

온도구배를 갖는 평판에 대한 원형 충돌제트의 열전달 및 난류유동에 관한 실험적 연구

An experimental study on the heat transfer and turbulent flow of round jet impinging the plate with temperature gradient

한 충 호*, 이 계 복**, 이 충 구**
C. H. Han, K. B. Lee, C. G. Lee

Key words: Turbulent flow(난류유동), Impinging jet(충돌제트), Temperature gradient(온도구배) Heat transfer rate(열전달률), Turbulent intensity(난류강도)

ABSTRACT

An experimental study of jet impingement on the surface with linear temperature gradient is conducted with the presentation of the turbulent characteristics and the heat transfer rates measured when this jet impinges normally to a flat plate. The jet Reynolds number ranges from 30,000 to 90,000, the temperature gradient of the plate is 2~4.2°C/cm and the dimensionless nozzle to plate distance(H/D) is from 6 to 10. The results show that the peak of heat transfer rate occurs at the stagnation point, and the heat transfer rate decreases as the radial distance from the stagnation point increases. A remarkable feature of the heat transfer rate is the existence of the second peak. This is due to the turbulent development of the wall jet. Maximum heat transfer rate occurs when the axial distance from the nozzle to nozzle diameter(H/D) is 8. The heat transfer rate can be correlated as a power function of Prandtl number, Reynolds number and the dimensionless nozzle to plate distance(H/D). It has been found that the heat transfer rate increases with increasing turbulent intensity.

기 호 설 명

A_s : 구리판의 면적 [m²]
 b : 제트의 폭 [m]
 D : 노즐 직경 [m]
 H : 충돌 거리 [m]
 h : 열전달계수 [W/m²K]
 Nu : Nusselt 수, hD/λ

Pr : Prandtl 수, ν/α
 q : 대류 열유속 [W/m²]
 Re : Reynolds 수, $\rho U_c D/\mu$
 S : 충돌판으로부터의 수직거리 [mm]
 T_∞ : 제트 온도 [K]
 T_w : 충돌판의 온도 [K]
 U : 제트의 축방향 평균속도 [m/s]
 U_c : 제트의 중심속도 [m/s]
 U_e : 노즐 출구에서의 속도 [m/s]
 u' : 축방향 요동속도 [m/s]
 V : 벽면제트방향 평균속도 [m/s]

* 충북대학교 대학원

** 정회원, 충북대학교 기계공학과

- v' : 벽면제트방향 유동속도 [m/s]
 x : 정체점으로부터 온도구배 방향을 따른 거리 [m]
 z : 노즐 출구로부터 축방향 거리 [m]

그리스 문자

- λ : 공기의 열전도도 [W/mK]
 ψ : 제트의 충돌각

1. 서론

충돌제트는 설치의 간편성과 고효율의 열 및 물질전달 효과를 얻을 수 있고 냉각 또는 가열하고자 하는 위치의 조절이 쉽다는 장점을 가지고 있다. 따라서 강판의 냉각, 유리의 템퍼링, 종이 및 필름의 건조, 가스터빈 블레이드의 내부선단과 연소기의 외벽, VLSI 고밀도 전자부품의 냉각, 질삭공구, 가공재료의 열변형 방지 등의 산업에 응용되고 있다. 또한 충돌제트가 국부 열 및 물질 전달을 증가시키기에 매우 적합하기 때문에 최근에 관심이 고조되고 있고 실험적 연구와 더불어 해석적 연구도 병행되고 있다.

충돌제트에 관한 연구는 응용분야가 폭넓은 만큼 연구분야도 다양하여 유동장 해석과 전열면에서의 열전달 해석으로 나눌 수 있는데, 유동장의 연구보다는 주로 전열면상에서 열전달 특성에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 주로 레이놀즈수, 노즐과 충돌면 사이의 거리, 노즐 형상, 제트의 온도와 방향, 충돌면의 형상과 상태 등이 유동과 열전달에 미치는 영향을 다루고 있다.

Gau와 Chung⁽¹⁾은 2차원 슬롯제트가 분사되는 원통형의 오목면과 볼록면에서의 열전달 연구에서 볼록면의 정체점에서 일련의 3차원 와류에 의한 운동량 전달의 증가에 의해 열전달이 촉진되며, 벽면제트영역에서 유동은 구심력에 의해 안정되므로 열전달률이 감소함을 알았다. 또한 원형제트가 볼록 반구면에 충돌할 때 열전달계수를 측정하여 벽면 제트영역에서 층류제트가 난류제트로 천이 할 때 증가되는 난류강도의 영향 때문에 열전달계수의 2차 정점이 나타난다고 보고되고 있다.⁽²⁾

Sparrow 등⁽³⁾은 비스듬히 충돌하는 원형제트의 열전달 특성에 관한 연구에서 최대 질량전달지점

의 상향이동은 유동의 비대칭을 증가시키고 이로 인해 최대 압력지점은 정체점과 일치하지 않고 최대 질량전달지점과도 일치하지 않으며, 충돌거리가 증가함에 따라 하향류의 열전달계수의 감소율과 비대칭 성향도 작아짐을 밝혔다.

Ward와 Mahmood⁽⁴⁾는 선회류(swirl)를 축방향과 접선방향의 상대적인 유동률이라 정의하고 선회류가 증가함에 따라 열전달률은 일반적으로 감소하며 큰 선회류에서 최대 열전달의 위치가 제트의 중심축에서 벗어남을 알았다.

Ali Khan 등⁽⁵⁾은 노즐과 충돌판 사이에 다공판을 설치하여 포텐셜 코어 구간에서 3배의 열전달의 증가를 얻었다. 이는 다공판의 설치가 단일제트의 원래의 유동을 다공판과 충돌판사이의 공간에서 3차원 유동의 강한 와류 2차유동(vortical secondary flow)으로 변화시키기 때문임을 유동가시화를 통해 알았다.

현재까지의 연구는 단일제트가 균일 온도를 갖는 평면에 수직으로 충돌할 때의 경우에 집중되어 있는데 서로 다른 발열량을 갖는 칩으로 이루어진 컴퓨터 보드는 다양한 온도분포를 가질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 충돌판이 균일 온도가 아닌 선형적인 온도구배를 갖는 경우에 대해 원형제트가 충돌할 때의 유동장을 측정하고 열전달 특성을 파악하여 서로의 상관 관계를 알아보하고자 한다.

노즐 출구와 각 영역에서의 속도분포와 난류량을 측정하여 유동구조를 파악하고 충돌면의 온도변화와 열유속을 측정하여 열전달계수의 분포를 알아본다. 레이놀즈수, 충돌거리, 벽면제트방향거리, 온도구배 등의 변수가 유동장 및 국부 열전달계수의 분포에 어떤 영향을 미치는지 파악하고자 하며 특히 온도구배가 주어진 충돌판에서의 열전달 특성에 초점을 두고 연구하려고 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 장치들의 개략도는 Fig. 1과 같으며 실내공기를 풍동(wind tunnel)으로 송풍시켜 노즐(D=0.05 m)에서 원하는 속도의 제트를 만들 수 있도록 하였다. 충돌판은 전후 이송이 가능한 이송장치에 지지하여 충돌거리(H=0.3-0.5 m)를 조절할 수 있도록 하였고, 선형적인 온도분포를 갖는 가열판을 만들기 위해 Fig. 2와

같이 두께가 0.05 mm인 구리판을 폭을 다르게 하여 직렬로 연결했다. 구리판은 두께가 10 mm인 단열성이 양호한 Bakelite판에 고온에서 내열성이 강한 thermal bond(Omega Bond, OB200)로 접착시켜 고온에서도 접촉상태가 양호하도록 하였다. 구리판의 양 끝단을 전원공급장치(Slidac, 2 kW)에 연결하여 저전압 고전류를 공급하고, 공급전원의 전류와 구리판에서의 전압강하를 측정하기 위해 디지털 전류계와 디지털 전압계를 연결하였다. 전열면의 이면에는 직경 0.3 mm의 T-type 열전대(thermocouple)를 납땜으로 부착하여 접촉저항을 최소화 하였고 구리판의 Biot 수를 계산하면 0.0003 이하로 가열판의 두께를 따른 온도변화는 무시할 수 있으므로 열전대를 구리판의 이면에 연결하여 온도를 측정하였다.

충돌판의 전면에서는 열선풍속계(KANOMAX, Hot Wire and Film Anemometer System 7106)를 사용하여 제트유동의 속도, 난류 전단력, 난류강도 등을 측정하도록 하였는데, 이 때 열선풍속계의 프로브는 스테핑 모터를 부착한 x-z 이송장치에 설치하여 프로브의 위치를 PC에서 제어할 수 있도록 하였다. 열선풍속계는 2채널이며 정온형식(constant temperature type)으로 여기서 얻어진 아날로그 데이터는 A/D 변환기(Data Translation Inc, PCI-EZ DT3001)를 이용하여 디지털 신호로 변환하여 PC에 저장한 뒤 데이터 분석을 하도록 하였다.

노즐의 출구 속도는 마이크로 마노미터를 사용하여 보정하였고 제트의 각 부분에서의 속도는 열선풍속계를 사용하여 측정하였다. x-프로브를 사용하므로 축방향과 벽면제트방향의 속도를 동시에 측정할 수가 있다. 축방향의 속도(U)는 이송장치를 PC로 제어하여 각각의 충돌거리(H/D=6, 8, 10)에서 벽면제트방향으로 2.5 mm 또는 5 mm 간격으로 측정하였다. 벽면제트방향의 속도(V)는 각각의 벽면제트방향거리(x/D=2, 3, 4, 5, 6)에서 충돌면 전면에서부터 축방향으로 1.25 mm 간격으로 측정하였다.

충돌판을 구성하는 구리판의 폭이 다르기 때문에 구리판 각각에서의 저항도 다르게 된다. 따라서, 디지털 전압계와 디지털 전류계로부터 구리판 전체에서의 압력강하(V)와 전류(A)를 읽어 전체저항을 계산한 뒤 구리판 각각의 폭의 비율에 따라 저항값을 계산한다. 그러므로 각각의 구리

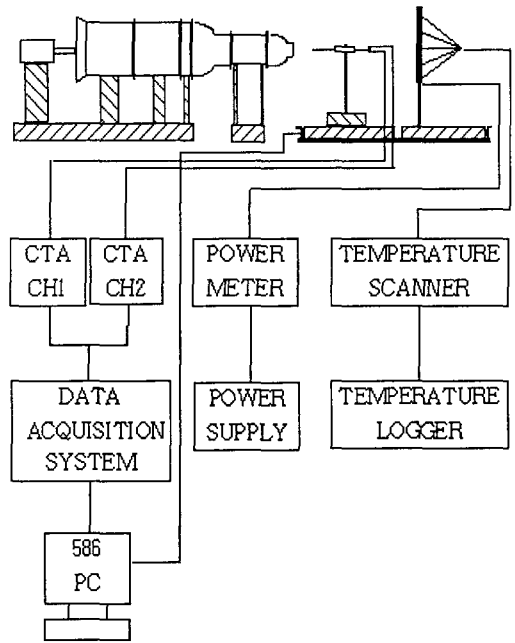


Fig. 1 Diagram of experimental apparatus.

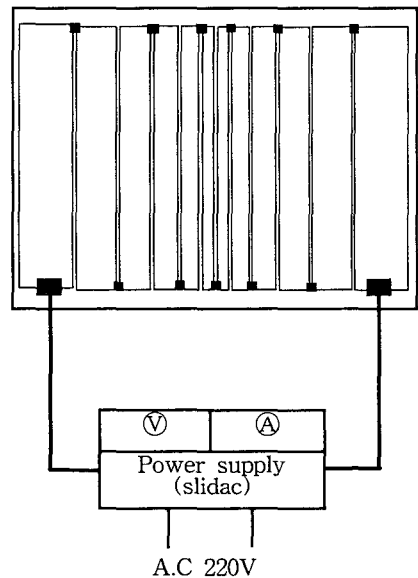


Fig. 2 Heating system.

판의 단위 면적당 열유속을 다음과 같이 계산한다.

$$q = \frac{1}{A_s} \times V \times I = \frac{1}{A_s} \times I^2 \times R \quad (W/m^2) \quad (1)$$

열전달계수는 다음 식으로부터 구하였다.

$$h = \frac{q}{(T_w - T_\infty)} \quad (W/m^2 K) \quad (2)$$

Nusselt 수는 다음의 식으로부터 구하였다.

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} \quad (3)$$

3. 실험결과 및 고찰

가열판의 온도구배(dT/dx)가 2, 3 및 4.2 °C/cm, 충돌거리(H/D)가 6, 8 및 10, 레이놀즈수가 30,000, 40,000, 50,000, 60,000 및 90,000일 때, 즉, 총 45 경우에 대해 열전달 특성을 구하였다.

Fig. 3은 온도구배에 따른 열전달계수를 정체점으로부터의 거리에 따라 나타냈다. 모든 경우에서 정체점에서 최대 열전달계수가 나타났고 정체점으로부터 멀어짐에 따라 감소하다가 임의의 위치에서 다시 증가하다 감소하는 경향을 보인다. 이것은 정체점 부근에서는 제트의 직접 충돌로 인해 열전달계수가 가장 크고 벽면제트방향을 따라서 난류가 발달함에 따라 난류의 영향으로 열전달계수가 다시 증가했다가 감소하는 것을 보여준다. 일정한 충돌거리에서 레이놀즈수가 다른 경우의 실험에서도 같은 결과를 보여주었다.

여러 가지 온도구배와 레이놀즈수에 대해 충돌거리를 변화시키며 열전달 특성을 구하였다. Fig. 4는 대표적인 예로 주어진 조건에서 열전달 효과가 H/D=8에서 가장 큰 것을 보여준다. 온도구배와 레이놀즈수가 다른 조건의 실험에서도 비슷한 경향을 보였다. 그러나 속도가 증가할수록 충돌거리의 영향은 작게 나타났다. 이는 Gardon과 Akfirat⁽⁶⁾이 제시한 난류강도가 H/D=8부근에서 최대가 된다는 결과와 잘 일치한다. 즉 난류확산에 의해 열전달이 증가되는 것을 보여준다.

여러 가지 온도구배와 충돌거리에 대해 제트의 속도를 변화시키며 레이놀즈수가 열전달에 미치는 영향을 알아보았다. Fig. 5는 일정한 온도구배와 충돌거리에서 열전달에 대한 레이놀즈수의 영향을 보여준다.

선형온도구배를 갖는 가열판에 대한 충돌제트의 열전달 효과를 정량적으로 나타내기 위해

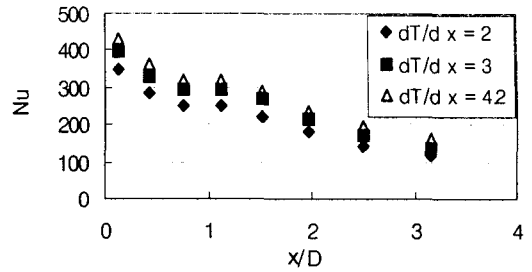


Fig. 3 Nusselt number vs. radial distance (H/D=8, Re=90,000).

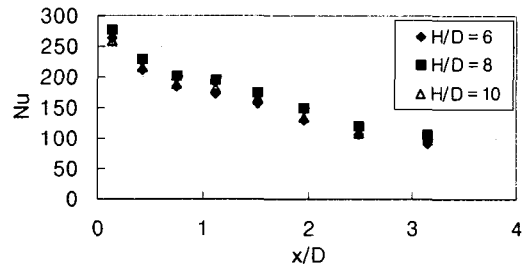


Fig. 4 Nusselt number vs. radial distance (dT/dx=2 °C/cm, Re=40,000).

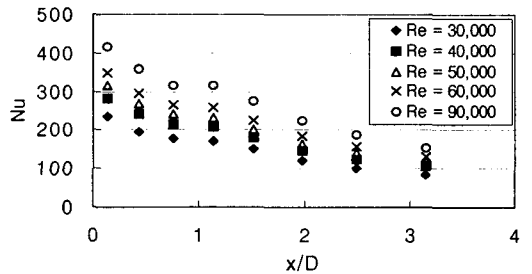


Fig. 5 Nusselt number vs. radial distance (dT/dx=4.2 °C/cm, H/D=10).

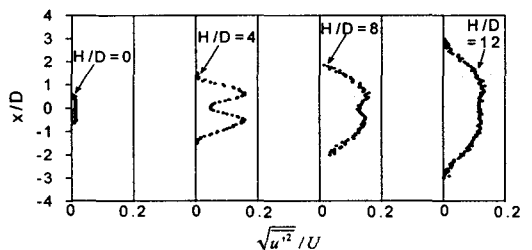


Fig. 6 Turbulence intensity distribution.

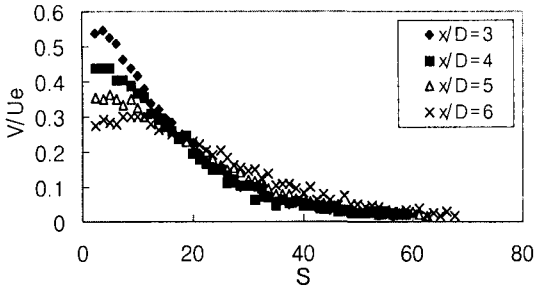


Fig. 7 Wall jet velocity distribution vs. normal distance from the wall.

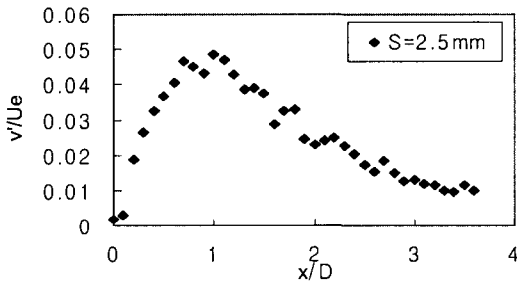


Fig. 8 Distribution of velocity fluctuation of the wall jet vs. radial distance.

무차원수인 Nusselt 수의 상관관계식을 구하였다. 강제대류 열전달에 관한 기존의 연구⁽⁷⁻⁹⁾는 Nusselt 수를 다음과 같은 일반적인 무차원식으로 표현하였다.

$$Nu = C Pr^m Re^n \quad (4)$$

본 실험의 온도범위에서 Pr수는 0.704~0.706이며 기존의 많은 연구결과에 따르면 $m=1/3$ 을 적용하게 된다. Pr^m 의 변화값이 미소하므로 온도구배에 의한 Pr수의 영향이 적다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 강제대류에 대한 기존의 열전달 상관식에 충돌제트의 기하형태 변수인 (H/D)를 포함시켜 각 온도구배에 대해 상관식을 회귀분석을 통해 구하였다.

모든 실험조건에 대해 정체점에서의 열전달 상관식을 구하면

$$Nu = 2.674 Pr^{1/3} Re^{0.472} (H/D)^{-0.1} \quad (5)$$

로 나타낼 수 있으며 오차는 3.2%이내이다.

충돌제트의 열전달 특성과 난류구조와의 관계를 알아보기 위해 평균속도, 난류요동속도, 난류전단력을 측정하였다. 축방향의 거리에 따른 제트중심부의 속도를 측정된 결과 제트출구속도가 유지되는 포텐셜 코어 길이가 4~5D 정도 된다는 기존의 연구⁽¹⁰⁾와 일치한다. 그리고 노즐 출구에서의 속도분포와 벽면제트방향의 거리에 따른 축방향의 속도(U)분포를 측정하였는데 노즐 출구에서의 균일 속도분포가 축방향으로 나아갈수록 전단력의 발달과 함께 서서히 종모양의 속도분포를 이루며 속도구배가 완만해져 가는 것을 알 수 있다.

축방향의 난류요동속도를 측정해 Fig. 6에 나타냈다. 충돌거리 H/D=8부근까지 난류요동속도가 증가한다. 이 구간에서는 중심축을 기준으로 대칭을 이루는데 벽면제트방향거리 $x/D=0.5\sim 0.75$ 부근에서 최대값을 나타낸다. H/D=8이후에는 구배가 완만해지며 중심축의 부근에서 최대값을 나타낸다. 3개의 레이놀즈수에 대해 난류전단력도 측정해보았는데 레이놀즈수가 증가하면 난류전단력도 증가하며 최대값의 위치가 중심축에서 멀어지는 것을 알 수 있었다.

벽면제트방향으로 유동하는 벽면제트의 속도(V)분포는 Fig. 7과 같이 초기에는 벽면 가까이 큰 속도량이 집중되어 있다가 중심축에서 멀어질수록 벽면제트가 발달하여 속도구배가 완만해짐을 알 수 있다.⁽¹¹⁾

또한, 벽면제트방향으로 나아갈수록 벽면제트의 발달로 인해 최대값의 위치가 벽면에서 멀어지는 경향이 있다.

벽면에서 2.5 mm 떨어진 위치에서의 벽면제트방향의 난류요동속도를 측정해 보았는데 Fig. 8과 같이 $x/D=1$ 부근에서 최대값을 나타낸다. 이것은 이 지점에서의 열전달계수가 증가하는 것과 관련된다.⁽¹²⁻¹⁴⁾

4. 결론

선형적인 온도구배를 갖는 가열판에 대한 충돌제트의 열전달 특성과 난류유동구조를 실험을 통해 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 선형적인 온도구배를 갖는 가열판에서의 열전달계수는 정체점에서 최대값을 나타냈고 정

체점에서 벽면제트방향으로 멀어질수록 감소하다가 난류의 영향으로 다시 증가해서 정체점으로부터 벽면제트방향거리 $x/D=1 \sim 1.2$ 부근에서 제 2의 정점을 형성하고 다시 감소하는 경향을 보인다.⁽¹⁵⁾

(2) 선형적인 온도구배를 갖는 가열판에서 열전달이 가장 잘 일어나는 노즐출구에서 가열판까지의 거리는 8D정도로 나타났고 속도가 증가할수록 거리효과는 감소하였다.

(3) 본 실험범위 내에서 가열판의 온도구배가 클수록 열전달이 증가하는 것으로 나타났다.

(4) 열전달을 나타내는 무차원수인 Nusselt 수는 Prandtl 수와 레이놀즈수, 충돌거리(H/D)의 지수승의 함수로 나타낼 수 있었다.

참고문헌

- Gau, C. and Chung, C. M., 1991, Surface curvature effect on slot air jet impingement cooling flow and heat transfer process, ASME J. of Heat Transfer, Vol. 113, pp. 858-864.
- 이대희, 정영석, 김대성, 임경빈, 1997, 블록한 반구면에 충돌하는 원형제트의 열전달 및 유동특성, 대한기계학회논문집, 제21권, 제4호, pp. 579-588.
- Sparrow, E. M. and Lovell, B. J., Heat transfer characteristics of an obliquely impinging circular jet, ASME J. of Heat Transfer, Vol. 102, pp. 202-209.
- Ward, J. and Mahmood, M., 1982, Heat transfer from a turbulent, swirling, impinging jet, J. of Heat Transfer, Vol. 3, pp. 401-408.
- Ali Khan, M. M., Hirata, M., Kasagi, N., and Nishiwaki, N., 1982, Heat transfer augmentation in an axisymmetric impinging jet, Seventh Int. Heat Transfer Conf., Vol. 3, pp. 363-368. Hemisphere, Washington.
- Gardon, R. and Akfirat, J. C., 1966, Heat transfer characteristics of impinging two-dimensional air jets, J. Heat Transfer, Vol. 86, pp. 101-108.
- 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.
- Ma, C. F., Zheng, Q., Sun, H., Wu, K., Gomi, T., and Webb, B. W., 1997, Local characteristics of impingement heat transfer with oblique round free surface jets of large Prandtl number liquid, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 40, No. 10, pp. 2249-2259.
- 이중수, 엄기찬, 최국광, 1996, 장방향 충돌수분류 냉각계의 국소열전달에 관한 연구, 대한기계학회논문집, 제20권, 제4호, pp. 1395-1405.
- Saad, N. R., Polat, S., and Douglas, W. M., 1992, Confined multiple impinging slot jets without crossflow effects, Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 13, No. 1, pp. 2-14.
- Kataoka, K., Komai, T., and Nakamura, G., 1978, Enhancement mechanism of mass transfer in a turbulent impinging jet for high Schmidt numbers, ASME paper 78-HT-5.
- Gardon, R. and Akfirat, J. C., 1965, The role of turbulence in determining the heat transfer characteristics of impinging jets, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 8, pp. 1261-1272.
- Lytle, D. and Webb, B. W., 1991, Secondary heat transfer maxima for air jet impingement at low nozzle to plate spacing in experimental heat transfer, Fluid Mechanics and Thermo Dynamics, Elsevier, New York, pp. 776-783.
- Gardon, R. and Carbonpue, J., 1962, Heat transfer between a flat plate and jets of air impinging on it, Int. Heat Transfer Conf. Univ. of Colorado, Vol. 2, pp. 454-460.
- 유한성, 양근영, 최만수, 이준식, 1996, 제트충돌 냉각되는 반원 오목면에서 열전달 및 유체유동에 관한 실험적 연구, 대한기계학회논문집, 제20권, 제9호, pp. 2991-3006.