노즐형상 변화에 따른 국한 슬롯형 제트의 비정상 거동에 대한 실험적 연구

민영욱*• 김경천†

An experimental study of the unsteady flow in a confined slot jet by the change of nozzle shape

Kyung Chun Kim and Young Uk Min

Abstract

The flow characteristics in a confined slot jet impinging on a flat plate were investigated by using cinematic Particle Image Velocimetry technique. The three different kinds of confined slot were applied to the jet with a view to evaluating the shape effect and the jet Reynolds number was varied from 250 to 1000 for a fixed jet-to-plate spacing of H/W=5. It was found that the vortex 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. Finally, the slot shape was proved to be related with the generation timing of vortex pair and the temporal vortex structure.

Key Words : Confined Slot Jet (국한 슬롯 제트), Vortex Pair(와쌍), Unsteady Flow(비정상 유동)

기호설명(선택사항)

x, y	: 직교 좌표계
V_j	: 노즐출구속도(m/s)
W	: 노즐의 폭(mm)
H	: 채널의 폭(mm)
L	: 채널의 길이(mm)
D	: 채널의 폭(mm)

† 부산대학교 기계공학부
E-mail : kckim@pusan.ac.kr
* 부산대학교 대학원 기계공학과

1. 서 론

충돌제트는 상대적으로 적은 압력강하로 높은 열전달 효과를 얻을 수 있기 때문에 제지 또는 필름의 건조 공정, 유리/금속의 제조공정, 터빈 블레이드 냉각과 연소기 벽면 냉각 그리고 전자부품 내부의 반도체 냉각 등과 같은 다양한 산업분야에 활발히 응용되어 왔다. 따라서, 이와 관련된 제트 관련 선행연구는 노즐과 평판 사이의 거리, 출구 노즐의 형상, 제트의 온도, 노즐과 평판 사이의 각도, 제트 배치(jet configuration), 횡단류(cross flow), 그리고 충돌 면의 형상과 열 전달 효과 등의 다양한 인자와 변수들에 대하여 상당한 연구가 진행되어왔으며 특히 산업 응용면에서 활용도가 높은 고 Reynolds 수 영역의 제트에 관한 연구가

주로 수행되어 왔다. 그러나 최근 충돌제트가 좁은 공간에서 많은 열을 발생하는 전자장비 패키지의 냉각 등에 응용되기 시작하면서 공간적으로 제한된 국한 슬롯형 제트의 유동현상에 관한 연구가 조명을 받고 있으며 특히 충돌제트로 인해 대상표면에 작용하는 높은 압력을 감소시키기 위하여 저 Reynolds 구간에 해당하는 충돌제트의 거동해석에 관한 연구가 수행되고 있다.

선행연구로서 최근 Chiriac & Ortega[1]는 H / W = 5 인 조건에서 슬롯 충돌제트에 대한 유동 및 열전달 특성을 조사하였는데 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 된다는 사실을 전산해석을 통해 밝히고 있다.

이처럼 지금까지 수행된 선행연구결과로부터 저 Reynolds 수의 제한된 충돌제트의 비정상성을 입증하고 유동구조를 상세히 규명한 실험적 연구는 아직 보고된 바가 없으므로 본 연구에서는 고속 카메라를 이용한 Cinematic PIV 기법을 이용하여 국부충돌제트의 비정상유동으로의 천이과정을 측정하고, 레이놀즈 수의 변화와 슬롯의 형태에 따른 유동구조 및 비정상유동의 변화특성을 실험적으로 분석함으로써 저 레이놀즈 영역에서의 국한충돌제트의 비정상 유동현상을 규명하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치의 구성

본 연구에 사용된 슬롯충돌제트의 실험장치 개략도를 Fig. 1 에 나타내었다. Cinematic PIV 기법을 이용한 유동장 측정을 위해 광원으로써 High-repetition rate Nd:Yag 펄스 레이저를 사용하였으며 원통형 렌즈를 통해 평면광을 검사영역 내에 조사하고 Dantec 사의 1k×1k CMOS 고속카메라를 통해 유동장 내 입자이미지를 획득하였다. 수동은 순환형 저속 수동으로 수조, 액체 펌프(pump), 확대부(Diffuser), 정류실(Plenum), 노즐부(Nozzle), 실험부분으로 구성하였다. Fig. 2 는 충돌제트의 유동을 측정하기 위한 시험구간을 나타낸 그림으로 길이 250mm, 폭 100mm, 높이 50mm 의 크기의 직사각형 채널 형태를 가지며 두께 10mm 의 아크릴로 제작되었으며 Fig.3 의 세 가지 채널을 사용하여 실험을 수행하였다.

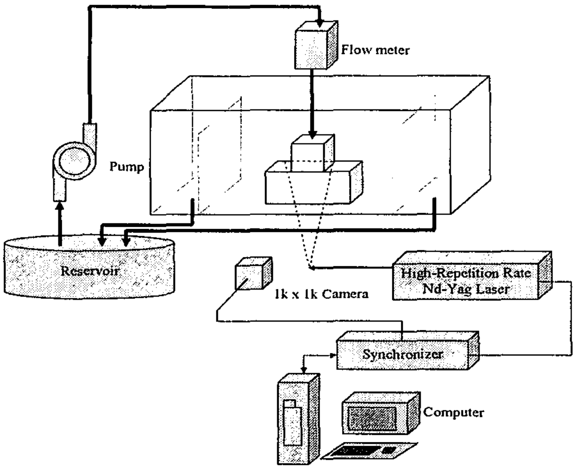


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

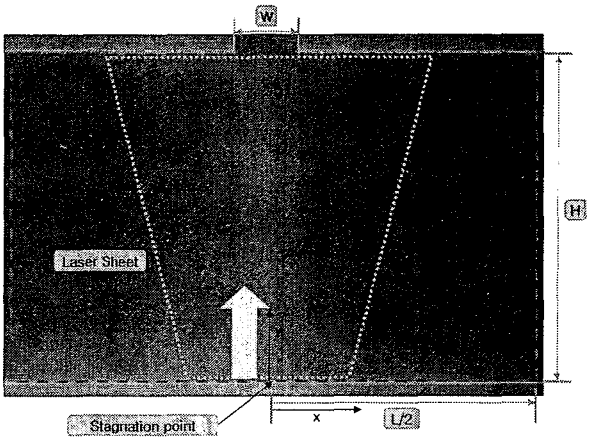


Fig. 2 Geometry of the test section

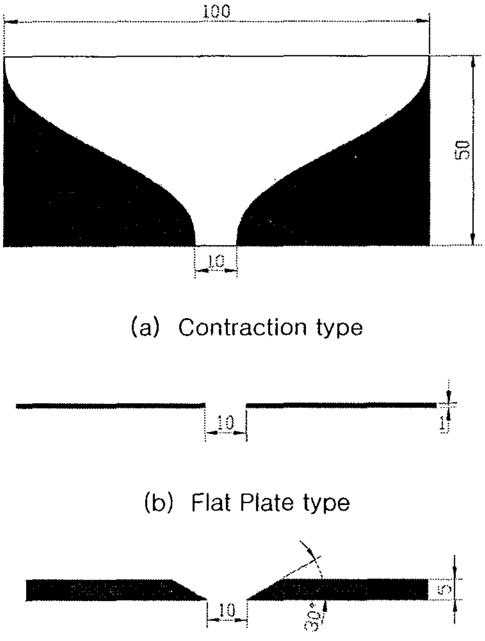
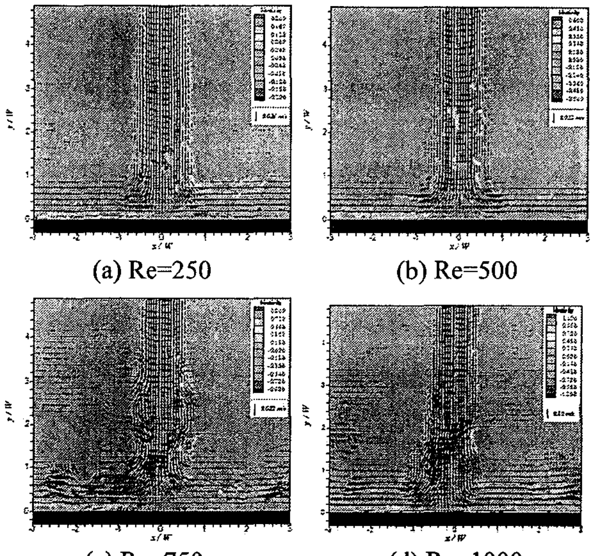


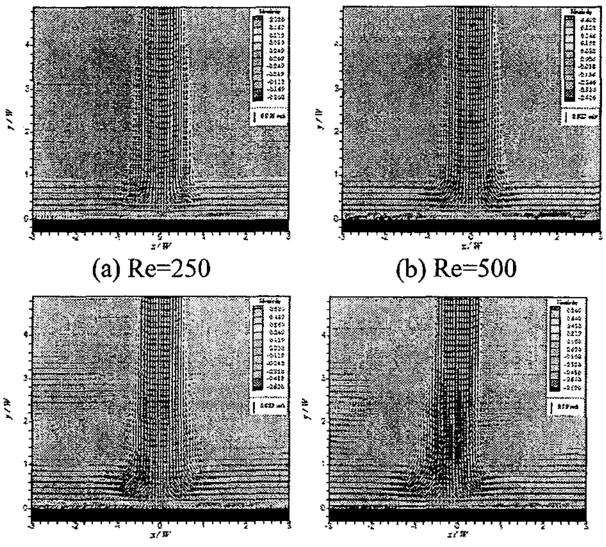
Fig. 3 Nozzle shapes



(a) Re=250 (b) Re=500

(c) Re=750 (d) Re=1000

Fig. 4 Instantaneous velocity and vorticity fields of the contraction type nozzle(-3<x/W<3)



(a) Re=250 (b) Re=500

(c) Re=750 (d) Re=1000

Fig. 5 Mean velocity and vorticity fields of the contraction type nozzle(-3<x/W<3)

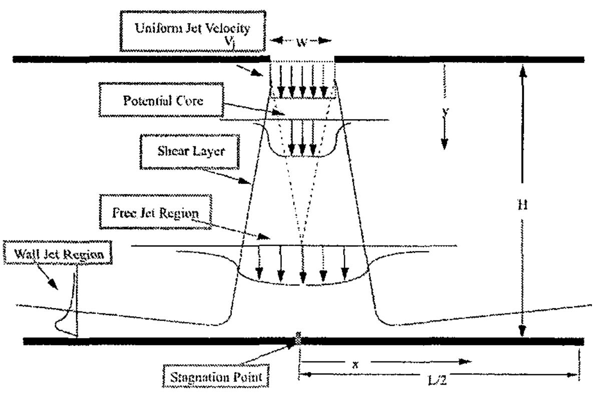
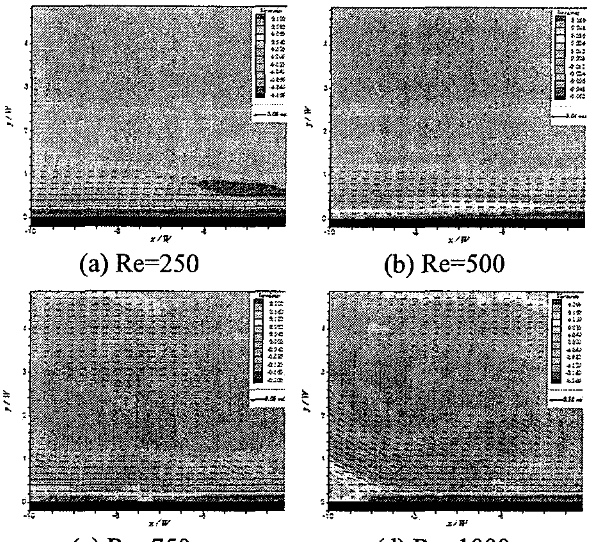


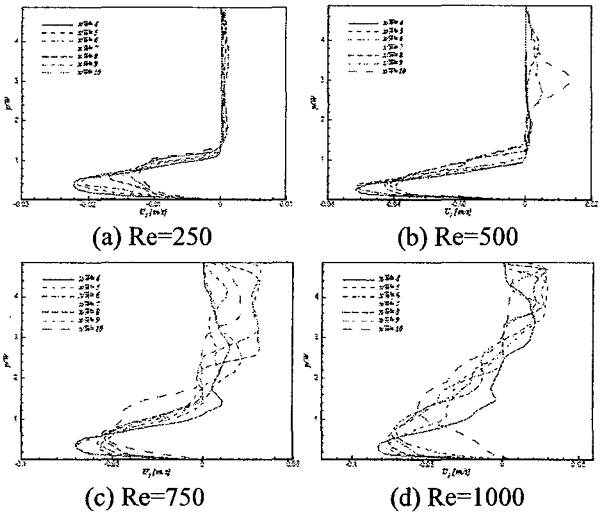
Fig. 6 The geometry of a two-dimensional confined impinging jet



(a) Re=250 (b) Re=500

(c) Re=750 (d) Re=1000

Fig. 7 Mean velocity and vorticity fields of the contraction type nozzle (-10<x/W<-4)



(a) Re=250 (b) Re=500

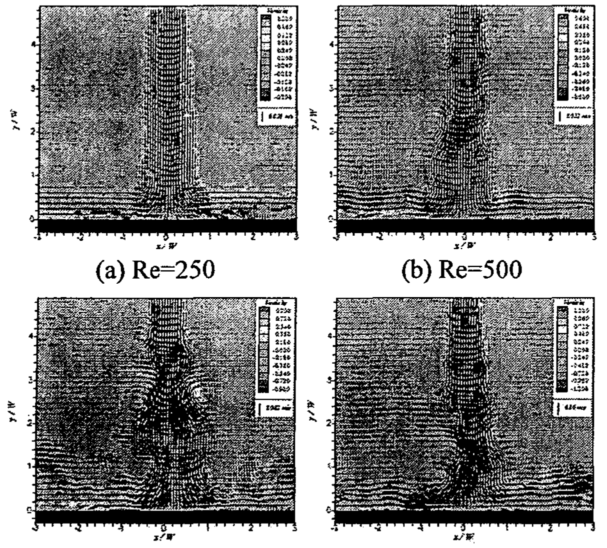
(c) Re=750 (d) Re=1000

Fig. 8 Lateral velocity distribution of the contraction type nozzle (-10<x/W<-4)

3. 3 실험결과

3.1 속도장 결과

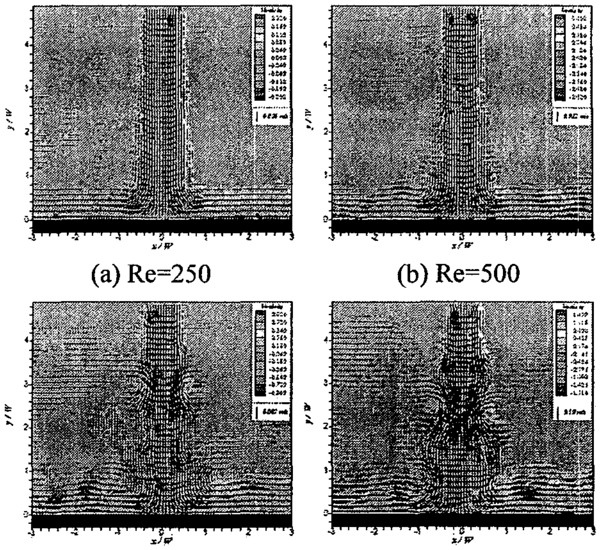
Fig. 4 는 Contraction type 노즐에 대한 충돌제트의 순간속도장의 이미지를 Re= 250 ~ 1000 인 구간에 대하여 측정한 결과이다. Re=250 과 Re=500 의 경우, 유동은 안정적인 층류유동을 보여주나 Re=750 의 경우 제트를 중심으로 하여 양측에 동일한 형태의 와쌍(vortex pair)이 형성되면서 충돌벽면 쪽으로 진행하는 모습을 확인할 수 있었다. 이 때 와쌍의 생성주기가 같아 유동이 비정상(unsteady) 상태로 천이되면서 발생하는 주류(main stream)의 요동 현상은 보이지 않았다.



(a) Re=250 (b) Re=500

(c) Re=750 (d) Re=1000

Fig. 9 Instantaneous velocity and vorticity fields of the flat plate type nozzle(-3<x/W<3)



(a) Re=250 (b) Re=500

(c) Re=750 (d) Re=1000

Fig. 10 Instantaneous velocity and vorticity fields of the flat sharp edge type nozzle(-3<x/W<3)

유동이 Re=1000 에 이르면서 와쌍의 생성주기가 엇갈리며 유동이 정체점의 좌우로 요동하는 현상을 확인할 수 있었으며 Fig. 6 의 평균속도장 결과에서 코안다 현상(Coanda effect)에 의해 제트중심이 좌측으로 좌굴되는 현상을 확인할 수 있었다. 따라서, 층류유동이 비정상상태로 발달하는 천이구간은 Re=750~1000 사이에 있음을 알 수 있으며 이는 Victor A. Chiriac 의 전산해석결과에서 천이지점이 Re=325~375 임을 언급했던 사실과 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 사용된 contraction 노즐입구의 제트유동 단면속도프로파일이 노즐벽면의 점성저항에 의하여 Fig. 6 과 같이 균일한 유동(uniform flow)형상을 지니지 못하고 완곡한 곡선의 발달유동형태 지니는데 기인한 것으로 판단된다. 즉, 이론적으로 가정된 충돌제트의 노즐간격 W 와 비교하여 본 연구에서 균일유동생성을 위해 적용 되어야하는 실질적 노즐간격 W 은 더 작은 값을 가짐을 알 수 있으며 이는 실험적 제트유동의 레이놀즈수가 낮아짐을 의미하는 것이다.

Fig. 7, 8 은 벽면제트유동을 측정한 결과로 Re=250~500 영역에서는 충돌제트로의 유입유동이 거의 확인되지 않으나 Re=750~1000 영역에서는 y/W=2 인 지점에서 채널상부까지 크게 증가하는 것을 알 수 있으며, 특히 Re=1000 의 경우 유입유동이 증가함에 따라 벽면제트가 충돌벽면으로부터 분리되며 거대 와구조가 생성되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 9 은 Flat Plate Type 의 노즐에 대한 충돌제트의 속도장 결과로 Contraction Type 노즐과 달리 Re=500 의 영역에서 와쌍이 생성되는 현상을 보였으며 이는 특성길이인 W 의 크기가 contraction type 노즐보다 큰 것을 유추할 수 있다. Fig.10 은 sharp edge type 의 유동측정 결과로 Contraction type 의 노즐과 근접한 레이놀즈수 영역에서 천이구간을 가지는 사실을 확인할 수 있다.

4. 결 론

충돌제트유동은 각 노즐의 형상에 따라 노즐출구에서의 속도프로파일이 달라져 정상상태에서 비정상상태로 천이되는 레이놀즈수에 영향을 미치며 생성된 와쌍은 벽면제트로부터 역유입된 유동의 간섭으로 인해 간섭을 받으며 주기가 달라져 충돌제트의 요동현상을 일으킨다.

참 고 문 헌

1) Chiriac, V.C. and Ortega, A., 2002, "Numerical Study of Unsteady Flow and Hear transfer in a Transitional Confined Slot Jet Impinging on an Isothermal Surface," Int.J.Heat Mass Transfer, Vol.45, pp.1237~1248.
2) Park, T.H, Choi, H.G. and Yoo, J.Y., 2000, "Numerical Simulation of Two Dimensional Impinging Slot Jet," Trans. of the KSME (B), pp. 603~608
3) 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.