

직렬 4원주 주위의 유체유동 및 열전달에 관한 실험적 연구

최순열* · 김민수†

(원고접수일 : 2008년 3월 10일, 원고수정일 : 2008년 5월 13일, 심사완료일 : 2008년 7월 10일)

An Experimental Study on Fluid Flow and Heat Transfer Around Four Circular Cylinders of In-line

Soon-Youl Choe* · Min-Soo Kim†

Abstract : Heat exchangers are commonly used in practice in a wide range of application, from heat and air-conditioning system in a household, to chemical processing and power production in large plant. An Experimental study was conducted to investigated the fluid flow and heat transfer around four circular cylinders of in-line in a cross flow of air. The local and average heat transfer characteristics for tube banks are investigated in the present study. Heat transfer in a heat exchanger usually involves convection in each fluid and conduction through the wall separating the two fluid. The in-line pitch ratio was in the range $1.5 \leq L/d \leq 4.0$, where L is the center distance and d the cylinder diameter, and in the Reynolds number $8,000 \leq Re \leq 50,000$. The local and mean Nusselt numbers were estimated. Subsequently, the heat transfer characteristics of four circular cylinders are found to exhibit a strong dependency upon the separation point of their upstream cylinders.

Key words : Separation point(박리점), Stagnation point(정체점), Attachment point(부착점), Heat exchanger(열교환기), Circular cylinder(원관), Tube bank(관군)

1. 서 론

최근, 고성능·고밀도 열교환기의 개발과 함께 열교환기의 전열 특성 및 성능개선을 위한 연구가 활발해지고 있다. 열교환기는 강도, 경제성 등의 관점에서 관형열교환기가 광범위하게 사용되고 있는데 이에 관한 연구로서, 관군 주위의 유체 유동과 열전달에 관한 많은 연구가 행하여 지고 있다.

Mabuchi등⁽¹⁾은 원주군에 작용하는 유체역학적 진동력에 의한 진동기구의 해명의 관점으로 부터 복수의 원관이 병렬 2열 및 3열로 배열된 경우의 압력손실을 측정하고, 원관 간격비가 작아짐에 따라 압력손실은 증가하며, 항력계수는 증가한다고 보고하고 있다. Aiba등⁽²⁾은 바둑판형 배열관군에 대해서 열전달과 유체수송을 위한 동력을 위한 흐름 방향 간격의 최적 피치를 원관 직경의 1.3배라

† 교신저자(전북대학교 기계설계공학부, E-mail : kimms@chonbuk.ac.kr, Tel:063)850-0824)

* 군산대학교 동력기계시스템 공학부

고 발표하였으며 Nakai등⁽³⁾은 대단히 조밀한 원관군내 유동의 압력변동과 속도변동을 고찰하였다. 관군의 기본이 되는 일열 관군 주위의 유동과 관련해서도 종래로부터 많은 연구가 이루어지고 있다. 직렬 2원관에 대해서는 원관 축간거리와 원관 직경 d 와의 비 L/d 가 3.5~3.8을 경계로 하여 2원관 유동저항과 후방의 와류가 급변하는 이른바 도약현상은 잘 알려져 있다. Igarashi⁽⁴⁾는 변동압력을 측정하고 레이놀즈수에 따른 2원관 주위의 유동모양을 상세하게 분류하고 있으며 또한 Strouhal수가 Reynolds수에 반비례하는 특이한 유동 모양에 주안을 두고 좁은 간격의 특이한 유동을 고찰하였다. 직렬 2원관의 열전달에 대해서는 Kostic등⁽⁵⁾이나, Hiwada등⁽⁶⁾의 연구가 있다. 이들의 연구는 모두 아입계 영역에 대해서이지만 Okasima⁽⁷⁾는 높은 Reynolds수의 초입계 영역에 대해서 실험을 행하였다. 직렬 3원관에 대해서는, Igarashi⁽⁸⁾가 아입계 Reynolds수 범위에서 유동 특성을 고찰하고 직렬 2원관의 Strouhal수에 관한 특이한 유동 등 불안정한 유동은 직렬 3원주에서는 나타나지 않는다고 보고하고 있다. Aiba등⁽⁹⁾은 $Re > 48,000$ 에서 평균열전달율은 원관간격의 영향을 별로 받지 않는다고 보고하고 있다. 직렬 4원관에 대해서는 Igarashi⁽¹⁰⁾는 아입계 Reynolds수 범위에서의 유동특성은 직렬 3원관인 경우와 각각 일치하는 것으로 보고하고 있다.

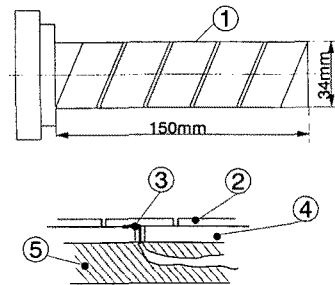
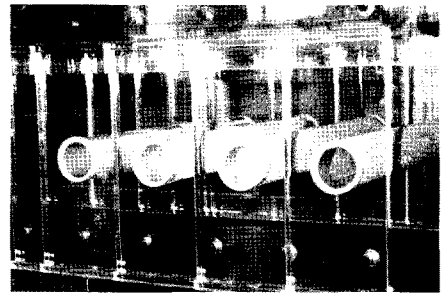
본 연구는 이상과 같은 연구 배경을 바탕으로 직렬 4원관을 채택하여 원관 간격과 Reynolds수를 변수로 하여 강제대류 열전달 실험을 통한 열교환기 열전달 성능에 미치는 영향을 1, 2번째 원관을 중심으로 규명하고자하는 것이다.

2. 실험장치 및 측정방법

2.1 실험장치

실험 장치에 사용된 풍동은 저속 개방형 취출 형식으로 최대속도가 25m/s이고 난류강도가 1% 이하이다. 측정부는 플렉시글래스로 제작 되었으며 높이는 400mm, 폭 150mm, 길이 1200mm의 장방형으로 양측면은 원관 간격이 다른 판을 끼울수

있도록 되어있다. 원관의 배열은 관군의 기본적 배열의 하나인 직렬 4원관의 배열로 하였으며, 실험원관은 직경 $d=34\text{mm}$, 두께 3mm, 길이 150mm의 염화비닐제 원관으로 Fig.1에 표시된 것과 같이 원관 주위에는 직경 $70\mu\text{m}$ 의 동-콘스탄탄 열전대를 37개소에 원관 중앙부의 표면을 따라 10° 간격으로 나선상으로 설치하였다. 그 위에는 전열면으로서 폭 23.5mm, 두께 0.03mm의 스텐레스 박판을 나선상으로 감고 박판의 양단에는 동관 전극을 용접 하였다. 또 원관 내부에는 열손실을 최소화하기 위하여 원관 중공부에는 발포 우레탄을 충전하였다. 실험에서는 실험용 원관을 풍동의 측정부의 양측 벽에 삽입하고, 유동 방향에 직교하도록 4원관을 배치하였다. 제1원관은 풍동의 노즐 출구로부터 180mm의 위치에 고정하고, 원관 간격은 원관직경의 1.5~4.0배의 범위에서 변화하였다. 주류속도(U_∞)는 제1원관 보다 150mm 상류측에서 측정하고 표준 가열 관과 마노메타에 의해 측정 하였다. 전열면의 가열은 스텐



- ① Test cylinder ② Stainless steel sheet
- ③ Thermocouple ④ Vinyl chloride
- ⑤ Insulation

Fig. 1 Arrangement of cylinders and schematic diagram of heating tube

레스 박판 양단의 등전극을 교류전원에 접속하고 원관 표면의 최대국소 온도가 45°C를 넘지 않도록 슬라이더스에 의해 제어 하였다. 레이놀즈수에 따라 열유속의 범위는 1.5~11 kW/m²로 변화하였다. 열전달 실험은 측정 원관만을 가열하여 원관 표면의 온도분포가 정상상태가 되었을 때 측정하였다.

2.2 측정방법

전열면 온도는 원관표면의 열전대의 신호를 디지털 멀티메타(IWATSU-VOAC7413)로 읽고 전압을 온도로 환산하는 방법으로 구했다. 열유속은 원관 양단 전극의 전압과 전류에 의해 산출 하였으며 열유속이 일정한 것으로 가정하고 물성치는 주류온도에 대한 값을 사용하여 아래의 식으로부터 국소열전달율, 국소Nusselt수, 평균Nusselt수를 구하였다.

$$q_w = \frac{V \cdot I}{S} \tag{1}$$

$$h = \frac{q_w}{t_\theta - t_\infty} \tag{2}$$

$$Nu = \frac{h \cdot d}{\lambda} \tag{3}$$

$$Nu_m = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} Nu(\theta) d\theta \tag{4}$$

원관으로부터의 열전도와 복사에 의한 열손실이 4원관 주위의 유동에 미치는 각 원관의 영향을 고려하는 것은 어려운 일이므로 본 연구에서는 이것의 영향은 무시 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 국소열전달율

본 실험의 기준이 되는 직렬 4 원관에 대해서 원관 간격 L/d=1.5, 1.76, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 3.75, 4.0 및 Re=50,000, 40,000, 30,000, 20,000, 13,000, 10,000, 8,000의 조건에서 실험을 행하고 그 결과에 대해서 고찰하였다.

Fig.2는 본실험의 정밀도를 비교하기 위하여 다른 연구자들의 단독 원관의 평균Nu수(Nu_m)를 Re수 변화에 따라 각각 나타내고 있다. Nu_m은 본 실험의 결과가 Kostic^[5]의 결과와는 잘 일치되고 있으나 Hiwada^[6], Aiba^[9] 등의 결과 보다는 약간 높은 5% 정도의 차이를 보이지만 경향에 있어서는 큰 차이가 없다. 따라서 본 실험에 사용된 실험원관 및 측정의 정밀도는 신뢰할 수 있을 것으로 사료된다.

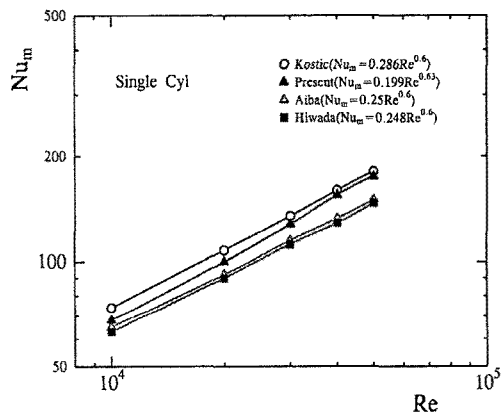


Fig. 2 Comparison of mean nusselt number with single cylinder

제1원관의 국소 Nusselt수 분포 예를 L/d=1.5, 4.0의 경우에 대해서 Fig.3(a), (b)에 나타내었다. 원관 전방의 국소 Nusselt수 분포는 원관간격 L/d의 영향은 별로 없다고 할 수 있지만 원관 후면의 박리역에서는 (b)에 나타낸 바와 같이 L/d의 크기가 커지면 Nu의 분포는 전반적으로 높아진다. 이것은 원관 간격이 작아지면 제1, 제2원관의 사이에 준정상적인 밀폐된 와영역이 형성되어 2원관으로의 주류 진입이 적어지기 때문이다.

한편, L/d의 크기가 커지는 경우에는 이른바 유동의 도약현상이 생겨 제1원관 으로부터도 와류가 방출되어 제1원관의 후면은 활발한 와운동에 노출되어 박리역에서의 열전달은 회복되고, 단독 원관과 같은 정도나 그 이상이 되고 있다. Re가 13,000보다 클 경우에는 원관 간격에 관계없이, θ = ± 90°에서 Nu수의 극소치 Nu_{min}이 보이고 있다. Re수가 13,000보다 작을 경우에는 원관 간격

L/d의 증가와 함께 원관 후면의 열전달율이 회복되어 L/d=4.0에 도달하면, ± 90°에서 극소치가 된다.

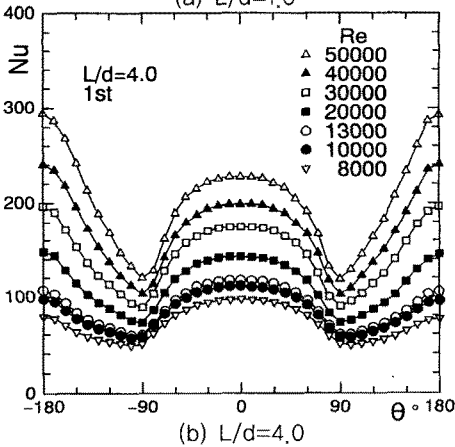
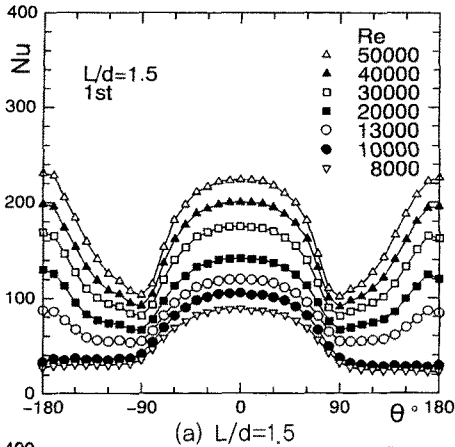


Fig. 3 Variation of local nusselt number of 1st cylinder

제2원관의 국소Nusselt수 분포의 대표 예를 L/d=1.5, 4.0의 경우에 대하여 Fig.4(a), (b)에 나타내었다. Nu_{max}를 나타내는 각도는 Re>13,000의 경우에는, 제1원관으로부터 박리전 단층의 부착에 따라, L/d= 1.5에서는 원관 전방의 $\theta = \pm 70^\circ$ 부근에서, Re≤13,000의 경우에는 Re>13,000의 경우보다 10° 정도 하류측에 존재하고 있다. L/d=4.0에서는 $\theta = 0^\circ$ 에서 최대치가 되고 직렬 2원관에서 발생하는 도약현상이 직렬 4원관의 제2원관의 경우에도 각각 동일한 원관 간격에서 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

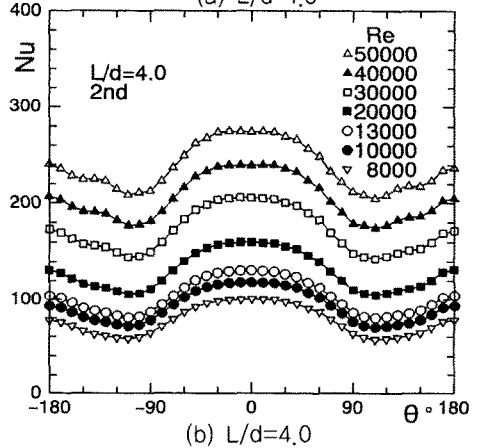
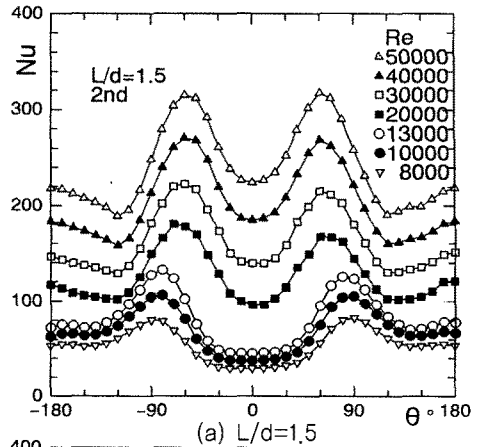
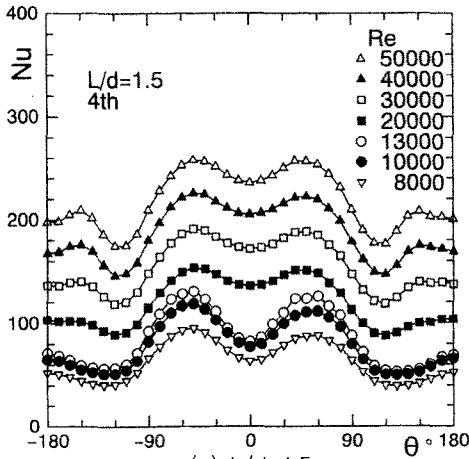
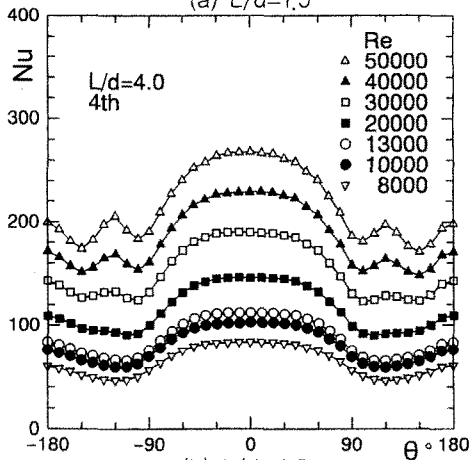


Fig. 4 Variation of local nusselt number of 2nd cylinder.

제4원관의 국소 Nu수 분포의 대표 예를 L/d=1.5, 4.0의 경우에 대하여 Fig. 5(a), (b)에 나타내고 있다. 제3원관의 분포는 본 논문에는 나타내지 않았으나 제4원관의 경우와 각각의 분포는 거의 일치하고 있다. L/d=1.5의 경우에는 Re 수 20,000부근을 넘으면 그 분포현상이 약간 차이가 나기 시작하며, Re≤13,000에서는 원관 전방의 열전달이 상당히 저하되고 있는 것을 알 수 있다. L/d=4.0의 경우에는 원관 전방으로의 주류의 진입이 증대하기 때문에 열전달이 증가되어 전방지점 $\theta = 0^\circ$ 에 Nu_{max}가, $\theta = 110^\circ$ 부근에서 Nu_{min}가 Re수의 변화에 관계없이 존재하고 있다. 국소 Nu수 분포에 미치는 원관 간격의 영향을 Re=50,000의 경우에 대하여 Fig.6(a), (b)에 나타



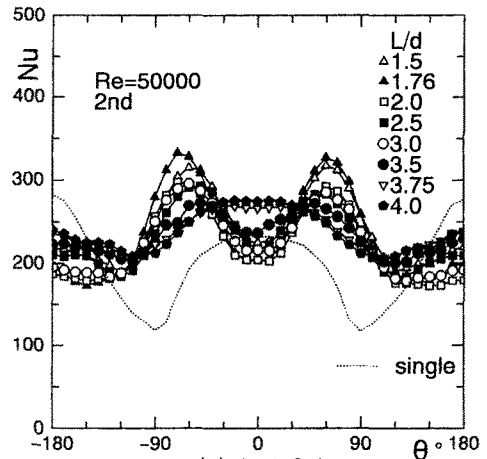
(a) L/d=1,5



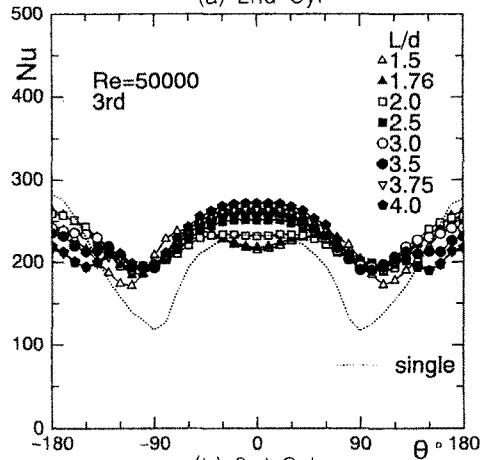
(b) L/d=4,0

Fig. 5 Variation of local nusselt number of 4th cylinder

내었다. 제2원관에서는 L/d에 의한 분포형상이 상당히 차이가 나는 것을 알 수 있다. Nu_{max} 는 L/d에 크게 의존되고 L/d가 작은 쪽이 큰 값을 보인다. 또 박리영역에 대해서는 L/d가 작은 쪽이 열전달은 저하되고 원관의 전방 영역을 제외하고 열전달율은 단독(Single)원관의 경우보다 상당히 크다. 제4원관의 분포는 본 논문에 나타내지 않았으나 제3, 4원관은 거의 같은 분포 형상이며 L/d ≤ 2.0의 경우에는 원관 전방 부근의 열전달율은 단독(single) 원관의 경우보다 약간 낮다. 한편, 후방 영역에서는 원관 간격에 관계없이 단독 원관의 경우보다 낮다.



(a) 2nd Cyl



(b) 3rd Cyl

Fig. 6 Variation of local nusselt number with L/d

3.2 평균열전달율

제1원관의 평균Nu수 Nu_m 의 값을 Re수의 변화에 따라 Fig.7(a)에 나타내었다. L/d = 1.5, Re(13,000의 경우를 제외하고, L/d ≤ 3.0에서는 Nu_m 의 L/d에 따른 변화는 별로 크지 않다. 그렇지만 L/d=4.0에서는 도약현상에 따른 원관 후면의 열전달이 회복되어 L/d ≤ 3.0의 경우보다 열전달율은 높다.

L/d=1.5의 경우는 Re ≤ 10,000에서 원관 후면의 열전달이 극단적으로 나빠지기 때문에, 다른 L/d 과의 차이가 크게 된다.

제2원관에서 Nu_m 의 Re수에 따른 변화를 Fig.7(b)에 나타내었다. Re ≥ 20,000이 되면 원관

간격에 의한 의존성은 작아지고, 거의 하나의 직선으로 정리된다. $L/d=1.5$ 의 경우, $Re \leq 13,000$ 에서는 다른 L/d 과의 차이가 크게 나타나고 있다. 이것은 원관 전방의 열전달이 극히 낮게 되기 때문이다.

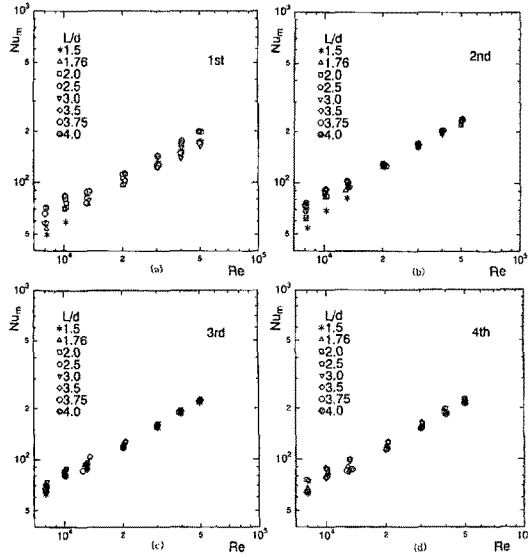


Fig. 7 Mean nusselt number of cylinders with L/d

제3원관의 Nu_m 의 Re 수에 따른 변화를 Fig.7(c)에 나타내었다. 제1, 2원관과 같은 모양으로 Nu_m 은 Re 수가 크게 되면 원관 간격 (L/d)의 의존성은 그다지 크지 않다는 것을 알 수 있다. 제4원관은 제3원관과 유사한 경향을 보인다.

평균 Nu 수 Nu_m 의 원관 간격 L/d 에 따른 변화를 Fig.8(a)에 나타내었다.

제1원관에 대해서는, $L/d \geq 3.5$ 에서 특히 $Re \geq 40,000$ 의 경우에 Nu_m 의 급격한 증가를 보이고 있다. 이것은 원관 간격이 커지고 유입속도가 커짐에 따라 후방 와류에 의한 열전달율의 증가에 기인한 것으로 사료된다. Fig.8(b)에 나타난 제2원관의 Nu_m 은 $L/d > 3.0$ 의 경우에 제1원관의 경우만큼은 아니지만 증가되고 있다. 이와 같은 경향은 Aiba 등^[9]에 의해서도 보고되고 있다.

제3원관에 대한 Nu_m 의 L/d 에 따른 변화를 Fig.8(c)에 각각 나타내었다. 제3원관의 Nu_m 은 L/d 에 따른 변화는 작다. $L/d \geq 3.5$ 의 경우에 제2

원관과 비교하여 제3, 4원관의 경우는 역으로 약간 감소하는 경향을 보인다. 이것은 전방 원관의 영향으로 주류의 진입이 감소하기 때문으로 사료된다.

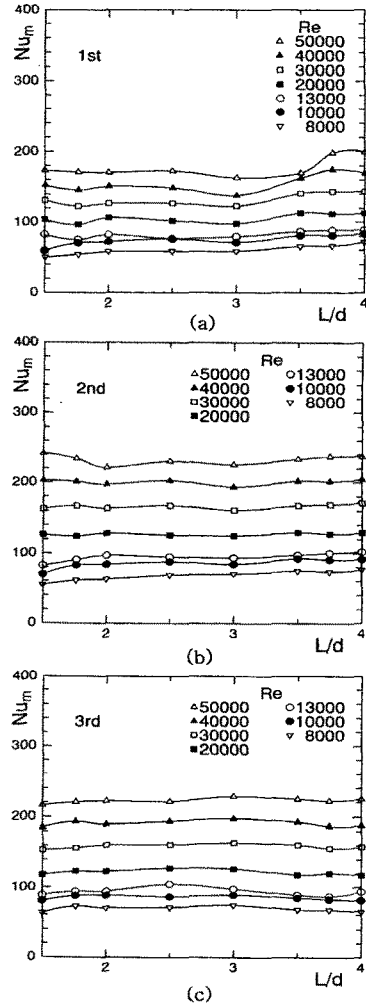


Fig. 8 Mean nusselt number of 1st, 2nd and 3rd cylinder with Re No

4. 결 론

직렬4원관에 대하여 원관간격과 Reynolds수를 변수로 하여 강제대류 열전달실험을 통한 열교환기 전열성능에 미치는 영향에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 제1원관의 경우 $Re < 13,000$ 이면 원관 간격

의 증가와 함께 원관 후면의 열전달율이 회복되어 $L/d=4.0$ 에 도달하면 $\theta=\pm 90^\circ$ 에서 Nu_{min} 이 나타난다.

평균열전달율은 $L/d=4.0$ 에서는 유동의 도약에 따라 원관 후면의 열전달이 회복되어 $L/d\leq 3.0$ 의 경우보다 열전달율이 높다. 그리고 $L/d\geq 3.5$ 에서 $Re\geq 40,000$ 의 경우에는 Nu_m 의 급격한 증가를 보인다.

(2) 제2원관의 경우 Nu 수의 분포는 $Re>13,000$ 일때 전방 원관으로부터의 박리 전단층의 부착에 따라 $L/d=1.5$ 에서는 $\theta=70^\circ$ 부근에서 최대치가 된다. $Re\leq 13,000$ 의 경우에는 $Re>13,000$ 의 경우보다 10° 정도 하류에 존재한다. 평균열전달율은 $L/d=1.5$ 의 경우, $Re\leq 13,000$ 에서 다른 L/d 과의 차이가 크게 나타나고 있는데 이것은 원관 전방의 열전달이 극히 낮게 되기 때문이다.

참고문헌

[1] Ikuo Mabuchi, Masaya Kumada, Kenyuu Oyakawa and Munehiko Hiwada, "Fluid Flow Behavior around a Circular Cylinder Perpendicular Arrangement of Circular Cylinders, JSME B, Vol. 56, No.526, pp.1588~1594, 1990

[2] Shinya Aiba, "Heat Transfer around a Circular Cylinder with a Single Tripping Wire, JSME B, Vol 57, No 536, pp.1371~1378, 1991

[3] Tetsushi Nakai, Kyoza Ayukawa and Tsutomu Inoue, "Cross Flow Through in Closely Arranged Circular Cylinders", JSME B, Vol.62, No.593, pp65~71, 1996.

[4] Tamotsu Igarashi "Characteristics of the Flow around Two Circular Cylinders Arranged in Tandem", JSME B Vol.24, No.188, pp323~328, 1981

[5] Z.G.Kostic and S.N.Oka, "Fluid Flow and Heat Transfer with Two Cylinders in Cross Flow", Int.J.Mass Trans.

Vol15, pp. 279~299, 1972

[6] Munehiko Hiwada, Ikuo Mabuchi and Hideaki Yanagihara, "Fluid Flow and Heat transfer of Two Circular Cylinder with Same Diameter, JSME B, Vol.48, No.427, pp. 499~508, 1983

[7] Okasima, "Fluid Flow around a Two Cylinder of in-line with High Reynolds Number." JSME B, Vol.44, No.384, pp.2663~2671,1979

[8] Tamotsu Igarashi and Hiroaki YAMASAKI, "Fluid Flow and Heat Transfer Around Two Circular Cylinders Closely Arranged in Tandem", JSME B,Vol.55, No.517, pp.2800~2808,1989

[9] Shinya Aiba, Hajime Tsuchida and Terukazu OTA, "Heat Transfer Around a Tube in a Bank, JSME, Vol.23, No.181, pp. 1163 ~ 1170, 1980

[10] Tamotsu Igarashi, "Characteristics of the Flow around Four Circular Cylinders", Vol.51, No.467, pp.2061~2067, 1986

저 자 소 개



최순열(崔順烈)
 1947년 6월생, 1986년 서울산업대학교 졸업, 1993년 조선대학교대학원 졸업(공학석사), 1999년 한국해양대학교 졸업(공학박사), 현재 군산대학교 동력기계시스템공학전공 교수.



김민수(金敏洙)
 1958년 5월생, 1986년 서울산업대학교 기계공학과 졸업, 1988년 조선대학교 기계공학과(공학석사), 1993년 전북대학교 기계공학과(공학박사), 현재 전북대학교 기계설계공학부 교수.