

정현파 형상 노즐 제트의 유동특성에 관한 실험적 연구

김학림* · S.Rajagopalan* · 이상준†

Experimental Study on the Flow Characteristics of Sinusoidal Nozzle Jet

Hak Lim Kim, S.Rajagopalan and Sang Joon Lee

Abstract. Two turbulent jet with different sinusoidal nozzle exit configurations of in-phase and 180° out-of-phase were investigated experimentally using a smoke-wire method and a hot-wire anemometry. Mean velocity and turbulence intensity were measured at several downstream locations under $Re_D = 5000$. For the case of in-phase nozzle configuration, the length of potential core exhibits negligible difference with respect to the transverse locations (0, $\lambda/4$ and $\lambda/2$), similar to that of a plane jet. On the other hand, a maximum difference of 30% in the potential-core length occurs for the 180° out-of-phase configuration. The spatial distributions of turbulence intensities also show significant difference for the nozzle of 180° out-of-phase, whereas non-symmetric distribution is observed in the near-exit region($x/D = 1$) for the in-phase sinusoidal nozzle jet. Compared to a slit plane jet, the sinusoidal nozzle jets seem to suppress the velocity deficit as the flow goes downstream. The sinusoidal nozzle jet was found to decrease turbulent intensity dramatically. The flow visualization results show that the flow characteristics of the sinusoidal nozzle jet are quite different from those of the slit plane jet.

Key Words: Sinusoidal nozzle(정현파 노즐), Flow visualization(유동가시화), Mean velocity(평균유속), Turbulence intensity(난류강도)

1. 서 론

제트유동에 대한 제어는 자동차나 선박, 공조시스템에서 반도체 공정에 이르기까지 산업계 전반에 걸친 광범위한 적용 분야와 그 경제적 가치로 인하여 최근 까지도 꾸준히 연구되고 있다.

유동제어는 크게 능동제어기법(active control method)과 수동제어기법(passive control method)으로 나눌 수 있으며, 제트유동에 있어서 대표적인 능동제어기법으로는 음향 여기(acoustic excitation)를 이용하여 난류강도 또는 모멘텀 손실을 감소시키거나 제트에 회전력을 부여하는 방법 등이 있다. 능동제어 기법의 경우, 유동조건에 따라 제어할 수 있다는 장점이 있으나 지속적인 에너지 유입이 필요하고 이를 위

한 장치가 복잡해지는 경향이 있다. 이에 반해 수동제어 기법은 간단히 노즐 출구 형상을 변화시키거나 부가적인 구조물을 설치하여 와류 형성을 제어함으로써 외부로부터의 에너지 유입없이 효과적으로 유동을 제어하는 것이 가능하다.

Bradbury & Khadem⁽¹⁾은 아음속 원형 제트의 노즐 출구 끝단에 부착한 탭(tab)이 유동의 혼합특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 탭에 의하여 후류에서 서로 반대방향으로 회전하는 와류쌍이 형성되며 이로 인해 주위 유체의 유입이나 혼합이 증가하게 된다. Bohl & Foss⁽²⁾는 2개의 층류유동의 혼합을 촉진하는 방법으로 탭을 사용하였다.

또 다른 수동제어 기법으로 제트 유동의 성장을 변형시키기 위해 출구 가장자리에 제어봉과 같은 구조물을 설치할 수 있다. Tong & Warhaft⁽³⁾는 축대칭 원형 제트의 출구 끝단 전단층 영역에 얇은 링을 설치하여 전단층에서의 제트 성장이나 중심부에서의 난류강도와 유속 등을 현저히 줄일 수 있음을 밝혔다. Rajagopalan

†포항공과대학교 기계공학과 교수

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

*포항공과대학교 기계공학과

& Antonia⁽⁴⁾는 평면제트의 출구에 얇은 와이어를 설치하는 것이 Tong & Warhaft의 링과 같은 제어효과를 가져온다고 하였는데, 이것은 출구 부근 전단층 영역에 설치된 와이어의 후류에 기인하여 생성된 작은 와들(small-scale vortices)이 주제트 유동의 와류 병합(vortex pairing)을 억제함으로써 생기는 결과라고 하였다.

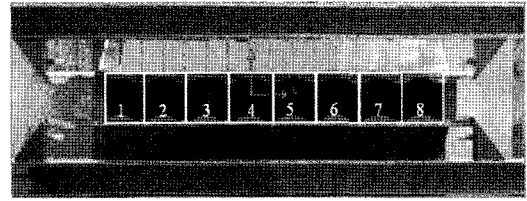
노즐 출구 형상을 바꾸어 유동구조를 변화시키는 연구도 활발히 진행되어져 왔다. Hu⁽⁵⁾등은 PIV 속도장 측정기법을 이용하여 굴곡진 원형 노즐로부터 토출되는 제트의 와류구조에 관해 연구하였고, New & Tsovolos⁽⁶⁾도 V-notched 노즐의 sharpess변화에 따라 달라지는 유동특성을 연구하기 위해 정량적인 유동분석과 더불어 유동가시화를 수행하였다.

노즐 출구 형상을 바꾸는 제트 유동제어 연구에 있어서, 기존의 실험연구들은 주로 축대칭 원형 제트를 대상으로 하였다. 특히, 정현파(sinusoidal) 형상의 실린더 후류에 관한 연구(Lee & Nguyen⁽⁷⁾)나 정현파 형태의 앞전(leading edge)형상을 갖는 델타윙(delta wing)에 관한 연구(Gornuey & Rockwell⁽⁸⁾)와 같이, 정현파 형상 구조물의 외부 유동에 관한 연구는 있지만 정현파 형상의 출구 형상을 갖는 평면 노즐 제트에 대한 연구는 아직까지 수행된 바 없다.

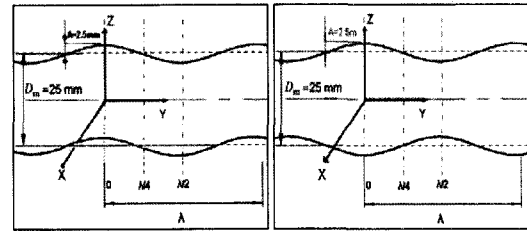
본 연구에서는 정현파 형상을 갖는 상하 노즐의 위상을 서로 달리함으로써 생기는 정현파 형상 노즐제트의 유동특성 변화를 실험적으로 연구하였다. 즉, 동일 위상인 in-phase와 180° out-of-phase 노즐에서 토출되는 제트유동과 평면 슬릿 제트(slit jet)유동의 유동특성을 분석하여, 정현파 형상 노즐의 평면제트에 대한 유동제어 효과를 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 400 mm×40 mm 크기의 평면제트 노즐의 끝단에 25 mm 두께의 정현파 형상의 노즐 sheet를 Fig. 1(a) 처럼 노즐 상하에 붙여 구성하였다. 윗쪽과 아랫쪽 노즐 sheet를 평균 출구간격 $D_m = 25$ mm를 갖도록 설치하고, 아랫쪽 sheet를 좌우 방향으로 이동이 가능하게 하여 두 sheet의 정현파 형상이 위상차를 가지도록 하였다. 총 8개의 파장 중 4번째 파장의 중심부를 원점으로 하여, 주유동방향(streamwise direction)을 x축, 수평방향(lateral direction)을 y축, 수직방향



(a) Front view of the in-phase sinusoidal nozzle



(b) In-phase

(c) 180°out-of-phase

Fig. 1. Schematic diagram and coordinate of the sinusoidal jet nozzles tested in the study

(vertical direction)을 z축으로 설정하였다

Fig. 1(b)와 (c)는 각각 동일위상(in-phase)과 180° 위상차(out-of-phase)에 대한 노즐 형상의 개략도를 보여 주고 있는데, 동일위상의 경우 출구간격 $h(y)$ 는 D_m 으로 일정한 반면, 180°위상차의 경우 출구간격은 다음과 같은 식으로 표시되어진다.

$$h(y) = D_m + 2A \sin[2\pi(y + \lambda/4)/\lambda] \quad (1)$$

여기서 정현파의 진폭은 $A = 2.5$ mm, 파장은 $\lambda = 50$ mm이다.

동일위상과 180° 위상차 조건의 정현파 노즐 제트에 대하여 수평방향(y축 방향) 위치에 따른 유동특성의 변화를 알아보기 위해, 제트 출구속도 $U_j = 3$ m/s일 때 ($Re_D = U_j D/\nu = 5000$), $y = 0, \lambda/4, \lambda/2$ 세 위치에서의 수직단면(x-z평면) 내부 평균유속과 난류강도 분포를 측정하였다. $x/D = 0.5$ 의 하류지점에서 z축방향으로 2 mm 간격으로 주유동 방향 평균유속과 난류강도 분포를 측정하였으며, 하류로 나아가며 따른 속도변화를 연구하기 위하여 $x/D = 1, 2, 4, 6$ 의 하류위치에서 측정을 반복하였다. 속도를 측정하기 위해서 TSI사의 IFA-100 정온형 열선풍속계와 I-형 열선 프로우브(DANTEC 55P11)를 사용하였고, 정밀도가 0.1 mm이 하인 3차원 이송장치를 이용하여 열선 프로우브를 원하는 위치로 이송시켰다. 각각의 측정위치에서 초당

4,000개의 비율로 샘플링하여 16,384개의 속도 데이터를 얻었는데, 노이즈 제거를 위해 속도신호를 800 Hz의 저역필터를 거치게 하였다.

동일위상과 180° 위상차 조건에 대하여 수직 단면(x-z평면)에서의 유동구조를 가시화하기 위해, 연선법(smoke-wire method)을 사용하여 $y=0, \lambda/4, \lambda/2$ 세 위치의 수직면에서 유동가시화 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 직경이 0.1 mm인 니크롬 와이어가 사용되었는데, 와이어는 제트 출구로부터 10 mm 위치에 수직으로 설치되었다. 니크롬 와이어에 Safex oil을 고르게 바르고 여기에 DC 전원공급기로 전기를 공급하면 Safex oil이 기화되면서 흰색의 smoke filament가 발생하여 측정하고자 하는 유동단면을 지나가게 된다. 측정 단면을 Nd:Yag 펄스레이저와 렌즈들을 사용하여 만든 얇은 레이저 평면광(laser light sheet)으로 조사하여 smoke filament 유맥선(streakline)의 순간적인 정지영상을 Nikon D100 디지털 카메라로 촬영하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수직면 평균유속 분포

Fig. 2는 동일위상의 노즐형상에 대한 출구부근(x/D

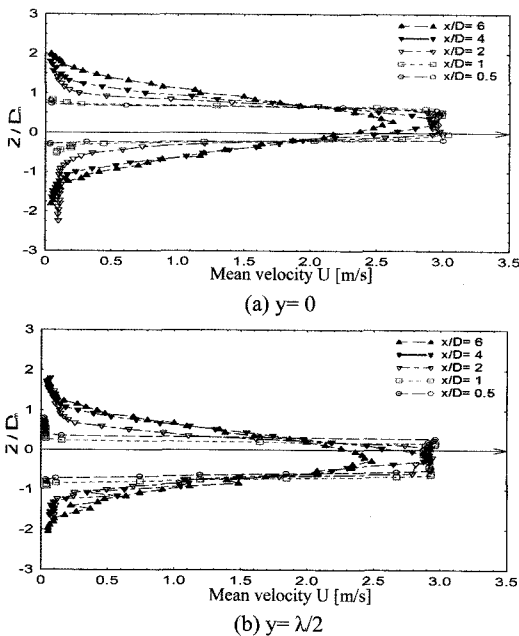


Fig. 2. Mean velocity distribution of the in-phase nozzle jet according to the y position

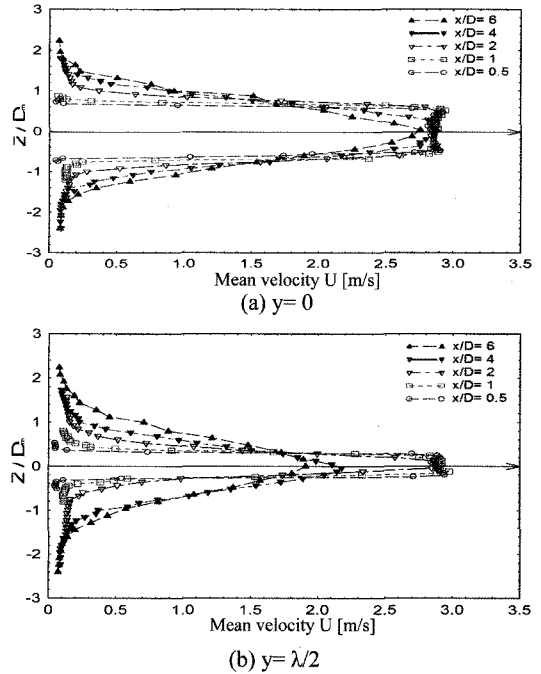


Fig. 3. Mean velocity distribution of the 180° out-of-phase nozzle jet according to the y position

$D=6$ 까지의 y 위치($y=0, \lambda/2$)에 따른 주유동방향 유속의 수직방향분포를 보여주고 있다. 정현파 형상의 노즐 제트가 동일위상을 갖는 경우, y 위치에 따른 유속분포의 변화가 작으며 포텐셜코어의 길이도 $x/D=4$ 정도로 비슷하였다. 동일 출구폭을 갖는 슬릿 평면 제트와 비교하여보면 단지 y 위치 변화에 따른 중심축의 변화만 나타난다.

반면에 Fig. 3에서와같이 180° 위상차 노즐형상의 경우에는 y 위치 변화에 따라 유속분포가 현저한 차이를 보이며, 포텐셜코어의 길이는 $y=\lambda/2$ 위치단면에서 $x/D=2-4, y=0$ 위치 단면에서 대략 $x/D=6$ 하류 위치까지 30%가 넘는 큰 차이를 보여주고 있다. 이와 같은 결과를 통해, 동일위상 조건의 경우 출구부근에서의 수직면(x-z단면)에서의 주유동방향 평균 유속분포는 정현파형 노즐형상에 거의 영향을 받지 않지만, 180° 위상차 형상 노즐의 경우에는 평균유속이 노즐출구간격 $h(y)$ 의 변화에 크게 영향을 받고있음을 알 수 있다. 특히 출구 노즐 간격 $h(y)$ 가 작은 $y=\lambda/2$ 단면에서, 하류로 나아갈수록 유속과 모멘텀이 크게 작아진다.

Fig. 4에서 180° 위상차 노즐 제트의 $y=0$ 과 $\lambda/2$ 위치 단면과 슬릿 제트에서의 3차 다항식으로 추세된 제

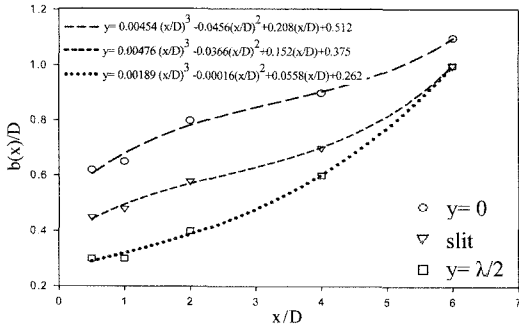


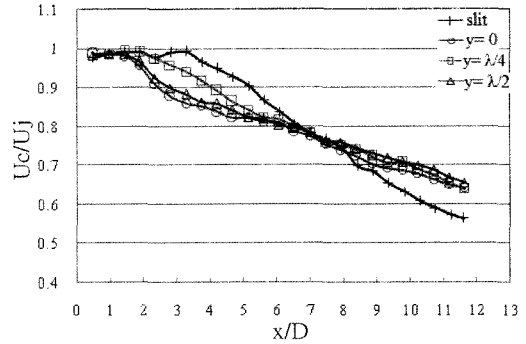
Fig. 4. Comparison of non-linear spreading of jet half-widths for the slit jet and the 180° out-of-phase nozzle jet

트반폭(jet half-width)변화를 비교하였다. 무차원 속도 U/U_c 는 $x/D=0.5, 1, 2, 4, 6$ 하류위치에서의 주유동 방향 속도 U 를 각 단면 중심축에서의 제트중심속도 U_c 로 나누어 구한 값이다.

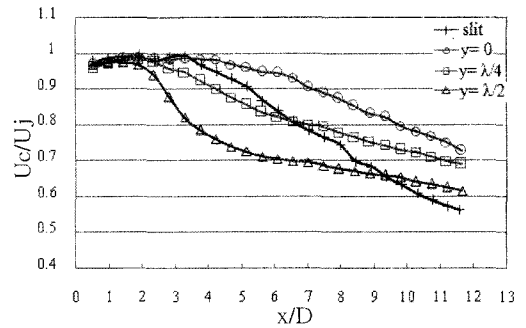
제트반폭 $b(x)$ 에 대한 미분값인 $db(x)/dx$ 는 제트의 확장율(spreading rate)을 나타내는데(Nicolas⁽⁹⁾), 하류 방향으로 갈수록 180° 위상차 노즐 제트의 $y=\lambda/2$ 단면에서 제트의 확장률이 크다. 이것은 $y=\lambda/2$ 위치 단면에서 제트가 보다 빨리 확장하는 것을 의미하며, 제트의 빠른 확장으로 인해 전단층(shear layer)으로 유입(entrain-ment)되는 주위 유체가 증대되어 전단층에서의 혼합(mixing) 강도가 상대적으로 커지게 된다. 전단층에서 외부유체와의 혼합증가는 결국 제트 중심부에서의 모멘텀 손실을 야기시키게 되는데, 이로 인하여 $y=\lambda/2$ 단면에서 하류로 나아감에 따라 유속이 빠르게 감소하게 되는 것으로 생각되어진다.

3.2 제트 중심부를 따른 유속 변화

Fig. 5는 제트유동의 중심부($z=0$)에서, 출구간격 25 mm의 슬릿 제트와 각 위상에 대한 정현파 형상 노즐 제트의 y 위치변화에 따른 하류방향 속도분포를 보여주고 있다. 동일위상 노즐 제트의 경우(Fig. 5(a)) 같은 크기의 출구간격을 가진 슬릿 제트에 비하여, 노즐 출구로부터의 거리가 $x/D=7$ 이전 영역에서는 평균유속이 느리지만, $x/D=7$ 이후의 하류영역에서는 평균유속이 빠른 것으로 나타났다. 이것은 수평 중앙단면에서, 슬릿 제트에 비하여 동일위상 노즐 제트의 경우가 속도 감쇄(velocity deficit)가 작다는 것을 의미한다. 또한 $y=0$ 과 $y=\lambda/2$ 위치 단면 속도분포는 거의 유사한



(a) in-phase sinusoidal nozzle jet



(b) 180° out-of-phase sinusoidal nozzle jet

Fig. 5. Comparison of streamwise velocity distribution for the slit jet and sinusoidal nozzle jets in the center plane

반면, $x/D=1\sim6$ 의 출구 부근 영역에서는, $y=\lambda/4$ 단면에서의 속도가 빠르고 $x/D=6$ 후방 하류로 나아갈수록 y 위치에 상관없이 전반적으로 속도가 일정해지는 것으로 나타났다. $x/D=1\sim6$ 의 출구 부근 영역에서 $y=0$ 과 $y=\lambda/2$ 단면에서의 속도가 $y=\lambda/4$ 단면에서의 속도에 비하여 느린 것은, $y=0$ 과 $y=\lambda/2$ 단면에서의 동일위상 노즐 제트 중심축이 수평중앙단면에서 벗어나 있기 때문이다.

180° 위상차 노즐 제트의 경우(Fig. 5(b))도 하류로 나아갈수록 슬릿 제트에 비해 속도의 감쇄가 작아지지만, y 위치에 따른 변화폭이 크게 차이가 나고 있다. 출구간격이 큰 $y=0$ 단면에서는 슬릿 제트에 비해 전반적으로 큰 속도값과 작은 속도감쇄를 보이며, $y=\lambda/4$ 단면에서는 출구부근($x/D=1\sim6$)에서의 속도는 작지만 슬릿 제트보다 작은 속도감쇄로 인해 $x/D=7$ 이후 구간에서 속도가 역전되고 있다. 출구간격이 작은 $y=\lambda/2$ 단면에서는 $x/D=2\sim5$ 의 영역에서 슬릿 제트에 비해 오히려 속도의 감쇄가 크게 나타나고, $x/D=6$

이후 급격히 줄어들어 결국 $x/D=9$ 이후 구간에서 슬릿 제트에 비해 속도가 커지게 됨을 알 수 있다. 출구 부근($x/D=2\sim5$) 영역에서 $y=0$ 수직단면에서의 속도 감쇄에 비해 $y=\lambda/2$ 수직단면에서의 속도 감쇄가 현저히 큰 것은, 이 단면에서 유체가 빠르게 확장함에 따라 외부 유체와의 혼합이 크게 증가되기 때문인 것으로 생각되어진다. 이것은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 $x/D=2\sim5$ 영역에서 $y=\lambda/2$ 위치 수직단면의 유동이 상대적으로 큰 확장율을 가지는 것과 대응되는 결과이다.

정현파 형상 노즐 제트의 경우, 전반적으로 낮은 속도 감쇄율으로 인하여, $x/D=9$ 후방에서 슬릿제트에 비해 빠른 유속을 유지하게 됨을 알 수 있다. 이것은 출구로부터 먼 곳까지 유속을 유지하기 위해서는 정현파 노즐 제트가 유리하다는 것을 의미한다.

3.3 수직면 난류강도(turbulent intensity) 분포

Fig. 6에서 볼 수 있듯이 동일위상 노즐 제트의 경우 난류강도 분포 역시 y 위치에 따라 큰 차이를 보이지 않는다. 하지만 출구 부근($x/D=1$) 영역에서는 난류강도

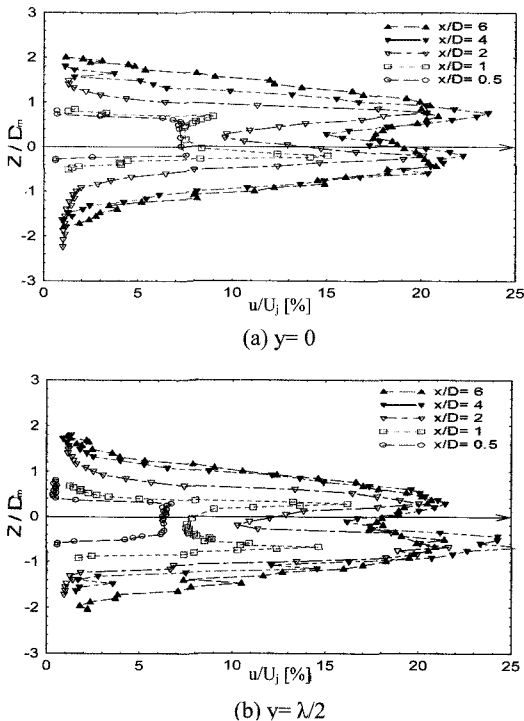


Fig. 6. Turbulent intensity profiles of the in-phase nozzle jet

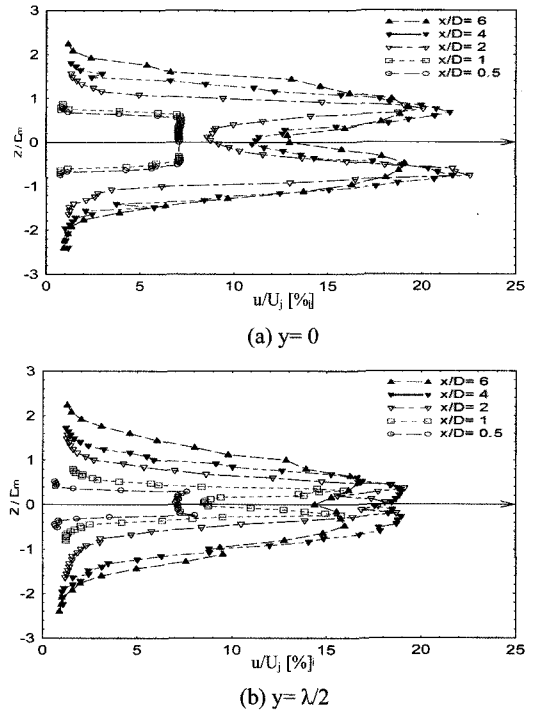


Fig. 7. Turbulent intensity profiles of the 180° out-of-phase nozzle jet

의 비대칭성을 뚜렷하게 확인할 수 있는데, 유동에 대해 불룩한 쪽, 즉 $y=0$ 위치에서의 아랫쪽 부분과 $y=\lambda/2$ 단면에서의 윗쪽 부분에서의 난류강도가, 오히려 큰 값을 가진다.

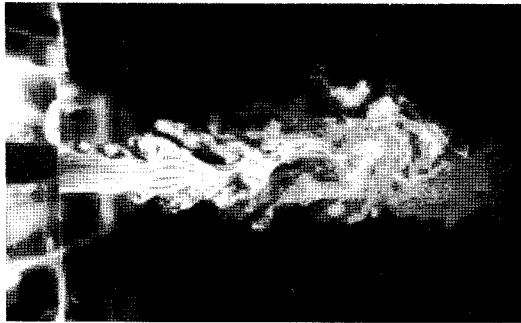
반면에 180° 위상차 노즐의 경우에는 y 위치에 따라 난류강도 분포가 큰 차이를 보였다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 $y=\lambda/2$ 위치에서 노즐출구에서 멀어질수록 중심부에서 난류강도가 증가하는데, 출구로부터 $x/D=4$ 만큼 떨어진 곳에서 $y=0$ 단면의 중심부보다 36% 정도 큰 난류강도값을 가졌다. 이것은 $y=\lambda/2$ 단면의 중심부에서 난류강도가 $y=0$ 단면의 중심부에 비해 급격히 증가함을 나타내며, 이로부터 출구간격이 작은 $y=\lambda/2$ 단면에서 빠른 난류천이가 일어남을 유추할 수 있다.

3.4 유동가시화

Fig. 8과 Fig. 9는 정현파 노즐 제트 유동을 가시화 결과로, 동일위상 노즐 제트(Fig. 8)에서는 y 위치에 따라 와류가 비대칭 구조를 보여주고 있다. 출구 부근 $y=0$ 위치에서 노즐 아랫쪽에서 와류가 활발히 형성되고, $y=\lambda/4$ 위치 단면에서는 위·아래가 대칭적인 구조

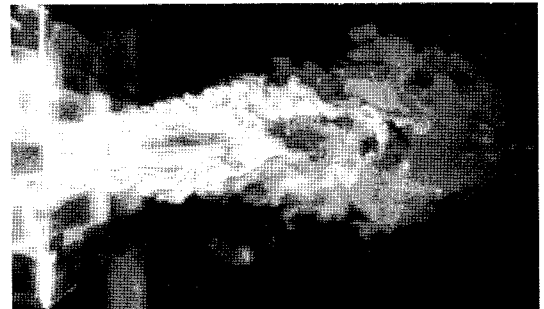


(a) $y=0$

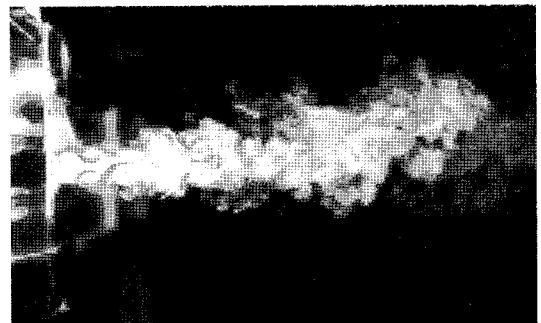


(b) $y=\lambda/2$

Fig. 8. Visualized flow of the in-plane sinusoidal nozzle jet in the vertical plane



(a) $y=0$



(b) $y=\lambda/2$

Fig. 9. Visualized flow of the 180° out-of-phase sinusoidal nozzle jet in the vertical plane

를 형성하며, $y=\lambda/2$ 에서는 노즐 윗쪽에서 활발히 와 구조가 형성되었다. 이것은 노즐을 정면에서 볼 때, 유동에 대하여 볼록한 쪽에서 와류가 활발히 형성되는 것을 나타내며, 난류강도분포의 비대칭성에 대응되는 결과이다.

180° 위상차 노즐의 경우(Fig. 9)에는 $y=\lambda/2$ 위치 단면에서 포텐셜 코어의 길이가 확연히 줄어들고 난류천이가 빠르게 발생하며 혼합이 크게 증가되는 것으로 나타났다.

4. 결 론

정현과 형상을 갖는 노즐의 출구형상 위상을 달리함으로써 생기는 유동특성 변화를 실험적으로 연구하고자, 동일위상인 in-phase와 180° 위상차(out-of-phase) 노즐에서 토출되는 제트의 유동특성을 분석하고 슬릿 평면 제트유동과 비교하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 동일위상 정현과 노즐 제트의 경우, 수평 방향(y

축 방향) 위치에 따른 수직면 유속분포의 변화가 작으며, 동일 출구간격을 갖는 슬릿 제트와 비교하여 y 위치 변화에 따른 중심축의 변화만 나타난다. 반면에 180° 위상차 노즐 제트의 경우, 수평방향 위치에 따라 주유동방향 모멘텀이 변화함에 따라 y 위치별 유속분포가 큰 차이를 보인다.

2) 동일위상 정현과 노즐 제트의 경우, 수평방향 위치에 따른 수직면 난류분포 변화는 작지만, $x/D=1$ 의 출구 부근에서 난류의 비대칭성이 발생한다. 이는 유동가시화를 통해 관찰된 출구 부근 와류의 비대칭구조와 일치하는 결과이다. 180° 위상차 노즐 제트의 경우에는 y방향 위치에 따른 수직면 난류분포가 현저한 차이를 보이며 $y=0$ 위치 단면에서 포텐셜 코어의 길이가 현저히 길며, $y=\lambda/2$ 위치에서는 빠른 난류천이가 일어난다.

3) 180° 위상차 정현과 노즐 제트의 경우, 슬릿 제트에 비하여 $y=0$ 수직단면에서 제트폭의 성장은 느린 반면에 $y=\lambda/2$ 위치단면에서는 제트폭이 빠르게 성장한다. 제트의 빠른 성장은 주위 유체의 유입을 촉진시키고

이로 인해 $y = \lambda/2$ 단면에서는 혼합이 증대된다. 반면에 $y = 0$ 위치 단면에서는 혼합이 억제되며 이로 인해 유속 분포는 현저한 차이를 보인다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부/한국과학재단 창의적 연구진흥사업(생체유동현상 규명 및 생체모방 연구) 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) L.J.S. Bradbury and A.H. Khadem, "The distortion of a jet by tabs", *J. Fluid Mech.*, Vol.70, pp.801-813, 1975.
- 2) D. Bohl and J.F. Foss, "Near exit plane effects caused by primary and primary -plus-secondary tabs", *J. AIAA*, Vol. 37(2), pp. 192-201, 1999.
- 3) C. Tong and Z. Warhaft, "Turbulence suppression in a jet by means of a fine ring", *Physics of Fluids*, Vol.6, No.1, pp.328-333, 1994.
- 4) S. Rajagopalan and R.A. Antonia, "Turbulence reduction in the mixing layer of plane jet using small cylinders", *Experiments in Fluids*, Vol.25, pp. 96-103, 1997.
- 5) H. Hu, Tetsuo Saga, Toshio Kobayashi and Nubuyuki Taniguchi, "Research on the vortical and turbulent structures in the lobed jet flow using laser induced fluorescence and PIV techniques", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 11, pp. 698-711, 2000.
- 6) T.H. New and D. Tsovolos, "Influence of nozzle sharpness on the flow fields of V-notched nozzle jets", *Physics of Fluids*, Vol.21, No.8, pp. 084107, 2009.
- 7) S. J. Lee and A. T. Nguyen, "Experimental investigation on wake behind a wavy cylinder having sinusoidal cross-sectional area variation", *Fluid Dynamics Research*, Vol. 39, pp. 292-304, 2007.
- 8) T. Goruney and D. Rockwell, "Flow past a delta wing with a sinusoidal leading edge: near-surface topology and flow structure", *Experiments in Fluids*, Vol. 47, pp. 321-331, 2009.
- 9) E. Nikolas, "A note on the spreading rate and virtual origin of a plane turbulent jet", *J. Fluid Mech.*, Vol. 77, pp. 305-311, 1976.