



정현파 입구 속도 변동에 따른 열교환기 관군의 유동 및 열전달 특성

하지수[†]

계명대학교 기계공학과 교수

(2021년 1월 4일 접수, 2021년 2월 18일 수정, 2021년 2월 22일 채택)

Flow and Heat Transfer Characteristics of Heat Exchanger Tube Bank with the Sinusoidal Inlet Velocity

Ji Soo Ha[†]

Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu, Korea

(Received January 4, 2020; Revised February 18, 2021; Accepted February 22, 2021)

요약

열교환기 관군에서 덕트 입구의 속도가 일정한 경우와 정현파로 변하는 경우에 대하여 시간에 따라 배관 주위에서 유동 특성과 열전달 특성 규명을 위해 와류 분포와 온도 분포 변화를 비교 분석하였다. 입구 속도가 정현파 변동이 있는 경우에 열교환기 관군에서 대표적인 원관에서 양력과 항력의 power spectral density를 도출하여 유동 변화에 따른 주파수 특성을 살펴보았다. 입구 유속이 일정한 경우는 열교환기 관군의 입구쪽 관군 부근에서 원관 주위 유동에서 관찰할 수 있는 칼만 와류를 관찰할 수 있었다. 정현파 입구 속도 변동의 경우에서도 입구쪽 관군에서 칼만 와류가 형성되는 것을 관찰할 수 있었고 정현파 입구 속도 변동에 따른 유동 와류 변화를 관찰할 수 있었다. 온도 분포 변화는 일정한 입구 속도 변화의 경우와 정현파 입구 속도 변화의 경우 모두 유동 와류 분포에서 관찰한 것과 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 유동 주파수는 일정한 입구 속도의 경우는 37.25 Hz이며 정현파 입구 속도의 경우는 정현파 주파수와 동일하게 18.63 Hz로 나타났다. 열교환기 배관 전체의 평균 Nu수는 일정한 입구 속도의 경우에는 1051이며 정현파 입구 속도 변동의 경우는 1117로 나타나서 정현파로 입구 속도가 변하는 경우의 열전달이 6.3% 증가하는 것을 알 수 있었다.

Abstract - The change of the vorticity and the temperature distribution in heat exchanger tube bank were analyzed for the flows with the constant inlet velocity and the sinusoidal inlet velocity. The flow frequency characteristics were examined by analyzing power spectral density of lift and drag at a typical circular tube in the tube bank. Karman vortex street could be seen at the upstream region of tube bank for the case of constant inlet velocity. It could be seen that the Karman vortex street was affected by the change of inlet velocity near the circular tubes for the case with the sinusoidal inlet velocity. It was observed that the unsteady temperature distributions for both inlet velocity conditions had almost the same motion as the flow vorticity behavior. The flow frequency for the case with the constant inlet velocity is 37.25Hz, and that with the sinusoidal inlet velocity, the flow frequency is 18.63Hz, which is equal to the sinusoidal inlet velocity. The mean surface Nusselt number(Nu) for overall heat exchanger tube bank was 1051 for the case with the constant inlet velocity and 1117 for the case with the sinusoidal inlet velocity. From the result of heat transfer analysis, it could be seen that Nu with the sinusoidal inlet velocity showed 6.3% increase than that with the constant inlet velocity.

[†]Corresponding author:jisooaha@kmu.ac.kr

Copyright © 2021 by The Korean Institute of Gas

Key words : tube bank, vorticity, lift, drag, power spectral density, sinusoidal inlet velocity, karman vortex, surface nusselt number

I. 서론

발전설비는 고온의 연소가스를 열원으로 하여 전열관군으로 이루어진 열교환기에서 순환하는 보일러수로부터 고온의 증기를 만들어 터빈을 구동하고 터빈에 연동된 발전기에서 전기를 생산한다. 발전설비에서 열교환기는 원형의 배관으로 만들어 지는데 내부에는 보일러 수 또는 증기가 흐르고 외부는 고온의 연소 가스가 흐르게 된다. 고온의 연소가스가 열교환기 배관의 외부를 지나면서 양력과 항력의 변화가 발생하는데 이러한 변화로 말미암아 유동 유발 진동이 일어난다. 열교환기나 원형관 주위에서 유동에 따른 진동에 관한 연구는 구조적 특성에 관련한 연구[1-5]가 수행되어 왔다. 발전설비에 사용되는 단일 원관[6]에서와 전열관군[7]에서 양력 변동에 따른 PSD(Power Spectral Density) 특성에 관한 연구가 수행되었다. 단일 원관에서 전방류에서 일정한 속도로 유입될 때와 정현파 속도 변동이 있는 경우에 유동 주파수 특성과 열전달 특성에 관한 연구[8]도 최근에 수행되었다.

이전의 연구들을 살펴보면 입구 속도 조건이 일정한 경우에 대하여 원관이나 열교환기 관군에서 칼만 와류에 의한 양력의 시간 변화에 따른 PSD를 살펴보고 유동 변화에 따른 진동을 연구하였다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 열교환기 관군에서 유동에 의해 발생하는 진동으로 열교환기 관군의 진동에 의한 안정성을 평가하고 판단의 기준을 마련하는데 목적을 두고 연구가 이루어 졌다.

현재의 연구에서는 열교환기 관군을 대상으로 하였는데 입구 속도가 일정한 경우와 입구 속도가 정현파 변화가 있을 때, 대표적인 원관에서 와류 변화와 양력과 항력의 시간에 따른 변화 및 주파수 특성을 살펴보았다. 또한 대표적인 원관에서 입구 속도 변화에 따른 열전달 변화를 관찰하여 열전달 특성을 규명하였다.

II. 수치해석 방법

열교환기 관군에서 정현파 입구 속도 변화에 따른 와류 변화와 양력과 항력의 변화 특성, 그리고 열전달 변화를 살펴보기로 한다. 이를 위해 열교환기 관군에 대한 전산유체 해석을 수행하였다. 현재의 연구에서 전산유체 및 열전달 해석에 사용한 열

교환기 관군의 형상과 대표적인 원관의 격자 모양을 Fig. 1에 표현하였다.

Fig. 1에 표현한 것과 같이 입구 속도 경계는 왼쪽에 있고 출구는 오른쪽에 위치하였다. 그리고 윗면과 아랫면은 벽면으로 설정하였다. 열교환기 관군은 세로로 5개, 가로로 19개의 관군으로 배열하였다. 열교환기 원관 주위에는 유동의 박리와 와류 발생으로 복잡한 유동이 일어나기 때문에 Fig. 1에서 처럼 열교환기 원관 부근위에는 다른 부분 보다 많은 격자로 구성하였다. 본 연구에서 유체는 상온의 공기이며 열교환기 단관의 직경은 석탄 화력발전소의 이코노마이저에 이용하고 있는 원관의 크기인 50.8mm를 사용하였다. 열교환기 관군 덕트의 길이는 7m이며 수직 폭은 0.508m이다. 입구 경계 조건은 일정한 속도 경계조건일 때는 7.63m/s이고 정현파 속도 경계 조건일 때는 아래 식과 같이 일정속도와 정현파 속도가 같이 있게 설정하였다.

$$V = V_o + 0.5 V_o \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

여기에서 V_o 는 7.63 m/s이며 정현파 주파수인 f 는 주어진 원관 크기와 속도에 해당하는 레이놀즈수의 칼만 와류 주파수의 0.5배를 이용하였다. 또한 정현파 속도 변동 크기는 V_o 의 0.5배를 이용하였다. 현재의 연구를 통해 입구에서 일정한 입구 속도 경계 조건에서 칼만 와류 변동 주파수가 37.25 Hz로 나타났으며 이를 이용하여 정현파 주파수는 0.5배 값인 18.63 Hz를 이용하였다. 이에 따라 주파수 37.25Hz에 해당하는 주기(T)는 0.0268 sec이다. 열교환기 관군의 열전달 해석을 위해 관군의 표면에서 온도는 100 °C로 하였고 입구 공기의 온도는 상온인 25 °C로 하였다. 시간 변화 관측을 위한 시간 폭 dt 는 0.001 sec로 하여 해석을 수행하였다.

입구 속도가 일정한 경우에 상온 공기의 물성치로 계산한 Re수는 2.64×10^4 이다. 원관 외부의 유동에 대한 임계 Re수는 3.5×10^5 이므로 현재 연구의 유동은 층류로 판단되며 유동 지배방정식은 2차원 비정상상태 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식으로 다음과 같이 구성하였다.

연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

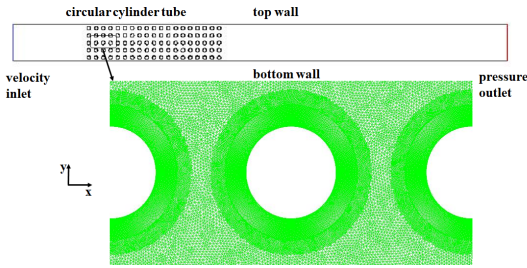


Fig. 1. Configuration of heat exchanger tube bank array and mesh near circular cylinder tubes.

운동량 방정식

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

에너지 방정식

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

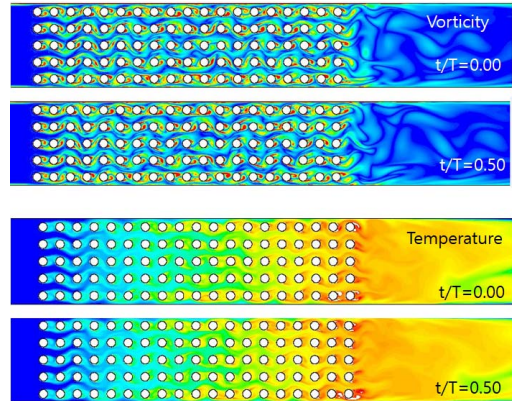
지배방정식에서 x, y 는 유동 방향 좌표와 유동의 수직방향 좌표이고 u, v 는 유동 방향 속도, 수유동의 수직방향 속도이다. ρ : 밀도, p : 압력, T : 온도, C_p : 정압비열, k : 열전도율이다.

위의 지배방정식을 해석하기 위해 SIMPLE 알고리즘[10]을 사용한 ANSYS Fluent ver. 19 프로그램을 이용 하였으며 격자의 수는 약 300만 개로 형성하였다.

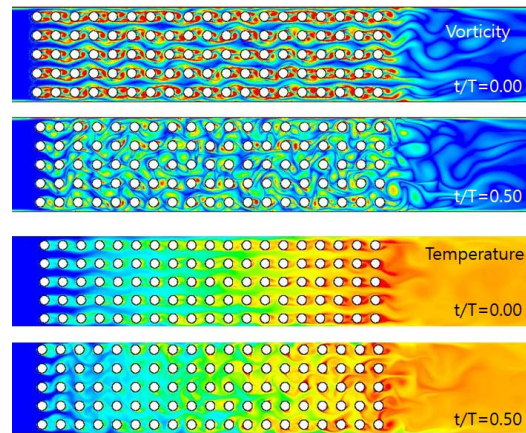
III. 결과 및 고찰

3.1. 와류 및 온도 분포 변화 비교

입구의 조건이 일정 속도일 때와 정현파 변화가 있을 때 반 주기 동안에 변화하는 와류와 온도 분포를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 t 는 시간, T 는 정현파의 한 주기 시간을 나타내었다. Fig. 2(a) 상단 두 개의 그림에는 일정한 입구 속도 조건에서



(a) constant inlet velocity



(b) sinusoidal inlet velocity

Fig. 2. Contours of vorticity and temperature at two time steps for (a) constant inlet velocity and (b) sinusoidal inlet velocity.

와류 분포 변화를 나타내었다. 입구 측에 있는 원관 주위에서 발생한 와류가 후류에 있는 원관 주위의 와류 분포에 영향을 주고 있고 후류의 관군과 전방의 관군에서의 와류는 서로 시간 위상 차이를 보여주지만 같은 주기의 와류를 발생하고 있음을 관찰할 수 있다. 하단의 두 그림은 온도 분포 결과를 보여주고 있다. 온도 범위는 온도 변화를 잘 관찰할 수 있도록 최소 25 °C에서 최대 30 °C로 하였다. 온도 분포 변화는 앞에서 살펴본 와류 변화와 같이 관군 벽면에서 열전달에 의해 유체의 온도가 상승하고 이렇게 상승한 온도의 유체는 와류에서 관찰한 것과 같은 움직임을 관찰할 수 있다.

입구 속도가 정현파로 변하는 경우에 와류와 온

도 변화를 Fig. 2(b)에 나타내었다. 속도 변동 진폭과 주파수를 변화하여 진폭과 주파수 변화에 따라 나타나는 특성을 고찰 할 수 있지만 이러한 연구는 추후 연구로 남겨두고 현재의 연구에서는 속도 변동 진폭과 주파수를 일정한 입구 속도 크기의 반값, 와류 주파수의 반값으로 설정하여 수행하였다.

그림에서 상단 두 개는 와류 변화를 나타내었는데 입구 속도가 정현파로 변하는 경우는 와류의 속도가 빠른 유동이 흐르다가 유속이 줄어들 때는 와류의 속도가 느린 유동이 흐르는 것이 반복됨을 알 수 있다. 하단 두 그림에서 온도 분포 변화를 나타내었는데 와류 분포 변화와 유사하게 거동하는 것을 관찰할 수 있다.

3.2. 와류 주파수와 열전달계수 변화 비교

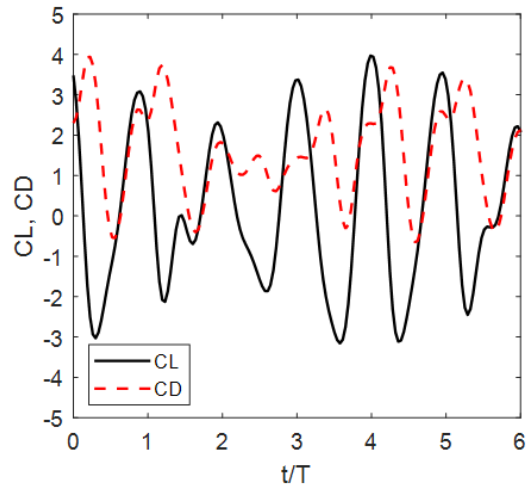
앞 절에서 살펴보았듯이 일정한 입구 속도일 경우나 정현파 입구 속도 경우 모두 와류와 온도 변화 특성이 서로 유사한 거동을 한다는 것을 알 수 있었다. 본 절에서는 와류 주파수와 대류열전달 변화를 비교하기로 한다.

현재의 연구에서 열교환기 관군에서 수직으로 가운데이고 수평으로 가운데인 3행 10열의 원관을 대표적인 원관으로 선정하여 양력계수와 항력계수를 도출하여 정현파 입구 속도 변화가 있을 때 어떠한 특성이 있는지 Fig. 3에서 살펴보았다.

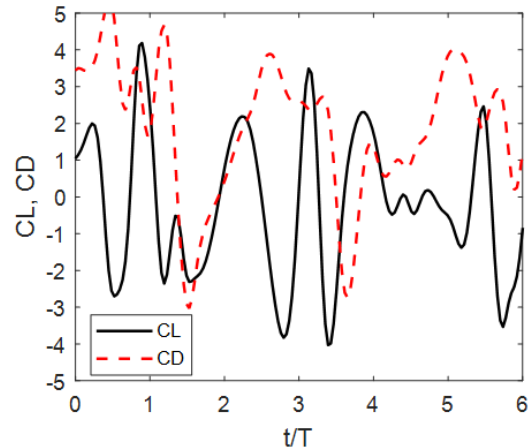
그림에서 t 와 T 는 Fig. 2에서 언급한 것과 같이 t 는 임의의 시간, T 는 정현파의 한 주기 시간이다. 일정한 입구 속도의 경우(Fig. 3(a))에는 양력 변동의 진폭 크기가 항력 변동의 진폭 보다 약 40% 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 타 연구[8]의 단일 원관에서 관찰할 수 있는 매우 주기적이고 삼각함수 변화와 같은 갈만 와류 양력계수, 항력계수 변화와는 다소 차이가 나는 변화를 관찰할 수 있는데 이는 가운데 위치의 원관이기 때문에 전방에서의 원관 후류 와류 영향으로 복잡한 와류가 복합되어서 나타나는 현상으로 판단할 수 있다.

정현파 입구속도 변화의 경우는 Fig. 3(b)에 표현하였다. 이 경우에는 양력계수와 항력계수의 진폭 크기는 거의 비슷하게 나타났다. 일정한 입구 유속의 항력계수 보다 다소 크게 나타나는 것은 정현파 입구 속도의 변화가 항력계수진폭의 크기를 증가시키는 것으로 생각할 수 있다. 또한 양력계수와 항력계수의 시간 변화를 살펴보면 정현파 입구 속도의 변화에 따라 소와 밀한 변화를 관찰 할 수 있다.

와류의 시간에 변화에 대한 주파수 특성은 타 연구[9]에서 고찰하였으며 일정 입구 속도의 경우에



(a) constant inlet velocity



(b) sinusoidal inlet velocity

Fig. 3. Lift and drag coefficient with time at the circular cylinder: row No. 3 and column No. 10.

양력과 항력은 37.25Hz에서 가장 큰 값을 가졌다. 정현파 입구 속도의 경우에는 양력의 주파수는 37.25Hz이었고 항력은 정현파 주파수인 18.63Hz으로 나타났었다.

Fig. 4에 대표적인 원관 표면에서 두가지 입구 속도 조건에 대하여 누셀수(Nu, Nusselt number)의 변화를 나타내었다.

누셀 수는 다음과 같이 정의 된다.

$$N = \frac{hD}{k} \quad (6)$$

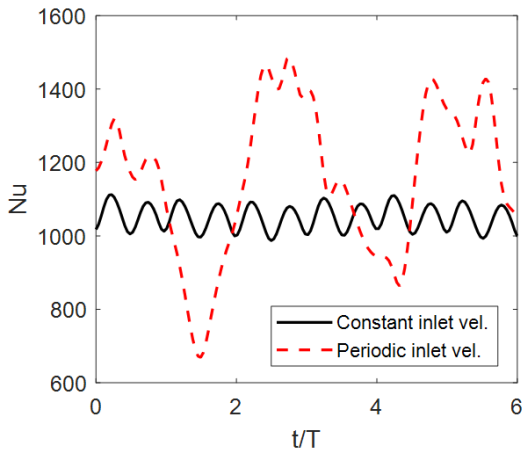


Fig. 4. Mean surface Nusselt number with time at the circular cylinder: row No. 3 and column No. 10.

일정 입구 속도의 경우에는 시간에 따라 Nu 값이 주기적으로 변하지만 평균 값은 1051이며 변동 진폭은 정현파 입구 속도 경우 보다 상대적으로 작게 나타났다. Nu의 변화 주파수는 73.00Hz로 나타났다으며 이는 와류 변화 주파수의 두 배이다. 원관을 지나는 유동은 원관의 위와 아래에서 와류가 한번씩 순서대로 발생하여 와류에 대한 주파수는 상하로 발생한 와류의 한 주기가 주파수로 나타나지만 원관 표면의 평균 열전달은 상하에서 발생한 와류가 한쪽에서 발생한 것이 반대에서 발생한 것과 동일한 값으로 나타나기 때문에 와류 주파수의 두 배로 되는 것으로 판단된다.

정현파 입구 속도의 경우에는 원관 표면 평균 Nu 값의 진폭이 크게 나타났고 시간 평균 Nu 값은 1117이며 이 값은 일정 입구 속도의 경우보다 6.3% 증가한 값이다. 정현파 입구 속도 변화에 따라 열전달이 증진되는 것을 알 수 있다.

IV. 결론

열교환기 관군에서 정현파 입구 속도 변화가 있는 경우에 원관 주위 와류 분포와 열전달 특성을 살펴보았으며 아래와 같이 결과를 요약할 수 있다.

일정 입구 속도의 경우에는 원관의 상하에서 와류가 주기적으로 발생하고 후류로 갈수록 전방에서 발생한 와류와 혼합된 유동을 보여주었다. 정현파 입구 속도의 경우에는 정현파 주파수의 영향을 받아서 와류가 강하게 발생하다가 약하게 발생

하는 것을 반복하여 유동이 형성되는 것을 관찰하였다.

열교환기 관군의 가운데 원관을 대표적인 원관에서 유동 특성인 양력과 항력 그리고 평균 Nu 수의 주파수 특성을 살펴보았다. 양력과 항력의 주된 주파수는 일정 입구 속도의 경우는 37.25 Hz로 나타났다고 정현파 입구 유속의 경우는 양력의 경우는 37.25Hz이지만 항력은 정현파 주파수인 18.63Hz로 나타났다.

열전달 특성을 표면의 평균 Nu수로 분석하였다. 일정 입구 속도의 경우는 평균 Nu 값이 1051으로 나타났으며 주파수는 73.00Hz로 양력이나 항력 주파수의 두 배로 나타났다. 정현파 입구 속도 변화의 경우에는 평균 Nu 값이 1117로 나타났으며 일정 입구 속도의 Nu 값 보다 6.3% 증가하였으며 이로부터 정현파 입구 속도 변화가 열전달을 증가시키는 것을 알 수 있었다.

사용기호

- p : pressure [Pa]
- u, v : velocities for x and y axes [m/s]
- k : thermal conductivity [W/mK]
- h : convective heat transfer coefficient [W/m²K]
- T : Temperature [°C]
- Cp : specific heat at constant pressure [J/kg°C]
- f : frequency [Hz]
- D : circular cylinder diameter[m]

그리스 문자

- ρ : density [kg/m³]
- μ : viscosity [kg/ms]

참고문헌

- [1] Blevins, R.D., et al., "Experiment on vibration of heat exchanger tube arrays in cross-flow", *Trans. 6th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Paper B6/9,(1981)
- [2] Taylor, C., et al., "Experimental determination of single and two-phase cross flow induced forces on tube rows", *Flow Induced Vibration*, **104**, 31-39, (1986)
- [3] Chen, S.S., and Jendrzeczyk, J.A., "Fluid excitation forces acting on square tube array", *Journal*

- of Fluids Engineering*, **109**, 415, (1987)
- [4] Axisa, F., et al., "Random excitation of heat exchanger tubes by cross-flows", *Int. ASME Winter Symposium on Low-Induced Vibrations and Noise*, CEA-CONF-9744, (1988)
- [5] Lee, K.B., et al., "A study on flow-induced vibration of tube array in uniform cross flow (I)", *Transactions of the KSME B*, **117**(5), 924-932, (1982)
- [6] Ha, J.S., Lee, B.Y., "A study on the characteristics of lift fluctuation power spectral density in a heat exchanger tube array", *J. of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, **16**(10), 6641-6646, (2015).
- [7] Ha, J.S., et al., "A study on the flow induced vibration on a heat exchanger circular cylinder", *J. of Energy Engineering*, **24**(3), 109-114, (2015)
- [8] Ha, J.S., "Flow and Heat Transfer Characteristics of a Circular Cylinder with the Periodic Inlet Velocity", *J. of the Korean Institute of Gas*, **23**(3), 27-32, (2019)
- [9] Ha, J.S., "A Study on the Flow Characteristics in Tube Banks due to the Upstream Periodic Velocity Fluctuation", *J. of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, **21**(4), 446-451, (2020).
- [10] Patankar, S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, 126-131, (1980)
- [11] Zhukauskas, A., *Heat Transfer from Tubes in Cross Flow*, (1972)