

연소기 개발에서 시뮬레이션 기술의 활용

정승채* · 양시원* · 김신현* · 박희호** · 안철주** · 윤삼손*

Application of non-reacting and reacting flow simulation for combustor development

Seungchai Jung*, Siwon Yang*, Shaun Kim*, Heeho Park**, Chulju Ahn**, Samson Yoon*

ABSTRACT

Combustor development requires high fidelity simulation capable of predicting recirculation zone (RZ), temperature field, and pollutant emission. Swirling flow is widely used in combustor for its benefits in efficient mixing and flame stabilization by RZ. Large eddy simulation (LES) is used to calculate swirling flow in an expanding pipe [1], and shows higher accuracy than RANS. Reactive flow modeling using LES and flamelet model is validated with experiments by Barlow et al. [4] and Masri et al. [3]. Finally, heat transfer simulation of Samsung Techwin's combustor liner is presented

Key Words : Combustor, swirling flow, reacting flow simulation, liner heat transfer

연소기 개발은 연소기 사이징, 유량 배분량 결정 및 유로 설계, 냉각 방식 선정 및 냉각 홀 설계 등 기본설계가 이루어진 후에 cold flow 시험, 상압 연소 시험, 고압 연소 시험의 단계를 거친다. 연소 현상은 난류와 화학반응이 결합되어 강한 비선형 특성을 보이기 때문에 이론적 예측이 쉽지 않다. 따라서 기존에 개발된 연소기로부터 획득한 실험 관계식을 활용하거나 많은 시험을 거쳐 반복 설계가 이루어지는 경우가 대부분이다. 자연적으로 연소기 개발에는 많은 비용과 시간이 소모된다.

최근에는 설계 오류를 줄이고 효율적인 개발을 도모하기 위해서 시뮬레이션 기술을 적극 활용하고 있다. 병렬형 클러스터 컴퓨터가 보급되어 CFD(Computational Fluid Dynamics) 계산의 경우 천만개 이상의 격자를 사용하는 것이 가능해졌으며, 대와류모사기법(LES, Large Eddy Simulation)을 적용한 비반응/반응 유동장 해석이 일반화되고 있는 추세이다. 또한 flamelet model, eddy dissipation concept model 등 finite-rate chemistry를 사용한 난류연소 해석 기법을 적용하여 보다 정확한 반응장 해석이 가능하다.

본 논문에서는 삼성테크윈이 보유하고 있는 연소기 시뮬레이션 기술을 소개하고 앞으로의 모델

링 및 해석 기술 개발 방향을 기술한다.

가스터빈 연소기는 화염을 안정적으로 유지하고 고정시키기 위하여 재순환영역을 이용하는 것이 일반적이다. 공기를 스윙러에 통과시키면 접선방향의 유동 성분을 가지게 되며 이 공기는 연소기 내부로 분출되어 가운데 공간에 큰 재순환영역을 형성시킨다. 뜨거운 연소가스는 재순환영역에 머물면서 새로 유입되는 연료와 공기를 지속적으로 점화시킴으로써 화염을 유지시킨다. 또한 이러한 swirling flow는 일정한 주기를 가지는 precessing vortex core를 형성시켜 연소불안정에 영향을 미칠 수도 있다. 따라서 연소기 설계 시 내부의 유동구조를 정확히 파악하는 것이 중요하다. $k-\epsilon$ 또는 $k-\omega$ 모델과 같은 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 기반의 난류모델은 이러한 강한 swirling flow 및 그에 기인한 vortex 현상을 정확히 예측하지 못한다. 하지만 격자보다 큰 와류를 별도의 모델링 없이 직접 모사하는 LES 난류해석 기법을 적용하면 매우 정확한 해석결과를 도출할 수 있다.

그림 1은 Dellenback[1]의 swirling flow 실험 결과와 해석 결과를 비교한 것이다 (swirl number=0.6). 해석은 LES와 3개의 RANS 기반 난류 모델(Realizable $k-\epsilon$, $k-\epsilon$, $k-\omega$ SST)로 수행되었다. Dellenback은 주유동의 접선방향으로 유체를 공급하여 swirling flow를 형성시켰으며 하류의 급팽창 chamber 내부에서의 유동 속도를 측정하였다. 축방향 속도 비교 그래프(그림 1의 중간)를 보면 LES 해석 결과가 실험 데이터와

* 삼성테크윈 선형기술연구소 CAE기술그룹

** 삼성테크윈 파워시스템사업부 가스터빈개발그룹

† 연락처, seungchai.jung@samsung.com

TEL : 070-7147-5073

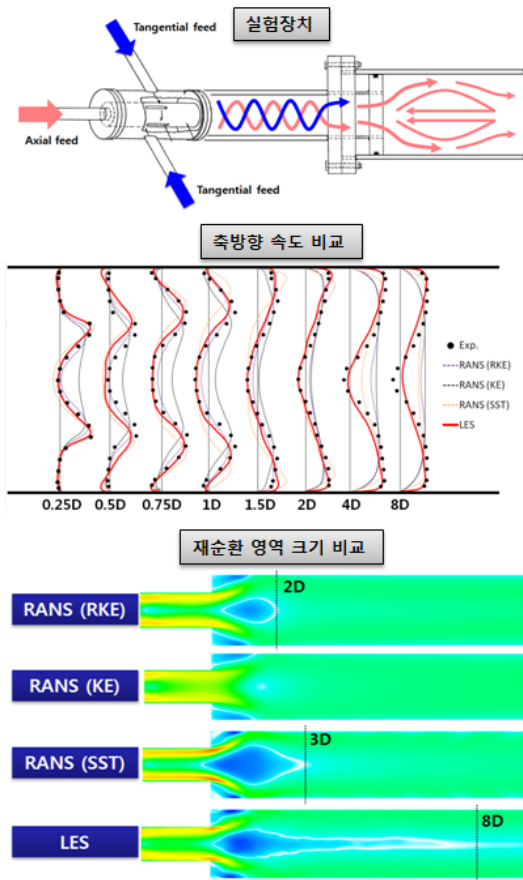


Fig. 1 Schematic diagram of swirling flow test apparatus[1] and simulation results

매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 비교대상 RANS 모델 중에서는 $k-\omega$ SST 모델이 가장 정확하다. 그림 1의 아래는 재순환영역의 크기를 비교한 것이다. 가운데 하얀색 부분이 속도가 0인 지역으로 재순환영역의 경계를 나타낸다. Realizable $k-\epsilon$ 과 $k-\omega$ SST는 각각 2D와 3D(D : inlet diameter) 재순환의 길이를 예측하였으며 LES 해석은 8D로 예측하였다. Dellenbak 실험에 의하면 재순환 길이는 약 8D 정도이다. 그림 2는 Q-criterion을 나타낸다. Vortex 구조 중 회전성분을 더욱 선명하게 가시화하기 위해서 와도(vorticity)나 압력 선도보다 Q-criterion을 사용하는 경우가 있다. 그림을 보면 유동의 spiral motion을 확인할 수 있다.

화염 해석에 사용되는 난류연소 반응 모델은 크게 나누어 EDM(Eddy dissipation model), EDC(Eddy dissipation concept), Flamelet 모델, CMC(Conditional moment closure), PDF(Probability density function) 등이 있다. EDM은 화학반응식을 난류에 의한 혼합으로 대체하여

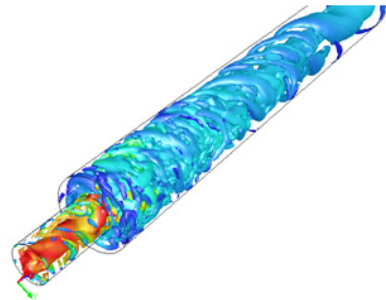


Fig. 2 LES result of swirling flow Q-criterion

계산속도가 빠르지만 정확도가 떨어진다. 반면 EDC는 finite-rate chemistry를 고려할 수 있다. Flamelet 모델은 화학반응식을 전처리 작업으로 대체하여 높은 정확도의 결과를 빠르게 해석한다. CMC는 온도, 농도 등을 mixture fraction의 정도에 따라 조건적(conditional)으로 계산한다. PDF 모델은 화학종의 농도와 그에 따른 반응을 확률적으로 계산한다.

그림 3은 LES와 flamelet 모델을 사용한 CH₄-air 화염 온도장 해석 결과를 보여준다. Burner의 중심에서 CH₄이 49.6m/s로 분사되며 그 주위에 1880K의 pilot 연소가스가 11.4m/s로 분사된다[2~4]. 이 pilot 연소가스는 연료를 지속적으로 점화시켜 화염이 유지될 수 있도록 도와준다. 그림을 보면 크고 작은 와류(eddy)의 거동을 명확히 관찰할 수 있다. 이처럼 LES 해석 기법은 와류(eddy)의 거동을 직접 모사함으로써 연료와 산화제의 혼합을 정확하게 계산할 수 있고 결과적으로 반응 유동장의 해석 정확도를 크게 높여준다.



Fig. 3 Temperature contour of piloted CH₄-air flame

Swirling flow는 재순환영역을 형성시켜 화염이 유지되도록 도움을 준다. 또한 재순환영역 내부 및 그 경계의 전단층에서 연료와 공기의 혼합이 촉진되어 화염 길이가 짧아지고 NOx 등 공해 배출물이 감소된다. 그림 4, 5는 swirl stabilized CH4-air 화염 해석 결과를 보여준다. Bluff-body의 중심에서 CH4이 66.3m/s로 분사되며 그 주위로 축방향 속도와 접선방향 속도가 각각 32.9m/s, 21.6m/s인 공기가 분사된다. 공기의 swirl number는 0.66이다[5]. 그림 4의 위는 bluff-body 중심에서 분사되는 CH4와 그 주위에서 분사되는 swirling air를 보여주며, 아래는 LES와 flamelet 모델을 이용하여 계산한 온도장을 보여준다.

그림 5에 0.2D, 0.7D, 1.8D (D : Bluff-body의 직경)의 위치에서 온도 측정치와 계산 결과를 비교하였다. 또한 난류 모델(k- ω SST, RSM, LES)에 따른 정확도 차이를 비교하였다. k- ω SST와 RSM은 RANS 기반의 난류 모델이다. 하늘색 실선은 James 등의 LES 해석 결과를 나타낸다[6]. Bluff-body와 가까운 곳(0.2D)에서의 k- ω SST 모델의 정확도가 매우 낮은 것을 볼

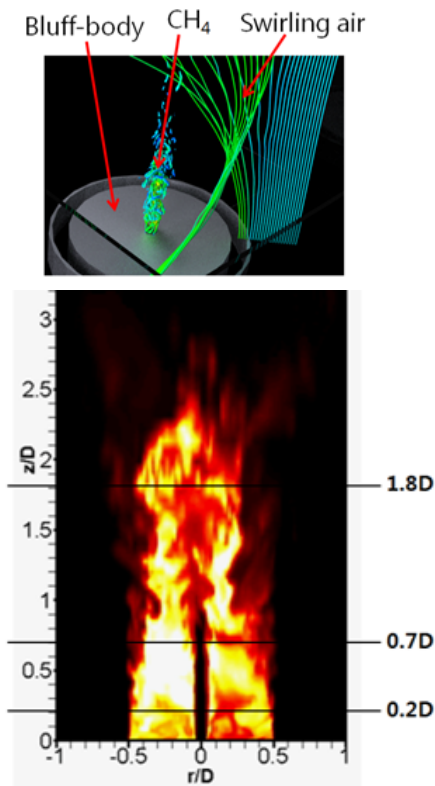


Fig. 4 Simulation of CH4 and swirling air injection (upper) and temperature field of swirl stabilized CH4-air flame

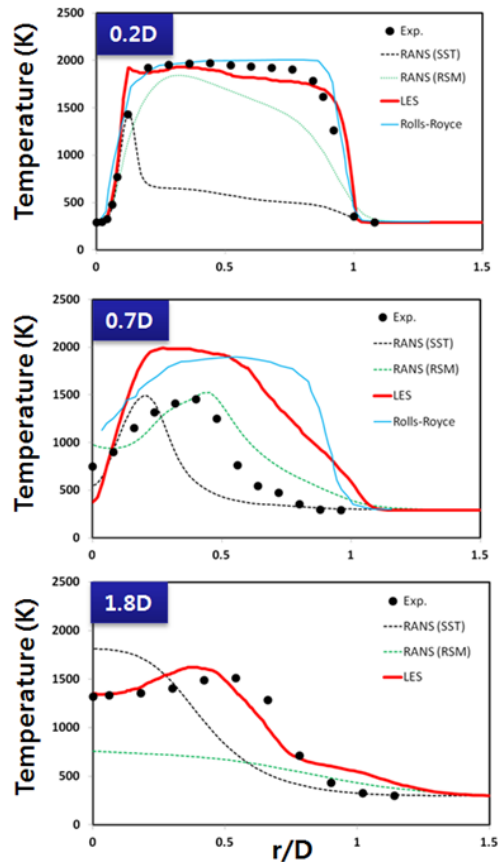


Fig. 5 Comparison between temperature measurement and simulation of swirl stabilized CH4-air flame

수 있다. 이는 swirling flow에 의해서 bluff-body 근처에 형성되는 재순환영역을 예측하지 못하였기 때문이다. 반면 LES 모델은 매우 정확하게 온도를 예측하는 것을 알 수 있다. 0.7D 지점에서 실험결과와 차이가 나는 것은 necking 효과를 모사하지 못하였기 때문이다. 그림 4를 보면 0.7D 지점에서 화염이 잘록해지는 것을 볼 수 있는데(necking 효과) 이는 swirling flow의 원심력에 의해서 발생하는 것으로 알려져 있다. RSM 모델이 비교적 정확한 예측 결과를 보이는 것처럼 보이지만, 이는 necking을 잘 모사하였기 때문이 아니라 우연에 의한 것으로 보인다. 1.8D 지점에서 LES 모델이 가장 정확하게 화염 온도를 예측하고 있다. 이처럼 LES와 finite-rate chemistry 기법을 적용하여 비교적 정확한 수준의 화염 온도 예측이 가능하다. 화염 해석 결과는 연소기 내부 공간 설계, 운전 조건에 따른 화염 거동, 내부 온도 분포 예측에 기반한 라이너 냉각 설계 등에 활용될 수 있다.

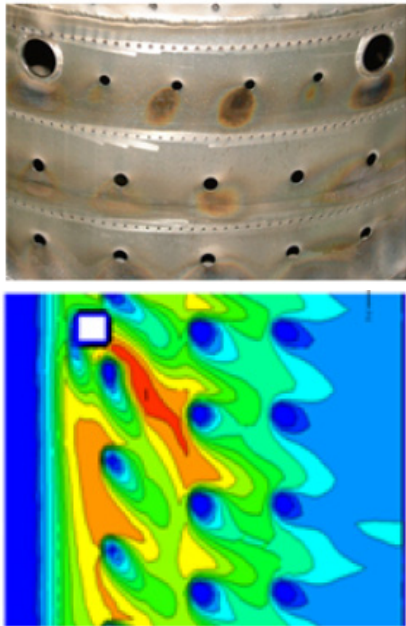


Fig. 6 Combustor liner developed by Samsung Techwin (upper) and heat transfer simulation result

연소기 라이너는 내부에 화염 공간을 형성하고 화염으로부터 케이스를 보호하는 역할을 한다. 고온의 연소 gas와 직접 접촉하기 때문에 수명 연장을 위해서 라이너 벽면을 냉각시켜줘야 한다. 희박연소기술을 적용하는 경우에는 연소 공기의 공급량이 증가하므로 가용한 냉각공기량이 상대적으로 줄어들게 되므로 더욱 효과적인 냉각 설계가 요구된다. 라이너와 케이스 사이에 rib turbulator를 부착하여 대류에 의한 냉각을 촉진하는 방법과, 라이너 냉각홀을 통해 공기를 흘려 보내어 안쪽 벽면에 공기의 막을 형성시켜 고온 가스로부터 보호하는 방법(막냉각)이 주로 사용되고 있다. Rib turbulator의 높이, 간격, 너비 또는 냉각홀의 위치, 크기, 개수 등의 조합수가 매우 많으므로 최적 조합을 찾아내는 데에 시뮬레이션이 유용하게 사용될 수 있다. 그림 6은 삼성 테크윈이 개발한 연소기 라이너 벽면의 열전달 해석 결과를 보여준다. 해석 결과를 바탕으로 냉각홀의 위치, 크기, 개수 등을 최적화할 수 있다.

그림 7은 연소기 내부 반응 유동장 해석결과를 보여준다. 주 연소 영역에 큰 재순환영역이 형성되면서 화염이 재순환 영역을 따라 원형의 형태로 분포하는 것을 관찰할 수 있고, 희석 공기공으로부터 유입된 공기흐름이 주 연소영역을 분리시키면서 연소가스를 희석시키는 것을 볼 수 있다. 또한 화염이 아래쪽 라이너에 근접해 있으므로 이의 개선이 필요함을 알 수 있다.

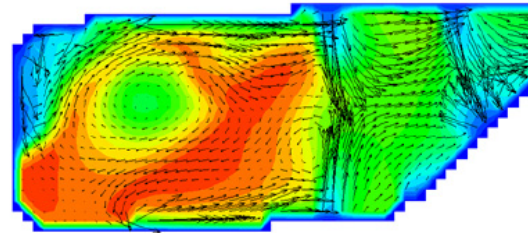


Fig. 7 Simulation of reacting flow field

지금까지 swirling flow, CH₄-air 화염, 라이너 냉각, 연소기 내부 반응 유동장 해석 기술을 소개하였다. 이러한 해석 기술을 적극 활용하면 비용과 시간 측면에서 보다 효율적인 개발이 이루어 질수 있을 것으로 기대한다. 향후에는 NO_x, CO 등 공해 물질 예측 모델과 연소진동 예측 모델을 개발하여 연소기 설계에 적용하고자 한다.

참고 문헌

- [1] P. A. Dellenback, "Heat Transfer and Velocity Measurements in Turbulent Swirling Flows Through an Abrupt Axisymmetric Expansion", Ph.D. Thesis, Arizona State University, 1986
- [2] TNT. International workshop on measurement and computation of turbulent nonpremixed flames.
<http://www.ca.sandia.gov/TNF>
- [3] Masri A. R., Dibble R. W., and Barlow R. S., "The structure of turbulent nonpremixed flames revealed by raman-rayleigh-lif measurements" Prog. Energy Combust. Sci., 22:307-362, 1996.
- [4] R.S. Barlow and J.H. Frank. "Effects of turbulence on species mass fractions in methane/air jet flames" Proc. Combust. Inst., 27:1087-1095, 1998.
- [5] Universi of Sydney, Swirl Flows and Flames Database,
<http://sydney.edu.au/engineering/aeromech/thermofluids/swirl.htm>
- [6] S. James, J. Zhu, M. S. Anand., "Large eddy simulations of turbulent flames using the filtered density function model" Proc. Combust. Inst., 31:1737-1745, 2007.