

단일 축대칭제트에 의한 경사충돌면에서 유동 및 열전달 특성

이창호* · 황상동* · 조형희** · 정학재***

Flow and Heat Transfer Characteristics on Oblique Impingement Surface by Single Axisymmetric Jet

Chang Ho Lee* · Sang Dong Hwang* · Hyung Hee CHO** and Hak Jae CHUNG***

ABSTRACT

An experimental study has been conducted to determine the effects of inclined impinging jet on the local heat transfer coefficients. A single jet with nozzle diameter of 24.6 mm was tested for Reynolds numbers from 10,000 to 70,000 and nozzle-to-plate spacings of 2~6 jet diameters. The angle of inclination of the impingement surface relative to the horizontal surface was varied from 0° (normal impingement) to 60°. The results indicate that the point of maximum heat transfer is moved up from the geometrical stagnation point of inclined surface by Coanda effect. The local heat transfer coefficients on the minor jet region decrease more rapidly than on the major jet region, thus creating an imbalance in the cooling capabilities on the two sides.

초 록

경사면에 충돌된 제트의 유동은 주제트(major jet)와 부제트(minor jet)로 나뉘어지게 되고 이로 인해 경사면 양쪽 영역에서의 유동 및 열전달 특성이 상이하게 된다. 또한 분사된 제트는 코안다 효과(Coanda effect)로 인하여 경사면 위쪽으로 편향이 되어 충돌하게 된다. 이 결과 부제트영역에서 높은 난류 강도와 운동량을 얻을 수 있고 국소 열전달계수를 상당히 높일 수 있다. 본 연구에서는 경사면의 각도와 분사속도를 변화시켰을 때 제트의 유동특성 변화 및 충돌면에서의 열전달 특성을 실험적으로 고찰하였다.

기 호 설 명

U: 제트출구속도

ν : 공기의 동점성계수

k: 공기의 열전도계수

h: 국소열전달계수

D: 노즐출구 직경(24.6 mm)

H: 노즐과 충돌면사이의 거리

* 연세대학교 대학원(Yonsei University, Graduate School)

** 연세대학교 기계공학과 (Yonsei University, Dept. of Mechanical Engineering)

*** LG정밀(주)연구소 (LG Precision Co., Ltd.)

r : 반경방향 좌표계

x : 유동방향 좌표계

θ : 경사면의 각도

Re : 제트 레이놀즈수($=UD/\nu$)

Nu : 누셀수($=hD/k$)

1. 서 론

최근 전자장비의 급속한 발달로 인하여 전자부품들이 점점 더 고집적화 되어지고 있고, 이러한 고집적화된 전자부품들의 성능과 수명은 주위온도와 상당히 밀접한 관계가 있다. 따라서, 전자부품의 냉각에 대한 필요성이 점차로 확대됨에 따라 다양한 냉각방식이 전자부품 냉각에 적용되고 있고 전자부품에서 발생하는 열을 보다 효과적으로 전달시키기 위한 많은 연구들이 이루어지고 있다. 충돌제트에 의한 냉각방식은 그 중 한가지이며 화학공장에서 압력용기의 온도제어 뿐만 아니라 종이 혹은 필름의 건조, 터빈날개의 냉각등 산업체 전반에서 널리 이용되어 지고 있다.

충돌제트에 의한 열전달 특성은 많은 학자들에 의해 다양하게 연구되어 왔다. Popiel⁽¹⁾ 등은 면적이 축소되는 노즐과 끝이 날카로운 관형 노즐로 수직 평판에서의 유동특성과 충돌면에서 반경방향의 물질전달율을 나프탈렌 승화법으로 연구하였다. 그러나 수직 충돌제트는 정체영역에서의 국부적인 열전달 향상은 시킬 수 있으나 반경 방향으로 열전달이 점차로 감소된다. 따라서 충돌면의 전반적인 열전달 향상을 위해서는 열전달이 정체점보다 상대적으로 낮은 영역에서 열전달 향상이 필요하다. 또한, 실제 적용시 충돌면의 형상이나 협소한 공간에서 노즐 위치의 제약으로 인하여 충돌제트가 수직분사 되는 경우보다 경사진 분사가 더욱 많이 응용된다. 더욱이, 수직 충돌제트가 사용되는 많은 상황에서도 주위의 다른 공기 흐름의 영향으로 인하여 실제 제트가 경사각을 갖고 분사되어진다. 이렇게 경사 충돌제트의 중요함에도 불구하고 경사 충돌제트에 대한 연구는 수직 충돌제트에 의한 연구보다 상대적으로 적게 이루어져 왔다. McMurray 등⁽²⁾은 고온 평판으로부터 열을

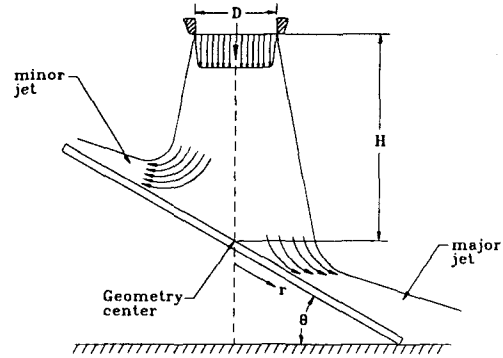


Fig. 1. Schematic flow field of oblique impinging jet

빼앗기 위해 경사 충돌제트를 이용하였고, 경사각에 따른 충돌면에서의 국부 열전달 형태를 연구하였다. Kamoi와 Tanaka⁽³⁾는 $30^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 각도 범위에서 노즐 출구의 난류강도에 따른 정압분포 및 속도분포, 전단응력을 측정하였다. Sparrow와 Lovell⁽⁴⁾은 원형제트를 가지고 열전달과 물질전달간에 유사성을 이용하여 나프탈렌을 승화시킴으로써 여러 가지 각도에 대하여 충돌면까지의 거리를 이동시키면서 최대 열전달계수를 구하였으며, Goldstein 등⁽⁵⁾은 Re 수, 제트 분사각, 충돌면까지의 거리를 변화시키면서 원형 충돌제트에 대한 평판에서의 열전달을 연구하여 제트의 중심으로부터 최대 열전달이 일어나는 위치까지의 변위를 찾아냈고 변위는 경사각의 함수임을 알아냈다.

본 연구에서는 단면적이 축소되는 원형노즐을 사용하여 경사진 가열평판에서 제트의 유동 및 열전달 특성을 실험적으로 고찰하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 실험은 $\theta = 0^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 범위의 경사각에서 실시하였고 제트의 경사효과를 위해 충돌면을 기울이게 하여 노즐에서 경사지게 분사되는 것과 같은 효과를 얻도록 하였다. 분사제트의 경사에 따른 속도분포 및 난류성분 분포를 열선유속계를 사용하여 측정하였으며, $H/D = 4$ 에서 유막법(Oil and Lampblack method)과 연기열선법(Smoke-wire method)를 사용하여 유동가시화를 하였다. 또한, 각각의 경사각에 대하여 노즐과 충돌면의 거리를 $H/D = 2, 4, 6$ 로 변화시키면서 등열유속을 받고 있는 평판에서 각각의 경사각에 대한 열전달 효과를 보았다. 한편, θ

= 0°, 45° 경사각에서 제트의 Re수 변화에 따른 열전달효과를 알아보기 위하여 Re = 10,000, 34,000, 50,000, 70,000인 경우에 대한 국소 열전달계수를 측정하였다.

2. 실험 장치

Fig. 2는 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 주 제트 유동은 3.7 kW 출력의 송풍기를 사용하여 공기를 공급하였으며, 속도제어는 송풍기에 연결된 인버터(inverter)를 사용하였다.

제트주위의 실내공기와 같은 온도(온도차이 0.2°C 이내)를 갖도록 하기 위해 흡입된 공기는 열교환기 챔버를 통과하도록 하였다. 노즐에 공급되는 공기의 유량측정은 열교환기와 소음기(silencer)사이에 연결된 오리피스 유량계를 사용하였다. 제트 노즐은 50:1의 면적 수축비(area contraction ratio)를 가지는 노즐을 사용하였는데, 단면수축비가 큰 노즐을 사용함으로써 노즐 출구에서 균일한 속도분포 및 낮은 난류강도를 얻을 수 있었다⁶⁾. 노즐 출구의 직경(D)은 24.6 mm로 제작하였다. 냉각되는 충돌면에서의 열전달계수를 측정하기 위하여 열유속을 일정하게 만든 후 열전대(T-type)를 이용하여 충돌면에서의 표면 온도분포를 측정하였다.

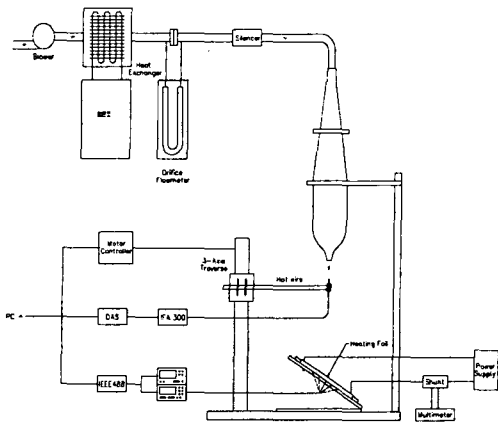


Fig. 2. Schematic diagram of apparatus

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 속도측정

Fig. 3은 $\theta=30^\circ$ 일 때 $H/D=2$ 에서 측정한 속도 선도를 나타낸다. 그림에서 보이는 바와 같이 충돌면의 경사로 인하여 충돌면에서 압력구배가 다르게 나타나는데 노즐 출구와 상대적으로 가까운 경사면 위쪽으로 압력이 낮게 형성된다. 따라서, 노즐에서 분사된 제트는 낮은 압력이 형성되는 경사면 위쪽으로 휘게 되는 코안다 효과(Coanda effect)가 나타나게 된다. 휘어진 제트는 충돌면에서 경사면 아래쪽으로 유동이 형성되는 주제트(major jet)와 경사면 위쪽을 따라 흐르는 부제트(minor jet)로 나뉘어지며 서로 다른 속도성분과 난류강도를 갖게된다.

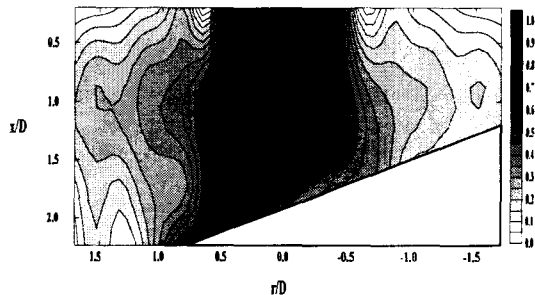


Fig. 3. Velocity distributions of oblique impinging jet at $H/D=2$

3.2 가시화

Fig. 4는 $Re=34,000$, $H/D=4$, $\theta=30^\circ$ 인 경우에 유동특성을 보이고 있다. 충돌후 부제트 영역에서 생성된 와류는 유동이 경사면의 위쪽으로 상승함에 따라 운동량감소로 인해 급격히 성장하게 되고 난류로 천이하게 된다. 반면에 주제트 영역에서는 유동의 가속으로 인해 와류의 성장이 지연되고 난류로 천이되는 지점도 정체점에서 더 멀어질 것이며 이로 인해 난류강도도 부제트 영역에 비해 낮아질 것으로 생각된다.

Fig. 5는 $Re=34,000$, $H/D=4$ 인 경우 충돌면의 각도변화에 따른 표면에서의 유동특성을 나타내고 있다. Fig. 5(a)는 $\theta=0^\circ$ 일 때 충돌면에서의 유동현상을 보여주고 있는데 제트 중앙에 노즐의 직경과 거의 비슷한 크기로 약간 진한색의 정체영역이 원형

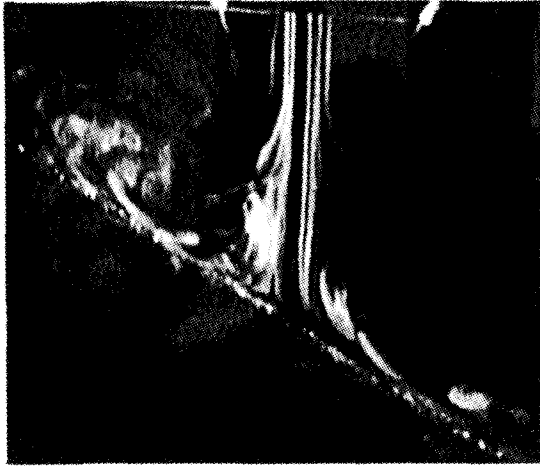


Fig. 4. Smoke-wire visualization of the jet on the oblique impingement surface. ($H/D=4$, $\theta = 30^\circ$, $Re=34,000$)

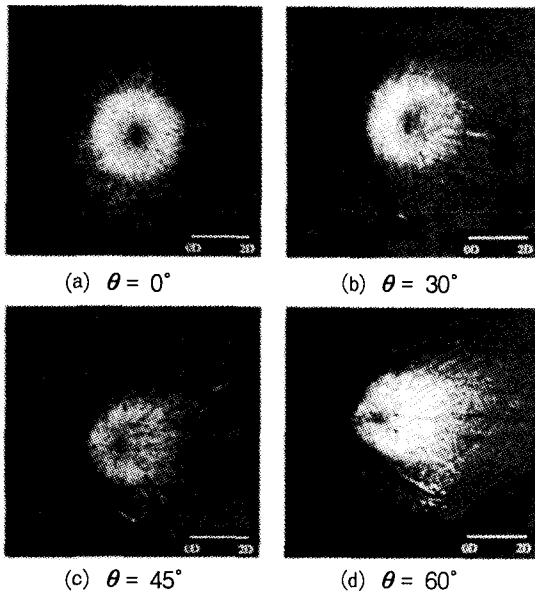


Fig. 5. Surface flow visualization by oil and lampblack method ($H/D=4$, $Re=34,000$)

으로 보이고 있다. 이 영역에서는 경계층이 일정하게 유지되면서 축방향 속도성분들이 반경방향으로 바뀌기 시작한다. 제트가 반경방향으로 가속되면서 탄소입자가 밀려나가 하얗게 보이고 있으며 가속에 의하여 경계층이 감소하게 된다. $r/D \approx 1.5$ 인 전단층 바깥에서 생기는 제트의 강한 주와류에 의해 표면

근접 지역에서 이차와류가 생성되며 표면에서 제트 유동은 난류로 천이된다. 이 위 치에서 약간 진한 색의 띠가 형성됨을 볼 수 있다. 그 이후부터는 벽 제트가 형성되어 밖으로 퍼져 나감에 따라 다시 검은색을 나타낸다.

Fig. 5(b)는 $\theta = 30^\circ$ 인 경우 표면 유동가시화의 결과를 보여준다. 충돌면의 경사로 인한 제트의 유동 특성 때문에 충돌면에서의 가시화 결과는 계란형을 나타내고 있고 부제트 영역($r/D < 0$)에서는 하얀 띠가 뚜렷하게 나타나지만 양의 방향으로 갈수록 희미하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 주제트 영역이 운동량감소가 부제트 영역에 비해 작은 것을 나타낸다. 또한, 부제트측의 운동량이 급격하게 낮아 지므로 $\theta = 0^\circ$ 일 때 볼 수 있었던 천이영역이 매우 얇아진 반면에 주제트측에서는 반경방향의 속도성분의 증가로 상대적으로 두껍게 나타났다.

Fig. 5(c)는 $\theta = 45^\circ$ 인 경우에 표면 유동가시화를 수행한 결과를 보여주고 있는데 경사로 인한 충돌면에서의 유동변화가 더욱 확실히 나타나고 있다. 경사각이 커짐으로써 부제트 영역이 상당히 짧아지고 반대로 주제트 영역은 하류로의 가속에 따라 넓게 퍼짐을 알 수 있다. 또한 각도에 의한 주와류 발달의 차이로 인해 정체점에서 천이영역까지 거리가 각도의 증가에 따라 부제트 영역에서는 점점 짧아지고 주제트 영역에서는 길어지는 것을 알 수 있다. Fig. 5(d)는 $\theta = 60^\circ$ 일 때의 결과로 이 경우 제트에서 나온 유동은 경사면에 부딪친 후 부제트 영역으로 경사를 거슬러 올라가기 보다는 주제트 영역 하류로 더 쉽게 흐름을 볼 수 있다. 이로 인해 부제트 영역은 운동량감소와 주와류의 빠른 성장으로 쉽게 천이되고 반면에 주제트 영역은 먼 하류까지 가속영역이 존재함을 알 수 있다.

3.3 열전달측정

Fig. 6(a)은 충돌면의 경사각이 $\theta = 0^\circ$ 인 경우에 대하여 노즐 출구와 충돌면 사이의 간격을 변화시키면서 충돌면에서 열전달계수를 측정한 결과를 보여준다. $r/D = 0$ 은 측정면의 원점이고, 노즐 중심의 연장선과 충돌면과의 교차점을 의미하는 정체점이다. 노즐 출구와 충돌면 사이의 간격이 작은 경우($H/D = 2$), $r/D \approx 0.6$ 에서 유동의 가속에 의한 일

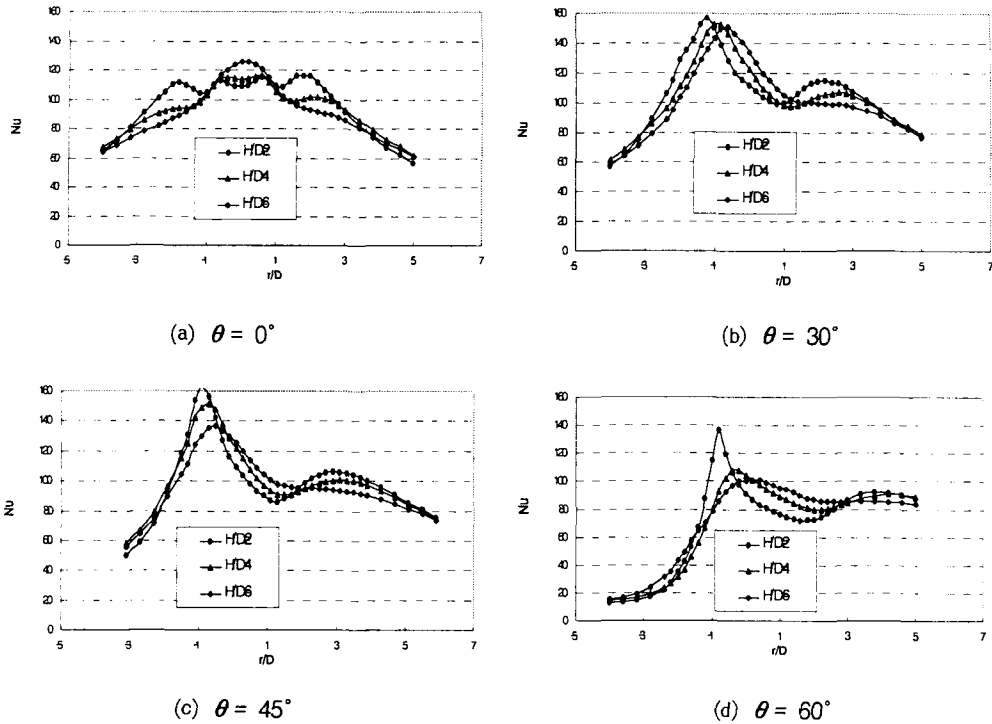


Fig. 6 Local heat transfer coefficients for impinging jet ($Re_D=34,000$)

차 극대점을 볼 수 있고 그 후 경계층이 발달하면서 열전달계수는 감소하게 되고 $r/D \approx 1.2$ 에서 다시 증가하기 시작하여 $r/D \approx 1.8$ 에서 난류로의 천이에 의한 이차극대점을 가진다. 이차 극대점 이후 충돌제트 유동은 벽체를 형성하면서 유동면적 증가에 따른 속도감소 및 경계층 발달에 기인하여 열전달계수가 감소하게 된다. 제트노즐 출구와 충돌면 사이의 간격이 증가하여 $H/D = 4$ 인 경우 $H/D = 2$ 일 때에 비하여 완만하지만 $r/D \approx 0.6$ 에서 일차극대값을 갖는다. 그러나 정체영역에서 열전달계수의 절대값은 주제트의 난류강도의 증가로 인하여 $H/D = 2$ 일 때 보다 높게 나타난다. $H/D = 2$ 와는 달리 명확하지는 않지만 이차극대점이 $r/D \approx 2.0$ 인 지점에 존재한다. 이것은 제트가 하류로 진행하면서 주와류의 강도가 약해져서 이차와류의 형성이 미약하기 때문이다. 제트노즐 출구와 충돌면 사이의 간격이 증가하여 $H/D = 6$ 인 경우 포텐셜코어가 표면에 충돌하기 전에 발달되었기 때문에 제트중심($r/D=0$)에서 충돌 전에 자유제트가 최대 속도를 가지게 되며 난류강도도 매

우 높다. 그 결과 $r/D=0$ 일 때 열전달계수가 최대값을 가지며 반경방향으로 감소하게 된다. 이 경우 이차극대점을 갖지 않는데 그 이유는 정체점에서 유동이 이미 난류경계층 유동으로 시작하므로 천이가 일어나지 않고, 노즐 출구와 충돌면 사이의 간격이 넓은 이유로 인하여 충돌면 근접 지역에서 주와류의 강도가 약해져 충돌면 $r/D \approx 1.8$ 인 영역에서 이차와류가 형성되지 않기 때문이다.

Fig. 6(b)는 $Re=34,000$ 에서 충돌면이 $\theta=30^\circ$ 일 때 충돌면에서의 국소 열전달계수의 분포를 나타낸다. $\theta=0^\circ$ 일 때 열전달 경향이 좌우대칭으로 나타나는데 비하여 $\theta=30^\circ$ 경우는 비대칭으로 나타난다. 이것은 주제트측과 부제트측의 상이한 유동특성으로 인한 것이고 이로 인해 양쪽의 열전달 경향도 다르게 나타나게 되며 전반적인 열전달의 분포는 비대칭을 이루게 된다. 최대 열전달값은 $\theta=0^\circ$ 일 때 보다 훨씬 크게 나타났는데 이것은 노즐 출구와 충돌면의 거리가 경사 위쪽으로 갈수록 가깝기 때문에 충돌면에서 제트의 속도성분 자체가 크고 또한 가시화에서

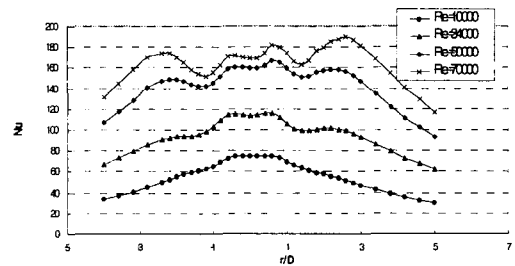
알 수 있듯이 주와류의 성장이 촉진되면서 난류로 급격히 천이하게 되고 이때의 높은 난류강도로 인해 부제트 축에서 더욱 커다란 열전달이 일어나게 된다. 이후 부제트 쪽은 급속히 열전달이 감소하는데 유동이 경사면을 거슬러 올라가면서 제트의 운동에너지가 감소하기 때문이다. 양의 방향($r/D > 0$)으로 흐르는 주제트 유동은 $r/D \approx 0.8$ 까지 열전달이 계속 감소하는 경향을 보이는데 이는 정체영역에서 주제트의 수직 속도성분 완전히 반경방향으로 바뀌지 않고 서서히 감속하기 때문에 계속해서 경계층이 발달하여 열전달 감소의 원인이 된다. 그 후 유동의 천이에 의해 이차 극대점을 갖게된다. 다만, 형성되는 위치가 코안다 효과에도 불구하고 양의 방향으로 조금 더 이동한 $r/D \approx 2.2$ 에서 생기는데 이것은 충돌면이 경사짐으로써 가시화에서도 알 수 있듯이 이차 와류의 생성이 억제되고 천이되는 지점도 정체점으로부터 더 먼 곳에 생기기 때문이다. 노즐 출구와 충돌면 사이의 간격이 조금 더 커진 $H/D = 4, 6$ 에서도 전체적인 열전달은 $H/D = 2$ 일 때와 거의 동일한 양상을 보이고 있으나 최대 열전달이 일어나는 위치는 노즐 출구와 충돌면 사이의 간격이 커질수록 정체점에 가까워지고 최대 열전달의 절대값도 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이것은 노즐 출구와 충돌면 사이의 간격이 멀어질수록 코안다 효과에 의한 제트의 편향 정도가 줄어들면서 제트가 충돌되는 위치가 정체점에 가까워지고 속도성분과 난류강도도 약해져 열전달이 감소하게 된다.

Fig. 6(c)는 $Re=34,000$ 에서 충돌면의 각도가 $\theta = 45^\circ$ 일 때 충돌면에서의 국소 열전달계수의 분포를 측정한 결과를 나타낸다. 전반적인 열전달 분포는 $\theta = 30^\circ$ 일 때와 비슷하나 최대 열전달계수의 형성 위치가 정체점에 다소 가까워 졌다. 이것은 급격한 주와류의 성장으로 천이가 더욱 촉진되었음을 나타내는 것이다. 그리고 최대 열전달 값은 노즐 출구와 충돌면 사이의 간격에 따라 $\theta = 30^\circ$ 일 때 보다 편차가 심하게 나타난다. 이것은 각도가 커지고 노즐 출구와 충돌면 사이의 간격이 멀어질수록 부제트의 운동량이 작아지기 때문이다. 또한, 경사각이 커짐에 따라 부제트측은 에너지 손실이 증가하여 천이 후 열전달도 급격한 경사를 이루며 떨어지고 주제트측은 유동의 진행방향과 경사면의 반경방향 각도가

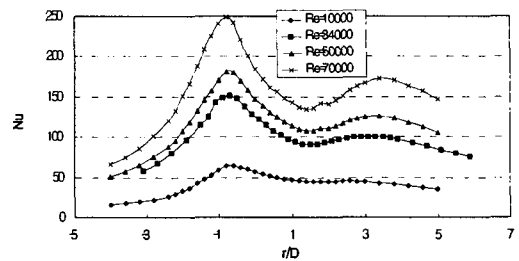
비슷해 지기 때문에 완전히 반경방향으로 속도변환이 이루어 질 때보다 와류의 성장이 억제되고 주와류의 강도도 약해져서 이차극점의 위치가 정체점으로부터 멀어지게 된다.

Fig. 6(d)에서 보여준 $\theta = 60^\circ$ 일 때 이러한 현상은 더욱 분명하게 나타난다. 최대 열전달계수의 발생 위치는 정체점에 보다 가까워졌고 편차는 더욱 커졌다. 또한, $H/D=2$ 일 때를 제외하고 이차 극대점의 형성이 거의 나타나지 않아 곡선의 기울기는 거의 평행상태를 보여주며 위치도 정체점으로부터 더욱 먼 곳에서 형성되었다.

Fig. 7(a)는 $\theta = 0^\circ$ 일 때 $H/D=4$ 에서 Re수를 변화시킨 것을 나타낸다. 전반적으로 Re수에 비례하여 열전달은 상승하였다. 특히 이차극대값이 $Re = 70,000$ 경우 오히려 정체영역의 값보다 크게 되는 것을 알 수 있다. 반면에, Re수가 작을수록 이차극대값이 나타나지 않고 정체점($r/D=0$)에서 단조 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 Re수가 적으면 노즐 출구에서의 속도가 낮기 때문에 포텐셜코어의 길이가 짧아져 충돌이전에 발달하기 때문이다.



(a) $\theta = 0^\circ$



(b) $\theta = 45^\circ$

Fig. 7. Effect of Reynolds number of local heat transfer coefficients($H/D=4$)

Fig. 7(b)는 $\theta=45^\circ$ 일 때 $H/D=4$ 에서 Re수 변화에 따른 열전달계수를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 경사 제트에서의 Re수 변화에 따른 열전달 특성은 수직 제트에서와 마찬가지로 Re수 증가에 따라 상승하고 특히 부제트 영역의 최대열전달을 용이하게 상승할 수 있었다.

4. 결 론

1. $Re=34,000$ 일 때 경사 충돌면에서의 최대 열전달은 $\theta=45^\circ$, $H/D=2$ 에서 얻을 수 있었고, 이것은 수직 충돌일 때 최대 열전달값($H/D=6$)보다 약 29% 상승된 값이다.
2. 경사 충돌면에서 최대 열전달이 일어나는 영역은 정체점보다 경사면 위쪽에 나타났고, 충돌면의 경사각이 커짐에 따라 최대 열전달이 생기는 지점이 정체점과 가까워 졌다.
3. 제트의 Re를 변화시키기에 따라 $\theta=0^\circ$ 인 경우와 마찬가지로 열전달이 상승하는 것을 보았고 $H/D=4$, $Re=70,000$, $\theta=45^\circ$ 에서의 최대 열전달계수는 $\theta=0^\circ$ 에 비해 약 32%상승했다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 1997년 핵심전문연구 과제 지원(과제번호: 971-1006-033-2)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Popiel, C. O. and Boguslawski, L., 1988, "Effect of flow structure on the heat or mass transfer on a flat plate in impinging round jet," 2nd UK Nat. Conf. On Heat Transfer, University of Strathclyde, UK, Sept. 14-16, Vol. 1, pp. 663~685.
2. McMurray, D. C., Myers, P. S., and Uyehara, O. A., 1966, "Influence of Impingement Jet Variables on Local Heat Transfer Coefficients Along a Flat Surface with Constant Heat Flux," Proceedings of 3rd International Heat Transfer Conference, Vol. 2, pp. 292~299.
3. Kamoi, A., and Tanaka, H., 1977, "Study on Two-Dimensional Impingement Jet Flow Considered Initial Turbulence(Part 2, Static Characteristics of Boundary Layer in Stagnation Region)," Transactions of JSME, Vol. 43, pp. 2957~2969.
4. Sparrow, E. M., and Lovell, B. J., 1980, "Heat Transfer Characteristics of an Obliquely Impinging Circular Jet," ASME Journal of Heat transfer, Vol. 102, pp. 202~209.
5. Goldstein, R. J., Franchett, M. E., 1988, "Heat Transfer from a flat surface to an oblique impinging jet," Transactions of the ASME, Vol. 110, pp. 84~90.
6. 이창호, 김영석, 조형희, 1998, "원형제트 출구 전단류 조절에 따른 제트충돌면에서의 열전달 특성(1)-균일속도분포제트", 대한기계학회논문집B, 제22권, 제3호, pp. 386~398.