

수평 배치된 분사구의 배치 간격에 따른
초음속 유동장 내 분사 유동의 침투 및 혼합 특성김세환¹ · 이형진^{2,†}¹대우조선해양(주)²인하대학교 항공우주공학과

Effect of the distance between the adjacent injectors on penetration and mixing characteristics of the jet in supersonic crossflow

Sei Hwan Kim¹ and Hyoung Jin Lee²¹Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd., Korea²Department of Aerospace Engineering, Inha University, Korea

Abstract

In the present study, a numerical investigation was conducted to analyze the effect of the distance between the adjacent injectors on the characteristics of flow structure, fuel penetration, and air/fuel mixing. Numerical results were validated with experimental data using a single injection. Subsequently, the same injector geometry and properties were applied on a non-reacting flow simulation with multiple injectors. Total pressure loss, penetration height, and mixing efficiency were compared with the distance between the injectors. The results showed that each injected gas merged into a single stream, resulting in the 2D-like flow fields under the condition of short distance and lower mixing efficiency along with higher total pressure loss. When the distance between the injectors increased, total pressure loss reduced and mixing efficiency increased due to the weakening of interactions between the injected gases.

초 록

본 연구에서는 초음속 유동장 내 연료 분사시 연소기의 공간적인 제한 조건을 고려하여 복수의 분사기 간 배치 간격을 변화시키고 그에 따른 유동 구조, 연료의 침투 거리 및 연료-공기의 혼합 특성을 비교 분석하였다. 이를 위하여 널리 알려진 단일 분사구를 이용한 실험 조건을 모사하여 적용된 수치 모델을 검토하였으며, 동일한 분사 조건을 갖는 복수의 분사기를 이용하여 비반응 유동 해석을 수행하였다. 해석 결과를 바탕으로 분사기 간 거리에 따라 전압력 손실, 침투 거리, 및 혼합 성능 등을 정량적으로 비교하였다. 해석 결과 분사기 간 배치 거리가 매우 짧은 경우 분사 연료가 서로 융합되면서 유동장이 2차원 특성을 나타내었고 전반적으로 낮은 혼합 효율 특성과 높은 전압력 손실을 발생하였다. 분사기 간 거리가 멀어짐에 따라 분사 가스간의 상호작용이 감소하면서 혼합 효율이 증가하고 전압력 손실이 낮아지는 것이 관찰되었다.

Key Words : Supersonic injection(초음속 분사), Multiple injection(복수 분사), Transverse injection(수직 분사), Nonreacting flow(비반응 유동), Injector distance(분사기 거리)

1. 서 론

극초음속 추진 기관의 개발에 있어 초음속 연소를

위한 효율적인 분사 시스템 개발이 선행되어야 한다. 특히 연소기 유입 유동의 체류 시간이 짧기 때문에 공기와 연료의 효과적인 혼합이 필수적이다. 짧은 구간에서 혼합 효율을 향상시킬 경우 엔진의 길이를 감소시킬 수 있으며, 이는 벽면에서의 저항을 감소시켜 엔진의 총 추력을 증가시키는데 기여하게 된다. 이러한 이유로 초음속 유동장 내 분사된 연료의 혼합 특성을 향상시키기 위한 다양한 분사 연구들이 진행되어 왔으

Received: July. 31, 2018 Revised: Aug. 23, 2018 Accepted: Aug. 27, 2018

† Corresponding Author

Tel: +82-32-860-7355, E-mail: hyoungjin.lee@inha.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

며, 분사기 구조에 따라 크게 벽면 분사 방식(wall injection)과 유동 내 분사 방식(in stream)으로 구분할 수 있다. 경사면 또는 스트럿을 이용한 분사 방식의 경우 고엔탈피 유동에 장시간 노출됨에 따른 열 변형 문제[1,2]와 전압력 손실 등의 단점을 가지는 반면, 벽면 분사 방식은 구조적으로 단순하고 돌출부가 없으므로 효율적인 분사 방법으로 평가되어 왔다. 그러나 벽면 분사 유동의 경우 구조적인 단순함에 비해 복잡한 유동 구조를 갖는 것으로 알려져 있으며, Fig. 1과 같이 분사 유동에 의한 궁형 충격파, 말굽 와류 유동, 복수의 재순환 영역 및 엇 회전하는 와류쌍(CVP; counter-rotating vortex pair) 등 다양한 물리 현상을 포함하고 있다. 이러한 이유로 분사구 주위 유동의 발달, 분사 제트와 주 유동간의 간섭 및 혼합 특성 등을 관찰하기 위하여 다양한 연구가 수행되고 있다.

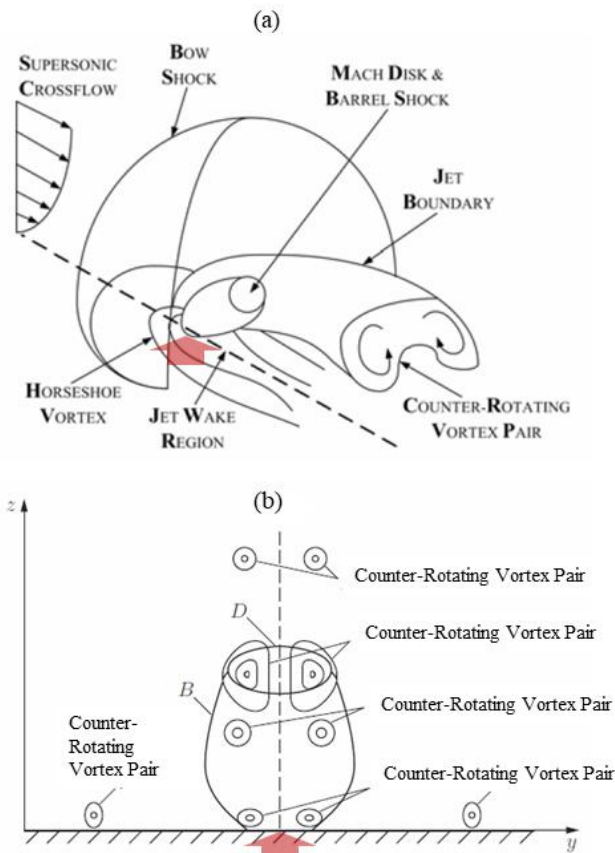


Fig. 1 Schematic diagram of a sonic jet injection into a transverse stream of supersonic flow : (a) Averaged 3D flow feature, (b) Vortex pattern on a cross-plane

사 제트와 주 유동의 혼합이 주로 분사구 후류에 생성되는 회전 와류쌍(CVP)에 의해 증진됨을 확인하였다. 이후 분사 압력, 분사 기체의 종류 등이 연료의 침투와 혼합 성능에 미치는 영향에 대한 연구[5~7]가 다수 수행되었으며, Tomioka[8]는 마름모형과 원형 분사구를 이용한 실험을 통해 분사 gas와 자유류의 압력비에 따른 혼합 성능 변화를 관찰하였다. 이후 Ben-Yakar[9]는 스크램제트 엔진의 작동 환경을 보다 정성적으로 모사하고 수소와 에틸렌을 이용한 수직 분사 실험을 수행하였으며, Won[10]은 해당 실험 조건에 대한 DES 해석을 통하여 초음속 유동 내 수직 분사 제트의 비정상 특성에 대한 이해를 높인 바 있다. 최근 Kim[17]등은 분사구 형상에 따른 혼합 효율을 전산해석을 통해 상대 비교하였고 분사구 형상에 따라 유동 및 혼합 특성이 달라질 수 있음을 정량적으로 제시하였다.

실제 스크램제트 엔진의 작동을 위해서는 연소기의 전 단면에서 균일한 혼합과 함께 연료의 침투 거리 향상이 중요하지만, 현재의 연구들은 대부분 단일 분사기를 이용하여 유동의 구조를 보다 정밀하게 관찰하고 그 매커니즘이나 효과를 규명하는데 집중하고 있다. 이에 일부 연구진은 보다 실제적인 연구를 위해 다수의 분사기를 적용하는 연구를 진행하였다. Schetz[1]은 3행 3열로 9개의 분사기를 후류에서 점차 모아지는(toe-in) 형태로 배치한 분사 장치를 이용하여 물리적인 경사면을 대체할 수 있는 공력 경사면(aerodynamic ramp) 개념을 제안하고 실험을 통하여 그 가능성과 성능을 살펴본 바 있으며, Jacobsen[2]은 폭 방향으로 배치된 3개의 분사기의 상대 각도(toe-in angle)가 연료의 혼합에 미치는 영향에 대한 실험을 수행하였다. 이와 함께 Rogers[11]는 2개의 원형 분사기를 이용한 수소 분사 실험을 통하여 연료의 침투 특성은 단일 분사기와 큰 차이를 보이지 않으나, 연료의 공간 분포 및 혼합 특성에 큰 영향을 미칠 수 있음을 밝혔으며, Sun[12]은 질소를 이용한 실험과 수치 해석을 통하여 거리에 따른 침투 및 혼합 특성 변화에 대하여 살펴보았다. 최근 Ali[13]는 유동을 제어하기 위한 목적으로 복수의 마이크로 제트를 이용하여 분사 제트간 간섭 효과에 대하여 살펴보았다.

이와 같이 초음속 유동 내 분사 유동과 관련하여 단일 분사기를 이용한 분사 조건(자유류의 마하수, 제트-자유류의 운동량 비, 분사기 형상 등)에 따른 침투거리 및 혼합 특성의 변화에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔으나, 복수의 분사기에 대하여 분사구 간 배치 거리에 따른 유동 구조를 관찰하고 유동의 간섭 효과

Ben-Yakar[3]와 Santiago[4]는 실험을 통하여 분

와 혼합 특성 변화에 미치는 영향은 명확히 분석된 사례가 적다. 이에 본 연구에서는 단일 분사기에서 수행된 실험을 수치적으로 모사하고 이를 확장하여 동일선상에 배치된 분사구 간 배치 거리 변화가 유동 특성, 연료의 침투 거리 및 혼합 성능에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

2. 해석 방법

2.1 수치 기법

본 연구에서 분사구의 배치 간격에 의한 특성을 살펴보기 위하여 3차원 비정상 RANS 해석을 수행하였다. 최근 수치 해석을 이용한 분사 유동 해석을 위하여 DES 또는 LES를 적용하여 분사 제트와 자유류 간 교란에 의한 에디의 발생 및 그에 따른 혼합 메커니즘을 규명하기 위한 연구가 널리 진행되었다.[14,15] 그러나 본 연구에서는 기존 연구[16, 17]에서 나타난 바와 같이 RANS 기반의 해석을 통하여 해석 자원을 절감하여 복수의 분사구에 의한 효과를 상대적으로 비교하고자 하였다. AUSM+ 기법을 적용하여 비점성 대류항을 계산하고, 경계면에서의 플럭스는 2차 보간 기법을 적용하였다. 난류 모델은 k- ω SST 를 사용하였으며, 공기 및 수소의 화학종은 각각의 보존 방정식을 통해 해석하고, 혼합기의 물성치는 질량 가중 방식(mass-Weighted)으로 계산하였으며 난류 Prandtl 수와 Schmidt 수는 각각 0.9로 가정하였다.

2.2 격자 및 경계 조건

초음속 유동장 내 복수의 분사구의 배치 간격에 따른 특성을 살펴보기에 앞서, 단일 분사구를 이용한 실험(Ben-Yakar[9])을 모사하고 그 결과를 비교하였다. 자유류의 마하수는 3.38이며, 평판의 시점부터 분사구 중심까지의 거리는 50.0 mm이다. 분사구의 직경은 2.0 mm 이며, 수소가 음속으로 수직 분사하는 조건으로 Eq. 1으로 정의된 분사가스-자유류의 운동량 플럭스비는 1.4이다. 자유류와 제트 분사구에서의 물리량은 Table 1 에 나타내었다.

$$J = \frac{(\rho u^2)_j}{(\rho u^2)_\infty} = \frac{(\gamma p M^2)_j}{(\gamma p M^2)_\infty} \quad (1)$$

Figure 2는 해석 영역의 구성 및 각 경계에서의 조건을 나타낸 것으로 해석 영역은 분사구의 직경(D)을 기준으로 후방으로 50D, 높이는 30D 이며 폭은 분사

구 간의 거리로 한정하였다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 상하단은 자유류 조건, 출구의 경우 외압 조건을 적용하였으며, 벽면은 단열 점착 조건을 부가하였다. 본 연구에서는 복수의 분사기가 주기적으로 배치된 것을 가정하여 양측면을 주기(periodic) 경계 조건으로 설정하였다. 분사 유동에 중요한 요소 중 하나는 충격파-경계층 상호 작용(SBLI; Shock boundary layer interaction)으로 벽면 근방에서의 유동을 정확히 모사하는 것이 중요하다. 이에 본 연구에서는 Fig. 5에 나타난 것과 같이 벽면 근처에 격자를 밀집하여 벽면 무차원 거리인 y^+ 가 약 1을 가질 수 있도록 하였다.

단일 분사 유동에 대한 기존 연구에서는 계산 비용을 줄이기 위하여 교란이 미치지 않는 전방 영역을 생략하고 2차원 또는 이론해를 유입 유동 조건으로 부가하는 방식을 취하기도 하였다. 그러나 본 연구에서는 분사구간 거리에 따라 분사구 전방에 발생하는 박리구간의 크기가 가변적이므로 이러한 기법을 적용할 경우 유동의 확산을 제한할 수 있는 것으로 확인되어 전 영역을 하나의 도메인으로 설정하였다.

Table 1 Properties for crossflow and fuel (H₂)

	Supersonic crossflow	Injector exit (H ₂)
Mach number	3.38 ± 0.04	1
Velocity [m/s]	2360 ± 25	1,205
Static temperature [K]	1,290	246
Static pressure [kPa]	32.4	490
Characteristic length [mm]	50	2
Reynolds number	2.2 × 10 ⁵	1.5 × 10 ⁵

J (Momentum flux ratio) : 1.4

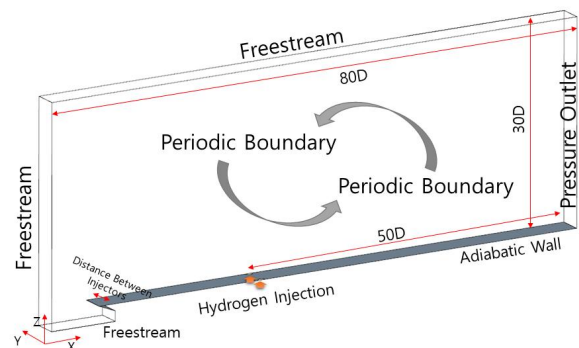


Fig. 2 Computational Domain and Boundary Condition

단일 분사구를 대상으로 수행된 선행 연구[17] 결과는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 분사기 직경으로 무차원화된 흐름 방향(x/D)으로 수소 제트의 폭 방향 분포는 약 3.5D 범위로 한정되는 것으로 조사되었다.

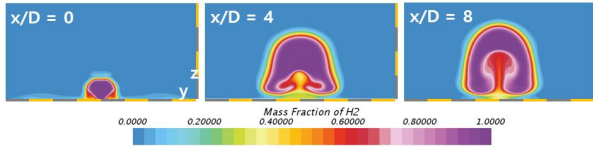


Fig. 3 Spanwise fuel distribution for single injector

이에 본 연구에서는 분사구의 거리를 Fig. 4에 나타난 바와 같이 (A)1.75D, (B)3.5D 및 (C)7.0D 로 선정하여 그 효과를 살펴보았다. Figure 5는 분사구간 거리가 (B)3.5D 인 조건에서 분사구 주위의 격자를 나타낸 것으로 격자의 크기는 기존의 연구[17]의 값을 차용하였다.

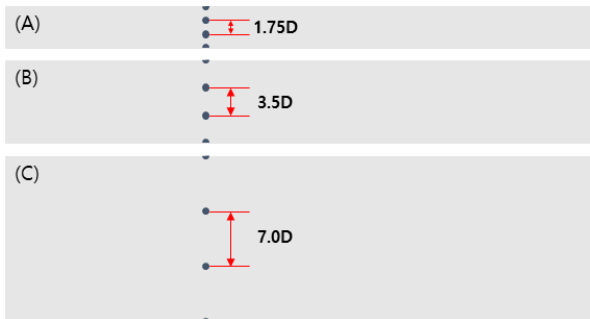


Fig. 4 Distance between adjoint injectors

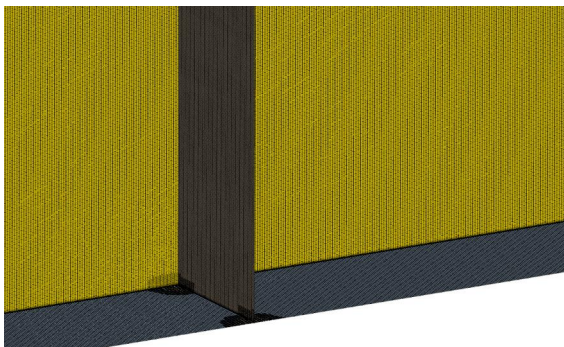


Fig. 5 Computational Grid near the injector (3.5D case)

3. 해석 결과

3.1 단일 분사구 유동 해석

주 유동내 수직 또는 경사 분사와 관련하여, 자유류의 마하수, 분사 압력, 자유류-분사 제트의 모멘텀 플럭스비 등에 따른 침투 및 혼합 특성에 대한 다양한 연구가 수행된 바 있다. 그러나 본 연구에서 다루고자 하는 동일 분사 조건에서 분사구 거리에 따른 혼합 특성에 대한 연구는 수행된 바가 드물다. 이에 본 연구에 앞서 단일 분사구를 이용하여 실험 연구[9]의 분사 조건을 모사하고, 그 결과를 참고문헌[17]에서 살펴보았다. 본 연구에서 제안한 모델을 통하여 해석한 결과를 실험과 비교하여, 참고문헌[17] 내 Fig. 5에 나타난 바와 같이 분사제트에 의해 발생한 궁형 충격파의 형상, 전방 박리 구간의 길이가 실험과 잘 일치함을 확인하였다. 이와 함께 연료의 침투 거리가 기존 실험들에서 밝혀진 경험식[6,7]과 잘 일치하였으며, 실험에서 관찰되지 않은 과소 팽창된 분사 유동에 의한 배럴 충격파 및 마하 디스크의 구조를 확인하였다.

3.2 분사구 거리에 따른 유동 특성

분사구 거리에 따른 유동 특성 변화를 정성적으로 살펴보기 위하여 Fig. 6에 임의의 시간에 대하여 유동의 마하수가 0.9, 1.1, 1.5, 2.0인 등위면(Isosurface)과 함께 $z=1$ 인 단면에서 수소의 질량 분율의 분포를 좌측 상단에 나타내었다. 분사구의 배치 간격이 (A)1.75D로 단일 분사구를 이용한 연구에서 확인된 폭 방향 확산 거리(3.5D) 이내에 다른 분사기가 존재하는 경우 전방의 박리 구간이 분사구로부터 상류로, 약 20D, 넓게 분포하고 있으며, 제트의 후류 일부 구간을 제외하면 매우 안정화된 유동을 확인할 수 있다. 분사구의 거리를 (B)3.5D로 증가시키는 경우 전방 박리 구간의 길이는 짧아졌다. (A)의 경우 $M=2.0$ 인 등위면이 전 영역에서 2차원 형태를 갖는 반면, (B)의 경우 분사구 상류에서는 2차원 형태의 경사 충격파 형태를 보이며 분사구 상부를 통과하면서 폭/길이 방향 모두에서 교란이 발생함을 알 수 있다. 다만 해석 구간내에서 폭 방향 교란은 크게 증가하지 않고 후류로 진행함에 따라 유동의 불안정성이 증가하였으며, 연료의 침투 높이는 감소하였다. 분사구 배치 간격을 (C)7.0D로 증가시킨 경우, (B)3.5D에서 나타난 유동의 길이 방향 불안정성이 더욱 증폭되어 나타난다. 연료의 전방 박리 구간이 크게 감소하였으며 2차원 충격파와 형상은 확인되지 않았다. 모사된 연소장 내 나타나는 연료의 침투 및 혼합 경향을 살펴보기 위하여 Fig. 7에 x/D 에 따른 연료의 질량 분율을 나타내었다. 해석은 주기 경계 조건을 사용하였으나 이해를 돕기 위하여 Fig. 4에 표시한 것과 같이 3개의 반복 구

간을 나타내었다.

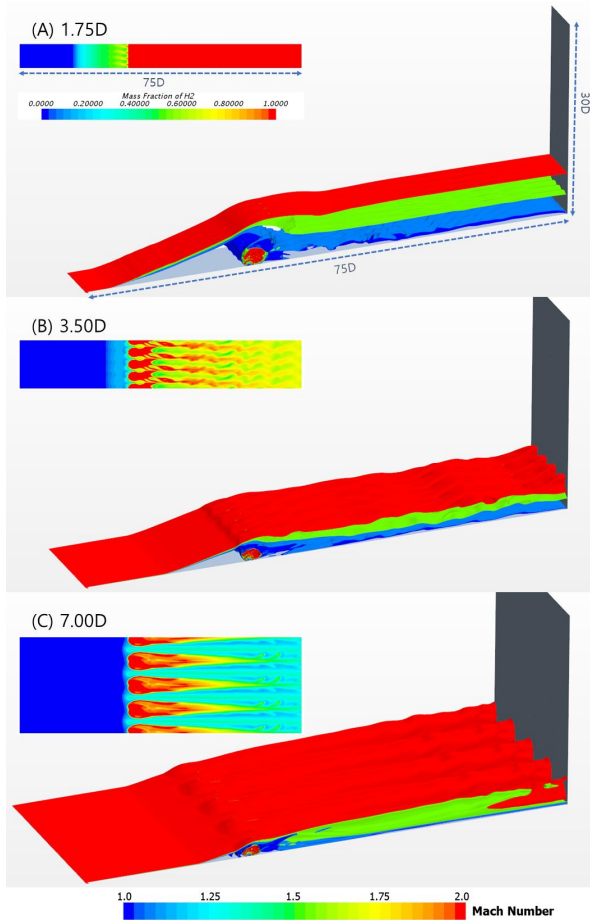


Fig. 6 Isosurface of Mach number & Mass Fraction of H₂

특히 Fig. 7은 Unsteady RANS (URANS)를 수행하여 매 시간 간격에서 얻은 단면의 질량 분율 이미지를 임의의 구간에 대해 시간 평균한 값으로, (B)3.5D와 (C)7.0D의 결과에서 나타난 바와 같이 후류로 갈수록 유동의 비정상 특성이 증가하여 흐릿한 이미지를 보이고 있다. 각 단면에서 연료의 분포를 살펴보면, 분사구의 거리가 (A)1.75D인 경우, 인접한 분사 유동으로 인하여 연료가 폭 방향으로 확산되지 못하고 상부로 발달하며 두 분사구 간 거리의 중심 위치에서 두 유동의 충돌에 의한 제트가 생성됨을 확인할 수 있다. 이때 생성된 2차 제트는 분사구 사이에 존재하는 공간으로 침투한 공기와 혼합되지만 $z/d=1$ 인 단면에서의 결과에서 보듯이 하부 벽면 근처에서는 자유류가 침투할 공간이 존재하지 않으므로 전체적인 혼합 효율은 낮을 것으로 예상된다. 이 배치의 경우 상부의 2차 제트가 혼합되면서 $x/D>30$ 영역에서 유동은 2차원 분포를 갖는 것으로 판단된다.

분사구 배치 거리를 (B)3.5D로 증가시킨 경우 인접한 분사 유동에 의한 간섭 효과는 나타나고 있으나 충격과 충돌에 의한 2차 제트의 형성은 확인되지 않았다. 그 결과 연료의 침투 거리는 (A)1.75D의 1/2 수준으로 감소하였다. 이 경우 $x/D=0$ 에서 확인할 수 있는 바와 같이 제트 사이에 자유류가 통과할 수 있는 공간이 존재하므로 분사기 후류에서 활발한 혼합이 이루어질 것으로 예상된다. 이러한 자유류와 수직 분사 제트의 상호 작용의 결과 Fig. 6에서 관찰되는 후류의 불안정성이 발생한 것으로 판단된다. 단면 유동으로부터 해석 구간 내 유동이 2차원인 구간을 확인할 수 없었으며, $x/D>30$ 인 구간 내 연료의 분포 형태로부터 제트의 폭 방향 침투 거리가 시간에 따라 크게 변화할 것으로 예상된다. 인접한 분사구의 거리를 (C)7.0D로 더욱 증가시킨 경우, $x/D=0$ 에서 인접한 분사 유동에 의한 주 분사 유동의 간섭 및 확산의 교란 현상은 관찰되지 않는다. 그러나 분사기 간 거리의 중심(3.5D) 근방에서 더 이상 폭 방향으로 진행하지 못한 작은 양의 연료가 상부로 발달하였다. 이 때 발생한 2차 제트는 (A)1.75D의 경우와 달리 상부로 침투하거나 주 유동과 융합되지는 않고, 해석 구간내 일정한 크기와 높이를 보이고 있다. 분사구의 배치 거리가 증가함에 따라 전방의 박리 구간이 크게 감소하였으며, 등마하수 면의 정성적인 특성은 (B)3.5D와 유사한 것으로 판단된다. 단면의 유동 분포를 살펴보면, 이 경우 $x/D=30$ 까지의 유동은 (A)1.75D 및 (B)3.5D와 비교하여 시간에 따라 큰 변화가 없는 것으로 판단되며, $x/D=45$ 에서의 질량 분율 분포를 보아 시간에 따른 변화가 크게 나타났을 것으로 예상된다. 특히 Fig. 7로부터 연료의 침투 거리는 (A)1.75D에서 가장 높게 나타나고, (B)3.5D와 (C)7.0D에서는 유사한 수준으로 나타났다.

초음속 추진 기관에서 전압력의 손실은 추력 손실과 직결되므로 분사기의 성능을 비교하는 주요한 인자가 될 수 있다. 이에 Eq. 2과 같이 정의한 전압력 손실율을 URANS 해석 결과로부터 시간 평균한 유동장의 x/D 를 따라 계산하여 Fig. 8에 나타내었다.

$$1 - \frac{\int P_0 d\dot{m}}{\int_{x=Farfield} P_0 d\dot{m}} \quad (2)$$

앞서 Fig. 6와 Fig. 7에서 확인한 바와 같이 인접한 제트와의 상호 간섭으로 큰 박리 구간과 함께 강한 충격파가 생성된 (A)1.75D 조건에서 가장 높은 전압력

손실이 관찰되었으며, 분사구간 거리가 증가함에 따라 전압력 손실율은 감소하였다. 분사구 배치 거리에 따른 해석 구간의 출구인 $x/D=50$ 지점에서의 전압력 손

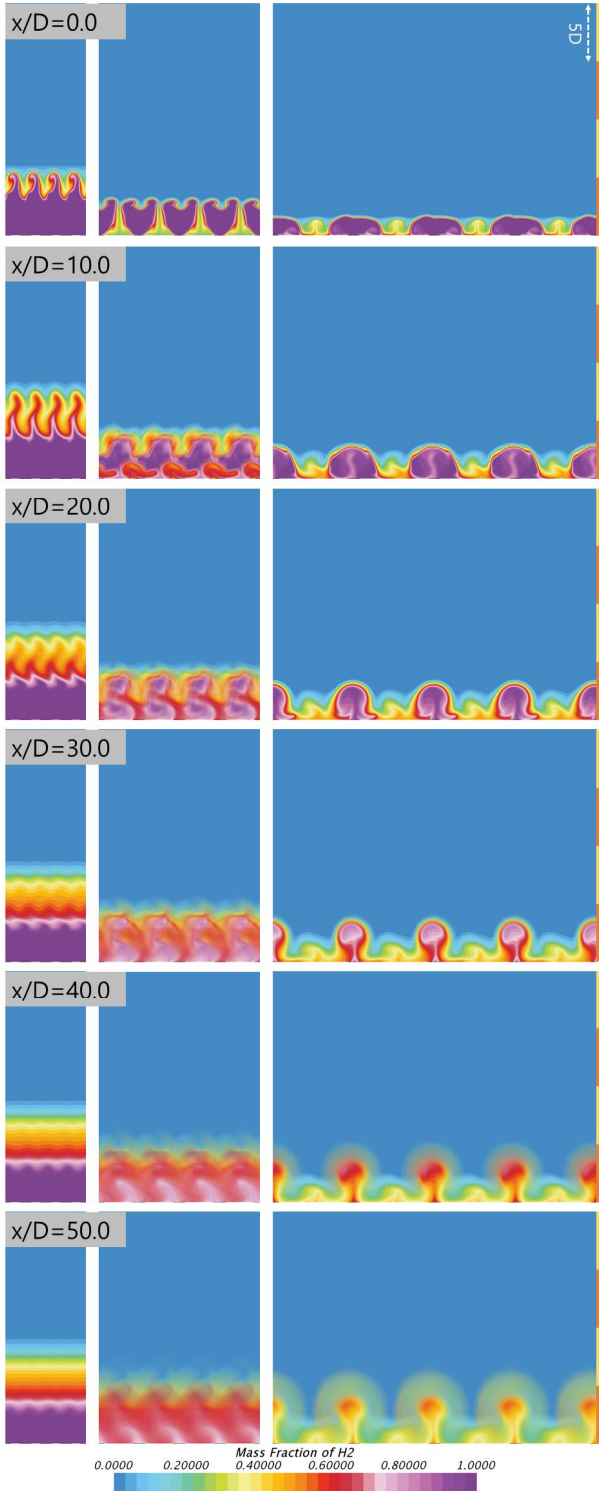


Fig. 7 Cross-sectional distribution of mass fraction of H2

실을 분사구 위치($x/D=0$)의 전압력 손실을 기준으로 조사해보면, Table 2에 나타낸 바와 같이 (B)3.5D 인 경우 가장 큰 전압력 변화가 발생한 것으로 조사되었다. (A)1.75D 의 경우, 전방에 강한 충격과 발생하고 그에 따라 $x/D=0$ 에서 높은 전압력 손실을 보이고 있으나, 이후 유동이 안정화된 반면, (B)3.5D의 경우 분사구 위치에서 상대적으로 낮은 전압력 손실을 보이나, 인접한 분사 유동과의 교란에 따라 후류에서 나타나는 불안정성에 의하여 추가적인 손실이 발생한 것으로 예상된다. 그러나 분사구의 배치 거리가 (C)7.0D 인 경우에도 $x/D=10$ 위치에서 전압력 손실은 약 16%로 10%를 나타내었던 단독 분사 조건[17]에 비해 높은 수준인 것으로 파악되어, 인접한 분사구에 의한 교란을 피하기 위해서는 더 넓은 간격으로 분사구를 배치해야 할 것으로 판단된다. 단, 실제 초음속 추진 기관에 적용할 경우 제한된 폭을 고려하면, 분사구의 크기, 간격 및 분사 연료의 양 등을 함께 살펴보아야 할 것이다.

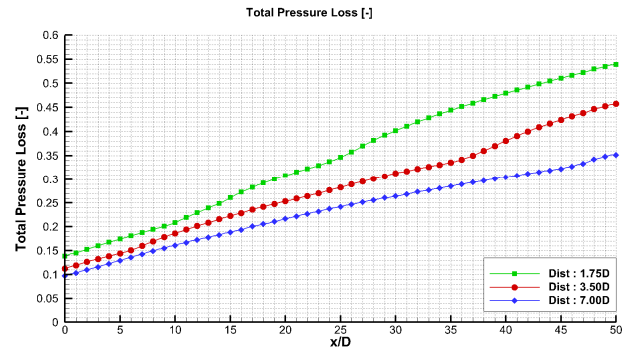


Fig. 8 Total pressure losses along longitudinal direction

Table 2 Difference of total pressure losses(%)

	(A)1.75D	(B)3.5D	(C)7.0D
$x/D=0$	13.8	11.2	9.7
$x/D=50$	54	45.7	35.2
Increase	290	310	260

3.3 분사구 거리에 따른 연료 침투 특성

Figure 9은 분사구간 배치 거리에 따른 연료의 침투 특성을 비교하기 위하여 각 x/D 단면에서 수소의 질량 분율이 1%인 지점의 최대값(closed symbol)과 최소값(open symbol)을 함께 나타낸 것이다. 이는 비정상

해석 결과 중 1ms 동안 연속 측정된 값으로부터 추출한 것으로, Fig. 9에서 확인할 수 있는 바와 같이 분사구의 배치 간격에 따라 연료의 수직 분포 특성이 크게 변화하였다. 분사구의 거리가 (A)1.75D 인 경우 Fig. 6과 Fig. 7에서 분사구 전방의 유동이 2차원 형태로 발달하고 후류의 유동에서도 교란이 관찰되지 않았다. 그 결과 Fig. 7을 통하여 예상한 바와 같이 연료의 침투 거리는 3개 조건 중 가장 높으며, 시간에 따른 변화가 거의 나타나지 않는 것으로 판단된다. 분사구의 배치 간격을 (B)3.5D 로 증가시킨 경우 $x/D < 30$ 인 구간에서 수소의 수직 분포는 $3 < z/D < 5$ 인 영역 내에서 비교적 안정적으로 형성되었으나, $x/D > 30$ 인 구간에서는 그 변동이 활발하게 일어나는 것을 확인할 수 있다. 이는 연료 제트의 분사에 의한 초기 모멘텀이 감소함에 따라 제트 경계면에서 전단력에 의한 변동의 효과로 판단되며, Fig. 6에 나타나는 등위면의 형상에서 이러한 경향을 확인할 수 있다.

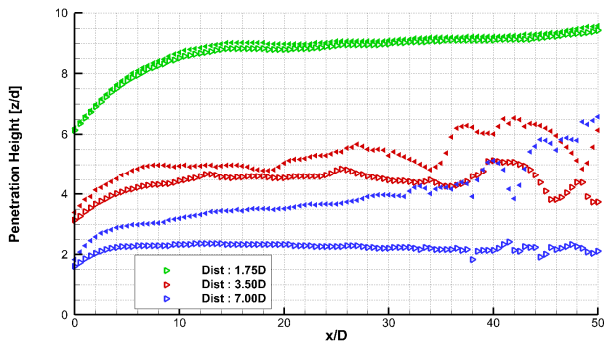


Fig. 9 Fuel penetration height

분사구 간 배치 간격을 (C)7.0D로 더욱 증가시킨 경우 후류로 진행함에 따라 질량 분율 1%인 구간의 높이 방향 변화가 큰 것을 알 수 있으며, 이로부터 연료가 비정상 특성을 가지고 넓은 범위에 존재하는 것으로 예상된다. 이 경우 침투 높이는 $x/D=10$ 위치에서 약 $z/D=3$ 으로 단일 분사구를 이용한 기존 연구[6,7,17]의 결과와 유사한 것으로 조사되었다. 이상의 결과로부터 $x/D < 40$ 인 구간에서는 분사구의 거리를 증가시킴에 따라 연료의 침투 높이는 점차 감소하는 것으로 조사되었으며, $x/D > 40$ 인 구간에서는 배치 간격이 (C)7.0D 인 조건의 침투 높이가 (B)3.5D 인 경우와 유사한 수준을 갖는 반면 연료가 넓은 공간에 분포하고, 분사 제트 사이에 자유류가 침투하여 공기를 공급할 수 있으므로 혼합 효율이 상대적으로 높게 나타날 것으로 예상된다. 그러나 실제 연소기 출구에서 균일한 유동을 얻는 것 역시 중요하므로, 최적 성능을 얻

기 위해서는 앞서 살펴본 전압력 손실율과 함께 침투 특성도 고려해야 할 것으로 판단된다.

3.4 혼합 효율

초음속 추진기관의 분사기는 연소기 내 균일한 반응 유동을 생성하기 위하여 넓은 범위에 연료를 공급할 수 있어야 하며, 충분한 혼합을 통해 공기-연료의 반응을 촉진시켜야 한다. Baurle[18] 등은 연료-산화제의 화학 반응을 포함하는 유동의 혼합 효율을 Eq. 3와 같이 정의하였다. Eq. 3은 분사된 연료 중 화학 반응이 일어날 수 있는 혼합율을 갖는 연료의 양을 나타내는 것으로 α_R 은 분사된 연료의 stoichiometry 비를 기준으로 Eq.4 과 같이 정의되며, 연소가 일어난 경우 연료가 소모되므로 반응이 발생하지 않는 상태의 비반응 유동장 해석을 통해 계산될 수 있다.

$$\eta_m = \frac{\int_x \alpha_R \rho u dA}{\sum_x m_{fuel, injection}} \quad (3)$$

$$\alpha_R = \begin{cases} \alpha_{H_2}, & \alpha_{H_2} \leq \alpha_s, \\ \alpha_s \frac{1 - \alpha_{H_2}}{1 - \alpha_s}, & \alpha_{H_2} > \alpha_s \end{cases} \quad (4)$$

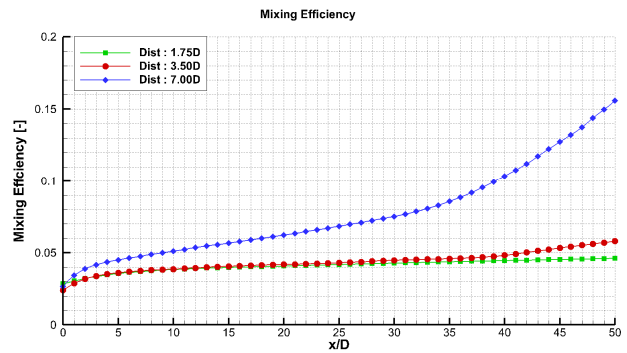


Fig. 10 Air/Fuel mixing efficiency

앞서 제시한 3개의 배치 간격을 갖는 분사 유동에서 x/D 가 일정한 단면을 따라 계산된 혼합 효율을 Fig. 10에 나타내었다. $x/D < 3$ 인 구간에서는 분사구의 배치와 관계없이 혼합 효율이 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히 (A)1.75D 인 경우 전방에 큰 박리 구간이 생성되어 공기-연료의 혼합이 가장 빠르게 시작되었을 것으로 예상되나 초기 혼합 효율에서 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 분사 후 2차원 형태로 연료가 분포하면서 충분한 공기

가 분사 제트와 혼합되지 못하였기 때문인 것으로 판단된다. 그 결과 (B)3.5D의 경우 $x/D > 3$, (C)7.0D인 경우에는 $x/D > 1$ 인 구간에서 (A)1.75D 에 비해 높은 혼합 효율을 갖는 것을 알 수 있다. 분사구의 거리가 (B)3.5D 인 조건에서 $x/D=25$ 를 기준으로 이 지점 상류에서는 혼합 효율의 변화가 크지 않은데 반하여 후류에서 혼합 효율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 6에서 $x/D < 30$ 인 영역의 마하수 등위면이 직선에 가까운 형태로 유동 교란이 크지 않고 $x/D > 30$ 인 구간 이후 교란이 상대적으로 크게 나타나는 것과 연관되어 있을 것으로 예상된다. 이러한 교란은 Fig. 8 및 Fig. 9에 관찰되는 비정상 특성으로 나타나는 것으로 판단된다. 분사구의 거리가 (C)7.0D 로 증가된 경우 다른 배치에 비해 높은 혼합 효율이 나타나는 원인 역시 분사구 근방에서 넓은 구간에 연료가 분포하고 제트 사이에 공기가 침투함으로써 연료-공기의 접촉면이 증가했기 때문인 것으로 판단된다. 이와 함께 (B)3.5D 인 경우와 같이 후류에서 비정상 특성이 나타나는 $x/D > 30$ 구간에서 혼합 효율이 크게 증가하였다.

이상의 연구에서 초음속 유동 내 폭 방향으로 복수의 수직 분사 장치의 배치가 배치되는 조건을 수치적으로 모사하고 분사구의 배치 간격이 연료의 침투 거리, 혼합 효율에 미치는 영향을 살펴보았다. 이를 통하여 인접한 분사구간 간섭 및 상호 작용에 의하여 분사구의 배치 간격이 연료의 침투 거리와 혼합 효율에 큰 영향을 미칠 수 있다는 것을 확인하였다. 연구 결과에 따르면 높은 혼합 효율을 얻기 위해서 분사구의 배치 간격을 증가시켜야 하지만, 연료의 침투 거리가 감소하므로, 제한된 연소기의 길이를 고려할 때 침투 거리를 보완할 수 있는 방안이 필요할 것으로 예상된다. 또한 실제 연소기의 폭이 제한되므로, 주기(periodic) 경계 조건 대신 벽면에 의한 제한 효과 등에 대한 연구도 추가로 수행되는 것이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 초음속 유동장 내 설치된 복수의 분사 장치를 이용한 수치 해석을 수행하고, 연료의 공간 분포, 침투 특성 및 연료-공기의 혼합 성능을 살펴보았다. 이를 위하여 단일 분사 장치를 이용한 실험 결과와의 비교를 통해 적용된 수치 기법의 타당성을 살펴보고, 동일한 분사기를 서로 다른 간격으로 배치하여 비반응 유동 해석을 수행하였다.

분사구의 배치 간격을 1.75D, 3.5D, 7.0D 로 점차 증가시키기에 따라 전방 박리 구간의 크기, 연료의 폭

방향 분포, 연료의 침투 높이나 혼합 효율 등의 차이를 확인할 수 있었다. 즉, 분사구의 간격이 증가함에 따라 박리 구간의 크기가 감소하고 전압력 손실양이 감소하였다. 이와 함께 분사구가 가까이 존재하는 경우 제트 사이로 자유류가 침투하지 못하여 혼합 성능은 낮아지는 반면, 연료의 폭 방향 흐름이 제한되어 침투 높이는 증가하였다. 특히 분사구의 거리가 가장 넓은 조건에서는 자유류로부터 산화제의 공급이 원활하게 이루어짐에 따라 다른 조건 대비 2배 이상의 혼합 효율을 갖는 것으로 조사되었으나, 연료 분사 후 충분한 거리에 이르기 전의 침투 높이가 낮아, 이를 보완하기 위한 방안이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구를 통하여 복수의 분사기를 배치하는 경우, 그 간격이 혼합, 침투 특성 등에 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 이와 함께, 실제 시스템에서는 연소기의 폭이 제한되므로 분사기의 수, 벽면에 의한 반사 효과 등을 살펴보기 위한 연구도 필요할 것이다.

References

- [1] J. A. Schetz, S. Cox, and R. Fuller, "Integrated CFD and Experimental Studies of Complex Injectors in Supersonic Flows," *20th AIAA Advanced Measurement and Ground Testing Technology Conference*, Albuquerque, NM, U.S.A., June 1998.
- [2] L. S. Jacobsen, J. A. Schetz, and W. F. Ng, "Flowfield near a Multiport Injector Array in a Supersonic Flow," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 16, no. 2, pp. 216-226, March 2000.
- [3] A. Ben-Yakar, M. Kamel, C. Morris, and R. K. Hanson, "Experimental investigation of H₂ 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.
- [4] J. Santiago, and J. Dutton, "Crossflow Vortices of a Jet Injected into a Supersonic Crossflow," *AIAA Journal*, Vol. 35, No. 5, pp. 915-917, 1997.
- [5] S. Aso, S. Okuyama, M. Kawai, and Y. Ando, "Experimental study on mixing phenomena in supersonic flows with slot injection," *29th Aerospace Sciences Meeting*, Reno, NV, U.S.A., January 1991.

- [6] A.D. Rothstein, and P. J. Wantruck, "A study of the normal injection of hydrogen into a heated supersonic flow using planar laser-induced fluorescence," *28th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Nashville, TN, U.S.A., July 1992.
- [7] J. C. McDaniel, and J. Graves, "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.
- [8] S. Tomioka, L. S. Jacobsen, and J. A. Schetz, "Sonic Injection from Diamond-Shaped Orifices into a Supersonic Crossflow," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 1, pp. 104-114, 2003.
- [9] A. Ben-Yakar, M. G. Mungal, and R. K. Hanson, "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.
- [10] S. H. Won, I. S. Jeung, B. Parent, and J. Y. Choi, "Numerical investigation of transverse hydrogen jet into supersonic crossflow using detached-eddy simulation," *AIAA Journal*, Vol. 48, No. 6, pp. 1047-1058, 2010.
- [11] R. C. Rogers, "Mixing of Hydrogen Injected from Multiple Injectors Normal to a Supersonic Airstream," NASA Technical Note, NASA-TN-D-6476, Sep. 1971
- [12] M. B. Jun, J. Lei, H. Wu, J. Liang, W. Liu, and Z. Wang, "Flow patterns and mixing characteristics of gaseous fuel multiple injections in a non-reacting supersonic combustor," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 11, pp. 1499-1516, 2011.
- [13] M. Y. Ali, and F. Alvi, "Jet arrays in supersonic crossflow - An experimental study," *Physics and Fluid*, Vol. 27, No. 12, pp. 1-30, 2015.
- [14] K. Mahesh, "The Interaction of Jets with Crossflow," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 45, pp. 379-407, 2013.
- [15] L. Zhang, and V. Yang, "Flow Dynamics and Mixing of a Transverse Jet in Crossflow - Part I: Steady Crossflow," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 139, No. 8, pp. 1-14, 2017.
- [16] S. H. Won, I. S. Jeung, and J. Y. Choi, "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.
- [17] S. H. Kim, B. J. Lee, I. S. Jeung, and H. J. Lee, "Characteristics of the Transverse Fuel Injection into a Supersonic Crossflow using Various Injector Geometry," *Journal of The Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 22, No. 3, pp. 53-64, 2018.
- [18] M. P. Burke, M. Chaos, Y. Ju, F. L. Dryer, and S. J. Klippenstein, "Comprehensive H₂/O₂ Kinetic Model for High-Pressure Combustion," *International Journal of Chemical Kinetics*, Vol. 44, No. 7, pp. 444-474, 2011.