도의 상류차분법을 제외한 다른 차분법들은 거의 비슷한 밀도분포를 보여주고 있다. 밀도분포를 기준으로 생각하면 2차 정확도 이상의 차분법을 이용하면 충분한 정확성이 얻어지는 것으로 생각할 수 있다.

Figure 10은 대류항차분법의 변화에 따른 단면에서의 난류운동에너지 분포와 축중심선상에서

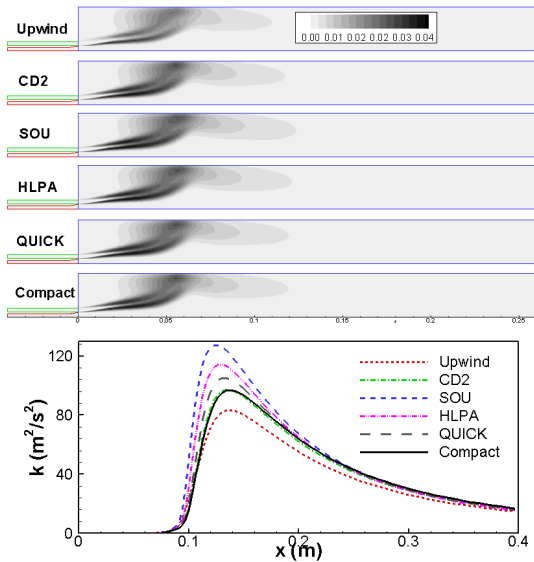


Fig. 10 Comparison of the predicted turbulent kinetic energy with different convection schemes (RCM3)

난류운동에너지 변화를 나타내고 있다. Fig. 7에서 확인할 수 있는 속도변형률이 크게 존재하는 부분에서 난류운동에너지가 크게 나타나는 일반적인 경향을 모든 차분법에서 동일하게 보여주고 있다. 그림에서 보면 대류향 차분법에 따라 난류운동에너지 분포는 상당한 차이를 보여주고 있다. Upwind[14]가 가장 작은 최대값을 예측하고 있고 SOU[14]가 가장 큰 난류운동에너지 값을 보여주고 있다. 그렇지만 중심차분법 계열인 CD2[14]와 Compact[17]은 매우 유사한 분포를 보여주고 있다. 결과적으로 난류모델을 이용한 해석에서 대류향차분법에 의한 차이는 크지 않지만, 안정성이 확보된다면 중심차분법을 이용한 해석이 보다 일관성 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

난류모델의 영향을 Figs. 11-12에서 살펴보자. Fig. 11은 난류모델 변화에 따른 예측된 온도분포를 보여준다. 신뢰성 있는 실험결과가 문헌상에 존재하지 않기 때문에 Cutrone 등[2]의 해석결과와 비교하였다. 전체적인 경향은 Cutrone 등[2]의 결과와 SKE[8]모델이 매우 유사하고 나머지 모델들은 온도분포를 다르게 예측

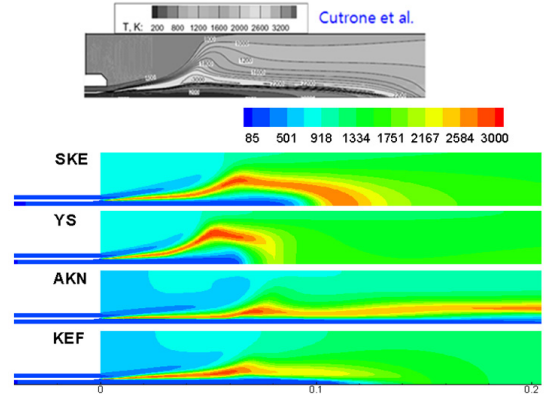


Fig. 11 Temperature distributions with different models for the RCM3 case

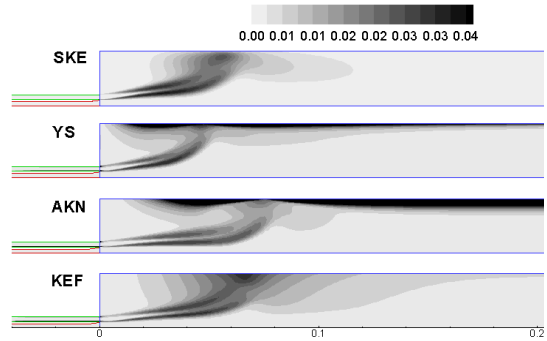


Fig. 12 Turbulent kinetic energy with different models for the RCM3 case

하고 있다. Fig. 12에서 난류운동에너지 분포를 살펴보면 SKE[8]모델과 달리 YS[9], AKN[10], KEF[11]는 유동변형률이 큰 영역과 벽면근처에서 난류운동에너지가 크게 나타나고 있다. AKN[10]과 KEF[11]모델은 주유동 방향으로 난류운동에너지가 늦게 발달하여 최대값이 SKE[8] 모델보다 후류에서 나타나고 있는데, 이러한 구조에 의해서 제트의 확산율이 감소되고 화염이 길어지는 특징을 보여주고 있다. 반면에 YS[9]모델의 경우는 난류운동에너지가 주유동 방향으로 빠르게 증가하고 있고 액체산소 제트의 반경달달이 빠르게 나타나고 있다. 레이놀즈수 모델들은 다수의 수정항을 난류방정식에 포함하고 있다. 이러한 수정항들은 대체적으로 난류운동에너지를 감소시키는 경향이 있고 이러한 경향은

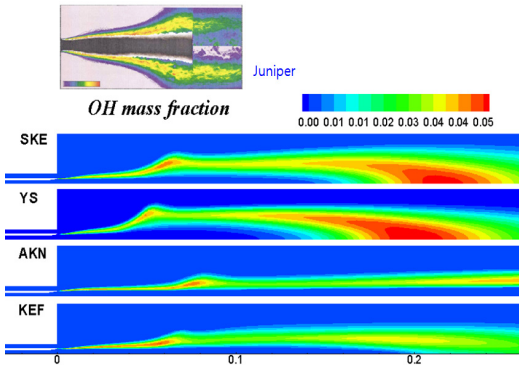


Fig. 13 Comparison of the predicted OH mass fractions for different turbulence models. (C60)

제트유동의 확산율 (spreading rate)을 작게 예측하기 때문에 얻어진 결과로 생각된다.

RCM-3와 동일한 형상조건에서 연료의 유량이 적은 액체산소가 0.105 g/s로 분사되고 기체수소가 0.042 g/s로 분사되는 C60조건[19]에 대한 해석이 추가되었다. Fig. 13에 예측된 OH 질량분율을 나타내었다. 결과는 각 난류모델마다 화염의 크기를 명확하게 살펴볼 수 있다. Juniper[18]의 실험결과와 비교할 때 전체적으로 SKE[8]과 YS[9]보다 AKN[10]과 KEF[11]가 화염의 크기를 크게 예측하고 있고, 화학반응이 활발하게 일어나는 영역이 매우 좁게 나타나고 있다. 이러한 경향은 RCM-3에서 관찰된 난류모델 예측성에 대한 특징과 같은 경향으로 판단된다. 즉, 제트유동이 발달되는 영역에서 난류운동에너지가 작게 예측되어 액체산소 제트가 반경방향으로 정상적인 발달을 보여주지 못하고 있다. 이것은 연소장에서 온도와 밀도변화 그리고 물성치 등의 변화와 연계되어서 나타난 것으로 생각된다. 따라서 밀도변화가 심하지 않거나 온도변화가 없는 상황에서 유동변화에 주된 관심을 가지고 개발된 일반적인 난류모델들은 연소유동에 적용할 때 적절성을 검토한 후에 적용해야 함을 알 수 있고 모델수정에 대한 연구가 추가적으로 진행되어야 함을 보여주고 있다.

4. 결 론

초임계조건외의 기체수소-액체산소 화염에 대한 난류연소해석이 수행되었다. PISO알고리즘과 SRK 상태방정식을 이용하여 실제유체효과가 반영되었다. 압력기반 해석알고리즘에서 압력수정방정식을 수립하는 과정에 혼합분율방정식의 풀이과정이 적절하게 포함되어야 안정적인 해를 얻을 수 있음을 보여주었다.

실제유체 연소유동에 대한 대류항 차분법의 영향을 살펴본 결과 난류운동에너지와 온도장에는 대류항 차분법의 변화가 크게 영향을 주었지만 밀도와 주유동 방향의 속도분포에는 상대적으로 영향이 적게 나타났다. 안정성을 고려하지 않을 경우 중심차분법이 일관성있는 결과를 보여주었다.

RCM-3와 C60조건 모두 저레이놀즈수 모델들은 제트전단유동이 발달하는 영역에서 난류운동에너지를 작게 예측하여 화염영역이 반경방향으로 작고 주유동방향으로 길게 예측되는 특성을 보여주었다. 이러한 경향은 물성치 변화에 연결된 난류모델의 단점으로 생각되었다. 결과적으로 비연소 유동에 최적화된 난류모델들은 연소유동에서 충분한 검토가 이루어져야 하고 물성치가 심하게 변하는 연소유동에 대하여 모델수정이 요구되었다.

후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업 (NSL, National Space Lab)으로부터 지원받아 수행되었습니다 (No.20090091793).

참 고 문 헌

1. Schmitt, T., Selle, L., Cuenot, B., and Poinsot, T., "Large-eddy simulation of transcritical flows," C. R. Mecanique, Vol. 337, 2009, pp.528-538
2. Cutrone, L., De Palma, P., Pascazio G.,

- and Napolitano, M., "A RANS flamelet-progress-variable method for computing reacting flows of real-gas mixtures," *Computers and Fluids*, Vol. 39, 2010, pp.485-498
3. Kim, T., Kim, Y., and Kim, S. K., "Real-fluid flamelet modeling for gaseous hydrogen/cryogenic liquid oxygen jet flames at supercritical pressure," *The J. Supercritical Fluids*, Vol. 58, 2011, pp.254-262
 4. 김성구, 최환석, 박태선, "액체로켓 분사기 해석을 위한 실제유체 기반의 난류연소모델 개발," 한국추진공학회 2010년도 춘계학술대회 논문집, pp.150-155
 5. Park, T. S., "Effect of time-integration method in a large eddy simulation using PISO algorithm: Part I - flow field," *Numer. Heat Transfer Part A*, Vol. 50, 2006, pp.229-245
 6. Park, T. S., "Effect of time-integration method in a large eddy simulation using PISO algorithm: Part II - thermal field," *Numer. Heat Transfer Part A*, Vol. 50, 2006, pp.247-262
 7. Park, T. S., "LES and RANS simulations of cryogenic liquid nitrogen jets," *The Journal of Supercritical Fluids*, Vol. 72, 2012, pp.232-247
 8. Launder, B. E. and Spalding, D. B., "The numerical computation of turbulent flows," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 3, 1974, pp.269-289
 9. Yang, Z. and Shih, T. H., "New time scale based $k-\varepsilon$ model for near-wall turbulence," *AIAA J.*, Vol. 31, 1993, pp.1191-1198
 10. Abe, K., Kondoh, T., and Nagano Y., "A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flow," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, 1994, pp.139-151
 11. Park, T. S., Sung, H. J., and Suzuki, K., "Development of a nonlinear near-wall turbulence model for turbulent flow and heat transfer," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 24, 2003, pp.29-40
 12. Li, J., Zhao, Z., Kazakov, A., and Dryer F. L., "An updated comprehensive kinetic model of hydrogen combustion," *Int. J. Chemical Kinetics*, Vol. 36, 2004, pp.566-575
 13. Soave, G., "Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state," *Chemical Engineering Science*, Vol. 37, 1972, pp.1197-1203
 14. Ferziger, J. H. and Peric, M., *Computational methods for fluid dynamics*, 3rd ed., Springer, 2002
 15. Zhu J., "On the Higher-Order Bounded Discretization Schemes for Finite Volume Computations of Incompressible Flows," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 98, 1992, pp.345-360
 16. Leonard, B. P., "A stable and accurate convection modeling procedure based on quadratic upstream interpolation," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 19, 1979, pp.59-98.
 17. Lele, S. K., "Compact finite difference schemes with spectral-like resolution," *J. Comput. Phys.* Vol. 103, 1992, pp.16-42
 18. Juniper, M., "Structure and stabilization of cryogenic spray flames," PhD thesis, Ecole Centrale Paris, 2001
 19. Candel, S., Juniper, M., Singla G., and Scouflaire P., Rolon C., "Structure and dynamics of cryogenic flames at supercritical pressure," *Combustion Science and Technology*, Vol. 178, 2006, pp.161-192