

論文

DES를 이용한 초음속 유동내 수직 연료분사 유동의 비정상 3차원 해석

Part II : 반응 유동장

원수희*, 정인석**, 최정열***

Unsteady Three-Dimensional Analysis of Transverse Fuel Injection
into a Supersonic Crossflow using Detached Eddy Simulation

Part II : Reacting Flowfield

Su-Hee Won*, In-Seuck Jeung** and Jeong-Yeol Choi***

ABSTRACT

Unsteady three-dimensional reacting flowfield generated by transverse hydrogen injection into a supersonic mainstream is 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. The intermittency phenomena are identified by the comparative analysis between RANS and DES. Those effects are also quantified by the temperature distributions along streamlines and superimposed OH mass fraction along with time.

초 록

초음속 주 유동내 수소의 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 모사하고 있다. 반면, 점화 지연 시간은 계산과 실험 사이에 차이를 보이고 있으며, 이는 실험적 측정의 한계에 기인하는 것으로 생각된다. RANS 및 DES 계산 결과의 비교로부터 간헐 현상을 확인하였으며, 유선을 따른 온도 분포 및 중첩된 OH 질량 분율을 통해 시·공간적 간헐 현상을 정량적으로 측정하였다.

Key Words : DES(Detached Eddy Simulation), Autoignition(자발 점화), Ignition Delay (점화 지연), Intermittency Phenomena(간헐 현상)

1. 서 론

† 2009년 6월 9일 접수 ~ 2009년 8월 24일 심사완료

* 정희원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원, 부산대학교 부품소재산업협력연구소

** 정희원, 서울대학교 기계항공공학부, 항공우주신기술연구소

*** 정희원, 부산대학교 항공우주공학과
교신저자, E-mail : aerochoi@pusan.ac.kr
부산시 금정구 장전동 산 30번지

본 논문은 초음속 주 유동내 연료의 수직분사에 따른 비정상 비반응 유동장 해석을 다룬 이전 논문[1]에 이어 비정상 반응 유동장에 대한 해석을 수행한다. 이전 논문에서 언급한 바와 같이, 수직분사는 형상적 단순함에도 불구하고 이로 인

해 발생하는 유동의 구조는 매우 복잡하다. 과소 팽창하는 분사기 출구 유동은 초음속 주 유동과 충돌하여 궁형 충격파(bow shock), Mach disk, barrel shock 등과 같은 복잡한 3차원 충격파 구조를 형성한다. 또한, 초음속 주 유동과 수직분사 유동의 충돌은 말굽 와류(horseshoe vortex), 제트-전단층 와류(jet-shear layer vortex), 엇회전하는 와류쌍(counter-rotating vortex pair), 후 와류(wake vortex) 등과 같은 연료와 공기의 혼합을 증진시키는데 중요한 역할을 하는 다양한 간섭 구조(coherent structure)를 발생시킨다.

이전 논문으로부터 비반응 유동장의 Detached Eddy Simulation (DES) 해석 결과는 순간 유동장의 비정상 간섭 구조를 포착하며, 시간 평균된 유동장의 정상 상태 특징을 보여주는 등 정성적으로 실험 결과를 잘 따른다. 또한 연료 제트의 침투 높이 및 분포 두께 등과 같은 실험 결과와의 정량적 비교를 통해 계산 결과의 신뢰성을 확인하였다. 이를 바탕으로 초음속 수직분사 유동장의 에디(eddy) 생성 메커니즘과 동적 거동 등을 분석함으로써 연료-공기의 혼합 특성을 살펴 보았다. DES 난류 모델은 초음속 주 유동내 연료의 수직분사에 따른 비반응 유동장을 전반적으로 정확하게 모사하고 있으며, 이러한 검증은 바탕으로 반응 유동장에 적용하고자 한다.

최근의 실험적 논문들은 향상된 실험 장치 및 계측 기법에 힘입어 초음속 유동내 수직분사 유동장의 비정상 특성을 매우 잘 보여준다[2-3]. 특히, Ben-Yakar et al.은 초고속 카메라와 OH-PLIF 기법을 이용해 시간에 따른 유체역학적 불안정성을 비반응 및 반응 유동장에서 포착하는데 성공하였다[4]. 한편, 초음속 비정상 유동에 대한 수치적 접근은 Large Eddy Simulation (LES) 및 DES를 이용해 최근 시도되고 있으나, 고 레이놀즈수의 초음속 유동장 해석에 따른 계산비용의 문제로 인해 매우 제한적이며[5-7], 반응 유동장에 대한 해석은 더욱 드물다. Choi et al.[8]은 수직분사와 공동이 포함된 스크램제트 형상의 연소기 내부 난류 반응 유동장에 대한 수치적 연구를 수행하여, 유동의 불안정성이 공동뿐만 아니라 밀도 구배에 입사하는 충격파에 의해서도 발생함을 보였다. 그럼에도 Choi et al.의 연구는 2차원 형상에서 수행되었기 때문에 실질적인 3차원 유동 특성을 보여주는 데 한계가 존재한다. Von Lavante et al.[9]은 LES 및 상세 화학반응을 이용하여 3차원 수직분사 유동장에 대한 해석을 수행하였으나, 난류 반응 유동장에 대한 정성적 특성만을 언급하였다.

본 연구에서 해석의 대상으로 삼은 Ben-Yakar et al.의 실험은 마하 수 10의 속도로 비행하는 스크램제트 엔진의 연소기 조건에 해당한다. 이와 같은 큰 전엔탈피 극초음속 유동 조건으로 인해 Ben-Yakar et al.은 기존의 blow-down 형식의 풍동 대신 expansion tube를 이용하였다. 또한 Ben-Yakar et al.의 실험은 초고속 카메라 및 OH-PLIF 기법을 이용하여 초음속 반응 유동장의 상세 구조를 살펴보는 데 적합하다. 본 연구는 DES 난류 모델 및 상세 화학반응 모델을 이용하여 초음속 유동내 수직으로 분사하는 수소 연료에 의한 비정상 반응 유동장의 특성을 살펴보고자 한다. 먼저 계산을 통해 구해진 OH 분포와 실험의 OH-PLIF 결과를 비교하여 초음속 수직분사 유동장의 자발 점화(autoignition) 및 화염 유지(flame-holding) 특성을 살펴보고, 점화 지연(ignition delay) 시간이 미치는 영향을 알아보고자 한다. RANS 및 DES 계산 결과의 비교를 통해 난류 연소 유동장의 간헐 현상(intermitency phenomena)을 확인하고, 시·공간적 간헐 현상을 정량적으로 살펴보고자 한다.

II. 수치적 접근방법

2.1 지배방정식

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

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial z} = \frac{\partial \mathbf{E}_v}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}_v}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}_v}{\partial z} + \mathbf{W} \quad (1)$$

위의 식에서 \mathbf{Q} 는 보존 변수 벡터를 의미하며, \mathbf{E} , \mathbf{F} , \mathbf{G} 및 \mathbf{E}_v , \mathbf{F}_v , \mathbf{G}_v 는 각각 비점성 유동 벡터와 점성 유동 벡터이며, \mathbf{W} 는 반응 및 난류에 의한 생성항을 의미한다. 해석을 위해서 사용된 수치적 기법 및 DES 난류 모델에 대한 내용은 이전 논문에서 상세하게 기술하였다[1].

이 외에 반응 유동 해석은 초음속 주유동 및 분사기 출구 유동을 포함한 계산 조건이 비반응 유동장과 동일한 경우에 대해 수행되었으며, 계산 영역을 비롯한 경계 조건 또한 비반응 유동장과 동일하게 처리하였다. 계산에 사용된 격자 역시 $x \times y \times z = 234 \times 150 \times 138$ 로서 비반응 유동장의 격자 세분화 연구를 통해 결정되었으며, 영역분할기법과 MPI 표준 라이브러리를 이용하여 병렬 계산을 수행하였다.

2.2 화학반응 모델

수소-산소 화학반응을 위해 25단계 8화학종(H, H₂, O, O₂, H₂O, OH, H₂O₂, HO₂)의 GRI-Mech 3.0 화학반응 모델을 사용하였다[10]. N₂의 해리에 의한 산화물의 생성은 충격과 유도 연소와 같은 문제에서 전체적인 유동장에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있으므로 N₂를 비활성 기체로 가정하였다. 상세 화학반응 모델에 대한 자세한 내용과 검증은 이전 연구에서 수행되었기 때문에 여기서는 생략한다[11].

초음속 반응 유동장에서 중요한 문제 가운데 하나는 난류와 화학반응 사이의 상호작용이다. 최근 들어 PDF(Probability Density Function) 및 Flamelet 이론 등과 같은 다양한 연소 모델을 통해 난류와 화학반응 사이의 상호작용에 대한 설명이 시도되고 있으며, 많은 진전이 이루어졌음에도 불구하고 층류 연소로부터 얻어진 결과와 큰 차이를 보여주지 못하고 있다. Norr칩류 et al.은 해멘하고확성이 난류-화학반응 상호작용에 의한 영향뿐만 아니라 격자 해상도에 크게 의존함부터 여주었다[12]. 특히, 초음속 유동장에서 난류-화학반응 상호작용에 대한 신뢰할만한 모델의 부재로 인해 본 연구에서는 화학반응에 대한 난류의 효과를 고려하지 않았다.

III. 초음속 난류 반응 유동장

3.1 자발 점화 및 점화 지연

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 유동장에서의 높은 변형률은 연소를 억제하는 역할을 한다. 일반적으로 초음속 반응 유동장의 자발 점화를 위해서는 적절한 정온도, 정압력, 당량비 및 유동 체류 시간이 필요하다. 수직분사 유동장에서는 분사기 앞전 재순환 영역과 궁형 충격과 후방이 이에 해당한다. 분사기 앞전 재순환 영역은 긴 체류 시간과 높은 정온도 조건으로, 궁형 충격과 후방은 높은 정온도 및 정압력 조건으로 인해 자발 점화가 발생하기 용이하다.

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 발생

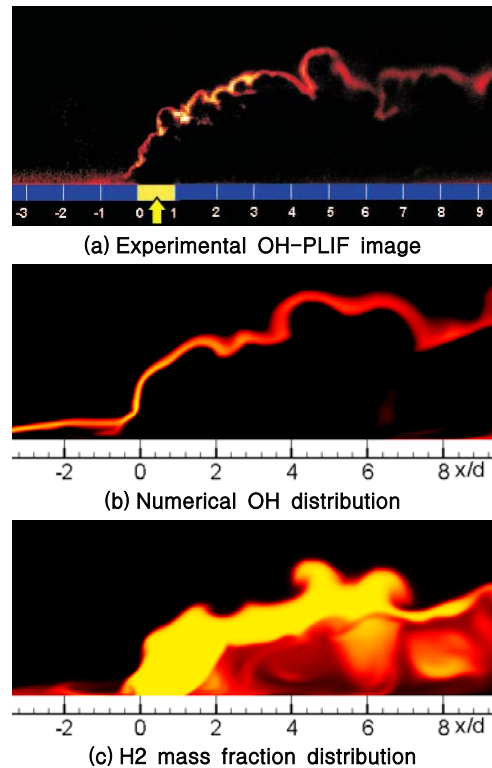


Fig. 1. Experimental OH-PLIF and corresponding numerical images at the jet center plane

하는 영역을 표시한다. Fig. 1(a)는 실험의 OH-PLIF 이미지로 제트의 전단층을 따라 연속적이고 가는 선형으로 OH가 존재함을 보여준다. OH는 분사기 앞전 재순환 영역뿐만 아니라 경사가 급한 궁형 충격과 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 전기의 혼합잘 나타내고 있다. 그러나 계산의 공간 해상도는 실험에서 관찰되는 미세한 구조의 OH 분포를 포착하기에는 충분하지 않으며, 실험의 미세 구조 OH 분포는 Direct Numerical Simulation(DNS)급의 계산이 포착할 수 있을 것으로 생각된다. Fig. 1(c)는 수소 연료의 질량 분율 분포를 나타낸 것으로, 제트 전단층의 에디 거동을 보여준다. Fig. 1(b)와 Fig. 1(c)의 비교를 통해 반응 영역이 제트 전단층의 에디와 주 유동 사이의 경계 영역에 존재함을 확인할 수 있다.

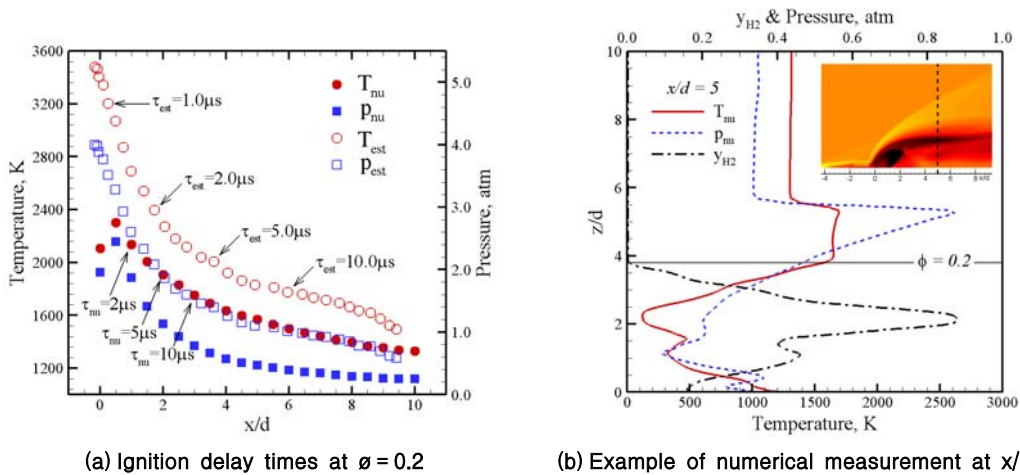


Fig. 2. Comparison of experimental and numerical ignition delay time of hydrogen transverse jet

Ben-Yakar et al.의 실험에서 상대적으로 차가운 수소가 뜨거운 고속 유동에 분사됨에 따라 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 실험적 OH-PLIF 결과로부터 점화 지연 시간을 계산하였다. 카메라 노출 시간이 긴 정상 상태의 솔리덴 이미지(ref. 1의 Fig. 9(a))로부터 충격파 관계식을 이용해 궁형 충격파 후방의 정온도(T_{est})와 정압력(p_{est})을 구하고, 당량비에 따른 혼합기의 온도(T_{mix})는 간단한 1차원 엔탈피 관계식을 통해 계산하였다. 이를 바탕으로 x 축을 따라 몇몇 지점에서 점화 지연 시간(τ_{est})을 계산하였으며, 그 결과를 Fig. 2(a)에 나타내었다. 수소 연료의 온도는 300 K로 가정하였으며, 당량비 $\phi = 0.2$ 인 연료 희박조건에서 점화가 발생하는 것으로 가정하였다[13].

전산해석은 유동장내 위치에 따른 당량비 및 그 지점의 정압력(p_{nu})과 정온도(T_{nu})를 직접 추출함으로써 점화 지연 시간(τ_{nu})을 보다 정확하게 계산할 수 있다. Fig. 2(a)에 나타난 Ben-Yakar et al.의 결과는 자발 점화가 주로 연료 분사기 부근에서 발생하며, 이때의 점화 지연 시간(τ_{est})은 약 1-2 μs 이다. 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. 전산해석에서는 실험에 비하여 약 2배 정도의 긴 점화 지연을 보여준다. 예를 들어, $x/d \approx 3$ 에서 실험에서는 $\tau_{est} \approx 5 \mu s$ 인데 반해, 전산해석에서는 $\tau_{nu} \approx 10 \mu s$ 이다. 실험과 전산해석 결과 사이의 차이에도 불구하고, 자발 점화는 주로

분사기 근방에서 발생하며, 제트 전단층을 따라 분사기 후방으로 흘러가는 현상은 공통적이다. 분사기 후방에서는 점화 지연 시간이 유동 체류 시간보다 길기 때문에 OH는 해석 영역 내에서 새로 발생하지 않으며, 분사기 부근에서 발생한 OH가 주변 공기에 희석되어 분사기 후방에서 OH 신호는 약화된다.

Ben-Yakar et al.과 본 연구의 점화 지연 시간 차이는 주로 Ben-Yakar et al.의 연구에서 점화 지연을 직접 측정하기 어렵기 때문에 가시화 실험으로부터 얻은 추정치로부터 많은 가정을 통해 점화 지연을 예측하였기 때문으로 여겨진다. 앞서 언급한 정상 상태의 솔리덴 이미지로부터 당량비가 0.2인 혼합층을 정의하기는 어려우며, 따라서 당량비가 0.2인 지점의 정온도(T_{est})와 정압력(p_{est})의 계산에는 오류가 포함될 가능성이 있다. 또한 간단한 1차원 엔탈피 관계식으로부터 구해진 혼합기의 온도(T_{mix})와 300 K로 가정된 수소 온도도 실제 값과 차이를 보인다. 이러한 불확실성으로 인해 실험을 통해 계산된 점화 지연 시간(τ_{est})은 오류를 포함하고 있을 것으로 생각된다. 반면, 전산해석에서는 Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 당량비가 0.2인 지점을 정확하게 정의할 수 있으며, 이 지점에서 정압력(p_{nu}) 및 정온도(T_{nu}) 값을 추출할 수 있다. 그 결과 전산해석에서의 정온도 및 정압력 값은 실험에 비해 다소 낮게 예측되었다. 또한 실험에서 가정된 연료 온도(300 K)에 비해 실제 연료 온도(246 K)는 더 낮으며, 작은 온도 차이에도 불구하고 점화 지연 시간에 미치는 온도의 지수적 영향은 무시할 수 없을 것으로 생각된다. 이러한 전산해석의 낮은 정온도 및 정압력 값과 낮은 연료 온도로 인해

Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 점화 지연 시간이 실험에 비해 길게 나타난 것으로 생각된다.

3.2 난류 반응 유동의 가시화

본 단락은 수직분사 유동장의 난류 반응 유동에 대해 살펴보고자 한다. 순간 또는 시간 평균

된 DES 결과를 RANS 결과와 비교하고, 이를 통해 정성적인 난류 연소 효과를 살펴볼 것이다.

Fig. 3은 RANS 및 DES 계산을 통해 OH 질량 분율 분포를 나타내었다. 먼저 RANS를 이용한 화염면의 공간적 분포를 Fig. 3(a)에 나타내었다. $y/d = 0$ 의 측면(side-view) 이미지는 부드럽고

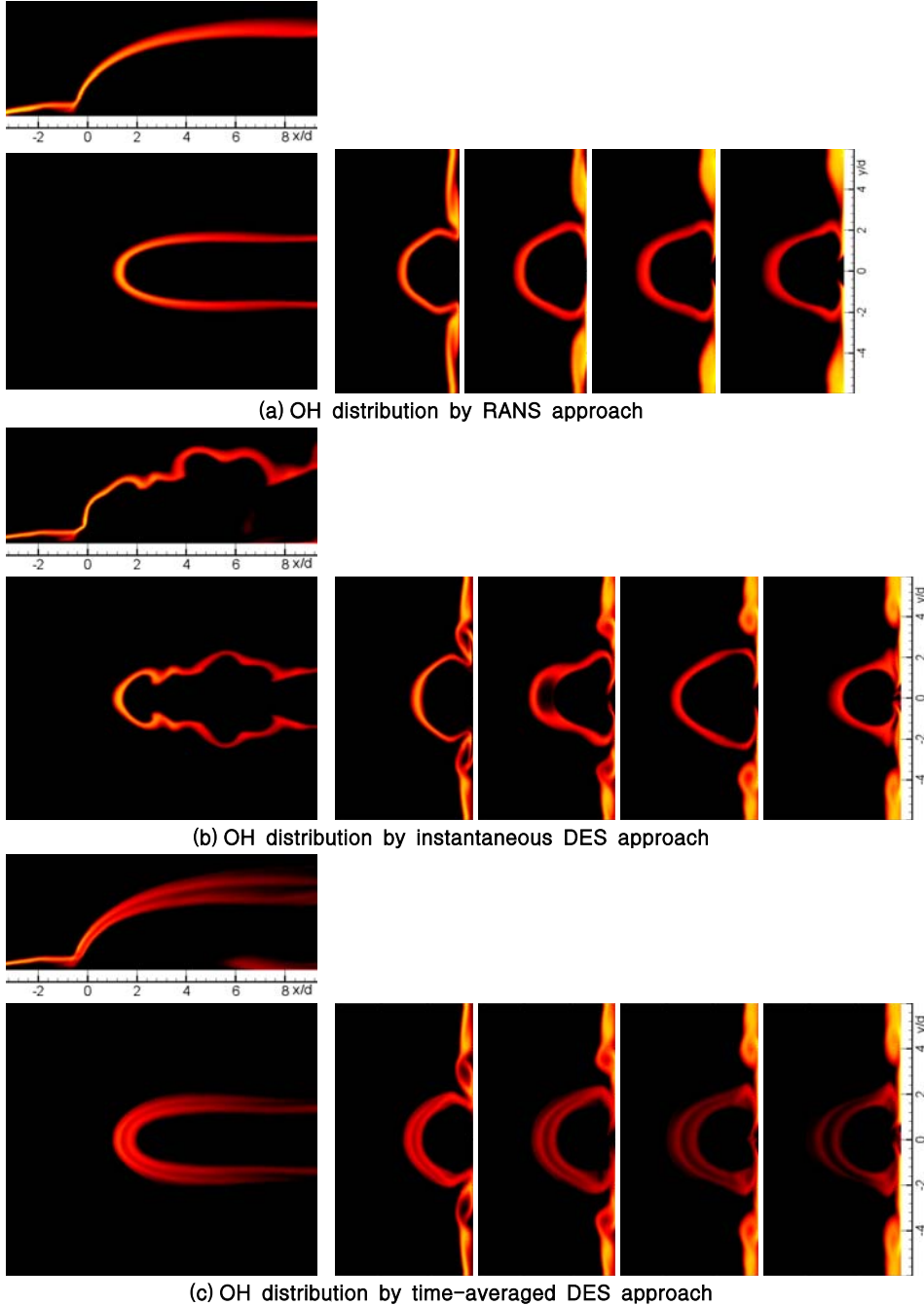


Fig. 3. Spatial OH distribution in the near field of hydrogen jet

얇은 화염면이 연료 제트의 바깥 경계를 따라 분포하고 있음을 보여주고 있으며, 유사한 결과가 $z/d = 2$ 의 횡단면(top-view) 이미지에서도 관찰된다. $x/d = 0 \sim 8$ 의 연속적인 종단면(end-view) 이미지는 유동 진행 방향에 따라 화염면이 성장하고 있음을 보여준다. RANS 난류 모델은 본질적으로 모든 크기의 난류 구조를 평균화하며, 난류와 연소 간의 상호작용이 고려되지 않아 화염면의 평균화된 분포만을 보여준다. RANS 계산에서 반응은 상대적으로 좁은 영역에서 존재한다.

한편, Fig. 3(b)의 DES 결과는 화염면의 비정상 거동을 잘 보여준다. 측면 및 횡단면 이미지에서 화염면의 수직 및 수평 방향으로의 동적 거동이 명확히 관찰되며, 연속적인 종단면 이미지에서는 화염면의 불규칙한 성장 과정이 관찰된다. 이러한 화염면의 비정상 거동은 주 유동과 수직분사 연료의 충돌에 의해 발생하는 다양한 간섭구조에 따른 영향 때문이다. DES는 난류 반응 유동장에서 화염면의 간헐 현상을 포착하고 있으며, 이러한 간헐 현상은 DES 난류 모델의 중요한 장점 가운데 하나이다. 또한 주어진 위치에서 화염의 존재 가능성을 판단하기 위해서는 유동의 간헐적 특성이 반드시 고려되어야 한다.

Fig. 3(c)는 시간 평균된 DES 결과이다. 시간 평균된 DES 결과는 정상 상태 유동장의 화염 분포 특성을 나타내며, RANS 결과와 비교될 수 있을 것이다. RANS와 비교해 시간 평균된 DES 결과는 보다 넓은 화염 분포를 보여준다. 이러한 넓은 화염 분포는 앞서 언급된 유동장의 간헐 현상으로 설명될 수 있다. Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 유동의 간섭 구조에 의해 주름진 화염면은 매순간 공간적 위치가 변화하며, 변화하는 화염면의 끝단 위치에 의해 시간 평균된 화염의 분포가 결정된다. 따라서 화염면의 비정상 거동이 고려된 시간 평균된 DES 결과가 정상 상태의 화염 분포 영역을 보다 정확하게 보여준다고 할 수 있을 것이다.

Fig. 4는 H_2O 질량 분율 분포에 대한 RANS 및 DES 계산 결과를 비교하여 나타내었다. 연소 과정의 부 화학종인 OH의 공간적 분포는 화염면의 위치와 일치하는 반면, 연소 과정의 주 화학종인 H_2O 의 공간적 분포는 반응 유동장의 전반적인 정보를 제공해준다. RANS에 의한 H_2O 질량 분율 분포를 Fig. 4(a)에 나타내었으며, 측면과 횡단면 이미지로부터 연료 집중(fuel-core) 영역을 따라 미연(unburned) 영역이 존재함을 확인할 수 있다. 즉, 연료 집중 영역에서는 반응이 활발하지 않다. 또한 OH와 달리 H_2O 질량

분율 분포의 종단면 이미지에서는 엷회전하는 와류쌍 구조가 관찰되며, 유동 진행 방향에 따라 대칭형의 와류쌍 구조 또는 기연(burned) 영역이 성장한다.

DES에 의한 Fig. 4(b)의 H_2O 질량 분율 분포는 Fig. 3(b)의 OH 질량 분율 분포와 마찬가지로 반응 유동장의 비정상 거동을 잘 보여준다. 그러나 OH 분포가 연료 제트 외부 화염면의 비정상 거동만을 보여주는 반면에, H_2O 분포는 연료 제트 외부뿐만 아니라 엷회전하는 와류쌍 구조를 포함한 연료 제트 내부의 비정상 거동도 함께 보여준다. 또한 RANS와 달리 DES 결과는 연료 제트 내부에서 유동 진행 방향을 따라 비대칭적으로 성장하는 와류쌍 구조 또는 기연 영역도 명확히 보여준다.

앞서 언급된 연료 제트 내외부의 비정상 거동에 대해 시간 평균된 H_2O 분포를 Fig. 4(c)에 나타내었으며, 역시 Fig. 4(a)의 RANS 결과와 비교될 수 있을 것이다. RANS 결과는 측면, 횡단면, 종단면 등 모든 이미지로부터 기연 영역이 상대적으로 좁은 영역에 집중되어 있으며, 연료 집중 영역을 따라 미연 영역도 넓게 존재한다. 반면, DES 결과는 RANS에 비해 기연 영역이 넓게 분포해 있으며, 연료 집중 영역을 따라 미연 영역도 훨씬 작다. 유동장 전반에 걸친 이러한 기연 영역의 확대는 앞서와 마찬가지로 간헐 현상으로 설명될 수 있을 것이다. 즉, 큰 스케일의 난류 구조는 화염 구조를 변화시킬 뿐만 아니라 연료-공기의 혼합 증진을 통해 활발한 반응을 유도하며, 이러한 결과는 시간 평균된 유동장에서 보다 넓은 화염 분포 및 기연 영역으로 나타난다.

3.3 간헐 현상의 정량화

이전 단락은 RANS와 DES 계산의 차이를 정성적으로 보여주었으나, 여기에서는 보다 정량적 비교를 위해 두 가지 방법을 이용한다. 고정된 시간의 유동장에서 공간에 따른 간헐 현상을 살펴보기 위해 유선(streamline)과 그에 따른 온도 분포를 추출하여 비교하였다. 한편, 유동장의 고정된 지점에서 시간에 따른 간헐 현상을 살펴보기 위해 시간에 따라 OH 질량 분율을 중첩하여 비교하였다.

Fig. 5는 RANS, 순간 DES 및 시간 평균된 DES 계산 결과로부터 6개의 지점에서 추출된 유선을 보여준다. 기준이 되는 유선은 $x/d = -5$, $y/d = 0$, $z/d = 1$ 에서 시작하며, 수직 및 수평 방향으로 각각 2개의 유선이 $1d$ 의 간격을 두고 추가되었다. 마지막 6번째 유선은 $x/d = 0.5$, $y/d = 0$, z/d

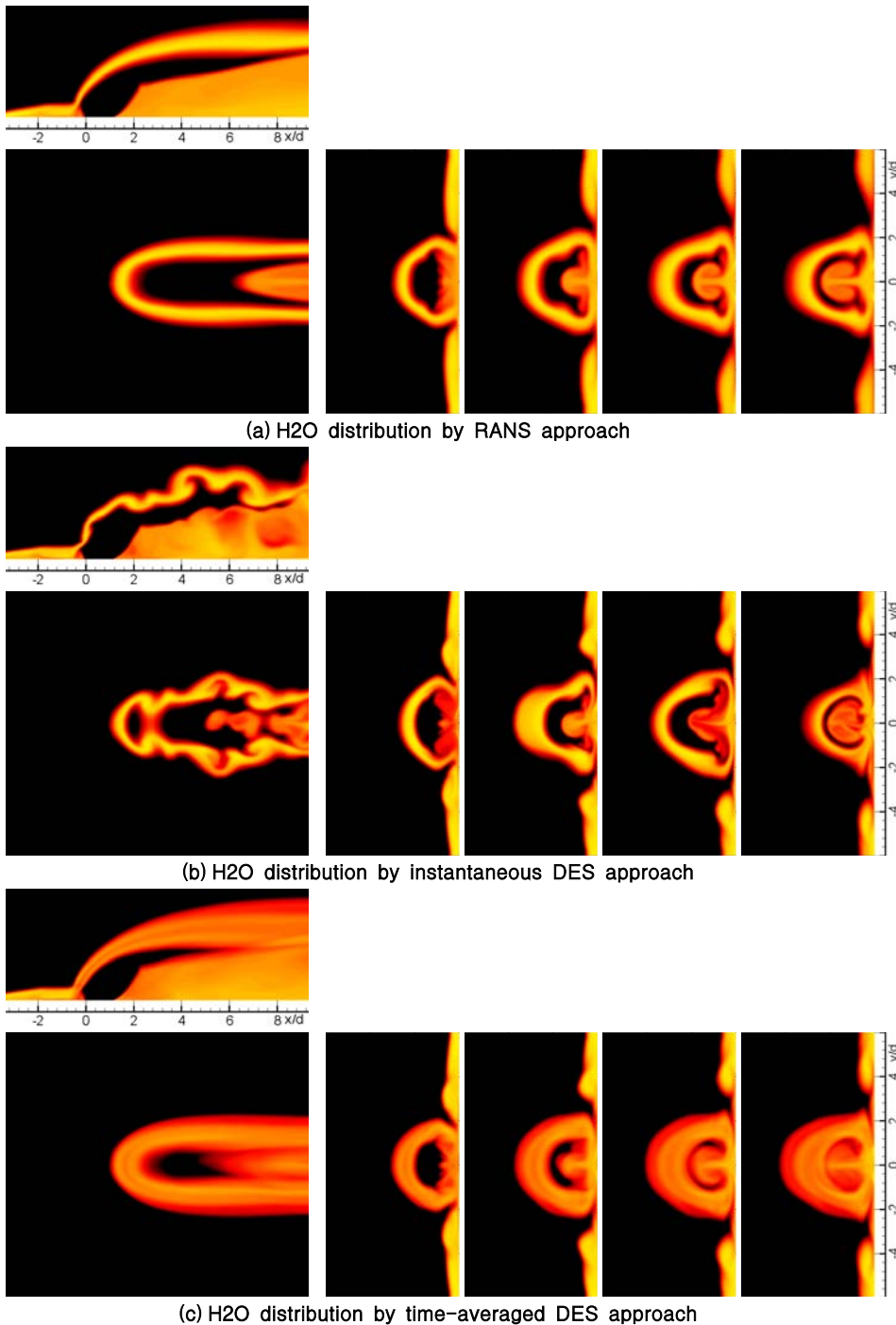


Fig. 4. Spatial H2O distribution in the near field of hydrogen jet

= 0인 분사기 중앙에서 시작한다. 유선은 유동장의 속도 벡터에 의해 영향을 받기 때문에, 속도 벡터의 변화가 상대적으로 큰 순간 DES 유동장의 경우 다른 두 경우에 비해 유선의 공간적 위

치에 차이가 존재한다. 그러나 RANS 및 시간 평균된 DES 유동장에서 유선의 공간적 위치의 차이는 3% 이내이다. 따라서 유선을 따라 RANS 와 시간 평균된 DES 결과를 비교하는 것은 공간

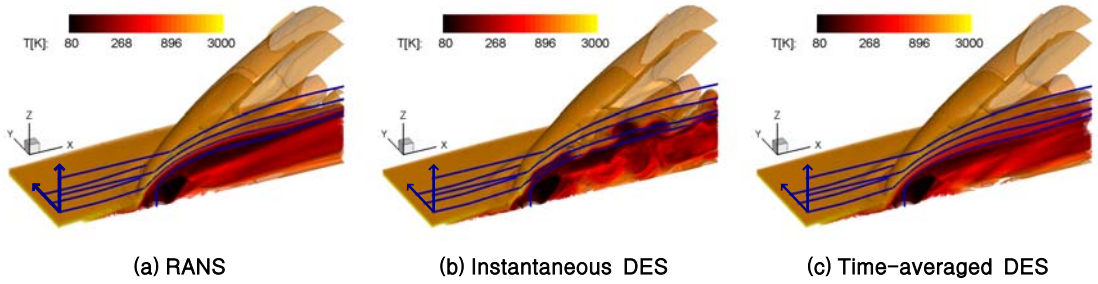


Fig. 5. Iso-surface of temperature and streamline positions

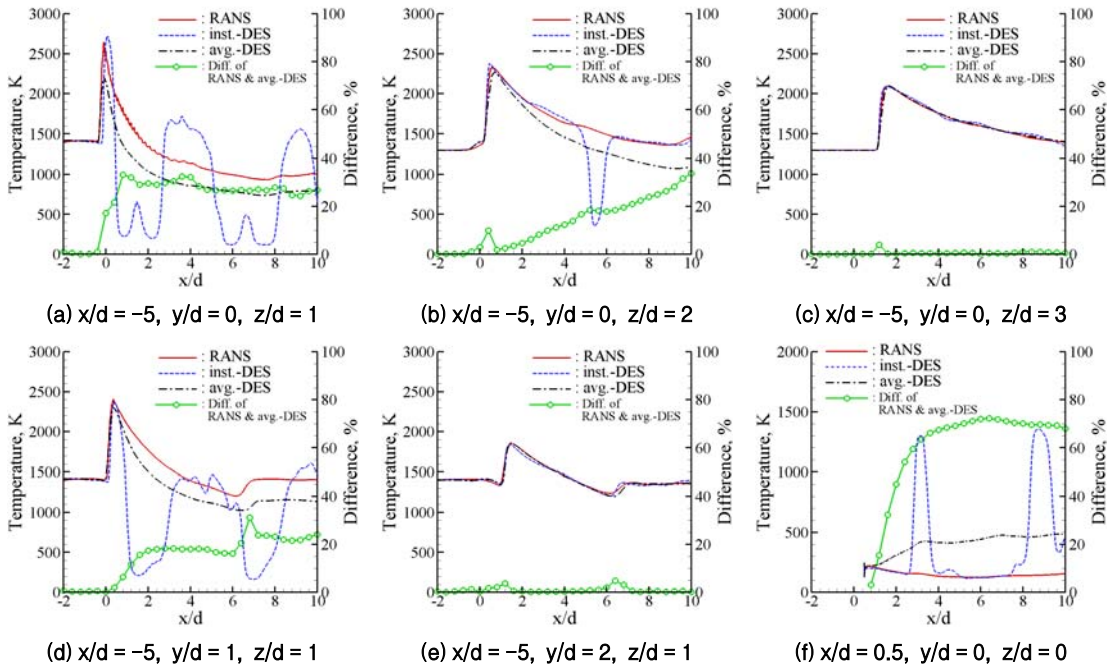
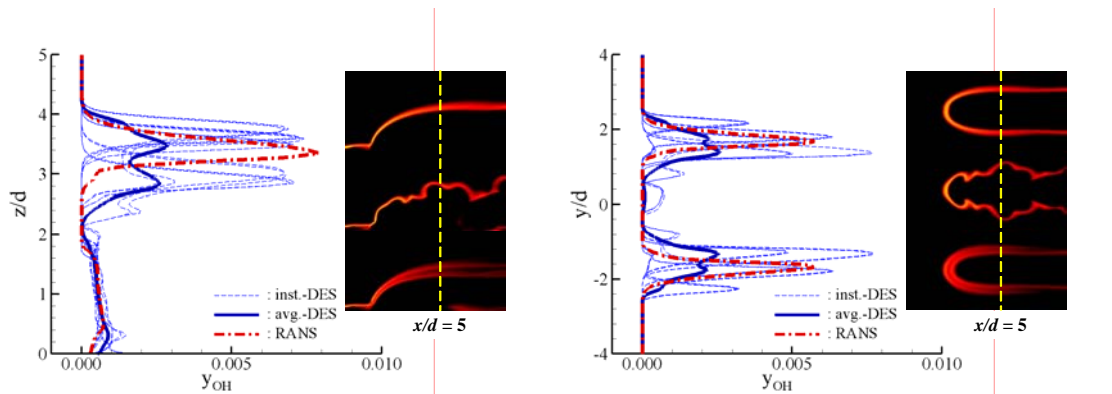


Fig. 6. Temperature distribution along streamlines



(a) Vertical OH distribution at $x/d = 5$ of $y/d = 0$ plane (b) Lateral OH distribution at $x/d = 5$ of $z/d = 2$ plane

Fig. 7. Superimposed OH mass fraction along with time

에 따른 간헐 현상을 살펴보기에 타당하다.

RANS, 순간 DES 및 시간 평균된 DES의 결과로부터 대응하는 유선을 따라 추출된 온도 분포가 Fig. 6에서 비교되었다. Fig. 6(a)에서 기준 유선의 RANS 결과는 궁형 충격파에 의한 급격한 온도 상승이 연료-공기의 혼합에 따라 점진적으로 감소하는 경향을 보여준다. 반면, 순간 DES 결과는 유선이 차가운 연료 에디를 통과하는지 여부에 따라 급격한 온도 변화를 보여준다. 시간 평균된 DES의 경우 RANS와 유사한 경향을 보여주고 있으나, 전반적으로 낮은 온도 분포를 보여준다. 시간 평균된 DES 결과에서 낮은 온도 분포는 그 지점에서 높은 온도가 발생할 가능성이 낮다는 것을 의미한다. 그러나 Fig. 6(a)에서 볼 수 있듯이, 순간 DES 온도 분포는 부분적으로 시간 평균된 DES 온도 분포보다 매우 높은 온도에 이르기도 하며, 차가운 연료 에디 근처에서는 온도가 매우 낮다. 따라서 RANS 결과는 간헐 현상이 고려된 시간 평균된 DES에 비해 유동장의 온도 분포를 대략 30% 과대 측정한다고 할 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 6(b)와 6(d)에서 보이는 바와 같이 수직 및 수평 방향으로 1d 만큼 벗어난 유선에서도 나타나며, 이는 에디에 의한 간헐 현상이 이 영역 내에서 여전히 존재하기 때문이다. 그러나 간헐 현상이 사라지는 수직 및 수평 방향으로 2d 만큼 벗어난 유선에서는 온도 분포가 거의 동일하며, 이는 Fig. 6(c)와 6(e)에서 확인할 수 있다. Fig. 6(f)는 분사기 출구에서 시작되는 유선에 따른 온도 분포를 보여준다. 연료 유동의 온도 분포는 주변 뜨거운 공기 유동의 침투 여부에 따라 크게 상승하기도 한다. 따라서 RANS 결과는 이전과 반대로 시간 평균된 DES 결과에 비해 유동장의 온도 분포를 대략 70% 정도 과소 측정한다.

Fig. 7은 1 μs 간격의 순간 DES 결과로부터 추출된 OH 질량 분율을 중첩하여 나타낸 그림이다. Fig. 7(a)는 $y/d=0$ 인 평면(즉, $x-z$ 평면)의 $x/d=5$ 인 지점에서 수직방향의 OH 질량 분율 분포이며, Fig. 7(b)는 $z/d=2$ 인 평면(즉, $x-y$ 평면)의 $x/d=5$ 인 지점에서 수평방향의 OH 질량 분율 분포이다. RANS 계산에 의한 OH 질량 분율은 좁은 영역에 한정되어 있는 반면에, 순간 DES 계산에 의한 OH 질량 분율은 시간에 따라 넓은 영역에 걸쳐 분포해 있음을 확인할 수 있다. 시간에 따라 연속적으로 평균화된 시간 평균된 DES 결과는 순간 DES 결과의 간헐 현상이 반영되어 나타난다. 즉, OH 질량 분율의 최대값은 낮은 반면에 넓은 영역에 분포해 있다. 보다 정

량적으로 비교하기 위해 OH 질량 분율의 최대 구배를 기준으로 폭을 측정하였다. Fig. 7(a)의 수직방향 OH 분포의 경우, 시간 평균된 DES 결과는 RANS 결과에 비해 폭이 약 4.44배 더 넓다. 한편, Fig. 7(b)의 수평방향 OH 분포의 경우 시간 평균된 DES 결과는 첫 번째 OH peak의 폭은 2.17배, 두 번째 OH peak의 폭은 2.45배 RANS 결과에 비해 넓다. 이러한 결과는 유동장의 고정된 공간에서 시간에 따른 간헐 현상을 명확하게 보여주며, 수평방향 보다 수직방향으로의 간헐 현상이 더 큼을 보여준다. 이는 수직방향의 에디 거동이 더 활발함을 의미하며, 연료의 수직 분사에 의한 수직방향으로의 운동 에너지가 상대적으로 더 큼을 고려할 때 당연한 결과이다.

이상에서 살펴본 바와 같이 동적 에디 거동이 영향을 미치는 영역에서는 시·공간에 따른 간헐 현상이 존재한다. 동적 에디 거동을 포착하지 못하는 RANS 계산의 경우 유동장의 특성을 상대적으로 부정확하게 예측할 수 있다. 따라서 수직 연료 분사에 의한 비정상 난류 연소 유동장의 특성을 보다 정확하게 포착하기 위해서는 동적 에디 거동 또는 이에 의한 간헐 현상을 고려할 수 있는 DES 계산이 필수적이다.

IV. 결 론

초음속 주 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 모사하고 있으며, 이를 통해 자발 점화가 발생하는 위치를 확인하였다. 또한 연료 제트의 전단층을 따라 연속적이고 가는 선형으로 존재하는 OH 분포는 자발 점화가 주로 분사기 근방의 급격한 궁형 충격파 후방에서 발생하여 제트 전단층을 따라 동적 에디와 함께 후방으로 흘러감을 보여준다. 보다 정량적 비교를 위해 점화 지연 시간이 측정되었으며, 계산에서의 점화 지연 시간은 실험 결과의 2배에 달했다. 이러한 차이는 점화 지연 시간을 측정하는데 있어 실험적 측정의 불확실성에 기인하는 것으로 판단된다. 분사기 주변 OH 및 H₂O 분포에 대하여 측면, 횡단면, 종단면 이미지를 통해 가시 화합으로써 전반적인 난류 화염면의 구조를 확인하였다. 또한 RANS 및 DES 계산 결과의 비교를 통해 간헐 현상이 반응 유동장에 미치는 영향을 살펴보았다. 유선을 따른 온도 분포 및 OH 질량 분율의 중첩을 통해 간헐 현상의 시·공간적 영향

을 정량적으로 측정하였으며, 이를 통해 비정상 난류 연소 유동장의 특성을 포착하기 위해서는 동적 에디 거동 또는 이에 의한 간헐 현상의 고려가 필수적임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 기초연구 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사사를 드립니다. (계약번호 UD060024AD)

참고문헌

- 1) 원수희, 정인석, 최정열, "DES를 이용한 초음속 유동내 수직 연료분사 유동의 비정상 3차원 해석, Part I: 비반응 유동장", *한국항공우주학회지*, 제 37권 9호, 2009, pp. 863-878.
- 2) Papamoschou, D. and Hubbard, D. G., "Visual Observations of Supersonic Transverse Jets", *Experiments in Fluids*, Vol. 14, No. 6, 1993, pp. 468-471.
- 3) Gruber, M. R., Nejad, A. S., Chen, T. H., and Dutton, J. C., "Bow Shock/Jet Interaction in Compressible Transverse Injection Flowfields", *AIAA Journal*, Vol. 34, No. 10, 1996, pp. 2191- 2193.
- 4) 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.
- 5) Peterson, D. M., Subbareddy, P. K., and Candler, G. V., "DES Investigation of Transverse Injection into Supersonic Crossflow using a Hybrid Unstructured Solver", AIAA Paper 2006- 903, 2006.
- 6) Kawai, S. and Lele, S. K., "Mechanisms of Jet Mixing in a Supersonic Crossflow: A Study using Large-Eddy Simulation", *Annual Research Briefs 2007*, Center for Turbulence Research, Stanford University and NASA-Ames, 2007, pp. 353-365.
- 7) Boles, J. A., Edwards, J. R., and Baurle, R. A., "Hybrid LES/RANS Simulation of Transverse Sonic Injection into a Mach 2 Flow", AIAA Paper 2008-622, 2008.
- 8) Choi, J.-Y., Yang, V. and Ma, F., "Combustion Oscillations in a Scramjet Engine Combustor with Transverse Fuel Injection", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, 2005, pp. 2851-2858.
- 9) Von Lavante, E., Zeitz, D., and Kallenberg, M., "Numerical Simulation of Supersonic Airflow with Transverse Hydrogen Injection", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 17, No. 6, 2001, pp. 1319-1326.
- 10) 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/
- 11) Choi, J.-Y., Jeung, I.-S. and Yoon, Y., "Computational Fluid Dynamics Algorithms for Unsteady Shock-Induced Combustion, Part 1: Validation", *AIAA Journal*, Vol. 38, No. 7, 2000, pp. 1179-1187.
- 12) Norris, J. W. and Edwards, J. R., "Large-Eddy Simulation of High-Speed Turbulent Diffusion Flames with Detailed Chemistry", AIAA Paper 97-0370, 1997.
- 13) Huber, P., Schexnayder, C., and McClinton, C., "Criteria for self-ignition of supersonic hydrogen-air mixture", NASA Technical Paper 1457.