

DES를 이용한 초음속 유동내 수직 연료분사 유동의 난류 연소 해석

원수희* · 정인석** · 최정열***

Turbulent Combustion Dynamics of Transverse Fuel Injection into a Supersonic Crossflow using DES

Su-Hee Won* · In-Seuck Jeung** · Jeong-Yeol Choi***

ABSTRACT

Three-dimensional unsteady reacting flowfield generated by transverse hydrogen injection into a supersonic mainstream are numerically investigated using DES and finite-rate chemistry model. Comparisons are made with experimental results to investigate the turbulent reacting flow physics. The numerical OH distribution describes well the experimental OH-PLIF result, while the numerical ignition delay time shows some disparity due to the restricted available experimental data.

초 록

초음속 주 유동내 연료의 수직분사에 의한 비정상 반응 유동장에 대한 3차원 수치해석이 DES 난류 모델과 상세 화학반응 모델을 이용하여 수행되었다. 난류 반응 유동의 물리적 현상을 이해하기 위하여 해석 및 실험 결과를 비교하였다. 계산에 의해 구해진 OH 분포는 실험의 OH-PLIF 결과를 잘 묘사하고 있다. 반면, 점화 지연 시간은 계산과 실험 사이에 차이를 보이고 있으며, 이는 실험적 계측의 한계에 기인하는 것으로 생각된다.

Key Words: DES Turbulence Model (DES 난류 모델), Autoignition(자발 점화), Ignition Delay (점화 지연)

1. 서 론

스크램제트 엔진의 연소기 내부에서 유동이 머무는 수 ms의 짧은 시간 동안 연료와 공기의 혼합 및 연소 반응을 효율적이고 안정적으로 구

현하기 위한 방법 가운데 하나로 수직분사가 있다. 최근의 실험적 논문들은 향상된 실험 장치 및 계측 기법에 힘입어 초음속 유동내 수직분사 유동의 비정상 특성을 보여준다. Papamoschou & Hubbard[1]는 초음속 수직분사 유동장에 존재하는 유체역학적 불안정성을 보고하였으며, Ben-Yakar et al.[2]은 초고속 카메라를 이용하여 시간에 따른 유체역학적 불안정성을 반응 및 비 반응 유동장에서 포착하는데 성공하였다.

* 서울대학교 대학원 항공우주공학과

** 서울대학교 항공우주공학과

*** 부산대학교 항공우주공학과

연락처, E-mail: aerochoi@pusan.ac.kr

본 연구에서 수치적 모사의 대상은 Ben-Yakar et al.의 실험을 선택하였다. Ben-Yakar et al.의 실험은 기존의 blow-down 형식의 풍동에서 구현하기 힘든 큰 전엔탈피 극초음속 유동 조건을 위해 expansion tube에서 수행되었으며, 다른 실험적 연구에 비해 스크램제트 운용조건과 유사한 환경에서 결과를 도출하였다. 또한 초고속 카메라 및 OH-PLIF 기법을 이용하여 초음속 반응 유동장의 상세 구조를 살펴보는데 적합하다. 본 연구는 DES 난류 모델 및 상세 화학반응 모델을 이용하여 초음속 유동내 수직으로 분사하는 수소 연료에 의한 비정상 반응 유동장의 특성을 살펴보고자 한다.

2. 수치적 접근 방법

초음속 난류 반응 유동장 해석을 위한 3차원 압축성 Navier-Stokes 방정식을 보존형 벡터식으로 표현하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial z} = \frac{\partial \mathbf{E}_v}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}_v}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}_v}{\partial z} + \mathbf{W}$$

대류 플럭스항은 일반 좌표계에서 Roe의 FDS 기법을 사용하여 차분하였으며, MUSCL 기법을 이용하여 고차의 공간차분 정확도를 유지하였고, TVD 성질을 유지하기 위하여 미분형 제한자를 사용하였다. 점성항의 차분에는 중심 차분법을 이용하였다. 차분된 방정식은 2차 정확도의 완전 내재적 시간적분을 수행하였으며, 시간 정확도와 해의 안정성을 위해 Newton 반복계산이 부차적으로 사용되었다.

난류 모델은 Strelets에 의해 제안된 SST-DES가 사용되었으며[3], SST 모델의 난류 운동에너지(k)에 소산항을 다음과 같이 수정하였다.

$$d = \min(C_{DES}\Delta_g, d), \quad \Delta_g = \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$$

$$\epsilon = \frac{\omega}{\beta^*} k = \frac{k^{3/2}}{\min(\Delta_t, C_{DES}\Delta_g)}$$

$$\Delta_g = \sqrt{k}/\beta^* \omega, \quad C_{DES} = (1 - F_1) C_{DESKE} + F_1 C_{DESKW}$$

여기서 $\beta^*=0.09$, $C_{DESKE}=0.61$, $C_{DESKW}=0.78$ 이며,

F_1 은 SST 난류 모델의 전환 함수이다.

수소-산소 화학반응을 위해 25단계 8화학종(H, H₂, O, O₂, H₂O, OH, H₂O₂, HO₂)의 GRI-Mech 3.0 화학반응 모델을 사용하였으며[4], N₂의 해리에 의한 산화물의 생성은 충격파 유도 연소와 같은 문제에서 전체적인 유동장에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있으므로 N₂를 비활성 기체로 가정하였다.

경계조건은 자유류가 초음속이므로 입구조건인 경우 주어진 마하 수에 대하여 고정된 형태로 주어졌으며, 윗면은 계산 영역 내부에서 발생한 충격파가 영향을 미치지 않을 만큼 충분히 멀리 때문에 입구조건과 동일하게 처리하였다. 벽면에서는 점착-단열조건이 사용되었다. 분사 유동에 대한 난류조건을 추가로 고려하지 않았으며, 출구조건은 외삽처리 하였다.

계산 영역은 분사기 외경($d=2\text{mm}$)을 중심으로 분사기 앞전으로 $5d$, 분사기를 포함한 후방으로 $11d$ 가 고려되었으며, 폭 방향으로 $12d$, 높이 방향으로 $10d$ 가 각각 고려되었다. 비정상 유동을 포착하기 위해 DES 계산에서는 격자 간격이 조밀하고 일정한 focus region이 중요하며, 본 계산에서는 초기 비정상 간접구조가 발생하는 분사기 주변에 focus region을 두었다.

계산에 사용된 격자는 $x \times y \times z = 234 \times 150 \times 138$ 이며, 영역 분할 기법(64 sub-domain)과 MPI 표준의 라이브러리를 이용하여 병렬 계산을 수행하였다. 초음속 주 유동 및 분사기 출구 조건을 포함한 계산 조건을 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Simulation conditions (J=1.4)

Supersonic Crossflow		Injector Exit (H ₂)	
M _∞	3.38±0.04	M _j	1
T _∞ (K)	1290	T _j (K)	246
p _∞ (kPa)	32.4	p _j (kPa)	490
l ¹ (mm)	50	d _j (mm)	2
δ ² (mm)	0.75	γ _j	1.42
Re _∞	2.2 × 10 ⁵	Re _{aj}	1.5 × 10 ⁵

¹ distance of injector from plate leading edge

² boundary layer thickness at the injector

3. 계산 결과 및 고찰

고 엔탈피의 주 유동에 수직으로 분사되는 연료 제트의 점화 및 화염 안정화는 유동의 짧은 체류 시간 및 높은 변형률로 인해 어려운 문제이다. 점화 과정은 유동의 짧은 체류 시간에 크게 영향을 받으며, 초음속 압축성 유동장의 높은 변형률은 연소를 억제한다. 초음속 반응 유동장의 자발 점화를 위해서는 적절한 정온도, 정압력, 당량비 및 유동 체류 시간이 필요하다.

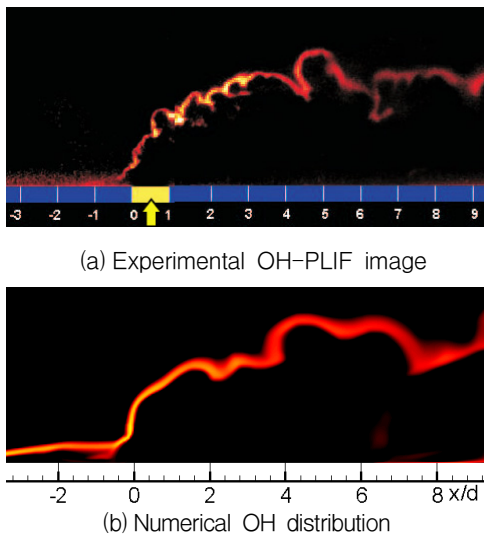


Fig. 1 Experimental OH-PLIF image and corresponding numerical images at the jet center plane

Fig. 1은 실험과 계산에서 임의 순간의 OH 분포를 나타낸 그림이다. OH는 연소 반응 과정에서 생성되는 중간 화학종으로 반응 유동장에서 화염의 위치와 일치하는 것으로 알려져 있다. 따라서 실험의 OH-PLIF 결과는 자발 점화가 발생하는 영역을 표시한다. Fig. 1(a)는 실험에서의 OH-PLIF 이미지로 제트의 전단층을 따라 연속적이고 가는 선형으로 OH가 존재함을 보여준다. OH는 분사기 앞전 재순환 영역뿐만 아니라 경사가 급한 공형 충격파 후방에서 주로 생성되며, 제트 전단층의 에디와 함께 분사기 후방으로 흘러간다. 또한 연료 제트의 중심부에서는 OH 신호가 관측되지 않는 것으로 보아 이 영역에서는

연료와 공기의 혼합이 활발하지 않은 것으로 보인다. Fig. 1(b)는 계산에서 얻어진 OH 분포로서 위에서 언급한 특징을 전반적으로 잘 나타내고 있다. 그러나 계산의 공간 해상도는 실험에서 관찰되는 미세한 구조의 OH 분포를 포착하기에는 충분하지 않다.

Ben-Yakar et al.의 실험에서 상대적으로 차가운 수소 연료가 뜨거운 고속 주 유동에 분사됨에 따라 연료-공기의 혼합층에는 당량비 및 온도의 변화가 급격하게 일어난다. 수소-공기의 점화 시간은 혼합기의 온도에 지수적으로 의존하며, 따라서 낮은 당량비(즉, 높은 온도)에서 자발 점화가 발생할 것으로 예상된다. Ben-Yakar et al.은 그들의 OH-PLIF 결과로부터 점화 지연 시간을 예측하고자 하였다. 카메라 노출 시간이 긴 정상 상태의 솔리텐 이미지로부터 충격파 관계식을 이용해 공형 충격파 후방의 정온도(T_{est})와 정압력(p_{est})을 구하고, 당량비에 따른 혼합기의 온도(T_{mix})는 간단한 1차원 엔탈피 관계식을 통해 측정하였다. 이를 바탕으로 x 축을 따라 몇몇 지점에서 점화 지연 시간을 측정하였으며, 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 수소 연료의 온도는 300K로 가정하였으며, 당량비 0.2인 연료 희박조건(희박조건에서 혼합기의 온도가 높다)에서 점화가 발생하는 것으로 가정하였다. 계산에서는 앞서 언급된 과정과 유사하지만 보다 정확한 계측을 통해 점화 시간을 측정하였으며, Fig. 2에서 실험 결과와 비교하였다.

Fig. 2에 나타난 실험 결과는 자발 점화가 주로 연료 분사기 근방에서 발생하며, 이때의 점화 지연 시간(τ_{est})은 약 1-2 μ s이다. 보다 하류의 $x/d \approx 6$ 에서는 점화 지연 시간이 증가하며($\tau_{est}=10\mu$ s 이상), 따라서 주어진 영역($\approx 10d$) 내의 유동 체류 시간을 증가하게 된다. 계산에서는 실험에 비하여 약 2배 정도의 긴 점화 지연 시간을 보여준다. 예를 들어, $\tau_{est}=10\mu$ s인 지점이 실험에서는 $x/d \approx 6$ 인데 반해, 계산에서는 $x/d \approx 3$ 이다. 실험과 계산 결과 사이에 차이가 존재함에도 불구하고, 자발 점화는 주로 분사기 근방에서 발생하며, 제트 전단층을 따라 분사기 후방으로 흘러가는 현상은 공통적이다. 분사기 후방에서는 점화

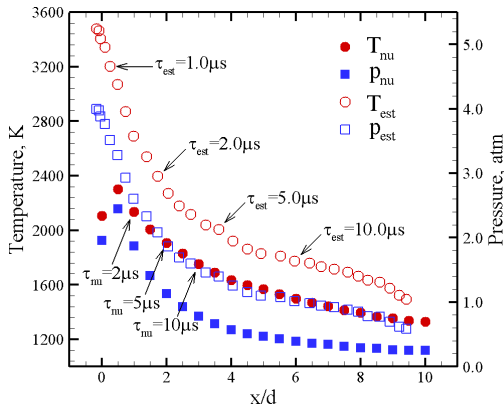


Fig. 2 Comparison of experimental and numerical ignition delay times of transverse jet

지연 시간이 유동 체류 시간보다 길기 때문에 OH는 해석 영역 내에서 새로 발생하지 않으며, 분사기 근방에서 발생한 OH가 주변 공기에 희석되어 분사기 후방에서 OH 신호는 약화된다.

실험과 계산의 점화 지연 시간 차이는 주로 계측 과정 및 기술적 어려움에 기인하는 것으로 생각된다. 매우 복잡한 3차원 수직 분사 유동장에서 실험적으로 유동의 물성 값을 계측하는 것은 쉽지 않다. 앞서 언급한 정상 상태의 슬리켄 이미지로부터 당량비가 0.2인 혼합층을 정의하기는 매우 어려우며, 따라서 당량비가 0.2인 지점의 정압력과 정온도의 측정에는 오류가 포함될 가능성이 있다. 또한 간단한 1차원 엔탈피 관계식으로부터 구해진 T_{mix} 와 300K로 가정된 수소 온도도 실제 값과 차이를 보인다. 이러한 불확실성으로 인해 실험을 통해 구해진 점화 지연 시간은 오류를 포함하고 있을 것으로 생각된다. 반면, 계산에서는 당량비가 0.2인 지점을 정확하게 정의 할 수 있으며, 이 지점에서 정압력(p_{nu}) 및 정온도(T_{nu}) 값을 계측할 수 있다. 그 결과 계산에서의 정온도 및 정압력 값은 실험에 비해 다소 낮게 측정되었다. 또한 실험에서 가정된 연료 온도(300K)에 비해 실제 연료 온도(246K)는 더 낮으며, 작은 온도 차이에도 불구하고 점화 지연 시간에 미치는 온도의 지수적 영향은 무시할 수 없을 것으로 생각된다. 이러한 계산의 낮은 정온도 및 정압력 값과 낮은 연료 온도로 인해 Fig.

2에 보여진 바와 같이 점화 지연 시간이 실험에 비해 길게 측정된 것으로 생각된다.

4. 결 론

초음속 유동내 연료의 수직분사에 의한 3차원 비정상 반응 유동에 대해 DES 난류 모델 및 상세 화학반응 모델을 이용해 해석을 수행하였다. 계산에서 구해진 OH 분포는 실험에서 구해진 OH-PLIF 결과를 잘 묘사하고 있다. 연료 제트의 전단층을 따라 연속적이고 가는 선형으로 존재하는 OH 분포는 자발 점화가 주로 분사기 근방의 급격한 공형 충격과 후방에서 발생하여 제트 전단층을 따라 동적 에디와 함께 후방으로 흘러감을 보여준다. 정량적 비교를 위해 점화 지연 시간이 측정되었으며, 계산에서의 점화 지연 시간은 실험 결과의 2배에 달했다. 이러한 차이는 점화 지연 시간을 측정하는데 있어 실험적 계측의 불확실성에 기인하는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Papamoschou, D. and Hubbard, D. G., "Visual Observations of Supersonic Transverse Jets," *Experiments in Fluids*, Vol. 14, No. 6, 1993, pp. 468-471.
2. Ben-Yakar, A., Mungal, M. G., and Hanson, R. K., "Time Evolution and Mixing Characteristics of Hydrogen and Ethylene Transverse Jets in Supersonic Crossflows," *Physics of Fluids*, Vol. 18, 2006. 026101.
3. Strelets, M., "Detached Eddy Simulation of Massively Separated Flows," AIAA Paper 2001-0879, 2001.
4. Smith, G. P., Golden, D. M., Frenklach, M., Moriarty, N. W., Eiteneer, B., Goldenberg, M., Bowman, C.T., Hanson, R.K., Song, S., Gardiner Jr., W.C., Lissianski, V.V., and Qin, Z., GRI-Mech, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/