

## PIV를 이용한 삼중 제트의 유동 특성에 관한 연구

이명재<sup>†</sup> · 윤순현\* · 김동건\*\* · 김문경\*\*\*

### A Study on the Flow Characteristics of the Triple Jets Using Particle Image Velocimetry

Myung Jae Lee, Soon Hyun Yoon, Dong Keon Kim and Moon Kyung Kim

#### Abstract

Experiments were conducted to show the characteristics of the flow on triple parallel plane impinging jets. Measurements of mean velocity components and turbulent intensities were carried out with a particle image velocimetry(PIV) to investigate the flow field generated by the air issued from three identical plane parallel nozzles and mixed with the ambient air. The measurements range of these experiments were Reynolds number of 5000 and 1000 based on the nozzle width and the case of nozzle-to-plate distances were two times, six times and ten times the width of the nozzle. Results show that recirculation region of Re=5000 is the stronger than that of Re=1000. Therefore, velocity loss of centerline for Re=5000 that shows strongly recirculation region takes effect greatly.

**Key Words** : Triple Turbulent Impinging Jets (삼중 난류 충돌제트), Particle Image Velocimetry(입자영 상유속계), Turbulent Intensity(난류강도), Recirculation Region (재순환 영역),

#### 기호설명

$b$  : 분류 반폭

$CP$  : 결합점 (combined point)

$H$  : 노즐과 충돌면 사이의 거리

$h$  : 노즐의 높이

$MP$  : 합체점 (merging point)

$M_E$  : 제트에 유입된 유량

$$\left( = \rho \int_{-\infty}^{\infty} U dy - M_0 \right)$$

$M_0$  : 노즐 출구에서의 초기 유량 (=  $3\rho UW$ )

$Re$  : Reynolds 수  $\left( = \frac{U_j W}{\nu} \right)$

$S$  : 노즐과 노즐사이의 거리

$U$  : X방향의 속도

$U_j$  : 노즐 출구 속도

$U_{max}$  : X방향의 최대 속도

$u'$  : X방향의 root mean square

$\overline{uw}$  : Reynolds 전단응력

$v'$  : Y방향의 root mean square

$W$  : 노즐 폭

$X$  : 유동방향의 좌표

$Y$  : 유동 직각방향의 좌표

<sup>†</sup> 부산대학교 대학원

E-mail : jjcale20@nate.com

TEL : (051)510-1528 FAX : (051)512-5236

\* 부산대학교 기계공학과

\*\* 부산대학교 기계기술연구소

\*\*\* 창원전문대학 기계설계학과

## 1. 서론

제트는 전단층에서 생성되는 대규모 와에서 높은 난류강도를 얻을 수 있다. 이러한 제트가 충돌면에 분사되면서 국소적으로 높은 열 및 물질 전달 효과를 얻을 수 있기 때문에 물체의 냉각, 가열 및 건조 수단으로 산업현장에서 널리 사용되고 있다. 충돌제트에 대한 연구는 Reynolds 수, 노즐과 충돌면 사이의 간격, 노즐 출구 형상, 제트와 충돌면의 경사각, 충돌면의 곡률 형상, 난류강도의 변화에 의한 여러 가지 변수로 적용되어 왔다. Brarata 등<sup>(1)</sup>은 LDV기법을 이용하여 교차유동(cross flow)이 발생하는 다중제트에서의 제트간에 형성된 유동의 속도와 난류구조에 대해 조사하였다. Cziesla 등<sup>(2)</sup>은 LES를 사용하여 충돌 슬롯제트의 유동구조를 조사하였는데, 난류운동에너지와 난류 생성률 등의 난류구성요소의 난류량을 계산하였으며, 정체점에서 실험적인 데이터와 비교 조사하였다. Dano 등<sup>(3)</sup>은 DPIV를 이용하여 다공성판에서의 제트간의 간섭효과와 제트배열 형상에 따른 유동형태 그리고 크로스유동이 열전달에 미치는 영향에 관찰하였다. Sakakibara 등<sup>(4)</sup>은 DPIV와 LIF를 사용하여 슬롯제트에서의 충돌면의 거리변화에 따른 순간유동장과 온도를 측정하였다. Viskanta<sup>(5)</sup>는 다중 제트시스템에서 제트 상호작용, 큰 규모의 에디(eddy), 선회현상(swirl) 및 냉각벽면에서의 유동흡입 압력섭동 등을 제시하였다. Yoon<sup>(6)</sup>은 2차원 단일제트에서 초기 난류강도 증가를 위해 노즐 출구에 설치된 사각 로드(square rod)의 두께(T)에 따라 난류 유동장을 측정하여 난류강도가 열전달에 미치는 영향을 조사하였다.

Fig. 1은 삼중제트의 개략도에 대해 나타낸 것으로 Fig. 1(a)와 Fig. 1(b)는 각각 자유제트와 충돌제트의 개략도이다. Fig. 1(a)의 삼중제트의 유동특성을 살펴보면, 각각의 외부제트가 유입의 불균형으로 인해 중심제트쪽으로 편향되고, 편향된 제트는 중심제트와의 상호간섭효과에 의해 각각의 합체점(merging point : MP)과 결합점(combined point : CP)를 형성한다. 여기서 합체점은 X방향의 속도가 0가 되는 지점이고, 결합점은 단일제트로 합쳐지기 시작한 점으로 중심선상에서 속도가 최대인 지점을 의미한다. 여기서 정의된 합체점과 결합점에 의해 삼중제트의 유동은

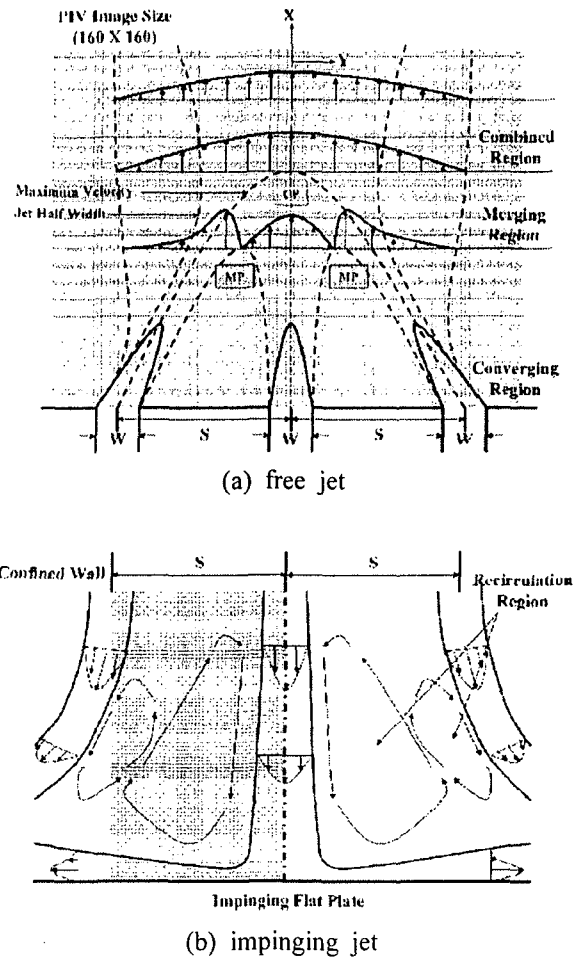


Fig. 1 Schematic diagram of triple jets

수렴영역(converging region), 합체영역(merging region)과 결합영역(combined region)과 같이 3가지의 영역으로 구분할 수 있다. Fig. 1(b)는 삼중 충돌제트의 개략도를 나타낸 것이다. 각각의 제트가 노즐로부터 분사된 후에 중심제트가 충돌면에 부딪힌 후에 벽제트가 사이드제트의 영향으로 인해 외부로 빠져나가지 못하고 재순환 영역을 형성하며, 내부유동은 Fig. 1(b)와 같다. 삼중 충돌 제트의 중심제트의 경우 다중제트의 유동특성과 유사하며, 이런 다중제트는 유동의 복잡성 때문에 주로 열전달의 연구에서 주로 이루어졌거나 전산 해석을 통한 연구가 진행되어 왔다.

본 연구에서는 입자영상유속계를 이용하여 유동가시화를 실시하였다. 제트간의 간섭효과에 따른 자유제트의 유동특성과 삼중충돌제트의 레이놀즈 수의 변화를 통해 실험을 실시하였다.

Table 1 Experimental Conditions

Type of jet	Triple jets
Reynolds number (Re)	5,000, 1000
Nozzle width (W)	10mm
Nozzle-to-nozzle distances (S)	60mm
Nozzle-to-plate distance (H)	20, 60, 100mm

## 2. 실험장치 및 실험방법

본 연구의 실험 장치는 풍동과 시험부로 구성 되어 있으며, 먼저 풍동은 개회로 저속풍동으로 송풍기(blower), 안정실(settling chamber), 확대부(diffuser), 정류실(plenum chamber) 및 축소노즐(contracting nozzle)로 구성되어 있다. 송풍기는 7.5kW의 삼상 교류 전동기로 구동되며, 외기의 유입부에 유량 조절 밸브를 설치하였다. 송풍기의 공기 흡입부로의 이물질의 유입을 방지 및 균일 유동장을 구현하기 위하여 풍동의 확대부와 덕트 사이에 각각 스크린(#50)을 설치하였다. 유속의 속도를 제어하기 위하여 전원 주파수 변화기를 사용하였다. 시험부(test section)는 축소노즐과 시험부로 구성되어 있다. 축소노즐은 Morel(7)이 제시한 설계방법에 의하여 제작되었고, 위에서 제시한 노즐을 3개 제작하여 삼중제트를 구현하였다. 사용된 각각의 노즐은 폭(W)이 10mm, 높이(h)가 300mm로 형상비(h/W)가 30이고, 노즐과 노즐 사이의 거리는 노즐 폭의 6배로 고정하였다. 그리고 시험구간은 700mm×700mm로 제작되었으며, 노즐의 높이 방향의 유동을 제한할 목적으로 노즐의 상하에 평행판을 설치하여 유동의 2차원성을 유지하였다.

Fig. 2는 본 연구에 사용된 입자영상유속계(PIV)의 개략도를 나타낸 것으로, 입자 영상 유속계는 강도가 120mJ/pulse, 파장이 532nm인 이중펄스 방식의 Nd:Yag Laser 시스템과 2K×2K 고해상도 CCD카메라, 동기화 장치(TSI610032) 및 구동용 펜티엄 컴퓨터로 구성되어 있다. 그리고 추적 입자는 라스킨(Laskin) 노즐을 이용하여 올리브 오일을 에어로졸화 하였으며, 이 때 입자의 평균 직경은 2 $\mu$ m로 유동에 영향을 거의 주지 않기 때문에 PIV측정에 적당한 크기이다. 라스킨 노즐에서 발생된 올리브 입자는 송풍기의 입구를 통해 세 개의 축소노즐을 통하여 시험부에 분사

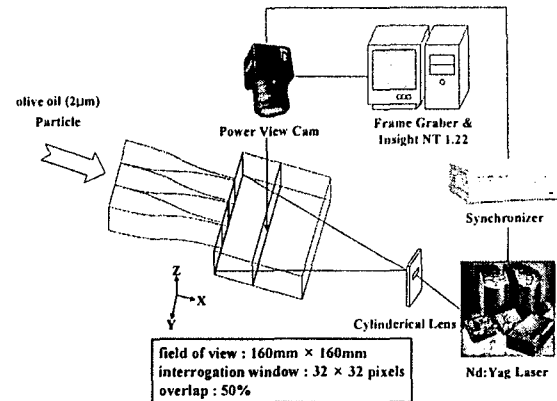


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

되고, 레이저는 원통형 렌즈(cylindrical lens)와 구형 렌즈(spherical lens)를 통해 실험에 적당한 광량을 가지고 시험부에 조사하여 고해상도 CCD 카메라를 이용하여 입자의 이미지를 획득할 수 있다. 이미지는 총 4000장이며, 두 장의 이미지가 하나의 순간 속도장을 얻어 총 2000장의 순간 속도벡터장을 획득했다. 이 때 레이저의 펄스 간격은 50 $\mu$ s이고, 추적영역의 크기는 32×32 픽셀, 50%의 겹침을 허용하여 실제 속도벡터간의 간격은 16픽셀이 된다. 이는 전체 화상에서 127×127개의 속도벡터를 구하였다. 구해진 속도 벡터는 후처리 프로그램을 사용하여 불량벡터의 제거, 중심추적, 앙상블 평균 등의 통계적 처리를 수행하였다. 자세한 실험조건 Table 1에 나타내었다.

## 3. 실험결과

본 연구에서는 노즐과 노즐사이의 거리(S/W)를 6으로 고정하고, Re=5,000과 1000으로 하여 삼중제트의 자유제트와 레이놀즈 수를 변화시켜 충돌제트에 대한 유동특성을 조사하였다.

### 3.1 삼중제트의 자유제트의 유동특성

Fig. 3은 입자영상유속계로부터 얻은 삼중제트의 평균속도벡터를 나타낸 것이다. 각각의 노즐 출구로부터 분사된 외부제트는 유입의 불균형으로 인해 중심제트쪽으로 편향되는 것을 볼 수 있다. 이렇게 편향된 제트는 중심제트와의 상호간섭 효과로 인해 X/W=5.3, Y/W=±2에서 합체점이

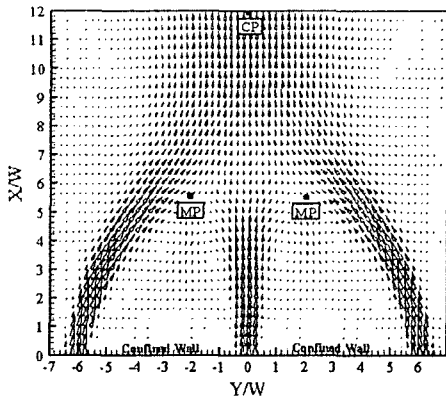
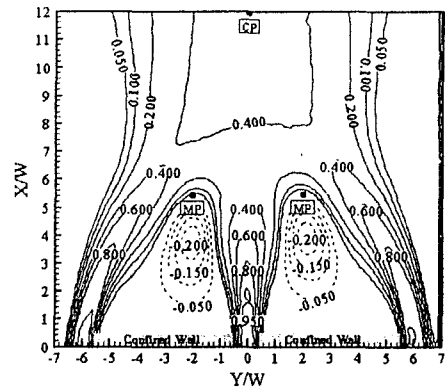


Fig. 3 Ensemble mean velocity vector for triple jets at  $Re=5000$

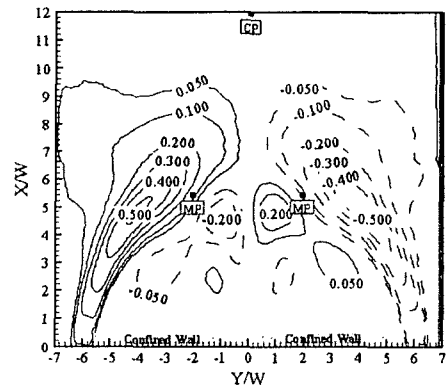
존재하는 것을 관찰할 수 있고, 단일제트의 특성이 나타나는 결합점은  $X/W=12$ 에서 존재하는 것을 확인할 수 있다. 여기서 합체점과 결합점의 의해 삼중제트의 유동특성에 따른 수렴, 합체, 결합영역 등 3가지 영역으로 구분할 수 있다.

Fig. 4는 삼중제트의 X와 Y방향의 평균속도의 등분포를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 X방향 평균속도의 등분포를 나타내었다. 중심제트의 좌우의 외부제트가 편향되는 것을 관찰할 수 있다. 합체점 부근에서 외부제트의 상호작용 효과로 인해 중심제트의 평균속도가 감소하고, 두 개의 외부제트와 중심제트 사이에 역류가 발생하는 것을 볼 수 있다. 상호작용 효과가 발생하는  $X/W=6$  이후로 삼중제트의 평균속도가 점차 증가한다. Fig. 4(b)는 Y방향 평균속도의 등분포를 나타내고 있다. 외부제트의 편향성으로 인해 중심제트에 비해 큰 속도분포를 보이며, 합체점이 존재하는 부분에서 Y방향 평균속도가 최대로 발생한다. 그리고 합체점에서 멀어져 하류방향(downstream)으로 갈수록 Y방향 평균속도는 다시 감소한다.

Fig. 5는 삼중제트의 X와 Y방향의 난류강도의 등분포를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)은 X방향 난류강도의 등분포를 나타낸 것으로, 노즐 출구에서는 노즐의 팁(tip)부분에서 난류강도가 커지는 요인이다. 합체점부근에서의 강한 상호작용 효과로 인해 중심제트가 외부제트에 비해 큰 난류강도를 가진다. 합체점을 지나서 하류방향으로 갈수록 X방향 난류강도는 감소한다. 그리고 외부제트의 외부전단층(outer shear layer)에 비해 제트와 제트 사이의 외부전단층에서의 피크치가 보다 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 상호간섭 효과



(a) streamwise velocity



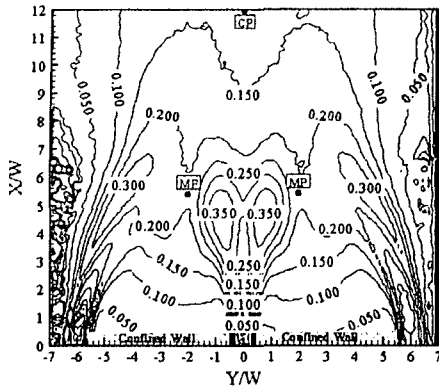
(b) spanwise velocity

Fig. 4 Contours of ensemble velocity for triple jets at  $Re=5000$

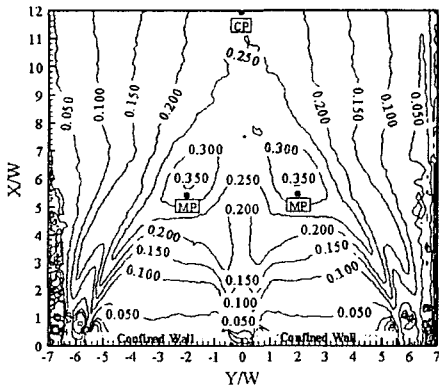
로 인해 발생하는 유입의 불균형으로 인한 증가가 큰 요인으로 작용하기 때문이다. Fig. 5(b)는 Y방향의 난류강도를 나타낸 것으로, Y방향의 난류강도를 통해 제트간의 상호간섭의 정도를 파악할 수 있다. 삼중제트의 Y방향의 난류강도 피크치가 합체점 영역에서 하나의 덩어리로 나타나는 것을 알 수 있다. 이때 피크치가 발생하는 지점은  $X/W=5.9$ ,  $Y/W=\pm 1.9$ 인 위치에서 발생한다.

### 3.2 레이놀즈 수의 변화

Fig. 6는 삼중제트의 충돌제트에 대한 충돌면의 거리의 변화에 따른 유선을 나타낸 것이다. 중심제트 출구에서 분사된 유동이 충돌면을 따라가다가 재순환 영역을 형성하여 외부제트가 바깥쪽으로 편향되는 것을 볼 수 있다. 이것은 외부제트의 영향으로 인해 중심제트의 유동이 바깥쪽으로



(a) streamwise turbulence intensity

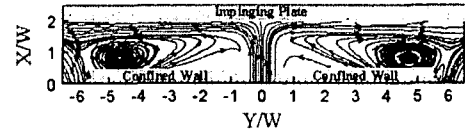


(b) spanwise turbulence intensity

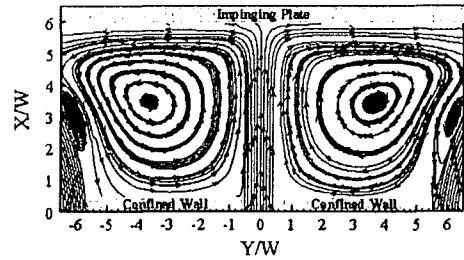
**Fig. 5** Contours of ensembled turbulence intensity for triple jets at  $Re=5000$

빠져나가지 못하고 노즐과 노즐사이 내부에 재순환 영역을 형성하여 외부제트를 바깥쪽으로 밀어낸다. 충돌면의 거리가 멀어질수록 재순환 영역은 넓게 분포한다. 특히  $H/W=6$ 과  $10$ 인 경우는 2개의 재순환 영역이 뚜렷하게 형성된다. 이것은 외부제트의 일부가 바깥쪽으로 빠져나가지 않고 중심제트의 벽제트 일부와 합쳐져 또 다른 방향의 재순환 영역을 형성한다. 이것은 Fig. 3에서 나타난 자유제트의 평균적인 속도벡터에서와 동일한 현상으로 간주된다. Brarata<sup>(1)</sup>에서도 이와 같은 두 개의 분수형태의 재순환 영역을 발견할 수 있다.

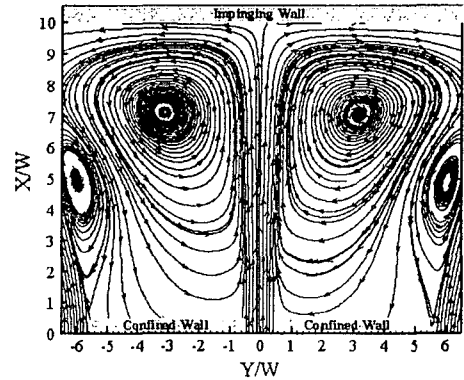
Fig. 7은 삼중충돌제트에서 레이놀즈 수의 변화에 따른 중심선상의 평균속도와 난류강도 분포를 타낸 것이다. Fig. 7(a)은 삼중충돌제트에서 충돌면의 거리의 변화에 따른 중심선상의 평균속도를 나타낸 것이다.  $Re=5000$ 의 경우가  $Re=1000$ 에 비



(a)  $H/W=2$



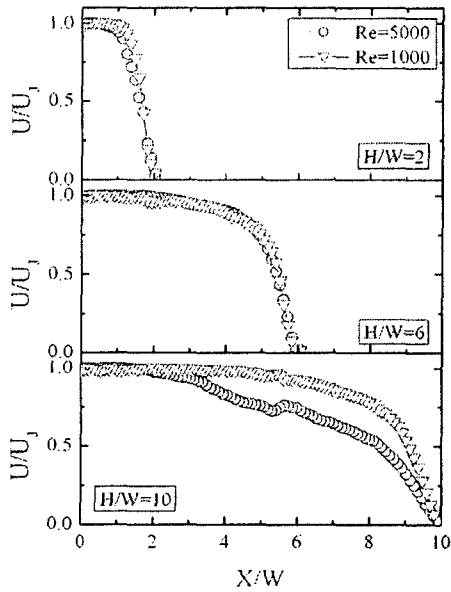
(b)  $H/W=6$



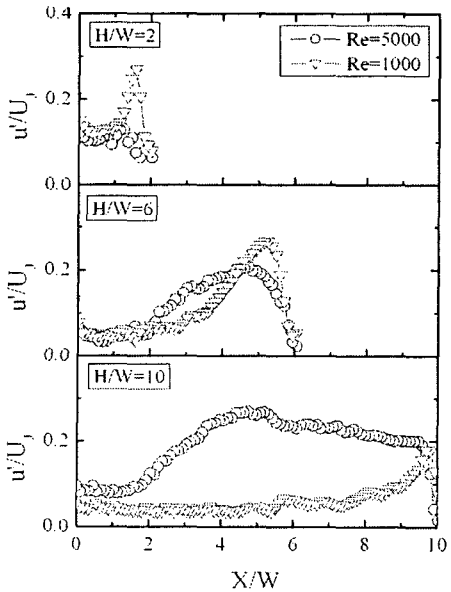
(c)  $H/W=10$

**Fig. 6** Ensembled mean velocity streamlines in the triple impinging jets for various nozzle-to-plate distances

해 높은 속도 모멘텀 손실이 크게 나타난다. 충돌면의 거리가  $H/W=2$ 와  $6$ 인 경우  $Re=5000$ 과  $1000$ 이 유사한 속도 분포를 가지지만, 충돌면의 거리가 멀어질수록 재순환 영역의 넓어져  $H/W=10$ 인 경우에 속도 모멘텀 손실이  $Re=5000$ 의 경우가 더 크게 나타났다. 이것은 재순환 영역의 영향이  $Re=1000$ 에 비해  $Re=5000$ 의 경우가 크게 작용하여 발생한 것이다. 따라서, 재순환 영역의 영향도 역시 레이놀즈 수가 증가할수록 크게 작용한다는 것을 알 수 있다. Fig. 7(b)은 삼중충돌제트에서 충돌면의 거리의 변화에 따른 중심선상의 난류강도 분포를 나타낸 것이다.  $Re=1000$ 의 경우 노즐과 충돌면사이의 거리가 가까울수록  $Re=5000$ 에 비해 높은 난류강도 분포를 보이고 있다. 하지만  $H/W=10$ 인 경우  $Re=1000$ 에 비해  $Re=5000$ 의 경우가 높게 나타난다. 이것은



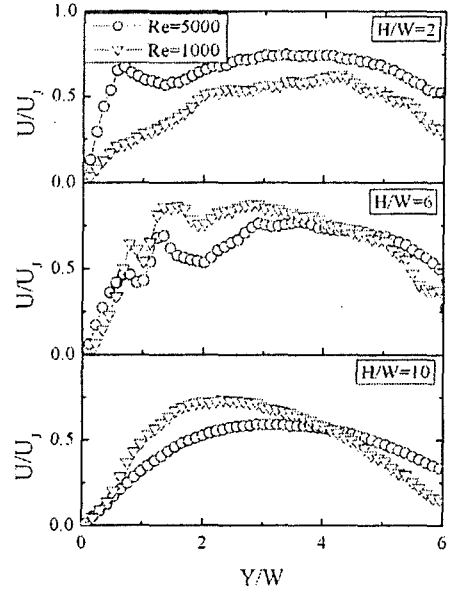
(a) mean velocity



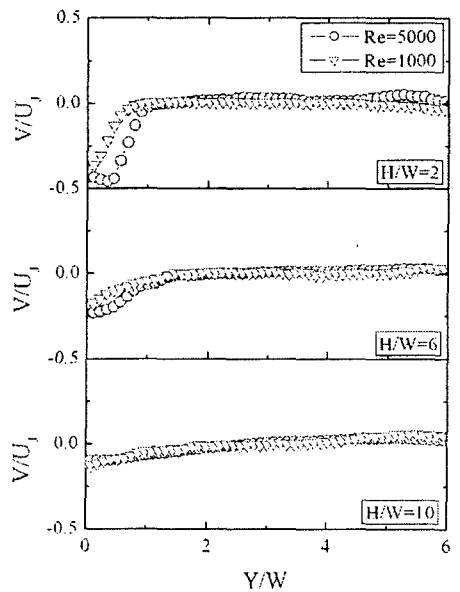
(b) mean turbulence intensity

**Fig. 7** Comparison of Reynolds number for mean velocity and mean turbulent intensity in triple impinging jets

재순환 영역이 넓어지면서,  $Re=5000$ 의 속도 손실 폭이 증가로 인해 중심선상의 유동의 진동효과 (oscillation effect)가 크게 발생한 것으로 나타난다. 이것은 낮은 레이놀즈 수의 경우 총돌면이 가까울수록 재순환 영역의 영향이 크게 작용하지만, 거리가 먼  $H/W=10$ 인 경우 재순환 영역이 상대적으로 약해지는 것을 관찰할 수 있다. 하지만,



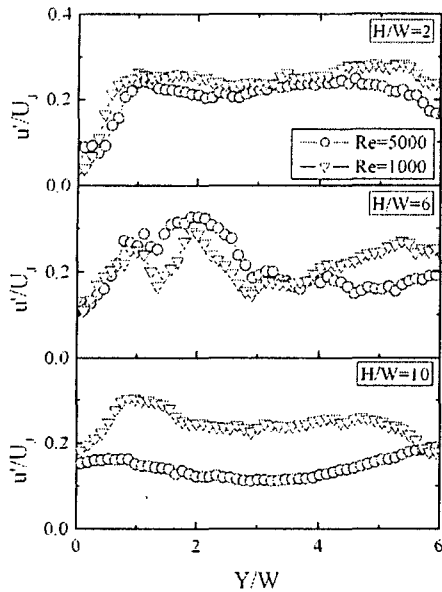
(a) streamwise velocity in the wall jet



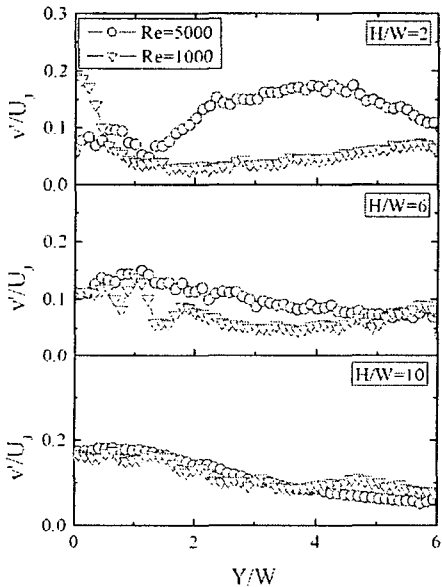
(b) spanwise velocity in the wall jet

**Fig. 8** Distribution of velocity with various nozzle-to-plated distances for  $Re=5000$  and  $Re=1000$  in the triple impinging jets

레이놀즈 수가 높은  $Re=5000$ 의 경우는 총돌면의 거리가 멀어질수록, 재순환 영역이 넓어지고 이에 따라 난류강도 분포도 커지게 된다. 따라서, 낮은 레이놀즈 수는 총돌면의 가까울수록 재순환 영역의 영향이 크게 작용하고, 높은 레이놀즈 수는 총돌면이 멀어질수록 재순환 영역의 영향이 크게 작용한다.



(a) streamwise turbulence intensity



(b) spanwise turbulence intensity

**Fig. 9** Distribution of turbulence intensity with various nozzle-to-plated distances for  $Re=5000$  and  $Re=1000$  in the triple impinging jets

Fig. 8과 9는 벽면에서의 벽제트 유동을 나타낸 것이다. 주유동 방향은 벽면을 따라 흐르는 방향으로 중심선상의 좌표와 반대방향으로 분석을 하였다.

Fig. 8은 벽제트 유동의 X와 Y방향의 평균속도 분포를 나타낸 것이다.  $Re=5000$ 의 X방향의 평균

속도의 경우 충돌면의 거리가 멀어질수록  $Re=1000$ 에 비해 속도 모멘텀 손실이 크게 발생한다. 중심선상의 평균속도에서 나타난 것과 동일하게  $Re=5000$ 이  $Re=1000$ 에 비해 재순환 영역의 영향이 강하게 작용을 하여 재순환 영역의 영향이 가장 크게 작용하는  $H/W=10$ 에서 속도 손실이 가장 크게 나타났다. 이에 반해 Y방향의 평균속도의  $Re=5000$ 과  $1000$ 이 거의 비슷한 분포도를 가진다. 따라서 평균속도의 경우 재순환의 영역의 영향이 X방향의 속도성분에 크게 작용하는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 X와 Y방향의 난류강도 분포를 나타낸 것이다. X방향의 난류강도 분포는 평균속도 분포와는 달리  $Re=1000$ 의 경우가 높게 나타나며, 충돌면에서의 거리가 가장 먼  $H/W=10$ 인 경우 가장 크게 나타난다. 벽면에서 유동은  $Re=5000$ 에 비해  $Re=1000$ 의 경우가 진동효과가 가장 많이 발생한다는 것을 알 수 있다. 재순환 영역의 영향이  $Re=5000$ 에 비해  $Re=1000$ 이 약하게 작용하여 이로 인해 진동이 많이 발생하는 것을 알 수 있다. Y방향의 난류강도의 경우  $H/W=2$ 의 경우를 제외하고 대체로 유사한 난류강도 분포를 보이고 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 입자영상유속계를 이용하여 세 개의 동일한 노즐인 삼중제트에 대해 자유제트와 충돌제트의 유동특성을 조사하여 다음과 같이 결론을 얻었다.

- (1) 삼중제트의 자유제트는 제트간의 간섭효과로 인해 제트와 제트사이에 재순환 영역이 형성하고 이 재순환 유동에 의해 외부제트가 편향된다.
- (2) 삼중제트의 자유제트의 난류강도는 세 개의 제트가 합쳐지는 합체점 부근에서 최대가 된다.
- (3) 삼중충돌제트는 충돌면의 거리가 멀어질수록 재순환 영역의 분포가 넓어진다.
- (4)  $Re=5000$ 의 경우 재순환 영역의 분포가 가장 높은  $H/W=10$ 에서  $Re=1000$ 에 비해 높은 속도 모멘텀 손실이 발생한다. 이로 인해 재순환

영역의 영향이  $Re=5000$ 의 경우가 강하게 작용한다.

- (5) 벽면에서의 벽제트 유동은  $Re=5000$ 에 비해  $Re=10000$ 이 더 강한 진동이 발생하여 난류강도도 높게 나타난다.

225~233.

- 8) Yoon, S.H., Jung, F.Y., Lee, Y.S., Boo, J.S., 1983, "The Characteristics of Free and Impinging Turbulent Plane Jet," *KSME B*, Vol. 7, No. 4, pp. 361~371.

### 참 고 문 헌

- 1) Brarata, J. M. M., Durdo, D. F. G., Heitor, M. V., 1992, "Velocimetry characteristics of Multiple Impinging Jets Through a Crossflow," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 114, pp. 231~239.
- 2) Czielska, T., Biswas, G., Chattopadhyay, H., Mitra, N.K., 2001, "Large-eddy simulation of flow and heat transfer in an impinging slot jet," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 22, pp. 500~508.
- 3) Dano, B. P.E., Liburdy, J. A., Kanokjaruvijit, K., 2005, "Flow characteristics and heat transfer performances of a semi-confined impinging array of jets: effect of nozzle geometry," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 691~701.
- 4) Sakakibara, J., Hishida, K., Maeda, M., 1997, "Vortex structure and heat transfer in the stagnation region of an impinging plane jet (simultaneous measurements of velocity and temperature fields by digital particle image velocimetry and laser-induced fluorescence)," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 3163~3176.
- 5) Viskanta, R., 1993, "Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets," *Experimental Thermal and Fluid Sci.*, Vol. 6, pp. 111~134.
- 6) Yoon, S.H., Kim, D.K., and Kim, M.K., 1999, "A Characteristics of Flow and Heat Transfer for Variation of Turbulence Intensity in the Two-Dimensional Channel Impinging Jet," *KSME B*, Vol. 23, pp. 753~760.
- 7) Morel, T., 1975, "Comprehensive design of axisymmetric wind tunnel contraction," *ASME Journal of Fluid engineering*, Vol.97, pp.