

병렬평면제트의 유동특성

김동건*·윤순현**

Flow Characteristics of Parallel Plane Jets

Dong-Keon Kim* and Soon-Hyun Yoon**

Key Words : Parallel plane jets(병렬평면제트), Turbulence intensity(난류강도), Merging point(혼합점), Combined point(복합점), Mass flow rate(질량유량), Particle image velocimetry(입자영상유속계)

Abstract

Experiments were conducted to show the characteristics of the flow on unventilated parallel plane jets. Measurements of mean velocity components and turbulent intensities were carried out with a particle image velocimetry. The measurements range of these experiments was Reynolds number of 5300 based on the nozzle width and the cases of nozzle-to-nozzle distance were 4, 6, 8, and 10 times the width of the nozzle. Results show that a recirculation zone with a sub-atmospheric static pressure was bounded by the inner shear layers of the individual jets and the nozzle plate. The positions, where maximum value of mean turbulent intensities and mean turbulent kinetic energy show, were at the same position with the merging point. The spread of jets in the merging region increases more rapidly than that of jets in the converging and the combined region. As nozzle-to-nozzle distances were increased, it was shown that merging and combined lengths were shorter.

1. 서론

병렬 난류 제트(parallel turbulent jets)는 보일러, 가스터빈 연소실, 분사기, 기화기 시스템에서 유입(entrainment)과 혼합과정(mixing processes)과 같은 공정에서 많이 응용되고 있다. 또한 수직/단거리 이착륙기의 발전, 미사일 발전 시스템 등 항공우주 및 군사분야에 이르기까지 다양하게 응용되고 있다.

기존의 연구를 살펴보면 Miller와 Comings^[1]는 노즐과 노즐 사이의 거리를 $6D$ 로 고정하여 열선유속계를 이용하여 평균속도, 정압, 난류강도를 측정하여 혼합점의 위치는 $6.8D$, 와류중심(vortex center)이 $4.5D$ 에서 나타나는 것을 밝혔다. Tanaka^[2]는 노즐과 노즐 사이의 거리변화에 따른 압력장 및 유동장을 측정하여, 노즐과 노즐사이의 거리변화와 혼합점 위치에 대한 상관식을 제시하였고, 복합영역에서의 유동특성은 단일제트와 유사한 형태로 나타난다는 것을 제시하였다. Lin 과 Sheu^[3]는 제트와 제트사이의 거리 $30B$, $40B$ 로 두고 열필름(split film)을 이용하여 유동장을 측정하고, 평균속도, 난류강도, 분류반폭을 3가지영역에 대한 특성을 비교하였다. Nasr와 Lai^[4]는 레이저 도플러 속도계(LDV)를 이용하여 노즐과 노즐사이의 거리를 노즐의 4.25배로 고정된 상태에서 평균 유동을 측정하였고, 음향여기에 의한 유동특성을 규명하였다. 그 결과로 노즐과 노즐사이의 거리가 비교적 작은 영역에서는($S/B < 8$) Tanaka^[2]가 제시한 상관식이 잘 맞지 않는다는 것을 밝혔다. 그리고 음향여기에 의한 유동 특성에서 혼합점의 위치가 노즐 출구의 0.5배정도 당겨짐을 밝혔다.

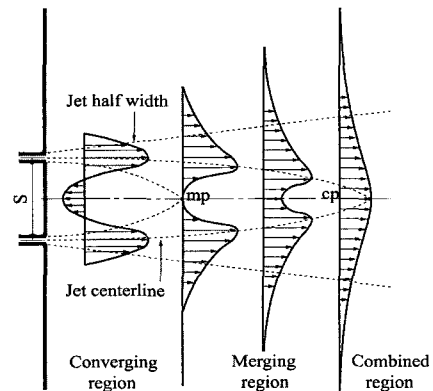


Fig. 1 Schematic diagram of unventilated parallel jets

그 밖의 연구자들은 복합영역에서 속도분포의 상사성을 단일제트와 비교하였다.^[5]

병렬제트의 유동에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 병렬제트는 유동특성에 따라 수렴(converging), 혼합(merging), 복합(combined) 3가지 영역으로 나눌 수 있다. 수렴영역에서는 각각의 노즐에서 분사된 제트가 내부 경계층에서 서로간의 유입에 의해 노즐판과 노즐의 내부 전단층에서 음압장(sub-atmospheric)을 형성하여 재순환(recirculation) 영역이 나타나고, 재순환 영역의 중심부에는 와류중심(vortex center)이 존재한다. 혼합영역에서는 두 개의 제트가 상호간섭효과가 두드러지게 나타나는 영역으로 혼합점(merging point)이 존재한다. 혼합점은 노즐과 노즐사이의 중심선 속도가 0이 되는 지점으로 수렴영역에서 나타나는 재순환 유동은 사라지고, X축의 중심선에서의 속도가 점점 증가하면서 발달해 간다. 복합영역은 혼합영역에서 X의 중심선에서의

* 부산대학교 대학원, kimdk@pnu.edu

** 부산대학교 기계공학부, yshyoon@pnu.edu

속도가 점점 증가하여 최대속도가 나타나는 복합점(combined point) 이후의 영역이다. 이 영역에서의 유동 특성은 축대칭구조의 속도 분포를 가지고 있으며, 유동형태는 단일제트의 유동 특성과 유사하다.

이상의 선행연구자들은 열선유속계와 레이저 도플러 속도계를 사용하여 점(point)으로 측정하였기 때문에 부분적인 거동은 알 수 있지만, 전체적인 거동을 알기에는 미흡하였다. 그래서 본 연구에서는 입자영상유속계(particle image velocimetry)를 사용하여, 유입을 제한한 상태(unventilated)에서 노즐과 노즐사이의 거리를 변화시켜가면서 병렬제트에서 나타나는 3가지 영역에 대한 유동특성을 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 풍동은 개방형 저속풍동으로 송풍기, 확대부, 정류실, 축소노즐, 시험부로 구성되어 있다. 송풍기는 10kW의 삼상전류를 사용하는 고풍압용이고, 송풍기의 입구에서는 이 물질의 유입을 방지하기 위하여 필터를 설치하였다. 낮은 난류도와 균일한 평균속도를 얻기 위하여 확대부와 정류실, 정류실과 노즐사이에 스크린(#50)을 설치하였다. 축소노즐의 형상은 Morel¹⁶⁾의 3차 다항식으로 제작하였으며, 노즐출구 폭과 높이는 각각 10 mm, 200 mm로 형상비가 20인 사각 노즐을 사용하였다. 평면제트의 조건을 위해 노즐의 상하에 판을 설치하여 노즐의 높이 방향으로의 유동발달을 제한하였다. 노즐 출구 속도는 전원주파수변환기(LG, 10kW)를 사용하여 속도를 조절할 수 있도록 하였다. 평균속도 및 난류를 측정하기 위하여 입자영상유속계를 사용하였다. 본 연구에서 사용되어진 입자영상유속계는 250mJ/pulse의 이중 펄스 방식의 Nd:Yag 레이저 시스템과 1K×1K의 고해상도 CCD카메라(TSI, PIVCAM 10-15) 동기화장치(Synchronizer, TSI 610032), 화상처리 보드(TSI, Frame grabber 610066) 및 구동형 컴퓨터로 구성되어 있다. 광원으로부터 레이저 빔은 구형렌즈와 원통형렌즈를 거치면서 평면빔으로 만들어져 시험부로 조사된다. 사용된 입자는 캐비테이션 원리를 이용하여 입자를 발생시키는 라스킨 노즐에서 발생된 올리브 오일 에어로졸이며, 입자의 평균직경은 2 μ m로서 공기중 유동의 PIV계측에 적당한 크기이다. PIV 측정영역의 면적은 105 mm×105 mm이다. 각각의 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 24×24로 하고 50%의 오버랩(overlap)을 사용하여 총 6724개의 벡터를 얻었다

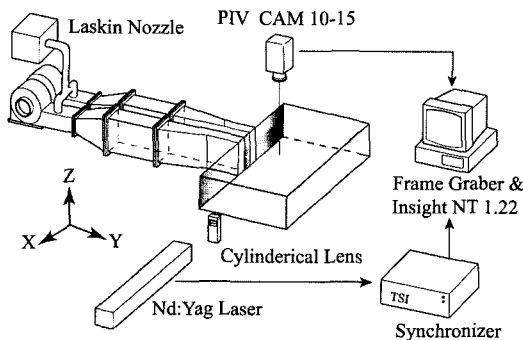


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

2. 실험결과

Fig. 3은 2040장의 이미지에서 나온 1020장의 속도장을 앙상블 평균한 속도벡터장을, Fig. 4는 평균한 속도장으로부터 구한 유선의 분포를 나타낸 그림이다. 평균 속도장에서 구한 유선의 분포를 보면 노즐 출구에서 나온 제트는 제트의 내측과 외측 전단층에서 발생하는 유입울의 불균형으로 인해 제트 주류는 노즐과 노즐사이의 중심으로 휘게 되고, 이렇게 휘어진 유동은 노즐과 노즐사이의 중심선상에서 서로 만나 정체영역을 형성한다. 정체점(stagnation point)을 기준으로 상류방향(upstream direction)에서는 역류의 발생으로 인해 재순환 유동과 와류중심(vortex)이 나타나고, 하류방향(downstream direction)에서는 각각의 제트유동이 합쳐져서 발달해 가는 것을 볼 수 있다. Miller와 Comings¹¹⁾는 노즐사이의 거리가 6일 때 와류중심의 위치는 $X/S=0.75$ 와 $Y/S=0.18$ 에서 나타난다고 하였고, 이 결과는 본 실험과 잘 일치한다.

Fig. 5은 혼합점의 위치를 파악하기 위하여 노즐과 노즐사이의 중심선에서 평균속도 분포를 나타낸 것이다. 혼합점의 정의는 중심선에서의 속도가 0이 되는 지점이고, 혼합점을 기점으로 전후의 속도방향은 서로 반대로 나타난다. 이러한 정의로 혼합점의 위치를 결정하면 노즐과 노즐사이의 거리의 변화에 따른 혼합점의 위치는 각각 1.07S, 1.07S, 0.99S, 0.84S이다. 노즐과 노즐사이의 거리에 따른 역류의 속도 최대값이 차이가 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 노즐에서 나온 유동의 선회각도(turning angle) 때문이다. 선회각도가 작으면 혼합점에서의 운동량손실은 크고,

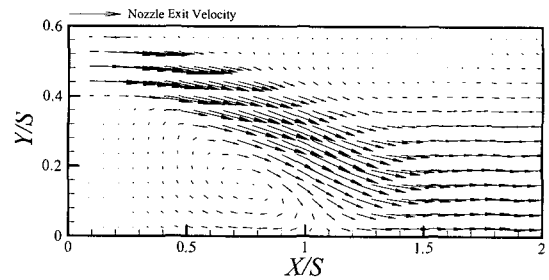


Fig. 3 Ensemble averaged velocity fields at S/B=6

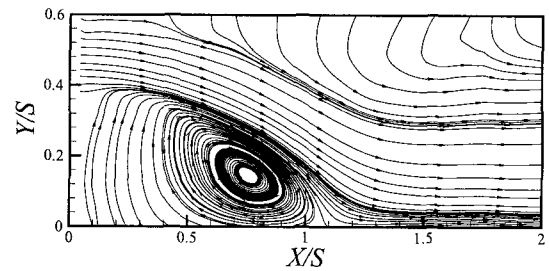


Fig. 4 Streamlines from ensemble averaged velocity fields at S/B=6

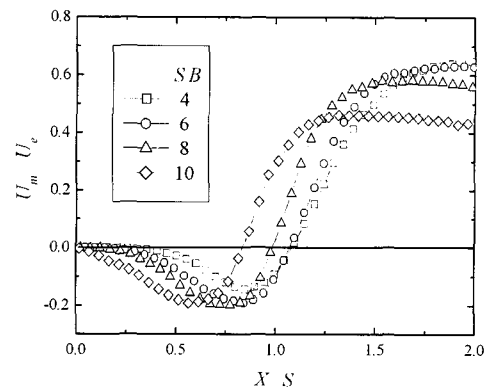


Fig. 5 Centerline velocity distribution along X-axis

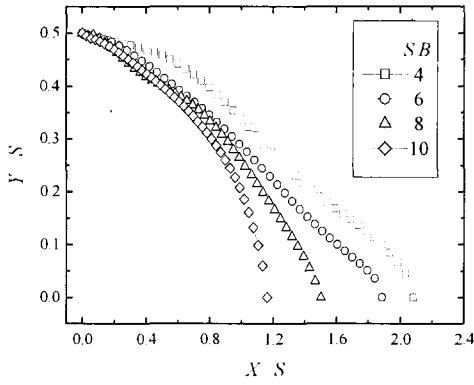


Fig. 6 Trajectory of maximum axial velocity

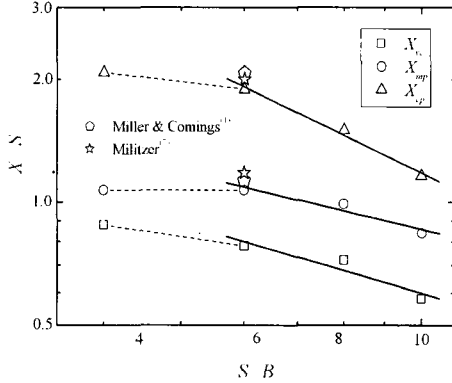


Fig. 7 Correlation of S/B, vc, mp and cp

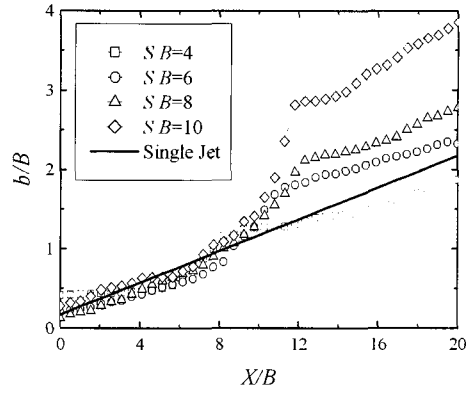


Fig. 8 Variation of half-widths in outer shear layers

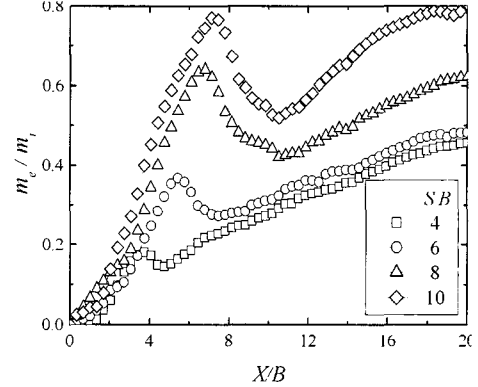


Fig. 9 Entrainment of mass flow rate

역류속도는 작아진다. 선회각도는 노즐사이의 거리가 클수록 선회각도는 커지고, 혼합점에서 운동량손실이 작기 때문에 역류의 최대값이 커진다.

Fig. 6은 노즐 출구에서 분사된 제트의 최고속도가 나타나는 지점을 연결하여 도식하였다. 복합점은 노즐에서 분사된 제트의 중심선 속도가 합쳐져서 노즐과 노즐사이의 중심선에서 최고 속도가 나타나는 지점을 말한다. 복합점의 위치는 각각 2.08S, 1.89S, 1.5S, 1.16S인 지점에서 존재한다. 이 결과로 인해 각각의 제트의 상호간섭에 의한 제트가 휘어지는 정도는 노즐과 노즐사이의 거리는 클수록 급격히 휘어지는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 노즐사이의 거리가 외부중심, 혼합점, 복합점의 위치 변화에 미치는 영향을 알기 위하여 상관관계를 나타내었다. 외부 중심, 혼합점 및 복합점의 위치에 대한 상관관계가 음의 값을 가진다. 이 결과로 인해 노즐과 노즐사이의 거리가 멀어질수록 위의 세 점은 노즐판쪽으로 당겨오는 것을 알 수 있다. 그리고 혼합점과 복합점의 위치를 알면 혼합영역의 크기를 알 수 있다. 혼합영역 크기는 각각 1.01S, 0.82S, 0.51S, 0.32S로 작아지는 것을 볼 수 있고, 이것을 실제 길이로 환산하면 4.04, 4.92, 4.08, 3.2 cm로 S/B=6이후에서는 혼합영역이 줄어든다.

노즐출구에서 분사된 제트의 발달정도를 조사하기 위하여 외부 전단층에서의 분류반폭을 Fig. 8에 나타내었다. 노즐사이의 거리에 따른 분류반폭의 기울기를 보면 노즐 출구에서 나온 제트가 초기에는 단일제트에서 나타나는 기울기 0.1승에 비례하여 발달해 가다가 혼합점에 이르면 각각의 제트가 상호간섭에 의한 혼합으로 인해 외부전단층의 발달을 가속화시키기 때문에 분류반폭의 기울기가 급격히 커지는 것을 알 수 있다. 급격한 기울기는 각각의 제트가 완전히 합쳐지는 복합점까지 나타난다. 복합점 이후의 분류반폭의 기울기는 두 개의 제트가 하나로 합쳐져서 단일제트의 특성이 나타나기 때문에 기울기는 0.1승에 비례한다. 이러한 특성을 고려해 볼 때 분류반폭을 가지고도 병렬

제트에서 나타나는 3가지의 영역을 구분할 수 있다.

Fig. 9은 제트로 유입되는 유량을 나타낸 것이다. 유입된 유량 계산은 식(1)에 나타내었다.

$$\dot{m}_e(x) = \rho \int_{-\infty}^{\infty} u dy - 2\rho U_e B \quad (1)$$

외부로 유입되는 유량곡선을 보면 노즐사이의 거리가 멀어짐에 따라 유입되는 유량이 많아지는 것을 볼 수 있다. 이것은 노즐사이의 거리가 멀수록 내부경계층에서 유입되는 유량이 많아지기 때문이다. 3가지 영역에서 살펴보면 수렴영역에서는 내부전단층과 외부전단층에서 유입이 있기 때문에 유입되는 유량은 급격히 증가하고, 이렇게 유입되는 유량은 혼합점에서 최대정점을 가진다. 혼합점을 지난 혼합영역에서는 유입되는 유량이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 두 개의 제트가 서로 상호간섭에 의해 혼합하는 과정에서 운동량 손실로 인해 나타나는 것이라고 사료된다. 복합영역에서는 선형적으로 유입유량이 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11은 X, Y방향의 난류강도의 분포를 나타낸 것이다. Fig.10은 X방향의 난류강도로서 수렴영역에서는 노즐 출구에서 분사된 제트는 노즐 끝(tip)부분에서 전단층이 발생으로 인하여 난류강도가 커지는 쌍봉구조의 형태를 가지며, 하류방향으로 나아가면 내외부 전단층에서의 유입에 대한 불균형으로 인하여 내부전단층보다 외부전단층에서 유입이 강하게 일어나기 때문에 난류강도가 큰 것을 관찰할 수 있다. 하류방향으로 더 내려와서 복합점을 지나면 2개의 제트가 하나의 제트로 합쳐지기 때문에 난류강도의 분포는 단일제트와 동일하게 나타난다. Fig. 11은 Y방향의 난류강도의 분포로서 외부전단층에서의 일어나는 유입에 의한 혼합보다는 내부전단층에서 제트의 상호간섭에 의한 발달이 강하게 일어나는 것을 알 수 있다.

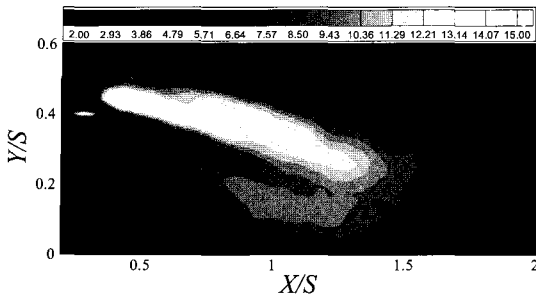


Fig. 10 Contours of the X-component turbulence intensity

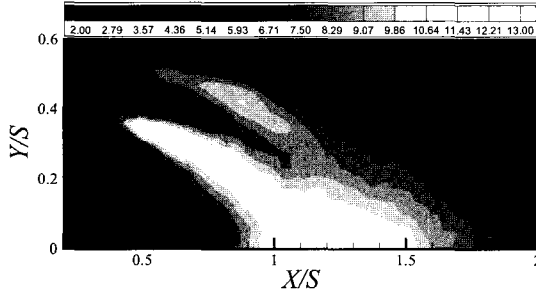


Fig. 11 Contours of the Y-component turbulence intensity

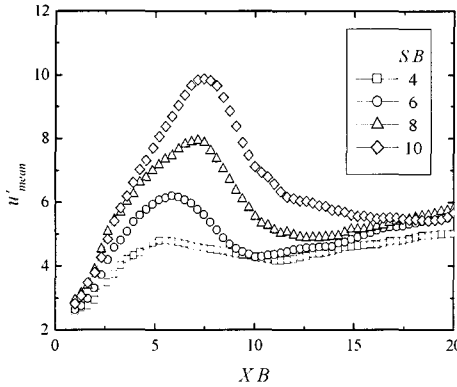


Fig. 12 Mean turbulence intensity of X-component

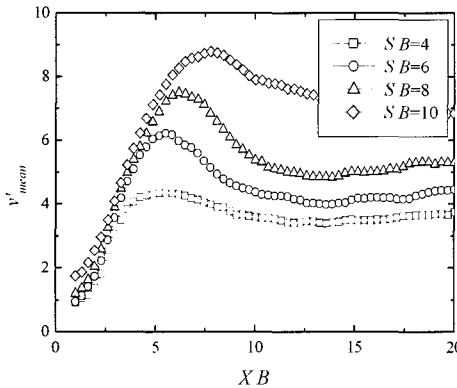


Fig. 13 Mean turbulence intensity of Y-component

Fig. 12, 13, 14는 X 방향과 Y 방향의 속도 섭동성분과 난류운동에너지를 면적 적분하여 평균하였고, 적분구간은 노즐과 노즐사이의 영역인 $-0.5 \leq Y/S \leq 0.5$ 이다. X 방향의 평균난류강도와 Y 방향의 평균난류강도의 분포에서 최대 정점이 나타나는 위치는 동일한 지점에서 나타나지만, 정점에서 감소하는 정도는 차이가 있다. 이것은 혼합영역에서의 난류 에너지 손실은 Y 방향보다는 X 방향의 난류강도가 더욱 크게 나타나는 것을 의미한다. 평균 난류운동에너지는 국부 등방성에 근거하여 계산되며, 일반적으로 단위 질량당 난류운동에너지는 $k = (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})/2$ 로 정의되지만, 본 연구에서는 z 방향의 속도성분의 발달을 제한

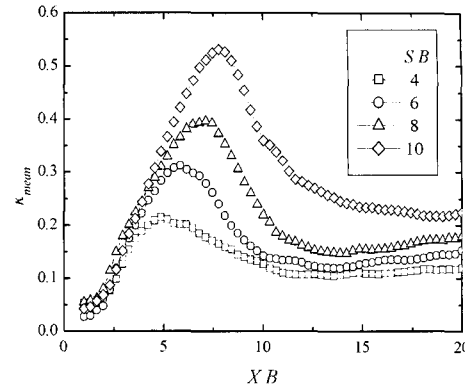


Fig. 14 Mean turbulent kinetic energy

하였기 때문에 수평방향과 수직방향의 난류섭동성분만을 측정하여 $k = (\overline{u'^2} + \overline{v'^2})/2$ 의 식으로 구하였다. 난류 운동에너지의 평균은 식(2)으로 구하였고, 적분구간은 $-0.5 \leq Y/S \leq 0.5$ 이다. 평균 난류운동에너지의 분포는 혼합점에서 최대 정점이 나타났으며, 이것은 노즐사이의 간섭이 최대로 나타나는 혼합점에서 최대 평균난류강도를 갖는 것과 일치한다.

4. 결론

본 연구에서는 동일한 두 개의 노즐을 이용한 병렬제트에서 노즐과 노즐사이의 거리변화에 대한 유동현상을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 혼합점과 복합점의 위치는 노즐과 노즐사이의 거리가 멀어질수록 유동이 중심선쪽으로 휘어지는 정도가 크기 때문에 노즐관쪽으로 당겨오고, 이로인해 혼합영역의 크기도 작아진다.
- (2) 분류반쪽은 수렴영역과 복합영역에서는 단일제트의 경우 유사한 기울기를 가지며 발달하지만, 혼합영역에서는 각각의 제트 혼합에 의해 급격한 기울기를 가진다.
- (3) 유입된 유량은 수렴영역과 복합영역에서는 외부경계층에서 유입으로 인해 증가하지만, 혼합영역에서는 혼합에 의한 에너지 손실로 인해 유입되는 유량은 감소한다.
- (4) 평균 난류강도 및 평균 난류 운동에너지는 재순환유동이 존재하는 영역에서 급격히 증가하여 혼합점에 이르러 최대값을 가진다.

참고문헌

- [1] Miller, D.R., and Comings, E.W., "Force-momentum fields in a dual-jet flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 7, (1960), pp. 237-256.
- [2] Tanaka, E., "The interference of two-dimensional parallel jets," *Bull JSME*, Vol. 13, (1970), pp.272-280.
- [3] Lin, Y.F. and Sheu, M. J., "Investigation of Two Plane Parallel Unventilated Jets," *Experiments in Fluids*, Vol. 10, (1990), pp. 17-22.
- [4] Nasr, A., and Lai, J.C.S., "Two parallel plane jets mean flow and effects of acoustic excitaton," *Experiments in Fluids*, Vol. 22, (1997), pp.251-260.
- [5] Elbanna, H., Gahin, S., and Rashed, M.I.I., "Investigation of two plane parallel jets," *AIAA*, Vol. 21, No.7, (1983), pp.986-991.
- [6] Morel, T., "Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contraction," *J. Fluid Engineering*, Vol. 97, (1975), pp.225-233.