

# Zonal Hybrid RANS/LES를 이용한 크랙된 케로신 스크램제트 연소기의 비예혼합 난류 연소 연구

신준수\* · 성홍계\*\*†

## Numerical Investigation of Nonpremixed Turbulent Flame of Cracked Kerosene in a Model Scramjet Combustor using Zonal Hybrid RANS/LES Method

Junsu Shin\* · Hong-Gye Sung\*\*†

### ABSTRACT

This paper studies a nonpremixed turbulent flame in a model scramjet combustor using zonal hybrid RANS/LES method. The numerical domain is divided into two region, RANS and LES region. The interface between the two regions is treated with synthetic eddy method. A model scramjet combustor experimented at German aerospace center is selected for the comparative study. The fuel injection of cracked kerosene surrogate which is composed of ethylene and methane is considered. Turbulent combustion of cracked kerosene surrogate is achieved using flamelet approach.

### 초 록

본 연구에서는 zonal hybrid RANS/LES 기법을 사용하여 모델 스크램제트 연소기 내에서의 비예혼합 연소 현상에 대한 연구를 수행하였다. 수치 계산을 위한 도메인은 RANS와 LES 영역으로 나누어져 있으며, 이 두 개 영역의 계면은 synthetic eddy method로 처리되었다. 본 연구에서는 독일 항공우주센터에서 실험한 모델 스크램제트 연소기가 사용되었다. 수소 연료를 사용한 실험 결과와 수치해석적 검증을 수행하였다. 크랙된 케로신 연료는 에틸렌과 메탄으로 구성되었으며, 크랙된 케로신 surrogate의 난류연소는 화염편 모델을 사용하여 모사되었다.

Key Words: Zonal Hybrid RANS/LES Method(지역별 RANS/LES 혼합모델), Scramjet Combustor (스크램제트 연소기), Flamelet Combustion Model(화염편 연소모델)

### 1. 서 론

최근 선진국의 많은 연구자들에 의해 zonal hybrid RANS/LES 기법을 사용한 스크램제트의 수치적 연구가 이루어지고 있다. Zonal hybrid RANS/LES 기법을 사용함으로써 비정상적인 예

\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

† 교신저자, E-mail: hgsung@kau.ac.kr

디의 거동이 유동장에 큰 영향을 미치지 않는 영역에서는 RANS로 계산을 하고, 비정상적인 에디의 거동이 유동장에 영향을 크게 미치는 연소실과 그 후류에서는 LES 기법을 사용하여 격자의 사용을 크게 줄여 수치적 부담을 줄일 수 있다.

최근 Baurle는 미공군 연구소에서 실험한 에틸렌을 연료로 사용하는 마크 2 스크램제트 연소기를 zonal hybrid RANS/LES 기법을 사용하여 실험결과와 유사한 수치결과를 얻었다.[1] 또한 Zilberter 등도 zonal hybrid RANS/LES 기법을 사용하여 스크램제트 연소기에 대한 연구를 수행한 바 있다.[2] 또한 본 연구그룹에서도 hybrid RANS/LES 기법을 사용하여 스크램제트 연소실에 대한 연구를 수행하여 hybrid RANS/LES 난류모델에 따른 영향을 분석한 바 있다. [3]

본 연구에서는 zonal hybrid RANS/LES 기법을 사용하여 독일 항공우주센터에서 실험한 스크램제트 연소기[4]에 대한 수치적 연구를 수행하였다. 수치계산을 위한 도메인은 RANS와 LES 영역으로 나누어져 있다. 또한 이 두 개의 영역의 계면은 synthetic eddy method (SEM)[5]로 처리되었다. 연소기에 주입된 연료는 수소와 에틸렌과 메탄을 포함하고 있는 케로신 대체모델이 사용되었다. 이 케로신 대체모델은 Vaden[6] 등이 HiFiRE 프로젝트에서 계산하는 해석모델을 위해 개발되었다.

## 2. 수치기법

### 2.1 지배 방정식

본 연구에서는 3차원 Favre 평균화된 질량, 운동량, 에너지 보존방정식을 사용하였으며, 식 1 ~ 3와 같다.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j + \bar{p} \delta_{ij}}{\partial x_j} = \frac{\partial (\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} u_j'' u_i'')}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} \bar{E}}{\partial t} + \frac{\partial ((\bar{\rho} \bar{E} + \bar{p}) \bar{u}_j)}{\partial x_j} \\ = \frac{\partial (u_i \tau_{ij} - \bar{\rho} h'' u_i'')}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{q}_j}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (3)$$

### 2.2 Hybrid 비점성 유량 계산기법

본 연구에서는 Genin 등[7]이 제안한 hybrid 비점성 유량 계산기법을 사용하였다. 스크램제트 연소실과 같이 유동 혹은 연소에 의해 유동변수들의 불연속적인 지점이 다수 존재하는 경우, 풍상차분 기법만을 사용하게 되면 혼합에 의해 연소가 지배되는 비예혼합 연소계산에서는 에디의 비정상적 거동이 예측이 어려워 실험값보다 혼합이 낮은 수준으로 계산된다. 따라서 Genin 등은 식 4와 같이 중심차분법과 풍상차분법을 함께 사용하는 hybrid 비점성 유량 계산기법을 제안하였다.

$$F_{i+1/2} = \lambda_{i+1/2} F_{i+1/2}^c + (1 - \lambda_{i+1/2}) F_{i+1/2}^u \quad (4)$$

위 식에서  $F^c$  는 중심차분법으로 구해진 유량값을 의미하며,  $F^u$  는 풍상차분법으로 구해진 유량값을 나타낸다. 본 연구에서는 4차 중심차분법과 5차 MUSCL 재구축 기법과 함께 AUSMPW+ Riemann 해법을 사용하였다. 또한 식 4의  $\lambda$  변수는 스위치 변수로서 밀도와 압력의 구배로 계산된다.

### 2.3 비예혼합 화염면 연소모델

수소와 분해된 케로신 대체모델의 비예혼합 난류 화염을 모사하기 위하여 화염면 연소모델을 본 연구에 적용하였다.

화학종의 질량분율, 온도와 같은 열역학적 상태량들은 라이브러리에 저장되어 있으며, 혼합분율을 독립변수로 열역학적 상태량을 불러오게 된다. 본 연구에 사용된 수소 연소의 반응 메카니즘은 O'Connaire 등[8]에 의해 제안된 9개의 화학종과 19단계 반응식이다. 또한 분해된 kerosene surrogate 연소의 반응 메카니즘은 Gri-mech 3.0을 사용하였다.

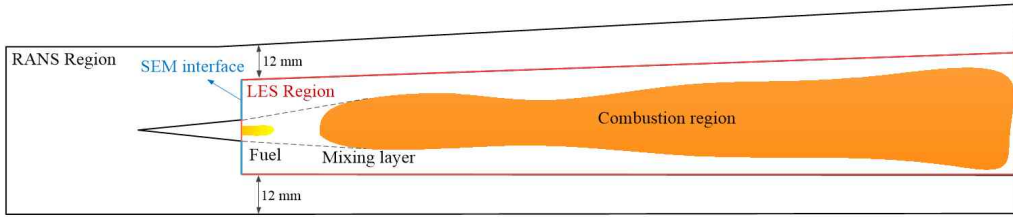


Fig. 1. Schematic of numerical domain

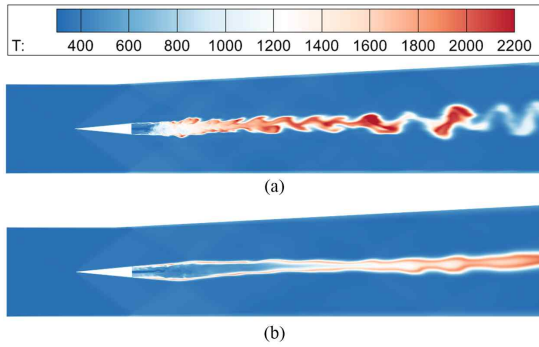


Fig. 2. Temperature contour for hydrogen reacting case; a) zonal hybrid RANS/LES method, b) fully upwind method

### 3. 해석모델 및 경계조건

본 연구에서 사용한 모사 스크램제트 형상의 해석모델을 Fig. 1에 나타내었다. 수치공간은 크게 두가지 영역으로 나누어져있다. RANS 영역에서는 풍상차분법인 AUSMPW+ 기법을 사용하며 난류모델은  $k-\omega_{SST}$  기법을 사용한다. LES 영역에서는 hybrid 비점성 유량계산 기법을 사용하며 난류모델은 improved delayed detached eddy simulation (IDDES)를 사용하였다. 그리고 RANS와 LES 영역의 경계에서는 SEM 기법을 사용하여 RANS 영역에서 계산되는 난류운동에너지 비정상 유동장에서의 속도 변동량으로 변화시켜 주게 된다. 또한 모사 스크램제트의 형상과 조건은 독일 항공우주센터의 실험케이스[3]를 사용하였다. 위의 실험조건에서는 수소만을 주입연료로 사용하였지만 본 연구에서는 Vaden 등이 제안한 분해된 케로신 대체모델을 사용한 주입연료를 함께 사용하였다. 이 케로신 대체모델은 스크램제트 벽면 주위의 마이크로 채널에 의해 열/축매 분해된 케로신을 부피비로 64%의

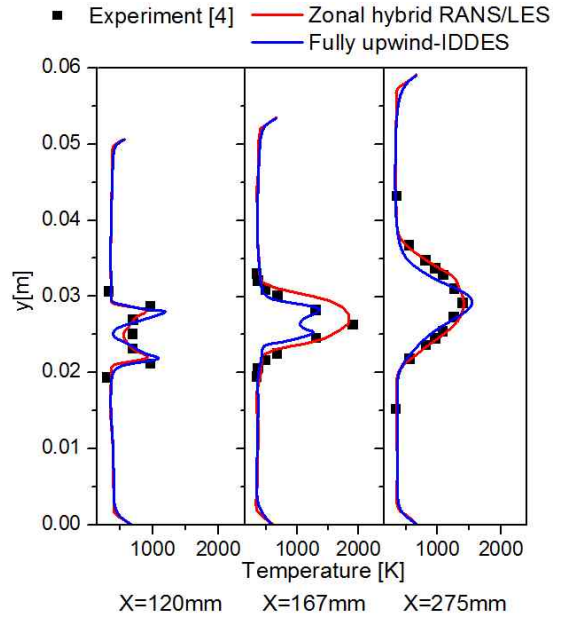


Fig. 3. Time averaged temperature profile for hydrogen reacting cases at different location

$C_2H_4$ 와 36%의  $CH_4$ 로 모사하고 있다. 수소 연소의 경우와 분해된 케로신 연소의 연료-공기의 총 당량비는 0.034로 동일하게 하였다.

### 4. 결과

Figure 2에 수소를 주입한 모사 스크램제트 연소실의 온도장을 zonal hybrid RANS/LES 기법을 사용한 경우와 모든 수치공간에 대해 풍상차분법을 사용한 경우에 따라 나타내었다. 풍상차분법만을 사용한 경우에는 수치적 소산이 크게 예측되어 공기-연료와의 혼합이 잘 이루어지지 않는 것을 볼 수 있다. 그에 반해 zonal hybrid RANS/LES 기법을 사용한 경우에는 작은 스케

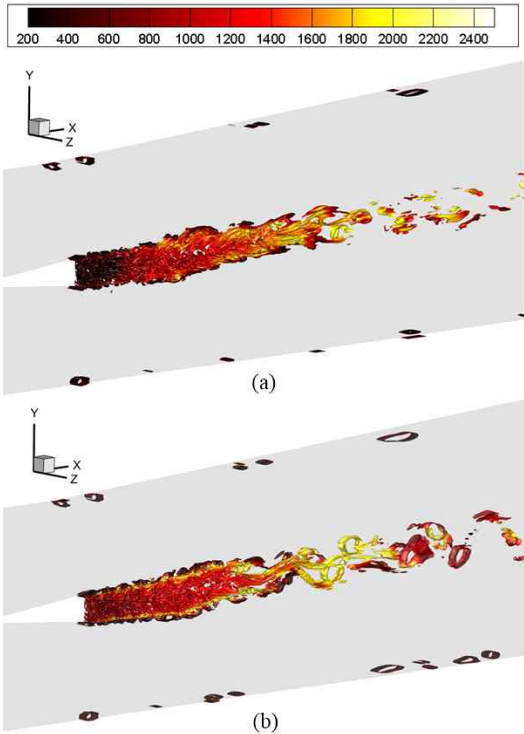


Fig. 4. Isosurface of Q-criterion colored by temperature; a) hydrogen injection, b) cracked kerosene surrogate injection

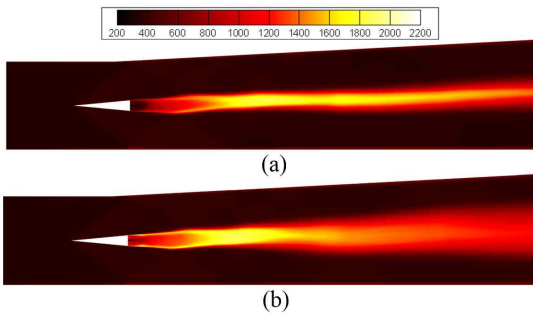


Fig. 5. Time averaged temperature contour; a) hydrogen injection, b) cracked kerosene surrogate injection

일의 에디가 잘 모사되어 공기-연료 혼합을 촉진시키고 강한 난류화염이 발생하는 것을 볼 수 있다. 각 위치에 따른 수직방향의 온도분포를 Fig. 3에 나타내었다. 풍상차분법과 IDDES만을 사용한 결과에서는  $x=167\text{ mm}$  위치에서 화염의

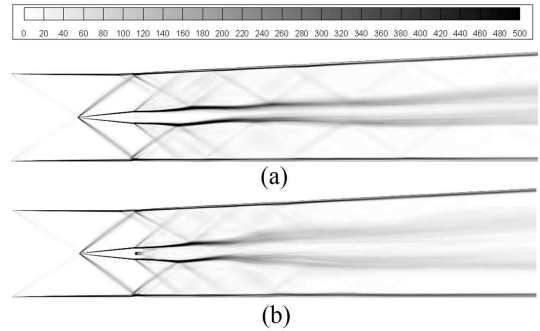


Fig. 6. Time averaged density gradient magnitude; a) hydrogen injection, b) cracked kerosene surrogate injection

두께가 실험값보다 작으며  $y=25\text{ mm}$  부근에서의 온도 분포 경향이 실험값과 다른 것을 알 수 있다. 또한  $x=275\text{ mm}$  위치에서도 화염의 두께가 실험값보다 얇게 나타나고 온도의 최고값도 조금 높게 나오는 것을 볼 수 있다. 하지만 zonal hybrid RANS/LES 기법을 사용한 경우 실험값과 유사하게 예측하는 것을 볼 수 있다.

Zonal hybrid RANS/LES 기법을 사용하여 모사 스크램제트 연소실에 수소와 분해된 케로신을 주입한 경우의 Q-criterion의 isosurface를 Fig. 4에 나타내었다. 수소 주입의 경우인 Fig. 4a를 보면 주입구 바로 뒤편에서의 온도가 Fig. 4b의 분해된 케로신 주입의 경우보다 낮은 것을 볼 수 있으며 연소실 후류에서 에디의 발생이 적은 것을 볼 수 있다. Fig. 5에 시간평균된 온도장을 수소와 분해된 케로신의 경우에 대해 비교하였다. 분해된 케로신을 주입한 경우에는 후류에서의 온도가 낮고 화염이 연소실에서 넓은 면적을 차지하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 6의 각 경우에 따른 밀도구배강도의 시간평균장에서도 확인할 수 있다. Fig. 6b의 분해된 케로신 주입의 경우 후류에서의 난류전단면이 매우 넓게 나타나는 것을 볼 수 있다. 분해된 케로신 주입의 경우 후류의 난류전단면이 넓게 나타나는 것에 의해 Fig. 7에 나타난 각 경우에 따른 시간 평균된 온도분포에도 영향을 미치게 된다. 따라서  $x=275\text{ mm}$ 에서의 온도분포가 분해된 케로신 주입의 경우 상대적으로 넓지만 최고

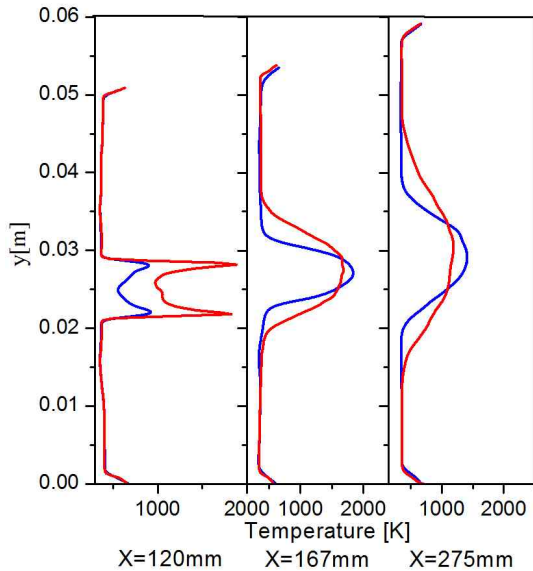


Fig. 7. Time averaged temperature profiles at different location for hydrogen injection(blue line), cracked kerosene surrogate injection(red line)

온도는 약 200 K 정도 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 분해된 케로신 주입의 경우 연소기 후류에서의 화염전단면의 불안정성이 더 크게 되어 화염이 수직방향으로 주기적으로 이동하는 폭이 더 크기 때문이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 Zonal hybrid RANS/LES 기법을 사용한 모사 스크램제트 유동장에 대한 수치적 연구를 수행하였다. Zonal hybrid RANS/LES 기법과 풍상차분기법을 사용한 결과를 비교한 결과 전자의 경우가 연료-공기 혼합이 촉진되는 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 수소와 분해된 케로신을 주입한 경우를 비교하여 분해된 케로신을 사용한 경우 주입구 바로 뒷부분에서의 온도는 높으며, 연소기 후류에서는 화염의 두께가 더 넓지만 온도는 낮게 나타나는 것을 확인하였다.

## 참고 문헌

1. Baurle, R. A., "Hybrid Reynolds-Averaged/

Large-Eddy Simulation of a Cavity Flameholder: Modeling Sensitivities," *AIAA Journal*, Vol. 55, No. 2, pp. 524-542, 2017.

2. Zilberter, I. A. and Edwards J. R., "Large-Eddy Simulation/Reynolds-Averaged Navier -Stokes Simulations of High-Speed Mixing Processes," *AIAA Journal*, Vol. 52, No. 7, pp. 1486-1501, 2014.

3. Shin, J., Sung, H.-G., "Comparison of Hybrid RANS/LES Methods for Supersonic Combustion in a Model Scramjet Combustor," Sixth Symposium on Hybrid RANS/LES Method, 26-28 September 2016, Strasbourg University, France

4. Waidmann, W., Alff, F., Böhm, M., Clauß, W. and Oswald, M., "Supersonic combustion of hydrogen/air in a scramjet combustion chamber," *Space Technology*, Vol. 15, No. 6, 1995, pp. 421-429.

5. Jarrin, N., Prosser, R., Uribe, J.-C., Benhamadouche, S. and Laurence, D., "Reconstruction of turbulent fluctuations for hybrid RANS/LES simulations using a Synthetic-Eddy Method," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 30, 2009, pp. 435-442.

6. Vaden, S. N., Debes, R. L., Lash, E. L., Burk, R. S., Boyd, C. M., Wilson, L. G. and Pellet G. L., "Unsteady Extinction Of Opposed Jet Ethylene / Methane HIFiRE Surrogate Fuel Mixtures vs Air," *45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, August 2009, Denver, Colorado; AIAA-2009-4883.

7. Géin, F. and Menon, S., "Studies of shock/turbulent shear layer interaction using Large-Eddy Simulation," *Computers & Fluids*, Vol. 39, 2010, pp. 800-819.

8. O'Connaire, M., Curran, H. J., Simmie, M., Pitz, J. and Westbrook, C. K., "A

Comprehensive Modeling Study of  
Hydrogen Oxidation," *International Journal of  
Chemical Kinetics*, Vol. 36, 2004, pp. 603-622.