

이중제트에서 노즐과 노즐사이의 각도 변화에 따른 유동 특성

김동건† · 김문경* · 윤순현**

(원고접수일 : 2008년 10월 23일, 원고수정일 : 2008년 11월 17일, 심사완료일 : 2008년 11월 21일)

The Flow Characteristics with Variation of Nozzle-to-nozzle Angles on Unventilated Dual Jets

Dong-Keon Kim† · Moon-Kyoung Kim* and Soon-Hyun Yoon**

Abstract : The characteristics of flow on unventilated dual 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. All measurements were made over a range of nozzle-to-nozzle angles from 0° to 25°. The particle image velocimetry and pressure transducer were employed to measure turbulent velocity components and mean static pressure, respectively. 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. As nozzle-to-nozzle inclined angles were decreased, it was found that the spanwise turbulent intensity is greater than the streamwise turbulent intensity in the merging region. In the combined region, the velocity of dual jets agree well with that of single jet, but the turbulence intensity of dual jets not agree with that of single jet.

Key words : Unventilated dual jets(유입제한 이중 제트), Merging point(합체점), Combined point(결합점), Particle image velocimetry(입자영상 유속계), Turbulence intensity(난류 강도)

기호설명

C_p : 정압계수

S : 노즐과 노즐사이의 거리

U : X 방향 전체 평균속도

U_J : 노즐의 출구속도

u' : X 방향의 R.M.S.

V : Y 방향 전체 평균속도

v' : Y 방향의 R.M.S.

VC : 와류중심

W : 노즐 폭(10 mm)

X : 제트의 유동 방향 좌표

† 교신저자(부산대학교 기계기술연구원, E-mail:kdkkim@empal.com, Tel: 051)510-1528)

* 창원전문대학 기계설계과

** 부산대학교 기계공학부

Y : 제트의 유동 방향에 직각인 방향 좌표
 α : 노즐과 노즐사이의 각도

아래첨자

CP : 결합점
 MP : 합체점

1. 서 론

이중 제트는 두 개의 노즐로 구성되어 각각의 노즐에서 분사된 단일제트가 하류 방향으로 발달해 가면서 제트간의 상호 간섭에 따라 유동의 형태가 바뀌는 유동 특성을 지니고 있다. 이러한 이중 제트는 산업적으로 이용가치가 높으며, 유동의 복잡성으로 인해 충돌제트에 의한 열전달 촉진을 위한 방안으로 계속적으로 연구되고 있고, 연소기내에서 연료와 공기의 혼합을 최적화시켜줌으로서 환경문제에서 크게 대두되고 있는 자동차 배기가스에서 NO_x를 감소시킬 수 있으며, 연소기, 보일러, 가스 터빈 연소기 벽의 막냉각, 연료 분사 시스템, 그리고 가열 및 건조 시스템에 이르기까지 폭 넓게 산업적으로 이용되고 있다. 또한 오염물질의 배기 굴뚝과 같은 환경 분야와 용해-비등 공정 등 화학공업에서도 응용된다.

Fig. 1은 이중 제트의 유동 형태를 개략적으로 나타낸 것으로, 유동의 특성에 따라 수렴영역(converging region), 합체영역(merging region), 결합영역(combined region)과 같이 3가지 영역으로 표현할 수 있다. 첫째, 수렴 영역은 노즐 출구에서 합체점(merging point, MP)까지의 영역을 의미하는 것으로, 여기서 합체점은 노즐과 노즐사이의 대칭면에서 속도가 0이 되는 지점으로 정의된다. 정지된 외기에 각각의 노즐에서 제트가 분사되면 제트와 제트사이의 내부에 음압장을 형성하게 되고, 내 외부의 전단층에서 유입의 불균형이 발생하게 된다. 이러한 현상으로 인해 각각의 제트들은 노즐과 노즐사이의 중심부로 편향해서 발달하고, 이렇게 편향된 제트는 노즐과 노즐사이의 중심선상에서 정체영역을 형성한다. 둘째, 합체영역은 합체점과 결합점(combined point, CP)사이 존재한다. 결합점은 대칭면을 따라 최대의 속도가 나타나는 지점을 말하며, 또한 유동직각방향으로 유동을 나누었을 때 대칭면에서 최고 속도가 나타나는 지점이기도 하다. 이 영역에서는 제트간의 상호간섭 효과가 최대이기 때문에 혼합특성이 가장 강하게 나타나며, 이중 제트가 단일제트로 바뀌어가는 구간이다. 셋째, 결합영역은 결합점 이후의 영역으로, 두 개의 제트가 하나로 합쳐져서 단일제트의 유동 특성을 띄는 영역이다.

선행연구를 살펴보면, Tanaka^{[1],[2]}는 노즐과 노즐사이의 거리를 $S/W=8.5\sim 32$ 까지 변화시키면서 압력과 평균 속도를 각각 정압 프로브와 열선 유속계를 이용하여 측정하였고, 노즐사이의 거리에 대한 합체점과 결합점사이의 상관관계를 제시하였다. 또한 결합영역에서의 속도 및 난류강도의 분포를 측정하여 단일제트의 유동과 비교하였다. 그 결과 속도분포는 단일제트와 유사한 경향을 보이고 있지만, 난류강도의 경우는 단일제트와 뚜렷이 구분된다고 하였고, 이것은 난류의 생성 및 확산이 평형상태가 아니기 때문에 나타난 것이라고 하였다. Murai 등^[3]은 노즐과 노즐사이의 거리를 16W, 22W, 30W에서 노즐사이의 각도를 변화시키면서 유동 특성을 관찰하여 결합점 이후의 속도 분포는 단일제트와 유사함을 밝혔고, 확산 계수의

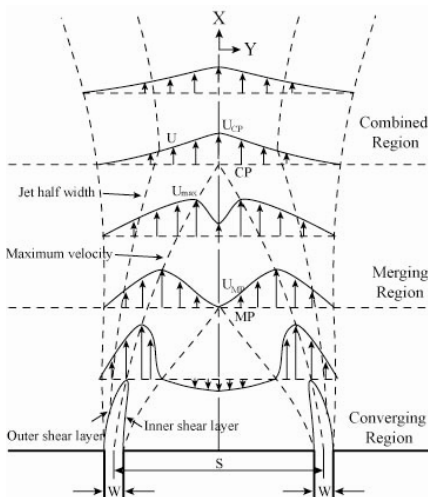


Fig. 1 Schematic diagram of unventilated dual jets

값은 노즐사이의 거리가 멀어지거나 노즐사이의 각이 커짐에 따라 커진다고 하였다. Wang 등^[4]은 노즐과 노즐사이의 거리를 30W로 고정한 상태에서 노즐사이의 각도를 9°, 18°, 27°에서 유동 특성을 조사하여 분류반폭, 속도변화율, 모멘텀 변화율, 유입유량률을 유동방향에 대하여 상관관계식을 제시하였다. Harpham과 Shambaugh^[5]는 노즐과 노즐사이의 거리를 4W, 노즐과 노즐사이의 각도를 60°로 고정한 상태에서 하류 방향에 따라 피토탄과 열전대(thermal couple)를 이용하여 각각 속도장 및 온도장을 측정하였다. 결합영역에서는 속도장뿐만 아니라 온도장까지 단일제트의 유동특성이 나타남을 밝혔다. 그리고 유입 계수를 도입하여 하류방향으로 갈수록 많은 양의 유입이 일어남을 관찰하였다.

이중 제트의 유동은 각각의 단일 제트가 서로에 대한 상호작용에 의해 하나의 제트로 합쳐지는 유동이다. 이러한 상호작용은 노즐과 노즐사이의 각도 설치 효과에 따라 달라지며 하나로 합쳐지는 과정에서 유동은 복잡성을 띄게 되고, 속도가 영이 되는 합체점과 단일제트의 유동 특성을 지닌 결합점 등과 같은 이중제트의 주요한 변수가 나타나게 된다. 이에 본 연구에서는 노즐과 노즐사이의 설치 각 효과에 따른 이중제트의 유동 구조 및 혼합 특성을 입자영상 유속계를 이용하여 규명하고, 이중제트에서 중요한 변수인 합체점과 결합점의 위치를 파악하여 노즐과 노즐사이의 각도에 대한 상관관계를 제시하고자 한다.

형상은 Morel^[6]의 3차 다항식으로 제작하였다. 노즐출구 폭과 높이는 각각 10 mm, 200 mm로 형상비가 20인 사각 노즐을 사용하였다. 노즐 설치각을 변화시키기 위하여 풍동과 노즐을 2개씩 제작하였고, 노즐사이의 각설치는 수동으로 가능케 하였다. 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.

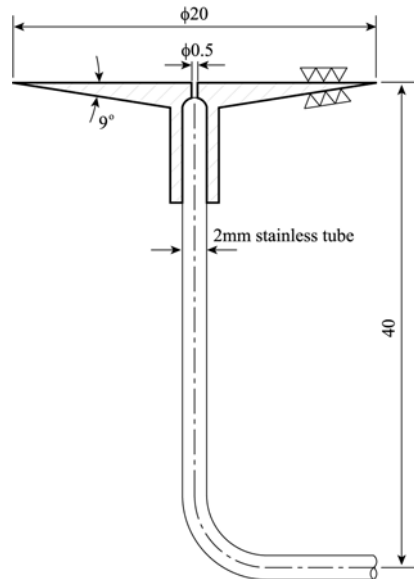


Fig. 2 Disk type static pressure probe

2. 실험장치 및 방법

2.1 풍동

본 실험에 사용된 풍동은 개방형 저속풍동으로 송풍기, 확대부, 정류실, 수축노즐, 시험부로 구성되어 있으며, 실험장치의 총 길이는 4m이다. 낮은 난류도와 균일한 평균속도를 얻기 위하여 확대부와 정류실, 정류실과 노즐사이에 스크린(#50)을 설치하였다. 각각의 송풍기에는 전원주파수변환기(LG, 10kW)를 설치하여 노즐출구에서의 속도를 0~60 m/s까지 변화시킬 수 있도록 하였다. 수축노즐의

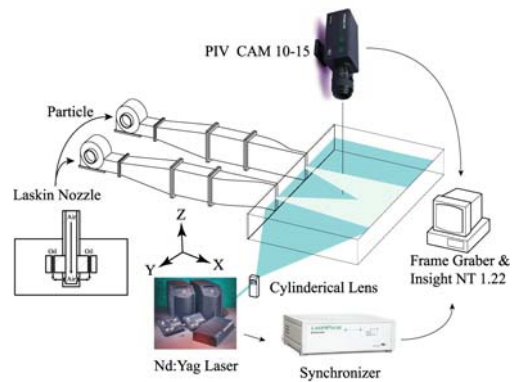


Fig. 3 Experimental apparatus set up

2.2 압력 측정

평행 평면 제트의 압력 측정은 디스크 형태의 정압 프로브(static probe)와 디지털마노미터(digital manometer, FCO510)를 사용하였다. 이 때 사용된 정압프로브는 유동의 방해를 최소한으로 하기 위하여 표면을 매끈하게 가공하였고, 중심에 있는 0.5mm 홀을 통해 압력을 측정한다. Fig. 2는 압력측정에 사용되었던 정압 프로브의 개략도를 나타낸 것이다. 정압계수 C_p 는 식 (1)과 같이 구하였다.

$$C_p = \frac{P - P_{atm}}{0.5\rho U_J^2} \quad (1)$$

2.3 속도 및 난류성분 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), 화상처리보드(TSI, Frame grabber 610066) 및 구동형 컴퓨터로 구성되어 있다. 본 실험에 사용된 추적입자는 비유독성, 비부식성, 비연마성, 비휘발성이며, 화학적으로 불활성인 올리브기름의 액적을 적용하였다. 입자의 평균직경은 $2\mu\text{m}$ 로서 공기중 유동의 PIV계측에 적당한 크기이다. PIV 측정영역의 면적은 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 이다. 각각의 화상에 한번의 레이저 펄스를 노출시켜 화상을 얻은 다음 두 개의 화상을 비교하는 2화상 상호상관기법을 사용하였고, 이 때 두 레이저의 펄스간격은 $50\mu\text{s}$ 이다. 이러한 화상들의 쌍은 카메라의 촬영속도가 15Hz 이므로 초당 7.5개 얻어진다. 화상획득은 2040장(속도장 1020개)을 획득하여 난류값의 평균이 일정한 값으로 유지되도록 하였다. 속도벡터는 FFT 방식의 상호상관법에 의해 계산되었으며, 상관영역은 32×32 로 하고 50%의 오버랩(overlap)을 사용하여 총 6724개의 벡터를 얻었다.

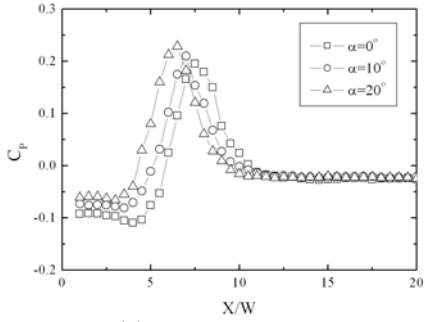
3. 실험결과

본 연구에서는 노즐과 노즐사이의 거리(S/W)를

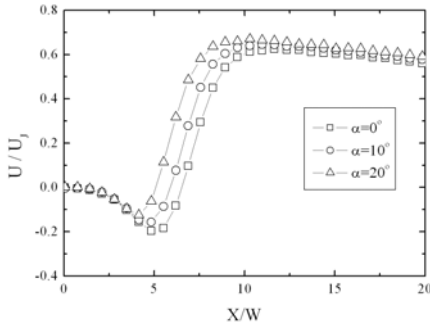
6으로, $Re=5,000$ 으로 고정하고, 노즐과 노즐사이의 각도 변화에 따른 압력 및 유동 특성을 입자영상유속계를 통하여 조사하였다.

Fig. 4는 노즐과 노즐사이의 각도변화에 따른 노즐과 노즐사이의 중심선에서 압력, 평균속도 그리고 난류섭동성분을 측정하여 나타낸 것이다. 먼저 Fig. 4(a)의 압력분포를 보면 수렴영역에서는 음압이 발생하며, 제트간의 혼합이 발생하는 합체영역에서 최대 압력계수를 가지고 있으며, 결합영역에서의 압력은 0에 가까운 음압을 형성한다. 수렴영역에서 보이는 최대음압은 노즐사이의 각도가 멀어질수록 음압이 작아지고 있으며, 합체 영역내의 최대압력은 노즐사이의 각도가 커질수록 압력계수가 커지는 것을 볼 수 있다. 전자는 재순환유동의 크기가 기인한 것이고, 후자는 노즐사이의 각도가 커질수록 각각의 제트가 X축 선상에 도달하는 시점이 빠를 뿐만 아니라 포텐셜 코어의 영향으로 인해 압력계수가 증가하는 것으로 판단된다. Fig. 4(b)는 속도분포를 나타낸 것으로, 노즐사이의 각도가 증가할수록 역류 속도는 작아지고, 결합점에서의 속도는 커지는 것을 볼 수 있다. 이것은 노즐사이의 각도가 커질수록 합체점에서 발생하는 운동량 손실이 적게 발생하여 나타나는 현상이다. Fig. 4(c),(d)는 난류강도를 나타낸 것으로, X방향의 난류강도, 즉 u' 는 외부 전단층에서의 유입으로 난류강도가 증가하는 것을 볼 수 있고, Y방향의 난류강도, v' 은 내부 전단층에서 제트간의 상호간섭에 의해 난류강도가 증가한다. 노즐사이의 각도 변화에 따른 X방향의 난류강도는 외부 전단층에서 유입조건에 있어서 별다른 점이 없기 때문에 거의 동일한 값을 가지고 있으며, Y방향의 난류강도는 노즐사이의 각도가 작을수록 노즐사이의 내부에서 넓게 형성되는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 합체점에서 제트간의 혼합특성이 노즐사이의 각도가 작을수록 크고 넓게 나타나는 것을 의미한다.

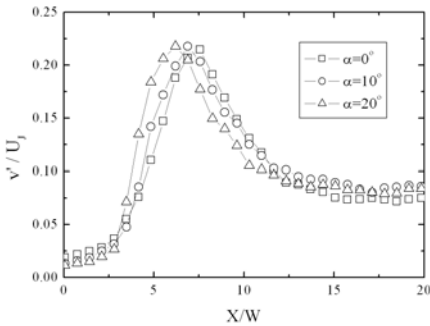
Fig. 5는 2000장의 이미지를 통하여 측정된 1000장의 순간속도를 앙상블 평균하여 노즐과 노즐사이의 각도 변화에 따라 속도 벡터로 나타낸 것이다. 속도 벡터를 관찰해 보면 각각의 노즐에서 분사된 제트는 내부 및 외부의 전단층에서의 유입의 불균형으로 인해 X축 선상으로 편향되어 발달



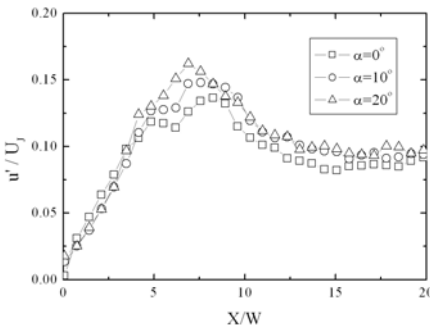
(a) Static pressure



(b) Mean velocity

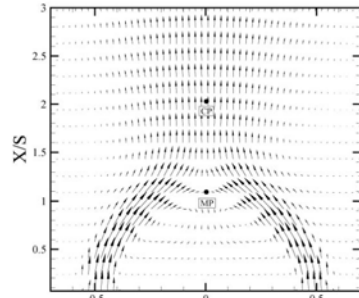


(c) Streamwise turbulent intensity

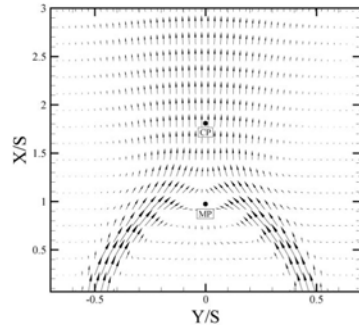


(d) Streamwise turbulent intensity

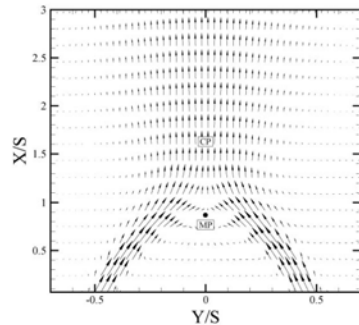
Fig. 4 Distribution of centerline pressure, mean velocity and turbulent intensities along X-axis at S/W=6



(a) $\alpha = 0^\circ$



(b) $\alpha = 10^\circ$



(c) $\alpha = 20^\circ$

Fig. 5 Ensembled-mean velocity vector for various nozzle-to-nozzle angles in dual jets

Table 1 Position of VC, MP and CP

α	VC		MP	CP
	X	Y	X	X
0°	$\pm 1(W)$ $\pm 0.17(S)$	4.5(W) 0.75(S)	6.54(W) 1.09(S)	12(W) 2(S)
10°	$\pm 0.9(W)$ $\pm 0.15(S)$	4.1(W) 0.68(S)	5.86(W) 0.97(S)	11.49(W) 1.92(S)
20°	$\pm 7.8(W)$ $\pm 1.3(S)$	3.8(W) 0.63(S)	5.17(W) 0.86(S)	10.64(W) 1.77(S)

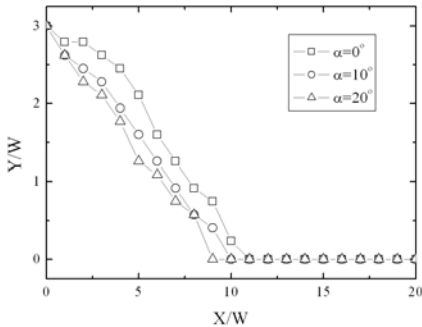


Fig. 6 Trajectory of maximum axial velocity for nozzle-to-nozzle angles in dual jets

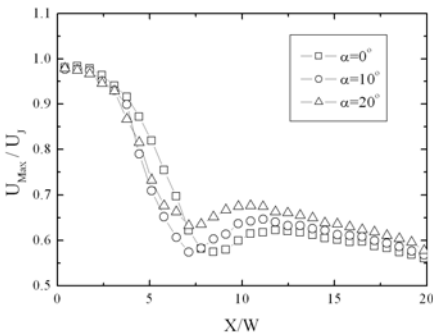


Fig. 7 Maximum velocity distributions for various nozzle-to-nozzle angles in dual jets

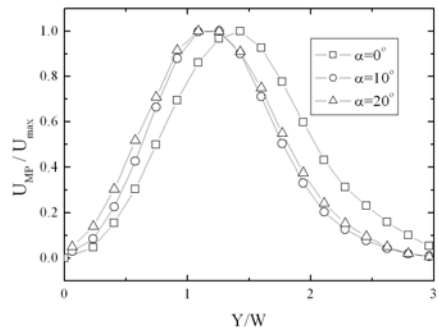
이렇게 편향된 제트가 X축 선상에서 서로간의 간섭효과에 의해 단일제트로 결합되어 발달해 간다. 특히 수렴 영역내의 유동을 자세히 살펴보면, 합체점뿐만 아니라 와류중심에 이르기까지 노즐사이의 각도가 커질수록 노즐판에 가깝게 배치되고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 와류중심의 부근에 나타나는 재순환 영역은 작아지는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 합체점의 기점으로 역류 유동이 노즐사이의 각도가 커짐에 따라 작아졌기 때문이다. 노즐사이의 각도 변화에 대한 와류중심, 합체점, 결합점의 위치는 Table 1에 나타내었다.

Fig. 6은 노즐사이의 각도 변화에 따라 노즐 출구에서 분사된 제트를 Y방향의 단면에서 최고속도가 나타나는 지점의 궤적을 나타낸 것이다. 노즐사이의 각도가 증가할수록 X축 선상에 도달하는 거리가 짧아지는 것을 알 수 있다. 수렴영역에서 제트간의 상호간섭 효과에 대한 편향정도를 조사하기 위해 편향반경을 식(2)으로 정의했을 때 노즐사이

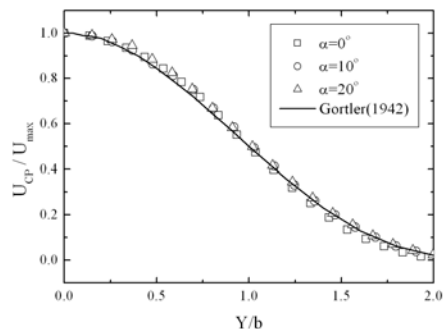
의 각도가 0°, 10°, 20°일 때 각각 편향반경(R_θ)은 1.54, 1.635, 1.635이고, 노즐사이의 각도가 작을수록 편향반경이 작아지는 것을 알 수 있다. 이 결과를 통해 수렴영역내의 제트간의 상호간섭 효과는 노즐사이의 각도가 작을수록 크다.

$$R_\theta = \frac{R}{S} \tag{2}$$

Fig. 7은 노즐사이의 각도에 따른 유동방향에서 Y단면에 대한 최고 속도 분포를 나타낸 것이다. 노즐사이의 각도가 커질수록 합체영역에서 제트간의 상호간섭에 의한 속도 모멘텀 손실이 작게 나타나고 있으며, 또한 결합점에서 속도 분포도 노즐사이의 각도가 커질수록 높게 나타나는 것을 관찰할 수 있다.



(a) Merging point



(b) Combined point

Fig. 8 Mean velocity similarity on the merging point and the combined point for various nozzle-to-nozzle angles in dual jet

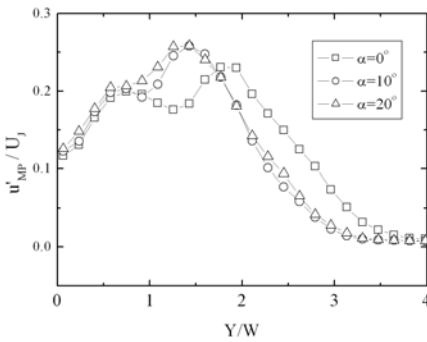
Fig. 8은 노즐사이의 각도에 따른 합체점과 결합점의 속도 분포를 나타낸 것이다. 합체점의 속도

분포는 노즐사이의 각도가 변함에 따라 최대 속도 값의 피크치가 X축 선상으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 하지만 노즐 각도 10°와 20°에서는 별다른 피크치의 변화가 없다. 그리고 결합점에서의 속도 분포를 분류 반쪽과 최대 속도로 무차원화하여 단일제트와 비교하였을 때 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이것으로 미루어 보아 결합점 이후의 영역에서 평균 속도는 단일제트의 유동과 유사한 특성을 지니고 있다.

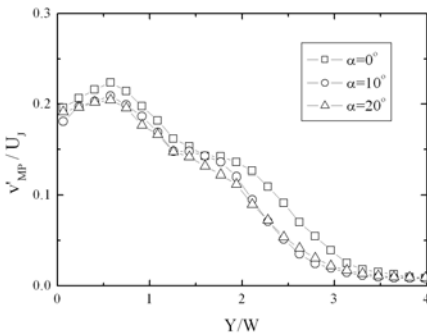
Fig. 9는 수렴영역과 합체영역을 구분할 수 있는 합체점에서의 u' 와 v' 의 분포를 Y단면으로 나타낸 것이다. u' 은 노즐사이의 각도에 따른 모든 경우에 대해 두 개의 피크치가 발생하는 것을 볼 수 있다. 두 개의 피크치가 발생하는 것은 내, 외부 전단층에서의 유입으로 인해 난류강도가 증가한 것으로 내부에 비해 외부의 u' 이 크다. 그리고 노즐 사이의 각도에 따른 u' 는 각도가 커질수록 최대값

값을 크지만, 합체점이 빠른 시점에서 만나기 문에 분포되는 영역은 좁아진다. v' 의 증가요인은제트간의 상호간섭 효과에 의존하기 때문에 노즐사이의 각도가 작을수록 v' 의 크기 때문에 각도가 작을수록 제트간의 상호간섭 효과가 강하게 나타난다는 것을 의미한다.

Fig. 10은 합체영역과 결합영역을 구분할 수 있는 결합점에서의 Y방향의 단면을 잘라서 X, Y방향에 대한 난류성분을 나타낸 것이다. Fig. 10(a)는 u' 의 분포로, u' 은 외부 유입에 의존하기 때문에 노즐과 노즐사이의 거리에 따라 난류강도 값의 차이가 조금 있지만 단일제트와 비교하여 유사한 경향을 보이고 있다. 그렇지만 Fig. 10(b)에 나타난 v' 은 노즐과 노즐사이의 거리변화에 비해 제트간의 상호간섭 효과가 나타나지 않기 때문에 단일제트에 비해 낮다.

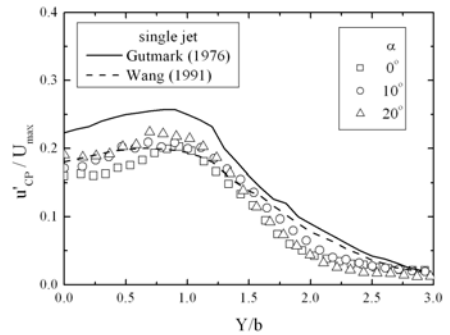


(a) Streamwise turbulent intensity

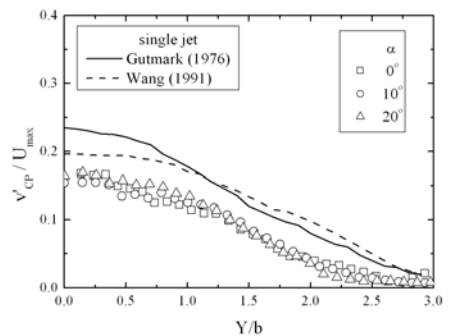


(b) Spanwise turbulent intensity

Fig. 9 Turbulent intensity distribution on merging point for various nozzle-to-nozzle angles in dual jets



(a) Streamwise turbulent intensity



(b) Spanwise turbulent intensity

Fig. 10 Turbulent intensity distribution on combined point for various nozzle-to-nozzle angles in dual jets

Fig. 11과 Fig. 12는 노즐사이의 각도 변화에 따라 합체점과 결합점 위치의 상관관계를 나타낸 것이다. 상관식은 식(3)과 식(4)에 제시하였고, 이때 상관식의 오차범위는 모든 경우에 대하여 $\pm 5\%$ 안에 드는 것으로 나타났다.

$$\frac{X_{MP}}{W} = 2.18 \left(\frac{S}{W} \right)^{0.616} \left(\frac{180 - \alpha}{180} \right)^{2.083} \quad (3)$$

$$\frac{X_{CP}}{W} = 6.62 \left(\frac{S}{W} \right)^{0.335} \left(\frac{180 - \alpha}{180} \right)^{1.082} \quad (4)$$

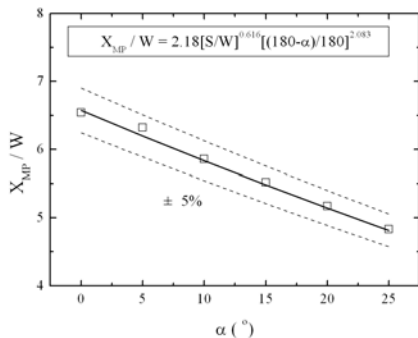


Fig. 11 Correlation of merging point and nozzle-to-nozzle angles in dual jets

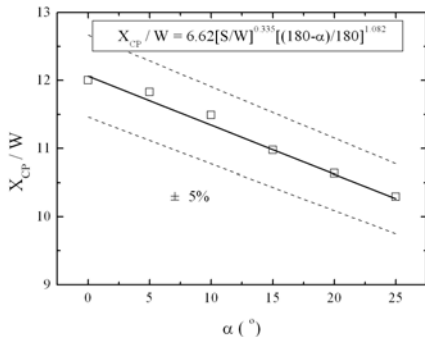


Fig. 12 Correlation of combined point and nozzle-to-nozzle angles in dual jets

4. 결 론

이중 제트에서 노즐과 노즐사이의 각도변화에 따른 압력 및 속도성분을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 이중 제트는 수렴영역, 합체영역 및 결합영역

의 기점이 되는 합체점과 결합점의 존재로 인해 수렴, 합체, 결합영역으로 구분할 수 있다.

(2) 이중제트에서 X방향의 난류강도가 증가하는 원인은 유입에 의한 것이고, Y방향의 난류강도의 증가 원인은 제트간의 상호 간섭에 의한 것이다.

(3) 노즐사이의 각도가 작아질수록 외부 유입에 의한 u'의 상승과 제트간의 상호간섭에 의한 v'의 상승으로 인해 난류에너지가 크다.

(4) 결합점에서 속도분포는 단일제트와 유사한 특성을 지니고 있지만, 난류 분포는 단일제트와 다른 경향을 보인다.

(5) 이중 제트에서 노즐과 노즐사이의 각도 변화에 따른 합체점과 결합점의 위치에 대한 상관식을 노즐과 노즐사이의 거리까지 고려하여 제시하였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음

참고문헌

- [1] Tanaka, E., "The interference of two-dimensional parallel jets (1st report, Experiments on dual jet)," Bull. JSME, Vol. 13, pp. 272-280, 1970.
- [2] Tanaka, E., "The interference of two-dimensional parallel jets (2nd Report, Experiments on the combined flow of dual jets)," Bull. JSME, Vol. 17, pp. 920-927, 1974.
- [3] Murai, K., Taga, M. and Akagawa, K., "An experimental study on confluence of tow-dimensional jets," Bull JSME, Vol. 19, pp. 956-964, 1976.
- [4] Wang, C. S., Lin, Y. F. and Sheu, M. J., "Measurement of turbulent inclined plane dual jets," Experiments in Fluids, Vol. 16, pp. 27-35, 1993.
- [5] Harpham, A. S. and Shambaugh, R. L.,

"Velocity and Temperature Field of Dual Rectangular Jets," Ind. Eng. Cham. Res. Vol. 36, pp. 3937-3943, 1997.

- [6] Morel, T., "Comprehensive design of axisymmetric wind tunnel contraction," ASME Journal of Fluid engineering, Vol. 97, pp. 225-233, 1975.
- [7] Gortler, H., "Berechnung von Aufgaben der freien turbulenz auf grund eins neuen Näherungsansatzes," Z. Angew, Math Mech. Vol. 22, pp. 244-1942.
- [8] Gutmark, E. and Wyananske, J., "The Planar Turbulent Jet," J. of Fluid Mech., Vol. 73, pp. 465-495, 1976.
- [9] Anderson, E. A. and Spall, R. E., "Experimental and Numerical investigation of Two Dimensional Parallel Jets," Journal of Fluids Engineering, Vol. 123, pp. 401-406, 2001



윤순현(尹焯鉉)

1977년 부산대학교 기계공학과 졸업(학사), 1979년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사), 1992년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(박사), 현재 부산대학교 기계공학부 교수, 당학회 종신회원

저 자 소 개



김동건(金東建)

1996년 동아대학교 기계공학과 졸업(학사), 1998년 부산대학교 기계설계공학과 졸업(석사), 2005년 부산대학교 기계공학과 졸업(박사), 현재 부산대학교 기계기술연구원 전임연구원, 당학회 종신회원



김문경(金文經)

1998년 부산대학교 기계공학과 졸업(학사), 1992년 부산대학교 기계공학과 졸업(석사), 1998년 부산대학교 생산기계공학과 졸업(박사), 현재 창원전문대학 자동차기계계열 조교수, 당학회 정회원