

## 평면제트를 이용한 충돌면에서의 난류유동 특성

김 문 경\* · 윤 순 현\*\*

### Turbulent Flow Characteristics using Plane Jet on Impingement Surface

M. K. Kim\* · S. H. Yoon\*\*

**Key words** : Impingement Surface(충돌면), Turbulent Flow(난류유동), Plane Jet(평면제트), Turbulent Intensity(난류강도), Stagnation Point(정체점)

#### Abstract

Experiments were conducted to investigate the turbulent flow characteristics from an oblique impingement surface to a plane jet at the jet Reynolds number ( $Re$ , based on the nozzle width)  $3 \times 10^4$ . The jet mean velocity and turbulent intensity profiles have been measured along the impingement surface by hot-wire anemometer. The nozzle-to-plate distance ( $H/B$ ) ranged from 2 to 10, and the oblique angle ( $\alpha$ ) from 45 to 90 degree. Also, the secondary peak of the turbulent intensity was observed at  $H/B=4$ ,  $S/B \cong 5$  and  $\alpha=90$  degree. It has been found that the stagnation point shifted toward the minor flow region as the oblique angle decreased and the position of the stagnation point nearly coincided with that of the maximum turbulent intensity.

#### 1. 서 론

평면 제트로부터 분사되어 경계면에 충돌하는 제트는 그 형태가 단순하면서도 국부적으로 열 및 물질 전달 효과를 극대화할 수 있다. 특히 제철 및 금속의 열처리 등 급속한 열전달이 필요한 경우나 터어빈 깃의 막냉각, 전자 부품의 냉각, 플럼 공정에서의 냉각 등의 지속적인 열전달이 요구되는 경우, 그리고 제지나 인쇄, 유리공업의 건조 공정분

야에서 폭넓게 적용되고 있다. 이러한 충돌제트의 냉각방법은 다른 냉각방법에 비해 국소적으로 많은 열을 효과적으로 제거할 수 있고 냉각하고자 하는 위치의 조절이 쉽다는 장점을 가지고 있기 때문에 많이 이용되고 있다.

제트충돌시 충돌판에는 복잡한 유동구조를 갖기 때문에 대부분의 연구가 단일제트가 대부분이며 이때 충돌면에서의 영역을 자유 제트 영역(free jet region), 충돌영역 혹은 정체 영역(impinge-

\* 창원전문대학 기계설계과 (원고접수일 : 97년 9월)

\*\* 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

ment region or stagnation region), 벽면 제트 영역(wall jet region)의 세부분으로 나누고 있다. 그러나 이와 같은 영역이 존재하는 구간이나 경계는 노즐의 형상이나 제트 출구 속도 분포, 난류강도 및 충돌각도의 영향 등의 많은 차이가 발생하게 된다.

2차원 충돌제트에서 유동 중심선을 따라 평균 속도는 Schauer와 Eustis(1963)<sup>1)</sup>, Beltaos와 Rajaratnam(1973)<sup>2)</sup>에 의하여 연구가 되어졌고, 후자들은 원형제트류를 평면 위에 수직 하향으로 분사시킬 때 피토투관을 사용하여 평균 속도 및 노압분포를 측정하고 충돌벽 근처에서 제트반쪽의 급한 증가를 관찰하였으며, 이 밖에도 Gutmark와 Wygnanski (1976)<sup>3)</sup>는 2차원 제트 출구와 충돌판과의 거리 비가 120에서 난류강도, 난류성분의 3차, 4차항들 및 2점에서의 상관관계등을 조사하였다. 또한 Gutmark 등(1978)<sup>4)</sup>은 노즐 출구에서부터 출구폭의 100배의 거리에 충돌벽을 설치하고 제트류의 중심선상에서 평균 속도 분포가 충돌벽에 의해 변하는 영역의 범위를 연구하였다. Amano(1983)<sup>5)</sup>와 Wolfshtein(1970)<sup>6)</sup>는 평판 위에 충돌하는 경우의 난류의 거동을 수치적 연구를 통하여 조사하였다.

Gardon과 Akfirat(1966)<sup>7)</sup>는 2차원 평면제트와 원형제트가 평판에 충돌할 때 제트유동과 외부 공기와의 혼합에 의해서 생성되는 난류구조를 이용하여 열전달 특성을 조사하였으며, 충돌판과의 거리가 단일 제트 출구의 8배일 때 최대의 열전달이 발생함을 밝혔다. 또한 Baughn등(1989)<sup>8)</sup>과 마찬가지로 제트 출구와 평판사이와의 간격이 좁은 경우, 정체점 외의 제2의 열전달 극대점이 나타남을 관찰하고, 이를 경계층의 천이에 의한 것으로 추론하였다.

이러한 충돌제트에서 충돌판의 경사각에 따른 유동특성은 Goldstein과 Franchetti(1988)<sup>9)</sup>가 벽면 경사각, 제트출구와 충돌판과의 거리변화, Reynolds수 변화에 따른 열전달을 조사하였고, 벽면의 충돌경사각이 클수록 최대열전달 지점이 부류축으로 이동함을 조사하였다. 또한 Sparrow와 Lovell(1980)<sup>10)</sup>은 나프탈렌 승화법을 이용하여 경사진 평판에서의 열전달 특성을 조사하였다.

본 실험에서는 2차원 평면충돌제트에서 평행평판위에 제트가 충돌할때 제트의 Reynolds 수(Re; 노즐폭 기준)가  $3 \times 10^4$ 인 값에서 노즐과 충돌면의 무차원 거리(H/B), 충돌판위를 따르는 무차원 거리(S/B), 충돌판의 각( $\alpha$ )의 변화에 따른 평면 충돌제트의 충돌면에서의 정압분포와 난류유동장을 측정하였다. 이때 충돌면에서의 압력은 정압공(pressure hole)을 통해 마노메타를 통하여 읽었으며, 유동장은 열선 유속계와 연결된 컴퓨터에서 데이터를 획득하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig.1은 평면 제트로부터 분출되는 제트의 평균속도와 난류유동을 측정하는 실험장치이다. 풍동은 5마력 3상 전동기로 구동되는 개회로 저속 풍동으로 시험구간을 포함하여 전체길이는 약 6m이다. 유동은 원심형 송풍기(centrifugal blower)로부터 확대부(diffuser)와 Morel(1975)이 제안한 2개의 3차곡선식으로 계산된 값에 따라 제작된 축소노즐(contracting nozzle)을 통하여 시험구간으로 분사된다.

안정된 노즐 출구속도를 얻기 위하여 안정실(settling chamber)을 설치하였으며, 철판으로 제작된 덕트안에는 2개의 철망을 두어 유동을 균일하게 하였다. 또한 전동기의 전원회로에 장치한 전원 주파수 변환기(금성사, 5마력용: SV-037GS-2)를 사용하여 공기속도가 일정하도록 조절하였

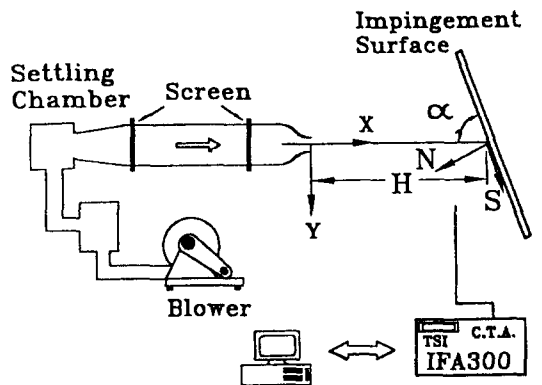


Fig. 1 Schematic diagram of the test apparatus for the plane impinging jet on flat plate

다. 노즐의 출구폭 B는 26.5 mm이고, 높이 W는 350 mm로서 형상비 W/B는 약 13이다. 또한 충돌판이 2차원성을 유지하기 위하여 충돌판의 위와 아래를 막았다.

시험 구간에서 수직으로 설치되어 제트 흐름이 충돌하게 될 평판은 20 mm 두께의 아크릴을 사용하여 제작되었고, 필요한 위치에 수동 이송하게 된다. 충돌판은 유동장 측정용으로 제작된 판과 벽면 정압의 측정을 위하여 0.5cm 간격으로 수직 압력공을 설치한 판을 각각 제작하였다.

벽면 압력 계수는 디지털 마이크로 마노미터(Furness Co.)를 이용하여 충돌평판에 설치된 압력공으로부터 계기 압력 데이터를 얻어 환산하였다.

또한, 제트의 유동은 S의 양의 방향을 주류측(major flow region), S의 음의 방향을 부류측(minor flow region)으로 정의한다. 노즐출구와 충돌판과의 거리를 H라 하고, 경사각을  $\alpha$ , 노즐폭을 B라 정의하고, 충돌제트의 유동장을 측정하기 위하여 열선유속계를 사용하였다. 이때 2채널의 정온형 열선유속계(TSI사, IFA-300)와 I형 열선 및 X형 열선을 사용하였다. I형 열선의 교정에는 5차 근사 다항식을 이용하였고, X형 열선의 교정에는 look up table 기법을 사용하였다. 열선의 좌표를 보다 정밀하게 하기 위하여 0.05mm의 정밀도를 갖는 길이 측정용 현미경이 사용되었다. 열선센서로부터 얻어진 데이터는 열선풍속계를 통하여 PC에 저장된다

각 실험 조건에서 벽면 압력계수 ( $C_p$ ), Reynolds 수(Re)와 난류강도 ( $u'$ )는 다음 식으로 정의된다.

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho U_j^2} \quad (1)$$

$$Re = \frac{U_j B}{\nu} \quad (2)$$

$$u' = \frac{\overline{u^2}}{u} \quad (3)$$

이때  $U_j$ ,  $\nu$ ,  $u$  는 노즐 출구 속도, 상온 공기에서의 동점성 계수, 각 순간에서의 변동속도이다.

### 3. 실험결과

Fig. 2은  $Re=3 \times 10^4$ 에서 자유제트와 평판이 설치된 경우의 제트 중심선상 유속 분포를 측정 한 것이다. 노즐출구의 평균속도가 어느 거리까지 계속 유지되는 길이를 포텐셜코어영역(potential core region)이라고 하며, 포텐셜 코어 길이는 임의의 중심선에서 최대 평균 속도가 노즐 출구에서의 최대 평균 속도의 95%에 도달하는 노즐 출구로부터의 길이로 정의할 수도 있다.<sup>11)</sup> 따라서 본 실험조건에서는 포텐셜코어길이가  $X/B=6$ 에서 형성됨을 보이고 있고, 노즐로부터 나오는 유동이 충돌판 가까이서 고압장 형성으로 인하여 속도가 급격히 감소되는 영역(자유제트의 성질로부터 변화하는 구간)을 충돌영역두께(impingement region thickness)이라고 했을 때, 충돌판이 설치되었을 경우에 평균속도분포는 포텐셜 코어 영역 내( $H/B=2$ )에서는 충돌영역두께가 1.5B정도에서부터 충돌판의 영향을 받고 있지만, 포텐셜코어영역 외( $H/B=10$ )에서는 충돌영역두께가 2.5B로 증가되고 있다. 이러한 원인은 충돌판과의 거리가 가까울 경우, 즉 포텐셜코어 내에서는 균일한 노즐 출구 속도가 충돌판 가까이 까지 지속되나 충돌판의 거리가 포텐셜 코어 영역을 벗어나게 되므로 인하여 노즐 출구속도는 점차 노즐 주위로부터의 공기 유입과 함께 최대 중심 속도는 저하하게 되어 충돌판 가까이에서는 평균속도가 감소하게 된다. 이때 각 충돌판과의 거리에 따른 난류강도

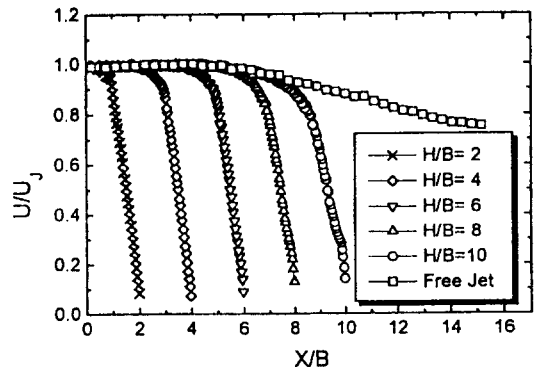


Fig. 2 Free- and impinging-jet centerline velocity profiles for  $\alpha=90^\circ$  and  $Re=3 \times 10^4$

를 Fig. 3에 나타내었다. 충돌판과의 거리가  $H/B=2$ 일 때는 급격한 난류강도의 증가를 가져오는데 이는 포텐셜코아 영역내에서의 강한 운동에너지가 충돌되면서 충돌벽면 가까이에서 강한 혼합을 일으키고 있음을 알 수 있고, 노즐 출구로부터 충돌판과의 거리가 멀수록 포텐셜코아 영역을 벗어남으로 인하여 난류강도의 증가곡선의 기울기는 점점 감소하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는  $Re=3 \times 10^4$ 이고,  $H/B=2 \sim 10$ 사이에서 충돌판의 경사각에 따른 최대 벽면 압력 계수를 나타낸 것이다. 여기서  $\alpha=90^\circ$ 인 경사각에서는  $H/B$ 가 증가할수록 Fig. 2와 Fig. 3에서 언급한 내용에서처럼 노즐 출구속도가 포텐셜코아 끝점인,  $H/B=6$ 에서부터 점차 감소하게 되므로 인하여 최대 벽면압력 계수도 점점 감소하고 있음을 알 수 있다. 그리고 충돌판의 경사가 많이 질수록( $\alpha$ 가 작

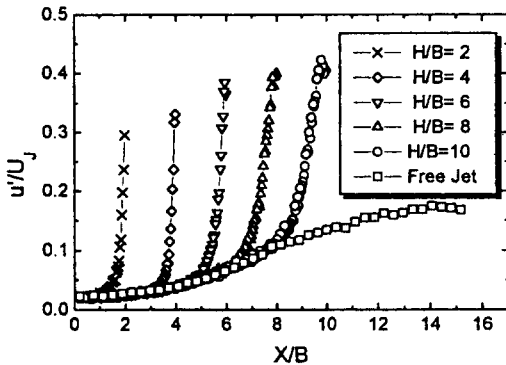


Fig. 3 Free- and impinging-jet centerline turbulent intensity profiles for  $\alpha=90^\circ$  and  $Re=3 \times 10^4$

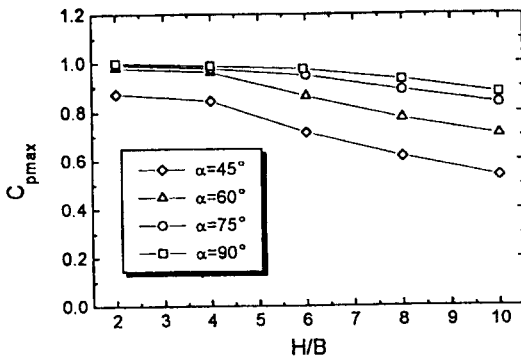


Fig. 4 Profiles of the wall pressure coefficient along the nozzle-to-plate for  $Re=3 \times 10^4$

을수록) 벽면의 최대 압력계수의 값이 점차 작아지고 있다. 이는 경사가 질수록 벽면의 최대 압력 계수지점은 경사각에 따라 부류측으로 이동하게 된다. 따라서 경사각이 작을수록 유체는 주류방향으로 갈려는 성질을 갖고 있기 때문에 부류측으로 유체의 운동에너지는 작아지게 된다.

Fig. 5는 충돌판위에서의 벽면 압력계수분포를 최대 압력계수로 나눈값의 분포를 나타낸 것이다. 여기서 앞의 Fig. 4에서 결론을 내린 바와같이 경사각이 작을수록 부류측으로 최대압력계수의 지점이 이동되고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 노즐로부터 분출된 유동이 벽면 가까이서 고압장으로 인하여 급격히 감소하게 되고 이때 유동은 가까운 벽면으로 휘어지게 되는 coanda현상을 일으키게 된다. 여기서  $\alpha=45^\circ$ 일 때는  $\alpha=90^\circ$ 일 경우에 비해 약 1.2B정도 부류측으로 이동되어 있다.

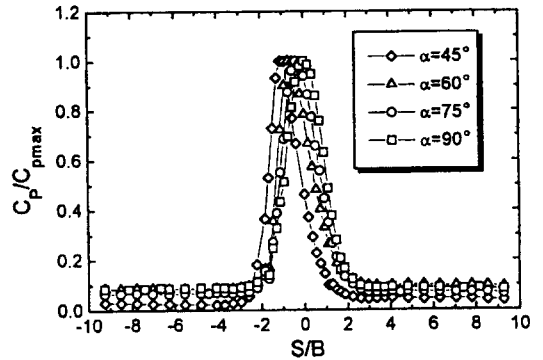


Fig. 5 Profiles of the wall pressure coefficient along the impingement surface for  $H/B=4$  and  $Re=3 \times 10^4$

이러한 경사각에 따른 이동 현상을  $Re=3 \times 10^4$ 이고,  $H/B=4$ 일 때, 평균속도분포와 난류강도분포로 나타낸 것이 Fig. 6과 Fig. 7이다. 즉  $\alpha=90^\circ$ 인 경우에 평균유속은 좌우가 아주 잘 일치하고 있지만 경사각이 작을수록 주류측은 거의 비슷하게 벽면을 따라 유동이 나아가고 있지만, 부류측에서는 운동에너지의 감소로 인하여 평균속도는 감소하게 된다. 하지만 여기서 중요한 사실은 Fig. 7에서 경사각에 관계없이 두 번째 최대 난류강도점이 보이고 있는데, 이는 2차원 충돌제트에서 밝혀진 열 전달특성에서 포텐셜코아 내에서는 두 번째로 열

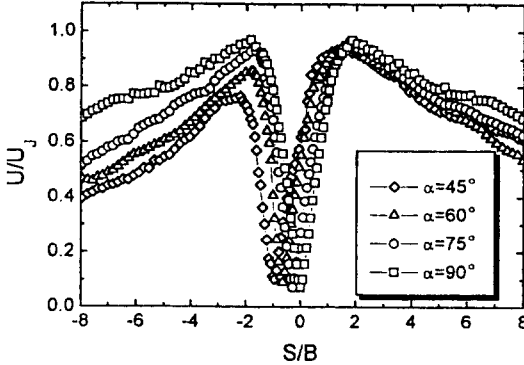


Fig. 6 Mean velocity profiles along the impingement surface for  $H/B=4$  and  $Re=3 \times 10^4$

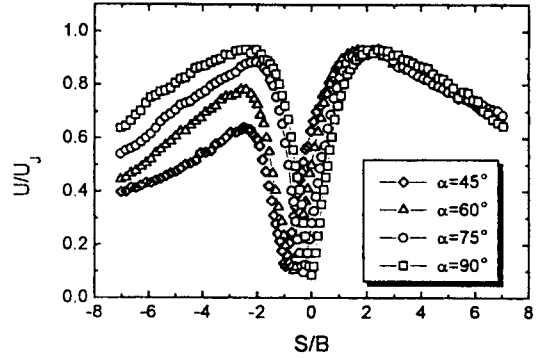


Fig. 8 Mean velocity profiles along the impingement surface for  $H/B=6$  and  $Re=3 \times 10^4$

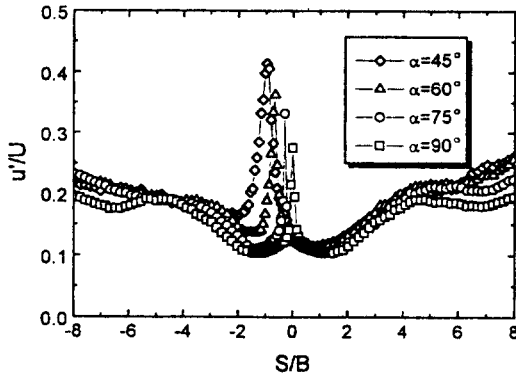


Fig. 7 Turbulent intensity profiles along the impingement surface for  $H/B=4$  and  $Re=3 \times 10^4$

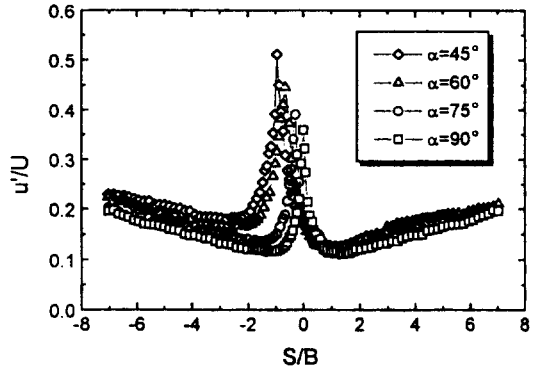


Fig. 9 Turbulent intensity profiles along the impingement surface for  $H/B=6$  and  $Re=3 \times 10^4$

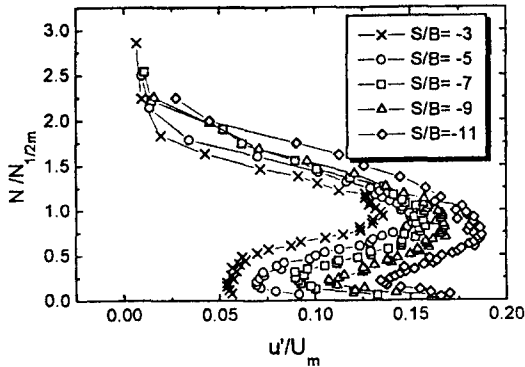
전달이 잘되는 지점( $5 \leq S/B \leq 8$ )과도 거의 일치하고 있다.<sup>12,13)</sup>

Fig. 8과 Fig. 9는  $Re=3 \times 10^4$ 이고,  $H/B=6$ 에서의 충돌판위에서의 평균속도분포와 난류강도분포를 나타낸것으로써  $H/B=4$ 에서 나타난 두 번째 최대 난류강도점은 나타나지 않았으며, 포텐셜 코어 끝부분에 위치하여 경사각이 작을수록 부류측에서의 평균유속은 주류측에 비해 많이 감소됨을 알 수 있다. 이는 충돌판과 노즐 출구와의 거리가 증가됨에 따라 운동에너지의 감소와 더불어 부류측으로의 평균속도가 감소하게 된다. 그리고 경사각이  $\alpha=45^\circ$  일 때는  $\alpha=90^\circ$  에 비해 약 1.1B정도 부류측으로 이동하고 있는데, 앞의 Fig. 5에서 나타난 것과 거의 동일한 위치임을 알 수 있다. Fig. 10(a),(b)는  $Re=3 \times 10^4$ ,  $H/B=4, \alpha=60^\circ$  일 때 충

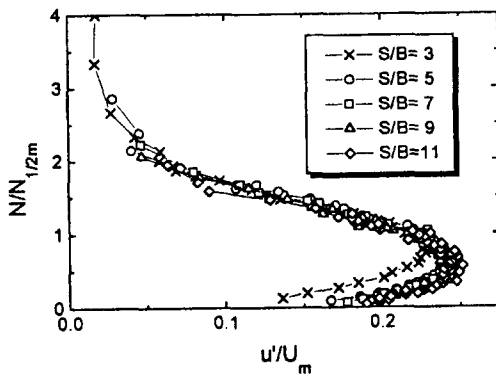
돌판으로부터 수직인 방향으로의 난류강도를 주류측과 부류측으로 나누어 나타낸것으로써 주류측의  $S/B=3$ 의 지점에서는 정체점( $S/B=0$ )으로부터 가까운 지점이므로 난류의 성분은 그다지 크게 나타나지 않고 있으나,  $5 \leq S/B \leq 11$ 에서는 거의 비슷한 유동구조를 갖고 있음을 알 수 있다. 또한 부류측에서는  $S/B=-3$ 에서  $S/B=-11$ 로 갈수록 경사에 의한 부류측의 활발한 혼합으로 인하여 난류가 점점 증가되고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 2차원 평면제트가 평판에 충돌할 경우 경사각도( $\alpha$ )와 노즐과 충돌판과의 거리( $H$ )에 대하여 난류 유동구조를 조사하였다.



(a) Minor flow region



(b) Major flow region

Fig. 10 Turbulent intensity profiles in the wall jet region for  $H/B=4$ ,  $\alpha=60^\circ$  and  $Re=3 \times 10^4$

1. 난류유동이 충돌면에  $90^\circ$  경우 제트의 정체점( $S/B=0$ )에서 최대압력계수가 존재하게 되고, 경사각이 작을수록 부류측으로 정체점이 이동하게 된다. 즉  $\alpha=45^\circ$  일 때는  $\alpha=90^\circ$  일 경우에 비해 약 1.2B정도 부류측으로 이동되어 있다.

2.  $Re=3 \times 10^4$ 이고,  $H/B=4$ 일 때,  $\alpha=90^\circ$  에서 평균유속분포는 좌우가 아주 잘 일치하고 있고, 경사각이 작을수록 주류측은 거의 비슷하게 벽면을 따라 유동이 나아가고 있지만, 부류측에서는 운동에서지의 감소로 인하여 평균유속은 감소하게 된다.

3.  $Re=3 \times 10^4$ ,  $H/B=4$ 인 경우, 경사각에 관계없이 주위와의 활발한 혼합으로 인하여 두번째 최대 난류강도점이 존재하고 있음을 알수 있다. 이는 2차원 충돌제트에서 밝혀진 열전달특성에서

포텐셜코아 내에서는 두 번째로 열전달이 잘되는 지점( $5 \leq S/B \leq 8$ )과도 거의 일치하고 있다.

4.  $H/B=4$ 이고  $\alpha=60^\circ$  인 경우, 주류측의 난류강도가 정체점부근에서는 포텐셜 코아 내부( $S/B \leq 6$ )의 영향으로 인하여 작은 값( $u'/U_m=0.22$ )을 가지지만,  $5 \leq S/B \leq 8$ 의 범위에서는  $u'/U_m=0.25$ 의 값을 유지하고 있고, 부류측에서는 급작스런 유동방향의 급선회로 인하여 주위 유체와의 혼합이 계속됨에 따라 하류(downstream)로 갈수록 난류강도의 값이 증가하고 있다.

### 후 기

본 연구는 부산대학교 기성희비 및 부산대학교 발전기금 학술연구조성비지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 진심으로 감사드립니다.

### 참고문헌

- Schauer, J. J. and Eustis, R. H., 1963, "The Flow Development and Heat Transfer Characteristics of Plane Turbulent Impinging Jets," Stanford Univ. Tech. Rep. no.3.
- Beltaos, S. and Rajaratnam, N., 1974, "Impinging Circular Turbulent Jets," J. of Hydraulics Div. ASCE, Vol. 100, pp.1313-1328.
- Gutmark, E. and Wyananske, J., 1976, "The Planar Turbulent Jet," J. of Fluid Mech., Vol. 73, pp. 465-495.
- Gutmark, E., Wolfshtein, M. and Wagnanski, I., 1978, "The Plane Turbulent Impinging Jet," J. of Fluid Mech., Vol. 88, pp. 737-756.
- Amano, R. S., 1983, "Turbulent Effect on the Impinging Jet on a Flat Plate," Bulletin of the JSME, Vol. 26, No. 221, pp. 1891-1899.
- Wolfshtein, M., 1970, "Some Solutions of the Plane Turbulent Impinging Jet," Trans. of ASME, J. of Basic Eng. Vol. 92, pp. 915-922.
- Gardon, R. and Akfirat, J. C., 1966, "Heat Transfer Characteristics of Impinging Two-Dimensional Air Jets," ASME, J. of Heat Transfer, Vol. 88, pp. 101-108.
- Baughn, J. W. and Shimizu, S. S., 1989, "Heat

- Transfer Measurements from a Surface with Uniform Heat Flux and a Fully Developed Impinging Jet," ASME J. of Heat Transfer, Vol. 111, pp. 1096-1098.
- 9) Goldstein, R. J. and Franchett, M. E., 1988, "Heat Transfer From a Flat Surface to an Oblique Impinging Jet," ASME J. of Heat Transfer, Vol. 110, pp.84-90.
  - 10) Sparrow, E., and Lovell, B. J., 1980, "Heat Transfer Characteristics of an Obliquely Impinging Wall Jet," ASME J. of Heat Transfer, Vol. 102, pp. 202-209.
  - 11) Jambunathan, K., Lai, E., Moss, M.A., and Button, B. L., 1992, "A Review of Heat Transfer Data for Single Circular Jet Impingement," J. Heat and Fluid Flow, Vol. 13, pp. 106-115.
  - 12) Gardon, R. and Cobonpue, J., 1962, "Heat Transfer Between a Flat Plate and Jets of Air Impinging on It," International Developments in Heat Transfer, ASME, New York. pp. 454-460.
  - 13) Gardon, R. and J. C. Akfirat, 1965, "The Role of Turbulence in Determining the Heat-Transfer Characteristics of Impinging Jets," Int. J. Heat Transfer, Vol. 8, pp. 1261-1272.