

맥동주파수의 변화에 따른 충돌제트의 열전달 특성

김용일*·박복춘**·백병준**

Heat Transfer Characteristics Of Impinging jet with Pulsating Frequency

Yong Il Kim, Bock Choon Pak and Byoung Joon Baek

Key Words: Impinging jet(충돌제트), Heat transfer(열전달), Pulsating Frequency(맥동주파수)

Abstract

The method of Impinging jet was applied lots of part in industrial field as a cooling of as gas turbine blade, a annealing of metal and plastic sheets, drying of textile, veneer paper, X-ray medical devices, laser weapons and electronic components. This study's main factor is reciprocating Jet impingement perpendicular to the heated Surface. We researched the effect of heat transfer and enhancement with pulsating air jet. The pulsating air jet has an improvement in pulsating Frequencies($f= 0.5, 1, 1.5, 3\text{Hz}$) and nozzle-to-plate distances($l/d= 2\sim 4, 6\sim 8, 4\sim 6, 8\sim 10$).

1. 서 론

최근 열을 발생하는 각종 열설비 및 전자장비의 열적제어는 열전달분야의 첨단기술응용의 중요한 영역으로 인식되어 왔다. 특히 충돌제트는 높은 열전달 및 물질전달 효과의 우수성 및 냉각 위치조절이 용이함으로 인해 터빈 블레이드 선단에서의 냉각, 증기건조 유리제조 및 전자 장비의 냉각에 이르기까지 광범위한 영역에 사용되고 있으며, 최근 전자부품의 고집적화에 따른 국소면적에 대한 발열량의 증가로 인하여 반도체의 접합온도의 증가에 따라 기대수명이 지속적으로 증가하므로 이에 대한 냉각문제 해결등에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 충돌제트는 기존의 많은 산업현장에 적용되어 사용되고 있으며 열전달 성능 개선의 필요성과 더불어 현장에 미치는

직접적인 효과는 크리라고 기대된다.

지금까지 충돌제트에 의한 열전달 향상에 관한 연구는 제트의 난류강도, Reynolds 수, 노즐과 충돌벽면의 거리 및 방향, 제트의 외부유동의 온도, 노즐형상의 변화, 동작유체의 종류, 충돌벽면의 형상, 등 여러 인자들이 존재하며 이에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다.

최근까지 원형 공기제트에 의한 충돌제트의 열전달에 관한 많은 실험들이 있었다. 원형공기제트의 열전달 향상을 위한 기법으로 노즐의 길이, 지름, 노즐의 형태 등 여러 인자들에 관한 실험이 있었고 이에 따른 많은 열전달 효과 증진의 결과들이 발표되고 실제 산업현장에서 사용되고 있다. Matin[1]은 그 동안 원형충돌제트에 관련되어 실험해온 결과들을 단상, 다중제트 및 인자들의 변화에 대해 발표하였다.

Gardon and Cobonpue[2]는 최초로 국소지점에서의 열전달률은 그 지점에서의 표면온도와 대기 온도차이에 의해 표현되어짐을 보였고, Jambunathan[3], Goldstein[4], Lee et al[5]는 평판에서의 원형공기충돌제트의 열전달의 영향에 대한 연구를 하였으며, 제트의 난류유동 특성을 중대

* 전북대학교 대학원

** 전북대학교 기계공학부

시키기 위하여 Farrington과 Claunch[6], Liu[7]등은 공기제트에서 크게 증폭된 유동과장의 영향을 연구하였다.

본 연구에서는 충돌면에 수직으로 왕복운동하는 노즐에 의한 파동이 존재하는 원형충돌제트의 열전달 특성에 대하여 실험을 하였다.

이 실험은 Reynold 수(Re)를 20,000으로 하고, 일정한 시간 간격에 따른 노즐의 수직 왕복운동에 의한 맥동주파수(0.5, 1, 1.5, 3Hz)와 노즐과 충돌면 사이의 왕복운동하는 거리비($l/d = 2 \sim 4, 4 \sim 6, 6 \sim 8, 8 \sim 10$)를 주 인자로 하여 국소면에서의 열전달 성능의 향상 및 공기의 맥동이 충돌벽면에 미치는 열전달 효과를 연구하였다. 이 실험을 통한 열전달 성능의 향상과 더불어 실제 산업 현장에서 사용되는 공기충돌제트와 연관성 있는 장치구성을 통하여 효율적인 성능개선을 이루고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 가열면에 수직으로 왕복운동하는 충돌제트 실험장치의 개략도이다. 실험장치의 구성은 크게 풍속발생부[송풍기(Blower), 열교환장치(Heat Exchanger), 오리피스 유량측정기(Orifice)], 발열부(Test Section), Nozzle, 맥동발생장치(Pulse Generate Section), 적외선 온도측정장치 및 데이터 처리장치(Data Acquisition System)로 구성된다.

1.5Kw 원심송풍기를 통하여 공급되어진 공기는 노즐출구에서 대기온도와 동일하게 유지될수 있도록 열 교환기(Constant Temperature Bath)를 통하여 PVC관으로 공급되어진다. 공급된 공기는 관내 유속분포를 일정하게 유지하기 위하여 Honeycomb을 지난다. 송풍기의 유량은 주파수 변환기(Inverter) 와 Bypass valve을 이용하여 원하는 Reynold수에 맞게 조절한다. 유량을 측정하기 위해 오리피스 유량 측정기를 설치하였으며, KS A 0512" 조임 기구에 의한 유량측정방법"의 규격에 의해 제작하였으며 차압 측정방법은 D와 1/2D 탭 압력공을 오리피스 상단과 하단에 설치하여 차압값을 고정밀 마노미터(MEDM 5K, Airflow)를 사용하여 측정하였으며, 이 오리피스 유량측정장치는 본 실험에 사용전에 한국표준과학 연구원의 유량 표준장치로 Calibration 하였으며 이 결과에 의하여 유량을 측정하였다.

Fig. 2은 발열부의 개략도이다. 그림에서와 같이 발열부(test section)는 플렉시글라스(Plexiglass Plate, 40x40x0.8cm)로 제작하였으며 열손실(heat loss)을 줄이기 위해 6cm 두께의 스티로폼을 판 사이에 삽입하였다. 발열체는 가로40cm, 세로5cm, 두께 18 μ m의 동박막(copper foil)을 사용하였으며, 균일 벽면 열유속(uniform wall heat flux)경계 조건을 만들어 주기 위해 직류 전원공급장치(HP6673A DC Power Supply)를 통하여 전원을 공급하였다. 동박막과 플렉시글라스는 양면테이프(Scotch VHB, 3M)를 이용하여 접착을 하였고, 동박막의 전원공급은 동박막 양끝에 두께 0.5mm의 구리봉을 5x2mm의 bar 형태로 은납 용접으로 표면에 부착하여 전원공급장치와 연결하였다. 공급된 전압과 전류는 Intergrating Digital Multimeter(PREMA)로 측정하였다.

제트와 제트주변온도를 측정하는 열전대는 두께 0.7mm의 열전대(T-Type Thermocouple) 2개를 부착하여 각 지점의 온도를 측정할 수 있게 하였다. 온도측정은 Hewlett Packard HPE8404(64 Channel) 고정밀 온도측정장치(온도 허용오차 $\pm 0.01^\circ\text{C}$)를 사용하였으며 이 장치의 구성은 데이

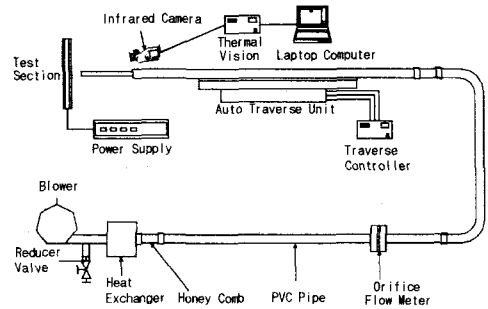


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

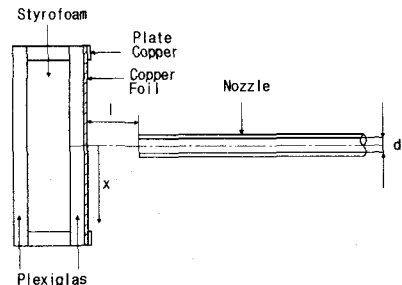


Fig. 2 Schematic of main test section

터 처리장치(main frame), 멀티채널 입력부, IBM PC 1대로 구성되어 있으며 T-type 열전대를 통하여 입력부에서 읽어진 값들은 HPE8404 main frame을 거쳐 interface된 컴퓨터(pentium II)의 HPVEE 프로그램을 통하여 온도 값으로 구해진다.

발열부의 온도분포는 적외선 카메라(Thermo-Vision 900, AGEMA Inc., Sweden)로 측정하였으며 감응도(sensitivity)는 0.1℃이고, 정확도(accuracy)는 1%내이며 스티어링(stirling)냉각방식이다. 적외선 온도측정장치는 측정표면의 복사계수에 따라 측정온도가 다르므로 복사계수(emissivity)가 0.98인 흑색페인트를 도포한 후 측정하였다. 발열부의 표면온도는 정상상태에 도달한후에 온도변화가 0.1℃이내일 때 측정하였다.

발열부의 대류열전달량은 다음과 같이 구하였다.

$$q_{conv}'' = q'' - q_{rad}'' - q_{cond}'' - q_{wire}''$$

$$= IV/A - \epsilon\sigma(T_w^4 - T_a^4) - q_{cond}'' - q_{wire}''$$

$$h = q_{conv}'' / (T_w - T_j)$$

$$Nu = hd / k$$

여기서 T_w , T_a , T_j 는 발열부 표면의 온도, 제트 주변 온도, 제트온도이며, q_{rad}'' 는 발열면에서의 복사열량, q_{cond}'' 는 전도열량, 그리고

q_{wire}'' 는 전원선을 통하여 전달된 열량을 나타내며, h 는 국소 대류 열전달계수이다.

그림2는 이 실험에 사용된 노즐로서 노즐 지름은 $d=18.84\text{mm}$ 이고 노즐의 길이는 지름의 20배인 37.7cm 로 제작하였고, 노즐의 끝은 경사각도 10° 로 Sharp edged nozzle type 형태로 날카롭게 제작하였고 PVC 본관과 노즐관과의 연결은 황동(brass)로 제작하였으며 관내의 유동 변화를 줄이기 위하여 수축지름의 각도를 20° 로 하여 관수축으로 인한 불안정한 내부의 유동을 최소화시켰다.

자동이송장치(Auto Traverse Unit)를 이용한 파동발생장치는 직선운동시스템(Linear Motor, HRA, THK Co), 소형 1축 위치시스템(PS-101A, OHM Co) 서보모터(MR-CA, Mitsubishi)로 구성되었으며, 프로그램 입력에 따라 맥동주파수 및 노즐과 가열 평면사이의 거리를 조정할수 있게 되어 있다. 노즐과 가열평면 사이의 거리는 노즐지

름과의 무차원화된 수 $r/d = 2, 4, 6, 8, 10$ 의 범위에서 스텝모터에 의한 자동이송장치를 이용 정밀하게 조절하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기존 연구결과와의 비교

Fig. 3에서는 온도측정 결과를 검증하기 위하여 축대칭 충돌제트에서 $Re=20,000$, $l/d=10$ 일때의 실험결과를 Goldstein & Franchetti[8]와 Hollworth & Gero[9]의 결과와 비교해 보았다. 이 실험결과에서 보면 천이영역에서 조금 큰 값을 가지고 있으나 충돌영역(impingement region) 및 벽분류영역(wall jet region)에서는 전체적으로 잘 일치하고 있으며, 최대 차이는 9%내에서 존재하였다. 기존 연구결과와의 비교에서 나타난 미소한 차이는 실험의 정확도와 각각의 연구결과에서 사용된 노즐의 형태가 서로 다르기 때문에 나타나는 것으로 사료되며 본 연구결과와 비교해 보면 비슷한 경향을 보여주고 있다.

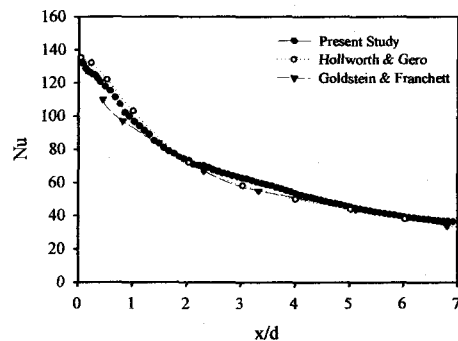


Fig. 3 Heat transfer measurements for a normal jet compared with those from earlier studies

3.2 노즐과 충돌면사이의 간격변화가 열전달에 미치는 영향

Fig. 4, 5, 6, 7, 8는 가열면에 수직으로 왕복운동($l/d=2\sim 4, 4\sim 6, 6\sim 8, 8\sim 10$)하는 원형 충돌제트에서 맥동주파수($f=0, 0.5, 1, 1.5, 3\text{Hz}$)가 열전달에 미치는 영향을 고정노즐인 경우와 비교, 검토하고자 한다.

Fig. 4은 고정노즐($f=0\text{Hz}$)인 경우로 충돌분류영역($x/d<1$)에서는 노즐과 충돌면사이의 거리비가 6

인 경우에 가장 큰 난류강도를 가지므로 최대의 열전달분포를 보여주고 있으며, 층류분류영역에서 벽분류 영역으로 향할수록 Nu수는 감소하나 벽분류영역에서는 l/d 에 관계없이 비슷한 분포를 보여준다.

Fig. 5는 맥동주파수가 $f=0.5\text{Hz}$ 인 경우의 층류제트의 열전달 분포를 보여준다. $l/d=2\sim 4$ 와 $4\sim 6$ 인 경우에 있어서 최대 열전달분포를 보여주고 있다. $l/d=2\sim 4$ 인 경우에 $x/d=1.3\sim 2.3$ 인 지점에서 2차 정점(secondary peak)현상이 나타났다. 이 2차 정점 현상은 가속되는 정체영역의 흐름에서 감속하는 벽분류영역으로의 천이(transition)과정이 수반되면서 난류의 급격한 증가와 정체 영역에서의 와류의 형성에 기인한 것으로 보여진다

Fig. 6는 맥동주파수 $f=1\text{Hz}$ 인 경우의 정체점으로부터 반경방향의 열전달 분포를 나타낸다. 정체점부근에서 $l/d=4\sim 6$ 와 $6\sim 8$ 인 경우에 거의 동일하게 최대의 열전달값을 가지며, $l/d=2\sim 4, 8\sim 10$ 의 순으로 국소 Nusselt수의 변화를 보여준다.

Fig. 7는 맥동주파수 1.5Hz 인 경우의 원형층류제트의 열전달 분포를 나타내는데 정체점부근에서의 열전달은 $l/d=8\sim 10$ 인 경우에 최대의 열전달값을 가지며, $l/d=4\sim 6, 6\sim 8, 2\sim 4$ 의 순으로 국소 Nusselt수의 감소가 이루어지고, 벽분류 영역($x/d>1.5$)으로 나아가면서 $l/d=2\sim 4, 4\sim 6, 6\sim 8, 8\sim 10$ 의 순으로 감소하게 되는데 그 이유는 l/d 이 작을 때에는 보텍스와 난류의 특성에 의하여 낮은 열전달계수를 높이는 작용을 하기 때문이다.

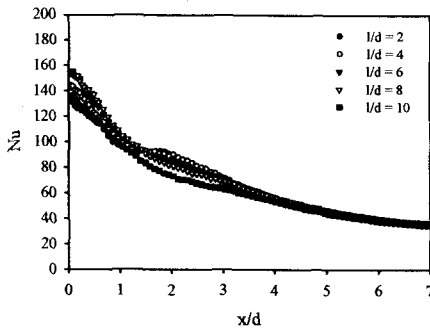


Fig. 4 Distribution of local Nusselt number along the flat plate at various impinging distances. ($f = 0\text{Hz}$, $Re = 20,000$)

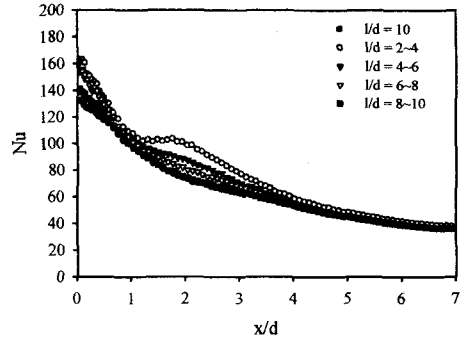


Fig. 5 Distribution of local Nusselt number along the flat plate at various impinging distances. ($f = 0.5\text{Hz}$, $Re = 20,000$)

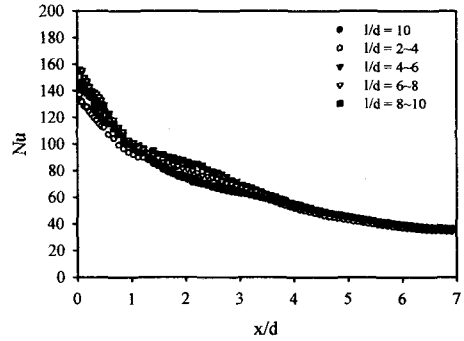


Fig. 6 Distribution of local Nusselt number along the flat plate at various impinging distances. ($f = 1\text{Hz}$, $Re = 20,000$)

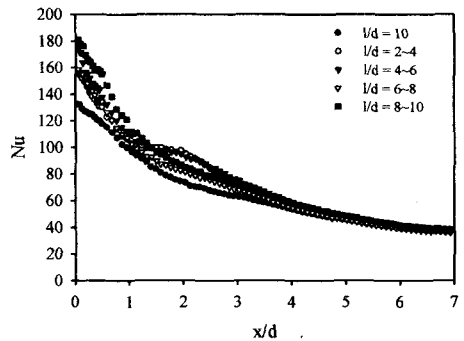


Fig. 7 Distribution of local Nusselt number along the flat plate at various impinging distances. ($f = 1.5\text{Hz}$, $Re = 20,000$)

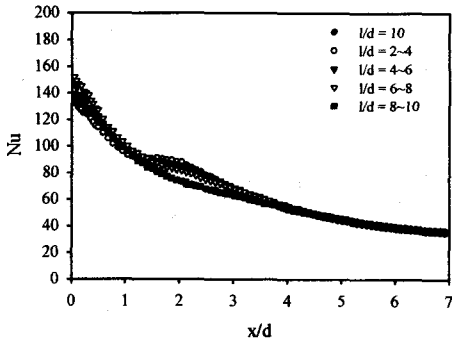


Fig. 8 Distribution of local Nusselt number along the flat plate at various impinging distances. ($f = 3\text{Hz}$, $Re = 20,000$)

Fig. 8는 맥동주파수가 3Hz인 경우의 충돌제트의 열전달 분포를 나타내는데 정체점부근에서의 열전달은 $l/d=6\sim 8$ 인 경우가 최대의 열전달값을 가지며, $l/d=4\sim 6$, $8\sim 10$, $2\sim 4$ 의 순으로 국소 Nusselt수의 변화를 보여준다.

3.3 맥동주파수가 열전달에 미치는 영향

Fig. 9에서 Fig. 12까지는 노즐과 충돌면사이의 왕복운동하는 거리비(l/d)에 대하여 고정노즐과 왕복운동하는 노즐에 따른 원형 충돌제트의 열전달 특성을 나타내고 있다.

Fig. 9은 노즐과 충돌면사이의 왕복운동하는 거리비가 $l/d = 2\sim 4$ 인 경우의 열전달 분포를 나타내고 있다. $l/d = 2\sim 4$ 인 경우에는 $x/d = 1.2\sim 2.6$ 인 지점이 원형제트의 포텐셜 코어 영역내에 존재하여 2차 정점 현상이 발생한다. 정체점부근에서는 맥동주파수가 0.5Hz인 경우에 최대 열전달값을 가지는데 고정노즐인 경우에 비해 약 17%의 열전달 증진을 보여준다.

Fig. 10은 노즐과 충돌면사이의 왕복운동하는 거리비가 $l/d = 4\sim 6$ 인 경우의 열전달 분포를 나타내고 있다. $l/d = 4\sim 6$ 인 경우에는 정체점부근에서의 열전달 특성은 맥동주파수가 1.5Hz인 경우에 최대열전달값을 가지는데 고정노즐인 경우에 비해 약 32%의 열전달향상을 보여주고 있으며, $x/d = 1.3\sim 2.6$ 인 지점에서는 맥동에 의하여 난류가 발생하여 낮은 열전달계수를 높이는 효과를 가져왔다

Fig. 11은 노즐과 충돌면사이의 왕복운동하는 거리비가 $l/d = 6\sim 8$ 인 경우의 열전달 분포를 맥동주파수의 변화에 따라 나타낸 것인데, 맥동주파수의 변화에 영향을 받지 않고 충돌지역에서 반경방향으로 균일한 열전달분포를 나타내고 있다.

Fig. 12은 노즐과 충돌면사이의 왕복운동하는 거리비가 $l/d = 8\sim 10$ 인 경우의 열전달 분포를 나타내고 있다. 정체점부근에서는 맥동주파수가 1.5Hz인 경우에 최대열전달값을 가지는데 고정노즐인 경우에 비해 약 36% 큰 열전달계수 값을 가진다. 그리고 맥동주파수가 증가함에 따라 열전달은 증가하다가 다시 감소하는 최적의 맥동주파수가 존재함을 보여주고 있다. 본 실험에서의 최적의 맥동주파수는 1.5Hz로 나타났다.

Fig. 13는 맥동주파수의 변화에 따른 최대 열전달계수를 노즐과 충돌면사이의 왕복운동하는 거리비(l/d)의 변화로 나타낸 것이다. 여기서 보면 고정노즐(0Hz)인 경우에는 노즐과 충돌면사이의 거리비(l/d)가 6와 8인 부분에서 최대의 열전달값을 가지는데 이것은 이 영역이 포텐셜코어 영역으로부터 발달된 영역으로 천이(Transition)하는 영역으로 대규모의 와류가 발생하는데 이 와류는 흐름의 운동량 및 에너지 교환을 증가시켜 열전달 성능을 향상시킨다. 맥동주파수 0.5Hz인 경우의 정체점에서의 열전달계수의 값을 보면 $l/d=2\sim 4$ 인 경우에 최대값을 가지는데 이것은 $l/d=2\sim 4$ 인 지점에서 포텐셜코어가 존재하기 때문이고, 맥동주파수가 1.5Hz인 경우 정체점의 열전달계수가 노즐과 충돌면사이의 왕복운동하는 거리비가 $l/d = 2\sim 4$, $6\sim 8$, $4\sim 6$, $8\sim 10$ 로 증가하게 되며, $Re=20,000$, $l/d=8\sim 10$, 1.5Hz인 경우에 최적의 열전달 향상을 보였는데, 고정노즐인 경우에 비해 약 36%정도의 열전달향상을 보였다. 맥동주파수 3Hz인 경우의 정체점에서의 열전달계수의 값을 보면 노즐과 충돌면사이의 왕복운동하는 거리의 위치가 $l/d=2\sim 4$, $4\sim 6$, $6\sim 8$ 로 증가함에 따라 열전달향상을 보이다가 다시 $l/d=8\sim 10$ 에서 감소하는 최적의 노즐과 충돌면사이의 왕복운동하는 거리의 위치가 존재함을 보여주고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 레이놀드수 $Re=20,000$, 노즐과 충돌면 사이의 왕복운동하는 거리비가 $l/d = 2\sim 4$,

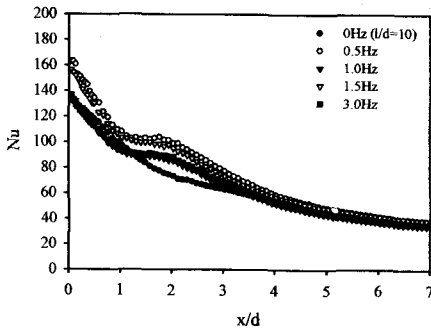


Fig. 9 Distribution of local Nusselt number along Pulsating Frequency. ($l/d = 2 \sim 4$, $Re = 20,000$)

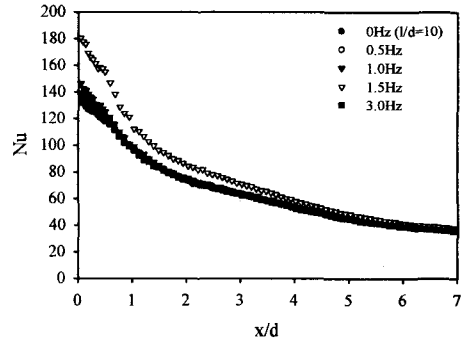


Fig. 12 Distribution of local Nusselt number along Pulsating Frequency. ($l/d = 8 \sim 10$, $Re = 20,000$)

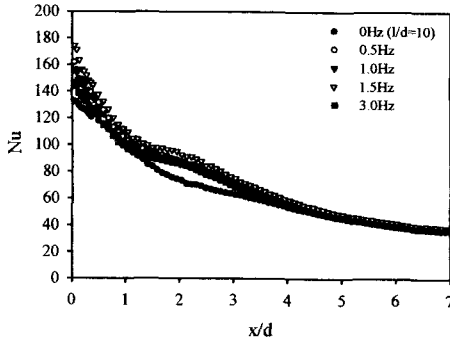


Fig. 10 Distribution of local Nusselt number along Pulsating Frequency. ($l/d = 4 \sim 6$, $Re = 20,000$)

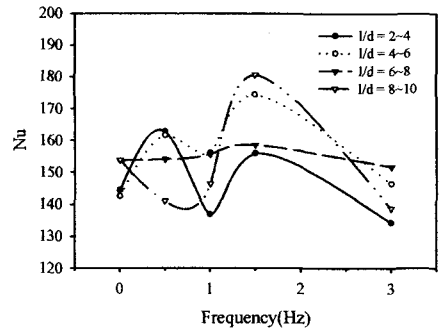


Fig. 13 stagnation point Nusselt number distributions about the pulsating frequencies. ($Re = 20,000$)

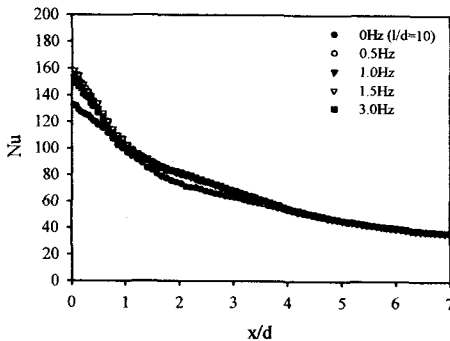


Fig. 11 Distribution of local Nusselt number along Pulsating Frequency. ($l/d = 6 \sim 8$, $Re = 20,000$)

4~6, 6~8, 8~10, 맥동주파수가 0.5Hz, 1Hz, 1.5Hz, 3Hz인 경우에 가열면에 수직으로 왕복운동하는 충돌체의 열전달 특성에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 고정된 노즐인 경우에는 벽면분류영역에서 분류의 속도감소와 확산으로 인하여 열전달성능이 정체점 이후 급격히 감소하게 되는데, 맥동주파수의 변화에 따라 정체점과 벽면분류영역에서 열전달 향상이 이루어 졌다.

2) 맥동주파수가 1.5Hz, 노즐과 충돌면사이의 왕복운동하는 거리비가 $l/d = 8 \sim 10$ 인 경우에 최대 열전달값을 가지는데 고정노즐인 경우에 비해 약 36% 큰 열전달계수 값을 가진다. 그리고 맥동주파수가 증가함에 따라 열전달은 증가하다가 다시

감소하는 최적의 맥동주파수가 존재함을 보여주고 있다.

From a Flat Surface to an Oblique Impinging Jet," ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 110, pp. 84-90 (1988)

참고문헌

- [1] H. Martin Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces. In Advances in Heat Transfer(Edited by T. Irvine and J. P. Hartnett), Vol. 13, pp. 1-60. Academic Press, New York(1977)
- [2] R.Gardon and J. Cobonpue, Heat transfer between a flat plate and jets of air impinging on it, Int. Developments in Heat Transfer, Proc. 2nd Int. Heat Transfer Conference, pp. 454-460. ASME, New york(1962)
- [3] Jambunathan, K., Lai, E., Moss, M. A. and Button, B. L., A review of heat transfer data for single circular jet impingement. International Journal of Heat Fluid Flow, 1992, 13, 106-115
- [4] Goldstein, R. J., Sobolik, K. A. and Seol, W. S., "Effect of entrainment on the heat transfer to a heated circular air jet impinging on a flat surface". ASME Journal of Heat Transfer, 1990. 112, 608-611.
- [5] J. H. Lee, S. J. Lee, "Heat Transfer Enhancement Based on Nozzle Exit Configuration of Turbulent Axisymmetric Impinging Jet", KSME 99TE14, pp. 146-153 (1999)
- [6] Farrington, E. B. and Claunch, S. D., Infrared imaging of large-amplitude, low-frequency disturbances on a planar jet. AIAA Journal , 1994, 32, 317-323
- [7] Tianshu Liu and J.P. Sullivan, "Heat Transfer and Flow Structures in an Excited Circular Impinging Jet." International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 39, No. 17, 3695-3706 (1986)
- [8] Hollworth, B. R., and Gero, L.R., "Entrainment Effects on Impingemen Heat Transfer, Part 2: Local Heat Transfer Measurement," ASME Paper No. 84-WA/HT-20 (1984)
- [9] Goldstein, R. J., Franchett, M. E., "Heat Transfer