

## 경사진 평판에서 2차원 충돌 제트의 유동 특성에 관한 연구

윤순현\* · 김문경\*\* · 김대성\*\*\*

A Study on the Flow Characteristics of a Two - Dimensional  
Oblique Plate Impinging Jet

S. H. Yoon · M. K. Kim · D. S. Kim

**Key words** : Impingement region(충돌 영역), Two - dimensional oblique plate impinging jet(경사진 평판에 충돌하는 2차원 제트), Stagnation point(정체점)

**Abstract**

Turbulent flow characteristics of a two - dimensional oblique plate impinging jet(OPIJ) were experimentally investigated. The jet mean velocity and turbulent intensity profiles were also measured along the plate. The jet Reynolds numbers(Re, based on the nozzle width) ranged from 10,000 to 35,000, the nozzle - to - plate distance(H/B) from 2 to 16, and the oblique angle ( $\alpha$ ) from 60 to 90 degree. It has been found that the stagnation point shifted toward the minor flow region as the oblique angle decreases and the position of the stagnation point nearly coincided with that of the maximum turbulent intensity.

## 1. 서 론

2차원 평면 노즐로부터 분사되어 경계면에 충돌하는 제트는 그 형태가 단순하면서도 국부적으로 열 및 물질 전달 효과를 극대화할 수 있다. 특히 철 및 금속의 열처리 등 급속한 열전달이 필요한 경우나 터어빈 깃의 막냉각, 전자 부품의 냉각, 플립 공정에서의 냉각 등의 지속적인 열전달이 요구되는 경우, 그리고 제지나 인쇄, 유리공업의 건조

공정분야에서 폭넓게 적용되고 있다. 더구나 충돌 제트는 동력원의 용량이 비교적 소규모이며 유동의 제어를 통한 열 및 물질 전달량의 미소 조정이 용이하다는 이점을 갖고 있기 때문에 경제성이 또한 높다. 따라서 여러 가지 형태의 충돌 제트에 대한 실험 및 수치적 연구가 이루어져 왔다. 따라서 열전달 촉진을 위하여 열전달에 관한 연구와 함께 노즐 출구로부터 나오는 난류 유동의 정확한 규명이 필요하다.

\* 부산대학교 기계설계공학과 기계기술연구소

\*\* 부산대학교 대학원 기계설계공학과

\*\*\* 부산대학교 기계기술연구소

일반적으로 충돌판에 충돌하는 제트 유동장을 세부분의 영역으로 분류된다. 즉 노즐에서 분사되는 제트 유동이 벽면의 영향을 받지 않는 자유 제트 영역(free jet region), 정체점을 포함하고 벽면의 순압력구배가 존재하여 유동이 가속되는 충돌 영역 혹은 정체 영역(impingement region or stagnation region), 층류에서 난류 벽면 제트로 발달되어 가는 벽면 제트 영역(wall jet region)으로 구별된다. 그러나 이와 같은 영역이 존재하는 구간이나 경계는 노즐의 형상이나 제트 출구 속도 분포, 난류강도 및 그 밖의 많은 차이가 발생하게 된다.

2차원 충돌제트에서 유동 중심선을 따른 평균 속도는 Schauer와 Eustis(1963)<sup>1)</sup>, Beltaos와 Rajaratnam(1973)<sup>2)</sup>에 의하여 연구되었고, 후자들은 원형제트류를 평면 위에 수직 하향으로 분사시킬 때 피토투관을 사용하여 평균 속도 및 노압력분포를 측정하고 충돌벽 근처에서 제트반쪽의 급한 증가를 관찰하였으며, 이 밖에도 Gutmark와 Wagnanski (1976)<sup>3)</sup>는 2차원 제트 출구와 충돌판과의 거리 비가 120에서 난류강도, 난류성분의 3차, 4차항들 및 2점 상관관계등을 조사하였다. 또한 Gutmark 등(1978)<sup>4)</sup>은 노즐 출구에서부터 출구 폭의 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>은 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 평판사이의 간격이 좁은 경우, 정체점 외의 제2의 열전달 극대점이 나타남을 관찰하고, 이를 경계층의 천이에 의한 것으로 추론하였다.

이러한 충돌제트에서 충돌판의 경사각에 따른 유동특성은 Goldstein과 Franchett(1988)<sup>9)</sup>가 벽

면 경사각, 제트출구와 충돌판과의 거리, Reynolds수등의 변화에 따른 열전달을 조사하였고, 벽면의 경사가 클수록 최대열전달 지점이 부류측으로 이동함을 조사하였다. 또한 Sparrow와 Lovell (1980)<sup>10)</sup>은 나프탈렌 승화법을 이용하여 경사진 평판에서의 열전달 특성을 조사하였다.

본 연구에서는 산업현장에 많이 활용되고 있는 2차원 충돌제트에서 경사진 평판위에 제트가 충돌할 때 제트의 최대벽면 압력계수  $C_p = \frac{P - P_{00}}{\frac{1}{2}\rho U_j^2}$  Reynolds 수  $\left(Re = \frac{U_j B}{\nu}\right)$ , 노즐출구와 충돌벽면의 무차원 거리(H/B), 충돌판에서의 Y방향으로의 무차원 거리(S/B), 충돌판의 각( $\alpha$ )의 변화에 따른 충돌제트의 유동장을 측정하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2. 1. 실험장치

Fig. 1은 노즐에서 분출되는 제트가 경사평판에 충돌되어 열선풍속계를 통하여 PC로 저장되는 장치의 개략도이다.

풍동은 5마력 3상 전동기로 구동되는 개회로 저속 풍동으로 시험구간을 포함하여 전체길이는 약 6m이다. 유동은 원심형 송풍기(centrifugal blower)로부터 확대부(diffuser)와 축소 노즐(contracting nozzle)을 통하여 시험구간으로 분사된다. 노즐은 Morel(1975)이 제안한 2개의 3차곡선식으로 계산된 값에 따라 제작되었다.

안정된 노즐 출구속도를 얻기 위하여 세틀링 챔버(settling chamber)를 설치하였으며, 철판으로 제작된 덕트안에는 2개의 철망을 두어 유동을 균일하게 하였다. 또한 전동기의 전원회로에 장치한 전원 주파수 변환기(금성사, 5마력용: SV-037GS-2)를 사용하여 공기속도를 0~22m/s 범위 내에서 조절하였다. 노즐의 출구폭 B는 26.5 mm이고, 높이 W는 350mm로서 형상비 W/B는 약 13이다. 경사각  $\alpha$ 는 60°에서 70°의 범위로 조절할 수 있도록 제작하였다.

시험 구간에서 수직으로 설치되어 제트 흐름이 충돌하게 될 평판은 20mm 두께의 아크릴을 사용

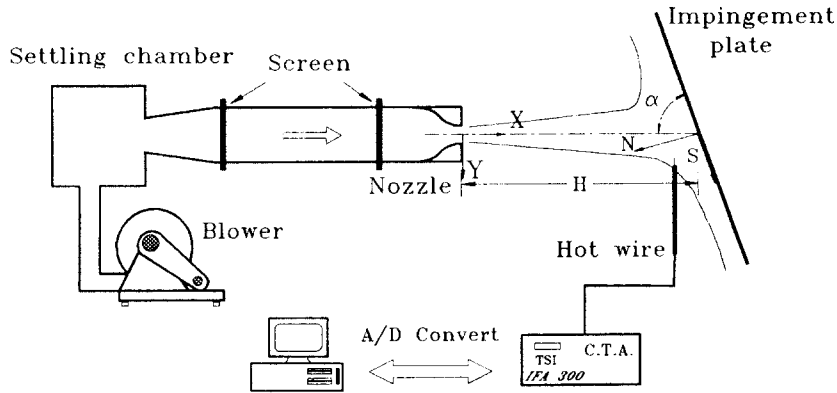


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

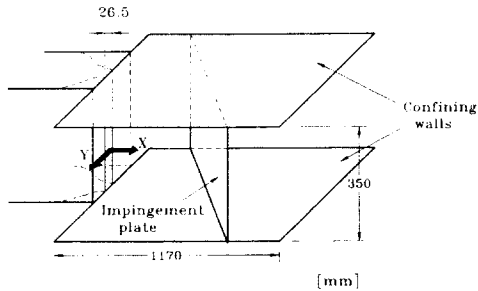


Fig. 2 Apparatus of nozzle exit and impingement plate

하여 제작되었고, 필요한 위치에 수동 이송하게 된다. 충돌판은 유동장 측정용으로 제작된 판과 벽면 정압의 측정을 위하여 1cm 간격으로 수직 압력공을 설치한 판을 각각 제작하였다. 제트의 유동은 S의 양의 방향을 주류측, S의 음의 방향을 부류측으로 정의된다. 노즐출구와 충돌판과의 거리를 H라 하고, 경사각을  $\alpha$ , 노즐폭을 B라 정의하고, 충돌제트의 유동장을 측정하기 위하여 열선풍속계를 사용하였다. 또한 충돌판이 2차원성을 유지하기 위하여 Fig. 2와 같이 판의 아래와 위를 막았다.

### 2. 2. 실험방법과 자료 환산

Furness사의 디지털마이크로 마노미터로써 평판에 설치된 압력공으로부터 계기 압력을 측정하여 벽면 압력계수를 계산하였다. 또한, 유속을 측정하기 위하여 2채널의 정온형 열선풍속계(TSI사, IFA-300)과 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 0.05 mm의 정밀도를 갖는 길이 측정용 현미경이 사용되었다. 열선센서로부터 얻어진 데이터는 열선풍속계를 통하여 PC에 저장된다.

### 3. 실험결과

본 연구에서는 노즐의 균일성을 먼저 조사하기 위하여 X형 열선으로 측정된 속도분포를 Fig. 3에 나타내었다. 평균속도 변동폭이 노즐 폭 방향으로 1.8%, 높이 방향으로 2.4%이내에 들고 있어 균일한 출구속도 분포를 보이는 것으로 확인되었다.

Fig. 4(a)는  $Re=35,000$ 이고,  $H/B=2\sim 16$ 사이에서 충돌평판이 노즐에 수직하게 설치된 경우의 벽면 압력 계수 분포를 보인 것이다. 정체점에 해당하는  $S/B=0$  지점에서 뚜렷한 최대값을 관찰할 수 있으며, 거의 정확하게 좌우 대칭적 분포를 이루고 있다. 또한 평판과 노즐간의 거리가 멀어질수

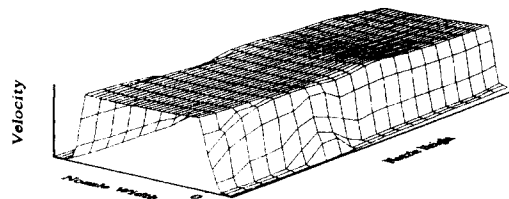
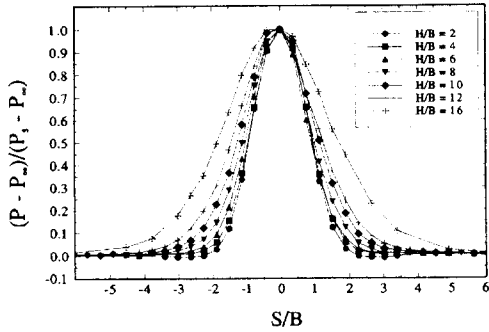
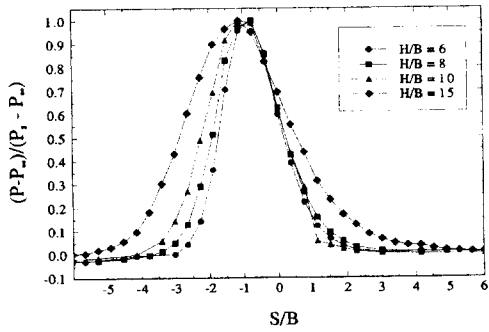


Fig. 3 Uniformity of the nozzle exit velocity



(a)  $\alpha = 90^\circ$



(b)  $\alpha = 60^\circ$

Fig. 4 Profiles of the wall pressure coefficients along the inclined plate surface at  $Re=35,000$

록 제트의 발달로 인하여 벽면압력계수가 확산되는 것을 볼 수 있는데 이것은 평면제트의 전형적인 특성이라 하겠다. 그러나, 평판이 노즐과  $60^\circ$ 의 각을 이루고 있는 Fig. 4(b)의 경향을 보면 최대 벽면압력계수 위치가 기하학적인 정체점으로 부터 부류측으로 노즐 쪽의 약 1배 정도 치우치고 있다. 이러한 최대 벽면압력계수점의 변화는 정체점의 이동을 의미하게 된다. 즉, 유동이 경사진 충돌판의 영향으로 인하여 충돌판 근처에서 속도가 감소되다가 경사진 평판에 가까워진 쪽으로 휘어지게 되므로 인하여 실제 분리유선이 부류측으로 치우치고 있음을 알 수 있다. 즉 분리유선이 존재하는 곳에서 속도의 최소지점이 이루어지며, 최대 벽면압력계수가 동시에 존재하게 된다. 유동의 대부분은 S방향으로 나아가지만, 최대압력계수지점에서는 유동의 방향이 전환되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 최대압력계수지점이 H/B가 8,10일 경우에 대해 부류측으로 이동되는 정도를 나타내고

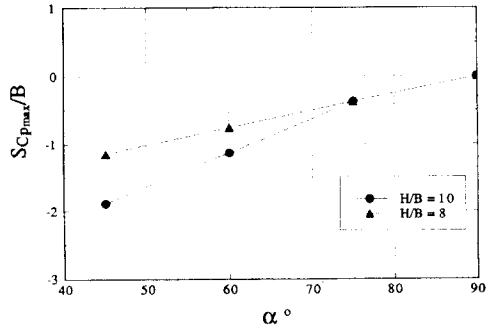


Fig. 5 Profiles of the maximum  $C_p$  variation with the nozzle to plate length for various oblique angle

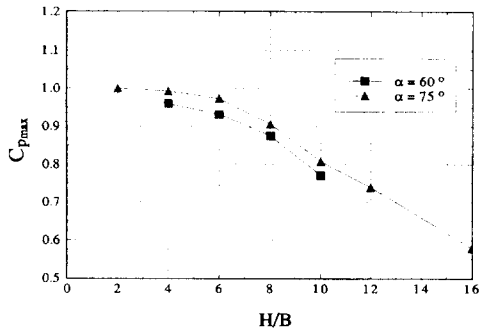


Fig. 6 Profiles of the maximum  $C_p$  position distribution with the oblique angle

있다. 즉 노즐출구와 충돌판과의 거리가 멀수록, 경사각이 작을수록 더 많이 이동되고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 6은 경사각도에 따른 최대압력계수의 변화를 보여주고 있는데,  $H/B=6$ 이후부터는 자유제트의 유속이 약화되면서 압력장 또한 점점 감소되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 자유제트와 평판이 설치된 경우의 제트 중심선상 유속 분포를 I형 열선을 사용하여 측정하여 보인 것이다. 노즐출구의 평균속도가 어느 거리까지 계속유지되는 길이를 포텐셜코어영역(potential core region)이라고 하며, 포텐셜 코어 길이는 중심선상의 임의의 위치에서 최대 평균 속도가 노즐 출구에서의 최대 평균 속도의 95%에 도달하는 노즐 출구로부터의 길이로 정의할 수도 있다.<sup>10)</sup> 따라서 본 실험에서  $Re=35,000$ 에서는 포텐셜코어길이가  $X/B=6$ 근방까지 형성됨을 보이고 있고, 노즐로부터의 유동이 충돌판 가까이서 고압장 형성으

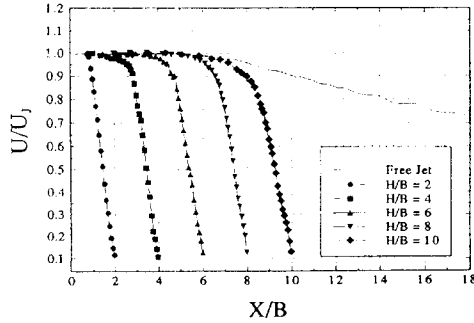


Fig. 7 Profiles of free and impinging oblique jet centerline velocity at  $\alpha=90^\circ$  and  $Re=35,000$

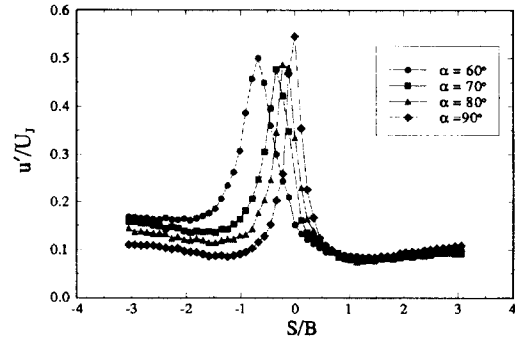
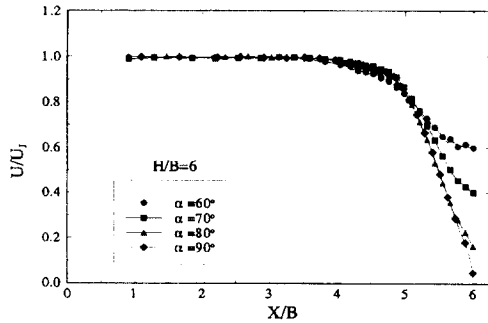
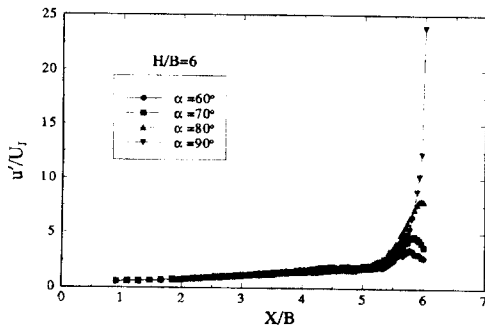


Fig. 9 Turbulent intensity profiles in the impingement region for  $H/B=6$  and  $Re 35,000$



(a) Centerline mean velocity



(b) Turbulent intensity

Fig. 8 Profiles of the centerline mean velocity and turbulent intensity with the oblique angle at  $Re=35,000$

로 인하여 속도가 급격히 감소되는 영역(자유제트의 성질로부터 변화하는 구간)을 충돌영역 (Impingement region)이라고 했을 때, 충돌판이 설치되었을 경우에 평균속도분포는 포텐셜 코어 영역 내( $H/B=2$ )에서는  $X/B=1$  정도에서 충돌판의 영향을 받고 있지만, 포텐셜코어 영역 외( $H/B =$

10)에서는 무차원 충돌영역이 2로 증가되고 있는데, 이러한 원인은 충돌판과의 거리가 가까울 경우 노즐 출구 속도가 충돌판 가까이 까지 지속되나 충돌판의 거리가 멀수록 노즐 출구속도가 포텐셜 코어 영역을 지나면서 최대 중심 속도의 저하로 인하여 속도도 함께 감소하고 있는 것으로 생각된다.

Fig. 8은  $Re=35,000$ ,  $H/B=6$ 에서 노즐로부터 중심선을 따라 충돌판의 경사각도에 따른 속도분포와 난류강도를 나타낸 것으로서, 충돌판이 수직일 때는 벽 근처에서는 평균속도가 거의 0에 가까운 반면 난류강도는 급격히 증가한 값을 갖고, 경사각도가 작을수록 벽 근처에서는 임의의 속도가 존재하고 있고, 난류강도의 값도 작게 나타나고 있다. 이는 부류측으로의 최대압력계수의 이동 때문이다.

Fig. 9는  $Re=35,000$ ,  $H/B=6$ 인 위치에서 벽면으로부터 측정높이는 2mm이고 센서는 벽면과 가장 근접할 수 있도록 하여 충돌판의 경사각도에 따른 난류강도를 나타낸 것이다. 충돌판의 주류측에서는 벽면유동이 각도에 관계없이 형성되고 있음을 알 수 있고,  $\alpha$ 가  $90^\circ$ 에서 충돌판에서의 난류강도는 정확히 대칭이 되며, 경사각이 작을수록 충돌판에서의 최대난류강도는 부류측으로 이동하여 부류측의 난류강도도 급격한 유동방향의 변화로 인한 유입이 활발하여 난류강도가 증가됨을 알 수 있다.

Fig. 10은 충돌 후 주류측 하류에서의 유동특성의 상사 성을 조사하기 위하여  $H/B=6$ ,  $\alpha=70^\circ$ 의 경우의 속도분포이다. 여기서,  $U_m$ 은 축방향 최대평균

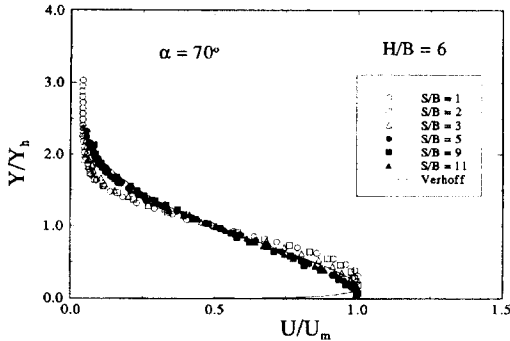


Fig. 10 Mean velocity profiles in the wall jet region for H/B=6 and Re=35,000

속도이고,  $Y_h$ 는 상부확산거리(upper jet spread)이다. 원형제트에 대한 연구를 통하여 Poreh 등 (1967)<sup>12)</sup>은 벽면유동이 S/B가 H/B보다 큰 경우에는 거의 유사한 유동특성을 갖는다고 하였는데, 본 연구에서도 S/B>5일때 거의 유사하게 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 2차원 평면제트가 경사진 평판에 충돌할 경우 경사각( $\alpha$ )와 노즐과 충돌판과의 거리(H)에 대하여 유동특성에 관하여 조사하였다.

평판의 경사각이 90°인 경우 제트 중심선과 평판의 교점에서 최대압력계수가 존재하게 되고, 경사각이 줄어들수록 부류축으로 정체점이 이동하게 된다. 이러한 현상은 노즐로부터 분출된 유동이 벽면 가까워서 고압장으로 인하여 급격히 감소하게 되고 이때 유동은 가까운 벽면으로 휘어지게 되는 coanda현상을 일으키게 된다. 또한 충돌판의 경사각이 작을 수록 부류축에서는 충돌 후 유동방향의 전환으로 인하여 외부로부터의 유입이 활발하여 전체적인 난류강도가 증가하게 된다.

충돌 후 유동이 벽면을 따라 주류축의 하류방향으로 지나면서 S/B>5의 범위에서는 유사한 유동 형태를 갖게 됨을 알 수 있다.

#### 참고문헌

1) 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.

2) Beltaos, S. and Rajaratnam, N., 1974, "Impinging Circular Turbulent Jets," J. of Hydraulics Div. ASCE, Vol. 100, pp. 1313 - 1328.

3) Gutmark, E. and Wyananske, J., 1976, "The Planar Turbulent Jet," J. of Fluid Mech., Vol. 73, pp.465 - 495.

4) Gutmark, E., Wolfshtein, M. and Wgnanski, I., 1978, "The Plane Turbulent Impinging Jet," J. of Fluid Mech., Vol. 88, pp. 737 - 756.

5) 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.

6) Wolfshtein, M., 1970, "Some Solutions of the Plane Turbulent Impinging Jet," Trans. of ASME, J. of Basic Eng. Vol. 92, pp. 915 - 922.

7) 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.

8) 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) Poreh, M., Tsuei, Y. G., and Cermak, J. E., 1967, "Investigation of a Turbulent Radial Wall Jet," Trans. ASME, J. Appl. Mech., pp. 457 - 463.

13) Foss, J. F., 1979, "Measurements in a Large - Angle Oblique Jet Impingement Flow," AIAA Journal, Vol. 17, No. 8, pp. 801 - 802.