

열전달 촉진관내의 화울링 해석-2차원 리브블이관에
 Kern-Seaton 화울링 모델 적용
 Fouling in Enhanced Tubes-Extension of Kern-Seaton Fouling
 Model to Repeated Ribbed Tubes

김 내 현*
 N. H. Kim

Key Words : Fouling(화울링), Tube(관), Enhanced(촉진), Repeated-ribbed(리브블이), Model(모델)

ABSTRACT

Fouling is "a major unsolved" area in heat transfer research. Currently, fouling researches are performed in every directions-fundamental aspects, modeling and cumulating experimental data. In this study, an attempt was made to extend the knowledge in enhanced tube fouling. The Kern-Seaton fouling model which was originally proposed for smooth tube fouling was extended to repeated rib tubes. Key parameters-mass transfer coefficient and wall shear stress-were modeled for repeated rib tubes. Some critical points related with the enhanced tube fouling-uncertainties in the mass transfer rate, wall shear stress modeling, deformation of roughness shape during fouling-were discussed, and some quantitative evaluations were made.

기호설명

D : 관의 내경

e : 리브의 높이

e^+ : 조도 Reynolds 수 $\left(= \frac{e}{D} Re \sqrt{\frac{f}{2}} \right)$

f : Fanning 마찰계수 $\left(= \Delta p \frac{D}{L} \frac{1}{2\rho u^2} \right)$

k_f : 침적물의 열전도 계수

k_m : 물질 전달 계수

m_f : 침적물의 질량

m_f^* : 점근적 침적물의 증가율

\dot{m}_{f0} : 초기 침적물 증가율

p : 리브의 핏치

Pr : Prandtl 수

Re : Reynolds 수

R_f : 화울링 저항

R_f^* : 점근적 화울링 저항

R_{f0} : 초기 화울링 증가율

Sc : Schmidt 수

St : Stanton 수

St_m : 물질 전달 Stanton 수 $(= km/u)$

* 금오공대 기계공학과

- St : Stanton 수
 St_m : 물질 전달 Stanton 수 (= km/u)
 t : 시간
 t_c : 시간 상수 (식(5) 참조)
 u : 관 평균 유속
 ΔP : 관내 압력손실
 φ_d : 단위 면적당 침적율
 φ_r : 단위 면적당 제거율
 ρ : 유체의 밀도
 ρ_f : 침적물의 밀도
 τ_w : 벽면 전단응력

1. 개 요

화울링이란 열전달 표면에 이물질이 침적하여 그 표면의 열수력적 성능을 저하시키는 현상을 말한다. 이러한 화울링은 열교환기의 초기비용 뿐 만이 아니라 운용비용도 증가시키게 된다.

최근들어 열전달 축진관이 널리 사용되고 있다. 축진관의 내부 형상은 통상 나선형 리브블이, 주름형상 또는 삼차원적 조도를 가지고 있다. 이러한 축진관내에 이물질이 침적할 경우는 그 이물질이 조도 사이를 매울 수가 있으므로 평관의 경우에 비하여 열전달 성능이 더욱 나빠지게 된다. 따라서, 조도의 형상은 이물질의 침적이 적은 형상으로 선정됨이 바람직하다. 축진관의 화울링에 대한 연구는 별로 많지 않은데, 주로 실험적으로 연구되어 왔다. Watkinson 등⁽¹⁾은 나선형 주름잡힌관(spirally indented tube)에 유속 0.5-3m/s에서 행한 관석에 의한 화울링(scaling) 실험에서 주름잡힌 관의 화울링은 평관의 화울링과 유사함을 보여주었다. Webb과 Kim⁽²⁾은 나선형 리브블이 관에 대한 미세 입자에 의한 화울링(particulate fouling) 실험에서 리브블이관의 화울링은 2m/s 이상에서는 평관의 화울링과 유사하고 그 이하의 유속에서는 평관보다 높게 나타남을 보여주었다.

화울링 현상에는 많은 변수들이 관계되기 때문에 화울링 모델을 개발한다는 것은 매우 어려운 작업이다. 화울링에 관계되는 변수들로는 이물질의 종류(입자, 미생물, 석회질등), 열교환기 운전 변수(유속, 온도등), 관의 재질(동, 알

루미늄, 스테인레스등), 표면 조도 등 여러가지가 있는데, 이렇게 많은 변수들을 모두 고려한 모델을 개발한다는 것은 거의 불가능한 일이다. 따라서, 화울링 모델에 대한 연구는 화울링 값을 정량적으로 예측하기 보다는 상기 변수의 경향을 설명하는 데 초점이 맞추어져 왔다.

최초의, 또한 가장 널리 알려진 화울링 모델은 Kern과 Seaton⁽³⁾에 의하여 제안되었다. 산업 현장이나 실험실에서 주로 관측되는 화울링 곡선은 시간에 따라 점근적인(asymptotic) 경향을 보여주게 된다. 그림1에 점근적 화울링 곡선이 나타나 있다. 그림1에 보여지듯이 침적율은 초기에 높고 시간이 지남에 따라 감소하면서 화울링 값은 점근치에 접근하게 된다. Kern과 Seaton은 이러한 점근적 경향은 이물질이 연속적으로 표면에 침적되고 동시에 표면으로부터 제거됨으로써 나타나게 된다고 가정하였다. 그들의 모델은 화울링 곡선의 점근적 현상과 유속의 영향을 적절히 설명하는 모델로 평가 된다.

Kern과 Seaton 이후 많은 연구자들이 화울링 모델을 발표하였다. Watkinson과 Epstein⁽⁴⁾은 부착 확률(sticking probability) - 벽면에 이송된 입자가 부착할 확률 - 의 개념을 도입하였고, Taborek 등⁽⁵⁾은 침적물의 부착강도를 고려한 모델을 제안하였는데 이 모델들은 Kern과 Seaton의 모델을 근간으로 한 것들이다. 이외에도 Gudmundsson⁽⁶⁾, Thomas와 Grigull⁽⁷⁾ 등이 화울링 모델을 제안하였다. 이러한 모델들은 주로 평관에 적용되어 왔는데, 최근들어 축진관의 사용이 늘어남에 따라 축진관에 적합한 모델이 필요하게 된다.

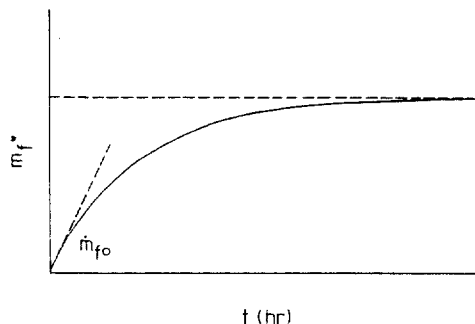


Fig. 1 Asymptotic fouling curve

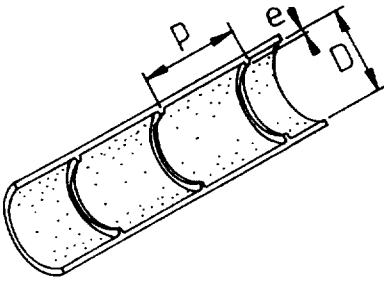


Fig. 2 Sketch of a repeated rib tube

본 논문에서는 평관에서 제안된 Kern과 Seaton의 모델을 열전달촉진관의 가장 간단한 형태인 리브블이 이차원 조도관에 적용하여 보았다. 리브블이 이차원 조도관은 그림2에 나타나 있는데, 리브 높이(e)와 리브 핏치(p), 그리고 관 내경(D)로 특징지워질수 있는 관을 말한다. 우선 Kern과 Seaton의 모델을 소개하고, 그 모델이 어떻게 이차원 조도관에 적용될 수 있는지 살펴보았다. 또한, Kern과 Seaton의 모델 적용시 나타나는 문제점도 고찰하였다.

2. Kern-Seaton 화울링 모델

Kern과 Seaton은 화울링의 점근적 현상은 이 물질이 연속적으로 벽면에 침적되고 동시에 벽면으로부터 제거됨으로써 나타나게 된다고 가정하였다. 따라서 벽면에서의 침적율은 아래식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_i = \varphi_d - \varphi_r \dots\dots\dots (1)$$

여기서 \dot{m}_i 는 단위 면적당 침적물 증가량이고 φ_d 는 단위 면적당 침적율, 그리고 φ_r 은 단위 면적당 침적물 제거율이다. Kern과 Seaton은 물질 전달이 침적율을 결정하고 벽면 전단 응력이 제거율을 결정한다고 가정하였다. 즉,

$$\varphi_d = k_m (C_b - C_w) \dots\dots\dots (2)$$

$$\varphi_r = C\tau_w m_i \dots\dots\dots (3)$$

여기서 k_m 은 물질 전달 계수, C_b 는 유체내 이 물질의 농도, C_w 는 벽면에서의 이물질 농도, 그리고 τ_w 은 벽면 전단 응력, 그리고 C 는 비례상수이다. 방정식(3)에서 제거율 φ_r 은 이물질 침적량 m_i 에 비례한다고 가정하였는데, 이는 상부 침적물은 하부 침적물보다 약하게 부착되어 있어서 전단력에 의해 좀 더 손쉽게 제거됨을 의미한다.

식(2)와 (3), 그리고 초기 조건 $t = 0$ 에서 $m_i = 0$ 를 이용하여 식(1)을 적분하면 아래 식을 얻는다.

$$m_i = m_i^* (1 - e^{-t/t_c}) \dots\dots\dots (4)$$

여기서 t_c 는 식(5)로 정의되는 시간 상수이다.

$$t_c = \frac{m_i}{\varphi_r} = \frac{1}{C\tau_w} \dots\dots\dots (5)$$

식(4)에서 점근 침적량 m_i^* 는 아래식으로 나타난다.

$$m_i^* = \varphi_d t_c \dots\dots\dots (6)$$

또한 초기 침적율 \dot{m}_{i0} 도 식(4)로부터 아래와 같이 계산된다.

$$\dot{m}_{i0} = \frac{m_i}{t_c} = \varphi_d \dots\dots\dots (7)$$

시간상수 t_c 는 화울링이 초기 침적율로 선형적으로 진행될 때 점근 침적량에 도달하기 까지 걸리는 시간으로 생각할 수도 있다. 식(5)-(7)은 열적 화울링 계수 $R_f = m_i / \rho k_f$ 를 사용하여 아래 식으로 다시 나타낼 수가 있다.

$$R_f = R_f^* (1 - e^{-t/t_c}) \dots\dots\dots (8)$$

$$R_f^* = \frac{\varphi_d t_c}{\rho k_f} \dots\dots\dots (9)$$

$$R_{i0} = \frac{\varphi_d}{\rho k_f} \dots\dots\dots (10)$$

여기서 R_f^* 는 점근 화울링 계수이고 R_{i0} 는 초기 화울링율이다. 위 식에서 ρ 는 침적물의 밀도이고

k_m 는 침적물의 열전도도이다.////

다음 절에서는 Kern-Seaton 모델을 이차원 리브블이 관에 적용하여 보았다. 또한, 조도 표면의 화올링 모델 개발시 예상되는 문제점도 고찰하였다.

3. 이차원 리브블이 관에 Kern-Seaton 모델의 적용

Kern-Seaton 모델 (식(2)와 (3))을 이차원 리브블이관을 적용하기 위해서는 물질 전달 계수 k_m 과 벽면 전단응력 τ 의 모델링이 필요하다.

3.1 물질전달 계수 k_m

화올링시 이물질의 침적물은 물질 전달 계수에 비례하여 증가하기 때문에 물질 전달계수를 적절히 예측하는 것이 필요하다. 미세 입자가 벽면으로 이송될 경우 Schmidt 수는 $10^4 - 10^6$ 정도 된다. 문헌 조사 결과 이렇게 높은 Schmidt 수에 적용할 수 있는 물질 전달 계수의 상관식은 제안되지 않았다. 본 연구에서는 열과 물질 전달의 유사성을 이용하여 물질전달 상관식을 적절한 열전달 상관식으로부터 구하였다. 이차원 리브블이 관에 대해서는 Webb 등⁽⁸⁾은 하기의 열전달 상관식을 제안하였다.

$$St = \frac{f/2}{1 + \sqrt{f/2} [4.75(e^+)^{0.28} Pr^{0.57} - 0.95(p/e)^{0.53}]} \dots\dots\dots (11)$$

윗 식은 $0.7 < Pr < 40$ 의 실험자료로부터 구해진 상관식이다. 식(11)은 Prandtl수를 Schmidt수로 대체하고 Stanton수를 물질전달 Stanton수(St_m)로 대체하면 이차원 리브블이관의 물질 전달을 예측하는 데 사용될 수 있다. 높은 Prandtl (또는 Schmidt)수에서는 식(11)은 하기 식으로 간소화 된다.

$$St_m = \frac{k_m}{u} = \frac{\sqrt{f/2}}{4.75(e^+)^{0.28} Sc^{0.57}} \dots\dots\dots (12)$$

다른 하나의 널리 사용되는 열전달 상관식은 Kader와 Yaglom⁽⁹⁾에 의하여 제안되었다. 그들은 차원 및 상사해석을 통하여 이차원 조도 표면에 적용할 수 있는 상관식을 유도해 내었는데, 그들의 상관식은 보다 넓은 범위의 Prandtl수($0.7 < Pr < 5000$)에 적용 가능함을 보여주었다. 높은 Schmidt수에서 그 상관식은 아래와 같이 된다.

$$St_m = \frac{k_m}{u} = \frac{\sqrt{f/2}}{3.2(e^+)^{0.25} Sc^{2/3}} \dots\dots\dots (13)$$

상기 두 상관식은 모두 Prandtl수가 그렇게 크지 않은 열전달의 경우 실험자료를 잘 예측하였다. 입자 이송의 경우 Schmidt수는 $10^4 - 10^6$ 정도 된다. 이렇게 높은 Schmidt수에서는 두 상관식의 예측치는 다를 수가 있는데, 그림3에 비교 결과가 나타나있다. 그림3에 나타나 있듯이 $Sc < 100$ 인 경우는 두 상관식은 거의 같은 값을 예측하게 된다($Sc < 100$ 인 경우는 그래프가 $Sc = 100$ 인 경우와 거의 겹치기 때문에 그림3에는 $Sc = 100$ 인 경우만이 나타나 있다). 그러나, Schmidt수가 커질수록 점점 차이가 나게 되는데, 예를 들면 $Sc = 10^6$ 에서 Webb의 상관식은 Kader의 상관식보다 약 2배 정도 큰 값을 예측하게 된다. 그 이유는 각 상관식 내의 Schmidt수의 지수가 다른 때문으로 판단되는데, Webb의 상관식은 Schmidt수의 지수가 0.57인 반면 Kader의 상관식은 0.67이다. 높은 Schmidt수에서는 지수값의 조그마한 차이도 예측 결과에는 큰 영향을 미치게 된다.

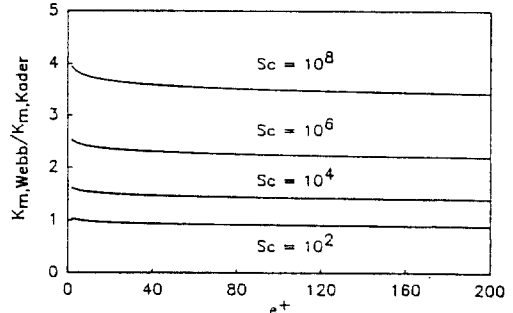


Fig. 3 Comparison of mass transfer coefficients predicted by Webb (8) and Kader (9) correlations

높은 Schmidt수에서의 Schmidt수 지수값은 아직 잘 알려지지 않고 있다. Dawson과 Trass⁽¹⁰⁾는 흡진 형상에서의 물질전달 실험을 통하여 0.55의 지수값을 제안하였다. 반면에, Hahn등⁽¹¹⁾은 리브블이관에서의 에어로솔 침적 실험 결과를 Kader의 상관식을 사용하여 예측하였다. 화올링 해석을 위해서는 이송계수의 상관식이 필수적인데, 이에 관해서는 좀더 많은 연구가 필요하다고 판단된다.

그림4에 세 종류의 리브 블이관(30/20, 30/10, 15/10)에 대하여 Webb의 상관식을 이용하여 계산된 물질 전달 계수의 값이 나타나 있다. 이때, Schmidt수는 5×10^6 을 사용하였다. 리브블이관을 지칭하기 위하여 사용된 기호중 앞 부분은 e/D 값을, 뒷 부분은 p/e 값을 나타낸다. 예를들면, 30/20관은 $e/D = 0.03$ 이고 $p/e = 20$ 이다. 상기 리브 블이 관들은 Kim⁽¹²⁾의 화올링 실험 자료와 비교하기 위하여 그의 시편과 같은 형상으로 선정되었다. 그림4에는 평관의 값도 나타나 있다. 그림4에 나타나 있듯이 리브 블이관의 물질전달계수는 평관의 그것에 비하여 훨씬 크고, 리브 블이 관 중에서는 15/10관과 30/10관의 전달 계수는 비슷하고 30/20관의 전달 계수는 다른 관들에 비하여 적은 것을 보여준다. 이는 조사된 조도 형상($0.015 \leq e/D \leq 0.03, 10 \leq p/e \leq 20$) 내에서는 물질 전달에 리브의 높이가 미치는 영향은 미소하고, 리브 핏치는 적을수록 물질 전달율이 커짐을 의미한다. 이러한 경향은 Kader와

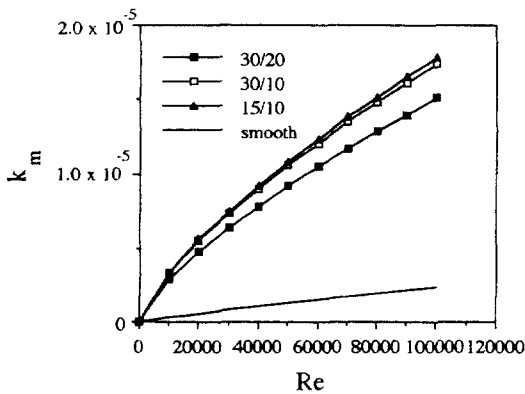


Fig. 4 Comparison of the predicted mass transfer coefficients

Yaglom의 상관식을 사용하여도 유사함을 알 수 있다.

3.2 벽면 마찰 계수 τ_w

Kern-Seaton의 모델에 따르면 침적물은 침적물 상부에 작용하는 전단응력으로 인하여 제거된다. 따라서, 벽면에 작용하는 전단응력을 평가하는 것이 필요하게 되는데, 평관의 벽면 전단응력은 마찰 손실 실험 자료로부터 구할 수 있다.

그러나 조도 표면의 마찰 손실은 조도에 작용하는 항력과 조도 사이의 평면에 작용하는 벽면 전단력의 두가지가 모두 기여하게 된다. 조도 표면의 침적물의 제거에 있어서는 항력보다는 벽면 전단력이 주로 영향을 미치리라 판단되는데, 본 논문에서는 벽면 전단력만이 침적물 제거에 기여한다고 가정하였다. 따라서, 조도 표면에서의 순수 전단력을 도출해 내야하는데, 이 부분은 실험이나 수치해석적으로나 아직 연구가 미흡한 분야이다.

조도 사이의 전단응력 분포는 균일하지 않으리라 예상되는데, 그림5에 Lavallee와 Popovich⁽¹³⁾의 측정 결과가 나타나 있다. 그림5는 조도 후방의 재 순환 영역에서는 상당한 양의 전단응력이 흐름과 반대 방향으로 작용하고 있음을 보여 준다. 또한, 전단응력의 크기도 균일하지

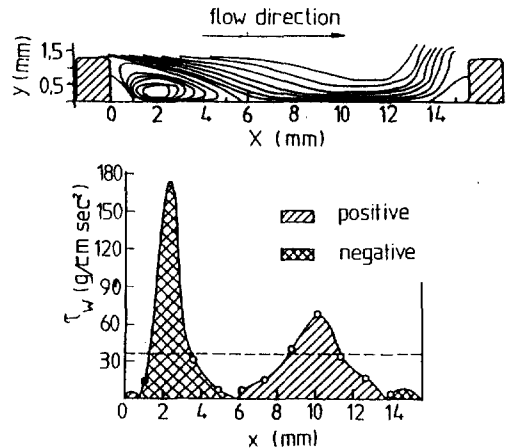


Fig. 5 Velocity and wall shear stress distribution between the ribs (10)

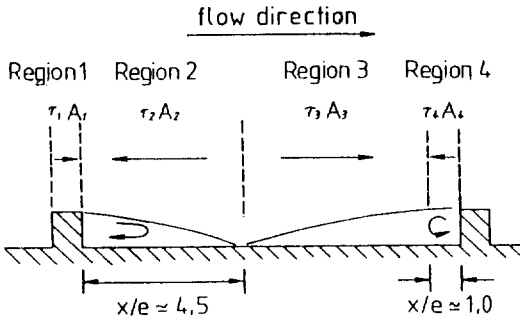


Fig. 6 Wall shear stress model by Kim and Webb (14)

않음을 보여준다. Kern-Seaton 모델을 리브불이 관에 적용하기 위해서는 벽면 전단응력을 정량적으로 산출해 내야한다. Kim과 Webb⁽¹⁴⁾은 Lewis⁽¹⁵⁾의 모델을 이용하여 평균 벽면 전단 응력을 계산하는 방법을 제안하였다. 그들은 재순환 영역, 부착후 발달영역 등 조도사이의 유체 구조를 고려하여 평균 전단응력을 계산할 수 있는 모델을 제시하였다. 그림6에 Kim과 Webb의 모델이 나타나 있다. 그림에서 Region 1은 리브 상부의 전방흐름 영역이고, Region 2는 리브 후방의 재순환 영역, Region 4는 리브 전방의 재순환 영역, Region 3는 Region 2와 4사이의 전방흐름 영역을 나타낸다. 이 때, 평균 전단 응력 τ_w 은 아래 식으로 나타낸다.

$$A_w \tau_w = A_1 \tau_1 + A_2 \tau_2 + A_3 \tau_3 + A_4 \tau_4 \dots (14)$$

여기서 A 는 각 영역의 표면적이다. 그들은 전방 흐름 영역에서의 전단 응력(τ_1, τ_3)은 Lewis의 모델로부터 구하고, 재순환 영역의 전단 응력(τ_2, τ_4)은 Lavallee와 Popovich의 측정 자료에 의거 전방흐름의 전단 응력과 같다고 가정하였다. 이와 같이 구한 각 영역의 전단 응력을 식(14)에 대입하여 평균 전단 응력 τ_w 을 구하게 된다. 이 때, 재순환 영역의 전단 응력도 전방 흐름의 전단 응력과 마찬가지로 이물질 제거에 기여하게 되므로 양(positive)의 값을 대입하여야 한다. 본문에서는 상기 방법을 사용하여 리브불이관의 벽면 마찰 계수를 계산하였다.

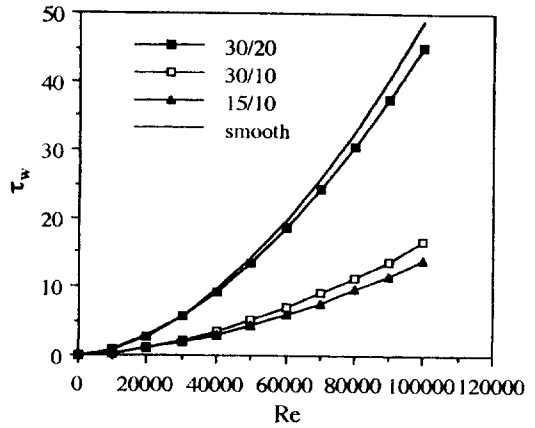


Fig. 7 Comparison of the predicted wall shear stresses

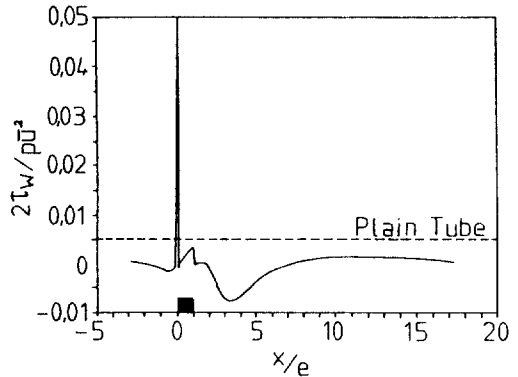


Fig. 8 Wall shear stress distribution by Arman and Rabas (16)

그림7에 리브불이 관의 벽면 전단응력 계산 결과가 평관의 결과와 함께 나타나 있다. 그림7은 리브불이관의 전단응력이 평관의 전단응력보다 작음을 보여주는데 이는 Arman과 Rabas⁽¹⁶⁾의 수치해석 결과와 일치한다. 그림8에 $Re = 47,000$, $e/D = 0.01$, $p/e = 20$ 에서 수행한 Arman과 Rabas의 수치해석 결과가 나타나 있는데, 조도관의 벽면 전단응력은 평관의 전단응력보다 작게 됨을 보여준다. 그림7은 또한 리브불이관의 p/e 값이 커질수록 전단응력은 평관의 값에 접근함을 보여준다.

3.3 리브불이관의 화울링 곡선

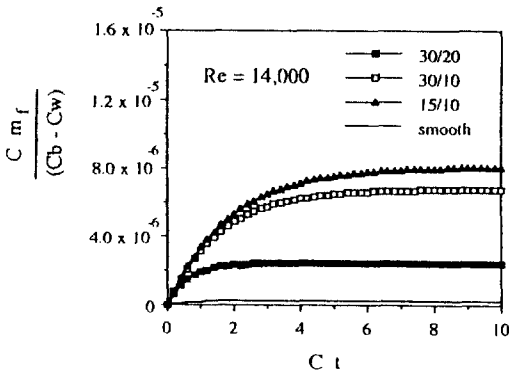


Fig. 9 Comparison of the predicted fouling resistance curves ($Re=14,000$)

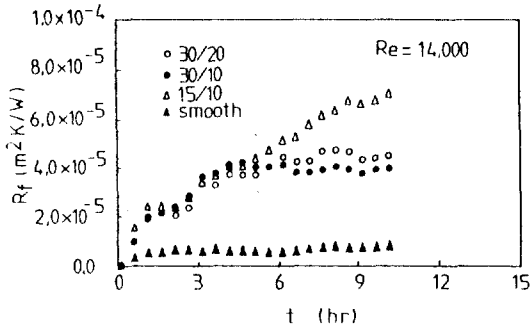


Fig. 10 Fouling resistance measurements (12)

상기 모델을 이용하여 $Re = 14,000$, $Sc = 5 \times 10^6$ 에서 그려진 화울링 곡선이 그림9에 나타나 있다. 그림9의 x와 y축에 나타난 "C"는 식(3)에 정의된 상수이다. 이 그림은 리브플이 관이 평관보다 화울링이 많이 일어남을 보여준다. 리브플이 관 중에서는 30/20관의 다른 관에 비하여 화울링이 적게 일어남을 보여주는데 이는 30/20관의 벽면 전달능력이 다른관에 비하여 크고 물질 전달 계수가 작기 때문으로 (그림4와 7참조)판단된다. 이 화울링 곡선과 같은 조건(조도형상, Reynolds수, Prandtl수)에서 수행된 Kim (12)의 실험 결과가 그림 10에 나타나 있다. Kim의 실험 자료는 시간에 따른 열적 화울링 계수(m_f)을 비교하기 위해서는 침적물의 밀도와 열전도율 등의 값을 알아야하는데, 이들의 값은 관석(scale)등 극히 일부를 제외하고는 알려져

있지 않다. Kim은 산화 알루미늄을 사용하여 실험을 수행하였는데, 침적상태에서는 물과 섞인 상태로 존재한다고 보고하였으나, 침적물의 밀도와 열전도율은 제시하지 않았다. 따라서 예측치와 실험치의 직접적인 비교는 불가능하므로 예측치의 x축과 y축의 scale을 실험치와 비교가 용이하도록 임의로 조정하였다. 그림9와 10을 비교하여 보면, 본 모델과 실험자료에 내재한 불확실도를 고려할 때, 본 모델은 조도관의 화울링 경향을 그런대로 예측함을 알 수 있다.

그림11과 12에 다른 Reynolds수($Re = 26,000$)에서의 예측치와 실험치가 나타나 있다. 예측치의 x축과 y축의 scale은 앞의 경우($Re = 14,000$)와 같은 크기를 사용하였다. 이 그림들은 예측된 화울링율이 실험치보다 높고 그 차이는 Reynolds수가 커질수록 커짐을 보여준다. 이는 본 모델이 Reynolds수에 따른 화울링 경향을 적절히 예측하지 못함을 나타내는데, 그 이유는 Kern-Seaton모델에 묵시적으로 내재된 가정, 즉 벽면에 이송된 침적물은 모두 벽면에 부착된다는 가정에 기인하는 것으로 생각된다. 벽면에 이송된 침적물은 여러가지 요인-침적표면에서의 유체흐름, 침적물과 침적표면 사이의 전기적 힘, 또한 침적물과 침적 표면 사이에 작용하는 물리적 힘 등-에 의하여 침적이 되거나 또는 침적되지 못하고 본류로 되돌아 갈 수도 있다. Watkinson과 Epstein(4)은 이를 설명하기 위하여 부착 확률(sticking probability)-벽면에 이송된 부착물이 벽면에 부착할 확률-이라는 개념을 도입하였는데, 이 부착 확률은 부착 현상의 복잡성과 이에 대한 이해의 부족으로 이론적 접근보다는 실험에 의존하여 평가되고 있다. Reynolds수가 높아질수록 벽면에 이송된 침적물의 부착이 점점 어려워 지리라 판단되는데, Kern-Seaton 모델은 이러한 현상에 대한 고려를 하고 있지 않다. 부착 확률에 대한 연구는 평관에 대해서는 다소 되어 있지만 조도 표면에서는 거의 전무한 형편이다. 본 모델은 부착 확률에 대한 항을 포함하고 있지 않는데, 적절한 화울링 해석을 위해서는 부착 확률에 대한 모델링이 필요하다고 하겠다.

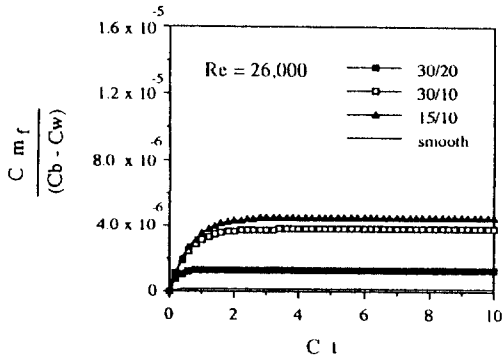


Fig. 11 Comparison of the predicted fouling resistance curves (Re=26,000)

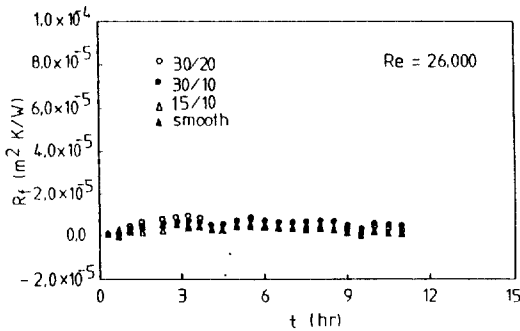


Fig. 12 Fouling resistance measurements (12)

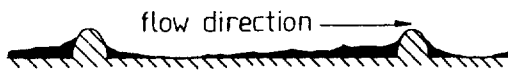


Fig. 13 deposit distribution between the ribs (17)

4. 열전달 촉진관의 화울링에 대한 기타 고려 사항

전 절에서 리브불이 관에 Kern-Seaton 모델을 적용하려 할 때 발생하는 문제점들—Schmidt수의 지수값의 불확실성, 벽면 전단응력 계산의 신뢰도—이 지적되었다. 이외에도 조도 표면의 화울링에는 고려해야 할 점이 있는데, 그들은 다음과 같다.

4.1 불균일한 침적물 분포

이차원 리브불이 관 조도 사이의 침적물 분포도가 그림13에 나타나 있다.⁽¹⁷⁾ 그림13은 침적물 두께가 일정하지 않음을 보여준다. 침적물 두께는 리브 후방에서 두껍고 흐름 방향으로 점차로 얇아지면서 유선의 재부착 지점 부근에서 최소로 된다. 재 부착 후방의 재 발달 영역에서는 점차로 침적물의 두께가 두꺼워짐을 보여준다.

Kern-Seaton 모델에서 사용되는 침적량 m_f 는 관 평균 침적량이다. 따라서, 그 모델에서는 침적물이 표면에 균일하게 분포되어 있다는 것이 묵시적으로 내포되어 있다. Kern-Seaton 모델을 리브불이관에 적용하기 위해서는 이와같은 침적물의 불균일한 분포의 영향이 평가되어야 하는데, Kim(12)은 그 영향으로 인한 오차가 10% 이내라고 평가하였다. 또한 리브 불이 관의 침적물분포를 예측하기 위해서는 리브 사이의 물질전달 계수와 전단응력의 분포를 알아야 하는데 이 부분에 대한 연구는 실험적으로나 수치해석적으로나 미흡한 형편이다. 만일 물질전달 계수와 전단응력의 분포가 알려진다면, 본 모델은 리브 사이의 침적물 분포를 예측하는데 사용될 수 있을 것이다.

4.2 화울링에 따른 리브불이관 형상의 변화

화울링이 진행되면서 리브사이에 이물질이 침적될수록 리브불이관의 형상($p/e, e/D$)은 변화하게 된다. Kern-Seaton 모델은 이러한 영향을 고려하지 않고 단지 침적물에 의한 열저항만을 고려하고 있다. 따라서, 리브 형상 변화에 따른 리브의 열촉진 성능 저하가 검토되어야 하는데, Kim(12)은 그 영향으로 인한 오차가 크지 않다고(5% 이내) 평가하였다.

결 론

화울링은 열전달 분야에서 가장 연구가 필요한 분야 중의 하나인데 최근들어 이론, 모델링, 실험 등 여러방면으로 많은 연구가 수행되고

있다. 본 논문에서는 원래 평관의 화울링 모델로 제안된 Kern-Seaton 모델을 조도 표면의 기본형상인 이차원 리브 불이관에 적용하여 모델의 주요 변수인 물질 전달 계수와 벽면 전단응력에 대하여 살펴보았다. 이러한 리브불이관의 모델은 비록 제한된 자료이지만 기존 실험자료의 화울링 경향과 유사함을 보인다. 그러나 Reynolds수에 따른 화울링은 적절히 예측하지 못하는데, 이는 부착 확률의 개념을 도입함으로써 개량될 수 있으리라 판단된다.

또한 본 논문에서는 조도 표면의 화울링 해석에서 고려하여야 할 사항들—물질 전달 계수의 불확실성, 벽면 전단응력 모델의 필요성, 침적물의 불균일 분포 및 침적으로 인한 조도 표면의 열전달 성능 감소 등—이 제안되었고, 다소나마 정량적 평가도 수행되었다.

참 고 문 헌

1. Watkinson, A. P., Louis, L. and Brent, R., 1974, "Scaling of Enhanced Heat Exchanger Tubes", *Can. J. Chem. Engr.*, Vol. 52, pp. 558-562
2. Webb, R. L. and Kim, N-H., 1989, "Particulate Fouling in Enhanced Tubes", *Heat Transfer Equipment Fundamentals, Design, Application and Operating Problems*. edited by R. K. Shah, ASME HTD-108, pp. 315-324.
3. Kern, D. Q. and Seaton. R. E., 1959, "A Theoretical Analysis of Thermal Surface Fouling", *Brit. Chem. Eng.* Vol. 14, No. 3, pp. 258-262.
4. Watkinson, A. P and Epstein, N., 1969, "Gas-Oil Fouling in a Sensible Heat Exchanger", *Chem. Eng. Symp. Series*, Vol. 65, No. 79, pp. 84-90.
5. Taborek, J., Aoki, T., Ritter, R. B. and Palen, J. W. and Knudsen, J. G., 1972, "Fouling—the Major Unresolved Problem in Heat Transfer", *Chem. Eng. Progress*, Vol. 68, No. 2, pp. 59-67 and No. 7, pp. 69-78.
6. Gudmundsson, J. S., 1977, "Fouling of Surfaces", Ph. D. Thesis, University of Birmingham, U. K.
7. Thomas, D. and Grigull, U., 1974. "Experimental Investigation of the Deposition of Suspended Magnetite from the Fluid Flow in Steam Generating Boiler Tubes", *Brennst-Warmekraft*, Vol. 26, No. 3, pp. 109-115.
8. Webb. R. L., Eckert, E. R. G. and Goldstein, R. J., 1971, "Heat Transfer and Friction in Tubes with Repeated Rib Roughness", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 14, pp. 601-617.
9. Kader, B. A. and Yaglom, A. M., 1977, "Turbulent Heat and Mass Transfer from a Wall with Parallel Roughness Ridges", *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 20, pp. 345-357.
10. Dawson, D. A. and Trass, O., 1972, "Mass Transfer at Rough Surfaces", *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 15, pp. 1317-1336.
11. Hahn, L. A., Stukel, J. J., Leung, K. H. and Hopke, P. K., 1985, "Turbulent Deposition of Submicron Particles on Rough Walls", *J. of Aerosol Sci.*, Vol. 16, No. 1, pp. 81-86.
12. Kim. N-H., 1989, "A Theoretical and Experimental Study on the Particulate Fouling of Tubes Having Two-Dimensional Roughness", Ph. D. Thesis, The Pennsylvania State University.
13. Lavallee, H. C. and Popovich, A. T., 1974, "Fluid Flow near Roughness Elements Investigated by Photolysis Method", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 29, pp. 49-59.
14. Kim, N-H. and Webb, R. L., 1991, "Particulate Fouling in Tubes Having Two-Dimensional Roughness by Aqueous Suspension", *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 34, No. 11, pp. 2727-2738.
15. Lewis, M. J., 1975, "An Elementary Analysis for Predicting the Momentum and Heat Transfer Characteristics of a Hydraulically Rough Surfaces", *ASME, J. of Heat Transfer*, Vol. 97, pp. 249-254.
16. Arman, B. and Rabas, T. J., 1991, "Prediction of the Pressure Drop in Transverse, Repeated Rib Tubes With Numerical Modeling", *ASME. HTD-164, Fouling and Enhancement Interac-*

- tions, edited by T. J. Rabas and J. M. Chenoweth, pp. 93-100.
17. Kim, N-H., and Webb, R. L., 1990, "Particulate Fouling of Tubes Having Arc-Shaped Two-Dimensional Roughness by a Flowing Suspension of Aluminum Oxide in Water", 9th Int. Heat Trans. Conf., Vol. 5, pp. 139-144.