

판형 열교환기에 대한 전자식 스케일 완화 장치의 성능평가

서해성* · 신상철* · 김경우* · 모정하** · 김동현**

Performance Evaluation of Electronic Scale Mitigation Unit for Plate Heat Exchanger

Hae Sung Seo, Sang Chul Shin, Kyong woo Kim, Jeong Hah Moh, Dong Hyun Kim

Key Words: Fouling(오염), Scale(스케일), Overall Heat Transfer Coefficient(총합열전달계수), Fouling Factor(오염계수), Cleanliness Factor(청정계수)

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. A plate heat exchanger with 20 thermal plates is used for the tests. In order to accelerate the rate of fouling in a laboratory test, artificial hard water of 2000 ppm(as $CaCO_3$) is recirculated at a flow rate 5L/min throughout the tests. The overall heat transfer coefficients and fouling factors are examined. Results show that the ESMU technology can significantly reduce the scale deposits.

1. 서론

오염(fouling)은 일반적으로 침전, 입자, 화학 반응, 부식, 생물학, 응고의 여섯 가지 유형으로 분류된다^(1,2). 특히 온도의 변화에 따른 용해도의 차이로 인하여 불용성 이온이 열교환기 표면에 침전 또는 퇴적되는 현상을 침전오염이라하며 이를 스케일(scale)이라 부른다.

산업체에서 볼 수 있는 스케일의 형태에는 탄산칼슘($CaCO_3$), 황산바륨($BaSO_4$), 황산칼슘($CaSO_4$), 규산염(silica), 철(Fe)스케일 등이 있다. 스케일 중에서 가장 일반적인 형태 중 하나는 탄산칼슘이며 백악(chalk), 석회암 및 대리석의 성분으로 존재한다. 이러한 스케일이 열전달면에 생성되면 스케일과 관련된 여러 가지 문제들이 발생하지만 중요한 두가지 문제만을 고려하면 다음과

같다. 첫째로, 튜브직경의 변화로 인해 열전달 장치 내에서 유량이 감소하거나 압력손실이 증가한다는 것이며, 두 번째로 열전달 장치의 성능이 저하된다는 것이다. 스케일은 열전도도가 매우 적기 때문에 열전달 표면에 얇은 막이 형성되면 열전달 성능이 매우 급격히 떨어지게 된다는 것이다. 스케일 방지방법에는 산화물 세척 및 화학약품 처리에 의한 화학적인 방법 그리고 스크래핑, 수력블라스팅, 모래블라스팅과 같은 물리적인 방법이 있다. 기타 방법으로 영구자석식, 초음파식, 전기식 그리고 전자식 등^(3,4,5)이 있다. 자석식은 큰 직경의 판에는 작용이 안되고, 유속의 범위도 한정되어 있어 적용에 한계가 있으며, 초음파식은 분자교란을 이용하는 방법이며 주로 연관 보일러에 사용되고 있으나 배관에는 적용이 불가능한 단점이 있다. 전기식은 전극을 사용하는 방법으로서 전극을 설치하기 위하여 판을 분해해야하며 전극의 부식으로 인한 잦은 교체의 문제점 때문에 유지관리에 많은 어려움이 있다. 전자식은 최근에 소개된 방법으로서 설치 및 유

* 원광대학교 대학원

** 원광대학교 기계공학부

지관리가 간단한 장점이 있으나 아직 충분한 연구가 이루어지지 않았다.

모정하 등⁽⁶⁾은 열교환기에서 발생하는 스케일을 줄이기 위한 목적으로 유도전기장을 이용한 전자식 스케일완화장치를 개발, 소개하였으며 제한적이지만 장치의 성능에 대한 효과를 고찰하였다.

본 연구에서는 전자식 스케일 완화 장치⁽⁶⁾를 스케일 형성에 민감한 반응을 보이는 판형 열교환기⁽⁷⁻⁹⁾에 적용하여 이 장치에 대한 성능의 타당성을 고찰하였다. 즉, 장치를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대하여 스케일 형성이 판형 열교환기의 성능에 어떠한 영향을 미치는지를 고찰하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험장치의 전체 개략도이다. 개략도에 나타난 바와 같이 장치는 두 개의 항온조와 판형 열교환기, 펌프, 전자식 스케일 완화 장치, 유량계, 압력계, 히터, 온도 조절기, 데이터 획득장치로 구성된다. 전자식 스케일 완화장치는 솔레노이드(solenoid) 코일부와 전기적인 신호를 발생시키는 신호발생부(ESMU)로 구성된다. 두 개의 항온조는 일정한 온도의 인공적인 경수를 공급하기 위한 저온항온조와 시험부 판형 열교환기에서 고온수를 유입하기 위한 고온항온조로 구성되어 설계·제작하였다. 판형 열교환기의 입·출구온도를 측정하기 위하여 K형 열전대를 삽입하여 데이터 획득장치로 1분마다 온도를 PC에 저장하였고, 시험부 열교환기의 저온수 입·출구 압력차를 측정하기 위하여 압력계를 설치하였다.

2.2 판형열교환기

본 실험에서는 국내에서 판매되는 판형 열교환기 중 '동일열기공업(주)'에서 제작한 열교환기를 사용하였다. Fig. 2는 이의 제원을 나타낸 것으로서 입·출구가 교차된 구조로 되어있다. 사

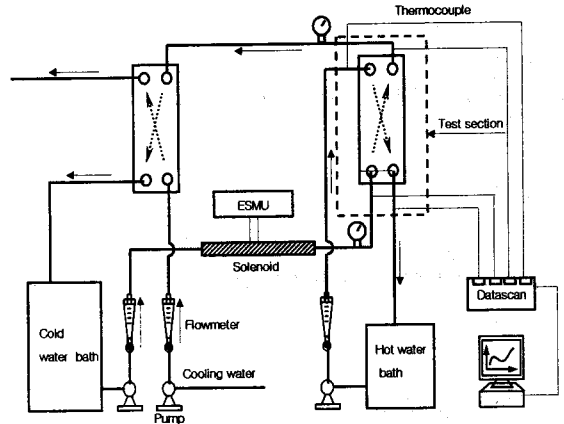


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus.

용된 전열판(thermal plate)은 20장이고 전열판의 주름각도, 즉 세브론각(chevron angle)은 25°이며 1매당의 전열면적은 0.014m²이다. Fig. 3은 전열판의 상세도로서 채널 갭(channel gap)은 2.2 mm이며 판의 두께는 0.4mm이다. 따라서 전열판 깊이(e)는 1.8mm가 된다.

Reynolds수를 계산하기 위한 수력직경은 유동의 접수길기와 단면적의 비로 정의되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

따라서 Reynolds수는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} Re &= \frac{\rho D_h u_m}{\mu} = \frac{\rho D_h}{\mu} \cdot \frac{\dot{Q}_{ch}}{A} \\ &= \frac{2}{e+w} \cdot \frac{\dot{Q}_{ch}}{\nu} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 ρ 는 밀도, u_m 은 평균속도, μ 는 점성계수, \dot{Q}_{ch} 는 유로당 체적유량을 의미한다.

2.3. 실험방법

본 연구에서는 실험용 유체로 전라북도 익산 시에서 생산하는 수돗물을 사용하였다. 저온항온

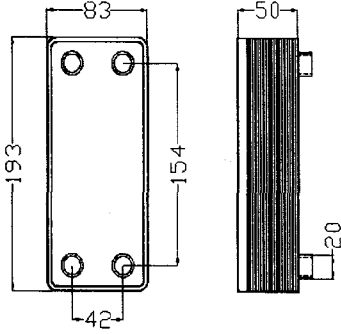


Fig. 2 Configuration of the plate heat exchanger

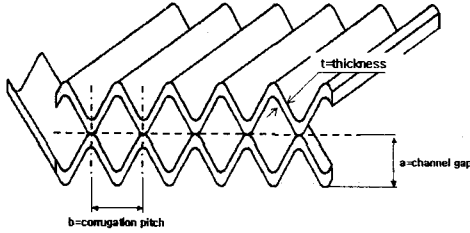


Fig. 3 Detail of the thermal plates

조에 80L의 수돗물을 넣고 30℃에 도달할 때까지 가열한다. 30℃에 도달한 후에 가속화 실험을 위하여 수돗물이 들어 있는 저온항온조에 탄산칼슘의 농도가 2,000ppm이 되도록 0.02M 염화칼슘 ($CaCl_2$)과 0.04M 중탄산나트륨($NaHCO_3$)을 첨가해 인공적인 경수를 만든다. 이때 고온항온조의 온도는 90℃로 유지한다. 이러한 상태에서 저온항온조의 유량이 5 lpm일때 전자식 스케일 완화 장치를 설치한 상태와 설치하지 않은 상태의 가속화 실험을 비교하여 판형 열교환기의 열전달 특성을 고찰하였다. 다음은 열교환기의 성능을 고찰하기 위한 계산순서이다.

판형열교환기의 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 열량, q 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

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

$$\begin{aligned} q &= q_c = (\rho \dot{Q}c_p)_c (T_{c,o} - T_{c,i}) \\ &= q_h = (\rho \dot{Q}c_p)_h (T_{h,i} - T_{h,o}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 하첨자 i 및 o 는 열교환기의 입·출구를, c 및 h 는 저온 및 고온을 그리고 U 는 총합열전달계수를 의미한다. 따라서 총합열전달계수, U 는 아래와 같이 계산되어진다.

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

스케일 성장으로 인한 오염계수, R_f 는 다음과 같이 정의될 수 있다⁽⁹⁾.

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

여기서 하첨자 c 는 깨끗한 상태를, f 는 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.

본 연구에서의 실험조건은 다음과 같다. 저온수의 입구온도는 30℃, 고온수의 입구온도는 90℃이며 저온수의 유량은 5 lpm, 고온수의 유량은 11 lpm이다. 온도 30℃ 및 5 lpm에 대응하는 Reynolds수는 244이다. 그리고 시험용액의 농도는 2000 ppm이다.

3. 결과 및 고찰

스케일완화장치의 성능평가를 위하여 본 실험에서는 깨끗한 상태, 장치가 설치된 오염된 상태, 그리고 장치가 설치 않된 오염된 상태의 세가지의 경우에 대하여 판형열교환기에 대한 성능을 비교 검토하였다.

시험부에 대한 정확한 에너지 평형을 해석하기 위해서는 단열을 하여 시험부에서 외부로의 열손실이 적도록 하여야 한다. Table 1은 시험부에서 깨끗한 상태에 대하여 고온수가 뺀 열량과 저온수가 얻은 열량을 비교한 것으로서 약 5%의 편차를 보였다. 시험부 주위온도가 대략 20°C이기 때문에 고온수의 뺀 열량이 저온수의 얻은 열량보다 낮게 나타나고 있다.

Table 1 Energy balance of plate heat exchanger

| unit | q_c | q_h |
|------|-------|-------|
| kw | 18.1 | 17.2 |

Table 2는 깨끗한 상태에 대하여 저온수 및 고온수의 출구온도 그리고 저온수 기준 총합열전달계수를 나타낸 것이다.

Table 2 Values of temperature at outlet and overall heat transfer coefficient for clean state

| T_{co} (°C) | T_{ho} (°C) | U_c (W/m ² K) |
|---------------|---------------|----------------------------|
| 82 | 68 | 3300 |

Fig. 4는 오염된 상태에 대하여 저온수의 출구온도를 시간의 함수로 도시한 것이다. 출구온도는 시간의 흐름에 따라 열교환기 표면에 발생하는 스케일 형성에 의한 전도저항으로 인하여 서서히 감소하고 있다. 스케일완화장치가 설치된 경우 출구온도는 완만하게 감소하다가 200분부터 일정한 온도를 유지한 반면에, 장치가 설치않된 경우 출구온도는 시간이 지날수록 감소의 폭이 심하였으며 계속적으로 감소하는 모습을 보였다.

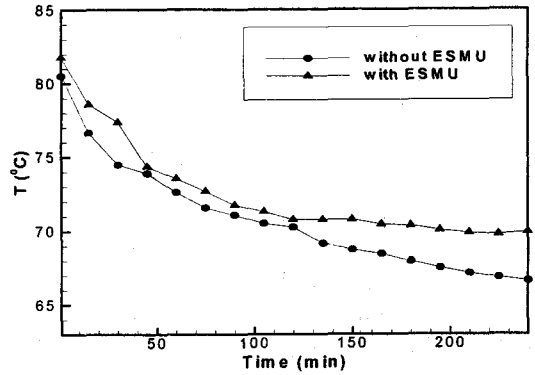


Fig. 4 Temperature variation of cold water at outlet with and without ESMU

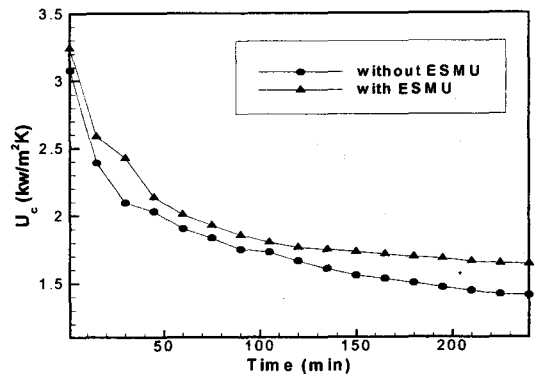


Fig. 5 Variation of overall heat transfer coefficients with and without ESMU

Fig. 5는 저온수를 기준으로 한 총합열전달계수를 시간의 함수로 표현한 것이다. 총합열전달계수는 식(6)으로부터 계산되며 유량이 일정할 경우 저온수의 출구온도만의 함수가 된다. 따라서 변화형태는 저온수의 변화모습과 비슷하게 된다. 오염된 상태의 열전달계수값은 저온수의 출구온도와 마찬가지로 초기에는 감소정도가 심하다가 시간의 지남에 따라 완만히 감소하는 양상을 나타내고 있다. 이는 전술한 바와같이 스케일이 열교환기 내표면에서 성장되면서 열저항으로 작용한 결과이다. 장치를 설치했을 경우의 열전달계수값은 4시간후 설치하지 않은 경우에 비하여 230W/m²K 증가하였으며 이러한 차이는 시간이 흐를수록 증가할 것으로 판단된다.

열전달계수의 감소는 오염계수의 증가를 의미

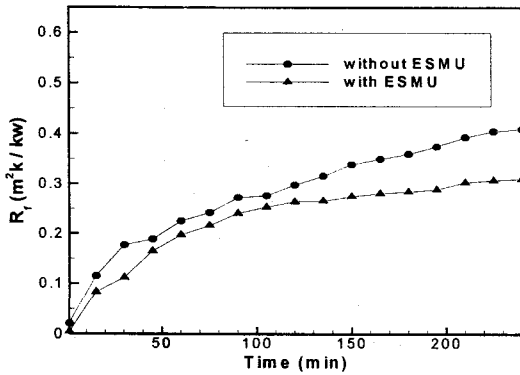


Fig. 6 Variation of fouling factor with and without ESU

하는 것으로서 오염계수를 장치 설치의 유무에 따라 시간의 함수로 나타내면 Fig. 6과 같이 도시된다. 전반적인 변화형태를 살펴보면 오염계수 값은 초기에 급격히 증가하다가 시간의 흐름에 따라 완만하게 증가하는 모습을 보이고 있다. 즉, 스케일의 형성 정도는 두 유체간의 온도차에 비례하기 때문에 초기에는 온도차가 큰 결과로 스케일의 형성이 활발하다가 스케일 형성으로 인한 온도차의 감소로 오염계수의 증가가 완만하게 된다.

시간의 흐름에 따른 오염의 진행정도를 청정계수(cleanliness factor)를 사용하여 표현할 수 있는데 청정계수는 깨끗한 상태의 열전달계수에 대한 오염된 상태의 열전달계수의 비로 정의된다.

Fig. 7은 오염된 상태에 대하여 장치의 설치 유무에 따른 청정계수를 나타낸 것이다. 청정계수는 저온수의 출구온도만의 함수가 되기 때문에 변화하는 모습은 총합열전달계수의 변화 형태와 동일하며 시간의 진행에 따른 오염의 형성 정도를 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 전자식 스케일 완화 장치를 오염에 매우 민감한 반응을 보이는 판형 열교환기에 적용하여 장치의 설치 유·무에 따른 열교환기의 특성 변화를 고찰하였다.

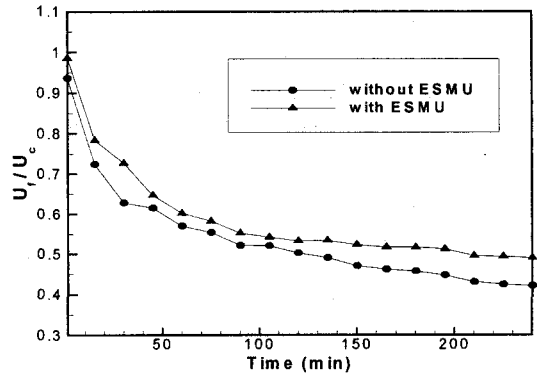


Fig. 7 Variation of cleanliness factor with and without ESU

총합열전달계수는 열교환 초기에 급격히 감소하는 모습을 보인 후 완만한 감소를 나타냈으며 후반부로 갈수록 감소의 정도가 줄어들었다. 장치가 설치된 경우 열전달계수 값은 장치가 설치 안된 경우에 비하여 약 15% 증가하였다. 오염계수 값은 열전달계수와 반비례 관계로서 초기에 급격히 증가한 후 서서히 증가하는 경향을 보였다.

제한적인 범위에서 장치의 성능을 고찰한 결과 스케일의 형성을 상당히 완화시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 향후에는 전자식 스케일 완화 장치의 정량적인 성능 평가를 위하여 여러 가지 오염인자에 대한 지속적인 연구를 수행할 계획이다.

참고문헌

- (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., Marnar 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) Chunfu Fan, 1997, "A Study of Electronic Descaling", Ph.D. Dissertation, Drexel University.
- (6) 서해성, 김경우, 이상설, 이건휘, 모정하, 김동현, 1999, "열교환기용 전자식 스케일완화장치의 성능평가", 대한기계학회 추계학술대회 논문집 B, pp. 409-412.
- (7) Bansal, B. and Muller-Steinhagen, H., 1993, "Crystallization fouling in plate heat exchangers", J. of Heat Transfer, Vol 115, pp. 584-591.
- (8) 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.
- (9) Grandgeorge, S., Jallut, C. and Thonon, B., 1998, Particulate fouling of corrugated plate heat exchangers. Global kinetic and equilibrium studies, Chemical Engineering Science, Vol. 53, No. 17, pp. 3051-3071