



Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2018.22.3.053>

분사구 형상에 따른 초음속 유동장 내 수직 연료 분사 특성

김세환^a · 이복직^b · 정인석^c · 이형진^{d,*}

Characteristics of the Transverse Fuel Injection into a Supersonic Crossflow using Various Injector Geometries

Seihwan Kim^a · Bok Jik Lee^b · In-Seuck Jeung^c · Hyoungjin Lee^{d,*}

^aDaewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd., Korea

^bSchool of Mechanical Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology, Korea

^cSchool of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Korea

^dDepartment of Aerospace Engineering, Inha University, Korea

*Corresponding author. E-mail: hyoungjin.lee@inha.ac.kr

ABSTRACT

In this study, computational simulation was performed to investigate the characteristics of air/fuel mixing according to the shape of the injector exit when the transverse jet was injected into a supersonic flow. Non-reacting flow simulation was conducted with fixed mass flow rate and the same cross-sectional area. To validate the results, free stream Mach number and jet-to-crossflow momentum ratio are set to 3.38 and 1.4, respectively, which is same as the experimental condition. Further, separation region, structure of the under-expanded jet, jet penetration height, and flammable region of hydrogen for five different injectors compared.

초 록

본 논문에서는 초음속 유동장 내 연료 수직 분사 조건에서 분사구의 형상에 따른 연료/공기 혼합 특성을 분석하고자 하였다. 이를 위해 동일한 분사구 출구 면적과 유량 조건에 대해 수소와 공기에 대한 비반응 유동장 전산 해석을 수행하였다. 해석 결과의 검증에 위하여 자유류 마하수 3.38, 제트-자유류 운동량 플럭스비 1.4 인 평판 분사 시험을 모의하였다. 5개의 서로 다른 형상을 갖는 분사구를 이용하여 형태에 따른 박리 구간, 분사 제트의 구조의 차이를 살펴보고 분사구 후류에서 수소의 침투 높이와 수소-공기의 혼합에 따른 가연 면적에 변화를 확인함으로써 분사구 형상에 따른 연료/공기 혼합 특성을 정량적으로 비교하였다.

Key Words: Transverse Injection(수직 분사), Supersonic Cross-flow(초음속 유동), Hydrogen(수소), Injector Geometry(분사구 구조), Nonreacting Flow(비반응 유동)

Received 5 January 2018 / Revised 22 March 2018 / Accepted 26 March 2018
Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

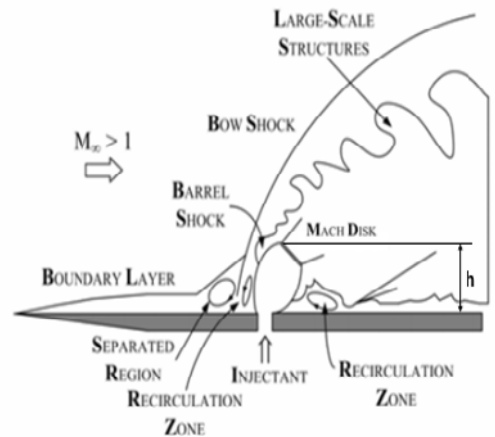
1. 서 론

스크램제트 엔진의 경우 초음속 연소가 진행됨에 따라 흡입구를 통과한 유동과 분사된 연료가 연소기 내에 머무는 시간이 매우 짧기 때문에 공기와 연료의 효과적인 혼합이 매우 중요하다. 이에 혼합 특성을 향상시키기 위하여 다양한 시도가 이루어져 왔으며, 이 중 벽면에서 연료를 수직으로 분사하는 방식은 구조적으로 간단하여 매우 효율적인 분사 방법 중 하나로 평가되어 왔다. 그러나 구조적 단순함에도 불구하고 수직 분사 유동은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 분사 제트 전방에는 궁형 충격파와 말굽 형태의 와류 유동, 분사 제트 후류에는 분사된 연료가 주위 유동과의 교란으로 엇 회전하는 와류쌍(counter-rotating vortex pair, CVP) 및 재순환 영역 등 복잡한 물리 현상을 포함하고 있다. 이러한 복잡한 현상은 혼합/연소 특성 뿐 아니라 엔진의 전체적인 성능과도 밀접한 관련이 있어 많은 연구가 수행되어 왔다.

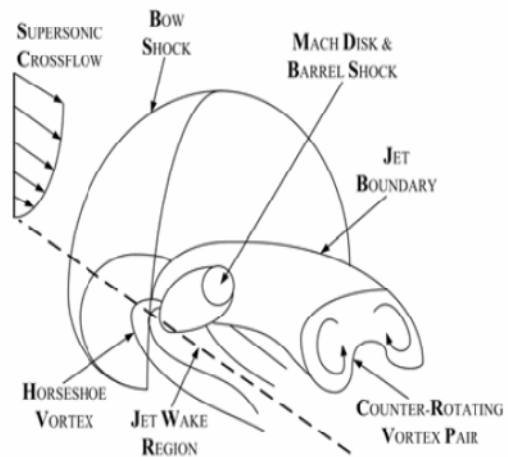
Santiago 등[1]과 Ben-Yakar 등[2]은 분사 가스와 주유동의 혼합이 주로 후류의 회전 와류쌍(CVP)에 의해 증진되는 것을 실험을 통해 관찰하였다. 실험적 관찰 이후, Koo 등[3]은 2차원 RANS 해석을 통하여 분사 조건에 따른 침투거리, 박리 및 재부착 위치를 검토하였으며, Kim 등[4]은 slot 형태의 분사 장치에서 연료의 침투거리와 혼합에 미치는 영향을 분석하였다. 그 외 Shin[5]은 평판에 설치된 두 분사기의 거리를 변화시키며 분사 유동의 상호 작용이 연료의 혼합 특성에 미치는 영향을 파악하기 위한 수치 해석을 수행하기도 하였다. 제한적이지만 분사구 형상이 혼합에 미치는 영향은 Tomioka 등[6]에 의해 실험을 통해 분석되었다. 마름모꼴과 원형의 분사구 형상을 비교하였으며, 분사 가스와 자유류의 압력비에 따라 분사구의 형상이 혼합에 미치는 영향을 관찰한 바 있다. 이후 Ben-Yakar 등[7]은 팽창튜브를 이용하여 스크램제트 엔진의 연소기 환경을 보다 정성적으로 모사하여 수직 분사 실험을 수행하였으며, Won 등[8,9,11]은 그 실험 조건에 대해 DES 난류 모델을 이용한 전산 해석을 통해 비정상 유동 특성에 대한 이해를 높인 바 있다. 특히 Forster 등[16]은 다양한

형상의 분사구 형태를 이용한 수치 연구를 통하여 초음속 질소 유동에 산소를 분사하고 분사된 제트의 침투 거리 및 공간 분포, 그에 따른 벽면의 압력 변화를 살펴본 바 있다. 그러다 해당 연구는 자유류 마하수 1.2인 조건에서 수행되었으며 제트 분사가 소음 감소 및 추력 방향 제어에 미치는 영향을 살펴보는 데 목적이 있어 경계층에 의한 효과가 고려되지 않았다.

이처럼 분사 조건(예를 들어 유입 유동의 마하수, 제트-자유류의 운동량 비, 분사기 배치 등)이 연료의 침투 거리, 혼합/연소 및 유동 특성에 미



(a) Instantaneous flow near injection



(b) Averaged 3D flow feature

Fig. 1 Schematic diagram of a sonic jet injection into a transverse stream of supersonic flow.

치는 영향을 분석하기 위해 실험적/수치해석 연구가 활발히 진행되어 왔으나, 대부분의 연구가 하나의 분사구 형상에 대해서만 집중되었으며, 동일 조건에서 복수의 분사구를 이용한 비교 연구나 분사구 형상에 따른 유동 구조를 관찰하고 유동이나 혼합에 미치는 영향은 명확히 분석된 사례가 적다. 이에 본 연구에서는 수치 해석을 통하여 초음속 유동에 대해 다양한 분사구 형상에 따른 유동 및 혼합 특성을 분석하고자 하였다. 이를 위해 평판 위 동일한 초음속 자유류 유동 및 분사조건에 대해, 5가지 다른 분사구 형상이 유동 특성, 연료 침투 거리 및 혼합 특성에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

2. 해석 방법

2.1 수치 기법

본 연구에서는 상용 전산 유체 역학 해석 프로그램인 STAR-CCM+(ver 12.06.10)를 사용하였으며, 분사구 형상에 따른 정성적 특성 비교를 위하여 3차원 RANS 비정상 유동 해석을 수행하였다. 비점성 대류항은 AUSM+ 기법을 적용하였으며, 경계면에서의 플럭스는 2차 보간 기법을 적용하여 고차 정도를 확보하였다. 난류 모델로는 Menter[10]의 k-w SST 모델을 적용하였다. 수소를 포함한 각 화학종에 대한 보존 방정식을 해석하고, 분자의 확산 계수는 Schmidt수를 파라미터로 Fick's law를 이용하여 계산하였다. 이와 함께 난류 Prandtl 수와 Schmidt 수는 각각 0.9로 가정하였다. 최근 분사 유동과 관련한 수치 해석에 DES/LES 등이 적용되고 있으나, RANS 기반의 난류 모델에 비하여 해석 시간이 수십배 이상인 고비용 해석[18]임을 고려하면, 분사구 형태를 변화시키고 그 유동장의 변화를 살펴보고자 하는 본 연구에 RANS 난류 모델을 적용할 수 있을 것으로 판단된다. Won 등[9]은 DES를 이용하여 분사 유동에서 나타나는 eddy의 비정상 거동을 수치적으로 모사함과 동시에 시간 평균된(Time-averaged) 유동장에서 RANS 및 DES 결과 비교를 통해 수직 분사에 의한 층

격과 구조, 분사기 전후의 재순환 영역 등은 유지됨을 확인하였다. 또한 Song 등[17]은 후방 계단 유동에 대한 수치적 연구에서 SST 모델을 통하여 유동 내 박리 유동 및 재순환 영역을 효과적으로 예측할 수 있음을 보인 바 있다. 이에 본 연구에서는 비정상 해석 결과를 기준으로 1주기 동안의 물리량을 평균하여 그 특성을 살펴보았다.

2.2 경계 조건 및 격자 구성

다양한 분사구 형상에 따른 특성을 비교하기 전에 Ben-Yakar의 실험[7]을 대상으로 검증 해석을 수행하였다. 실험 장치는 자유류 마하수 3.38인 유동에 놓인 평판 끝단에서 50 mm 떨어진 위치에 설치된 2.0 mm 노즐을 통하여 수소를 음속으로 수직 분사하도록 구성되었으며, 분사가스-자유류의 운동량 플럭스비는 1.4이다. 실험에서 계측된 분사구 끝단에서 평판 경계층 두께는 약 0.75 mm이며, 자유류와 분사구 출구에서의 유동 변수는 Table 1에 나타내었다.

Fig. 2에 해석 영역과 경계 조건을 나타내었으며, 해석 영역은 분사구 후방으로 11d, 폭 방향으로 $\pm 8.5d$, 높이 방향으로 12.5d를 설정하였다. 경계 조건으로 출구는 외삽 조건, 상하단 및 측면은 자유류 조건을 적용하였고 벽면에서의 경계 조건은 단일 점착 조건을 적용하였다.

Ben-Yakar의 실험 결과에 의하면 분사구 위

Table 1. Properties for crossflow and fuel (H_2).

	Supersonic crossflow	Injector exit (H_2)
Mach number	3.38 \pm 0.04	1
Velocity [m/s]	2360 \pm 25	1205
Static temperature [K]	1290	246
Static pressure [kPa]	32.4	490
Characteristic length [mm]	50	2
Reynolds number	2.2e5	1.5e5
J (Momentum flux ratio) : 1.4		

치에서의 경계층 두께(0.75 mm)가 분사구 직경(2.0 mm)의 약 40%이므로 경계층을 포함하여 벽면 근처에서 실제 속도 분포를 모사하는 것이 중요하다. 그러나 평판 경계층 모사를 위해 많은 격자가 필요하기 때문에, 기존 연구에서는 2차원 분사를 고려하거나, 일부 영역까지 2차원 해석을 수행하고 이를 3차원 해석 영역의 유입 조건으로 부가하는 방식을 택하였다. 그러나 이 경우 입구에서의 격자 크기의 변화와 입구에 인접한 벽면 격자에서 나타나는 불연속성에 의해 물리량의 보간 및 변환에 따른 오차가 유발되거나 경계층 두께의 불연속성이 발생할 수 있다. 이에 본 연구에서는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 벽면 y^+ 가 1 이하가 되도록 벽면 근처에 충분한 격자를 배치하고 수직 분사에 따른 유동 변화가 없는 $x/D < -5$ 인 구간은 2차원 격자를 y 축 방향으로 수십 개 층으로 돌출하고, $x/D \geq -5$ 인 영역과 내부 경계면(Fig. 2의 interface)로 설정하였다. 해석 결과 두 영역의 경계에서 유동의 불안정성은 발견되지 않았다. 이를 통하여 분사구 전단의 경계층 유동을 포함한 전 유동장 해석을 모사할 수 있었다.

Fig. 3은 분사구 단면이 원형인 조건에서 $y=0$

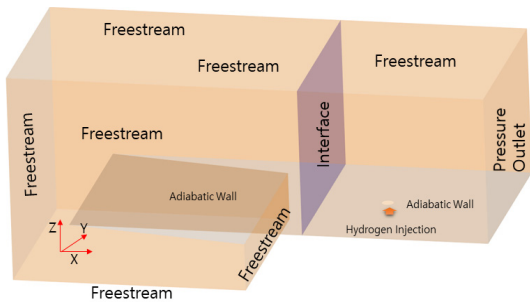


Fig. 2 Computational domain and boundary conditions.

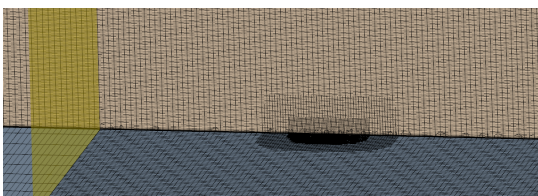


Fig. 3 Computational grid for circular injector.

인 단면 및 평판에서의 격자 구성을 나타내었다. 격자의 크기 및 구성은 기존 연구[11] 결과로부터 해에 더 이상 영향을 미치지 않는 것으로 제안한 격자 크기를 차용하였으며, 격자의 비대칭성을 제거하기 위하여 반쪽 격자를 생성한 후, 이를 대칭/복사하는 결합 방식을 적용하였다.

2.3 분사구 형상

분사구 형상에 따른 침투 거리, 유동 특성, 연료의 혼합 특성 등을 살펴보기 위하여 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 5개의 다른 형상에 대한 해석을 수행하였다. 실험과 비교를 위하여 원형 분사구의 직경은 2.0 mm 으로 선정하고, 다른 4개의 형상에 대해서는 동일한 단면적을 갖도록 하였다. (B)유동 방향 및 (C)폭 방향 인장형 분사구의 경우 폭/길이비는 약 1:7 인 형태이다.

3. 해석 결과

3.1 해석 결과 검증

Fig. 5에 Ben-Yakar[7] 실험의 쉘리텐 이미지를 기존 연구[9]의 온도 분포 및 본 해석 결과의 수치적 쉘리텐 이미지를 비교하였다. 실험 이미지와 온도 분포는 10 μ s 내외의 유동을 시간 평균한 것으로 비정상 유동 특성에 의한 간섭 구조 등이 제거된 결과이다. 해석 결과 분사에 의해 발생한 궁형 충격파의 형상, 전방 박리 구간의 크기 및 람다 충격파 등이 실험 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이와 더불어 실험

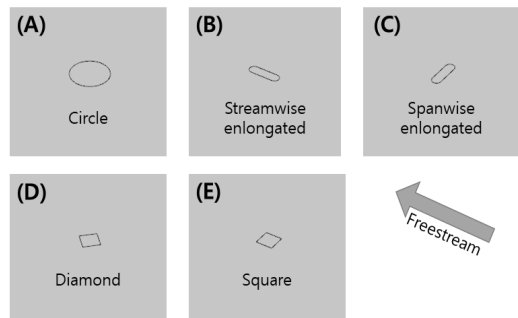


Fig. 4 Shape of the exit for different injectors.

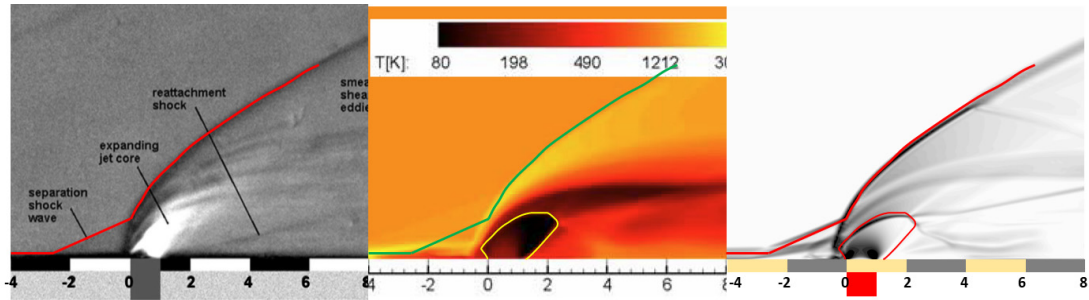


Fig. 5 Comparison between experiment (Left), previous research (Center) and present study (Right).

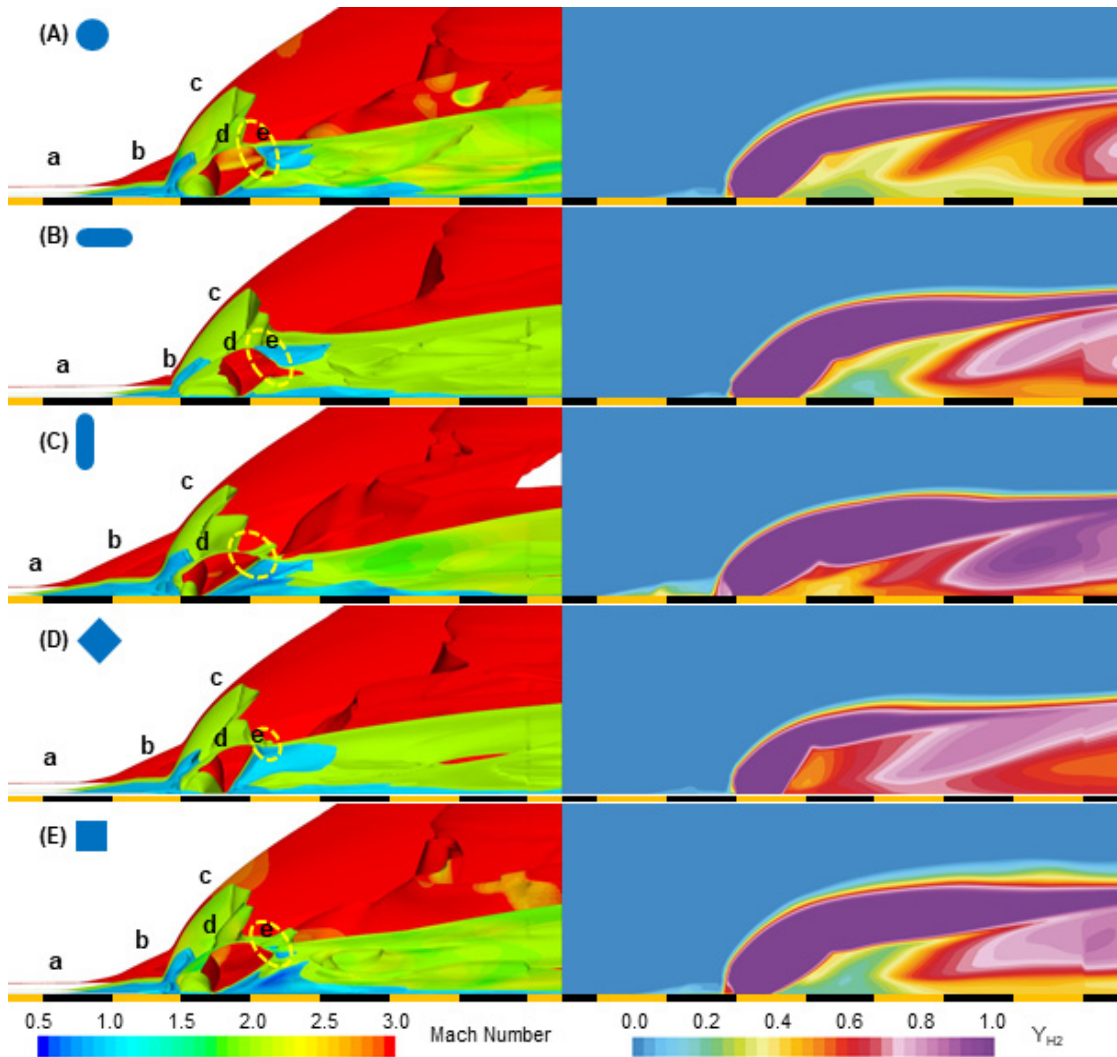


Fig. 6 Isosurface of Mach number (Left) and Mass fraction of H_2 (Right) for different injectors
 (a)Boundary Layer, (b)Separation Shock wave, (c)Bow Shock, (d)Barrel Shock, (e)Mach Disk.

험의 쉘리텐 이미지에서는 휘도로 인해 관찰되지 않은 분사 제트의 배럴 충격파나 마하 디스크가 전산해석 결과에서는 명확히 관찰되었으며 그 형태와 구조가 기존 해석과도 잘 일치하고 있다.

3.2 분사구 형상에 따른 유동 특성

Fig. 6에는 분사구 형상에 따른 $y=0$ 인 대칭면에서 분사 유동의 마하수 분포와 수소의 질량 분율을 함께 나타내었다. 분사구의 형상이 다르다 하더라도 전반적인 유동의 구조는 원형 분사구 형상에서 발생하는 것과 유사하지만, 세부적인 유동 구조의 형상은 각각 다른 것으로 관찰된다. 본 절에서는 각 분사구 형상에 따라 (A)원형 분사구를 기준으로 비교적 큰 차이를 보이는 양상을 설명하고자 한다.

(B)유동 방향 인상형: 궁형 충격파가 완만하고 전방에 발생한 박리 구간의 크기 역시 크게 감소하였는데, 이는 분사구의 면적을 동일하게 유지함에 따라 분사구의 폭이 감소되어 분사 제트의 폭이 감소하였기 때문인 것으로 판단된다.

(C)폭 방향 인상형: 분사 제트의 영역이 폭 방향으로 증가함에 따라, 전방에 강한 궁형 충격파와 큰 박리 구간이 생성된다. 따라서 전방의 재순환 영역의 크기 증가가 뚜렷하게 관찰되었으나, 마하 디스크의 크기와 위치는 명확히 판별하기 어려웠다. 이는 90도 이하의 낮은 분사 각도의 기존 연구에서와 유사한 현상이다.[12] 분사구 후방에는 배럴 충격파의 각도가 낮아지면서 큰 재순환 영역이 생성되며, 분사 제트의 침투 거리 (Fig. 1(a)의 h , [13])는 감소하였다.

(D) 마름모형: 유동에 수직한 분사 제트의 폭이 감소하였으나 분사구 전방의 박리 영역의 길이, 궁형 충격파의 각도 등에서 뚜렷한 차이는 발견되지 않았다. 그러나 분사구 후방에 생성된 배럴 충격파 각도가 증가함에 따라 마하 디스크의 길이가 감소하였으며, 제트 후방에 큰 재순환 영역이 생성되었다. 이러한 국소 유동의 차이에도 불구하고 대칭면에서 제트의 침투 거리는 (A)원형 분사구를 이용한 해석과 동일하였다.

(E) 정사각형: 분사 제트의 단면 길이가 (D)마름

모형 분사구에 비해 감소하였으나 전방 박리 구간의 길이나 궁형 충격파의 각도 변화는 관찰되지 않았다. 즉, 이 분사구를 이용한 경우에도 (D)마름모형 분사구와 같이 분사 유동 전방의 구조는 (A)원형 분사구와 동일하게 형성되었다. 그러나 분사구 후방의 배럴 충격파 각도는 다시 감소하여 마하 디스크의 길이는 증가하였다.

살펴본 같이 분사구의 형상에 따라 분사 제트 주위의 유동 구조에 차이가 있었으나 모든 분사구에서 마하 디스크를 기준으로 측정된 제트의 침투 거리는 (A)원형 분사구와 동일한 것으로 조사되어 동일한 운동량 플럭스비(1.4)를 갖는 분사 유동에서 제트의 단면적 변화가 동일한 경우, 분사구 형상이 다르더라도 분사구 중심에서 제트의 침투 거리의 차이는 크지 않음을 확인할 수 있었다.

초음속 유동 내 분사/혼합 유동에 있어 전압력 손실은 추진기의 추력 손실로 이어지므로 높은 전압력 회복율을 가져야 한다. 이에 Fig. 7에 Eq. 1과 같이 정의한 전압력 단면에서의 질량 유량 기준 전압력 손실율을 x/d 에 따라 나타내었다.

$$1 - \frac{\int P_0 d\dot{m}}{\int_{x = \text{Far field}} P_0 d\dot{m}} \quad (1)$$

전반적으로 전압력 손실은 분사구 형상에 따라 미세한 차이가 발생하는 것으로 나타났으며 대체적으로 거리에 따라 다르지만, 궁형 충격파

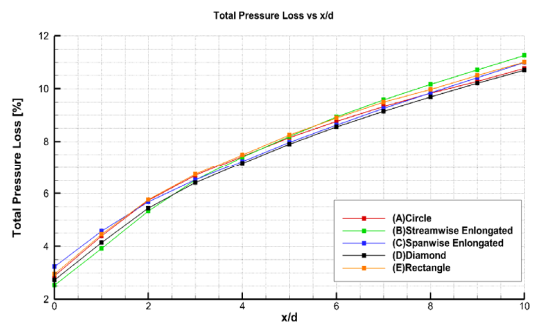


Fig. 7 Total pressure loss along streamwise direction.

의 영향을 크게 받는 분사구 근처를 제외한 영역에서는 (B)유동 방향 인장형 분사구의 전압력 손실이 점차 증가하여 $x/d > 6$ 인 지점부터 가장 높은 손실율을 보였으며, $x/d > 3$ 인 구간에서 (D)마름모형 분사구의 전압력 손실이 다른 분사구에 비해 낮은 경향을 보였다.

분사구 앞전에서는 강한 궁형 충격파가 발생한 (C)폭 방향 인장형의 전압력 손실이 가장 크게 발생하였다. 분사구 전방의 박리 구간 길이와 궁형 충격파의 각도가 동일하게 나타난 (A)원형 분사구와 (E)정사각형 분사구의 경우, 전 영역에서 걸쳐 전압력 손실도 동일한 분포를 보였다. (B)유동 방향 인장형 분사구의 경우, 앞전에서 손실은 가장 작았으나, 흐름 방향에 따른 손실이 증가하여 $x/d = 5.5$ 지점에서는 (A)원형 분사구와 전압력 손실이 유사하였다. (D)마름모형 분사구

의 경우 앞전에서 손실은 (A)원형 분사구에 비해 낮고 (B)길이 방향 인장형 분사구보다 높은 수준이었으나, $x/d > 2.5$ 인 구간 이후로 (C)폭 방향 분사구와 함께 가장 낮은 전압력 손실율을 갖는 것으로 조사되어, 분사구의 형상에 의해 성능의 차이가 발생할 수 있음을 확인하였다.

3.3 분사구 형상에 따른 연료 분포 특성

Fig. 8에 $y=0$ 인 대칭면에서 분사구 형태에 따른 연료의 공간 분포를 거리별로 나타내었다. 분사구 형태에 따라 차이는 있으나 연료의 침투 높이는 최대 $z/d = 3 \sim 4$ 정도였으며, 대체적으로 (E)정사각형 분사구의 경우가 가장 높은 것으로 조사되었다. Fig. 9는 수소를 이용한 기존 연구 결과와 함께 본 결과에서의 수소의 질량 분율이 1%인 지점을 기준으로 계산한 침투 높이를 동시

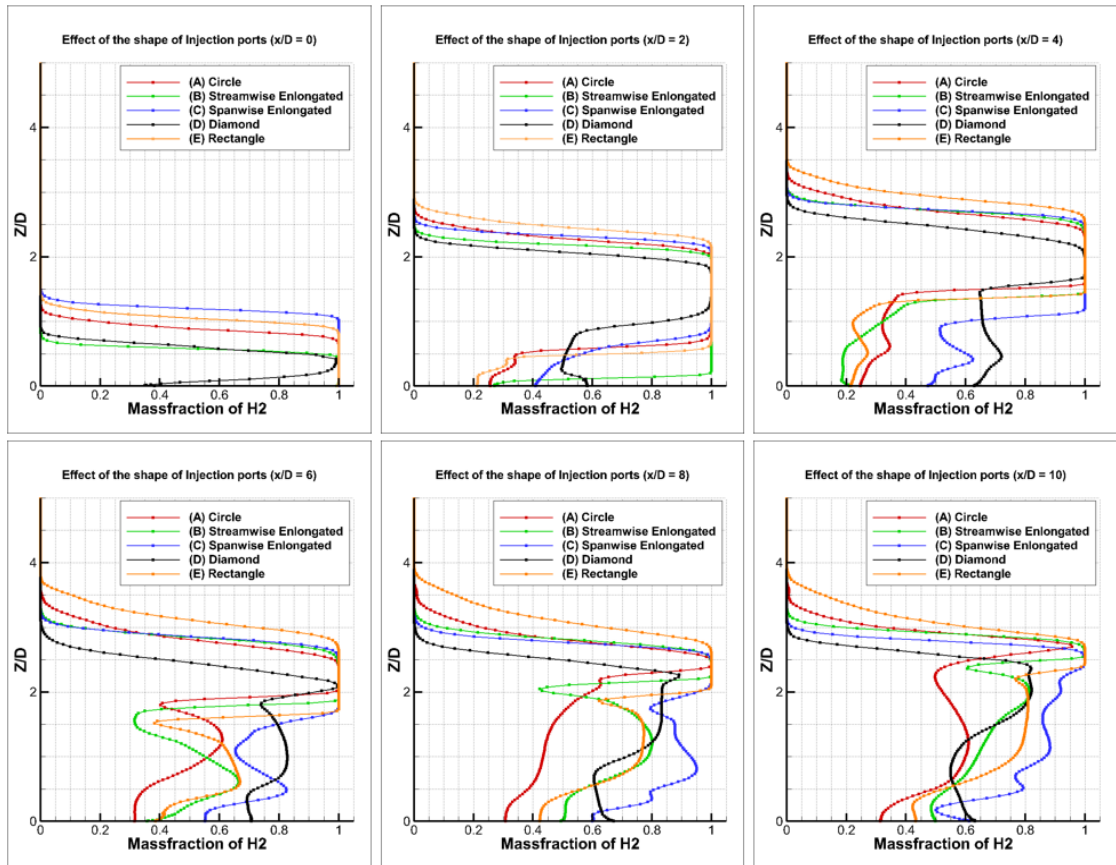


Fig. 8 Mass fraction of H₂ along the streamwise direction for various injectors.

에 나타내었다. 유동 상류에서는 분사구 형상 변화에 따른 침투 거리 차이가 명확하게 나타났으며 전 구간에서의 침투 거리는 Rothstein 등[14]과 McDaniel 등[15]이 제시한 근사식 사이에 분포하였다. 분사구 형상에 따른 침투 특성은 Fig. 8을 통해 보다 자세히 관찰할 수 있다.

분사구 근처($x/d=0\sim 2$): $x/d=0$ 주위에서는 전방에 큰 박리 구간이 생성된 (C)와 (E) 형상의 분사구에서 연료의 침투 높이가 가장 높았다. 이는 두 분사구 형상이 분사되는 제트와 유동이 수직하게 만나는 영역이 크기 때문인 것으로 판단된다. $x/d=2$ 위치에서는 분사구 형상과 무관하게 수소의 침투 높이가 $x/d=0$ 위치 대비 약 2배 증가하였으며, $x/d=4$ 부터는 수직 방향으로의 큰 변화는 관찰되지 않았다. $x/d=2$ 에서 수소의 침투 높이는 (E)정사각형 분사구에서 가장 높고 (D)마름모형 분사구에서 가장 낮았으며, (E)정사각형 분사구의 경우 대부분 영역에서 타 분사구보다 높은 침투 거리를 나타내었다.

분사구 하류($x/d>4$): 유동이 하류로 이동함에 따라 제트 경계면의 하부 영역($z/d<2$)에서 수소의 분포가 크게 변화하였다. 이는 Fig. 1에 제시된 바와 같이 제트 와류 영역에 의하여 수소/자유류의 혼합이 증대되었기 때문이다. $x/d=10$ 지점에서 수소의 질량 분율이 80% 이상인 영역이 (A)와 (D)분사구가 (B), (C), (E) 분사구 형상에 비해 얇게 형성되어 수소의 혼합이 더 잘 이루어진 것으로 보인다. 특히 (D)마름모형 분사구의 경우 중심 평면에서 80% 이상인 구간이 존재하지 않았다. 즉, 침투 높이 측면에서는 (E)정사각형 분사구 형상이 가장 우수한 특성을 나타내는 것으로 보이나, 수소가 유입 유동에 혼합되는 측면에서는 (E) 정사각형 분사구 형상이 우수한 것으로 보기 어렵다. 이는 수소의 가연 구간이 매우 넓고 엷 회전하는 와류쌍이 존재하므로 침투 높이만으로 혼합 정도를 평가하기 어렵기 때문이며, 따라서 유동에 수직한 단면에서의 연료의 분포를 관찰하는 것이 필요하다.

이에, Fig. 8에 나타낸 위치에서 분사된 수소의 공간 분포를 살펴보기 위하여 Fig. 10에 각 단면에서 수소의 질량 분율을 나타내었다. 이를

통하여 분사구 형태에 따른 연료의 침투 거리 및 공간 분포의 차이를 확인할 수 있다. (A)원형 분사구에 비해 (B)유동 방향 인장형 분사구 후방 유동에서 엷 회전하는 와류 구조가 빨리 생성되었으나, 전반적으로 높은 수소의 질량 분율이 제한된 영역에 존재하여 혼합 특성이 우수하지 못한 것으로 보인다. (D)마름모형 분사구의 경우 분사 제트의 상단이 평평한 형태로 발달함에 따라 폭 방향으로 수소를 넓게 분포시키고 있으나 다른 형태의 분사구에 비해 수직 방향 침투 거리는 감소하였다. 이와 달리 (C)폭 방향 인장형 분사구와 (E)정사각형 분사구의 경우, 제트의 단면이 포물선 형태로 생성되었으며, 그 결과 수직 방향 침투 거리가 증가하였음을 알 수 있다.

폭 방향으로의 혼합 특성을 살펴보면, (E)정사각형 분사구의 경우 주유동 전영역(x 방향)에 걸쳐 $y/d<3$ 영역에 수소가 주로 분포된 반면, (A)원형 분사구의 경우 $y/d<4$ 구간까지 연료가 확산되어 있는 것을 확인할 수 있다. (A)원형 분사구에 비해 단면의 폭 방향 길이가 2배 가량 증가한 (C)폭 방향 인장형 분사구의 경우 $x/d=0$ 인 영역에서 모든 분사구 중 가장 넓은 영역에 연료가 분포하고 있으나, 이후 수소는 높이 방향으로 주로 확산되어, 분사구의 폭이 증가하였음에도 원형 분사구와 유사한 $y/d<4$ 인 구간에 수소가 주로 분포하였다. 이와 함께 Fig. 10에서 (C)폭 방향 인장형과 (E)정사각형 분사구의 경우 후류로 이동함에 따라 수소의 분포가 비대칭성을 갖고 있음을 확인할 수 있다. 앞서 설명한 바

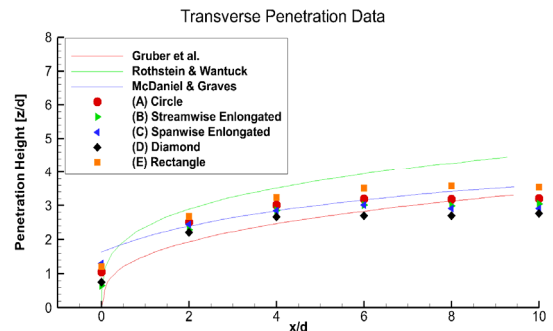


Fig. 9 Transverse penetration height of hydrogen jet compared with previous studies.

와 같이, 격자에 의한 비대칭성을 막기 위하여 반쪽 기준으로 자동 격자를 생성 후 대칭하여 해석 영역을 생성하였으므로 이러한 비대칭성은 제트 후류에서 와류 생성과 연관이 있을 것으로 추정된다.

3.4 분사구 형상에 따른 가연 한계 영역 분석

수소의 공간 분포와 함께 고려되어야 할 성능 변수는 연소 가능한 영역으로, 상온/상압 조건에서 수소의 가연 한계는 물 분율 기준 4%~75%으로 알려져 있다. 이에 분사구의 형상에 따라 Fig. 10에 나타낸 각 단면에서 가연 구간의 면적을 Fig. 11에 나타내고 그 총 합을 (A)원형 분사구의 값 기준 비율로 Fig. 12에 나타내었다. 해석 결과에 따르면, 가연 영역의 넓이는 해석 영역 전 구간에서 (B)유동 방향 인장형 분사구에서 가장 작게 나타났으며 Fig. 11에 제시된 바와 같이, 동일한 구간 내에서 혼합이 가장 느린 것으로 나타났다. 반면, (C)폭 방향 인장형 분사구에

서 가연영역이 가장 넓은 것으로 조사되었다. 제트 상단이 평평하게 생성된 (D)마름모형 분사구의 경우 $x/d < 4$ 인 구간에서는 (A)원형 분사구에 비해 가연 면적이 작았으나, 후류로 갈수록 폭 방향으로 넓게 확산되면서 가연 면적이 증가하여 전 영역을 기준으로 (A)원형 분사구에 비해 넓은 가연 구간을 보여주었다. 마지막으로 (E)정사각형 분사구의 경우 앞서 Fig. 10에서 살펴본 바와 같이 침투 거리는 증가하였으나 폭 방향으로 분포가 감소하여 가연 면적은 (A)원형 분사구와 유사한 것을 다시 한 번 확인할 수 있었다.

이상의 연구에서 수치 해석을 통하여 분사구 형상에 따라 초음속 유동장 내 수직 분사 유동의 침투/혼합 특성에 대하여 살펴보았다. 이를 통하여 현재 널리 연구되고 있는 원형 분사구에 폭 방향 인장형 분사구 또는 마름모형 분사구를 이용하여 혼합 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 예상되었다. 그러나 이러한 형태의 인장형 분사구의 경우 폭/길이 등에 의하여 그 효과

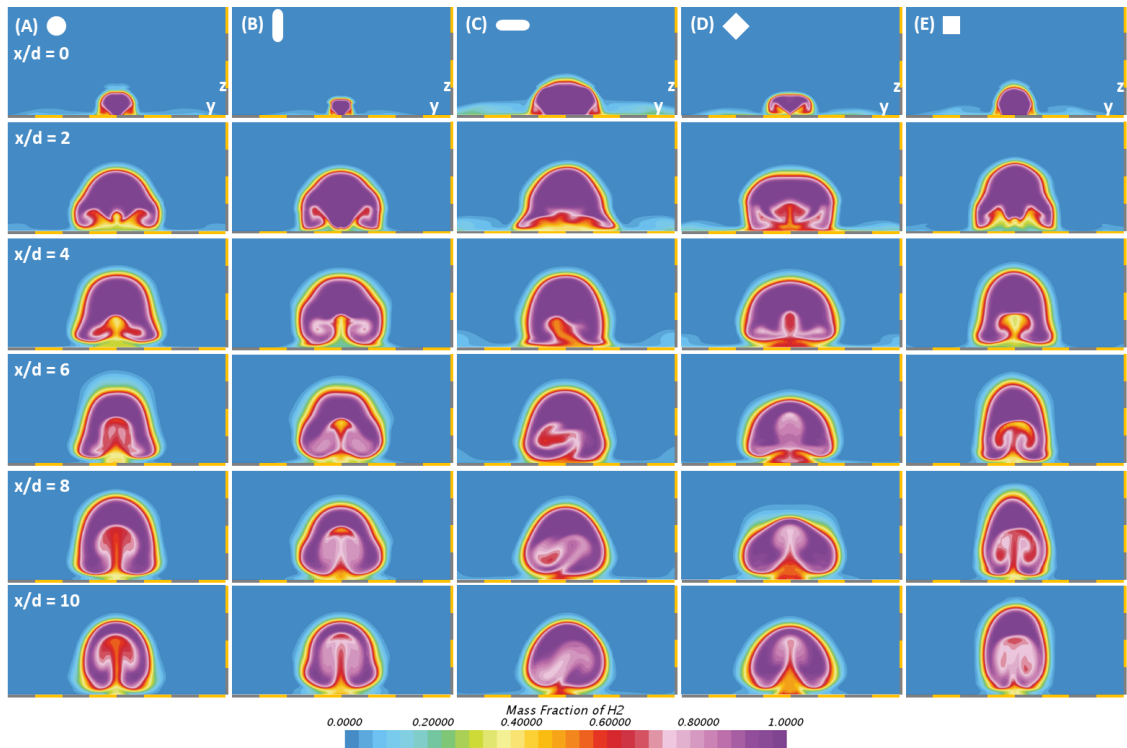


Fig. 10 Cross-sectional distribution of mass fraction of H_2 .

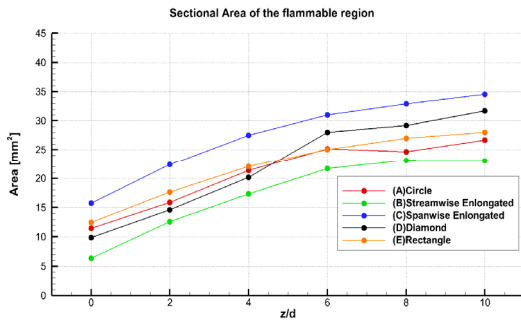


Fig. 11 Cross-sectional areas of flammable regions based on mole fraction of H_2 .

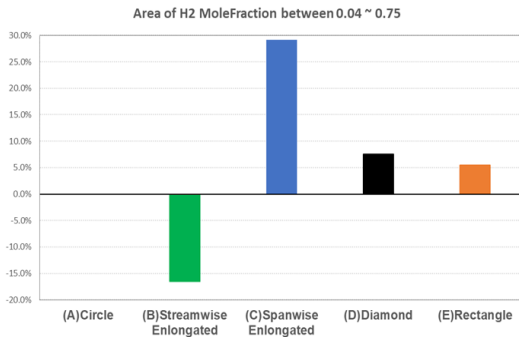


Fig. 12 Sum of cross-sectional areas of flammable regions based on mole fraction of H_2 .

에 변화가 있을 것으로 예상되며, 분사구의 형상에 따른 연소 반응의 차이, 연소기 구조와의 상호 작용에 의한 효과 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 초음속 유동장 내 수직 분사에 대한 전산해석을 통해 연료와 공기의 혼합 특성을 분석하고자 하였다. 이에 동일한 분사 조건에서 분사구의 형상을 변경시키며 비반응 유동장 해석을 수행하고 그 특성을 비교하였다.

해석 결과 분사구의 형상에 따라 분사 가스로부터 발생하는 마하 디스크의 높이는 유사하였으나, 분사 가스(수소)의 질량 분율을 기준으로 한 침투 높이와 가연 영역의 크기는 각각 형상

에 따라 차이가 발생하였다. 5가지 분사구 형상 중, 침투 높이 측면에서는 정사각형 분사구 형상이 가장 유리하였으며, 가연 영역의 크기 측면에서는 폭 방향 인장형 분사구 형상이 가장 우수한 것으로 관찰되었다. 특히 폭 방향 인장형 분사구의 경우, 원형 분사구 형상 대비 가연 영역이 20% 증가되는 성능 향상을 보였으며, 분사구로부터 일정 거리 이후에서는 전압력 손실이 타 분사구 형상보다 낮아 가장 나은 혼합 성능을 나타내는 것으로 보였다.

이상의 연구 결과로부터 분사구의 형상이 혼합 특성을 변화시킬 수 있음을 확인하였으며, 추후에는 실제 연소 반응에 미치는 영향에 대한 추가 연구도 필요할 것으로 판단된다.

후 기

제2저자는 연구재단 선도연구센터과제(2013R1A5A1073861)의 지원을 통하여 본 연구를 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Santiago, J. and Dutton, J., "Crossflow Vortices of a Jet Injected into a Supersonic Crossflow," *AIAA Journal*, Vol. 35, No. 5, pp. 915-917, 1997.
2. Ben-Yakar, A., Kamel, M., Morris, C. and Hanson, R.K., "Experimental investigation of H_2 transverse jet combustion in hypervelocity flows," 33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit, Joint Propulsion Conferences, Seattle, WA, U.S.A., AIAA 1997-3019, July. 1997.
3. Koo, B.S. and Kim, H.D., "Study of the air jet normally injected into supersonic stream," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 4, No. 4, pp. 42-49, 2000.

4. Kim, K.M. and Baek, S.W., "Numerical Study on Injecton and Mixing of Secondary Gas into a Supersonic Stream," *Journal of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 29, No. 2, pp. 10-19, 2001.
5. Shin, H.B. and Lee, S.H., "Characteristics of Dual Transverse Injection in Supersonic Flow Fields I -Mixing Characteristics," *Journal of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 30, No. 6, pp. 53-60, 2002.
6. Tomioka, S., Jacobsen, L. S. and Schetz, J. A., "Sonic Injection from Diamond-Shaped Orifices into a Supersonic Crossflow," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 1, pp. 104-114, 2003.
7. 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 and Fluids*, Vol. 18, No. 2, pp. 1-16, 2006.
8. Won, S.H., Jeung, I.S. and Choi, J.Y., "Unsteady Three-Dimensional Analysis of Transverse Fuel Injection into a Supersonic Crossflow using Detached Eddy Simulation Part I : Non-Reacting Flowfield," *Journal of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 37, No. 9, pp. 863-878, 2009.
9. Won, S.H., Jeung, I.S., Parent, B., and Choi, J.Y., "Numerical investigation of transverse hydrogen jet into supersonic crossflow using detached-eddy simulation," *AIAA Journal*, Vol. 48, No. 6, pp. 1047-1058, 2010.
10. Menter, F.R., "Two-equation eddy-viscosity turbulence modeling for engineering applications", *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605, 1994.
11. Won, S.H., Jeung, I.S. and Choi, J.Y., "Verification and Validation of the Numerical Simulation of Transverse Injection Jets using Grid Convergence Index," *Journal of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 34, No. 4, pp. 53-62, 2006.
12. Ogawa, H., "Effects of injection angle and pressure on mixing performance of fuel injection via various geometries for upstream-fuel-injected scramjets," *Acta Astronautica*, Vol. 128, pp. 485-498, 2016.
13. Aso, S., Okuyama, S., Kawai, M. and Ando, Y., "Experimental study on mixing phenomena in supersonic flows with slot injection," 29th Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, U.S.A., AIAA 91-0016, January, 1991.
14. Rothstein, A.D. and Wantruck, P.J., "A study of the normal injection of hydrogen into a heated supersonicflow using planar laser-induced fluorescence," 28th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Nashville, TN, U.S.A., AIAA 1992-3423, July, 1992.
15. McDaniel, J.C. and Graves, J., "Laser-induced-fluorescence visualization of transverse gaseous injection in a nonreacting supersonic combustor," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 4, No. 6, pp. 591-597, 1988.
16. Forster, L.E. and Engblom, W.A., "Computational of Transverse Injection into Supersonic Crossflow with Various Injector Orifice Geometries," 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, U.S.A., AIAA 2004-1199, Jan., 2004.
17. Song, C.S., and Park, S.O., "Assessment of URANS and DES Simulations for Two-dimensional Backward Bacing Step Flow," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol. 11, pp. 25-31, 2006.

-
18. Hassan, Ez., Luke, E.A., Walters, K., Peterson, D.M, Eklund, D., Hagenmaier, M., "Computations of a Hydrogen-Fueled Scramjet Combustor on Locally Refined Mesh," Journal of Flow Turbulence Combust, Vol. 99 No. 2, pp. 437-459, 2017.