

전자장을 통과한 물의 표면장력 측정에 대한 연구

고 영 하[†]

(원고접수일 : 2002년 7월 18일, 심사완료일 : 2003년 6월 19일)

A Study on Surface Tension Measurement for the Water through Electro-Magnetic Field

Young-ha Koh[†]

Key words : Fouling(파울링), Hard water(경수), Cooling Tower(냉각탑)

Abstract

The purpose of this study was to measure the surface tension of hard water through electro-magnetic field for investigating the effect of electro-magnetic water treatment. The maximum reduction of surface tension was 8% comparing to the no treatment case. When the flow velocity through the permanent magnetic device (PMD) was 6.3 m/s, sample of hard water had the minimum surface tension.

1. 서 론

열교환기, 콘덴서, 증발기, 냉각탑, 보일러 및 파이프 벽과 같은 열전달 장치에서 경수가 가열되거나 냉각될 때 스케일이 형성된다. 스케일의 종류는 산업체별로 다르고, 사용할 수 있는 물의 광물 함유량에 의존한다. 산업체에서 관찰되는 스케일은 일반적으로 탄산칼슘, 황산칼슘, 황산바륨, 실리카 및 철 스케일 등이 있다⁽¹⁾. 이러한 스케일의 가장 일반적인 형태중의 하나는 탄산칼슘이 있는데, 일반적으로 분필과 석회석 및 대리석의 성분이다. 산성의 물이 흘러 바위에 침투하게 되면 석회석에서 칼슘과 중탄산염 이온을 용해해서 경수를 만들게 된다. 경수가 열전달 장치로 통과되었을 때

칼슘과 중탄산염 이온이 가용성 내의 변화 때문에 응결하고, 열전달 표면에 딱딱한 스케일을 형성하며 관로의 통로를 막게 된다. 열교환기 표면에 스케일이 침전할 때, 이것을 일반적으로 "파울링(Fouling)"이라고 한다.

열전달 표면에서 스케일이 형성되면, 적어도 두 가지 문제가 생긴다.⁽²⁻⁴⁾ 첫 번째는 열전달 장치의 성능저하 문제이다. 열전달 표면에 부착된 얇은 박막의 스케일은 스케일의 작은 열전도도 때문에 열전달 성능을 크게 감소시키게 된다. 두 번째는 튜브 직경의 조그마한 변화가 유량을 감소시키게 되고, 열전달 장치에서 압력강하를 증가시키게 되는 문제가 대두된다.

특히, 서로 다른 온도의 액체가 파이프나 저장

[†] 책임저자 (조선이공대학 국방특수기술과) E-mail : yhgo@mail.chosun-c.ac.kr, T : 062)230-8252

시스템의 벽을 통하여 접촉되고 있는 열교환기 시스템에서 스케일의 고체 축적물 형성은 일반적인 문제로 잘 알려져 있다. 스케일이나 부식에 대한 처리는 가격이 매우 비싸다. 산성 화학약품을 사용하여 스케일을 제거할 수 있으나, 열교환기의 수명을 단축시켜 빠른 교체가 뒤따르게 된다. 열교환기에서 파울링(Fouling)이 발생한 경우, 산성 클리닝이 작업될 수 없는 경우는 스크래핑이나 모래 블레스팅 및 나일론 브러시의 금속이 사용되는 경우가 많은데⁽⁴⁾, 이 작업은 장치의 가동을 중지시키거나 많은 경제적 손실을 가져오게 된다. 생태적인 환경오염 문제를 해결하고, 효과적으로 파울링을 완화할 수 있는 비화학적인 방법이 있다면, 그 방법은 산업에서만 아니라, 환경적인 면에서도 이익이 될 수 있을 것으로 기대된다.

비화학적으로 물을 취급하는 방법 중에서, 영구 자석이나 전자장 장치의 효과를 최근에 많은 연구자들이 증명했다.⁽⁵⁻⁷⁾

일반적으로 파울링 저항 값은 온도차이와 유동률을 측정하여 전자장 장치의 효율을 증명하는데 사용된다. 이 방법은 실제 상황과의 유사성 때문에 보편화되어 있다. 그러나, 이 방법은 각 경우의 실험을 마치는데 오랜 시간이 요구되고, 주 테스트 섹션과 온수 공급 시스템과 냉각탑 등의 아주 거대한 시스템이 요구된다.

몇몇 연구자들은 결정 조직형태 연구, 결정 상, 가용성 변화와 물 성질 변화 등과 같은 몇가지 다른 방법으로 전자장 물 취급의 효과를 연구하고 있다.⁽⁵⁻⁸⁾ 그러나, 표면장력 측정에 대한 실험 데이터가 없는 실정이다.

그러므로, 현 연구의 목적은 파울링을 완화하기 위한 전자장 장치(즉, PMD와 EAF 기술)를 통과한 물에 대하여 모세관을 이용하여 표면장력을 측정하는 것이다.

2. 실험

Fig. 1은 물 샘플링을 위한 실험시설의 개략도를 보여주고 있다. 이 장치는 저장탱크, 펌프, 유량계, 컨트롤 밸브, 영구자석 장치(PMD)와 전자

엔티 파울링(EAF) 장치로 구성되어 있다.

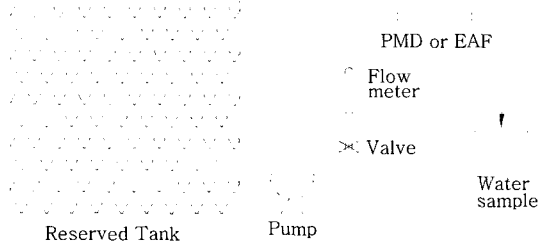


Fig. 1 Schematic diagram of experimental Apparatus.

Fig. 2는 PMD 장치의 차원과 배열을 보여주고 있다. 4개의 영구자석이 실험에 이용되었다. 전자장의 최대 강도는 자력계로 0.16T(1600 G)로 측정되었다. PMD에서 유동 채널의 횡단면 차원은 0.68 mm×9.27 mm×100 mm이다. PMD의 배열은 전 실험을 통하여 고정되었다.

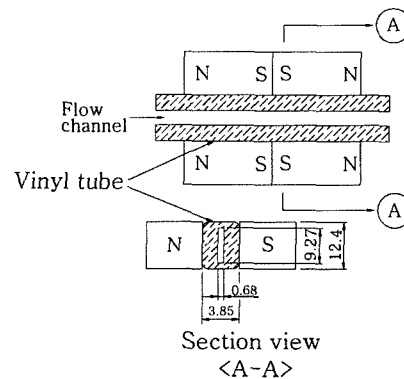


Fig. 2 Arrangement of permanent magnets and cross-sectional dimension.

Fig. 3은 솔레노이드 코일을 사용한 전자 엔티 파울링(EAF) 시스템을 보여주고 있다. 솔레노이드 코일은 외경이 50.8 mm인 플라스틱 관 위에 14 게이지 선을 80회 감아서 솔레노이드 두 코일의 선단은 EAF 컨트롤 유니트에 연결하였다. 유동 전기장의 강도가 코일의 표면에서 최대값을 갖고, 코일의 중심에서 최소값을 갖기 때문에, 동관

은 솔레노이드 코일에 상대적으로 중심이 아닌 곳에 위치하게 하였다.

EAF 컨트롤 유닛은 주파수 600 Hz에서 맥동 전류를 산출하도록 조정되었다. 계속적으로 유도된 맥동 전기장은 Faraday 법칙에 의하여 파이프 내부에서 생성된다.⁽⁹⁾

$$\int E \cdot ds = -\frac{\partial}{\partial t} \int B \cdot dA$$

여기서 E(V)는 유도된 전기장 벡터이고, s는 원주방향의 선벡터, B(Wb/m²)는 전자장 강도 벡터이고, A는 솔레노이드 코일의 횡단면적이다.

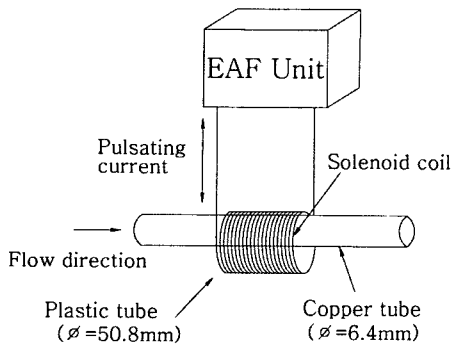


Fig. 3 Sketch of an EAF unit and a solenoid coil.

EAF 장치의 자세한 작동 원리는 다른 문헌에서 찾아 볼 수 있다.⁽⁵⁻⁸⁾

경수는 냉각탑 시스템에 의하여 만들어졌고, Table 1은 표준 적정 방법(칼슘 경도와 알칼리 경도 등을 측정)으로 이행된 물 분석의 결과이다. 실험은 저장탱크내의 일반 물을 펌프하여 유량계를 지나서 PMD나 EAF 시스템을 통과하여 다른 탱크에 모이도록 하였다. 통과 횟수는 최대 30회까지 진행했다. PMD와 EAF 시스템을 통한 유동 속도는 각 경우에서 각각 6.3 m/s와 1.0 m/s로 하였다.

표면장력과 실험 시스템 그 자체 사이의 관계를 알아보기 위하여 전자장 장치 없이 통과횟수를 변화시켜 가면서 같은 실험을 이행하였다. 두 번째 실험은 PMD를 통한 유동 속도와 유동 속도를 변화(0, 2, 4, 6.3, 8.5 m/s)한 경수의 표면장력 사

이의 관계를 알아보기 위하여 이행되었다. 그리고, 마지막 실험은 1.0 m/s로 유동 속도를 고정해 놓고, EAF 시스템의 5가지 다른 주파수(0, 0.3, 0.5, 2.0, 3.5 KHz)에 대하여 실험을 이행하였다.

Table 1 Water quality data of general water and hard water.

Quality Properties	Water 1	Water 2	Hard water
Conductivity($\mu\text{s}/\text{cm}$)	450	570	2990
pH	7.1	7.4	8.3
Total Hardness (mg/l)	140	204	1190
Ca ⁺ Hardness (mg/l)	120	142	780
Total Alkalinity (mg/l)	65	75	320
Chloride (mg/l)	75	95	640

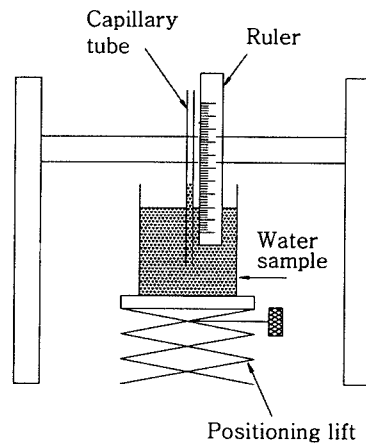


Fig. 4 Schematic diagram of capillary tube system.

각 실험을 마친 후에, 샘플 물의 표면장력이 모세관을 이용하여 측정되었다. Fig. 4는 모세관 시스템의 개략도를 보여주고 있다. 처음에 유리 모세관과 자를 부착해 놓고, 샘플 물이 담긴 100 ml 비이커를 리프트로 올리면서 내경이 1.15 mm이고 길이가 100 mm인 유리 모세관을 비이커의 중심에 위치하도록 하였다. 리프트 판을 올림으로써 모세관은 젖게 되고, 천천히 샘플 물의 표면을 모세관의 바닥부분에서 5mm 지점에 도달하게 함으로써 모세관 내부의 물높이를 읽었다. 이 과정은 정확도를 높이기 위하여 각 샘플 물에 대하여 5회

반복하여 실행하였다. 전 실험을 통하여 샘플 물의 온도는 25℃를 유지하였고, 최대 읽음 오차는 ±1%로 평가될 수 있다.

3. 결과 및 고찰

Table 1은 실험을 시작하기 전의 일반 물과 냉각탑에 의하여 만들어진 경수(Hard Water)에 대한 물 분석의 결과를 나타내고 있다. 경수는 일반 물보다 전 경도가 5배 이상 높도록 하였다.

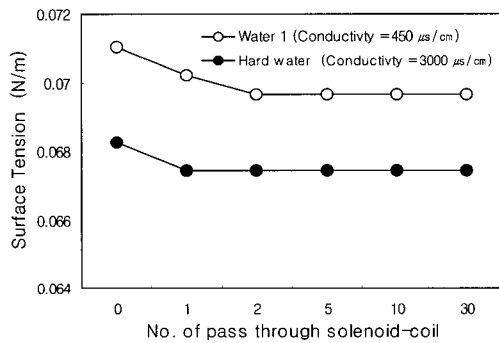


Fig. 5 Result of surface tension for water 1 and hard water with changing the number of treatment without electro-magnetic device.

Fig. 5는 전자장 장치 없이 통과횟수를 변화해 가면서 샘플 물의 표면장력 결과를 보여주고 있다. 초기 상태와 비교해서 경수의 표면장력이 최대 2%정도 떨어졌음을 확인할 수 있는데, 이 결과는 펌프의 동요(Agitation)가 벌크 침전(Bulk Precipitation)을 만들었을 것으로 설명될 수 있다.

Fig. 6은 PMD 통과 횟수를 변화시키면서 샘플 물의 표면장력 결과를 보여주고 있다. 일반 물(Water 2)의 표면장력 최대 감소량은 7.7%이었고, 경수의 경우는 일반 물과 거의 유사한 8.2%이었다. 이것은 물의 경도가 표면장력 감소에 영향을 미치지 않음을 의미한다. 그러나, 통과하는 사이클의 횟수를 증가시킴으로써 표면장력이 8% 감소했다. 이 결과는 경수가 PMD를 통과했을 때, 냉각탑에서 용해된 광물 이온이 중탄산염과 같은 음이

온과 충돌하여 부유 상태의 물(Bulk water)에서 커다란 콜로이드 상태의 입자를 만들게 되고, 자장 장치를 통과하는 횟수를 증가시킴으로써 콜로이드 상태의 입자 수나 크기가 증가되는 것으로 설명될 수 있다.

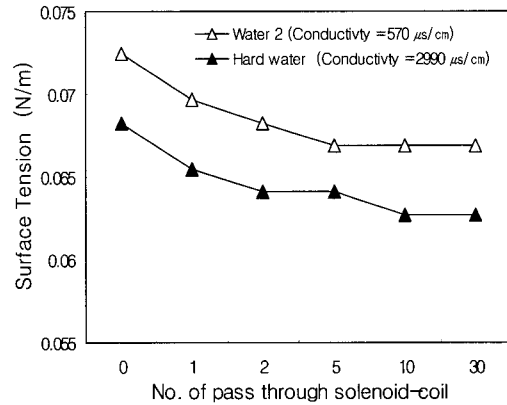


Fig. 6 Result of surface tension for water 2 and hard water with changing the number of PMD treatment.

물에서 콜로이드 입자의 수를 증가시킴으로써 물의 표면장력은 감소하게 된다.

Fig. 7은 EAF 시도의 횟수를 변화시켜가면서 물 샘플의 표면장력 결과를 보여주고 있다. EAF 시도의 횟수를 증가시킴으로써, 샘플 물의 표면장력이 경수의 경우는 7.8%로 감소되었다.

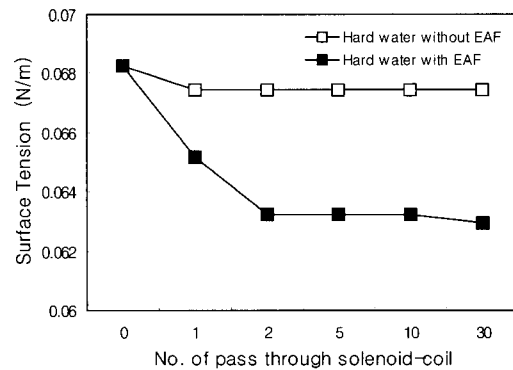


Fig. 7 Result of surface tension for hard water without and with EAF.

이것은 경수의 표면장력 감소량이 일반 물 (Water 1, Water 2)보다 약간 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 EAF의 효율이 물 경도에 비례한다는 것을 의미한다. 즉, 경도가 심한 경수에서 이온의 콜로이드 상태가 증가했음을 알 수 있다.

Fig. 8은 PMD를 통한 여러 가지 유동 속도에서 시행된 샘플 물의 표면장력 결과를 나타내고 있다. 유동 속도가 4.0 m/s로 증가되었을 때도 표면장력에는 커다란 차이가 없었으나, 유동속도가 6.3 m/s에 도달되었을 때, 일반 물과 비교하여 표면장력이 약 8% 감소되었고, 유동속도가 8.5 m/s로 증가한 경우에는 또한, 표면장력에 별다른 차이가 없었다.

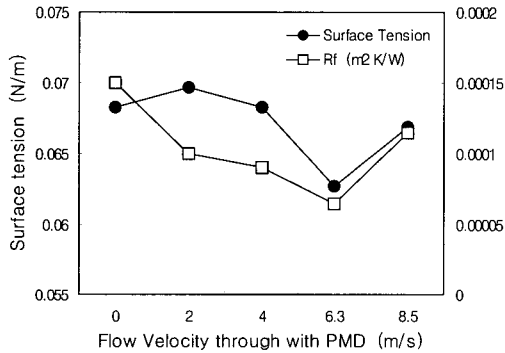


Fig. 8 Result of surface tension with comparing to fouling resistance, R_f with various flow velocity through the PMD.

파울링 저항값을 얻기 위하여, PMD를 가진 작은 열교환기와 냉각시스템에서 열전달 실험이 이루어졌다. 파울링 저항의 결과에서, 파울링 저항의 최소값은 6.3 m/s의 유동속도에서 얻어졌고⁽⁵⁻⁸⁾, 여러 가지 유동속도에 따른 전반적인 파울링 저항의 경향이 표면장력의 값과 거의 유사한 결과를 보이고 있음을 발견할 수 있다. 이 결과는 주어진 자기장 조건에서, 유동속도가 임의의 지점에 도달했을 때, 광물 이온들이 가장 효과적인 콜로이드 입자로 만들어짐을 의미한다.

Fig. 9는 주파수가 다른 EAF 장치에서 경수가 적용되었을 때, 물 표면장력의 효과를 보여주고 있다. EAF의 주파수를 증가시킴으로써, 물의 표면

장력은 8%로 감소되었다.

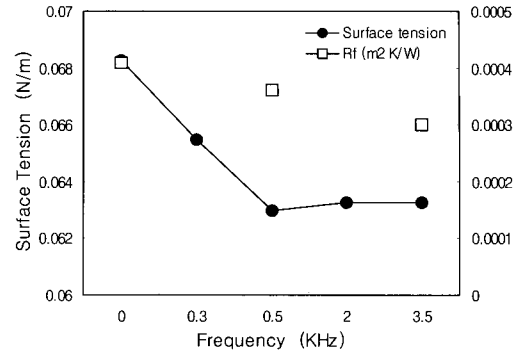


Fig. 9 Result of surface tension of sample water that performed with various frequency of EAF with comparing to fouling resistance, R_f .

이 결과는 파울링 실험과 같이 감소하는 경향을 보이고 있는데, 앞에서 언급한 것처럼, 파울링을 감소시키는 EAF의 주요 요소 중의 하나는 주파수의 조절이다. 예를 들면, 주파수를 증가시킴으로써, 전자장 저항의 역할을 하는 자기유도 (self-inductance) 값이 증가하기 때문이다. 그래서 작은 크기의 튜브를 통한 유동 시스템의 경우에는 자기유도 값이 무시될 수 있으나, 커다란 크기의 튜브를 통한 유동 시스템에서는 자기유도 값이 무시될 수 없다는 문제이다. 그러므로, 여러 경우에서 주파수의 범위를 적정화시키는 것이 미래에 연구되어야 할 과제로 사료된다.

4. 결 론

이 연구는 자기 장치와 EAF의 통과 횟수, 물의 종류, 유동속도 등을 변화해 가면서 여러 가지 실험조건에서 모세관으로 표면장력을 측정하였는데, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 통과 횟수를 증가시킴으로써, 샘플 물의 표면장력은 일반 물의 경우와 비교해서 8%로 감소되었다.

(2) PMD를 통과하는 유동속도가 0에서 8.5 m/s로 변화될 때, 표면장력의 최소값은 6.3 m/s에서 얻어졌다.

(3) EAF의 주파수를 변화할 때, 샘플 물의 표면장력은 감소하였다.

후 기

이 논문은 2002년도 조선이공대학 학술연구비의 지급을 받아 연구되었음

참고문헌

- [1] J. C. Cowan and D. J. Weintritt., "Water-formed Scale Deposits", Gulf Publishing Company, 1976.
- [2] J. Tabor, T. Aoki, R. B. Ritter, J. W. Palen, and J. G. Knudsen, "Fouling : the major unresolved problem in heat transfer", Chemical Engineering Progress, Vol. 68, No. 2, pp. 59-67, 1972.
- [3] J. W. Sutor, W. J. Marner, and R. B. Ritter, "The history and status of research in fouling of heat exchangers in cooling water service", Canadian J. of Chem. Eng., Vol. 55, pp. 374 - 380, 1977.
- [4] J. G. Knudsen, "Cooling water fouling - a brief review : Fouling in Heat Exchanger Equipment", 20th ASME/AICHE Heat Transfer Conference, Milwaukee, HTD-17, pp. 29 - 38, 1981.
- [5] C. F. Fan, "A study of electronic descaling technology", Ph. D. Thesis, Drexel University, Philadelphia, PA, 1997.
- [6] Y. I. Cho, C. F. Fan, and B. G. Choi, "Theory of electronic anti-fouling technology to control precipitation fouling in heat exchangers", Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 24, pp. 757-770, 1997.
- [7] C. F. Fan and Y. I. Cho, "A new electronic anti-fouling method to control fouling", 1997 National Heat Transfer Conference, Baltimore, HTD- Vol. 350, Vol. 12, pp. 183-188, 1997.
- [8] C. F. Fan and Y. I. Cho, "Microscopic observation of calcium carbonate particles : validation of an electronic anti-fouling technology" Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 24, pp. 747-756, 1997.
- [9] P. W. Atkins, "Physical Chemistry", 3rd edn. W. H. Freeman and Company, pp. 791-792, 1986.

저 자 소 개



고영하 (高永河)

1959년 10월생. 1985년 조선대학교 공과대학 기계공학과 졸업, 1987년 조선대학교 대학원 우주공학과 졸업(석사), 1992년 동대학원 기계공학과 졸업(박사) 2003년 현재 조선이공대학 국방특수기술과 교수