

# 3차원 PIV 기법을 사용한 벤트혼합기가 초음속 연료-공기 혼합에 미치는 특성 연구

김채형\* · 정인석\*\*† · 최병일\*\*\* · 토시노리 코오치\*\*\* · 고로 마쓰야\*\*\*

## Characteristic Study on Effect of the Vent Mixer to Supersonic Fuel-Air Mixing with Stereoscopic-PIV Method

Chae-Hyoung Kim\* · In-Seuck Jeung\*\*† ·  
Byungil Choi\*\*\* · Toshinori Kouchi\*\*\* · Goro Masuya\*\*\*

### ABSTRACT

Vent mixer can provide main flow directly into a recirculation region downstream of the mixer to enhance fuel-air mixing efficiency. Based on experimental results of three-dimensional velocity, vorticity and turbulent kinetic energy obtained by a stereoscopic PIV method, the performance of the vent mixer was compared with that of the step mixer which was used as a basic model. Thick shear layers of the vent mixer induced the increase of the penetration height. The turbulent kinetic energy mainly distributed along a boundary layer between the main flow and the jet plume. This turbulent field activates mass transfer in a mixing region, leading to the mixing enhancement.

### 초 록

벤트 혼합기는 혼합기 후류에 존재하는 재순환 영역으로 공기를 유입시켜 연료-공기 혼합을 증대시키는 혼합기이다. Stereoscopic PIV기법을 통해 얻은 3차원 속도, 와류, 난류운동에너지를 토대로 계단형 혼합기를 기본 모델로 하여 벤트 혼합기의 성능을 분석하였다. 벤트 혼합기는 두터운 전단층으로 인해 높은 침투거리를 보였으며, 난류운동에너지는 주로 주유동과 제트유동의 경계면을 따라 분포하였다. 이 난류 영역은 혼합영역 내에서 활발히 물질전달을 일으키며, 혼합 증대를 가져온다.

Key Words: Vent Mixer(벤트 혼합기), Stereoscopic PIV(3차원 PIV), Vorticity Field(와류장), Counter-Rotating Vortex Pair(한 쌍의 회전하는 와류), Turbulent Kinetic Energy(난류 운동 에너지)

\* 국방기술품질원 사천(항공)센터  
\*\* 서울대학교 기계항공공학부, IAAT  
\*\*\* 일본 동북대학교 항공우주공학과  
† 교신저자, E-mail: enjis@snu.ac.kr

### 1. 서 론

초음속 연소를 위해 선행되어야 하는 부분은

이론적 화학조성이 이루어질 수 있도록 연료와 공기가 충분히 혼합이 되어야 한다. 또한 혼합된 연료-공기가 점화할 수 있도록 충분한 잔류 시간이 필요하며, 이와 같은 혼합층에서의 잔류시간 ( $\tau_r$ )과 화학반응 시간( $\tau_i$ ) 관계는 일반적으로 Damkohler 수( $Da = \tau_r/\tau_i$ )로 표현된다. 벽면 혼합 난류층에서 Damkohler수가 1보다 커야 화염이 안정적으로 유지될 수 있기 때문에 초음속 유동 내에서 보열기 역할을 하는 혼합기가 존재해야 하며, 혼합기 후류 재순환영역에서 연료와 공기가 적극적으로 혼합될 수 있도록 하여야 한다[1]. 이런 기본적인 개념을 토대로 벤트 혼합기는 개발되었으며, 선행 연구로 수치해석 기법을 사용하여 벤트 혼합기의 성능을 먼저 예측하였다[2-4]. 수치해석 기법을 사용한 선행 연구에서는 벤트 혼합기의 홀을 통해 주유동에서 재순환영역으로 공기가 유입되며, 이 유동의 영향으로 벤트 혼합기의 재순환 영역은 기존의 혼합기(계단형 혼합기)에 비해 후류 영역으로 더 확장되었다. 또한 혼합 계산에서는 홀을 통해 유입되는 유동과 연료 분사간의 간섭효과에 의해 혼합 성능이 증대하는 것을 확인할 수 있었다.

수치해석결과를 토대로 실험 장치를 구축하여 실험을 수행하였으며, 솔리덴 가시화 기법, 벽면 정압력 측정과 가스크로마토그래픽 기법을 사용하여 수치해석 결과를 검증하였다[5-6]. 솔리덴 가시화 사진에서는 벤트 혼합기가 계단형 혼합기에 비해 완만하면서 넓은 재순환영역을 형성하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 완만한 유동 확장으로 인해 기존 혼합기 후류에서 발생했던 급격한 충격파 형성을 완화시켜 전압력 손실이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 혼합기 후류 재순환영역 내 연료 잔존량의 경우에도 계단형 혼합기에 비해 벤트 혼합기의 연료 잔존량이 높은 것을 확인할 수 있었다. 초음속 유동내 연료 분사의 경우 초음속 유동으로 침투한 연료는 매우 짧은 잔류 시간으로 인해 연소되지 못하고 연소기를 벗어나기 때문에 혼합층에서의 연료 잔존량이 높다는 것은 앞서 말한 것과 같이 Damkohler 수 증대를 가져오며 혼합 및 연소

성능 증대를 의미하게 된다.

본 연구에서는 계단형 혼합기에 비해 벤트 혼합기의 성능 증대가 생기는 원인을 연구하기 위해 유동 단면에서의 유동장 특성(3차원 유동 속도, 와류도, 난류도 등)을 분석하였다. 이를 위해 최근 선진국에서 초음속 유동장 해석에 많이 적용하여 개발하고 있는 Stereoscopic PIV(Particle Image Velocimetry)기법[7, 8]을 사용하였다. Stereoscopic PIV는 2 대 이상의 CCD 카메라로 동시 계측하여 stereoscopic imaging 방식으로 out-of-plane 속도성분을 도출하는 방식으로 주어진 2차원 평면에서 3 가지 속도성분을 구할 수 있는 방식이다.

본 연구에 필요한 stereoscopic PIV 실험은 초음속 유동장 측정이 가능한 PIV실험 시설을 구축하고 있는 일본 토호쿠 대학교(마쓰야-다케타 연구실)에서 수행하였다. 토호쿠 대학교는 수십 년 동안 초음속 유동 내에서의 연료 분사에 대한 PIV 측정 기법들을 연구하여 왔으며[9, 10], 최근에 stereoscopic PIV측정 기법을 연구하기 시작하였다. 토호쿠 대학교 PIV팀은 stereoscopic PIV 개발을 위해 계측/실험 오차 및 보정기법에 대한 연구를 수행하였고[11, 12], 본 연구자는 벤트 혼합기 혼합 실험에 적합하도록 stereoscopic PIV 실험 장치를 구축하고 그 결과들은 토호쿠 대학교 PIV팀이 제공하는 보정값을 사용하여 자료 후처리를 하였다. 본 연구에서는 벤트 혼합기 측정과 관련된 주요 실험 장치들과 조건만 제시하며 stereoscopic PIV 보정에 대한 자료는 참고 문헌 [11, 12]을 참고하기 바란다.

## 2. 실험 장치와 모델

실험 장치는 Fig. 1에서와 같이 흡입방식의 마하 2 초음속 풍동장치를 사용하였으며, 온도와 압력 조건은 대기조건이다. 내부 유로 실험부의 단면적은 노즐 출구 단면적은 30 mm × 30.7 mm이며, 혼합기 후류 단면적은 30 mm × 36.7 mm로 혼합기 높이만큼 확장하게 된다. 혼합기 앞전의 레이놀즈수는  $6.6 \times 10^5/m$  이다. 레이저

가 투과할 수 있도록 퀴즈(quartz) 유리창이 부착되어 있는 부분은 구조 강도를 고려하여 알루미늄 재질을 사용하였다. 레이저 빔이 충돌하는 부분은 레이저 빛의 산란과 구조 강도를 고려하여 아세탈을 사용하였다. 혼합기 모델은 혼합 실험뿐만 아니라 연소 실험에도 사용되기 때문에 황동 재질을 사용하였다.

Stereoscopic PIV에 사용된 2 대의 CCD 카메라는 Fig. 1과 같이 Scheimpflug 조건[13]으로 배치한다. 광원은 이중 펄스 Nd:YAG 레이저( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ,  $12 \text{ mJ/pulse}$ , pulse width 5-7 ns, Y12-15E: TSI Inc.)를 사용하였으며, 원통형 렌즈 배열을 사용하여 레이저는 평면광으로 실험장치로 투영하게 되며, 분사지점에서 15 mm 떨어진 지점에 위치한다. 2 대의 CCD 카메라는  $1600 \times 1200 \text{ pixels}$ 와  $28.77 \mu\text{m}$  픽셀 분해도를 가지며, PC-Micro 85 mm f/2.8 렌즈와 Scheimpflug 렌즈 마운트를 사용하였다. PIV용 입자(seed)는 dioctyl-sebacate(밀도  $913.5 \text{ kg/m}^3$ )를 사용하였으며, Laskin 노즐을 통해 유입되는 평균 입자 크기는 약  $1 \mu\text{m}$ 이다[14].

실험 당 200 이미지를 측정하며, 같은 실험을 3회 실시하여 600 이미지를 FtrPIV 프로그램을 통해 평균화하게 된다. 평균 속도에 대한 측정 오차는 주유동 속도 성분에 대해서는 약 3%, 단면적 속도 성분에 대해서는 약 1.5%이다.

주유동의 운동량에 대한 분사부에서 분사되는 유량의 운동량비(momentum flux ratio,  $J$ )는 약 3.1이다. 본 실험에 사용된 실험장치의 내부 면적에 대해서는 운동량비가 증가했을 경우 측면 유리가 PIV측정용 액체 입자에 의해 오염되어 PIV 측정이 불가능하기 때문에  $J = 3.1$ 는 PIV 측정에 최적화된 운동량비이다.

벤트 혼합기는 Fig. 2와 같은 형상을 가진다. 높이 6 mm의 계단형 혼합기에서 2 mm 두께에 6 mm 연장된 벽의 중간에 2 mm 폭의 슬롯을 가지게 된다. 분사기는 혼합기 벽면에서 9 mm 떨어진 곳에서 분사되며, 분사 홀의 지름은 1 mm이며 분사기체는 공기를 사용하였다. 주유동과 같이 분사기체에도 PIV측정용 입자가 포함되어 분사된다.

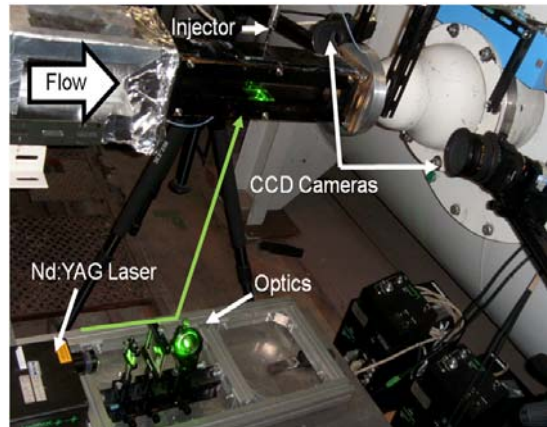


Fig. 1 Experimental Facility

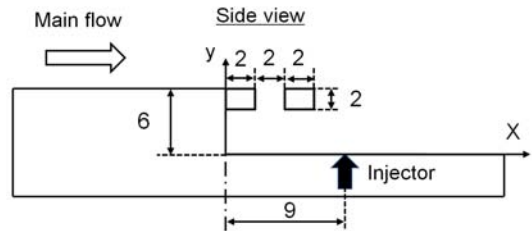


Fig. 2 Schematic of Vent Mixer Model

실험 결과에서는 연장된 벽이 없는 계단형 혼합기와 비교하여 벤트 혼합기의 유동 특성을 비교·분석하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 속도장 분포

운동량비 3.1로 분사했을 경우의 계단형 혼합기와 벤트 혼합기의 단면적을 그림 3에 나타내었다. 측정 지점은 혼합기 후류 유동 확산지역이므로 두 혼합기 모두 노즐출구 속도인 마하 2보다 높은 마하수를 주유동장에서 보인다.

계단형 혼합기의 경우, 주유동의 속도벡터의 방향이 좌우로 변화하는 것을 볼 수 있는데 이는 Fig. 3(a)에 표시한 것과 같이 수직 분사에 의한 궁형 충격파에 의해 유동 방향이 영향을 받기 때문이다. 초음속인 주유동 영역과 바닥면의 혼합층 경계면은 음속선(sonic line)으로 구분하

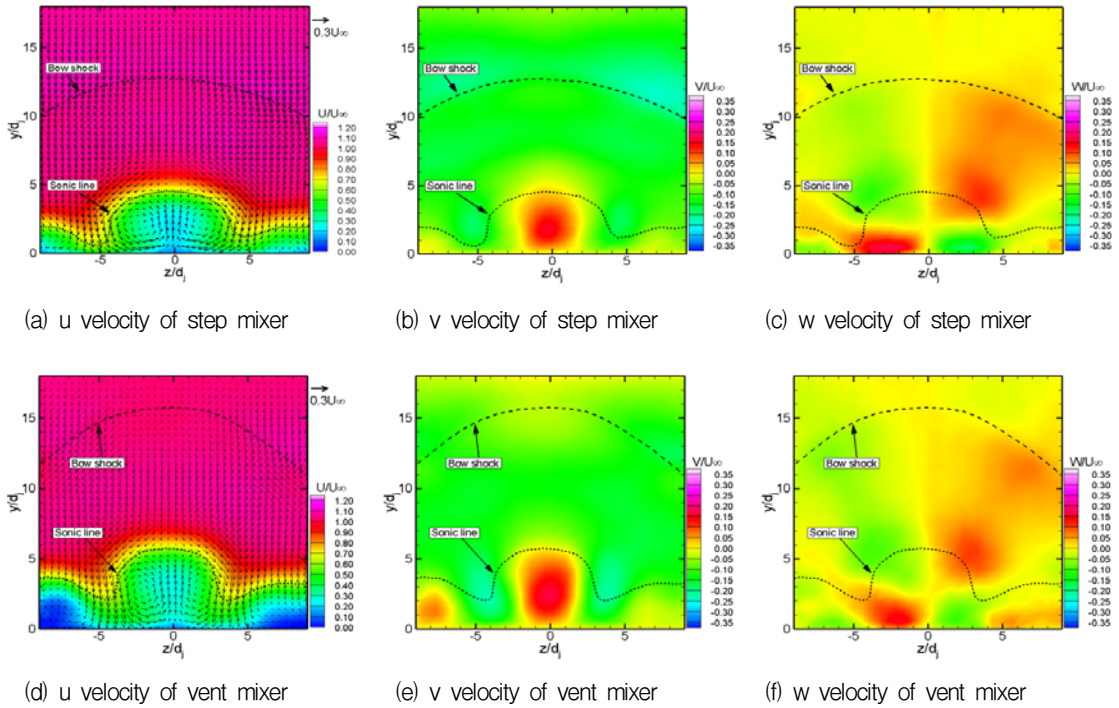


Fig. 3 Velocity components

였다. 수직 분사의 경우 주변 유동과의 속도구배에 의해 Fig. 3(a)에서 보는 것과 같은 한 쌍의 회전하는 와류 유동(counter rotating vortex pair)을 제트 유동(jet plume)내에서 볼 수 있다. 제트 유동 중심의 와류 유동으로 인해 Fig. 3(b)에서 보는 것과 같이 제트 유동 내부에서는 상부로 향하는  $v$  속도값을 가지게 된다. 또한 제트 유동 내 와류 유동으로 인해 Fig. 3(c)에서와 같이 중심축을 대칭으로 같은 속도값을 가지면서 방향이 반대인  $w$  속도장을 가지게 된다. 제트 유동 외부에서도 부채꼴 모양으로 대칭적인  $w$  속도 분포를 보이는데 이는 Fig. 3(a)에서처럼 주 유동이 궁형 충격파를 지나면서 중심축을 기준으로 유동의 방향이 대칭적으로 좌우로 변화하기 때문이다.

Figures 3(d)-3(f)의 벤트 혼합기의 경우 전반적인 유동 형상은 계단형 혼합기의 속도 분포 형상과 유사하다. 하지만 바닥면 주변 전단층이나 제트유동의 침투 높이가 계단형 혼합기에 비

해 증대한 것을 볼 수 있다. 측면 벽면 주변의 전단층 두께는 계단형 혼합기는  $y/d_j = 2$  인 반면에 벤트 혼합기는  $y/d_j = 3.8$ 이다. 전단층 두께 증가는 수직 분사의 제트의 침투거리를 증대시키게 된다. 그 이유는 초음속 유동 내에서의 수직분사 침투거리는 압축성 효과에 의해 침투높이는 제한을 받게 되는데, 분사되는 영역의 전단층 두께가 증가하게 되면 압축성 효과를 받는 영역이 줄어들기 때문이다. 따라서 Fig. 3(d)에서 보는 것과 같이 중심부 제트 영역의 침투거리가 증가한 것을 볼 수 있으며, 궁형 충격파의 위치도 계단형 혼합기에 비해  $y$ 축 양의 방향으로 증가한 것을 확인할 수 있다. 제트 유동 내부 와류 유동 역시 계단형 혼합기에 비해  $y$ 축 방향으로 형상이 길어진 것을 확인할 수 있다.

제트 유동의 침투거리가 증가하면 제트 유동 내  $y$ 축 양의 방향의 속도 분포도 Fig. 3(e)와 같이 비례적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 계단형 혼합기와 마찬가지로 Fig. 3(f)에서 궁형

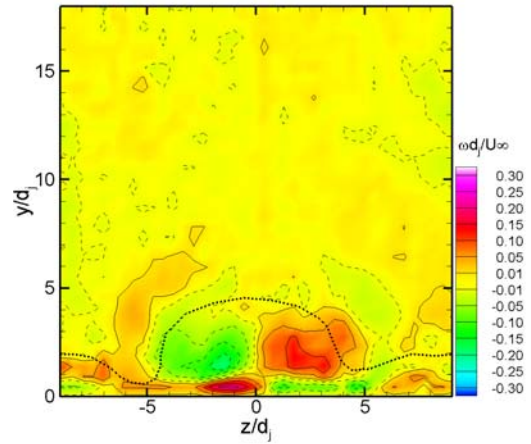
충격파에 의해 주유동은  $w$  속도 성분을 가지게 된다.

### 3.2 와류 분포

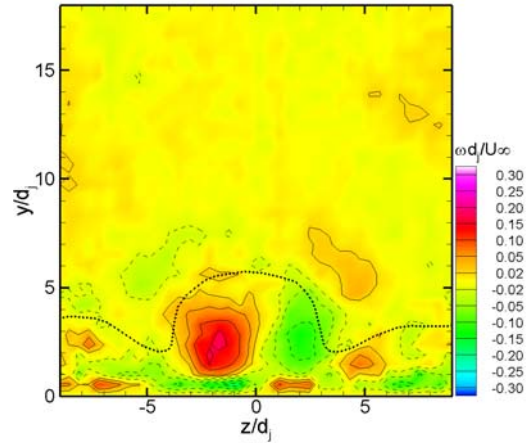
Stereoscopic-PIV 측정 위치는 분사지점에서 15 mm 떨어져 있다. 이 영역은 혼합 영역을 구분할 때 전이 지점에 속한다. 분사구 지름을  $d$ 라 할 때  $10d$  위치까지를 근처 혼합 영역(near-field mixing region)이라 하며, 분사 유동과 주유동의 충돌에 의한 큰 와류 구조들(large-scale vortex structures)에 의해 혼합층 내부는 영향을 받는다.  $20d$ 를 넘어서게 되면 먼 혼합 영역(far-field mixing region)이라 하며 큰 와류 구조물들은 확장되면서 분해되어 작은 와류 구조들(small-scale vortex structures)로 전이되게 된다[15].

분사 지점 근처의 혼합 영역 제트 유동 내에서는 일반적으로 콩팥 모양의 한 쌍의 와류 유동이 대칭으로 존재한다[16]. 후류로 감에 따라 콩팥 모양의 한 쌍의 와류 유동은 주변 유동과 충격파 구조물과의 간섭에 의해 점점 약해지면서 흐트러지게 된다. Fig. 4(a)의 경우에는 낮은 침투거리로 인해 한 쌍의 와류 유동은  $z$ 축으로 퍼져있는 것을 볼 수 있으며, 바닥면 가까이 와류 유동이 분포하는 것을 볼 수 있다. 벤트 혼합기의 경우에는 앞서 설명한 것과 같이 침투거리 증대로 인해 제트 유동 면적은 계단형 혼합기에 비해  $y$ 축으로 넓게 분포하게 된다. 제트 유동 내 와류 역시 Fig. 4(b)에서와 같이 계단형 혼합기에 비해 원형을 유지하면서 벽면에서 떨어져 있다.

바닥면에서는 제트 유동 내 한 쌍의 와류 유동에 대해서 속도 방향이 반대인 또 하나의 와류 유동이 관찰된다. 하지만 PIV 측정의 경우 바닥면에서의 난반사나 급속한 속도벡터의 변이 등으로 인해 벽면 근처 유동의 경우 PIV 값은 다른 영역에 비해 정확도가 떨어지게 된다. 따라서 벽면 근처의 또 다른 와류 형성이라는 것을 확인하기 위해서는 이에 대한 추가 검증 실험이 필요하다.



(a) Vortex field of step mixer



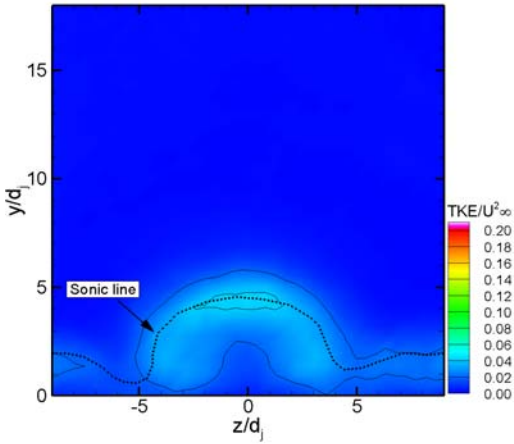
(b) Vortex field of vent mixer

Fig. 4 Vortex field of two mixers

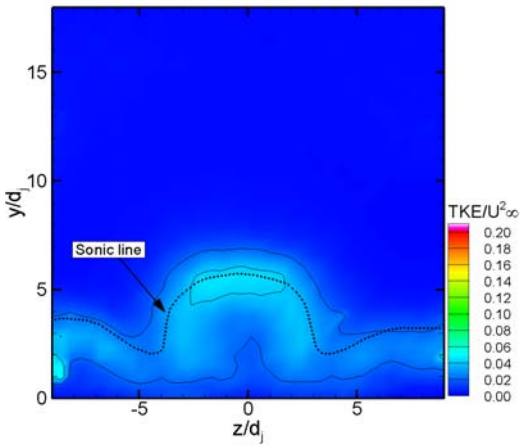
### 3.3 난류 운동에너지 분포

연료-공기 혼합에 주요한 영향을 주는 부분은 난류이다. 여러 난류 표현식들 중에서 본 논문에서는 난류운동에너지(turbulent kinetic energy, TKE)를 사용하여 두 혼합기의 난류 특성을 비교하였다. 난류 운동에너지는 아래 식과 같이 평균 속도에 대한 순간 속도들의 차이값을 제곱한 값으로 표현된다.





(a) TKE field of step mixer



(b) TKE field of vent mixer

Fig. 5 TKE field of two mixers

$$TKE = \frac{1}{2}(u')^2 + \frac{1}{2}(v')^2 + \frac{1}{2}(w')^2$$

위와 같은 식을 토대로 구한 난류운동에너지 분포도는 Fig. 5에 나타내었다. 두 혼합기 모두 난류운동에너지는 음속선(sonic line)을 경계로 분포하는 것을 볼 수 있는데, 이는 초음속 유동과 아음속 유동간의 경계에서의 전단속도 차이에 의해 유동 간섭이 일어나기 때문이다. 주유동과 제트 유동 경계를 중심으로 형성되는 난류운동에너지는 난류의 가장 큰 특징 중의 하나인

물질 전달이 활발하다는 것을 의미한다. 따라서 이 경계면을 통해서 주유동의 공기들이 제트 유동으로 유입되게 되며, 이는 연료-공기 혼합뿐만 아니라 연소 성능에도 주요한 영향을 미치게 된다. 이와 같이 경계면을 통해 유입된 공기는 Fig. 4와 같은 와류 유동에 의해 내부에서 혼합이 진행되게 된다. 계단형 혼합기의 경우는 Fig. 5(a)에서처럼 주로 제트 유동에서 난류운동에너지 분포를 보이지만, 벤트 혼합기는 Fig. 5(b)에서처럼 제트 유동뿐만 아니라 주변 전단층에서도 활발히 분포하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 활발한 난류운동에너지는 분사된 유동을 확산시켜 혼합을 증대시킨다.

#### 4. 결 론

본 연구는 stereoscopic PIV기법을 통해 얻은 3차원 속도값과 와류, 난류운동에너지를 이용하여 계단형 혼합기와 벤트 혼합기의 유동 특성을 비교하였다. 일반적인 속도분포 경향성은 두 혼합기 모두 유사한 경향성을 보였다. 하지만 벤트 혼합기의 경우 벽면의 두꺼운 전단층으로 인해 같은 운동량비에 대해 계단형 혼합기보다 높은 침투거리를 보였으며, 침투거리 증가는 제트 유동 내의 와류 유동을 확장시켰다. 또한 난류운동에너지는 주유동과 재순환영역 경계면을 중심으로 형성되며 이를 통해 주유동과 재순환영역의 물질 전달이 이루어진다. 계단형 혼합기가 제트 유동 영역에서 난류운동에너지가 주로 분포한 것에 비해 벤트 혼합기는 제트유동과 전단층에서 난류 영역이 활발히 발달하였다. 와류와 난류 영역의 활성화는 혼합 증대를 가져오며, 이를 토대로 벤트 혼합기가 계단형 혼합기에 비해 혼합 성능을 증대시킨다는 사실을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 서울대학교와 일본 동북대학교의 공동연구결과이며, 국제과학기술협력재단/한이태리 협력기반조성사업의 지원으로 수행되었으며,

이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 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.
2. 김채형, 정인석, "초음속 유동장 내 벤트 혼합기에 관한 수치해석 연구," *한국추진공학 회지*, 12권 2호, 2008, pp. 33-39.
3. 김채형, 정인석, "초음속 유동 내 벤트 혼합기의 형상적 특성에 따른 성능 연구," *한국항공우주학회지*, 37권 1호, 2009, pp. 69-75.
4. Chae-Hyoung Kim, In-Seuck Jeung, "A Study of Vented Cowl Supersonic Mixer for Improvement of Supersonic Mixing," the 3rd Tohoku-SNU Joint Workshop on Next Generation Aero Vehicle, Sendai Japan, 25-26 September, 2008.
5. Chae-Hyoung Kim, In-Seuck Jeung, Byungil Choi, Toshinori Kouchi, and Goro Masuya, "Effect of a vent slot mixer with a plasma jet torch in unheated supersonic flow," 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Tennessee USA, 25-28 July, 2010, .
6. Chae-Hyoung Kim, Kunmin Sung, In-Seuck Jeung, Byungil Choi, Toshinori Kouchi, and Goro Masuya, "Flowfield characteristics on a vent slot mixer in supersonic flow," *Shock Waves*, Vol. 20, No. 6, 2010, pp. 559-569.
7. Beresh, S. J., Henfling, J. F., Erven, R. J., and Spillers, R. W., "Crossplane Velocimetry of a Transverse Supersonic Jet in a Transonic Crossflow," *AIAA Journal*, Vol. 44, No. 12, 2006, pp. 3051-3061.
8. Smith, C. T., and Goyne, C. P., "Three-component Velocimetry in a Scramjet Combustor," *AIAA Paper* 2008-5073, July 2008.
9. Koike, S., Takahishi, H., Tanaka, K., Hirota, M., Takita, K., and Masuya, G., "Correction Method for Particle Velocimetry Data Based on the Stokes Drag Law," *AIAA Journal*, Vol. 45, No. 11, 2007, pp. 2770-2777.
10. Takahashi, H., Hirota, M., Oso, H., and Masuya, G., "Measurement of Supersonic Injection Flowfield Using Acetone PLIF," *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 51, No. 174, 2009, pp. 252-258 (in Japanese).
11. Uramoto, S., Tsuru, S., Kouchi, T., and Masuya, G., "Stereoscopic PIV Measurement of Supersonic Injection Flowfield and Its Error Analysis," *Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2010*, Miyazaki Japan, March 4-6, 2010, pp. 733-740.
12. Tsuru, S., Uramoto, S., Kouchi, T., and Masuya, G., "Stereoscopic PIV Measurement of Supersonic Flow with Normal Injection," *Proceedings of the 2010 Annual Meeting and the Eleventh Symposium on Propulsion System for Reusable Launch Vehicles*, Northern Branch of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, March 10-11, 2010, pp. 191-196 (in Japanese).
13. Prasad, A. K., and Jensen, K., "Scheimpflug Stereocamera for Particle Image Velocimetry in Liquid Flows," *Applied Optics*, Vol. 34, No. 30, 1995, pp. 7092-7099.
14. Koike, S., Suzuki, K., Kitamura, E., Hirota, M., Takita, K., Masuya, G., and Matsumoto, M., "Measurement of Vortices and Shock Waves Produced by Ramp and

- Twin Jets," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 22, No. 5, 2006, pp. 1059-1067.
15. Hollo, S., McDaniel, J., and Harfield, R., "Quantitative Investigation of Compressible Mixing: Staged Transverse Injection into Mach 2 Flow," *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 3, 1994, pp. 528-534.
  16. Fearn, R., and Weston, R. P., "Vorticity Associated with a Jet in a Cross Flow," *AIAA Journal*, Vol. 12, No. 12, 1974, pp. 1666-1671.