

국한 충돌 슬롯 제트의 비정상 거동에 대한 실험적 연구

김경천[†] · 오성진* · 이인원**

Experimental Study on the Unsteady Behavior of a Confined Impinging Slot Jet

Kyung Chun Kim, Sung Jin Oh and In Won Lee

Abstract. The flow characteristics in a confined slot jet impinging on a flat plate were investigated by using cinematic Particle Image Velocimetry technique. The jet Reynolds number was varied from 250 to 1000 for a fixed jet-to-plate spacing of $H/W=5$. We found that the vortical structures in the shear layer are developed with increase of Reynolds number and that the jet becomes unsteady by the interaction of vortex pairs between 500 and 750 of Reynolds number. Vortical structures and their temporal evolution are verified by using proper orthogonal decomposition.

Key Words: Impinging jet(충돌제트), Confined slot jet(국한 슬롯형 제트), Reynolds Number(레이놀즈수), Cinematic PIV(시네마틱 입자영상유속계), POD(Proper Orthogonal Decomposition: 적합직교분해)

기호설명

x, y : 직교 좌표계
 V_j : 노즐출구속도(m/s)
 $V_{j,mean}$: 평균노즐출구속도
 W : 노즐의 폭(mm)
 H : 채널의 폭(mm)
 L : 채널의 길이(mm)
 D : 채널의 폭(mm)
 Re : Jet Reynolds 수
 St : Strouhal 수

1. 서 론

충돌제트는 상대적으로 작은 압력강하로 높은 열전달 효과를 얻을 수 있기 때문에 터빈블레이드 냉각과 연소기 벽면 냉각 그리고 전자부품 내부의 반도체 냉각 등 여러 산업분야에 많이 응용되어 왔다. 충돌제

트에 관한 이전의 연구는 많은 응용성 때문에 고 Reynolds수 영역에서 작동하는 충돌 제트에 주로 집중되었으나 최근에 충돌제트가 좁은 공간에서 많은 열을 발생하는 전자장비 패키지의 냉각 등에 응용되기 시작하면서 충돌제트 표면에 작용하는 높은 압력을 감소시키기 위한 Reynolds수가 낮은 충돌제트에 대한 연구가 수행되고 있다. Sparrow & Wong (1975)⁽¹⁾은 나프탈렌 승화법(naphthalene sublimation technique)을 이용하여 저 Reynolds수 영역($150 < Re < 950$)에서 슬롯충돌제트의 물질전달을 연구하였다. 그리고 물질전달과 열전달과의 유사(analogy)를 통하여 열전달특성을 밝혀내었다. Beitelmal 등⁽²⁾은 저 Reynolds 수 영역에서 충돌제트의 유동 및 열전달 특성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 또한 이들은 제트의 경사각이 충돌제트의 성능에 미치는 영향을 규명하였다. Chung 등⁽³⁾은 Reynolds수가 $Re=300\sim 1000$ 의 범위에서 변할 때 제한된 영역에서 발생하는 슬롯 충돌제트의 비정상 열유동 현상에 대한 계산을 수행하였고, Reynolds 유사성(Reynolds analogy)의 불일치에 대하여 조사하였다. 전자장비 패키지의 냉각의 경우 종종 제트의 유동은 노즐이 위치한 상측면(upper surface)와 충돌면(impingement surface)에 국한되게

[†]부산대학교 기계공학부
E-mail: kckim@pusan.ac.kr

*부산대학교 대학원 기계공학과

**부산대학교 첨단조선공학연구소

되어 자유제트의 거동이 채널의 상하면에서 형성되는 유동과 결부되는 복잡한 유동장을 형성한다. Chiriac & Ortega⁽⁴⁾는 $H/W = 5$ 인 조건에서 슬롯 충돌제트에 대한 유동 및 열전달 특성을 계산하였다. 정상상태에서 유동은 입구로부터 빠져 나온 제트의 중심(Core)이 정체점에 직접적으로 충돌하게 되나 Reynolds 수가 증가함에 따라 유동이 비정상상태로 변하게 되면, 입구로부터 빠져 나온 유체는 정체점에 다다르기 전에 시간의 변화에 따라 매우 복잡한 크고 작은 와(eddy)의 변동에 의해 유동의 대칭성이 깨어지게 된다고 밝히고 있다.⁽⁵⁾ 하지만 저 Reynolds수의 국한 충돌제트의 비정상성을 입증하고 유동구조를 상세히 규명한 실험적 연구는 아직 보고된 바가 없다.

유동장의 동역학적 정보는 유동의 공간적 구조와 이와 연관된 에너지 분포를 알 수 있는 POD(Proper Orthogonal Decomposition)기법을 이용하여 효과적으로 설명할 수 있다. Weitao 등(2003)⁽⁶⁾은 Cinematic PIV 기법을 이용하여 측정된 Round jet의 유동장에 대하여 시분해 POD기법을 적용하여 Round jet의 혼합층에서의 와 구조와 그에 대한 시간적, 공간적 형성과정을 밝혀내었다. POD기법에 의해 유동장은 일련의 고유모드(eigenmode)로 분해될 수 있으며, 각 고유모드는 고유함수(eigenfunction)와 고유치(eigenvalue)로 구성되는데 이들은 연관된 유동구조와 유동의 운동에너지의 정도를 나타낸다. 기존에 제시된 POD 기법은 상당한 계산시간이 필요하였으나, Sirovich(1987)⁽⁷⁾는 계산량을 줄일 수 있는 스냅샷 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 고속 카메라를 이용한 Cinematic PIV 기법을 사용하여 국부충돌제트의 전체 유동장을 측정하고, Reynolds 수의 증가에 따른 유동특성을 분석하고자 한다. 또한 입자영상유속계에 의한 순간 속도장을 입력으로 하여 POD해석을 수행하였다. 이 결과로부터 기본적인 고유모드로부터 전단층에서의 Vortex 생성 현상을 파악하고 Vortex 생성 주기 및 유동현상을 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 슬롯충돌제트의 제원 및 좌표계를 Fig. 1에 나타내었다. 슬롯의 폭(W)은 10 mm이며 채널의 높이(H), 길이(L), 폭(D)은 각각 50 mm, 250 mm, 100 mm이며 채널의 밑바닥은 수면으로부터

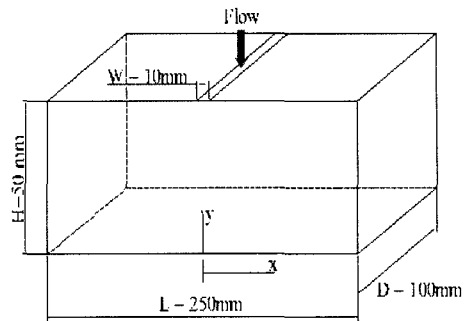


Fig. 1. A schematic of the test section of a confined slot jet.

500 mm인 지점에 위치하고 있다. 작동유체는 물(Water)로써 유동장 측을 위하여 비중이 1.05이하고 평균직경이 8~12 μm 인 중공유리구슬(Hollow glass)입자를 유동 내에 주입하였다. Jet Reynolds 수는 다음과 같이 정의된다.

$$Re = \frac{\overline{WV_j}}{\nu}$$

실험은 $Re=250, 500, 750, 1000$ 인 경우에 대하여 수행하였으며, 이 때 노즐출구속도가 각각 $V_j = 0.0268, 0.0533, 0.0879, 0.125$ m/s이다. 이때 측정영역은 채널 중심($D=50\text{mm}$)에서 수직한 단면으로 그 크기는 $60\text{mm} \times 50\text{mm}$ 이다.

Fig. 2는 실험장치의 전체 개략도를 나타낸다. 유동 내 입자들의 조명을 위해 High-repetition rate Nd:Yag 펄스 레이저가 사용되었으며 원통형 렌즈를 통해

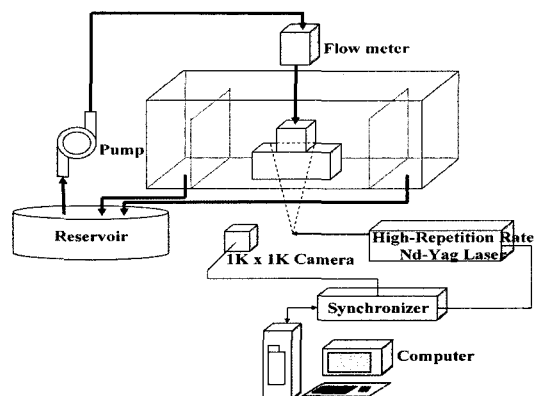


Fig. 2. A schematic diagram of experimental setup.

변형된 평면광이 유동의 x-y 평면에 조사된다. 이때 펄스간의 시간 간격은 1594 μ s이며 초당 628frame의 이미지가 획득된다.

x-y 평면의 2프레임 입자영상은 FLOW MAP 프로그램을 통해 1K \times 1K CMOS 카메라에 의해 획득되어 컴퓨터에 저장된다. 속도검출 알고리즘은 2 프레임 상호상관기법을 이용하였으며 추적구간의 크기는 24 \times 24pixel을 사용하였다.

3. 실험결과 및 검토

제트입구의 속도분포는 전단층(shear layer)의 발달과 밀접한 연관을 갖기 때문에 속도분포에 따라 유동 패턴이 서로 다르다. 따라서 본 연구에서는 제트 입구의 속도분포를 측정하였으며, 속도 분포는 Fig. 3과 같다.

Reynolds수의 증가에 따른 유동특성을 파악하기 위해, 상측면과 충돌면 사이의 2차원 횡단면에 대하여 속도장과 와도장을 살펴 보았다. Fig. 4는 측정영역의 순간 속도장과 순간 와도장을 도식화한 것이다. Re=250의 경우 노즐에서 나오는 유동은 층류이며, 전단층에서 vortex가 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. Re=500의 경우는 속도가 증가함에 따라 vortex 구조가 제트의 전단층에서 발달하면서 제트를 따라 이동하는 것을 확인할 수 있으며, Re=750의 경우에서 전단층에서의 vortex구조가 더욱 발달하며 제트로 유입되는 재순환유동이 관찰된다. 이로부터 재순환영역이 활성화됨을 알 수 있다. Re=1000의 경우 vortex pair가 비대칭적으로 발생하며 제트의 왜곡 및 좌굴 현상

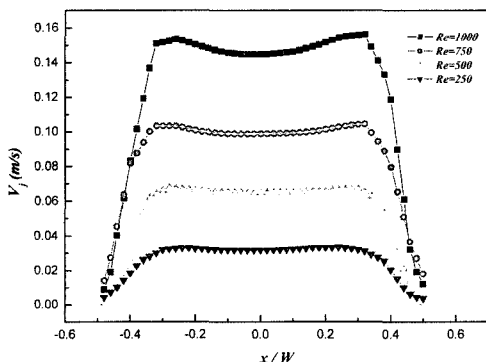
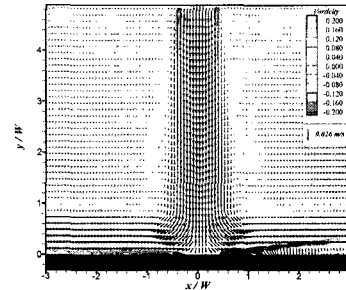


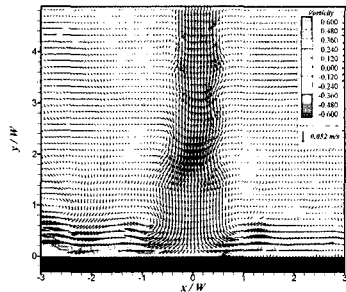
Fig. 3 Distribution of inlet velocity profile.

도 관찰된다.

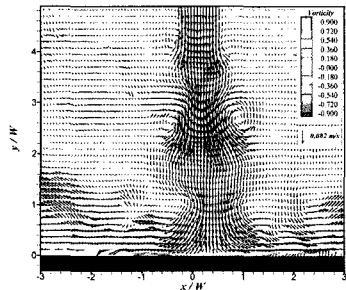
Fig. 5는 축 방향 속도 성분의 크기를 제트의 중심



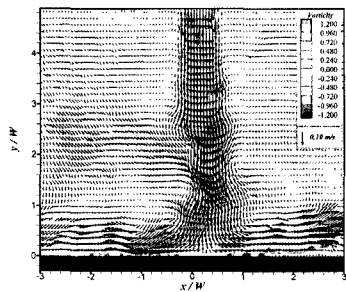
(a) Re=250



(b) Re=500



(c) Re=750



(d) Re=1000

Fig. 4 Instantaneous velocity and vorticity fields.

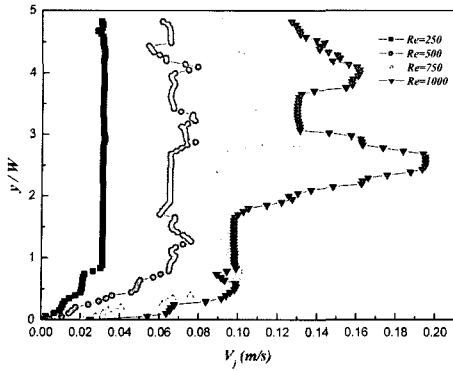


Fig. 5 Instantaneous axial velocity distribution.

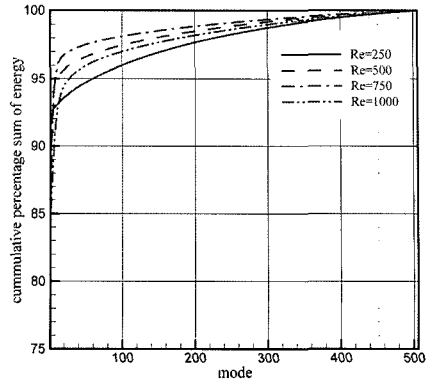


Fig. 6. Cumulative percentage sum of energy.

을 따라 추출한 것이다. $Re=250$ 인 경우 $y/W=1$ 인 지점에서부터 stagnation region이 형성되는 것을 알 수 있다. $Re=500$ 인 경우 축 방향 속도 성분의 변화가 발생하며, $Re=750, 1000$ 인 경우 potential core region, deceleration region과 vortex의 성장에 따른 acceleration region을 볼 수 있다.

전단층에서의 vortex pair의 생성 주기를 파악하기 위하여 POD해석을 수행하였다.

Fig. 6은 POD 해석을 통하여 유동장을 분석한 결과로서, 상부에서 각 Reynolds 수에 대하여 고유 모드들이 기여하는 운동에너지들의 합을 고유 모드 수에 따라 전체 운동에너지와의 비를 나타낸 것이다. $Re=250, 500, 750, 1000$ 에 대하여 각각 10차 모드에 이르러 에너지가 93, 95, 95, 92%까지 축적됨을 확인

하였다. 따라서 작은 구조를 필터링하고 대표적인 동적 구조를 파악하기 위하여 $Re=500, 750, 1000$ 에 대하여 10차 모드까지의 eigenmode의 합으로 유동장을 재구성하였다.

Fig. 7은 $Re=750$ 에 대하여 10차 모드까지의 eigenmode의 합으로 재구성한 유동장과 $x/W=0$ 에 대한 축 방향 속도 성분을 0.06초 간격으로 나타낸 것이다. Fig. 5에서 본 것처럼 vortex pair가 위치한 곳의 축 방향 속도 성분이 potential core region의 축 방향 속도 성분보다 크음을 알 수 있고, vortex pair가 위치한 곳을 기준으로 상하로 deceleration region이 위치함을 알 수 있다. 시간이 지남에 따라 vortex pair가 위치한 곳의 축 방향 속도 성분은 더 증가하였다가 충돌면으로 내려 오면서 감소하며 $y/W=1$ 인 영역

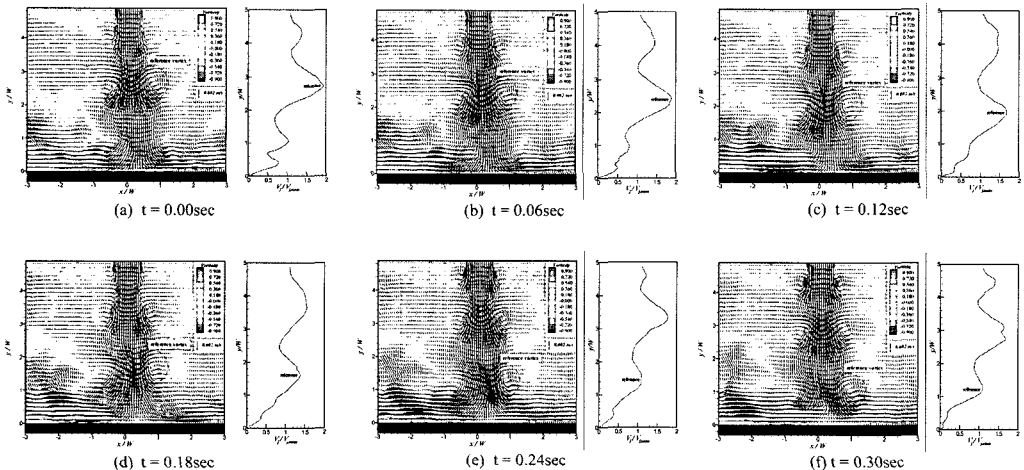


Fig. 7 A sequence of the six instantaneous velocity and vorticity fields with axial velocity distribution.

에서부터는 더 이상 축 방향 속도 성분이 증가하지 않는 것을 볼 수 있다. 또한 축 방향 속도 성분의 pattern이 일정한 주기를 가지고 변화함을 확인할 수 있고 이는 vortex pair의 생성 주기와 일치함을 알 수 있다. 따라서 vortex pair의 생성 주기를 조사하기 위하여 $x/W=0$ 인 지점에서의 축 방향 속도 성분의 시간에 따른 변화를 알아 볼 필요가 있다.

Fig. 8은 $x/W=0$, $y/W=2.5$ 인 지점에 대한 축 방향 속도성분의 시간에 대한 변화를 나타내었다. 시간에 대한 주기성은 vortex pair가 확실하게 형성되어 이동하는 위치와 좌굴이 발생하여 중심축이 이동하는 위치를 피해야하므로 $y/W=2.5$ 를 선택하였다. $Re=500$, 750 , 1000 인 경우에 대하여 각각 대략 0.37 , 0.3 , 0.21

초의 주기로 축 방향 속도성분이 변화함을 확인하였으며, 이로부터 vortex pair는 각각 2.7 , 3.3 , 4.76Hz 로 생성하는 것을 알 수 있다. 이에 해당하는 Strouhal number는 $Re=500$, 750 , 1000 에 대하여 각각 $St=2.53$, 1.90 , 1.90 이다.

4. 결 론

제한된 슬롯형 충돌제트의 유동특성을 Cinematic PIV를 이용하여 노즐 폭을 기준으로 노즐출구속도를 2배, 3배, 4배로 변화시켜 속도분포를 구하였다. 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. $Re=250$ 과 $Re=500$ 사이에서 비정상상태로 넘어가는 천이영역이 존재한다.
2. $Re=500$ 이상의 유동에서는 제트의 전단층에서 vortex pair가 생성되는 것을 확인하였다.
3. Vortex pair의 생성주기를 규명한 결과 $Re=500$, 750 , 1000 에서 Strouhal수가 각각 2.53 , 1.90 , 1.90 이었으며 상대적으로 높은 Reynolds수에서는 1.90 으로 일정해짐을 알 수 있었다.
4. $Re=750$ 이상의 유동에서는 제트 출구에서 전단층에서의 vortex pair가 생성되며 vortex pair가 아래로 내려오면서 점차 불안정해지고 제트의 좌굴을 야기한다.

후 기

본 연구는 두뇌한국 21 핵심사업의 연구비 지원과 부산대학교 첨단조선공학연구센터의 장비지원에 의해 수행되었다.

참고문헌

- 1) Sparrow, E.M. and Wong, T.C., 1975, "Impingement Transfer Coefficients due to Initially Laminar Slot Jets," *Int.J.Heat Mass Transfer*, Vol.21, pp.156-163.
- 2) Beitelmal, A.H., Saad, M.A. and Patel, C.D., 2000, "The Effect of Inclination on the Heat Transfer Between a Flat Surface and Impinging Two-dimensional Air Jet," *Int.J. Heat & Fluid Flow*, Vol.18, pp.597-605.
- 3) Chung, Y.M., Luo, K.H. and Sandham, N.D., 2002, "Numerical Study of Momentum and Heat Transfer

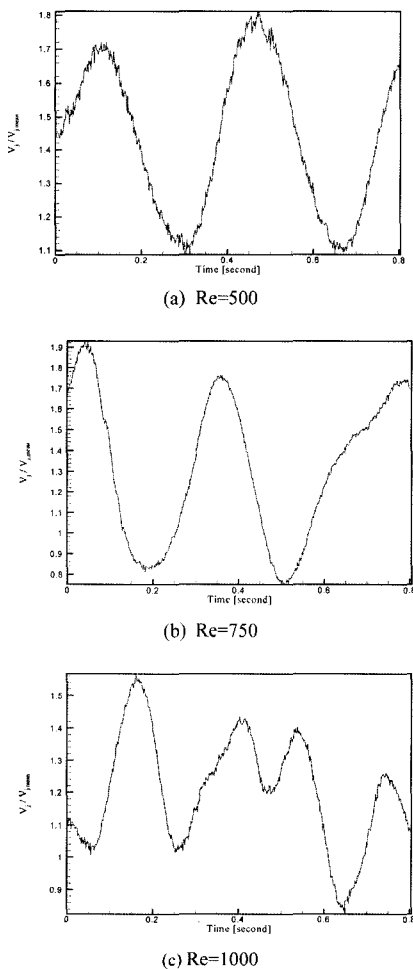


Fig. 8. Variation of axial velocity at the point (0, 2.5).

- in Unsteady Impinging Jets,” *Int.J.Heat Fluid flow*, Vol.23, pp.592-600.
- 4) Chiriac, V.C. and Ortega, A., 2002, “Numerical Study of Unsteady Flow and Heat transfer in a Transitional Confined Slot Jet Impinging on an Isothermal Surface,” *Int.J.Heat Mass Transfer*, Vol.45, pp. 1237-1248.
- 5) Lee, H.G, Ha, M,Y, Yoon, H.S. and Hong S.D., 2005, “A Numerical Study on the Impinging Jet Flow Characteristics in the Presence of Applied Magnetic Fields,” *Trans. of the KSME (B)*, Vol.29., no.5, pp. 537-544.
- 6) Weitao Bi, Yasuhiko Sugii, Koji Okamoto and Haruki Madarame., 2003, “Time-resolved proper orthogonal decomposition of the near-field flow of a round jet measured by dynamic particle image velocimetry,” *Meas. Sci. Technol*, Vol.14, L1-5.
- 7) L Sirovich., 1987, “Turbulence and The Dynamics of Coherent Structures PART : Coherent Structures,” *Quarterly of Applied Mathematics*, pp. 561-571