

튜브뱅크 배열특성에 따른 전열특성변화 수치모사

전 용 두^{*†}, 남 명 환^{**}, 구 병 수^{***}, 이 금 배^{*}

^{*}공주대학교 기계자동차공학부, ^{**}공주대학교 대학원 기계공학과, ^{***}(주)동화엔텍

Numerical Simulation of Heat Transfer Characteristics of Tube Banks with Non-conventional Arrangement

Yong-Du Jun^{*†}, Myong-Hwan Nam^{**}, Byeong-Soo Koo^{***}, Kum-Bae Lee^{*}

^{*}Division of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University, Cheonan 330-717, Korea

^{**}Department of Mechanical Engineering, Kongju National University, Cheonan 330-717, Korea

^{***}Donghwa Entec. Co., Ltd, Busan 618-270, Korea

(Received May 15, 2009; revision received February 10, 2000)

ABSTRACT: A numerical study has been conducted to investigate the effect of tube arrangement on the heat transfer and the pressure loss for cross flow heat exchangers. By defining a transverse deviation factor, $\epsilon_t=l_T/S_T$, the flow pattern and the heat transfer characteristics are compared for selected ϵ_t values of 0.0(in-lined), 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5(staggered) by using a commercial software. Computational domain includes 1 pitch in the transverse direction and 5 pitches in the flow direction with due periodic boundary conditions.

Key words: Heat exchanger(열교환기), Tube bank(관군), Circular tubes(원형관), Heat transfer(열전달), Pressure loss(압력손실), Numerical simulation(수치모사)

기 호 설 명

그 리 스 문 자

D : 관직경 [mm]
 l_T : 횡방향 이격거리 [mm]
 P : 압력 [Pa]
 S_T : 횡방향 관 피치 [mm]
 S_L : 흐름방향 관 피치 [mm]

ϵ_T : 횡방향 이격도, $\frac{l_T}{S_T}$
 ν : 동점성 계수

하첨자

$Re_{D,m}$: Reynolds 수, $\frac{U_{max}D}{\nu}$
 T : 온도 [K]
 U_∞ : 자유유속 [m/s]
 U_{max} : 최대평균유속, $U_\infty \frac{S_T}{S_T-D}$ (aligned)

∞ : 자유유동상태

1. 서 론

핀-관 열교환기들은 원형 관군 형태로 많은 산업분야에 응용되고 있다. 이와 같은 열교환기에 서 관 배열의 형식은 정열배열(aligned)과 엇갈림 배열(staggered)로 대별되며, 관배열에 있어 중요

[†] Corresponding author
 Tel.: +82-41-521-9251; fax: +82-41-555-9123
 E-mail address: yjun@kongju.ac.kr

한 인자로는 관직경(D), 길이방향 관 간격(S_L) 및 횡방향 관 간격(S_T)들이다. 관군 외부의 흐름이 관군을 가로지르는 경우 전열특성은 온도차와 압력강하로 대별되는데 이를 지배하는 유동특성으로 관표면에서 발생하는 경계층의 박리와 관군에 있어 다른 관에 의한 'shading', 그리고 다른 관에 의한 후류와의 간섭 등이 중요한 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 이와 같은 관군의 열전달 특성은 유동특성에 크게 지배되므로 관련된 유동특성을 이해하기 위하여 많은 연구가 이루어졌으나⁽²⁻⁵⁾, 거의 대부분 전통적인 관배열 방식에 관한 것들이다. 일반적으로 정열배열의 경우에는 'shading' 효과로 인하여 압력손실이 적은 반면, 전열성능이 낮고, 엇갈림배열의 경우에는 압력손실이 크지만 전열성능이 우수한 것으로 이해되고 있으나, 그 밖의 배열에 대한 연구결과는 보고된 내용이 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 열교환기 전열성능 개선을 위한 방안으로서 주어진 설계조건하에서 전열관 배열의 변화에 따른 전열특성을 수치모사를 통하여 검토하고자 한다.

2. 해석모델 및 접근방법

2.1 물리적 모델

본 수치모사를 위하여 선정된 열교환기는 핀이 없는 5열의 원형관 튜브 뱅크 (Figure 1)로서 입구로부터의 자유공기는 온도 160℃, 속도 5 m/s로 튜브 뱅크로 접근하며, 원관의 내부로는 냉각수가 통과한다. 튜브뱅크를 가로지르는 유동의 레이놀즈수, $Re_{D,m}$, 는 관군을 통과하는 최대평균 유속, U_{max} 와 관직경에 의하여 결정되며 본 연구대상의 경우 $U_{max} = 9.43$ m/s, $Re_{D,m} = 13,074$

Table 1 Geometric parameters and selected inlet conditions for the present study

Tube material	Carbon steel
Number of tube rows(N)	5
Longitudinal spacing(S_L/D)	2.13
Transverse spacing(S_T/D)	2.13
Free stream air velocity(U_∞)	5 m/s
Free stream air temperature(T_∞)	160 °C

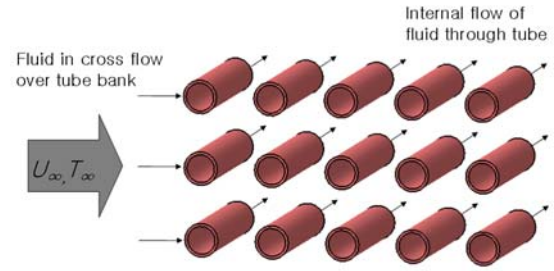


Fig. 1 An illustration of tube bank (aligned)

이다. 설정된 기하학적 변수와 입구조건 등은 Table 1에 정리하였다.

2.2 설계변수 - 튜브배열 이격도

Fig. 2 은 관군배열특성을 나타내기 위한 관군배열형식을 나타내고 있다. 정열배열을 기준으로 짝수열이 홀수열에 대하여 횡방향으로 이격된 정도를 횡방향 이격도, $\varepsilon_T = \frac{l_T}{S_T}$ 로 정의한다. 이렇게 함으로써 흐름방향에 대한 짝수열의 홀수열에 대한 이격 정도를 체계적으로 표현할 수 있으며, 정열배열은 $\varepsilon_T=0.0$ 그리고 엇갈림배열은 $\varepsilon_T=0.5$ 로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 횡방향 이격도를 0부터 0.5까지 변화시켜 가면서 전열성능(ΔT)과 압력강하(ΔP)를 비교 검토하였다.

2.3 수치 모델

본 수치해석을 위하여 상용해석 software인 ANSYS CFX V.11가 사용되었다. 이 software는 열전달을 포함하는 유동장 해석을 위한 지배방정식으로 일련의 보존형 비정상 Navier-Stokes 방

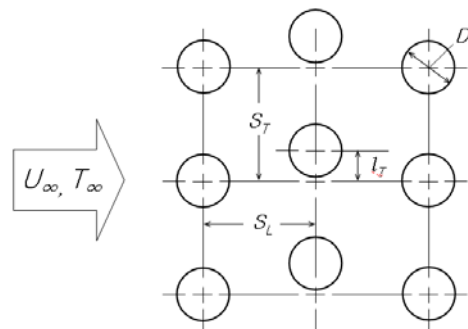
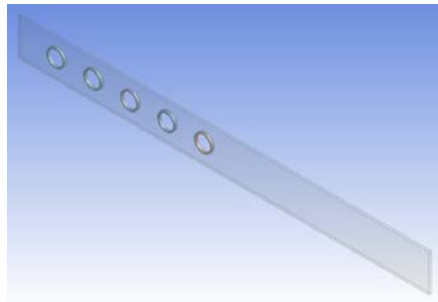
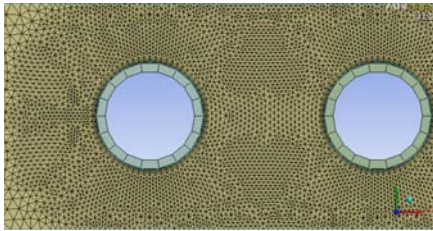


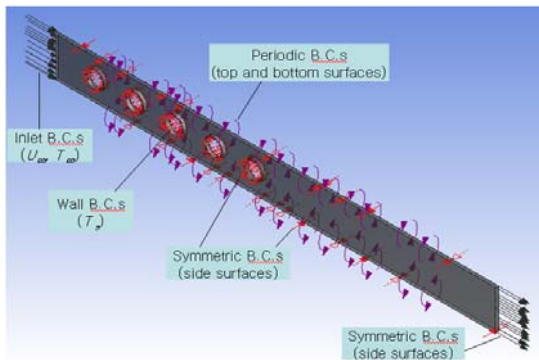
Fig. 2 Tube arrangement parameters



(a) Computational domain



(b) Grid system around tubes

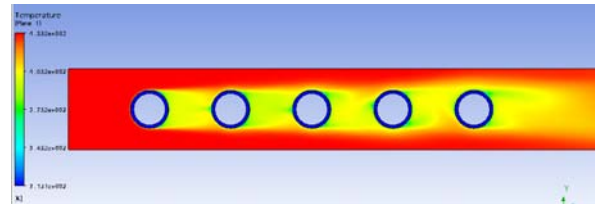


(c) Boundary conditions

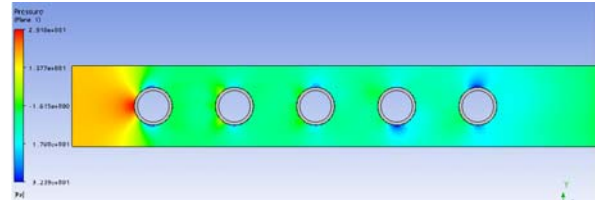
Fig. 3 Tube bank model

정식을 사용하며, 특히 유동의 박리와 경계층 해석에 안정적인 SST(Shear stress transport) 난류모델과 scalable wall function이 적용되었다.⁽⁶⁾

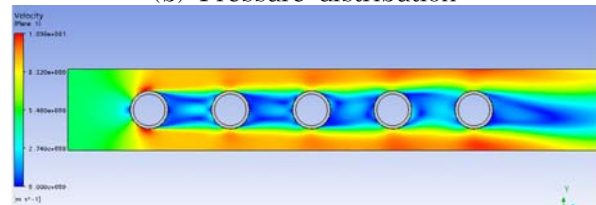
계산 영역은 유동방향으로 5열의 관을 포함하여 관군의 상류 및 충분한 길이의 하류를 포함하였으며, 횡방향 배열의 1 피치를 포함하는 공간으로 하였다. 전체적으로 계산영역의 크기는 600 mm x 54 mm x 3.6 mm (LxHxW)이다. Figure 3은 본 계산에 사용된 계산영역(a)과 전형적인 격자계(b)로서 4면체격자(tetra)를 기본으로 하고 벽면을 따라서 프리즘 격자를 5겹 사용하여 구성하였다. 경계조건으로 입구 경계조건으로는 속도(5m/s)와 온도(160°C)를, 출구 경계조건으로는 대기압을 각각 지정하였다. 튜브길이 방향의 단면



(a) Temperature distribution



(b) Pressure distribution



(c) Velocity distribution

Fig. 4 Flow field ($Re_{D,m} = 13,074$, $\epsilon_T = 0.0$)

은 대칭경계조건, 그리고 상하면에는 주기적 경계조건을 적용하였으며, 튜브 내면에는 일정온도 조건을 적용하였다. 격자계의 적절성을 판단하기 위하여 본 연구에서는 격자 개수 30만개, 60만개 및 120만개 수준의 격자계를 각각 사용하여 얻어진 결과를 분석하였으며, 그 결과 60만개 수준의 격자계로 신뢰성있는 모사결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 정열배열 유동장

Fig. 4는 정열배열($\epsilon_T = 0.0$)의 경우에 대한 수치계산 결과이다. 계산에 사용된 격자요소는 약 65만개이며, 비정상모사를 수행하였다.

Fig. 4에 나타난 유동의 경우에 제 1열을 제외한 후열 튜브들은 전열면의 상당부분이 후류영역에 덮여 주유동과의 접촉이 제한되는 것으로 나타났다. Fig. 5는 계산시 미리 설정해 놓은 관찰점에서의 시간에 따른 압력변화를 나타내고 있으며, monitor point 1은 튜브뱅크의 상류 입구조건을 나타내고 있다. 정상상태 도달 후 입구에서의

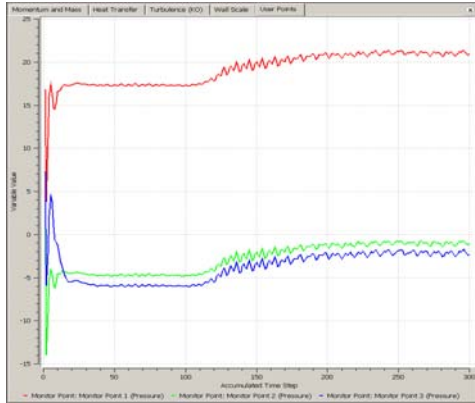


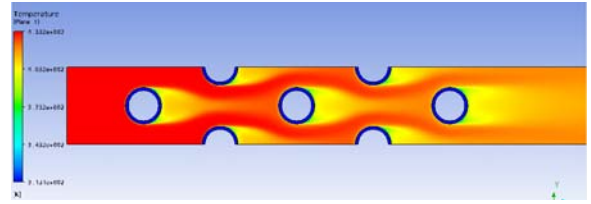
Fig. 5 Monitored pressure variations

평균압력은 20.65 Pa로 나타났으며, 압력의 떨림 현상은 유동장의 불안정성에 기인하는 것으로 판단된다.

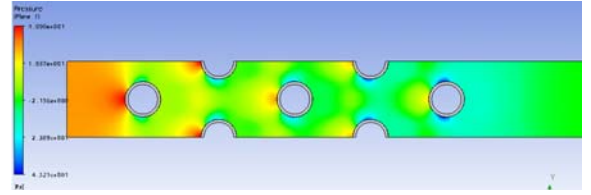
3.2 이격도에 따른 전열성능 및 압력강하

본 연구에서는 흐름 방향의 짝수열이 정열된 상태에서부터 이탈 정도에 따라 이격도($\varepsilon_T = \frac{l_T}{S_T}$)를 0.1 씩 (일부 구간은 0.05 씩) 변화시켜 가며 수치모사를 수행하여 유동장 정보를 확보하였다. Fig. 6은 엇갈림배열($\varepsilon_T=0.5$)에 대한 유동장 해석 결과이다. 본 모사조건에서 각 열들은 상류로부터의 고온공기와 접촉면이 충분히 확보되어 정열배열의 경우에 비해 전열성능의 향상을 기대할 수 있다. 그러나 빠른 속도의 기류 중심에 전열관이 놓이게 됨으로써 정체점 유동이 형성되고, 관 표면과의 간섭면적이 넓어져 압력손실이 증가하게 된다. 이와 같은 성능변수의 변화특성은 이격도 변화에 따른 수치모사 분석 결과로부터 보다 명확하게 확인할 수 있다.

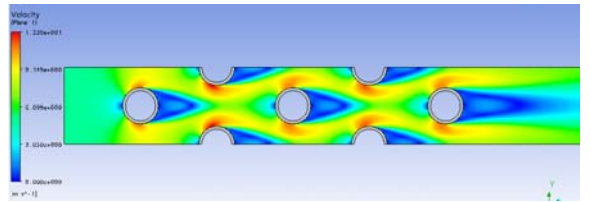
Fig. 7 및 Table 2는 횡방향 이격도(ε_T)에 따른 성능변화비율로서 각각 튜브뱅크 전후의 온도차(ΔT)와 압력차(ΔP)를 정열배열(aligned)의 경우에 대한 값의 비($r_T \equiv \frac{\Delta T}{\Delta T_{aligned}}, r_P \equiv \frac{\Delta P}{\Delta P_{aligned}}$)로 나타내었고, 압력변화율에 대한 온도변화율($\frac{r_T}{r_P}$)을 나타내었다. 그림에 나타난 결과에 따르면, 정열배열($\varepsilon_T=0.0$)을 기준으로 짝수열을 이격시킴에 따라 전열과 압력강하 거동이 변화하여



(a) Temperature distribution



(b) Pressure distribution



(c) Velocity distribution

Fig. 6 Flow field ($Re_{D,m} = 13,074, \varepsilon_T = 0.5$)

엇갈림배열($\varepsilon_T=0.5$)의 경우에는 $r_T=1.236, r_P=1.452$ 로서, 압력손실 증가율에 대한 전열성능증가율은 $\frac{r_T}{r_P}=0.851$ 로 나타났다. 이것은 엇갈림배열을 하였을 경우 정열배열에 비하여 전열성능만

Table 2 Temperature and pressure changes at various ε_T values

ε_T	r_T	r_P	r_T/r_P	Note
0.00	1	1	1	unsteady
0.05	1.021	1.137	0.898	unsteady
0.10	0.987	0.963	1.025	converged*
0.15	1.138	1.049	1.084	converged*
0.20	1.182	1.140	1.084	converged*
0.30	1.193	1.290	0.925	converged*
0.40	1.225	1.402	0.873	converged*
0.50	1.236	1.452	0.851	converged*

* 수렴조건 : RMS error $\leq 10^{-4}$

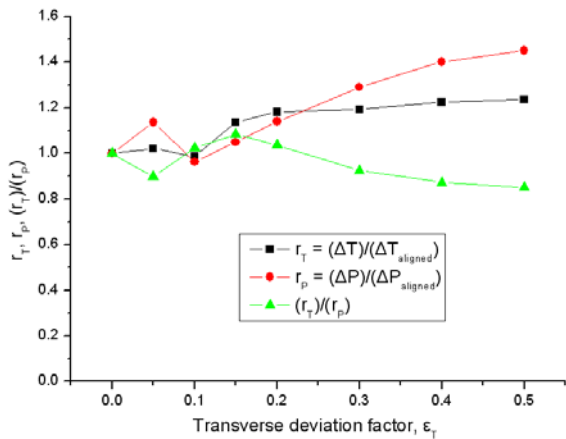


Fig. 7 Effect of deviation factor on the heat transfer performance

으로는 23.6%가 증가할 수 있으나, 수반되는 압력손실의 증가(45.2%)가 커서 그다지 효과적이지 못하다는 것을 의미한다.

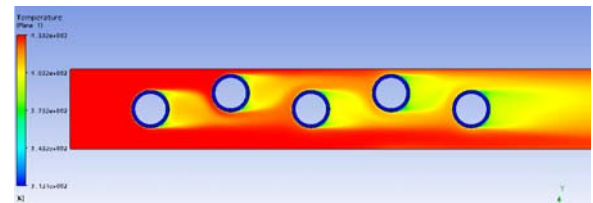
흥미로운 점은 이격도 변화에 따른 온도 및 압력의 변화는 유동현상에 의해 지배되며 그 결과가 선형적이지 않다는 점이며, 그림에서 보듯이 온도변화율이 압력변화율보다 높아지는 영역이 존재할 수 있다는 점이다. 본 연구를 통하여 검토내용 중 이격도 0.15와 0.2의 경우가 이에 해당된다. 이와 같이 전열성능이 개선되는 이유는 유동장 해석 결과로부터 어느 정도 설명이 가능할 것이다.

Fig. 8은 $\epsilon_T=0.2$ 인 경우의 유동해석 결과이다. 고온의 공기는 정열배열의 경우(Fig. 4)와 달리 제 1열 뿐 아니라 제 2열 이후의 관 표면과 접촉하게 됨으로써 유효전열면적이 확대된 반면(Fig. 4(a)), 짝수열의 이격정도가 크지 않으므로 압력손실 요소는 정열배열보다 증가했으나 엇갈림배열에 비하여 경미한 것으로 보인다.

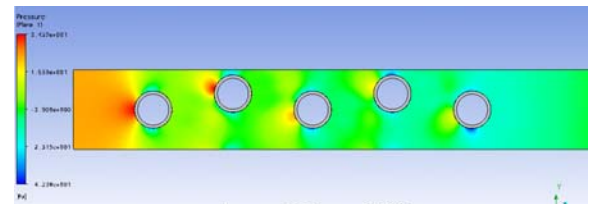
본 연구대상에 대한 수치계산 중 이격도(ϵ_T)가 작은 범위(0~0.05)에서는 비정상 유동특성을 나타낸 반면, 그 이상의 이격도 범위에서는 수렴해(r.m.s. error $\leq 10^{-4}$)를 얻을 수 있었다.

4. 결론

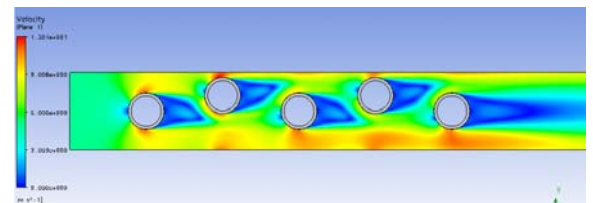
관군 열교환기의 전열성능 개선을 위한 방안으로 기존 정열배열과 엇갈림배열의 중간 배열의



(a) Temperature distribution



(b) Pressure distribution



(c) Velocity distribution

Fig. 8 Flow field ($Re_{D,m} = 13,074$, $\epsilon_T = 0.2$)

전열특성을 온도차와 압력강하 측면에서 검토하였다. 중간 배열을 정의하기 위해 정열배열로부터 짝수열의 이탈정도를 나타내기 위한 횡방향 이격도를 정의하여 배열특성을 표현하였다. 본 수치연구의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 연구대상 운전조건에 있어 정열배열의 경우와 엇갈림배열 관군 열교환기의 전열특성을 횡방향 이격도로 정의함으로써 체계적인 관군 배열 개념을 도입하였다.

(2) 연구대상 조건에 대한 수치모사를 통하여 정열배열과 엇갈림배열의 전열특성을 정량적으로 제시하고 비교하였다.

(3) 흐름 방향에 대하여 짝수 열인 관군의 횡방향 이격도에 따른 전열성능 수치모사 결과 전열성능이 압력손실효과보다 우월한 영역을 확인할 수 있었다. 본 연구대상에 대한 모사결과에 따르면 이격도 0.2 일 때에는 약 18%의 전열성능 향상(압력손실 14% 증가) 그리고 0.5 일 때 약 24%의 전열성능이 향상(압력손실 45% 증가)될 수 있다.

(4) 수치모사 결과에 대한 검증을 위해서는 실험적 연구가 필요하다.

후 기

이 논문은 2008년도 지식경제부 산업에너지 기술개발사업(2단계)에 의해서 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Chapman, A. J., 1987, Fundamentals of Heat Transfer, McMillan Publishing Co., pp. 350-353.
2. Wallis, R. P., 1934, Engineering, 148:423, pp. 327.
3. Launder, B. E. and Massey, T. H., 1978, The Numerical Prediction of Viscous Flow and Heat Transfer in Tube Banks, Journal of Heat Transfer, Vol. 100, pp.565-571.
4. Faghri, M. and Rao, N., 1987, 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.
5. Fujii, M. Fujii, T., and Nagata T., 1984, Numerical Heat Transfer, Vol. 7, pp.89-102.
6. ANSYS CFX-Solver Theory Guide, ANSYS CFX, Release 11.0.