

유출홀을 사용한 배열충돌제트의 열/물질전달 특성

윤필현* · 황상동* · 조형희**

Heat/mass transfer characteristics of arrays of impingement jets using effusion holes

P. H. Yoon*, S. D. Hwang* and H. H. Cho**

Key Words : Heat/Mass Transfer(열/물질전달), Array Jet(배열제트), Impingement(충돌), Effusion hole(유출홀), Crossflow(횡방향유동)

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. Spent fluid makes a crossflow in the confined space. The crossflow reduces heat/mass transfer at the small gap distance between the jet plate and impingement surface because of reentrainment of the spent fluid. The present study suggests a new exhaust system having effusion holes in the impinging jet plate. The spent air flow out after impingement just through effusion holes located in the upper plate. This system increases heat/mass transfer coefficients and uniformity for small gap distances($H/d \leq 2$).

기호설명

d : 제트 오리피스 직경
 dy : 나프탈렌 승화 깊이
 dt : 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
 \overline{Sh} : 국소 Sherwood 수, 식 (2)
 \overline{Sh} : 폭방향 평균 Sherwood 수, 식 (3)

\overline{Sh} : 전체 평균 Sherwood 수, 식 (4)
 x : 배출 유체 유동 방향 좌표, Fig. 1(b)
 y : 폭방향 좌표, Fig. 1(b)
 z : 충돌면으로부터의 높이
 ρ_s : 고체 나프탈렌 밀도
 $\rho_{s,w}$: 표면에서 나프탈렌 증기 밀도
 $\rho_{s,\infty}$: 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. 단일충돌제트(single impinging jet)를 사용하는 것보다는 여러 개의 제트들을 동시에(배열충돌제트) 사용하는 경우 넓은 영역에서 균일하게 열/물질전달을 시킬 수 있다. 배열 충돌

* 연세대학교 대학원

** 연세대학교 기계공학과

제트(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.

배열 충돌 제트는 단일충돌제트에 비해 몇 가지 기본적인 차이점이 있다. 배열 충돌 제트의 각각의 제트들은 두 가지 형태의 상호작용의 영향을 받게 된다.[1] 첫째는 제트가 충돌면(impinging surface)에 부딪히기 전에 일어나는 인접 제트간의 상호작용이다. 그런 상호작용은 인접제트간의 간격이 작을 때와 제트 출구와 충돌면의 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.

배열 충돌 제트의 경우 분사 제트가 면에 충돌한 후 유체가 배출구가 없기 때문에 횡방향(분사 제트에 수직방향)으로 이동하면서 덕트유동을 형성한다. 이 덕트유동은 하류로 진행하며 점점 증가된다. 윤필현 등[2]에 의하면, 이것은 충돌면 제트 중심부에서 유동의 난류 강도를 점점 증

가시켜 높은 열전달계수를 가진다. 반면 충돌면 사이유로(제트와 제트의 중간 부분)에서는 급격한 열경계층의 발달로 인하여 점점 작아지는 열전달계수를 갖는다. 따라서 전체 충돌면에서 불균일한 냉각 효과를 나타내게 되며 이것은 고온의 강판 또는 터빈 블레이드에서 심각한 열응력 문제를 야기한다.

본 연구에서는 횡방향유동이 충돌면의 냉각 성능에 미치는 좋지 않은 영향을 개선하기 위하여 유출홀 배출방식이라는 새로운 기술을 제안한다. Fig. 1(a)는 횡방향유동이 있는 일반적인 배열충돌제트 이용의 개략도이고 Fig. 1(b)는 유출홀을 이용한 배출 방식의 배열충돌제트의 개략도이다.

본 연구에서는 바람직하지 않은 방향의 전도와 복사 문제를 배제할 수 있고 국소값 측정에 잇점이 있는 나프탈렌승화법을 이용하였다. 또한 열전달 특성을 잘 이해하기 위해서는 유동장 해석이 필수적이다. 그러나 제트를 여러개 사용하는 배열충돌제트 형상적 요인으로 인하여 유속측정을 위한 실험 장치 구성이 어렵다. 따라서 유동 해석은 실험과 똑같은 형상조건에서 상용 프로그램인 FLUENT를 이용하였다.

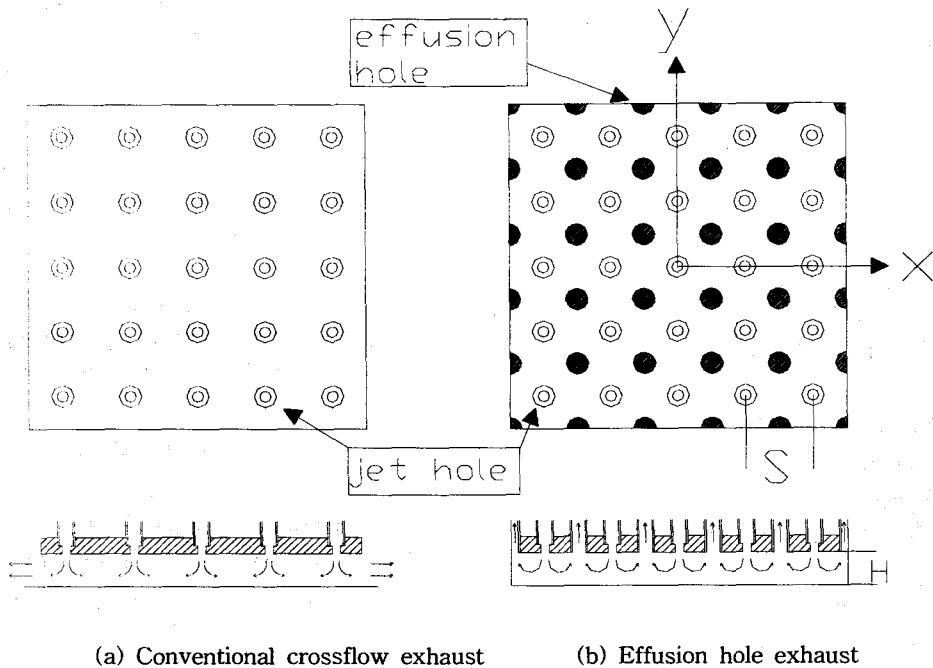


Fig. 1 Difference of exhaust between crossflow and effusion hole method.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

주유동은 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 여러개의 제트에 유량을 고르게 공급하기 위하여 다공판(baffle)과 하니콤(honey comb)을 설치하였으며 온도측정을 위하여 두 개의 T형 열전대(thermocouple)를 부착하였다. 플레넘을 통한 유동은 동등한 압력손실을 주기 위하여 길이가 같은 내압튜브를 통하여 분산하였다. 이 유동은 외경 18 mm, 내경 14 mm의 아크릴 pipe를 통하여 각각의 제트를 형성한다. 오리피스 분사관의 분사제트 직경은 10 mm이다.

제트가 분사되는 오리피스 관은 25개의 제트 분사홀을 가지고 있다. 분사홀 사이의 간격은 제트 홀 직경의 6배($S=6d$)로 하였다. 그리고 제트 개수의 무한 조건을 만족시키기 위하여 마지막 홀과 측면 벽의 간격은 제트 사이 간격의 반($S/2$)으로 하였다. 가운데 홀의 중심을 기준으로 가로 방향을 횡방향 또는 덕트 유동방향(streamwise)이라 하고 그 축을 x 라 한다. 그리고 수직인 방향을 폭방향(spanwise)이라 하고 그 축을 y 라 한다.

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

2.2 실험결과 처리방법

물질 전달 계수는 다음과 같이 정의된다.

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

여기서 분사제트 유동은 나프탈렌을 포함하고 있

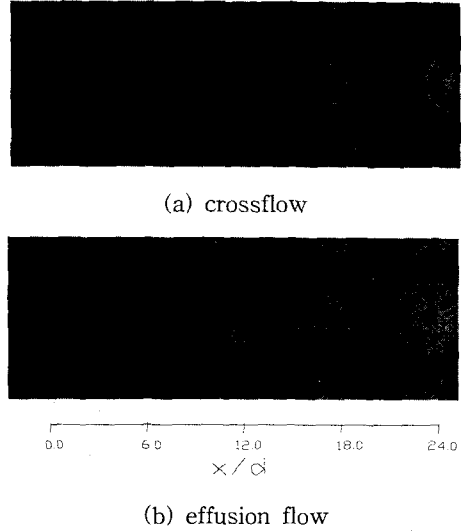


Fig. 2 Visualization by oil and lampblack method at $Re=7,000$.

지 않으므로 $\rho_{v,w}=0$ 이다. 그리고 나프탈렌의 승화량(dy), 실험시간($d\tau$), 고체 나프탈렌의 밀도(ρ_s)와 표면에서의 나프탈렌 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 무차원형태로 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 Sh 는 다음과 같이 구해진다.

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

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

$$\overline{\overline{Sh}} = \frac{\int_{x/d=-15}^{x/d=14} \overline{Sh} d(x/d)}{29} \quad (4)$$

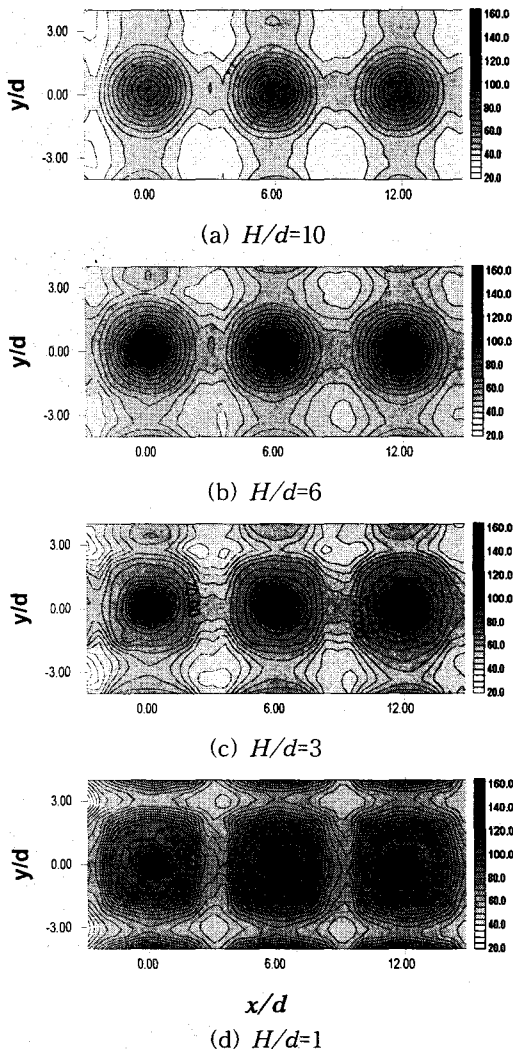


Fig. 3 Contour plots for Sh with various gap distance at $Re=10,000$.

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 물질전달 계수는 물질전달과 열전달 사이의 유사성에 의하여 열전달계수로 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

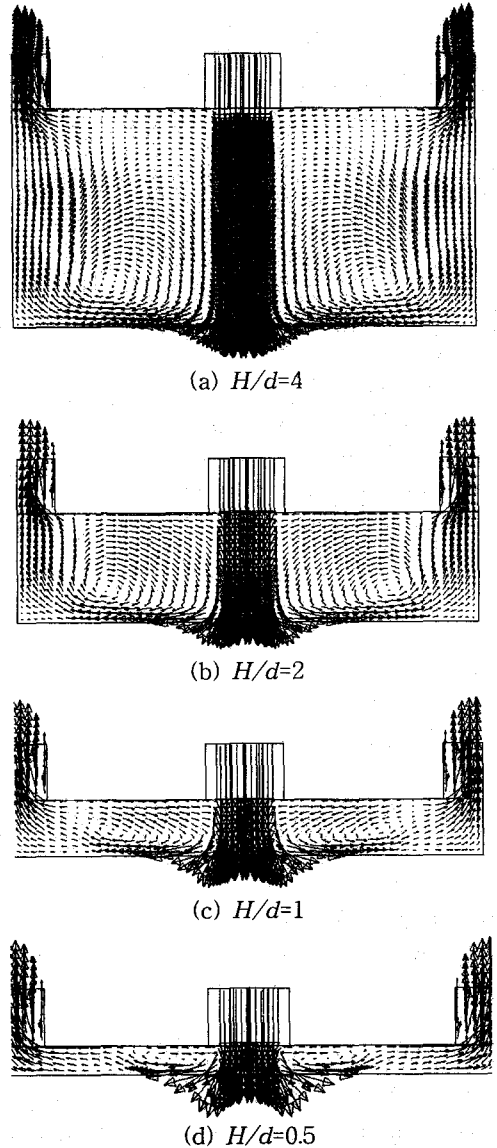


Fig. 4 Vector plots for velocity components with various gap distance at $Re=10,000$.

신뢰도에서 Sh 의 상대오차는 약 6.1%로 계산되었다.

2.3 수치해석 조건

제트 분사판과 충돌면 사이에서의 유동장을 해석하기 위하여 상용 프로그램인 FLUENT를 이용하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 필요한 유입공기의 속도 및 온도등을 실험조건과

동일하게 하였다. 격자는 $31 \times 186 \times 38$ 로 격자수 변화에 따른 효과를 제거하였으며, 난류 모델은 Reynolds stress model을 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 국소 열/물질전달계수

유출홀 배열충돌제트는 Fig. 1(b)에서 보듯이 제트 분사판에 유출홀을 만들었다. 이것은 배출 방식의 변화를 주어 횡방향유동에 의한 열/물질 전달의 불균일한 분포 및 감소효과를 개선하기 위한 방법이다.

Fig. 2는 탄소유막법을 이용한 가시화 사진이다. Fig. 2(a)에서 횡방향유동이 있는 경우에 하류방향으로 제트가 편향되는 것이 명확히 관찰되

었다. 하지만, Fig. 2(b)와 같이 분사판에 유출홀을 가진 경우 매우 고른 분포를 얻을 수 있었다.

Fig. 3은 등Sh선도이다. 분사제트에 의한 열/물질전달계수가 높은 부분이 제트 중심을 기준으로 동심원 모양의 등Sh선도를 형성한다. 높은 충돌면-분사판 간격에서는 Fig. 3(a), (b)에서와 같이 비교적 반듯한 원의 형태를 보인다. 그러나 Fig. 3(d)와 같이 간격이 좁은 경우에는 원이라기 보다는 오히려 정사각형에 가까운 모양을 만든다. 이것은 분사제트간들의 대각선 중심에 유출홀의 존재로 인하여 생긴 결과이다.

Fig. 4는 수치해석을 수행한 속도 벡터로 유출홀과 분사홀을 연결한 단면에서의 그림이다. Fig. 4(a), (b)의 $H/d=4$, 2에서는 그림에서 보듯이 사용 유체(spent air)의 분사제트로의 재흡입

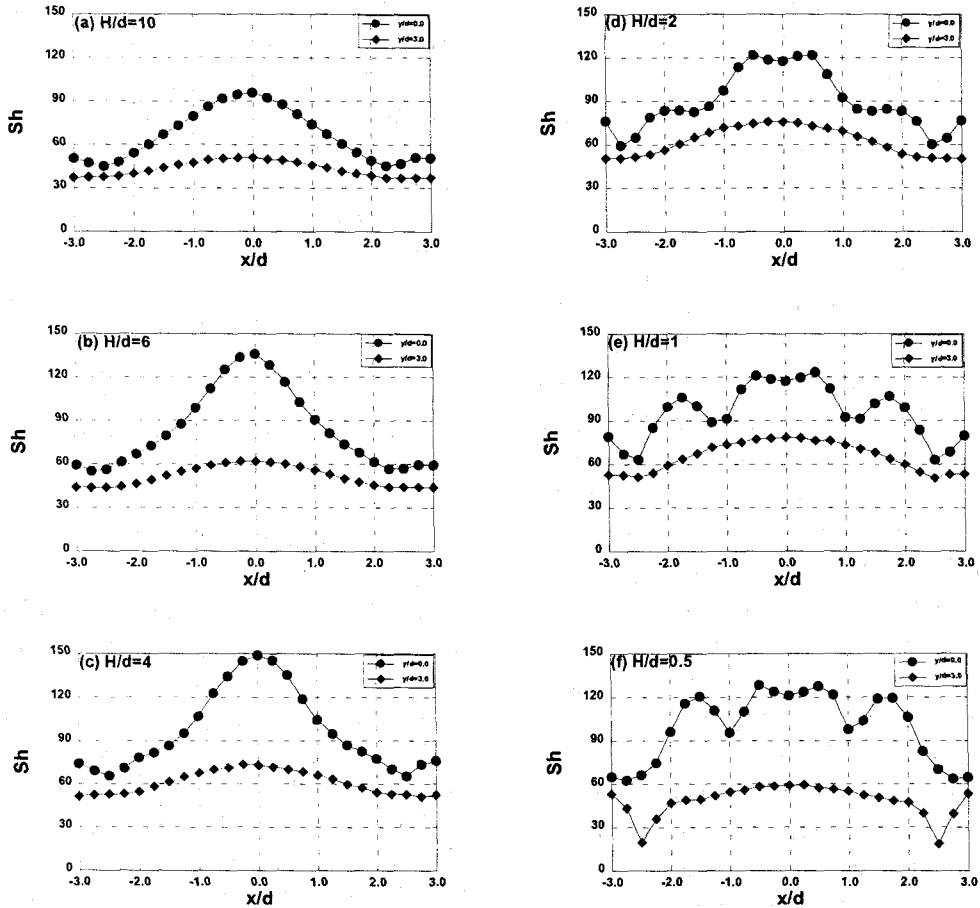


Fig. 5 Local Sh for various gap distances at $Re=10,000$.

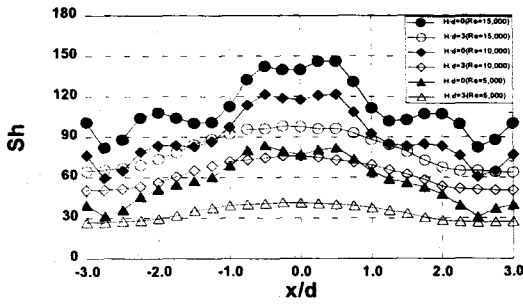


Fig. 6 Local Sh for various Reynolds numbers at $H/d=2$.

(re-entrainment) 현상이 뚜렷이 나타난다. 이 재흡입 유동은 순환(circulation)영역을 형성하며 이 순환 유동의 크기는 간격에 따라 변하게 된다. Fig. 4(c)의 $H/d=1$ 에서는 재흡입이 좁아진 간격으로 인하여 많이 줄어든 것을 확인할 수 있으며, Fig. 4(d)의 $H/d=0.5$ 에서는 분사제트 부근에서 약간의 재흡입이 일어날 뿐 전체적으로는 거의 덕트 유동에 가까운 유동장을 형성한다. Fig 3(d)의 열/물질전달계수가 높은 부분이 전체적으로 유출홀 부근으로 가까이 폭 넓게 나타나는 것도 이러한 이유 때문으로 생각된다.

Fig. 5는 일정한 제트 유속에서 간격 변화에 따른 국소 Sh를 나타낸다. $y/d=0$ 은 제트 중심을 지나는 일직선을 의미한다. 분사출구와 충돌면 간격(H/d)이 좁아질수록, $x/d=0$ 의 제트 중심에서의 값이 주위값보다 작은 정체점[6] 특성과 $x/d=1.5\sim 2.0$ 에서 난류로의 천이에 의하여 열/물질전달계수 값이 높아지는 2차 극대값이 뚜렷이 나타난다. 제트 중심에서의 값은 제트포텐셜코어길이[7,8] 정도의 $H/d=4\sim 5$ 에서 가장 큰 값을 보였으며 이는 분사제트 초기에 나타난 전단층에 의한 와류의 생성 및 발달이 제트 포텐셜코어가 끝나는 지점에서 중심 부근까지 영향을 미쳐 난류강도가 증가하기 때문이다.[9,10]

Fig. 5에서 $y/d=3$ 으로 두 분사제트의 중앙위치(midway)이며, 이 때의 값들을 H/d 의 변화에 대하여 비교해 보면 간격이 작아짐에 따라서 전체적으로 Sh값이 증가함을 알 수 있다. 그러나 분사판과 충돌면의 간격이 매우 작은 $H/d=0.5$ 에서는 오히려 $H/d=1$ 에서 보다 작아진다. 이것은

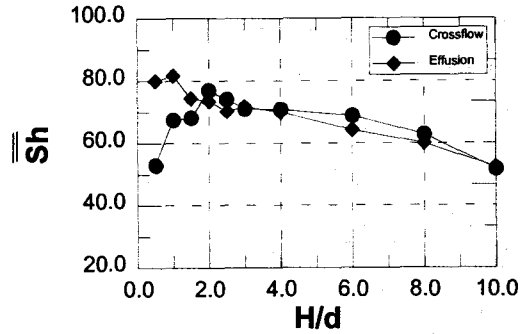


Fig. 7 Overall average Sh at $Re=10,000$.

아주 작은 간격에서 벽제트영역의 상호작용 즉 충돌(collision)에 의한 열/물질전달 상승효과는 거의 나타나지 않기 때문이다. 반면 $H/d=1\sim 4$ 에서는 벽제트 충돌에 의한 열/물질전달 상승효과가 뚜렷하며 $H/d=6$ 이상에서는 운동량 감소에 의하여 점점 작아진다.

Fig. 5의 $H/d=0.5$ 에서 $y/d=3.0$, $x/d=\pm 2.5$ 부근의 매우 낮은 Sh값을 볼 수 있다. 이것은 분사판과 충돌면의 간격이 매우 작은 경우 유출홀 부근에서 매우 낮은 열/물질전달계수를 나타내는 영역이 존재함을 보여준다.

Fig. 6은 $H/d=2$ 에서 유속의 변화에 따른 Sh 변화를 나타낸다. 전체적인 Sh의 분포형상은 유사하지만 $Re=15,000$ 에서와 같이 유속이 빨라지면 분사제트 주위에 생성되는 와류강도의 증가에 따라 벽면에서 형성되는 2차 와류의 강도 증가에 의해 $x/d\cong 2.0$ 에서 2차 극대값이 더욱 뚜렷이 나타남을 알 수 있다.

3.2 평균 열/물질전달계수

Fig. 7은 간격변화에 따른 전체 평균 열/물질전달계수 분포를 나타내고 있다. 횡방향유동이 있는 경우[2]는 H/d 가 감소함에 따라 서서히 증가하다가 $H/d=2$ 에서 최대값을 가진 후 급격히 감소한다. 이는 낮은 간격에서는 분사제트가 면에 충돌한 후 공간제약으로 사용유체가 빠른 횡방향 유동을 형성하여 하류에서 분사제트에 큰 영향을 주기 때문인 것으로 사료된다. 하지만 유출홀이 있는 경우 분사제트가 면에 충돌 후 바로 유출되어 사용유체가 분사제트로 재흡입되는 효과가 없어지게 된다. 하지만 분사제트판과 충돌면사이의 간격이 큰 경우 횡방향유동이 약하기 때문에

유출홀의 존재에 관계없이 유사한 평균 열/물질 전달계수값을 갖는다. $H/d \leq 2.0$ 일 때 유출홀이 있는 경우 간격이 감소함에 따라서 평균값이 계속증가하여 $H/d=1$ 일 때 최대값을 갖는다. $H/d=0.5$ 에서 평균값이 약간 감소하는데, 이는 아주 낮은 간격에서는 유출홀주위에 형성되는 낮은 열/물질전달 계수에 기인한다.

유출홀이 존재할 때 $H/d \leq 2$ 영역에서 유출홀이 없어 횡방향 유동이 형성되는 경우보다 높은 열/물질전달과 균일한 분포를 얻을 수 있었다.

4. 결론

배열충돌제트에서 유출홀이 존재할 때 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유출홀이 있는 경우, 충돌제트가 바로 배출됨으로써 열/물질전달계수 분포가 횡방향 배출 방식에 비하여 매우 고르게 나타났다.

(2) 유출홀이 있는 경우, 분사판과 충돌면사이의 간격이 큰 경우는 차이가 없지만 간격이 작은 경우($H/d \leq 2$) 높은 열/물질전달 계수를 얻을 수 있었다.

(3) 횡방향유동이 있는 경우는 $H/d=2$ 에서 최대 평균 열/물질전달계수값을 갖지만, 유출홀이 있는 경우 전체 평균 열/물질전달계수는 $H/d=1$ 에서 최대 값을 가진다.

후기

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) 윤필현, 이동호, 조형희, 2000, "배열충돌제트에서 횡방향유동 성분에 따른 열/물질전달 특성 고찰", 대한기계학회논문집(B), 제24권, 제2호, pp. 195~203.

(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) Gardon, R. and Akfirat, J. C., 1966, "Heat Transfer Characteristics of Impinging Two-Dimensional Air Jets," *J. Heat Transfer*, pp. 101~108.

(7) Martin, H., 1977, "Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces," *Adv. Heat and Mass Transfer*, Vol. 13, pp. 1~60.

(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) 이창호, 김영석, 조형희, 1998, "원형제트 출구 전단류 조절에 따른 제트충돌면에서의 열전달 특성(1)-균일속도분포제트," 대한기계학회 논문집(B), 제22권, 제3호, pp. 386~398.

(10) Cho, H. H., Lee, C. H. and Kim, Y. S., 1998, "Characteristics of heat transfer in impinging jets by controls of vortex pairing," *International Gas Turbine and Aeroenging Congress and Exposition*, 98-GT-276.

(11) Hwang, S. D, Lee, C. H. and Cho, H. H., 2000, "Heat transfer and Flow Structures in Axisymmetric Impinging Jets Controlled by Vortex Pairing." *3rd Int. Symp. on Turbulence, Heat and Mass Transfer*, Nagoya, Japan.