



2차원 채널에서 사각봉을 이용한 난류열전달 증가에 대한 수치해석

김 희 영¹, 박 태 선^{*2}

AUGMENTATION OF TURBULENT HEAT TRANSFER IN A CHANNEL USING A SQUARE ROD

Hee Young Kim¹ and Tae Seon Park^{*2}

The characteristics of heat transfer in a two-dimensional channel obstructed by a square rod is investigated by a turbulence model. The computation is made for the six cases of different rod positions between channel walls. To analyze the wall heat transfer, the heat flux of channel walls is set as a constant value and the $k-\epsilon-f_w$ model is employed. Downstream the square rod, the flow recirculation region appear and they are varied by the rod position. The enhancement of the turbulent heat transfer to the wall is induced by the flow instability using a square rod. The averaged heat transfer rate is maximized at a specific rod position. Finally, the effects of square rod on unsteady flows are scrutinized with the frequency analysis.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 비정상유동(Unsteady Flow), 난류모델(Turbulent model), 사각봉(Square rod), 채널유동(Channel -flow)

1. 서 론

열전달 증가현상은 에너지 비용을 절약할 수 있기 때문에 많은 연구자들에게 관심의 대상이 되어 왔던 연구주제이다. 공학시스템에서 응용되고 있는 상당수의 열전달 기기들은 채널형상에 열전달이 존재하는 문제로 단순화가 가능하다. 그러므로 이러한 형상조건에서 열전달 증가방법에 대한 연구는 학문적인 관심뿐만 아니라 공학응용 측면에서도 매우 중요하다고 할 수 있다. 형상조건의 변화로 열전달을 증가시키는 방법 중 사각봉을 이용한 여러 가지 연구가 진행 되었다.

AISUSHI OKAJIMA[1]는 직사각형 사각봉의 가로, 세로의 비율과 레이놀즈수(Reynolds number, Re)에 따라 변화하는 무차원 주파수 (Strouhal number, St)를 관찰하는 실험을 수행하였다. 사각봉의 가로, 세로비가 1, 즉 정사각봉인 경우에는 Re에 관계없이 비교적 일정한 St를 관찰 할 수 있었다. 사각봉의 가로, 세로비가 2, 3, 4인 직사각봉의 경우 특정 Re에서는 정사각봉보다 높은 St가 관찰 되었지만, Re에 따라 그 변화가

심하였다. 따라서 본 연구에서 사각봉의 위치에 따른 열전달 변화를 살펴보기 위하여 난류영역에서 St의 변화가 적은 정사각봉을 선택하였다. 변화 요인이 적은 조건을 선택함으로써 결과분석을 좀 더 명확하게 할 수 있을 것으로 기대된다. 기존에 진행된 연구들을 살펴보면 Hiroshi Suzuki[2]는 층류유동에서 사각봉의 크기와 Re의 변화에 따라 나타나는 와류가 십자로 교차하는 운동에 대하여 실험적으로 관찰하였다. 2차원 채널 내부의 유동특성은 사각봉의 크기에 따라서 달라지는데 본 연구에서는 기존 연구를 토대로 벽면에 가장 많은 영향을 줄 수 있는 사각봉의 크기를 선택하였다. M.yao and M.Nakatani[3]는 $k-\epsilon$ 형태의 난류모델을 사용하여 사각봉의 크기와 Re를 고정 시키고 사각봉의 위치를 변화시켜 와류에 의한 유동변화를 조사하였다. 이 연구에서 사각봉의 삽입으로 나타나는 유동의 특성을 해석하였으며 열전달에 의미 있는 영향을 줄 수 있음을 보여 주었다. 그렇지만 사각봉의 조건과 열전달의 관계에 대한 명확한 분석을 수행하지는 못하였다.

본 연구는 2차원 채널 내부에 사각봉을 도입함으로써 나타나는 유동변화와 열전달의 상관관계를 분석하고자 한다. 사각봉의 위치변화와 열전달의 관계에 대한 난류유동 해석을 수행하기 위하여 최근에 개발되어 여러 유동조건에 우수한 성능을 보여준 $k-\epsilon-f_w$ [4] 난류모형을 선택하였다. 사각봉의

1 학생회원, 경북대학교 대학원 기계공학부

2 정회원, 경북대학교 기계공학부

* Corresponding author E-mail: tsparkjp@knu.ac.kr

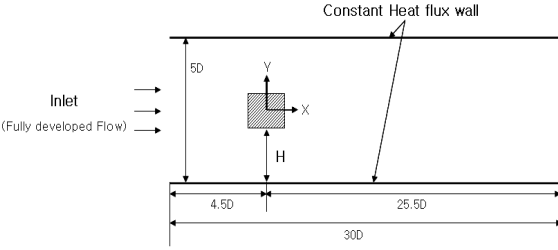


Fig. 1 Computational Domain

위치를 변화시켜가면서 열전달 증가가 발생하는 조건을 조사하고 열전달이 증가하는 경우 유동의 동적인 거동을 살펴보고자 한다.

2. 본 론

2.1 지배방정식

사각봉에 의한 유동장의 교란을 해석하기 위해서는 비정상 방정식이 사용되어야 하고, 비압축성 유체의 난류조건을 해석하기 위한 연속방정식과 운동량 방정식, 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\rho \partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - u_i u_j \right] \tag{2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu}{Pr} + \frac{\nu_i}{Pr_i} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \tag{3}$$

여기서 U_i 와 u_i 는 j번째 요소의 평균속도 및 섭동 성분을 나타낸다. P는 평균 압력이며 ρ 와 ν 는 유체의 밀도와 동점성계수이다. 난류Prandtl 수 Pr는 상수로서 0.9로 설정하였다.

Table 1 Case

YST	H
1.0	2.0 D (Center)
0.7	1.4 D
0.5	1.0 D
0.4	0.8 D
0.2	0.4 D
0.0	0.0 D (Bottom wall)

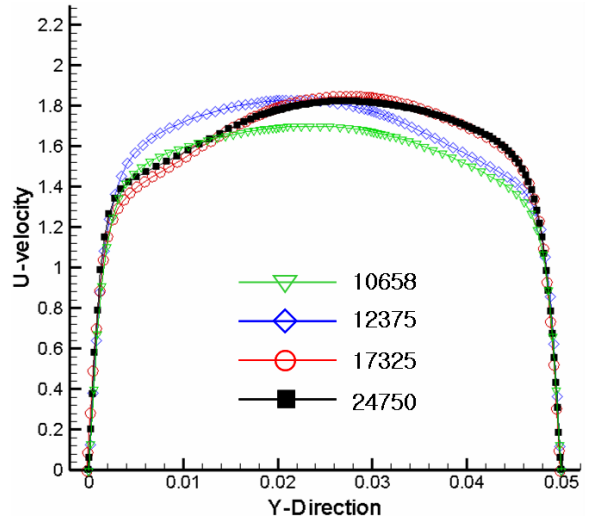


Fig. 2 Grid test

2.2 난류모델

본 연구에서는 URANS(Unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes equation) 개념을 이용한 $k-\epsilon-f_\mu$ 의 난류모델이 선택되었다.

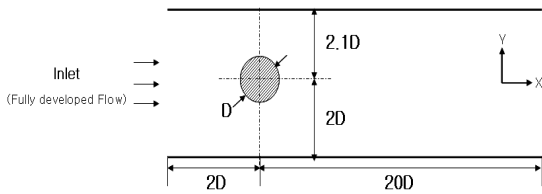
$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_i / \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \epsilon \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_i / \sigma_\epsilon) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ & + (C_{\epsilon 1}^* P_k - C_{\epsilon 2} f_2 \epsilon) / T \\ & + Cp(1 - f_w) \nu_i \left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} \right)^2 \end{aligned} \tag{5}$$

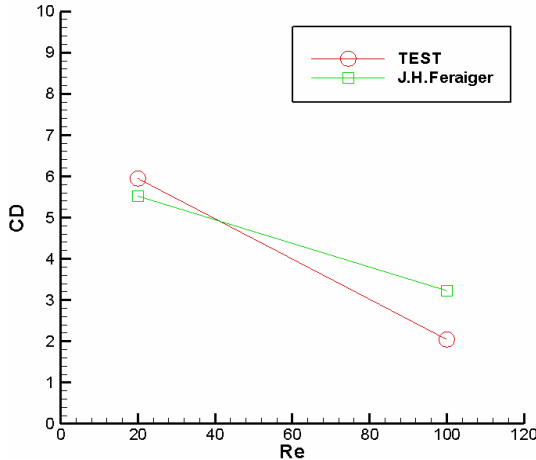
$$\nu_i = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \tag{6}$$

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_i \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \tag{7}$$

난류 생성항 $P_k = -\overline{u_i u_j} \partial U_i / \partial x_j$ 이며, 모델상수들은 $C_{\epsilon 2} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$ 이다. T는 난류 시간 척도로 $T = \sqrt{(\kappa/\epsilon)^2 + C_T^2 T_\kappa^2}$ 으로 정의되고 Kolmogorov 시간척도 $T_\kappa = \sqrt{\nu/\epsilon}$, 상수 $C_T = 6.0$ 로 결정된다. 감쇠함수 f_μ 는 $f_\mu = f_{\mu 1} f_{\mu 2}$ 로 정의되며 $f_{\mu 1}$ 은 벽면



(a) Circle Computational Domain



(b) Circle Computational of result and experimental data

Fig. 3 Circle Computational

부근의 영향을 고려하게 되고 $f_{\mu 2}$ 는 벽면으로부터 떨어진 영역의 비평형 효과를 나타낸다. $f_{\mu 1}$ 과 $f_{\mu 2}$ 는 다음과 같이 정의 된다.

$$f_{\mu 1} = [1 + C_{w1} \exp\{- (R_i / C_{w2})^2\}] R_i^{-3/4} f_w^2 \quad (8)$$

$$f_{\mu 2} = \frac{C_{\mu 1} + C_{\mu 2} \xi + (g^2 + \eta^2)(C_{\mu} g + C_{\mu 3} \xi^2)}{C_{\mu 3} g^4 + C_{\mu 4} (g \eta)^2 + C_{\mu 3} \xi^2 (g^2 + \eta^2 + C_{\mu 5} \eta^3)} \quad (9)$$

$$\frac{\partial f_w}{\partial x_i \partial x_i} = \frac{Re_i}{A^2 L^2} (f_w - 1) \quad (10)$$

식(8), (10)에서 $C_{w1} = 15$, $C_{w2} = 120$, $A=2.4$ 이고, 난류 길이 척도 L 은 $L = \sqrt{\kappa^3 / \epsilon^2 + C_L^2 (v^3 / \epsilon)^{1/2}}$ 으로 정의되며 이때 C_L 은 70이다. 식(9)에서 $\eta = C_{\mu} f_w \sqrt{2 S_{ij}^* S_{ij}^*}$, $\xi = 2 C_{\mu} f_w \sqrt{2 W_{ij}^* W_{ij}^*}$, $g = 1 + 0.2 \eta$ 이고 모델 상수들은 $C_{\mu 1} = 7$, $C_{\mu 2} = 4$, $C_{\mu 3} = 6$, $C_{\mu 4} = 13$, $C_{\mu 5} = 10$ 이다.

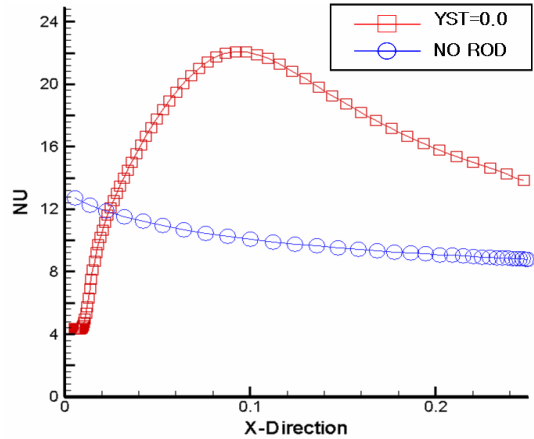


Fig. 4 Insert Rod & No Rod

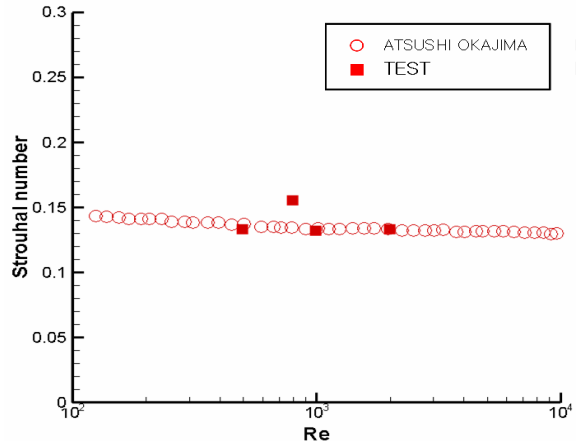


Fig. 5 Strouhal number

2.3 계산영역 및 방법

본 연구에서의 계산 영역은 Fig. 1과 같다. 채널의 높이는 5D이며 사각봉의 직경은 1D이다. 채널의 길이는 사각봉의 이후의 유동을 충분히 관찰하기 위하여 25.5D로 설정하여 총 채널의 길이는 30D이다. 채널의 바닥과 사각봉 사이의 거리 H는 바닥면에서부터 채널의 중심까지 6단계로 변화하며 그 높이는 Table1과 같다. YST는

$$YST = H / [0.5 * (\text{채널의 높이} - \text{사각봉의 높이})]$$

이다. YST = 0.0은 사각봉이 바닥과 닿아 있음을 의미하고, YST = 1.0은 채널의 중심에 사각봉이 위치함을 나타낸다. 입구는 계산 영역 전에 길이 40D의 Inflow Generator를 도입하여 Fully developed 조건의 유동이 유입되도록 설정하였다. 채널 벽면은 500 W/m²의 일정한 열 유속 조건으로 설정하였다.

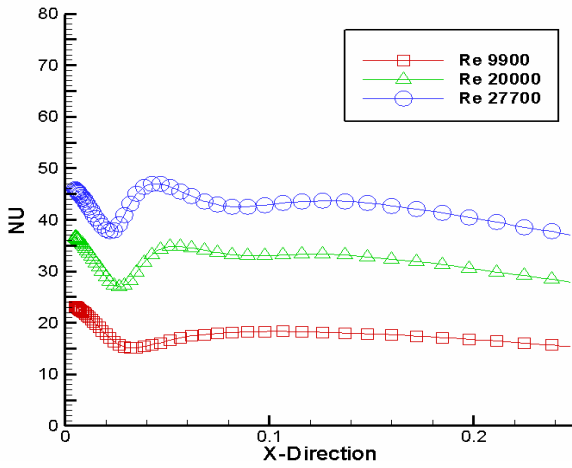


Fig. 6 Distribution of local Nusselt number

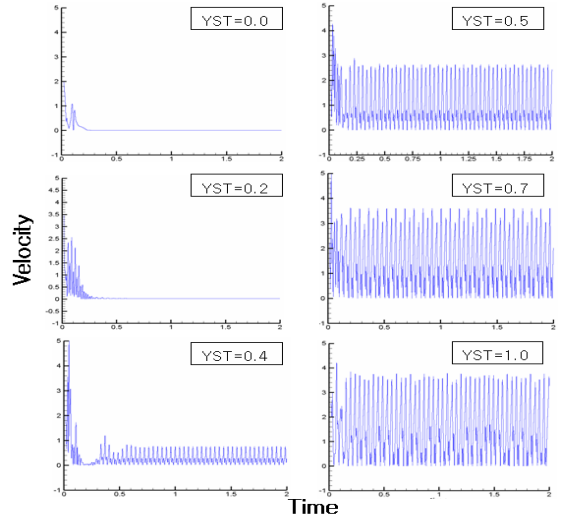
본 연구는 $Re=5250$ 의 채널유동에서 난류의 비정상거동을 관찰 하는 것이므로, 비압축성 유체에 대한 2차원 평면 조건에서 난류모델($k-\epsilon-f_\mu$ model)을 적용한 비정상 전산해석이 수행되었다. 계산 방법은 SIMPLEC 알고리즘을 사용하였고, 지배방정식에 대한 대류항의 차분화는 Second order upwind, 시간항의 적분법에는 Second order fully implicit 를 적용하였다.

수치해석 과정에서 격자계를 검증하기 위하여 $YST=1.0$ 인 조건에서 격자수를 10658, 12375, 17325, 24750 으로 변화시켰다. 유동변화가 활발한 $X=20D$ 인 위치에서 Y방향의 시간평균된 U-속도를 비교하였다

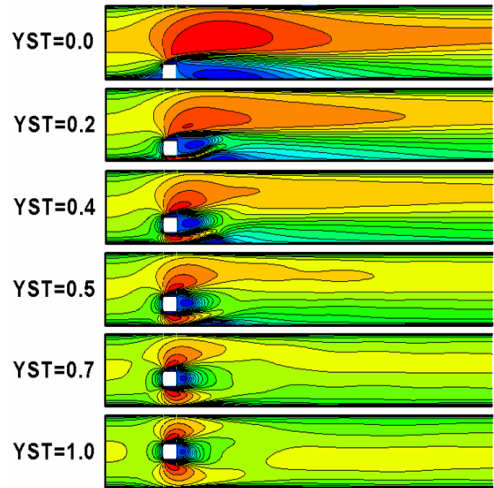
Fig. 2에 나타난 결과를 보면 성긴격자에서 조밀한 격자로 갈수록 U-속도분포의 차이가 점점 줄어들고 있고 격자수 24750부터 거의 하나의 속도분포를 보여주고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과를 토대로 사각봉에 있는 2차원 채널에 대한 해석은 24750개의 격자수 이상이면 충분히 신뢰성 있는 결과가 얻어질 것으로 예상되어 모든 경우에 대하여 24750개의 격자수를 기본으로 이용하였다.

2.4 예비해석

예비해석을 통하여 계산 결과를 기존의 실험들의 결과와 비교하여 프로그램의 타당성을 검증하였다. 프로그램의 검증은 원형봉을 삽입한 채널에서의 결과가 이미 검증된 결과와 일치하는 경향을 보이는지를 확인 한다. 또한 본 해석에 적용할 타당한 Re 를 찾기 위하여 Re 에 따른 St 와 열전달계수를 비교한다. 마지막으로 타당한 Re 를 적용하여 봉의 삽입이 열전달 변화에 어떠한 영향을 미치는지 확인한다.



(a) Time history of U-velocity



(b) Time averaged velocity

Fig. 7 Time history and time averaged velocity

2.4.1 원형봉의 삽입

프로그램의 검증을 위하여 원형봉을 삽입한 채널의 결과를 이미 확인된 J.H. Ferziger[6]의 결과와 비교하였다. 원형봉이 삽입된 채널의 Domain은 Fig. 3의 (a)와 같으며 $Re=20, 100$ 로 설정하여 항력계수(Drag Coefficient, C_D)를 비교하였다.

Fig. 3에서 보면 본 해석결과와 J.H. Ferziger의 결과가 차이를 보여주고 있다. 이 차이는 격자해상도와 대류항 차분법의 차이에 기인한 것으로 생각되지만 전체적인 경향은 일치하고 있다.

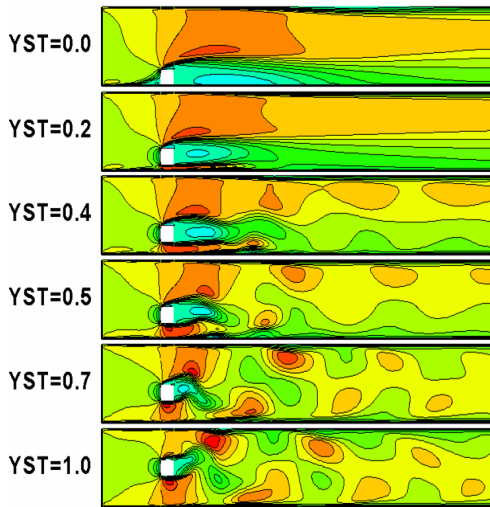


Fig. 8 Instantaneous U-velocity Contour

2.4.2 사각봉 삽입에 의한 열전달 변화

일반적인 조건에서의 열전달은 대류열전달이 지배적이기 때문에 유동의 변화에 따른 열전달도 변화하게 된다. 본 연구대상인 채널에서의 열전달은 사각봉에 의해서 채널내부의 유동을 교란시킬 수 있기 때문에 열전달에 변화가 발생할 수 있다. 사각봉의 삽입으로 나타나는 이러한 유동변화가 열전달을 증가시키는 지를 관찰하기 위하여 검증해석을 수행하였다. 해석은 채널벽면이 일정 열유속조건(Constant heat flux)일 때 채널높이와 기준 Re를 고정하고 사각봉이 있는 조건과 없는 조건에 대하여 해석을 수행하였다. 사각봉을 지난 아래벽면에서 나타나는 열전달계수(Nu)를 Fig. 4에 나타내었다. 사각봉이 있는 경우 재순환유동이 발생하기 때문에 아래벽면으로부터 유입되는 열량이 재순환유동에 의해 구속되는 현상으로 열전달 계수가 사각봉이 없는 경우보다 작게 나타나고 있다. 그렇지만 재순환유동 이후의 영역에서 열전달계수가 크게 증가함을 알 수 있다. 이러한 현상은 사각봉에 의해 발생된 유동변화가 대류열전달을 증가시키는 형태로 변화를 가져옴으로써 나타난 결과이다. 그렇지만 유동장에 변화를 주는 것은 Fig. 4에 나타난 결과처럼 긍정적인 측면과 부정적인 측면을 모두 가지고 있기 때문에 열전달효과를 자세히 알아 볼 필요가 있다.

2.4.3 Reynolds number와 Strouhal number 변화

Re에 대한 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 Strouhal number를 ATSUSHI OKAJIMA[1]의 결과와 비교하였다. Strouhal number는 vortex의 Shedding frequency와 상관 관계가 있기 때문에 일정한 속도 주기가 나타나는 사각봉의 높이 YST=0.4이상에서 측정할 수 있다. 본 예비해석에서는

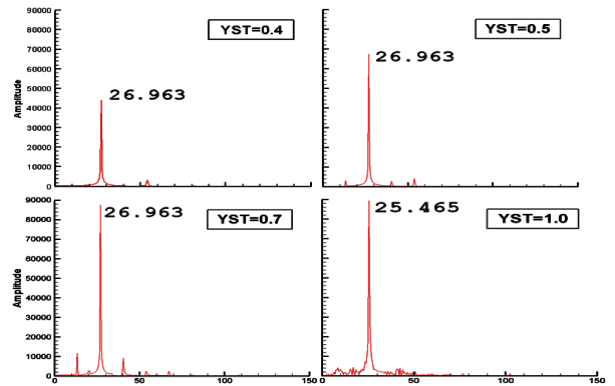


Fig. 9 Comparison of the predicted frequency of lift coefficient

YST=1.0인 사각봉이 채널의 중심에 위치할 때의 Strouhal number를 비교하였다. 레이놀즈의 수는 $Re=500, 800, 1000, 2000$ 의 4가지 경우를 해석하였고 그에 따른 결과를 Strouhal number로 무차원화 한 결과는 Fig. 5와 같다.

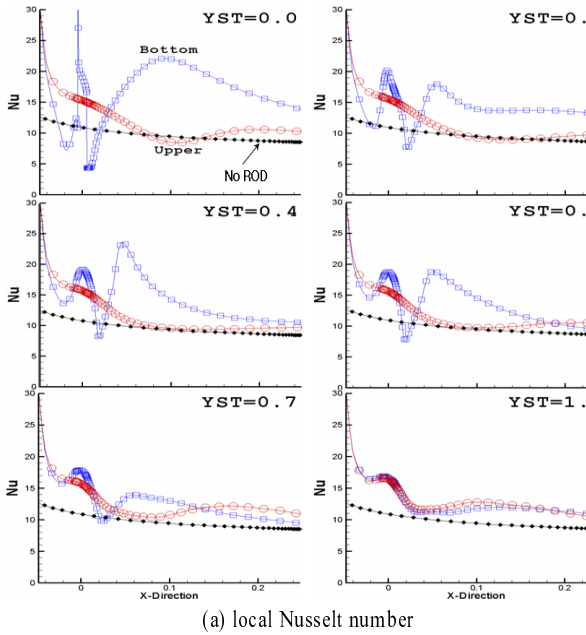
예측된 결과를 살펴보면 대부분 OKAJIMA의 결과와 일치 하였으나 $Re=800$ 에서는 실험보다 과대예측하고 있다. 그렇지만 $Re=1000$ 이상의 결과는 잘 일치하기 때문에 형상변화에 대한 해석은 Re 의 1000이상에서 수행되었다.

2.4.4 Reynolds number에 따른 열전달계수 변화

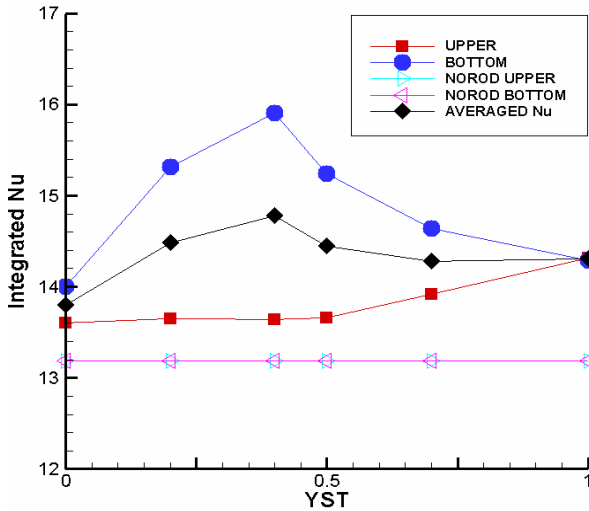
Reynolds number에 따른 열전달계수(Nu)를 알아보기 위하여 사각봉이 중심에 삽입된 채널에서 Re를 $Re=9900, 11200, 20000, 27700$ 으로 변화시켜 열전달계수를 관찰 하였다. 결과는 Constant heat flux가 있는 아래벽면을 따라 그래프로 확인 하였다.

Fig. 6의 결과에서 확인 할 수 있듯 Re가 증가 할수록 대류열전달의 영향으로 열전달계수 또한 커진다. 그렇지만 주유동 방향으로의 열전달계수 변화는 커다란 차이를 나타내고 있지 않다. 이것은 난류영역에서 사각봉의 교란에 의한 열전달 변화는 일관성 있는 특징이 존재함을 보여주는 결과이다.

원형봉이 삽입된 채널의 결과로 본 연구에서 사용하는 프로그램이 봉이 삽입된 채널의 해석하여 그 결과가 기존의 결과와 비교하여 적용이 적합함을 증명하였다. 또한 봉의 삽입으로 열전달이 변화함을 보이기 위하여 사각봉이 삽입되지 않은 채널과 사각봉이 삽입된 채널을 비교하였다. 사각봉의 삽입만으로 일부구간에서 열전달계수의 상승이 나타났으며, 이는 사각봉의 삽입으로 나타나는 열전달 변화를 관찰해 볼 필요가 있음을 나타낸다. Re에 대한 Strouhal number의 해석에서 얻어진 결과로부터 난류영역의 1000이상의 레이놀즈의 수를 정하였다.



(a) local Nusselt number



(b) Surface integrated Nusselt number

Fig. 10 Distribution of local Nusselt number

3. 결과 및 고찰

3.1 유동장 특성

사각봉이 삽입된 2차원 채널에서 $Re=5250$, 비정상 난류유동에서 삽입된 사각봉의 의하여 변화하는 유동장 특성을 확인하였다. Fig 3에서는 Monitoring Point에서 (a)시간에 따른 속도 변화와 (b)시간 평균한 속도 2차원 평면의 Contour로 나

타내었다.

그 결과 Fig 7의 (a)에서 시간에 따른 속도를 보면 $YST=0.4$ 이상부터 일정한 주기를 갖는 속도변화를 확인 할 수 있다. 이는 사각봉이 일정 높이 이상에서 유동장이 일정한 주파수를 갖게 된다는 것이며 그 높이가 $YST=0.4$ 즉, 사각봉이 $0.8D$ 의 위치에서부터이다. 이후 속도 주기는 봉의 높이가 증가함에 따라 증가하는 경향이 보인다. 사각봉의 삽입으로 유동장의 속도 교란을 일으킬 수 있으며 그 폭은 사각봉이 채널의 중심에 위치 할 때 가장 크다. Fig. 7(b)에서는 시간 평균한 속도의 Contour를 확인 할 수 있다. 사각봉의 위치에 따라 위와 아래벽면의 주유동 방향의 속도는 달라진다. $YST=0.0$ 에서 위쪽 벽면의 속도가 가장 빠르며 아래 벽면은 사각봉 뒤쪽으로 가장 느린 속도변화가 나타난다. 이러한 변화는 사각봉이 중심으로 이동하면서 점차 봉의 아래와 위쪽의 속도의 형태가 대칭이 된다. 이러한 속도 변화의 형상 또한 열전달에 영향을 줄 수 있다.

Fig. 8에서 일정한 속도 주기를 갖는 사각봉의 위치 $YST=0.4$ 이상에서의 유동장의 특성을 알아본다. 일정 시간의 속도 Contour를 확인하여 보면 $YST=0.4$ 이상의 사각봉의 위치에서 $YST=0.0, 0.2$ 에서 관찰 할 수 없었던 형태의 유동현상이 나타난다. $YST=0.4$ 에서부터 사각봉에서의 유동의 박리 현상이 나타나기 시작하며 사각봉의 높이 증가에 따라 점차 Karman vortex의 형태가 나타난다. 이러한 비정상 유동의 형태가 처음 시작되는 $YST=0.4$ 에서는 Vortex의 형태가 명확하지 않으나 $YST=0.5$ 부터는 명확한 Karman Vortex를 확인 할 수 있다. 사각봉의 삽입으로 발생된 Karman vortex는 유동진행 방향으로 와류의 크기가 발달하지만 채널벽면의 존재로 제한을 받게 되고 이로 인해 채널벽면의 경계층 유동이 교란되어진다. 위와 같은 Karman vortex의 주파수 특성을 살펴보기 위하여 양력계수(C_L)에 대한 FFT결과를 Fig. 9에 나타내었다. 결과에서 볼 수 있듯이 원봉의 위치변화에 관계없이 거의 비슷한 고유주파수 특성을 가지고 있다. 이것은 유동의 주파수가 사각봉의 위치보다 레이놀즈수 같은 유동조건에 더 큰 영향을 받는다는 것으로 생각할 수 있다.

3.2 열전달 효과

Fig. 7 을 통하여 확인한 사각봉의 유동장 특성이 열전달 효과에 어떤 영향을 미치는 지를 알아본다. 2차원 채널의 Bottom과 Upper Wall에서 일정한 열 유속을 부여하고 열전달 변화를 관찰하여 열전달 특성을 살펴볼 수 있는 Nusselt number(Nu)로 무차원화 하였다. Fig 10의 (a)에서는 주유동방향의 Bottom과 Upper Wall의 Nu의 결과를 살펴보고 사각봉이 삽입되지 않았을 경우와 비교하였다. 사각봉이 없는 경우의 Upper와 Bottom Wall의 Nu의 결과 차이는 0.01%로 무시하여



도 좋을 만큼 발생하므로 Bottom Wall의 결과만을 사용하였다.

Fig. 10(a)의 결과를 살펴보면 $YST=0.0$ 에서의 경우 일부 구간에서 사각봉이 삽입되지 않은 경우보다 벽면에서 열전달계수가 낮게 나타나기도 한다. 이러한 구간은 점차 줄어들어 $YST=1.0$ 에서는 벽면의 열전달계수가 사각봉이 삽입되지 않은 경우보다 항상 높게 나타난다. 사각봉의 위치가 증가함에 따라서 Upper와 Bottom Wall의 열전달 차이는 점차 줄어들며 사각봉이 채널의 중심에 위치 할 때 Upper와 Bottom Wall의 열전달 차이는 크게 나타나지 않는다. (a)를 통하여 알 수 있었던 사각봉의 위치에 따른 열전달의 변화를 분석하여 가장 이상적인 사각봉의 위치를 찾아내도록 한다. 정량적인 분석을 위하여 면적 평균된 Nu 를 사각봉이 삽입되지 않은 경우의 면적평균 Nu 값과 비교한다.

Fig. 10의 (b)는 사각봉의 높이에 따른 면적 평균된 Nu 값을 나타낸 것이다. Bottom wall에서 열전달계수는 $YST=0.4$ 까지 증가 후 감소한다. Upper wall은 $YST=0.0$ 에서부터 작은 증가를 보이며 $YST=0.7$ 이상에서는 주목할 만한 열전달계수 증가를 보인다. $YST=1.0$ 의 경우 Bottom과 Upper wall의 열전달계수는 거의 같다. 채널 내에서 전체적인 열전달의 증감을 확인하기 위하여 Bottom과 Upper wall의 열전달계수를 평균한 결과 $YST=0.4$ 에서 가장 높은 값이 나타났으며 $YST=0.0$ 에서 가장 낮은 값을 나타냈다. 또한 모든 경우에서 사각봉이 삽입되지 않은 채널의 경우보다 열전달계수가 높다.

3.3 유동장 변화와 열전달 특성의 관계

Fig. 7과 Fig. 10을 통하여 유동장 특성과 열전달을 살펴보았다. 사각봉의 위치가 점차 증가함에 따라 사각봉 위쪽의 벽면에서 속도는 점차 감소하지만 열전달 계수는 증가한다. 아래벽면은 $YST=0.0$ 일 때 사각봉의 뒤쪽에서 재순환유동이 발생한다. 이러한 재순환 유동으로 아래벽면으로부터 유입되는 열량이 재순환유동에 의해 구속되는 현상으로 열전달계수가 사각봉이 없는 경우보다 작게 나타난다. 그렇지만 재순환유동 이후의 영역에서는 열전달계수가 크게 증가한다. 사각봉이 바닥에서 멀어지는 $YST=0.2$ 부터 점차 재순환유동은 사라지고 열전달 계수 또한 증가하지만 후류의 영역의 열전달 계수는 감소한다. 이처럼 열전달계수는 유동의 특성과 속도에 따라 변화한다. Upper와 Bottom wall을 평균한 결과 $YST=0.4$ 에서 가장 높은 결과를 보이고 YST 가 증가함에 따라 열전달계수는 감소한다. 이는 Fig. 8에서 확인한 Karman vortex의 발달이 오히려 벽면에서의 열전달을 감소시켜 비정상 유동이 채널내부의 유체 혼합을 증대시켜 채널벽면의 온도구배를 감소시키는 역할을 하는 것으로 생각된다.

4. 결 론

사각봉의 삽입으로 2차원 채널에서 변화하는 유동특성과 열전달 변화를 알아보기 위하여 사각봉의 위치 변화에 대한 비정상 난류해석을 수행하였다. 채널의 유동은 사각봉의 높이에 따라 특정한 형태가 나타났다. 사각봉이 아래벽면으로부터 채널 중앙으로 위치할수록 비정상적인 형태의 유동이 발생하였는데 $YST=0.4$ 부터는 주기적인 속도 주파수와 와류유동을 확인 할 수 있다. 이러한 유동 특성에 의하여 유동의 형태가 변화하여 열전달에 영향을 미쳤다. $YST=0.0$ 일 때 다른 경우와 비교하여 가장 작은 열전달변화를 보였다. 위 벽면에서는 $YST=1.0$ 이 아래 벽면에서는 $YST=0.4$ 가 가장 높은 열전달이 나타났다. 위와 아래 벽면 모두에 열전달증가를 가져 올 수 있는 봉의 높이는 $YST=1.0$ 이었다. 채널에서 열전달은 사각봉의 삽입은 사각봉이 삽입되지 않은 경우보다 항상 높은 결과를 나타내었으며 특히 $YST=0.4$ 에서 평균적으로 가장 좋은 열전달변화를 보였다. 사각봉이 채널의 중앙으로 이동할 경우 열전달은 $YST=0.4$ 일 경우 보다 감소하는데 Karman voertex에 의한 혼합증대에 기인한 것으로 생각된다. 본 연구를 통하여 사각봉의 삽입으로 나타나는 유동특성과 유동의 교란으로 발생하는 열전달의 증가를 확인 하였으며 가장 이상적인 사각봉의 높이도 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 1982, Okjima, A., "Strouhal numbers of rectangular cylinders," *J.Fluid Mech*, Vol.123, pp.379-398
- [2] 1993, Suzuki, H. and Inoue, Y., et al., "Unsteady flow in a channel obstructed by a square rod (crisscross motion of vortex)," *Int. J. Heat and fluid Flow*, Vol.14, No.1
- [3] 1995, Yao, M. and Nakatani, M., "Flow visualization and heat transfer experiments in a turbulent channel flow obstructed with an inserted square rod," *Int. J. Heat and fluid Flow*, Vol.16, pp.389-397
- [4] Park T.S. and Sung H.J., "A new low-Reynolds-number $k-\epsilon-f_{\mu}$ model for predicions involving multiple surfaces," *Fluid Dynamics Reserch*, Vol.20, pp.97-113
- [5] 1996, Ferziger, J.H. and Peric, M., *Computational Methods for fluid Dynamics*, Springer
- [6] 1995, Muzaferija, S. and Peric, M., *Computation of flow around circular cylinder in a channel*, Internal Report, Institut für schif University of Hamburg.