

환상핀이 부착된 원봉에서 핀 간격에 따른 대류열전달 해석

박 태 선,* 김 창 하

경북대학교 기계공학부

EFFECTS OF FIN SPACING ON CONVECTIVE HEAT TRANSFER FOR A CIRCULAR CYLINDER WITH ANNULAR FINS

Tae Seon Park* and Chang Ha Kim

School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University

This study is to analyze the local convective heat transfer for a circular cylinder with annular fins. The relation between wall heat transfer and three-dimensional flow is investigated for different distances of annular fins. Depending on the fin spacing, the flow structure is strongly changed by the variation of horseshoe vortices. As the fin spacing increases, the heat transfer rate is maximized at a certain condition. This is clearly obtained as the Reynolds number increases, and it is closely related to the development of horseshoe vortices.

Key Words : 원형실린더(Circular Cylinder), 층류(Laminar Flow), 말굽와류(Horseshoe Vortex), 환상핀(Annular Fins), 대류열전달(Convective Heat Transfer)

1. 서 론

전열면적을 넓히기 위한 환상핀이 부착된 원봉의 형상은 다양한 열교환기에서 이용되고 있다. 원봉주위의 유동구조는 기하학적 특징에 의해서 3차원적 유동구조가 발생된다. 특히 원봉과 환상핀이 만나는 부분에서 존재하는 말굽와류는 열전달에 커다란 영향을 주는 것으로 알려져 있다[1]. 그렇지만 3차원 유동구조와 열전달과의 관계에 대해서는 자세히 고찰되어 있지 않은 실정이다. 문헌조사[2]에 의하면 환상핀이 부착된 원봉 주위의 열전달은 레이놀즈수(Re)와 핀의 간격(L/H) 등에 크게 의존하기 때문에 많은 실험적 연구들은 그런 조건들이 변할 때 열전달의 효율성에 주로 관심을 가져왔다.

Romero-Mendez et al.[3]은 원봉에 사각핀을 부착함으로써 층류유동조건에서 수치해석과 실험을 병행하였다. 고정된 레이놀즈수에서 핀의 간격이 증가함에 따라 열전달계수가 증가하였지만 일정간격 이상에서는 감소하는 것으로 나타났다.

Sanhaji et al.[4]은 난류실험을 통해 속도장이 원봉 전면부에 발생되는 말굽와류에 미치는 영향들을 보였는데, 속도장이 커짐에 따라 말굽와류의 위치는 약간씩 이동하지만 와도의 크기가 증가하여 열전달의 증가를 초래하였다. Sung et al.[2]은 원봉에 환상핀이 부착되었을 경우 난류 물질전달이 증가함을 보였고 핀의 간격에 따라 난류물질전달의 크기가 크게 변화함을 보여주었다. 이러한 연구들로부터 원봉에 핀이 부착된 경우 핀의 간격이 열전달 성능을 좌우하는 중요변수임을 알 수 있다. 한편, Sheui et al.[5]은 층류조건인 열교환기 형상에서 3차원적인 유동구조를 보여주었고, Mon and Gross[6]는 난류조건에서 환상핀이 부착된 원봉에서 핀 간격에 따른 열전달 변화를 비교하였다. 엇갈린 배열의 경우 핀의 간격이 일정정도 증가한 후에는 거의 일정한 열전달 계수값을 보여주었지만 일렬로 배열했을 경우에는 핀의 간격에 따라 열전달 계수가 증가하는 결과를 나타내었다.

이러한 선행연구에서 확인할 수 있듯이 핀이 부착된 원봉 주위의 열전달에 대해 수치해석과 실험들을 통해 열전달계수의 정량적인 변화에 대해서는 제시되고 있지만 핀이 부착된 원봉에서 3차원적인 유동구조와 열전달의 관계에 대해서는 충분한 연구가 이루어 지지 않은 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 층류유동 조건에서 환상핀이 부착된 원봉에 대한

Received: March 4, 2014, Revised: May 19, 2014,

Accepted: May 20, 2014.

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

DOI http://dx.doi.org/10.6112/ksce.2014.19.2.001

© KSCFE 2014

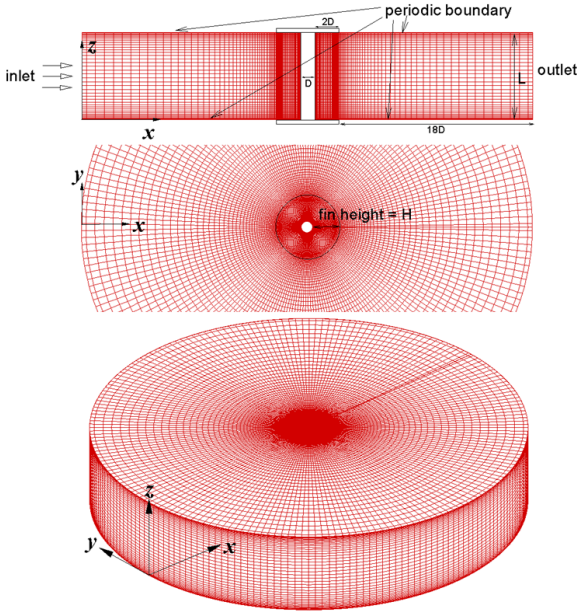


Fig. 1 Computational domain and grid

여 유동구조와 열전달 변화의 관계를 조사하고자 한다. 문헌 조사에 의하면 환상핀이 부착된 원봉에 대한 대류열전달은 레이놀즈수, 핀의 간격, 핀의 형상, 핀의 길이 등 다양한 요소들에 의해서 영향을 받는다[1,2]. 그렇지만 본 연구에서는 대류열전달계수 변화에 중요한자인 레이놀즈수와 핀의 간격 변화에 대한 열전달 및 유동구조에 대해 살펴보고자 한다.

2. 해석 방법

3차원 대류열전달을 살펴보기 위한 비압축성 유체의 비정상 운동방정식과 온도방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial u_j T}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

여기서 u_i , p , ρ , α , T 는 각각 속도, 압력, 밀도, 열확산계수, 온도 등을 나타낸다.

계산영역은 Fig. 1과 같이 입구와 출구가 원봉으로 $20D$ 떨어져 있고, 핀의 높이는 $2D$ 이다. 입구속도(U_{in})는 원봉직경 기준의 레이놀즈수($Re = U_{in}D/\nu$) 100, 500, 1000, 2000을 이용하여 결정하였다. 레이놀즈수가 클 경우 3차원 유동구조에

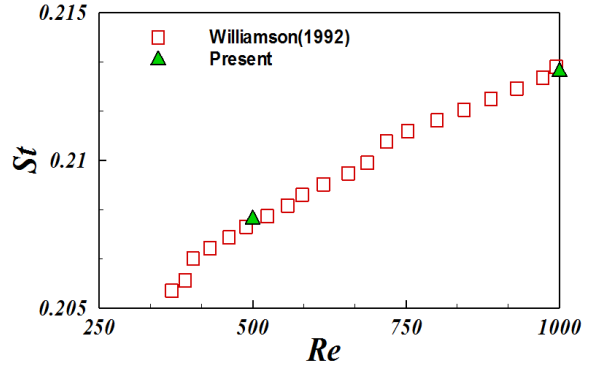


Fig. 2 Relationship between St and Re

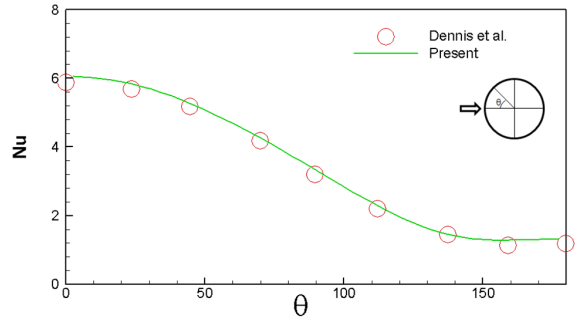


Fig. 3 Comparison of local Nusselt numbers

의해서 난류구조가 발생될 것이 예상되지만 3차원 비정상 해석이 수행되기 때문에 현재 연구는 직접수치모사(DNS)의 결과로 생각될 수 있다. 입구온도는 $T_{in} = 300K$, 원봉의 온도는 $T_w = 500K$, 환상핀은 단열조건으로 선택하였다. 핀의 간격(L/H)은 0.05와 0.5사이 10개에 대해 작동유체는 공기이고 프란틀수는 0.72로 해석이 수행되었다.

비엇갈림 격자계에서 비정상해석에 효율적인 PISO알고리즘[7]을 이용하여 수치해석이 수행되었다. 대류항 차분법은 4차 정확도의 Compact scheme[8]이 선택되었다.

검증해석을 수행하기 위하여 다양한 방법으로 자료를 조사하였지만 동일한 형상에 대한 실험자료를 구하기 어려워서 핀이 없는 원봉주위의 유동 및 열전달에 대한 실험결과와 비교를 통해 해석방법의 타당성을 검토하였다. Fig. 2는 $Re = 500, 1000$ 일 때 예측된 $St (= fD/U_{in})$ 를 보여주고 있다. 해석결과는 Williamson and Brown[9]의 결과와 잘 일치하고 있다. 또한 열전달에 대한 예측성을 비교하기 위하여 $Re = 40$ 일 때 Dennis et al.[10]의 실험과 Fig. 3에 비교하였다. 해석결과는 열전달계수를 잘 예측하고 있다. 이러한 결과

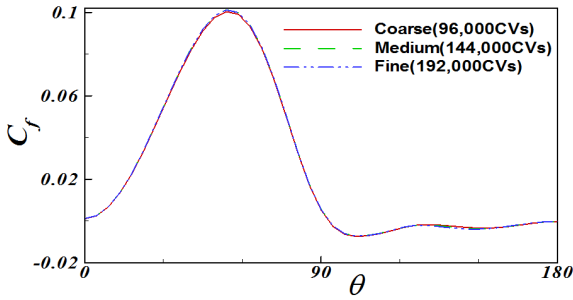


Fig. 4 Skin friction coefficient at the center plane for three grid resolution

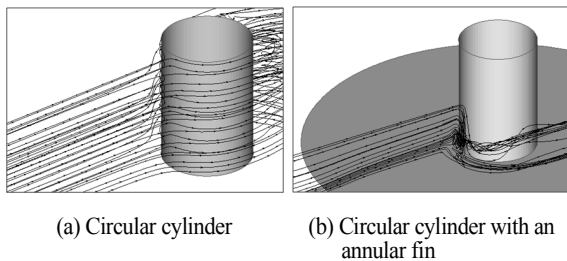


Fig. 5 Comparison of pathlines

로부터 현재의 해석방법은 원봉주위의 대류열전달 예측에 적절한 정확성을 가진 것으로 생각할 수 있고 환상핀이 부착된 경우에도 타당한 결과를 제시할 수 있을 것으로 예상된다.

해석조건 변화에 대한 해석에 앞서 적절한 격자수를 선택하기 위하여 격자수를 바꾸어 가면서 핀과 핀사이의 중심에서 원봉표면의 벽면마찰계수를 원주방향으로 비교한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 3가지 격자수 변화에 대하여 커다란 차이가 없기 때문에 15만개를 기준으로 환상핀의 간격이 커질수록 격자수를 늘려가면서 해석이 진행되었다.

3. 결과 및 고찰

핀이 부착된 원봉주위의 유동구조는 Fig 5에서 보는 바와 같이 핀이 없는 경우와 달리 원봉과 핀이 인접한 부근에서 압력분포의 차이에 의해서 3차원적인 재순환유동 구조가 나타나게 된다. 이러한 재순환유동은 말굽와류[4]라 불리우고 대류열전달에 커다란 영향을 줄 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 핀이 부착된 경우 대류열전달은 와류유동구조의 변화와 함께 열전달의 변화를 분석할 필요가 있다. Fig. 6는 Re=100, 500, 1000, 2000에 대한 핀사이의 중심에서 열전달계수의 면적평군을 나타낸 것이다. 열전달계수는 레이놀즈수가 증가함

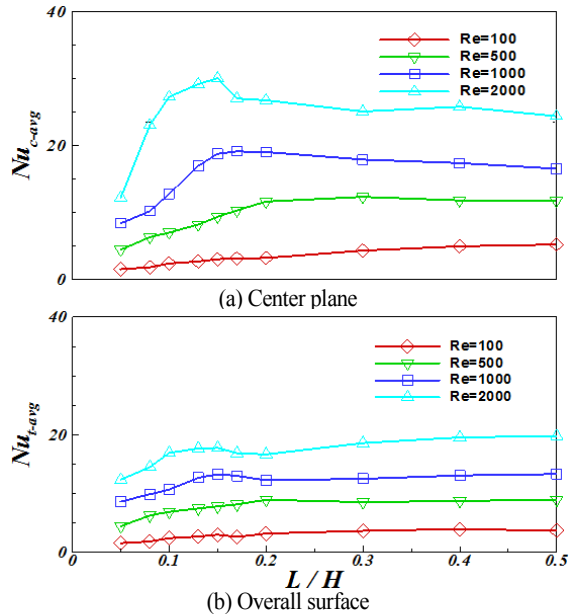


Fig. 6 Distribution of Nu as a function of L/H for Re=100, 500, 1000, 2000

에 따라 증가하는 일반적인 경향을 보여주고 있다. 핀의 간격의 변화에 대해서는 레이놀즈수가 작은 Re=100, 500의 경우 대체로 핀의 간격이 증가함에 따라 평균 열전달계수는 증가하는 경향을 보이고 있지만 레이놀즈수가 큰 Re=1000, 2000의 경우 일정한 핀 간격까지 열전달계수가 크게 증가하다가 비슷한 값을 유지하는 경향을 보여주고 있다. 대체적으로 핀 간격이 0.2이하에서는 핀 간격에 의한 열전달계수의 변화가 심하지만 간격이 0.2보다 클 경우 열전달계수가 거의 비슷하게 나타나고 있다.

일정한 핀 간격에서 열전달이 증가하는 Re=2000 조건에서 핀 간격에 따른 원봉 중심부분의 원주방향 Nu수를 Fig. 7에 나타내었다. 핀에 의한 열전달 영향을 알아보기 위해 핀이 부착되지 않은 원봉의 Nu를 함께 비교하였다. 핀의 간격이 L/H=0.05인 경우 핀이 부착되지 않은 경우보다 낮은 Nu가 얻어졌다. 이것은 핀에 의한 영향으로 유동이 충분히 발달되지 못하는 것에 기인한다. L/H=0.15인 경우 핀에 의한 저항이 감소되어 핀과 핀사이의 유동이 충분히 발달되기 때문에 핀이 부착되지 않은 경우와 전체적으로 유사한 Nu수 변화를 보여주고 있다. 그리고 핀과 핀사이의 중앙에서 주유동방향의 속도가 증가하는 현상으로 정체점에서의 Nu수 값이 핀이 없는 원봉보다 크게 나타나고 있다. 또한, 핀의 간격이 넓은 L/H=0.5의 경우 핀이 없는 경우와 거의 유사한 Nu수 분포를 보여주고 있다.

핀의 간격에 따른 열전달 변화에 영향을 주는 유동구조

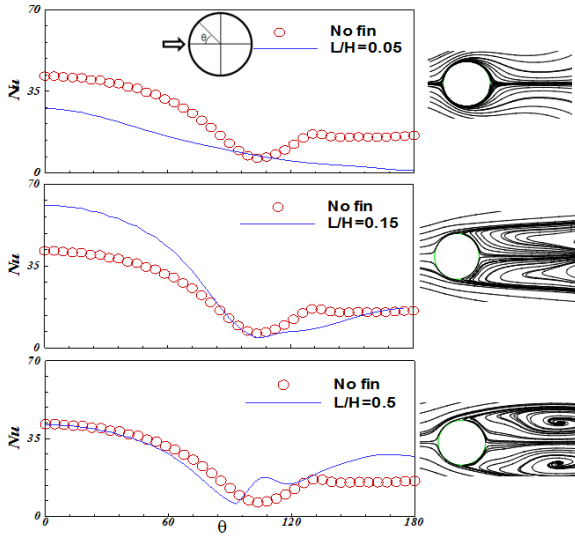


Fig. 7 Circumferential variations of Nu at the center plane of annular fins (Re=2000)

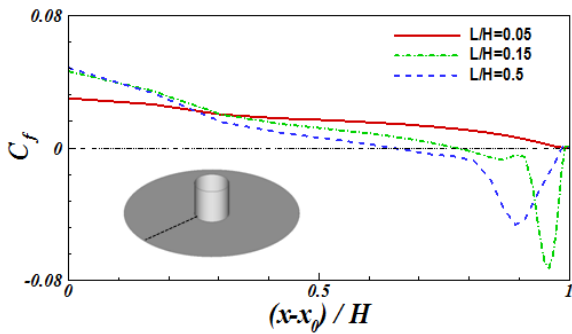


Fig. 8 Comparison of skin friction coefficient

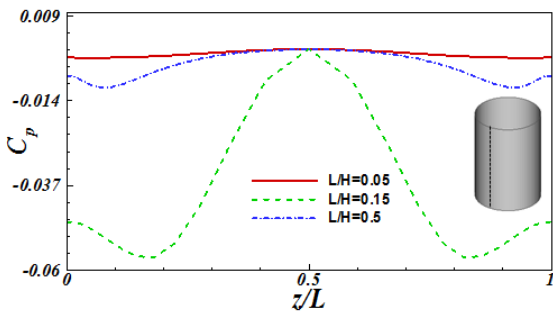


Fig. 9 Comparison of pressure coefficient

변화를 살펴보기 위하여 Fig. 8에 $y=0$ 과 $z=0$ 인 핀의 표면에 대한 표면마찰계수를 살펴보았다. 여기서 x_0 는 핀이

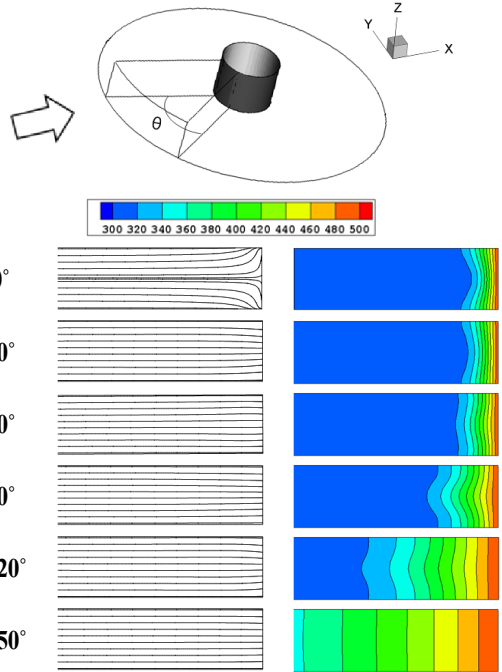


Fig. 10 Streamlines and temperature distributions on several planes of L/H=0.05

시작되는 곳의 x 값이고 H 는 핀의 높이이다. 핀의 간격이 클 경우 원봉에 접근해갈수록 재순환 유동의 형태가 존재함을 알 수 있다. 이것은 말굽외류의 발생에 의한 것이고 핀의 간격이 $L/H=0.05$ 인 경우 말굽외류가 존재하지 않음을 알 수 있다. Fig. 9의 원봉표면 압력계수를 보면 말굽외류의 존재를 다시 한번 확인할 수 있다. 여기서 p_o 는 $z/L=0.5$ 일 때 압력이고 $C_p = (p_w - p_o) / (0.5\rho U_{in}^2)$ 이다. 원봉표면에서 핀으로 향하는 압력구배가 핀의 간격이 클 경우 크게 존재하기 때문에 말굽외류의 크기가 증가하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 10-12는 원봉주위에서 핀과 핀사이의 원주방향 몇몇 단면에서 유선과 온도를 나타낸 것이다. 말굽외류와 같은 3차원 유동 구조가 정체점 근처에서 생성되어 원주방향으로 발달되어 가는 과정에 의한 온도분포의 발달과정을 살펴볼 수 있다. 핀의 간격이 좁은 $L/H=0.05$ 인 경우 θ 가 증가하더라도 유선의 변화가 거의 없는데 이것은 핀의 영향으로 유동이충분히 발달되지 않아 말굽외류가 존재하지 않는 것으로 생각할 수 있다. 그 결과 온도분포는 벽면에 평행한 유동이 발달할 때의 온도분포와 유사한 변화를 보여주고 있다. 그렇지만 $L/H=0.15$ 로 증가하면 말굽외류가 존재하여 핀근처의 원봉표면보다 핀과 핀사이의 중앙 원봉표면에서 열경계층 크기가 감소하고 있다. 핀의 간격이 $L/H=0.5$ 로 증가하면

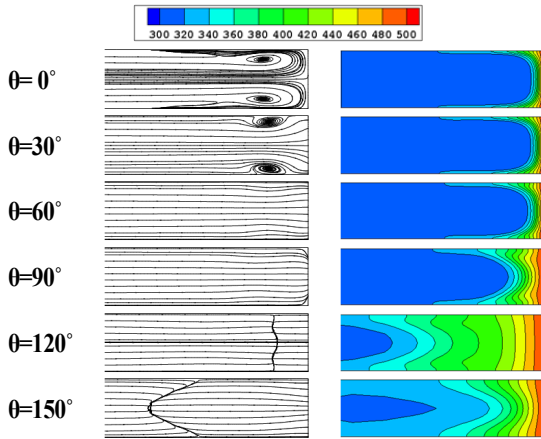


Fig. 11 Streamlines and temperature distributions on several planes of $L/H=0.15$

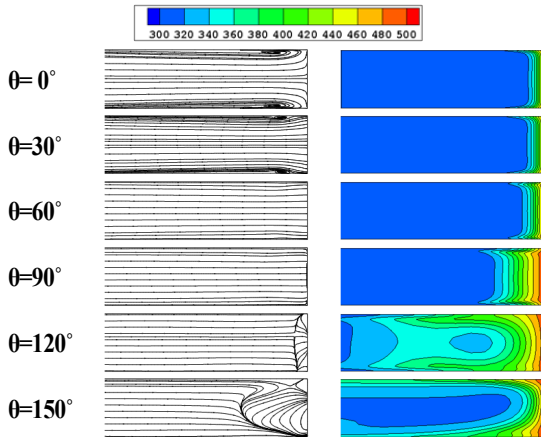


Fig. 12 Streamlines and temperature distributions on several planes of $L/H=0.5$

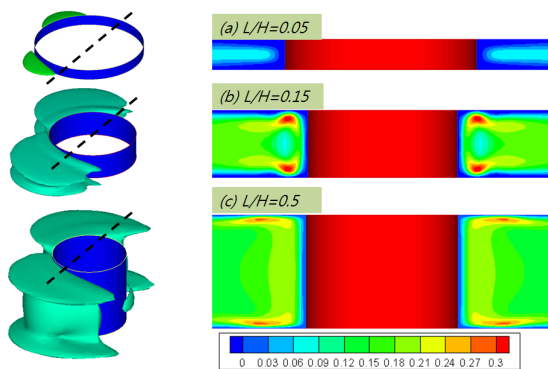


Fig. 13 Iso-secondary flow surface around the cylinder $Sc=0.25$

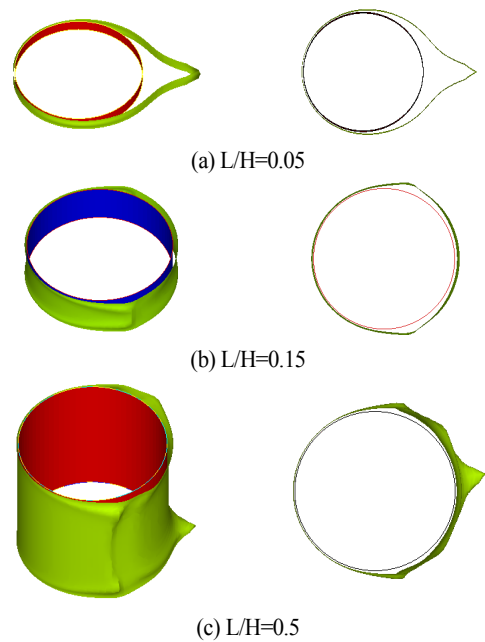


Fig. 14 Iso-surface of temperature for $T+=0.7$

$L/H=0.15$ 와 비슷한 유동구조를 보이면서 핀과 핀사이의 중앙부분이 넓게 형성되고, 말굽와류에 의한 영향은 핀근처의 원봉표면에서만 크게 나타나는 형태를 보이고 있다

Fig. 13은 핀의 간격에 따른 2차유동의 변화를 살펴보기 위하여 $Sc = \sqrt{v^2 + w^2} / U_{in}$ 를 살펴본 것이다. 3차원적인 변화를 살펴보기 위하여 $Sc_c=0.25$ 의 표면과 오른쪽에 점선영역으로 자른 단면에 대한 변화를 추가하였다. 핀 간격이 가장 좁은 경우에는 2차유동이 핀과 핀사이의 중앙부분에 많이 발생되지만 핀 간격이 커질수록 핀과 원봉근처에서 크게 발생됨을 알 수 있다. 이러한 3차원적인 유동구조는 유동혼합을 증가시켜 열전달을 증진시키는데 큰 영향을 주게 된다.

Fig. 14은 원봉표면근처의 $T=450K$ 인 면의 3차원적인 변화를 나타낸 것이다. Fig. 10과 13에서 보았듯이 $L/H=0.05$ 인 경우에는 핀의 간격이 좁아 벽면저항의 증가로 유동이 충분히 발달하지 못하였는데, $T=450K$ 인 면을 보면 확인할 수 있다. 즉 원봉 뒷부분에 재순환유동이 충분히 발달하지 못하여서 $T=450K$ 인 면이 원봉에서 떨어진 위치에서 존재하고 있다. 그렇지만 핀의 간격이 넓어짐에 따라서 핀과 핀사이의 중앙에 핀에 의한 유동저항이 감소되어 고온부가 원봉주위로 가까워지고 3차원적인 변화를 보여주고 있다. 따라서 핀이 좁은 경우보다 넓은 경우 대류열전달의 증가가 예상되겠지만 핀의 간격이 일정한 크기 이상이 되면 핀과 핀사

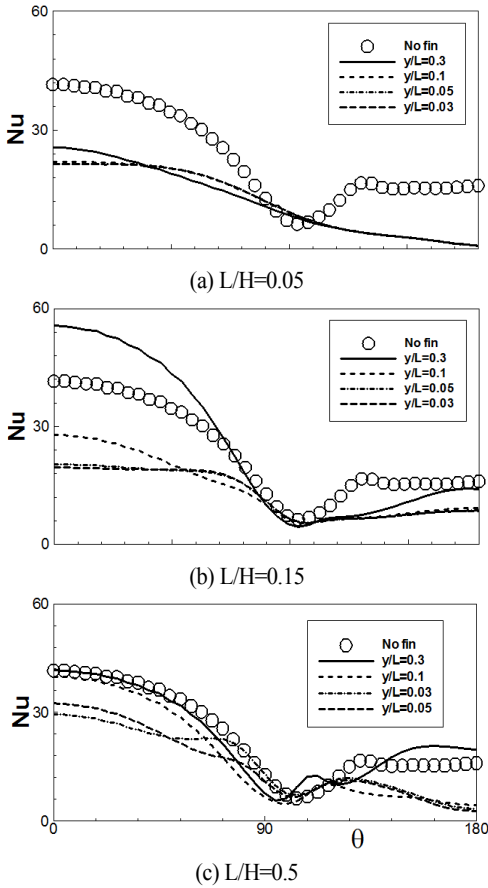


Fig. 15 Circumferential distributions of local Nu for several x-z planes ($Re=2000$)

이의 중앙부분이 핀이 없는 원봉주위의 유동과 유사하게 되어 지기 때문에 핀에 의한 3차원 유동구조에 의한 열전달 영향은 점점 작아지게 된다. 이러한 3차원적인 온도변화에 대한 Nu수 변화를 Fig. 15에서 시간평균된 Nu의 분포를 보면 핀 간격의 영향을 확인할 수 있다. 비교를 위해 핀이 없는 경우(no fin)의 Nu를 나타내었다. $L/H=0.05$ 인 경우에는 핀으로부터의 거리 (y/L)에 따라 Nu수 변화가 작게 나타나고 있다. 그렇지만 핀의 간격이 넓은 경우 말굽외류의 영향에 의해 y/L 에 따라 많은 변화를 보여주고 있다. $L/H=0.15$ 의 경우 핀이 없는 원봉에서의 Nu수보다 큰 값을 보여주는 것은 매우 흥미로운 결과로 생각되고 후속연구에서 체계적인 분석이 수행될 예정이다.

4. 결 론

환상핀이 부착된 원봉에서 핀 간격에 따른 대류열전달의 변화를 살펴보았다. 평균열전달계수를 살펴보면 $L/H=0.2$

근처까지 핀간격이 커질수록 Nu수는 증가하였고 $L/H=0.2$ 보다 큰 핀간격에 대해서는 Nu수의 증가가 둔화되었다. 핀과 핀사이의 중앙에서 Nu수는 $L/H=0.15$ 까지 크게 증가하는 경향을 보였지만 $L/H=0.2$ 이후는 거의 비슷한 Nu수를 보여주었다. 핀간격이 좁을 경우 핀에 의한 마찰저항으로 인해 핀사이에서 재순환유동이 발달하지 못하였고 간격이 넓어짐에 따라서 말굽외류가 발달되었다. 이러한 3차원 유동구조와 대류열전달은 매우 밀접한 관계를 나타내었다. 또한 핀의 간격이 넓어짐에 따라 2차유동의 크기가 증가하였는데 이것은 정체점 부근에서 발달된 말굽외류와 관련이 깊게 나타났다. 결과적으로 핀의 간격과 대류열전달계수의 변화는 선형적이지는 않지만 핀의 마찰저항과 말굽외류의 발달정도에 따라 크게 의존하는 형태로 나타난다고 생각할 수 있다. 이상의 연구결과를 바탕으로 추가적인 연구가 진행된다면 환상핀이 부착된 원봉주위의 대류열전달에 대해 의미 있는 다양한 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

References

- [1] 2011, Giordano, R., Ianiro, A., Astarita, T. and Carlomagno, G. M., "Flow field and heat transfer on the base surface of a finite circular cylinder in crossflow," *Applied Thermal Engineering*, Vol.49, pp.1-10.
- [2] 1993, Sung, H.J., Yang, J.S., and Park, T.S., "Local convective mass transfer on circular cylinder with transverse annular fins in crossflow," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.39, pp.1093-1101.
- [3] 2000, Romero-Mendez, R., Sen, M., Yang, K.T., McClain, R., "Effect of fin spacing on convection in a plate fin and tube heat exchanger," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.43, pp.39-51.
- [4] 2006, Sanhaji M., Bougeard D., Abbadi A. E., Russeil S., Nacer-Bey M. and Baudoin B., "Infrared thermography study of the local heat transfer coefficient in front of a single finned tube", *8th Int. Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, Italy, N12.
- [5] 1999, Sheui, W.H., Tsai, S.F. and Chiang, T.P., "Numerical study of heat transfer in two-row heat exchangers having extended fin surfaces," *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol.35, pp.797-814.
- [6] 2004, Mon, M.S. and Gross, U., "Numerical study of fin-spacing effects in annular-finned tube heat exchangers," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.47, pp.1953-1964.
- [7] 2006, Park, T.S., "Effects of time-integration method in a

- large-eddy simulation using the PISO algorithm: Part I-Flow field," *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol.50, pp.229-245.
- [8] 1992, Lele, S.K., "Compact finite difference schemes with spectral-like resolution," *J. Computational Physics*, Vol.103, pp.16-42.
- [9] 1998, Williamson, C.H.K. and Brown, G.L., "A series in $1/\sqrt{Re}$ to present the Strouhal-Reynolds number relationship of the cylinder wake," *Journal of Fluids and Structures*, Vol.11, pp.1073-1085.
- [10] 1968, Dennis, S.C.R., Hudson, J.D., and Smith, N., "Steady laminar forced convection from a circular cylinder at low Reynolds numbers," *Physics of Fluids*, Vol.11, pp.933-939.