

<논 문>

장방형 충돌수분류 냉각계의 국소열전달에 관한 연구

이종수* · 엄기찬** · 최국광***

(1995년 5월 23일 접수)

A Study on the Local Heat Transfer in Rectangular Impinging Water Jet Cooling System

Jong-su Lee, Ki-chan Ohm and Kuk-kwang Choi

Key Words : Impinging Water Jet(충돌수분류), Rectangular Nozzle(장방형노즐), Supplementary Water(보조수), Nusselt Number(누셀트 수), Stagnation Point(정체점), Heat Flux(열유속), Characteristic Decay Region(특성감쇠영역)

Abstract

The purpose of this experimental research is to investigate the local heat transfer characteristics in the upward free water jet impinged on a downward flat plate of uniform heat flux. The inner shape of rectangular nozzle used was sine curve type and its contraction ratio of inlet to outlet area was five. Experimental parameters considered were Reynolds number, nozzle exit-flat plate distance, and level of supplementary water. Local Nusselt number was influenced by Reynolds number, Prandtl number, supplementary water level, and distance between the nozzle exit and flat plate. Within the impingement region, the Nusselt number has a maximum value on the nozzle center axis and decreases monotonically outward from center. Outside of the impingement region, on the other hand, the Nusselt number has a secondary peak near the position where the distance from nozzle center reaches four times the nozzle width. However if nozzle exit velocity exceeds 6.2m/s, the secondary peak appears also in the impingement region. The empirical equation for the stagnation heat transfer is a function of Prandtl, Reynolds, and axial distance from the nozzle exit. The optimum level of supplementray water to augment the heat transfer rate at stagnation point was found to be twice the nozzle width.

기 호 설 명			
C_p	: 정압의 위치 비열	L_i	: 노즐의 위치 입구에서 i 번째 요소까지의 길이
B_i, B	: 노즐의 위치 입구 및 출구단면의 단축 길이	S	: 보조수층의 높이
H_i	: 노즐의 위치 입구에서 i 등분께 요소의 단축 길이	t	: 시편의 두께
h	: 국소의 위치 열전달계수	V_0	: 노즐출구의 평균속도
$L_{1/2}$: 노즐의 위치 출구 장변의 절반 길이	X, Y, Z	: 노즐중심을 원점으로 한 3차원 직각좌표계
		k_t, k_s	: 냉각수 및 시편의 열전도도
		μ	: 절대점성계수
		ν	: 동점성계수
		r	: 비중량

*회원, 안동공업전문대학 기계과

**회원, 인하공업전문대학 기계설계과

***회원, 인천대학교 기계공학과

$$Bi = \frac{ht}{k_s} : \text{Biot number}$$

$$Nu = \frac{hB}{k_f} : \text{Nusselt number}$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k_f} : \text{Prandtl number}$$

$$Re = \frac{V_0 B}{\nu} : \text{Reynolds number}$$

1. 서 론

충돌분류의 산업분야에의 응용 예로서는 세척, 제지, 직물, 버블-잉크젯트 프린터 등의 가열이나 건조분야와 고온금속, 가스터빈 깃, 중성자 빔 반사체, 금형, 고효율 항공기의 발전기 코일, 고속 베어링, 절삭공구와 가공재료의 열변형방지, 금속 심냉각 외과요법, VLSI 고밀도 전자부품 등의 냉각을 들 수 있다.^(1~3) 이 밖에 선박의 추진동력용, 금속의 표면가공용, 공조설비에서 취출구를 통한 냉온기의 분배용, 의학적 응용인 제트메스, 터널 굴착공사, 해저암반준설, 암석천공 등에도 적용된다.⁽⁴⁾

특히 20세기말 전자산업의 발전으로 컴퓨터의 추세는 전자부품의 초소형화, 대용량화에 따라 놀랄 만큼 고밀도의 열에너지가 발생되기 때문에 Bar-Cohen 등⁽⁵⁾은 멀지 않은 장래에 칩에서 $10^6 [W/m^2]$ 이상의 열유속이 발생되리라고 예시하고 있다. 이런 문제의 해결방법은 하드웨어의 소형화와 처리 속도의 증가를 동시에 만족하면서, 칩 냉각에 높은 효과를 갖는 충돌분류 냉각계를 적용하는 것이 바람직하다.

이와 같이 공업적 응용범위가 광범위한 충돌분류는 자유분류를 발생시키는 노즐의 형상에 의하여 원형분류, 정방형분류, 장방형분류, 십자형분류, 배열된 군분류로 분류한다. 특히 장방형분류는 노즐로부터 발생하는 분류의 유동방향 거리에 따라서 다음과 같이 세 개의 분류영역으로 나누어진다. 즉 제1영역은 분류의 축선상의 속도와 노즐출구의 분류속도가 거의 같은 속도를 나타내는 포텐셜코어 영역, 제2영역은 특성감쇠 영역 또는 이차원 분류형 감쇠영역, 그리고 제3영역은 축대칭형 감쇠영역이라 한다. Krothapalli⁽⁶⁾ 등에 의하면 장방형의 삼차원 자유분류에서 포텐셜코어 영역은 노즐 출구로부터 노즐 폭의 네 배인 영역까지, 이차원 분류형태의 영역은 노즐 폭의 60배까지이며, 축대칭분

류 영역은 노즐 폭의 60배 이후의 영역이라고 제시하고 있다. 이러한 분류영역에 관한 경계값들은 노즐의 형상비나, 노즐 입구의 형태, 노즐 출구에서 난류강도, 노즐의 내부형상, 레이놀즈수, 분류가 분출되는 주위 유체 등의 유동 특성에 따라 변화한다.

또한 삼차원 분류는 분류유체의 확산성과 주위 유체와의 혼합성에 따라서 자유표면이 명확하지 않으며 확산의 영향이 큰 서브머지드 분류(submerged jet)와 분류유체와 주위유체와의 사이에 명확한 경계를 가지며 분류의 확산이 무시되는 자유분류(free jet)로 구분된다. 이와 같은 자유분류의 어떤 분류영역내에 냉각이나 가열하고자 하는 전열면이 설치되어서 충돌분류를 형성하느냐에 따라서 열전달 특성이 달라진다. 이러한 장방형 형태의 자유충돌액체분류에 있어서 유동장의 구조는 Fig. 1과 같다. 이 그림에서 분류가 노즐 출구에서 충돌판에 충돌하기까지의 분류영역을 자유분류영역 ①과 정체점영역 ② 그리고 벽분류영역 ③으로 구분되며, 이 충돌판상의 벽분류는 다시 평판영역, 천이영역 그리고 수력 도약 영역으로 세분하여 구분되어진다.^(2,6)

충돌분류에 관한 연구는 응용분야가 폭넓은 만큼 연구분야도 다양하여 유동장 해석과 전열면에서의 열전달 해석으로 나눌 수 있으나, 유동장의 연구보다는 주로 전열면상에서 열전달 특성에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 그 대표적인 연구로서 Stevens⁽¹⁾ 등은 자유액체충돌 분류냉각에서 분류 레이놀즈수, 노즐-전열면간 거리, 노즐 직경의 영

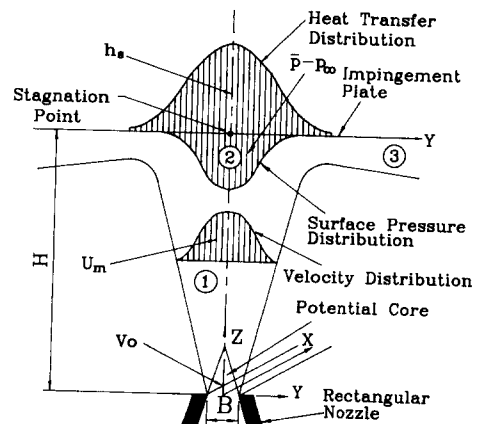


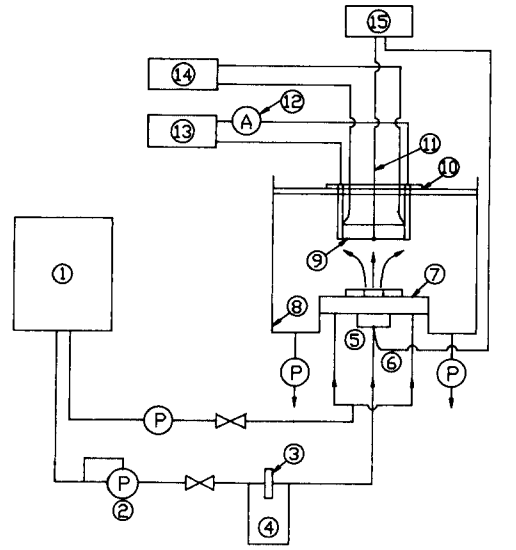
Fig. 1 Free impingement jet configuration in the upward 3-dimensional coordinate system

향을 실험적으로 연구하여 국소 및 평균 Nu수의 분포를 구하였다. 또한 정체점 Nu수를 무차원 함수식으로 나타내었다. Gardon⁽⁷⁾ 등은 정체점 열전달에 대해서 노즐 크기와, 레이놀즈수, 노즐-전열면간 거리의 함수로 나타내고 있다. Wolf⁽⁸⁾ 등은 사각 노즐을 이용하여 등열유속 표면에 충돌하는 자유충돌수분류에서 국소 열전달계수에 영향을 끼치는 층류와 난류 노즐의 유동에 대하여 연구하였으며, 그 결과 노즐에서 균일한 속도분포보다도 불균일한 속도분포를 갖는 경우가 열전달을 증진시키며, 이러한 열전달 증진효과는 난류강도와 속도분포의 변화에 기인한다고 보고하고 있다. 한편 Zumbrennen 등⁽⁹⁾은 일정한 속도로 직선운동을 하고 있는 등온 평판 위에 수분류를 충돌하는 실험에서 층류강제대류 이론을 근거로 정지상태의 경우와 비교 해석하였을 때, 고정상태의 전열면과 이동하는 전열면의 경우에 각각 열전달 특성에 차이가 있음을 제시하였다.

이와 같은 충돌분류계의 연구는 분류 냉각액은 주로 공기를 사용하고, 분류노즐은 축대칭 원형 노즐을 사용하였으며, 노즐-전열면간 거리는 대부분의 연구가 층류영역에서 연구가 수행되었다. 또한 분류방향은 하향 또는 수평방향으로 구성되어 있다. 그러나 본 실험적 연구에서는 장방형의 축류노즐을 이용하여 상향의 자유충돌수분류 냉각계의 열전달에 영향을 미치는 실험변수로 노즐의 출구속도, 노즐-전열면간 거리를 실험변수로 하였다. 또한 열전달을 증진하기 위한 방법으로서 주분류가 노즐을 통과하여 보조수조내의 보조수를 유인 혼합하는 형식의 보조수 동반의 연직상향 충돌수분류에 관한 실험적인 연구를 수행하였다. 이 실험에서 장방형의 노즐 출구를 원점으로 하는 3차원 직각좌표계를 구성하여, 좌표평면상의 온도분포를 측정하여 국소 열전달계수의 분포 특성 및 정체점 열전달 특성을 규명하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

장방형의 노즐로부터 분사되는 주분류가 보조수를 동반하는 연직상향의 삼차원 단상 충돌수분류계의 실험장치는 Fig. 2와 같다. 장방형의 하향 전열면은 $1.5 \times 10^5 [W/m^2]$ 의 등열유속 조건에서 충돌수분류에 의하여 냉각되는 단상 강제대류계이다. 수



- | | |
|-----------------------------|--------------------------|
| 1. Water Tank | 2. High Pressure Pump |
| 3. Integral Orifice | 4. Manometer |
| 5. Rectangular Nozzle | 6. Thermocouple |
| 7. Water Chamber | 8. Recovery Tank |
| 9. Heating Unit | 10. Traversing Mechanism |
| 11. Thermocouple | 12. Ampere Meter |
| 13. Power Supplier | 14. Digital Voltmeter |
| 15. Data Acquisition system | |

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

조 ①의 냉각수는 고압펌프(SF-3700, 5HP) ②에 의하여 가압되어, 오리피스(No.ss. 29-101, YAMA TAKE) ③을 통과하여 장방형의 노즐 ⑤에서 일정한 분류속도로 분사 된다. 노즐로부터 분류속도는 오리피스 전후의 압력차를 마노미터 ④에서 측정하여 구하였다. 이때 분류속도의 측정오차 범위는 $\pm 7.4\%$ 이내이다. 노즐 ⑤에서 분출된 수분류는 하향의 장방형 전열면 ⑨에 충돌하여 열교환을 한 후 회수조 ⑧에서 배출된다. 보조수를 사용하는 경우는 노즐 ⑤로부터 분사되는 주분류가 분출되는 동안 보조수조 ⑦에 일정한 높이의 보조수층 높이가 되도록 유량을 조절하여, 주분류가 보조수조 ⑦의 보조수층을 통과하면서 자유분류는 서브머지드 효과에 의하여 주위의 보조수와 혼합확산되어 분출되므로, 이때 소비된 유량만큼 계속하여 보조수조내의 유량을 공급함으로써 보조수조내의 보조수층 높이를 일정하게 유지하였다.

전열면 ⑨ 상에서의 온도는 전열면 이면의 도심에서 노즐의 정축방향으로 3mm 간격으로 용착된

열전대(T-Type $\phi 70\mu\text{m}$) ⑩에 의하여 측정하였다. 전열면 ⑨는 장방형 스테인리스 박판(SUS304, $10\text{mm} \times 60\text{mm} \times 30\mu\text{m}$)이며, 전열면의 이면은 단열성이 양호한 베이크라이트 판상에 이중 재료의 접합시 열팽창이 적고 고온에서 내열성이 강한 접착제를 사용하였다. 전열면은 그 양단을 구리전극에 연결시키고, 전원 공급장치(Slidac) ⑬를 이용하여 등열유속 조건 $1.5 \times 10^5 [\text{W}/\text{m}^2]$ 의 부하가 걸리도록 하였다. 전열면에서의 등열유속 조건을 만족시키기 위하여 열전대의 용착시 각 접점에 균일한 저항값이 걸리도록 시편을 제작한 후, 대기중에서 과부하 이내의 열유속을 가하였을 때 각 접점에서 거의 균일한 온도를 나타내었으며 그 온도차는 0.03°C 이내였다.

본 실험에서 측정된 온도는 전열면 이면의 온도지만 분류가 직접 충돌하는 전열면 표면의 온도를 계산할 필요가 있으나, 본 실험범위 내에서 Bi수는 0.02×0.19 의 범위이므로 이면의 온도를 표면의 온도로 간주하고⁽¹⁰⁾ 열전달계수를 구하였다. 또한 이 열전달계수와 노즐출구의 단축 길이(B)를 대표 길이로 하여 Nu수는 다음과 같이 정의하였다.

$$Nu = \frac{hB}{k_f} \quad (1)$$

장방형 노즐로부터 분사되는 수분류의 온도는 노즐 입구에 설치한 열전대(T-Type $\phi 70\mu\text{m}$) ⑥으로 측정하였으며, 전열면 및 냉각수의 온도는 데이터 획득장치(Hellious Plus System, Fluke) ⑮를 사용하였다. 또한 장방형의 분류는 그 유동 특성상 삼차원 유동성을 갖고 있으므로 전열면 ⑨는 Fig. 1에서 정의한 노즐의 중심을 원점으로 하는 직각좌표계의 X, Y, Z 방향으로의 좌표이송장치 ⑩을 이용하여 3차원 공간내를 이동할 수 있게 하였다. 주분류를 분사시키는 장방형의 노즐 ⑤는 고압 펌프 ②로부터 공급되는 냉각수 배관과 디퓨저로 연결되어 있으며, 디퓨저와 노즐의 입출구는 장방형의 단면형상을 갖도록 설계하였다. 특히 노즐의 내부형상과 축류비는 분류의 평균속도, 난류유동 특성, 분류의 확산 등과 같은 노즐 성능에 상당한 영향을 끼치게 되므로 유체역학적 특성과 이로 인한 열전달을 고려하여, 노즐의 선택은 노즐 출구에서 균일한 속도분포와, 저난류강도 및 노즐내부의 벽면에서 형성되는 경계층 두께가 얇도록 선택되어야 한다. 이와 같은 점을 고려하여 본 연구에서 사용

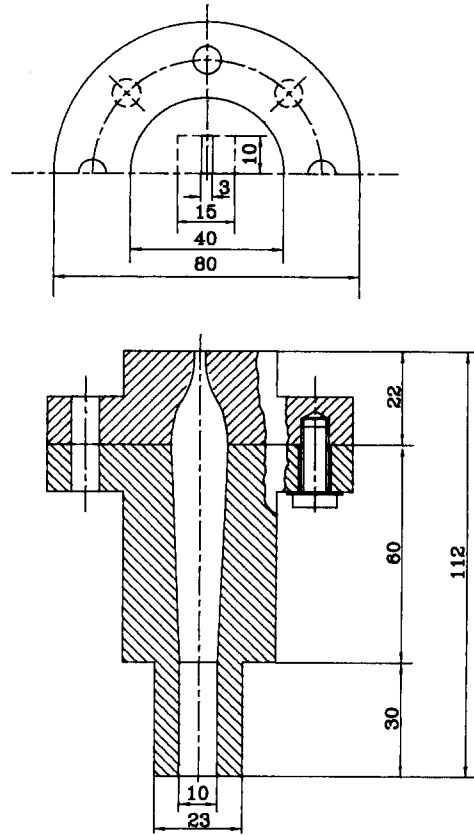


Fig. 3 Detail drawings of rectangular nozzle and diffuser

된 장방형 노즐의 형상과 디퓨저의 형상에 관한 상세도는 Fig. 3과 같다. 이 상세도에서 주분류의 유동특성을 결정짓는 장방형 노즐부의 내부곡선 형상을 나타내는 식은 다음과 같다.

$$H_i = \frac{B_{in} + B}{2} + \frac{B_{in} - B}{2} \sin \pi \left(0.5 - \frac{L_i}{L_N} \right) \quad (2)$$

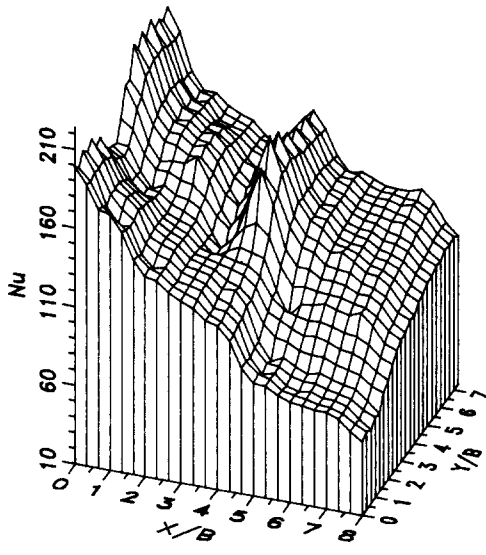
이와 같은 내부곡선식으로 설계된 장방형 노즐의 축류비는 5이고, 노즐의 내부형상은 식 (2)에서 표시한 바와 같이 내부의 흐름 손실이 적은 정현곡선 형태이다. 이 노즐의 설계식에서 노즐 입구단면에서 단축의 길이(B_m)는 15mm, 출구단면에서 단축의 길이(B)는 3mm, 입출구 단면에서 장축 길이(L)는 20mm로 일정하다. 노즐 입구에서부터 노즐 출구까지 길이(L_N)은 20mm로 하고, 노즐 출구 끝단에 2mm의 평행부를 두어서 노즐의 총 길이는 22mm이다.

3. 실험결과 및 고찰

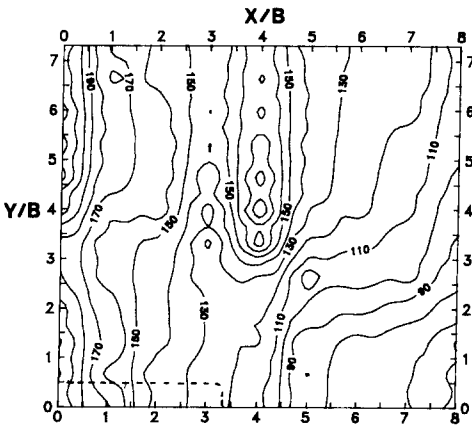
장방형의 자유충돌수분류는 삼차원성의 유동특성을 갖게 되므로, 본 실험의 경우는 분류의 유동방향(Z방향)에 대하여 노즐출구에서 충돌판까지 거리 Z를 노즐의 단변 길이(B)로 무차원화한 거리인 Z/B를 20, 30, 40, 50까지 변화하였다. 이 무차원 거리는 삼차원 자유분류의 제2영역인 특성감쇠영역의 범위내에 속한다. 분류의 일정한 유동거리 Z에

대하여 국소 Nu수의 분포를 전열면상의 제1상한에서 노즐 출구단면의 장축방향(X방향)과 단축방향(Y방향)에 대하여 각각 삼차원 평면좌표상에서와 등 Nu수 선도(contours of constant Nu number) 상에 노즐-전열면간 거리, 분류속도, 보조수층 높이의 영향을 나타내고자 한다.

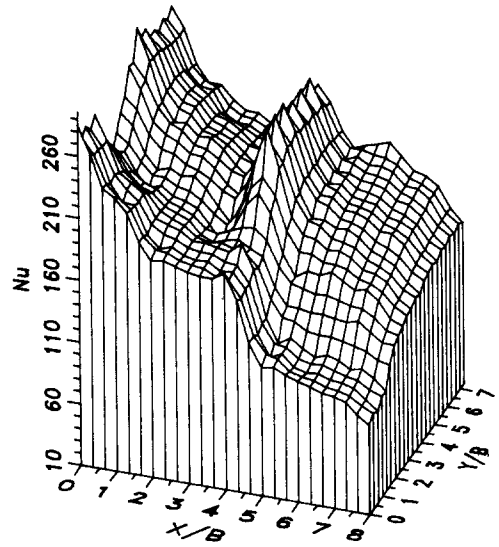
Fig. 4 및 Fig. 5는 무차원 노즐-전열면간 거리 Z/B=20이고, 노즐로부터 주분류가 보조수를 사용하지 않은(S/B=0) 조건인 단일수분류의 경우에 각 노즐출구 속도에서의 국소 Nu수 분포를 나타낸



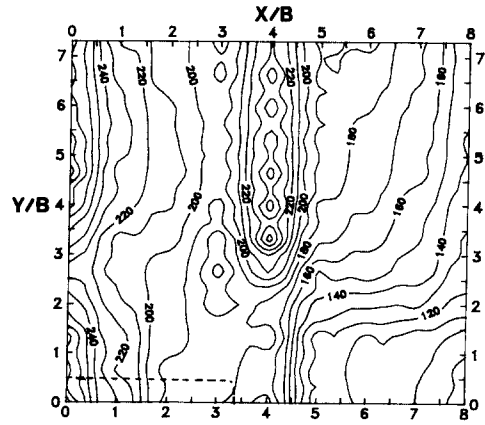
(a) 3-D plot



(b) Contour plot



(a) 3-D plot



(b) Contour plot

Fig. 4 Local distribution Nu number for Z/B=20, S/B=0 and Vo=4.0m/s(Dashed lines represent nozzle outlet contour)

Fig. 5 Local distribution Nu number for Z/B=20, S/B=0 and Vo=6.2m/s(Dashed lines represent nozzle outlet contour)

것이다. 각 선도에서 (a)는 전열면상에서 국소 Nu수의 삼차원 분포를 나타내는 Nu수의 입체도이고, (b)는 등 Nu수를 10의 간격으로 나타낸 등 Nu수 선도이다. Fig. 4(a)와 Fig. 5(a)의 국소 Nu수의 삼차원 분포도에서 노즐의 단축 방향(Y방향)의 열전달계수 분포에 주목할 때, 정체선($X/B=0$) 상에서는 노즐 단면 방향으로 Y/B가 증가하면 Nu수는 완만한 감소를 보이다가 $Y/B=3$ 부근부터 증가하여 $Y/B=4$ 부근에서 최대치를 이루어 제2극대치가 존재한다. 그러나 정체선을 벗어나면 정체선($Y/B=0$)으로부터 노즐의 단면방향으로 Y/B가 증가함에 따라 Nu수가 다소 완만하게 증가하는 경향을 나타낸 후 충돌영역의 경계인 $Y/B=4$ 부근에서 다소 급하게 증가하는 경향을 나타낸다. 노즐의 단면방향에서의 충돌영역은 $Y/B \leq 1.3^{(11)}$ 인 영역으로 나타나는데, 이 충돌영역내에서 분류가 충돌 후 벽면분류 영역으로 천이하게 되고, 그 하류 쪽에서 와류가 발생하여 난류경계층으로 유동하게 된다. 본 실험조건에서는 벽면분류에서의 와류발생이 $Y/B=4$ 부근에서부터 발생하게 되므로, 극대치는 $Y/B > 4$ 영역 이후에 존재하게 되고, 노즐의 단면방향 흐름이 갖는 운동량은 $X/B > 4$ 영역이 $X/B \leq 4$ 영역보다는 작지만, 노즐의 장축 방향에 비하여 크므로, 노즐 단면 방향의 열전달계수는 Y/B의 증가에 따라 서서히 증가하며, 제2극대치는 $Y/B > 7$ 영역 이후에 나타날 것으로 추론된다. 그러나 Vader 등⁽¹²⁾은 하향의 사각수분류의 실험결과에서 $Z/B=8.7$ 인 경우에 정체선상에서는 $Y/B=10$ 부근에서 극대치가 발생한다고 보고하고 있어서, 본 결과와는 차이가 나고 있다. 이와 같은 차이는 분류방향, 노즐-전열면간 거리, 노즐의 내부형상이 다르기 때문이며, 자유분류 자체가 충돌면상에서 볼 때 $Z/B=8.7$ 보다는 $Z/B=20$ 인 본 실험조건에서는 분류가 이미 난류로 발달한 상태이기 때문이다. 만일 충돌 후에 경계층이 층류라면 Y/B의 증가에 따라 열전달계수는 계속 감소할 것으로 추론된다.

노즐의 장축방향(X방향)으로의 열전달계수 분포에 대하여 주목하면, $Y/B=0$ 인 정체선상에서 Nu수는 X/B의 증가에 따라 단순감소현상이 나타나고, 충돌영역($X/B \leq 3.7$)⁽¹¹⁾을 벗어난 $X/B > 4$ 영역에서 현저히 감소하는 경향이다. 정체선 밖의 영역에서는 $Y/B \leq 2$ 영역인 충돌영역에서는 정체선($X/B=0$) 상에서 제1극대치인 열전달계수가 나타나

고, X/B가 증가함에 따라 단순감소하고 있으며, $X/B > 4$ 이후 영역에서는 그 감소경향이 더욱 크게 나타난다. 이것은 노즐의 장축방향으로는 유량 및 운동량이 작으므로, 층류경계층에서 난류로의 천이는 측정범위 내에서 발생하지 않아서 단순감소한다고 생각된다. 그러나 충돌영역을 벗어난 $Y/B > 2$ 영역에서의 X방향 열전달계수 분포는 마찬가지로 $Y/B=0$ 인 정체선에서 제1극대치를 나타내고 X/B의 증가와 더불어 감소 후 $X/B=4$ 부근에서 제2극대치를 나타낸 후 단순감소 경향을 나타낸다. 이것은 X, Y 양쪽방향의 액략류가 서로 교차하는 위치로서 경계층의 교란효과가 크기 때문으로 생각된다. 그런데 Fig. 5에 나타난 바와 같이 분류속도 V_0 가 6.2m/s에서는 $Y/B < 2$ 의 영역에서도 X/B의 증가에 따라서 분류속도가 저속인 Fig. 4에서 나타낸 것과는 달리 제2극대치가 나타나고 있다. 이러한 현상은 본 실험의 경우 분류속도가 $V_0 \geq 6.2$ m/s 이상인 비교적 고속의 경우에는 Y방향 뿐만 아니라, X방향에서도 와류발생에 의한 수력도약현상이 나타나기 때문에 제2극대치가 나타난다고 생각된다.

Fig. 4(B)와 Fig. 5(B)의 등 Nu수 선도의 국소 Nu수 분포에서 나타난 바와 같이 제2극대치를 갖는 국소지점은 좌표평면상에서 $X/B=4.0$, $Y/B=4.0$ 인 영역 근방이며, 등 Nu수의 선도는 $X/B < 4$ 영역에서는 선도에 의하여 나타나는 벽분류의 흐름 방향이 주로 Y방향으로만 나타나고 있고 이 영역을 벗어난 영역에서는 선도가 X, Y방향의 2차원적 유동특성이 강하게 나타나고 있다. 따라서 분류가 전열면에 충돌하여 벽면분류로 되어 유동할 때 X방향의 운동량보다는 주로 Y방향의 운동량이 크다는 것을 이 선도로부터 알 수 있다. 또한 노즐 출구단면을 직상으로 평행 이동해서 전열면상에 나타내었을 때에 점선부분에 해당하는 영역 중 Y방향의 Nu수 분포는 노즐 직상영역 외측에 비하여 상대적으로 낮은 Nu수의 분포를 나타내고 있다. 이와 같은 현상은 확대칭 원형충돌분류에서의 결과와 정성적으로 일치하고 있다.⁽¹³⁾ Fig. 4(B), Fig. 5(B)의 등 Nu수 선도에 임의의 (X/B , Y/B)의 좌표지점에서 국소 Nu수는 분류속도가 증가하면 그 값도 증가하고 있으며, 제2극대치 선상의 극대치는 분류속도가 증가함에 따라 증가하고 있다. 이와 같은 제2극대치를 나타내는 위치는 전반적으로 극대치선을 따라서 상류 쪽으로 이동하는 경향을 나타낸다. 또한 Fig. 5의 등 Nu수 선도(B)에서 나

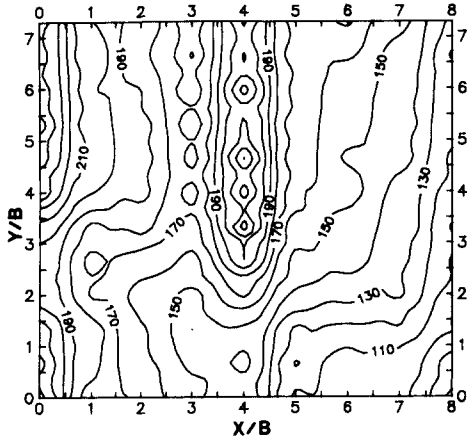


Fig. 6 Contours of constant Nu number for $Z/B=50$, $S/B=0$ and $Vo=6.2\text{m/s}$

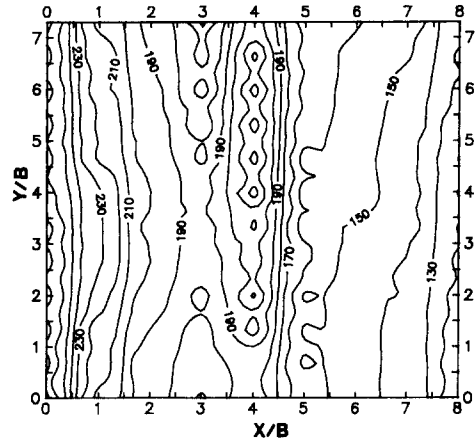


Fig. 8 Contours of constant Nu number for $Z/B=50$, $S/B=2$ and $Vo=6.2\text{m/s}$

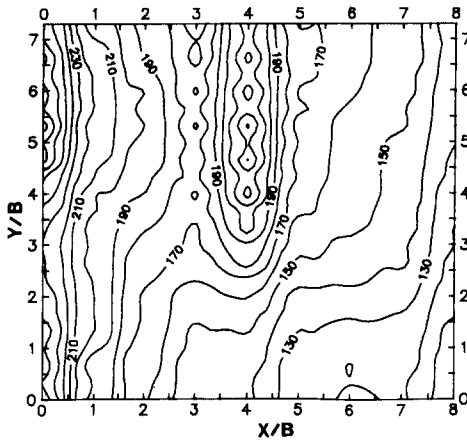


Fig. 7 Contours of constant Nu number for $Z/B=50$, $S/B=1$ and $Vo=6.2\text{m/s}$

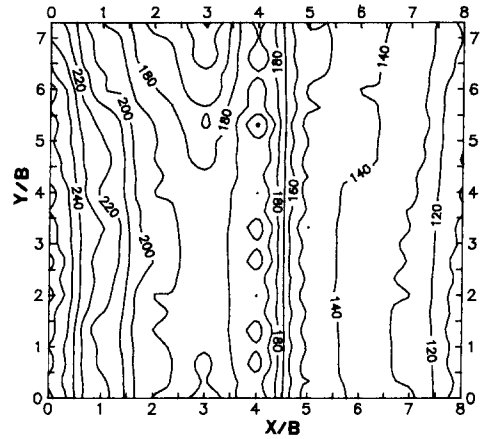


Fig. 9 Contours of constant Nu number for $Z/B=50$, $S/B=3$ and $Vo=6.2\text{m/s}$

타난 바와 같이 Fig. 4(B)에 비하여 노즐 출구속도가 증가함에 따라 제2극대치선 근방에서 등 Nu수 선도간의 Nu수 값이 10이라는 등간격임을 생각할 때 저속에 비하여 조밀함을 알 수 있다.

Fig. 6~Fig. 9의 등 Nu수 선도에서 노즐-전열면 간 거리 $Z/B=50$, 분류속도가 $Vo=6.2\text{m/s}$ 로 일정한 실험조건에서 등 Nu수 선도를 이용하여 보조수층의 높이가 국소열전달에 미치는 영향을 고찰할 수 있다. 노즐 출구로부터 보조수층내의 보조수 수위(S)를 노즐 폭(B)로 무차원화한 값인 S/B 을 0, 1, 2, 3으로 변화한 경우에 각각의 무차원 보조수층에 대한 선도 중에서 무작위로 국소점(X/B , Y/B)의 6개소를 선별하여 그 위치에서 국소 Nu수를

무차원 보조수층의 높이에 대하여 각각 비교하면 Table 1과 같다.

이 표에서 볼 때 좌표평면위치 (5, 5)에서 국소 Nu수는 $S/B=2$ 인 경우가 $S/B=1$ 보다 다소 작은 것을 제외하면, 나머지 좌표평면 위치의 경우 $S/B=2$ 인 경우가 여타 보조수층에 비하여 높은 국소 Nu수의 분포를 나타내고 있으며, 특히 제2의 극대치를 나타내는 무차원 좌표평면 위치인 (X/B , Y/B)=(4, 4)의 경우는 그 Nu수의 크기가 명확하게 큰 값을 나타내고 있으므로 열전달을 최대화하는 최적조건인 무차원 보조수층의 높이는 $S/B=2$ 로 나타나고 있다.

이러한 현상은 주분류가 보조수층을 통과하면서

Table 1 The Comparison of local heat transfer coefficient ($Z/B=50$, $Vo=6.2m/s$)

(X/B, Y/B) \ S/B	0 (Fig. 6)	1 (Fig. 7)	2 (Fig. 8)	3 (Fig. 9)
(1,1)	186	194	217	214
(3,3)	163	166	196	185
(4,4)	220	220	225	195
(5,5)	166	169	166	150
(1,6)	202	217	225	203
(6,1)	112	126	144	135

받는 저항에 의한 속도의 감소를 가져오기 때문에 열전달의 감소를 가져오며, 동시에 주분류가 보조수조내의 보조수층을 통과하면서 자유분류가 서브머지드 분류로 되면서 보조수조내에서 분류의 확산에 의한 혼합효과로 인하여 분류유량의 증대를 가져오기 때문에 유량증대로 인한 열전달 증진효과가 발생할 수 있다. 이 경우에 $S/B=2$ 인 조건의 경우, 분류가 노즐 폭 B 의 두 배인 보조수를 통과하면서 분류속도의 감소에 의한 열전달 감소보다도, 서브머지드 효과에 의하여 분류의 유량증대로 인한 열전달의 증대효과가 보다 크게 작용하기 때문이라고 생각할 수 있다.

Figs. 10~12는 무차원 보조수층의 높이가 $S/B=$

2로 일정하며, 분류속도가 $Vo=7.3m/s$ 인 실험조건에서 무차원의 노즐-전열면간 거리(Z/B)의 영향을 나타내는 3차원의 국소 Nu 수의 분포를 나타낸 것이다. 여기서 무차원 노즐-전열면간 거리 $Z/B=20\sim50$ 이므로 이 값은 삼차원 자유분류 영역에서 $Z/B<60$ 영역인 특성값외영역에 해당하는 영역⁽⁶⁾이다. 이 영역에서 Nu 수의 분포는 Z/B 의 변화에 대하여 상사성을 유지하고 있으나, 노즐-전열면간 거리가 증가함에 따라 동일한 좌표위치상에서 국소 Nu 수는 감소하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 13은 본 실험범위내에서 삼차원의 국소열전달 분포가 면대칭 조건을 만족한다고 가정하고, 노즐-전열면간 거리 $Z/B=30$, 보조수층 높이 $S/B=$

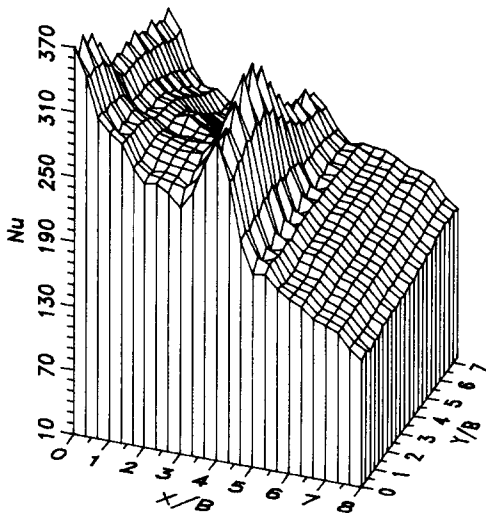


Fig. 10 Profiles of 3-D. local Nu number for $S/B=2$, $Vo=7.3m/s$ and $Z/B=20$

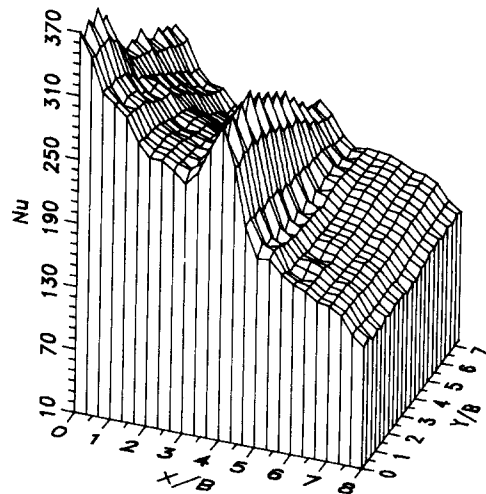


Fig. 11 Profiles of 3-D. local Nu number for $S/B=2$, $Vo=7.3m/s$ and $Z/B=30$

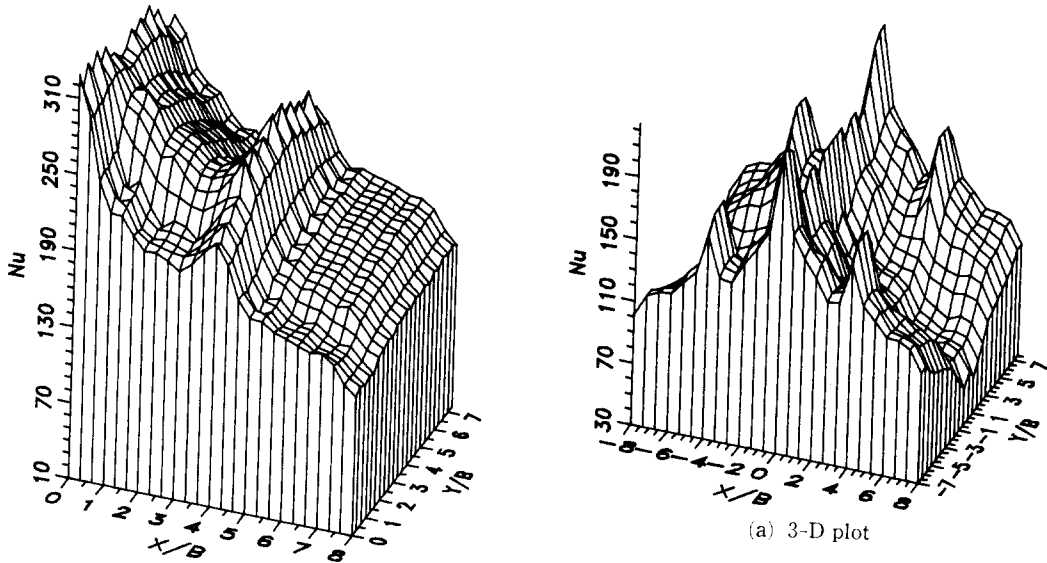


Fig. 12 Profiles of 3-D. local Nu number for $S/B=2$, $V_o=7.3\text{m/s}$ and $Z/B=50$

1, 노즐출구속도 $V_o=4.0\text{m/s}$ 인 실험조건에서 제1상한의 국소열전달 분포를 이용하여 나머지 2, 3, 4상한에 대해서 축대칭으로 방사하여 복사했을 때 국소 Nu수의 분포를 나타내고 있다. 등 Nu수 선도(B)의 점선영역은 노즐 출구단면의 직상영역이다. 이 선도(A), (B)에서 나타난 바와 같이 분류의 운동량은 주로 Y방향으로 유동하고 있으며, 등 Nu수의 선도는 $X/B=0$ 인 정체선상에서 제1극대치가 나타나고 X/B 가 증가함에 따라 감소율이 증가하고 있으며, $X/B=4$ 인 영역에서 등 Nu수의 밀도가 조밀하게 보이는 곳에 제2극대치가 존재함을 명확하게 나타내 주고 있다. 그러나 $-3 < Y/B < 3$ 의 영역이고, $X/B > 5$ 와 $X/B < -5$ 인 영역에서는 분류의 운동량이 적어서 매우 낮은 열전달 분포를 나타내고 있다. 이러한 현상은 노즐의 단축 방향으로의 분류의 운동량이 노즐의 장축 방향으로의 운동량에 비해 큰 데 기인한다고 생각된다.

Fig. 14는 장방형의 수분류가 노즐을 통과하면서 보조수조내의 보조수를 동반하는 경우에 가장 높은 열전달 효과를 나타내는 무차원 보조수층 높이인 $S/B=2$ 인 경우에 대하여 정체점 열전달에 관한 실험식을 나타낸 것이다. 본 실험의 경우 일정한 보조수층 높이에 대하여 무차원의 정체점 열전달은 다음의 함수식으로 나타낼 수 있다.

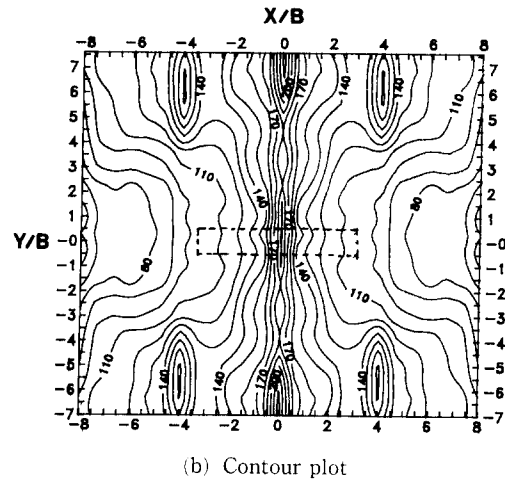


Fig. 13 Local distribution Nu number for $Z/B=30$, $S/B=1$ and $V_o=4.0\text{m/s}$ (Dashed lines represent nozzle outlet contour)

$$Nu_o = F(\text{Re}, \text{Pr}, Z/B) \quad (3)$$

식 (3)에 의하여 $S/B=2$ 의 경우에 정체점 열전달을 최대로 하는 무차원 열전달 실험식은 다음의 식 (4)와 같이 해석된다.

$$Nu_o = 0.0108 \text{Re}^{1.05} \text{Pr}^{0.4} (Z/B)^{-0.29} \quad (4)$$

정체점 열전달의 식 (4)에서 레이놀즈수의 증가에 따른 정체점 Nu수의 증가율은 본 실험범위의 모든 조건에서 $Nu_o \propto \text{Re}^{1.05}$ 의 관계가 있음을 알았다. 그러나 층류충돌액체분류의 연구결과에 의하면⁽²⁾

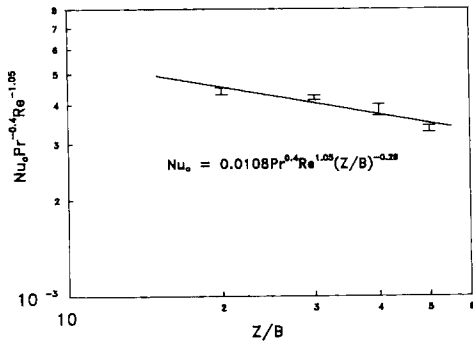


Fig. 14 Dependence of stagnation Nusselt number on Z/B for $S/B=2$

Nu_0 는 $Re^{0.5}$ 에 비례하며, 난류분류의 경우에는 (8,12)은 $Re^{0.8}$ 을 나타낸다. 본 실험의 경우는 난류충돌분류의 레이놀즈수의 지수 0.8보다도 더 큰 지수 값을 나타내고 있어서, 보조수를 이용한 정체점 Nu 수는 분류속도에 의한 증가구배가 다른 연구결과보다도 큼을 나타내고 있다. 또한 분류의 유동방향에서 정체점의 최대열전달을 나타내는 노즐-전열면간의 무차원거리는 Gardon 등⁽⁷⁾의 연구에 의하면 $Z/B=8\sim 10$ 으로 나타내고 있으나, 본 실험의 경우는 노즐-전열면간 거리 (Z/B)가 20~50인 범위이므로 3차원 분류의 특성감쇠영역 범위⁽⁵⁾내에 속하고 있다. 따라서 Z/B 의 증가에 따라 정체점 Nu 수 (Nu_0)의 극대치를 나타내는 Z/B 영역은 이 범위에서 나타나지 않고 $(Z/B)^{-0.29}$ 에 비례하여 단순히 감소하고 있다. 그림의 $S/B=2$ 에 대한 정체점 열전달에서 구하여진 결과식의 신뢰도는 불확실성 해석(Uncertainty Analysis)방법에 의하면⁽¹⁴⁾ Nu_0 의 불확실성의 범위는 6%~14%로 나타나고 있으므로, 정체점 Nu 수 (Nu_0)는 14% 오차 범위내에서 신뢰할 수 있다.

4. 결론

장방형의 노즐을 이용한 연직상향의 충돌수분류가 등열유속조건 [$1.5 \times 10^5 W/m^2$]의 전열면에 충돌 냉각하는 실험적 연구를 수행하였다. 이 실험에서 노즐-전열면간 거리 Z/B 는 삼차원 자유분류의 특성감쇠영역 범위인 20~50이고 레이놀즈수를 $1 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4$ 로 변화하였으며, 또한 보조수를 동반하지 않은 단일수분류 ($S/B=0$)와 보조수를 동반하는 보조수 동반수분류 즉 $S/B=1, 2, 3$ 에 대하여

실험한 결과는 다음과 같다.

① 장방형 노즐의 장축방향의 국소 열전달계수 분포는 Y 축상 ($X/B=0$)에 제1극대치가 나타나고, $Y/B \leq 2$ 영역에서는 X/B 의 증가에 따라 열전달계수가 단순히 감소하고 있으나, $Y/B > 2$ 영역에서는 $X/B=4$ 인 근방에서 제2극대치가 나타난다. 그러나 분류속도 $V_0 \geq 6.2 m/s$ 에서는 $Y/B < 2$ 의 영역에서도 X/B 의 증가에 따라 제2의 극대치가 존재한다.

② 장방형 노즐의 단변방향의 열전달계수 분포는 정체점 영역보다도 오히려 정체점을 벗어난 영역에서 극대치가 나타난다.

③ 보조수 동반수분류가 단일수분류에 비하여 전반적으로 높은 열전달 효과를 나타내고 있으며, 무차원 보조수층 높이가 $S/B=2$ 일 때 가장 높은 열전달효과가 나타났다.

④ 본 실험범위에서 정체점 Nu 수는 레이놀즈수의 1.05승에 비례하여 증가하고, 이차원 특성감쇠영역내에서 노즐-전열면간 거리의 -0.29 에 비례하여 감소하는 경향을 나타낸다.

참고문헌

- (1) Stevens, A. and Webb, B. W., 1991, "Local Heat Transfer Coefficients Under an Axisymmetric, Single Phase Liquid Jet," *Trans. ASME, Journal of Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 71~78.
- (2) Liu, X., Lienhard, J. H. and Lombara, J. S., 1991, "Convective Heat Transfer by Impingement of Circular Liquid Jets," *Trans. ASME, Journal of Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 571~582.
- (3) Mudawar, I. and Wadsworth, D. C., 1991, "Critical Heat Flux From a Simulated Chip to a Confined Rectangular Impinging Jet of Dielectric Liquid," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, No. 6, pp. 1465~1479.
- (4) Lichtarowicz, 1992, *Jet Cutting Technology, Fluid Mechanics and Its Applications*, Vol. 13, Kluwer Academic, London, pp. 483~501.
- (5) Krothapalli, A., Baganoff, D. and Karamcheti, K., 1981, "On the Mixing of a Rectangular Jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 107, pp. 201~220.
- (6) Wang, X. S., Dagan, Z. and Jiji, L. M., 1989, "Heat Transfer between a Circular Free Imping-

- ing Jet, and a Solid Surface with Nonuniform Wall Temperature or Wall Heat Flux—1. Solution for the Stagnation Region,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 32, No. 7, pp. 1351~1360.
- (7) Gardon, R. and Akfirat, J. C., 1966, “Heat Transfer Characteristics of Impinging Two Dimensional Air Jets,” *Trans. ASME, Journal of Heat Transfer*, Vol. 88, pp. 101~108.
- (8) Wolf, D. H., Viskanta, R. and Incropera, F. P., 1990, “Local Convective Heat Transfer From a Heated Surface to a Planar Jet of Water With a Nonuniform Velocity Profile,” *Trans. ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 899~905.
- (9) Zumbrennen, D. A., Viskanta, R. and Incropera, F. P., 1989, “The Effect of Surface Motion on Forced Convection Film Boiling Heat Transfer,” *Trans. ASME, Journal of Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 760~766.
- (10) Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 1985, *Introduction to Heat Transfer*, John Wiley & Sons, New York, pp. 177~181.
- (11) 이종수, 1992, “장방형 자유충돌수분류계의 열전달 특성에 관한 연구,” 인하대학교 대학원 박사학위 논문.
- (12) Vader, D. T., Incropera, F. P. and Viskanta, R., 1991, “Local Convective Heat Transfer from a Heated Surface to an Impinging, Planar Jet of Water,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, No. 3, pp. 611~623.
- (13) 一宮浩市, 中村好男, 1991, “熱流束補正を考慮した單一圓形衝突噴流の傳熱特性,” 第28回日本傳熱シンポジウム講演論文集 A52, pp. 64~66.
- (14) Holman, J. P., 1989, *Experimental Methods for Engineers, 4th Ed.*, McGraw Hill, New York, pp. 41~49.