空氣調和·冷凍工學 論文集 第 12 卷 第 2 號(2000)/pp. 113~119

원관 주위 유하 액막에 의한 관 외벽에서의 입자 부착에 대한 실험

정 종 수*, 이 윤 표*, 정 기 만**, 박 찬 우**

An experiment of the particle deposition on a circular cylinder in a laminar flow

J. Jurng, Y. P. Lee, K. M Jeong, and C. W. Park

(Received December 18, 1998: revision received November 18, 1999)

ABSTRACT

An experimental study has been carried out in order to investigate on a particle deposition on a circular cylinder surface. The present study is focused on the particulate fouling occurring in a heat exchanger for a seawater desalinization, in a laminar flow over circular cylindrical tubes. The objective is to investigate how NaCl concentration influences the SiO_2 particle deposition on the surface of a glass circular cylinder. The NaCl concentration was changed from 0 g/L to 40 g/L.

As the experimental results of SiO_2 particle which is deposited on the glass circular cylinder surface showed, particle deposition rate per unit time increases rapidly with the increase of NaCl concentration between 0 g/L and 15 g/L. After the maximum of particle deposition rate was found at the NaCl concentration of 15 g/L, particle deposition rate remains unchanged or decreases gradually with the NaCl concentration from 15 g/L to 40 g/L. Also the SiO_2 deposition rate of particles does not have serious variations with the position at present glass surface.

Key words: Particle depostion(입자 부착), Deposition rate(부착율), Flow Visualization(유동 가시화), NaCl concentration(염화나트륨 농도)

기 호 설 명

L : 관 길이
Me : 순환 유량
N : 부착 입자 수 (particles/mm^2)
N_c : 장시간 경과 후 점근 부착 입자 개수
n : 열교환기 관군의 수
Re_f : 막(film) 레이놀즈 수
t_o : 부착 시작 시각
t_c : 입자 부착 특성 시간(characteristic time)
z : 관의 총 수

그리스 문자

Γ : 액막 유량(film flow rate, kg/ms)
μ : 혼합 용액의 점성계수(viscosity)

* 정회원, 한국과학기술연구원
(E-mail address: jjurng@kist.re.kr)
** 한국과학기술연구원

1. 서 론

본 논문은 해수 담수화 설비의 열교환기에서 발생하는 입자 오염(파울링, fouling) 현상에 관한 것으로, 입자 오염 현상은 용액 속의 고체 입자가 열교환기 표면에 부착되는 현상으로 시간이 경과함에 따라 여러 종류의 열교환기의 열전달을 저하시키는 원인이 된다.

해수의 담수화는 담수화 장치에 의해 염수(saline water)속에 존재하는 염분을 제거하는 공정으로 대량의 열 또는 전력 에너지가 소요된다. 따라서 적은 에너지원으로 담수화 할 수 있는 처리공정의 개발과 기술이 보다 더 요구되고 있으며 운전 중에 발생하는 생산비용의 상승요인을 최소화하는 노력이 필요하다. 담수화장치에서 오염은 열전달 면적의 40 % 정도에서 발생하고 전체 설비비의 10 %를 증가시키며 오염된 상태에서 운전을 하는 경우에는 깨끗한 상태에서 운전하는 경우보다 연료 소비량을 10 ~ 15 % 증가시킨다고 한다[1]. 기존의 연구에서는 오염 현상의 난해함과 대상의 다양함으로 인해서 오염 현상을 여러 분야로 나누어 연구하고 있는데, 본 실험에서는 입자 오염(particulate fouling)에 초점을 맞추고 있다. 입자 오염은 해수 담수화 시 필터(filter)를 통과한 입자, 즉 필터를 통하여 제거가 불가능한 입자(직경 0.01 ㎛ ~ 1.0 ㎛)나 입자 필터링(particle filtration)에 의해 일부 제거할 수 있지만 역시 직경이 작은 입자(0.3 ㎛ ~ 12 ㎛)에 의해서 발생하는 오염 현상이다. 기존의 연구로는 열교환기에서 발생하는 입자 오염 현상을 정성적으로 연구하거나 사각형 유리관에서 SiO_2입자나 산화철 입자가 표면에 부착되는 특성을 정량적으로 연구하여 이러한 입자 부착이 열교환기의 열전달 성능에 어떠한 영향을 미치는지에 관한 연구 결과가 몇 가지 발표되어 있다[2-6]. 고체 입자가 유리 표면에 부착되는 부착율에는 많은 실험 조건들이 관련되어 있지만 이론적으로 그 중에서도 특히 유리 표면의 조도, Van der Waals 힘, 전기적 이중층(electronic double layer) 등이 입자 부착율에 영향을 미친다고 알려져 있다. 본 연구는 해수 담수화 장치에 사용하는 열교환기의 입자 오염 현상, 즉 입자의 부착 현상에 영향을 미치는 인자들에 대한 실험 연구로, 특히 용액 속의 염화 나트륨의 농도가 입자 부착에 미치는 영향을 알아보는 것이 이 실험의 주 목적이다.

본 연구에서는 입자 부착율을 정량적으로 측정하기 위하여 유리 표면에 부착된 입자를 가시화하여 측정하였다. 이를 위해서 CCD 카메라와 경통 그리고 확대 렌즈로 구성된 입자 확대 장치를 구성하여 유리 원관 표면상의 1 mm × 1.5 mm 영역에 부착된 SiO_2 입자를 가시화 하였다. 레이저 광원을 이용하여 입자를 비추고 확대 장치와 CCD 카메라를 이용하여 부착된 입자의 영상을 촬영하여 부착된 입자의 수를 계수하였으며, 본 연구와 유사하게 평판 상의 입자 부착 가시화 실험을 수행한 Adomeit and Renz[2,3]의 실험 결과와 비교하였다. 유리 평판 표면에 부착된 입자를 측정한 Adomeit and Renz[2,3]의 실험에 따르면 입자가 pH 농도 6.2 부근에서 입자 부착률이 최대가 되고, 유속의 변화에 따른 실험 결과는 Reynolds 수(Re)가 2,000 이하인 층류 영역에서는 Re 가 증가함에 따라 부착 입자 개수가 증가하고, Re 수가 2,000 이상인 난류 영역에서는 Re 가 증가함에 따라 오히려 부착 입자의 개수가 감소한다고 한다. 한편, 동일한 Re 에 대해서는 입자의 직경이 작을수록 부착 입자의 개수가 증가하며, 온도가 높으면 입자의 부착 개수가 조금 증가하지만 온도 변화에 대해서는 그다지 큰 영향이 없다는 것을 실험을 통하여 보였다. 하지만 실제 열교환기에서는 원형 전열관이 주로 사용되기 때문에 전열관 상의 입자 부착에 의한 오염과 이에 따른 전열 성능의 저하를 예측하기 위해서는 이 논문[2,3]의 실험 대상이 평면 유리판이므로 실험 결과를 그대로 적용할 수 없고, 원관 형상에서의 입자 부착에 대한 실험 결과가 필요하다. 해수 담수화용 열교환기에 실질적으로 적용할 수 있는 관련 있는 실험이나 계산 결과가 발표된 다른 논문들도 없다. 본 논문에서는 특히 해수 담수화 장치의 일부인 열교환기의 원형 전열관 외벽면에 대해 입자 부착에 의한 오염이 해수에 함유되어 있는 염화 나트륨(NaCl)의 농도와 어떤 상관 관계가 있는가에 중점을 두어 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용한 실험 장치의 개략도는 Fig. 1

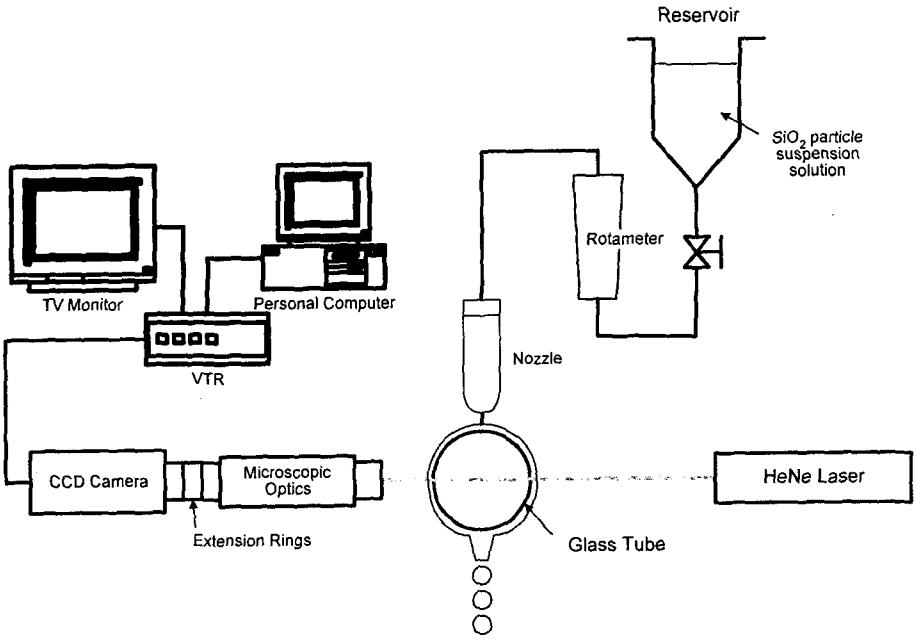

Fig. 1 Schematic diagram of a fouling experiment apparatus.

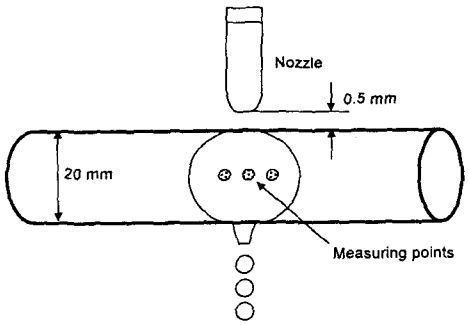

Fig. 2 Details of the test section.

과 같다. 이 실험 장치는 외경이 20 ㎜인 원형 유리관 외벽의 미소 부분(약 1.5 ㎟)을 대상으로 벽면에 부착되는 입자의 시간당 개수를 계수하는 것을 목적으로 구성되었다. 본 실험에서 사용한 유리 원관은 해수 담수화 열교환기와 재질은 다르지만, 입자 부착에 가장 중요한 역할을 하는 유동 현상이 유하 액막의 형태로 유사하기 때문에 원관 외벽면에서의 입자 부착을 모사(simulate)하는 방법으로 채택하였다.

본 실험에 사용한 부착 입자는 SiO2 입자로 Fig. 3의 전자 현미경 사진에서 보는 것처럼 직경이 0.01 ㎛에서 12 ㎛의 넓은 범위에 분포되어 있으나 대부분의 입자의 크기는 1 ㎛ 근처의 입자이다. 유리관 외벽에 붙어 있는 입자의 화상(image)을 확대하기 위한 입자 화상 확대 장치는 35 mm 확대 렌즈와 405 mm의 경통을 연결하고 CCD 카메라로 구성하였다. 이렇게 입자 화상 확대 장치로 잡은 이미지를 VTR로 보내 녹화하는 동시에 TV monitor 로 보내서 측정부의 입자 부착 상태를 실시간으로 육안으로 관찰하고 또한 이 이미지는 PC의 화상획득보드(image grabber)로 보내져 매 순간의 가시화 이미지를 파일로써 저장하였다.

본 실험에 사용한 측정 영역(Fig. 2)이 매우 작기 때문에 외부로부터의 미소한 진동에 의해서도 측정 영역의 화상이 흔들리므로 부착 입자의 화상을 잘 잡기 위해 진동 방지 장치가 부착되어 있는 광학 테이블(Optical Table)을 이용하여 외부로부터 측정 부위로 전달되는 진동을 차단하였으며 광원으로는 He-Ne Laser를 사용하였다.

표준 해수의 고형분의 농도가 0.034 g/L인 점을 감안하여 여러 번의 예비 실험 결과 본 실험의 실험 조건 중에서 혼합 용액 중의 SiO_2 입자의 농도를 중량비 300 ppm으로 결정하였으며, 해수의 NaCl 농도가 30 g/L 정도이므로 실험 시 NaCl의 농도를 5 g/L에서 40 g/L까지 변경하면서 NaCl의 농도의 변경에 따른 입자의 부착 특

성의 차이를 실험하였다. 실험 결과에서는 SiO_2 입자의 농도가 너무 낮으면 유리관 표면에 붙는 입자 수가 너무 작아서 실험 시간이 지나치게 많이 소요되고 SiO_2 입자의 농도가 너무 높으면 유동장 중의 흘러내리는 입자의 산란광 때문에 유리관 표면에 부착된 입자를 관찰하기가 어렵다. 한편 유리관 외부에 흘러내리는 유하 액막의 액막 Reynolds 수 Re_f는 다음 식으로 정의한다.

$$Re_f = \frac{4\Gamma}{\mu} \quad (1)$$

$$\Gamma = \frac{nM_e}{2Lz} \quad (2)$$

식 (1)에서 μ는 용액의 점성계수, Γ는 액막 유량이다. 한편 식 (2)에서 Me는 열교환기에서의 전체 순환유량, n은 열교환기 관군 수, L은 전열관의 길이, z는 관의 총 수를 나타낸다. 본 실험은 단일 원관에 대한 실험이므로 n과 z는 모두 1이며 여러 번의 예비 실험을 거쳐 본 실험의 Reynolds 수를 20 으로 결정하였다.

유리관 표면에서의 유동의 속도는 결정된 액막 Reynolds 수를 근거로 계산하면 약 5 ㎜/s 정도이다. PC의 화상획득보드가 한 화상을 잡는데 소요되는 노출 시간이 1/30 s 이고, 측정부의 크기가 약 1.0 mm 인데 유동장 중의 입자의 속도가 5 ㎜/s이므로 PC의 화상획득보드가 잡은 화상에는 유리관에 붙은 입자는 고정되어 잡히지만 흐르는 입자는 마치 저녁에 도로상에서 달리는 자동차를 카메라로 찍었을 때 사진에 나타나는 전조등(headlight) 광 사진처럼 빗금형의 궤적이 화상에 나타나게 된다. 표면에 부착된 입자의 화상이 경우에 따라서는 이 궤적에 가려지기 때문에 정지 화상으로 부착 입자 개수를 세면 오차가 발생할 수 있다. 실제 실험에서는 입자의 영상을 VTR로 녹화하여 각 시각에 대해 녹화된 화상을 보면서 유리 표면에 고정되어 있는 입자만을 판별할 수 있도록 모니터에 붙인 투명한 셀로판 필름에 점을 찍어 표시하고 이를 바탕으로 부착 입자의 개수를 산정(count)하였다.

한편 투입되는 SiO_2 입자의 크기 분포 특성에 큰 차이가 없어도 용액을 혼합한 후 시간이 많이 지나면 용기 벽면 등에서의 입자 부착이 일어나서 용기 내의 입자의 크기 분포가 달라지게 되

Fig. 3 Electron-microscopic photograph of SiO_2 particles.

며, 본 실험 중에도 용액을 혼합한 후 상당한 시간이 경과한 이후에 실험을 수행하여 부착률이 달라지는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 실험 시에 입자의 크기 분포 조건이 가능한 한 가까와지도록 용액 내에 SiO_2 입자를 혼합한 후 30 분 이내에 실험을 시작하여 큰 차이가 나지 않도록 주의하였다.

3. 실험 결과 및 검토

3.1 경과 시간에 따른 입자의 부착

Fig. 4는 시간에 따른 부착 입자의 개수의 변화를 나타내는 대표적인 그림이다. 이 실험에서

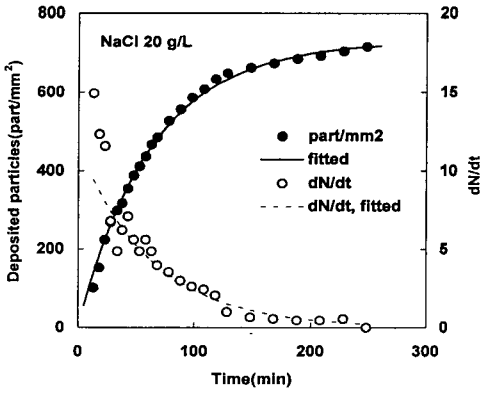

Fig. 4 Time history of particle deposition and deposition rate (NaCl 20g/L).

는 NaCl 20 g/L인 조건하에서 4시간 동안 부착 입자 개수를 측정하였으며 단위 면적(1 mm^2) 당의 부착 입자 수와 단위 시간당 입자 부착률(dN/dt)를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 보듯이 약 60 분이 경과하기까지의 부착 초기에는 입자의 부착이 급격하게 이루어지고, 입자 부착률(dN/dt) 또한 최대 분당 15 개/min 정도를 나타내고 있다. 그 이후 부착 입자 수의 증가세가 완만해 지고 입자의 부착률도 완만하게 작아지는 경향을 나타낸다. 이와 같은 현상은 Adomeit and Renz[2,3]가 발표한 논문에서의 결과와 매우 유사하며 이러한 경향이 나타나는 이유는 시간 경과와 함께 부착된 입자가 증가하면 부착 입자가 다시 재탈락할 확률이 부착 입자 수에 비례하여 증가한다는 점으로 설명할 수 있다. 즉, 입자 부착이 시작되는 초기에는, 부착된 입자의 재탈락률이 크지 않아서 입자의 겉보기(apparent) 부착률이 큰 값을 나타내지만, 시간이 지나 부착 입자가 증가하여 부착된 입자의 재탈락률이 증가하면 입자의 겉보기 부착률이 감소하는 것이다.

이 그래프에서 부착 입자 수 N (particles/mm^2)의 시간 t 에 따른 변화를 수식으로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$N = N_c \{ 1 - \exp(\frac{t_o - t}{t_c}) \} \qquad (3)$$

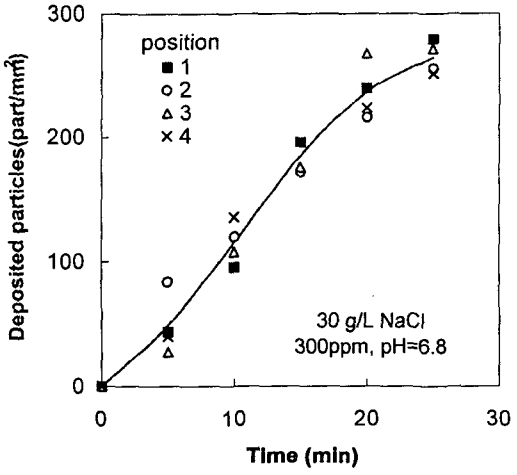

Fig. 5 Positional variation of particle deposition rate (NaCl 30g/L).

이 식에서는 부착 곡선의 형태를 결정하는 3 개의 특성 변수(parameter) 들이 있는데 t_o 는 부착 시작 시각, N_c 는 장시간 경과 후 점근하는 부착 입자의 갯수, t_c 는 입자 부착 특성 시간(characteristic time)을 나타낸다. 이 식에 따르면 3 t_c 경과 후에는 입자의 수가 점근값 N_c 의 95%에 도달한다. Fig. 4의 실선은 특성 변수를 각각 N_c = 730, t_c = 63, t_o = 8 로 준 곡선이며 실험 결과와 비교적 잘 일치한다. 한편 식 (3)을 시간에 대해서 미분하면 입자의 단위 시간당 부착률 dN/dt 는 식 (4)와 같다.

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N_c}{t_c} \exp(\frac{t_o - t}{t_c}) \qquad (4)$$

Fig. 4 의 점선은 입자의 부착률을 나타내는 선이다. 식 (4)에서 입자의 초기 부착률은 $t = t_o$ 일 때 N_c / t_c 이므로, 이 그림에서 입자의 초기 부착률은 약 10.3 개/mm^2/min 이다.

3.2 측정 위치에 따른 부착률의 차이

열교환기 표면에서의 입자의 부착률은 표면의 상태에 따라서 달라진다고 알려져 있다[8]. 따라서 본 연구에서는 동일한 조건 하에서 원관 상의 위치에 따라서 부착률이 달라지는 지 여부에 대한 실험을 수행하였다. Fig. 5는 각각의 위치 1, 2, 3, 4에서 측정한 입자의 부착률의 실험 결과를 나타내는 그림이다. 측정 위치는 약 1 mm 정도 간격을 두고 측정부의 전체 화면을 상하좌우로 각각 2 등분하여 4 개로 나누어 각각의 화면을 선택한 것이다. 부착 입자의 수가 작을 때에는 영역에 따라 부착 입자의 수가 차이가 나지만, 약 25 분 정도 경과한 후에는 최대 편차가 10 % 이내이다. 이 결과로 미루어 보면 본 실험에서는 원관 상의 위치에 따른 입자의 부착률의 편차는 크지 않은 것으로 생각할 수 있다.

3.3 NaCl 농도 변화에 따른 부착 특성 실험

NaCl 농도의 변화에 따른 입자의 부착 특성에 대한 실험을 수행하기 위하여 본 실험에서는 용액 중의 NaCl 농도를 0 - 40 g/L (중량비 0 - 4

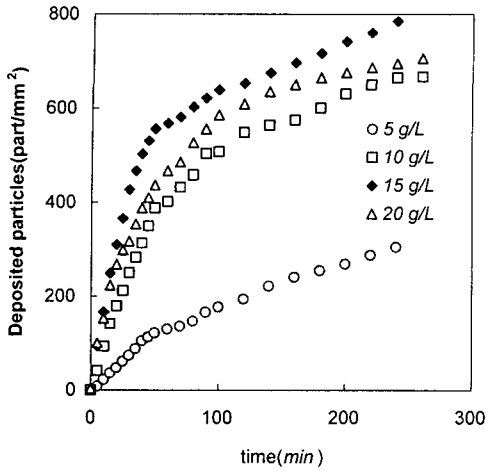

Fig. 6 Time history of particle deposition with varying NaCl concentration (5 g/L - 20 g/L).

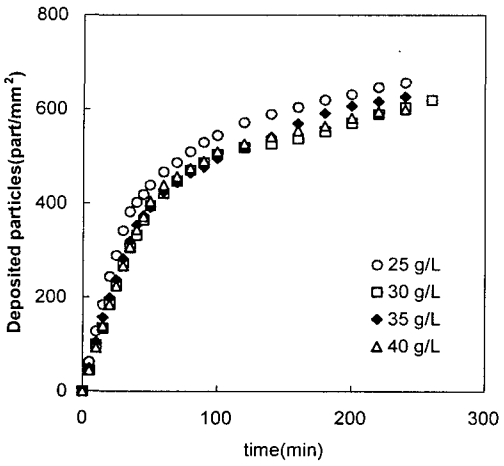

Fig. 7 Time history of particle deposition with varying NaCl concentration(25 g/L - 40 g/L).

%) 범위에서 변화시키면서 실험을 수행하였다. 용액 중의 NaCl 농도가 증가하면 용액 중의 $[Na^+]$ 및 $[Cl^-]$ 이온의 농도의 증가로 인해서 발생하는 Van der Waals Potential Force의 영향으로 입자의 부착률이 증가한다고 알려져 있다[7].

Fig.6 과 Fig.7 은 각각 5 - 20 g/L, 25 - 40 g/L 범위의 NaCl 농도에 대해서 시간에 따른 부착입자 수를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 나타낸 시간의 경과에 따른 데이터들을 정리하면 초기의 급격한 부착 구간을 지나면 약 40 - 50 분 정도 경과 후에는 입자의 부착률이 거의 고정되는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 6에 나타난 것처럼 NaCl의 농도가 5 g/L와 15 g/L 까지의 범위에서는 NaCl 농도가 증가하면 부착 입자의 개수와 입자의 초기 부착률이 급격하게 증가한다. 한편 Fig.7에서는 15 g/L와 40 g/L 까지의 NaCl의 농도 범위에서는 입자의 초기 부착률이 NaCl의 농도 15 g/L에서 최대가 된 후, 그 이상의 NaCl 농도에서는 NaCl 40 g/L 까지 오히려 조금씩 감소하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 8 은 120분이 지난 후 계측한 단위 면적당 부착입자 수를 NaCl 농도에 따라 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 입자의 부착 개수는 NaCl 농도가 5 g/L에서 1 mm^2당 300개 정도로부터 NaCl 농도의 증가에 따라 급속히 증가하여 NaCl 농도 15 g/L에서 1 mm^2당 800개 정도로 최대의 입자 부착률을 나타낸 후, 그 이상의 NaCl 농도에서는 NaCl 40 g/L까지 완만하게 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 이러한 결과에 따르면, 담수화 장치와 관련해서 취수된 원수의 NaCl 농도에 따라서 열교환기 내의 입자 오염의 정도가 크게 달라진다는 것을 의미하게 되

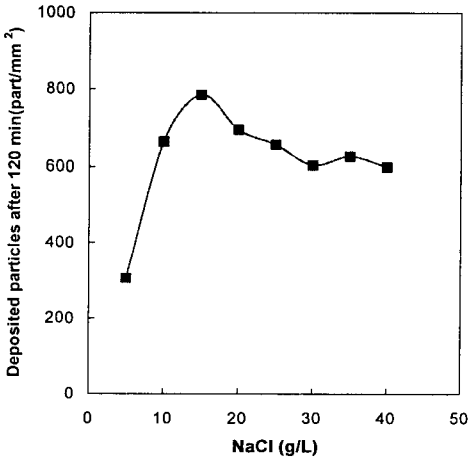

Fig. 8 Particle deposition rate with varying NaCl concentration.

므로 매우 중요한 의미가 있다. 이 결과로 미루어 볼 때 NaCl 농도 15 g/L 까지는 NaCl 농도가 증가하고 용액 중의 [Na^+] 및 [Cl^-] 이온의 농도가 증가하면 Van der Waals 힘이 증가하기 때문에 입자의 부착률이 증가하는 것으로 생각된다[7]. 한편 NaCl 농도 15 g/L 이상에서는 NaCl 농도가 높아져도 부착률이 더 이상 증가하지 않고 거의 차이가 없거나 오히려 감소하는 것은 용액 중의 입자의 크기가 변화하는 것이 원인이라고 생각된다. 즉, 용액 중의 [Na^+] 및 [Cl^-] 이온의 농도가 증가하여 Van der Waals 힘이 증가하면 미소 입자 들간의 결합력이 커져서 용액 중의 입자 사이에서 결합이 먼저 일어나서 용액 중의 입자의 평균 크기가 커지게 된다. 큰 입자의 부착율은 상대적으로 작기 때문에, 전체적으로 입자의 부착율이 감소하는 것이라고 추정된다.

4. 결론

(1) NaCl을 첨가하지 않고 증류수에 SiO_2 입자만을 혼합하여 실험하였을 때는 여러 번의 실험결과 입자 부착 현상이 상당히 작아서 입자의 부착률은 거의 0 이라고 할 수 있는데 반해, 혼합용액에 NaCl을 첨가하면 입자의 부착률이 급속히 증가한다.

(3) NaCl 농도의 변경에 따른 입자의 부착은 NaCl 농도가 0 g/L - 15 g/L 까지는 NaCl 농도의 증가와 더불어 급속히 증가하며 15 g/L에서 입자 부착률이 최대가 되고, NaCl 농도가 15 g/L - 40 g/L 의 범위에서는 입자의 부착 경향이 NaCl 농도의 증가에 무관하게 변하지 않거나 오히려 조금씩 감소하는 경향을 보인다.

(4) 입자 부착 초기에는 부착 입자의 수가 급속하게 늘어나지만 시간이 지나면서 입자 부착률이 작아져서 점차 점근값으로 접근한다. 이러한 현상은 시간 경과에 따라 부착된 입자의 수가 증가할수록 부착된 입자 중에서 재탈락하는 비율이 증가하여 부착과 재탈락이 평형 상태가 되기 때문으로 판단된다.

(5) 표면 위치에 따른 입자 부착 개수는 부착 초기에는 위치에 따른 편차가 있지만 시간이 충분히 경과한 후에는 부착 입자 수의 편차가 최대 10 % 정도로 위치에 따른 입자 부착의 변동은 그다지 크지 않다.

REFERENCE

1. Y.P.Lee, Jongsoo Jurng et al., 1997, Development of Analysis Technology for Fouling Phenomena, Annual Project Report, UCN1516-6016-2, Korea Institute of Machine and Metallogy(1997. 11).
2. Adomeit, P. and Renz, U., 1994, Deposition of fine particles from aqueous Suspensions, proceedings of 10th Int. Heat Transfer Conference, Vol. 5, pp. 207-212.
3. Adomeit, P. and Renz, U., 1995, The influence of liquid flow rate on particle deposition and detachment, Proc. Fouling Mitigation of Industrial Heat Exchange Equipment, An International Conference, San Luis Obispo, California, USA, June 1995, pp. 353-364.
4. Williamson, R., Newson, I., and Bott, T. R., 1988, The deposition of haematite particles from flowing water, The Canadian J. of Chemical Engineering, Vol. 66, pp. 51- 54.
5. Kuo, R. J. and Matijevic, E., 1980, Particle adhesion and removal in model systems III, monodisperse ferric oxide on steel, J. Colloid and Interface Sci., V. 78, pp. 407-421.
6. Matijevic, E., 1982, Properties of Colloidal Corrosion Products and their Effects on Nuclear Plants, EPRI NP 2606.
7. Matijevic, E., and Kuo, R. J. and Kolny, H., 1981, Stability and Deposition Phenomena of Monodisperse Haematite Sols, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 80, pp. 94-106.
8. Melo, L.F., Bott, T.R. and Bernardo, C.A., 1987, Fouling Science and Technology, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute, Kluwer Academic Publisher, Hingham, MA, pp. 3-14.