

국한 충돌 제트의 비정상 거동에 대한 실험적 연구

김경천[†] · 오성진* · 이인원**

Experimental Study on the Unsteady Behavior of a Confined Impinging 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 cinematic Particle Image Velocimetry technique.

Key Words : Impinging jet(충돌제트), Confined slot jet(국한 슬롯형 제트), Reynolds Number(레이놀즈수), Cinematic PIV(시네마틱 PIV)

기호설명

- x, y : 직교 좌표계
 V_j : 노즐출구속도(m/s)
 $\overline{V_j}$: 노즐출구평균속도
 W : 노즐의 폭(mm)
 H : 채널의 폭(mm)
 L : 채널의 길이(mm)
 D : 채널의 폭(mm)

1. 서 론

충돌제트는 상대적으로 적은 압력강하로 높은 열전달 효과를 얻을 수 있기 때문에 터빈블레이드 냉각과 연소기 벽면 냉각 그리고 전자부품 내부의 반도체 냉각 등 여러 산업분야에 많이 응용이 되어 왔다. 충돌제트에 관한 이전의 연구는 많은 응용성 때문에 고 레이놀즈 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 레이놀즈수가 낮은 충돌제트에 대한 연구가 수행되고 있다. Sparrow & Wong(1975)⁽¹⁾은 나프탈렌 승화법(naphthalene sublimation technique)을 이용하여 저 레이놀즈 수 영역($150 < Re < 950$)에서 슬롯충돌제트의 물질전달(mass transfer)을 연구하였다. 그리고 물질전달과 열전달과의 유추(analogy)를 통하여 열전달특성을 밝혀내었다. beitelmal 등⁽²⁾은 저 레이놀즈 수 영역에서 충돌제트의 유동 및 열전달 특성에 대한 실험적 연구를

[†] 회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : kckim@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2324 FAX : (051)515-7866

* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 부산대학교 첨단조선공학연구소

수행하였다. 또한 이들은 제트의 경사각이 충돌 제트의 성능에 미치는 영향을 규명하였다. Chung 등⁽³⁾은 레이놀즈 수가 $Re=300\sim1000$ 의 범위에서 변할 때 제한된 영역에서 발생하는 슬롯 충돌제트의 비정상 열유동 현상에 대한 계산을 수행하고, 레이놀즈 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 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 조사하였다. 정상상태에서 유동은 입구로부터 빠져나온 제트의 중심(Core)이 정체점에 직접적으로 충돌하게 되나 Re 수가 증가함에 따라 유동이 비정상상태로 변하게 되면, 입구로부터 빠져나온 유체는 정체점에 다다르기 전에 시간의 변화에 따라 매우 복잡한 크고 작은 와(eddy)의 변동에 의해 유동의 대칭성이 깨어지게 된다고 밝히고 있다.⁽⁵⁾

본 연구에서는 고속 카메라를 이용한 Cinematic PIV 기법을 사용하여 국부충돌제트의 전체 유동장을 측정하고, 레이놀즈 수의 증가에 따른 유동특성을 분석하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 슬롯충돌제트의 제원 및 좌표계를 Fig.1에 나타내었다. 슬롯의 폭(W)은 10mm이며 채널의 높이(H), 길이(L), 폭(D)는 각각 50mm, 250mm, 100mm이다. 채널의 밑바닥은 수면으로부터 500mm인 지점에 위치하고 있다. 작동유체는 물(Water)이며, 유동장 계측을 위하여 비중이 1.05이하이며, 평균직경이 8~12 μ m인 속이 빈 유리구슬(Hollow glass)입자를 유동 내에 주입하였다. 제트 레이놀즈 수는 다음과 같이 정의된다.

$$Re = \frac{W\bar{V}_j}{\nu}$$

실험조건은 $Re = 250, 500, 750, 1000$ 인 경우에 대하여 평균노즐출구속도가 각각 $\bar{V}_j = 0.02873, 0.05948, 0.08408, 0.11189$ m/s이다. 이때 측정영역

은 채널 중심($D=50$ mm)에서 수직한 단면이며, 측정영역의 크기는 50mm×50mm이다.

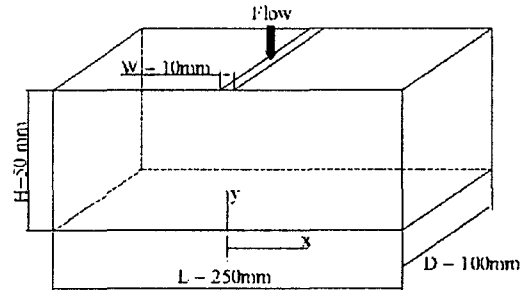


Fig. 1 A schematic of the test section of a confined slot jet

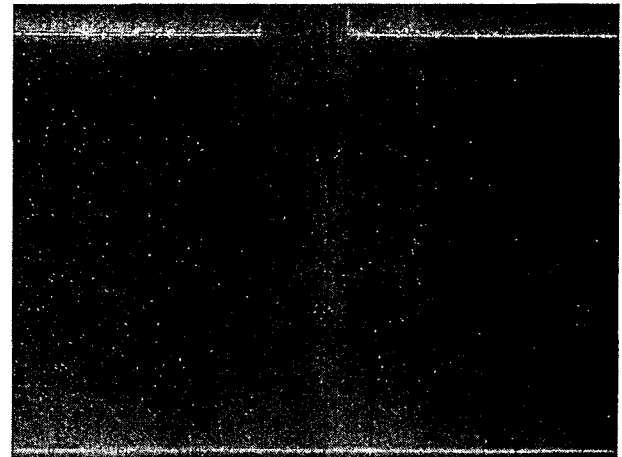


Fig. 2 A photograph of the test section of a confined slot jet

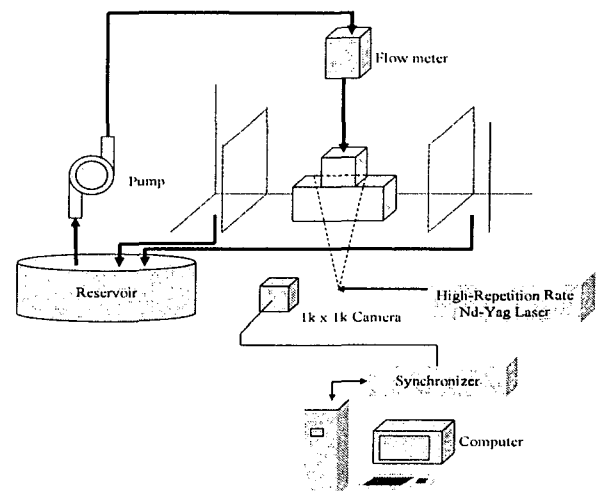


Fig. 3 A schematic diagram of experimental setup

Fig.3는 실험장치의 전체 개략도를 나타낸다. 유동 내 입자들의 조명을 위해 High-repetition rate Nd:Yag 펄스 레이저가 사용되었으며 원통형 렌즈를 통해 평면광으로 유동의 x-y평면에 조사된다. 이때 펄스간의 시간 간격은 제트출구속도에 비례하여 $\overline{V}_j = 0.02873, 0.05948, 0.08408, 0.11189$ m/s 인 경우에 각각 5025, 3188, 1594, 1594 μ s를 적용하였다.

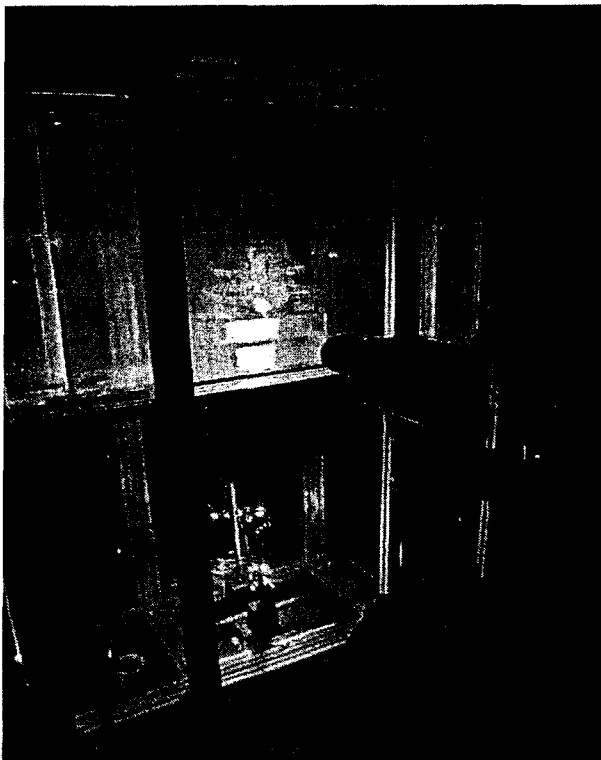


Fig. 4 A photograph of experimental setup

x-y 평면의 2프레임 입자영상은 FLOW MAP 프로그램을 통해 1kx1k CMOS 카메라에 획득되어 컴퓨터에 저장된다. 속도검출 알고리즘은 2프레임 상호상관기법을 이용하였으며 추적구간의 크기는 24pixelx24pixel을 사용하였다.

3. 실험결과 및 검토

제트입구의 속도분포(profile)는 전단층(shear layer)의 발달과 밀접한 연관을 갖기 때문에 속도 분포에 따라 유동패턴이 서로 다르다. 따라서 본 연구에서는 제트 입구의 속도분포를 측정하였으며, 속도 분포는 Fig.5과 같다.

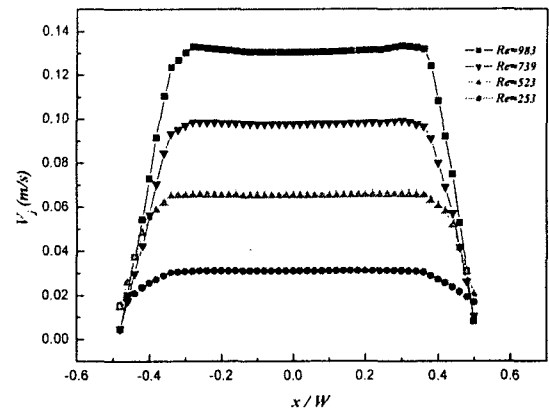
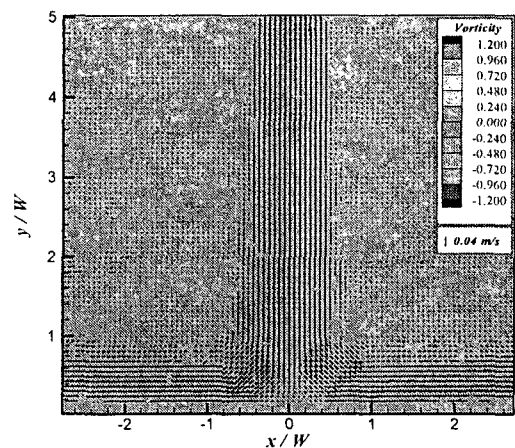
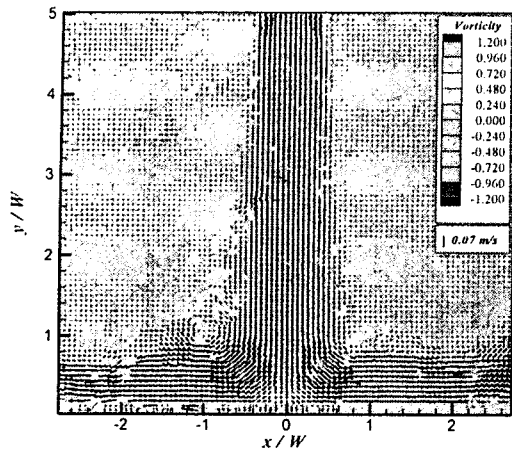


Fig. 5 Distribution of inlet velocity profile

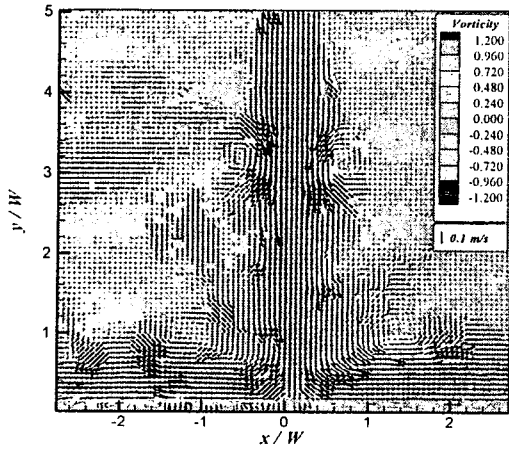
레이놀즈 수의 증가에 따른 유동특성을 파악하기 위해, 상측면과 충돌면 사이의 2차원 횡단면에 대하여 속도벡터와 와도를 살펴 보았다. Fig.6는 측정영역의 속도벡터와 와도를 도식화한 것이다. Case 1의 경우, Re=250에 해당하는 것으로서, 노즐에서 나오는 유동은 층류이며, 전단층에서 와가 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. Case 2는 Re=500에 해당하는 것으로 속도가 증가함에 따라 와 구조가 제트의 전단층에서 발달하면서 제트를 따라 이동하는 것을 확인할 수 있다. Case 3은 Re=750에 해당하는 것으로 Case 2와 비교하여 볼 때 전단층에서의 와 구조가 더욱 발달하며 제트로 유입되는 유동이 관찰된다. 이로부터 재순환영역이 활성화됨을 알 수 있다. Case 4는 Re=1000에 해당하는 것으로 와쌍이 비대칭적으로 발생하며 제트의 외곽 및 좌굴 현상도 관찰된다.



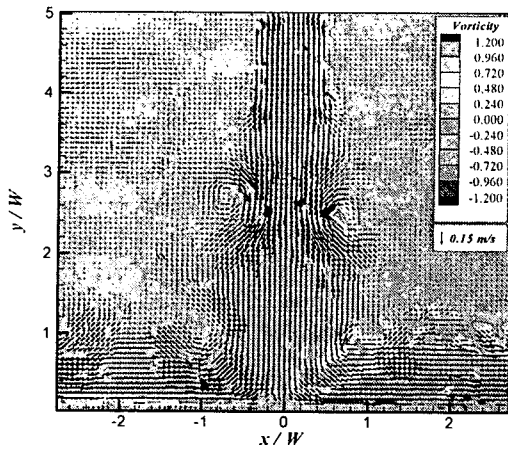
(a) Case 1 : Re=250



(b) Case 2 : Re=500



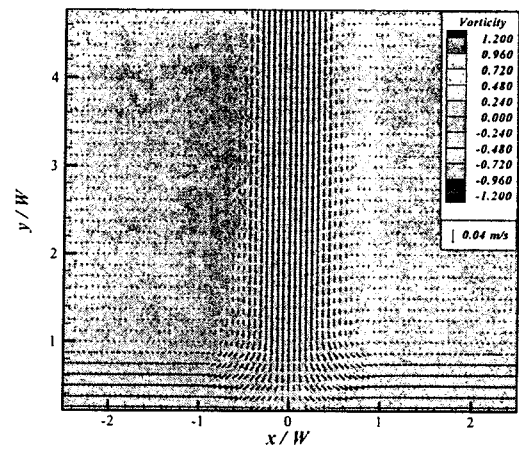
(c) Case 3 : Re=750



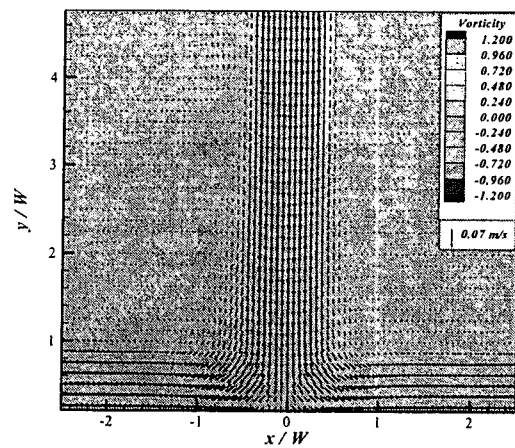
(d) Case 4 : Re=1000

Fig.7는 0.81초 동안의 측정시간에 대한 측정영역의 평균속도장과 와도장을 나타낸 것이다. Case 1의 경우, Fig.6의 순간속도장과 거의 다르지 않으며 이로부터 Re=250인 경우 유동장은 정상상태임을 알 수 있다. Case 2는 Re=500에 해당하는 것으로 Re=250과 비교하여 볼 때 노즐 출구에서의 와도가 증가하였음을 알 수 있다.

Case 3과 4는 각각 Re=750과 1000에 해당하는 것으로 속도가 증가함에 따라 전단층에서의 와도가 높아짐을 알 수 있다. 또한 평균유동장임에 불구하고 제트의 중심이 한쪽으로 편향됨을 볼 수 있는데, 이는 0.81초보다 더 긴 주기를 가지는 유동구조의 영향 때문이라고 생각된다.

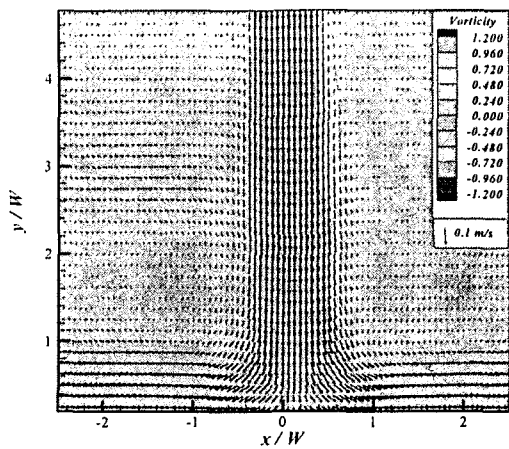


(a) Case 1 : Re=250

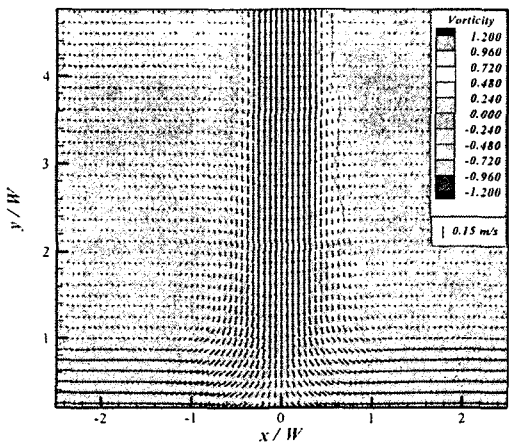


(b) Case 2 : Re=500

Fig. 6 Instantaneous velocity and vorticity fields



(c) Case 3 : Re=750



(d) Case 4 : Re=1000

Fig. 7 Mean velocity and vorticity fields

4. 결론

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

1. Re=250과 Re=500사이 비정상상태로 넘어가는 천이영역이 존재한다.
2. Re=500의 유동에서는 제트 좌우의 전단층에서 와쌍이 생성되고 충돌면으로 내려오지만 제트 중심의 좌굴에는 영향을 끼치지 않는다.
3. Re=750의 유동에서는 대칭적으로 하강하는 와쌍의 균형이 깨어지면서 비대칭유동이 발생하며 이로 인해 제트 중심에 좌굴이 발생한다. 따

라서 정상유동에서 비정상유동으로 발전하는 Reynolds number는 이 영역 안에 있다고 할 수 있다.

후 기

본 연구는 두뇌한국 21 핵심사업의 연구비 지원에 의해 수행되었다.

참 고 문 헌

- 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 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.