

# 냉각 파일런 분사를 이용한 스크램제트 연소기 내 혼합증대

이상현\*

## Mixing Augmentation with Cooled Pylon Injection in Scramjet Combustor

Sang-Hyeon Lee\*

### ABSTRACT

The mixing characteristics of pylon injection in a Scramjet combustor and effects of film cooling to protect pylon from air-heating. Three-dimensional Navier-Stokes equations with  $k-\omega$  SST turbulence model were used. Fuel hydrogen and air were considered as coolants. There were remarkable improvements of penetration and mixing rate with the pylon injection. There also over-heating on the front surface of pylon without film cooling. The coolant injected parallel to the front surface of the pylon protect the pylon from over-heating.

Key Words: Scramjet Combustor(스크램제트 연소기), Mixing characteristics (혼합특성), Pylon Injection(파일런 분사), Air-heating (공력가열), Film Cooling(막냉각)

### 1. 서 론

스크램제트(Scramjet, Supersonic Combustion Ramjet)에서 과도한 공력저항 없이 연소 가능한 연료-공기 혼합기를 효율적으로 생성시킬 수 있는 연료 분사 시스템은 스크램제트 엔진의 설계에서 가장 중요한 문제 중의 하나이다. 현재까지 가장 활발하게 연구되어온 분사방법은 연료를 연소기 벽면에서 유입공기에 수직으로 연료를 분사하는 방법인데, 연료-공기 혼합 및 연소 특성이 우수하고 안정된 방법이다[1-6].

본 연구는 이전의 연료 수직분사의 혼합특성에 대한 연구[7-9]의 후속연구로, 스크램제트 연소기 내의 혼합특성(침투거리, 혼합률)을 증대하기 위한 방법론을 모색하기 위한 연구이다.

Bogdanoff는 파일런을 이용한 분사[2]가 제안된 바 있으나, 공력가열에 의한 파일런의 과열문제가 발생할 수 있음을 언급하였다. 이에 본 연구에서는 파일런의 냉각을 위해 파일런 주위에 막냉각 제트를 분사함으로써 공력가열에 의한 재료손상을 방지할 수 있는 방법론을 제시하고 이를 수치계산을 통해 검증하고자 한다.

### 2. 수치계산

수치계산은 3차원 Navier-Stokes 방정식과  $k-\omega$  SST 난류 모델[10]을 사용하였다. 지배방정식을 차별화하기 위해서 유한체적법을 이용하였다. 공간차분을 위해서는 Edwards의 LDFSS 풍상차분 기법[11]을 사용하였다. 시간적분을 위해서는 LU-SGS 기법[12]을 사용하였다.

그림 1은 본 연구에서 고려한 분사기 모델을 도시하고 있다. 모델 A는 연소기 바닥에서 수직

\* 울산대학교 항공우주공학과  
연락처, E-mail: lsh@mail.ulsan.ac.kr

분사하는 기본 모델이다. 모델 B는 막냉각 없는 파일런 분사 모델이고, 모델 C는 막냉각을 위하여 공기를 파일런 전방에서 분사하는 모델이고, 모델 D는 막냉각을 위하여 수소 연료를 파일런 전방에서 분사하는 모델이다.

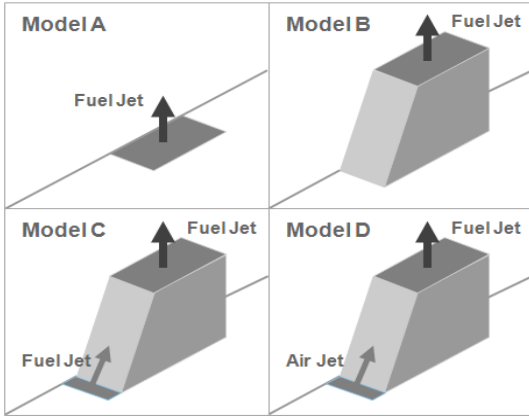


Fig. 1. Injection Model

계산조건은 고도 35km에서 비행 마하수가 6인 공기 유동이 마하 2로 감속되어 연소기 입구로 유입되는 조건이다. 입구유동의 온도와 압력은 1081K, 754kPa이다. 연료와 공기의 운동량플럭스비( $J$ ) 1.0으로 고정하여 계산을 수행하였다.

수치 계산에 사용된 격자는 계산 시간을 단축하기 위하여 대칭 경계조건을 사용하였다. 수치 계산 격자수는  $190 \times 75 \times 100 (= 1,425,000)$ 개이다.

### 3. 결과 및 분석

#### 3.1 전체적인 혼합과정

그림 2는 기본 수직 분사기와 파일런 분사기의 혼합특성을 나타내고 있다. 짙은 부분이 연료 질량분율이 높은 부분이다. 모델 A와 B를 비교하면, 모델 B에서 연료의 침투거리가 증대되고, 연소기 바닥면에 연료의 잔류량이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

모델 C는 모델 B와 거의 유사한 혼합 양상을 보이고 있는데, 모델 B에 비해 연료가 연소기 바닥에 잔류하는 양이 더 감소하는 것을 알 수 있다. 모델 D의 경우 기본 모델에 비해 연료의 침투거리는 어느 정도 증대되지만, 연소기 바닥에 연료가 잔류하는 문제가 발생함을 알 수 있다.

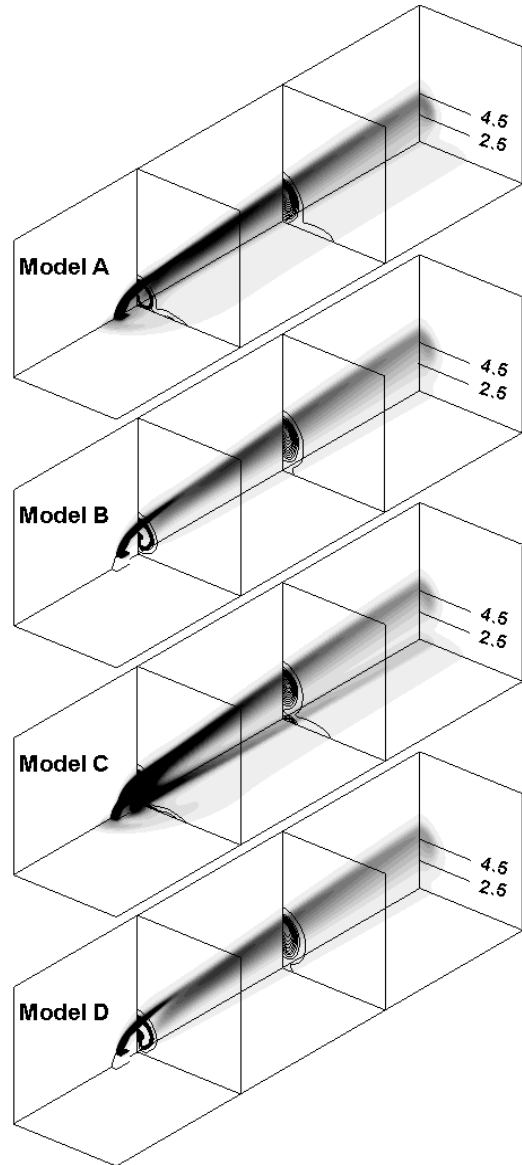


Fig. 2 Distribution of hydrogen mass-fraction

#### 3.2 혼합 특성

그림 3은 각 모델의 침투거리의 경향을 나타내고 있다. 파일런을 통한 분사(모델 B, C, D)는 모델 A에 비해 모두 침투거리가 큰 것으로 나타났다. 모델 C가 모델 B 및 D보다 작은 침투거리를 나타내는 것은 막냉각을 위하여 연료를 파일런 전방의 바닥에서 분사하기 때문인 것으로 판단된다.

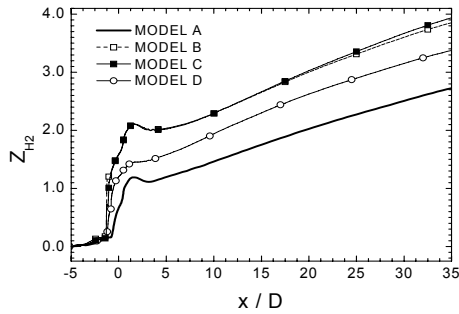


Fig. 3. Variation of Penetration distance

그림 4는 각 모델에 대한 선회율 변화를 보여 주고 있다. 연소기 바닥에서 분사하는 모델 A에 비해 파일런을 이용한 분사를 이용하는 모델 B, C, D의 선회율이 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 모델 B, C, D는 거의 비슷한 선회율의 변화를 보이는데, 특이한 것은 분사기 후방에서 모델 D의 선회율의 가장 크게 나타난다는 점이다. 이는 혼합률 증가에 영향을 미치게 될 가능성이 크다.

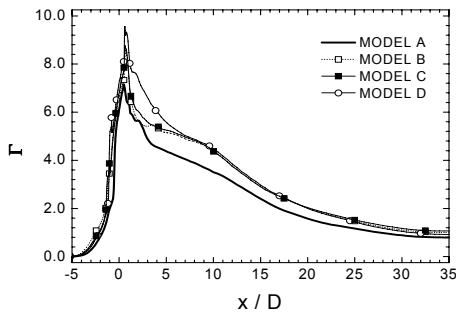


Fig. 4. Variation of circulation

그림 5는 수소 최대 질량분율이 감소하는 정도를 log-log 스케일에 표시한 것이다. 파일런 분사의 경우 모델 A에 비해 큰 혼합률을 나타내는 것으로 나타났다. 이는 앞서 살펴본 선회율의 크기와 관련이 깊은 것으로 판단된다. 파일런을 장착한 모델의 혼합률이 모델 A보다 큰 선회율을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 모델 C가 가장 빠른 혼합을 나타낸다.

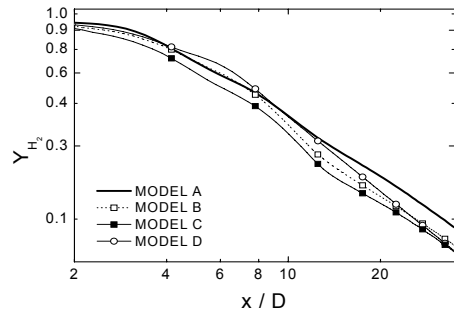


Fig. 5. Variation of mixing rate

그림 6은 각 모델에 대한 정체압력의 변화를 도시하고 있다.  $x/D=35$  지점을 기준으로 볼 때, 정체압력이 약 4~5% 감소하는데, 모델 A에 비해 파일런 분사 모델의 정체압력 손실이 더 크게 나타남을 알 수 있다. 파일런 분사 모델 중에서도 침투거리가 크고 혼합률이 클수록 정체압력 손실이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 하지만 정체압력 손실 증가가 최대 약 1.5% 정도로 혼합특성의 증대를 고려할 때 그렇게 크지 않는 것으로 판단된다.

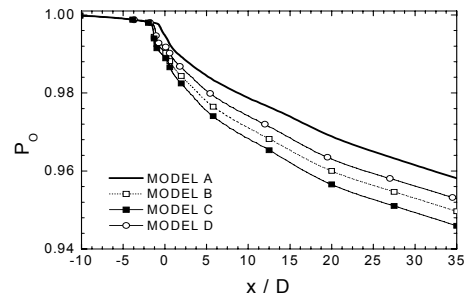


Fig. 6. Losses of stagnation pressure

그림 7은 분사기 주위의 온도분포를 도시하고 있다. 짙은 부분이 온도가 높은 부분이다. 가장 짙은 부분의 온도는 1745K이고, 가장 밝은 부분의 온도는 312K이다. 모델 B의 경우 분사기 전방면의 최고 온도는 약 1745K로 심각한 공력가열이 일어남을 확인할 수 있다. 모델 C와 D의 경우 막냉각 제트에 의해 파일런 벽면이 냉각되어 온도가 상당히 떨어진 것을 확인할 수 있다.

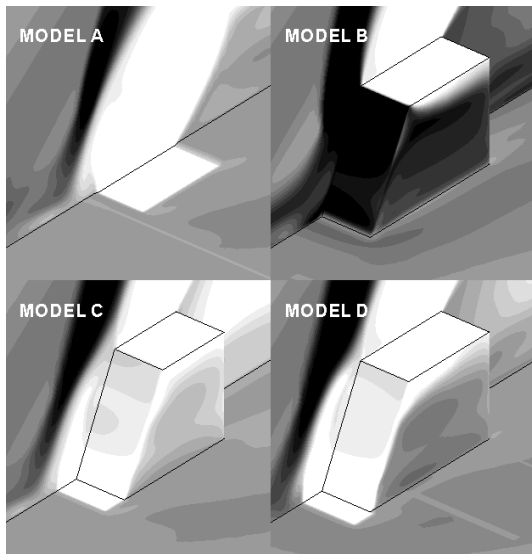


Fig. 9. Temperature Distributions near Injectors

#### 4. 결 론

연료 파일런 분사는 연소기 바닥면에서 연료를 분사하는 방식에 비해 침투거리, 혼합률 등의 혼합특성을 증대하는 것으로 나타났다. 파일런 분사에 의해 정체압력 손실이 증가되는 것을 확인하였는데, 혼합특성의 증대를 고려하면 손실의 증가는 크지 않은 것으로 판단된다.

파일런 분사 모델에서는 파일런 표면의 과열이 확인되었으며, 막냉각 제트를 파일런 전방에서 분사하는 방안을 제시하였는데 상당히 효과가 있는 것으로 확인되었다. 막냉각 제트로 연료인 수소와 공기인 경우에 대해 조사하였는데, 수소를 막냉각 유체로 사용하는 경우 냉각효과가 조금 더 뛰어나지만, 연료의 침투거리의 감소와 연소기 바닥면에 연료가 잔류하는 문제가 발생함을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

1. E. T. Curran and S.N.B. Murthy., "SCRamjet Propulsion," AIAA, Volume 189 Progress in Astronautics and Aeronautics, 2001, pp. 539-564.
2. Bogdanoff, D. W., "Advanced Injection and Mixing Techniques for Scramjet Combustors," Journal of Propulsion and

- Power, Vol. 10, No. 2, 1994, pp. 183-190.
3. Kumar, A., Bushnell, D. M., and Hussaini, M. Y., "Mixing Augmentation Technique for Hypervelocity Scramjets," Journal of Propulsion and Power, Vol. 5, No. 5, 1989, pp. 514-522.
4. Gruber, M. R., Nejad, A. S., and Goss, L. P., "Surface Pressure Measurements in Supersonic Transverse Injection Flowfield," AIAA Paper 97-3254.
5. Schetz, J. A., Weinraub, R. A., and Mahaffey, R. E., Jr., "Supersonic Transverse Injection into a Supersonic Stream," AIAA Journal, Vol. 6, No. 5, 1968, pp. 933-934.
6. Everett, D. E, Woodmansee, M. A., Dutton, J. C., and Morris, M. J., "Wall pressure Measurements for a Sonic Jet Injected Transversely into a Supersonic Crossflow," Journal of Propulsion and Power, Vol. 14, No. 6, 1998, pp. 861-868.
7. 이상현, "초음속 유동장 내 수직분사의 혼합 특성 개선 연구," 한국항공우주학회지, 29권 5호, 2001, pp. 99-107.
8. Lee, S-H, and Mitani, T., "Mixing Augmentation of Transverse Injection in Scramjet Combustor," Journal of Propulsion and Power, Vol. 19, No. 1, Jan. 2003, pp. 115-124.
9. Lee, S-H, "Characteristics of Dual Transverse Injection, Part 1: Mixing," Journal of Propulsion and Power, Vol. 22, No. 5, Oct. 2006, pp. 1012-1019.
10. Menter, F.R., "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, 1994, pp.1598-1605.
11. Jack R. Edwards, Meng-sing Liou, "Low-Diffusion Flux-Spilting Methods for at All Speeds" AIAA Journal, Vol. 36, No. 9, 1998.
12. Yoon, S., and Jameson, A., "Lower-Upper Symmetric-Gauss-Seidel Method for the Euler and Navier-Stokes Equation," AIAA Journal, Vol. 26, No. 9, 1988, pp. 1025-1026.