

# CFD 해석을 통한 엇갈린형 관군의 열전달 및 압력강하 특성에 관한 연구

유소<sup>1</sup>, 윤준규<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>가천대학교 대학원 기계공학과, <sup>2</sup>가천대학교 기계공학과

## A Study on Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Staggered Tube Banks using CFD Analysis

Liu Zhao<sup>1</sup>, Jun-Kyu Yoon<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Gachon Univ.

<sup>2</sup>Dept. of Mechanical Engineering, Gachon Univ.

**요약** 본 연구에서는 엇갈린형 관군에 대해 ANSYS FLUENT v.14의 SST 난류모델을 적용하여 가로피치, 튜브표면, 와류발생기위치 등의 변화에 따른 열전달 및 압력강하 특성을 이론적으로 해석하였다. CFD 해석시 튜브표면의 온도는 363 K, 입구측 공기온도는 313 K이고 입구측 속도는 5 m/s에서 10 m/s까지 가정하였다. 그 해석결과로서 열전달계수는 가로피치에 대한 영향은 큰 차이가 없었고, 튜브표면의 돌기형상은 열전달 및 압력강하 특성에서 원형이 톱니형보다 적절하게 나타내었으며, 와류발생기의 설치 경우에는 열전달특성이 튜브의 전방부 위치가 후방부 위치보다 약 4.6% 정도로 우수함을 보였다.

**Abstract** In this study, the characteristics of heat transfer and pressure drop was theoretically analyzed by changing longitudinal pitch, bump phase, location of vortex generator about the staggered tube banks by applying SST (Shear Stress Transport) turbulence model of ANSYS FLUENT v.14. Before carrying out CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis, It is presumed that the boundary condition is the tube surface temperature of 363 K, the inlet air temperature of 313 K and the inlet air velocity of 5-10 m/s. The results indicated that the heat transfer coefficient is not affected by the longitudinal pitch and the bump phase of circle type was more appropriate than serrated type in the characteristics of heat transfer and pressure drop. Additionally, in case of vortex generator location, the heat transfer characteristics showed that forward location of tube was more favorable 4.6% than backward location.

**Key Words** : Bump Shapes, Heat Transfer, Pressure Drop, Staggered Tube Bank, Vortex Generator

### 1. 서론

최근 산업의 발달로 열교환기의 열효율과 전열성능을 향상시키기 위하여 원형 관군형태로 구성된 직교류 열교환기가 산업분야에 많이 보급되고 있다. 이와 같은 열교환기는 관 배열에 따라 정렬배열과 엇갈린형 배열이 있으며, 이러한 관 배열에 따라 관 직경( $D$ ), 가로피치( $S_T$ )

및 세로피치( $S_T$ ) 등을 잘 고려하여 설계되어야 한다. 일반적으로 관군 외부의 흐름이 관군을 가로지르는 경우 대수평균온도차(LMTD)에 의한 열전달 및 압력강하의 특성을 정확하게 고찰하기 위해서 이를 지배하는 유동특성으로 관 표면에서 발생하는 경계층의 박리와 관군에서 관에 의한 음영효과(Shading effects), 관 배열에 의한 후류와 간섭 등의 영향을 파악하는 것이 중요하다[1]. 이와

\*Corresponding Author : Jun-Kyu Yoon (Gachon Univ.)

Tel: +82-31-750-5651 email: jkyoon@gachon.ac.kr

Received January 19, 2015

Accepted May 7, 2015

Revised (1st March 2, 2015, 2nd March 31, 2015)

Published May 31, 2015

같은 관군의 열전달특성으로 거의 대부분 정렬배열의 경우에는 음영효과로 인하여 압력손실이 낮은 반면에 전열 성능이 감소하는 특성을 갖으나 엇갈린형 배열의 경우에는 압력손실이 크지만 전열성능측면에는 우수한 것으로 연구되고 있다[2-5].

엇갈린형 관군의 열교환기에 대한 연구동향으로서 Park 등[6]은 체적이 일정한 경우의 엇갈린 핀 배열을 갖는 평판 열교환기를 선택하여 핀의 배열(핀의 간격 및 피칭) 및 핀 형상(핀의 상하부 직경) 변화에 따라 유한 체적법을 이용하여 제약조건을 고려한 다목적합수 문제를 해결하기 위해 설계 최적화 기법을 연구하였으며, Cho 등[7]은 엇갈린 다이아몬드형태의 핀 형이 부착된 유로에서의 난류열전달 특성을 파악하기 위해서 3차원 RANS 해석을 통하여 핀 형의 각도, 핀 형의 높이 대 채널 높이의 비, 주기방향의 핀 환과 핀 환 사이의 거리 대 채널 높이의 비를 변형시켜 유로의 열전달특성과 압력손실 등을 고찰하였다. Lee 등[8]은 상용 유동해석프로그램인 ANSYS CFX에 탑재된 난류모델을 이용하여 수치 해석을 수행함으로써 계산결과를 실험결과와 정량적으로 비교하여 CFD 해석의 적용성을 보여주었으며, Hwang 등[9]은 와류발생기가 열교환기에 어떠한 영향을 주는지에 대하여 유동을 CFD로 해석하였다.

본 연구에서는 Zhukauskas[10]가 고찰한 엇갈린형 관군의 열전달특성을 비교하기 위해 수치해석적으로 검증하였고, 이를 토대로 가로피치, 튜브표면의 돌기형상, 와류발생기의 설치위치 등의 여러 인자를 변화시켜 엇갈린형 관군의 열전달 및 압력강하 특성을 고찰하여 열교환기 설계 시 기초자료로 활용하고자 한다.

## 2. 이론해석

### 2.1 해석모델

본 수치해석을 위하여 선정된 열교환기는 Fig. 1에서 나타난바와 같이 핀이 없는 5열 7행의 엇갈린형 관군으로서 입구의 공기온도는 313 K, 유속은 5~10 m/s로 관군에 접근하며, 관의 내부로는 냉각수가 통과한다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 엇갈린형 관군의 해석모델에 대한 개략도를 나타내고 있다. 여기서 관의 직경은 10 mm이고, 세로피치  $S_T$ 는 25.4 mm이며, 가로피치는  $S_L$ 은 15 mm이다. 계산영역은 유동방향으로 5열 7행의

엇갈린형 관을 포함하여 관군의 상류(제1열관 중심으로부터 30 mm) 및 충분한 길이의 하류(제1열과 중심으로부터 120 mm)를 포함하였으며, 세로방향 배열의 1피치를 포함하는 공간으로 하였으며, 전체적으로 계산영역의 크기는 150×25.4(L×H)이다.

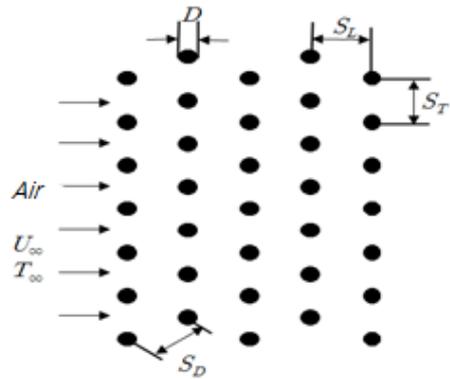


Fig. 1. Staggered arrangement of tube banks

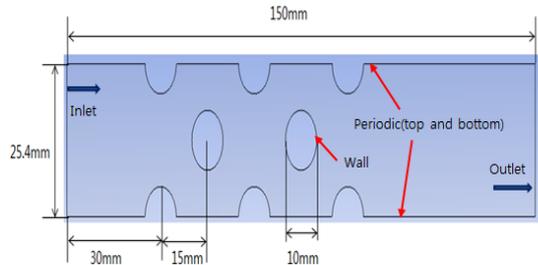


Fig. 2. Schematic of analysis domain

계산영역은 유동방향으로 5열 7행의 엇갈린형 관을 포함하여 관군의 상류(제1열관 중심으로부터 30 mm) 및 충분한 길이의 하류(제1열과 중심으로부터 120 mm)를 포함하였으며, 세로방향 배열의 1피치를 포함하는 공간으로 하였으며, 전체적으로 계산영역의 크기는 150×25.4(L×H)이다.

### 2.2 이론방법

관군의 열전달해석을 위해서는 먼저 관군에서 생기는 최대속도에 의한 무차원수로 나타나는 레이놀즈수를 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$Re_{D_{max}} = \frac{u_{max} D}{\nu} \quad (1)$$

여기서 최대흐름속도  $u_{max}$ 을 구하기 위해서 관의 엇갈린형 배열에서 대각선피치  $S_D$ 를 구하여 다음과 같은 상관식으로부터 구하여야 한다.

$$S_D = \sqrt{S_L^2 + \left(\frac{S_T}{2}\right)^2} \quad (2)$$

$$S_D < \frac{S_T + D}{2}, \quad u_{max} = \frac{S_T}{2(S_D - D)} u_{\infty} \quad (3)$$

그리고 관군에 대한 평균열전달계수  $h_m$ 는 Zhukauskas[10]가 제안한 다음과 같은 경험식을 적용하여 평균Nusselt수  $Nu$ 를 구하여만 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$Nu = FCRe_{D_{max}}^m Pr^n \left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{1/4} \quad (4)$$

여기서  $F$ 는 열로 구성된 관군에 대한 감소상수이며,  $C, m, n$ 는  $Nu$ 를 구하기 위한 상수이다.

$$h_m = \frac{Nu \cdot k}{D} \quad (5)$$

따라서 관 길이 1m당 대류열전달률  $\dot{Q}$ 은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\frac{\dot{Q}}{L} = Nh_m \pi D \Delta T_m \quad (6)$$

여기서  $\Delta T_m$ 는 대수평균온도차이다.

일반적으로 유체가 관군 입구에서 출구를 지나 유동할 때 관군에 의해 압력이 감소한다. 압력강하는 다음과 같은 상관식으로 산출할 수 있다[10].

$$\Delta P = N_L \Phi \frac{\rho u_{max}^2}{2} f \quad (7)$$

여기서  $\Phi$ 와  $f$ 는 보정계수와 마찰계수이다.

### 2.3 수치해석

엇갈린형 관군의 열전달 및 압력강하 특성을 해석을 위해 본 연구에서는 ANSYS FLUENT v14.0 프로그램을 사용하였고, Zhukauskas[10]이 고찰한 엇갈린형 관군의 열전달특성과 비교분석을 통해 여러 난류모델 중 유동의 박리와 경계층 해석에서 안정적인 결과를 보여준 SST  $k-\omega$  난류모델[11]을 사용하였다. Fig. 3은 본 연구의 수치모사에 사용된 모델링한 격자계로서 계산의 정확도와 기하학적 특성을 고려하여 육면체 격자의 크기로 조정하였다. 본 계산모델은 전체 격자수를 약 18만개로 구성하여 해석을 수행하였다.

Table 1. Boundary conditions for staggered tube

Inlet air temperature [K]	313
Inlet air velocity [m/s]	5, 6, 7, 8, 9, 10
Outlet pressure [kPa]	0
Tube surface temperature [K]	363

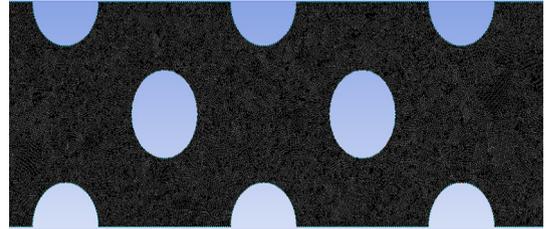


Fig. 3. Grid system of staggered tube banks

### 2.4 경계조건

경계조건은 Fig. 2와 Table 1에서 나타남과 같이 공기측 입구는 가스유량에 따른 속도범위는 5 ~ 10 m/s로 하여 1 m/s씩 변화시켰으며, 이에 대응하는 온도는 313 K로 하고 출구의 압력을 국소대기압을 기준으로 0 Pa로 하였다. 튜브길이방향의 상하면에는 주어진 경계조건을 적용하였으며, 튜브 내면의 온도는 363 K로 일정하게 적용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 수치해석 검증

Fig. 4는 해석결과에 미치는 영향을 검토하기 위하여  $4,000 < Re < 10,000$  영역에서 Standard  $k-\epsilon$ , RNG(Re-Normalization Group)  $k-\epsilon$ , SST(Shear

Stress Transport)  $k-\omega$  난류모델을 사용하여 해석을 수행한 결과를 Zhukauskas[10]의 연구결과와 비교하여 나타내었다. 그 결과로 레이놀즈수의 증가(입구속도의 증가)에 따라 압력강하의 거의 선형적으로 증가하는 특성을 나타냈으며, 여러 난류모델(Standard  $k-\epsilon$ , RNG  $k-\epsilon$ , SST  $k-\omega$ )중에서 SST  $k-\omega$  난류모델이 실험 결과와의 오차를 줄일 수 있어 민감도측면에서 가장 양호한 결과를 얻게 되어 본 연구에서는 SST  $k-\omega$  난류 모델을 적용하게 되었다.

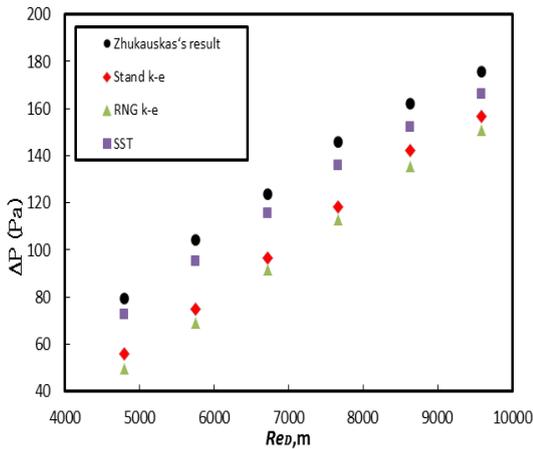


Fig. 4. Pressure drop characteristics according to the variation of Reynolds number

### 3.2 가로피치 변화의 영향

Fig. 5 와 Fig. 6은 가로피치  $S_L$ 을 15 mm부터 18 mm까지 1 mm씩 변화시켰을 때 유속에 따른 열전달 및 압력강하의 특성을 나타낸 것이다.

그 결과로  $S_L$ 의 변화에 관계없이 레이놀즈수의 증가에 따라 열전달계수가 선형적으로 증가함을 알 수 있었으며,  $S_L$ 의 변화에는 열전달특성에 큰 영향을 주지 않음을 확인하였다. 또한 압력강하의 특성도 비슷한 양상을 나타냈다.

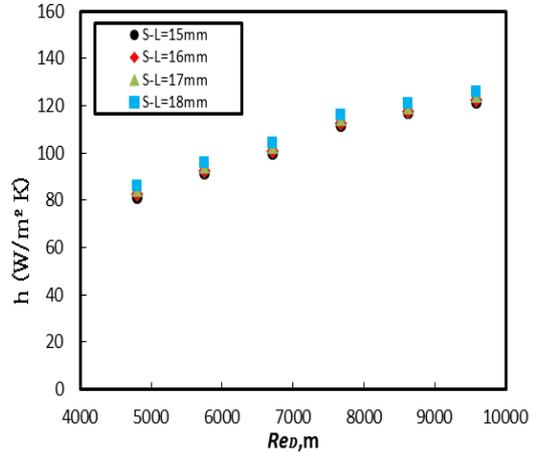


Fig. 5. Heat transfer characteristics according to the variation of longitudinal pitch

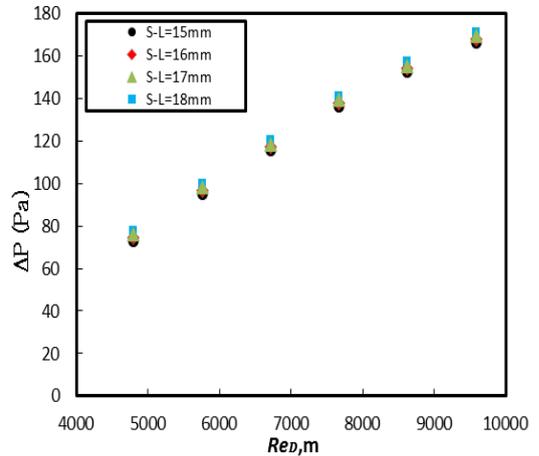


Fig. 6. Pressure drop characteristics according to the variation of longitudinal pitch

### 3.3 돌기형상의 영향

Fig. 7은 열전달면적의 증가를 통해 열전달을 향상시킬 수 있는 이점을 착안하여 튜브표면의 돌기수를 10개로 하여 돌기형상을 (a)의 경우는 톱니형 튜브를, (b)의 경우는 원형 튜브의 형상을 나타낸 것이다.

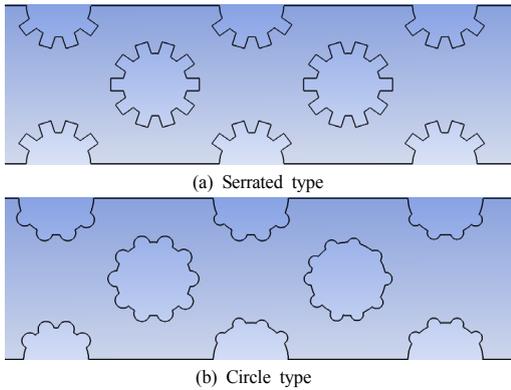


Fig. 7. Bump shapes of tube surface

Fig. 8은 튜브표면의 돌기형상조건에서 레이놀즈수의 증가에 따른 열전달특성을 나타낸 것이다. 그 결과로 기본모델에 비해 훨씬 열전달특성이 향상됨을 알 수 있었으며, 특히 원형 튜브(b)의 경우가 톱니형 튜브(a)의 경우보다 열전달계수가 더 높게 나타나 열전달성능이 우수한 점을 나타냈다. 이는 원형 튜브(b)가 톱니형 튜브(a)보다 유동저항을 적게 받고 열전달면적이 커짐으로써 열전달특성을 향상시키는 것으로 사료된다.

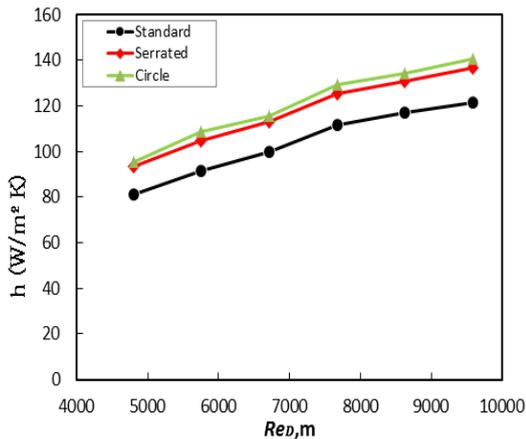


Fig. 8. Heat transfer characteristics according to the variation of bump shape number

Fig. 9는 튜브표면의 돌기형상조건에서 레이놀즈수의 증가에 따른 압력손실의 특성을 나타낸 것이다. 그 결과로 열전달특성 결과와 마찬가지로 기본모델에 비해 압력강하가 큼을 알 수 있었으며, 특히 톱니형 튜브(a)의 경우가 원형 튜브(b)의 경우보다 유동저항을 크게 받아 압

력강하가 크게 나타났다. 이로 인해 열전달 및 압력 강하의 특성은 원형 튜브(b)의 경우가 톱니형 튜브(a)의 경우보다 열전달률이 약 0.7% 정도로 향상되었고, 압력강하는 약 3.6% 정도로 낮아지는 특성을 나타내어 열전달 및 압력강하의 특성은 서로 상반관계임을 알 수 있었다.

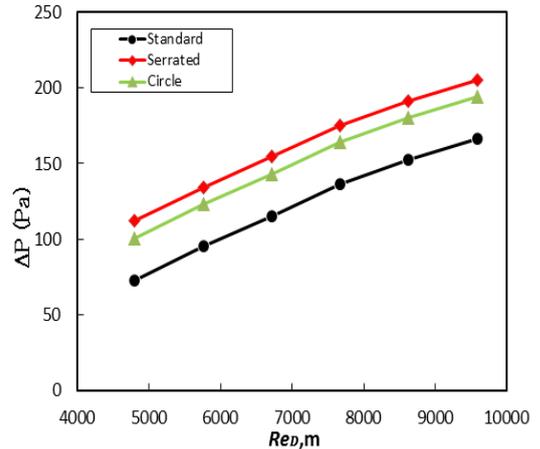


Fig. 9. Pressure drop characteristics according to the variation of bump shape number

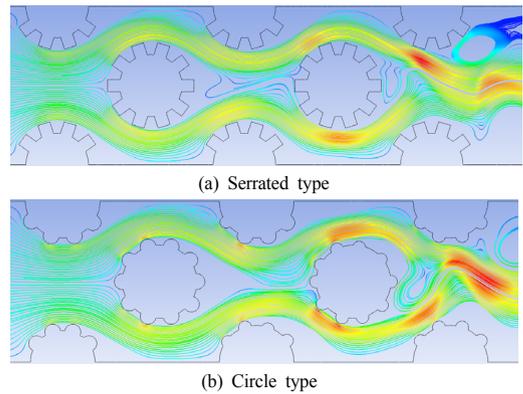


Fig. 10. Streamline contour according to the variation of bump shapes

이는 Fig. 10에 유동장 형태를 시뮬레이션한 결과를 나타내며와 같이 톱니형 튜브(a)가 원형 튜브(b)보다 와류발생이 약하여 유동흐름이 더 원만한 것으로 판단된다. 따라서 Fig. 11의 압력분포특성을 나타낸 결과와 같이 톱니형 튜브(a)가 원형 튜브(b)보다 가파른 형상에 따른 유동형태의 저항을 크게 영향을 받으므로써 압력강하

가 크게 나타났다.

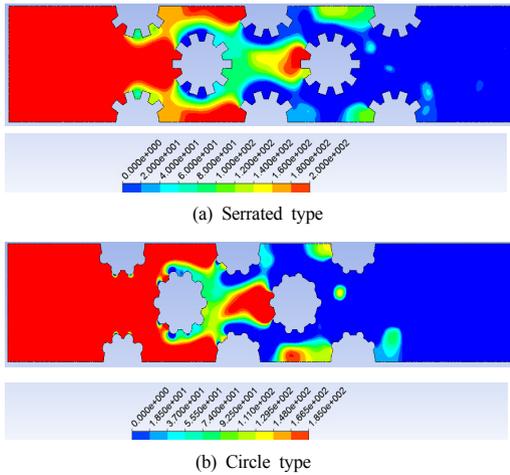


Fig. 11. Pressure contour to the variation of bump shape

### 3.4 와류발생기 설치의 영향

Fig. 12는 열전달능을 촉진시키기 위하여 와류발생기(가로 6 mm, 세로 1 mm)의 설치위치를 나타낸 것으로 (a)는 전방부에 설치하였을 경우이고, (b)는 중앙부에 설치하였을 경우이며, (c)는 후방부에 설치하였을 경우이다.

Fig. 13은 각 와류발생기의 위치변화와 레이놀즈수의 증가에 따른 열전달특성을 나타낸 것이다. 그 결과로 기본모델에 비해 훨씬 열전달특성이 향상됨을 알 수 있었으며, 특히 와류발생기의 설치위치에 따라 후방부(c), 중앙부(b), 전방부(a)순으로 열전달계수가 높게 나타났으며, 전방부(a)의 경우가 열교환기 입구에 가까움으로써 강한 와류의 영향을 많이 받아 열전달이 촉진되는 효과임을 알 수 있었다.

Fig. 14는 각 와류발생기의 위치변화와 레이놀즈수의 증가에 따른 압력강하를 나타낸 것이다. 그 결과로 와류발생기의 설치를 후방부(c)의 경우가 압력강하는 가장 크게 나타났고, 중앙부(b)의 경우는 두 번째로 크게 나타났으며, 전방부(a) 경우는 압력강하의 특성이 가장 낮게 나타났다.

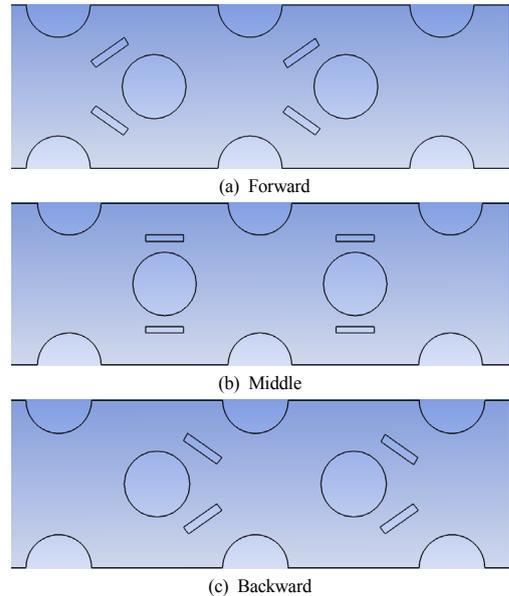


Fig. 12. Set-up location of vortex generator

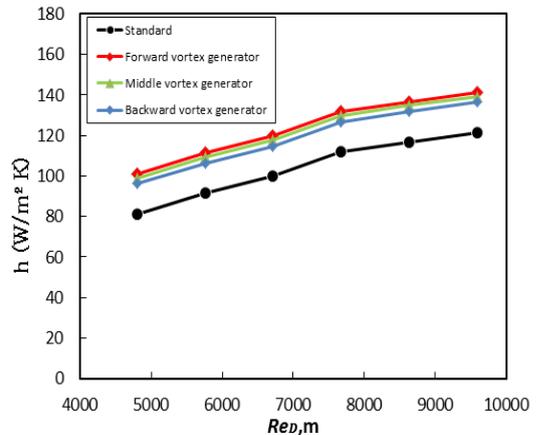


Fig. 13. Heat transfer characteristics according to the variation of vortex generator location

이는 열전달 및 압력강하의 상반관계를 나타낸 결과로서 와류발생기의 위치에서 튜브의 전방부(a)의 경우가 후방부(c)의 경우보다 열전달률이 약 4.6% 정도로 향상되는 반면에, 압력강하는 약 4.6% 정도로 낮아지는 특성을 나타내게 된 것이다. 따라서 와류발생기의 설치위치에 따라 압력구배의 영향으로 경계층의 유동특성이 크게 달라짐으로 와류발생기의 설치위치를 잘 고려할 필요가 있음을 알 수 있었다.

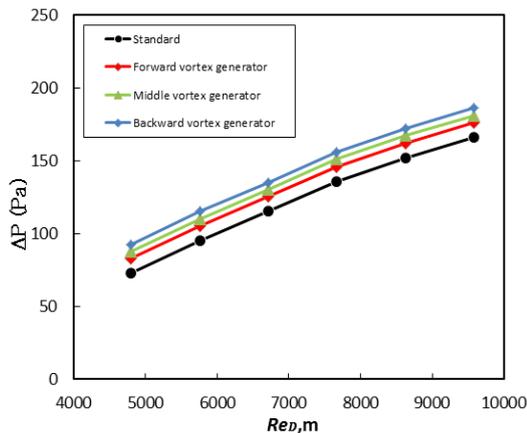


Fig. 14. Pressure drop characteristics according to the variation of vortex generator location

#### 4. 결론

본 연구에서 엇갈린형 관군의 열전달 및 압력강하 특성을 고찰하기 위해 CFD 해석을 통하여 가로피치, 튜브 표면의 돌기형상, 와류발생기의 설치위치의 변화에 따라 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 입구속도의 증가에 따라 Zhukauskas[10]의 압력강하 특성과 비교했을 때 약 8% 정도의 오차를 얻게 되어 SST 난류모델이 가장 양호한 결과를 보여 해석의 검증에 신뢰할 수 있었다.
- (2) 가로피치의 변화는 열전달 및 압력강하의 특성이 비슷한 양상을 보여 큰 영향을 주지 않음을 확인할 수 있었다.
- (3) 튜브표면의 돌기형상으로 유속에 따른 열전달 및 압력강하의 특성을 고찰한 결과로는 원형 돌기형상이 튕니형 돌기형상보다 약 0.7%의 열전달률 향상과 약 3.6% 압력강하 특성을 나타내어 우수함을 보였다.
- (4) 와류발생기의 설치위치로 유속에 따른 열전달 및 압력강하의 특성을 고찰한 결과로 와류발생기를 전방부에 설치하는 것이 후방부에 설치보다 열전달률이 약 4.6% 정도 높은 반면에, 약 4.6%의 압력강하는 낮게 나타내어 열전달측면에서 우수함을 보였다.

따라서 엇갈린형 관군의 직교류 열교환기에 적용하는 설계변수가 열전달 및 압력강하 특성에 미치는 영향이

큼으로 관군의 최적설계를 위하여 관배열의 수, 튜브표면의 돌기형상 및 돌기개수, 와류발생기의 설치위치 등을 잘 조화시킨다면 열전달성능은 더욱더 향상될 것으로 사료된다.

#### References

- [1] Y. D. Jun, M. H. Nam, B. S. Koo, K. B. Lee "Numerical Simulation of Heat Transfer Characteristics of Tube Banks with Non-conventional Arrangement ", The Society of Air-Conditioning and Refrigeration, pp. 1129-1134, 2009.
- [2] Chapman, A. J, "Fundamentals of Heat Transfer", McMillan Publishing Co., pp. 350-353, 1987.
- [3] Launder, B. E. and Massey, T. H., "The Numerical Prediction of Viscous Flow and Heat Transfer in Tube Banks", Journal of Heat Transfer, Vol. 100, pp. 565-571, 1978.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.3450858>
- [4] Faghri, M., Rao, N., "Numerical Computation of Flow and Heat Transfer in Finned and Unfinned tube banks", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 30, No. 2, pp. 363-372, 1987.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310\(87\)90124-4](http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310(87)90124-4)
- [5] Fujii, M. Fujii, T., Nagata T., "Numerical Heat Transfer", Vol. 7, pp. 89-102, 1984.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10407798408546958>
- [6] K. W. Park, D. H. Choi, K. S. Lee, K. H. Chang, "Design Optimization of Plate Heat Exchanger with Staggered Pin Arrays", The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 1441-1446, 2003.
- [7] A. T. Cho, K. Y. Kim, "Analysis of Turbulent Heat Transfer from Staggered Pin-Fin arrays with Diamond Shaped Elements at Various Geometrical Configurations", Korean Society for Computational Fluids Engineering, Vol. 13, No. 2, pp. 20-25, 2008.
- [8] G. H. Lee, Y. S. Bang, S. W. Woo, "Numerical Analysis of Turbulent Flow in a Staggered Tube Bundle by Applying CFD Best Practice Guideline", The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 2900-2905, 2012.
- [9] S. W. Hwang, J. H. Jeong, "Flow Analysis of Heat Exchanger with Delta Winglet Vortex Generators on CFD", The Society of Air-Conditioning and Refrigeration, pp.1166 -1171, 2009.
- [10] C. H. Jun, G. H. Jang, "Heat Transfer", Bosunggak Pub., pp. 224-233, 2008.

- [11] Z. Liu and J. K. Yoon, "A study on heat transfer and pressure drop characteristics of plain fin-tube heat exchanger using CFD analysis", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 38, No. 6 pp. 615-624, 2014.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2014.38.6.615>

---

유 소(Liu Zhao)

[정회원]



- 2012년 9월 : 가천대학교 기계·자동차공학과 (공학학사)
- 2015년 2월 : 가천대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)

<관심분야>  
열전달, CFD

---

윤 준 규(Jun-Kyu Yoon)

[정회원]



- 1987년 8월 : 경희대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 명지대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 기계공학과 교수

<관심분야>  
열유체공학, 자동차공학