

< 논문 >

두 개의 평행한 평면 제트의 실험적 연구

김 동 건* · 윤 순 현†

(2004년 8월 26일 접수, 2004년 12월 13일 심사완료)

Experimental Investigation of Two Parallel Plane Jets

Dong-Keon Kim and Soon-Hyun Yoon

Key Words: Parallel Plane Jet(평행 평면 제트), Unventilated Jet(유입제한 제트), Ventilated Jets(유입허용 제트), Merging point(합체점), Combined Point(결합점), Vortex Center(와류중심), Converging Region(수렴영역), Merging Region(합체영역), Combined Region(결합영역), Particle Image Velocimetry(입자영상 유속계)

Abstract

The characteristics of flow on two parallel plane jets was experimentally investigated. The two nozzles each with an aspect ratio of 20 were separated by 6 nozzle widths. Reynolds number based on nozzle width was set to 5,000 by nozzle exit velocity. The particle image velocimetry and pressure transducer were employed to measure turbulent velocity components and mean static pressure, respectively. In case of unventilated parallel plane jets, it was shown that a recirculation zone with sub-atmospheric static pressure was bounded by the inner shear layers of the individual jets and the nozzles plated. There was no recirculation zone in the ventilated parallel plane jets. It was found that the spanwise turbulent intensities of unventilated jets were higher than those of ventilated jets because of the interaction of jets, and the streamwise turbulent intensities of ventilated jets were higher than those of unventilated jets because of the effect of entrainment.

기호설명

b : 분류반폭
 CP : 복합점
 H : 노즐의 높이(200 mm)
 MP : 혼합점
 Q : 체적유량
 Q_e : 노즐 출구에서의 체적 유량
 S : 노즐과 노즐사이의 거리
 U : X 방향 전체 평균속도
 U_c : 노즐과 노즐사이 중심선의 속도

U_{cmaz} : 중심선에서의 최고속도
 U_e : 노즐의 출구속도
 U_m : Y 방향의 최고속도
 u : X방향의 난류섭동 성분
 u' : X 방향의 R.M.S.
 u'_m : 최대속도 지점에서 X방향의 난류강도
 V : Y 방향 전체 평균속도
 v : Y방향의 난류섭동 성분
 v' : Y 방향의 R.M.S.
 v'_m : 최대속도 지점에서 Y방향의 난류강도
 VC : 와류중심(Vortex center)
 W : 노즐 폭(10 mm)
 X : 제트의 유동 방향
 Y : 제트의 유동 방향에 직각인 방향
 X_m : 축방향의 속도가 최대인 지점

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부
 E-mail : yshyoon@pnu.edu
 TEL : (051)510-2314 FAX : (051)583-4140

* 회원, 부산대학교 기계기술연구소

- X_{cp} : 결합점의 위치
- X_{mp} : 혼합점의 위치
- X_p : 최대 압력의 위치

1. 서론

단일 난류제트(single turbulent jet)와 오프셋 벽제트(offset wall jet)는 공학적인 중요성이 커 넓게 연구되어져 왔고, 연소기, 보일러, 가스터빈 연소기 벽의 막냉각, 연료분사시스템, 그리고 가열 및 공조시스템에 이르기까지 폭 넓게 산업적으로 응용되고 있다. 평행 평면 제트(parallel plane jets)는 위에서 언급된 응용 뿐만 아니라 오염물질의 배기굴뚝과 수직 이착륙기의 추력 증대 배출 장치 등 환경과 항공산업에도 응용되어 기술적으로 중요한 역할을 하고 있다.

평행 평면 제트는 노즐에서 유체가 분사될 때 외부로부터 유입의 유·무에 따라 유입제한제트(unventilated jets)와 유입허용제트(ventilated jet)로 구분할 수 있고, Fig. 1에 개략적으로 나타내었다. 먼저 Fig. 1(a)에 나타난 유입제한 제트의 유동형태를 살펴보면 축방향을 따라 유동의 특성에 따라 3가지 영역으로 표현할 수 있다. 첫째, 수렴영역(converging region)은 노즐 출구에서 시작하여 각각의 분사된 제트의 내부 전단층이 만나는 점, 즉 합체점(merging point : MP)까지이고, 여기서 합체점은 속도가 0가 되는 것을 말한다. 각각의 제트가 편향되어 노즐과 노즐 중심선상에서 합쳐지는 것은 내부, 외부 전단층에서의 유입율의 불균형 성질에 기인한 것이고, 노즐과 노즐사이에는 음압장이 형성되고, 재순환 유동이 발생한다. 둘째, 합체영역(merging region)은 합체점(merging point, MP)과 결합점(combined point, CP) 사이에 존재한다. 결합점은 대칭면을 따라 최대의 속도가 나타나는 지점을 말하며, 또한 유동직 각방향으로 유동을 나누었을 때 대칭면에서 최고 속도가 나타나는 지점이기도 하다. 셋째, 결합영역(combined region)은 두 개의 제트가 단일제트로 닮아가기 시작하는 결합점 이후의 영역을 말한다. Fig. 1(b)에 나타난 유입허용 제트는 3가지 영역으로 표현되는 유입제한 제트와 달리 2가지의 영역만이 존재한다. 왜냐하면 수렴영역과 합체영역을 구분할 수 있는 합체점이 존재하지 않기 때

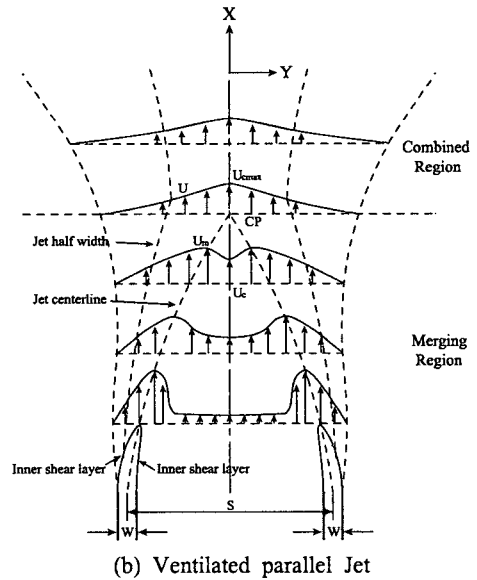
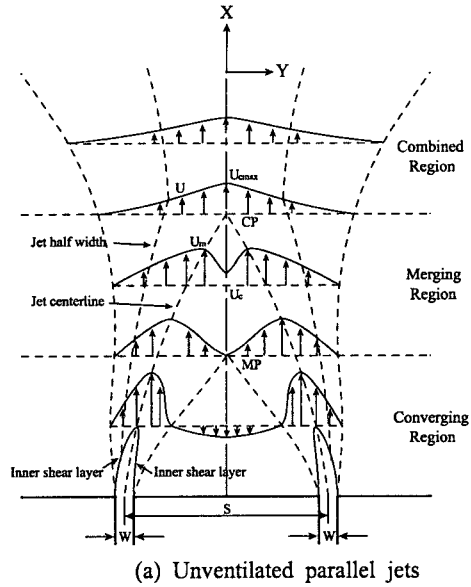


Fig. 1 Schematic of two parallel plane jets

문이다. 합체점은 대칭면에서 속도가 0이 되는 지점으로, 유입허용 제트에서는 제트사이의 내부에 음압장이 존재하지 않고, 동시에 역류가 발생하지 않아 속도가 0가 되는 지점이 없기 때문이다. 그렇지만 대칭면에서 속도가 최대가 되는 합체점은 존재하기 때문에 유입 허용제트는 합체영역과 결합영역으로 구분된다.

평행 평면 제트의 연구는 Miller와 Comings⁽¹⁾에

의해 시작되었으며, 유동형태와 유입 구조에 대한 연구는 Tanaka^(2,3)에서 본격적으로 시작하였다. Tanaka^(2,3)는 I형 열선을 이용하여 노즐과 노즐사이의 거리변화에 따른 속도와 난류강도를 측정하여 유동장을 조사하였고, 노즐과 노즐사이의 거리변화를 $8.5 < S/W < 16$ 에서 실험하여 합체점, 결합점, 최대 압력점 등에 대해 노즐사이의 거리에 대한 상관식을 식 (1)과 같이 제시하였다. 또한 결합영역에서는 단일제트와 유사한 유동특성이 나타난다는 것을 밝혔다.

$$\begin{aligned} \frac{X_{mp}}{W} &= 5.06 \left(\frac{S}{W} \right)^{0.27} & \frac{X_{cp}}{W} &= 7.08 \left(\frac{S}{W} \right)^{0.27} \\ \frac{X_p}{W} &= 5.82 \left(\frac{S}{W} \right)^{0.27} & \frac{U_{max}}{U_e} &= 1.96 \left(\frac{S}{W} \right)^{-0.5} \end{aligned} \quad (1)$$

Elbanna 등⁽⁴⁾은 평행 제트의 평균 속도 분포는 결합점 이후, 즉 결합영역에서 단일제트와 잘 일치하는 것을 보였다. 결합영역의 평균속도 감소율은 비록 두 개의 제트가 합쳐져서 속도가 증가하였을지라도 단일제트와 잘 일치한다고 밝혔고, 평행제트의 분사율은 단일제트보다 기울기가 작다고 보고하였다. Lin과 Sheu⁽⁵⁾는 열선 유속계를 이용하여 평균속도는 합체영역과 결합영역 둘 다에서 자기보존(self-preserving)이 나타났고, 레이놀즈 전단응력은 결합영역에서 자기보존이 나타났다. 또한 수렴영역에서 최대속도의 궤적은 노즐 거리의 변화에 의해 거의 바뀌지 않는다는 것을 밝혔고, 결합영역에서의 유입 및 분사율은 단일제트보다 크다고 하였고, 이것은 단일제트에 비해 V방향의 난류강도와 레이놀즈 전단응력이 증가하였기 때문이다. Nasr과 Lai^(6,7)는 평행제트와 움셋제트를 비교하여 제시하였다. 평행제트와 움셋제트의 무차원 거리는 각각 4.25, 2.125에서 수행되었고, 평행 제트의 각각 노즐의 내부전단층의 간섭은 움셋제트보다 더 커서 난류강도도 더 크고, 재순환영역은 움셋제트보다 두 개의 평행제트가 더 작다는 것을 관찰하였다. 윤과 김⁽⁸⁾은 유입제한제트에서 노즐과 노즐사이의 거리를 노즐 폭에 4~10배로 변화시키면서 결합점과 합체점의 위치에 대한 상관 관계식을 제시하였다.

본 연구에서는 유입 제한 벽 설치의 유무에 따른 유입제한제트(unventilated jets)와 유입허용유입(ventilated jets)의 압력 분포 및 유동을 조사하여 제트간의 상호간섭 효과를 규명하고자 한다.

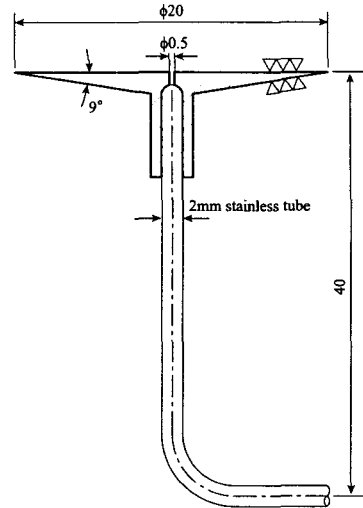


Fig. 2 Disk type static pressure probe

2. 실험장치 및 고찰

2.1 풍동

본 실험에 사용된 풍동은 개방형 저속풍동으로 송풍기, 확대부, 정류실, 수축노즐, 시험부로 구성되어 있으며, 실험장치의 총 길이는 4m이다. 송풍기는 10kW의 3상전류를 사용하는 고풍압용이고, 송풍기의 입구에서는 이물질의 유입을 방지하기 위하여 필터를 설치하였다. 낮은 난류도와 균일한 평균속도를 얻기 위하여 확대부와 정류실, 정류실과 노즐 사이에 스크린(#50)을 설치하였다. 각각의 송풍기에는 전원주파수변환기(LG, 10kW)를 설치하여 노즐출구에서의 속도를 0~60 m/s까지 변화시킬 수 있도록 하였다. 수축노즐의 형상은 Morel⁽⁹⁾의 3차 다항식으로 제작하였다. 노즐출구 폭과 높이는 각각 10 mm, 200 mm로 형상비가 20인 사각 노즐을 사용하였다. 평행제트의 조건을 맞추기 위하여 풍동과 노즐을 2개씩 제작하였다. 노즐 출구에서 유동이 분사될 때 주위의 공기로부터 유입을 제한(unventilated)하기 위하여 노즐과 노즐사이와 각각의 노즐 옆면에 판을 설치하였고, 평면제트의 조건을 위해 노즐의 상하에 판을 설치하여 노즐의 높이 방향으로의 유동의 발달을 제한하였다.

2.2 압력 측정

평행 평면 제트의 압력 측정은 디스크 형태의

정압 프로브(static probe)와 디지털마노메타(digital manometer) 사용하여 측정하였다. Fig. 2는 압력측정에 사용되었던 정압 프로브의 개략도를 나타낸 것이다. 정압계수 C_p 는 식 (2)와 같이 구하였다.

$$C_p = \frac{P - P_{atm}}{0.5\rho U_c^2} \quad (2)$$

2.3 속도 측정

평균속도 및 난류성분을 측정하기 위하여 PIV (particle image velocimetry) 시스템을 사용하였고, 개략도는 Fig. 3에 나타내었다. Nd:Yag 레이저, CCD카메라(TSI, PIVCAM 10-15) 동기화장치(Synchronizer, TSI 610032), 화상처리 보드(TSI, Frame grabber 610066) 및 구동형 컴퓨터로 구성되어 있다. 사용된 레이저 원은 mini Nd:Yag 레이저로 파워는 120mJ/pulse이며, 532mm의 파장을 가진다. CCD 카메라는 2K×2K 픽셀의 고해상도와 12bit의 gray-resolution을 가지고, 속도추출 시 정확도를 높일 수 있으며, 최소 200ns까지 시간간격을 조절할 수 있다. 렌즈는 50m 니콘 렌즈가 사용되었으며 화상 전체의 초점을 맞추기 위해 렌즈틸팅이 이루어졌다. 레이저 시트의 두께는 2mm로써 측정에 적합한 크기이다. 본 실험에 사용된 추적입자는 비유독성, 비부식성, 비연마성, 비휘발성이며, 화학적으로 불활성인 올리브기름의 액적을 적용하였다. 입자의 평균직경은 2 μ m로써 공기중 유동의 PIV계측에 적당한 크기이다. PIV 측정영역의 면적은 200mm × 200mm이다. 각

각의 화상에 한번의 레이저 펄스를 노출시켜 화상을 얻은 다음 두개의 화상을 비교하는 2화상 상호상관기법을 사용하였고, 이 때 두 레이저의 펄스간격은 50 μ s이다. 이러한 화상들의 쌍은 카메라의 촬영속도가 15Hz이므로 초당 7.5개 얻어진다. 화상획득은 2040장(속도장 1020개)을 획득하여 난류값의 평균이 일정한 값으로 유지되도록 하였다. 속도벡터는 FFT 방식의 상호상관법에 의해 계산되었으며, 상관영역은 32×32로 하고 50%의 오버랩(overlap)을 사용하여 총 6724개의 벡터를 얻었다.

3. 실험 결과

본 연구에서는 노즐과 노즐사이의 거리(S/W)를 6으로, Re=5,000으로 고정하고, 유입제한을 위한 제한벽의 설치 유무에 따른 압력 및 유동 특성을 조사하였다.

Fig. 4는 유입제한과 유입허용제트에서 노즐과 노즐사이의 중심선에서의 압력, 평균속도 그리고 난류섭동성분을 측정하여 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 압력계수의 분포를 나타낸 것으로, 유입제한(unventilated) 경우에는 노즐 벽면 근처에서 음압장이 형성되며, 노즐 벽면에서 거리가 멀어져 X/W=4에서 최대 음압이 발생한다. 이것은 노즐 벽면의 존재로 재순환 유동이 발생하고, 재순환 유동에 대한 와류중심(vortex center)이 존재하는 것을 의미한다. 벽면에서 거리가 더 멀어져 X/W=6이 되면 압력이 음압에서 양압으로 역전되고, X/W=7.5에 최대압력이 존재한다. X/W=12가 지나면 일정한 압력 분포를 보이고 있다. 즉 정압계수의 분포에서 X/W=0~6은 수렴영역, X/W=6~12는 합체영역, X/W=12 이후는 결합영역임을 알 수 있다. 유입허용제트는 재순환유동이 존재하지 않기 때문에 와류중심도 없고, 최대 음압점도 존재하지 않는다. 하지만 X/W=10에서 압력이 0이 되는 지점과 X/W=12에서 최대압력이 존재한다. 즉 X/W=0~20는 합체영역이고, 하류방향에 결합점과 결합영역이 존재할 것이다. 이 결과로 인해 유입허용제트는 병렬제트에서 나타나는 3가지 영역이 존재하고, 유입제한제트는 2가지 영역이 존재한다는 것을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 유동 방향의 속도 분포를 나타낸 것으로, 압력 분포에서와 마찬가지로 재순환 영역이 존재하는 곳에서

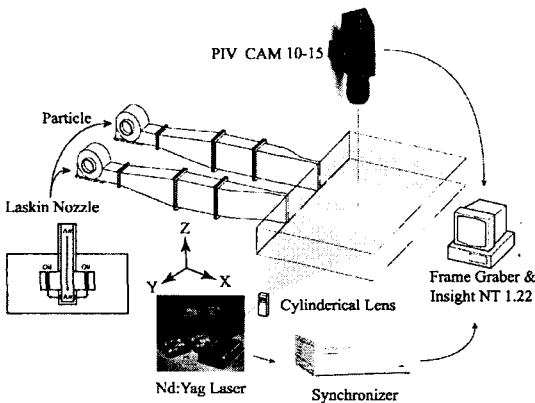


Fig. 3 Experimental apparatus set up

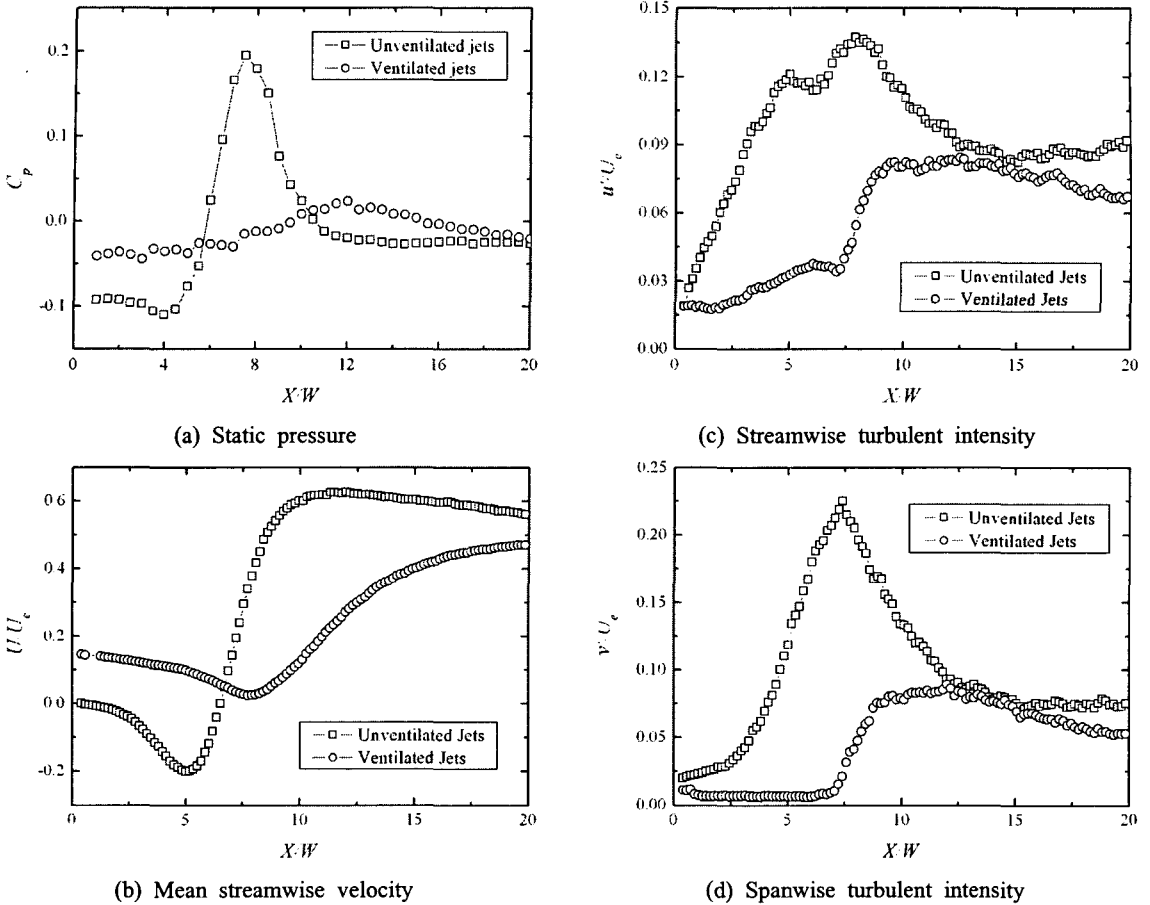


Fig. 4 Distribution of centerline pressure, mean velocity and turbulent intensities along X-axis at S/W=6

는 음의 속도, 역류가 발생하고, 속도가 0이 되는 즉, 합체점을 기점으로 수렴영역과 합체영역이 구분된다. 중심선에서 속도가 최대인 결합점 이후부터는 결합영역을 의미한다. Fig. 4(c)는 X방향의 난류강도의 분포로, 유입제한 제트는 각각 $X/W=5$ 와 $X/W=7.5$ 에서 피크점을 가진다. 이것은 와류중심과 최대압력이 작용하는 영역에서 혼합(mixing)이 강하게 일어나는 것을 의미한다. 유입허용 제트는 완만한 기울기로 증가하다가 최저 속도가 나타나는 $X/W=7.5$ 에서 급격한 기울기를 가지며 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 4(d)는 Y방향의 난류강도의 분포를 나타낸 것으로, 유입제한 제트의 경우 $X/W=7.5$ 에서 최대 난류강도가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 압력분포에서 최대압력이 나타나는 지점과 동일하다. 그리고 $X/W=12$ 이후에서는 두 개의 제트가 합쳐진 지점

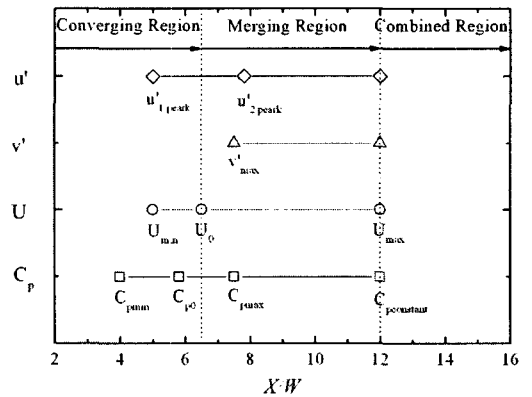


Fig. 5 Distribution of pressure, streamwise velocity, turbulent intensities in converging, merging and combined region

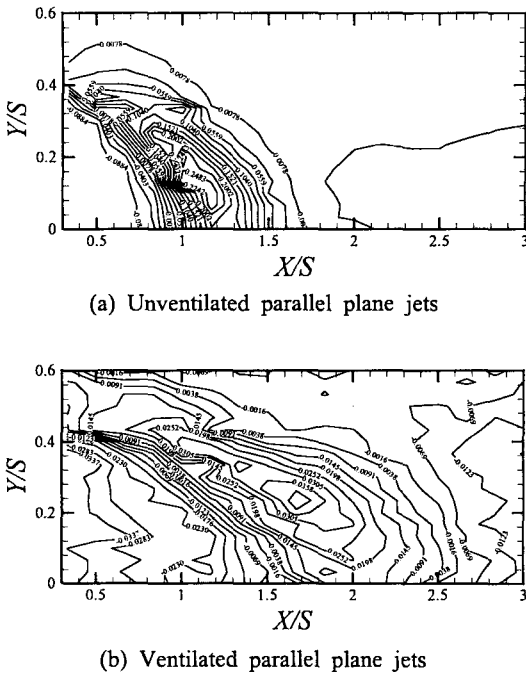


Fig. 6 Contours of mean pressure at $H/W=6$ and $Re=7,500$

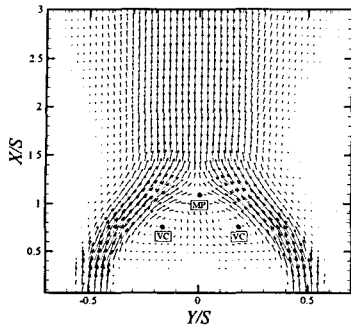
이기 때문에 동일 값을 가지는 것을 알 수 있다. 유입허용 제트의 경우 Y 방향의 최대 난류강도가 나타나는 지점은 압력분포에서 최대압력이 나타나는 지점과 일치한다. Fig. 5는 유입제한 제트에서 나타나는 수렴영역, 합체영역, 결합영역을 구분하였고, 압력 및 난류강도의 피크점을 표시하였다. 위의 3가지 영역은 속도 성분에 의해 구분되는 것으로 수렴영역과 합체영역의 구분은 속도가 0가 되는 지점 즉, 합체점이고, 합체영역과 결합영역의 구분은 속도가 최대가 되는점 즉, 결합점이다. C_{pmax} , u'_{2peak} 와 v'_{max} 가 거의 동일한 위치인 $X/W=7.5$ 인 영역에서 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 $X/W=7.5$ 인 부근에서 유동의 강한 혼합이 존재한다는 것을 의미한다. 그리고 $X/W=12$ 이후는 두 개의 제트가 결합이 완료되어 단일제트로 발달해 가는 것을 압력 및 속도성분에 의해 확인할 수 있다.

Fig. 6은 유입제한과 유입허용 제트의 전체 압력계수의 분포를 나타낸 것이다. 유입제한 제트는 최대 압력 계수가 $X/S=1.1$, $Y/S=0.2$, 유입허용 제트는 $X/S=1.6$, $Y/S=0.24$ 에서 나타나는 것을 볼 수 있다. 여기서 유입제한 제트가 유입허용 제트

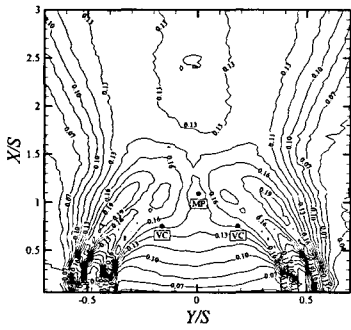
에 비해 최대압력계수의 값이 당겨지는 것은 제트간의 상호 간섭 효과가 크기 때문이고, 이러한 원인으로 인해 압력계수 값도 2배정도 상승한다.

Fig. 7과 Fig. 8은 유입제한제트와 유입허용제트에 대한 속도벡터, X , Y 방향의 난류강도와 레이놀즈 전단응력을 나타낸 것이다. Fig. 7(a)와 Fig. 8(a)는 속도 벡터로, 유입제한제트의 경우에 내부, 외부 전단층에서의 유입의 불균형이 심하게 일어나서 노즐과 노즐사이의 중심으로 급격하게 편향되어 합체점($X/S=1.1$, $Y/S=0$)에서 만난다. 이 때 노즐판과 합체점사이에 재순환영역을 형성하고, 중심부($X/S=\pm 0.18$, $Y/S=0.75$)에 와류중심(vortex center)이 존재하는 것을 관찰할 수 있다. 이에 반해 유입허용제트는 유입 불균형이 미세하게 존재하여 유동이 완만하게 편향되는 것을 볼 수 있지만, 합체점 뿐만 아니라 재순환 영역 및 와류중심은 존재하지 않는다.

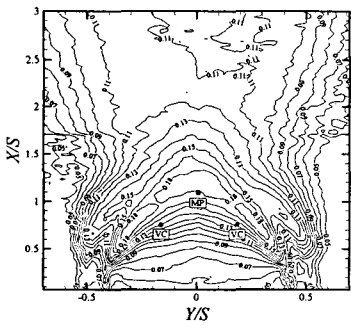
Fig. 7(b)와 Fig. 8(b)는 X 방향의 난류강도의 등분포를 나타낸 것이다. 노즐 출구에서는 노즐의 팁(tip)부분에서 난류강도가 커지는 요인으로 인해 쌍봉구조를 가지다가 외부 전단층은 유입으로 인해 발달하고, 내부 전단층은 제트간의 간섭효과에 의해 발달해가는 것을 관찰할 수 있다. 유입제한 제트에서 외부경계층에서의 난류강도의 피크치가 내부경계층에서의 피크치보다 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 X 방향의 난류강도는 제트간의 상호 간섭보다는 유입에 의한 증가가 큰 요인으로 작용한다. 그리고 유입제한제트가 유입허용제트에 비해 전체적인 난류강도의 값이 크게 나타나고 있으며, 이것은 제트의 상호 간섭 효과가 추가되어 더 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 7(c)와 Fig. 8(c)는 Y 방향의 난류강도의 등분포를 도시한 것으로, Y 방향의 난류섭동성분을 통해 제트간의 상호 간섭의 정도를 파악할 수 있다. 유입제한 제트는 피크치가 합체점 영역에서 하나의 덩어리로 나타나는 것으로 보아 제트간의 상호간섭 효과가 강하게 나타나는 것을 알 수 있지만, 유입허용 제트는 $X/S=0$ 을 기점으로 서로 대칭적인 구조로 되어 있어서 제트간의 혼합은 내부 전단층에서만 일어나고, 각각의 제트가 벽을 형성하여 미끄러져서 발달해가는 것을 볼 수 있다. 그리고 난류강도의 크기도 유입제한 제트가 유입허용에 비해 1.4배 증가한다. Fig. 7(d)와 Fig. 8(d)는 난류 레이놀즈 전단응력으로,



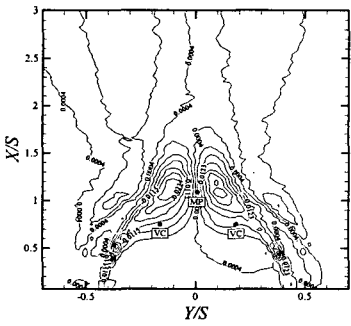
(a) Velocity vector



(b) Streamwise turbulent intensity

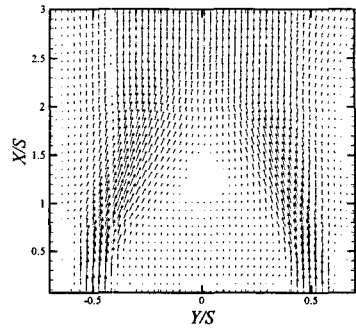


(c) Spanwise turbulent intensity

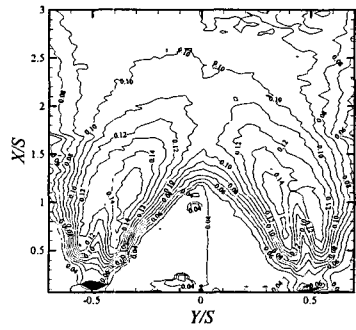


(d) Reynolds shear stress

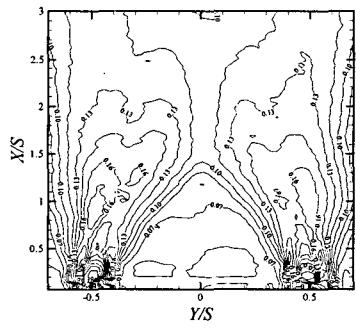
Fig. 7 Distribution of mean velocity vector, stream wise and spanwise turbulent intensities, Reynolds shear stress in unventilated jets



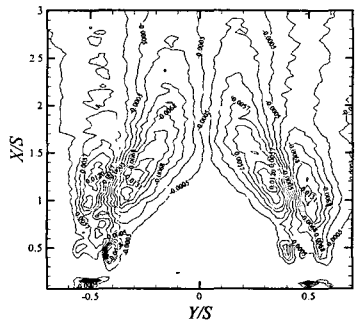
(a) Velocity vector



(b) Streamwise turbulent intensity



(c) Spanwise turbulent intensity



(d) Reynolds shear stress

Fig. 8 Distribution of mean velocity vector, stream wise and spanwise turbulent intensities, Reynolds shear stress in ventilated jets

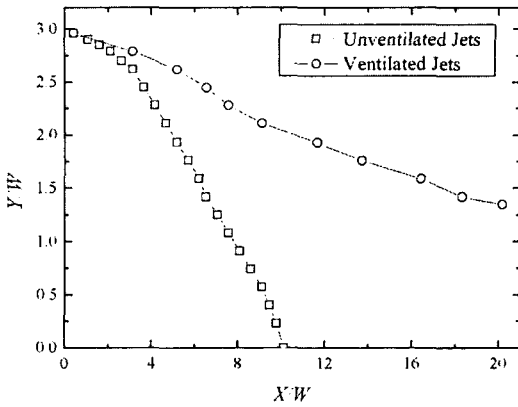


Fig. 9 Trajectory of maximum axial velocity

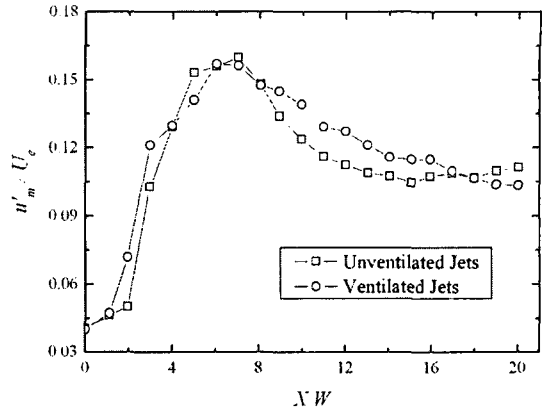


Fig. 11 Variation of streamwise turbulent intensity in maximum velocity with Y-axis

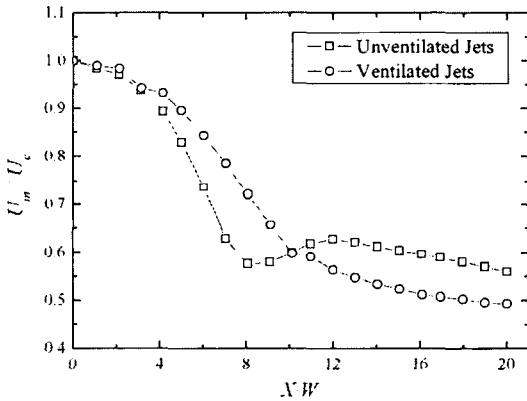


Fig. 10 Variation of decay of maximum velocity with downstream distances

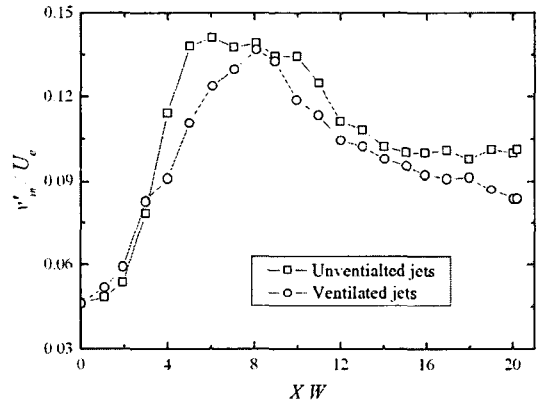


Fig. 12 Variation of spanwise turbulent intensities in maximum velocity with Y-axis

난류성분 u, v 의 레이놀즈 전단응력은 같은 위치에서 각 방향의 난류성분 중 2방향(X, Y 방향)성분간의 상관관계에 의하여 발생하는 것으로 유동장에서 운동량의 이동을 의미하는 것이다. 좌우의 형태는 대칭이나 부호가 반대로 나타나고 있으며, 이는 좌우의 와류출로 인해 유동의 수직방향 섭동성분 V 의 부호가 반대로 나타나기 때문이다. 유입제한 제트의 경우, 레이놀즈 전단응력의 가장 큰 값은 와류중심에서 조금 더 하류에 부호가 다른 두 개의 피크지점 ($X/S=\pm 0.15, Y/S=1.15$)이 좌우로 대칭을 이뤄 위치하고 있고, 유입허용 제트는 피크치($X/S=\pm 0.3, Y/S=1.4$)가 있는 것을 관찰할 수 있다. 유입제한 제트의 피크치가 유입허용제트보다 2배정도 크다는 것은 운동량 전달효과가 더 활발하다는 것을 의미한다.

방향으로 절단하여 최대 속도가 나타나는 지점에서의 위치, 속도감소율, X 방향의 난류강도와 Y 방향의 난류강도의 분포를 나타낸 것이다. Fig. 9는 최대 속도의 위치 변화를 나타낸 것으로, 유입제한 제트는 급격히 기울기로 편향되어 $X/W=10$ 에서 제트가 완전히 합쳐지는 것을 볼 수 있지만, 유입허용 제트는 완만한 기울기로 편향되어 $X/W=20$ 이 되는 지점에서 합쳐지지 않는다. 이 결과로 인해 유입제한 제트가 유입허용제트에 비해 훨씬 빨리 제트가 합쳐지는 것을 알 수 있다.

Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11과 Fig. 12는 유동을 Y

Fig. 10은 속도 감소율을 나타낸 것으로, 유입제한 제트는 $X/W=8$ 부근에서 속도 감소율이 최대이고, 더 하류로 내려가면 속도가 회복하여 $X/W=12$ 에서 피크치를 가지는 것을 볼 수 있다. 이것은 $X/W=8$ 까지는 유동이 각각 단일제트의 성

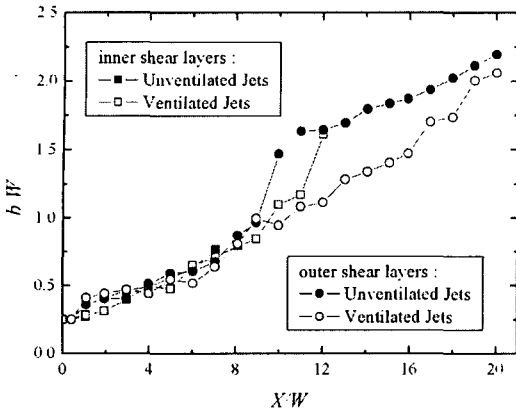


Fig. 13 Variation of half-width in inner and outer shear layers with down stream distance

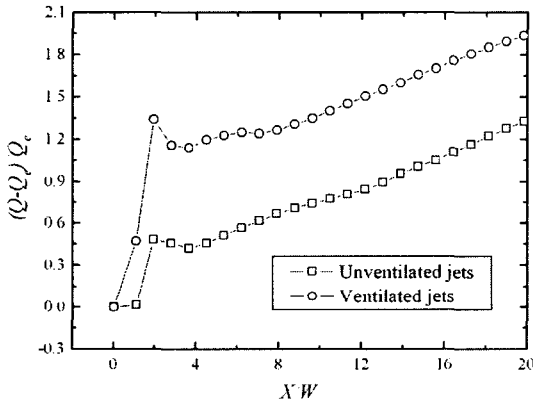


Fig. 14 Entrainment of volume flow rate

질을 띄고 있지만, $X/W=8$ 이후로는 두 개의 제트가 합쳐지기 때문에 속도가 다시 증가하고, $X/W=12$, 즉 결합점에 이르면 속도가 최대가 되고 더 하류로 내려가 속도는 다시 감소한다. 또한 피크치인 $X/W=12$, 이후는 단일제트의 속도 감소율과 거의 일치한다.

Fig. 11과 Fig. 12는 X, Y 방향의 난류강도 분포로, 유입에 의해 증가하는 X 방향의 난류강도는 유입허용 제트가 유입제한 제트에 비해 크고, 이와 반대로 제트의 상호 간섭효과에 의해 증가하는 Y 방향의 난류강도는 유입제한 제트가 유입허용 제트에 비해 크게 나타난다.

Fig. 13은 노즐 출구에서 분사된 제트의 발달 정도를 조사하기 위하여 내, 외부 전단층에서 분류반쪽을 나타낸 것이다. 각각의 전단층에서의 기울기를 보면 내부 전단층은 단일제트의 기울기

Table 1 Comparison between various parameters determined by measurements

References	S/B	X_{mp}/S	X_{cp}/S
Miller & Comings ⁽¹⁾	6	1.13	2.07
Tanaka ⁽²⁾	6	1.37	1.91
Militzer ⁽¹⁰⁾	6	1.18	2
Present study	6	1.08	2

인 0.1승에 비례하여 나타나는 것을 볼 수 있지만, 외부 전단층의 경우 영역에 따라 기울기가 달라 나타나는 것을 볼 수 있다. 유입제한 제트의 경우 수렴영역과 결합영역에서는 기울기가 완만하지만, 합체영역에서는 급격한 기울기를 가지는 것을 관찰할 수 있다. 그렇지만 유입허용 제트는 외부 전단층의 경우 0.1승에 비례하는 것을 볼 수 있다. 이 결과 유입제한 제트의 합체영역을 제외한 모든 영역에서 분류반쪽은 단일제트와 유사하고, 합체영역은 급격한 기울기를 가지고 발달해가는 것을 알 수 있다.

Fig. 14는 유입 유량율에 대한 나타낸 것이다. 유입 유량은 Y 방향으로 잘라 속도를 전 구간에 대하여 면적 적분하여 구하였다. 유입제한 제트는 노즐 출구에서부터 유입율은 증가하지만, $X/W=2$ 에서 피크치를 가지고, $X/W=4$ 부터는 선형적으로 유입율이 증가하는 것을 볼 수 있다. $X/W=2$ 에서 피크치가 보이는 것은 외부 전단층에서는 유입이 일어나지만, 노즐과 노즐사이의 내부에는 합체점까지 역류가 존재하고, 이 역류는 유동에 유입이 아니고, 유출이라고 볼 수 있다. 유출현상으로 인해 유입 유량율은 감소하는 것이고, $X/W=4$ 에서 유출현상이 최대로 일어나기 때문에 유입율이 최소값을 가진다. 유입허용 제트의 경우 유입제한 제트와 동일한 위치에서 피크치를 가지는 것을 볼 수 있다. 이것은 유입제한 제트에서 나타나는 유출현상이 아니고, 노즐 출구에서는 제트 유동에 의해 유입되는 속도가 크지만, 피크치를 지나면 유입되는 유동이 미세하게 나타난다. 이것은 Fig. 8(a)의 속도벡터를 보면 더욱 뚜렷이 알 수 있다. 초기의 많은 유입율을 가지는 유입허용 제트가 유입제한 제트에 비해 2배 이상 유입된다.

Table 1은 두 개의 평행한 평면제트의 유동에

서 영역의 구분 등 중요한 의미를 갖는 합체점, 결합점 위치를 선행연구들과 비교하여 제시하였다. 합체점과 결합점은 각각 $X_{mp}/S=1.08$ 이고, $X_{cm}/S=2$ 이고, 이 결과는 선행연구자들과 비교적 잘 일치하는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 유입제한 제트(unventilated jets)와 유입허용 제트(ventilated jets)에 대해 압력 및 속도성분을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유입제한 제트는 수렴영역, 합체영역 및 결합영역의 기점이 되는 합체점($X/W=6.5$)과 결합점($X/W=12$)이 존재한다. 그리고 수렴 영역내에서 음압장 때문에 재순환 영역을 발생시키고, 재순환 유동의 중심에 와류중심이 존재한다. 그러나 유입허용 제트는 합체점이 존재하지 않기 때문에 3가지 영역으로 구분할 수 없을 뿐만 아니라 수렴영역에서 재순환 유동도 존재하지 않는다.

(2) 두 개의 평행한 평면제트에서 X 방향의 난류강도가 증가하는 원인은 유입에 의한 것이고, Y 방향의 난류강도의 증가 원인은 제트간의 상호간섭에 의한 것이다.

(3) 최대 속도의 감소율은 유입제한 제트의 경우, 3가지 구간으로 나눌 수 있다. 각각의 노즐출구에서 나온 제트가 단일제트의 성격을 띠는 구간($X/W < 8$)과 제트간의 상호간섭에 의한 합체구간($8 < X/W < 12$) 그리고 제트가 완전히 합쳐져서 완전히 결합한 단일 제트구간($X/W > 12$)이다. 그러나 유입허용 제트는 단일제트의 속도 감소율이 동일하게 나타난다.

(4) 유입제한 제트의 분류반쪽은 수렴영역과 결합영역에서의 기울기는 단일제트와 거의 일치하지만 합체영역에서의 기울기는 급격한 기울기를 가진다.

(5) 유입 유량율은 유입허용 제트가 유입제한 제트에 비해 내부, 외부 전단층에서의 유입이 자유롭기 때문에 유입율이 2배 이상 커진다.

후 기

본 연구는 부산대학교 학술연구조성비에 의해 연구되었습니다.

참고문헌

- (1) Miller, D.R. and Comings, E.W., 1960 "Force-Momentum Fields in a Dual-Jet Flow," *J. Fluid Mech*, Vol. 7, pp. 237~256.
- (2) Tanaka, E., 1970, "The Interference of Two-Dimensional Parallel Jets(1st Report, Experiment on Dual Jet)," *Bull JSME*, Vol. 13, pp. 272~280.
- (3) Tanaka, E., 1974, "The Interference of Two-Dimension Parallel Jets (2nd Report, Experiments on the Combined Flow of Dual Jet)," *Bull JSME*, 17, No. 109, pp. 920~927.
- (4) Elbanna, H. Gahin, S. and Rashed, M.I.I., 1983, "Investigation of Two Plane Parallel Jets," *AIAA*, Vol. 21, No. 7, pp. 986~991.
- (5) Lin, Y.F. and Sheu, M. J., 1990, "Investigation of Two Plane Parallel Unventilated Jets," *Experiments in Fluid*, Vol. 10, pp. 17~22.
- (6) Nasr, A. and Lai, J.C.S., 1997, "Comparison of Flow Characteristics in the Near Field of Two Parallel Plane Jets and an Offset Plane Jet," *Physics of Fluid*, 9(10), pp. 2919~2931.
- (7) Nasr, A. and Lai, J.C.S., 1997, "Two Parallel Plane Jets Mean Flow and Effects of Acoustic Excitaton," *Experiments in Fluids*, Vol. 22, pp. 251~260.
- (8) Kim, D. K. and Yoon, S. H., 2003, "The Flow Characteristics of Parallel Jets Using Particle Image Technique(I)," *Transactions of the KSME (B)*, Vol. 27, No. 3, pp. 302~310.
- (9) Morel, T., 1975, "Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contraction," *J. Fluid Engineering*, Vol. 97, pp. 225~233.
- (10) Militzer, J., 1977, "Dual Plane Parallel Turbulent Jets," *Ph. D. Thesis, University of Waterloo*.