

배열충돌제트에서 횡방향유동성분에 따른 열/물질전달 특성 고찰

윤필현* · 이동호* · 조형희**

(1999년 4월 13일 접수)

Effect of Arrays of Impinging Jets with Crossflow on Heat/Mass Transfer

Pil-Hyun Yoon, Dong-Ho Rhee and Hyung Hee Cho

Key Words: Heat/Mass Transfer(열/물질전달), Array Jets(배열제트), Impingement(충돌), Crossflow(횡방향유동), Naphthalene Sublimation(나프탈렌 승화법)

Abstract

The local heat/mass transfer coefficients for arrays of impinging circular air jets on a plane surface are determined by means of the naphthalene sublimation method. Fluid from the spent jets is constrained to flow out of the system in one direction. Therefore, the spent fluid makes a crossflow in the confined space. The present study investigates effects of jet-orifice-plate to impingement-surface spacing and jet Reynolds number. The spanwise- and overall-averaged heat/mass transfer coefficients are obtained by numerical integrating the local heat transfer coefficients. The local maximum heat/mass transfer coefficients move further in the downstream direction due to the increase of crossflow velocity. At the mid-way between adjacent jets, the heat/mass transfer coefficients have a small peak owing to the collision of the adjacent wall jets and are affected strongly by the crossflow. The effect of the crossflow occurs strongly at the small orifice-to-impingement surface distance.

기호설명

d : 제트 오리피스 직경
 dy : 나프탈렌 승화 깊이
 $d\tau$: 실험 시간
 D_{naph} : 공기 중에서의 나프탈렌 확산계수
 H : 제트 분사 출구와 충돌면의 간격
 h : 국소 열전달 계수
 h_m : 국소 물질 전달 계수
 \dot{m} : 질량 유속
 Nu : Nusselt 수
 Pr : Prandtl 수
 Re : Reynolds 수
 S : 제트 오리피스 간의 간격
 Sc : Schmidt 수

Sh : 국소 Sherwood 수, 식 (2)
 \overline{Sh} : 폭방향 평균 Sherwood 수, 식 (3)
 $\overline{\overline{Sh}}$: 전체 평균 Sherwood 수, 식 (4)
 x : 배출 유체 유동 방향 좌표, Fig. 1(b)
 y : 폭방향 좌표, Fig. 1(b)
 ρ_s : 고체 나프탈렌 밀도
 $\rho_{v,w}$: 표면에서 나프탈렌 증기 밀도
 $\rho_{v,\infty}$: 제트에서 나프탈렌 증기 밀도

1. 서론

충돌제트(impinging jet)는 국소적으로 높은 열 전달 및 물질전달 효과를 가지기 때문에 터빈 블레이드와 연소기 내벽의 냉각, 고온강판의 냉각, 종이와 천의 제조과정에서의 건조에 많이 사용되고 있다. 일반적으로 단일충돌제트(single impinging jet)를 사용하는 것보다는 여러 개의 제트들을 동시에(배열충돌제트) 사용하는 경우 넓은 영

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hhcho@bubble.yonsei.ac.kr

TEL : (02)361-2828 FAX : (02)312-2159

역에서 균일한 열/물질전달 효과를 얻을 수 있다. 배열충돌제트(array impinging jets)의 설계에 있어서 형상 및 유동 변수는 높은 평균 열/물질 전달 계수 및 표면 온도 분포의 균일성이라는 두 가지 조건을 잘 만족시키도록 선택되어야 한다. 이에 대한 연구는 제트와 제트 사이의 간격, 제트 배열 방법 및 제트 노즐과 충돌면 사이의 간격을 변화시키면서 수행되어져 왔다.

배열충돌제트의 경우 분사 유체가 면에 충돌한 뒤 배출구가 없기 때문에 횡방향(분사제트에 수직방향)으로 이동하면서 덕트유동을 형성한다. 이 덕트유동은 이웃한 인접 제트 주위로 재흡입(re-entrainment)되어 전체적인 열/물질전달 효과를 낮출 뿐 아니라 사용유체(spent fluid)의 횡방향유동(duct flow or crossflow)에 따라서 전체 충돌면에서 불균일한 열전달을 유발시킬 수 있다. 이와 같은 불균일한 냉각 효과는 고온의 강판 또는 터빈 블레이드의 충돌면에서 잔류 열응력을 유발시키게 된다.

배열충돌제트는 단일충돌제트에 비해 몇 가지 다른 기본적인 차이점이 있다. 배열충돌제트의 각각의 제트들은 두 가지 형태의 상호작용의 영향을 받게 된다.⁽¹⁾ 첫째는 제트가 충돌면(impinging surface)에 부딪히기 전에 일어나는 인접 제트간의 상호작용이다. 이와 같은 상호작용은 인접제트간의 간격이 작을 때와 제트 출구와 충돌

면의 간격이 상대적으로 클 때 증대된다. 둘째는 벽제트(wall jet) 영역에서의 인접 제트간의 충돌에 의한 상호 작용이다. 이 벽제트 영역의 충돌은 인접제트가 가까이 있을 때, 제트 출구와 충돌면의 간격이 작을 때 그리고 제트의 속도가 클 때 더욱 현저하다.

기존의 연구들에서 Behbahani와 Goldstein⁽²⁾는 열전대(thermocouple)를 이용하여 다열 배열제트의 열전달 특성에 대하여 고찰하였다. 열전대의 이용은 그 측정위치 및 개수의 제한으로 인하여 국소값을 얻지 못했다. Koopman과 Sparrow⁽¹⁾는 나프탈렌 승화법을 이용하여 단지 하나의 열에 대하여 실험을 수행하였다. 이것은 열이 하나밖에 없으므로 횡방향유동등에 의한 효과나 폭방향 배열제트의 상호작용 연구등이 실제 배열충돌제트와 크게 다르다. 본 연구에서는 횡방향유동이 있는 경우에 간격과 유속 변화가 열/물질전달 효과에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 실험방법으로 국소적 전달 계수의 측정에 잇점이 있는 나프탈렌 승화법(naphthalene sublimation method)을 이용하였으며 횡방향유동이 있는 경우에 대하여 제트출구와 충돌면 사이의 간격 및 제트 분사 속도를 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 나프탈렌 승화법의 이용으로 국소값의 측정이 가능하므로 유동의 자세한 이해와 횡방향유동에 의한 충돌면에서의 열/물질전달의 미세한 중심이동(제

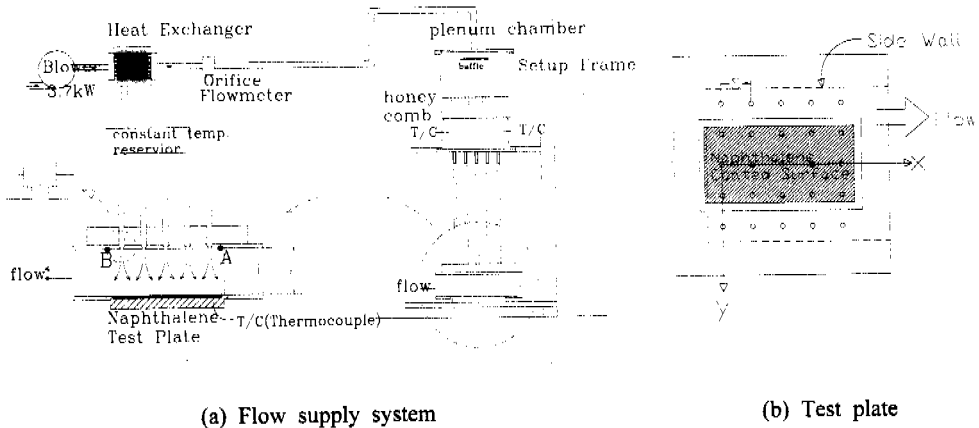


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

트의 힘)도 측정이 가능하다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1(a)는 실험장치의 개략도를 나타낸다. 주 유동은 인버터(inverter)를 이용하여 속도를 제어할 수 있는 3.7 kW 출력의 송풍기를 사용하였다. 송풍기에서 나온 유동은 열교환기를 통하여 일정한 온도를 유지하여 플레넘으로 유입된다. 열교환기는 온도를 제어하는 항온조와 연결되어 있다. 유량측정은 열교환기와 플레넘 사이에서 오리피스 유량계를 이용하였다. 플레넘에는 여러 개의 제트에 유량을 고르게 공급하기 위하여 다공판(baffle)과 하니콤(honeycomb)을 설치하였으며 온도측정을 위하여 두 개의 T형 열전대(thermocouple)를 부착하였다. 플레넘을 통한 유동은 동등한 압력손실을 주기 위하여 길이가 같은 내압튜브를 통하여 분산되었다. 이 유동은 외경 18 mm, 내경 14 mm의 아크릴 pipe를 통하여 각각의 제트를 형성한다. 오리피스 분사판의 분사제트 직경은 10 mm이다.

제트가 분사되는 오리피스 판은 25개의 제트 분사홀을 가지고 있다. 분사홀 사이의 간격은 제트 홀 직경의 6배($S=6d$)로 하였다. 그리고 분사 제트 개수의 부한 조건을 만족시키기 위하여 마지막 홀과 측면 벽의 간격은 제트 사이 간격의 반($S/2$)으로 하였다. 좌표계는 Fig. 1(b)과 같이 첫 번째 열의 가운데 홀의 중심을 기준으로 유체의 흐름 방향을 횡방향 또는 덕트 유동방향(streamwise)이라 하고 그 축을 x 라 하였다. 그리고 유체의 흐름에 수직한 방향을 폭방향(spanwise)이라 하고 그 축을 y 라 하였다.

나프탈렌 측정면은 300 mm×150 mm의 크기로 제작하였다. 승화된 물질 전달량을 측정하기 위하여 선형가변 차동변환기(LVDT; linear variable differential transformer, Lucas LBB-375TA-020)를 이용하여 실험전후의 나프탈렌 표면 고도를 측정하여 물질전달계수를 계산한다.

2.2 실험결과 처리 방법

물질 전달 계수는 다음과 같이 정의된다.

$$h_m = \frac{\dot{m}}{\rho_{v,w} - \rho_{v,\infty}} = \frac{\rho_s(dy/dr)}{\rho_{v,w}} \quad (1)$$

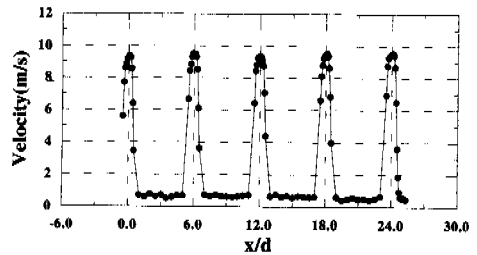
여기서 분사제트 유동은 나프탈렌을 포함하고 있지 않으므로 $\rho_{v,w}=0$ 이다. 그리고 나프탈렌의 승화량(dy), 실험시간(dr), 고체 나프탈렌의 밀도(ρ_s)와 표면에서의 나프탈렌의 증기밀도($\rho_{v,w}$)로부터 물질전달계수를 구할 수 있다. 벽면에서의 나프탈렌의 증기밀도 $\rho_{v,w}$ 는 Ambrose 등⁽³⁾이 제안한 실험식으로부터 얻은 나프탈렌의 포화증기압을 이상기체 방정식에 대입하여 구한다.

Sherwood수는 물질전달계수의 무차원 형태로 다음과 같이 정의된다.

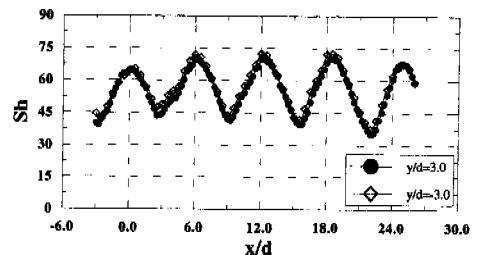
$$Sh = \frac{h_m d}{D_{naph}} \quad (2)$$

D_{naph} 는 Goldstein과 Cho⁽⁴⁾가 제시한 나프탈렌의 물성치에 근거하였다.

폭방향(spanwise)의 평균 Sh는 다음과 같이 구해진다.



(a) Velocity profile at jet nozzle exits



(b) Sh at $H/d=6$ with crossflow

Fig. 2 Velocity and Sherwood number distributions

$$\overline{Sh} = \frac{\left(\int_0^{S/2} Sh \, dy \right)}{S/2} \quad (3)$$

더불어 전체적인 열/물질전달의 효과를 보기 위하여 면적 평균을 다음과 같이 정의하였다.

$$\overline{Sh} = \frac{\int_{x/d=-3}^{x/d=26} \overline{Sh} \, d(x/d)}{29} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)에서 실험을 통하여 얻어진 값들을 수치적분을 통하여 계산하면 폭방향 평균 및 면적 평균값을 구할 수 있다.

위와 같은 계산과정을 통하여 얻어진 물질 전달 계수는 물질전달과 열전달 사이의 유사성에 의하여 열전달 계수로 변환할 수 있는데 상관관계식은 난류 유동의 경우 아래와 같다.

$$\frac{Nu}{Sh} = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{0.4} \quad (5)$$

결과에 대한 오차해석은 Kline과 McClintock⁽⁵⁾이 제시한 방법을 이용하여 수행하였다. 95%의 신뢰도에서 Sh의 상대오차는 7%로 계산되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 국소 열/물질전달계수

Fig. 2는 분사제트의 속도 성분 및 총들면에서 열/물질전달 계수의 폭방향(spanwise)의 대칭성을 확인하기 위하여 예비 실험을 수행한 결과이다. 각 오리피스에서 나오는 자유 제트의 출구속도는 모두가 동일해야 한다. 이를 확인하기 위하여 열선유속계(TSI-IFA300)를 이용하여 속도를 측정하였다. 제트의 중심을 지나도록 분사홀로부터 직경만큼 떨어진 거리에서 열선유속계의 2축 이송장치를 이용하여 $Re=5,000$, $y/d=0$ 에서 x 방향으로 그 속도분포를 측정하였다. 그 결과 Fig. 2(a)에서 보여 주듯이 매우 균일한 속도 분포를 얻을 수 있었다. 그리고 Fig. 2(b)에서 보듯이 물질전달 실험의 Sh 값이 y/d 가 3일 때와 y/d 가 -3일 때의 경향이 거의 일치함을 볼 수 있다. 따라서 실험 장치의 대칭성을 확인할 수 있었다.

H/d 변화에 따른 동Sh 선도를 Fig. 3에서 제시

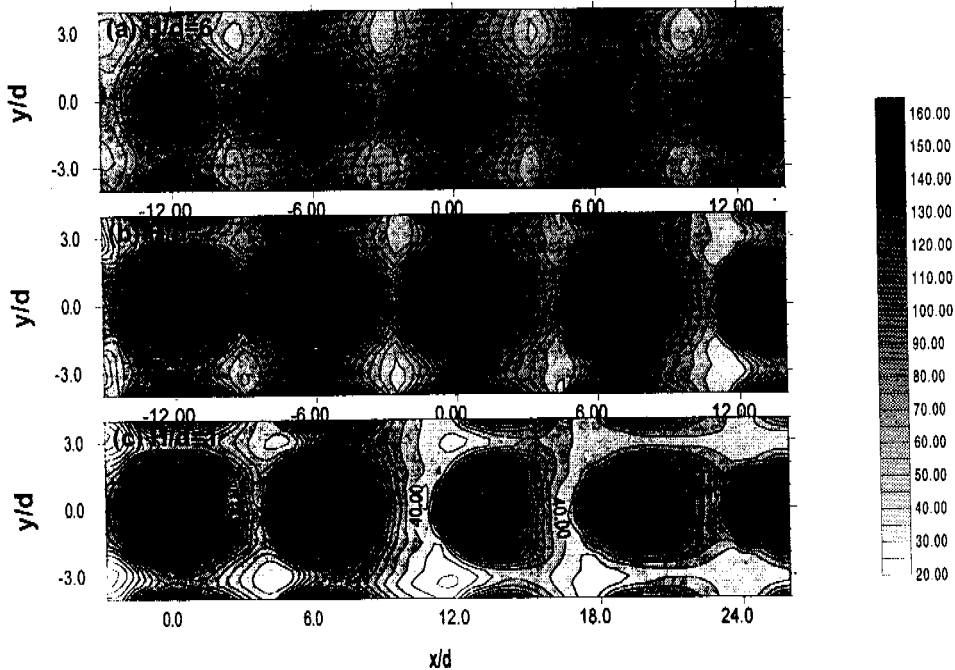


Fig. 3 Contour plots for Sh with various gap distances at $Re=10,000$

하였다. 분사제트 중심 기준 동심원의 축대칭 모양이 많이 변형됨은 그 부분에서의 횡방향유동의 영향이 크다는 것을 의미한다. Fig. 3(a)와 같이 제트 출구와 충돌면의 간격이 큰 경우에는 횡방향유동의 영향이 출구 부분에서만 약간 나타났다. 그러나 작은 간격인 $H/d=1$ 인 경우는 Fig. 3(c)에서 볼 수 있듯이 횡방향 영향이 전체적으로 뚜렷하게 나타났다. 특히 하류에서의 정체점(stagnation point)의 이동 및 횡방향유동에 의한 폭방향 유동의 방해 효과를 볼 수 있다. 이것은 횡방향유동에 의하여 단일 충돌제트가 가지고 있던 열/물질전달 분포 특성이 크게 바뀔 것을 의미한다.

Fig. 4에서는 국소 Sh 분포를 일정한 유속에서 ($Re=10,000$) 높이를 변화시키면서 유동방향을 따라서 나타내었다. Fig. 4(a)에서 $H/d=10$, $y/d=0$ 인 경우, 홀과 홀사이의 중간부분($x/d=3, 9, 15, 21$)에서는 인접제트에서 퍼져 나오는 벽제트 간의 충돌에 의한 상호작용으로 인한 2차와류 형성 및

난류강도의 증가에 기인하여 국소적으로 물질전달계수의 부가극대(additional peak)값이 나타나는 것을 볼 수 있다. 홀과 홀 사이에 나타난 부가극대값 부분의 형태가 하류로 갈수록 횡방향유동의 증가로 인하여 그 형태를 잃어버리고 있다. 횡방향유동의 영향이 있을 경우 횡방향유동과 같은 방향의 벽제트 영역은 그 속도가 증가하게 되고 반대 방향 유동은 속도가 감소하게 된다. 따라서 두 인접제트간의 벽제트 충돌 지점이 하류 쪽으로 이동하게 된다. H/d 가 작을 때 부가극대값 부분의 형태를 잃어버리는 부분이 상류 쪽으로 이동되는 것을 볼 수 있다. 이것은 작은 H/d 간격에서 횡방향유동의 영향이 크다는 것을 보여 준다. 즉 Fig. 4(f)의 H/d 가 0.5인 경우의 분포를 보면 인접제트 충돌에 의한 부가극대값은 거의 미미한 정도로 나타남을 확인할 수 있다.

제트의 중심 축에서의 압력수두가 95%까지 떨어지는 곳까지 제트 출구로부터의 길이를 포텐셜 코어길이(potential core length)라고 하며 일반적으

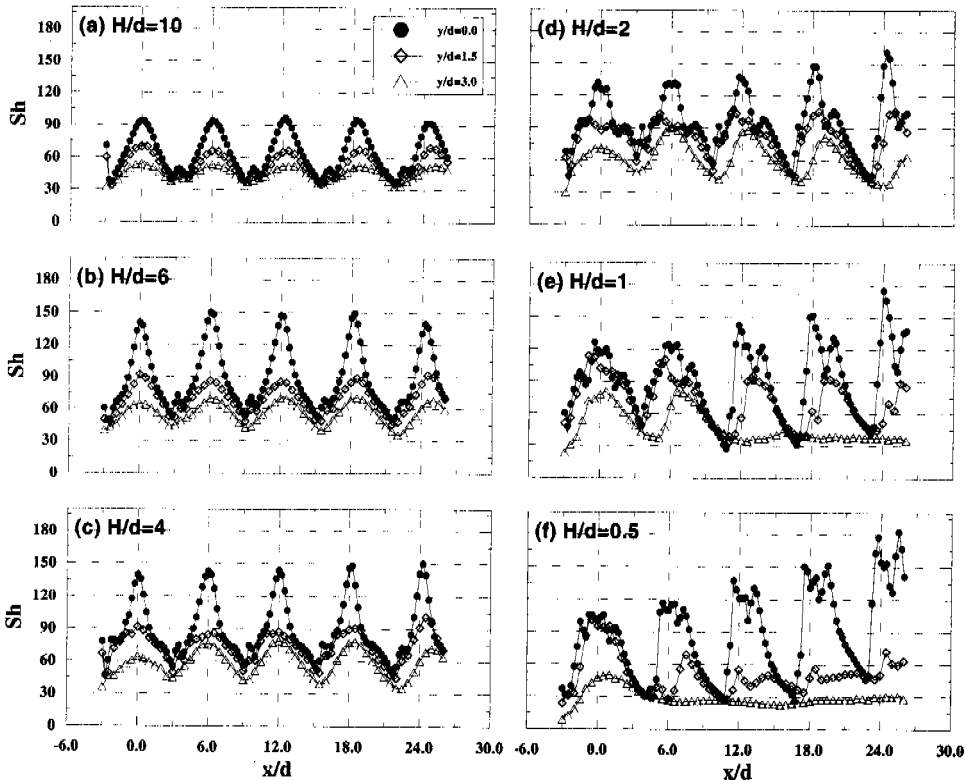


Fig. 4 Local Sh for various gap distances at $Re=10,000$

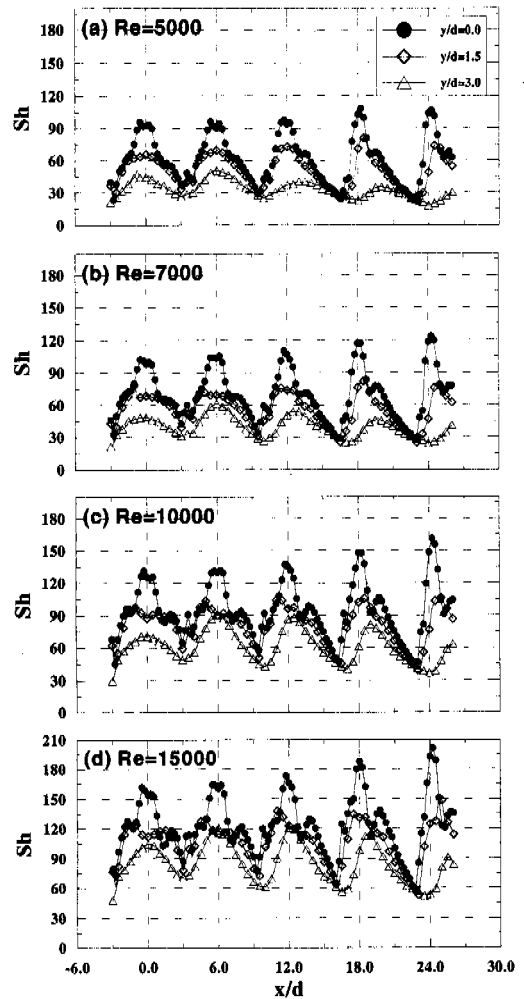
Table 1 Pressure loss at Re=10,000

H/d	Chamber gage pressure(Pa)	Jet plate pressure loss(Pa)	ratio(%)
0.5	626.6	435.2	69.5
1	359.2	125.7	35.0
2	269.9	36.3	13.4
4	258.4	15.1	5.8

로 포텐셜 코어길이는 직경의 4~5배라고 알려져 있다.⁽⁶⁾ 제트 출구와 충돌면 간격이 작은 경우 ($H/d=0.5, 1, 2$)에는, 열/물질전달계수가 제트의 중심 부근에서 상대적으로 낮은 값을 갖는 정체점 유동의 특성이 확연히 드러난다.⁽⁷⁾ 그러나 간격이 점점 넓어지면($H/d=4$ 이상) 점차 정체점 유동의 특성이 없어짐을 확인할 수 있다. 이는 포텐셜 코어길이가 이상에서 제트의 중심부의 난류강도가 충돌전에 증가하여 충돌면에서 열/물질전달을 촉진하기 때문이다.

Fig. 4(c),(d),(e)에서 y/d 가 3일 때 x 방향의 값 변화를 보면 제트 출구와 충돌면의 간격이 작을 때는 극대값이 점차로 증가하다가 감소함을 볼 수 있다. 처음에 증가하는 이유는 유속의 증가로 인한 열/물질전달의 증가로 생각된다. 그 이후 하류로 갈수록 다시 감소하는 것은 횡방향 유동의 온도/농도의 증가로 인하여 열/물질전달의 효과가 감소함을 의미한다. 특히 H/d 의 값이 작은 경우 유동이 하류로 빠져나가는 유로가 좁아서 단위면적 당 유량의 증가로 높은 온도/농도의 영향을 상대적으로 많이 받는다. 그리고 운동량이 큰 횡방향(x 방향)유동의 방해로 인하여 폭방향(y 방향)의 제트간 충돌에 의한 열/물질전달 촉진 효과도 상대적으로 작게 된다. 즉 Fig. 3(c)와 Fig. 4(e)의 $y/d=3, x/d=12$ 에서 보듯이 횡방향유동이 폭방향 유동을 방해하고 제트간의 충돌지점을 하류쪽으로 이동시키며 충돌 효과를 감소시키므로 하류 쪽에서 열/물질 전달이 거의 일정한 완전 발달 덕트유동을 형성한다.

중심 부근에서 제트 출구와 충돌면의 간격이 커지면서 자유 제트의 난류강도 증가⁽⁸⁾에 의한 열/물질전달 증가 효과와 제트의 충돌면 근접 정체영역에서의 속도 감소에 따른 열/물질 전달 감소효과가 상충되게 된다. 일반적으로 단일 제트의 중심에서 최대 열전달계수가 나타나는 경우는

Fig. 5 Local Sh for various jet velocities at $H/d=2$

포텐셜 코어 길이로 H/d 가 4~5정도이다.⁽⁹⁾ Fig. 4에서, $y/d=0$ 일 때 $H/d=4, 6, 10$ 과 같이 간격이 큰 경우는 정체점에서의 열/물질전달계수가 횡방향으로 거의 일정한 분포를 나타낸다. 하지만 간격이 작은 경우, 정체점 부근에서의 열/물질전달계수가 하류로 갈수록 큰 폭으로 증가하게 된다. 이것은 Table 1에 제시된 정압측정실험 결과에서 알 수 있듯이 간격이 작아질수록 분사판 부분의 압력이 증가하기 때문이다. Table 1은 플레넘 챔버의 계기압력과 배출 유체 분사판에서의 압력손실을 보여준다. 분사판과 충돌면 사이에서 횡방향유동에 의한 압력 손실은 Fig. 1

의 분사판 A, B점에서 정압을 측정하여 계산하였다. 챔버에서의 압력은 모든 분사제트에서 동일한 값을 가지지만, $H/d=0.5, 1$ 과 같이 간격이 작은 경우 유류가 좁기 때문에 횡방향으로 진행하면서 압력 손실이 많이 일어나게 된다. 따라서 분사판 상류에서의 압력이 하류보다 높으며, 상류 부분의 분사제트는 상대적으로 낮은 유속을, 하류 부분의 분사제트는 상대적으로 높은 유속을 갖게 된다. 또한 횡방향유동은 운동량이 큰 분사제트의 중심까지 그 영향을 미쳐 중심에서 난류강도가 증가한다. 그러므로 분사판과 충돌면의 사이 간격이 작은 경우, 정체점 부근에서의 열/물질전달 계수는 하류로 진행함에 따라 증가하는 분포를 나타낸다.

Fig. 5는 일정한 높이($H/d=2$)에서 제트 출구의 유속을 변화시키면서 측정한 결과이다. 여기서 볼 수 있듯이 제트 유속의 증가는 열/물질 전달의 증가를 가져온다.^(10,11) y/d 가 0에서 난류로의 천이에 의한 2차 극대점은 Re 의 증가에 따라 명확해지는 것은 단일 충돌 제트의 경우와 유사하다. 또한 두 충돌 제트로부터 형성되는 벽제트가 충돌하는 영역($x/d=3, 9$)에서의 극대값도 분사제트 유속 증가에 따라서 증가한다. 하지만 하류로 진행하면서 횡방향유동에 의하여 소멸됨을 볼 수 있다.

y/d 가 0에서의 물질전달계수의 극대값이 나타나는 지점의 위치는 각 분사 제트의 중심 위치와

거의 일치한다. 그 이유는 어느 정도 간격에서는 제트가 횡방향유동의 방해에도 불구하고 횡방향유동보다는 더 큰 운동량으로 충돌면까지 분사되기 때문이다.⁽¹²⁾ 하지만 정체점에서 극대값은 어느 Re 나 관계없이 하류로 진행하면서 서서히 증가하는 특성을 가진다. 폭방향의 홀 사이의 중간 지점, 즉 $y/d=3$ 의 사이유로에서는 하류로 갈수록 횡방향유동의 영향으로 극대값이 나타나는 지점의 이동이 뚜렷하였으며, 특히 Re 가 작을 경우 그 현상은 더욱 심하였다. 낮은 제트 Re 에서는 벽제트 유동이 충돌 영역에 속하므로 횡방향유동의 영향을 크게 받지만, 높은 Re 에서는 난류벽제트 유동으로 횡방향유동 영향이 작아지기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 6는 $H/d=2, Re=10000$ 에서 폭방향에서의 Sh 의 분포를 보여준다. $x/d=0$ 에서의 값보다 $x/d=12$ 에서의 값이 전반적으로 더 커짐을 볼 수 있는데, 이는 하류로 갈수록 유속의 증가에 기인한 대류 열전달 효과가 증가됨을 의미한다. 그러나 더 하류 쪽인 $x/d=24$ 에서의 값은 유량의 증가로 인한 중심의 이동과 온도/농도의 증가에 기인한 열/물질 경계층의 발달로, 열/물질전달이 $y/d=0$ 부분을 제외한 나머지 부분에서 현저히 감소함을 볼 수 있다.

3.2 평균 열/물질 전달 계수

Fig. 7은 폭방향 평균 물질전달계수를 나타낸

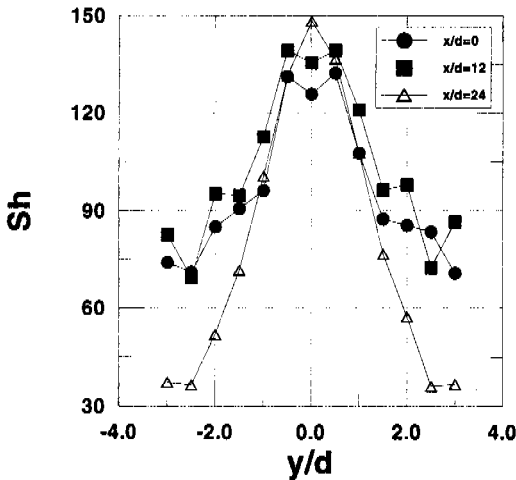


Fig. 6 Sh in the spanwise direction at $H/d=2$ and $Re=10,000$

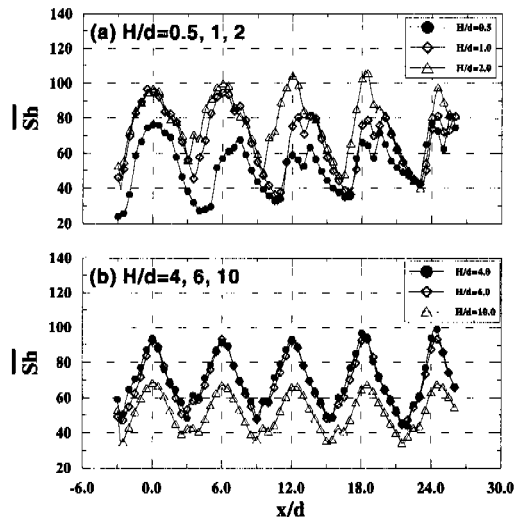


Fig. 7 Spanwise-averaged Sh at $Re=10,000$

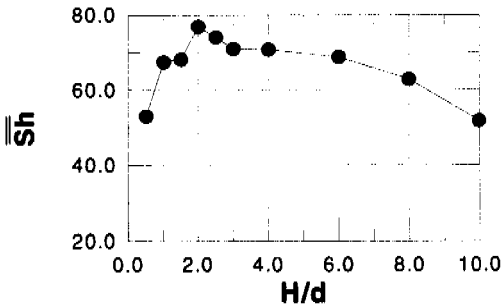


Fig. 8 Overall-averaged Sh at Re=10,000

그림이다. 일정한 제트 출구와 충돌면의 간격 (H/d)에 대하여 x/d 를 따라서 횡방향(y/d)으로 평균한 Sh 값의 분포를 나타낸다. 이 평균값들은 앞의 Fig. 4에서 보인 $y/d=0$ 에서의 최대 값의 약 55~75%정도로 나타났다.

작은 H/d 에서는 Fig. 7(a)에서와 같이 하류로 갈수록 $x/d=0, 6, 12, 18, 24$ 등 극대값이 나타나는 지점의 이동이 드러난다. 간격이 매우 작은 $H/d=0.5$ 에서 보면 전체적으로 값이 다른 경우에 비하여 현저히 작다. 간격이 작은 $H/d=1$ 에서의 값을 보면 두 번째 극대점을 지난 다음부터 급격히 감소함을 볼 수 있다. 이것은 앞의 국소값들의 분석에서 언급한대로 작은 간격에 따른 좁은 유로에서 유동의 온도/농도의 증가에 따라 분사 제트로 재흡입(re-entrainment)되면서 열/물질 전달을 감소시키는 효과가 두드러지기 때문이다. $H/d=2$ 에서는 하류로 진행하면서 극대값은 증가하고 극소값은 감소하는 것을 알 수 있다. 간격이 커서 $H/d \geq 4$ 인 영역에서는 횡방향유동이 충돌면 열/물질 전달에 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있다.⁽¹³⁾

Fig. 8에서는 전체적인 평균 열/물질 전달 효과를 보기 위하여 식(4)를 수치계산을 통하여 구한 값을 간격 변화에 따라서 보여준다. 간격이 직경의 2배일 때 가장 큰 값을 보였다. 이는 높이 (H)가 코어길이보다 작으므로 제트 출구에서 가진 유속이 그리 많이 감소하지 않은 상태에서 횡방향유동에 의한 섭동(난류) 성분의 증가 효과에 의한 것으로 생각된다. H/d 가 1일 때, $y/d=0$ 에서 극대값이 H/d 가 2일 때보다 큼에도 불구하고 평균값이 작다. 그것은 H/d 가 1에서 상대적으로 큰 횡방향유동의 영향으로 $y/d=3$ 에서의 국소값이 급격히 감소하기 때문이다.

간격이 큰 H/d 가 8, 10에서 평균 열/물질 전달

이 크게 작아지는 이유는 발달된 자유제트 영역에서 제트 주유동 속도의 감소에 기인한다.

4. 결론

(1) 인접한 분사제트의 벽제트 충돌로 인하여 두 제트의 중간 부분에서 열/물질전달계수의 극대점이 존재한다. 이러한 충돌 효과는 높은 Re와 작은 간격에서 뚜렷이 나타난다.

(2) 횡방향유동의 영향은 간격이 작은 경우 폭방향 평균 열/물질 전달 계수의 극대값의 위치 및 크기를 변화시킨다. 하지만 간격이 커서 $H/d \geq 4$ 인 경우 횡방향유동 영향은 미미하여 그 효과를 무시할 수 있다.

(3) Re=10,000에서 면적 평균 열/물질전달계수는 제트 포텐셜코어길이 보다 작은 $H/d=2$ 에서 최대 값을 가지며 H/d 가 증가함에 따라서 감소한다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Koopman, R. N. and Sparrow, E. M., 1975, "Local and Average Transfer Coefficients due to an Impinging Row of Jets," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 8, pp. 1261~1272.
- (2) Behbahani, A. I. and Goldstein, R. J., 1983, "Local Heat Transfer to Staggered Arrays of Impinging Circular Air Jets," *J. of Engineering for Power*, Vol. 105, pp. 354~360.
- (3) Ambrose, D., Lawrenson, I. J. and Sparke, C. H. S., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene," *J. Chem. Thermodynamics*, Vol. 7, pp. 1173~1176.
- (4) Goldstein, R. J. and Cho, H. H., 1995, "A Review of Mass Transfer Measurement Using Naphthalene Sublimation," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 10, pp. 416~434.
- (5) Kline, S. J. and McClintock, F., 1953,

- "Describing Uncertainty in Single Sample Experiments," *Mech Engineering*, Vol. 75, pp.3~8.
- (6) Martin, H., 1977, "Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces," *Adv. Heat and Mass Transfer*, Vol. 13, pp. 1~60.
- (7) Gardon, R. and Akfirat, J. C., 1966, "Heat Transfer Characteristics of Impinging Two-Dimensional Air Jets," *J. Heat Transfer*, pp. 101~108.
- (8) 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.
- (9) Behbahani, A. I., 1979, "Heat Transfer to Staggered Arrays of Impinging Circular Air Jets," Ph.D. Thesis, University of Minnesota..
- (10) Huber, A. M. and Viskanta, R., 1994, "Effect of Jet-Jet Spacing on Convective Heat Transfer to Confined Impinging Arrays of Axisymmetric Air Jets," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, No. 18, pp. 2859~2869.
- (11) Obot, N. T. and Trabold, T. A., 1987, "Impingement Heat Transfer Within Arrays of Circular Jets: Part 1-Effects of Minimum, Intermediate, and Complete Crossflow for Small and Large Spacings," *J. Heat Transfer*, Vol. 109, pp. 872~879.
- (12) Metzger, D. E. and Korstad, R. J., 1972, "Effects of Crossflow on Impingement Heat Transfer," *J. Engineering for Power*, pp. 35~42.
- (13) Hollworth, B. R. and Berry R. D., 1978, "Heat Transfer From Arrays of Impinging Jets with Large Jet-to-Jet Spacing," *J. Heat transfer*, Vol. 100, pp. 352~357.