

# 램제트 연소기 내 유동조건에 따른 분무 및 연소천이 ( I ) : 연소실 램공기 유동

함 회 철(국방과학연구소)\* · 이 진 호\*\* · 윤 용 섭\*\* (연세대)

## Effect of Flows on the Evolution of Sprays and Combustion in Ramjet Combustor ( I ) : Ram Air Flows in Combustion Chamber

H. C. Hahm\* · J. H. Lee\*\* and W. S. Yoon\*\*

### ABSTRACT

With a view to estimating the effect of flows on evolving sprays and combustion in ramjet combustor and corresponding extent of combustion, ram air flows in combustion chamber is numerically experimented. Preconditioned three dimensional Navier-Stokes system of equations per transient, compressible, turbulent flows in IRR(Integral Rocket Ramjet) combustor is numerically integrated. Flow properties in the side-dump ramjet combustor, rectangular duct with two 60-deg curved inlets located radially at an angle of 180-deg, are addressed in terms of mixing quality and extent of combustion efficiency.

### 1. 서 론

램제트 연소기의 궁극적인 목표는 여타의 가스발생기를 제외한 추진기관과 동일하게 발사체를 의도한 대로 비행시키기 위한 동력의 발생, 즉 열방출(heat release)을 주어진 요구조건 대로 발생하는 것이다. 그러나 연료-산화제 모두를 사용하는 추진기관과는 다르게 램제트나 ducted 로켓은 공기흡입식이며, 공기의 흡입조건이 비행조건과 맞물려 있어, 산화제 유동의 기계적인 조절이 만족한 열방출량의 달성에 중요한 조건이 된다. [1]. 램제트에 공통적으로 사용되는 급 확장 덤프 형태의 연소기는 IRR(integrated rocket ramjet)의 기본적인 연소기 형상이다. 체적이 제한된 램제트와 ducted 로켓 유도무기에 적용하기 위해 측면 덤프 연소

기는 동축 덤프 연소기를 대신할 목적으로 설계, 연구되고 있다. 측면 흡입구 덤프 연소기에서, 주 공기 유동은 다수의 측면 흡입구를 통해 연소기로 유입된다. 연료는 ducted 로켓의 경우 연소기의 상단에서 분사되고, 액체 연료 램제트의 경우 흡입구 덕트 내에서 분사된다. 흡입구를 통과하면서 충격파에 의해 가압된 램공기는 비교적 빠른 속도로 연소실로 유입되고 액상으로 분무되는 연료(일반적으로 Alkane 탄화수소 콤파운드의 혼합물)와 빠르게 혼합되어 연소되어야 한다. 따라서 분사기로 인위적으로 조절할 수 있는 액상의 국소혼합보다는 크고 작은 스케일의 기상 유동이 중요하다. 일단 연소기로 유입된 혼합물은 연소되어 매우 빠르게 팽창, 가속되므로 거의 흐름관의 형태를 나타내게 되어, 연소와 그에 따른 열방출의 정도는 반응이 발생하기 이전인 공기 유입관과 돔 근처 급팽창 영

\* 국방과학연구소 (Agency for Defence Development)

\*\* 연세대학교 기계공학과(Yonsei University, Dept. of Mechanical Eng.)

역에서의 유동 형태와 난류의 정도, 그리고 그에 따른 기상의 혼합에 지배받게 된다.

따라서 본 연구에서는 일반적인 측면 덤프식 램제트 연소기 내에서의 3차원, 비정상, 압축성, 난류유동장의 수치해석을 통하여 흡입공기 조건과 연소기 형상에 따른 램프기 유동의 변화를 고찰하고자 하였다.

## 2. 기본 방정식 및 수치 기법

일체형 로켓 램제트 연소실 내부의 유동은 본질적으로 3차원 현상이므로 이러한 내부의 복잡한 물리현상을 밝히기 위해서는 3차원, 비정상, 압축성, 난류 유동장에 대한 해석이 수행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 3차원, 비정상, 압축성, 난류 유동장 수치해석 코드를 사용하여 3차원 측면덤프 일체형 로켓 램제트 연소기내에서 발생하는 유동장 특성을 해석하였다. 이를 위해, 비압축성 유동내에서 연소중에 의해 발생하는 압축성을 고려하기 위해 압축성 알고리즘을 적용하였을 경우 발생하는 고유치의 강성을 처리하기 위한 Shuen 등[2]의 예조건화 방법과 낮은 마하수에서 발생하는 압력항의 특이성을 해결하기 위한 압력분리 기법을 사용하였다. 난류는 Shih와 Lumley[3]에 의해 제안된 Kolmogorov 난류 벽면 거동을 고려한 낮은 레이놀즈수  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

측면 덤프 연소기에서, 화염 안정은 주로 측면 흡입구 제트와 돔 상단 사이에 형성된 재순환 영역에 의해 이루어진다. 따라서 보염기는 일반적으로 필요하지 않다. IRR에서 연소실은 로켓 추진제의 구조물 역할도 수행해야 하므로 보염기가 없는 연소실은 IRR의 기본 요구조건이다.

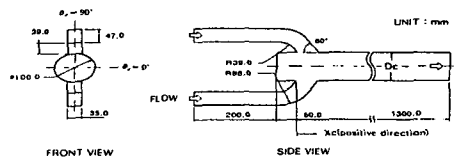


Fig. 1 측면덤프 램제트 연소기 형상

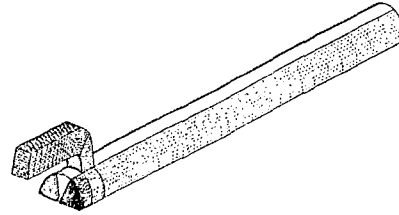


Fig. 2 Multiblock Grid for Dual-Inlet Side-Dump Ramjet Combustor(half only)  
(Block 1 : 11×11×21, Block 2 : 11×11×15, Block 3 : 11×11×31, Block 4 : 15×11×31, Block 5 : 51×11×31, Block 6 : 11×11×31, Block 7 : 15×11×31, Block 8 : 51×11×31, Block 9 : 11×11×31, Block 10 : 15×11×31, Block 11 : 51×11×31)

측면 덤프 연소기에서 유동은 다수의 측면 흡입구를 통해 연소기로 유입된다. 측면 흡입구와 덕트 축이 이루는 각도와 흡입구 상부 돔의 길이는 연소과정에 영향을 미칠 수 있는 두 가지의 중요한 변수이다. 본 연구에서 사용한 연소기 형상에 대한 내부 유동장은 난류이며, 급 확장, 충돌, 재순환, 소용돌이를 포함하기 때문에 확실한 3차원 유동이며, 매우 복잡하다. 측면 흡입구로부터 각도를 갖고 공기가 유입되면 연소실 내부에 좌우 2개의 대칭적인 와류가 형성된다. 또한 측면 흡입구의 각도에 따라 흡입구 제트의 상하에 형성되는 와류가 유동을 더욱 복잡하게 한다. 첫 번째 와류는 대류 순환류(convected flow)에 의해 구동되고, 두 번째 와류는 흡입구 제트 하류에 형성된 전단 구동 와류(shear driven vortex)이다. 제트 인접 유동장은 복잡한 3차원 와류 영역을 형성한다. 돔 평판과 측면 흡입구 사이의 유동은 흡입구 제트와의 전단과 과잉 유동(spill-over flow)에 의해 형성되는 와류영역으로 특징지어진다. 각도를 가진 유선이 위쪽 벽으로부터 중심 평면으로 부딪힌 후 직선적으로 하류로 진행한다. 그러나 흡입구에서 멀리 떨어진 하류 영역에서의 주 유동은 축방향이며, 서로 방향이 반대인 와류는 하류로 진행할 수록 점차 약화된다. 유동 형태는 연소기내에서의 연료 분산, 연소 특성, 국소가열율에 크게 영향을 미칠 것이다.

측면덤프에 의한 액체연료 램제트 연소기 내부에서 발생하는 유동특성을 연구함으로써 다차원 현상을 이해하고, 전 작동범위에서 화염안정을 유지하며 연소효율 향상을 이룰 수 있는 분무 및 연소과정에 대하여 체계적으로 고찰하기 위해, Fig. 1과 같은 2개의 사각형 흡입구 측면덤프가 원형의 연소실 축을 중심으로 대칭을 이루고, 연소실로의 측면유동 덤프각도가  $60^\circ$ 인 액체 램제트 연소실의 3차원 내부 유동장을 계산하였다. 이 형상과 유동조건은 Liou와 Wu[4]의 실험 및 Yen과 Ko[5]의 수치계산시 사용된 것과 동일하다. 여기서 보염을 위한 돔의 높이는 연소실 직경의 0.5배이다. 연소기 직경과 질량보존 연소실 통과 속도 ( $U_{in}=4.15 \text{ m/sec}$ )를 기준으로 한 레이놀즈수는  $2.6 \times 10^4$ 이며 전 유동장이 난류영역에 있다. 계산은 다중블럭 격자를 이용해 수행하였으며, 계산영역을 11개의 블럭으로 나누어 축대칭으로 계산하였다. 전체 격자의 요소(element) 개수는 70,000개이다. 흡입구의 공기 유동속도는  $9.907 \text{ m/sec}$ 이고, 온도는  $300 \text{ K}$ , 압력은 1기압이다. 격자는 Fig. 2와 같고, 계산은 다중 블럭 격자를 이용해 수행하였으며, 계산영역은 11개의 블럭으로 나누어 축대칭으로 계산하였다. 각 블럭의 격자 크기는 각각  $11 \times 11 \times 21$ ,  $11 \times 11 \times 15$ ,  $11 \times 11 \times 31$ ,  $15 \times 11 \times 31$ ,  $51 \times 11 \times 31$ ,  $11 \times 11 \times 31$ ,  $15 \times 11 \times 31$ ,  $51 \times 11 \times 31$ ,  $11 \times 11 \times 31$ ,  $15 \times 11 \times 31$ ,  $51 \times 11 \times 31$ 을 사용하였으며, 전체 격자의 요소(element) 개수는 70,000개이다. 돔 길이는 연소실 직경의 0.5배이다. 흡입구의 공기 유동 속도는  $9.907 \text{ m/sec}$ 이고, 온도는  $300\text{K}$ , 압력은  $1\text{atm}$ 이다.

Figures 3과 4는 각각  $\theta_c=90^\circ$  과  $\theta_c=0^\circ$  평면에서의 반경방향과 축방향 평균속도를 각각 나타낸 것이며, 본 연구에서 수행한 수치 계산 결과와 Yen과 Ko[5]의 수치 결과를 포함하여 Liou and Wu[4]의 실험 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 평균속도와 흡입구 제트의 충돌 정체점, 충분히 발달된(fully developed) 평균속도의 형태를 얻기 위한 길이, 난류강도 등을 구하였다. 이 결과로부터 2차원 모델에서는 예측할 수 없는 유동 특성을 확인하였다. 이러한 정보는 이 분야의 연소기 모델링을 발전시키고 시험하는데 유용할 것이다. 수치와 실험 결과를 비교하면 그 결과가 잘 일치하였지만, 연소기 입

구 영역 근처에서 상당한 불일치가 존재한다. 이는 계산시 적용된 흡입구 자료가 연소기 입구에서의 실제 조건들과 정확히 일치하지 않기 때문이다[5]. 즉, 실험 결과들로부터 측면 흡입구 덕트의 출구에서 매우 복잡한 2차 유동이 존재하는 것을 알 수 있으며, 실험상 어려움으로 정확한 연소기 입구에서 측정하는 것이 불가능하기 때문에 계산 시 흡입구 조건으로 연소기 입구에서의 값이 적용되지 못하고 측면 덕트의 출구 근처 상 평면에서 측정된 값이 적용되었다.

Figure 3에서 각도를 가진 흡입구 제트에 의해  $X_c/D_c=0.0\sim 1.0$  사이에서 반경방향 평균속도가 증가한다. Figure 4에서 유선 분리에 의해 축방향 평균속도가  $X_c/D_c=0.25\sim 0.5$  사이에서 크게 변화한다. 유선 분리 하류에서 축방향 평균속도가 중심에서  $X_c/D_c=0.5\sim 1.0$  사이에서는 증가하고,  $X_c/D_c=1.0\sim 2.5$  사이에서는 감소한다.

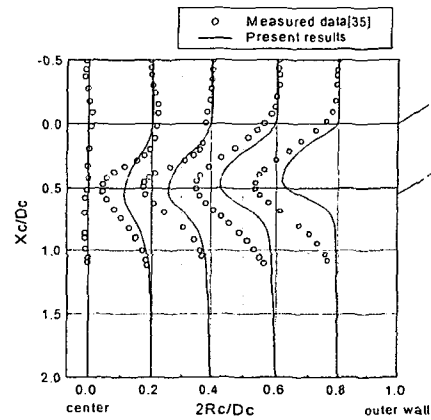


Fig. 3 Radial Mean-Velocity Profiles on the  $\theta_c=90^\circ$  Plane

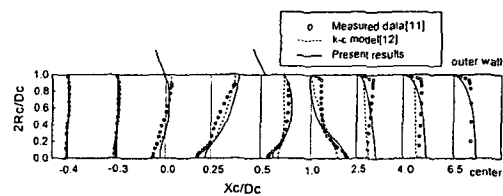


Fig. 4 Axial Mean-Velocity Profiles on the  $\theta_c=90^\circ$  Plane

이 유동 형태는 2차원 계산에서는 예측할 수 없으며, 측면 덤프 연소기 유동장의 3차원 특성을 나타내는 것이다. 즉, 이 부분의 유동장은 매우 3차원적이며, 서로 방향이 반대인 와류가 존재한다. 유동이 하류로 진행함에 따라 ( $Xc/Dc > 2.5$ ), Fig. 4에서는 축방향 평균속도가 점차 벽 근처에서 중심축으로 이동하는 것을 보여주며, Fig. 3에서는 이에 따라 반경방향 평균속도가 0이 되는 것을 보여준다. Figure 4에서 하류 벽면 근처 유동의 계산결과는 충분한 난류 특성을 나타내지 못하고 있다. 이는 컴퓨터 계산 용량의 부족으로 벽면으로 격자를 충분히 조밀하게 구성하지 못하였기 때문으로 판단된다.

충분히 발달된 유동(fully developed flow)의 위치를 측정하기 위하여 중심선에서 측정된 축방향과 반경방향 평균속도를 bulk 속도 ( $U_{ref}$ )로 나눈 값 ( $U_x/U_{ref}$ ,  $U_r/U_{ref}$ )을 Fig. 5에 도시하였다. 계산 영역의 하류 경계, 즉 독립 변수들의 유선을 따른 구배가 0인 위치는 축방향 평균속도에서 일정하게 차이는 있지만 실험결과와 계산결과가 거의 일치한다. 또한 축방향과 반경방향 평균속도가 모두 0이 되는 제트 충돌 정체점도 두 결과 거의 일치한다 (실험결과  $Xc/Dc=0.42$ , 계산결과  $Xc/Dc=0.38$ ).

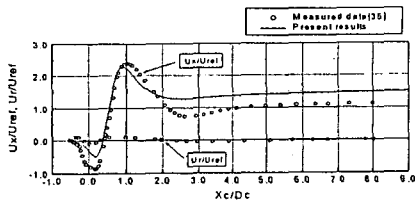


Fig. 5 Profiles of the Mean Axial and Radial Velocity Components Along the Chamber Axis

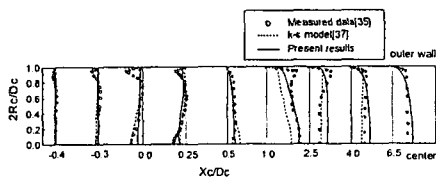


Fig. 6 Axial Mean-Velocity Profiles on the  $\theta_c=0^\circ$  Plane

Figure 6은  $\theta_c=0^\circ$  평면에서의 축방향 평균속도를 나타낸 것이다.  $Xc/Dc=0.25\sim 0.5$  사이에서 최대 축방향 평균속도의 변화가 앞에서 언급한  $\theta_c=90^\circ$  평면에서의 값과 유사하다. 이 부분의 유동장은 충돌 영역 내부에 존재하므로 속도 양상이 2개의 형태로 명확하게 구별된다. Fig. 3-6에서 보아 알 수 있듯이  $Xc/Dc=4.0$  이상에서 유동은 한 방향이며, 충분히 발달된 속도 현상을 보여준다.

$\theta_c=90^\circ$ ,  $0^\circ$  평면에서의 축방향 난류강도를 Fig. 7과 8에 각각 나타내었다. 예측한대로 평균속도의 구배가 큰 영역에서 높은 난류강도와 높은 난류에너지 수준을 나타낸다. 즉, Fig. 7에서 흡입구 제트의 전단층과 Fig. 8에서 제트의 충돌-분리-회전 영역( $0 \leq Xc/Dc \leq 0.5$ ), 나선형 유동이 우세한 영역( $0 \leq Xc/Dc \leq 1.0$ ) 등이다. 돔 영역에서도 난류가 생성되지만 작으며, 하류( $Xc/Dc > 2.5$ )에서의 난류강도 또한 매우 작다. 난류강도의 균질성과 등방성은 유동장의 중요한 특성이다. 일반적으로 측정된 난류강도는 앞에서 언급한 높은 난류영역( $0 \leq Xc/Dc \leq 1.0$ )에서 매우 높은 비균질성과 비등방성을 나타내며, 계산결과가 실험결과보다 큰 값을 나타낸다. Figure 9에 돔 내부, 흡입구, 그리고 연소실 하류 단면에서의 유동특성을 도시하고 있다.

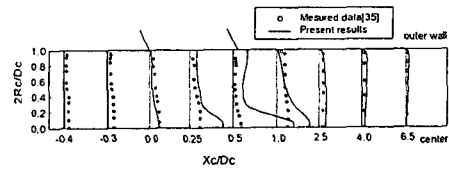


Fig. 7 Axial Turbulence Intensity Distribution on the  $\theta_c=90^\circ$  Plane

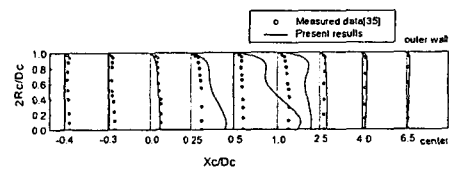


Fig. 8 Axial Turbulence Intensity Distribution on the  $\theta_c=0^\circ$  Plane

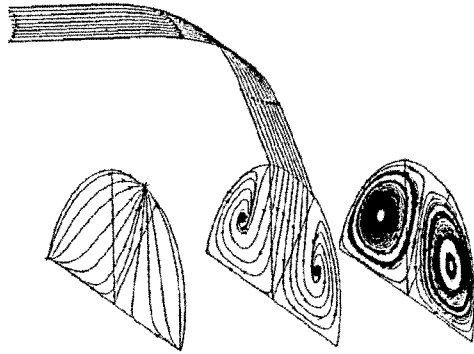


Fig. 9 Counter-Rotating Spiral Vortices(at three planes of  $i=6$ )

#### 제 4장 결론

측면 덤프식 램제트 연소기 내에서의 3차원, 비정상, 압축성, 난류유동장의 수치해석을 통하여 흡입공기 조건과 연소기 형상에 따른 램공기 유동의 변화를 수치적으로 계산하였다.

1) 흡입구 제트 유선은  $X_c/D_c=0.38$ 에서 연소기 중심축과 만난다. 흡입구 제트 유선의 상류는 돔 재순환 영역이며, 하류는 방향이 서로 반대인 2개의 나선형 유동, 그 이하는 발달된 와이프 유동이다.

2) 돔 재순환 영역 역시 방향이 서로 반대인 2개의 나선형 유동이 존재하며, 흡입구 측면으로부터 상류방향으로 회전하고 상류로 진행함에 따라 크기가 감소한다.

3) 돔 재순환 영역은  $\theta_c=90^\circ$  평면에 대해 대칭이며, 방향이 서로 반대인 2개의 나선형 유동과  $\theta_c=0^\circ$  평면에 대해 방향이 서로 반대인 4개의 나선형 유동으로 특징지워진다. 이것이 앞에서 언급하였듯이 2차원 연소기 모델로는 실현할 수 없는 방향이 서로 반대인 나선형 유동의 존재이다.

4)  $\theta_c=0^\circ$  평면의 제트 충돌 영역 주위에서 속도 양상이 2개의 형태로 명확하게 구별된다.

5) 난류는 평균속도의 구배가 큰 영역에서 매우 높은 비균질성과 비등방성을 나타내며, 돔 평면과 하류로 진행할수록 점차 균질성과 등방성이 향상된다.

향후, 돔 길이, 흡입구 각도, 유동장 면적 등과 같은 여러 가지 변수의 효과 및 연료와 공기의 난류 혼합 과정에 대한 연구가 계속될 예정이다.

#### 참고 문헌

- [1] R. F. Salyer, "Flow Visualization and Experimental Optimization of Three Inlet-Side-dump Liquid-Fuel Ramjet Combustors," AD-A283 564, Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, Sep. 1993.
- [2] J. S. Shuen, K. H. Chen, and Y. Choi, "A Time-Accurate Algorithm for Chemical Non-Equilibrium Viscous Flows at All Speed," AIAA 92-3639, 1992.
- [3] T. H. Shih, and J. L. Lumley, "Kolmogorov Behavior of Near-Wall Turbulence and Its Application in Turbulence Modeling," NASA TM 105663, 1992.
- [4] T. M. Liou, and S. M. Wu, "Flowfield in a Dual Inlet Side-Dump Combustor," Journal of Propulsion and Power, Vol. 4, No. 1, Jan.-Feb. 1988, pp. 53-60.
- [5] R. H. Yen and T. H. Ko, "Effects of Side-Inlet Angle in a Three-Dimensional Side-Dump Combustor," Journal of Propulsion and Power, Vol. 9, No. 5, 1993, pp. 686-693.