

## 論文

## 초음속 유동 내 벤트 혼합기의 형상적 특성에 따른 성능 연구

김채형\*, 정인석\*\*

## A Performance Study of Vent Mixer with Geometric Characteristics in Supersonic Flow

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

## ABSTRACT

This paper studies the aerodynamic performance that the vent mixer—new conceptual supersonic mixer—showed with its geometric characteristics. The hole is 2 mm with 2 mm's distance from the wall in case 1 and with no distance in case 2. In case 3 the hole is 1 mm. Case 1 and case 2 showed the same total pressure recovery ratio, of which the case 3 was lower than that. While cases 1-3 had the same reattachment length, the shear layer was thicker in cases 1 and 2 than in case 3. Within the recirculation zone, cases 1 and 2 had lower pressure loss and higher velocity gradient difference than case 3—they enhance mixing between air and fuel. Separation bubble which is developed by the inflow into the recirculation zone has a significant effect on the total pressure recovery ratio in the combustor. Also separation bubble influences pressure distributions and recirculation flows in the recirculation zone. Therefore, inflow rate of air into the recirculation zone mainly affects the performance of vent mixer.

## 초 록

본 논문은 새로운 개념의 초음속 혼합기인 벤트 혼합기의 형상적 특성에 따른 공력 특성을 연구하였다. 홀의 크기는 2 mm이며 혼합기 벽면에서 2 mm 떨어진 곳에 위치한 모델(case 1)과 혼합기 벽면 뒤쪽에 위치한 모델(case 2)의 경우 같은 전압력 회복율을 보였으며, 홀의 크기를 반으로 줄인 1 mm(case 3) 모델은 cases 1, 2에 비해 낮은 전압력 회복율을 보였다. 재순환 영역의 크기는 cases 1-3은 같지만 전단층 두께는 cases 1, 2가 case 3보다 두꺼웠다. 재순환 영역 내 압력 손실의 경우 cases 1, 2은 case 3에 비해 낮은 압력 손실과 높은 속도 구배를 보였으며, 이는 재순환 영역 내 공기와 연료의 혼합을 증대시키는 요인이다. 재순환 영역 내로 유입 되는 유동에 의해 형성되는 박리 버블은 연소기의 전압력 회복율과 재순환 영역 내 압력 분포와 순환 유동에 영향을 미친다. 따라서 박리 버블 형성에 영향을 주는 유입 공기 유량이 벤트 혼합기 성능에 주요한 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

**Key Words** : Vent Mixer(벤트 혼합기), Recirculation Zone(재순환 영역), Total Pressure Recovery(전압력 회복), Separation Bubble(박리 버블)

† 2008년 6월 30일 접수 ~ 2008년 11월 18일 심사완료

\* 정회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원, IAAT

\*\* 정회원, 서울대학교 기계항공공학부, IAAT

교신저자, E-mail : enjis@snu.ac.kr

서울시 관악구 관악로 599

## I. 서 론

1990년대 이후 스크램제트 엔진의 지상시험 장비 및 지상시험을 검증할 수 있는 비행시험 기

술의 진보에 힘입어 국제적인 스크램제트 개발 활동이 크게 증가하였다. 미국은 정부기관 및 산업체를 중심으로 극초음속 유도무기 시스템, 순항 항공기 및 저 비용의 우주 발사체 등에 적용 가능한 통합된 형태의 스크램제트 엔진 개발에 주력하고 있다. 미국을 제외한 러시아, 프랑스, 일본, 호주 등은 스크램제트 엔진의 구성품 단위의 지상시험을 통해 각 구성품의 성능 특성을 도출하고 이를 기반으로 실물 엔진에 대한 비행 시험을 계획 또는 수행하고 있다[1].

실제 스크램제트 엔진 설계에서 중요 사항 중의 하나는 연소기 내에서 연료를 분사하였을 경우 연료와 공기의 혼합을 증진시키는 것이다. 초음속 혼합기는 연료와 공기의 혼합을 증진시킬 뿐만 아니라 점화가 일어났을 경우, 화염을 유지하고 화염을 안정화시킬 수 있어야 하며, 혼합기 장착에 의한 추가적인 전압력 손실이 크게 발생하지 않도록 하여야 한다.

초음속 유동장 내 연료분사 방식은 전압력 손실 정도에 따라 간섭 방식과 비간섭 방식으로 구분할 수 있다. 비간섭 방식은 주로 연소기 벽면에서 연료를 직접 분사하는 방식으로 전압력 손실을 최소화하는 장점이 있다. 비간섭 방식은 세부적으로 분사 각도(수직, 수평, 경사방식), 분사구 모양(원, 타원, 썸기, 다이아몬드 모양)과 형상(공력램프, 소형돌이형, 캐스케이드형)에 따라 구분된다. 간섭 방식은 공기와 연료의 혼합을 증진시키기 위해 램프, 공동, 층계 혼합기 등의 구조물을 사용하여 연료를 분사하는 방식이다. 이 방식은 비간섭 방식에 비해 공력 간섭을 일으켜 전압력 손실과 저항이 크지만 스크램제트 연소기 연구에서 연료와 공기의 혼합 증진을 위해 일반적으로 많이 연구되고 있으며, 스크램제트 엔진의 길이를 줄이는데 효과적인 방식이다. 하지만 혼합기 구조물 장착에 의한 추가적인 중량 증가의 결점을 고려하여야 한다[2].

램프, 공동, 층계 혼합기 구조물을 통해 연료

를 분사하는 간섭 방식의 연료혼합기는 일반적으로 Fig. 1과 같이 세 가지 기본 요소(전단층, 재순환 영역, 외부 공기 유동)를 가진다[3]. 고온의 공기 유동은 재순환 영역으로 유입되며, 재순환 영역 내에서의 연료분사는 또 다른 전단층을 형성하게 된다. 재순환 영역 내에서 연료와 공기는 혼합과 열전달이 이루어지며, 이 과정을 거쳐서 생성된 혼합 생성물은 재순환 영역에서 주유동부로 공급되게 된다. 재순환 영역의 전단층 성장과 물질전달에 영향을 주는 요소는 속도차, 밀도차, 발열량, 국부 압력차 등이 있다[4].

난류 전단층에서 화염이 안정화되기 위해서는 Damkohler 수가 1보다 커야하며, Damkohler 수는 식 (1)과 같이 점화시간( $\tau_i$ )과 잔류시간( $\tau_r$ )의 비로 정의된다[4].

$$Da = \frac{\tau_r}{\tau_i} > 1 \quad (1)$$

혼합기에 의해 형성된 난류 전단층은 난류 연소 속도를 증가시키며, 재순환 영역은 잔류시간( $\tau_r$ )을 증대시킨다[5]. 따라서 혼합기의 형상은 재순환 영역의 크기와 특성을 변화시키며, 이는 점화 조건과 화염 안정성에 영향을 끼친다.

기존의 램프, 공동, 층계 혼합기는 재순환영역에서의 수동적인 혼합방식을 통해 연료-공기 혼합과 잔류시간을 증대시키지만 혼합기에 의한 전압력 손실이 존재한다. 현재 이를 보강하기 위해 선진국들에서는 형상을 변형시키거나 다른 혼합기와의 조합을 통해 혼합기 성능 향상을 위한 연구가 진행 중이다.

본 연구의 목적은 벤트 혼합기의 형상적 특성에 따른 공력 특성을 분석하여 벤트 혼합기의 성능에 영향을 미치는 주요 설계 변수를 찾는 데 있다. 층계형 혼합기를 기준 모델로 하여 연료 분사를 하지 않은 상태에서 혼합기의 형상적 특성에 따른 유동 간섭과 전압력 손실을 분석하고, 재순환 영역 내의 유동 특성을 수치해석을 통해 비교 분석하였다.

## II. 본 론

### 2.1 수치해석 방법

벤트 혼합기의 형상적 특성에 따른 유동 특성을 분석하기 위해 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)방정식을 이용한 수치해석을 수행하였다. Gruber et al.[6]와 안동대학교 김희동 교수[7]의 연구 자료를 토대로 본 수치해석에서

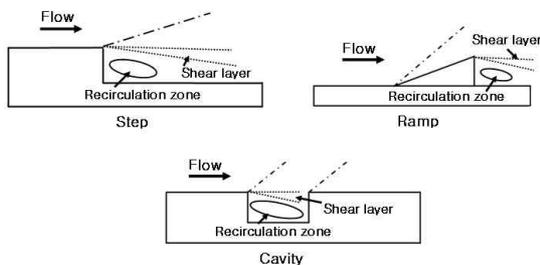


Fig. 1. Types of supersonic mixers

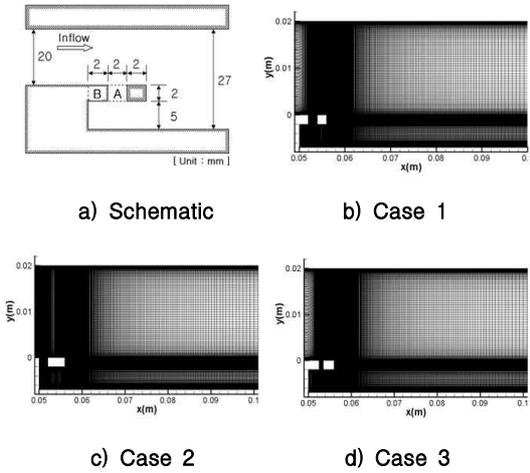


Fig. 2. Schematic and cases of vent mixer with geometric variables

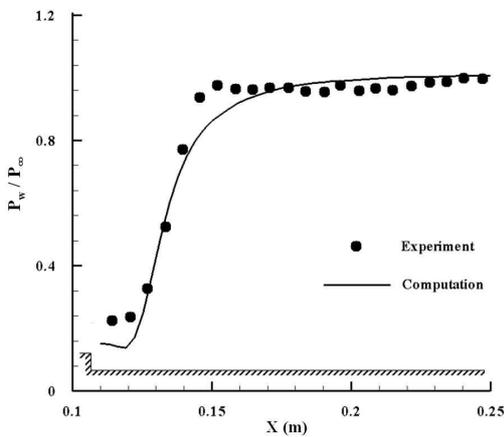


Fig. 3. Comparison of surface pressure profiles for Smith[9] configuration

이차원 정상상태 조건을 가정하였으며, Roe's FDS를 이용한 2차 정확도의 공간차분과 Fully Implicit Point Jacobi를 사용한 시간적분 방법을 사용하였다. 난류 모델은 Menter의 SST  $\kappa$ - $\omega$  모델을 사용하였으며, 벽면에서의 첫 번째 격자 간격은 1보다 작다( $y^+ \leq 1$ ). 계산조건과 연구모델에 대한 자세한 내용은 참고문헌[8]에 나타나 있다.

Fig. 3에서는 참고문헌[8]에 사용된 상용코드의 추가적인 코드 검증을 위해 Smith의 층계형 모델을 사용한 실험의 압력값과 비교하였다[9, 10]. 전반적인 압력 분포가 실험 결과와 유사하게 일치하는 것을 볼 수 있다.

주 유동의 유입 조건은 본 연구실에서 보유하

고 있는 초음속 풍동 장치의 작동 조건을 사용하였다. 전압력은 658.6 kPa, 전온도는 295.5 K이며, 마하수는 1.92이다. 벤트 혼합기의 형상적 변형은 홀의 위치가 Fig. 2a의 A지점(Fig. 2b)과 B지점(Fig. 2c)일 경우, 그리고 A 지점에서 홀의 크기가 1/2(Fig. 2d)로 감소했을 경우의 형상적 차이를 두었다. Case 1의 격자수는 87,829개, case 2의 격자수는 99,029개, case 3의 격자수는 90,954개이다.

### 2.2 형상에 따른 전반적인 공력특성

Fig. 4는 혼합기 형상에 따른 마하수 분포를 나타낸다. x축은 유동이 흐르는 방향(좌에서 우)을 나타내며, y축은 수직 벽면 거리를 나타낸다. Fig. 4에서 충격파가 위 벽면과 충돌하는 지점을 점선으로 표시하였으며, 표시된 지점을 보면 층계형 혼합기의 경우 약 0.125 m 지점에서 위 벽면과 충돌하며 cases 1-3의 경우에는 약 0.13 m로 유사한 지점에서 충돌하는 것을 볼 수 있다. 층계형 혼합기의 경우, 층계 끝단에서 급격한 팽창을 하며 유동은 후류 부로 급경사로 흘러가게 된다. 재압축 지점에서는 급경사로 유동이 흘러들어왔기 때문에 이 지점에서 형성되는 압축파의 경사는 급하게 되며 압축파에 의한 전압력 손실도 발생하게 된다. Fig. 4에서 Cases 1-3의 재순환 영역 내로 홀을 통해 유입되는 유동의 모습을 볼 수 있다. 홀을 통해 들어오는 유동은 마하수 1 이상의 빠른 유동이며 이로 인해 재순환 영역

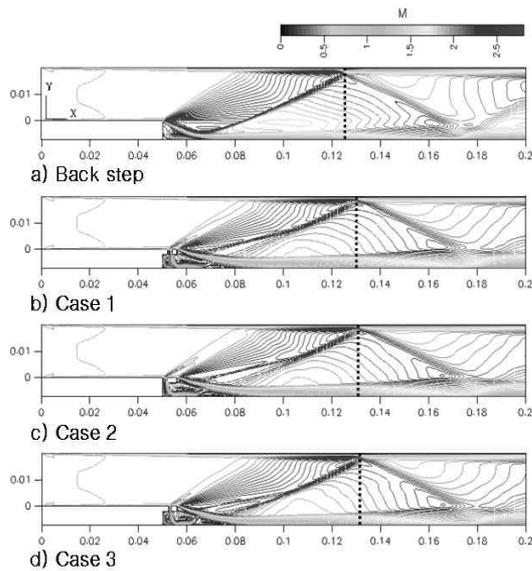


Fig. 4. Mach number contours

Table 1. Total pressure recovery at the exit plane

	Back step	Case 1	Case 2	Case 3
$\eta$ (%)	75.4	79.4	79.8	78.9

의 경사가 완만하게 된다. 경사가 완만한 재순환 영역은 cases 1-3처럼 유동을 후류부로 완만하게 흐르게 하는 역할을 하며 이로 인해 형성된 압축파의 강도와 경사는 감소하게 된다. 또한 재순환 영역의 경사가 완만해지면서 전단층이 증가한 것을 볼 수 있다.

서론에서 간접방식은 공기와 연료의 혼합 효율은 증대시키지만 혼합기에 의한 전압력 손실이 발생한다고 하였다. 따라서 초음속 혼합기에 의한 전압력 손실을 줄이는 것은 초음속 연소기 설계에 있어서 주요한 요소 중 하나이다. Table 1은 출구부에서 각 형상별로 식 (2)를 통해 구한 전압력 회복율( $\eta$ )을 나타낸다.  $P_{i,tot}$ 는 출구지점을  $n$ 값으로 차분한 각 지점(i)의 전압력 값이며,  $P_o$ 는 초기 전압력 값이다.

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_{i,tot}}{P_o} \quad (2)$$

층계형 혼합기의 전압력 회복율이 75.4%인 반면 case 1의 경우 79.4%이며, case 2는 79.8%로 높은 전압력 회복율을 보인다. Case 3의 경우 층계형 혼합기에 비해 전압력 회복율이 높지만 case 1과 case 2에 비해 조금 낮은 78.9%의 회복율을 보인다. 하지만 전체적으로 비교해 보았을 때 cases 1-3의 전압력 회복율이 층계형 혼합기보다 높음을 알 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 2에서 제시한 벤트 혼합기의 형상적 특성에 따른 전압력 비 분포를 나타낸다. 계산 시작부의 y축 중간지점(0 m, 0.01 m)에서 유선을 따라 계산된 전압력 값( $P_{tot}$ )을 초기 전압력 값( $P_o$ )으로 나눈 비이다. x축 약 0.1 m 지점에서 유동은 재압축 영역을 지나면서 전압력 손실이 발생한다. 층계형 혼합기의 경우 급격하게 유동이 압축되기 때문에 0.11의 전압력 손실이 발생하며, cases 1, 2의 경우는 유동이 완만하게 압축되기 때문에 약 0.01의 전압력 손실이 발생하는 것을 알 수 있다. Case 3의 경우 cases 1, 2에 비해 다소 높은 0.03의 전압력 손실이 발생하며, 이를 통해 case 3에서는 다소 강한 압축파가 형성되는 것을 알 수 있다. 0.15 m 지점의 경우 층계형 혼합기는 약 0.02의 전압력 손실이 발생하며, cases 1, 2는 0.02, case 3은 0.03으로 cases

Table 2. Reattachment lengths

	Back step	Case 1	Case 2	Case 3
$x_r$ (mm)	67	76	76	76
$\delta$ (mm)	1.1	2.7	2.6	2.0

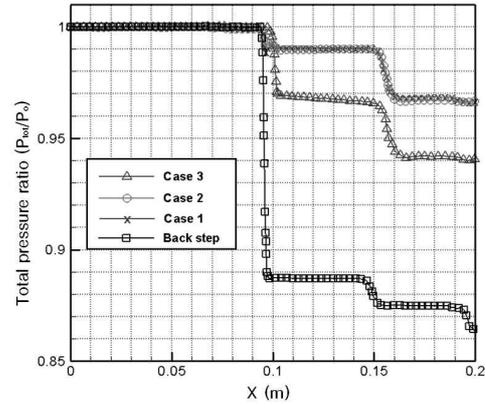


Fig. 5. Comparison of total pressure ratios

1-3은 첫 번째 전압력 손실보다 큰 손실을 보인다. 그 이유는 위 벽면에서 충격파와 충돌하는 지점에서는 경계층 박리가 생기며 여기서 형성된 반사 충격파가 후류부로 전파되기 때문에 0.1 m 지점에 비해 전압력 손실이 증가하게 된다.

### 2.3 재순환 영역에서의 유동 특성

재순환 영역의 크기는 벽면부에서 재부착지점까지의 거리( $x_r$ )로 정의하였다. 재부착지점은 벽면을 따라 축방향의 유동 흐름이 음(-u)의 방향에서 양(+u)의 방향으로 변하는 지점으로 정의한다[11]. 재부착지점의 길이를 Table 2에 나타내었다. 층계형 혼합기에 비해 cases 1-3의 재부착지점의 길이가 증가한 것을 알 수 있으며, cases 1-3의 재부착지점의 길이가 같음을 볼 수 있다. 홀이 없는 경우의 추가계산을 통해 측정된 재부착지점의 길이는 약 73 mm이다. 위 결과를 토대로 재순환 영역의 크기는 홀을 통해 유입되는 유량 보다는 혼합기 위 벽면의 길이에 의해 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 그리고 박리 버블에 의한 영향으로 재순환 영역은 약 3 mm 정도 증가하게 된다. 이렇게 증가된 재순환영역은 공기/연료 혼합물의 잔류시간( $\tau_r$ )을 증가시켜 준다. 재순환 영역은 연료와 공기를 혼합하여 혼합물을 재순환 영역 주변 전단층으로 공급하며 전단층에서는 고온의 공기에 의해 실제로 자발 점화가 일어나며 연소가 발생한다[3]. 따라서 전단층의 크기는 재순환 영역을 사용하는 보염기(flame)

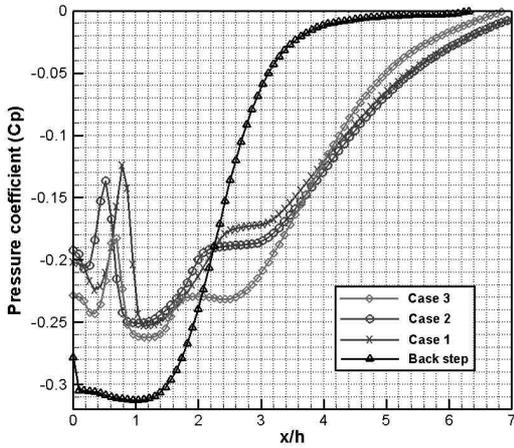


Fig. 6. Comparison of  $C_p$  along the wall

holder)의 성능을 좌우하는 요소이며 Table 2에 재부착지점에서의 전단층 두께( $\delta$ )를 나타내었다. 전단층 두께( $\delta$ )는 위 벽면에서 유동이 박리되면서 형성된 전단층[3]이 아래 벽면과 만나는 지점에서, 마하수가 1인 지점까지의 높이로 정의한다. 층계형 혼합기의 전단층 두께는 1.1 mm인 반면 case 1은 2.7 mm, case 2는 2.6 mm로 두 경우의 전단층 두께는 유사하다. Case 3의 경우는 cases 1, 2에 비해 다소 작은 2.0 mm이다. 이와 같은 차이를 보이는 이유는 홀을 통해 유입되는 유량의 차이에 의한 전단층의 경사도 차이 때문에 발생한다.

Fig. 6은 혼합기 벽면으로부터의 거리( $x$ )를 혼합기 벽면 높이( $h$ )로 나눈 값에 대한 압력계수( $C_p$ ) 분포를 나타낸다. 층계형 혼합기는 압력손실이 크지만 압력 회복율이 빠른 것을 볼 수 있다. Case 1과 case 2는  $h/x$ 가 0~1지점에서 유동 유입으로 인해 급격한 압력 증감이 발생하며, 층계형 혼합기보다 적은 압력 손실을 보이지만 층계형 혼합기에 비해 압력 회복율이 느리다. Case 3은 cases 1, 2에 비해 압력 증감이 낮고 압력 회복율이 빠른 편이지만 압력손실은 크다. Cases 1-3은 층계형 혼합기에 비해 압력 손실은 낮지만 압력 회복율이 느리며, 유동 유입으로 인한 초기 압력 증감을 보이는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 재순환 영역 내의 유선을 나타낸다. 층계형 혼합기에서는 큰 재순환 영역이 형성된다. 박리 버블은 역압력 구배( $dp/dx > 0$ )가 형성되는 감속 유동 영역에서 형성이 된다. Fig. 7b-d를 비교해 보면 case 3의 박리 버블이 가장 크며 case 2는 case 1과 같은 유량이 유입되지만 case 1보다 큰 박리버블을 가진다. 따라서 재순환 영

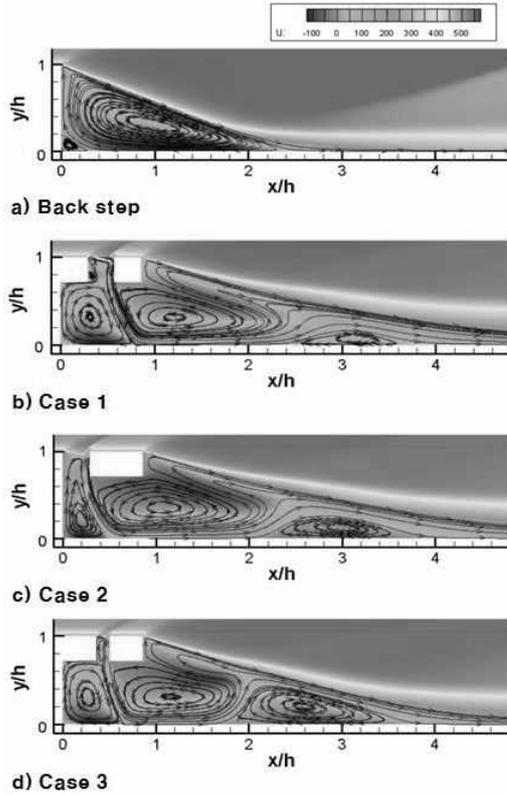


Fig. 7. Streamline contours within recirculation zones

역 내에서 case 3의 유동 유속이 가장 느리며, case 2는 case 1보다 유입 입구 위치가 앞쪽에 위치하기 때문에 case 1에 비해 후류로 감에 따라 유동 유속이 다소 감소한다. Fig. 7에서처럼 재순환 영역 내의 공기 유입은 벽면에서의 역압력 구배에 의해 박리 버블을 형성하며 이 박리 버블 영역에서 유동은 재순환 영역과 후류부 두 지역으로 나뉘어 흐르게 된다. 재순환 영역으로 흘러간 유동은 다시 재순환 영역과 전단층 두 영역으로 나뉘어 흐르게 된다. 재순환 영역으로 흘러간 유동은 공기와 연료의 혼합을 증대시키며, 전단층으로 흘러 들어가는 유동은 공기와 연료의 혼합물을 전단층으로 지속적으로 공급하게 된다.

Fig. 8은 혼합기 벽면에서  $x/h$ 비가 1, 2, 3인 지점에서의 주유동 속도( $u_0$ )에 대한 속도비( $u/u_0$ )를 나타낸다.  $x/h$ 가 1인 지점에서는 cases 1-3은 비슷한 속도 분포를 보이지만 층계형 혼합기는 다른 경향성을 보인다. 그 이유는 층계형 혼합기의 경우 큰 재순환 유동(Fig. 7a)의 영향으로  $y/h=0.3$  이하 영역에서는 역방향 유동(- $u$ )이 형성되며,  $y/h=0.3$  이상 영역에서는 정방향 유동

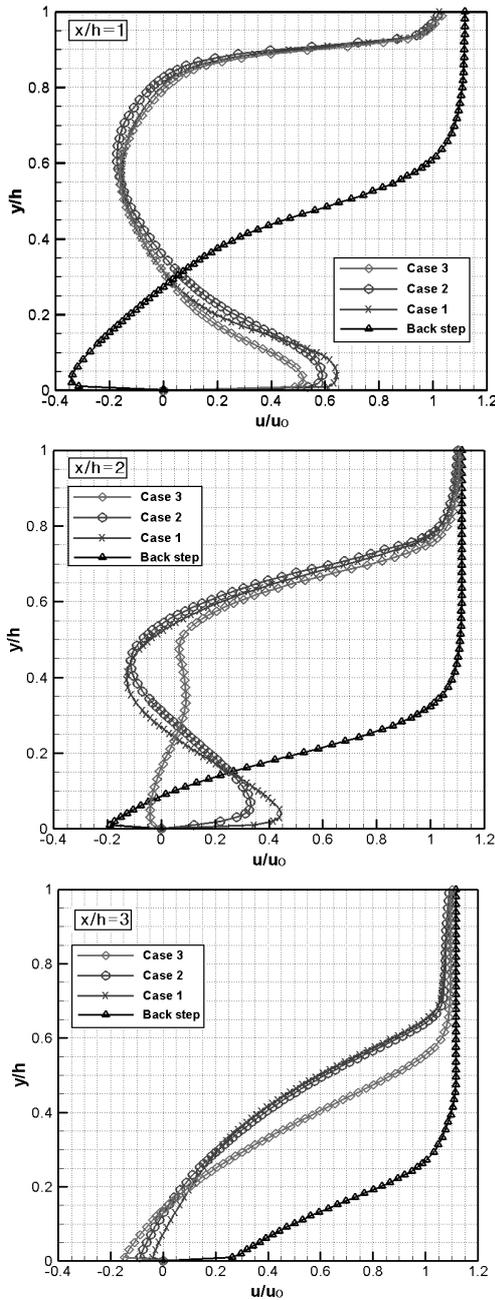


Fig. 8. Comparison of velocity profiles

(+u)이 형성된다. Cases 1-3의 경우, 공기 유입으로 인해 아래 벽면에서는 정방향의 유동(+u)이 형성되며, Fig. 7b-d에서 보는 바와 같이 재순환 영역이 존재하기 때문이며 유동의 방향이 바뀌게 된다.  $y/h=0.3$  이상에서는 역방향 유동이 존재하며, 전단층 지역( $y/h=0.85$ )에서는 다시 정방향의 유동이 형성된다.  $x/h=2$ 인 지점은 층계형 모델

은 재순환영역이 끝나가는 지점이기 때문에  $y/h=0.1$  이하 지점에서 작은 역방향 유동이 존재한다. Case 3의 경우  $y/h=0.5$  이하에서 속도비의 변화가 적은 것을 볼 수 있는데, 이 영역은 Fig. 7d에서처럼 유입 유동으로 인해 박리 버블이 형성되었기 때문이다. 유동의 속도비가 거의 일정한 이유는 유입 유동의 유속이 느리며 비교적 큰 박리 버블이 형성되어 유동의 흐름을 방해하기 때문이다. Cases 1, 2의 경우,  $y/h=0.15$  이하의 유입 유동의 영향을 받는 영역에서는 속도비의 차이가 발생하지만,  $y/h=0.15$  이상 영역인 재순환 영역과 전단층 영역에서는 속도비 분포가 유사함을 확인할 수 있다.  $x/h=3$  지점에서 층계형 혼합기는 재순환영역이 끝난 지점이기 때문에 정방향의 유동만 존재한다. Cases 1-3은  $y/h=0.2$  이하 영역에서는 Fig. 7b-d에서와 같이 박리 버블의 위치가 다르기 때문에 다른 속도비 분포를 보이고 있다. Cases 1, 2는  $y/h=0.2$  이상에서 서로 같은 속도비 분포를 보이며 case 3은 높은 속도비 증가를 보인다. 그 이유는 Fig. 7b-d에서처럼 전단층 아래에 존재하는 재순환 영역 구간의 크기 차이 때문에 발생하며(이는 전단층의 기울기와도 관계가 있다.), cases 1, 2의 재순환 영역이 case 3보다 큰 것을 알 수 있다. 이를 통해 홀의 크기가 같을 경우, 홀의 위치는 재순환 영역 내 속도 분포에 크게 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있으며, 홀을 통해 유입되는 유량은 재순환 영역 내 속도 분포에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

### III. 결 론

본 논문에서는 벤트 혼합기의 형상 중 홀의 크기와 위치에 따른 전반적인 유동 특성과 재순환 영역에서의 세부 유동 특성을 살펴보았다.

홀의 위치는 전반적인 전압력 회복율에 영향을 미치지 않았으며, 홀의 크기가 작아짐에 따라 전압력 회복율이 낮아졌다. 재순환 영역의 크기는 혼합기의 연장된 위 벽면에 의해 주 영향을 받으며, 박리 버블에 의한 영향으로 재순환 영역을 다소 확장시키는 결과를 보였다. 재순환 영역 내로의 유입 유량이 감소할 경우, 압력 손실이 증가하고 유동의 속도 차는 감소하며 전단층 두께도 감소하였다. 이와 같은 이유는 유입 유동에 의해 형성되는 박리 버블에 의한 영향 때문이다. 유입 유량이 감소함에 따라 박리 버블은 증가하며 박리 버블의 외부유동은 감소하여 효과적인 공기와 연료의 혼합이 이루어지지 못한다. 유량이 증가하면 박리 버블의 크기는 감소하고, 박리 버

블 영역에서 비교적 빠른 유속으로 재순환 영역으로 재순환되며 이는 연료와 공기를 적극 혼합시키면서 혼합물을 전단층 후류 영역으로 제공한다. 따라서 벤트 혼합기의 공력 특성에 주요한 영향을 미치는 요소는 재순환 영역 내에서 형성되는 박리 버블이며 박리 버블의 형성은 홀을 통해 유입되는 유량에 의해 좌우되는 것을 알 수 있다.

이와 같은 연구 결과를 토대로 벤트 혼합기의 주요한 특성 인자는 유동 유입에 의한 재순환 영역 내 박리 버블임을 알게 되었으며, 혼합 조건과 연소 조건에서는 어떤 차이를 보이는지에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

### 후 기

본 논문은 국제과학기술협력재단/한이태리 협력기반조성사업(K20713000013-07B0100-01310)과 한국형헬기 민군용 구성품(KHP 엔진) 개발사업(KARI협-06)의 지원으로 연구가 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- 1) 원수희, 정인석, 최정열, "극초음속 공기흡입 추진기관 개발의 국제적 동향 Part II: 세계적인 스크램제트 개발 프로그램", 한국항공우주학회지, 제34권 제10호, 2006, pp. 99~110.
- 2) Tam, C-J, Hsu, K-Y, Gruber, M. R., and Raffoul C. N., "Aerodynamic Performance of an Injector Strut for a Round Scramjet Combustor", AIAA 2007-5403, 2007.
- 3) Driscoll, J. F. and Rasmussen, C. C., "Correlation and Analysis of Blowout Limits of Flames in High-Speed Airflows", Journal of Propulsion and Power, Vol. 21, No. 6, 2005, pp. 1035-1044.

- 4) Thakur, A. and Segal, C, "Concentration Distribution in a Supersonic Flow Recirculation Region", Journal of Propulsion and Power, Vol. 24, No. 1, 2008, pp. 64~73.

- 5) Sengupta, K., Russell, K., and Mashayek F., "Step Geometry and Countercurrent Effects in Dump Combustor, Part 1: Cold Flow", AIAA Journal, Vol. 45, No. 8, 2007, pp. 2033~2041.

- 6) Gruber, M. R., Baurle, R. A., Mathur, T., and Hsu, K-Y, "Fundamental Studies of Cavity-Based Flameholder Concepts for Supersonic Combustors", Journal of Propulsion and Power, Vol. 17, No. 1, 2001, pp. 146-153.

- 7) Kim, H. D., Matsuo, S., Setoguchi, T., "Passive Control Applied to Prandtl-Meyer Expansion Flow with Homogeneous Condensation", Aerospace Science and Technology, Vol. 8, 2004, pp. 369-376.

- 8) 김채형, 정인석, "초음속 유동장 내 벤트 혼합기에 관한 수치해석 연구", 한국추진공학회지 제12권 제2호, 2008, pp. 33-39.

- 9) Smith, H. E., "The Flow Field and Heat Transfer Downstream of a Rearward Facing Step in Supersonic Flow", Aerospace Research Laboratories Paper ARL-67-0056, March 1967.

- 10) Ovais, U. K., and Klaus, A. H., "Flow Control Over a Backward-Facing Step with Application of a Magnetic Field", Journal of Propulsion and Power, Vol. 45, No. 2, 2008, pp. 255-263.

- 11) Loth, E., Kailasanath, K., and Lohner, R., "Supersonic Flow over an Axisymmetric Backward-Facing Step", Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 29, No. 3, 1992, pp. 352-359.