

## 초음속 유동장 내 벤트 혼합기에 관한 수치해석 연구

김채형\* · 정인석\*\*

### A Computational Study of Flowfield for a Vent Mixer in Supersonic Flow

Chae-Hyoung Kim\* · In-Seuck Jeung\*\*

#### ABSTRACT

To improve the mixing efficiency and to reduce the pressure loss, it is needed to develop a new mixing device for supersonic combustion. The vent mixer is introduced as the new supersonic fuel-air mixer. Computational analyses, that include pressure profile, density contour, and streamline tracing, have been carried out. The expansion wave generates at the end of the extended upper wall of the mixer. And it reduces the shock wave from the hole. Incoming air flow through the hole makes several recirculation regions which increase the mixing efficiency, and the separation region at the downward wall expands the boundary layer which reduces the pressure loss.

#### 초 록

초음속 연소에서 혼합 효율을 높이면서 전압력 손실을 줄일 수 있는 혼합기에 관한 연구가 수십 년 동안 진행되어 왔으며, 본 논문에서는 이를 만족할 수 있는 새로운 개념의 혼합기를 고안하여 그 성능을 수치해석을 통하여 분석하였다. 후면 계단 혼합기를 비교 대상으로 압력과 등밀도선, 유선구조를 분석하였다. 공동이나 탭에서 발생하는 충격파가 후류로 전파되는 것과 달리, 벤트 혼합기의 구멍에서 발생하는 충격파는 벤트 혼합기 끝단에서 형성되는 팽창파에 의해 전파되지 못하며, 후류부의 재순환 영역으로 인해 경계층이 증가하며 이로 인해 후면 계단 방식에 비해 약한 충격파가 형성된다. 따라서 충격파로 인한 전압력 손실을 줄일 수 있으며, 구멍을 통한 공기 유입은 다수의 재순환 영역을 형성하여 혼합 효율을 증대시킨다. 또한 후류부에서 유동 흐름이 전반적으로 안정화되는 것을 볼 수 있다.

Key Words: Supersonic Combustion(초음속 연소), Vent Mixer(벤트 혼합기), Mixing Efficiency(혼합 성능), Pressure Loss(압력 손실)

#### 1. 서 론

† 2007년 12월 31일 접수 ~ 2008년 3월 21일 심사완료

\* 학생회원, 서울대학교 항공우주공학과, IAAT

\*\* 종신회원, 서울대학교 항공우주공학과, IAAT

연락처, E-mail: enjis@snu.ac.kr

스크램제트 엔진에 관한 많은 연구가 현재 선진국에서 진행되고 있으며, 연료와 공기 혼합은

스크램제트 성능에 있어 주요한 요소이다[1]. 스크램제트 연소기로 유입되는 유동은 초음속이며, 연소가 이루어지기 위해서는 짧은 거리에서 연료와 공기의 점화 조건을 충족시킬 수 있도록 충분히 혼합이 되어야 한다. 이와 동시에 혼합을 증대시키기 위해 설치된 장치들에 의한 전압력 손실을 고려하여 추력 손실을 줄여야 한다.

Seiner et al[2]은 지금까지 연구되어 온 스크램제트 엔진 혼합기를 수동 혼합 방식과 능동 혼합 방식으로 정리하여, 각 혼합기의 특성을 제시한 바 있다. Seiner et al에 의해 정리된 혼합기들은 혼합 시키는 방식에 따라 다시 크게 유동방향의 와류(vorticity)를 이용한 혼합방식과 공진(resonance)에 의한 혼합방식으로 구분할 수 있다[3]. 유동방향의 와류에 의한 혼합 방식은 램프(ramps), 탭(tabs), 돌출부 혼합기(lobe mixers), 셰브론(chevrons), 하이퍼 혼합기(hyper mixers) 등이 있으며, 공진에 의한 혼합방식은 후면 계단방식(backward-facing step), 공동(cavities), Helmholtz 공명기, 물결벽면(wavy wall) 등이 있다.

앞에서 열거된 혼합기들은 초음속 연소를 위해 다음 조건을 따른다. 첫째, 거시영역에서 연료와 공기는 빠른 혼합이 이루어져야 하며, 바로 배기되지 않고 연소될 수 있는 충분한 잔류시간이 필요하다(와류 혼합 방식)[2]. 특히 초음속 연소기의 경우에는 아음속 연소기와 달리 연료의 연소기 내 잔류시간이 극히 짧기 때문에 이 부분은 초음속 연소기 설계에 있어서 가장 근본적으로 고려하여야 하는 사항이다. 둘째, 미시영역에서 연료와 공기는 화학반응 시간을 줄이기 위

해 준화학반응 상태로 혼합이 되어 있어야 하며, 이는 작은 규모의 난류유동에 의해 혼합이 되며, 연소반응이 일어날 경우 이런 소규모 난류 유동은 연소가 유지될 수 있도록 산화제와 연료의 혼합을 증대시켜야 한다(공진에 의한 혼합 방식)[2]. 따라서 거시영역에서 연료와 공기의 혼합이 이루어져도 미시영역에서의 혼합이 실질적으로 이루어지지 않으면 점화가 일어나지 않는다.

본 연구에서는 연료의 연소기 내 잔류 시간 증대를 위한 아음속 재순환 영역 증대, 연료와 공기의 난류 혼합과 혼합기에 의한 전압력 손실을 최소화 할 수 있는 새로운 개념의 혼합기를 제시하고자 한다. 벤트 혼합기(vent mixer)는 Fig. 1과 같은 기본구조를 가지며, 구멍(vent)을 통하여 공기가 혼합기 내부로 유입되기 때문에 벤트 혼합기라는 명칭을 사용하였다. 위 벽면의 구멍을 통해 주유동이 연료분사 영역으로 유입되며, 이로 인해 일차적으로 연료와 공기의 거시적 혼합 증대가 이루어진다. 또한 위 벽면의 구멍은 공동과 같은 역할을 하여 상부 면에서는 경사 충격파가 형성되며, 하부 면에서는 구멍에서의 가진에 의해 연료와 공기의 난류 혼합이 이루어진다. Fig. 2는 지금까지 지속적으로 연구되고 있는 초음속 연소기 내 연료와 공기의 혼합장치 중, 본 연구에서 소개하고자 하는 벤트 혼합기와 유사한 방식을 사용하고 있는 후면 계단방식, 공동, 램프와 비교한 것이다. Fig. 2(b)-(d)에 제시된 세 가지 방식의 혼합기들은 재순환 영역을 통해 연료와 공기가 혼합될 수 있는

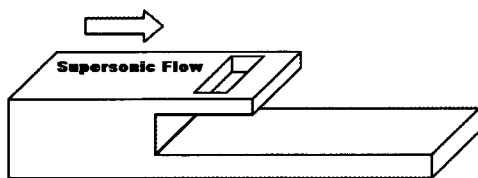
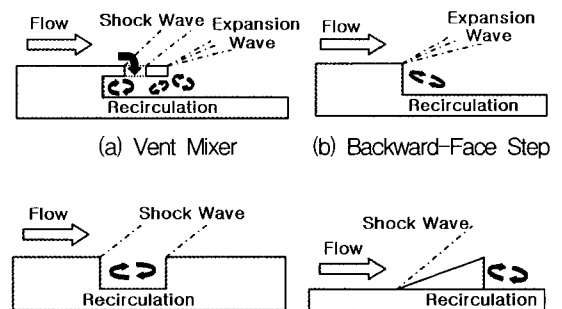


Fig. 1 Schematic of Vent Mixer



(a) Vent Mixer (b) Backward-Face Step  
(c) Cavity (d) Ramp  
Fig. 2 Comparison of Vent Mixer with Other Mixers

영역을 형성하며, 충격파나 진동 주파수에 의해 연료와 공기의 혼합을 증대시키는 방식이다[2]. 각각의 모델들은 혼합 효율과 전압력 손실 사이에서 장단점이 있으며, 지속적으로 개선 연구가 이루어지고 있다. 벤트 혼합기의 경우에는 크게 세 영역에서 재순환영역이 형성되며, 이 영역은 위 벽면의 길이나 구멍의 수에 따라 변화 가능하다. 또한 구멍에 의한 1차 가진과 후면부에서의 2차 가진으로 혼합의 증대를 높일 수 있다. 실험적 연구에 앞서 벤트 혼합기에 의한 유동장 특성을 분석하기 위해 상용코드(CFD-Fastran)를 이용한 수치해석을 수행하였다.

2. 수치해석적 방법

2.1 지배방정식

압축성 난류 유동 해석을 위해 밀도가중평균(Favre-average) Navier-Stokes 방정식을 지배 방정식으로 사용하였으며, 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = \frac{\partial F_v}{\partial x} + \frac{\partial G_v}{\partial y} \quad (1)$$

보존변수 Q와 플럭스 벡터들은 다음과 같다.

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \\ \rho k \\ \rho \omega \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (e + p)u \\ \rho uk \\ \rho u\omega \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho v^2 + p \\ (e + p)v \\ \rho vk \\ \rho v\omega \end{bmatrix}$$

$$F_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \beta_x \\ \frac{\mu_k \partial k}{\partial x} \\ \frac{\mu_\omega \partial \omega}{\partial x} \end{bmatrix}, \quad G_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ \beta_y \\ \frac{\mu_k \partial k}{\partial y} \\ \frac{\mu_\omega \partial \omega}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2)$$

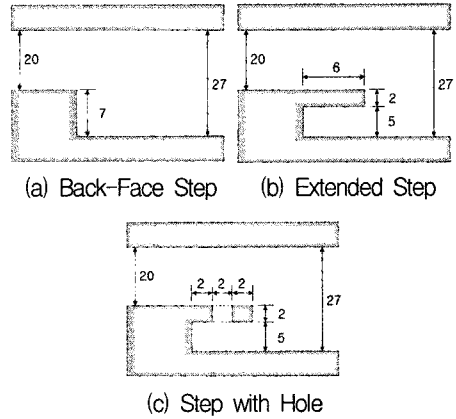


Fig. 3 Various Model Configurations

2.2 수치해석법

이차원 정상상태 조건으로 수치해석을 수행하였다. 공간 차분기법은 Roe의 2차 정확도 풍상 차분법(2nd order upwind scheme)을 사용하였으며, minmod 제한자를 사용하여 고차의 공간 차분 정확도를 유지하였다. 시간적분 방법은 Fully Implicit Point Jacobi기법을 사용하였다. 벽면은 no slip, 단열 조건을 사용하였으며, 모든 계산은 계산오차가 10<sup>-6</sup>이 될 때까지 수행하였다.

난류모델은 Menter의 SST(Shear Stress Transport) κ - ω 모델을 사용하였다. SST 모델은 2차 방정식 모델로 물질전달(ω)과 난류 운동 에너지(k)의 소산률을 계산하기 위한 모델로, 경계층 해석에 사용되는 표준 κ - ε 모델과 벽면 난류 현상 해석에 사용되는 κ - ω 모델을 혼합한 난류 모델이다[4].

2.3 수치해석적 형상 및 계산 조건

수치해석에 사용된 형상은 Fig. 3과 같다. 비교 자료로서 후면 계단 방식 형상을 사용하였으며, 위 벽면 연장 효과를 알아보기 위해 벽면을 6 mm 연장시킨 모델을 사용하였다. 구멍에 의한 유동 형상을 분석하기 위해 연장된 벽면의 중심 지점에 길이 2 mm 구멍을 형성하였다. 일반적으로 고도 약 20 km(P<sub>0</sub>: 5.5 kPa, T<sub>0</sub>: 216.7 K)에서 비행 마하수 5인 스크램제트엔진의 연소기 입구 마하수는 약 2이다[5]. 현재 보유하고

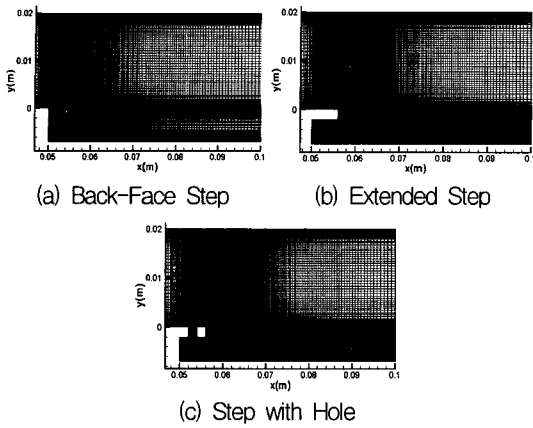


Fig. 4 Grid Configurations

있는 초음속 풍동장치의 마하수는 1.92(노즐 설계 마하수 2), 전압력  $P_0$ 는 658.6 kPa, 전온도  $T_0$ 는 295.5 K이며, 자세한 내용은 참고자료[6]를 참고하기 바란다. 계산에서의 유동 유입 조건은 풍동장치의 유입조건과 같다.

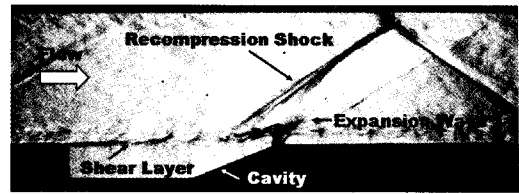
계산에 사용된 격자는 다음과 같다. Fig. 4(a)의 격자수는 41,965개, Fig. 4(b)의 격자수는 81,419개, Fig. 4(c)의 격자수는 87,829개이며, 특히 벤트 혼합기의 위 벽면 연장 부분과 구멍에 의한 유동 현상을 자세히 알아보기 위해 Fig. 4(a)에 비해 Fig. 4(b)-(c)의 격자수를 약 2배 정도 조밀하게 하였다. 벽면에서의 wall function을 고려하여 경계층 영역에서의 격자간격을  $1 \mu\text{m}$ 로 조밀하게 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

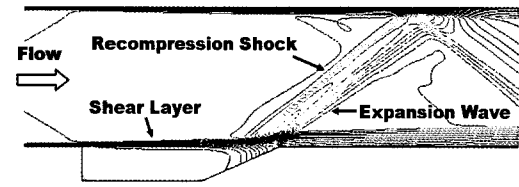
#### 3.1 등밀도선을 이용한 유동 분석

##### 3.1.1 유동가시화 사진과 등밀도선 비교

벤트 혼합기의 수치해석에 앞서 초음속 유동장 내에서 공동(cavity)을 이용한 연료 공기 혼합 실험 자료[6] 중 연료를 분사하지 않았을 때의 슐리렌 사진을 이용하여 코드 검증을 수행하였다. 계산 조건은 마하수 1.92, 시험부 정압력 95.2 kPa, 시험부 정온도 170 K이며, Menter의 SST 난류 모델을 사용하였으며, 다른 조건은 본



(a) Schlieren Image[6]

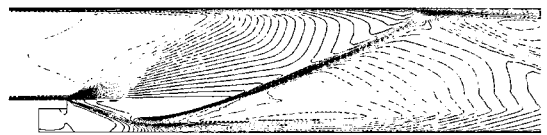


(b) Density Contour

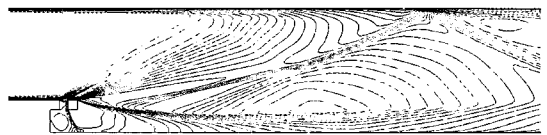
Fig. 5 Comparison of Cavity Case



(a) Back-Face Step



(b) Extended Step



(c) Step with Hole

Fig. 6 Comparison of Density Contours

논문에서 제시한 조건과 동일하다.

Figure 5는 슐리렌 장치를 이용하여 마하 1.92 초음속유동장 내에서 공동에 의한 유동 현상을 나타낸 슐리렌유동 가시화 결과와 같은 유입 조건에서 수치 해석을 통해 얻은 등밀도선을 비교한 사진이다. 슐리렌 사진과 수치계산에 의한 등밀도선을 비교해 보면, 공동 앞전에서 형성된 전단층과 후면부에서의 재압축 충격파(recompression shock)발생 위치, 충격파 뒤 팽창과 부분과 공동 후면에서 유동 형상이 거의 동일하게 나타나는 것을 알 수 있다.

### 3.1.2 등밀도선을 이용한 유동장 해석

Figure 6은 후면 계단 방식, 위 벽면 6 mm 연장 방식, 6 mm 연장된 벽면의 중심 지점에 2 mm 구멍을 형성했을 때의 등밀도선을 나타낸다. Fig. 6(a)는 후면 계단 방식의 등밀도선을 나타낸다. 후면 계단 끝단 부분에서 팽창파가 형성되는 것을 볼 수 있다. 후면 계단 뒤 아래 벽면 부분에서 경사 충격파가 형성되며, 위 벽면과 충돌하는 지점에서 재순환 영역이 형성되는 것을 볼 수 있다. Fig. 6(b)에서는 위 벽면을 6 mm 연장 시킨 만큼 팽창되는 부분과 충격파가 후류부로 약 6 mm 이동한 점을 제외하고는 Fig. 6(a)와 전반적인 유동 형상이 비슷한 것을 알 수 있다. Fig. 6(c)는 Fig. 6(b) 모델의 중심부분에 2 mm 구멍을 형성했을 때의 등밀도선을 나타낸다. 구멍 부분에서 충격파가 형성되는 것을 볼 수 있다. 하지만 후면에서의 팽창파 영향으로 충격파가 후류부로 전파되지 못하는 것을 알 수 있다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)의 경우는 유동이 아래벽면에서 급격히 휘어져서 강한 충격파가 형성되지만 Fig. 6(c)의 경우에는 후면부로 완만하게 밀도 분포가 퍼져가는 것을 볼 수 있으며, 충격파의 밀도분포 역시 Fig. 6(a)-(b)와 달리 조밀하지 않는 것을 볼 수 있다. 또한 구멍 부분과 아래벽면사이에 밀도 분포가 높은 등밀도선이 존재하는 것을 볼 수 있는데, 이는 구멍을 통해 유동이 유입된다는 것을 의미한다. 혼합기 내로 유입되는 유동을 경계로 앞뒤 경계가 나뉘지며, 이 지점에서 재순환영역이 형성된다. Fig. 6(a)-(b)의 경우 아래벽면으로 급격하게 경사졌던 등밀도선이 후류로 퍼지는 것과 달리 Fig. 6(c)의 경우 완만하게 후류로 퍼지는 것을 볼 수 있으며, 후방 경계층 또한 다른 두 모델의 경우보다 큰 것을 알 수 있다.

### 3.2 벽면 압력 분포와 전압 변화

후면 계단 벽면(계산 시작지점에서 0.05 m 지점)에서부터의 압력 분포를 Fig. 7에 나타내었다.

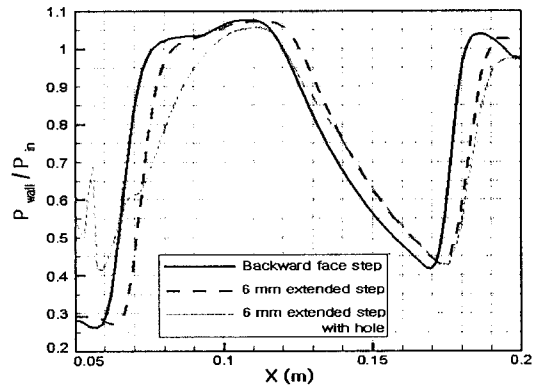


Fig. 7 Wall Pressure Distributions

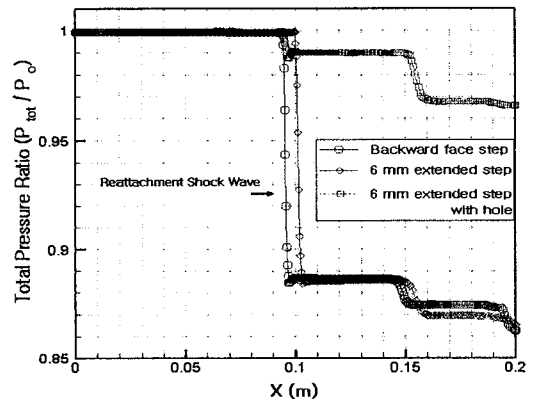


Fig. 8 Total Pressure Ratio Distributions

후면 계단 모델과 위 벽면을 6 mm 확장시킨 모델의 경우 전반적인 압력 분포가 유사하다. 위 벽면을 6 mm 확장시킨 모델은 후면 계단 모델의 압력분포를 우측으로 6 mm 만큼 평행 이동시킨 것과 같은 분포를 보인다. 구멍을 가지는 모델의 경우 공기 유입으로 인해 그래프 시작지점에서 압력의 증감이 나타나며, 다른 모델들과 달리 압력곡선이 완만하게 증가하다가 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 약 0.19 m 지점에서 다른 두 모델에 비해 압력값이 낮은 것을 볼 수 있다. 이는 연소기의 위 벽면에서 반사된 충격파가 아래벽면에 다시 충돌하는 지점이 약 0.19 m 지점이며, 충격파의 강도가 약하기 때문에 압력 값이 다른 두 모델에 비해 작게 나오는 것이다. Fig. 7

의 압력 분포를 토대로 분석을 하게 되면, 혼합기 위 벽면 연장부에 구멍이 있음으로 인해 전체적인 연소기 내 압력의 증감이 완만하게 되며 후류부에서 형성되는 충격파의 강도 또한 약화되는 것을 알 수 있다.

홀에 의한 전압력 손실 감소효과를 알아보기 위해 각 모델의  $x=0\text{ m}$ ,  $y=0.01\text{ m}$  지점에서 스트림라인을 형성하여 입력 전압값( $P_0$ )에 대한 각 지점의 전압( $P_{tot}$ ) 비를 Fig. 8에 나타내었다. 후면 계단 모델과 위 벽면을 6 mm 확장시킨 모델의 경우 충격파를 지나면서 약 11 %의 전압손실이 있는 반면, 홀을 가지는 모델의 경우는 약 1 %의 전압손실을 보였다. 반사 충격파를 지났을 경우에도 홀이 없는 모델의 경우 약 13 %의 전압손실을 보이는 반면 홀이 있는 모델의 경우 약 3 %의 전압손실을 보였다.

따라서 벤트 혼합기에서 홀의 존재가 혼합기에서 발생하는 충격파의 강도를 감소시키는 데 주요한 요소임을 알 수 있다.

### 3.3 혼합기에서 유동 특성 해석

혼합기에서의 유선구조를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)는 후면 계단 방식으로 벽면 뒤에서 큰 재순환 영역이 형성된 것을 볼 수 있다. 일반적으로 이 부분에서 연료와 공기의 혼합이 이루어지며, 벽면의 높이에 따라 재순환 영역의 크기가 변하여 후류부로 흘러가는 유동의 경사도가 달라진다. Fig. 9(b)에서는 크게 두 지점에서 재순환 영역이 형성된 것을 볼 수 있다. 위 벽면의 연장된 길이만큼 재순환 영역이 확대되며, 후류부에서의 유선구조는 후면 계단 방식에서의 유선구조와 유사하다. Fig. 9(c)의 경우 다른 두 경우와 달리 복잡한 유선구조를 보이고 있다. 구멍 부분에서 주유동의 유입과 함께 1차 재순환영역이 형성되며, 구멍을 통해 유입된 유동에 의해 전후 두 지점에서 재순환영역이 형성된다. 전반부에 위치한 재순환영역은 Fig. 9(b)의 재순환영역에 비해 활발한 순환을 보이는 것을 확인할 수 있다. 후반부 재순환 영역에서 유동 방향은 역방향과 후류 방향으로 분리가 된다. 주 유동 방향에 대해 역방향으로 흐르는 유동은 후반부 재순환영역으로 다시 흘러 들어가거나 주유동 경계면을 따라 흐르게 된다. 후류부로 흐르는 유동은 역방향 유동에 의해 팽창하게 되며, 이 지점에서 역압력 구배가 발생하여 후류 벽면에서 박리영역이 형성되게 된다. 이렇게 형성된 박리영역에서 재순환 영역이 형성되는 것을 볼 수 있다. 특히 이 지점은 전체적인 재순환 영역을 증가시키는 역할을 하여 Fig. 6(c)에서와 같이 후류부 유동의 흐름을 완만하게 하고, Fig. 7-8과 같이 충격파의 강도를 약화시켜 전압력 손실을 줄여주는 역할을 하게 된다.

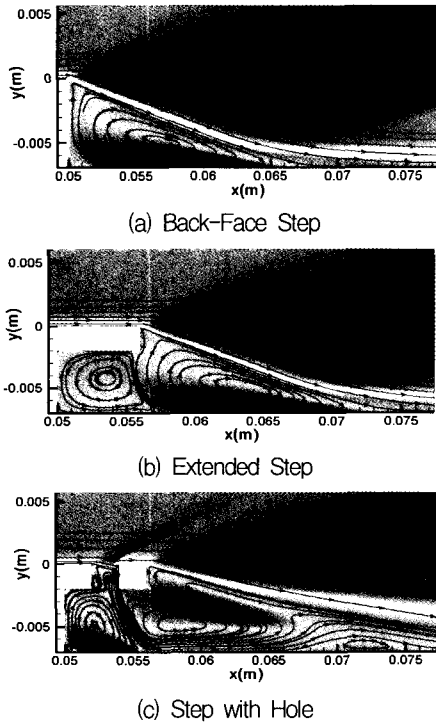


Fig. 9 Stream Line Contours

## 4. 결 론

본 논문에서는 벤트 혼합기(vent mixer)에서 구멍에 의한 유동 특성을 수치해석을 통하여 분석하였다. 구멍에서 형성된 충격파는 혼합기 끝단에서의 팽창파에 의해 후류로 전파되지 못하

며, 혼합기 끝단에서 후류부로 흐르는 유동의 경사가 완만하여 다른 혼합기에 비해 약한 충격파가 형성된다. 구멍을 통해 유입된 공기는 혼합기 내에 여러 재순환영역을 형성하며, 후류부에서의 재순환영역은 유동의 진행을 완만하게 하여, 후류부의 경계층과 재순환 영역을 증가시키며 충격파의 강도를 완화시키는 역할을 한다. 전반적으로 벤트 혼합기는 연료와 공기가 혼합될 수 있는 영역은 증대시키면서 충격파에 의한 전압력 손실은 줄여 준다. 이를 토대로 벤트 혼합기는 기존의 초음속 혼합기와 달리 혼합 효율을 증대시키면서 전압력 손실은 낮출 수 있는 새로운 개념의 초음속 혼합기로 초음속 연소기 성능향상에 기여할 것으로 기대된다.

앞으로 벤트 혼합기(vent mixer) 연구를 위해 구멍의 수, 구멍의 크기, 벽면의 길이 등의 변수를 통한 혼합·연소 실험 및 수치 해석 연구를 지속적으로 수행할 예정이다.

#### 후 기

본 논문의 저자는 서울대 항공우주신기술연구소의 일원으로, 국제과학기술협력재단/한이태리 협력기반조성사업(K20713000013-07B0100-01310)의 지원과 2007년도 2단계 두뇌한국 21사업의 지원으로 연구가 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 성홍계, 윤현걸, "램제트/스크램제트의 기술 동향과 기술분석 II. 스크램제트 및 복합엔진," 한국추진공학회지, 제10권, 제2호, 2006 pp.115-127
2. Seiner, J. M., Dash, S. M. and Kenzakowski, D. C., "Historical Survey on Enhanced Mixing in Scramjet Engines," Journal of Propulsion and Power, Vol. 17, No. 6, 2001, pp.1273-1286
3. Manoharan, S., Chandra, B. U., Chakravarthy, S. R., Ramakrishnan, S. R. and Subramanyam, J. D. A., "Experimental Studies on Supersonic Cold Flow Mixing with Ramp Mixers," Journal of Aerospace Engineering, Vol. 18, No 4, 2005, pp. 197-205
4. Kim, J. H., Yoon, Y., Jeung, I. S., Huh, H. and Choi, J. Y., "Numerical Study of Mixing Enhancement by Shock Waves in Model Scramjet Engine," AIAA Journal, Vol. 41, No. 6, 2003, pp.1074-1080
5. Billing, F. S., "Research on Supersonic Combustion," Journal of Propulsion and Power, Vol. 9, No. 4, 1993, pp.499-514
6. Kim, C. H., Jeong, E., Kim, J. W. and Jeung, I. S., "Experimental Study on Fuel/Air Mixing using the Cavity in the Supersonic Flow," AIAA-2006-7920, 2006