

초음속 유동내 수직분사 유동의 시간 전개에 따른 특성

원수희* · 문성영** · 정인석*** · 최정열****

Time Evolution Characteristics of Transverse Injection into a Supersonic Crossflow

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

ABSTRACT

Unsteady 3D flowfields generated by transverse fuel injection into a supersonic mainstream are simulated with a DES turbulence model. Comparisons are made with experimental results in term of the temporal eddy position and eddy formation frequency. Results indicate that the DES model correctly predicts the convection characteristics of the large scale eddies. However, it is also observed that the numerical results slightly overpredict the eddy formation frequency.

초 록

초음속 주 유동내 연료의 수직분사 유동장에 대한 비정상 3차원 수치해석이 DES 난류 모델을 이용하여 수행되었다. 해석 결과는 시간에 따른 에디의 위치 및 에디 생성 빈도에 대하여 실험과 비교되었다. DES 난류 모델은 에디의 대류 특성을 비교적 정확하게 모사하고 있는 반면에 에디 생성 빈도는 다소 과대 예측하고 있다.

Key Words: DES Turbulence Model(DES 난류 모델), Convection Characteristics(대류 특성), Eddy Formation Frequency(에디 생성 빈도)

1. 서 론

스크램제트 엔진의 핵심적인 소요기술 가운데 하나는 유동이 연소기 내부에 머무는 수 ms의 짧은 시간 동안 연료와 공기의 혼합 및 연소 반

응을 효율적이고 안정적으로 구현하는 것이다. 이러한 짧은 유동의 잔류 시간에 의해 발생하는 한계를 극복하기 위해 연료 분사기의 형태와 분사 방법에 대한 다양한 연구가 진행되었으며, 가장 간단하면서도 효율적인 방법 가운데 하나가 벽면에서의 수직분사이다.

수직분사는 가장 간단한 분사 방법 중의 하나이나 이로 인해 발생하는 유동 구조는 다소 복잡하다. 과소팽창 상태의 분사기 출구 유동은 초음속 주 유동과 충돌하여 bow shock, Mach

* 서울대학교 대학원 항공우주공학과
** 부산대학교 대학원 항공우주공학과
*** 서울대학교 항공우주공학과
**** 부산대학교 항공우주공학과
연락처, E-mail: aerochoi@pusan.ac.kr

disk, barrel shock 등과 같은 복잡한 3차원 유동 구조를 형성한다. 또한 초음속 주 유동과 수직분사 유동의 충돌은 horseshoe vortex, jet-shear layer vortex, counter-rotating vortex pair, wake vortex 등과 같은 연료와 공기의 혼합을 증진시키는데 중요한 역할을 하는 다양한 간섭구조(coherent structure)를 발생시킨다. 초음속 유동 내 수직분사 유동의 흥미로운 특징 가운데 하나는 분사기 출구의 제트 유동 근처에서 발생하는 에디의 동적 거동이며, 이러한 현상은 유동장 전반에 걸쳐 macro-mixing에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

본 연구는 DES (Detached Eddy Simulation) 난류 모델을 이용하여 초음속 유동 내 수직분사 유동의 동적 에디 거동을 살펴 그 특성을 알아보고자 한다. 수치적 연구 대상은 Ben-Yakar et al.의 실험을 선택하였다[1]. Expansion tube를 이용한 Ben-Yakar et al.의 수직분사 실험은 다른 실험적 연구에 비해 스크램제트 운용조건과 유사한 환경에서 수행되었으며, 초고속 카메라를 이용하여 초음속 혼합 유동장의 연속적인 순간 이미지를 포착함으로써 분사기 주변 에디의 동적 거동을 살펴보는데 적합하다.

2. 수치적 접근 방법

초음속 유동 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 사용하였다. 차분된 방정식은 2차 정확도의 완전 내재적 시간적분을 수행하였으며, 시간 정확도와 해의 안정성을 위해 Newton 반복계산이 부차적으로 사용되었다.

난류 모델은 Strelets에 의해 제안된 SST-DES 가 사용되었으며[2], 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.

경계조건은 자유류가 초음속이므로 입구조건인 경우 주어진 마하 수에 대하여 고정된 형태로 주어졌으며, 윗면은 계산 영역 내부에서 발생한 충격파가 영향을 미치지 않을 만큼 충분히 멀기 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. 그 외에 계산의 편의를 위하여 분사기 앞전 $5d$ 이전은 2차원 평판유동을 계산하여 초기조건으로 사용하였다. 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 _{dj}	1.5 × 10 ⁵

¹ distance of injector from plate leading edge

² boundary layer thickness at the injector

3. 계산 결과 및 고찰

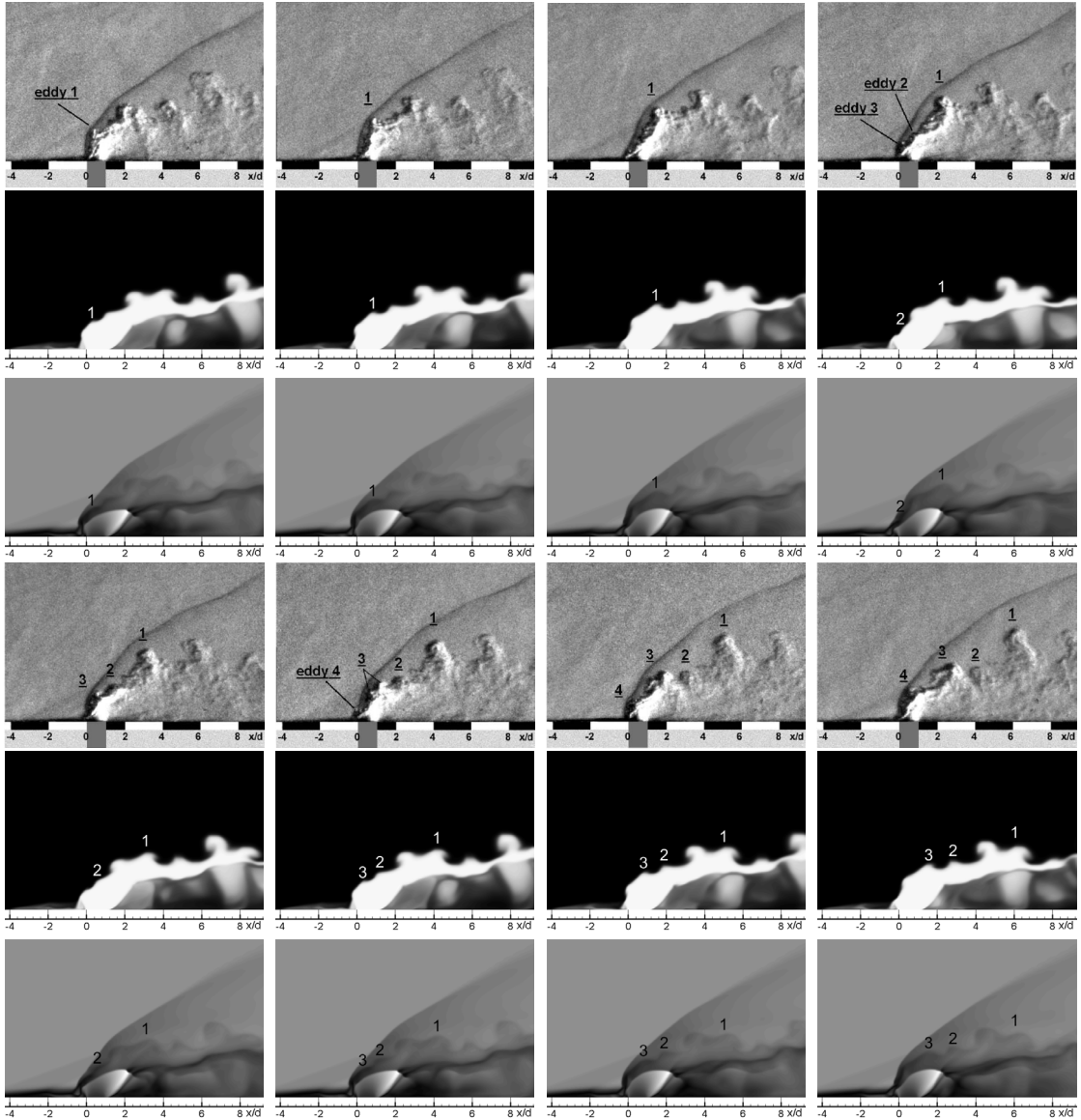


Fig. 1 Consecutive schlieren(left), y_{-H_2} (center) and Mach(right) images of underexpanded hydrogen injection ($d=2\text{mm}$) into a supersonic crossflow. Exposure time of schlieren image is 100 ns and interframing time is 1 μs .

실험은 마하 수 10의 속도로 비행하는 스크램 제트 엔진의 연소기 조건에 해당하며, 초고속 카메라를 이용하여 초음속 혼합 유동장을 연속 촬영함으로써 에디의 동적 거동을 포착하였다. 초고속 카메라의 노출 시간 100ns이며, 연속 사진 사이의 시간 간격은 1 μs 이다.

실험에서 분사기 출구 주변에 발생하는 에디는 비교적 주기적인 거동을 보이며, 유동장 하류까지 유지되고 있다. 생성된 에디는 유동을 따라 흐르면서 성장하고, 에디 사이에 자유류를 포획함으로써 연료-공기의 표면적 확대 및 밀도 구배에 의해 혼합이 증진된다. 분사기 앞전 충격파는

분사 제트에 부착된 형태로, 국부적 에디의 영향을 받아 위치와 형상이 가변적이다. 계산에서도 언급한 유동장의 특징(에디의 주기적 거동, 혼합 특성, 국부적 충격과 변화)을 잘 모사하고 있다. 특히, 실험에서 잘 나타나지 않는 과소 팽창 제트의 barrel shock 및 Mach disk가 관찰되고 있는데, 이는 초음속 수직분사 유동의 비정상성과 광경로를 따라 밀도 구배를 중첩하여 표현하는 슐리켄 기법의 영향도 포함된 것으로 보인다. 한편, 실험과 계산의 #1 에디에 대하여 시간에 따른 위치를 비교해보면 거의 동일하다. 이는 본 DES 계산이 초음속 수직분사 유동장의 대류 특성을 잘 모사하고 있음을 의미한다. 반면에, 에디 생성 빈도(eddy formation frequency)의 경우 실험에서는 $7\mu\text{s}$ 동안 4개의 에디가 생성되나, 계산에서는 $10\mu\text{s}$ 동안 4개의 에디가 생성된다.

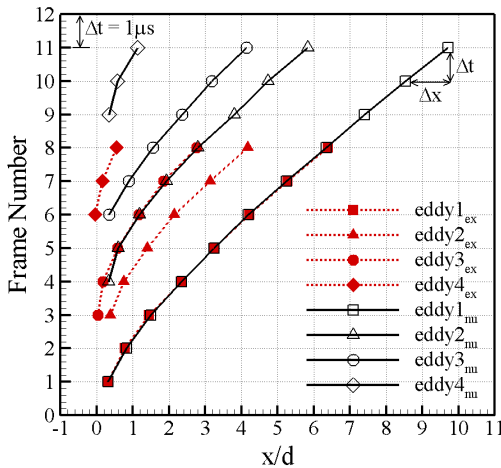


Fig. 2 Space-time trajectories of large-scale eddies

보다 정량적인 비교를 위해 시간과 공간에 따른 에디의 경로(s-t diagram)를 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 에디 생성 초기에는 수직 분사 속도 성분으로 인해 에디간 간격이 좁으나(즉, 주유동 방향의 에디 속도가 느리다), 유동장 하류로 갈수록 에디의 속도는 증가하여 최대 주 유동 속도의 90%까지 이른다. 또한, 앞서 언급한 바와 같이 실험과 계산의 #1 에디는 매우 정확하게 일치하고 있을 뿐만 아니라 실험의 #3

와 계산의 #2 에디의 경로도 잘 일치하고 있다. 다만 실험과 계산의 에디 번호의 불일치는 에디 생성 빈도의 차이에 기인한다. 한편, 실험에서는 에디의 생성 위치와 주기가 다소 불규칙적이지만, 계산에서는 매우 규칙적이다. 계산에서 에디의 생성 위치는 대략 $0.3d$ 로 거의 동일하며, #1 및 #3 에디와 #2 및 #4 에디의 시간에 따른 위치가 매우 유사하다.

실험과 계산의 에디 생성 빈도의 차이는 일정하게 주어진 분사 유동 조건 및 분사기 앞전 경계층의 난류 강도의 차이에 기인하는 것으로 생각된다. 이러한 차이는 에디가 생성되는 분사기 출구 주변 유동장에 영향을 미치고 결과적으로 에디 생성 빈도를 결정하는 Kelvin-Helmholtz instability에 영향을 미치는 것으로 생각된다.

4. 결 론

마하 수 10의 속도로 비행하는 스크램제트 연소기의 초음속 수직분사 유동에 대해 DES 난류 모델을 이용한 비정상 해석을 수행하였다. 시간의 경과에 따른 유동장내 에디의 위치 및 에디 생성 빈도에 대하여 실험과 계산의 결과가 비교되었다. DES 난류 모델을 이용한 수치해석 결과는 초음속 수직분사 유동장의 대류 특성을 비교적 정확하게 모사하고 있는 반면, 에디 생성 빈도는 다소 과대 예측 결과를 보여주었다.

참 고 문 헌

1. 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.
2. Strelets, M., "Detached Eddy Simulation of Massively Separated Flows," *AIAA Paper* 2001-0879, 2001.