

하이브리드 로드를 갖는 충돌공기제트의 열전달특성에 관한 연구

표 창 기, 박 상 록, 김 동 춘**, 금 성 민**, 임 장 순***
 인하대학교 대학원, *경문대학 기계과, **한라대학교 기계공학과, ***인하대학교 기계공학과

Heat Transfer Characteristics in Impinging Air Jet with Hybrid Rod

Chang-Ki Pyo, Sang-Rok Park, Dong-Choon Kim**, Sung-Min Kum**, Jang-Soon Yim***

Graduate school, Department of Mechanical Eng., Inha University, Incheon, 420-751, Korea

**Department of Mechanical Eng., Kyungmoon College, Pyungtaek, 459-070, Korea*

***Department of Mechanical Eng., Halla Institute of Technology, Wonju, 220-840, Korea*

****Department of Mechanical Eng., Inha University, Incheon, 420-751, Korea*

(Received September 10, 1999; revision received October 16, 1999)

ABSTRACT: The heat transfer characteristics for air jet vertically impinging on a flat plate which had a set of hybrid rod were investigated experimentally. The rod had a cross section made with a half of circular cross section and that of rectangular and was installed in front of the plate. The heating surface was given constant heat flux value of 1020 W/m²°C and the problem parameters investigated were jet Reynolds number, nozzle-to-plate spacing and the rod size. The local and local average Nusselt number characteristics were found to be dependent on the rod size because the flow was disturbed by installing the rod. Higher convective heat transfer rate occurred in the whole plate as well as in the stagnation region.

Key words: Impinging air jet(충돌공기제트), Hybrid rod(하이브리드 로드), Convective heat transfer rate(대류 열전달율), Wall jet region(벽면 제트영역)

기 호 설 명

A : 가열 표면적 [m²]
 B : 노즐출구 폭 [mm]
 C : 하이브리드 로드와 평판사이의 간극 [mm]
 h : 열전달계수 [W/m²°C]
 H : 노즐과 평판사이의 거리 [mm]
 L : 노즐높이 [mm]
 P : 하이브리드 로드피치 [mm]

T_w : 가열면의 국부 온도 [°C]
 T_∞ : 노즐출구에서의 공기 온도 [°C]
 X : 정체점으로부터 노즐 폭 방향의 거리 [mm]
 Nu : Nusselt 수, hB/λ
 Re : Reynolds 수, $\frac{UB}{\nu}$

그 리 스 문 자

λ : 열전도율 [W/m°K]
 ν : 동 점성계수[m²/°K]

† Corresponding author

Tel.: +82-333-610-8024; fax: +82-333-668-4900

E-mail address: nunjja@unitel.co.kr

하 첨 자

f : 단순 평판
 hr : 하이브리드 로드를 포함한 평판
 s : 정체점

1. 서 론

충돌제트의 산업적 응용은 경제성과 제어의 용이성으로 인해 비철금속 박판의 풀림 (annealing), 유리의 담금질 (tempering), 종이나 유리의 건조 (drying), 압연 제품의 냉각, 가스 터빈에서 blade의 냉각, 레이저나 플라즈마 절단 공정에서 제품의 열변형의 감소를 위한 냉각, 전자장비의 냉각 등 많은 분야에서 활용되고 있다.

충돌제트의 열전달에 관한 Gardon 등^(1,2)에 의한 초기 연구에서 가열평판면의 평균 열전달율은 노즐과 평판사이의 거리 H에 의존되며, H/B=8~10에 가열평판이 위치하였을 때, 주위유체와의 혼합작용에 의해 생성된 와류 때문에 정체점의 열전달 계수가 최대가 됨을 발표하였다. 특히 가열평판이 potential core영역 안에 위치하였을 때 정체점으로부터 노즐 폭의 약 3 배 되는 위치에서 열전달계수의 제 2 극대점이 나타나는데, 이는 충류에서 난류경계층으로의 천이에 의해 발생하는 것으로 추론하였다. Yokobori 등⁽⁴⁾은 전열평판면위 stagnation line에 수직하게 발생하는 counter rotating vortex pairs가 전열평판면의 높은 열전달율과 관계가 있음을 가시화로 확인하였으며, 전열평판이 potential core영역 안에 위치하게 되면 counter rotating vortex pairs는 관찰되지 않는다고 보고하고 있다. 이 연구 결과들을 종합하면 정체점을 포함한 정체영역에서의 높은 열전달 효과는 주로 주위 유체와의 혼합작용에 의해 전열평판면 앞에서 발생하는 와류가 온도 경계층을 교란하기 때문이며, 이러한 와류의 형성은 노즐출구에서 가열면까지의 거리에 의해 좌우됨을 알 수 있다.

Cha 등⁽⁷⁾은 2차원제트에서 열전달 증진을 도모하기 위하여 가열평판면에 3종의 파형rib를 설치하여 파형 rib의 pitch와 높이의 변화에 따른 열전달 증진율의 차이는 거의 없지만 이를 설치하지 않은 경우에 비해 약 1.6배의 열전달 증진효과를 얻었으며, 그 원인은 파형rib에 의한 유동의 재부착 효과 때문이라고 보고하고 있다.

A. Khan 등^(8,9)은 원형노즐을 사용하여 가열평

판면 전방에 다공판을 설치하여 실험한 결과, 열전달 증진은 다공판의 구멍 직경과 피치 (pitch), 다공판과 가열평판과의 거리에 좌우되며, 다공판을 통과하여 분할된 제트는 가열면상의 난류도가 증가되면서 온도 경계층을 교란시킴으로서 정체영역과 벽면제트영역 전체에 걸쳐 다공판이 설치되지 않은 경우보다 높은 열전달 증진 효과를 얻을 수 있다고 보고하였다. Kataoka⁽¹⁰⁾은 노즐 전방에 난류촉진체로 cylinder군 설치 실험 결과 cylinder와 가열면 간의 거리 X와 cylinder지름 D의 비를 parameter로 하고 $4 < X/D < 6$ 인 지점에 원형 cylinder군을 설치하여 cylinder군을 설치하지 않은 경우보다 최고 1.8배의 열전달 증진효과가 있다고 보고하였다. 이와 같이 벽면제트영역에서의 열전달 효과를 증가시키기 위해서 추가적인 동력을 공급하지 않고 열전달 면적을 증가시키거나, 난류촉진체를 설치하여 유동장을 교란시켜 제트의 가속, 재부착 등의 효과를 이용하는 방법이 에너지 절약의 측면에서 볼 때 바람직하다고 생각한다. 이에 본 연구에서는 열전달 효과를 증가시키기 위하여 가열평판면에 난류촉진체로서 하이브리드 로드 (이하 h-rod)를 설치하였을 때 열전달특성 및 유동특성을 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에서 사용된 가열면의 형태는 Fig. 1과 같은 직사각형의 bakelite(500×500×200)판 위에 스테인레스 박판(두께 30 μm, 폭 10 mm, 길이 500 mm) 3개를 접착제로 접착하고, 단면 B-B와 같이 동판으로 연결하여 제작하였다. 가열면의 열유속을 $q=1020 \text{ W/m}^2$ 로 유지하기 위하여 통전 가열방식으로 가열하였다. 이 때 전압은 자동 전압조정기를 사용하여 일정하게 유지시켰으며, 열유속 값은 식 (1)과 같이 회로내의 전류계의 전류와 스테인레스박판 양단 전위차의 적으로 구하였다.

$$q = I \cdot \frac{V}{A} \quad (1)$$

Fig. 2는 2차원 충돌제트계에 대한 실험장치의 개략도와 좌표계이다. 흡입공기는 flow rate dam

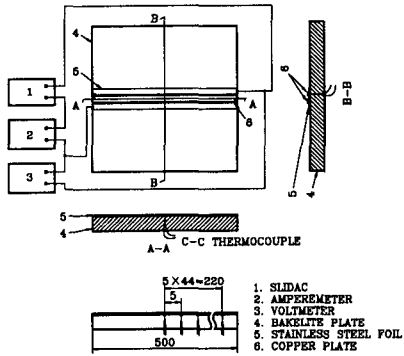


Fig. 1 Heating apparatus.

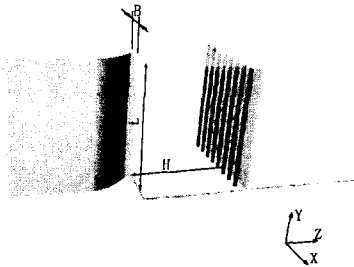


Fig. 2 2-D impinging air jet system.

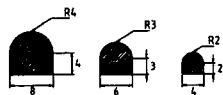


Fig. 3 Geometry of hybrid rod.

per에 의해 조절된 후 wire mesh와 diffuser를 지나 honeycomb과 settling chamber에 의해 균 일화 되어지고 노즐을 통해 분출된다. 또한 2차 원 제트로 제한하기 위하여 노즐출구 상하 면에 평행 판을 설치하였으며 노즐출구단면의 centroid와 충돌판의 centroid를 일직선상에 위치 시켰다. 충돌판은 전후 좌우이동이 가능하도록 하였으며 최대이동거리는 노즐출구로부터 노즐 출구 폭의 16배(800 mm)까지로 하였다. 풍동 및 test section 부의 지면과의 접촉면에는 진동에 의한 외란을 방지하기 위해 방진판을 설치하였다. 충돌판 앞 에 설치된 h-rod의 형상은 Fig. 3과 같으며 그 크기는 각각 4, 6, 8이다.

2.2 실험방법

h-rod군을 평판과의 간극 C=1mm, h-rod간의 간격 P/B=0.6으로 고정 설치하여 Re=6500~58500, H/B=2, 6, 10, 14의 조건에 대해 실험한 후 같은 조건의 h-rod가 설치되지 않았을 때와 열전달 증진효과를 비교하였다. 이때 가열면의 온도측정은 스테인레스 박판 뒷면에 직경 70 μm의 C-C열전대(T-type)45개를 정체점으로부터 5 mm간격으로 설치하여 data logger (Fluke, Helios I)에 연결하여 가열면이 정상상태에 도달한 것을 확인한 후 1분 간격으로 10회 측정된 값의 평균 온도를 PC에 저장하였으며, 매회 가열면의 평균 온도차가 0.1℃이하에 도달하였을 때를 정상상태로 가정하였다. 가열면이 부착된 bakelite판(열전도율 0.176 W/m℃)에서의 방열량은 전체 가열량의 0.8% 이내의 범위였기 때문에 bakelite판을 통한 열손실은 무시하였으며 노즐출구의 온도는 16~17℃에서 유지되었다. 국부 열전달계수(h), 국부 Nusselt수 (Nu), 국부평균 Nusselt수 (\overline{Nu})는 다음과 같이 계산하였다.

$$h = q / (T_w - T_e) \quad (2)$$

$$Nu = h \cdot B / \lambda \quad (3)$$

$$\overline{Nu} = \int_{-x}^x Nu \cdot dx / \int_{-x}^x dx \quad (4)$$

여기서 T_w 는 가열면의 온도, T_e 는 노즐출구에서의 제트온도이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 가열평판면에 충돌하는 2차원 제트에서의 열전달 특성

Fig. 4는 Re의 변화에 따른 정체점에서의 Nu를 나타낸 것으로 정체점에서의 Nu는 Re가 증가할수록 H/B에 따라 큰 폭으로 변하며 potential core영역 이후부터 급격히 증가하기 시작하여 H/B=10에서 최대가 된 후 H/B>10 영역에서는 다시 감소하는 경향을 나타낸다. 정체점에서의 Nu가 H/B=10에서 최대가 되는 것은 주위 유체와 이루어진 혼합작용이 제트 중심에서까지 이루어져 유체유속의 요동(fluctuation)이 커져 이 영

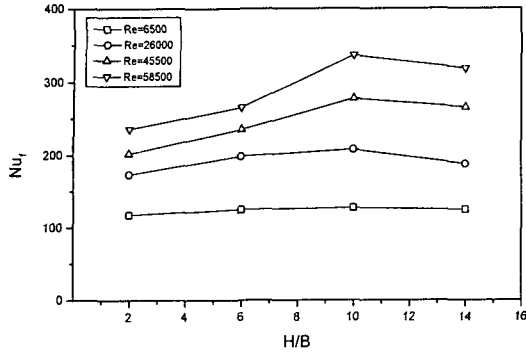


Fig. 4 Dependence of stagnation Nusselt number on H/B and Re.

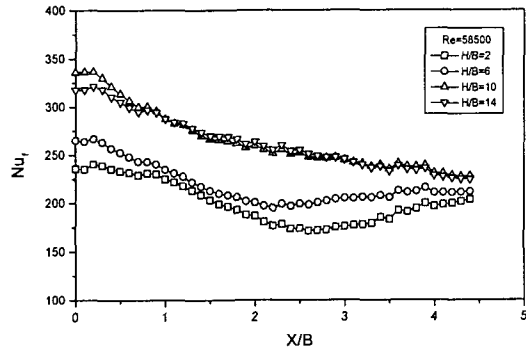


Fig. 5 Lateral distributions of local Nusselt number as a function of H/B (Re=58500).

역에서 난류강도가 최대가 되기 때문이다. 또한 $H/B > 10$ 이후 정체점의 Nu의 감소 원인은 난류강도가 최대가 되는 최적점 이후 강한 혼합작용에 의해 오히려 난류 강도가 감소하기 때문이며 이러한 결과는 R. Gardon⁽¹⁾과 F.O. Thomas⁽¹⁰⁾ 등의 연구 결과에서도 동일하게 나타나고 있다. Fig. 5는 $Re=58500$ 에 대해 H/B의 변화에 따른 가열평판 면의 국부 Nu를 정체점으로부터 X방향의 변화에 따른 분포를 나타낸 것이다.

H/B=2에서의 국부Nu의 분포가 가장 작게 나타나는데 이는 가열평판이 노즐출구에서의 작은 난류강도를 거의 그대로 유지하는 potential core 영역에 위치하였기 때문이다. potential core 영역 이외의 영역에 가열평판이 위치하였을 경우에는 높은 Nu의 분포를 나타내는데, 이것은 가열평판 면 앞에서 counter rotating vortex pairs가 형성되어 물질 및 열전달 효과를 증가시키기 때문이다. X/B=1이후부터 Nu가 계속 감소하고 있기 때문에 $X/B \leq 1$ 영역이 정체영역(stagnation region)

이라고 생각되며, S. A. Ashforth-Frost⁽³⁾은 이 영역에서 유동방향의 속도 기울기가 매우 작게 나타나기 때문에 정체영역으로 정의하고 있다. 벽면제트영역으로 이 동할수록 열전달 효과가 저하되고 있음을 확인 할 수 있는데 이는 제트가 벽면제트영역으로 진행할수록 유속이 감소되고 경계층이 성장하여 열전달을 방해하기 때문이며 이것은 다른 연구 결과와도 일치하고 있다^(1,6).

Potential core 영역에 가열평판이 설치되었을 경우의 Nu는 $X/B \sim 2.3$ 근방에서 다시 증가하기 시작하는데 이것은 경계층이 층류에서 난류로 전이하기 때문이며 R. Gardon⁽¹⁾과 S. A. Ashforth-Frost⁽³⁾의 연구 결과에서도 이러한 재상승 효과를 찾아 볼 수 있다.

Potential core 이외의 영역($H/B=10, 14$)에 가열평판이 설치되었을 경우에서는 벽면제트영역에서의 재상승효과가 나타나지 않고 있는데 이는 주위 유체와의 혼합작용이 제트중심까지 완전히 이루어져 난류강도가 증가된 상태로 벽면에 충돌하기 때문이며, 이 영역에서는 정체영역, 벽면제트영역 모두에서 $H/B=2, 6$ 에서 보다 큰 Nu를 나타낸다.

H/B의 변화와 무관하게 Nu가 정체점에서보다 정체점 근방에서 최대 값을 나타내는 것은 Kinetic energy가 정체점에서보다 $0 < X/B < 0.5$ 영역에서 최대 값을 나타내기 때문이며 M. Behnia⁽⁶⁾은 수치모사를 통해 정체영역에서의 kinetic energy의 분포를 확인하였으며 H/B=2, 6 일 때 각각 $X/B \approx 1, 2$ 에서 최대 kinetic energy를 갖는다고 보고하고 있다.

3.2. 하이브리드 로드群 설치가 열전달 특성에 미치는 영향

3.2.1 가열평판면의 국부 열전달 특성

Fig. 6은 h-rod가 설치되지 않았을 때 가장 적은 열전달 효과를 나타냈던 (a)H/B=2와 가장 큰 효과를 나타냈던 (b)H/B=10의 경우에 h-rod를 포함한 전열평판을 위치시킨 후, h-rod의 크기 변화에 따른 열전달 효과를 도시한 것이다. 정체영역 안에 놓여 있는 h-rod의 영향은 유동저항을 발생하기 때문에 오히려 h-rod가 설치되지 않았던 경우보다 작은 열전달 효과를 얻었다. 그

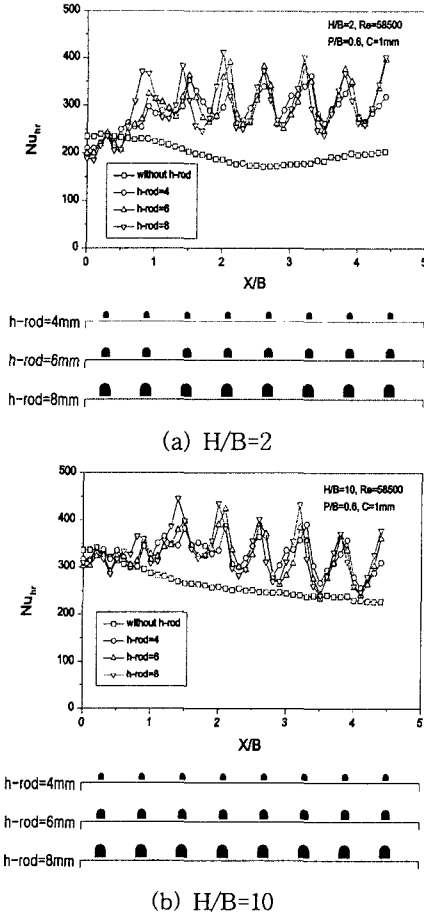


Fig. 6 Lateral distributions of Nusselt number as variation of hybrid rod size.

러나, 벽면제트 영역으로 갈수록 h-rod에 의한 열전달 효과가 명백하게 나타나는데 이러한 효과는 h-rod 크기가 증가할수록 더 크게 나타나고 있다. 또한 h-rod사이에서 열전달 효과의 감소 폭은 h-rod의 크기가 증가할수록 더 크게 나타나는데, 이것은 h-rod의 크기가 증가할수록 h-rod 사이의 거리가 짧아져 유동저항이 증가하여 유동이 충분히 성장하지 못할 뿐만 아니라 h-rod의 곡면부로 분산된 제트가 벽면으로 재부착하는 효과가 작아지기 때문이다.

H/B=2에서 h-rod=4, 6이 세 번째 h-rod이후부터 열전달 효과가 규칙성을 갖기 시작하는 것과는 다르게 h-rod=8은 두 번째 h-rod부터 규칙적인 증가·감소의 경향을 나타내고 있다. H/B=10에서는 세 번째 h-rod이후부터 Nu의 분포가 규

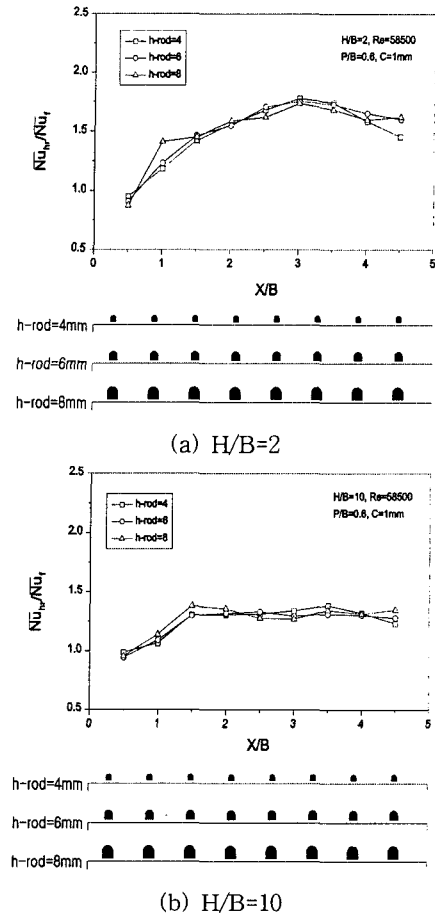


Fig. 7 Effect of hybrid rod on local average Nu.

칙적으로 나타나고 있으나 두 번째 h-rod이전까지의 Nu의 분포는 h-rod가 설치되지 않았을 경우에 비해 큰 차이를 나타내지 않고 있다. 이것은 가열평판이 천이영역(transition region)에 위치하였을 경우, 정체영역에서는 h-rod에 의한 영향보다는 제트가 지니고 있는 큰 난류강도에 의한 영향이 더 크게 나타나기 때문이다. H/B의 변화에 따른 열전달 효과는 h-rod가 설치되지 않았을 때와 같이 H/B= 10에서 정체영역 뿐만 아니라 벽면제트영역 전체에서 크게 나타난다.

3.2.2. 하이브리드 ROD에 의한 열전달 증진효과

Fig. 7은 국부평균 Nu를 나타낸 것으로 (a)H/B=2에서는 h-rod의 크기와 관계없이 X/B ≈ 3.4에서 h-rod=4, 6, 8 각각에 대해 181%,

178%, 176%의 최대 국부평균 증가율을 나타내고 있다. Fig. 7(b)의 $H/B=10$ 인 경우 $h\text{-rod}=4, 8$ 은 $X/B \approx 3.4$ 에서 각각 143%, 140%의 최대증가율을 나타내고, $h\text{-rod}=6$ 은 $X/B \approx 2.4$ 에서 137%의 최대증가율을 나타내고 있다.

최대 국부 열전달 증가율이 $H/B=2, 10$ 에 대해 $h\text{-rod}=8$ 에서 각각 226%, 180%로 나타나는 것과는 다르게 최대 국부평균 열전달 증가율은 $h\text{-rod}=4$ 에서 나타나고 있다. 이것은 $h\text{-rod}$ 의 크기가 증가함에 따라 유동저항이 증가하여 $h\text{-rod}$ 사이에서 열전달 효과의 감소 폭이 커져 평균값에 영향을 미치기 때문이며, 이러한 경향은 모든 H/B 조건에서 나타난다.

4. 결론

2차원 충돌공기제트계에서 열전달 증진을 목적으로 $h\text{-rod}$ 를 가열평판면 전방에 $h\text{-rod}=4, 6, 8$ 각각에 대하여 간극 $C=1$ mm, $h\text{-rod}$ 사이의 거리 $P/B=0.6$ 으로 고정 설치하였다. 이때 Re 를 6500~58500의 범위로, 가열평판을 $H/B=2, 6, 10, 14$ 각각에 위치하여 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 충돌제트계에 $h\text{-rod}$ 가 설치됨으로서 유동의 가속, 재부착, 경계층의 교란 등에 의해 $h\text{-rod}$ 가 설치되지 않은 가열평판면에서 열전달 효과가 감소하는 경향을 나타내는 벽면제트영역에서도 높은 열전달 증진효과를 얻을 수 있었다.

(2) 벽면제트영역에서 $h\text{-rod}$ 의 크기가 증가할수록 국부 열전달 증가율이 증가하였으며, $Re=58500$, $H/B=2$, $h\text{-rod}=8$ 에서 같은 조건하의 $h\text{-rod}$ 가 없는 경우에 비해 최대 약 226%로 나타났다.

(3) Hybrid rod의 크기가 증가함에 따라 제트의 재부착 효과가 감소하고 $h\text{-rod}$ 측면에서 유동저항이 증가하여 $h\text{-rod}$ 사이에서 열전달 증진효과의 감소 폭이 커지기 때문에 최대 국부평균 열전달 증진율은 $h\text{-rod}=4$ 에서 나타나는데 $Re=58500$, $H/B=2$ 에서 같은 조건하의 $h\text{-rod}$ 가 없는 경우 보다 최대 약 181%의 국부 평균 열전달 증진효과를 얻을 수 있었다.

(4) 전체 평균 열전달 효과는 노즐출구의 유속을 14%($Re=45500$)에서 18%($Re=58500$)로 증가시켰을 때 116%의 증가율을 보인 반면에 동일

유속(12 %)에서 $h\text{-rod}$ 를 설치함으로써 최대 약 145%의 증진효과를 얻었다.

참고문헌

1. Robert Gardon, J. Cahit Akfirat, 1966, Heat Transfer Characteristics of Impinging Two-Dimensional Air Jets, J. of Heat Transfer, Trans. of the ASME, Vol. 88, pp. 101-108.
2. Robert Gardon and J. C. Akfirat, 1995, The Role of Turbulence in Determining the Heat Transfer Characteristics of Impinging Jets, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 8, pp. 1261-1272.
3. S. A. Ashforth-frost, K. Jambunathan and C. F. Whitney, 1995, Velocity and Turbulence Characteristics of a Semi-Confined Orthogonally Impinging Slot Jet, 10th Symposium on Turbulence Shear Flows, Vol. 1, pp. 10-1, 10-6.
4. Yokobori S., Kasagi, N. and Hirata M., 1983 Transport Phenomena at the Stagnation Region of a Two Dimensional Impinging Jet, Trans. of JSME B, Vol. 49, pp. 1029-1039.
5. F. O. Thomas, V. W. Goldschmit, 1986, Acoustically Induced Enhancement of Widening and Fluctuation Intensity in a Two-Dimensional Turbulent Jet, Journal of Fluids Eng., Trans. of the ASME, Vol. 108, pp. 331-337.
6. M. Behnia and S. Parneix, P. A. Durbin, 1998, Prediction of Heat Transfer in an Axisymmetric Turbulent Jet Impinging on a Flat Plate, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 41, No. 12.
7. J. Y. Cha, S. Kasagi, K. Hirata, 1984, 2-Dimensional Impingement Heat Transfer with Cross Section of Ribs, 21th Japan Heat Transfer Symposium, B213, pp. 94-96.
8. M. M. Ali Khan, S. Kasagi, K. Hirata, 1980, A Study on Heat Transfer Augmentation in Impinging Jet (II), 18th Japan Haet

- Transfer Symposium, pp. 37-39.
9. M. M. Ali Khan, S. Kasagi, K. Hirata, 1981, A Study on Heat Transfer Augmentation in Impinging Jet, 18th Japan Heat Transfer Symposium, pp. 199-201.
10. K. Kataoka, 1990, Impinging Heat Transfer Augmentation due to Large Scale Eddies, Proc. 9th Int. Heat Transfer Conference, Vol. 1, KN-15, pp. 255-273.