

열교환기에 대한 스케일 완화장치의 성능평가

신상철^{*}· 김경우^{*}· 모정하[†]

(2000년 7월 29일 접수, 2001년 6월 15일 심사완료)

Performance Evaluation of Scale Mitigation Unit for Heat Exchangers

Sang-Chul Shin, Kyong-Woo Kim and Jeong-Hah Moh

Key Words: Scale(스케일), Electronic Scale Mitigation Unit(전자식 스케일완화장치), Heat Exchanger(열교환기), Overall Heat Transfer Coefficient(총합 열전달계수)

Abstract

The objective of the present study is to investigate the performance of electronic scale mitigation unit(ESMU), which reduces the amount of scale in a heat exchanger. The circular tube with diameter of 19mm and plate-and-frame heat exchangers with 20 thermal plates were used for the tests. In order to accelerate the rate of scale in a laboratory test, artificial hard water of 1000 ppm(as CaCO₃) was recirculated at a flow rate of 5 lpm, 7 lpm, and 9 lpm throughout the tests. The effect of ESMU on the scale thickness and overall heat transfer coefficients was examined. The test results showed that the ESMU could reduce the scale deposits even in the accelerated test.

기호설명	
A	관형 열교환기의 전열면적[m ²]
c_p	비열[J/kg · K]
D_h	수력 직경[m]
e	전열판 깊이[mm]
lpm	유량[L/min]
q	열전달률[W]
Q	유량[m ³ /sec]
Q_{ch}	채널당 체적유량[m ³ /sec]
Re	Reynolds 수
R_f	오염계수[m ² · K/W]
T	온도[°C]
ΔT_{lm}	대수평균온도차[°C]

u_m	: 평균속도[m/sec]
U	: 총합 열전달계수[W/m ² · K]
w	: 전열판 폭[mm]
그리스문자	
μ	: 점성계수[N · s/m ²]
ρ	: 밀도[kg/m ³]
하첨자	
c	: 저온수, 깨끗한 상태
f	: 오염된 상태
h	: 고온수
i	: 열교환기 입구
o	: 열교환기 출구

* 회원, 원광대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 원광대학교 기계공학부

E-mail : jhmoh@wonkwang.ac.kr

TEL : (063)850-6684 FAX : (063)850-6684

1. 서 론

스케일(scale)은 열교환기, 용축기, 증발기 및 보

일려와 같은 열전달장치의 전열면에 부착이 되어 열전달 성능을 저하시키는 물질을 지칭하며, 경수가 가열되거나 냉각될 때 관벽에 생성된다. 산업체에서 관찰되는 스케일에는 탄산칼슘, 황산칼슘, 황산바륨, 규산염 등이 있다. 스케일중에서 가장 일반적인 형태의 하나는 탄산칼슘이며 석회암 및 대리석의 성분으로 존재한다. 스케일이 열교환기 표면에 침전할 때 이를 일반적으로 파울링(fouling)이라 부른다.^(1,2)

스케일이 전열면에 생성되면 투브작경의 변화로 인하여 열전달 장치 내에서 유량이 감소하거나 압력손실이 증가하며, 장치의 성능이 저하된다. 스케일은 열전도계수가 매우 작기 때문에 전열면에 얇은 막이 형성되면 열전달 성능이 급격히 떨어진다. 따라서 열교환기의 성능 유지를 위해서는 스케일 생성을 억제시키는 것이 필수적이다.

스케일 방지(또는 제거)방법에는 산화물 세척 및 화학약품 처리에 의한 화학적 방법 그리고 스크래핑, 수력블라스팅, 모래블라스팅과 같은 물리적 방법이 있다. 비화학적 방법으로 영구자석식, 초음파식, 전기식 그리고 전자식 등^(3~5)이 있다. 물리적 방법 및 화학적 방법은 과다한 비용지출, 장치의 손상, 환경오염 등과 같은 문제를 야기하기 때문에 최근에는 비화학적인 방법에 대한 연구에 관심이 쏠리고 있다. 비화학적 방법 중에서 전자식을 제외한 기타 방법은 적용분야, 안전성, 설치 및 유지관리 등에 많은 문제가 있어 사용이 제한적이다. 전자식은 근래에 소개된 방법으로서 설치 및 유지관리가 간단한 장점이 있으나 아직 충분한 연구가 이루어지지 않았다.

연구동향을 살펴보면 Cho 등^(6,7)은 전자식 방법에 대한 이론을 소개하고 이를 열교환기에 적용하여 전자식 방법에 대한 기술의 타당성을 고찰하였다. 그러나 국내에서는 전자식 방법에 대한 연구가 전무하여 기술 자체가 전혀 이루어지지 않았다. 최근에 모정하 등^(8~10)은 유도전기장을 이용한 전자식 스케일 방지장치를 개발하였고 제한적인 범위에 대하여 장치의 성능에 대한 효과를 검토하였다.

따라서 본 연구의 목적은 모정하 등이 개발한 스케일 방지장치의 성능을 확인하는 것이며 이를 위하여 장치를 원관형 열교환기에 적용하여 장치의 설치 유·무에 따른 스케일의 결정구조 및 입

자크기를 관찰하였다. 그리고 장치를 판형 열교환기에 적용하여 스케일의 생성에 따른 열전달계수 및 오염계수의 변화를 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

개발된 장치의 성능을 평가하기 위하여 두 개의 실험장치를 구성하였다. 실험장치(I)을 통하여 장치의 설치 유·무에 따른 스케일의 결정구조 및 입자크기를 관찰하였고 실험장치(II)의 실험에서는 판형 열교환기에 대하여 유량의 변화에 따른 열전달계수 및 오염계수의 변화를 고찰하였다.

2.1.1 실험장치(I)

Fig. 1은 원관형 열교환기를 모델로 하여 실험장치를 구성한 것으로 고온황온조(100L), 히터(3kW 2개, 5kW 2개), 펌프(LG 온수순환펌프), 유량계(Oval사의 Flowpet LS5277-20), 온도조절기(Lab. Technology사의 TC-200) 등으로 구성되었다. 온도센서는 K 타입을 사용하였고 관은 3/4 인치 동관을 사용하였으며 관 중간에 내부의 공기 유입으로 인한 기포발생을 관찰하기 위하여 투명아크릴 투브를 삽입하였다. 그리고 배관시스템에서 상단의 중간 부분에 개발된 전자식 스케일 완화장치를 설치하였다. 장치는 신호발생부와 솔레노이드 코일부로 구성된다. 장치에 대한 자세한 사항은 참고문헌^(8,9)에 소개되어 있다.

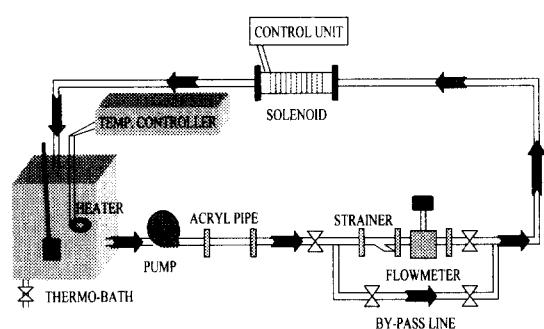


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus with circular tube heat exchanger

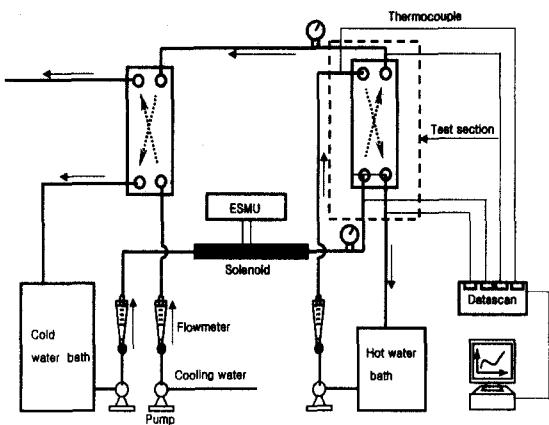


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus with plate-and-frame heat exchanger

2.1.2 실험장치(II)

Fig. 2는 판형 열교환기가 설치된 실험장치로서 고온항온조(100L), 저온항온조(150L), 2개의 판형 열교환기(동일 열기공 DIC 193모델), 히터(5kW 6개, 3kW 2개), 유량계(Blue White사의 F-450), 펌프 및 데이터 처리장치로 구성되었다. 계속적인 실험을 위해서는 매 실험 종료후 장치를 세척해야 한다. 세정제로는 (주)프라임텍의 유기산세정제, WinClean HC를 사용하였다. 실험이 끝난후 세정을 했을 때의 압력이 초기의 깨끗한 상태일 때의 압력과 동일한지를 확인하기 위하여 수은 액주계를 설치하였다. 그리고 저온수가 판형열교환기로 들어가는 부분의 배관에 솔레노이드 코일을 장착하였다. 열전달 유체로는 익산시에서 생산하는 수돗물을 사용하였다.

2.2 판형 열교환기

본 연구에서는 '동일열기공업(주)'에서 제작한 DIC 193 모델의 판형 열교환기를 사용하였으며 제원은 Table 1과 같다. Fig. 3은 이의 형상을 나타낸 것으로서 입·출구가 교차된 구조로 되어 있으며 20장의 전열판으로 구성되었다. 열교환기의 폭(w)은 83mm, 길이는 193mm이며 두께는 50mm이다. Fig. 4는 전열판의 상세도로서 전열판의 주름각도, 즉 쇼브론각(chvron angle)은 25°이다. 채널 간격(channel gap)은 2.2 mm이며 판의 두께는 0.4mm이다. 따라서 전열판 깊이(e)는 1.8mm가 된다.

Table 1 Characteristics of the plate-and-frame heat exchanger investigated

Characteristics	Plate heat exchanger
Working Temperature	-160°C ~ 185°C
Working Pressure	Max. 30 bar
Capacity per channel	0.024 L
Heat transfer area per sheet	0.014 m ²
Weight	0.19+(n×0.055) kg
Materials	Plate: STS304 Blazing: cu

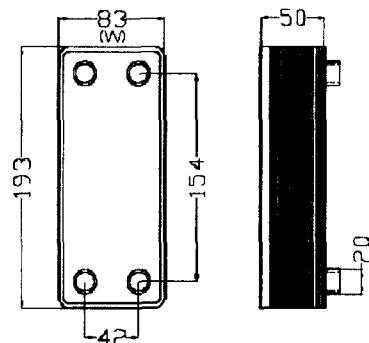


Fig. 3 Configuration of the plate-and-frame heat exchanger(unit=mm)

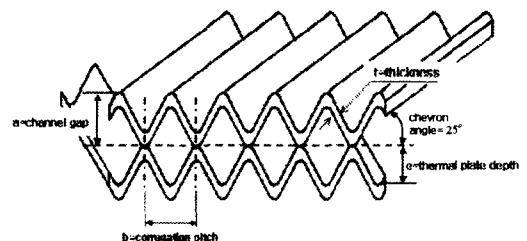


Fig. 4 Detail of the thermal plates

Reynolds 수를 계산하기 위한 수학적 경은 유동의 접수길이와 단면적의 비로 정의되며 하나의 채널에 대하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_h = \frac{4 \times \text{단면적}}{\text{접수길이}} = \frac{4 \times e \times w}{2e + 2w} = \frac{2ew}{e + w} \quad (1)$$

따라서 Reynolds수는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$Re = \frac{\rho D_h u_m}{\mu} = \frac{\rho D_h}{\mu} \cdot \frac{\dot{m}_{ch}}{\rho A}$$

$$= \frac{2}{e+w} \cdot \frac{\dot{m}_{ch}}{\mu} = \frac{2}{e+w} \cdot \frac{Q_{ch}}{\nu} \quad (2)$$

여기서, \dot{m}_{ch} 는 한 개의 채널을 통과하는 질량 유량을, Q_{ch} 는 체적유량을 나타낸다.

2.3 실험방법

첫 번째 실험(실험장치(I))은 장치의 성능테스트를 위한 실험이다. 항온조에 80L의 수돗물을 넣고 일정온도에 도달할 때까지 물을 가열한다. 일정온도 도달 후에 가속화 실험을 위하여 탄산칼슘($CaCO_3$)의 경도가 1000ppm이 되도록 수돗물이 들어있는 수조에 0.01몰의 염화칼슘($CaCl_2$)과 0.02몰의 중탄산나트륨($NaHCO_3$)을 첨가해 인공적인 경수를 만든다. 솔레노이드 코일부에서 발생되는 전자기장의 영향을 항온조의 실험유체 전부가 받을 수 있도록 10 lpm의 유량으로 30분 동안 시험유체를 순환시킨 후에 시편이 부착된 허터를 수조에 설치한다. 스케일의 두께를 측정하기 위한 시편은 직경이 2mm인 스테인리스 튜브를 사용하였다. 시편 설치 후 10 lpm의 유량으로 유체를 480분간 순환시킨다. 수조의 온도는 50°C, 60°C, 70°C이며 각각의 온도에 대하여 전자식 스케일 완화 장치(electronic scale mitigation unit; ESMU)를 설치한 것과 설치하지 않은 경우에 대한 스케일의 결정구조 및 두께를 비교 검토하였다.

판형 열교환기가 설치된 실험장치(II)에서는 저온 항온조에 120 L의 수돗물을 넣고 30°C에 도달할 때까지 가열한다. 30°C에 도달한 후에 앞에서의 실험과 마찬가지로 가속화 실험을 위하여 저온항온조에 0.01몰의 염화칼슘과 0.02몰의 탄산나트륨을 첨가해 탄산칼슘의 경도가 1,000ppm이 되도록 인공적인 경수를 만든다. 이때 고온 항온조에는 80L의 물을 넣고 온도는 90°C로 유지한다. 이러한 상태에서 ESMU 장치를 설치한 경우와 설치하지 않은 경우에 대하여 유량변화에 따른 가속화 실험을 하여 판형 열교환기의 열전달

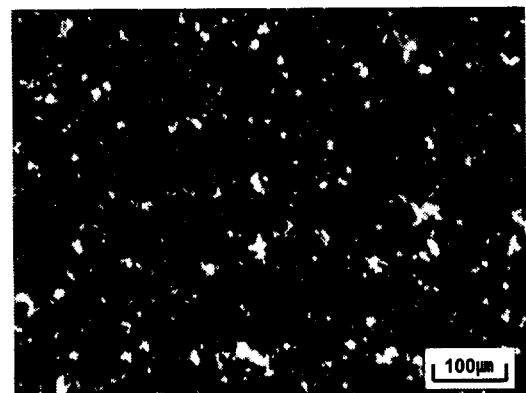


Fig. 5(a) Photograph of untreated water sample.
(Magnification 200×, Temperature 60°C)

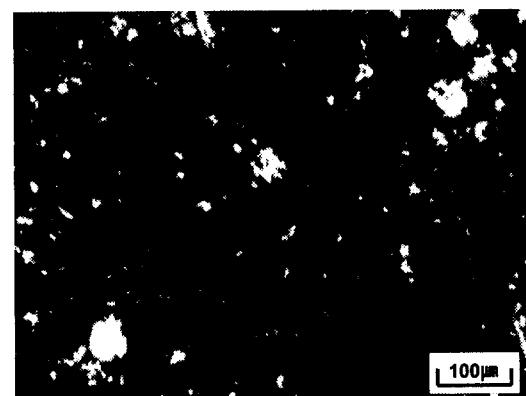


Fig. 5(b) Photograph of treated water sample.
(Magnification 200×, Temperature 60°C)

특성을 고찰하였다. 두 번째의 실험조건은 다음과 같다. 용액의 농도는 1000 ppm이며, 저온수의 입구온도는 30°C, 고온수의 입구온도는 90°C이다. 저온수의 유량은 각각 5lpm, 7lpm, 9lpm이며 고온수의 유량은 11 lpm으로 고정하였다. 두 번째의 실험에서 유량 5lpm, 7lpm, 9lpm에 대응하는 Reynolds수는 저온수의 입구온도, 30°C를 기준으로 하였을 때, 244, 341, 439이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 결정구조

스케일 생성을 좌우하는 주요 변수는 온도, 압력 및 pH이며 탄산칼슘의 용해도는 압력의 감소

그리고 온도와 pH의 증가에 따라 감소한다. 열교환기에서 물이 열전달 표면과 접촉하면 표면 균처의 물의 온도는 갑자기 증가하여 국부적으로 과포화상태가 된다. 이로 인하여 물속의 칼슘 및 중탄산염 이온은 석출되어 탄산칼슘 결정이 되며 이 과정에서 이온이 표면에 달라붙게 된다.

전자식을 이용한 스케일 방지기술의 원리는 다음과 같다.^(6,7) 시간에 따라 변하는 전자기장을 이용하여 이온간의 충돌을 증가시키면 물속에 함유된 광물질 이온의 결정은 크게 되어 표면에 부착하지 않고 물속에 침전되거나 물과 함께 유동하게 된다. 따라서 스케일 생성을 억제하기 위해서는 이온의 결정크기를 증가시킬 필요가 있다.

Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)는 시험유체의 온도가 60°C 일 때 ESMU 장치를 설치하지 않은 경우와 설치한 경우에 대하여 액적을 샘플링한 후 현미경(마이크로텍사의 Zoom 3000)으로 탄산칼슘 결정을 200배율로 확대하여 관찰한 것이다. 장치를 설치하지 않은 경우에는 결정의 크기가 1~10μm정도의 지름을 갖는 작은 결정이고 결정의 수가 많음을 볼 수 있다. 반면에 ESMU 장치를 설치한 경우 결정의 크기는 50~100μm로 증가하였고 결정의 수는 감소한 것을 관찰할 수 있었다. 즉, 장치를 설치하면 결정은 핵화되고 거대 결정을 형성하여 부유물로 관내를 유동하게 됨으로써 스케일 생성이 완화됨을 알 수 있었다.

3.2 스케일 두께

Fig. 6은 80L의 시험유체를 10 lpm의 유량으로

480분 순환시키는 동안 히터에 장착된 시편에 부착한 스케일의 두께를 현미경을 통하여 측정한 후 측정된 값을 나타낸 것이다. 스케일 두께는 전반적으로 유체의 온도상승에 비례하여 거의 선형적으로 증가하였다. ESMU 장치를 설치하지 않은 경우 스케일 두께는 고온에서 더 높은 값을 나타냈으나 ESMU 장치를 설치한 경우 완만한 상승을 보였다. 장치의 설치 유·무에 따른 스케일 두께는 유체의 온도가 50°C인 경우 20 μm의 차이를 보였으나 70°C인 경우 50 μm의 차이를 나타냈다. 따라서, ESMU 장치의 성능은 고온영역에서 더 높게 나타남을 확인할 수 있었다.

3.3 총합 열전달계수

판형 열교환기의 열전달특성을 해석하기 위하여 대수평균온도차를 다음과 같이 정의하면

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

고온수와 저온수 사이에서 교환되는 열전달률, q 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$q = UA\Delta T_{lm} \quad (4)$$

$$q = q_c = (\rho Q c_p)_c (T_{c,o} - T_{c,i})$$

$$= q_h = (\rho Q c_p)_h (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (5)$$

여기서 하첨자 i 및 o는 열교환기의 입·출구를, c 및 h는 저온 및 고온을 그리고 U는 총합 열전달계수를 의미한다. 따라서 총합 열전달계수, U는 다음과 같이 계산된다.

$$U = \frac{(\rho Q c_p)_c (T_{c,o} - T_{c,i})}{A\Delta T_{lm}} \quad (6)$$

Table 2는 시약을 첨가하지 않은 깨끗한 상태의 열교환기에 대하여 저온수를 기준으로 식 (6)을 사용하여 계산한 총합 열전달계수값을 표현한 것으로서 유량이 증가할수록 높은 계수값을 나타냈다.

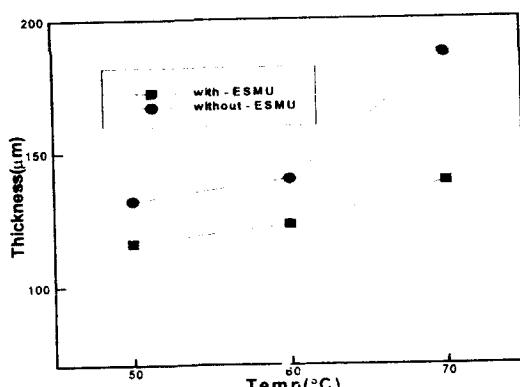


Fig. 6 Effect of temperature on the scale thickness
(Flow rate : 10 lpm)

Table 2 Values of overall heat transfer coefficient at different flow rates for clean state

Q[lpm]	5	7	9
$U_c[W/m^2\cdot K]$	3300	3600	4100

Fig. 7은 유량 5 lpm에 대하여 시약을 첨가한 후 ESMU 장치의 설치 유무에 따른 U_f 값을 시간의 함수로 나타낸 것이다. 열전달계수값은 초기에 급격히 감소하다가 서서히 감소하는 양상을 보이고 있으며 장치의 설치 유무에 따라 $300W/m^2\cdot K$ 의 차이를 나타내고 있다. 이러한 양상을 보이는 이유는 열전달 초기에는 전열면이 깨끗하기 때문에 스케일의 부착이 용이하지만 시간이 지남에 따라 스케일 형성의 발달로 인하여 부착율이 떨어지기 때문에 사료된다. 즉, 스케일의 형성 정도는 전열면에 인접한 유체와 전열면에서 떨어진 유체간의 온도차에 비례하기 때문에 열전달계수는 초기에는 온도차가 큰 결과로 스케일의 형성이 활발하여 급격히 감소하다가 스케일 형성으로 인한 온도차의 감소로 완만하게 감소하게 된다.

유량이 증가하여도 유사한 변화 형태가 나타남을 Fig. 8을 통하여 확인할 수 있다. Fig. 8은 유량 7 lpm에 대한 열전달계수값을 도시한 것으로서 변화 모습은 Fig. 7과 비슷하다. 그러나 ESMU 장치의 설치 유무에 따른 차이는 5 lpm의 유량에 비하여 소폭으로 증가(약 $400W/m^2\cdot K$)하였다.

Fig. 9는 유량이 더욱 증가한 9 lpm인 경우에 대하여 ESMU 장치의 설치 유무에 따른 열전달계수값을 나타낸 것이다. 변화 양상은 앞의 그림과 유사하지만 차이는 더욱 커져 약 $1100W/m^2\cdot K$ 의 차이를 나타냈다.

Fig. 7~9에서 ESMU 장치를 설치하지 않은 경우에 대한 열전달계수의 변화형태를 고찰하면 열전달계수는 유량의 변화에 따른 차이가 거의 없음을 관찰할 수 있다. 즉 스케일의 생성을 줄이지 않는 경우 스케일의 생성으로 인한 열전달계수의 감소는 유량의 변화에 의한 영향을 별로 받지 않는 것으로 파악할 수 있다. 그러나 장치를 설치하는 경우 유량의 변화에 따른 열전달계수는 많은 차이를 보이고 있다. 실험 종료시에 장치를 설치하지 않은 경우 유량변화에 따른 차이는 약

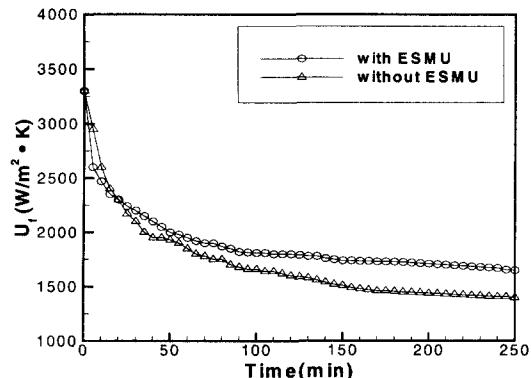


Fig. 7 Variation of overall heat transfer coefficient with and without ESMU for flow rate 5 lpm

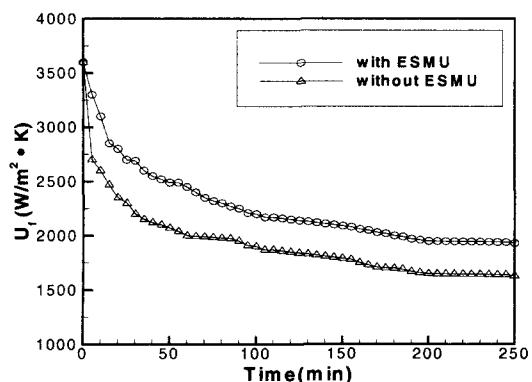


Fig. 8 Variation of overall heat transfer coefficient with and without ESMU for flow rate 7 lpm

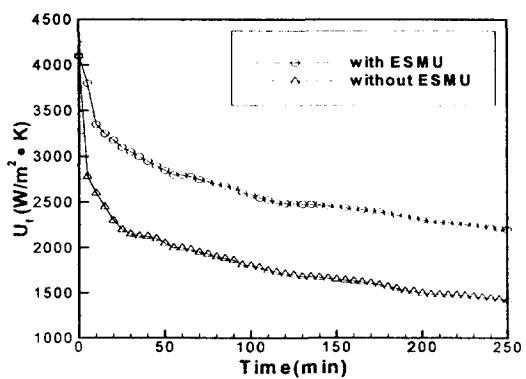


Fig. 9 Variation of overall heat transfer coefficient with and without ESMU for flow rate 9 lpm

250 W/m²K이었으며 장치를 설치한 경우 약 700 W/m²K의 차이를 나타냈다.

결과적으로 ESMU 장치를 설치하는 경우 스케일 방지 효과는 유량이 늘어날수록 커진다는 것을 확인할 수 있었다.

3.4 오염계수

스케일 성장으로 인한 오염계수, R_f 는 다음과 같이 정의될 수 있다.⁽¹¹⁾

$$R_f = \frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_c} \quad (7)$$

여기서 하첨자 c 는 깨끗한 상태를, f 는 시약이 첨가된 오염된 상태를 나타낸다. 깨끗한 상태 및 오염된 상태 각각에 대하여 식 (6)으로부터 U_c 및 U_f 를 계산한 후 식 (7)을 이용하면 각각의 경우에 대한 R_f 값을 계산할 수 있다.

오염계수는 열전달계수와 반비례 관계, 즉 열전달계수의 감소는 오염계수의 증가를 의미한다. Fig. 10은 유량 5 lpm에 대하여 ESMU 장치의 설치 유무에 따른 오염계수값을 시간의 흐름에 따라 나타낸 그림이다. 오염계수의 전반적인 변화 형태를 살펴보면 초기에 급격히 증가하다가 시간의 흐름에 따라 완만하게 증가하는 모습을 보이고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 스케일의 형성은 전열면에 인접한 유체와 전열면에서 떨어진 유체간의 온도차에 비례하기 때문에 초기에는 온도차가 큰 결과로 스케일의 형성이 활발하다가 스케일 형성으로 인한 온도차의 감소로 오염계수의 증가가 완만하게 된다.

이러한 변화 형태는 유량이 증가(Fig. 11, Fig. 12)하여도 유사하였다. 다만 유량이 증가할수록 장치의 설치 유무에 따른 오염계수의 차이는 증가하였다. Fig. 10~12로부터 실현 종반부에서 오염계수의 차이는 유량이 5 lpm 및 7 lpm인 경우 거의 비슷(약 0.00013m²K/W)하였으나 유량이 9 lpm인 경우 차이는 약 0.00024m²K/W로서 5 lpm 및 7 lpm에 비하여 거의 2배정도의 차이를 보였다. 이러한 결과로부터 ESMU 장치를 설치하는 경우 유량이 증가함에 따라 스케일 방지효과가 두드러진다는 것을 알 수 있었다.

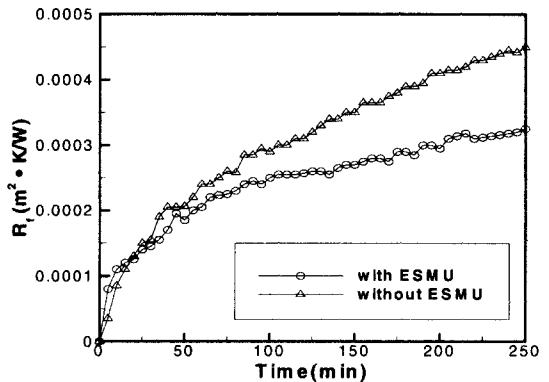


Fig. 10 Variation of fouling factor with and without ESMU for flow rate 5 lpm

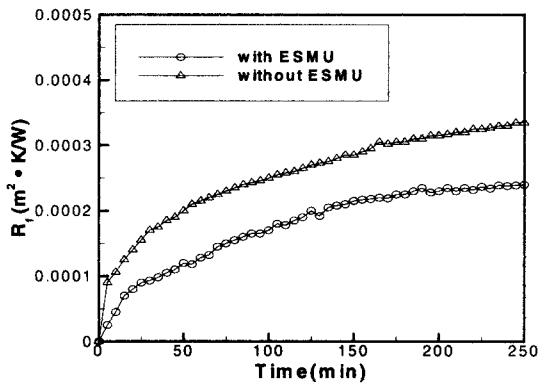


Fig. 11 Variation of fouling factor with and without ESMU for flow rate 7 lpm

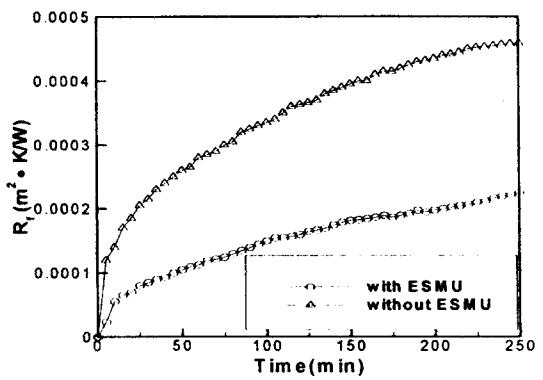


Fig. 12 Variation of fouling factor with and without ESMU for flow rate 9 lpm

4. 결 론

본 논문에서는 개발된 ESMU 장치의 성능을 평가하기 위하여 ESMU 장치가 설치된 경우와 설치가 안된 경우에 대하여 원관형 열교환기에서 탄산칼슘의 결정구조 및 두께를 관찰하였고, 판형 열교환기에서 유량의 변화에 따른 총합 열전달계수 및 오염계수의 변화를 고찰하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 결정크기는 ESMU 장치를 설치하지 않은 경우 약 $1\sim 10 \mu\text{m}$ 이며 장치를 설치한 경우 약 $50\sim 100 \mu\text{m}$ 로 나타났다.

(2) 시편에 부착된 스케일 두께는 ESMU 장치를 설치한 경우 유량에 따라 약 $15\sim 30\%$ 감소하였다.

(3) 총합 열전달계수는 열교환 초기에 급격히 감소하는 모습을 보인 후 완만한 감소를 나타냈으며 후반부로 갈수록 감소의 정도가 줄어들었다. 그리고 ESMU 장치가 설치된 경우 열전달계수값은 장치가 설치 안된 경우에 비하여 유량에 따라 약 $300\sim 800 \text{ W/m}^2\text{K}$ 증가하였다.

후 기

본 논문은 2000년도 원광대학교 교비지원에 의하여 연구되었으며 관계기관에 감사 드립니다.

참고문현

- (1) Taborek J., Aoki T., Ritter R. B., Palen J. W. and Knudsen J. G., 1972, Fouling: "The major Unresolved Problem in Heat Transfer," *Chemical Engineering Progress*, Vol. 68, No. 2, pp. 59~67.
- (2) Suitor J. W., Marner W. J. and Ritter R. B., 1977, "The History and Status of Research in

Fouling of Heat Exchangers in Cooling Water Service," *The Canadian J. of Chem. Eng.*, Vol. 55, pp. 374~380.

- (3) Parker, D., 1985, "An Investigation of the Role of the Magnetic Water Treatment Devices in Calcium Carbonate Scale Formation," M.S. Thesis, Baylor University, Waco, TX.
- (4) Maggard, S., 1989, "A Chemometric Analysis of a Magnetic Water Treatment Device," Ph.D. Dissertation, Baylor University, Waco, TX.
- (5) Fan, C.F., 1997, "A Study of Electronic Descaling Technology to Control Precipitation Fouling," Ph.D. Thesis, Drexel University, Philadelphia, PA.
- (6) Cho, Y. I., Choi, B. G., and Drazner, B. J., 1998, "Electronic Anti-Fouling Technology to Mitigate Precipitation Fouling in Plate-and-frame Heat Exchangers," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol 41, No. 17, pp. 2565~2571.
- (7) Cho, Y. I., and Choi, B. G., 1999, "Validation of an Electronic Anti-Fouling Technology in a Single-Tube Heat Exchanger," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol 41, pp. 1491~1499.
- (8) 서해성, 김경우, 김동현, 모정하, 1999, "열교환기의 효율향상을 위한 전자식 스케일완화장치," 대한기계학회 호남지부 학술대회 논문집, pp. 117~121.
- (9) 서해성, 김경우, 이상설, 이진휘, 모정하, 김동현, 1999, "열교환기용 전자식 스케일완화장치의 성능평가," 대한기계학회 추계학술대회 논문집 B, pp. 409~412.
- (10) 서해성, 신상철, 김경우, 모정하, 김동현, 2000, "판형 열교환기에 대한 전자식 스케일완화장치의 성능평가," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 B, pp. 13~17.
- (11) Choi, B. G., 1998, "A Study of Fouling Control in Heat Exchangers with Electronic Anti-Fouling Technology," Ph.D. Thesis, Drexel University, Philadelphia, PA.