

# 엇갈림 관군에서 원관 주위의 열전달에 미치는 파울링 영향에 관한 실험적 연구

김민수\* · 백병준\*\* · 박복춘\*\*  
(2000년 4월 12일 접수)

## An Experimental Study of Fouling Effect on the Heat Transfer Around a Tube in Staggered Tube Banks

Min-Soo Kim, Byung-Joon Baek and Bock-Choon Pak

**Key Words:** Fouling Effect(파울링 영향), Fouling Resistance(파울링 저항), Staggerd Tube Bank  
(엇갈림 관군), Scale Thickness(스케일 두께), Separation Point(박리점)

### Abstract

An experimental study has been performed to investigate the forced convection heat transfer characteristics of 6 circular cylinders in staggered arrangement in a cross flow of air. The water scale deposited on condenser wall of power plant was used to investigate the effect of roughness of scaled surfaces. The relative roughness (average diameter of scale/cylinder diameter) was in a range of  $k/d=0.0066, 0.0111, 0.0167, 0.0222$  and  $0.0278$ . The cylinder spacings( $L/d$ ) varies from 1.5 to 4.0, where  $L$  denote the cylinder spacings along and normal to the upstream uniform flow direction. The Reynolds number was varied in a range of  $10,000 \leq Re \leq 50,000$ . The local and mean Nusselt numbers were investigated as a function of scale roughness, the cylinder spacing and Reynolds number. The results are compared with those of clean cylinder and inline tube bank. Subsequently the mean fouling resistance over the entire circumference was estimated from those results as a function of scale roughness, the cylinder spacing and Reynolds number.

### 기호설명

$d$  : 원관직경 (mm)  
 $h$  : 열전달계수 ( $W/m^2 \cdot K$ )  
 $k$  : 스케일입자 크기 (mm)  
 $L$  : 이웃 원관의 중심까지의 거리 (mm)  
 $Nu$  : 누셀트수  
 $q$  : 열유속 ( $W/m^2$ )  
 $Re$  : 레이놀즈수

$R_{mf}$  : 평균파울링저항 ( $m^2 \cdot K/W$ )  
 $T_{inf}$  : 입구유동온도( $^{\circ}C$ )  
 $T_w$  : 벽온도 ( $^{\circ}C$ )  
 $U_{inf}$  : 입구유동속도 (m/s)  
 $\lambda$  : 공기의 열전도도 ( $W/m \cdot K$ )  
 $\theta$  : 전방 정체점으로부터의 각도( $^{\circ}$ )

### 하첨자

$c$  : 크린(clean)  
 $f$  : 오염(fouled)  
 $m$  : 평균(mean)  
 $w$  : 벽(wall)  
 $max$  : 최대(maximum)  
 $min$  : 최소(minimum)

\* 회원, 익산대학 열냉동관리과  
E-mail : kimms@mahan.iksan.ac.kr  
TEL : (063)840-6688 FAX : (063)842-1382  
\*\* 회원, 전북대학교 기계공학부  
E-mail: baekbj@moak.chonbuk.ac.kr  
TEL : (063)270-2373 FAX : (063)270-2388

1. 서론

관군을 이룬 실린더 주위의 유동 및 열전달 문제는 열교환기등의 공학적 응용과 관련되어 많은 연구가 진행되고 있으나, 원형 실린더 주위의 유동 현상에 대한 정확한 예측은 그 기하학적 단순함에도 불구하고 고려해야 할 변수의 다양성으로 인해 실험이나 해석에 어려움이 있다. 임용섭 등<sup>(1)</sup>에 의해 Reynolds에 따른 박리점의 변화를 고찰하고 박리점 이후의 유동구조를 분석하는 등 진전이 계속되고 있으며 원형 실린더가 조밀하게 배열된 관군의 열전달 특성은 열교환기의 소형화, 고성능화의 요구에 따라 유체 수송동력과 관련되어 연구가 진행되고 있다.

엇갈림 관군사이의 간격이 좁아질 경우 이웃하는 원관에 미치는 열전달 특성은 열교환기를 소형, 고성능화 하는데 많은 제약조건이 되고 있다. Aiba 등<sup>(2)</sup>은 산업현장에서 폭넓게 사용되고 있는 원관 간격에 대하여 각 원관 주위의 정압분포, 평균속도, 난류강도, 열전달율을 측정하여 그들의 상관 관계를 검토하였다. Bott<sup>(3)</sup>는 열교환기를 통과하는 고온유동의 압력과 온도강하가 전열표면 위에 스케일의 축적을 가져온다고 보고하였다.

시간에 따라 증가하는 스케일 축적은 열저항 증가에 따른 열교환기의 열적, 수력학적 성능 저하를 야기시키게 되며, 파울링 영향을 보상하기 위한 열전달 면적 증가 또한 피할 수 없게 된다. 이에 관한 산업용 유체와 공정 장치에 대하여 많은 파울링 문제들이 보고되고 있다.

Watkinson<sup>(4)</sup>은 나선형과 평판형 튜브의 내부에 발생하는 오염저항을 검토한바 있으며, Chamra와 Webb<sup>(5)</sup>는 열전달 촉진형과 평판형 튜브의 오염비에 관한 실험을 통하여 평판형보다는 촉진형의 오염비가 높음을 확인하였다. Ota 등<sup>(6)</sup>과 Ota와 Nishiyama<sup>(7)</sup>는 지열수 발전에 사용되는 단일원관 및 타원관 주위의 파울링 영향을 검토하여 스케일입자의 크기와 유체의 속도에 따른 파울링 저항을 연구하였다.

최근 Kim과 Ota<sup>(8)</sup>는 직렬 원관군 주위의 전열 표면 위에 축적되는 지열수 스케일의 파울링 영향에 관하여 스케일 입자의 크기, 원관간격, 레이놀즈수를 변수로 원관 주위의 온도분포를 측정하여 크린(clean) 원관의 경우와 비교하여 발표되었으나 엇갈림 관군에 있어서 스케일의 오염에 의

한 열전달의 영향은 아직까지 명확하게 밝혀지지 않고 있다. 열교환기에서 파울링에 의한 영향을 최소화하기 위해서는 운전조건을 효과적으로 변화시켜 그 변화 과정을 파악하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 관군의 관의 유동의 하나인 엇갈림 관군의 기본적인 배열에 관하여 스케일 축적에 의한 오염의 영향을 스케일 입자의 크기, 실린더 간격, Reynolds수 등을 변수로 하는 관군의 열전달 특성변화를 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

실험은 입구에서 원심 팬에 의해서 구동되며 난류강도가 1% 이하인 저속개방형 풍동을 사용하여 수행하였다. 측정부는 높이 300 mm, 폭 300 mm, 길이 900 mm의 장방형 plexiglass로서 제작하였으며 실험 원관을 측면에서 고정 할 수 있도록 구성하였다. Fig. 1은 실험에 사용된 엇갈림배열(staggered arrangement)관군의 기본적인 좌표표를 보이고 있다. 실험 원관의 제작은 Fig. 2에 도시한 바와 같이 외경 38 mm, 두께 3 mm, 길이 320 mm의 염화비닐제 원관으로서 표면에는 깊이 0.4 mm, 직경 0.5 mm의 구멍에 직경 0.25 mm의 T형 열전대를 10° 간격으로 37개를 삽입한 후 절연성 접착제(Thermal Bond, OMEGA)를 사용하여 공간을 충전하였다.

이 원관의 표면에 두께 0.03 mm, 폭 35 mm의 스테인리스 박판(SUS304)을 나선형으로 감아 양단에 동판전극을 용접한후 전원에 연결하여 가열하였다. 전원공급은 직류전력공급장치(HP 6673A,

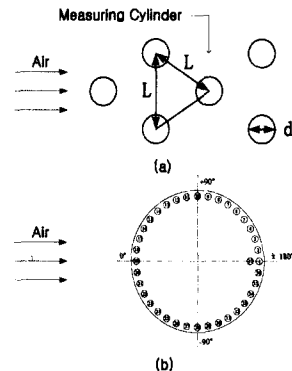


Fig. 1 Cylinder arrangement and thermocouple locations

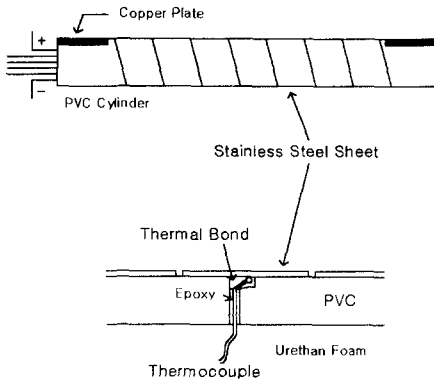


Fig. 2 Heating cylinder

최대전압 35V, 최대전류 60A)에 의하여 표면온도를 조절 할 수 있도록 하였다. 원관 내부의 증공부는 발포우레탄재로 충전하여 외부로의 열손실을 최대한 억제하였고 표면의 스케일은 화력발전소 열교환기로 부터 채취한 이산화규소가 주성분인 silica 스케일을 분쇄하여 여러 가지 크기로 분류하였다. 실험에 사용된 스케일 입자의 상대조도는  $k/d=0.0067, 0.0104, 0.0150, 0.0195, 0.0251$ 의 5종류를 선택하여 원관의 표면에 양면접착 테이프를 이용하여 균일하게 부착시켰다. 첫 번째 원관은 풍동 노즐 출구로부터 180 mm의 위치에 고정하였고 이후의 후방 원관의 간격은  $L/d=1.5, 1.75, 2.0, 2.5, 3.0$ 로 조절하였다. 주유동속도( $U_{inf}$ )는 약 5~22 m/s의 범위로서 Reynolds수 10000~50000에 대해 실험하였다. 전열면의 가열은 표면의 온도가 최대 50°C를 넘지 않도록 조절하였으며 실험 원관의 열유속은 1.7~7.5 kW/m<sup>2</sup>의 범위에 있었다. 원관 표면의 온도는 가열개시로부터 약 1시간후 원관표면의 온도가 정상상태에 도달된 후를 Graphtec사의 다기능 분석기(Multifunction Analyzer MA6000)를 사용하여 측정하였다. 국소열전달률, 국소Nusselt수, 평균Nusselt수는 전도 및 복사에 의한 열손실과 벽면의 영향을 무시하고 아래의 식을 이용하여 산출하였다.<sup>(9~11)</sup>

$$h = \frac{q}{(T_w - T_{inf})} \quad (1)$$

$$Nu = \frac{h \cdot d}{\lambda} \quad (2)$$

$$Nu_m = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} Nu(\theta) d\theta \quad (3)$$

여기서  $q$ 는 단위면적과 시간당의 열유속이며  $T_w$ 는 벽면온도이고,  $\lambda$ 는 공기의 열전도도로서 측정부 입구유동( $T_{inf}$ )의 온도에서 산정된 값이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

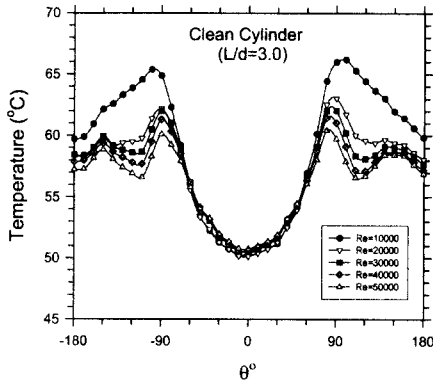
엇갈림 관군을 이루는 실린더 주위의 국소 열전달 계수에 미치는 Reynolds수, 실린더 간격 및 스케일 입자 크기의 영향에 대한 실험이 수행되었다. Fig. 3은 스케일이 부착되지 않은 원관인 경우,  $L/d=3.0, 10,000 \leq Re \leq 50,000$  일 때 원관 표면온도와 국소 Nusselt수의 분포를 나타내고 있다. 정체점의 온도가 50°C가 되도록 가열된 원관 표면의 온도는 정체점에서 멀어질수록 층류 경계층이 발달됨에 따라 온도가 상승하게 되고, 박리점(separation point) 근처에서 최대값에 도달된다. Reynolds수가 클수록 최대온도는 낮아지며 층류로부터 난류로의 천이 및 후류의 영향에 의한 온도 변화가 나타남을 알 수 있다. 그리고 원관 후면을 따라 다시 감소하게 된다. Fig. 3(b)는 측정된 온도분포에 의해 얻어진 국소 Nu를 나타내고 있다. 상류 정체점에서 최대값을 보이며 이후 원관 표면을 따라 감소하여  $\theta = \pm 90^\circ$  부근에서 최소값에 도달한다. 이 지점은 경계층이 표면으로부터 이탈되는 박리점으로 추정되며, 원관의 후면부에서는 박리된 유동영역 내에 존재하는 후류의 영향으로 다시 증가하게 된다. Re가 증가함에 따라 Nu의 분포는 약간의 변화를 보이며  $\theta \approx \pm 120^\circ$  지점에서 두 번째 최고점을 형성한다. 이러한 현상은 단독 원관 일 때,  $Re \geq 140,000$ 의 높은 범위에서 나타나는데<sup>(12)</sup> 본 실험의 경우에는 엇갈림 배열의 관군사이에서 가속된 유동의 효과에 의해 상대적으로 낮은 Re에서 유사한 현상이 나타나고 있다. 이후 와류의 영향으로 다시 증가하는 전형적 원관외부 유동현상을 보이고 있다.

Fig. 4는 원관 간격과 Re수에 따른 국소 Nu의 분포를 나타내고 있다. 국소 Nu의 분포는 모든 원관 간격에서 양호하게 대칭적으로 나타나며,  $Re=10,000$ 의 경우에 관군을 형성했을 때가 단일 원관의 경우보다 약간 높게 나타났으나, Re가 증

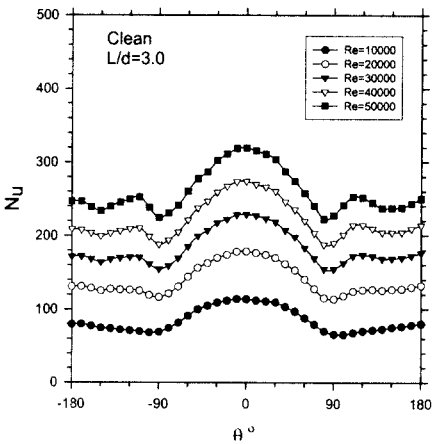
가함에 따라 이 차이는 크게 상승하는 것을 알 수 있다. 또한 원관 간격이 좁아짐에 따라 정체점에서의 최대값은 증가하며 이후 원관 후면으로 갈수록 급격하게 감소한다. 좁은 간격의 경우 원관후면( $\theta \approx \pm 135^\circ$ )에서의 국소 Nu는 단독 원관의 경우보다도 낮게 나타나고 있는데, 이것은 주위 원관에 의하여 와류형성이 억제되었기 때문이며 박리점은 단독 원관보다 전진하여  $\theta \approx \pm 70^\circ$  부근에서 발생하였다.

Fig. 5는 스케일 두께  $0.0067 \leq k/d \leq 0.0195$ 의 단독 원관에 대한 국소 Nu 분포를 나타낸 것이다.  $k/d=0.0067$ 의 가장 작은 스케일의 경우에 Re와 무관하게 클린 원관과 유사한 분포를 보이지만 스케일 층의 단열 효과 때문에 약간 낮게 나

타난다.  $Re=20,000$ 에서 스케일 조도에 의한 영향은 전반적으로 전체 원관 표면에 걸쳐 크지 않음을 알 수 있다. 그러나  $Re=50,000$ 에서는 스케일 조도가 증가함에 따라 국소 Nu 분포가 클린 원관과 많은 차이를 나타내고 있다. 이는 상류 정체점으로 부터 발달되는 층류경계층이 높은 스케일 조도로 인하여 난류로 천이됨에 따라 나타나는 현상으로 국소 Nu는 증가하여  $\theta \approx \pm 30^\circ$  부근에서 최대값을 보인다. 이후 원관 표면을 따라 국소 Nu는 감소되어  $\theta \approx \pm 120^\circ$  부근에서 최소값에 이르며 이 지점에서 난류경계층이 박리된다. 박리된 유동 영역에서는 스케일층의 단열



(a)



(b)

Fig. 3 Temperature distribution and local Nusselt number on the clean surface for  $L/d=3.0$

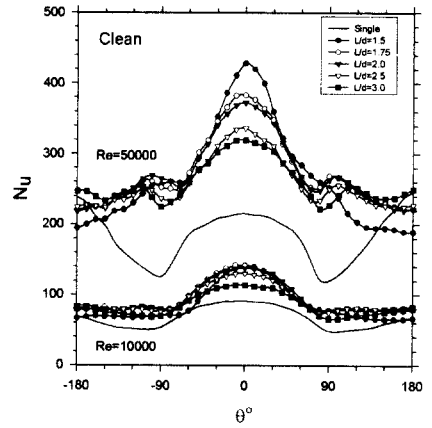


Fig. 4 Local Nusselt number on the clean surface at  $Re=10000$  and  $50000$

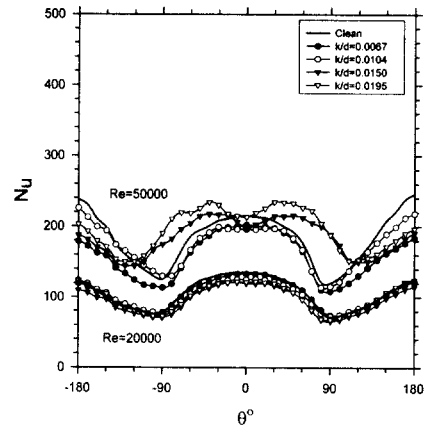


Fig. 5 Local Nusselt number on the single fouled cylinder at  $Re=20000$  and  $50000$

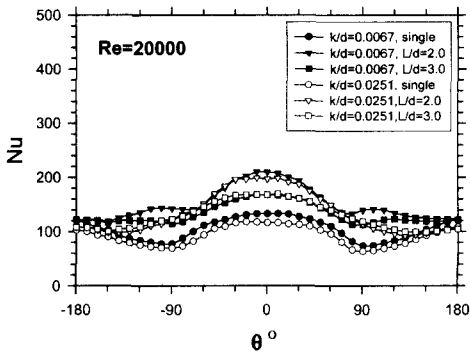
효과가 지배적으로 작용하게 되어 국소 Nu가 클린 원관보다 더 낮은 값을 갖게 된다.

Fig. 6은 엇갈림 관군(staggered tube bank)에 대한 국소 Nu의 분포를 원관 간격과 표면조도의 영향에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 6(a)의 비교적 낮은 Re=20,000에서는 원관 간격이 증가하게 되면 원관 전면의 열전달비가 저하되고 박리점으로 추정할수 있는  $Nu_{min}$ 의 위치가 불명확해진다. 최대 Nu는 정체점에서 나타나고 있으며, 국소 Nu는 원관 간격이 좁은 L/d=2.0인 경우가 3.0인 경우에 비하여 관군을 통과하는 높은 접근속도 때문에 높게 되나 스케일 조도의 효과는 원관의 후면을 제외하고 전체적으로 크지 않다. 반면에 이 스케일 조도의 영향은 Re 증가에 따라 크게 나타나며, 특히 단독 원관의 경우는 뚜렷한 차이가 나타나는 것을 Fig. 6(b)에서 볼 수 있다. k/d=0.0251의 큰 스케일 입자가 부착된 원관의

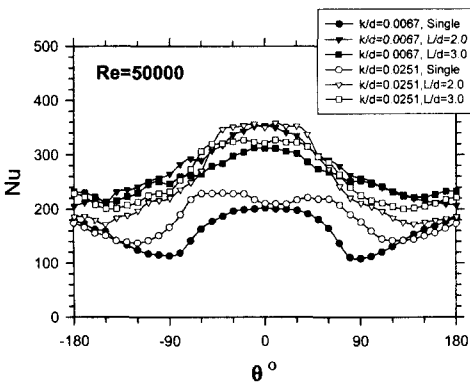
전면에서는 국소 Nu가 크게 증가되고 있으며 극심한 난류의 발생으로 인하여 최대값의 위치는 불명확하게 나타나고 있다. 스케일 입자 크기의 증가에 따라 국소 Nu는 원관 표면을 따라 급하게 감소되고 원관의 후면에서 더욱 낮은 값을 나타낸다.

Fig. 7은 클린원관의 국소  $Nu_c$ 에 대한 스케일 부착 원관의 국소  $Nu_f$ 의 비 ( $Nu_f/Nu_c$ )를 Re와 표면조도의 변화에 따라 나타낸 그림이다. 작은 스케일과 낮은 Re(Re=20,000)의 경우에 국소  $Nu_f$ 는 거의 클린원관의  $Nu_c$ ( $Nu_f/Nu_c \approx 1$ )와 비슷하나 스케일자가 커짐에 따라 국소 Nu는 전체 원주에서 거의 일정하게 감소되는 것을 알 수 있는데, 이는 스케일 층의 열저항에 의한 것으로 판단된다. 특히, 원관의 하류부분에서 Nu의 비는 크게 감소했으며,  $\theta = 120^\circ$  부근에서 나타난 최소값은 클린 원관보다 70%정도 감소했다. Re=50,000의 경우에는 국소 Nu에 대한 스케일 조도의 효과는 원관 전면부에서 크게 변화하였다. 정체점( $\theta = 0^\circ$ )에서의 Nu는 클린 원관보다 낮게 나타나나, 입자크기가 증가함에 따라 층류경계층이 스케일의 거칠기 효과 때문에 난류경계층으로 천이됨에 따라 국소 Nu는 k/d=0.015에서  $Nu_{max}$ 를 나타내며 표면조도가 k/d=0.0251까지 더 증가하게 되면, 이 천이는  $\theta = 45^\circ$ 의 상류로 이동하게 되고,  $Nu_{max}$ 는 감소한다. 전열 표면 위에 축적된 스케일 입자에 의한 파울링 효과는 Re와 입자의 두께에 따라 열전달 계수에 크게 영향을 미친다.

Fig. 8에서는 클린 원관의 평균  $Nu_{mc}$  값에 대한 오염된 원관의 평균  $Nu_{mf}$  값의 비 ( $Nu_{mf}/Nu_{mc}$ )를



(a)



(b)

Fig. 6 Local Nusselt number of staggered tube banks (a) Re=20000 (b) Re=50000

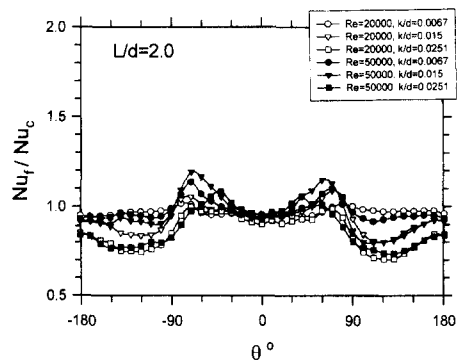


Fig. 7 Ratio of local Nusselt number on the fouled surface and clean one for L/d=2.0

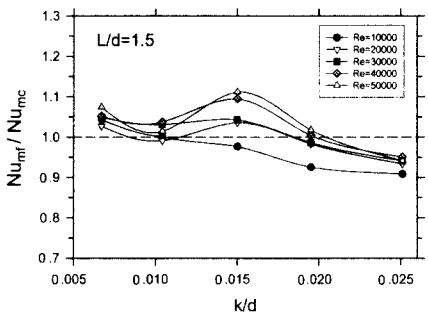
나타내고 있다. 낮은 Re(Re=10,000)에서는 입자의 크기가 증가하게 되면 그 비율이 일정하게 감소됨을 보이고 있으나, Re의 증가에 따라 열전달이 증가하며, Fig. 8(a)에서 보이는 바와 같이 뚜렷한 변화가 있다. 스케일 입자의 크기가 0.01 <k/d 에서는 입자 크기에 따라 Nu<sub>mf</sub>가 증가되어 k/d=0.015근처에서 최대값에 도달된 이후 지속적으로 감소되어 k/d=0.025에서는 그 비가 1보다도 작아지게 된다. 원관 간격이 증가된 L/d=3.0의 경우 평균 Nu 변화는 Fig. 8(b)과 같다. 오염된 원관에 대한 Nu<sub>mf</sub>는 k/d=0.01보다도 작으면 스케일의 단열 효과에 의해 Nu<sub>mc</sub> 보다도 낮은 값을 나타내는 반면 0.015 ≤ k/d ≤ 0.02 에서는 원관 간격이 넓고 입자의 조도가 증가 함으로써 열전달이 증진되어 최대의 비를 유지하고 있다.

Fig. 9는 표면조도에 따른 전체 원주상의 평균 파울링 저항 R<sub>f</sub>의 분포를 원관 간격에 따라 나타낸 그림이다. R<sub>f</sub>는 열유속, 유동속도, 온도가 일정하다는 조건하에서 다음의 식으로 표현된다.<sup>(13)</sup>

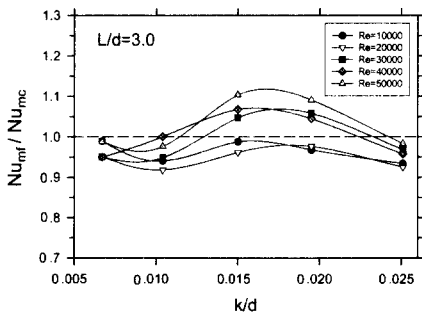
$$R_f = \frac{(T_{w,mf} - T_{w,mc})}{q} = \frac{1}{h_{mf}} - \frac{1}{h_{mc}} \quad (4)$$

여기에서 T<sub>w,mf</sub>와 T<sub>w,mc</sub>은 스케일이 부착된 원관과 클린 원관의 전체 원주상의 각각의 평균온도이며 h<sub>mf</sub>와 h<sub>mc</sub>는 이에 해당하는 평균 열전달 계수이다. 일반적으로 R<sub>f</sub>는 스케일에 의한 단열효과 때문에 양의 값을 갖는다. 그러나 스케일 조도에 의하여 열전달 촉진효과가 단열효과를 초과하는 경우에는 R<sub>f</sub>값은 음의 값을 갖는다.<sup>(3)</sup>

Fig. 9(a)의 낮은 Re수(Re=20,000)에서 대부분의 R<sub>f</sub>값은 단열효과 때문에 기준값(R<sub>f</sub>=0)보다 큰 값을 보이고 있다. k/d < 0.01의 작은 입자가 부착된 경우에는 간격이 커짐에 따라 단열효과가 지배적으로 작용하여 R<sub>f</sub>값이 증가하다가 k/d=0.015 부근에서 최소값을 보이며, k/d > 0.02으로 조도가 증가되면 R<sub>f</sub>는 다시 증가한다. Fig. 9(b)에서 Re=50,000으로 증가하면, 관 사이로 침투하는 유체의 속도가 증가함으로서 전반적으로 R<sub>f</sub>값은 감소하게 된다. 즉 유입속도가 증가하면 표면조도로 인한 열전달 증진효과가 단열효과를 초과하기

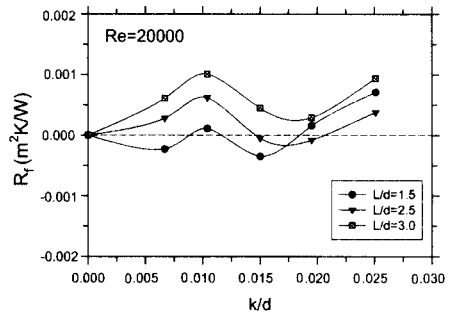


(a) L/d=1.5

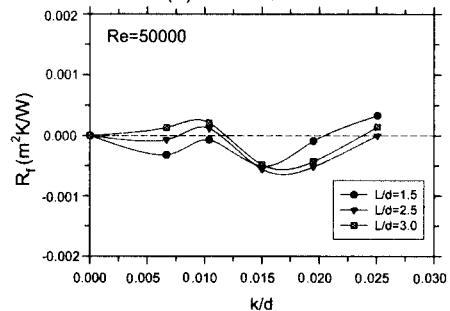


(b) L/d=3.0

Fig. 8 Ratio of mean Nusselt number on the fouled surface to the clean surface

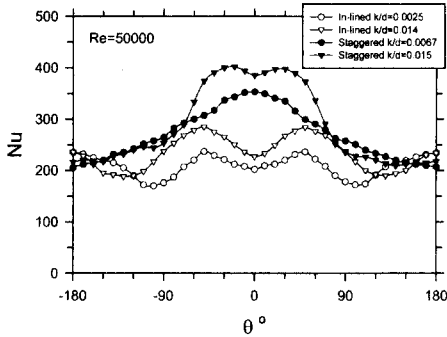


(a) Re=20000

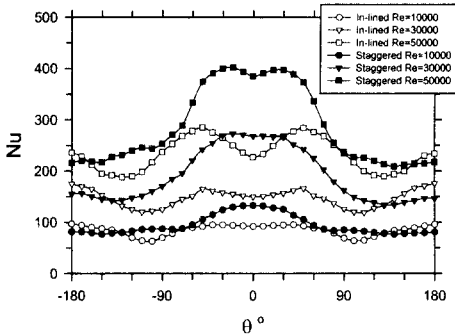


(b) Re=50000

Fig. 9 Fouling resistance of the cylinder



(a)



(b)

Fig. 10 Comparison of local Nusselt number with in-line tube banks for  $L/d=2.0$

때문에  $Re_f$  값이 낮게되며  $k/d=0.015$ 에서 최소값을 갖는다. 또한  $Re$  증가함에 따라 원관 간격에 의한  $Re_f$ 의 편차가 적어져 원관 간격의 영향은 적어짐을 알 수 있다.

Fig. 10은 엇갈림 관군의 국소  $Nu$  분포를 Kim 등<sup>(8)</sup>에 의해 발표된 직렬형 관군의 결과와 비교한 그림이다. 엇갈림 배열의 표면 조도 및 원관 간격이 유사한 조건에서, 엇갈림 배열측이 전반적으로 높은 값을 유지하고 있음을 알 수 있다. 이는 이웃하는 관군에 의한 제트류의 형성 및 난류 유동에 기인하는 것으로 판단된다. Fig. 10(a)에서 엇갈림 배열의 경우 큰 입자의 조도 ( $k/d=0.015$ )의 영향이 원관 전면에서의 경계층이 난류로 천이 됨으로써 두 개의 최대점이 존재하게 되나 조도가 작을( $k/d=0.0067$ ) 때는 원관 전면에서 최대점을 형성하고 이후 지속적으로 감소된다. 직렬형의 경우에는 입자의 크기가 큰 경우가 역시 높은  $Nu$ 를 유지하고 있으나 두 개의 최대

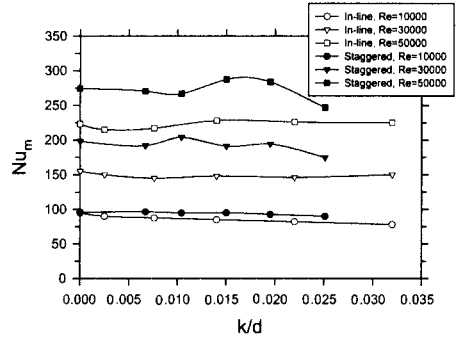


Fig. 11 Comparison of mean Nusselt number with in-line tube banks for  $L/d=2.0$

점은 입자의 크기에 관계없이 유지하고 있다. 이는 직렬형의 경우 시험부와 동일선상의 이전 원관으로부터 막리된 전단층이 후방원주에 재부착 됨으로써 그 지점에서 최대점이 형성되기 때문이다. Fig. 10(b)는 각 원관 배열의 국소  $Nu$ 의 분포를  $Re$ 의 변화에 대하여 도시한 것이다. 역시 엇갈림 배열의 경우가 높은  $Nu$ 를 나타내고 있으며  $Re$ 에 따라 그 증가량이 커짐을 알 수 있다.

Fig. 11은  $L/d=2.0$ 일 때 평균  $Nu$ 에 미치는 스케일 두께의 영향을 직렬형 관군의 결과와 비교한 것이다. Kim 등<sup>(8)</sup>에 의해 검토된 4개의 직렬형 원관 중 엇갈림 배열과 비교가 가능한 3번째 원관의 결과와 비교하였다. 스케일 입자의 크기에 따른 평균  $Nu$ 의 분포는 유사하며,  $Re=10,000$ 의 저속에서는 엇갈림 관군에서 약간의 열전달 증가가 보인다. 또한  $Re$ 가 증가함에 따라 엇갈림 관군은 직렬형 관군보다 평균  $Nu$ 가 크게 증가하고, 최대값은  $Re=50,000$ 에서 20%까지 증가된 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

엇갈림 관군에서 원관 주위의 열전달에 대한 스케일 조도와 원관 간격, Reynolds수의 영향을 검토하기 위하여 실험적 연구를 수행하였으며 결과는 다음과 같다.

(1) 국소 열전달률은 원관 간격이 좁아짐에 따라 원관 전면부에서는 증가하나, 후면부에서는 와

류형성을 억제하는 하류 원관의 영향으로 감소한다.

(2) 엇갈림 관군에서 국소 Nusselt수에 대한 스케일 조도의 영향은 Reynolds수가 증가할수록 커지며, 증가된 스케일 조도로 인한 층류경계층에서 난류경계층으로의 천이는 Nusselt수의 증가를 야기한다.

(3) 박리된 유동 영역에서의 국소 Nusselt수는 스케일층의 단열효과 증가로 인하여 낮은 값을 보인다. 스케일 층의 단열효과에 의한 열전달은 작은 조도에 대해서는 지배적이거나,  $k/d=0.015$ 와 같은 비교적 큰 조도에서는 와류발생으로 인한 열전달 증가의 효과가 단열효과를 초과한다.

(4) 파울링이 미치는 저항은 Reynolds수가 증가함에 따라 감소하고, 파울링 저항에 대한 원관 간격의 영향은 미미하다.

(5) 스케일이 부착된 원관의 경우, 직렬형 관군 배열보다 엇갈림 관군 배열에서 평균 Nusselt 수가 크게 높았다.

### 후 기

본 연구는 1999년도 전북대학교 자동차신기술 연구소의 지원에 의하여 연구되었음.

### 참고문헌

- (1) 임용섭, 손동기, 이준식, 양경수, 1998, "Reynolds 수와 난류강도의 변화에 따른 실린더 주위 유동 박리점의 거동에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제22권, 제7호, pp. 889~898.
- (2) Aiba S., Tsuchida H. and Ota T., 1982, "Heat transfer Around Tubes in Staggered Tube Banks," *Bulletin of JSME*, Vol. 25, pp. 927~933.
- (3) Bott T. R. and Gudmundsson J. S., 1978, "Rippled Silica Deposit in Heat Exchanger Tubes," *Heat Transfer*, Vol. 4, pp. 373~378.
- (4) Watkinson A. P., 1975, "Scaling of Spirally Indented Heat Exchanger Tubes," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 97, pp. 490~492.
- (5) Chamra L. A. and Webb R. L., 1993, "Effect of Particle Size Distribution on Particulate Fouling in Enhanced Tubes," *J. of Enhanced Heat Transfer*, Vol. 1, pp. 65~75.
- (6) Ota T., Nishiyama H. and Akama Y., 1984, "Fouling Effects of Geothermal Water Scale upon Heat Transfer around a Circular Cylinder," *Trans. of JAR*, Vol. 1, pp. 51~57.
- (7) Ota T. and Nishiyama H., 1985, "Fouling Effects of Geothermal Water Scale upon Heat Transfer around an Elliptical Cylinder," *Wärme und Stoffübertragung*, Vol. 19, pp. 93~100.
- (8) Kim M. S. and Ota T., 1997, "Fouling Effects of Geothermal Water Scale on the Heat Transfer around a Tube in a Bank," *The 4th Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, pp. 2079~2086.
- (9) Ota T., Kim M. S. and Yang K. S., 1996, "Fouling Effect of Geothermal Water Scale on Heat Transfer Around a Tube in a Bank," *Proceedings of the 3rd KSME-JSME Thermal Engineering Conference*, Vol. 3, pp. 145~150.
- (10) 檜和田, 馬淵, 柳原, B(昭57), "同徑直列2圓柱の流動と熱傳達," *機論*, 48卷, 427号, pp. 499~508.
- (11) Achenbach E., 1977, "The Effect of Surface Roughness on the Heat Transfer from a circular Cylinder to the Cross Flow of Air," *Int. J Heat Mass Transfer*, Vol. 20, pp. 359~368.
- (12) Holman J.P., 1997, *Heat Transfer*, McGraw-Hill.
- (13) Somerscales, E. F. C. and Knudsen, J. G., 1981, *Fouling of Heat Transfer Equipment*, Hemisphere Publishing Corp.