

충돌 Jet에서 Rod 형상에 따른 유동특성의 PIV 측정에 의한 연구

주은선† · 나우정** · 정진도*** · 송민근**** · 이상범**** · 손승우****

(원고접수일 : 2003년 5월 30일, 심사완료일 : 2003년 12월 12일)

A Study on the Flow Characteristics according to the Shapes of Rod on Impinging Jet by PIV Measurement

Eun-Sun Ju* · Woo-Jung La** · Jin-Do Jung*** · Min-Geum Song**** · Sang-Bum Lee**** ·
Seun-Woo Son****

Abstract : The thermal load is a very important problem to be solved in many industrial systems including the electronic equipment. Impinging Jets have been known to provide a large heat transfer rates on surface for many years. The turbulence enhancement of fluid flow is requested for the efficiency elevation of heat transfer. A study on flow fields by rods attached to the wall surface as a promoter of turbulence enhancement has been carried out. The exact analysis on characteristics of impinging jet field is requested to obtain the optimum design of the impinging jet system. By visualizing the flow field and processing the high digital image by computer, PIV can afford exact data on the velocity vector, kinetic energy, and turbulence intensity in the complex turbulence field. In this study, three kinds of rod shape such as square, triangle, and semicircle are selected as the turbulence promoter. Nozzle diameters are 10mm, 17mm, and 23mm. And the analysis of the flow characteristics due to the above rods is carried out at Re No. 2,000, 3,000, and 4,000 by PIV measurement. It is clarified that the rod setup is very useful to obtain the turbulence enhancement and the turbulence intensity according to the shapes of rod appears large in order of the shapes of rod such as square > triangle > semicircle.

Key words : Flow Characteristic(유동특성), Rod Shape(로드형상), Impinging Jet(충돌분류), PIV(입자 영상 유속계), Turbulence Enhancement(난류증진)

† 책임저자(경상대학교 기계항공 공학부, 항공기 부품 기술연구센터, 공학연구원),

E-mail : esju@nongae.ac.kr, T : 055)751-5311

** 경상대학교 농업시스템 공학부, 농업생명과학연구원

*** 호서대학교 환경공학부, 환경기술연구소

**** 경상대학교 대학원

1. 서 론

산업의 발달로 인해 기계요소와 고성능화와 전자부품의 고집적화가 이루어지면서 열부하가 문제시 되고 있다. 수년동안에 충돌분류가 벽면을 따르는 유동에서 큰 열전달비를 제공하는 것으로 알려져 왔다. 충돌분류에 의한 냉각법은 전자기구 부품, 종이의 건조, 섬유 및 유리제품의 건조, 고온 금형의 풀림과 가스터빈의 냉각 등 산업 전반에 걸쳐서 널리 응용되고 있다. 따라서 충돌분류에 대해 많은 연구가 있다.

Gutmark 등⁽¹⁾은 노즐출구에서 출구폭의 100배의 거리에 충돌판을 설치하고서, 중심선상에서의 평균적인 속도분포가 충돌판에 의해 변하는 영역의 범위를 연구하였고, Martin⁽²⁾은 평판에 충돌하는 분류출구의 여러 가지 노즐형상변화에 따른 열 및 물질 전달량의 특성을 정리하였다.

Goldstein 등⁽³⁾은 경사진 충돌평판에서 경사각이 클수록 최대 열전달지점이 부류축으로 이동함을 조사하였고, Gau 등⁽⁴⁾은 원통형 블록·오목면에서 표면곡률 효과에 따른 열전달 영향에 관해 보고하였다. Miranda 등⁽⁵⁾은 원추형 벽에 한정된 충돌분류에 대해, Lytle 등⁽⁶⁾은 순환성 충돌분류의 열전달 특성에 대해 조사하는 등 충돌분류에 대한 다양한 연구가 많이 이루어져 왔다. 이들 유동은 대부분 난류유동으로서 Kataoka 등⁽⁷⁾은 eddy와 vortex 영향에 관해, Hwang 등⁽⁸⁾은 vortex pairing 제어에 관해, Ahmed 등⁽⁹⁾은 한정된 동축분류의 난류혼합에 관해, Park 등⁽¹⁰⁾은 $K-\epsilon-f_0$ 난류모델 개발에 대해 연구하는 등 충돌 난류유동 특성에 관한 연구도 많이 있다.

충돌분류계에서 전열증진을 위해서는 난류축진이 필수적이다. Kum 등⁽¹¹⁾은 난류축진체로서 사각 로드(rod)를 설치하여 높은 전열 증진을 얻고 있다. 난류축진체를 가진 충돌분류 시스템의 고효율 전달 설계를 위해서는 이들 유동장에 관한 정확한 해석이 요구된다. 이를 위한 실험측정에 열선 유속계나 디지털 마노미터 등을 이용하나 복잡한 난류유동 측정에는 미흡한 점이 많다.

최근의 유동장 가시화를 위한 PIV는 컴퓨터 저장기능의 대폭적 확충과 고도의 영상처리 기법의 발전으로 복잡한 난류유동장의 동시 다점 측정이

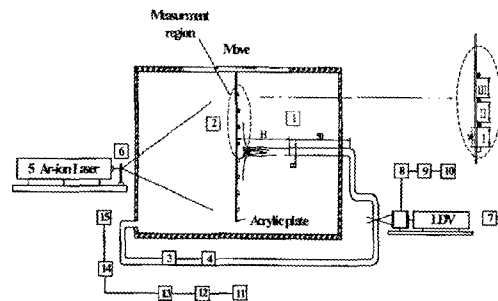
가능해져 난류유동장의 속도 vector, 속도 분포, 운동에너지 및 난류강도 등에 대한 비교적 정확한 정보를 얻을 수 있다. Nakabe 등⁽¹²⁾은 고경사진 충돌제트간의 상호작용을 관찰하는데 PIV개념을 적용하여 와류에 대해 좋은 자료를 얻고 있다. Lee 등⁽¹³⁾은 충돌분류 평판에 사각 로드를 설치하고 PIV 측정기법으로 속도 vector, 속도 분포, 운동에너지, 난류강도 등을 고찰하였다.

본 논문에서는 난류축진체로서 사각, 삼각, 반원 등의 3가지 로드형상을 택하고, PIV기법으로 로드형상에 따른 충돌분류 난류유동장에 관한 실험이 행해져, 여러 난류축진체에 의한 고효율 충돌분류 유동의 시스템을 제작하기 위한 유동특성에 대한 기초자료가 얻어진다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험을 위하여 유동장을 가시화하기 위한 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 전체적인 실험장치의 구성은 유체 유입부, 유출부, LDV를 이용한 속도 측정부, 레이저 광원조사부, 유동순환을 위한 순환펌프부, 영상획득 및 기록부, 평판 충돌부 등으로 크게 구성되어 있다.



- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1. Jet nozzle | 9. Signal processor |
| 2. Impinging plate | 10. LDV host computer |
| 3. Circulation pump | 11. CCD camera |
| 4. Flow control valve | 12. High-speed camera |
| 5. Ar-ion laser | 13. Hi-8mm camcorder |
| 6. Cylindrical lens | 14. Image grabber |
| 7. LDV | 15. PIV host computer |
| 8. Photo multiplier | |

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup and the detailed measurement region.

수조(1500×250×800 m³)는 투명아크릴로 제작되고, 유체 유동의 순환을 위해 1마력의 펌프(HANIL PB-40E-1-D)가 설치된다.

난류촉진체(turbulence promoter)로는 사각로드(8×8 m²)를, 로드형상 별로는 사각, 삼각, 반원(10×5 m²)을 택하고, 피치는 35 mm와 30 mm의 두 영역이, 노즐 직경은 10, 17, 23 mm의 3가지가 선택되었다.

2.2 실험 방법

작동유체로서 20℃의 수돗물을 사용하고, 자유 유동과 로드 설치 경우에서 3영역에 따른 유동의 특성들, 즉 속도 vector, 속도분포, 운동에너지 및 난류강도 등과 3가지 노즐에 대한 속도분포 등이 Re 수 2,000, 3,000 및 4,000과 무차원 거리(H/B) 6, 8, 10에서 실험·관측·비교·검토된다.

충돌관은 전후 좌우 이동이 가능하도록 장치했으며, 충돌제트 분류가 2차원이 되도록 하기 위해 유로 상면에 평행판을 설치하였고, 노즐 출구의 유동을 안정하게 유지하기 위해서 노즐 입구에 미세한 철망을 설치하여 분사 시켰다. 루프(loop)를 순환하는 유체의 속도는 LDV(Laser doppler velocimetry) 장비를 이용하여서 노즐중심의 평균속도를 10회 측정하여 그 평균값을 노즐을 통과하는 유동의 속도로 하였으며, 유량조절밸브를 통하여 유량은 정밀히 조절되었다.

유동가시화를 위해 사용된 산란입자는 비중이 1.02 직경이 약 100 μ m 전후의 Polyvinyl chloride 백색 구형입자로, 정전기를 방지하기 위하여 계면활성제를 소량 혼입하였다. 조명장치는 최대 10W출력의 2W상태에서 연속광 Ar-Ion laser (Spectra-physics lasers사 model 2017, λ : 514.5nm)를 사용하였으며, 아크릴 수조의 옆쪽면에서 조사하여 아크릴 평판(50×500mm²)에 수직으로 설치된 난류촉진체, 즉 로드 중앙에 정확히 조사되도록 설치하였다. 유동장에 조사되는 광은 실린더형 렌즈로 1차원으로 초점화 된 빔을 확산시키는 Expanding beam 방식으로 2차원 평면광(laser light sheet)을 형성한 후 두께

2mm 내외의 평면조명이 되게 하였다. 수직 평판에 부딪히는 충돌 분류는 상하 대칭이므로 상부면만을 측정 대상영역으로 했다.

Table 1 Experimental conditions.

Item	Specification
Image grabber	DT3155(640×480 pixel, B&W)
Light source	2W Ar-Ion laser
Particle seed	PVC(Polyvinyl chloride : 100 μ m)
Working fluid	City water(20℃)
Sheet light	Cylindrical lens(t=2mm)
Flow meter	Digital flow meter
Flow regulation	Pump(1HP), Valve(BrCl)
Host computer	Intel Pentium III
Image recorder	Hi-fi 8mm camcorder
Identification	Two-frame gray-level cross correlation algorithm
PIV software	CACTUS 2000

영상촬영장치는 수조의 전방에 설치하였으며, 촬영된 영상을 직접 확인하기 위해 외부에 고해상도 모니터를 설치하였다. 광원으로 측정영역에 평면광을 형성하면 산란광이 발생하므로 이를 최소화하기 위하여 측정영역 외의 나머지 부분에 검은색 시트지를 사용하여 잡음성분을 최소화하였다. CCD 카메라로 촬영된 영상을 Hi-fi 8mm 캠코더에 기록하고, Data translation사의 DT3155 영상입력장치(640×480 pixel, grey 8 bit)를 이용하여 기록된 원시영상을 PC에 입력하였다. 영상처리작업은 주 컴퓨터인 PC에 CACTUS 2000 소프트웨어를 이용하여 이루어졌다.

Table 1은 본 실험에서 사용된 제반 실험 조건을 나타내고 있다.

2.3 PIV에 의한 영상처리

속도장을 얻기 위하여 PIV알고리즘으로써 계조치 상호상관법을 적용하였다. 이는 유동방향의 모호성이 발생하지 않는 장점으로 현재 가장 많이 쓰이는 기법이다. 식 (1)은 시각이 다른 2장의 영상의 상관영역에 있어서의 계조치들의 상관계수를 나타낸다. 이 상관계수가 최대가 될 때의 g영상의 중점을 속도벡터의 중점으로 간주하게 된다.

$$C_{ix} = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)(g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_{i=1}^{n^2} (g_i - \bar{g}_i)^2}} \quad (1)$$

여기서 f_i, g_i 는 상관영역내의 각 pixel의 계조치를 의미하며 ‘ $\bar{\quad}$ ’는 평균을 뜻한다.

측정영역 설정에서는 240pixel×230pixel의 크기로 하였으며, 후처리 과정에서는 이상치(outlier)를 판별하여 구해진 속도 벡터 중에는 과오벡터(bad vector)가 포함되어 있어서 통계처리 이전에 과오벡터를 제거하고 순간 속도장을 앙상블 평균하여 난류 통계치를 구하고, 이어 격자점 재배치 및 pixel 단위의 속도벡터를 실제단위(cm/sec)로 바꾸는 단위환산을 하였다. 단위환산은 측정영역별로 실시하였고, 원시영상 240pixel은 측정거리 30mm에 해당한다.

Fig. 2는 PIV system의 처리과정을 나타내었고, 여기에 적용되어진 공식들은 다음과 같다.

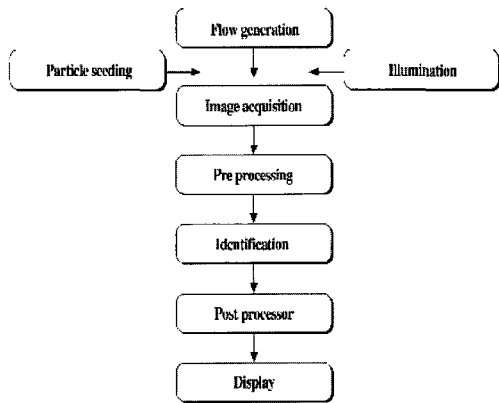


Fig. 2 Flow chart of PIV processing.

시간평균 속도(\bar{u}, \bar{v})는

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u \, dt, \quad \bar{v} = \frac{1}{T} \int_0^T v \, dt \quad (2)$$

으로 주어지고, 순시의 속도 변동성분은

$$u' = u - \bar{u}, \quad v' = v - \bar{v} \quad (3)$$

으로 주어진다.

순시의 운동에너지(E_k : kinetic energy)는

$$E_k = \frac{u^2 + v^2}{2} \quad (4)$$

로 주어지고, 시간평균 운동에너지(E_{tmk} : time mean kinetic energy)는

$$E_{tmk} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u^2 + v^2}{2} \, dt \quad (5)$$

로 주어진다.

순시의 난류강도(I_t : turbulent intensity)는

$$I_t = \frac{\sqrt{(u'^2 + v'^2)/2}}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}} \quad (6)$$

로 주어지고, 시간 평균 난류강도(I_{tmt} : time mean turbulent intensity)는

$$I_{tmt} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{\sqrt{(u'^2 + v'^2)/2}}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}} \, dt \quad (7)$$

로 주어진다.

난류운동에너지(E_{tk} : turbulent kinetic energy)는

$$E_{tk} = \frac{u'^2 + v'^2}{2} \quad (8)$$

로 주어지고, 시간 평균 난류운동에너지(E_{tmk} : time mean turbulent kinetic energy)는

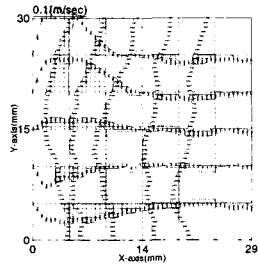
$$E_{tmk} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u'^2 + v'^2}{2} \, dt \quad (9)$$

로 주어진다.

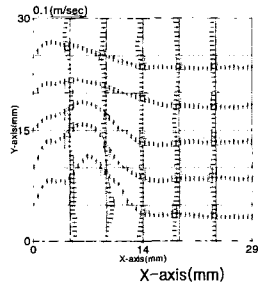
3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 로드가 없는 자유분류에서 Re 수 4,000, 무차원 거리 8 일때에 시간 평균속도 분포를 측정영역 순으로 나타내고 있다. I 영역에서는 속도분포가 비록 랜덤 하나마 Gaussian 분포에 가까운 형상을 보이며, 벽에 접근 할수록 속도 vector 크기가 작아지면서 상·하부로의 속도 분포가 발전하고 있다. II 영역에서는 충돌벽을 따른 유동의 속도분포가 넓어지며, 속도 크기는 감소하

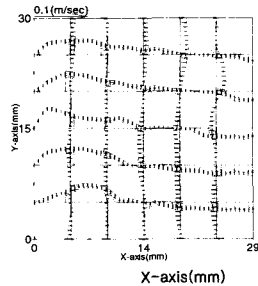
면서 벽면에 먼 곳에서는 역류가 나타나고 있다. III영역에서는 계속 속도분포가 넓게 퍼지면서 속도 크기는 감소함을 볼 수 있다. 이는 충돌분류가 충돌 평면에서 수직으로 충돌 후 나타나는 벽을 따르는 흐름이 상·하부의 정지유체에 묻혀감을 보여준다.



(a) Region I



(b) Region II

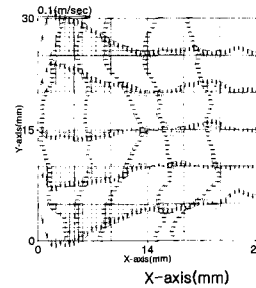


(c) Region III

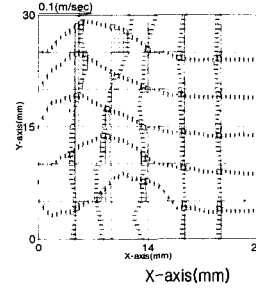
Fig. 3 Comparison of the velocity distributions according to measuring regions(I, II, III) at Re 4,000 and the dimensionless spray distance 8 in the free jet flow without rod.

Fig. 4는 사각 로드가 설치된 상태에서 Re 수 4,000, 무차원 거리 6 및 노즐 직경 17 mm 일 때

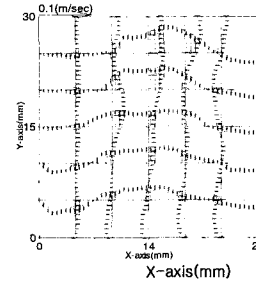
속도분포를 측정 영역순으로 나타내고 있다. I 영역에서는 상기 Fig. 3에 비해서 속도분포도의 중앙부가 꺼짐으로 Gaussian 분포를 나타내고 있지 않음을 볼 수 있다. 이는 충돌 평판 상하에 설치한 사각 로드의 영향임을 알 수 있다.



(a) Region I



(b) Region II



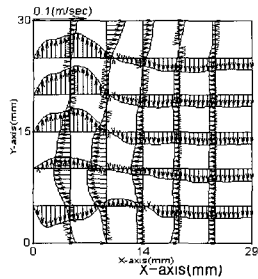
(c) Region III

Fig. 4 Comparison of the velocity distributions according to measuring regions(I, II, III) at Re 4,000 in the flow with rod.

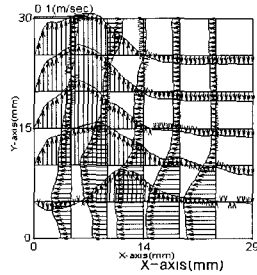
II 영역에서는 벽을 따른 유동의 속도 분포가 상부쪽으로 Gaussian 분포를 나타내고 있으나 상기 자유흐름에 비해 벽으로부터 좀 떨어져서 나타나고 있다. 이것 또한 사각 로드의 영향임을 말해

주고 있다. III영역에서는 속도분포도가 벽에서 더 멀어지면서 넓게 퍼지고 속도크기는 감소함을 볼 수 있다. 전반적으로 볼 때 로드를 설치한 경우가 로드 없는 자유흐름의 경우에 비해서 속도분포도가 넓은 범위에서 나타남을 알 수 있다.

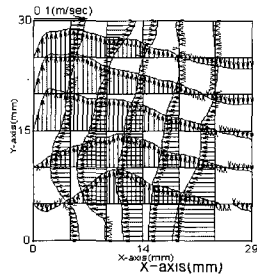
이는 로드 설치가 유체유동의 난류 증진에 친화적임을 말해주고 있다.



(a) 10 mm



(b) 17 mm



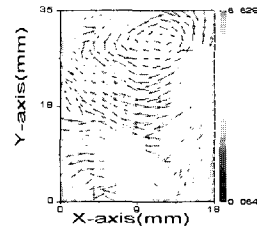
(c) 23 mm

Fig. 5 Comparison of velocity distribution according to the nozzle diameters in the region II of the flow with rod.

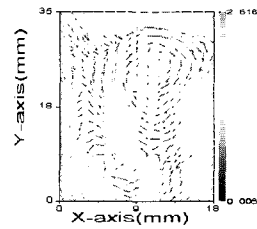
Fig. 5는 Re 수 4000, II 영역에서 사각 축진체가 설치되고, 노즐 직경 10, 17, 23 mm, 및 무

차원 분무거리 10 일 때 각 속도분포를 비교하고 있다. 노즐 직경이 커질수록 분무방향의 속도 분포와 상향 속도 분포가 넓게, 복잡하게 나타나고 있다. 이는 분류직경이 클 때가 난류 친화적임을 의미한다.

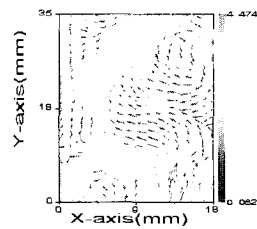
Fig. 6은 사각 로드, III영역에서 Re 수에 따른 속도 vector 분포를 비교하고 있다. Re 수가 커질수록 와류가 뚜렷해지는 난류특성을 보이고 있다. 이는 와류가 난류의 특성이라는 흐름이론에도 부합된다.



(a) Re 2,000



(b) Re 3,000

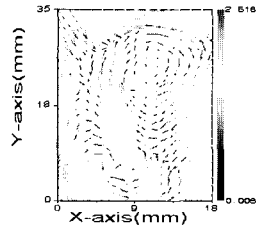


(c) Re 4,000

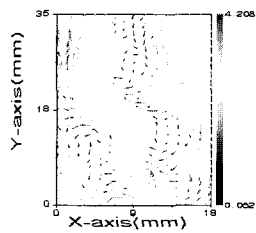
Fig. 6 Comparison of the velocity vector distributions according to Re in the region III.

Fig. 7은 Re 수 3,000, 무차원 분무거리 6일 때 III 영역에서 로드 형상에 따른 속도 vector 분

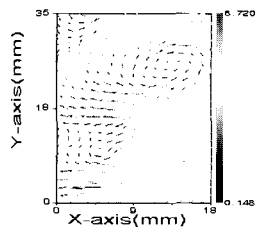
포를 비교하고 있다. 사각 로드일 때 난류 특성인 교란이 유동 중앙부에 가장 넓게 나타나고 있고 반원 로드일 때가 가장 적게 나타나고 있다.



(a) square



(b) triangle



(c) semicircle

Fig. 7 Comparison of the velocity vector distributions according to shapes of rod at Re 3,000 in the region III.

Fig. 8은 사각 로드, II 영역에서 x축 거리에 따른 평균 운동에너지의 Re 수 3,000과 4,000에서의 비교를 나타내고 있다. Re 수가 클 때에 전체에 걸쳐 운동에너지가 크게 나타나고 있으며, 이는 Re수가 클수록 유동에너지가 커지는 유동 이론에 부합된다.

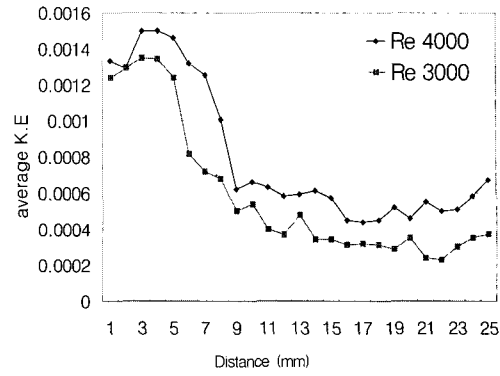
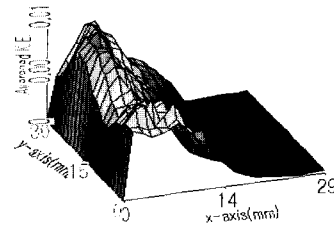
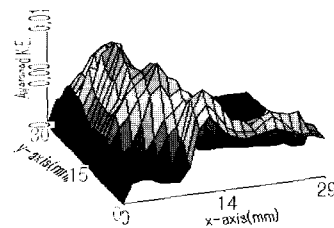


Fig. 8 Comparison of kinetic energy between Re 3,000 and 4,000 according to x axis distance in the region II.

Fig. 9는 Re 수 4,000, 무차원 분무거리 10일 때 II 영역에서 시간 평균 운동에너지의 3차원적 그림을 보이고 있다. (a)는 로드가 없는 자유 분류의 경우이고 (b)는 사각로드를 설치한 경우이다. 사각로드 설치때의 운동에너지가 자유분류 때에 비해 더 넓은 범위에서 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이는 로드 설치시 난류유동 형성 가능성이 더 크다는 것을 말해 준다.



(a) without rod

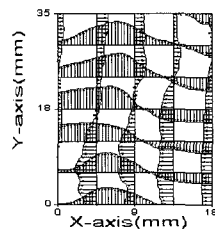


(b) with rod

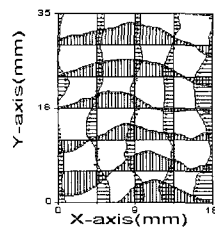
Fig. 9 Comparison of kinetic energy distributions between two cases of jet flow(without and with rod) at Re 4,000 in the region II.

Fig. 10은 Re 수 4,000, II영역에서 로드 형상에 따른 속도분포를 비교하고 있다. 반원 로드에서는 속도분포가 벽면에 근접하여 상부로 향하면서 벽면에서 먼 반대쪽에 역류가 나타나고 있다.

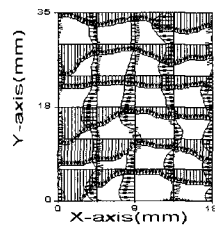
삼각 로드에서는 흐름이 벽면에서 조금 떨어져 나타나고, 사각 로드에서는 속도분포가 벽에서 더 떨어져 상부로 향하면서 속도크기는 감소하고 양쪽에서 역류가 발생하는 좀 복잡한 양상을 보이고 있다. 이는 사각 로드가 난류 형성에 가장 우세함을 보여준다.



(a) semicircle



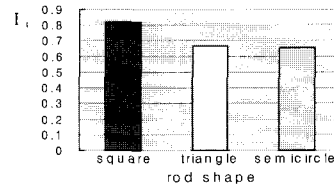
(b) triangle



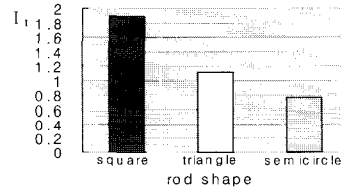
(c) square

Fig. 10 Comparison of the velocity distributions according to shapes of rod at Re 4,000 in the region II.

Fig. 11은 Re 수가 3,000과 4,000일때 II영역에서 로드 형상에 따른 난류강도를 비교하고 있다. Re 수 증가에 관계없이 난류강도는 사각 > 삼각 > 반원 순으로 나타나고 있다. 즉 로드가 사각형일 때 가장 난류형성이 강하게 나타남을 볼 수 있다. 또한 Re 수가 클 때 난류강도가 크게 나타났음은 유동이론에 부합된다.



(a) Re 3,000



(b) Re 4,000

Fig. 11 Comparison of turbulence intensity according to shapes of rod at Re 3,000 and 4,000 in the region II.

4. 결 론

난류축진체인 로드 형상에 따른 충돌분류의 난류 증진현상을 PIV 기법에 의해 실험 관찰한 결과는 다음과 같다.

1. 속도분포에 의한 고찰에서 난류축진체인 로드를 설치했을 때, 유동이 복잡하여져 난류 증진의 특성을 보였으며, 노즐직경이 클 때에 속도분포가 넓게, 복잡하게 나타나고 있다. 로드형상에 따른 난류증진의 우세성은 사각 > 삼각 > 반원 순으로 나타났다.

2. 속도 vector에 의한 고찰에서 Re 수가 클수록 와류에 의한 난류 증진 특성이 우세하게 나타남은 이론에 부합되며, 로드 형상에 따른 와류에 의한 난류 증진 특성은 사각 > 삼각 > 반원의 순으

로 우세하게 나타났다.

3. Re 수가 클수록 운동에너지가 증대됨은 유동 원리에 부합되며, 로드 설치 시에 운동에너지의 분포가 확대되고 있다.

4. 로드 형상에 따른 난류 강도의 우세함은 사각 > 삼각 > 반원 로드의 순으로 나타났으며, Re 수가 클 때 난류 강도가 우세함은 유동이론에 부합된다.

후 기

이 논문은 2002년도 두뇌한국 21사업에 의하여 지원 되었음.

참고문헌

- [1] E. Gutmark, M. Wolfshtein and I. Wygnanski, "The Plame Turbulent Impinging Jet", J. of Fluid Mech., Vol. 88, PP.737-756, 1978.
- [2] S. Martin and F. Hans-Hermann, "Turbulence Control in Wall Jets", Eur. J. Mech. B-Fluids 19, PP.503-528, 2000.
- [3] R. J. Goldstein and M. E. Franchett, "Heat Transfer from a Flat Surface to an Oblique Impinging Jet", Journal of Heat Transfer, Vol. 110, PP.84-90, 1988.
- [4] C. Gau and C. M. Chung, "Surface Curvature Effect on Slot-air Jet Impinging Cooling Flow and Heat Transfer Process", ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 113, PP.858-864, 1991.
- [5] J. M. Miranda and J. B. L. M. Campos, "Impinging Jets Confined by a Conical Wall-high Schmidt Mass Transfer Predictions in Laminar Flow", International J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 44, PP.1269-1284, 2001.
- [6] D. Lytle and B. W. Webb, "Air Jet Impinging Heat Transfer at Low Nozzle-plate Spacings", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 37, PP.1687-1697, 1994.
- [7] K. Kataoka, L. Mihata, K. Maruo, M. Saguro and T. Chigusa, "Quasi periodic Large-scale Structure Responsible for the Selective Enhancement of Impinging Jet Heat Transfer", Proc. Eighth IHTC 3, PP.1193-1198, 1986.
- [8] S. D. Hwang, C. H. Lee and H. H. Cho, "Heat Transfer Characteristics on Impinging Surface with Control of Axisymmetric Jet(2)-with Acoustic Excitation", Trans. KSME (B), Vol 24, PP.373-381. 2000.
- [9] M. R. Ahmed and S. D. Sharma, "Effect of Velocity Ratio on the Turbulent Mixing of Confined Co-axial Jets", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol 22, PP.19-33, 2000.
- [10] T. S. Park and H. J. Sung, "Development of a Near-wall Turbulence Model and Application to Jet Impingement Heat Transfer", Int. J. of Heat and Fluid Flow, Vol 22, PP.10-18, 2001.
- [11] S. M. Kum, J. Y. Kim and J. Y. Seo, "충돌분류계에서 사각 난류축진체에 의한 전열 증진에 관한 실험적 연구", Solar Energy, Vol. 14, No. 1, PP.79-91, 1994.
- [12] K. Nakabe, E. Fornalik, J. F. Eschenbacher, Y. Yamamoto, T. Ohta, K. Suzuki, "Interactions of Longitudinal vortices generated by twin inclined Jets and
- [13] S. B. Lee, M. G. Song, S. W. Son and E. S. Ju, "Analysis of Flow by the

PIV Measurement on Impinging Jet along to the Promoter Setup” , KSME 02S310, 2002.

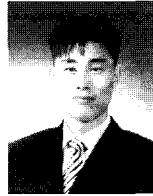


송민근 (宋旻根)
1974년 7월생. 2003년 경상대학교 대학원 졸업(박사).

저 자 소 개



주은선 (朱恩選)
1938년 6월 8일생. 1963년 서울대 물리학과 졸업. 1980년 부산대 대학원 기계공학 졸업(석사). 1984년 동대학원 기계공학 졸업(박사). 현재 경상대 공대 수송기계공학부 교수. 당 학회 정회원.



이상범 (李相範)
1974년생. 2002년 경상대학교 대학원 졸업(석사).



나우정 (羅又禎)
1947년 12월 12일생. 1970년 서울대 농공학과 졸업. 1986년 Ghent대 대학원 농공학과 졸업(농박). 현재 경상대 농대 농업시스템공학부 교수.



손승우 (孫承佑)
1974년생. 2003년 경상대학교 대학원 졸업(석사).



정진도 (鄭鎭度)
1960년 9월 23일생. 1983년 충남대 기계공학과 졸업. 1985년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학). 1996년 (日)Kanazawa Uni. 환경공학과 대학원 졸업(공학). 현재 호서대 공대 환경안전공학부.