

< 논문 >

# 인공 경수를 이용한 미네랄 파울링 저감에 물리적 수처리 기기들의 효과에 관한 연구

박복춘<sup>†</sup> · 김선도\* · 백병준\*\* · 이동환\*\*  
(2005년 7월 15일 접수, 2005년 10월 18일 심사완료)

## A Study of Efficacy of Physical Water Treatment Devices for Mineral Fouling Mitigation Using Artificial Hard Water

Bock Choon Pak, Sun Do Kim, Byung Joon Baek and Dong Hwan Lee

**Key Words:** Mineral Fouling(미네랄 파울링), Physical Water Treatment(물리적 수처리), Induction  
Period(유도 기간), Catalytic Material(촉매물질), Artificial Hard Water(인공경수)

### Abstract

The objective of the present study was to investigate the efficacy of physical water treatment (PWT) technologies using different catalytic materials and an electronic anti-fouling device in the mitigation of mineral fouling in a once-through flow system with mini-channel heat exchanger. Effects of flow velocity and water hardness on the effectiveness of PWT technologies were experimentally studied. The artificial water hardness varied from 5.0 to 10 mol/m<sup>3</sup> as CaCO<sub>3</sub>. For 10 mol/m<sup>3</sup> solution, fouling resistance reduced by 13-40% depending on flow velocity and types of PWT devices. On the other hand, fouling resistance reduced by 21-29% depending on the PWT devices for 5 mol/m<sup>3</sup> solutions. The PWT device using alloy of Cu and Zn as catalyst (CM2) was slightly more effective than the others. SEM photographs of scale produced from the 10 mol/m<sup>3</sup> solution at 1.0m/s indicated that calcium carbonate scales without PWT devices were needle-shaped aragonite, which is sticky, dense and difficult to remove. Scales with the PWT devices showed a cluster of spherical or elliptic shape crystals. Both the heat transfer test results and SEM photographs strongly support the efficacy of PWT technologies using catalytic materials and an electronic anti-fouling device in the mitigation of mineral fouling.

### 기호설명

A : 열전달 면적(m<sup>2</sup>)

$\dot{m}$  : 질량유동율(kg/s)

$\dot{Q}$  : 열전달량 (kW)

R : 열저항 (m<sup>2</sup>K/W)

T : 온도 (°K)

U : 총열전달계수 (W/m<sup>2</sup>K)

V : 속도 (m/s)

하첨자

c : 저온측

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 전북대학교 기계항공시스템 공학부

E-mail : bcpak@chonbuk.ac.kr

TEL : (063)270-2454 FAX : (063)270-2460

\* 전북대학교 대학원 기계설계학과

\*\* 회원, 전북대학교 기계항공시스템공학부

<i>f</i>	: 파울링
<i>h</i>	: 고온측
<i>i</i>	: 입구
<i>o</i>	: 출구

## 1. 서 론

파울링(Fouling)이란 유체 속에 들어 있는 이물 질들이 열교환기 표면에 부착되는 현상을 말하 여, 이러한 퇴적물을 보통 스케일(scale)이라 칭한 다. 파울링 현상은 응축기, 증발기, 냉각탑 및 보 일러 등과 각종 열교환기 열전달 성능을 급격히 감소시키며, 또한 유동저항의 증가로 인한 급격 한 압력손실을 초래한다. 열전달 표면에 축적되 는 스케일의 양은 물속에 들어 있는 미네랄 이온 의 농도와 표면온도, pH값, 시간, 유동속도 및 함 유된 불순물의 양과 같은 작동 조건에 따라 달라 진다.<sup>(1-3)</sup>

일반적으로, 파울링 메카니즘은 입자 화울링 (particulate fouling), 결정화 파울링 (precipitation or crystallization fouling), 바이오 파울링(biological fouling), 부식 파울링 (corrosion fouling), 화학반응 파울링 (chemical reaction fouling) 및 응고 파울링 (solidification fouling) 등 6가지 형태로 분류되 며,<sup>(1)</sup> 실제 현장에서는 이러한 파울링 메카니즘이 복합적으로 발생하게 된다. 이중 결정화 파울링 은 흔히 볼 수 있는 가장 일반적 형태로 물속에 용해되어 있는  $Ca^{2+}$ 나  $Mg^{2+}$ 등과 같은 미네랄 이온들이 온도가 높은 열전달 표면에 탄산염 이온( $CO_3^{2-}$ )과 반응하여 결정화되어 부착하게 된다.

이는  $Ca^{2+}$ 나  $Mg^{2+}$  등이 온도가 증가함에 따라 농도가 감소하는 역용해도(Inverse solubility) 성질 을 나타내는 물질이기 때문이며, 결정화에 의해 서 형성되는 스케일은 시간이 지남에 따라 점점 커지게 되고, 또한 점점 단단해져 제거하기가 매 우 어려운 상태로 된다.

물 속에 이미 결정화된 미세 입자들이나 그 밖 의 다른 입자들이 열전달 표면에 부착될 수 있으 며, 이와 같은 파울링을 입자 파울링이라 한다. 입자 파울링에 의해서 생성된 스케일은 열전달

표면에서 미네랄 이온들의 반응에 의해 결정화되 어 형성되는 것이라기보다 중력이나 입자들의 이 동에 의한 것이기 때문에 상대적으로 덜 단단하 게 축적된다. 스케일이 가장 빈번하게 발생하는 냉각탑에서 스케일의 주성분은  $CaCO_3$ 이며, 이  $CaCO_3$ 는 결정구조 면에서 calcite와 aragonite로 분류된다. Calcite 형태는 일반적으로 실온에서 형 성되며, 비중이 2.71인 육방정계 결정구조이다. 반면에, aragonite 형태는 사방정계의 결정구조로 비중은 2.94로 calcite 보다 약간 크고, 보통 30°C 이상에서 형성되며, 매우 단단하여 제거하기가 매우 어려운 결정구조이다.

스케일 발생을 억제하고 또한 이미 형성된 스 케일을 제거하기 위한 여러 가지 기술들이 연구 되어져 왔으며, 이는 스폰지 불의 사용, 열교환기 제작 시 촉진관의 사용 및 청관제의 사용 등이 이에 해당된다. 화울링의 저감 및 방지를 위한 최근의 한 기술로 전기장 및 자기장의 사용, 초 음파 및 와류발생기 이용 등과 같은 물리적 수처 리법이다. 최근의 연구 결과에 의하면, 전기장을 발생시키는 솔레노이드 코일을 이용한 물리적 수 처리법을 사용할 시 열저항을 급격히 저감시킬 수 있음을 보고하고 있다.<sup>(4-8)</sup>

본 연구에서 사용하는 수처리법은 자기장이나 전기장을 사용하지 않는 새로운 시도로서 유체 내에서 스케일 형성을 야기 시키기 위해서 촉매 물질을 사용하는 방법이다. 따라서, 본 연구는 열 전달 표면에 형성되는 스케일을 제어하는데 촉매 물질을 사용하는 물리적 수처리법의 효용성을 검 증하고자 하며, 비교를 위하여 솔레노이드 코일 을 이용한 수처리법도 병행하여 실험을 수행하였 다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 실험장치의 개략 도를 보여주고 있다. 두 개의 300l 저장탱크, 펌 프, 서어지탱크 등으로 구성되어진 유동라인이 static mixer를 통해서 혼합된 후 열교환기를 통과 하여 배출되는 개방형 유동루프형태이다. 이밖에

도 열교환기에 고온수를 공급하기 위한 고온 순환조, 스케일 형성과정을 관찰하기 위한 금속 현미경 및 CCD 카메라, 그리고 데이터 처리 시스템으로 구성되어 있다.

이제까지 대부분의 파울링 실험에서는<sup>(9~14)</sup> 재순환 유동루프를 사용하여 수행되어져 왔다. 파울링 실험에서 재순환 시스템의 가장 큰 단점은 실험 도중 실험수의 경도가 계속적으로 낮아진다는 점이다. 그러나, 실제 현장에서는 대부분 파울링 문제가 개방형 유동라인이나 시간에 따라 경도가 증가하는 재순환 유동 루프에서 발생한다. 실제 현장에서 발생하는 파울링 과정과 환경을 유사하게 하기 위하여, 본 실험에서는 개방형 유동 시스템을 택하였다.

또한, 본 연구에서는 실험시간의 단축을 위하여 인공적으로 이온 농도가 매우 높은 용액을 만들어서 사용하는 가속화 실험법을 택하였다. 먼저 수도관으로부터 각각의 보조탱크에 일정한 양의 물을 공급받은 후에 원하는 농도의 양이온과 음이온을 만들기 위하여 적정량의  $\text{CaCl}_2$  및  $\text{NaHCO}_3$ 의 분말을 각각 첨가하여 균일한 상태가 되도록 교반기로 잘 저은 후 300l 용량의 저장탱크에 펌핑 하였다. 본 실험에서는 5 및 10  $\text{mol/m}^3$ 의 인공경수를 실험실에서 만들어 사용하였다. 여기서  $\text{CaCO}_3$ 의 10 $\text{mol/m}^3$ 이라 함은 100mg/L와 동일한 값을 의미한다. 예를 들어, 10  $\text{mol/m}^3$ 의 인공 경수를 만들기 위해서는 한 개의 저장탱크에 0.2 $\text{m}^3$ 의 수도물을 받은 후 444g의 탄

산칼슘 ( $\text{CaCl}_2$ )을 용해시키고, 다른 한 개의 저장탱크에는 동일량의 수도물을 받은 후 762g의 중탄산나트륨( $\text{NaHCO}_3$ )을 용해시켰다. 이와 같이 준비된 두개의 다른 실험수는 Fig. 1에서와 같이 각각 다른 유동라인을 통과 한 후에 static mixer를 통과하여 열교환기로 유입되었다.

Table 1은 실험에서 사용한 인공 경수의 물 분석 결과를 보여주고 있다. Table에서와 같이 수도물의 전기전도도는 약 203  $\mu\text{S/cm}$ 인데 반하여 5  $\text{mol/m}^3$  및 10  $\text{mol/m}^3$ 의 인공경수의 전기전도도는 각각 2,315 및 3,485  $\mu\text{S/cm}$ 으로 수도물에 비하여 약 10~17배 높았다.

Fig. 2는 본 실험에서 스케일 형성에 따른 열저항의 변화를 측정하기 위해 사용한 열교환기의 상세도 및 단면도를 보여주고 있다.

사각의 미니채널로 구성된 대향류형으로 열교환기의 상부에는 광학창을 설치하였으며, 실험 도중 실시간으로 파울링 생성을 관찰하기 위해서 CCD 카메라가 장착된 금속현미경을 사용하였다. 열교환기의 저온측 전열면에 스케일의 형성과정을 현미경 및 CCD 카메라를 통해서 계속적으로 관찰되었으며, 일정 시간마다 기록되었다. 인공 경수가 흐르는 저온측의 유로의 단면은 6.4mm x 1.6mm의 미소 사각채널로 전열면의 길이는 240mm인 반면에, 고온수가 흐르는 유동 단면은 6.4mm x 3.7mm로 온도 감소를 적게 하기 위하여 저온측의 유동단면과 비교하여 상대적으로 크

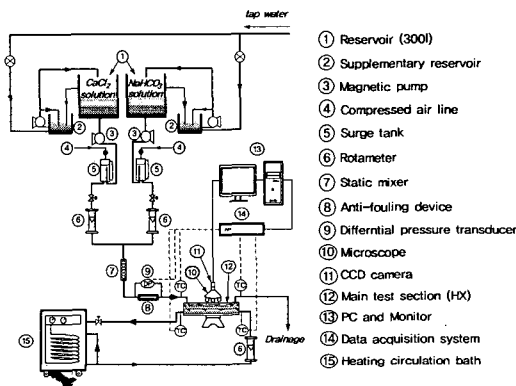


Fig. 1 Schematic diagram of the present experimental set-up

Table 1 Water analysis of artificial hard water

	tap water	concentration ( $\text{mol/m}^3$ )	
		5	10
$\text{CaCl}_2$ (mol)	-	0.01	0.005
$\text{NaHCO}_3$ (mol)	-	0.02	0.01
Electric Conductivity ( $\mu\text{S/cm}$ )	201-205	2,310-2,320	3,480-3,490
Hardness (mg/L)	33	198	225
Total Alkalinity (mg/L)	28	298	318
Chloride (mg/L)	5.5	195	360
Silica (mg/L)	5.3	6	9.5

게 제작하였다. 유로사이의 전열면은 두께가 1mm인 동판으로 제작하였으며, 냉수부와 온수부의 유량은 rotameter를 사용하여 각각 측정하였다.

온수의 가열은 온도조절이 가능한 4kW의 항온 순환조를 사용하였으며, 온도측정은 Omega T-type 열전대 (TMTSS-125G-6)를 이용하여 HP E8404A 데이터 처리시스템과 agilent VEE프로그램을 사용하여 처리하였다. 스케일 형성과정의 실험시 열교환기에서의 실험조건은 Table 2와 같이 고정하였다.

2.2 촉매물질을 이용한 수처리 기기

Fig. 3은 본 실험에서 사용한 두개의 다른 촉매물질을 이용한 수처리 기기의 구조를 보여주고 있으며, 여기서 (a)를 CM1, (b)를 CM2라 칭하고자 한다. 촉매물질 사용하는 이 방법은 어떠한 외력이나 전기 및 전기력을 이용하지 않음을 부연하고자 한다. CM1은 Fig. 3(a)에서와 같이 스테인레스 재질의 케이싱과, 코어부분으로 구성되어 있다. 코어 부분은 Cu와 Ni이 주성분으로(Table 3 참조) 기타 Zn, Sn 및 Fe가 함유된 전형적인

촉매물질들의 합금으로 제작되었다. 코어의 구조는 Fig. 3(a) 우측의 그림에서와 같이 유동 단면은 좌우 대칭인 다수의 사각 유로로 구성되어 있다. 그러나 유동방향으로는 압력손실을 최소화하기 위하여 다수의 유선형화 된 벤츄리 유로형태이다. 주물 형태로 제작되었으며, 따라서 표면은 매우 거친 상태이다. 반면에, CM2는 Fig. 3(b)에서와 같이 황동(BS 2784)으로 제작된 케이싱 내부의 중심에는 구리 9%, 아연 91%의 합금으로 된 링 형태의 촉매제 (Table 3 참조)가 삽입되어 있으며, 그 양측에는 동일 형상과 크기의 불소수지(PTFE)로 만들어진 다공 유로가 만들어져 있다. 케이싱 부분은 그림과 같이 연결 파이프의 양단을 연결하여 접지를 하였다.

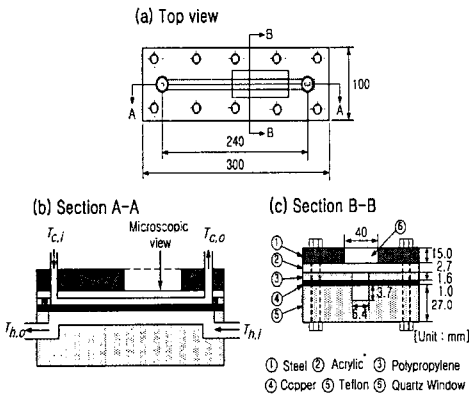


Fig. 2 Detailed view of heat transfer test section

Table 2 Experimental conditions in a heat exchanger during experiments

	$T_i$ (°C)	V (m/s)
Cold side	$25 \pm 1.0$	0.5, 1.0, 1.5
Hot side	$95 \pm 1.0$	1.51

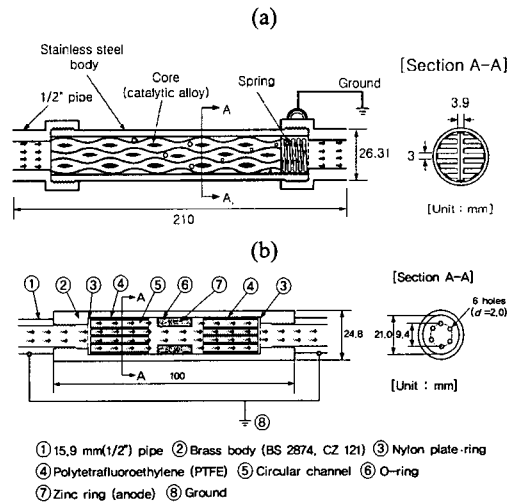


Fig. 3 Schematic diagram of (a)CM1 and (b)CM2

Table 3 Element composition analyses of CM1 and CM2

Material	Composition(%)	
	CM1	CM2
Cu	77	9
Zn	6	91
Ni	11	-
Sn	5	-
Fe	1	-

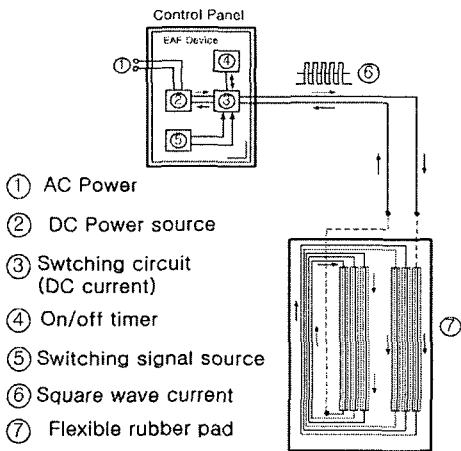


Fig. 4 Schematic diagram of electronic anti-fouling (EAF) device

Fig. 4는 솔레노이드 코일을 이용한 수처리 기기의 개략도를 보여주고 있다. 여기서는 EAF라 칭하고자 하며, 그 구성은 크게 2 부분 즉, 교류전력을 공급받아 저전압 직교형 고주파로 변조시켜주는 조절판과 파이프에 감아서 유동 내에 유도전자기장을 형성시키는 고무패드로 구성되어 있다. 그림에서와 같이 고무패드 내에는 보다 효과적인 유도전자기장을 발생시키기 위해서 방향이 서로 반대인 다수의 세선으로 회로가 구성되어 있다. 이와 같은 물리적 수처리 장치는 열교환기나 냉각탑 등 스케일이 빈번하게 발생하는 열기기 등의 유입구에 간단히 설치하여 스케일의 생성을 억제하고자 하는 것이다.

### 2.3 파울링 저항(Fouling Resistance)

파울링 저항은 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다.<sup>(1)</sup>

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

여기서  $U_f$ 는 화울링이 형성된 후,  $U_c$ 는 초기상태의 열교환기의 총열전달계수이며, 다음과 같이 계산된다.

$$U = \frac{\dot{Q}}{A \Delta T_{lm}} \quad (2)$$

여기서  $\Delta T_{lm}$ 는 대수평균온도차로서 대향류 열교환기에서는 다음과 같다.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln \frac{(T_{h,i} - T_{c,o})}{(T_{h,o} - T_{c,i})}} \quad (3)$$

그리고,  $\dot{Q}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{Q} = [\dot{m} C_p (T_i - T_o)]_h = [\dot{m} C_p (T_o - T_i)]_c \quad (4)$$

열교환기의 성능을 평가하기 위하여 본 실험을 수행하기 전에 식 (4)에서와 같이 열교환기의 저온측에서 얻은 열량과 고온측에서의 손실열량을 비교하였으며, 저온측 유속의 실험 범위 내에서는 그 오차가 5% 이내였다.

또한,  $\dot{Q}$ ,  $U$ ,  $R_f$  및  $A$ 에 대해서 불확실성 해석(Uncertainty analysis)으로부터 계산된 오차는 각각 2.4%, 3.0%, 8.5% 및 1.1%였다. 실험과정 동안 저온측의 출온도를 정확히 측정하는 것이 실험결과의 오차를 줄이는데 매우 중요함을 발견하였다. 따라서, 매번 실험 종료 후에는 특히 저온부의 입출구의 피복 열전대의 표면에 형성된 스케일을 완전히 제거한 후 다음 실험을 수행하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 스케일 형성과정의 현미경적 관찰

Fig. 5는 농도가 10 mol/m<sup>3</sup>인 인공경수를 수처리하지 않았을 경우와 수처리를 했을 경우 시간의 경과에 따라 열전달 표면에 스케일의 형성 과정을 보여주고 있다. 인공경수가 흐르는 저온측과 고온측의 유입온도는 각각 25°C, 95°C로 고정하였으며, 열교환기 내에서 저온측의 유속은 1.0m/s로 유지시켰다. 모니터를 통해서 총 6시간 동안 관찰하였으며, 현미경의 배율은 40배로 고정하고 실험 개시 후 2시간까지는 30분마다, 그 이후는 2시간마다 스케일 형성과정을 촬영하였다. Fig. 5(a)의 일련의 사진은 수처리를 하지 않았을 경우 실험 개시 후 4시간까지 시간의 경과에 따른 스케일 형성과정을 보여 주고 있다. 정량적인 평가는 다소 어려움이 있으나, 30분이 경과하면서 부터 크기가 70-80 μm인 다수의 결정이 이미 형성되기 시작함을 관찰할 수 있었다.

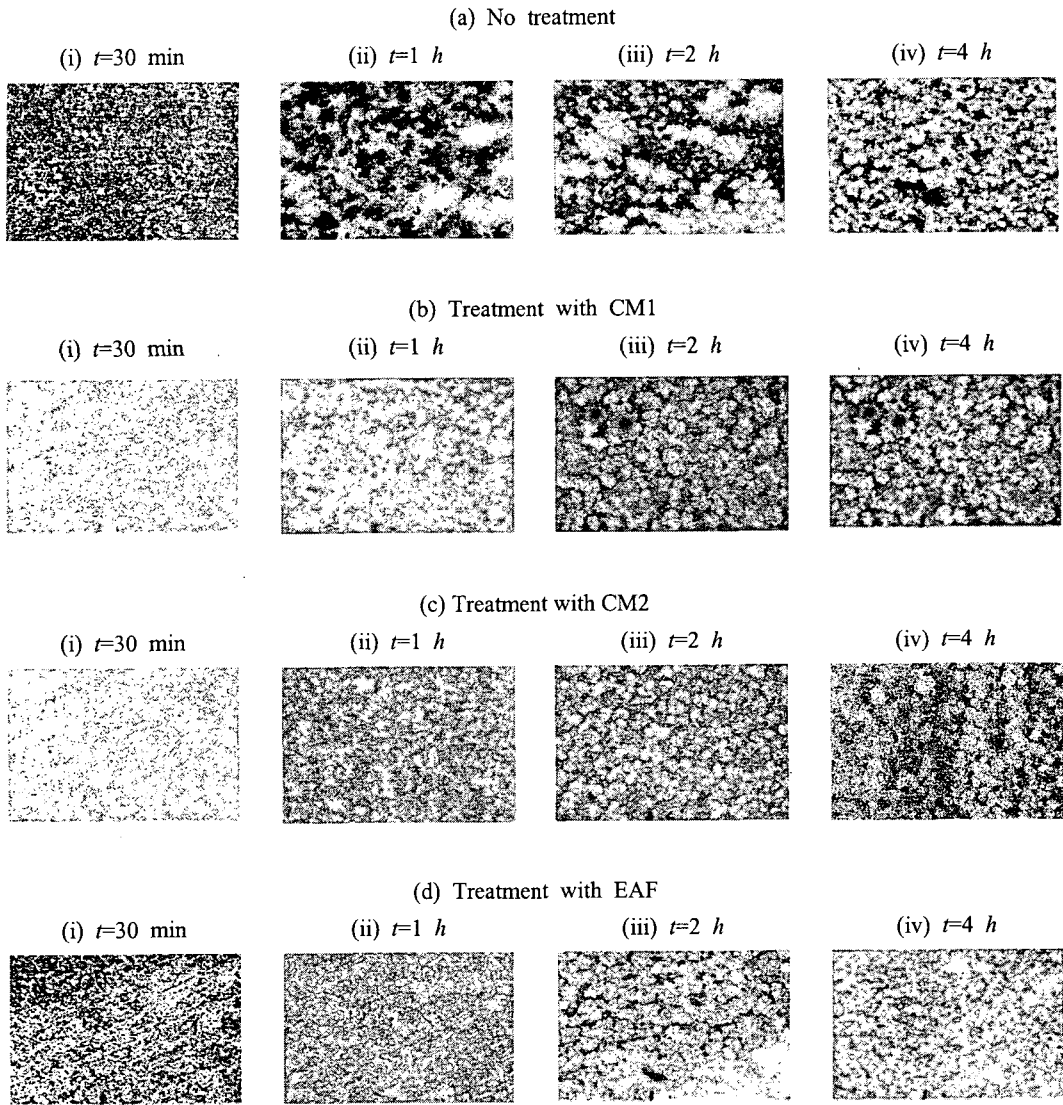


Fig. 5 Time-history microphotographs at inlet bulk temperature of 25°C and velocity of 1m/s. Magnification = 40x

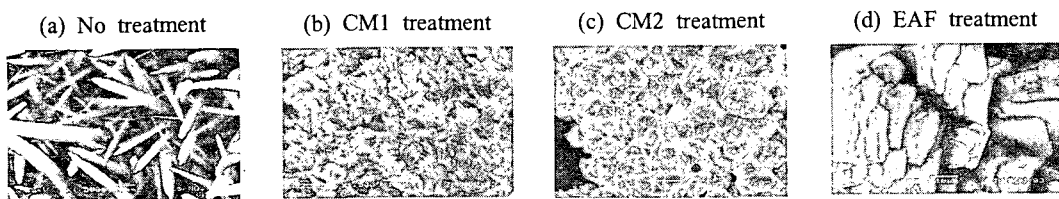


Fig. 6 Photographs of scaled heat transfer surfaces taken using a SEM (flow velocity=1.0m/s and concentration=10mol/m<sup>3</sup>). Magnification = 1500x

스케일 형성이 진행됨에 따라 결정은 급격히 180  $\mu\text{m}$ 의 크기까지 증가하여 2시간 후에는 스케일이 열전달 표면을 완전히 덮고, 그 위에 결정이 계속 성장함을 보여 주고 있다. 특히 4시간 이후에는 현미경으로 관찰한 스케일의 외형적 변화는 거의 보이지 않았으며, 결정구조는 수처리를 했을 경우와는 달리 다소 침상의 형태를 보여주고 있다. 이러한 경향은 실험조건이 다르기 때문에 직접적으로 비교는 어려우나, 최근의 결과<sup>(15)</sup>와 유사한 결과를 나타내고 있다. Fig. 5(b) 및 Fig. 5(c)는 재질이 각각 다른 촉매재 CM1과 CM2 (Table 2 참조)를 이용하여 수처리를 한 경우 스케일 형성과정을 보여주고 있는 반면에 Fig. 5(d)는 솔레노이드 코일을 이용한(EAF) 수처리 방법을 적용한 결과이다. 여기서 수처리 방법 적용한 경우는 수처리 방법을 적용하지 않은 경우와 동일한 실험 조건하에서 수행된 실험 결과이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 수처리 방법을 적용했을 시는 실험 개시 후 30분까지는 열전달 표면에 스케일의 형성되지 않음을 관찰 할 수 있었다. 수처리를 하지 않은 경우와 수처리를 한 경우와 비교할 때, 특징적인 것은 시간이 지남에 따라 수처리를 한 경우에는 열전달 표면에 형성되기 시작하는 결정의 크기가 수처리를 하지 않은 경우와 비교하여 210-250 $\mu\text{m}$ 로 상대적으로 크다는 점과 전반적으로 구형을 띠고 있다는 점이다. 이는 수처리를 한 경우에는  $\text{CaCO}_3$ 의 결정이 이미 유체 내에서 성장하여 표면에 침전되어 부착되는 침전 파울링 현상이 나타나기 때문으로 해석된다.

열전달 표면에 형성된  $\text{CaCO}_3$  스케일의 구조를 보다 정확히 관찰하기 위하여 실험 개시 4시간 경과한 후에 SEM (Scanning Electro Microscopy)을 이용하여 1,500배로 확대하여 관찰하였으며, Fig. 6은 그 결과를 보여주고 있다.

Fig. 6(a)에서와 같이 수처리를 하지 않은 경우에는 aragonite type의 침상 결정구조를 보여주고 있다. 전술한 바와 같이 aragonate type은 사방정계 (orthorhombic crystal shape)의 결정구조로서, 매우 단단하고 조밀하여 열전달 표면에 일단 형성되면 제거하기가 매우 힘든 결정구조이다. 반면에, Fig. 6 (b) 및 Fig. 6(c)는 촉매물질을 이용

한 수처리법을 적용한 결과이며, Fig. 6(d)는 EAF 수처리법을 적용한 결과 수처리법을 적용하지 않을 시와 같이 동일한 4시간 후의 SEM 사진을 보여주고 있다. 수처리 방법에 따라 결정 형태가 다소 차이를 나타내긴 하지만, 전반적으로 calcite type의 구형 팔방정계(hexagonal crystal shape)이었다. 이것은 보통 30°C 이하에서 생기는 결정구조로 약산(weak acid)이나 솔(brush)에 의해 쉽게 제거된다. 또한 aragonite보다 표면의 부착력이 적은 것이 특징이다. 이와 같은 SEM 사진 결과는 본 실험에서 사용한 촉매물질을 이용한 수처리 기기와 솔레노이드 코일을 이용한 수처리 기기가 스케일 형성의 억제에 그 효용성이 있다는 것을 입증하고 있다.

### 3.2 파울링 저항(Fouling Resistance), $R_f$

Figs. 7-9는 농도가 10 mol/m<sup>3</sup>인 인공 경수의 경우 수처리 기기를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 있어서 유속의 증가에 따른 열저항의 변화를 보여주고 있다. Fig. 7은 열교환기 내에서 저온측의 유속이 0.5m/sec인 경우로서 수처리를 하지 않은 경우에 있어서 스케일 발생이 없는 유도기간 (Induction period)은 15분 정도 지속됨을 볼 수 있었으며, 이후에는 파울링 저항이 계속적으로 증가하여 3시간 후에는 약  $6.8 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>K/W 까지 이르렀다. 반면에, 수처리를 하였을 경우에는 수처리 방법에 약간의 차이는 있으나 유도기간이 수처리를 하지 않은 경우와 비교하여 다소 길어지는 경향을 보여주고 있다. 그러나, 파울링 저항의 증가는 수처리 기기의 사용의 유무 및 수처리 기기의 종류에 관계없이 실험 시간 동안 거의 차이를 보이지 않으며, 이와 같은 저속에서는 수처리의 효과가 없음을 의미한다. 수처리 효과가 그다지 크게 향상되지 못한 이유를 이해하기 위하여 유도기간 이후의 파울링 곡선을 고찰해 보자.

Fig. 7 내의 A에서와 같이 수처리를 하지 않은 경우에 있어 초기 파울링 증가율(즉 파울링 곡선의 기울기)을 수처리를 한 경우보다 크다. 따라서, 수처리를 하지 않은 경우에는 열전달 표면에 스케일의 축적이 상대적으로 많아져, 스케일 표면 온도가 낮아지며, 결과적으로 스케일의 형성

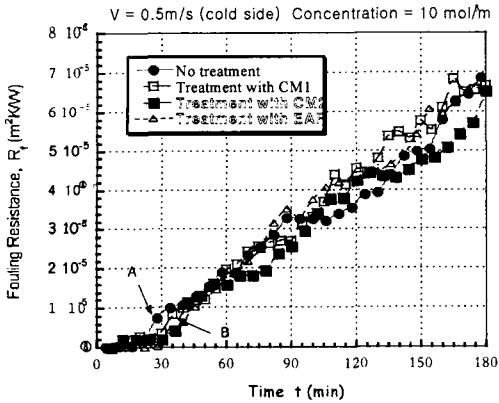


Fig. 7 Fouling resistance curves over time(velocity= 0.5 m/s at cold side, concentration of artificial hard water=10 mol/m<sup>3</sup>)

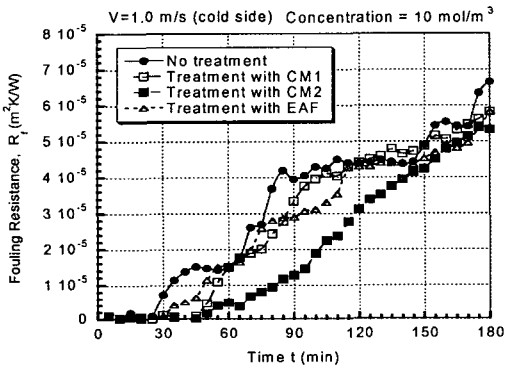


Fig. 8 Fouling resistance curves over time(velocity= 1.0 m/s at cold side, concentration of artificial hard water=10 mol/m<sup>3</sup>)

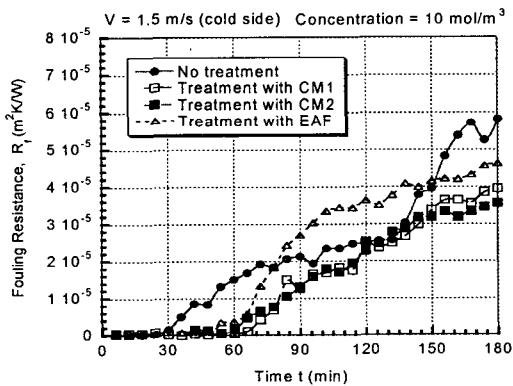


Fig. 9 Fouling resistance curves over time(velocity= 1.5 m/s at cold side, concentration of artificial hard water=10 mol/m<sup>3</sup>)

을 더디게 한다. 반면에 수처리를 한 경우에는 초기온도를 그대로 유지하다 B에서처럼 스케일 형성이 시작되고, 스케일 표면온도의 감소로 스케일의 축적률이 감소하는 현상이 반복되어 수처리를 한 경우와 하지 않은 경우의 파울링 곡선이 지그재그 식으로 증가한다 할 수 있다. 이와 같은 유사한 경향은 이전의 연구결과에서도 보고되고 있다.<sup>(4)</sup> 또한, 이와 같은 저속에서는 수처리 기기를 사용하였을 지라도 사용된 작동유체의 경도가 매우 높아 유체 내에서 결정핵이 빠른 속도로 형성되고 그 크기가 증가하여 고체표면에 침강하여 부착이 되며, 저속으로 인하여 축적된 스케일의 제거율(removal rate)이 매우 낮기 때문에 해석된다.

Fig. 8 및 Fig. 9는 Fig. 7과 동일한 실험조건에서 저속부의 유속을 각각 1.0m/s, 1.5m/s로 증가시켰을 때 시간의 경과에 따른 파울링 저항의 변화를 보여주고 있다. 유속이 0.5m/s에 비하여 수처리 기기의 사용에 따른 파울링 저항의 감소가 보다 확연하게 나타남을 보이고 있다. 또한, 시간이 경과함에 따라 파울링 저항의 증가는 유속이 0.5m/s인 경우와 정성적으로는 유사한 경향을 보여 주고 있으나, 저항곡선의 변곡이 다소 심하게 나타났다. 이는 본 실험에서 사용한 인공 경수의 이온농도가 매우 크기 때문에 추측되며, 또한 유속의 증가로 말미암아 열전달 표면에 형성된 스케일이 표면으로부터 이탈과 부착이 불규칙적이고 반복적으로 이루어지기 때문으로 생각된다.

Figs. 7-9에서와 같이 수처리를 하지 않은 경우에 유속이 0.5m/s에서 1.5m/s로 증가함에 따라 유도기간은 15분에서 25분으로 다소 길어진 반면에, 수처리를 하였을 경우에는 수처리 기기의 종류에 따라 차이는 있으나 약 30분에서 60분으로 현저히 증가함을 보이고 있다.

수처리를 하지 않은 경우에 스케일 형성에 유속의 영향을 고찰하기 위해서 실험 개시 후 3시간 후의 파울링 저항 값을 비교해 보면 유속이 1.0 m/s에서는  $6.7 \times 10^{-5} (\text{m}^2\text{K}/\text{W})$ , 그리고, 1.5m/s에서는  $5.9 \times 10^{-5} (\text{m}^2\text{K}/\text{W})$ 로 유속이 증가함에 따라 감소하였다. 또한, 동일한 유속에서 수처리를 한 경우와 수처리를 하지 않은 경우를 비교해 볼 때,



유속이 1.0m/s일 때는 파울링 저항의 감소가 13-21%, 유속이 1.5m/s로 증가하면 수처리 기기의 사용에 따른 파울링 저항의 감소가 22-40%로 현저히 증가 하였다. 이는 유속이 증가함에 따라 수처리 기기 사용의 효과가 더 커짐을 의미하며, 본 실험에서 사용한 수처리 기기 중 CM2가 다른 수처리법 보다는 다소 효과적임을 보여주고 있다.

Fig. 10은 농도가 5mol/m<sup>3</sup>인 인공 경수를 사용하였을 때 유속이 1.0m/s에서 수처리를 하지 않은 경우와 수처리를 한 경우에 파울링 저항의 증가 양상을 보여주고 있다. 인공 경수의 농도가 10mol/m<sup>3</sup>인 실험 결과와 비교할 때 파울링 곡선의 굴곡의 변화가 현저히 저하되었으며, 이는 실험유체의 경도가 낮아질수록 보다 안정화된 스케일 형성이 이루어짐을 의미하고 있다. 동일한 유속인 Fig. 8과 비교해 볼 때, 파울링 실험에 사용한 경수의 경도에 따라 유도기간 및 파울링 저항의 변화에도 큰 영향을 주는 것을 보여주고 있다. 경수의 농도가 감소함에 따라 유도기간은 수처리를 하지 않았을 경우에 다소 증가하였으며, 수처리를 하였을 경우에도 수처리 기기에 따라 다소 차이는 있으면 전반적으로 증가하는 경향을 보여주고 있다. 예상된 바와 같이 수처리를 하지

않은 경우에 3시간 후의 파울링 저항은 5.2x10<sup>-5</sup> (m<sup>2</sup>K/W)로 10mol/m<sup>3</sup>인 경수에 비하여 현저히 낮아짐을 알 수 있다. 수처리 기기의 사용에 의한 파울링 저항값의 감소는 농도가 10mol/m<sup>3</sup>인 경수와는 달리 수처리 기기에 따라 큰 차이를 보이지 않으나, 수처리 기기의 종류에 따라 약 21-29%의 감소 효과를 보여주고 있다. 특히 이 경우에는 CM2와 EAF를 병행하여 사용한 결과를 보여주고 있으며, 파울링 저항 감소효과는 약 52%로 두 종류의 수처리 기기를 사용하는 시너지 효과가 있어 더욱 효율적으로 파울링 제어를 할 수 있을 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 인공 경수를 사용하여 물리적 수처리 기기들의 미네랄 파울링 저감효과에 대한 성능 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 파울링 형성과정의 초기에 열전달 표면에 부착되는 결정들이 수처리를 한 경우가 수처리를 하지 않은 경우보다 그 크기가 더욱 크고, 대체적으로 둥근 형태임을 알 수 있었다. 특히, SEM 사진으로부터 물리적 수처리를 한 경우에는 CaCO<sub>3</sub>의 결정구조가 calcite 형태이며, 수처리를 하지 않은 경우에는 argonite 형태로, 물리적 수처리 기기들의 그 효용성이 있음을 입증하고 있다.

(2) 유도기간 (Induction period)은 수처리 기기를 사용했을 때가 사용하지 않았을 때보다 더욱 증가하였으며, 동일 농도에서는 유속이 증가함에 따라 증가하였고, 동일 유속에서는 농도가 감소함에 따라 증가하였다.

(3) 수처리 기기의 사용에 따른 파울링 저항의 감소는 농도가 10mol/m<sup>3</sup>인 경우에는 유속이 0.5m/s 일 때는 수처리의 효과를 보이지 않으나, 유속이 1.0m/s 및 1.5m/s로 증가할 때 각각 13-21%, 22%-44% 현저히 감소하였으며, 실험에 사용한 수처리 기기 중 CM2가 다소 효과적임을 보이고 있다. 반면에 농도가 5mol/m<sup>3</sup>인 경우에 파울링 저항의 감소는 수처리 기기에 따라 약

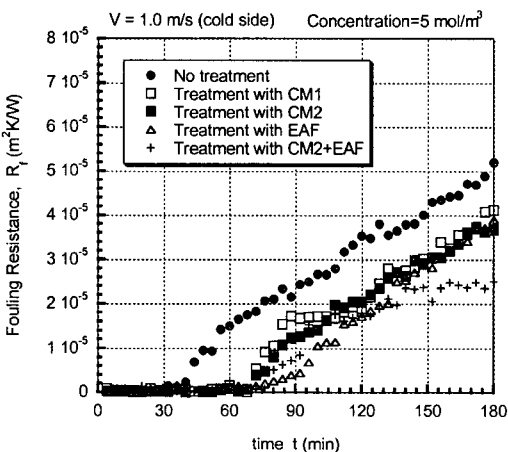


Fig. 10. Fouling resistance curves over time(velocity=1.0m/s at cold side, concentration of artificial hard water=5 mol/m<sup>3</sup>)

21-29%에 달하였으며, 농도가 낮을 경우 농도가 높을 경우에 비하여 상대적으로 기기의 효과가 낮아진다. 특히, 촉매물질을 이용한 방법 CM2와 EAF를 동시에 적용하면 시너지효과가 발생하여 약 52%의 저감 효과가 있음을 알 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (R05-2003-000-12188-0)

## 참고문헌

- (1) Bott, T.R., 1995, "Fouling of Heat Exchangers," *Elsevier Science B.V.*, Netherlands, pp. 55~133.
- (2) Bott, T.R., 1997, "Aspects of Crystallization," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 14, pp. 356~360.
- (3) Panchal, C.B. and Knudsen, J.G., 1998, "Mitigation of Water Fouling: Technology Status and Challenges," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 31, pp. 431~474.
- (4) Cho, Y.I. and Choi, B.G., 1997, Validation of an Electronic Anti-Fouling Technology in a Single-Tube Heat Exchanger," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 1491~1499.
- (5) Kim, W.T., Cho, Y.I. and Bai, C., 2001, "Effect of Electronic Anti-Fouling Treatment on Fouling Mitigation with Circulating Cooling-Tower Water," *International Communication of Heat and Mass Transfer*, Vol. 28, No. 5, pp. 671~680.
- (6) Cho, Y.I., Lee, S.H. and Kim, W.T., 2003, "Physical Water Treatment for the Mitigation of Mineralin Cooling-Tower Water," *Proceedings of the Symposia of ASHRAE Transactions*, pp. 346~357.
- (7) Lee, S.H. and Cho, Y.I., 2002, "Study of the Performance of Physical Water Treatment with a Solenoid Coil to Prevent Mineral Fouling. Part 1: Effect of Side-Stream Filtration," *International Communication on Heat and Mass Transfer*, Vol. 29, No. 2, pp. 145~156.
- (8) Cho, Y.I., Fridman, A.F., Lee, S.H. and Kim, W.T., 2004, "Physical Water Treatment for Fouling Prevention In Heat Exchangers," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 48, pp. 1~71.
- (9) Hasson, D., Avriel, M., Resnick, W., Roseman, T. and Windreich, S., 1968, "Mechanism of Calcium Carbonate Scale Deposition on Heat Transfer Surfaces," *Int. Eng. Chem. Fund.*, Vol. 7, pp. 59~65.
- (10) Sheikholeslami, R. and Watkinson, A.P., 1986, "Scaling of Plain and Externally Finned Heat Exchanger Tubes," *J. of Heat Transfer*, Vol. 108, pp. 147~152.
- (11) Watkinson, A.P. and Martinez, O., 1975, Scaling of Heat Exchanger Tubes by Calcium Carbonate," *J. of Heat Transfer*, Vol. 97, pp. 504~508.
- (12) Watkinson, A.P., 1983, "Water Quality Effects on Fouling from Hard Waters," In Taborek J, et al, editors, *Heat Exchangers-Theory and Practice*. Hemisphere, pp. 853~861.
- (13) Andritsos, N., Kontopoulou, M. and Karabelas, A.J., 1996, "Calcium Carbonate Deposit Formation Under Isothermal Conditions," *Can. J. Chem. Eng.*, Vol. 74, pp. 911~919.
- (14) Rabas, T.J. and Taborek, J., 1996, "Heat-Rate Improvements Obtained by Retubing Condensers with New, Enhanced Tube Types," *J. of Enhanced Heat Transfer*, Vol. 3, pp. 83~94.
- (15) Won Tae Kim, Cheolho Bai and Young I. Cho, 2002, "A Study of Caco<sub>3</sub> Fouling with a Microscopic Imaging Technique," *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 597~607.