

실험실용 판형 열교환 시스템에서 가시화를 이용한 파울링 기구 해석

성 순 경[†], 서 상 호, 노 형 운
송실대학교 기계공학과

Analyses of Fouling Mechanism using Visualization Techniques in a Lab-scale Plate-Type Heat Exchanging System

Sun Kyung Sung[†], Sang Ho Suh, Hyung Woon Roh
Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 157-743, Korea
(Received November 26, 2003; revision received February 17, 2004)

ABSTRACT: Scale is formed when hard water is heated or cooled in heat transfer equipments such as heat exchangers, condensers, evaporators, cooling towers, boilers, and pipe walls. When the scale deposits in a heat exchanger surface, it is conventionally called fouling. The objective of the present study is to analyze the process of the fouling formation in a heat exchanger according to different types of water using visualization techniques. In order to experimentally investigate the formation of the fouling, this study built a lab-scaled heat exchanging system. Using the visualization techniques of Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-Ray diffraction method, the three dimensional configurations of the fouling formation could be successfully obtained. Based on the experimental results, it was found that the configurations of the fouling formation were different when using tap water compared to river water.

Key words: Fouling(파울링), Hard water(경수), Heat exchanging system(열교환 시스템), River water(하천수), Tap water(시수)

1. 서 론

화석연료 사용으로 인한 기후변화 등 심각한 환경변화에 대하여 국제적인 규제가 진행되고 있다. 냉난방이나 제조공장에서 사용되는 화석에너지의 사용을 최대한 줄이면서 환경 친화적인 에너지 이용기술을 발전시켜야 한다. 우리나라에는 무궁무진한 미활용 에너지가 존재한다. 생활폐기

물 소각열, 하수처리수열, 해수, 하천수 등 열에너지의 부존량은 연간 236,400 Tcal이므로 이와 같은 미활용 에너지를 효과적으로 이용할 수 있는 시스템을 구축하면 열공급 부문의 에너지 이용의 극대화에 기여할 것으로 기대된다.⁽¹⁾

하천수와 같은 저온열원을 산업공정이나 건물의 냉난방 시스템에 저온용수로 활용하기 위하여는 열을 흡수 또는 방출하는 열교환기의 이용이 필수적이다. 그러나 열교환기의 열전달 표면에는 열전달을 방해하는 침전물의 층이 형성되는데 이를 파울링이라고 한다. 열전달 표면에 파울링이 생성되면 파울링이 없는 경우에 비해 열전달률이

[†] Corresponding author
Tel.: +82-31-750-8644; fax: +82-31-750-8648
E-mail address: sksung@kw.ac.kr

크게 감소한다. 또한 열전달 표면에 형성된 파울링은 유체가 흐르는 단면적을 감소시켜 유량을 감소시키고 압력손실을 증가시켜 결론적으로 에너지의 과소비를 유발하게 된다.⁽²⁾

열교환기 효율을 향상시키기 위해 구조적인 개선에 대한 연구가 많이 수행되었으나, 파울링 방지를 위한 연구는 활발하지 않았다. 국내의 경우 이와 관련된 연구의 필요성이 제기되고 있으나 연구활동은 선진국과 비교하여 비교적 기초적인 이론연구와 열교환기의 파울링 제거설계에 기계적인 방법을 적용하여 설계하는 등 기초적인 기술수준에 머무르고 있다.

본 연구에서는 실험실용 열교환 시스템을 제작하고 미활용 에너지로 하천수를 이용할 때의 파울링 형성에 관한 연구를 수행하였다. 열교환 시스템에서 하천수를 사용하였을 경우의 파울링의 생성과정을 가시화하고 SEM(Scanning Electron Microscope)과 X-Ray 회절시험방법을 이용하여 파울링의 종류와 3차원적 구조를 분석하고자 하였다.

2. 파울링 생성

파울링은 침전, 입자, 화학, 부식, 생물학적 및 응고 파울링 등으로 분류된다. 열교환기의 특성상 열교환기 내로 유입되는 유체는 열교환기의 표면 근처에서 유체의 온도가 변화되고 이러한 온도변화는 유체의 용해도를 변화시켜 유체와 접하는 열교환기 표면에 유체 내의 불용성 이온의 침전물이 형성되는 침전 파울링이 Fig. 1과 같이 발생된다. 산업체의 열교환기에서 볼 수 있는 침전 파울링의 종류는 탄산칼슘(CaCO₃), 황산바륨(BaSO₄), 황산칼슘(CaSO₄), 규산염(Silica), 철(Fe) 등이다. 이중 대표적인 것이 탄산칼슘(CaCO₃)이며, 하천수를 열교환기의 냉각수로 사용할 때 열전달 표면에 파울링이 생성된다.⁽³⁻⁵⁾

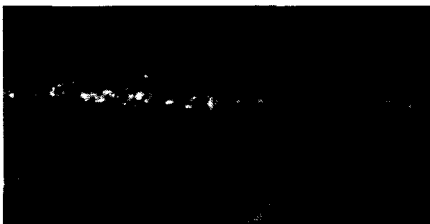


Fig. 1 A photograph of fouling.

3. 수질분석과 파울링 실험장치

3.1 수질분석

하천수와 같은 저온열원을 산업공정이나 건물의 냉방 시스템에 냉각용수 열원으로 활용하기 위하여 수질분석이 필요하다. 이는 물 중에 있는 칼슘, 마그네슘과 같은 용해된 미네랄 이온과 부유물질 등이 열전달 표면에 스케일로 발생되기 때문이다. 모든 산업현장에서 발생하는 스케일 생성문제는 물 성분과 밀접하게 관계되어 있다. 본 연구에서는 하천수와 시수의 경도, 전기전도도, pH, 알칼리도, 염화물 성분을 화학적인 방법으로 분석하였다.

3.2 파울링 실험장치

하천수 대응 열교환기 시스템의 파울링 생성과정을 실험하기 위하여 Fig. 2와 Fig. 3과 같이 실험장치를 구성하였다.

Fig. 2는 실험장치를 제작하기 위한 설계 계통도를 나타내고, Fig. 3은 Fig. 2의 설계도로 제작된 것을 사진으로 나타낸 것이다. 본 실험장치의 구성은 크게 경수를 만드는 부분과 파울링을 생성시키는 부분으로 나눌 수 있다. 첫번째로 경수를 만드는 부분은 크게 냉각탑, 히터, 온수순환펌프, 냉수순환펌프, 전기전도도계, 열교환기, 탱크, 유량계와 밸브 등으로 구성되어 있다. 하천수와 시수는 전기전도도와 경도가 낮기 때문에 직접 파울링 실험을 하기 위하여 많은 시간이 소요된

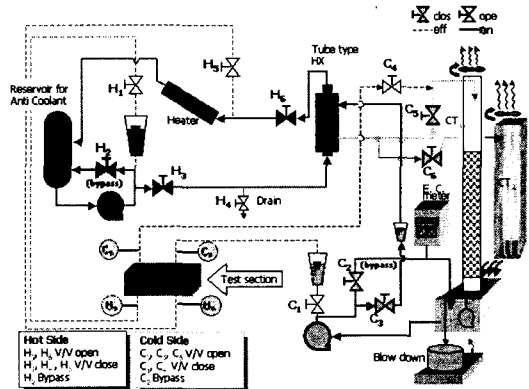


Fig. 2 Schematic diagram of lab-scale fouling experimental apparatus.

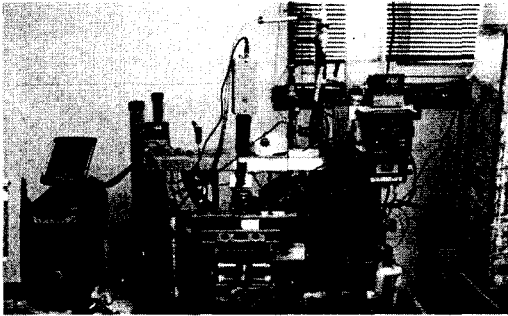


Fig. 3 Photograph of a lab-scale fouling experimental apparatus.

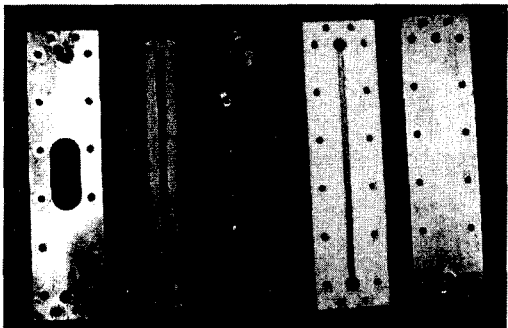


Fig. 4 Photographs of a test section.

다. 따라서 냉각탑을 이용하여 물을 일정시간 증발시키고, 증발된 만큼 물을 보충하는 순환의 과정을 거쳐 물의 경도를 증가시켜야 한다. 두번째로 파울링을 생성하는 부분은 온수순환펌프, 냉수순환펌프, 히터, 테스트섹션, 유량계와 밸브로 구성되어 있다. 실험장치에는 열교환이 일어나 파울링을 생성시키는 열교환 실험부분을 Fig. 4와 같이 제작하였다. 열교환 실험부분은 파울링의 생성 과정을 관찰할 수 있도록 투명한 아크릴판으로 덮여져 있으며, 냉수와 온수가 지나가는 유로 사이

의 열교환면은 동판으로 구성하였다.

파울링의 진행사항을 실시간으로 관찰하고 가시화하기 위하여 측정창에는 광학현미경($\times 40$)과 CCD 카메라(SONY사)를 장착하였다. 좋은 영상을 얻기 위하여 조명장치(50 W)를 설치하였다. 그리고 냉수와 온수의 유로 입구와 출구에는 온도를 측정하기 위하여 열전대를 4개 설치하여 A/D 변환기를 걸쳐 PC에서 Visual Basic과 엑셀로 작성된 프로그램으로 실시간 자료를 처리하도록 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 수질분석 결과

하천수의 수질분석을 위해 한강의 4개 권역(팔당, 잠실, 여의도, 김포)에서 하천수를 채수하였고, 시수는 실험실 내에서 채수하여 수질분석을 수행하였다. 수질분석을 수행한 결과는 Table 1과 같다.

Table 1에서 볼 수 있듯이 하천수의 전기전도도와 총경도는 각각 평균 $220 \mu\text{S}/\text{cm}$ 와 $71 \text{ mg}/\text{L}$ 로서 시수보다 평균 40% 정도와 15% 정도 크게 나타났다. 즉, 시수보다 하천수의 경도가 높음을 알 수 있다. 총경도는 Ca 경도와 Mg 경도를 합한 값인데, 하천수의 Ca과 Mg 구성비는 80 : 20으로서 Ca의 성분이 지배적임을 알 수 있다. 시수도 Ca과 Mg 구성비가 80 : 20으로서 비슷하게 나타났다. Fig. 1의 결과에서 한강의 하류지역으로 갈수록 전기전도도는 상류지역보다 크게 나타나지만 총경도는 크게 변하지 않음을 알 수 있다.

4.2 파울링 생성실험

Figs. 2~4와 같은 실험장치를 구성하여 파울링

Table 1 Water analyses data from Han-river at different places

	Paldang	Chamshil	Youido	Kimpo	Tap water
Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	162	163	246	306	158
pH	8.7	8.1	8.4	7.4	7.4
Ca hardness (mg/L)	50	52	62	62	50
Mg hardness (mg/L)	16	20	10	12	12
Total hardness (mg/L)	66	72	72	74	62
Alkalinity (mg/L)	52	42	74	78	40
Chloride (mg/L)	12	12	28	34	26

Table 2 Setting values of fouling parameters

	Values
Conductivity	2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Temperatures	Cold side : 20°C
	Hot side : 95°C
Velocity	Cold side : 0.5 m/s
	Hot side : 3.0 m/s

생성실험을 시작하였다. 이때의 설정 파라미터값은 Table 2와 같이 냉수 쪽의 온도를 20°C로 설정하였다. 20°C 이상으로 온도가 상승하면 냉각팬이 가동되게 하여 실험의 신뢰성을 향상시켰다. 고온수 쪽의 온도는 95°C로 설정하였으며, 온도조절기에 의하여 전기히터가 동작되도록 하였다. 실험용수의 전기전도도값은 실제 사용하고 있는 냉각탑의 냉각수 조건과 유사한 $2000 \pm 30 \mu\text{S}/\text{cm}$ 가 되게 설정하였다.

파울링 생성실험은 300시간 이상을 수행하였으

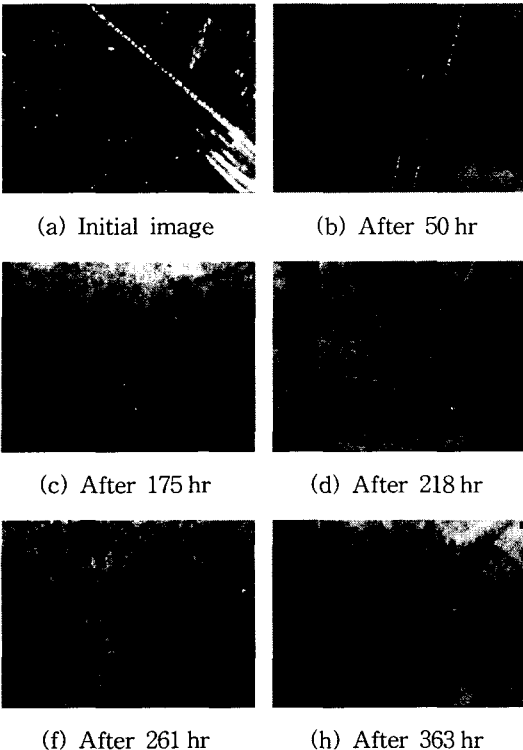


Fig. 5 Photographs of fouling history with inlet temperature of 20°C (magnification=40×).

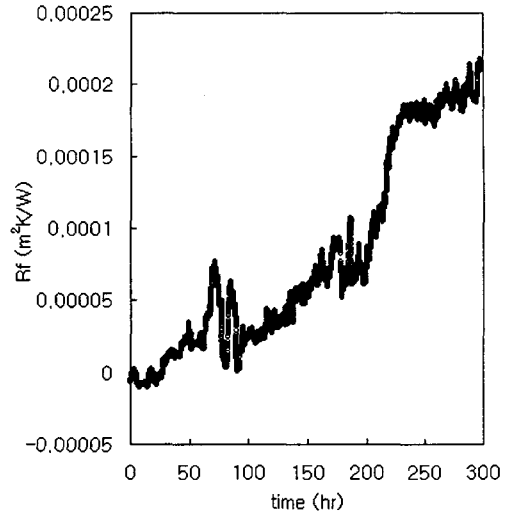


Fig. 6 Variation of fouling resistance with time.

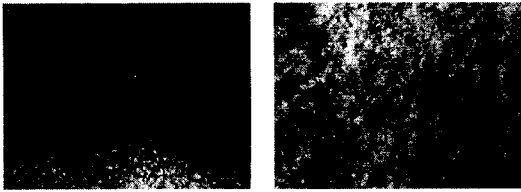
며 파울링 생성은 Fig.5와 같이 시간경과에 따라 점치 확대되어 가는 것을 볼 수 있다. 이때 실험용 열교환장치의 파울링 저항계수의 변화는 Fig.6과 같으며, 생성되는 과정은 크게 세 가지 영역으로 나눌 수 있다. 즉, 유도기, 성장기, 안정화 단계로 표현할 수 있다. Fig.6에서 60시간 정도까지는 서서히 파울링이 진행되는 것으로 보아 유도기이며, 60시간을 경과하여 급격히 변화하는 과정이 성장기이며 230시간 이후는 안정화 단계에 이른 것으로 보여진다.

하천수의 경우 유도기에서는 파울링 생성이 시수보다 늦게 진행되었다. 이는 열전달 표면에 점토, 모래, 진흙, 녹 등이 부유되다가 스케일이 형성될 수 있는 결정체들이 열교환기에 서서히 부착되는 것을 의미한다. 특히 하천수의 경우 60시간이 지나면서 파울링이 급격히 성장하는 현상을 나타내었다. 이는 열전달 표면에 비교적 용해가 잘 되지 않는 탄산칼슘(CaCO_3)이 과포화의 결과로 결정층을 이루기 때문으로 보여진다.

시수의 경우는 파울링 형성과정이 하천수와 다르게 나타났다. 하천수의 경우 입자 파울링은 아주 서서히 형성되는 반면에 시수의 경우 초기 짧은 유도기를 지나 침전 파울링이 빠르게 생성됨을 알 수 있었다.

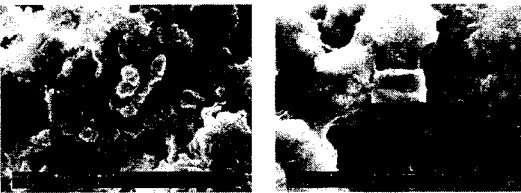
4.3 파울링 기전

파울링의 기전을 살펴보기 위하여 파울링 형성



(a) Tap water (b) River water

Fig. 7 Fouling formations for tap water and river water (magnification=50×).



(a) Tap water (b) River water

Fig. 8 SEM photographs.

과정을 가시화하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7을 보면 우윳빛 나는 부분이 파울링 결정이다. Fig. 7의 결과는 300시간 이상 실험 후 생성된 결과로서 시수와 하천수의 결정모양이 다름을 알 수 있다. 시수의 경우 구슬모양으로 전체적으로 얇게

갈려 있는 반면에, 하천수의 경우는 복층으로 불규칙하게 생성되었음을 확인하였다.

이 현상은 Fig. 8의 SEM(Scanning Electron Microscope) 영상을 통하여 명확하게 알 수 있다. 영상 측정결과에 의하면 Fig. 8(a)인 시수의 경우 규칙적인 CaCO_3 입자들의 모습을 볼 수 있는 반면에, Fig. 8(b)인 하천수의 경우 CaCO_3 입자들이 엉키어 복층을 형성하면서 커다란 덩어리로 나타남을 볼 수 있다. 하천수에 대한 SEM 영상은 입자 파울링이 생길 때 나타나는 결과이다. 그와 반대로 시수의 경우 얻어진 각개 결정체의 뚜렷한 존재는 결정 파울링이 생길 때 나타나는 현상과 유사하다.

X-ray 회절시험 방법에 의하여도 파울링의 생성상태를 분석하여 보았다. 그 결과는 Fig. 9(b)와 같이 나타났다. 시수와 하천수의 경우 결과가 서로 상이함을 알 수 있다. 시수의 경우는 관련자료인 Fig. 9(a)에 있는 calcite 형태의 결과와 유사하게 나타난 것을 보아 calcite형의 CaCO_3 임을 알 수 있었다. 그와 반대로 하천수의 경우는 Fig. 9(b)의 아래 그림과 같이 나타났다. 이는 Fig. 9(a)에 있는 aragonite 형태와 유사하게 나타남을 알 수 있으므로 하천수에서 생성되는 파울링은 aragonite 형태의 CaCO_3 라고 볼 수 있다.

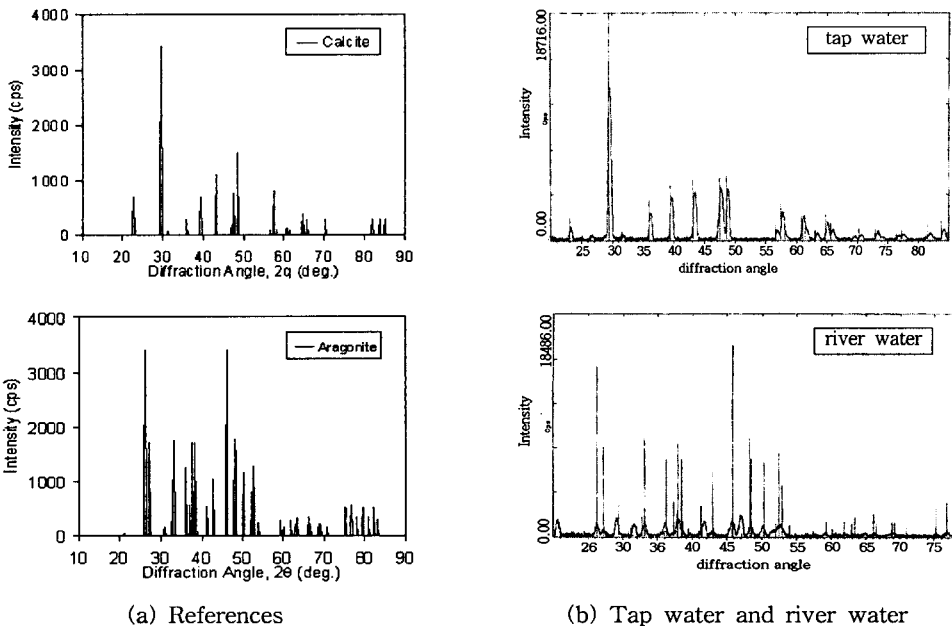


Fig. 9 Results of X-ray diffraction measurements of scale deposits.

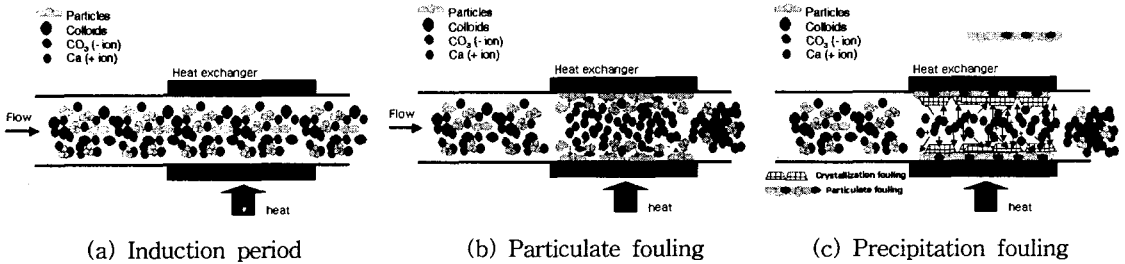


Fig. 10 Schematic diagrams of fouling formation.

Fig. 6의 실험결과로부터 파울링의 생성과정을 파악하기 위하여 Fig. 10과 같이 3단계로 나타내었다. 열교환 시스템에 적용되는 작동유체에 상관없이 초기에는 Fig. 10(a)처럼 일정기간 동안 스케일 부착이 없다. 오히려 열전달 표면이 파울링 초기단계에 매끈한 표면에서, 약간 거친 표면으로 바뀌게 되어 약간의 열전달계수의 증가하기도 하고, 파울링 저항은 음(-)의 값을 잠시 가질 수도 있게 된다. Fig. 10(b)는 입자 파울링을 보여주고 있는데 시간이 경과할수록 유체 속에 있는 부유물질(미립자, 콜로이드 등)이 열교환기 표면에 먼저 부착되고 있는 과정이다. 입자 파울링에 의해 생긴 칼슘 부착물은 아주 연하고 쉽게 제거될 수 있는 성질의 스케일로서 대개 흐르는 열교환기 내의 유속이 1 m/s 정도가 되면 전단응력에 의해 쉽게 제거되기도 한다. 하천수의 경우는 파울링 저항계수가 증가한 후 감소하기도 하는 것을 보아 입자 파울링의 생성과 스케일 제거가 불규칙적으로 일어난 것으로 보인다. 이후 시간이 계속 경과되면 물 속에 있는 이온들이 석출하여 Fig. 10(c)와 같은 결정 파울링이 생성되게 된다. 이 같은 결정 파울링의 경우 스케일 부착물이 아주 딱딱한 돌 같은 형태로서 제거가 어려워지고 시간의 경과에 따라 크기가 계속 커진다.

5. 결 론

(1) 시수의 경우 파울링 생성은 구슬 모양으로 전체적으로 얇게 깔려 있는 반면에 하천수의 경우는 복층으로 불규칙하게 생성되었음을 확인하였다.

(2) 하천수의 경우 파울링의 생성기전은 유도기, 성장기, 안정화 단계 순으로 발생되었다.

(3) 시수에서 생성된 파울링은 calcite 형태의 탄산칼슘이고 하천수의 경우는 aragonite 형태의 탄산칼슘임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 숭실대학교 교내 연구비 지원으로 이루어졌음.

참고문헌

1. Pilavachi, P. A. and Isdalem, J. D., 1992, European community R&D strategy in the field of head exchanger fouling project, Fouling Mechanisms, Theoretical and Practical Aspects, pp. 13-20.
2. Bott, T. R., 1995, The Fouling of Heat Exchangers, Elsevier Science, New York.
3. 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.
4. Moody, D. L., 1966, Method and apparatus for treatment of flowing liquids to control deposition of soild matter thereform, U. S. Patent Number 3,228,878, Jan. 11.
5. Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., 1981, Fundamentals of Heat Transfer, John Wiley & Sons, New York.