

피드백이 없는 유체진동기에서 분사되는 Sweeping jet의 유동 특성

남상현* · 김동욱** · 김경천†

Flow Characteristics of Sweeping Jet Issued by a Feedback-free Fluidic Oscillator

Sanghyun Nam*, Donguk Kim** and Kyung Chun Kim†

Abstract This paper presents flow characteristics of a sweeping jet issued by a feedback-free fluidic oscillator. Overall flow characteristics of feedback-free sweeping jet (FFSJ) were analyzed using flow visualization. The feedback-free sweeping jet has a sinusoidal external flow pattern. The oscillating frequency of the FFSJ is three times higher than that of a conventional sweeping jet at the same Reynolds number. Flow structure and turbulence characteristics were investigated using time-resolved particle image velocimetry (TR-PIV). In instantaneous velocity fields, the flow did not stay at ends but changed the direction continuously in contrast to the conventional sweeping jet. Velocity distributions at each plane which were extracted from mean velocity field has Gaussian distribution, which is similar with a circular jet. The sweep angles were constant as 45° at all Reynolds numbers in the high flow rate regime.

Key Words : Sweeping Jet(스위핑 제트), Feedback-free Fluidic Oscillator(피드백이 없는 유체진동기), Flow Visualization(유동가시화), Time-resolved PIV(시분할 입자영상유속계), Flow Characteristics(유동특성)

1. 서론

열 및 물질 전달 효율이 높은 충돌 제트는 가

† School of Mechanical Engineering,
Pusan National University, Busan 46241, Korea,
Professor
E-mail: kckim@pusan.ac.kr

* School of Mechanical Engineering,
Pusan National University, Busan 46241, Korea,
Ph.D student

** School of Mechanical Engineering,
Pusan National University, Busan 46241, Korea,
MS student

스 터빈 블레이드의 냉각, 철강 및 전기 장치의 열처리를 포함한 다양한 산업 응용 분야에서 널리 사용되고 있다.^[1] 충돌 제트를 사용한 열전달의 중요성은 산업에서 열 관리에 대한 요구가 증가함에 따라 더욱 중요해지고 있다.^[2] 충돌 제트는 간단한 구성 및 고효율로 많은 장점을 갖지만, 최근 많은 연구자들이 합성 제트, 맥동 제트 및 스위핑 제트와 같은 열전달 성능을 향상시키기 위한 대체 충돌 방법을 연구하고있다.^[3]

스위핑 제트는 유체 발전기에서 생성되는 시간적으로 연속적이고 공간적으로 진동하는 제트이다. 스위핑 제트의 특별한 유량 특성으로 인해 항공기의 유량 제어, 터빈 블레이드의 필름 냉

각, 유량계 및 스프레이와 같은 다양한 분야에서 사용되었다.^[4] 유체 발진기는 가압 유체에 의해 공급 될 때 광범위한 주파수를 갖는 진동 제트를 생성하는 수동적 유동 제어 장치이다. 유체 발진기를 사용하는 이점 중 하나는 동적 부품이 포함되어 있지 않다는 점이다.

유체 발진기는 두 그룹으로 분류 할 수 있다. 하나는 널리 연구된 피드백형 유체 발진기이다. 제트의 진동은 주로 코안다 효과와 피드백 채널의 신호에 의해 영향을 받는다.^[5]

Fig. 1과 같이 박리기포는 기본 제트 흐름을 반대쪽 측벽으로 밀고 1차 유동은 코안다 효과로 인해 측벽에 부착된다. 부착된 1차 유동은 피드백 루프의 정적 압력을 증가시키고 해당 피드백 채널로의 유량도 증가한다. 피드백 채널을 통한 이러한 유동은 1차 유동을 다른 측벽으로 밀어 내고, 유동 방향을 출구의 한쪽에서 다른 쪽으로 전환한다.^[5] 다른 하나는 Raghu가 특허를 획득한 피드백이 없는 유체 발진기이다.^[6] 이 발진기는 Fig. 2에 도시된 바와 같이 돔형 혼합 챔버에서 2 개의 경사진 제트의 충돌 및 결과적인 와류 흐름 패턴으로부터 자체 지속 진동을 갖는다. 충돌에 의해 생성된 큰 와류는 본질적으로 불안정하여, 한 쌍의 제트가 주기적으로 편향되게 한다. 하나의 제트가 돔 영역을 향해 편향 될 때 다른 제트는 출구 제트에 운동량을 추가한다.^[6]

냉각 성능을 향상시키기 위해 충돌제트의 유동 구조와 열전달 특성에 대해 많은 연구가 수행되었다.^[7-8] Martin^[7]과 Jambunathan 등^[8]은 충돌 제트의 열 및 물질 전달에 대한 상세한 문헌을 소개하였다. 충돌 제트 열전달에 관한 연구는 노즐 형상, 구속조건, 난류 강도 및 노즐과 벽면사이의 간격을 변수로 수많은 경험식이 확립되어 있다.

열전달 및 유동 제어를 위한 대안적인 전략으로 스위핑 제트가 널리 연구되고있다^[9-11]. 많은 연구자들이 스위핑 제트의 유동 구조에 관심을 보였으며 열전달 특성을 탐색하였다. Zhou 등^[12]은 좁은 간격에서 충돌하는 제트의 열전달을 정량화하기 위해 온도감응페인트 기술을 도입하였다. Kim 등^[11]은 인광체 온도 측정법을 사용하여 비교적 높은 제트-벽 간격에서 스위핑 제트와

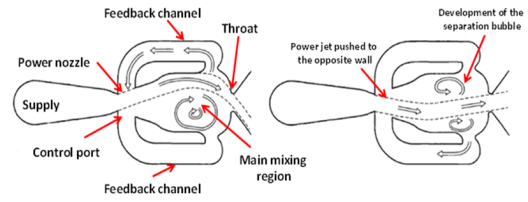


Fig. 1. Schematic of feedback-type fluidic oscillator

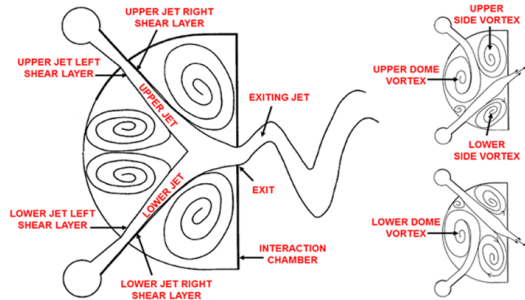


Fig. 2. Schematic of feedback-free fluidic oscillator

직사각형 정상 제트의 열전달 성능을 비교하였다. 스위핑 제트는 주유동의 방향이 주기적으로 변함에 따라 출구 근처에서 난류 강도가 높은 영역을 생성한다. 이러한 유동 특성으로 인해 좁은 간격에서의 열전달 성능이 높아진다. 그러나, 벽과 제트노즐 사이의 간격이 커지면, 중앙 영역에서의 유속이 급격히 감소하고 대부분의 유동이 양단에 집중됨에 따라 냉각 효과가 감소한다.

스위핑 제트의 유동특성에 대한 대부분의 연구는 피드백 형식의 유체 발진기로 수행되었다. Sitter^[13]는 세가지 서로 다른 유체 발진기의 내부 유동, 즉 단일 피드백 유형, 이중 피드백 유형 및 피드백이 없는 유체 발진기의 유동에 대해 수치해석 및 실험을 수행하였다. 유체 발진기의 발진 주파수를 유량에 따라 비교하였을 때, 피드백이 없는 발진기로부터의 진동 주파수는 피드백 있는 발진기의 주파수보다 더 높았다. Gregory 등^[14]은 피드백이 없는 유체 발진기의 혼합 챔버 내 유동의 특성을 조사하고 2 개의 제트의 충돌이 충돌의 계면에서 불안정한 전단층을 생성하고 제트가 진동함에 따라 전단층의 형상이 변함을 관찰하였다. 또한 불안정한 전단층은 두 개의 역회전 와류에 의해 구동되며 이 와류가

제트의 진동을 담당한다고 설명하였다.

피드백이 없는 스위핑 제트에 대한 기존의 연구는 주로 발진 메커니즘에 대한 연구로 발진기 내부 유동에 대한 연구들이다. 본 연구는 피드백이 없는 스위핑 제트의 외부 유동을 가시화 하고, 유동 특성을 다양한 Reynolds 수 범위에서 정량적으로 측정하여 피드백이 있는 기존의 스위핑 제트 유동과 비교하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

실험 모델은 Tomac 등^[15]의 연구에 사용된 모델을 기반으로 설계되었다. Fig. 3은 공급노즐, 안정화 챔버, 제트 발생을 위한 두 개의 채널, 혼합 챔버, 목 및 출구 노즐을 포함하는 피드백이 없는 유체 발진기의 구조를 보여준다. 두 개의 제트에 동일한 양의 유량을 보내주기 위해 안정화 챔버가 추가로 포함되었다. 유동 가시화 및 시간 분해 입자영상유속 (PIV) 측정을 위해 두 가지 유형의 유체 발진기가 제작되었다. 유동 가시화 실험 모델은 폭 38 mm × 길이 44 mm × 깊이 5 mm의 혼합 챔버 및 4.25 mm의 출구 노즐 폭을 갖는 알루미늄 재질의 유체발진기로 CNC 기계에 의해 가공되었다. 두 개의 내부 제트 사이의 각도는 116°이다. 노즐의 목(throat)은 수력 직경이 5 mm인 정사각형 형상이다. 노즐 출구의 폭은 20 mm이고 출구 각도는 90°이다. 노즐 목에서 노즐 출구까지의 거리는 9 mm이다. 제트 특성은 모델의 표면 거칠기에 의해 영향을 받지 않는 것으로 가정하였다. 시간 분해 PIV에 사용된 실험 모델은 CNC 기계에 의해 아크릴 재료로 제작되었다. 아크릴 모델은 수력 직경이 10 mm이며, 가시화 연구의 알루미늄 모델보다 크기가 두 배이다.

피드백이 없는 유체 발진기로부터 발생한 스위핑 제트의 유동 형태를 관찰하기 위해 유동가시화 실험을 수행하였다. Fig. 4는 공기를 작동 유체로 사용하는 연기 가시화 실험 정치를 보여준다. 연기 가시화를 위해, 1 μ m의 대표 직경을 갖는 올리브 오일 에어로졸 입자가 Laskin 노즐에 의해 생성되었다. 레이저 평면광은 532 nm의

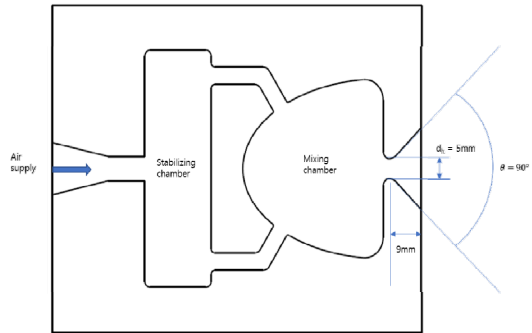


Fig. 3. Schematic of feedback-free fluidic oscillator for flow visualization and phosphor thermometry

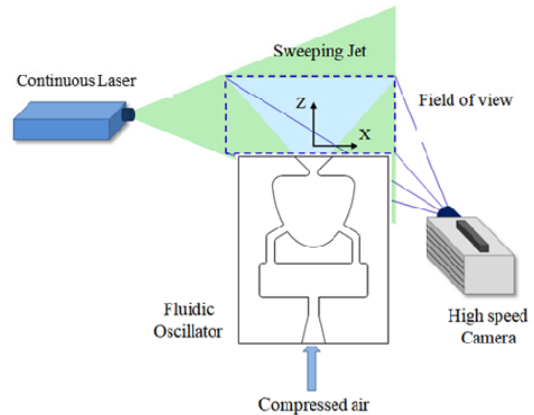


Fig. 4. Experimental setup for smoke visualization

파장을 갖는 CW 레이저, 초점 거리가 25 mm인 원통형 렌즈 및 초점 거리가 1000 mm인 구형 렌즈로 구성된 광학 렌즈 모듈에 의해 발생시켰다. 유체 발진기는 상온의 대기 조건에서 평면 실험대에 수직으로 설치되었다. Reynolds 수의 범위는 12000, 16000, 24000 및 32000으로 설정하였다. 여기서 Reynolds수는 유체 발진기 출구에서의 평균 제트 속도 (U) 및 노즐 목의 폭 (d)을 각각 특성 속도 및 특성 길이로 선택하여 구한 값이다. 스위핑 제트의 시간 분해 영상은 프레임 속도 7500fps 조건에서 50 mm 초점 거리 렌즈 (Nikon)가 부착된 고속 카메라 (Photron FASTCAM SA1.1)로 촬영하였다. 피드백이 있는 기존의 유동발진기에서 분출되는 연기 영상은 초당 7500 fps의 속도로 촬영하였고, 공간해상도

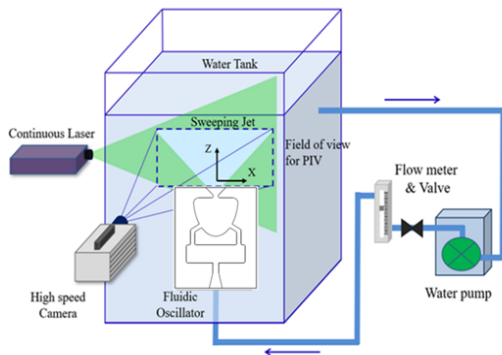


Fig. 5. Experimental setup for time-resolved particle image velocimetry

는 640 x 800 픽셀이며 관찰공간 (FOV)의 크기는 100mm x 120mm 이다. 피드백이 없는 유동 발진기에서 분출되는 스위핑 제트도 동일한 조건에서 고속카메라 촬영을 하였고, 이 영상으로부터 유동 구조와 주파수를 분석하였다.

Fig. 5는 시간 분해 입자 영상유속계 속도 측정 (TR-PIV)에 대한 실험장치를 보여준다. 아크릴로 제작한 유체 발진기는 물 탱크의 중간에 장착되어 있다. 추적입자로는 직경이 10 μ m인 Silver coated hollow glass 이며, 입자의 밀도가 물과 유사하므로 (SG = 1.05) 부력의 영향을 받지 않고 유동을 잘 추적한다. 입자의 영상은 유동가시화 실험과 같은 조건으로 평면광을 조명하여 촬영하였다. 이 때, Reynolds 수의 범위는 4000, 8000 및 12000으로 가시화 실험과 같이 설정되었다. 물의 체적 유량은 유량계 ($\pm 2\%$ 의 RMB 정확도, Dwyer)에 의해 조정되었다. 시간 분해 속도장은 1000fps의 고속 카메라 (Photron FASTCAM SA1.1)로 촬영하였다. 카메라 해상도는 1024 x 1024 픽셀이므로 화소 당 공간의 크기는 0.1 mm x 0.12 mm이다. Two frame 교차 상관법을 사용하여 속도 벡터를 추출 하였다. Interrogation window의 크기는 32 x 32 픽셀로 선택하였고, 50% 겹침 조건에서 속도 벡터를 구하였다. 측정된 순간 속도장들은 MATLAB 후처리 코드 (Para PIV)를 사용하여 오류 벡터를 제거하였다. 오차 벡터를 중간 필터로 제거하고 보간법을 사용하여 얻은 새로운 속도벡터를 대체

하였다. 각각의 실험조건에서 총 10,000 개의 이미지를 사용하여 시간 분해 속도장을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동가시화

Fig. 6의 유동가시화 영상은 Re = 16,000 조건에서 피드백이 없는 유체 발진기에서 분출된 스위핑 제트의 연속적 유동 형태를 보여준다. 연속 광 레이저에서 노즐 중앙 단면에 주사한 평면에 산란된 올리브오일 에어로졸은 유동이 전체적으로 난류임을 보여준다. 노즐 출구에서는 제트가 좌우로 주기적 진동 운동을 하여 정현파 형태의 거동을 보여준다.

Fig. 7의 유동가시화 영상은 Re = 16,000 조건에서 피드백이 있는 유체 발진기에서 분출된 스위핑 제트의 연속적 유동 형태를 보여준다. 한 주기의 사이클에서 동일한 시간 간격으로 촬영한 영상이지만 노즐 벽면 근처의 제트는 정현파 형태의 거동이 아니라 제트가 왼쪽이나 오른쪽

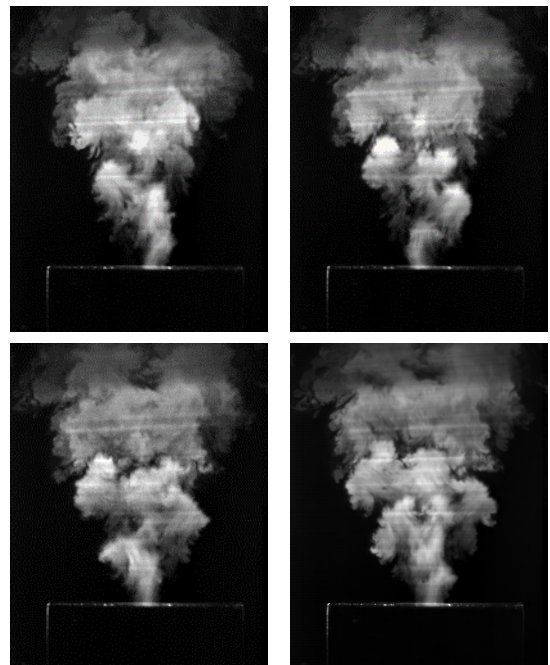


Fig. 6. Flow visualization of feedback-free sweeping jet (Re = 16,000)

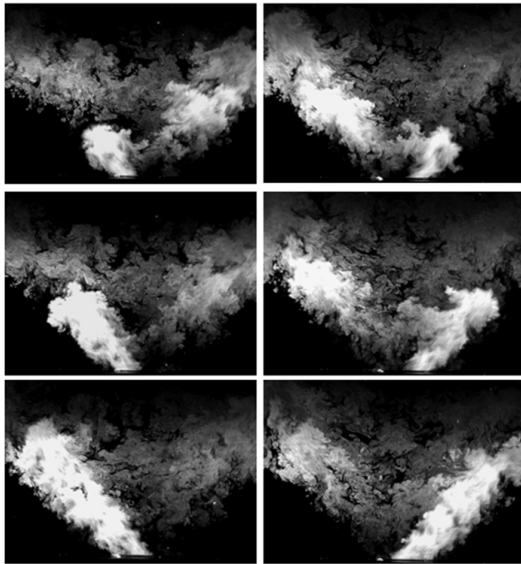


Fig. 7. Flow visualization of feedback-type sweeping jet ($Re = 16,000$)

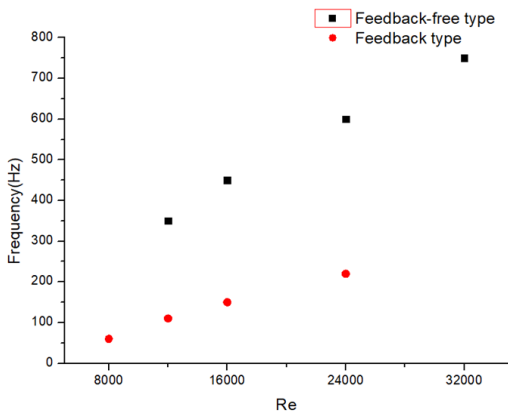


Fig. 8. Comparison between oscillating frequencies of feedback type and feedback-free type sweeping jet

에 치우쳐 있는 시간이 많으며, 방향 전환은 매우 짧은 시간에 이루어 진다. 이 현상은 출구 노즐의 확대 각도가 90° 이고 제트의 진동 각도 역시 90° 가 되기 때문에 코안다 효과로 벽면 부착 시간이 길어진 효과이다[11]. 한편, 피드백이 없는 스위핑 제트의 경우에는 진동 각도가 45° 정도 이므로 제트는 노즐 벽에 부착되지 않았기

때문에 어느 특정 각도에서 머무르는 경향이 없이 정현과 진동을 보이며, 이 현상이 피드백이 있는 기존의 스위핑 제트의 특성과 구별되는 현상이다.

Fig. 8은 Reynolds수에 따른 피드백이 없는 스위핑 제트와 피드백이 있는 스위핑 제트의 진동 주파수를 비교한 그림이다. MATLAB의 고속 푸리에 변환 (FFT) 방법을 사용하여 유동가시화 실험에서 얻는 시계열 이미지로부터 주파수를 추출 하였다. Reynolds수가 증가함에 따라 두가지 형태의 스위핑 제트 모두 발진주파수가 선형적으로 증가하였다. 피드백이 없는 스위핑 제트의 주파수는 동일한 Reynolds 수에서 피드백이 있는 스위핑 제트의 주파수보다 약 3 배 더 큰 값을 가졌다. 피드백이없는 스위핑 제트의 주파수 증가 기울기는 피드백이 있는 경우보다 높음을 알 수 있다. 이는 피드백이 없는 유체 발진기에서 생성된 비정상 유동 주파수가 커서 분출되는 유동의 각도 진폭이 줄어드는 효과와 확대 노즐의 벽면에 제트가 부착되지 않음에 기인된다고 설명할 수 있다. 두 가지 유체 발진기에서의 교란 유동은 실험을 수행한 높은 Reynolds 수 영역에서는 관성력이 지배적이기 때문에 주파수는 유량에 비례하며, 주파수 증가 기울기도 제트의 진동 각도에 반비례하여 선형적인 차이를 보여주고 있다.

3.2 유동 특성

피드백이 없는 스위핑 제트의 2차원 유동 구조 및 유동 특성을 시간 분해 입자 영상유속계 측정법을 사용하여 조사 하였다. Fig. 9는 Reynolds 수 8,000에서 피드백이 없는 스위핑 제트의 한 주기 진동에 대해 노즐 중앙단면에서의 위상 별 순간 속도장을 보여준다. 속도장에는 2차원 속도 벡터와 함께 제트의 분출 속도 (U)로 무차원화한 속도의 크기가 컬러로 표시되어 있다. 순간 속도장의 위상은 측정된 주파수로부터 진동 주기를 시간으로 등가 시켜 구하였다. 제트가 가장 왼쪽으로 치우쳐 있을 때가 0° 위상이며, 정현과의 진동을 하므로 가장 오른쪽으로 치우칠 때가

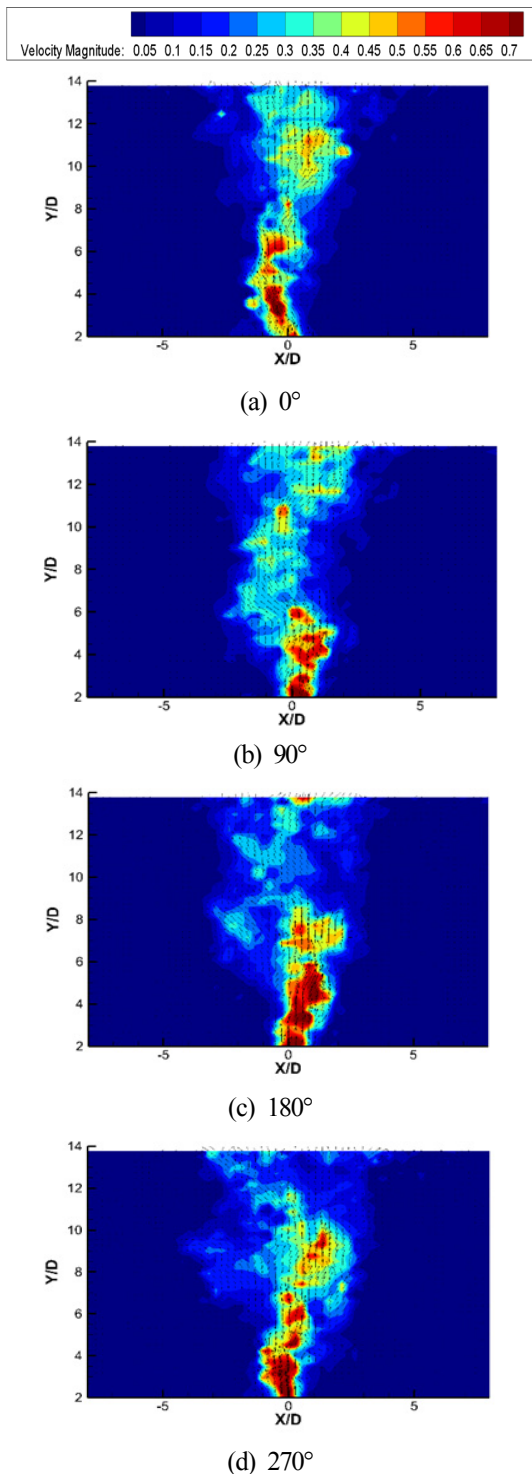


Fig. 9. Instantaneous velocity fields of feedback-free sweeping jet in the streamwise center plane ($Re = 8,000$)

180° 이다. 속도장 추출에 필요한 두 장의 입자 영상의 시간차를 고려하면 위상 오차는 6%이다. 0° 에서 제트의 주 유동은 노즐 출구에서 가장 왼쪽으로 치우쳐 있다. 이 때, 최대 치우침 각도는 약 45° 이다. 순간속도장은 유선을 보여주므로, 하류에 있는 이미 분출된 제트는 중앙에서 오른쪽 위치에 속도 벡터가 위치하며, 전체적으로 비점성 진동 제트의 이론적인 유선인 정현파를 보여주고 있으나 난류로 인한 제트의 확산 현상도 뚜렷이 나타난다. 진동 제트의 파장은 $14D$ 정도임을 알 수 있다. 위상이 90° 일 때 제트의 주유동 방향은 수직으로 바뀌었고, 하류에 있는 이미 분출된 제트는 중앙에서 왼쪽에 속도 벡터가 위치함을 알 수 있고 진동 제트의 파장은 변함이 없다. 제트의 위상이 180° 일 때, 노즐 출구에서 제트는 최대한 오른쪽으로 분출되며 약 30° 의 치우침 각도를 보인다. 이론적으로는 45° 의 각도를 보여주어야 하나, 여기서는 정확히 대칭적인 진동이 아니다. 하지만 순간 속도장의 앙상블 평균에서는 180° 위상에서 45° 의 치우침 각도를 보인다. 제트의 위상이 270° 에서는 다시 수직으로 분출되고 있음을 알 수 있다. 유동의 가시화 실험에서 얻은 이미지는 유맥선(streakline)이므로 비점성 진동 제트의 이론적 유맥선인 확대되는 정현파 형상으로 Fig. 6에 보이는 바와 같다.

Fig. 10은 Reynolds수 8,000조건에서 시간 분해 입자영상유속계로 측정된 피드백이 없는 스위핑 제트의 앙상블 평균 속도장을 보여준다. 평균에 사용한 순간속도장은 10,000개이며, 제트의 중앙 단면에서 위상과 관계없이 평균하였다. 그림에는 노즐로부터 3D, 5D, 8D위치에서 얻은 평균속도 분포가 나타나 있다. 실험은 펌프 용량의 한계로 인해 $Re = 4,000$, $8,000$ 및 $12,000$ 에서 수행되었다. 최대 속도는 $Re = 4,000$ 에서 0.32 m/s 였고, $Re = 12,000$ 에서는 0.8 m/s 로 증가하였다. 세가지 Reynolds수 조건에서 최대 속도로 무차원화한 평균속도는 서로 일치하며, 진동하지 않는 정상상태의 제트처럼 가우스 분포를 가지고 있다. 비교적 출구 근접 영역인 $X/D = 3$ 에서도 가우스 분포를 가진다는 의미는 진동하는 제트의 난

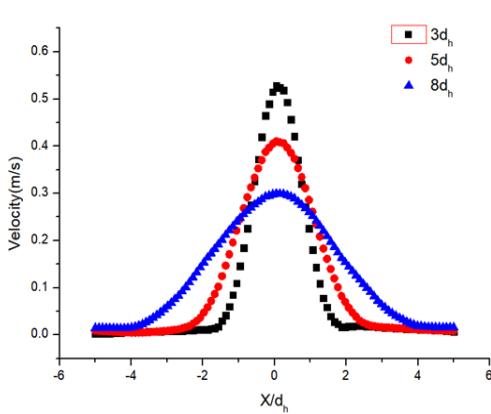


Fig. 10. Mean velocity profiles of feedback-free sweeping jet in the streamwise center plane ($Re = 8,000$)

류 천이가 빨리 일어남을 의미한다. 피드백이 있는 기존의 스위핑 제트의 양상블 평균 속도장은 마치 두 개의 제트가 분출하는 형태로 두 개의 피크를 가진 속도 분포였으나 [11], 피드백이 없는 스위핑 제트는 중심에 단 하나의 피크가 있는 단일 난류 원형제트와 평균 속도가 유사하며, 이는 기존의 일반적인 스위핑 제트와 가장 차이가 나는 특징이다.

Fig. 11은 피드백이 없는 스위핑 제트의 난류 운동 에너지 (TKE) 분포를 보여주고 있다. 본 연구에서는 평면에서의 속도섭동량만 측정 되었으므로 TKE는 $0.5(u'^2 + v'^2)$ 으로 정의하였다. 난류운동에너지는 최대 노즐 속도의 제곱으로 정규화 되었다. 세가지 Reynolds수에서 모두 유사한 형태의 분포를 보여주고 있다. 중앙에서 좌우로 진동하는 제트의 영향으로 노즐 출구 근처에서는 두 개의 TKE 피크가 관찰되었다. 통상적인 정상유동 원형 난류 제트에서도 근접 제트 영역에서 최대 속도구배점에서 두 개의 피크가 발견되며, 이는 양상블 평균 속도가 원형 난류 제트와 유사함에 따라 충분히 예측될 수 있는 결과이다. 그러나 피드백이 없는 스위핑 제트에서는 정현파로 진동하는 거동에 의한 피크도 포함 된 결과이다. 상대적으로 높은 난류운동에너지 영역은 노즐 출구에서 $Y/D = 7$ 까지와 제트의 중심 ($0 < X/D < 1.0$) 근처에서 관찰된다. 순간

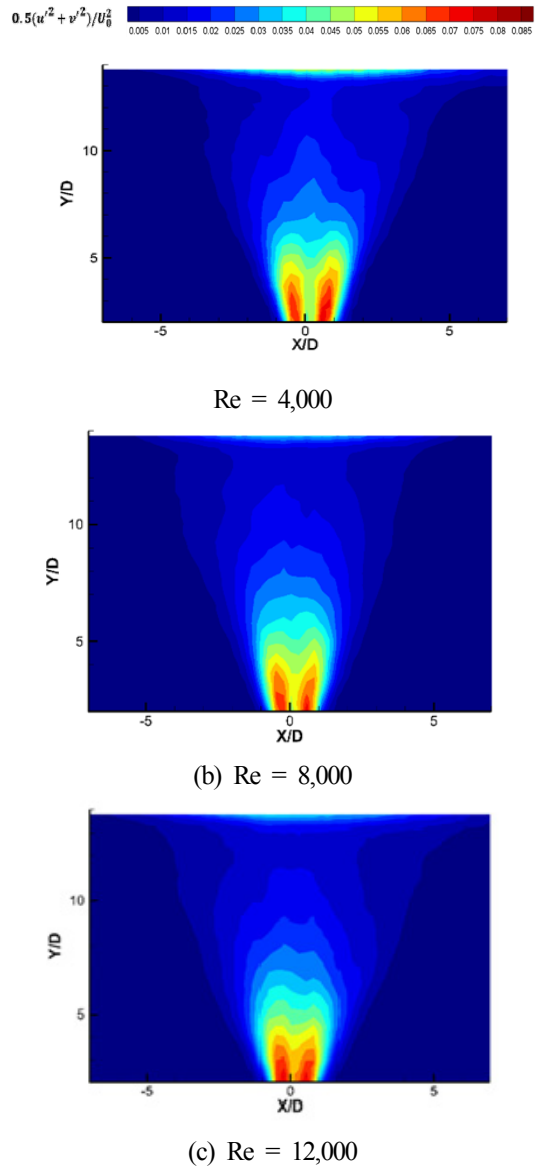


Fig. 11. Normalized turbulent kinetic energy (TKE) of feedback-free sweeping jet

속도장에서 진동 제트의 유동방향 파장이 14D 정도이므로 스위핑 제트의 반 파장까지는 높은 난류운동에너지를 보이고, 이후 급격히 줄어드는 현상을 보였다. 이는 스위핑 제트의 진동으로 운동량 확산이 급격히 진행되는 것으로 설명할 수 있으며, 열전달과 관련하여 생각해 보면 피드백이 있는 스위핑 제트보다는 벽면과의 공간이 더

길어도 좋은 열전달 특성을 가질 것으로 판단되며, 향후 연구를 진행 해야할 주제이다.

4. 결론

본 논문에서는 피드백이 없는 유체 발전기에서 분출되는 스위핑 제트에 대해 유동가시화와 시간분해 입자영상유속계로 유동 특성을 연구하였다. 두 개의 제트가 상호 작용을 하면서 혼합 챔버 내부에 형성시키는 주기적 와류로 인해, 외부로 분출된 스위핑 제트는 종래의 스위핑 제트와 다른 정현파 진동 특성을 보였다. 진동 주파수는 종래의 스위핑 제트의 진동 주파수 보다 동일한 Reynolds 수에서 3배 증가하였고, Reynolds 수가 증가하면 주파수도 선형적으로 증가하였다. 피드백이 없는 스위핑 제트의 진동 각도는 45° 정도로 90°를 보인 기존의 피드백이 있는 스위핑 제트와 차이를 보였다. 제트가 노즐의 양측 벽면에 부착되지 않고 진동 운동을 하므로 진동 주파수도 높았다. 순간 속도장을 보면 피드백이 없는 스위핑 제트가 벽에 부착되지 않고 정현파의 유선을 보여주었다. 양상블 평균 속도장에서 속도 분포는 Reynolds수에 관계 없이 가우스분포를 가지고 있으며, 이는 기존의 스위핑 제트가 가진 두 개의 피크로 V자 형태를 갖는 평균 속도와 현저한 차이가 있음을 보여주었다. 피드백이 없는 스위핑 제트의 속도 분포는 오히려 원형 난류 제트와 더 유사한 유동 특성을 가지고 있음을 밝혔다. 난류운동에너지의 분포 형상 역시 원형 정상 난류 제트와 유사함을 보여주었다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCE

- 1) N. Zuckerman, N. Lior, 2006, "Jet impingement heat transfer: physics, correlations, and numerical modeling", *Adv. Heat Transf.* 39, 565–631.
- 2) H. Wang, W. Yu, Q. Cai, 2012, "Experimental study of heat transfer coefficient on hot steel plate during water jet impingement cooling", *J. Mater. Process. Technol.* 212 (9) 1825–1831.
- 3) P.A. de Oliveira, J.R. Barbosa Jr., 2017, "Novel two-phase jet impingement heat sink for active cooling of electronic devices", *Appl. Therm. Eng.* 12, 952–964.
- 4) Laroche, E., Fenot, M., Dorignac, E., Vuillerme, J., Brizzi, L. E., Larroya, J. C., 2017, "A combined experimental and numerical investigation of the flow and heat transfer inside a turbine vane cooled by jet impingement", *J. Turbomach* 140(3), 031002 (9 pages)
- 5) M. Koklu, 2016, "Effect of a Coanda extension on the performance of a sweeping-jet actuator", *AIAA J.* 54 (3), 1131–1134.
- 6) S. Raghu, 2001, "Feedback-free fluidic oscillator and method," U.S. patent 6,253,782 (3 July 2001).
- 7) H. Martin, 1997, Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces, *Adv. Heat Transf.* 13, 1–60.
- 8) K. Jambunathan, E. Lai, M.A. Moss, B.L. Button, 1992, A review of heat transfer data for single circular jet impingement, *Int. J. Heat Fluid Flow* 13, 106–115.
- 9) X. Wen, Y. Liu, H. Tang, 2018, Unsteady behavior of a sweeping impinging jet: time-resolved particle image velocimetry measurements, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 96, 111–127
- 10) S.H. Kim, H.D. Kim (2019), Quantitative visualization of the three-dimensional flow structures of a sweeping jet, *Journal of Visualization*, 22:437–447
- 11) S.H. Kim, H.D. Kim, K.C. Kim, 2019, "Measurement of two-dimensional heat transfer and flow characteristics of an impinging sweeping jet", *Int. J. Heat Mass Transf.* 136, 415–426.

- 12) W. Zhou, L. Yuan, Y. Liu, D. Peng, X. Wen, 2019, Heat transfer of a sweeping jet impinging at narrow spacings, *Experimental Thermal and Fluid Science* 103, 89–98.
- 13) M. Sitter, 2015, Internal flow of fluidic oscillators: A numerical and experimental investigation, Master of Science Thesis
- 14) J. W. Gregory, J. P. Sullivan, and S. Raghu, 2005, Visualization of jet mixing in a fluidic oscillator, *J. Visualization* 8, 169–176
- 15) Tomac, M. N. and J. W. Gregory, 2018, Oscillation characteristics of mutually impinging dual jets in a mixing chamber, *Physics of Fluids* 30 (11).