

초음속 연소기내부의 측면제트분사에 대한 수치적연구

김 종록*, 김 재수*

Numerical Study of Slot Injection in Supersonic combustor

Jong-Rok Kim*, Jae-Soo Kim*

ABSTRACT

The numerical research has been done for the transverse jet behind a rearward-facing step in turbulent supersonic flow without chemical reaction. The purpose of transverse jet is used to improve mixing of the fuel in the combustor. Two-dimensional unsteady flowfields generated by slot injection into supersonic flow are numerically simulated by the integration of Navier-Stokes equation with two-equation $k-\epsilon$ turbulence model. Numerical methods are used high-order upwind TVD scheme. Eight cases are computed, comprising slot momentum flux ratios and slot position at downstream of the step. The flow is very similar to the cavity flow, because the jet is like an obstacle. Therefore, the numerical results show the periodic phenomenon.

1. 서 론

고속 비행체의 스크램/램제트엔진에서 고속의 유동장이 내부로 유입 되는 연소기 내부에서 측면제트분사(Transverse Jet Injection)는 연소효율의 증대와 안정적 연소를 위해 매우 유용하게 사용되어진다. 연소기 내부에서 유동의 변화는 연소의 안정성과 연료와 공기의 혼합 특성에 직접적인 영향을 미치게 되어, 이들 특성의 향상을 위하여 유동 변화에 대한 연구가 필요하게 된다. 특성향상 방법으로 연료분사 상류에 cavity 형상이나 연료분사 후류에서 경사충격파에 의한

연료혼합율의 개선, 후향계단에 의한 저압 형성 등 다양한 방법이 적용되어지고 있다. 후향계단에서 수직으로 연료를 분사하는 방법은 연료와 공기의 혼합 및 연료의 침투가 빠르게 일어나며, 안정성이 높은 장점을 가지고 있다.

연료분사구 주위의 유동은 안정적 연소를 위하여 많은 연구가 필요하나, 복잡한 유동과 화학 반응으로 인해 실험의 어려움이 있어, 수치적연구가 많이 수행되어져야 하지만, 아직 많은 연구가 진행되고 있지 않다. 연소기내의 초음속영역에서 측면제트분사에 대한 연구들을 보면, 1990년대부터 NASA Langly를 중심으로 많은 연

* 정회원, 조선대학교 항공조선공학부
연락처, jsckim@mail.chosun.ac.kr,
Tel& Fax: 062) 230-7080

구[1-4]가 수행되어 왔다. McDaniel et al.[5]는 후향계단형상의 후류에서 연료를 분사하여 분사구 주위의 유동현상에 대한 실험적 연구를 수행하여, 쉐리펜사진을 통하여 도시하고, 측면제트 분사에 따른 전단층의 두께에 대한 실험을 수행하였다. 1997년 Hanson et al.[6]은 초음속유동장의 연소기내에서 측면제트분사와 경사충격파에 대한 영향에 대해서 실험적 연구를 수행하여, 유동현상과 연료분사구 후류에서 압력을 측정하였으나, 유동현상을 나타내는 결과만을 도시하였다. 국내에서 연구를 보면 정동규[7]는 연소기내의 측면제트분사와 후향계단 후류에서의 화학반응에 대한 수치적 연구를 수행하였다.

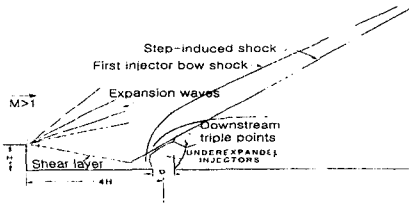


Fig. 1 single injection behind a rearward-facing step

Fig.1에 후향계단의 후류에서의 측면제트분사에 관한 유동의 개략적 특성을 나타내었다. 후향계단의 기본적인 목적은 고압의 연소기 내부에서 경계층을 분리하여, 연소기 내부의 압력을 낮추고 연료와 공기의 혼합물의 개선과 열적 쇼크 현상을 방지하기 위한 것이다. 유동의 특성은 후향계단의 뒷전에서 경계층이 분리되고 박리영역이 발생한다. 제트가 물리적인 장애물역할을 함으로서, 후향계단 후류와 제트분사 슬롯 사이에 cavity 유동과 같은 현상이 나타난다. 또한, 제트의 분사량과 분사위치에 따라 유동은 cavity 유동과 유사한 주기적 진동 특성[8,9]을 보여준다.

본 연구에서는 초음속유동장에서 측면제트 분사는 물리적인 장애물역할을 하므로, 후향계단과 측면제트사이에서 제트 분사량이나 분사거리에 따른 유동이 cavity 유동과 같은 정상과 비

정상의 유동특성을 나타내는 것을 수치적으로 묘사하는 것에 목적이 있다. 또한, 제트의 분사량에 따른 유동의 변화는 연소의 안정성에 많은 영향을 미치게된다. 화학반응이 없는 후향계단 후류에서 후향계단과 측면제트분사와의 상호영향에 의한 유동 특성을 Navier-Stokes 방정식과 $k-\epsilon$ 난류모델방정식을 이용하여 수치적으로 연구하였다. 수치해석 결과에 의하면, 제트에 의한 마하면이 장애물 역할을 하여 cavity 유동과 같은 특성을 줌으로서, 제트분사량에 따라 cavity 유동에서 발생하는 비정상 진동 특성 나타나는 것을 볼수 있다.

2. 지배방정식 및 수치계산

- 지배방정식

무차원화된 2차원 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \bar{F}}{\partial \eta} \quad (1)$$

$$= \frac{\partial \bar{E}_v}{\partial \xi} + \frac{\partial \bar{F}_v}{\partial \eta} + \bar{S}$$

무차원 기준값은 앞전에서 슬롯 중심까지의 길이, 자유유동속도, 자유유동밀도 등이며, t, ξ 과 η 는 시간과 일반 좌표축이다. (1)식에서 \bar{Q} 는 일반 좌표로 변환된 무차원 보존 유량함수벡터 $Q/J (= (\rho, \rho u, \rho v, \rho e)^T / J)$ 이다.

\bar{E}, \bar{F} 및 \bar{E}_v, \bar{F}_v 는 변환행렬과 유량 벡터에 의해 표현된 일반좌표 유량벡터고, 비점성 유량 벡터 Q, E, F 및 점성항 E_v, F_v 는 참고문헌[10,11]와 같으며, $\bar{S} (= S/J)$ 는 난류 모델식에서 사용되는 항이다.

- 난류 모델

난류모델 $k-\epsilon$ 방정식은 Jones-Launder의 모델식에 Sarkar의 보정항을 추가[12,13]하여 사용한다. 난류운동에너지 k 와 난류운동에너지 소멸율 ϵ 은 특성속도와 길이에 의해 무차원화시

켜 Navier-Stokes식과 같이 보존형태로 일반좌표에 대해 쓸 수 있다. 이 때 Navier-Stokes식의 각 유량벡터들에 대응하는 난류 모델식의 벡터는 다음과 같다.

$$Q = \begin{bmatrix} \rho k \\ \rho \varepsilon \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} \rho u k \\ \rho u \varepsilon \end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} \rho v k \\ \rho v \varepsilon \end{bmatrix}$$

$$E_v = \begin{bmatrix} \mu_k \frac{\partial k}{\partial x} \\ \mu_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \end{bmatrix}, \quad F_v = \begin{bmatrix} \mu_k \frac{\partial k}{\partial y} \\ \mu_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} S_k \\ S_\varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{P} - \rho(1+\Gamma)\varepsilon + L_k \\ C_1 \bar{P} \frac{\varepsilon}{k} + C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + L_\varepsilon \end{bmatrix}$$

$$\bar{P} = \mu_t \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} \rho k \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad \mu_\varepsilon = \mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}, \quad \mu_k = \mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$$

(2)식에서 $\sigma_\varepsilon, \sigma_k, C_1, C_2$ 등은 표준 $k-\varepsilon$ 모델의 상수이고, Γ 는 Sarkar의 압축성 보정항 [13]으로 난류 마하수 $M_T = \sqrt{k}/a_{sonic}$ 와 계수 α 에 의해 $\Gamma = \alpha M_T^2$ 로 표현된다. 압축성 보정계수는 Sarker에 의해 제시된 $\alpha=1.0$ 을 사용하였다[13]. L_k 와 L_ε 은 벽면 영향 보정항이고, 자유유동의 무차원난류강도는 0.005를 사용하였다[13].

- 수치 기법

유량벡터분리와 유량한계계수를 이용한 2차 정확도의 TVD기법을 사용하였다. 시간에 대한 이산화는 증분량을 이용하여 대류항에 대해서는 내재적방법으로 점성항에 대해서는 외재적 방법을 사용하고, 공간에 대한 이산화는 van Leer의 유량한계계수를 이용한 2차 정확도의 전방차분법을 사용하였다. [14]

- 초기조건 및 경계조건

연소기 내부에서의 측면제트분사에 관하여 J.C. McDaniel [5]의 실험에서 사용한 초기조건을 사용하였다. 수치해석의 검증을 위해서 실리렌사진과 2차원의 밀도분포에 대한 수치해석 결과와의 비교를 위해, 후향계단(rearward facing step), 그리고, 후향계단 후류에서 제트분사하는 경우에 대해 참고문헌[5]의 실험조건과 같이 마하수 2.07, 슬롯폭이 $w=2.0\text{mm}$ 일 때, 모멘텀 플럭스 $J=1.02, 0.71, 0.5, 0.35$ 에 대해서 분사유동 변화에 대해 계산을 수행하였다.

측면제트 분사에 따른 급격한 충격파의 형성과 유동의 변화를 고려하여, 수치계산에서 $CFL=1.0\sim 0.5$ 를 사용하였다. 내재적 기법에서 비교적 작은 CFL수를 사용하여, 수치계산에서 시간의 정확도와 수치적 발산에 대해서 고려하였다.

3. 결과 및 검토

- 수치계산 결과에 의한 유동특성

Fig. 2 ~ Fig. 5는 후향계단 후류 4H부분에 슬롯이 위치하고, 제트 모멘텀플럭스 $J=0.35, 0.5, 0.75, 1.02$ 일 때 수치계산에서 밀도와 난류강도에 대한 잔여치의 변화를 보여주고 있다. $J=0.35, 0.5$ 일 때 반복횟수가 증가할수록, 일정한 형태의 주기적인 특성을 보이는 비정상상태의 밀도 잔여치의 변화를 나타내고 있다. 그러나, $J=0.75, 1.02$ 일 때 밀도에 대한 잔여치 변화를 보면, $J=0.35, 0.5$ 와는 다르게 수렴되어지는 결과를 나타내고 있다. 이것은 측면제트분사의 모멘텀 플럭스가 증가함에 따라서, 후향계단 후류의 와류에 의한 영향이 감소하기 때문인 것으로 보인다. 따라서, 측면제트분사의 제트 분사량이 유동의 안정성에 많은 영향을 주는 것을 알 수 있다.

비정상유동의 특성을 나타내는 $J=0.35$ 와 0.5 에서 압력분포를 살펴보면 다음과 같다. Fig. 6와 Fig. 7는 모멘텀플럭스에 따른 시간에 대한 압력 변화를 나타낸 그림이다. 압력의 측정위치는

후향계단과 제트분사 슬롯사이의 3곳의 위치에 대하여 나타내었다. $x/L=1.0$ 와 $x/L=1.2$ 의 위치에서의 압력의 변화는 서로 반주기의 특성을 가지고 있는 것을 볼 수 있는데, 이것은 한 주기에서 후향계단에 의한 와류의 영향과 제트가 유동에 미치는 영향이 서로 상대적이라는 것을 알 수 있다. 그리고, 제트가 분사되어 형성되어지는 마하면과 궁형 충격파에 의한 와류사이에서 흡입 영역부분의 위치인 $x/L=1.3$ 에서 압력의 변화가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 후향계단의 와류의 영향이 커짐으로서 제트분사에 의한 유동의 영향이 작아지는 원인에 의한 것이다.

Fig. 8과 Fig. 9에서 한 주기에 대한 유동장의 유선의 분포에 대하여 나타내었다. 시간에 따른 유선의 형태를 보면, 제트분사가 없는 후향계단의 유동형태와 평판에서의 유동형태가 공존하는 현상이 나타나있다. 후향계단의 기저부분에서 반 시계방향의 와류가 형성되고, 제트분사의 마하면이 물리적인 장애물의 역할을 함으로서 궁형충격파를 발생시키고, 시계방향의 와류와 반 시계방향의 흡입영역의 와류가 발생한다. 후향계단의 기저부분에서 발생한 와류의 강도가 증가하면서, 기저부 와류의 영향에 의해서 제트의 마하면의 강도가 약해진다. 그리고, 마하면의 물리적인 장애물 역할이 감소하면서, 후향계단과 마하면 사이의 와류가 제트류의 유동방향으로 흐르게된다. 전체적인 유동현상은 마하면과 후향계단 그리고, 궁형충격파에 의한 음속면의 내부에서 강한 와류의 순환이 일어나고, 유동이 제트의 후류로 빠져나가면서 비정상상태의 주기적인 특성이 나타나는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구는 TVD기법으로 Navier-Stokes 방정식과 $k-\epsilon$ 난류모델 방정식을 이용하여 수치계산을 수행하여, 화학반응이 없는 후향계단 후류에서 측면제트분사에 대한 연구를 수행하였다. 후류의 제트분사에 의한 마하면이 물리적인 장

애물 역할을 함으로서, 공동유동(cavity flow)형상과 같은 유동현상이 발생하는 것을 볼 수 있었다. 그러나, 주기적인 특성의 비정상상태는 마하면 모양이 후향계단 후류의 영향에 의해서 변화하면서 나타나는 것으로 공동유동보다 더 복잡한 유동 특성을 보여주고, 분사제트모멘텀에 따라 주기적특성을 보여주거나 정상유동이 되는 것을 알 수 있었다. 따라서, 측면제트분사가 있을 때, 연소기 내부에서 안정적인 연소를 위해서는 모멘텀 플럭스에 대한 분석이 절대적으로 필요함을 알 수 있다.

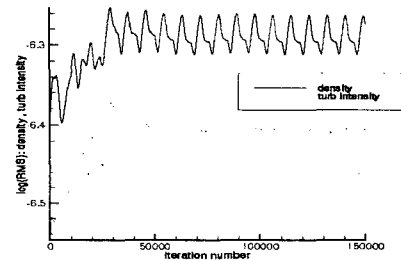


Fig. 2 History of residual density (J=0.35)

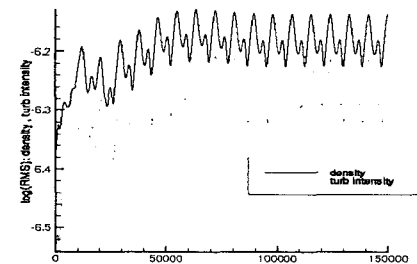


Fig. 3 History of residual density (J=0.5)

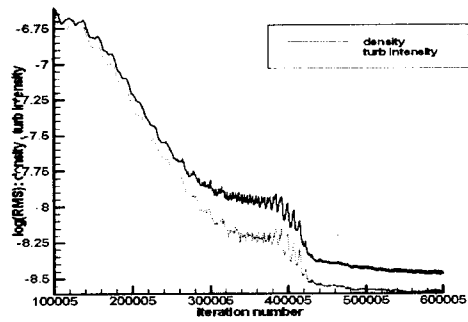


Fig. 4 History of residual density (J=0.75)

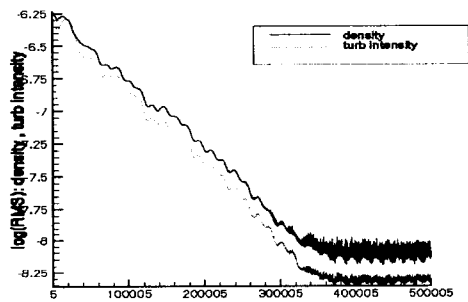


Fig. 5 History of residual density (J=1.02)

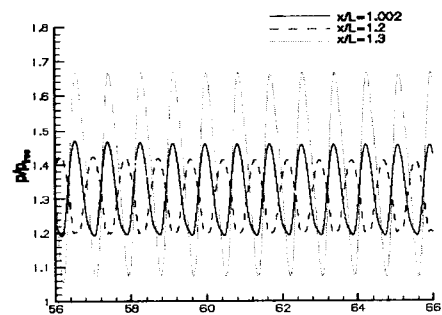


Fig. 6 Time histories of pressure(J=0.35)

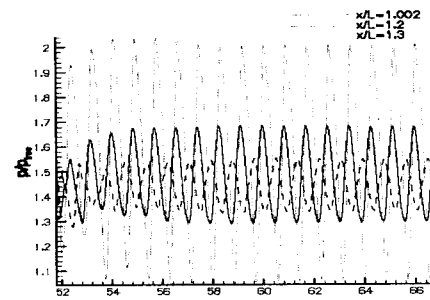


Fig. 7 Time histories of pressure(J=0.5)

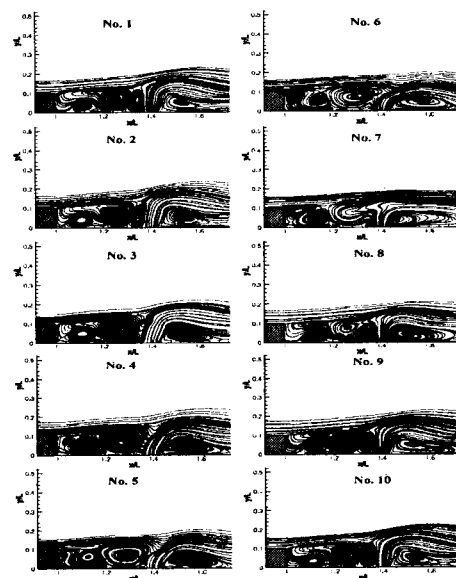


Fig. 8 Time history of Stream function contours (J=0.35)

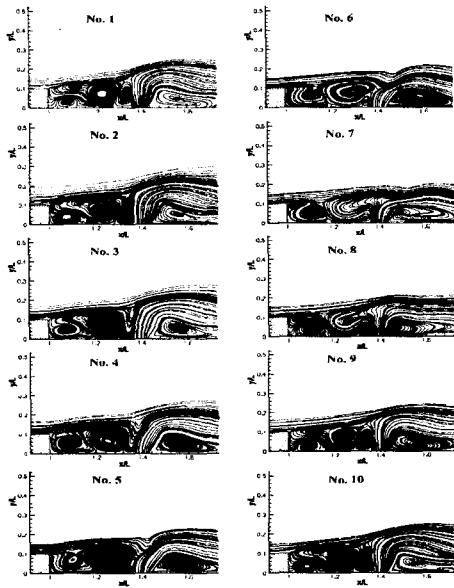


Fig. 9 Time history of Stream function contours ($J=0.5$)

참고문헌

1. J. P. Drummond, "Numerical Investigation of the Perpendicular Injector Flow Field in a Hydrogen Fueled Scramjet", AIAA Paper 79-1482, Jul. 1979.
2. E. H. Weidner and J. P. Drummond, "A Parametric Study of Staged Fuel Injector Configurations for Scramjet Applications", AIAA Paper 81-1486, Jul. 1981.
3. Bussing, Thomas R.A. and Murman, Earl M., "A Finite Volume Method for the Calculation of Compressible Chemically Reacting Flows", AIAA Paper 85-0331, Jan 1985.
4. K. Uenishi and R.C. Roger, "Three Dimensional computations of Transverse Hydrogen Jet Combustion in a Supersonic Airstream", AIAA Paper 87-0089, Jan.
5. J. C. McDaniel and J. Graves Jr., "Laser Induced-Fluorescence Visualization of

Transverse Gaseous Injection in a Nonreacting Supersonic Combustor", J. of Propulsion and Power, VOL. 4, no. 6, 1988.

6. Ben-Yakar, A. and Hanson, R.K. " Hypersonic Combustion and Mixing Studies Using Simultaneous OH-PLIF and Schlieren Imaging" AIAA Paper 98-0940, Jan. 1998.
7. 정동규, "초음속 화학반응유동의 수치적 연구", 박사학위논문, 과학기술원, 1994.
8. 황성욱, "이중 공동을 지나는 비정상 초음속 유동 수치 해석", 한국항공우주공학회지, 제22권 제5호, 1994
9. S. H. Shih, A. Hamed, and J. L. Yeuan "Unsteady Supersonic Cavity Flow Simulations Using Coupled $k-\epsilon$ and Navier-Stokes Equations", AIAA J. Vol. 32, No. 10. Oct. 1994
10. Hoffmann, K. C. and Chiang S. T., "Computational Fluid Dynamics for Engineers", Engineering Education System USA, 1993.
11. 김재수, "초음속 불완전 팽창 난류 제트 유동에 관한 수치적 연구", 한국전산유체공학회지 제4권 제2호(통권 제7호), pp. 57-66, Sep. 1999
12. Jones, W. P. and Launder, B. E., " The Prediction of Laminarization with a Two Equation Model of Turbulence," Int. Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 15, no.2 1972, pp.301-314.
13. Sarkar, S., Erlebacher, G., Hussaini, M. Y., and Kreiss, H. O., "The analysis and Modeling of Dilatational Terms in Compressible Turbulence," NASA CR 181959, Dec. 1989.
14. 김재수, "진동하는 NACA0012 날개 주위의 비정상 천음속유동 해석", 한국항공우주학회지 제 24권 제 6호, 1996.