

표면에 부착되는 스케일의 조도가 열교환기 성능에 미치는 영향에 관한 연구

김민수[†] · 최낙정¹

(원고접수일 : 2009년 8월 13일, 원고수정일 : 2009년 11월 11일, 심사완료일 : 2009년 11월 11일)

A Study on the Effect of Scale Roughness attached Surface of Heat Exchangers

Min-Soo Kim[†] · Nag-Jung Choi¹

요 약 : 본 연구는 열교환기의 가열된 표면위에 부착된 지열수 스케일의 조도 영향을 검증하기 위한 강제 대류 열전달에 관한 실험적 연구이다. 실험은 원형 원관 위에 5종류의 실리카 스케일 입자를 균일하게 부착하여 행하였다. Reynolds수는 13,000에서 50,000의 범위에서 행하였다. 국소와 평균 열전달 특성은 스케일 입자 크기와 레이놀즈수의 함수로서 측정하였으며 평균오염저항을 이들의 결과로부터 평가하고 그들의 특성들을 분석 하였다. 원관의 열전달 특성은 지열수 스케일의 오염에 의해, 특히 입자 크기에 의해 크게 변화하였다. 또한 국소와 평균 Nusselt수는 원관 간격과 Reynolds 수에 의해 크게 의존 되었다.

주제어 : 조도효과, 지열수스케일, 열교환기, 박리점, 정체점, 오염저항

Abstract: An experimental investigation has been conducted to clarify roughness effects of geothermal water scale deposited onto a heating surface upon its forced convection heat transfer characteristics. Examined was a circular cylinder, on which particles of silica scale having five different sizes are uniformly distributed. The Reynolds number was varied from 13000 through 50000. Local and mean heat transfer characteristics were measured as functions of particle size and Reynolds number. Subsequently the mean fouling resistance was estimated from those results, and its characteristics are clarified. It was found that the heat transfer of cylinders greatly varies with the fouling of geothermal water scale, especially its scale height. Further, the local and average Nusselt numbers strongly depend upon the cylinder spacing and the Reynolds number.

Key words: Roughness effect, Geothermal water scale, Heat exchanger, Separation point Stagnation point, Fouling resistance

1. 서 론

최근 부족되어 가는 천연자원과 지구온난화에 의한 환경 오염의 확대를 방지하기 위하여 태양열, 풍력, 조력 또는 지열등의 신재생에너지를 유효하게 이용하는 것이 중요한 과제의 하나가 되었다. 그중 지열 에너지의 이용은 친환경적인 청정 클린

에너지로서 지중열교환기설치로 지구온난화 현상 억제에 효과가 있으며 세계기후협약에도 대응할 수 있는 천연 에너지로서 초기 투자 비용이 많이 든다는 단점은 있으나 자연 에너지중에서도 많은 양이 있고 풍력, 수력 등 천연에너지와 달리 공급의 양이 일정하다는 강점이 있으며, 더욱이 높은 고밀

[†] 교신저자(전북대학교 기계설계공학부, E-mail:kimms@chonbuk.ac.kr, Tel: 063-270-4764)

¹ 전북대학교 기계설계공학부

도의 에너지이므로 지열발전이나 냉난방 등의 다목적 용도에 지열에너지의 활성화를 위한 실증연구개발 사업이 적극적으로 시도 되고 있다. 그러나 지열수중에 함유되어 있는 실리카, 탄산칼슘 등의 이온화 무기물들은 열교환기에서 압력과 온도의 강하와 함께 전열면 표면에 다양한 형태의 입자크기로 부착되어 fouling 현상에 의한 열효율 성능저하 및 오염이 발생하게 된다.[1-2]

지열스케일의 부착을 피하는 것은 대단히 곤란한 점이 많기 때문에 일반적으로 전열면적을 확대하는 방법이 주로 사용되고 있으며 운전중 부착되는 스케일의 대응책으로서, 스폰지불법, 자기법, 열충격법, 열교환기용 재료의 표면처리법 등 여러 가지 대책이 이용되고 있다. 또한, 스케일 부착에 의한 관내폐쇄를 방지하기 위하여 비교적 스케일제거가 쉬운 열교환기의 관외로 지열수를 흐르게 하는 방법도 시도되고 있다.[3] 그러나 열교환기는 강도, 경제성등의 관점에서 관형열교환기가 광범위하게 사용되고 있으며, 관군 주위의 유동과 열전달에 대해서는 종래로부터 많은 연구가 이루어지고 있다.

열교환기는 대부분 관군(tube banks)을 형성하고 있고, 유체가 관군에 직교하게 흐르므로서 원관 후류 유동과 열전달 현상의 이해는 열교환기의 설계 및 응용에 매우 중요하다. 이와 관련된 연구로서는 ISHITANI 등[4]의 원주군에 작용하는 유체 역학적 관점으로부터 복수의 원관이 병렬 및 3열 배열된 경우의 압력손실을 측정하고, 원관 간격비가 작아짐에 따라 압력손실은 증가하며, 항력계수는 증가한다고 보고하고 있으며 IGARASHI[5]는 일열관군인 경우 아임계 레이놀즈수 범위에서 유동 특성을 고찰하고 직렬 2,3,4원관의 유동 특성에 대해서, 열전달 및 유동 방향 간격의 최적 피치에 관한 연구를 하였다. NAKAI등[6]은 대단히 조밀한 원관군내의 유동의 압력변동과 속도변동을 고찰하여 보고하였다.

그러나 종래의 연구들은 관군의 유동장 해석을 관군을 이루는 초기 상태, 즉 스케일이 축적되지 않은 깨끗한 표면에만 초점이 맞춰져 있으며, 운전중 관군에 부착되는 스케일 입자에 의해 영향을 받는 원관 표면으로부터의 수송현상을 이해하는데

매우 중요한 관군의 국소유동특성 및 국소 열전달 현상을 명확하게 규명하지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 이상과 같은 배경을 바탕으로 지열발전소의 열교환기용으로 주로 이용되고 있는 평활관의 관군 표면에 부착되는 스케일 입자의 크기에 따른 유동 특성 및 유체의 유동 속도에 따라 변화되는 강제대류 열전달 실험을 행하여 원관 간격의 최적화를 도모하고 열전달 성능 저하를 예측함으로써 파울링 효과에 따른 영향을 규명하여 에너지 절약 및 열교환기 설계시의 기초 자료로 활용될 수 있도록 하고자 하는데 목적이 있다.

2. 실험장치 및 방법

실험장치에 사용된 풍동은 저속 개방형 취출 형식으로 측정부의 높이는 400mm, 폭 150mm, 길이 1200mm의 장방형이다. 측정에 사용된 원관은 직경 34mm, 두께 3mm, 길이 150mm의 얇화 비닐제 원관이며 **Figure 1**에 실험에 사용된 원관의 좌표를 보이고 있다.

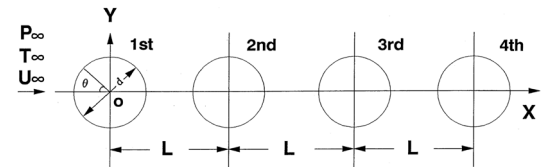


Figure 1: Arrangement of four cylinders and coordinate system

원관 주위에는 37개의 동-콘스탄탄 열전대를 원관 중앙부의 표면을 따라 10°간격으로 나선상으로 매입하였다. 그 위에는 전열면으로서 폭 23.5mm, 두께 0.03mm의 스텐레스박판을 나선상으로 감고 박판의 양단에는 동관 전극을 용접 연결하여 전원을 공급할 수 있도록 하였다.

또 원관 내부에는 열손실을 최소화하기 위하여 원관 중공부에 발포 우레탄을 충전 하였다. 열교환기 표면에 부착되는 스케일의 조도는 실제 열교환기에서는 측정이 어렵기 때문에 같은 효과를 낼 수 있도록 일본 大沼지열발전소의 열교환기에서 채취된 스케일 입자를 5종류의 메쉬를 임의로 설정하여 분류한 다음 스텐레스 박판 위에 양면접착 테이프

를 부착하고 그위에 스케일을 균일하게 살포하여 제작 하였다. 본 연구에 사용된 스케일의 입자 크기는 작은 순서대로 M150, M48, M35, M28, M20이며 각 입자 크기에 대한 분류 오차는 없을 것으로 생각되고 이때의 평균스케일의 조도 k 의 실측치는 각각 0.085, 0.257, 0.460, 0.756, 1.077mm이다.

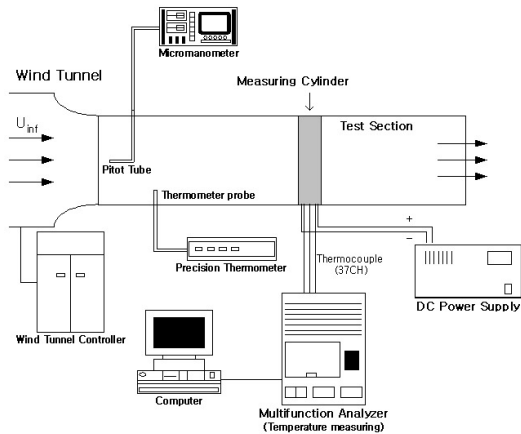


Figure 2: Experimental set-up

Figure 2는 실험장치의 개략도를 보이고 있으며 원관의 열전달률 측정은 유동 방향에 직교하도록 직렬 4원관의 경우를 대상으로 하여 제1원관은 풍동의 노즐 출구로부터 180mm의 위치에 고정하고, 원관 사이의 간격은 열교환기 제작시 일반적으로 많이 사용되고 있는 원관직경의 1.5~4.0배의 범위에서 임의로 정하였다. 주류속도 (U_{∞})는 제1원관보다 150mm 상류측에서 마노메타에 의해 측정하였으며 전열면의 가열은 원관 표면의 최대국소온도가 45°C를 넘지 않도록 슬라이탁스에 의해 제어하였다. 레이놀즈 수의 변화에 따라 열유속의 범위는 1.5~11(kW/m²)로 변화하였고 열전달 실험은 측정 원관만을 가열하여 원관 표면의 온도분포가 정상상태가 되었을때 측정하였다.

전열면 온도는 원관표면의 열전대의 신호를 디지털 멀티메타(IWATSU-VOAC7413)에 의해 구하고, 열유속은 원관 양단 전극의 전압과 전류에 의해 산출하였으며, 열유속이 일정한 것으로 가정하고 물성치는 주류온도에 대한 값을 사용하였다.

원관으로부터의 열전도와 복사에 의한 열손실의 영향은 무시 하였으며 열전대는 스텐레스박관의 뒤쪽 표면에 매입되어 있기 때문에 디지털 멀티메타로부터 얻어진 온도는 엄밀하게는 스케일 표면 온도라고 말 할수는 없으나 스케일 표면온도를 정확하게 측정하는 것은 대단히 어려운 일이므로 이하의 보정 방법에 의해서 열전달률을 구했다.

본 실험에서는 스텐레스 박관위에 양면접착 테이프를 이용하여 그 위에 스케일을 부착하였기 때문에 실리카, 탄산칼슘 등의 무기물 등이 부착된 스케일 원관의 온도 측정값은 양면접착 테이프의 열저항을 포함하고 있다고 말할 수 있다. 그리고 청정원관과 스케일부착 원관의 측정은 동시에 행할 수 없기 때문에 테이프의 영향을 소거하기 위한 보정은 동일 원관 간격 및 레이놀즈 수에서 청정 원관과 테이프 부착 원관의 열전달률을 비교하여 테이프 부착에 의한 열전달율의 감소분을 동일한 레이놀즈수의 스케일 부착시의 열전달률에 가산하였다. 이상의 보정 방법에 의해 얻어진 스케일 부착시의 평균열전달율은 0.5~3%증가 되었으며 일반적으로 레이놀즈수가 높고 L/d 가 작을 경우 보정량은 크게 되는 경향이 있었다.

본 연구에서는 콤팩트화되어가는 열교환기의 추세에 맞추어 좁은 원관 간격인 $L/d=1.5$ 에 주안점을 두고 1.2원관 위주로 분석하고자 한다.

3. 실험결과 및 고찰

Figure 3은 $Re=50000$ 에서 원관 간격 $L/d=1.5$ 인 경우에 스케일이 부착되지 않은 청정(淸淨) 4원관에 관한 국소 Nu 수 (local Nusselt number = $h \cdot d / \lambda$)의 분포를 나타내고 있다. 4원관 모두 국소 Nu 수가 전면 정체점($\theta=0^\circ$)을 기준으로 양호한 대칭을 이루고 있음을 볼 수 있으며, 1번 원관의 경우는 단독 정체원관(점선)의 경향과 유사함을 알 수 있으나, 원관 후면($90^\circ \leq \theta \leq -90^\circ$)의 Nu 수는 후방원관의 영향 때문에 원관 전면($-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)의 경우보다 약간 낮게 분포되고 있으며 하류 방향으로 갈수록 그 차이는 커지고 있다. 최대 Nu 수는 원관 전면정체점($\theta=0^\circ$)에서 얻어지고 상류 표면을 따라 층류경계층이 발달하게 되어 θ

$\pm 90^\circ$ 에서 최소값을 나타내며 그 위치가 유동의 박리가 시작되는 지점으로 사료된다. 이후의 박리 유동 영역에서는 하류방향을 따라 다시 증가하게 된다. 이러한 현상은 본 실험장치의 정밀도 확인을 위해 CFD를 이용하여 나타낸 Figure 4의 유동장 해석에서도 유사한 경향을 확인할 수 있다.

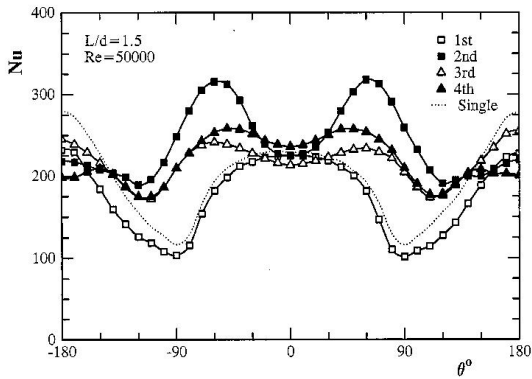


Figure 3: Local Nusselt number distribution of four clean cylinders

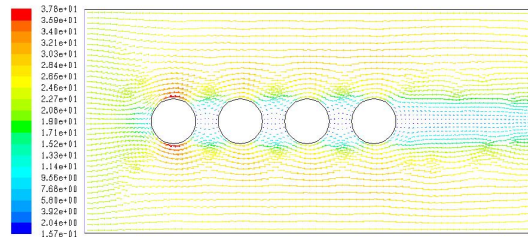


Figure 4: Velocity vector of four cylinders at $L/d=1.5$ & $Re=50000$

2번 원관의 경우는 1번 원관으로부터 박리된 전단층이 부착되는 $\theta = \pm 60^\circ$ 부근에서 Nu 수의 최대값이 나타난다. Nu 수의 최대값에 대한 속도구배는 다른 원관에 비하여 상당히 크고 이에 따라 부착점 부근의 열전달비가 높게 나타나게 되며 정체점($\theta = 0^\circ$)에서의 Nu값은 1번 원관보다도 낮다.

3,4번 원관의 경향은 매우 유사하게 나타나며 1, 2번 원관과는 많은 차이가 난다. 4번 원관의 경우 Nu수의 최대값은 $\theta = \pm 50^\circ$ 부근에 나타나는데 부착점은 2번 원관에 비하여 $\pm 10^\circ$ 정도 前面 上流에 존재하며 上流 정체점에서의 Nu 수는 다른 원관들

보다도 높게 나타난다. 이것은 전방 원관들의 영향을 받는 것으로 사료되며 전단층의 박리는 $\theta = \pm 110^\circ$ 부근에서 일어난다. 위의 결과들을 Kostic[7], Hiwada[8], Aiba[9]등의 단독 청정 원관의 실험값과 비교하여 약 5% 이내의 오차 범위에 있고 변화 경향에 있어서 큰 차이가 없다. 따라서 본 실험에 사용된 실험 원관 및 측정의 정밀도는 신뢰할 수 있을 것으로 사료된다.

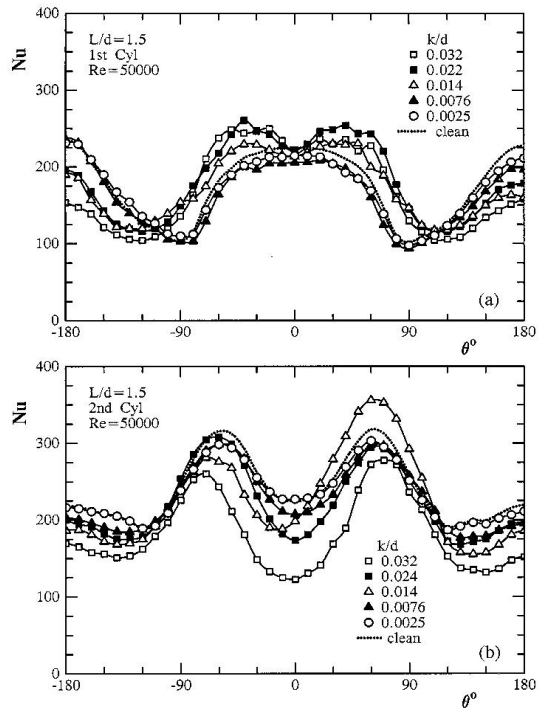


Figure 5: Local Nusselt number on the 1st and 2nd fouled cylinder at $L/d=1.5$

스케일 입자 크기에 따른 제1원관의 국소 Nu 수 분포의 대표예로서 $L/d=1.5$, $Re=50000$ 의 경우를 Figure 5(a)에 나타내었다. Nu 분포는 $k/d = 0.014$ 를 경계로 $k/d < 0.014$ 에서는 청정원관의 경우보다 약간 낮은 값을 보이며, $k/d \geq 0.014$ 에서는 원관 전면의 열전달률은 상당히 증가하였고 전방지점은 M자형태의 극소치를 나타내고 있다. 또 원관 후면의 박리영역에 대해서는, $k/d \geq 0.014$ 의 경우는 청정원관의 경우보다 열전달률은

현저히 저하되고, 박리점이라고 생각되는 극소치는 청정 원관의 경우보다 30° 정도 하류측에 존재하고 있다.

제2원관의 **Figure 5(b)**에서는 원관 전면의 $\theta = \pm 60^\circ$ 부근에 제1원관의 박리전단층의 부착에 의한 극대치가 보이고 있다. 또, $k/d=0.032$ 의 경우에 청정시에는 Nu의 최소치는 박리점 부근에 존재하고 있는 것에 반해 스케일 부착시에는 전방 정체점에서 최소치를 보이며 부착 스케일의 조도의 영향이 현저하게 있다는 것을 알 수 있다.

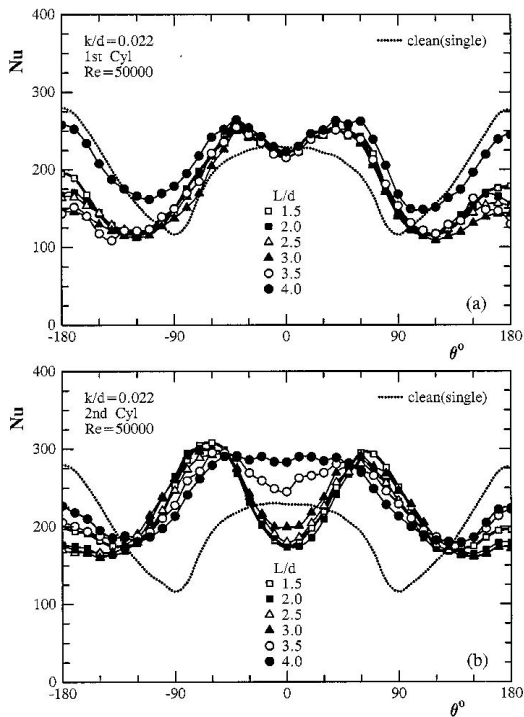


Figure 6: Local Nusselt number on the 1st and 2nd fouled cylinder at $k/d=0.022$

원관간격 L/d 을 변수로 하여 $k/d=0.022$, $Re=50000$ 의 경우에 대한 Nu 수의 분포를 **Figure 6(a)**에 나타내었다. 제1원관에서는 원관 전방 정면 정체점으로부터 시작된 표면 조도에 의한 난류 촉진 효과로 $\theta = \pm 50^\circ$ 부근에서 최대치가 보이고 있다. 이 최대치는 L/d 가 큰 쪽이 약간 큰 값이 된다. **Figure 6(b)**의 제2원관에서는 $L/d \leq 3.0$ 의 경우에는 원관 전면의 $\theta = \pm 60^\circ$ 부근에

극대치가 보인다. 이것은 전방 원주로부터 박리된 전단층이 부착되는 지점으로 사료되며 이 극대치는 L/d 가 작은쪽이 약간 큰 값을 나타내나 전반적으로 L/d 의 변화에 의한 Nu수의 분포 경향은 유사하다. 그리고 $L/d > 3.0$ 이상이 되면 넓어진 간격 사이로 주류 진입의 증가로 인하여 원관 전면의 열 전달률이 회복되는 형상을 보인다.

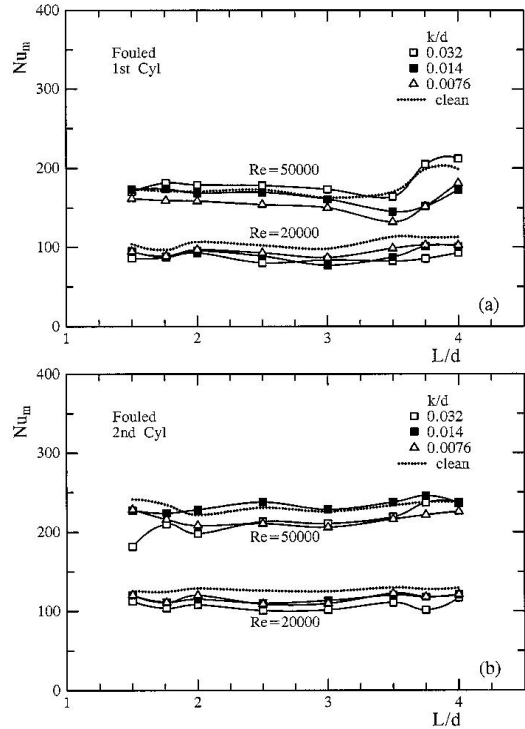


Figure 7: Mean Nusselt number on the 1st and 2nd fouled cylinders at $Re=50000$ & 20000

제1원관의 Nu_m 의 L/d 에 따른 변화를 $Re=50000$, 20000 의 경우를 **Figure 7(a)**에, 2원관의 경우를 **Figure 7(b)**에 각각 나타내었다. $Re=50000$ 의 경우에 원관간격 L/d 의 증가와 함께 어느 k/d 에서도, Nu_m 은 약간 감소하고 $L/d=3.5$ 에서 최소치가 되며 $L/d=3.75$ 에서는 넓어진 원관 사이로 주류유동의 도약현상에 따라, Nu_m 은 급격하게 증가하고 $L/d=4.0$ 에서 최대치가 된다. 먼저 $k/d=0.032$ 에 대해서는, $Re=50000$ 의 경우 대부분의 L/d 에 걸쳐서 청정원관보다 스케일 부착

원관의 평균 열전달률이 높은 것을 알 수 있다. 이후 Re수가 20000으로 작아짐에 따라 동일한 L/d에 대하여 평균열전달율은 스케일 부착 원관의 쪽이 청정원관보다 낮게 되는 것을 알 수 있다. 이는 Re수가 작아짐으로 인해 스케일에 의한 전열촉진보다는 단열효과가 더욱 커진 것으로 사료된다.

제2원관의 경우 평균 열전달률은 L/d=2.0~3.5의 범위에서는 원관간격의 영향은 별로 크지 않은 것을 알 수 있다.

전술한바와 같이 스케일의 부착에 따른 국소전열특성은 청정시와 상당히 차이가 나는 것으로 밝혀졌다. 다음으로는 국소 열전달률의 증가 혹은 감소에 대해서 고찰한다.

제1원관의 Re=50000의 경우 청정원관에 대한 스케일 부착시의 열전달률의 비 N_{UF}/N_{UC} 를 Figure 8(a)에 제2원관의 경우를 Figure 8(b)에 각각 나타내었다. 종축은 열전달 특성의 저하 및 증대의 비율을 의미한다.

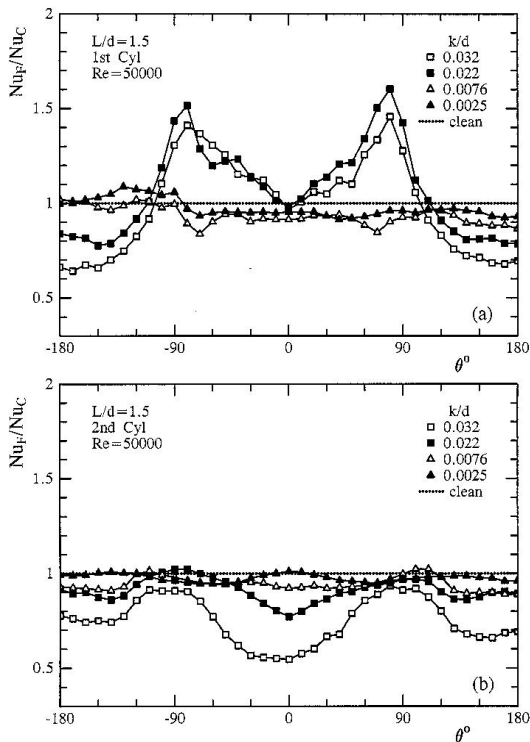


Figure 8: Ratio of Nusselts numbers on the fouled

surface and clean one

Figure 8(a)에 나타내는 바와 같이 k/d=0.022, 0.032의 경우에는 원관 전면에 극대치가 2개가 명료하게 나타난다. 이것은 전방지점으로부터 성장해온 층류경계층이 스케일의 조도에 의해 난류경계층으로 천이되기 때문에 전면의 열전달율이 크게 되는 것으로 사료된다. 한편 전방 정체점은 유동이 풍부하기 때문에 N_{UF} 는 N_{UC} 보다 약간 작게 된다. 원관후면에서는 후류폭이 협소하게 됨에 의해서 와류운동이 억제되기 때문에 스케일의 조도가 큰 쪽이 단열효과가 크게 된다. k/d=0.0025, 0.0076의 경우에는 극대치가 명료하지 않으며, 전반적으로 청정원관과 비교하여 하회한다. 이것은 스케일의 조도가 작은 경우에 전열촉진보다 오히려 단열효과가 지배적이라고 생각된다.

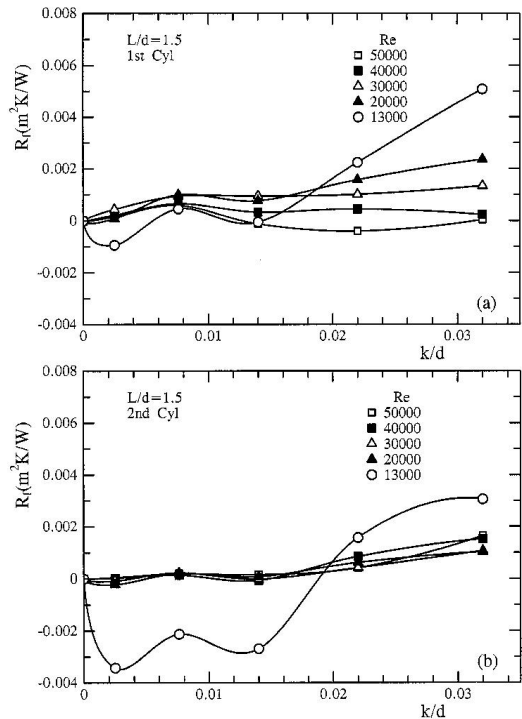


Figure 9: Fouling resistance on the 1st & 2nd cylinder with Re No at L/d=1.5

제2원관에서는 전방원관과의 사이에 유동량의

감소로 원관 전면의 열전달율의 저하가 현저하며 대부분의 k/d 의 변화에 대해서도 청정원관의 경우를 하회한다. 또한 스케일의 조도가 큰 쪽이 열전달률의 감소는 크게 된다.

본 연구에서는 원관표면에 부착된 스케일층이 비교적 얇은 것부터, 열유속, 주류온도, 주류속도가 일정하다는 가정하에서 평균오염계수 R_f 는 다음 식으로부터 구하였다.

$$R_f = \left(\frac{t_{\theta m} - t_{\infty}}{q_w} \right)_F - \left(\frac{t_{\theta m} - t_{\infty}}{q_w} \right)_C = \frac{1}{h_{mF}} - \frac{1}{h_{mC}}$$

일반적으로, R_f 는 스케일층의 단열변화에 따라 정(+) 부호로 되나 스케일의 조도에 따라 전열촉진이 단열효과를 상회하는 경우에는 부(-)의 부호가 된다.

R_f 의 k/d 에 따른 변화를 $L/d=1.5$ 의 경우에 대하여 **Figure 9(a)**에 나타내었다. 제1원관에서는 $Re=50000$ 의 경우 $k/d=0.076$ 에서 최대치가 되고 있다. 그 이후의 R_f 의 감소는 스케일의 조도에 따라 원관 전면의 전열촉진에 의하는 것이며 이후 $k/d=0.022$ 에서 R_f 는 최소치가 된다.

$Re=13000$ 의 경우는 k/d 의 변화에 따른 R_f 의 변화율이 가장 격렬하게 나타나고 있다. 이것은 낮은 Re 수에서는 k/d 가 증가할수록 단열 효과가 커지기 때문으로 사료된다.

Figure 9(b)의 하류원관에서는 R_f 의 k/d 에 따른 변화는 상류원관과는 다르다. $Re=13000$ 을 제외한 어느 Re 수에서도 k/d 에 따른 R_f 의 변화는 크지 않은 경향을 나타내고 있다. 제2원관은 제1원관에 의해 형성된 고난류의 유동중에 위치하고 있으므로 일정한 유동 중에 있는 제1원관에서 보이는 것과 같은 스케일 조도에 의한 난류촉진의 효과는 작고, 스케일층의 단열효과가 지배적이라고 생각된다.

원관간격 L/d 에 따른 R_f 의 변화를 $k/d=0.022$ 의 스케일 부착시의 경우에 대하여 **Figure 10(a)**에 나타내었다. 제1원관의 경우, $50000 > Re > 13000$ 에서는 $L/d=2.0$ 에서 극대치가 되고 $L/d=3.5$ 부근에서 최대치를 나타낸다. $Re=50000$ 의 경우에 R_f 의 분포는 모든 원관 간격에 변

화없이 전열촉진이 단열효과를 상회하는 것으로 나타난다.

Figure 10(b)의 제2원관의 경우에 $Re=50000$ 에서 R_f 의 분포는 제1원관의 경우보다 변화는 크게 되어 $L/d=3.75$ 에서 R_f 가 부(-)가 되며 최소치가 된다. $Re > 13000$ 의 경우에 $L/d=2.0 \sim 3.5$ 에서 Re 가 높은 쪽이 R_f 는 낮고, L/d 의 변화에 대해서 어느 것의 Re 에서도 거의 같은 모양의 변화를 보이고 있다.

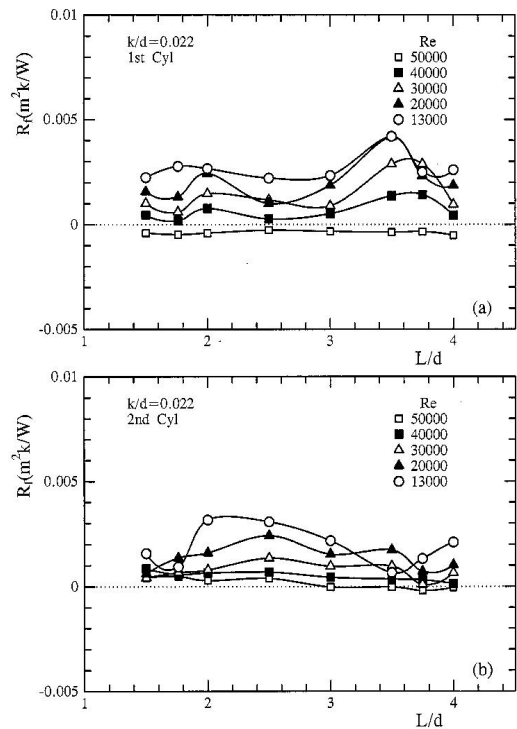


Figure 10: Fouling resistance on the 1st and 2nd cylinder at $k/d=0.022$

4. 결 론

본 연구에서는 직렬 원관을 대상으로 원관표면에 5종류의 조도를 가진 스케일을 부착하여 스케일의 조도, 원관간격, 유속을 변화시켜 강제대류 열전달의 실험을 행하였으며 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 스케일 부착 원관의 국소 열전달 특성은 청정원관의 경우와 상당히 차이가 난다.

제1원관에서는 스케일의 조도가 $k/d \geq 0.014$ 이

상으로 크게 되면 원관 주위의 유동이 급변하는 천이 레이놀즈수가 발생하여 원관 전면의 열전달률이 증가된다.

제2원관에서는 원관 전면의 열전달률의 저하가 현저하며 Re수가 높은 경우 스케일의 조도가 큰 쪽이 열전달률의 감소는 크게 된다.

(2) 평균열전달율은 제1원관에서 $Re=50000$ 의 경우에 $L/d=1.5$ 에서부터 원관간격의 증가와 함께 어느 k/d 에서도 Nu_m 은 감소하고 $L/d=3.5$ 에서 최소치가 된 후 다시 증가된다. $k/d=0.032$ 경우 대부분의 L/d 에 걸쳐서 청정원관보다 스케일 부착 원관의 평균 열전달률이 높다.

제2원관의 경우 평균 열전달률은 $L/d=2.0\sim 3.5$ 의 범위에서 원관간격의 영향은 별로 크지 않다.

(3) 평균 오염계수는 Re수에 강하게 의존된다. Re수가 큰 쪽이 일반적으로 낮으며, $Re=13000$ 의 경우 $k/d=0.014$ 이후로는 scale층에 의한 단열효과 증가로 급격하게 증가된다. 제1원관에서는 $k/d\geq 0.014$ 의 경우, 제2원관에서는 $k/d>0.0076$ 의 경우에 스케일 조도의 증가와 함께 평균오염계수는 크게 된다. 원관간격에 의한 평균 오염계수의 변화는 복잡하기는 하지만 전반적으로 Re수가 낮은 쪽이 변화는 격렬하고 Re수가 높은 쪽이 완만하다.

참고문헌

- [1] Bott.T.R, Fouling of Heat Exchangers, Elsevier, 1995.
- [2] Melo.L.F. Bott.T.R and Bernardo.C.A, Fouling Science and Technology, Kluwer Academic Publisher, 1988.
- [3] Ralph L. Webb, Principles of Enhanced Heat Transfer, A Wiley-Interscience Publication, 1993.
- [4] 石谷, 西川, "圓管群に 直交する管外流れの構造に関する研究", 機論, 40-337, pp. 2599-2608, 1975.
- [5] Tamotsu IGARASHI, "Characteristics of the Flow around Four Circular Cylinders", JSME B, vol.51, no.467, pp. 2061-2067,

1986.

- [6] Tetsushi NAKAI, Kyozo AYUKAWA and Tsutomu INOUE, "Cross flow through in closely arranged circular cylinders", JSME B, vol.62, no.593, pp.65-71, 1996.
- [7] Z.G.Kostic and S.N.Oka, "Fluid flow and heat transfer with two cylinders in cross flow", Int. J.Mass Trans. vol. 15, pp. 279-299, 1972.
- [8] 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.
- [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.

저 자 소 개



김민수(金敏洙)

1993년 전북대학교 대학원 기계공학과 열유체전공(공학박사), 현재 전북대학교 기계설계공학부 교수



최낙정(崔洛挺)

1995년 한양대학교 대학원 기계공학과(공학박사), 일본 나고야대학교 기계정보시스템공학과 연구원(1996-1997), 현재 전북대학교 기계설계공학부 교수