

< 논문 >

열교환장치의 냉각수 계통에서 세라믹 볼의 파울링 저감효과

성 순 경[†] · 서 상 호^{*}

(2006년 8월 16일 접수, 2007년 3월 13일 심사완료)

Effect of Fouling Mitigation for Ceramic Ball in Cooling Water System of Heat Exchanger

Sun-Kyung Sung and Sang-Ho Suh

Key Words: Fouling Mitigation(파울링 저감), Cooling Water(냉각수), Heat Exchanger(열교환기), Ceramic Ball(세라믹볼)

Abstract

The objective of this study was to investigate the effects of fouling mitigation for ceramic ball in cooling water system experimentally. The devices filled with ceramic balls were connected to the bypass line of the heat exchanging system. Cooling water in the heat exchanging system was artificial water. To visualize the formation of fouling on the heat transfer surface a number of images were obtained using a CCD camera with real-time microscopy. Fouling resistances and overall heat transfer coefficients were measured in order to analyze fouling mitigation effects. We found that the ceramic ball devices for artificial water reduced the formation of fouling compared to the no-mitigation devices.

1. 서 론

산업현장이나 빌딩에서 사용하는 냉동기나 열 펌프는 냉매를 응축하는 과정에서 응축열을 제거하기 위한 냉각수가 필요하게 된다. 이 냉각수는 시수나 지하수를 이용하는 경우가 일반적이다. 이때 냉각수는 한번 사용하고 난 후 버리지 않고 냉각탑을 이용하여 냉각시키므로, 이 과정에서 증발 또는 비산으로 인하여 냉각수의 일부가 없어지므로 부족 수량만큼 보충하여야 한다. 보충과정은 지속적으로 진행되므로 냉각수의 농도는 점점 높아지게 되며, 물 중에 용해되어 있

는 칼슘이나 마그네슘과 같은 염류의 농도도 높아지게 된다. 이때 높아진 농도의 냉각수는 열교환 과정에서 고온의 전열면을 통하여 가열됨으로써 온도는 상승하게 되고, 장시간 사용할 경우에는 열전달 표면에 열전달을 방해하는 침전물의 층인 파울링을 생성한다. 파울링이 생성되면 열교환기의 열전달 성능이 크게 감소된다.⁽¹⁾

열교환기의 전열성능을 유지하기 위해서는 파울링의 발생을 방지하거나 저감시켜야 하나, 아직까지 이에 대한 완전한 해결방법을 발견하지 못하고 있다. 이 분야에 관한 연구는 미국과 유럽에서 꾸준히 진행되고 있으나 국내의 경우는 아직 미진한 형편이다.^(2~5)

현재의 제안된 파울링 저감이나 방지기술 방법은 크게 나누어 화학적 방법, 기계적 방법, 물리적 방법으로 구분될 수 있다. 화학적인 방법은 파울링을 제거하기 위해서 화학약품을 이용하여

[†] 책임저자, 회원, 경원대학교 건축설비학과

E-mail : sksung@kyungwon.ac.kr

TEL : (031)750-8644 FAX : (031)750-8648

^{*} 회원, 숭실대학교 기계공학과

파울링 발생을 억제하거나 발생 후에 제거하는 것으로 공정을 중단하고 적용하여야 하는 불합리한 면 외에 처리 후에 산성의 화학약품과 제거된 파울링을 처리하는 것이 큰 어려움이다. 또한 기계적인 방법은 발생된 파울링을 제거하기 위하여 공정을 중단하고 스케일을 긁어내거나 블레스팅을 이용하여 떼어내거나 하는 방법이며, 일부의 방법은 배관 계통 내에 스폰지 볼과 같은 물체를 넣어 발생과정에서 파울링을 제거하는 방법이다.⁽⁶⁾

본 연구에서 적용한 방법은 물리적 수처리 방법(physical water treatment)의 한가지로 세라믹 볼을 이용하여, 시스템 운전을 중단하지 않고 열교환기 순환배관에 설치하는 방법으로, 실험실용 소형 열교환 시스템에서 파울링 저감효과를 분석하고 세라믹 볼이 파울링 저감에 이용 가능한지 평가하고자 하였다.

2. 파울링

2.1 파울링

일반적으로 산업현장에서 사용하는 열교환기에서 문제가 되는 주된 파울링은 결정파울링이다.⁽⁷⁾ Fig. 1의 포화곡선과 같이 온도변화에 따라 열교환기로 유입되는 유체의 용해도는 변화한다. 이때 유체의 온도가 상승하면 포화용해도는 내려가게 되므로 과포화 상태만큼 칼슘 등이 석출하게 되어 전열면에 결정 파울링이 형성된다. 산업체의 열교환기에서 결정 파울링을 유발하는 유체 내의 성분은 탄산칼슘(CaCO_3), 황산바륨(BaSO_4), 황산칼슘(CaSO_4), 규산염(Silica), 철(Fe) 등이다. 이 중 대표적인 것이 탄산칼슘이며, 우리나라의 수돗물이나 지하수는 칼슘이온을 포함하고 있으므로 열교환기의 냉각수로 사용할 때 열전달 표면에 탄산칼슘 침전에 의한 파울링이 많이 발생하게 된다.⁽⁸⁾

2.2 파울링 저항

파울링 저항 R_f 는 다음 식으로 계산할 수 있다.

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

여기서, U_f 는 파울링이 생성된 열교환기의 열관류율이고, U_c 는 파울링이 생성되지 않은 경우의

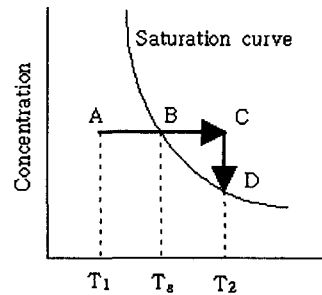


Fig. 1 A heating process of a solubility salt solution

열관류율이다. 열관류율은 다음 식으로 계산된다.

$$U = Q / A \Delta T_{LMTD} \quad (2)$$

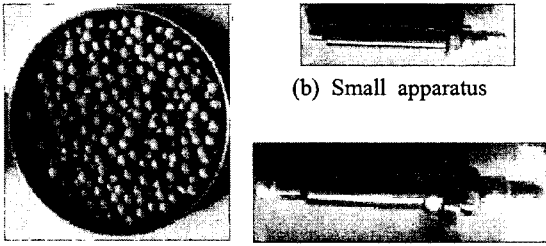
여기서, A는 전열면적이고, ΔT_{LMTD} 는 대수평균 온도차이다. Q와 ΔT_{LMTD} 는 열교환기 실험장치의 시험편의 입구와 출구에서 열전대로부터 측정된 자료를 A/D 변환기를 통하여 입력된 실시간 자료와 측정된 유량으로부터 각각 구하며, 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 파울링 저항과 열관류율을 구할 수 있다.

3. 파울링 실험장치

3.1 실험용수

우리나라의 물은 유럽이나 미국에 비하여 경도 성분이 낮으므로 파울링 생성에 미치는 영향이 상대적으로 낮다. 이와 같이 경도가 낮은 물을 이용하여 파울링을 생성시키기 위해서는 오랜 시간을 필요로 한다. 선행 연구자들은 실험시간을 단축하기 위하여 화학약품을 첨가하여 인공수(artificial water)로 실험을 하기도 하였다.^(9,10) 본 연구는 파울링 특성을 파악하고 물리적 방법을 이용한 파울링 저감효과에 초점을 맞추었고 이에 따라 실험시간을 단축하기 위하여 냉각수로 인공수를 사용하였다. 인공수는 탄산칼슘을 형성하는 질량비율로 시수 1ℓ 당 염화칼슘 0.669 g과 중탄산나트륨 0.784 g을 용해 시켜 만들었다.

실험용수에 대한 총경도, 칼슘경도, 알칼리성, 클로라이드를 측정 EDTA(Ethylendiamine tetraacetic acid) 방법을 이용하여 분석하였고, 전기전도도, pH는



(a) Ceramic ball (c) Large apparatus
Fig. 4 Ceramic ball & devices of experimental apparatus

Table 3 Specification of ceramic ball devices

Type	Case			Ceramic Ball	
	Out dia. (mm)	Inner dia. (mm)	Length (mm)	No. of Ball(ea)	Diameter (mm)
Large Type	38.4	33.0	175	280	8.45
Small Type	34.0	30.0	125	110	8.45

은 Fig. 2와 같이 저수조 외부에 순환 배관을 설치하여 세라믹 볼이 든 장치를 인공수가 통과하도록 하였다. 세라믹 볼 장치는 수직으로 설치하였으며 냉각수는 아래에서 위로 흐르도록 하여 세라믹 볼이 유속에 의하여 부유되면서 교란되도록 하였다. 이때 세라믹 볼을 통과하는 물의 속도를 변화시켜 파울링 발생의 변화상태를 관찰하였고, 소형과 대형의 두 가지 경우에 대하여 파울링 저감효과를 비교하는 실험도 수행하였다.

4. 실험 결과

Fig. 2의 실험장치를 이용하여 파울링 저감실험을 수행한 결과는 Figs. 5에서 7과 같다.

우선 두 가지 서로 다른 크기의 세라믹 볼 장치를 이용하는 경우에 대하여 파울링 저감효과를 비교하였다. 그 결과는 Fig. 5와 Fig. 6에서 보는 바와 같다. 열교환기내의 유속은 1.0 m/s일 때를 기준으로 하였으며 저감장치의 통과유속은 1.0 m/s, 1.5 m/s로 변화시켰다.

실험 결과 소형 장치의 경우는 Fig. 5와 6에서와 같이 저감장치가 없는 경우보다 파울링 저항값이 낮아지지 않아 저감효과가 없는 것으로 나타났다. 대형장치일 때 파울링 계수는 파울링 저감장치가 없을 때의 파울링 계수값에 대하여 통

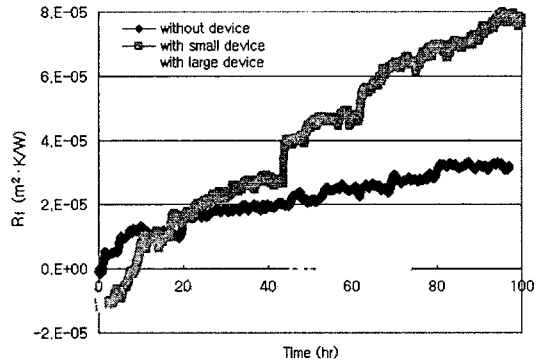


Fig. 5 Variations of the fouling factor for different ceramic ball devices (1.0 m/s)

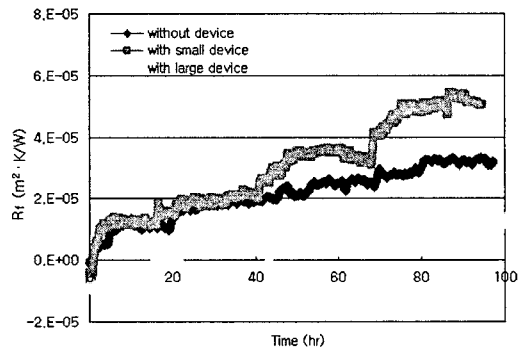


Fig. 6 Variations of the fouling factor for different ceramic ball devices (1.5 m/s)

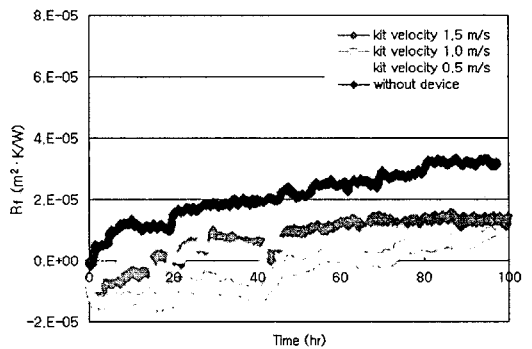


Fig. 7 Variations of fouling factor for different kit velocity

과유속이 1.0 m/s일 때는 28 %이고, 통과유속 1.5 m/s일 때는 43%로 나타나, 통과유속이 느린 1.0 m/s일 때의 파울링 계수가 15% 정도 낮으므로 파울링 저감효과가 더 높은 것으로 나타났다. 그러므로 세라믹 불의 양이 너무 적고 접촉시간이 짧은 경우에는 파울링 저감효과가 거의 없으며, 통과유속이 빠르면 저감효과가 높지 않은 것을 알 수 있었다.

앞의 실험을 통하여 대형 장치의 경우가 파울링 저감효과가 있으므로 대형 세라믹 불 장치에 대하여 장치 내 유속 변화에 따른 저감효과를 비교하여 보았다. 그 결과는 Fig. 7과 같다. 이때 시험용 열교환기의 유속은 1.0 m/s로 하였고, 세라믹 불 저감장치 내 유속은 0.5 m/s, 1.0 m/s, 1.5 m/s로 변화시켰다. 실험 결과 100시간 경과 후 파울링 계수는 1.5 m/s일 때 $1.45 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, 1.0 m/s일 때 $8.91 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, 0.5 m/s일 때 $9.06 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 로 나타나 키트 내 속도가 1.5 m/s보다는 낮은 1 m/s와 0.5 m/s 일 때 저감효과가 높은 것으로 나타났다.

5. 결 론

(1) 실험실용 열교환 장치에서 냉각수로 인공수를 이용하고, 세라믹 불을 파울링 저감장치로 이용한 결과 장치의 크기와 통과유속에 따라 파울링 저감효과가 다르게 나타나는 것을 알 수 있었다.

(2) 세라믹 불을 이용한 파울링 저감장치에서 불의 양이 적은 소형장치의 경우에는 파울링 저감효과가 없으며, 대형장치의 경우에는 파울링 저감효과가 있는 것으로 나타났다.

(3) 세라믹 불을 이용한 파울링 저감장치에서 장치의 통과유속이 높은 1.5 m/s인 경우보다는 1.0 m/s와 0.5 m/s에서 파울링 저감효과가 높은 것을 확인하였다.

(4) 추후에 세라믹 불의 양과 접촉시간 변화 등에 따른 파울링 효과에 대하여 연구하고자 한다.

참고문헌

- (1) Bott, T.R., 1995, *Fouling of Heat Exchangers*, Elsevier Science, New York
- (2) Cho, Y.I., Fan Chunfu and Cho, i B.G., 1997, "Theory of Electronic Anti-Fouling Technology to Control Precipitation Fouling in Heat Exchangers," *Int Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 24, pp. 757~770.
- (3) 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, pp. 3051~3071.
- (4) Forster, M., Augustin, W. and Bohnet, M., 1999, "Influence of The Adhesion Force Crystal/Heat Exchanger Surface on Fouling Mitigation," *Chemical Engineering and Processing* 38, pp. 449~461.
- (5) Lee Kum-Bae, Kim Arkkww and Jun Yong-Du and Park Seong-Min, 2001, "Fouling Reduction Characteristics of Fluidized Bed Heat Exchanger," *Proceedings of the SAREK*, pp 477~481.
- (6) Lee, Y. P. and Kang, S. W., 2001, "The Effect of Fouling Reduction by the Cleaning System in Compressed Type Refrigerator," *SAREK Trans.*
- (7) Bipan Bansal, Hans Muller-Steinhagen, Xiao Dong Chen, 2001, "Comparison of Crystallization Fouling in Plate and Double-Pipe Heat Exchangers," *Heat Transfer Engineering*, 22, pp. 13~25
- (8) Sung S.K, Suh S.H and Roh H.W., 2004, "A Study on the Formation of Fouling in a Heat Exchanging System for River Water," *Trans. KSME B*, Vol 28 No 6, pp. 646-651.
- (9) Qingfeng Tang, Jie Ding and Ziqiu Shen, 2000, "Investigation on Fouling Behaviors of Low-Energy Surface and Fouling Fractal Characteristics," *Chemical Engineering Science* 55, pp. 797~805.
- (10) Kim W.T. and Cho Y.I., 2000, "Experimental Study of the Crystal Growth Behavior of CaCO₃ Fouling Using a Microscope," *Experimental Heat Transfer*, Vol. 13, pp. 153~161.