대한기계학회 2000년도 춘계학술대회논문집 B pp. 180~186 KSME 00S187

새로운 도선감는 방법을 사용한 전기장을 이용한 스케일 제거

김건우*· 안희섭**· 손창현***

Prevention of Particulate Scale with a new winding method in the Electronic Descaling Technology

Gun-Woo Kim, Hee-Sub Ahn, Chang-Hyun Sohn

Key Words: Fouling(파울링), Enduced Motive Force(유도기전력), Faraday's Law(페러데이법칙) Hard Water(경수), Lorentz's Force(로렌쯔의 힘)

Abstract

This paper presents a new winding method in the electronic descaling (ED) technology. The ED technology produces an oscillating electric field via the Faraday's law to provide necessary molecular agitation to dissolved mineral ions. But present method gives another agitation force to mineral ions, which is Lorentz's force. Experiments were performed at various Renolds number. A series of tests was conducted, measuring pressure drop across test section and the overall heat transfer coefficient as a function of time. In order to accelerate the rate of fouling, artificial hard water of 1000ppm $CaCO_3$ was used throughout the tests. The results show that the new method accelerates collision of mineral ions and improvs efficiency of system.

기호설명

B : 자속밀도 [Wb/m^2]
q : 열유속 [W/m^2]
V : 유동속도 [m/s]
T : 온도 [℃]
R_f : 파울링열저항 [m^2 · K/W]
A : 단면적 [m^2]
$\dot{m}_h$: 질량유량 [Kg/m^3]
$c_{p,c}$: 정압비열 [J/Kg · K]
e : 전하량
U : 총합열전달계수

하첨자

c : 냉각수
h : 고온유체
f : 파울링
i : 입구
o : 출구
$LMTD$: 로그평균온도차

* 경북대학교 기계공학부 대학원
** 회원, 경북대학교 기계공학부 대학원
*** 회원, 경북대학교 기계공학부

1. 서 론

일반가정에서 사용되고 있는 온수 및 냉난방용 배관을 비롯하여 산업체의 보일러, 열교환기, 냉각기등 많은 기기들은 물을 공급하는 관으로 구성되어있다. 그런데 배관계통들은 사용시간이 누적됨에 따라 물에 포함되어 있는 불순물에 의해 배관 내부에 퇴적물이 쌓여지게 되고 이러한 퇴적물은 물의 원활한 흐름을 막고 열전달을 방해하게 된다.

이와 같이 경계면에 퇴적하는 바람직하지 않은 고체퇴적물[1]을 파울링으로 정의한다. 파울링은 배관재질, 약품 주입시스템, 작동유체의 변화에 따라 생성의 현격한 차이를 보이며 열교환기에서는 전체 열저항 중 파울링이 가장 큰 열저항으로 부각되고 있다[2].

경수(Hard Water)를 사용하는 열교환기기에서 가장 많이 발생하는 파울링은 $CaCO_3$(석회석)이다. 경수는 과포화된 상태의 미네랄이온들이 녹아있기 때문에 불안정한 상태로 존재한다. 이러한 경수는 온도가 높아짐에 따라 이온들의 용해도는 낮아지며, 이온들이 석출되어 전기적인 결합력에 의해 스케일(Scale)이 생성된다. 이러한 스케일이 관벽에 부착하고 결정으로 성장하여 파울링이 된다[3],[4]. (Fig. 1)

열교환기표면의 파울링층은 궁극적으로 총합열전달계수를 작게한다. 경수에서 발생하는 석회석의 경우 열전달계수는 약 0.8W/mK[4]이고 반면에 카본스틸(Carbon Steel)은 약 90W/mK이다.[5] 또한 관직경이 작아지므로 유량이 감소하거나 압력강하가 증가하게 된다. 5%의 직경감소는 약 22-30%의 압력강하를 증가시킨다.[6]

이러한 파울링을 제거하기 위한 방법으로는 화학약품을 사용하는 방법, 초음파를 사용하는 방법, 자기장과 전기장을 사용하는 방법등이 있다.[2] 본 연구는 자기장과 전기장을 이용한 파울링 제거방법에 관한 실험으로, 기존의 전기장을 이용한 방법들은 유동의 속도가 느리면 파울링제거의 효과가 없는 것이 문제점으로 지적되고 있다[2]. 본 연구에서는 저속유동에서도 파울링을 제거할 수 있는 방법과 그 이론적배경을 제시하고자 한다.

2. 기본이론 및 기본식

$CaCO_3$의 결정구조는 칼사이트(Calcite)와 아르고나이트(Argonite)의 두 가지 형태가 존재한다. 칼사이트는 30℃이하의 온도에서 주로 생성되며 부착성이 약하며 비중이 약 2.71정도이다. 반면에 아르고나이트는 30℃이상에서 주로 생성되며 부착성이 강하고 비중이 약 2.94정도이다[4]. 작동유체가 경수인 열교환기기는 주로 고온에서 작동하므로 아르고나이트구조의 $CaCO_3$가 생성되어 벽면에 부착된다. 즉 fig.1과 같이 특별한 장치를 부착하지 않은 자연적인 상태에서는 작동조건에 의해 부착성이 강한 아르고나이트가 이온결합으로 인해 생성된다. Fig.2는 선행연구자인 Cho등이 사용한 방법의 개략도이다.[7],[8] 사각파의 전류가 도선으로 인가되면 시간에 따른 전류의 변화로 인해 자기장이 발생하고 이 자기장은 배관내부에 유도기전력을 발생시켜 Fig.3과 같이 이온의 운동방향이 교대로 바뀌는 전기장을 발생시킨다. 경수에 포함되어 있는 이온들은 전기장으로 강제적인 결합을 하게 되고 결국은 아르고나이트

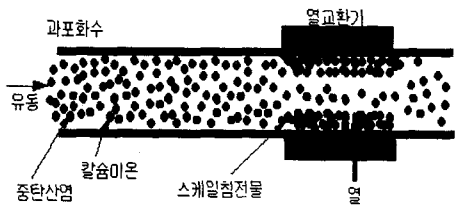


Fig. 1 파울링 발생과정

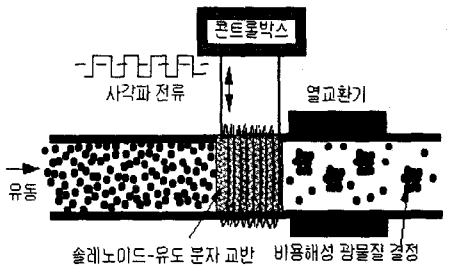


Fig. 2 Cho 등의 실험장치 개략도

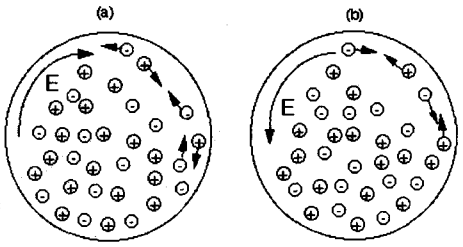


Fig. 3 전기장에 의한 이온결합

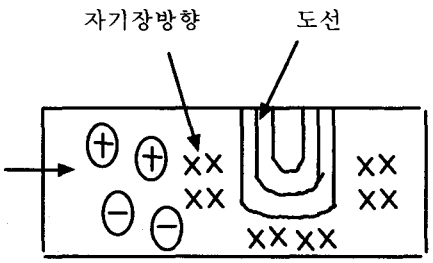


Fig. 4 본 연구에서의 방법

가 아닌 부착성이 약한 칼사이트로 결정화된다. Cho 등의 실험결과에 의하면 레이놀드수가 1650 이하에서는 전기장을 이용한 파울링제거의 효과가 없다고 밝혀져 있다.[7],[8]

본 연구에서는 Cho등이 제시한 유도기전력 이외에 로렌쯔의 힘을 이온결합에너지로 추가하기 위해 도선설치방법을 Fig.4와 같이 변경하였다.

로렌쯔의 법칙은 식(1)과 같이 표현된다.

$$F = eVB\sin\theta \qquad (1)$$

자기장속에서 움직이는 전하가 받는 힘은 자기장과 전하가 이루는 각(θ)이 직각일 때 가장 크게 된다. Fig.2와 같은 방법에서는 자기장과 전하의 방향이 수평이 되기 때문에 로렌쯔의 힘은 '0'이 된다. Fig.4와 같이 도선을 설치하면 자기장은 항상 전하의 흐름방향과 수직이 되기 때문에 가장 큰 로렌쯔의 힘을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 두 방법의 비교로써 압력강하(ΔP), 총합열전달계수(U), 파울링저항(R_f)를 구하여 파울링제거효과를 분석하였다.

고온과 저온의 작동유체사이의 열전달양은 다음 식[9],[10]으로 표현된다.

$$q = U A \Delta T_{LMTD} \qquad (2)$$

$$q = \dot{m}_h c_{p.h} (T_{h.i} - T_{h.o}) \qquad (3)$$

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{h.i} - T_{c.o}) - (T_{h.o} - T_{c.i})}{\ln[(T_{h.i} - T_{c.o})/(T_{h.o} - T_{c.i})]} \qquad (4)$$

여기서 $\dot{m}_h$는 파이프내의 고온유체의 질량유량이며, 총합열전달계수는 다음과 같다.

$$U = \frac{q}{A \Delta T_{LMTD}} \qquad (5)$$

고온유체에서 냉각수로의 열전달과정을 저항의 개념으로 나타내면 Fig.5와 같다.

고온유체에서 저온유체로의 열전달 과정에서 총합열전달계수는 식(6),(7)과 같고, 파울링열저항 R_f는 식 (8)과 같다.

$$\frac{1}{U_c} = R_1 + R_w + R_2 \qquad (6)$$

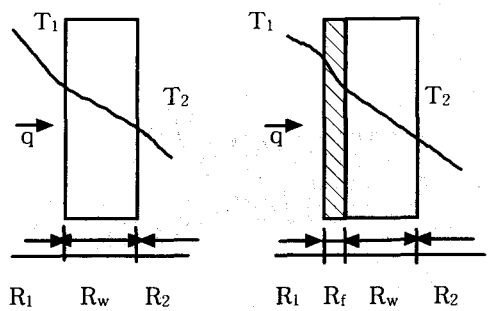
$$\frac{1}{U_f} = R_1 + R_f + R_w + R_2 \qquad (7)$$

$$R_f = \frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_c} \qquad (8)$$

본 실험에서 사용한 파울링열저항은 식(9)와 같다.

$$R_f = \frac{1}{U_o} - \frac{1}{U(t)} \qquad (9)$$

U_o는 스케일 생성전의 총합열전달계수이고 U(t)는 시간 t일때의 총합열전달계수이다.



(a) Clean Wall (b) Wall covered Fouling

Fig. 5 Thermal Resistance of Fouling

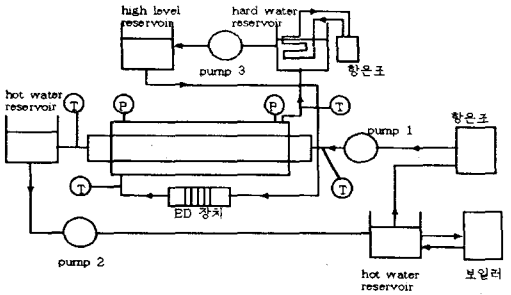


Fig. 6 Schematic diagram of experimental system

3. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험장치의 구성을 Fig.6에 도시하였다. ED(Electronic Descaling 장치), 파형발생기, 고온유체와 저온유체의 흐름방향을 반대로 한 대향류 열교환기등으로 구성되어 있으며, 열교환기의 시험부는 길이 1.75m의 동심 2중관으로 고온유체는 동관으로 직경 0.0127m이고 저온유체는 아크릴관으로 0.02m로 동관벽에 부착되는 스케일을 관찰할 수 있도록 설계하였다. 유동조건은 밸브를 조절하여 레이놀드 수가 2000미만의 층류유동으로 하고 작동유체가 일정한 온도를 유지할 수 있도록 항온조를 설치하였다.

작동유체는 농도는 1000ppm으로 맞추고 시간에 따른 작동유체의 농도를 맞추기 위해 4시간[7],[8] 마다 새로운 작동유체로 교체하였다.

ED 장치의 시험부는 직경 0.0405의 동관을 사용하여 코일를 동관주위에 감아 즉, 솔레노이드를 만들어 코일에 전류를 흘러 보냄으로써 유도 기전력을 발생시켰다. 동관에 코일의 감은수를 변화시키면서 파형발생기에서 발생하는 사각파의 파형과 주파수를 파형발생기를 통하여 주파수의 증폭과 입력최대전압에 변화를 주어 각 변수의 영향에 대해 관찰하였다. 작동유체는 서론에서 밝혀듯이 경수인 경우 칼슘에 의한 스케일이 가장 큰 원인이므로 임의로 칼슘카보나이트($CaCO_3$) 만들기 위해 $CaCl_2$ 와 $NaHCO_3$를 사용하였다.

이 두 용질이 물에 용해됐을 때의 화학반응식은 식 (10)으로 표현된다.

$$CaCl_2 + 2NaHCO_3 \Rightarrow CaCO_3 + H_2O + CO_2 \quad (10)$$

경수로 만들기 위해 CaCO3의 양을 1000ppm으로 설정하였다

4. 실험결과 및 고찰

본 실험에선 솔레노이드 직경, 도선의 감은수, 주파수, 입력최대전압의 변화를 주면서 RMS (Root Mean Square)전류, 임피던스(impedance), 전류, 유도기전력의 값을 측정하였다. 유도기전력의 값을 가장 크게 하기 위해서 각 변수들의 적정치를 조사하였고 그 결과로 ED장치의 솔레노이드직경을 0.405m, 권선수를 50번, 주파수를 500MHz 선택하였다.

먼저 전기장을 이용하지 않은 실험과 이용한 실험을 각각의 실험대상에 따라 비교, 검토하였다. 대향유동 형태의 이중관의 열교환기의 고온 입구온도는 40℃, 냉각수의 입구온도를 25℃ 로 일정하게 맞추고 출구온도의 변화를 조사하여 실험치를 계산하였다. 실험 측정 대상은 레이놀드 수에 따른 변화, 자기장의 방향에 따른 변화, 관직경에 따른 변화등을 조사하였다. Fig. 7은 레이놀드 수에 따른 차압을 나타낸 그림이다. 도선의 감은수를 50번, 관의 직경을 0.0405m로 하고 도선의 직경을 1㎜로 하여 레이놀드 수 1650, 1240, 1010에 따라 전기장을 이용한 방법과 그렇지 못한 방법을 비교하였다. 시간이 경과함에 따라 관벽에 스케일이 생성되면서 파울링 열저항(fouling factor)과 차압이 증가함을 볼 수 있고 총합 열전달 계수는 감소함을 알 수 있다. Fig.7에서 볼 수 있듯이 전기장을 이용하지 않은 실험에서 처음 8시간은 상대적으로 증가율 폭이 작지만 그 이후에 17시간까지는 급격한 증가를 보이며 그 이후는 일정한 값을 가지는 경향을 보인다. 전기장을 이용한 실험에서도 거의 같은 경향을 보이지만 차압이 상대적으로 작아지는 경향을 보인다.

처음 8시간은 스케일 생성에서 지연시간으로 볼 수 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 전기장을

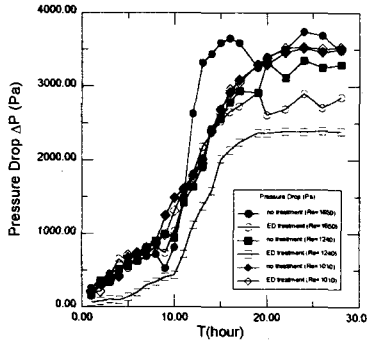


Fig. 7 Comparison of the effects of the ED treatment on pressure drop, Δp

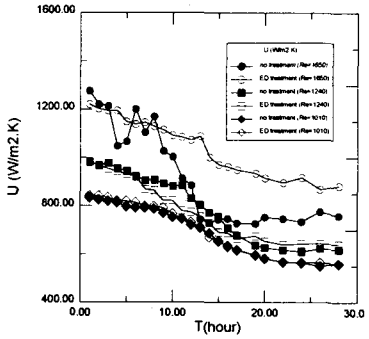


Fig. 8 Comparison of the effects of the ED treatment on overall heat transfer coefficient, U

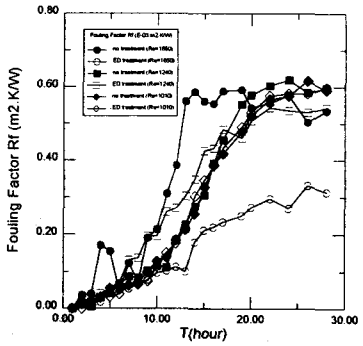


Fig. 9 Comparison of the effects of the ED treatment on fouling factor, R_f

이용한 실험이 그렇지 못한 실험에 비해 레이놀드 수가 1650의 경우에는 약 25%의 압력손실 감소효과를 보았다. 레이놀드 수가 낮아지면서 ED 장치의 효과가 감소함을 알 수 있고 레이놀드수 1010의 경우에는 ED장치의 영향이 없어짐을 알 수 있다. Fig 8는 총합열전달계수를 나타낸 그림이다. 레이놀드수 1650의 그림을 보면 전기장을 이용하지 않은 실험은 1277W/m_2·K에서 약 740W/m_2·K까지 감소했고 전기장을 이용한 실험은 약 17% 정도의 높은 열전달 계수값을 보였다. 총합열전달계수가 높을수록 열전달이 잘 되기 때문에 전기장을 이용한 방법이 열전달 향상에 도움을 준다는 것을 알 수 있다. Fig.9는 파울링 열저항 R_f를 나타낸 그림이다. 시간에 따라 스케일이 생성되면서 스케일이 열저항의 역할을 하여 파울링열저항이 증가하고 열전달이 감소됨을 알 수 있다. 전기장을 이용한 방법이 전기장을 사용하지 않았을 경우에 비해 20시간이 지난 후 약 43% 정도의 열저항이 낮아지는 경향을 보인다.

위의 결과로 부터 ED 장치의 효과는 레이놀드 수가 낮아질수록 떨어지고, 어느 한계 레이놀드 수에 도달하면 그 효과를 볼 수 없게 된다는 것을 알 수 있었다. 저 레이놀드수에선 물분자와 칼슘이온에 필요한 충돌에너지와 결합에너지를 더 이상 줄 수 없어 핵생성에 필요한 자유에너지의 감소로 자연적으로 핵생성이 지연되리라 생각된다.

Fig. 10에서 Fig. 12까지의 실험결과는 차압, 총합열전달계수, 파울링 열저항을 새로운 방법 즉, 유동의 흐름과 자기장의 방향을 수직으로 하여 레이놀드수를 바꾸어 가면서 ED 장치의 효과를 조사한 실험이다. Fig. 10는 차압을 나타낸 그림으로, 기존의 방법에서 효과를 볼 수 없었던 레이놀드 수 1010에서 약 17% 정도의 압력손실 감소효과를 볼수 있었다. 그러나 레이놀드수를 800으로 낮춘 실험에서는 그 효과를 볼 수 없었다.

Fig. 11은 레이놀드 수에 따른 총합열전달계수를 나타낸 것이다. 1010에선 약 27% 정도의 향상된 열전달 계수값을 보였지만 800에선 전기장을 이용한 실험과 이용하지 않은 실험이 거의 같은 경향을 나타내고 있다.

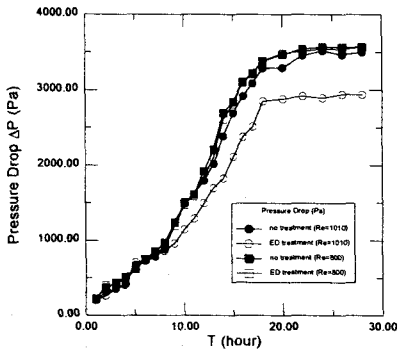


Fig. 10 Comparison of the effects of the ED treatment on pressure drop, ΔP

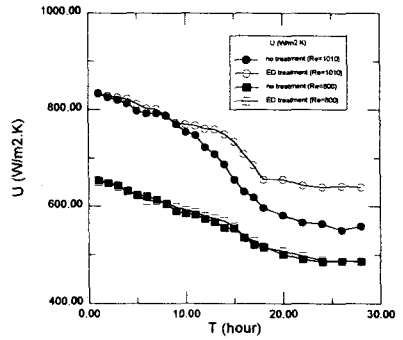


Fig. 11 Comparison of the effects of the ED treatment on overall heat transfer coefficient, U

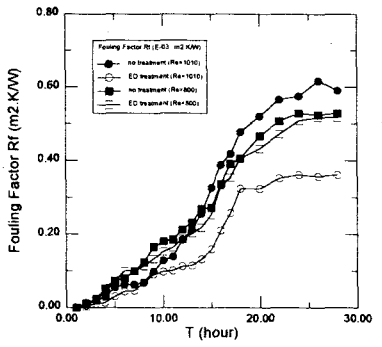


Fig. 12 Comparison of the effects of the ED treatment on fouling factor, R_f

Fig. 12는 레이놀드수에 따른 파울링 열저항을 나타낸 그림이다. 1010에선 열저항이 낮아지는 경향을 보이는데 800에선 거의 같은 값을 가져 그 차가 1010보다 현저히 줄어드는 경향을 나타내고 있다.

전기장의 방향을 바꾸어 실험을 한 결과 기존의 방법에 비해 더 낮은 레이놀드수에서도 효과를 볼 수 있었는데 그 이유는 유동의 흐름과 자기장의 방향이 직각을 두고 유동하므로 로렌쯔의 힘을 더 받기 때문이라 생각된다. 하지만 특정 레이놀드수이하에선 효과가 없었는 데 그 이유는 입자의 속도가 너무 느리기 때문에 완전히 칼사이크로 결정화되기전에 벽면에 먼저 부착하게 되어 아르고나이트의 결정으로 성장하기 때문이라 생각된다.

5. 결 론

본 연구는 열교환기 형태의 실험장치에서 스케일에 의한 압력 손실, 열전달율, 파울링 열저항 정도를 측정하였다. 레이놀드수를 1650, 1240, 1010, 800으로 변화를 주었고 ED장치의 솔레노이드 직경을 0.0405로 하여 실험을 하였다. 또한 기존의 방법인 유동방향과 자기장의 방향이 수평이 되게 코일을 감은 방법과 코일감는 방법을 달리하여 유동방향과 자기장의 방향이 수직이 되도록 한 방법을 비교, 관찰하였다. 실험결과로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 전기장을 이용한 방법이 파이프의 압력손실을 줄이고 열전달율을 증가시키지만 특정레이놀드수 이하에서는 ED장치의 효과가 없었다.
2. 자기장의 방향과 유동방향이 일치되게 도선을 감는 기존의 ED장치는 레이놀드수 1010이하에서는 ED장치의 효과가 나타나지 않았다.
3. 유동의 흐름과 자기장의 방향을 수직으로 되게 도선을 감은 결과는 레이놀드수 800이하에서 ED장치의 효과가 나타나지 않았고 기존의 방법에 비해 ED장치의 효과는 증대되었다.
4. 새로이 제시한 방법이 기본 방법에 비해 더 낮은 레이놀드수에서도 ED효과가 나타난 것은

로렌쯔 힘이 추가되었기 때문이라 판단한다.

5. 새로이 제시한 도선감는 방법은 ED장치의 상업화에 기존방법에 비해 훨씬 간편함을 알 수 있었다.

참고문헌

(1) Taborek, J., Aoki., Ritter, R. B., J. W., and Knudsen, J. G., "Fouling: The Major Unresolved Problem in Heat Transfer", Chemical Engineering Progress, Vol. 68, No. 2, pp. 59-67, Feb. 1972

(2) 이윤표, 이신표., "열교환기 Fouling의 저감 대책", 대한기계학회지, 제35권, 제9호, pp. 836-847, 1995

(3) Knudsen, J .G., "Cooling Water Fouling - A Brief Review", Fouling in Heat Exchanger Equipment , 20th ASME/AICHE Heat Transfer Conference, Vol. 17-HTD, pp. 29-38. Milwaukee, WI, Aug.2-5, 1981. Considerations, pp. 999-1011

(4) Cowan, J. C., Weintritt, D. J., "Water-Formed Scale Deposits", Gulf Publishing Company, 1976

(5) Incropera, F. P., et al "Fundamentals of Heat Transfer ', 4th Edition, John Wiley & sons, 1996

(6) Bruce R. Munson., Donald F. Young., and Theodore H. Okiishi., "Fundamentals of Fluid Mechanics", Second Edition

(7) Young I. Cho., "Current Driver for Electronic Descaling," U. S. Patent No. 5725778, Mar. 10, 1998

(8) Young I. Cho., "Reduced Corrrosion Electronic Descaling Techonlogy," U. S. Patent No. 5670041, Sep. 23, 1997

(9) L. F. Melo., T. R. Bott., and C. A. Bernardo., "Fouling Science and Technology", Published in Cooperation with NATO Scientific Affairs Division

(10) Anthony F. Mills., "Heat transfer", International Student Edition