

直列 管群에서 地熱水스케일의 파울링 영향에 관한 연구

김 민 수* · 윤 석 범**

A Study on the Fouling Effect of Geothermal Water Scale in In-line Tube Bank

M.S.Kim* · S. B. Youn**

Key words : Fouling effect(파울링 영향), Geothermal water scale(지열수 스케일), Tube bank(관군), Heat exchanger(열교환기), Separation point(박리점), Stagnation point(정체점), Attachment point(부착점)

Abstract

An experimental study was conducted to investigate the fouling effects of geothermal water scale deposited onto a heating surface upon its forced convection heat transfer characteristics. Scales deposited onto the heating surfaces of heat exchangers seriously reduce the heat transfer performance and also increase the hydrodynamic drag. Accordingly, fouling is an important problem in the design and operation of heat exchangers. The cylinders were settled in tandem with equal distance between neighbouring cylinders and only the test cylinder was heated under the condition of constant heat flux. The Reynolds number was varied from 13000 through 50000. It is found that the heat transfer of the in-line tube banks 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.

1. 서 론

최근 부족되어 가는 석유 대체 에너지로서 太陽熱, 風力, 潮力, 地熱과 같은 자연적인 에너지의 효율적인 이용이 관심의 대상이 되고 있는데 그 중에서 지열을 이용하는 방법은 에너지의 추출 밀도가

높기 때문에 산업 분야는 물론 가정의 난방이나 온수공급, 除雪, 농업 등에 이르기까지 여러 분야에서 적극적으로 추진 되어야 하나 지열수에 함유되어 있는 silica, 탄산칼슘 등의 불순물 성분이 열펌프 시스템에서 열교환기면에 형성하는 스케일은 열교환시 온도 저하에 따라 용해도가 낮아지므로

* 국립 익산대학 기계과(원고접수일 : 98년 7월)

** 국립 익산대학 자동차과

서 전체 열저항중 가장 큰 열저항으로 형성되어 막대한 에너지 손실을 초래하기 때문에 극복 해야 할 과제로 남아있다. 이와같이 운전시간의 경과와 함께 전열면에 부착되는 스케일을 예측하거나 감소 또는 제거하는 것은 극히 어려운 일로서 작동유체 자체를 청결하게 유지하여 파울링을 감소할 수도 있으나 오손의 원인은 주로 작동유체의 특성에 영향을 받기 때문에 유체중의 함유물이 전열면에 부착되어 표면을 부식시키고 열저항이 크게 되어 전열 성능을 저하시키며 심할 경우 유로가 막히는 경우도 발생한다^(1,2). 이의 방지를 위해 오손계수를 고려하여 전열면적을 확대하는 것이 일반적이고, PH조절법등 급수처리에 따른 작동유체중의 불순물을 제거하여 전열면으로의 부착을 방지하는 방법 등이 행하여지고 있으나 열교환기 설치환경의 제약 때문에 기술적이나 경제적면에서 크게 진전을 보지 못하고 있는 실정이다^(3,4).

이러한 난점을 고려하여 열교환기의 제작은 강도나 경제성등의 관점에서 관형 열교환기가 널리 사용되고 있고 원관주위의 유동과 열전달에 관한 여러 각도의 연구가 진행되고 있는데 유체의 유동에 관해서는 관형 열교환기의 전열관에 작용하는 유체력을 해명하는 관점으로 부터 복수의 원관을 유체 흐름방향에 대하여 직렬 또는 병렬로 배치된 경우의 압력손실 및 방출渦의 측정등 다수행열의 원관군의 압력손실에 대한 연구^(5,6)가 진행되고 있으며 열전달에 관해서는 일렬 관군이나 바둑판형 관군에 대해서 열전달과 유체수송동력과 관련된 연구가 있다. 예를들면 Watkinson⁽⁷⁾은 나선형과 평판형 튜브의 내부에 발생하는 오염저항에 관하여, Chamra 와 Webb⁽⁸⁾는 축진형과 평판형 튜브의 오염비에 관하여 보고 하였다. 또한 지열수의 오염 효과에 관해서는 단독원형 실린더와 타원형 실린더 주위의 열전달에 관한 연구가 Ota^(9,10)등에 의하여 발표되었으나 관군에 있어서 지열수의 오염에 의한 열전달의 영향은 아직까지 명확하게 밝혀지지 않고 있다. 따라서 열교환기의 운전조건을 효과적으로 변화시켜 파울링의 영향을 최소화하기 위해서는 관군 주위의 열전달과 스케일 부착에 따른 유체유동의 변화 과정을 파악하는 것이 중요하다.

동일 직경비를 가지는 두 개 이상의 정지원관을

자유흐름 방향으로 일정 간격을 두고 일렬로 설치한 경우는 관군의 가장 기본적인 배열 형태로서 본 연구에서는 관군의 관외 유동으로서 직렬로 설치한 4원관에 대하여 지열수의 스케일 축적에 의한 오염의 영향을 스케일 입자의 크기, 실린더 간격, Reynolds수 등을 변수로 하여 오손되는 관군의 열전달 특성 변화를 규명하여 열교환기 설계시의 기초 자료로 하는데 목적이 있다.

2. 실험장치 및 방법

실험은 입구에서 원심 팬에 의해서 구동되는 저속개방형 풍동을 사용하였으며 측정부는 높이 400mm, 폭 150mm, 길이 1200mm의 장방형 plexiglass로서 실험 원관을 삽입 할수 있도록 되어 있는데 Fig.1은 실험에 사용된 원관의 좌표를 보이고 있다.

실험 원관의 제작은 Fig.2에 도시한 바와 같이 직경34mm, 길이150mm의 열화비닐제 원관으로서 원관표면에는 직경0.07mm의 T형 열전대를 깊이 0.4mm, 폭 0.5mm의 구멍에 10 ϕ 간격으로 37개를 매입하였으며 원관의 가열을 위하여 두께 0.03mm, 폭 23.5mm의 stainless박판을 나선형으로 5회 감고 양단에는 동판전극을 용접하여 전원을 연결하였으며 슬라이더스에 의하여 표면온도를 조절할 수 있도록 하였다^(11,12). 원관 내부의 중공부는 발포우레탄재로 충전하여 외부로의 열손실을 최대한 억제하였고 표면의 스케일은 일본 大沼 지열발전소의 열수이용 열교환기내에 축적된 이산화규소가 주성분인 silica 스케일을 채취 분쇄하여 여러가지 크기로 분류하였다. 실험에 사용된 스케일 입자의 상대조도는 $k/d=0.0025, 0.0076, 0.014, 0.022, 0.032$ 의 5종류를 택하여 원관의 표면에 양면접착 테이프를 이용하여 균일하게 부착시켰다. 첫번째 원관은 풍동 노즐 출구로부터 180mm의 위치에 고정하였고 이후의 후방 원관으로 간격을 조절할 수 있도록 시설하였으며, 주류속도 U_{∞} 는 약 5~22m/s의 범위에서 조절하여 Re수를 13000~50000에 맞추었다. 전열면의 가열은 표면의 온도가 최대 45 $^{\circ}$ C를 넘지 않도록 조절하여 실험 원관의 열유속이 1.2~4.5 kW/m²의 범위내

에서 가열개시로부터 약 1시간후 원관표면의 온도가 정상상태가 된 것을 확인하고 열전대의 기전력을 온도로 환산하여 구했으며 전도 및 복사에 의한 열손실은 무시하고 아래의 식을 이용하여 국소열전달율, 국소Nusselt수, 평균Nusselt수를 산출하였다^(13,14).

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

$$Nu = \frac{hd}{\lambda} \quad (2)$$

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

여기서 q는 단위면적과 시간당의 열유속이며 T_w 는 벽온도이고, λ (공기의 열전도도)는 측정부 입구유동(T_∞)의 온도에서 산정된 값이다. 또한 원관 표면에 부착된 스케일층이 얇고 淸淨시와 스케일 부착시에 열유속, 주류온도, 주류속도가 일정하게 유지되며 스케일 부착에 따른 열전달율이 변화없다고 가정하면 결과적으로는 전열면 온도가 상승하게 되고 스케일 부착의 영향이 나타난다.⁽¹⁵⁾ 이와 같은 가정하에 원관 주위의 평균오염저항(R_f)은 다음식에 의하여 구하였다.

$$R_f = \frac{T_{wmf} - T_{wmc}}{q} = \frac{1}{hm_f} - \frac{1}{hm_c} \quad (4)$$

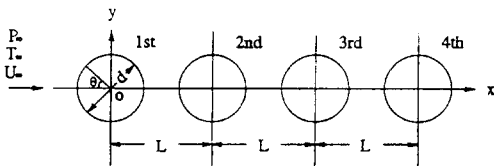


Fig. 1 Arrangement of four cylinders and coordinate system.

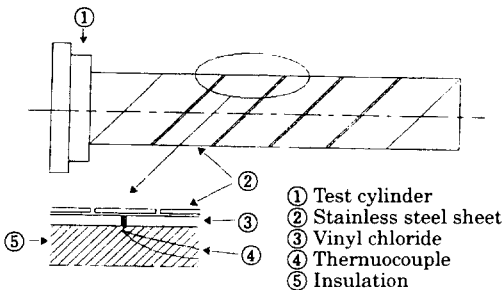
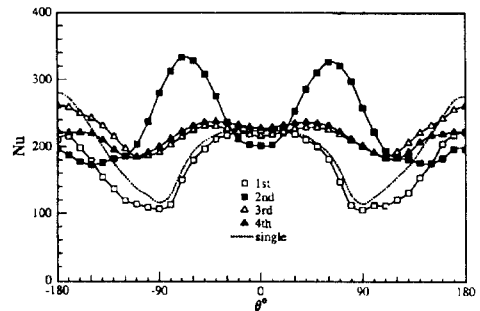


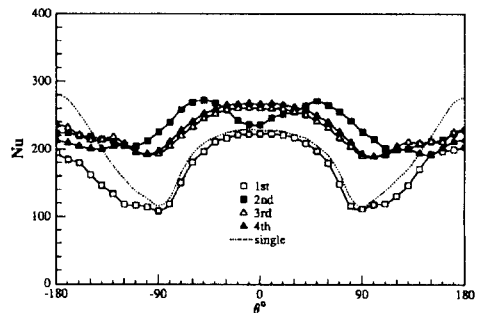
Fig. 2 Schematic diagram of heating tube.

3. 실험결과 및 고찰

Fig.3은 $Re=50000$ 에서 원관 간격 $L/d=1.76$, 3.5인 경우에 스케일이 부착되지 않은 淸淨 4원관에 대한 국소Nu수(local Nusselt number)의 분포를 나타내고 있다. Fig.3(a)는 4원관 모두 국소Nu수가 전면 정체점($\theta=0^\circ$)을 기준으로 양호한 대칭을 이루고 있음을 볼 수 있으며, 1번 원관의 경우는 단독 淸淨원관의 경향과 유사함을 알 수 있으나, 원관 後面($90^\circ \leq \theta \leq -90^\circ$)의 Nu수는 後方원관의 영향 때문에 원관 前面($-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)의 경우보다 약간 낮게 분포되고 있으며 下流방향으로 갈수록 그 차이는 커지고 있다. 최대Nu수는 원관 前面정체점($\theta=0^\circ$)에서 얻어지고 上流표면을 따라 층류경계층이 발달하게 되어 $\theta = \pm 90^\circ$ 에서 최소값을 나타내며 그 위치가 유동의 박리가 시작되는 지점으로 사료된다. 이후의 박리유동 영역에서는 下流방향을 따라 다시 증가하게 된다. 2번 원관의 경우는 1번 원관으로부터 박리된 전단층이



(a) $L/d=1.76$



(b) $L/d=3.5$

Fig. 3 Local Nusselt number distribution of clean cylinder at $Re=50000$.

부착되는 $\theta = \pm 70^\circ$ 부근에서 Nu수의 최대값이 나타난다. Nu수의 최대값에 대한 속도구배는 다른 원관에 비하여 상당히 크고 이에 따라 부착점 부근의 열전달비가 높게 나타나게 되며 정체점에서의 Nu값은 1번 원관 보다도 낮다. 3, 4번 원관의 경향은 매우 유사하게 나타나며 1, 2번 원관과는 많은 차이가 난다. Nu수의 최대값은 $\theta = \pm 40^\circ$ 부근에 나타나는데 부착점은 2번 원관에 비하여 $\pm 30^\circ$ 정도 前面 上流에 존재하며 上流 정체점에서의 Nu수는 2번 원관 보다도 높게 나타난다. 이것은 2번 원관과 후방 원관들의 영향을 받는 것으로 사료되며 전단층의 박리는 $\theta = \pm 120^\circ$ 부근에서 일어난다.

Fig.3(b)는 $L/d=3.5$ 인 경우를 보이고 있다. 1, 2번 원관의 국소Nu수 변화는 $L/d=1.76$ 의 경우와 경향은 유사하나 전반적으로 낮은 값을 보이고 있는데 2번 원관의 경우, 원관간격의 증가로 인한 1번 원관 後流쪽의 감소 때문에 부착점으로 생각되는 $\theta = \pm 50^\circ$ 부근의 최대Nu수는 $L/d=1.76$ 에 비하여 $\pm 20^\circ$ 정도 상류방향으로 이동 되었으나 열전달비는 약화된 것을 알 수 있다. 정체점은 1번 원관의 값 이상으로 증가 되었고 3, 4번 원관 역시 원관간격이 증가하게 되면 원관의 前面 주위에 主流의 진입이 증가되므로써 前面 정체점에서 최대값이 나타난후 $\theta = \pm 90^\circ$ 부근에서 최소값이 얻어 지는데 박리점의 위치는 上流쪽으로 이동된 것을 알 수 있다.

Fig.4(a), (b), (c)는 3번 淸淨원관의 국소Nu수를 Re수 변화에 대하여 원관 간격 $L/d=1.5, 1.76, 3.0$ 의 경우를 나타내고 있다. $L/d=1.5$ 의 경우, $Re \geq 20000$ 영역에서 Nu수의 분포는 $L/d=1.76$ 의 경우와 큰 차이는 없다. 최대 Nu수는 $\theta = \pm 50^\circ$ 부근에 위치하나 $Re=13000$ 에서는 국소Nu수의 분포에 변화가 생기고 최대값이 $\theta = \pm 60^\circ$ 의 下流방향으로 이동되며 원관 前面에서의 열전달은 저하되고 최소Nu수의 위치는 불분명하게 되어 박리점의 위치를 결정하기가 어렵게 된다. $L/d=1.76, 3.0$ 의 경우 Re수에 대한 Nu수의 변화는 적은편이며 $\theta = \pm 110^\circ$ 에 박리점이 존재하는 것을 알 수 있다. 특히 $L/d=1.76$ 에서는 Nu수의 최대값과 최소값이 Re수의 변화에 관계없이 항상 $\theta = \pm 50^\circ$ 와 $\theta = \pm 110^\circ$ 에서 나타나고 있으며 원관 간격이

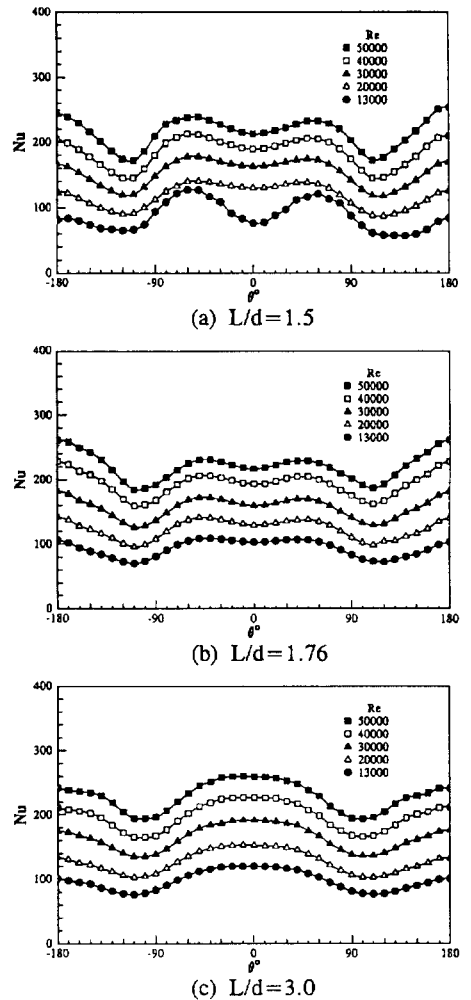


Fig. 4 Local Nusselt number of third cylinder with clean surface.

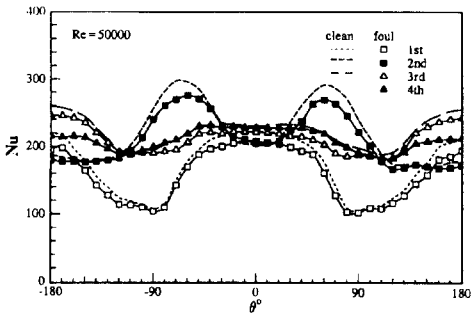
$L/d=3.0$ 로 넓어지게 되면 원관 前面으로 主流의 진입이 증가되어 上流 정체점에서 Nu수의 최대값이 명료하게 나타난다. 위의 3가지 원관 간격에 대한 4번 원관의 결과는 도시 하지는 않았으나 3번 원관과 매우 유사한 경향을 나타낸다.

Fig.5는 $L/d=2.0, Re=50000$ 의 경우, 스케일 입자 $k/d=0.0025, 0.032$ 의 부착에 의한 오염된 원관의 결과를 나타내고 있다. Fig.5(a)는 스케일 입자의 크기가 작은 $k/d=0.0025$ 에 대한 국소Nu수의 분포를 나타내고 있는데 스케일의 열저항 때문에 동일 간격의 淸淨원관의 경우에 비교하여 원관

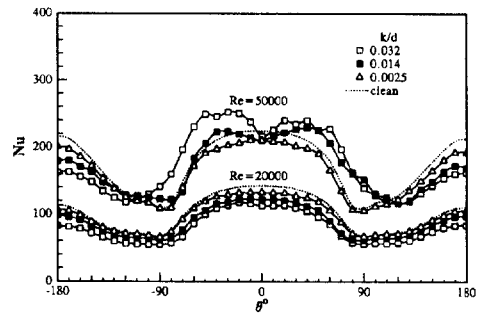
전체에 걸쳐 거의 균일하게 감소되었으며 전방 원관의 정체점 및 2번 원관 부착점에서 저하율이 가장 뚜렷한 것을 알 수 있다. Fig.5(b)는 입자가 제일 큰 $k/d=0.032$ 의 결과이다. 1번 원관은 스케일 입자의 조도 때문에 前面 정체점으로부터 층류 경계층이 난류로 천이 되어 원관 前面에서 두 개의 최대점을 형성하고 박리점은 $\theta = \pm 120^\circ$ 부근으로 이동 되었으며 그곳에서 난류박리가 일어난다. $\theta = 0^\circ$ 에서 Nu수는 스케일층의 절연효과 때문에 淸淨표면과 비교하여 낮게 나타나고 있으며 천이점으로부터 박리점까지의 Nu수는 반대로 높은 것을 알 수 있다. 2번 원관의 경우 원관 전면 정체점의 Nu수는 스케일층의 절연효과 때문에 급격히 감소되었으며 Fig.5(a)에서는 박리점의 위치가 불분명 하였으나 $\theta = \pm 130^\circ \sim 150^\circ$ 에서 박리점을 찾을 수 있고 이후의 Nu수는 다시 증가되고 있다. 3, 4번 원관의 경우는 Nu수 분포의 대칭성이 없어졌는데 이는 앞에 위치한 원관들로부터 난류경계층이 발달되기 때문으로 사료되며 원관의 前面에 부

착된 높은 난류 유동은 그 위치에서 높은 Nu수의 결과로 나타나고 이후 박리된 유동영역에서의 Nu수는 다시 증가되고 있다.

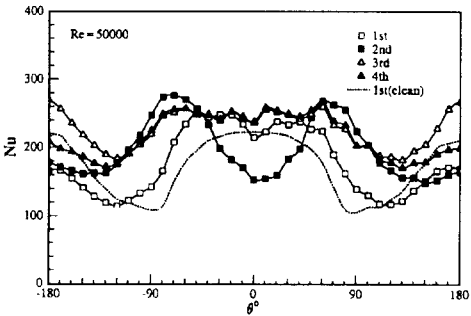
Fig.6은 1, 2번 원관의 국소Nu수 분포를 원관거리 $L/d=2.5$ 에서 스케일 크기 영향에 대하여 도시한 것이다. Fig.6(a)에서 가장 작은 $k/d=0.0025$ 의 경우, 淸淨원관과 거의 같은 경향을 보이거나 스케일층의 절연효과 때문에 약간 낮게 분포되고 있다. $k/d=0.014$ 의 경우에는 스케일 입자의 조도 때문에 전면 정체점 가까이에서 층류에서 난류로 천이 되므로써 $\theta = \pm 40^\circ$ 부근에서 최대Nu수가 나타나고 下流방향으로 감소되어 난류박리가 일어난다. $k/d=0.032$ 의 경우에는 최대Nu수가 淸淨원관의 전면 정체점 보다도 높으며 박리된 유동영역에서 Nu수는 스케일층의 절연효과 증가로 인하여 가장 낮은 값을 보이고 있다. Fig.6(b)는 2번 원관에 대한 결과로서 $k/d=0.032$ 의 경우, $\theta = \pm 70^\circ$ 부근에서 최대값이 나타나며 그곳이 1번 원관으로부터 박리된 전단층이 부착되는 것을 의미하고 입자의



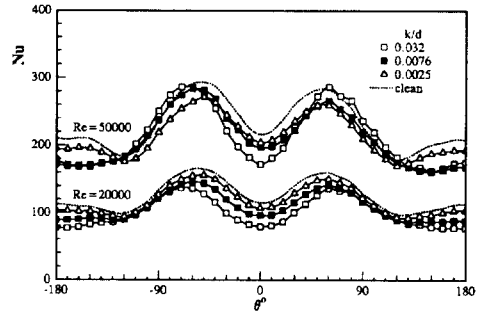
(a) $k/d=0.0025$



(a) First cylinder



(b) $k/d=0.032$



(b) Second cylinder

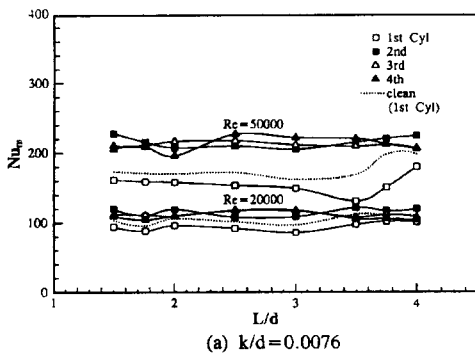
Fig. 5 Local Nusselt number distribution of fouled cylinder at $L/d=2.0$.

Fig.6 Local Nusselt number distribution of fouled cylinder at $L/d=2.5$.

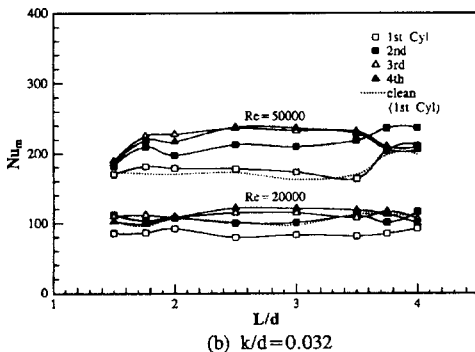
크기가 커질수록 부착점의 위치가 하류 방향으로 이동된 것을 알 수 있으며 Nu값 역시 높게 나타난다. 그리고 정체점으로부터 부착점까지의 Nu수는 스케일 입자가 클수록 낮은 값을 보이나 부착점 이후 박리점까지는 반대의 현상이 나타난다. 또한 $k/d < 0.032$ 인 경우, Nu수의 최소값은 박리점에 존재하는데 비하여 $k/d = 0.032$ 의 경우는 원관 전면 정체점에 존재되고 있다. 그러나 $Re = 20000$ 의 경우는, 각 입자의 크기에 따라 부착점의 위치는 $Re = 50000$ 의 경우와 동일하지만 최대 Nu수는 유동속도 저하로 인한 절연효과 증가로 입자가 작을수록 높게 나타난다.

Fig. 7은 $k/d = 0.0076, 0.032$ 의 스케일이 부착된 오염원관에 대하여 $Re = 50000, 20000$ 인 경우 원관 간격 L/d 에 대한 평균Nu수의 변화를 도시하고 있다. Fig. 7(a)의 $Re = 50000$ 에서 1번 원관에 대한 평균Nu수의 변화는 다른 원관들에 비하여 복잡한 변화를 보이고 있다. 평균Nu수의 변화는 원관 간격이 증가하면 감소되며 $L/d = 3.5$ 에서 최소

값이 얻어지고 그 이상의 간격이 되면 불연속적으로 증가하고 스케일 입자크기 $k/d \leq 0.076$ 에서는 항상 청정원관의 값보다 낮다. 그러한 변화의 이유는 원관 간격이 넓어 지므로서 湍度가 1번 원관의 후流내에서 형성되고 저온의 主流 진입이 Nu수의 증가를 가져오기 때문이다. 그러나 다른 원관들은 뚜렷한 변화를 보이지 않는다. 7(b)의 $k/d = 0.032$ 경우, 일반적으로 스케일 입자의 크기가 증가하면 평균Nu수는 감소하나 그러한 경향은 높은 Re수에서 난류유동 때문에 반대의 현상이 나타나는 경우도 있다. $Re = 50000$ 에서 오염된 1번 원관의 평균Nu수는 淸淨원관의 값 보다 약간 높게 나타나고 있는데 이러한 결과는 어느 특정 범위의 Re수에서 스케일 입자의 조도에 의한 난류의 발달로 인하여 오염된 표면의 열전달 능력이 증대되기 때문으로 사료된다. 3,4원관의 경우, $L/d = 3.5$ 이후 1번 원관과 같은 불연속적인 증가는 나타나지 않으며 평균Nu수는 원관 주위의 주류 진입으로 인하여 오히려 감소되고 있다. 그리고 $Re = 20000$ 에서는 원관 간격

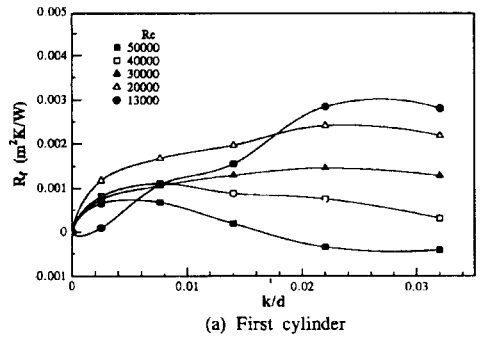


(a) $k/d = 0.0076$

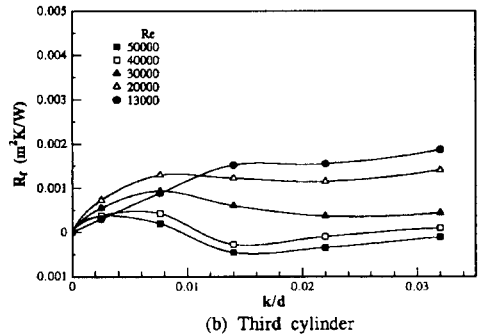


(b) $k/d = 0.032$

Fig. 7 Mean Nusselt number at $Re = 50000$ and 20000 .



(a) First cylinder



(b) Third cylinder

Fig. 8 Fouling resistance of first and third cylinders at $L/d = 2.0$.

증가에 대한 뚜렷한 변화는 나타나지 않는다. 이러한 결과들은 원관에 축적된 지열수 스케일의 오염이 가열표면에 심각한 영향을 미치며 그의 열전달 능력은 Re수, 스케일 입자의 두께, 원관 간격 등에 크게 의존 된다는 것을 의미한다.

Fig.8은 원관간격 $L/d=2.0$ 에서 1, 3원관에 대한 오염저항 R_f 의 변화를 도시하고 있다. 8(a)의 1번 원관은 일정한 유동내에 놓여있기 때문에 8(b)의 3번 원관에 비교하여 폭 넓은 변화를 하고 있다. $Re \geq 40000$ 에서 오염저항 R_f 는 $k/d=0.0076$ 에서 최대값이 얻어지고, $Re \leq 30000$ 인 경우에는 $k/d=0.022$ 에서 최대값에 도달되며 이후 스케일 입자 크기가 증가되면 오염저항 R_f 는 감소되는데

이것은 스케일층에 의한 열전달의 증진 때문이며 유동속도가 낮은 $Re=13000$ 의 경우에는 절연효과가 확대되므로 뚜렷하게 k/d 가 증대되면 오염저항 R_f 는 급상승 되고 있다. 8(b)의 3번 원관 역시 $Re=13000$ 에서 k/d 가 증가하면 오염저항 R_f 는 상승하나 그 비율은 1번 원관에 비하여 작다. 그러한 차이의 이유는 전방원주에 의해 형성된 높은 난류 유동내에 후방원주가 위치하기 때문으로 사료된다.

Fig.9는 1, 3번 원관의 평균오염저항 R_f 를 Re수와 원관 간격 $L/d=1.5, 2.0$ 의 변화에 대하여 나타낸 것이다. 1번 원관의 R_f 변화 특성은 스케일 입자 크기와 Re수에 크게 의존되고 있는데 $k/d=0.032,$

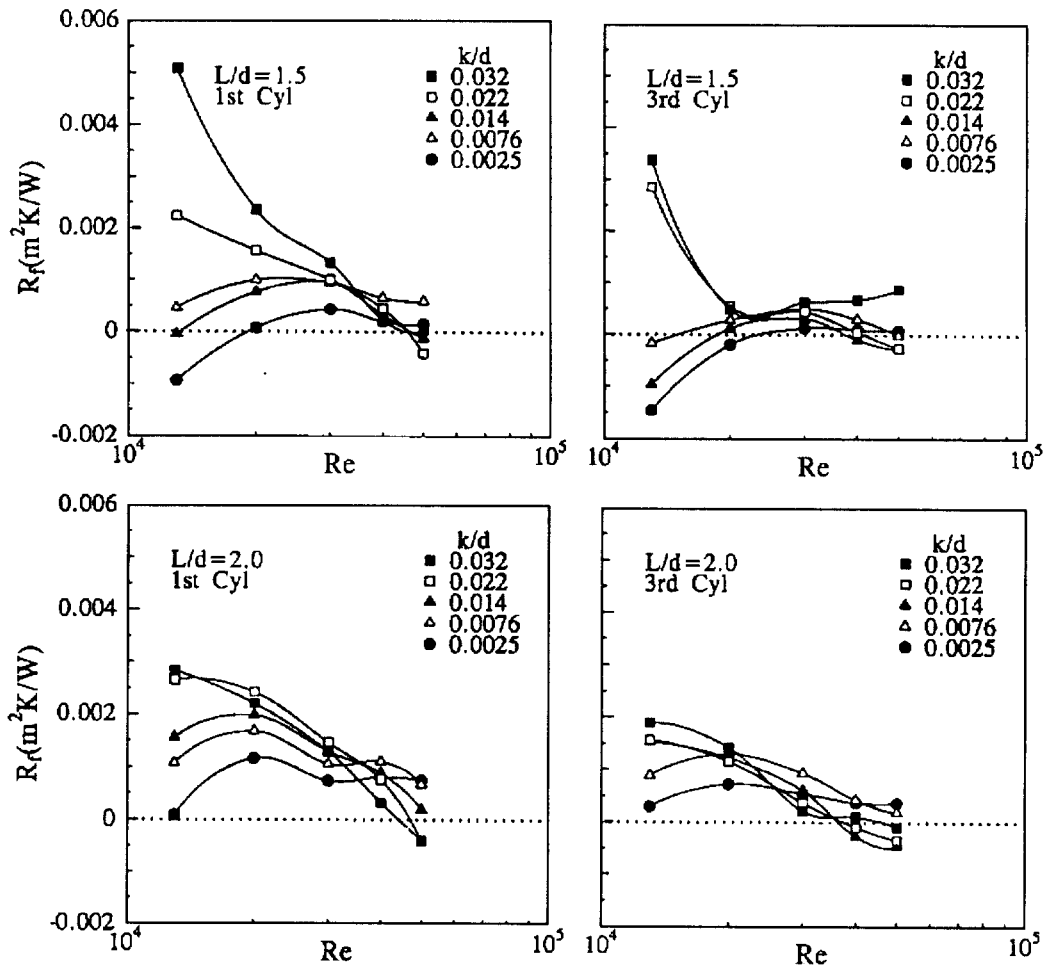


Fig. 9 Fouling resistance of first and third cylinders.

0.022와 같은 큰 스케일 입자의 경우 R_f 는 Re 수의 증가에 따라 크게 감소되나 $k/d=0.0075, 0.0025$ 와 같은 작은 스케일 입자의 경우는 상대적으로 그 변화율이 작다. 그리고 R_f 는 원관간격과 스케일 입자의 크기에 의존하여 어떤 특정 영역의 Re 수 범위에서 최대값을 나타내며 $L/d=1.5$ 의 경우, 1,3원관 모두 낮은 Re 수 범위에서는 스케일층에 의해 열전달이 증대 됨으로써 R_f 가 음수의 값이 되기도 한다. 3번 원관에서 $L/d=2.0$ 과 $k/d=0.0025, 0.0076$ 의 경우 R_f 는 $Re=20000$ 에서 최대값에 도달되고 이후는 감소된다. 이것은 후방 원관은 전방 원관에 의해서 형성된 높은 난류 유동내에 놓여있고 또한 스케일층의 영향이 상대적으로 작기 때문이다. 그러나 1번 원관은 일정한 유동내에 놓여 있으므로 스케일층의 절연효과는 다른 원관에 비하여 매우 크다

4. 결 론

지열수 스케일이 부착된 직렬 원관의 열전달 특성은 스케일 입자의 크기에 의하여 큰 영향을 받으며 국소 및 평균 Nu 수는 원관 간격과 Re 수에 의존되는데 주요 결과를 요약하면 다음과 같다. 1번 원관의 경우 국소 및 평균 Nu 수의 변화는 단독 원관의 경우와 유사하고 입자가 큰 스케일은 층류계층을 난류로 천이시켜 원관 上流에서 Nu 수의 증가를 가져오고 下流에서는 감소된다. $Re \geq 40000$ 과 $k/d \leq 0.0076$ 일 때 평균 Nu 수는 淸淨 원관 보다도 낮으며, $Re=50000$ 에서 모든 스케일 입자에 대하여 평균 Nu 수는 원관 간격이 커지면 감소하고 $L/d=3.5$ 에서 최소값에 이르며 그 이후는 불연속적으로 증가된다. 그리고 스케일 축적에 의한 오염 영향은 4원관 중에서 제일 크며 평균오염 저항 R_f 는 스케일 입자가 클 때 Re 수 증가에 따라 급격히 감소된다. 2번 원관의 경우, 국소 Nu 수 분포는 1번 원관으로 부터 박리된 전단층에 의해 크게 의존된다. 즉 박리된 전단층의 부착점에서 최대값이 얻어지고 원관 전면 정체점에서는 아주 낮다. 파울링의 영향은 1번 원관에 의해 형성된 높은 난류유동내에 놓여 있으므로 1번 원관에 비하여 작다. 3번, 4번 원관의 경우 국소 및 평균 Nu 수의

분포는 서로 유사한 경향을 보이며 원관 간격에 의한 의존성은 전방 원관에 비하여 약하다.

NOMENCLATURE

- d : cylinder diameter
- h : heat transfer coefficient $=q/(T_w - T_\infty)$
- k : size of scale particle
- L : longitudinal spacing between neighbouring cylinder centers
- Nu : Nusselt number $=hd/\lambda$
- q : heat flux per unit area and unit time
- Re : Reynolds number $=U_\infty d/\nu$
- R_f : mean fouling resistance of scale
- T_∞ : temperature of upstream uniform flow
- T_w : wall temperature
- U_∞ : velocity of upstream uniform flow
- λ : thermal conductivity of air
- ν : kinematic viscosity of air
- θ : angle from forward stagnation point

SUBSCRIPT

- c : clean
- f : fouled
- m : mean
- w : wall

참고문헌

- (1) Rott.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) Somerscales. E.F.C and Knudsen. J.G., Fouling of Heat Transfer Equipment, Hemisphere Publishing Corp, (1981).
- (4) 藤井, 熱交換裝置の汚れ, 冷凍, 65~758, 56, (1990)
- (5) Aiba.S., Tsuchida.H. and Ota.T., Heat transfer Around a Tube in a Bank, Bulletin of JSME, Vol.23, (1980), pp.1163~1170
- (6) 五十崩, 直列2圓柱まわりの流れ特性, 機論, 46~406, pp1026, B(昭55)

- (7) Watkinson.A.P., Scaling of Spirally Indented Heat Exchanger Tubes, ASME Journal of Heat Transfer, Vol.97, pp.490~492, (1975)
- (8) Chamra.L.A and Webb.R.L., Effect of Particle Size Distribution on Particulate Fouling in Enhanced Tubes. Enhanced Heat Transfer, Vol.1, pp.65~75, (1993)
- (9) Ota.T., Nishiyama.H.and Akama.Y., Fouling Effects of Geothermal Water Scale upon Heat Transfer around a Circular Cylinder, Trans. of JAR, Vol.1, pp.51~57, (1984)
- (10) Ota.T. and Nishiyama.H., Fouling Effects of Geothermal Water Scale upon Heat Transfer around an Elliptic Cylinder, Wärme und Stoffübertragung, Vol.19, pp.93~100, (1985)
- (11) Z.G.Kostic and S.N.Oka, Fluid flow and Heat Transfer with Two Cylinder in Cross Flow", Int J.Heat Mass Transfer., Vol.15~2, pp.279, (1972)
- (12) 檜和田, 馬淵, 柳原, 同徑直列2圓柱の流動と熱傳達, 機論, 48~427, pp.499, B(昭57)
- (13) E.Achenbach, 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, (1977).
- (14) 五十崩, 飯田, ボルテックスジェネレータのある圓柱まわりの流動と熱傳達, 機論 Vol.51~467, pp2420, B(昭60)
- (15) R.Sheikholeslami and A. P. Watkinson, Scaling of plain and Externally Finned Heat Exchanger Tubes, J. Heat Transfer, Vol.108, pp.147, (1986)

저 자 소 개



김민수(金載洙)

1958년 5월생. 1986년 서울산업대학교 기계공학과 졸업. 1993년 전북대학교 기계공학과 졸업(박사). 현재 익산대학 기계과 부교수.



윤석범(尹錫凡)

1951년 9월생. 1974년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1987년 단국대학교 기계공학과 졸업(박사). 현재 익산대학 자동차과 교수. 당학회 회원