

## 새 도선 감는 방법을 적용한 전기장 이용 스케일 제거

구상모\* · 김창수\* · 김건우\* · 손창현†  
(2001년 2월 14일 접수, 2002년 3월 13일 심사완료)

### Prevention of Particulate Scale with a New winding Method in the Electronic Descaling Technology

Sang-Mo Koo, Chang-Soo Kim, Gun-Woo Kim and Chang-Hyun Sohn

**Key Words:** Fouling(파울링), Induced Motive Force(유도기전력), Faraday's Law(페러데이법칙)  
Hard Water(경수), Lorentz's Force(로렌쯔힘)

#### Abstract

This paper presents a new winding method in electronic descaling (ED) technology. Conventional ED technology produces an oscillating electric field via Faraday's law to provide the necessary molecular agitation to dissolve mineral ions. However, the proposed method produces an additional agitation force for mineral ions, called Lorentz's force. Experiments were performed using various Reynolds numbers. A series of tests was conducted to measure the pressure drop across the test section and the overall heat transfer coefficient as a function of time. In order to accelerate the rate of fouling, artificial hard water, 1000ppm CaCO<sub>3</sub>, was used throughout the tests. The results show that the new winding method accelerates the collision of the mineral ions, thereby improving the system efficiency. The present study can develop more effective fouling-removing equipment with change of establishment method of coil.

#### 기호설명

A	: 단면적 [m <sup>2</sup> ]	R <sub>f</sub>	: 파울링열저항 [m <sup>2</sup> · K/W]
B	: 자속밀도 [Wb/m <sup>2</sup> ]	T	: 온도 [°C]
e	: 전하량[1.61 × 10 <sup>-19</sup> C]	U	: 총합열전달계수[W/(K · m <sup>2</sup> )]
C <sub>p,h</sub>	: 고온유체 정압비열 [J/Kg · K]	V	: 유동속도 [m/s]
H	: 자기장의 세기	γ	: 계면(界面) 에너지[J]
J	: 핵속의 분자수	μ <sub>0</sub>	: 진공중의 투자율
K	: 볼츠만상수[1.38 × 10 <sup>-23</sup> J/K]		
n	: 단위 길이당 감은 횟수		
$\dot{m}_h$	: 고온유체 질량유량 [Kg/s]		
q	: 열유속 [W/m <sup>2</sup> ]		
R <sub>f</sub>	: 파울링열저항 [m <sup>2</sup> · K/W]		

#### 하첨자

c	: 저온유체
f	: 파울링
h	: 고온유체
i	: 입구
LMTD	: 로그평균 온도차
o	: 출구

\* 경북대학교 기계공학부

† 책임저자, 회원, 경북대학교 기계공학부

E-mail : chsohn@knu.ac.kr

TEL : (053)950-5570 FAX : (053)950-6550

### 1. 서론

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

이와 같이 경계면에 퇴적하는 바람직하지 않은 고체퇴적물<sup>(1)</sup>을 파울링(fouling)으로 정의한다. 파울링은 배관재질, 약품 주입시스템, 작동유체의 변화에 따라 생성의 현격한 차이를 보이며 열교환기에서는 전체 열저항 중 파울링이 가장 큰 열저항으로 부각되고 있다.<sup>(2)</sup>

경수(hard water)를 사용하는 열교환기에서 가장 많이 발생하는 파울링은 칼슘카보나이트(CaCO<sub>3</sub>, 석회석)이다. 경수는 과포화된 상태의 미네랄이온들이 녹아있기 때문에 불안정한 상태로 존재한다. 이러한 경수는 온도가 높아짐에 따라 이온들의 용해도는 낮아지며, 이온들이 결정화되어 전기적인 결합력에 의해 석출되고, 이러한 스케일이 관 벽에 부착하고 결정으로 성장하여 스케일링(scaling) 혹은 침전파울링(precipitation fouling)이 되며 이를 통상 파울링이라 한다.<sup>(3-5)</sup>

열교환기 표면의 파울링층은 궁극적으로 총합 열전달계수를 작게 한다. 경수에서 발생하는 석회석의 경우 열전달계수는 약 0.8W/mK<sup>(4)</sup>인 반면, 카본스틸(carbon steel)은 약 90W/mK이다.<sup>(5)</sup> 일반적인 주거용 건물이나 소규모의 상업용 난방장치의 연료소비량 중 약 10%가 파울링으로 인해 손실되며 열교환기용 관은 파울링으로 인한 열전달 성능의 감소로 3년 또는 5년 주기로 관의 교체가 필요하고 효율감소에 따른 열손실은 매년 15%정도 증가하여 5년이 지나면 약 70%의 열손실이 파울링 때문에 발생한다.<sup>(6)</sup> 이러한 예에서 알 수 있듯이 파울링을 효과적으로 제거한다면 그 경제적 이득이 매우 클 것이다.

기존의 파울링을 제거하기 위한 방법<sup>(7)</sup>으로는 적정한 유속조건<sup>(8)</sup>을 만들어 유동의 정체를 억제하는 방법, 정기적인 세정에 의한 청관 작업, 용

수 중에 약품을 투여하는 방법, 고체 미립자를 사용한 열교환기 벽면의 충돌방법, 유동의 역류를 이용하는 방법, 초음파의 진동을 이용하는 방법등이 있다. 하지만 이러한 방법들은 청관 작업 시 보일러의 가동을 중단해야 하고 관 벽의 마모나 부식에 의한 배관 설비의 수명 단축을 유발할 수 있다.

위의 방법들과 비교하여 전기장을 이용한 방법(ED : Electronic Descaling)은 전기장으로 스케일 생성을 억제, 제거할 수 있으며, 작동유체의 이온 형태만 바꿈으로써 화학약품으로 인한 환경오염 문제를 해결할 수 있고 시스템 내부의 손상을 피할 수 있으며 저비용 고효율의 장점이 있다. 그러나 기존의 전기장을 이용한 방법은 유동의 속도가 느리면 파울링제거의 효과가 없는 것이 문제점으로 지적되고 있다.<sup>(2)</sup>

본 연구는 대항류 형태의 열교환기와 ED장치를 제작하여 도선의 감는 방법, 레이놀즈수의 변화에 따른 압력강하와 총합열전달계수(total heat transfer coefficient) 그리고 파울링열저항(fouling factor)을 비교함으로써 파울링 생성특성을 파악하고, 로렌쯔 힘을 이용한 새로운 방법을 사용하여 저속유동에서도 파울링을 방지 및 제거할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

### 2. 기본이론 및 기본식

#### 2.1 기본이론

칼슘카보나이트는 방해석구조(calcite)와 신석구조(argonite)의 결정립구조로 존재하며, 그 특징으로 방해석구조는 마름모격자를 하고 있고 부착성이 약하며 제거가 용이한 반면, 신석구조는 사방 결정형태로 30℃ 이상에서 주로 생성되며, 부착성이 강하여 제거가 곤란하다. 작동 유체가 경수인 열교환기는 주로 고온에서 작동하므로 아르고나이트구조의 칼슘카보나이트가 생성되어 배관 벽면에 부착하게 된다. Fig. 1과 같이 특별한 장치를 부착하지 않은 자연적인 상태에서는 작동조건에 의해 부착성이 강한 아르고나이트가 이온결합으로 인해 생성된다.

Fig. 2는 선행연구자인 Cho등이 사용한 방법의 개략도이다.<sup>(6,9)</sup> 솔레노이드 형식으로 감은 도선의 양 끝단에 일정한 주파수를 가지는 사각파의 전

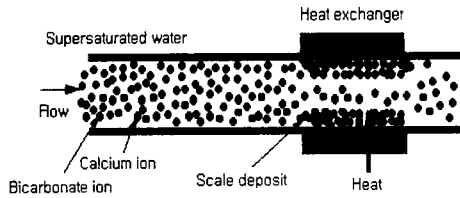


Fig. 1 Scale deposition in a heat exchanger surface

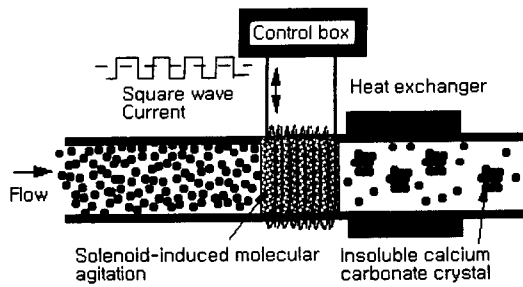


Fig. 2 Schematic diagram of Cho's experiment

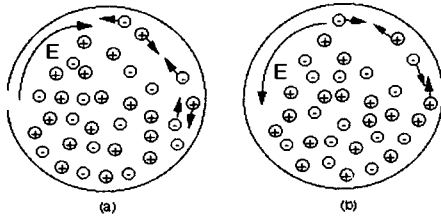


Fig. 3 Collision of ions by electronic field

류를 보내면 자기장이 발생하는데, 이 자기장은 배관 내부에 유도기전력을 발생시켜 Fig. 3과 같이 이온들의 운동방향을 교대로 바꾸어 주는 힘이 발생한다. 경수에 포함된 이온들은 열교환기 전에 ED장치에 의해 생성된 유도기전력에 의한 충돌로 강제적인 결합이 형성되어 CaCO<sub>3</sub>의 결정 구조는 부착성이 약한 칼사이트로 결정되어 벽면에서의 파울링 부착을 방지한다. 그리고 열교환기를 지나기 전에 용해된 이온들이 결정화 되어 이온 농도가 낮아져 관벽에 부착된 칼슘카보나이트를 녹여서 기존에 생성된 스케일을 제거도 할 수 있다.

유도기전력의 크기는 코일의 단면을 통과하는 자기력 선속의 시간적 변화율과 코일의 감은 횟수에 비례한다. 감은 수가 N인 코일을 지나는 자기력 선속이 시간 Δt 동안 ΔΦ 만큼 변했을

때, 코일에 생기는 유도기전력 E는 식 (1)과 같이 표시 되며, 이를 패러데이의 전자기 유도 법칙이라 한다.

$$E = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (1)$$

코일에 흐르는 전류가 변하면 코일 속을 지나는 자속의 변화가 생기고 코일에는 이 변화를 방해하는 방향으로 유도기전력이 생기기 때문에 코일 주변에 자기장이 생긴다. 이러한 현상을 자체 유도라 하며, 자체 유도 현상을 일으키는 자기력 선속의 변화 ΔΦ는 전류의 변화에 비례하므로, Δt 동안 코일에 흐르는 전류가 ΔI 만큼 변했다면, 자체 유도기전력 E<sub>s</sub>는 식 (2)와 같다.

$$E_s = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (2)$$

여기서 비례 상수 L은 코일의 자체 유도 계수 (self inductance)라고 하며, 이것은 코일의 감은 수, 단면적, 길이 및 코일 속에 들어 있는 철심의 종류에 의해 결정된다.

자체 유도 계수 L과 자속밀도 B는

$$L = \frac{N\Phi}{I} = \frac{NBA}{I} \quad (3)$$

$$B = \mu_0 H = \mu_0 \frac{N}{l} I = \mu_0 n I \quad (4)$$

따라서,

$$L = NA\mu_0 n = \frac{\mu_0 N^2 A}{l} \quad (5)$$

식 (2), (3), (4), (5)에 의해서 자체 유도기전력 E<sub>s</sub>는 다음 식으로 나타내어진다.

$$E_s = \frac{\pi\mu_0}{4} \cdot \frac{ND^2}{d} \quad (6)$$

결정 핵생성에 필요한 Gibbs 에너지는 식 (7)과 같이 나타내진다.

$$\Delta G(\text{nucleation}) = \Delta G(\text{bulk}) + \Delta G(\text{surface}) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } \Delta G(\text{bulk}) &= -JKT \frac{a}{a_0} \\ &= -\frac{4}{3} \pi r^3 \cdot \Delta G_v \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Delta G(\text{surface}) = 4 \pi r^2 \cdot \gamma \quad (9)$$

식 (8)의 (-)부호는 결정화되는 동안 에너지의 소비를 의미하고 식 (9)의 (+)부호는 핵표면을 만드는데 사용되는 에너지를 말한다. 핵생성 초기 핵반경(r)이 매우 작기 때문에  $\Delta G(\text{surface})$ 가  $\Delta G(\text{bulk})$ 보다 매우 커서  $\Delta G(\text{nucleation})$ 가 양수가 되어서 핵이 자연적으로 생성되지 않고 외부에서 에너지가 공급되어야 하지만 핵반경이 성장할수록  $\Delta G(\text{bulk})$ 가 지배적이 되어서  $\Delta G$ 가 음수가 되어 핵이 자연적으로 생성됨을 의미한다.

따라서 전기장을 이용하여 이온의 핵생성에 필요한 에너지를 주면 즉, 임계 핵 반경 성장에 필요한 에너지를 주면 그 이후로 자연적으로 핵생성을 하게 된다.

### 2.2 기본식

본 연구에서는 서로 다른 실험조건에서의 파울링 제거특성을 비교하기 위해 고온수 및 저온수(작동유체)의 온도를 측정하여 총합열전달계수와 파울링 저항을 계산하였다.

고온과 저온의 작동유체 사이의 열전달량은 다음 식으로 표현된다.<sup>(11,12)</sup>

$$q = UA \Delta T_{LMTD} \quad (10)$$

$$q = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (11)$$

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln[(T_{h,i} - T_{c,o}) / (T_{h,o} - T_{c,i})]} \quad (12)$$

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

$$U = \frac{q}{A \Delta T_{LMTD}} \quad (13)$$

고온유체에서 냉각수로의 열전달과정을 저항의 개념으로 나타내면 Fig. 4와 같다.

고온유체에서 저온유체로의 열전달 과정에서 총합열전달계수는 식 (14), (15)와 같고, 파울링열저항  $R_f$ 는 식 (16)과 같다.

$$\frac{1}{U_c} = R_1 + R_w + R_2 \quad (14)$$

$$\frac{1}{U_f} = R_1 + R_f + R_w + R_2 \quad (15)$$

$$R_f = \frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_c} \quad (16)$$

본 실험에서 사용한 파울링열저항은 식 (17)과 같다.

$$R_f = \frac{1}{U_o} - \frac{1}{U(t)} \quad (17)$$

$U_o$ 는 스케일 생성전의 총합열전달계수이고  $U(t)$ 는 시간 t일 때의 총합열전달계수를 나타낸다.

## 3. 실험장치 및 실험방법

### 3.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치의 구성을 아래의 Fig. 5에 도시하였다.

주요 실험장치로는 파형 발생기(function generator), 전류 증폭기(current amp), 항온조(bath circulator), 열전대 측정기(thermometer), 압력측정기(U-manometer), ED장치 등이 있으며, 실험구간내의

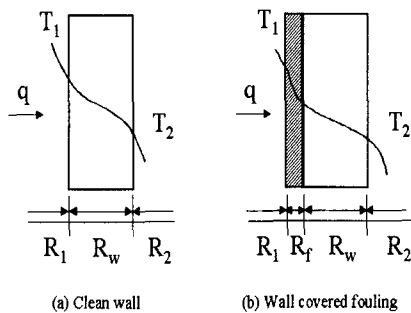


Fig. 4 The thermal resistance of fouling

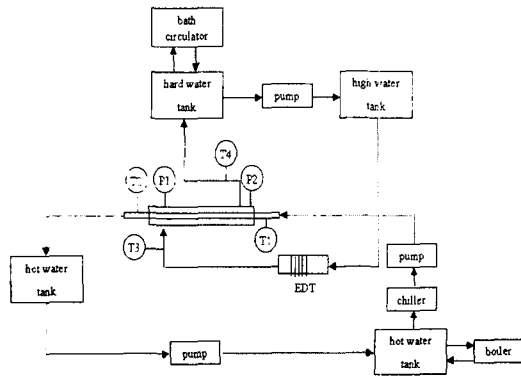


Fig. 5 Schematic diagram of experimental apparatus

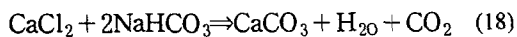
온도를 일정하게 유지하여 파울링으로만 인한 온도차를 알아보기 위해 대향류 형태(counter flow type)의 열교환기를 사용하였다.

열교환기의 실험 구간은 길이 1.75m의 동심 2중관으로 고온유체가 흘러가는 관은 동관으로 직경이 0.0127m이고 저온유체는 아크릴관으로 직경이 0.02m로 만들어 열전달이 이루어지는 동관벽에 부착되는 파울링을 관찰할 수 있도록 제작하였고, ED장치를 통한 저온유체는 고온유체의 흐름방향과는 반대 방향이며, 동관외부를 흐르면서 열을 흡수한 후 향온조로 들어간다. 고수조에 설치된 밸브를 통해 레이놀즈수를 조절하였으며, U자관을 설치하여 수두높이로 압력을 측정하였다.

측정시간대의 저온, 고온유체의 입구온도를 각각 298K, 313K로 유지하기 위해 2개의 향온조를 설치하였으며 측정시간대의 입·출구온도는 열전대를 설치하여 측정하였다.

물인 경우 칼슘에 의한 스케일이 가장 큰 원인이므로 임의의 칼슘카보나이트(CaCO<sub>3</sub>)를 만들기 위해 CaCl<sub>2</sub>와 NaHCO<sub>3</sub>를 사용하였다.

이 두 용질이 물에 용해됐을 때의 화학반응식은 식 (18)으로 표현된다.



경수(hard water)로 만들기 위해 CaCO<sub>3</sub>의 양을 1000ppm으로 설정하였다. 시간에 따른 작동유체의 농도를 일정하게 하기 위하여 실험 시작 후 4

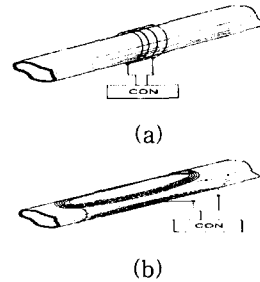


Fig. 6 Schematic diagram of previous and new method

시간마다 농도 1000ppm의 새로운 작동유체로 교체하였으며 한 번의 실험이 끝난 후 동심 2중관 안의 스케일은 빙초산과 물의 혼합액(1:20)을 이용하여 청소하였다. 예비실험 결과 더 이상의 압력증가가 없는 시간까지 실험을 수행하였으며 한 번의 실험시간을 30시간으로 하였다.

### 3.2 실험방법

본 실험에 앞서 유도 기전력의 값을 가장 크게 하기 위해 솔레노이드의 직경, 도선의 감은수, 주파수의 변화, 최고 전압의 변화등 각 변수들의 적정치를 조사하였고, 그 결과 ED장치의 솔레노이드 직경을 0405m, 도선의 직경을 1mm, 권선수를 50번, 주파수를 500MHz를 선택하였다. 또한, 실험에서는 유도기전력은 RMS 전류, 임피던스(impedance) 등을 변수로 하며 패러데이의 법칙에 의해 전류의 구배에 비례하기 때문에 사각파(square-wave)파형을 사용하였다.

Fig. 6은 ED장치의 도선 설치방법을 나타낸 그림이다. Fig. 6(a)는 Cho 등이 제시한 기존의 방법을 나타낸 그림으로 솔레노이드 형식으로 감은 도선의 양 끝단에 일정한 주파수를 가지는 사각파의 전류를 보내면 자기장이 발생하는데, 이 자기장은 배관 내부에 유도기전력을 발생시킨다.

결국, 이온의 강제적인 결합으로 인해 CaCO<sub>3</sub>의 결정구조는 부착성이 강한 아르고나이트에서 부착성이 약한 칼사이트로 바뀌게 되어 벽면에서의 파울링의 부착을 방지한다.

로렌쯔의 법칙에서 자기장 속에서 도선에 흐르는 전류가 받는 힘은 플레밍의 왼손법칙에 의하여 속도 V와 자기장 B에 수직이다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$F = eVB\sin\theta \quad (19)$$

기존의 방법에선 유동의 흐름이 자기장에 평행하기 때문에 즉,  $\theta = 0^\circ$  이므로 힘을 받지 못하게 되며 단지 ED의 효과는 난류의 미세요동으로 생기고 낮은 레이놀즈수에서는 ED의 효과가 없게 된다.

본 연구에서는 Fig. 6(b)의 형태 즉, 도선을 원형으로 감아 파이프에 말 안장 형태로 설치하여 자기장의 방향이 파이프 길이 방향에 수직 되게 하였다. Fig. 6(b)의 도선 형태는 유동의 흐름이 자기장에 수직이 되게 하여 최대가 되는 로렌츠의 힘을 이온결합에너지로 제공함으로써 더 큰 ED효과를 기대할 수 있다. 그 이외의 실험 조건은 Fig. 6(a)와 동일한 조건을 주었다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

Fig. 7은 레이놀즈수를 1650 및 1010으로 변화시켜 ED장치를 이용한 방법과 ED장치가 없는 경우의 차압을 측정한 것이다. 시간이 경과함에 따라 관벽에 스케일이 생성되면서 차압이 증가함을 볼 수 있다. Fig. 7에서 차압은 처음 8시간동안은 상대적으로 증가가 작지만 그 이후에 17시간까지는 급격한 증가를 보인 이후 일정한 값을 가지는 경향을 보인다. ED장치를 이용한 실험에서도 거의 같은 경향을 보이지만 일정한 값에 도달한 차압은 ED장치가 없는 경우에 비해 작음을 알 수 있다. 레이놀즈수가 1650의 경우에는 약 25%의 압력손실 감소효과를 보였다. 그러나, 레이놀즈수가 낮아지면서 기존 ED장치의 효과가 감소되어, 레이놀즈수 1010에서는 유도기전력에 의한 기존 ED효과가 나타나지 않음을 알 수 있다.

Fig. 8은 총합열전달계수를 나타낸 그림이다. 레이놀즈수 1650의 그림을 보면 전기장을 이용하지 않은 실험은  $1277\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ 에서 약  $740\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ 까지 감소했고 전기장을 이용한 실험은 약 17% 정도의 높은 열전달계수값을 보였다. 총합열전달계수가 높을수록 열전달이 잘 되기 때문에 전기장을 이용한 방법이 열전달 향상에 도움을 준다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 파울링열저항  $R_f$ 를 나타낸 그림이다. 시간에 따라 스케일이 생성되면서 스케일이 열저

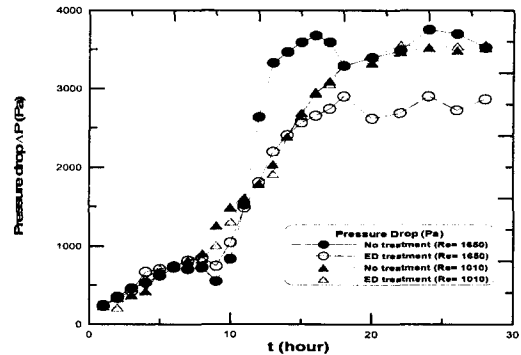


Fig. 7 Comparison of the effects of the ED treatment on pressure drop,  $\Delta P$

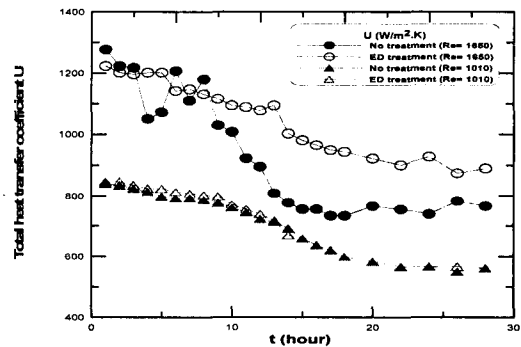


Fig. 8 Comparison of the effects of the ED treatment on over all heat transfer coefficient, U

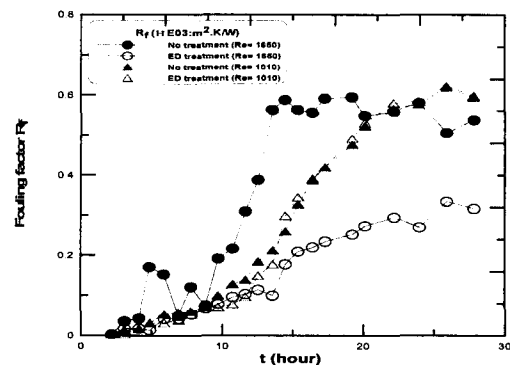


Fig. 9 Comparison of the effects of the ED treatment on fouling factor,  $R_f$

항의 역할을 하여 파울링열저항이 증가하고 열 전달이 감소됨을 알 수 있다. ED장치를 이용한 방법이 ED장치를 사용하지 않았을 경우에 비해 30시간이 지난 후 레이놀즈수 1650에서 약 43% 정도의 열저항이 낮아지는 경향을 보이지만 레이놀즈수 1010에서는 기존 ED장치의 효과가 나타나지 않음을 알 수 있다.

위의 결과로부터 기존 ED 장치의 효과는 레이놀즈수가 낮아질수록 떨어지고, 어느 한계 레이놀즈수에 도달하면 그 효과를 볼 수 없게 된다는 것을 알 수 있었다. 저 레이놀즈수에서는 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 도선감는 방법 즉, 유동의 흐름과 자기장의 방향이 수직이 되게 도선을 감아 레이놀즈수를 바꾸어 가면서 ED 장치의 효과를 조사한 실험이다.

Fig. 10은 차압을 나타낸 그림으로, 기존의 방법에서 효과를 볼 수 없었던 레이놀즈수 1010에서 약 17% 정도의 압력손실 감소효과를 볼 수 있었다. 그러나 레이놀즈수를 800으로 낮춘 실험에서는 그 효과를 볼 수 없었다.

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

Fig. 12는 레이놀즈수에 따른 파울링열저항을 나타낸 그림이다. 1010에선 열저항이 낮아지는 경향을 보이지만 800에선 거의 같은 값을 가져 그 차이가 1010일 때 보다 현저히 줄어드는 경향을 나타내고 있다.

도선의 감는 방향을 바꾸어 실험을 한 결과 기존의 방법에 비해 더 낮은 레이놀즈수에서도 효과를 볼 수 있었는데 그 이유는 이온들이 자기장의 방향과 직각을 두고 유동하므로 로렌츠의 힘을 더 받기 때문이라 판단된다. 하지만 특정 레이놀즈수 이하에선 효과가 없었는데 그 이유는 입자의 속도가 너무 느리기 때문에 완전히 칼사이트로 결정화되기 전에 벽면에 먼저 부착하게 되기 때문이라 판단된다.

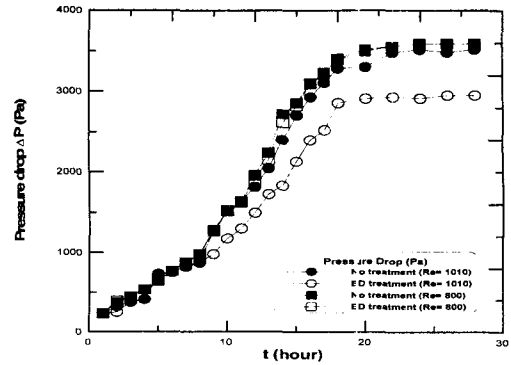


Fig. 10 Comparison of the effects of the ED treatment on the pressure drop,  $\Delta P$

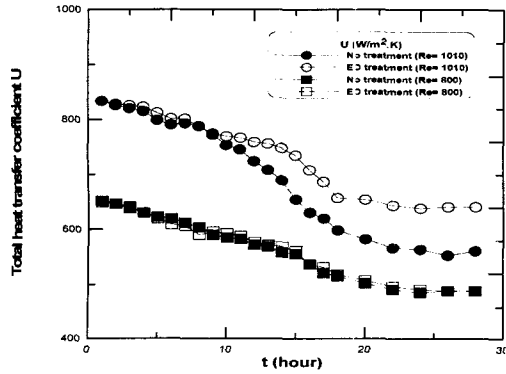


Fig. 11 Comparison of the effects of the ED treatment on the overall heat transfer coefficient,  $U$

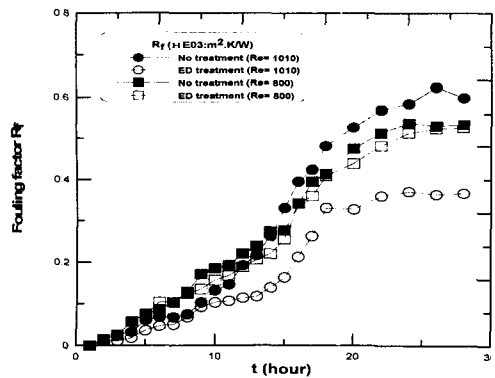


Fig. 12 Comparison of the effects of the ED treatment on fouling factor,  $R_f$

5. 결론

본 연구는 대향류 형태 열교환기의 실험장치에서 파울링에 의한 압력 손실, 총합열전달계수, 파울링열저항을 측정하였다. 레이놀드수를 1650, 1010 및 800으로 변화를 주었고 ED장치의 슬레노이드 직경을 0.0405로 하여 실험을 하였다.

그리고 기존의 방법인 유동방향과 자기장의 방향이 수평이 되게 도선을 감는 방법과 도선감는 방법을 달리하여 유동방향과 자기장의 방향이 수직이 되도록 한 방법을 비교, 관찰하였다. 실험결과로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 전기장을 이용한 스케일 제거 장치는 파울링 생성 억제에 효과적임을 확인할 수 있었다.
- (2) 자기장의 방향과 유동방향이 일치되게 도선을 감는 기존의 ED장치는 레이놀드수 1010이하에서는 ED장치의 효과가 나타나지 않았다.
- (3) 유동의 흐름과 자기장의 방향을 수직으로 되게 도선을 감는 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 것으로 렌즈 힘이 추가되었기 때문이라 판단한다.
- (5) 새로이 제시한 도선감는 방법은 산업 현장에 적용시에 기존방법에 비해 훨씬 간편함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2000년 에너지기술 학술진흥사업의 일환으로 진행되었으며, 일부 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Taborek, J., Aoki, Ritter, R. B. and Knudsen,

J.G. Feb. 1972 "Fouling: The Major Unsolved Problem in Heat Transfer," *Chemical Engineering Progress*, Vol.68, No.2, pp.59~67,

(2) 이윤표, 이신표, 1995, "교환기 Fouling의 저감 대책," *대한기계학회지*, 제35권, 제9호, pp. 836~847.

(3) Knudsen, J. G., 1981, "Cooling Water Fouling -A Brief Review," *Fouling in Heat Exchanger Equipment, 20th ASME/AICHE Heat Transfer Conf.*, Vol.17-HTD, pp. 29~38, Milwaukee, W. I, Considerations, pp. 999~1011.

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

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

(6) Cho, Y. I. and Choi, B. G.,1998, "Validation of an Electronic Anti-Fouling Technology in a Single-Tube Heat Exchanger," *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.42, pp.1491~1499.

(7) Hasson, D., Avriel, M., Resnick, W.,Rozenman, T., and Windreich, S., 1968, "Mechnism of Calcium Carbonate Scale Deposition on Heat Transfer Surfaces," *Ind. Eng. Chem. Fund.*, Vol. 7, pp. 59~65.

(8) Watkinson, A. P., and Martinez, O., 1975, "Scaling of Heat Exchanger Tubes by Calcium Carbonate," *J. of Heat Transfer, Trans of ASME*, pp. 504~508.

(9) Young, I. Cho., Sep. 23, 1997, "Reduced Corrosion Electronic Descaling Technology," U.S. Patent No. 5670041.

(10) Mullin, J. W., 1933, *Crystallization*, 3rded., Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, England.

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

(12) Mills, A F., "Heat Transfer," International Student Edition.