

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
 Journal of the Korean Solar Energy Society
 Vol. 23, No. 4, 2003

충돌분류시스템의 열전달 특성에 관한 수치적 연구

금성민*, 김동춘**

*한라대학교 기계공학부(smikum@hit.halla.ac.kr)

**경문대학교 컴퓨터정보기계과(dckim@kmc.ac.kr)

Numerical Study on Heat Transfer Characteristics in Impinging Air Jet System

Kum, Sung Min*/ Kim, Dong Choon**

*Dept. of Mechanical Eng., Halla University(smikum@hit.halla.ac.kr)

**Dept. of Mechanical Eng., Kyungmoon College(dckim@kmc.ac.kr)

Abstract

Heat transfer characteristics for an air jet vertically impinging on a flat plate with a set of hybrid rods was investigated numerically using the RNG $k-\epsilon$ turbulent model. A commercial finite-volume code FLUENT is used. The rods had cross sections of half circular and rectangular shapes. The heating surface was heated with a constant heat flux value of 1020 W/m^2 . Parameters investigated were the jet Reynolds number, nozzle-to-plate spacing, the rod pitch and rod-to-plate clearance. The local and average Nusselt number were found to be dependent on the rod pitch and the clearance because installing rods disturbed the flow. Higher convective heat transfer rate occurred in the whole plate as well as in the wall jet region.

Keywords : 충돌공기분류(Impinging air jet), 하이브리드 로드(Hybrid rod), 벽면분류영역(Wall jet region)

기 호 설 명

A	: 전열면적(m^2)	S	: Modulus of the mean rate-of-strain tensor
B	: 노즐 출구폭(mm)	X	: Lateral distance(mm)
C	: 평판과 하이브리드 로드사이 간극(mm)	N_u	: Nusselt 수
H	: 노즐과 평판사이 간격(mm)	P_r	: Prandtl 수
P	: 하이브리드 로드 피치(mm)	R_e	: Reynolds 수

- ϵ : 난류에너지 소산율
- λ : 열전도계수[W/mK]
- ρ : 공기밀도[kg/m³]
- ν : 동점성계수[m²/s]
- ψ : 독립변수

하 첨 자

- eff : Effective
- f : Flat plate without hybrid rod
- hr : Flat plate with hybrid rod

1. 서 론

충돌분류는 충돌지역에서 높은 열전달 및 물질전달을 얻을 수 있는 장점 때문에 제품의 가공, 생산 공정 및 산업 기기에서 요구되는 표면의 냉각, 가열 및 건조 등에 널리 사용되고 있다.

충돌분류의 열전달특성을 지배하는 인자로서는 분류의 R_e 수, 노즐과 충돌면사이의 거리, 노즐의 기하학적 형상, 분류출구의 난류 및 속도 분포 특성 등이 있다. 충돌분류는 정체영역에서는 높은 열전달 성능을 갖는 반면에 정체점 이후의 영역에서는 상대적으로 낮아지는데 이것은 노즐과 충돌면사이의 거리에 주로 지배를 받는 와류의 영향으로 알려져 있다.

충돌분류에 의한 열전달증진에 관한 연구는 유동 특성상 대부분이 실험적 연구이며 수치해석에 의한 연구결과는 극히 제한적이다. 실험적 연구로서는 벽면분류영역의 열전달성능을 향상시키기 위해 충돌판 앞에 메쉬, 다공판 및 사각이나 원형의 로드를 설치하는 방법¹⁾ 등이 있으며 이 방법들은 열전달증진 효과가 있었다.

수치해석에 의한 연구로서 Seydeine 등²⁾은 충돌분류에 대하여 5가지의 난류모델을 R_e 및 노즐과 충돌면사이의 거리를 변화시켜가며 적용하여 실험치와 비교하였다. Morris 등³⁾은 RNG $k-\epsilon$

난류모델을 제한된 액체충돌분류에 대하여 수치해석을 행한 결과 충돌영역에서 정확한 예측이 가능하다는 것을 검증하였다.

본 연구에서는 열전달 증진을 위하여 충돌판 앞에 hybrid rod(이하 로드라고 함)를 설치하고 로드의 피치, 로드와 전열면간의 간극을 변화시키면서 이때의 열전달 특성을 FLUENT를 이용하여 수치해석 하였다.

그림. 1은 충돌분류의 유동장과 로드의 위치를 나타낸 것이다.

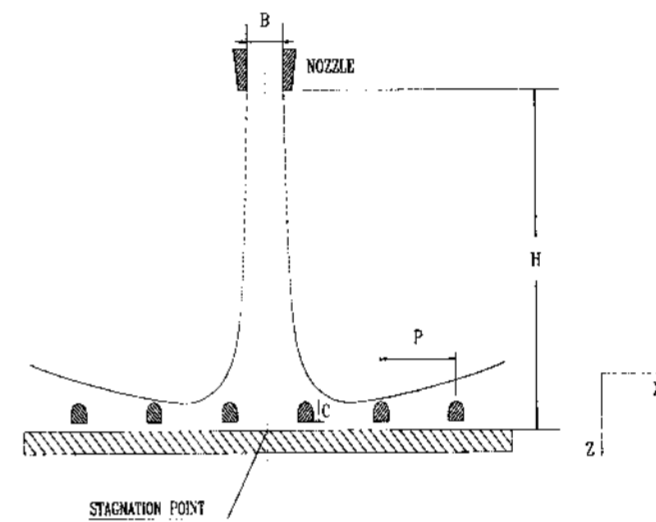


그림. 1 Impinging flat plate-hybrid rods array system (top view)

2. 이 론

2-1. 기본 방정식

유동 및 열전달현상을 해석하기 위하여 다음과 같이 가정하였다.

- ① 2차원 축대칭 비압축성 정상유동이다.
- ② 복사 열전달 및 중력의 영향은 무시한다.
- ③ 유동방향의 체적력(body force)은 무시한다.
- ④ 충돌판 주변의 열손실은 없다고 가정한다.

이에 따른 지배방정식은 다음과 같다.

(1) 연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

(2) 운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x_j} \dots\dots\dots (2)$$

(3) 에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \mu_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{Dp}{Dt} + (\tau_{ik})_{\text{eff}} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \dots\dots\dots (3)$$

(4) RNG $k-\epsilon$ 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \mu_t S^2 - \rho \epsilon \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \mu_t S^2 - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R \dots\dots\dots (5)$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_{\text{mol}} \left[1 + \sqrt{\frac{C_\mu}{\mu_{\text{mol}}} \frac{k}{\epsilon}} \right]^2$$

$$h = \sum_i m_i h_i, \quad h_i = \int_{T_{\text{ref}}}^T C_{p,i} dT$$

$$\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_{\text{mol}} - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_{\text{mol}} + 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu_{\text{mol}}}{\mu_{\text{eff}}}$$

$$\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu_{\text{mol}}}{\mu_{\text{eff}}}$$

$$\alpha_{\text{mol}} \equiv 1 / \text{Pr} = k / \mu c_p, \quad \alpha_0 = 1$$

$$S \equiv \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\epsilon^2}{k}$$

$$\eta \equiv Sk / \epsilon, \quad \eta_0 \approx 4.38, \quad \beta = 0.012$$

$$C_\mu = 0.0845, \quad C_{1\epsilon} = 1.42, \quad C_{2\epsilon} = 1.68$$

2-2. 경계 조건

기본 방정식에 적용할 경계 조건은 다음과 같다.

(1) 유입부 경계 조건(노즐 출구 조건)

$$u = 0, \quad v = U, \quad T = T_\infty,$$

$$k = \frac{3}{2} (u_i I)^2, \quad \epsilon = C_\mu^{0.75} \frac{k^{1.5}}{l} \dots\dots\dots (6)$$

(2) 충돌판 경계 조건

$$u = v = k = \epsilon = 0,$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0, \quad q = q_w \dots\dots\dots (7)$$

(3) 유출부 경계 조건

$$P = P_\infty \dots\dots\dots (8)$$

위에서 난류강도 I는 동일 조건의 실험값⁴⁾을 적용하였으며, l은 노즐출구폭 B를 적용하였다.

2-3. 해석 과정

그림. 2는 경계조건과 로드의 형상 및 격자구조를 나타낸 것이다. 유한 차분 방정식을 풀기 위하여 SIMPLEC (SIMPLE-Consistent) Algorithm을 적용하였는데 이것은 복잡한 형상의 모델이나 난류의 경우에 SIMPLE에 비해 수렴성과 안정성

이 뛰어난 것으로 알려져 있다⁵⁾.

또한 해의 안정성을 위해 하향이완계수(under relaxation factor)를 속도에 대하여 0.7, 온도는 0.9, k 와 ϵ 에 대하여는 0.8을 적용하였다. 해석에는 FLUENT를 이용하였다.

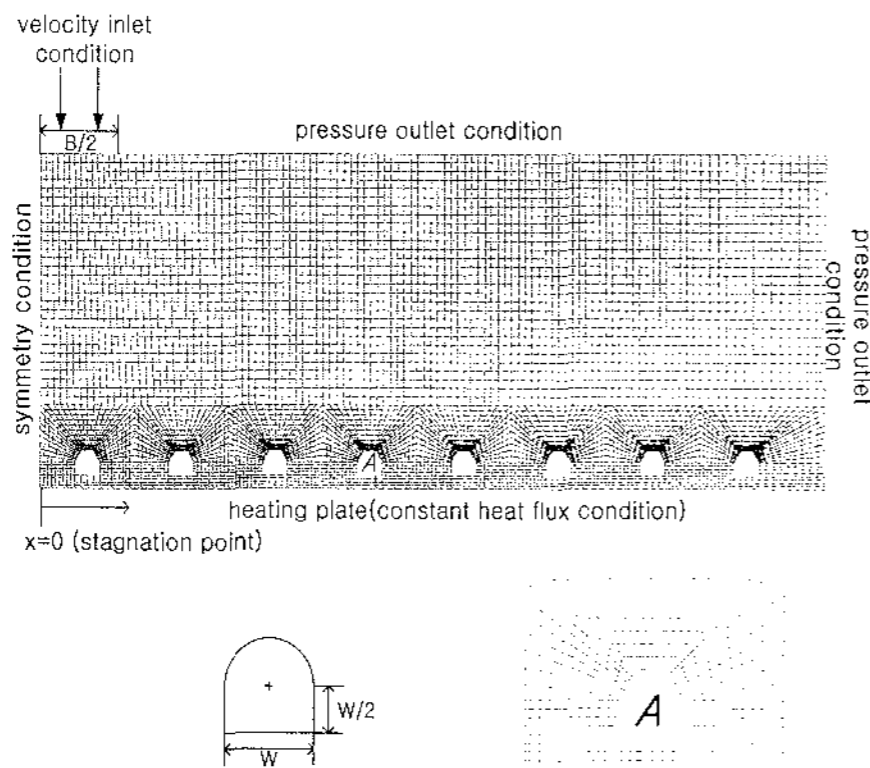


그림 2. Physical configurations and computational domain.

3. 해석결과

국부 열전달계수(h), 국부 Nu 및 국부평균 Nu 는 다음과 같이 계산하였다.

$$h = q / [T_w - T_b(x)] \dots\dots\dots (9)$$

여기서 T_w 는 가열면의 온도, $T_b(x)$ 는 bulk temperature이다.

$$Nu = h \cdot B / \lambda \dots\dots\dots (10)$$

$$\overline{Nu} = \int_{-x}^x Nu \cdot dx / \int_{-x}^x dx \dots\dots\dots (11)$$

3.1. 전열면에 충돌하는 2차원 분류에서의 열전달 특성

그림 3은 H/B 와 Re 변화에 따른 정체점에서의

Nu 분포를 나타낸 것이다. 정체점에서의 Nu 는 Re 가 증가할수록 H/B 에 따라 큰 폭으로 변하며 포텐셜 코어(potential core)영역($H/B < 2$) 이후부터 증가하기 시작하여 $H/B=10$ 에서 최대가 된 후 $H/B > 10$ 영역에서는 다시 감소하는 경향을 나타낸다.

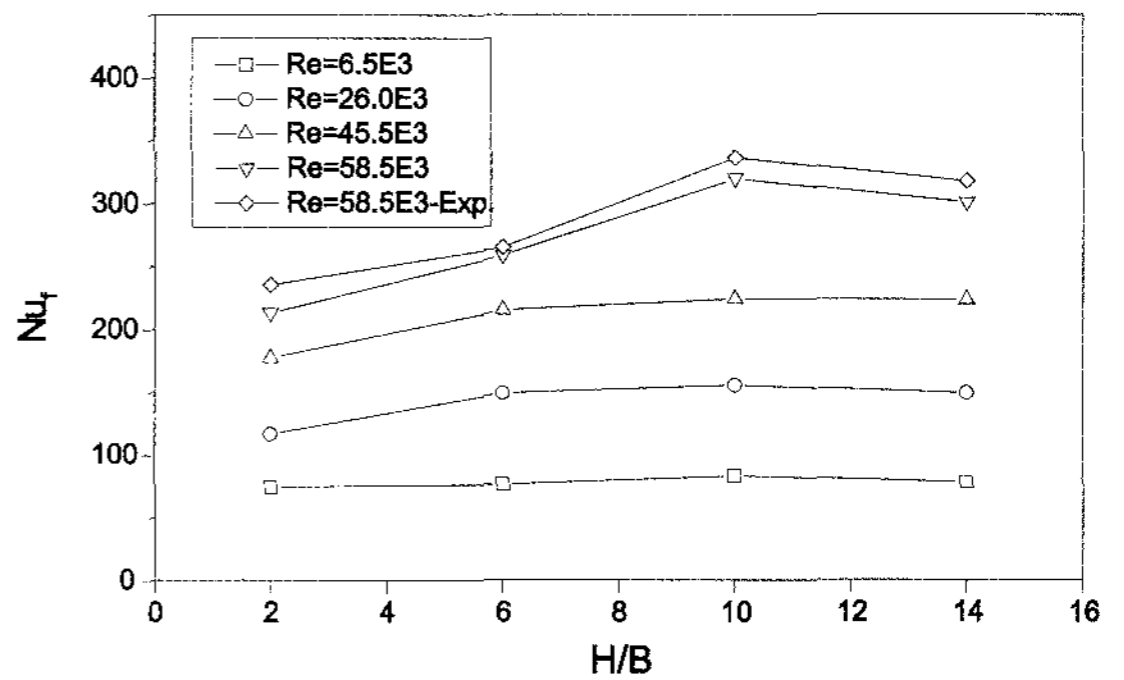


그림 3. Dependence of Nu on H/B and Re on stagnation Nusselt Number

정체점에서의 Nu 가 $H/B=10$ 에서 최대가 되는 것은 주위 유체와 이루어진 혼합작용이 분류중심에 서까지 이루어져 유체유속의 요동(fluctuation)이 커져 이 영역에서 난류강도가 최대가 되기 때문이다.

또한 $H/B > 10$ 에서 Nu 의 감소원인은 난류강도가 감소하기 때문이며 이러한 결과는 Gardon⁶⁾ 등의 연구 결과에서도 동일하게 나타나고 있다. $Re = 58.5 \times 10^3$ 인 경우에 수치해석 결과와 실험결과를 비교하였을 때 수치해석이 최대 약 10%의 오차를 보이나 정성적으로 충돌영역에서 그 경향이 일치함을 알 수 있다.

그림 4는 $Re = 58.5 \times 10^3$ 에 대해 H/B 의 변화에 따른 전열면면의 국부 Nu 를 정체점으로부터 X방향의 변화에 따른 분포를 나타낸 것이다.

$H/B=2$ 에서 국부 Nu 의 분포가 가장 낮게 나타나는데 이것은 충돌판이 노즐출구에서의 작은 난류강도를 거의 그대로 유지하는 포텐셜코어 영역이기 때문이다. 포텐셜코어 영역 이외의 영역에서는 충돌판 앞에서 counter rotating vortex pairs가

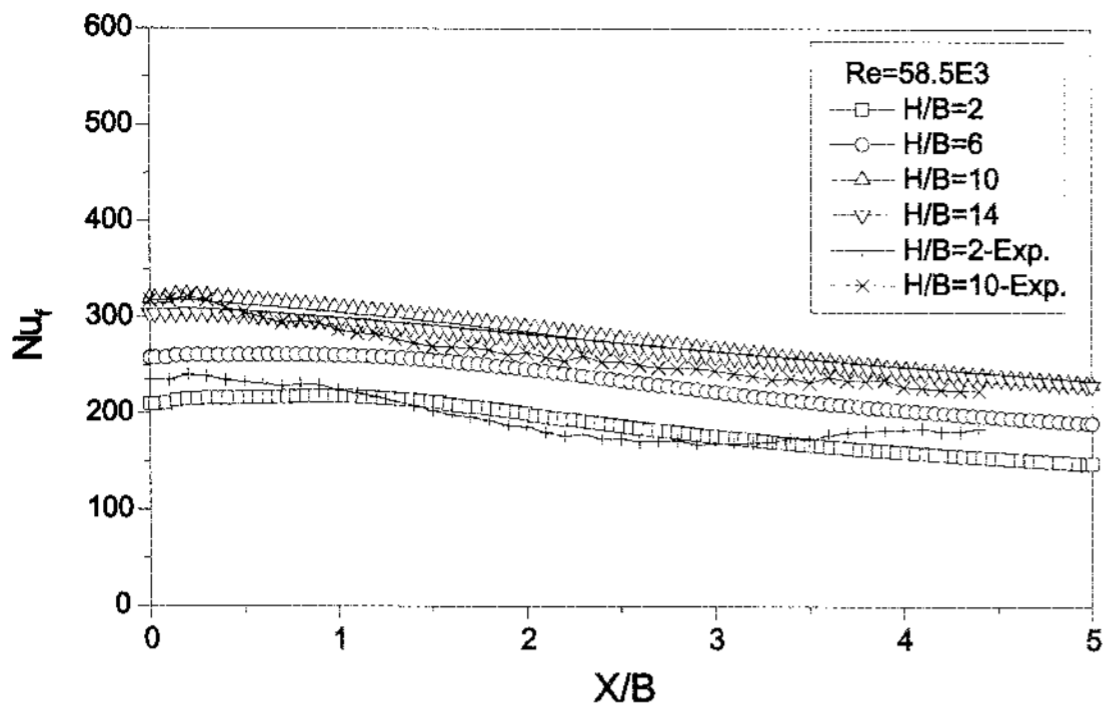


그림 4. Lateral distributions of local Nusselt number for different H/B(Re=58.5E3)

형성되어 물질 및 열전달 효과를 증가시키기 때문에 H/B=2보다 분포는 높게 나타난다. H/B변화와 관계없이 X/B=1이후부터 Nu_r 가 점차 감소하고 있기 때문에 X/B≤1 영역이 정체영역(stagnation region)이라고 할 수 있으며, Ashforth-Frost 등⁷⁾은 이 영역에서 유동방향의 속도 기울기가 매우 작게 나타나기 때문에 정체영역으로 정의하고 있다. 분류가 정체영역을 벗어나 벽면분류영역으로 이동하면서 열전달 성능이 낮아지고 있는데 이것은 분류가 벽면분류영역으로 진행할수록 유속이 감소되고 경계층이 성장하기 때문이며 기존의⁴⁾ 실험과도 잘 일치하고 있다.

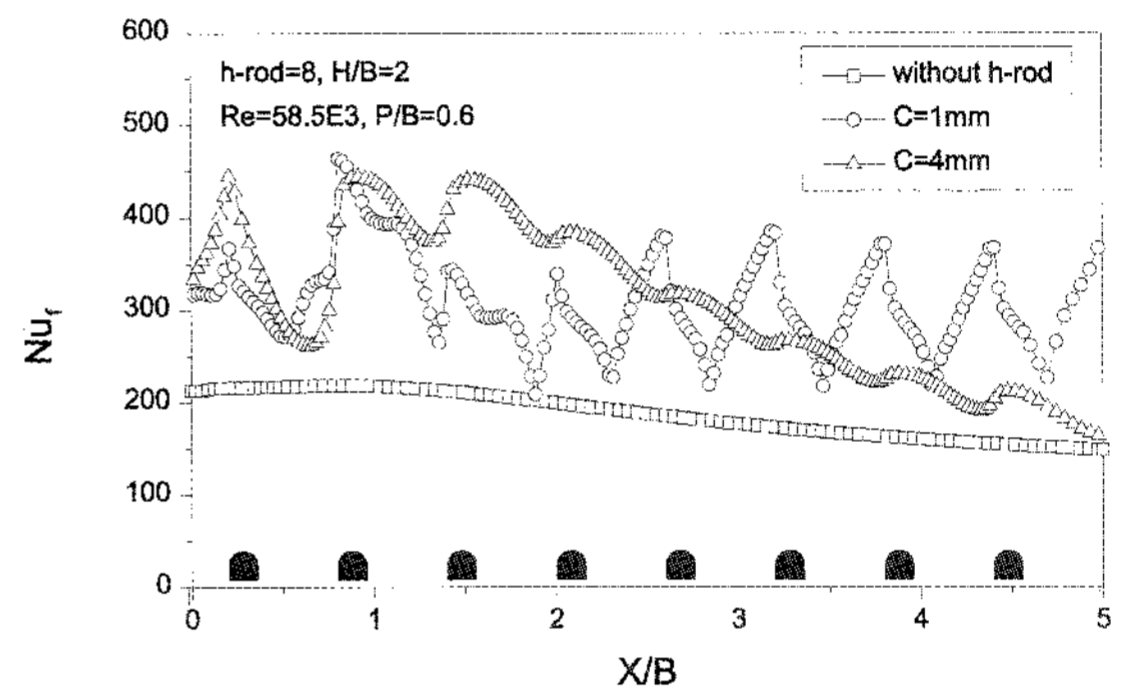
3.2. 하이브리드ROD군(群) 설치가 열전달 특성에 미치는 영향

그림 5는 H/B=2와 10에서 로드와 로드사이의 피치가 30mm(P/B=0.6)일 때 로드와 전열면사이의 간극(C) 변화에 대한 Nu_r 분포를 나타낸 것으로 로드가 없는 경우와 비교하면 전체적으로 높게 나타남을 알 수 있다.

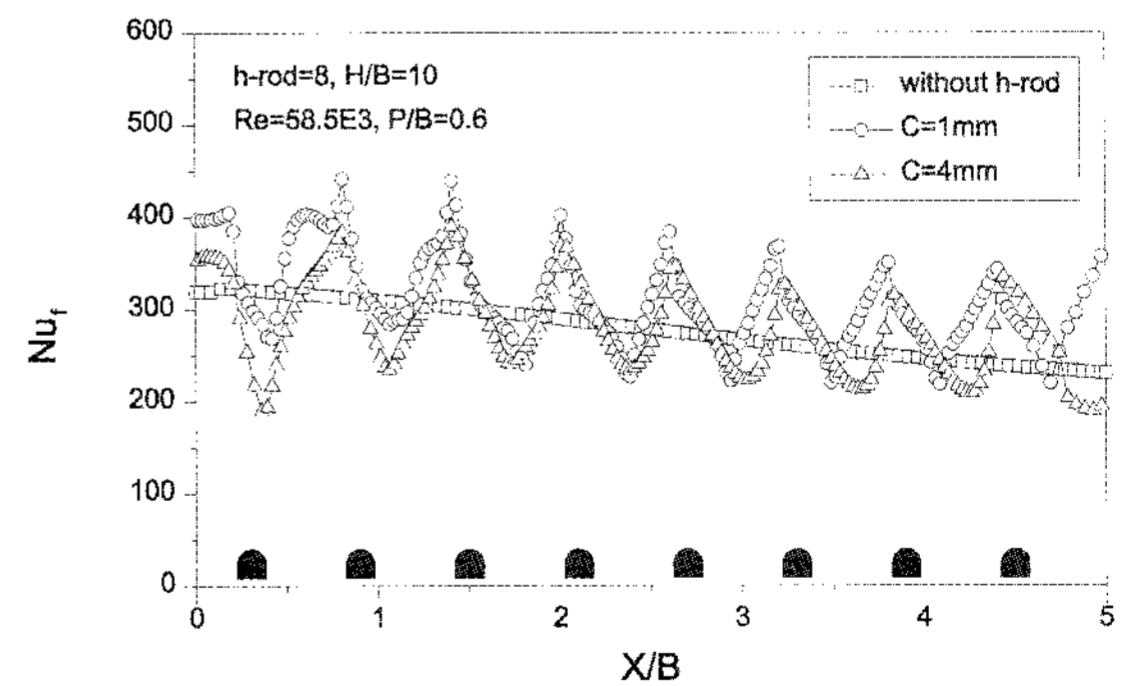
C변화와 관계없이 Nu_r 는 X방향으로 진행하면서 공통적으로 로드와 로드사이에서 감소하다 점차 증가하며, 로드 측면에서 피크를 나타낸 후 다시 감소와 증가를 반복하는 현상을 나타낸다.

로드와 로드 사이에서 Nu_r 가 감소하는 것은 분류

가 로드 밑을 나오면서 전열면에서 박리하기 때문이며 다시 증가하는 현상은 로드 위쪽에서 오는 분류가 로드 밑을 빠져나오는 분류를 누르면서 다시 전열면을 흐르도록 유도하기 때문이다. 특히 로드 측면에서 Nu_r 가 피크를 나타내는 것은 분류가 로드 측면에 충돌하면서 와류가 발생하기 때문으로 생각된다. H/B 및 C변화와 관계없이 X방향으로 진행할수록 Nu_r 는 점차적으로 낮아지는데 이것은 분류의 확산과 로드에 의한 저항으로 운동량이 감소하기 때문이다.



(a) H/B=2



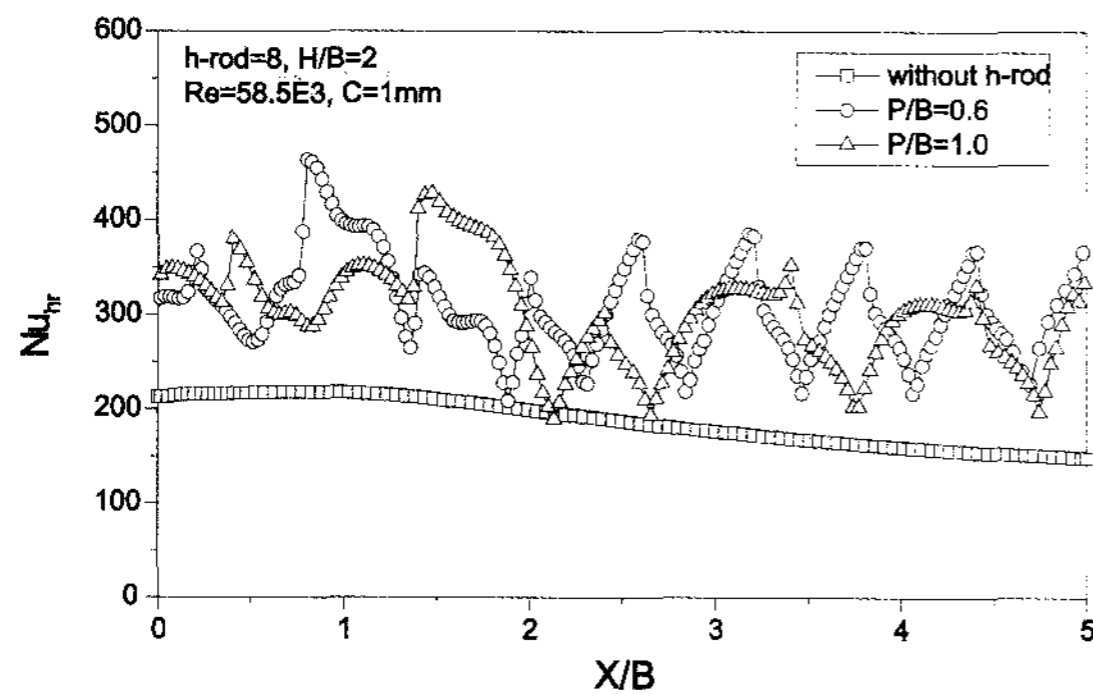
(b) H/B=10

그림 5 Lateral distributions of local Nusselt number as variation of clearances

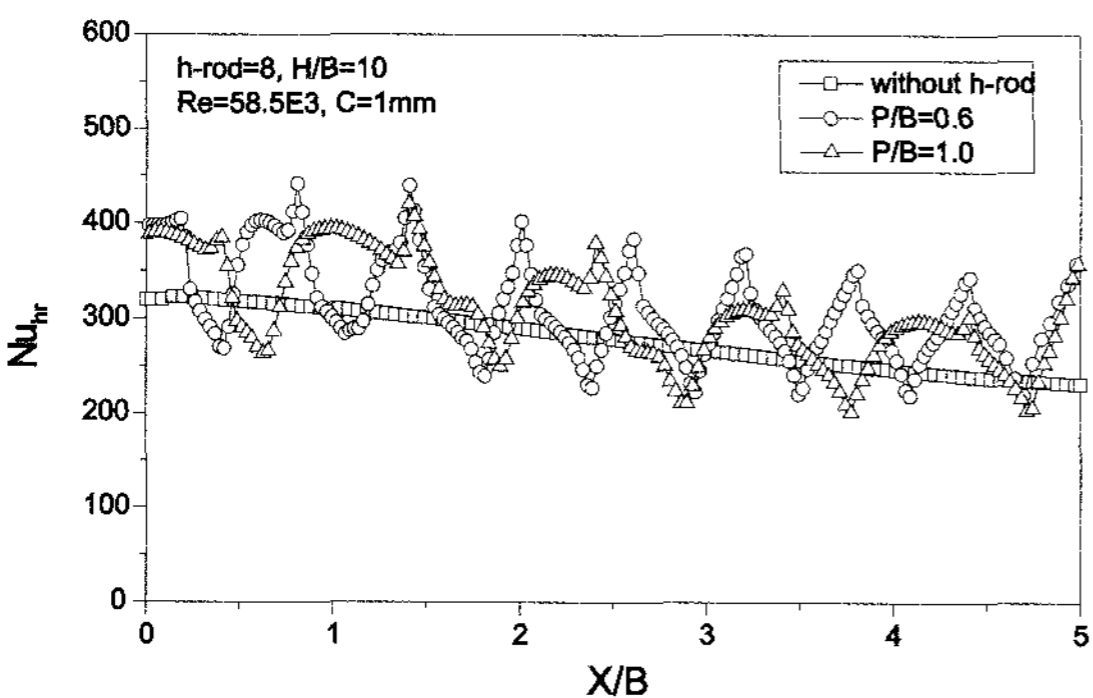
C변화에 대한 영향을 살펴보면 (a)에서 X/B<2.5까지는 C=1mm인 경우가 C=4mm인 경우보다 Nu_r 가 낮게 나타난다. 이것은 분류가 전열면에 충돌하면

서 $C=1\text{mm}$ 인 경우가 $C=4\text{mm}$ 인 경우에 비해 C 가 작기 때문에 벽면분류로의 흐름이 원활하지 않기 때문이며 (b)에서는 이러한 현상은 나타나지 않는다.

(b)의 $H/B=10$ 에서 로드와 로드사이의 N_u 는 로드가 없는 평판보다 오히려 낮게 나타나는데 이것은 분류의 박리와 로드에 의한 저항이 포텐셜코어영역 $H/B=2$ 보다 크게 작용하기 때문으로 생각된다.



(a) $H/B=2$

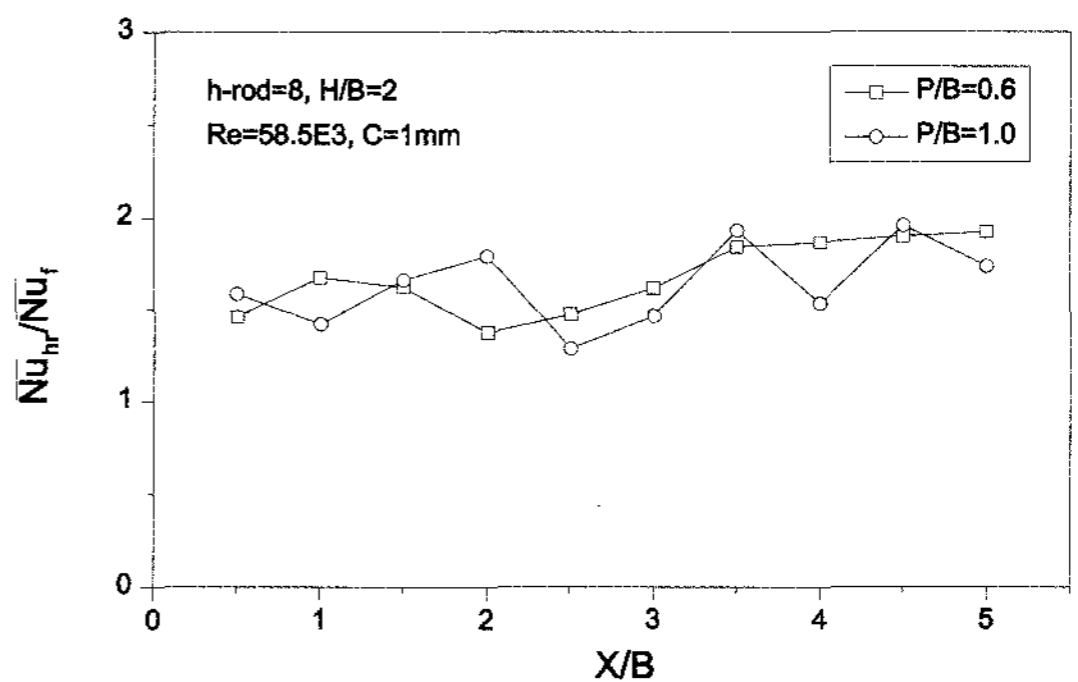


(b) $H/B=10$

그림. 6 Lateral distributions of local Nusselt number as variation of P/B

C 변화에 대한 영향은 $H/B=2$ 에서처럼 $C=1\text{mm}$ 일 때가 4mm 일때보다 열전달성능이 좋게 나타난다.

그림. 6은 $C=1\text{mm}$ 일 때 P/B 변화에 대한 N_u 분포를 나타낸 것으로 P/B 가 1.0(로드와 로드사이의 피치가 50mm)으로 변해도 N_u 는 X 방향으로 진행하면서 로드와 로드사이에서 감소하다 점차 증가하며, 로드 측면에서 피크를 나타낸 후 다시 감소와 증가를 반복하는 경향은 $P/B=0.6$ 일때와 유사하다. $P/B=1.0$ 일 때 N_u 의 피크점을 살펴보면 $P/B=0.6$ 의 경우와 같이 로드측면에서 일어난다. 그러나 피크의 절대값을 비교하면 $P/B=0.6$ 의 경우가 1.0보다 크다. 열전달 성능면에서 비교하면 로드의 개수가 많을수록 피크점이 많이 나타나기 때문에 전체적인 열전달 성능은 $P/B=0.6$ 이 1.0보다 높다. 그리고 (b)의 $H/B=10$ 에서 $P/B=1.0$ 인 경우에도 0.6과 동일하게 로드와 로드사이의 N_u 는 로드가 없는 평판보다 오히려 낮게 나타난다. 특히 그림. 5(b)와 그림. 6(b)에서 로드와 로드사이에서 Nu 는 로드가 없는 평판보다 낮게 나타나는데 이것은 천이영역이기 때문에 $H/B=2$ 보다는 속도감소가 많이 생기고 또한 속도가 많이 떨어진 상태에서 로드측면의 저항 때문으로 생각된다.



(a) $H/B=2$

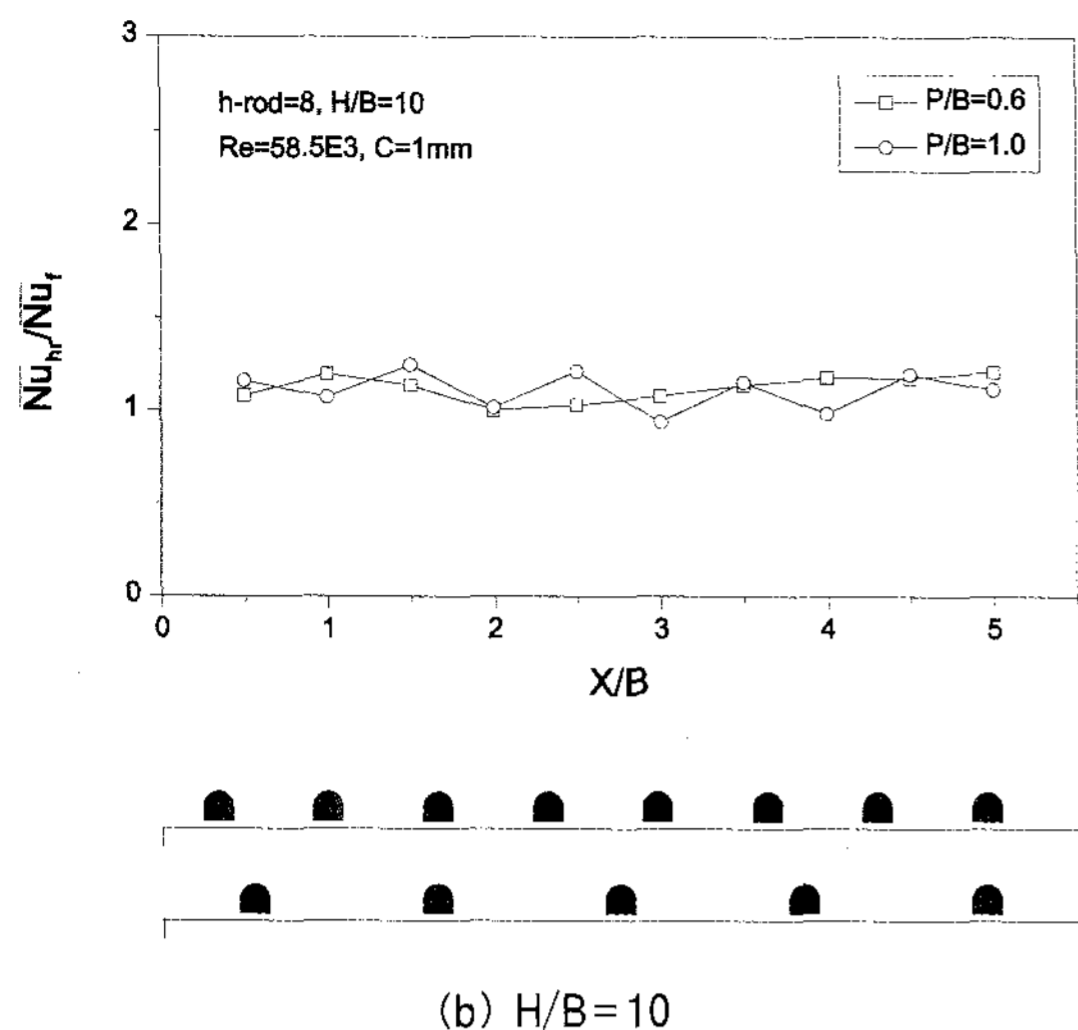


그림. 7 Effect of P/B on local average Nusselt number

그림. 7은 H/B=2, 10에서 C=1mm일 때 P/B의 변화에 따른 국부평균 Nu_r 를 나타낸 것이다. (a)의 H/B=2에서는 전체적으로 높은 증가율을 보이고 있으며 P/B=0.6인 경우에 평균 약 1.72배, P/B=1.0인 경우에는 1.65배의 열전달 증진율을 나타내고 있다. (b)의 H/B=10인 경우에는 H/B=2에 비해 상대적으로 낮은 편이며 P/B=0.6인 경우에 평균 약 1.19배, P/B=1.0인 경우에는 약 1.1배의 열전달 증진율을 나타내고 있다.

4. 결 론

- 1) 로드를 설치하지 않은 평판의 경우에는 정체점 이후 Nu_r 가 계속적으로 감소하지만 hybrid rod가 설치됨으로써 유동의 가속, 재부착, 경계층의 교란 등에 의해 정체점보다 높은 Nu_r 분포를 얻을수 있다.
- 2) 수치해석 조건 중 H/B=2, P/B=0.6, C=1mm인 조건에서 열전달성능이 가장 높게 나타났으며

동일 조건의 로드가 없는 경우보다 평균 약 1.72배의 열전달 증진효과가 나타났다.

- 3) 모든 조건에서 전체적으로 Nu_r 의 증가는 로드직전의 와류에 의한 영향이 지배적임을 알 수 있으며 P/B와 C가 작을수록 높은 열전달성능을 얻을수 있다.

참 고 문 헌

1. 임태수, 금성민, 이창언, 2차원 충돌분류계에서 사다리형 로드 배열에 의한 열전달 촉진 효과, 대한기계학회논문집, 2001, B권, 제25권, 11호, pp. 1659-1666.
2. Seyedein, S. H. and Hasan, M. Modelling of a Single Confined Turbulent Slot Jet Impingement using Various $k-\epsilon$ turbulence models, Applied Mathematical Modelling, 1994, Vol. 18, pp. 526-537.
3. Kleinig, A. R. and Middleberg, A. P. J. Numerical and Experimental Study of a Homogenizer Impinging Jet, AIChE Journal, 1997, Vol. 43, pp. 1100-1107.
4. 이용화, 2차원 충돌분류계에서 열전달증진에 관한 연구, 1989, 인하대학교 박사학위논문
5. Fluent, FLUENT User's Guide, Vols. 1-4, Release 4.4, Fluent, Inc.
6. Gardon, R., et al., Heat Transfer Characteristics of Impinging Two-Dimensional Air Jets, J. of Heat Transfer, 1966, Vol. 88, pp.101-108.
7. Ashforth-frost, et al., Velocity and Turbulence Characteristics of a Semi- Confined Orthogonally Impinging Slot Jet, 10th Symposium on Turbulence Shear Flows, 1995, Vol. 1, pp.10-1~10-6.