

열교환기 Fouling의 저감 대책

이윤표 · 이신표

Fouling Mitigation of Heat Exchangers

Yoon-Pyo Lee and Shin-Pyo Lee



- 이윤표 (KIST 기전연구부)
- 1957년생
- 상변화응용시스템을 전공하였으며, ice slurry의 제조, 폐수처리, fouling의 저감과 제거에 관심을 가지고 있다.



- 이신표 (KIST 기전연구부)
- 1963년생
- 메카트로닉스를 전공하였으며, 열시스템의 설계와 정밀계측기술 개발에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

열교환기에 관한 핸드북(hand book)이나 열전달교과서를 보면 설계의 마지막단계에서 고려사항으로서 fouling의 영향과 그 계수값이 소개된다. 그런데 이 값은 일반적으로 매우 작은 값으로 실제 설계자는 종종 그 효과를 거의 무시하고 있다. 그러나 폐열 회수나 환경장치 등에 사용되는 열교환기의 경우, 작동유체의 상태에 따라 이 값은 전 시스템의 설계값을 바꿔주는 값으로 부각될 수 있다. 많은 경우에 설계 엔지니어들은 설계를 모두 마치고 파울링(fouling) 등의 안전계수를 고려하여 열교환기 면적을 설계치보다 여유를 주어 설계하는 것으로 이 파울링의 영향을 고려하였다고 생각한다. 그러나 파울링은 온도의 상승에 따라 그 정도가 심해지므로 열교환기 면적의 확대는 더욱 심한 파울링을 야기시킬 수도 있다. 지하수를 이용하는 열펌프 시스템에서 열교환기면에 형성되는 파울링은 전체 열저항 중 가장 큰 열저항으로 부각되고 있으며 또한 최근에 많은

관심을 기울이고 있는 초소형 기기의 마이크로채널 열전달에서 가장 큰 장애 요인은 마이크로 채널 내의 파울링이다. 이와 같은 사실은 과거 핸드 북의 작은 상수 정도로 취급받던 파울링을 재평가하지 않을 수 없게 하였다.

파울링은 일반적으로 “경계면에 퇴적되는 바람직하지 않은 고체퇴적물”로 정의한다. 이렇게 볼 때 파울링은 단지 열교환기만의 문제는 아니고 어떤 정량적인 값을 측정하기 위한 센서의 오염도 넓게 보면 파울링에 해당한다. 많은 투자비가 들어간 소각로 공해방지장치의 자동제어 시스템에서 센서의 오염은 전체 시스템에서 치명적일 수 있다. 파울링에 대한 연구는 많은 연구자들에 의하여 시도되었으나 진전은 별로 없다는 사실이 또 한 놀라운 일이다. 현재까지 밝혀진 바로는 파울링은 어떠한 상황하에 고유한 것으로 파울링을 감소시키거나 제거하기 위한 정량적인 디자인 기술은 없다고 알려지고 있다.

이 글에서는 파울링이란 용어를 단지 열교환기면을 사이에 두고 열전달되는 간접접촉식 열교환기면의 고체-액체 경계면에 퇴적

되는 파울링으로 제한하고 형성되는 파울링의 종류, 열전달에 미치는 파울링의 영향, 파울링의 억제와 제거를 위한 현재의 기술에 대하여 논의한다.

2. 파울링의 종류

열교환면에 형성되는 파울링을 분류하는 방법은 매우 다양하다. 예를 들면, 열전달하는 종류에 따른 분류로서 증발, 응축과 같이 상변화에 의한 열전달, 가열과 냉각과 같은 현열에 의한 열전달, 발열, 흡열과 같은 화학적인 열전달로 분류하는 방법, 수용액, 석유, 연소가스 등과 같이 파울링을 야기시키는 유체의 성격에 따른 분류, 이외에 열교환면의 형태에 따른 분류, 담수화, 발전소 등과 같이 산업시설의 형태에 따른 분류 등이 있다. 그러나 조금 더 기초적인 분류로서 다음과 같은 분류가 일반적이다.

1) Precipitation fouling-주로 열교환기 면에서 용해물질의 석출에 의하여 일어난다. 온도가 상승할수록 쉽게 석출되는 용존물질의 경우 열교환기면에 심하게 형성되는데 이와 같은 경우를 스케일(scale)이라고 부른다.

2) Particulate fouling-용액중의 부유되어 있는 매우 작은 고체입자가 열교환기면에 축적됨으로써 발생한다. 중력에 의하여 발생하는 이와 같은 파울링을 침전에 의한 파울링 즉, sedimentation fouling이라고 부른다.

3) Chemical reaction fouling-화학반응에 의하여 침적물이 열교환기면에 형성되는 현상을 가리키며 이때 열교환기면 자체는 반응물질이 아니다.

4) Corrosion fouling-열전달면 자체 또는 다른 곳에서 화학반응으로 형성된 부식물질이 열교환기면에 부착됨으로써 발생하는 파울링을 말한다. 부식이 발생하는 경우는 발전소의 증기발전기에서 특히 중요하다. 화력발전소의 경우에는 시설유지비의 약 50%

가 부식방지 관련비용으로 지출되고 있다. 발생된 부식물질은 또한 다른 파울링 물질의 부착을 촉진시킨다. 그림 1은 보일러 튜브에서의 부식과 그로 인한 파울링의 형성과정을 나타낸 것이다.

5) Biological fouling-유체속에 조개류나 미세한 유기체가 포함된 경우 이들이 관벽에 부착되어 형성된다. 관벽의 온도는 일반적으로 이들의 성장을 촉진시키며 유속은 경우에 따라 성장을 증가 또는 억제시킨다. 해수로 응축기를 냉각하는 화력발전소의 경우 이들의 부착에 의해 심한 파울링이 형성된다.

6) Freezing fouling-냉동기 증발기에서 서리가 생성되는 것과 같이 열교환기면의 냉각에 따른 액체의 응고에 의하여 발생한다. 원유를 다루는 시스템에서 열교환기면에 형성되는 파라핀 등에 의한 파울링도 이 범주에 속한다.

3. 열저항으로의 파울링

그림 2는 더운 유체로부터 차가운 유체로의 열전달과정을 나타낸 것으로서 관의 내외벽에서 생성된 파울링에 의한 저항과 온도강하가 표시되어 있다. 그림 2(a)는 깨끗한 열교환기의 경우이고 그림 2(b)는 파울링이 형성된 경우로서 그림 2(b)의 경우 파울링에 의한 열저항은 열교환기가 깨끗할 때와 불결

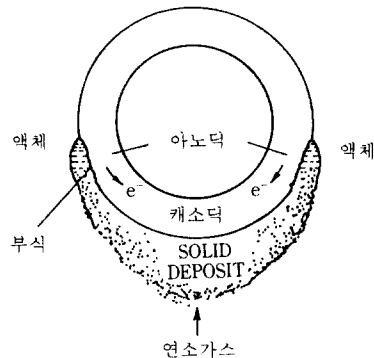


그림 1 보일러 튜브에서의 부식 및 침전물

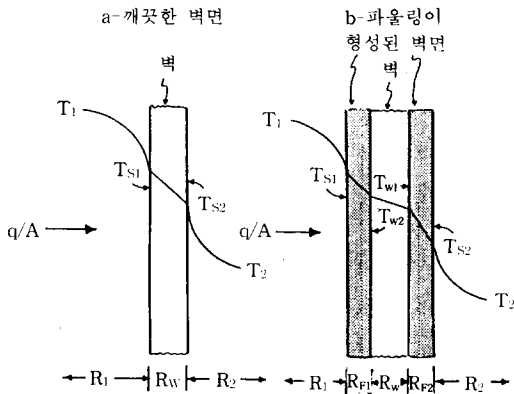


그림 2 fouling에 의한 온도분포 및 열저항

할 때의 총합열전달계수를 보통 실험적으로 결정하여 구한다.

각각의 경우에 대한 총합열전달 계수는 다음과 같다.

$$\frac{1}{U_C} = R_1 + R_w + R_2 \quad (1)$$

$$\frac{1}{U_F} = R_1 + R_{F1} + R_w + R_{F2} + R_2 \quad (2)$$

따라서 파울링 열저항은 다음과 같이 계산된다.

$$R_{F1} + R_{F2} = \frac{1}{U_F} - \frac{1}{U_C} \quad (3)$$

4. 파울링의 모델

열교환기의 운전조건을 효과적으로 변화시켜 파울링의 형성을 최소화하기 위해서는 파울링의 형성과정을 파악하는 것이 필수적이다. 파울링은 유체의 조성, 유체의 화학적 처리정도, 속도, 평균온도, 그리고 관의 표면온도에 따라 달라진다. 따라서 유체의 조성, 화학적 처리방법이 결정된 경우에는 이들 속도, 평균온도, 관온도를 조절하여 파울링의 형성을 제어한다.

파울링의 형성과정은 시간에 의존한다. 실험을 통하여 파울링곡선을 얻을 수 있는데

이 곡선은 침전되는 파울링의 열저항과 시간 사이의 관계를 보여준다. 생물학적인 파울링과 부식에 의한 파울링이 없는 경우에, 보통의 용해된 소금과 부유된 고체입자를 포함하는 고정도 냉각수의 파울링열저항과 시간의 관계는 그림 3과 같다. 일정시간의 경과 후에 파울링열저항은 점진적으로 거의 일정한 값을 갖는다.

실험을 통하여 얻어진 파울링곡선에 curve-fit되는 모델은 Kern-Seet 방정식이다.

$$\frac{dR_t}{dt} = \phi_d - \phi_r \quad (4)$$

여기서, R_t 는 침전된 열저항이며, t 는 시간, ϕ_d 와 ϕ_r 은 각각 퇴적률과 제거율이다. 이 모델에서 제거율은 파울링이 진행되면서 증가되는 것으로 가정하며 퇴적률은 시간에 관계없이 일정하다고 가정한다. 따라서 궁극적으로는 제거율이 퇴적률과 균형을 이루게 되고 파울링열저항은 일정하게 유지되는 것이다. 곡선의 형태는 다음식과 같은 지수함수적인 특성을 갖는다.

$$R_t = R_t^* \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{t_c}\right) \right] \quad (5)$$

여기서, R_t^* 은 점근파울링열저항이며, t_c 는 시간상수이다. 시간상수의 시간이 경과하면 파울링열저항은 점근값의 63%에 도달하게 된다. 그림 3에서 제시한 것과 유사한 일련

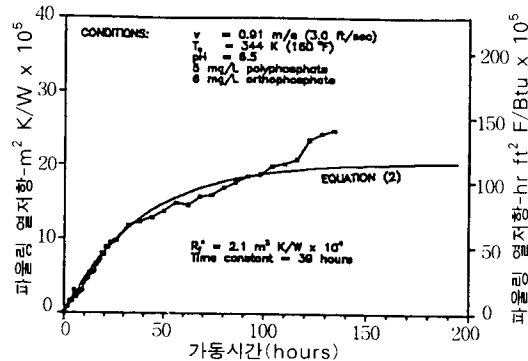


그림 3 시간에 따른 fouling 열저항의 변화

의 데이터들을 여러가지 관표면온도와 다양한 속도에 대하여 얻을 수 있으며 이 데이터들을 이용하여 각각 온도에서 속도의 함수로서 파울링열저항의 근사치를 그림 4와 같이 나타낼 수 있다.

그러나 식 (4)로 나타낸 파울링 모델은 일반적으로는 퇴적률과 제거율에 따라 그림 5와 같은 여러가지 형태의 파울링-시간 사이의 관계선도를 나타내게 된다.

A (linear curve) : 침적은 일정하며 파울링의 탈착은 없는 경우로서 파울링은 선형적으로 증가한다. 통상적인 calcium carbonate에

의한 파울링의 경우이다.

B (falling rate curve) : 약간의 탈착이 있으며 오랜시간이 경과하면 파울링은 일정한 값에 수렴해간다.

C (asymptotic) : 점진적인 파울링의 증가 형태를 보인다. 침적이 증가함에 따라 전단력이 증가하고 이에 따라 탈착도 증가하게 된다. 따라서 부착과 탈착이 일치하여 평형을 이루게 되는데 이와 같은 형태가 파울링의 가장 일반적인 형태이다.

D (sawtooth) : 톱날형 커브로 점근해가는 형태로서 입자의 침적이 많은 냉각탑의 경우 입자덩어리의 순간적인 탈착이 발생하는 파울링 형태이다.

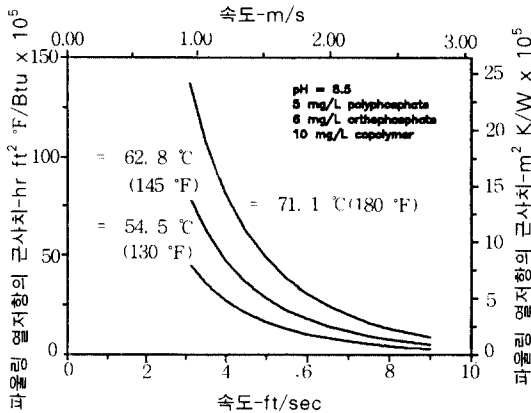


그림 4 냉각수에 대한 fouling열저항의 근사치

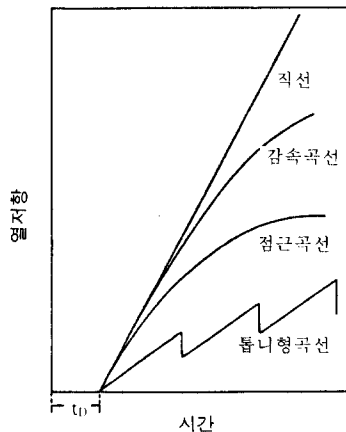


그림 5 fouling열저항의 특성곡선

5. 파울링에 영향을 미치는 인자

다음에 소개하는 작동변수와 설계변수들은 파울링형성에 매우 큰 효과를 미치는 것으로 알려져 있으며 비교적 그 효과들도 잘 연구되어 있다.

1) 유동속도와 전단력

일반적으로 유체속도가 증가함에 따라 열전달과 압력손실이 증가하는데 열전달과 물질전달의 유사성으로 열교환기 표면으로의 파울링 물질의 전달이 증가한다. 동시에 속도의 증가는 벽면에서 전단력을 증가시킨다. 따라서 전단력에 의한 퇴적물의 박리와 물질전달의 증가로 인한 파울링 물질의 열교환기면으로의 이동 때문에 퇴적물을 최소화할 수 있는 최적속도가 있을 수 있다. 따라서 열전달을 최대로 설계하는 경우 심각한 파울링을 일으킬 수 있다.

파울링이 형성된 표면에서의 전단력 τ 는 파울링에 미치는 유동속도의 효과를 비교하기 위한 편리한 매개변수이다.

$$\tau = \zeta (\rho V^2 / 2) \quad (6)$$

여기서, ζ 는 마찰인자로서 속도에 대하여 약 -0.25승의 관계를 갖는다. 파울링의 형

성은 전단력에 반비례하는 것으로 알려져 있으므로, 파울링에 대한 유속의 이론적 효과는 $(V)^{-1.75}$ 이며 실험을 통해서도 유사한 수치가 보고되었다. 따라서 파울링을 방지하기 위해서는 무엇보다 고속유동을 이용해야 한다.

2) 표면온도

표면온도가 높으면 표면에서의 화학반응과 결정의 형성 그리고 고분자화가 촉진된다. 따라서 열교환기의 크기가 비록 커지더라도, 결정화와 폴리머화의 작용온도 이하로 표면온도를 유지하는 것이 바람직하다. 냉각탑에서 사용되는 물의 경우에 최대 적정표면온도는 60℃로 보고되었다. 열교환기 표면의 온도는 열교환기면의 열전달계수와 유체의 평균온도에 관계된다. 표면 온도는 부분적으로 유체의 속도와 관계가 있으며 따라서 열교환기 설계자는 적절한 유체조건을 선정함으로써 표면온도를 조절하여야 한다. 열교환기면에서는 과도한 온도구배를 피해야 한다. 예를 들면 light organic liquid를 증발시키기 위해 지나치게 높은 온도의 가스를 사용하면 액체측의 벽면에 cracking reaction이 발생하여 파울링이 형성된다.

3) 관의 재질

부식성이 없는 재질(Cu-Ni, SS, Ti)로 제작된 열교환기의 경우에는 초기 파울링의 형성이 상당히 지연된다. 구리합금은 물속에서 생물체에 독으로 작용하기 때문에 최근의 환경보호법은 강, 호수 바닷물에서 구리의 사용을 제한하고 있다. 테프론관은 파울링을 억제하고 세정을 개선하지만 값이 매우 비싸다. 쇠파이프에 형성된 녹은 작은 틈새를 형성하는데 이곳이 초기 파울링의 결정성장 또는 생물학적 파울링의 시작점 역할을 한다. electro-polished 316 stainless steel은 침전되는 biofouling의 양이 다른 재료들보다 적다는 연구결과가 보고되었다.

4) 냉각수

냉각수는 파울링을 가장 잘 일으키는 유체

이다. 냉각탑의 물의 경우 수질과 화학적 처리정도에 따라 파울링의 형성 정도에 많은 차이가 생긴다. 이 경우 냉각수의 처리정도를 고려하지 않고 파울링의 열저항을 규정하는 것은 사실상 무의미하다.

5) 불순물

유체속에 포함된 미량의 불순물은 파울링의 초기생성을 단축하거나 파울링을 증대시킬 수 있다. 포함된 불순물의 흔한 예로서는

- 냉각수 내의 탄화수소
- 파울링형성의 촉매로 작용하는 미량의 금속들(Va, Mo)
- 물, 공기, 냉매속의 유탄성분

6) 셸측(shell side)유동

셸 튜브(shell-tube)형 열교환기의 경우에는 파울링을 일으키는 유체가 튜브측을 흐르도록 하는 것이 바람직하는데 이는 전적으로 세정이 편리하기 때문이다. 만약 파울링이 셸 측에 형성된다면 조절판(baffle)을 설치하는데 특별한 주의가 요구된다. 만약 튜브와 조절판 사이의 비율이 바르게 설계되지 않으면 유체의 흐름분포가 악화되고 파울링이 촉진된다. 이 경우에도 저속유동은 파울링형성을 가속화시킨다.

7) 낮은 핀이 달린 관

낮은 핀이 달린 관은 관들 사이에 침전물이 잘 모이므로 파울링이 쉽게 형성된다. 그러므로 낮은 속도(예를 들면, $Re < 1000$)에서는 핀이 달린관이 사용되어서는 안된다. 그러나 교차유동 내에서 핀이 달린 관들은 대부분의 파울링과, 특별히 피각질 침전물에 대하여 보통의 매끄러운 관들보다 파울링이 덜 형성된다. 핀의 날카로운 끝은 파울링층의 파괴를 증진시키고 이에 따라 파울링의 탈착을 증진시켜 세정을 용이하게 한다.

8) 판형 열교환기

물결모양의 주름이 있는 판에 생기는 강한 전단력은 파울링형성을 억제한다. 판형 열교환기의 경우는 셸 튜브열교환기보다 많은 시간이 경과한 후 세정이 요구된다.

9) 기계적인 형상

열교환기의 모든 표면은 흐르는 유체에 의해 쓸리도록 설계되어야 하며 압력은 난류가 형성될 수 있는 값이어야 한다. 난류의 형성은 여러 요인에 의하여 형성되는데, 예를 들면, baffle이나 내부 외부의 휨 등에 의하여 난류가 증가되고 이 증가된 난류에 의하여 파울링이 감소될 수도 있다. 파울링은 시간의 함수이므로 multi-pass 배열을 없애줌으로써 액체가 열교환기 내에 머무르는 시간을 가능한 한 줄여주어야 한다. Shell and tube 열교환기는 세척을 위하여 튜브 부분에 충분한 공간이 있어야만 한다.

10) 열교환기의 구동

아무리 잘 설계된 열교환기의 경우에도 만약 잘못 운전된다면 파울링이 심하게 형성될 수 있다. 따라서 운전자는 설계자가 설정한 조건에 맞추어 열교환기를 운영하는 것이 필수적이다. 열교환기가 설치된 전체 장치중 일부의 기기가 오동작하거나 보수를 위하여 정지되는 경우 열교환기가 받게 되는 유속 및 온도조건은 현저하게 바뀌게 된다. 예를 들어, 유체가 하나의 공정을 bypass하게 되면 하류측 열교환기내의 작동유체 온도가 상승한다. 만약 보수를 위하여 유량을 감소시키면 열교환기 내의 온도가 상승하게 되는데, 이 경우 파울링은 속도와 온도의 상승에 의해 더욱 급격히 증가한다.

11) 다른 변수들

Particulate fouling을 방지하기 위하여 필터를 사용하는 것이 바람직하다. 또한 열교환기의 설계시 파울링 열저항을 적절히 선택하여야 한다. 이 열저항을 너무 크게 설계하면 열교환기가 과잉 설계된 온도를 맞추기 위해서 유속을 변화시켜야 한다. 이 경우 파울링이 형성되는 열교환기의 효율은 급격히 떨어지게 된다.

지금까지 파울링에 영향을 미치는 여러가지 인자들과 이들의 효과를 살폈다. 이에 근거하여 열교환기기의 설계자와 운전자에게

도움이 될 일반적인 지침을 정리하면 다음과 같다.

- 허용되는 압력손실 내에서 유체 속도를 가능한 한 최대로 유지할 것.
- 열교환기의 표면 온도를 가능한 한 낮게 유지할 것.
- 파울링에 영향을 주는 인자를 관찰하여 파울링 저감대책을 수립할 것.
- 유체가 균일한 속도를 유지하고 세척이 용이하도록 간단하게 설계할 것.

6. 파울링의 정량적 측정방법

파울링 정도의 정량적 측정은 열교환기의 효율적인 작동을 위한 정보를 제공하여 주므로 매우 중요하다. 현재 일반적으로 사용되는 방법은 파울링 layer의 형성을 관찰하거나 열전달 성능의 감소를 감지하거나, 전체적인 압력강하 정도의 증가로부터 파울링의 정도를 판단하는 것이다. 그림 6은 파울링에 의한 열저항을 산출하는 장치이다.

원형 코어에는 발열원이 설치되어 있으며 동심원관으로 가열대상 유체가 흐른다. 외관은 투명하게 외부에서 관찰이 가능하고 설치된 열전대는 가열원관의 벽면 온도 T_{ic} 와 유체온도 T_b 를 측정한다. 이때 전체 열저항은 다음의 식으로 표시한다.

$$R_t = \frac{(T_{ic} - T_b)}{(Q/A)} = R_w + R_f + R_{tf} \quad (7)$$

여기서, R_w , R_{tf} 는 각각 벽면의 열저항, 대상유체의 열저항이다. 이 값들은 알려진 Correlation에 의해 구해지며 가열열량은 측정된다. 따라서 파울링에 의한 열저항을 구할 수 있다. 그림 7은 열전대 근처의 벽온도 분포를 나타낸다.

벽면의 파울링이 심할수록 유동에 의한 냉각이 부족하게 되므로 가열벽면의 온도가 상승하고 따라서 온도차이는 증가한다.

그림 8은 파울링에 의한 벽면의 전단력의

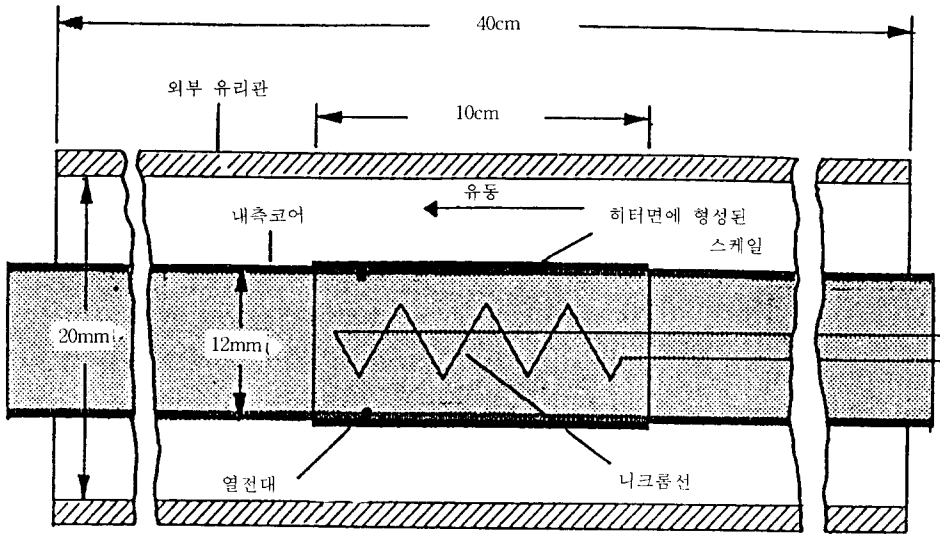


그림 6 열저항을 이용한 fouling 측정장치

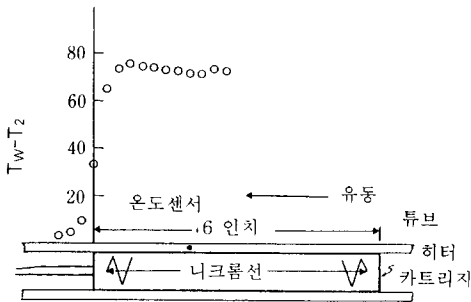


그림 7 열전대 근처의 벽온도분포

변화를 시험하기 위한 장치이다. 작동유체는 속도가 감소함에 따라 반경방향으로 흐르게 된다. 파울링 침적물이 형성되는 위치를 조사함으로써 상당전단력(equilibrium shear stress)을 산출한다.

7. 파울링의 억제와 제거를 위한 방법

열교환기에 발생하는 파울링을 방지하는 방법은 전술한 바와 같이 파울링의 원인을 파악하여 열교환기를 설계하는 것이 가장 효과적이다. 그러나 설계에 의하여 파울링을

근본적으로 방지하기는 매우 어렵다. 따라서 주기적인 세정이 요구된다. 표 1은 열교환기에 사용되는 각종 세정방법으로 세정시 운전을 중단하는지의 여부에 따라 off-line과 on-line 방식으로 구분된다. on-line technique은 시스템을 가동시키고도 세정이 가능하므로 경비면에서 보다 유리하다. 그러나 sponge ball 등을 순환시키는 on-line technique은 부대장치가 소요되어 규모가 매우 큰 열교환기 외에는 경제적 단가가 높아지는 단점이 있다.

1) 파울링의 방지를 위한 일반적인 원칙

제5절에서 소개한 파울링에 영향을 미치는 인자들을 다시 정리하면 열전달면의 구조, 열전달면의 재질, 파울링 유체와 고체 사이 경계면의 온도, 침적물의 온도, 열전달면을 통과하는 유체의 속도, 파울링 유체의 특성 등이다. 이와 같은 사실로부터 파울링을 방지하는 원칙적인 방법이 다음과 같이 요약될 수 있다.

- (1) 열교환면과 유체내 입자 사이에 반발력이 형성되도록 열교환기를 설계한다.
- (2) 용액의 pH 즉, 정전기적 성질을 변경

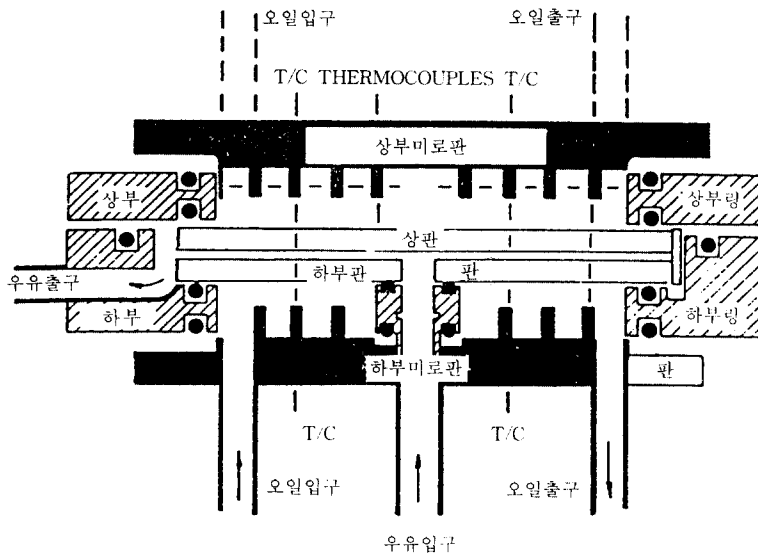


그림 8 전단력을 이용한 fouling 측정장치

- 시켜서 강한 반발력을 형성시킨다.
- (3) 이온 결합을 약화시키기 위하여 칼슘 이온을 가능한한 억제시킨다.
- (4) pH나 온도를 변경시키고 표면을 깨끗하게 유지하여 화학반응을 억제시킨다.
- (5) 난류를 형성시켜 준다든가, 높은 유속 조건을 만들어 줌으로써 유동의 정체를 없애는 유동조건을 형성하고 강한 drag

표 1 파울링 제거대책

연속운전방식	운전중단방식
첨가제	분해와 수동 세정
억제제	창
스케일 방지제	분사액체
산	증기
	공기분사
연속운전 세정	
스폰지볼	기계적 세정
브러쉬	드릴링
초음파 방식	스크레이퍼
체인과 스크레이퍼	
	화학적 세정
열 충격	

표 2 대표적인 화학적 첨가제와 그 응용예 (T. R. Bott)

파울링 종류	첨가제
입자 파울링	분산제 또는 응고제
생물학적 파울링	
(a) 미생물	살균제, 분산제, biostats
(b) 유기생물	살균제
석출파울링	분산제, 결정 변형제, 석출지연제
부식파울링	억제제
화학반응	산화방지제, 할성방해제, 분산촉진제, 청정제
연소생성물(배기가스)	중화제, 퇴적변형제

force의 조건을 만들어 준다.

2) 파울링형성의 지연을 이용하는 방법

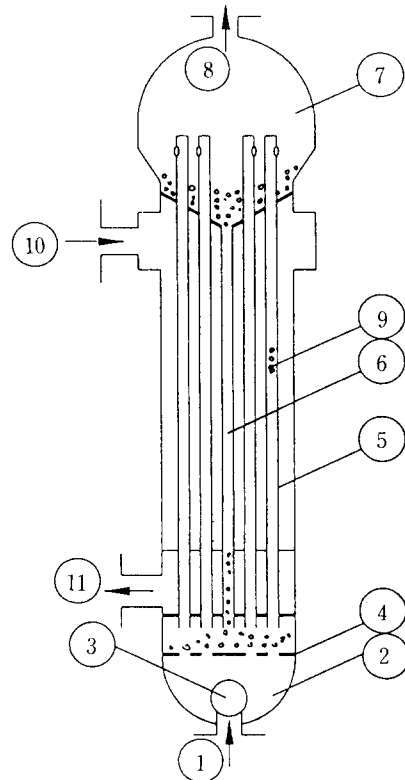
앞서의 그림 5를 보면 파울링이 형성되기 전에 일정시간의 지연이 있다. t_b 로 표시된 이와 같은 시간지연은 일반적으로 표면이 매끄럽거나 잘 부착이 일어나지 않는 표면의 경우 매우 길다. 그러나 궁극적으로는 파울링이 형성되는데 이 시간지연을 가급적 늘려 주는 것도 하나의 파울링 저감 방법이 될 수 있다.

3) 첨가제를 사용하는 방법

첨가제를 섞을 때 또 다른 고려는 첨가제가 결국은 주위로 방출되므로 이로 인한 환경오염을 고려해야만 한다. 제2절에서 제시한 파울링의 종류에 따라 적용되는 대표적인 화학적 첨가제를 정리하면 표 2와 같다.

4) 순환유동층 열교환기

순환유동층 열교환기는 particle의 자연순환에 의하여 열교환기의 내부가 세정되는 열교환기로서 그 개략도를 그림 9에 나타내었다. 순환유동층 열교환기의 particle순환원리는 다음과 같다. 주변의 튜브에 의하여 상승한 구슬은 상부의 확대된 단면에 의하여 속도가 감소된다. 따라서 자중에 의하여 바닥으로 떨어지게 되는데 이 때, 경사에 의하여 가운데 튜브로 굴러가게 된다. 가운데 튜브



- ① 작동유체입구 ⑤ 상승관 ⑨ 순환입자
- ② 입구철퍼 ⑥ 하강관 ⑩ 중기 입구
- ③ 체크볼 ⑦ 분출철퍼 ⑪ 응축수출구
- ④ 분배관 ⑧ 작동유체 출구

그림 9 경사면을 이용한 순환유동층 열교환기

는 하부에 원액의 상승이 가급적 적게 되도록 정지판을 둠으로써 가운데 튜브로 가는 유량은 매우 적게 된다. 더욱이 가운데 튜브의 상층부에서는 쌓이는 구슬의 밀도에 의하여 압력손실이 상승하게 된다. 정지판과 상승된 particle들로 인하여 가운데 튜브의 내부는 주변 튜브 내부보다 압력손실이 크므로 주변 튜브에서는 지속적인 원액의 상승과 함께 particle의 상승이 일어나고 가운데 튜브에서는 구슬의 하강과 함께 일부 원액의 하강이 이루어진다.

particle의 순환에 의하여 열전달계수가 파울링이 형성되기 이전의 값으로 회복되는데 이는 열교환기의 내부에서 순환되는 particle들이 열교환기의 벽면을 충돌하면서 스케일을 제거한 결과이다. 유체의 속도가 증가할수록 particle이 벽에 가하는 충격도 증가하며 특정한 속도에서는 particle이 정지한 상태로 벽면을 계속 두드리는 것이 관찰되었다.

5) 초음파를 이용한 방법

현재 사용되고 있는 스케일 처리 방법들은 대부분 정기적인 세정에 의한 청관작업이나 용수중에 약품을 투입하여 스케일의 발생을 억제하는 방법이 적용되고 있다. 그러나 이 방법들은 많은 노력과 비용이 요구되어 경제적으로 바람직하지 못하며, 산이나 염계 등의 화학약품의 사용에 따른 환경오염 문제가 대두되고, 관벽의 마모나 부식에 의한 배관설비의 수명단축과 청관작업시 보일러의 가동이 중지되어야 하는 문제점이 있다. 이에 따라 배관시스템에서 스케일 방지를 위한 여러 연구가 시행되어 최근에는 초음파를 이용한 스케일 방지기술이 적용되고 있다. 이 기술은 초음파 진동기기를 보일러에 부착할 경우 관벽에 형성된 스케일의 제거뿐만 아니라 스케일의 생성을 근원적으로 억제시켜 주는 효과가 있는 것으로 알려져 있다.

초음파 스케일 방지기의 원리는 열교환기의 배관에 음향진동을 부여하여 관벽에 생성

되는 스케일을 억제하는 방법으로 음향진동은 증폭된 전기펄스신호를 초음파진동자에 부가하여 발생시킨다. 초음파 스케일 방지기는 크게 발전기, 증폭기, 진동자의 세부분으로 구성되며 그 개략적인 회로도를 그림 10에 나타내었다.

초음파 스케일 방지기는 사용 주파수 및 출력을 조정하는 경우, 음향에너지가 적용부분을 벗어나는 높은 영역이나 혹은 발생진동이 장치자체의 공명주파수 수준보다 낮은 영역이 되지 않도록 주의해야 하며 스케일 입자의 방사진동운동에 최적 수준이 되도록 해야 한다.

초음파진동은 매체를 통해서 전달되며 음파를 가장 잘 전달하는 것음 금속이다. 초음파 진동의 전달매체는 비슷한 재질 즉, 임피던스(impedance)가 같은 매체 사이에서 전달이 잘되고 재질이 다르면 음파가 반사될 수 있으나 큰 문제는 없다. 따라서 변환기의 도파관(waveguide)이 강철인 경우 같은 재질인 철이나 스테리스강 등으로 된 대부분의 보일러에는 그 성능이 양호하게 나타난다.

초음파에 의한 스케일 발생의 억제 및 제거현상은 공동현상(cavitation) 즉, 기포의 생성과 붕괴현상에서 발생하는 극고온과 고압에 의한 충격파를 이용하여 파울링을 제거하는 것이다. 액체속에 단위면적당 3.5kW 이상의 강도를 가진 초음파를 가하면 공동현상이 발생한다고 보고되었다. 공동현상은 초

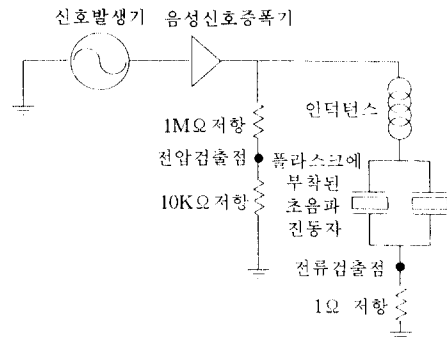


그림 10 초음파스케일 방지기의 회로도

음파장뿐만 아니라 순간적인 압력의 강하가 발생하는 환경, 예를 들면, 선박의 스크류를 고속으로 회전시키는 경우에도 날개의 이면에서 발생한다. 이 경우의 충격파는 표면을 부식시키는데 초음파 스케일 방지기기는 이 현상을 적극적으로 이용하는 것이다. 최근 단일기포의 생성과 붕괴과정에 대한 연구로서 초음파가 조사된 액체내에서 진동하는 기포로부터 빛이 발생하는 sonoluminance에 대한 연구가 진행되고 있다. 이 현상은 기포가 위치한 액체의 종류와 용기의 형태 및 액체의 체적에 따라 정해지는 매질의 공진주파수로 초음파를 진동시키고 강도를 증가시키면 이 음파에너지가 미소기포에 고도로 집중되어 기포가 주기적으로 수축과 팽창을 반복하면서 빛을 발산하는 것이다. 또한 초음파장내에서 고체벽 근처의 액체가 붕괴하는 경우 발생하는 액체제트가 벽면에 미치는 충격에 대한 연구도 유럽을 중심으로 진행되고 있다.

그림 10과 동일한 회로를 구성하고 Langevin 진동자를 사용하여 공동현상을 이용한 몇 가지 실험을 소개하기로 한다. 첫번째의 실험은 Langevin 진동자의 끝에 알루미늄테이프를 부착하고 물속에서 진동시킨 결과 표면에 작은 구멍이 생기며 부식되는 것을 관찰하였다. 두번째로 100 ml체적의 구형 플라스크에 물을 채우고 주사용 바늘을 플라스

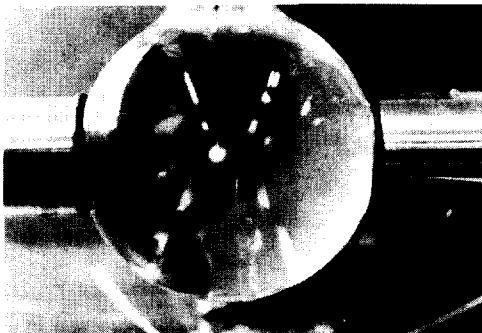


그림 11 초음파가 조사된 구형용기의 중심에 집중된 기포의 형상

크의 중심에 위치시킨 후, 대략 25 KHz의 주파수로 공진시킨 결과 용기의 중심에 구름모양의 강렬한 덩어리가 형성됨을 관찰하였다. 그림 11은 실험예를 나타내고 있으며 이것은 진동에너지가 용기의 중심에 집중됨을 나타낸다.

이와 같이 정성적인 관점에서는 진동하는 기포의 파괴효과가 흥미롭게 소개되고 있으나 아직 정립된 이론도 없고 정량적인 실험데이터도 없다. 그러나 이 방법은 파울링 제거의 적극적인 방법으로서 열교환기의 구조에 대한 제한도 없기 때문에 앞으로 많은 연구와 응용이 기대된다.

8. 맺음말

파울링은 열교환기에 형성되는 열저항으로 에너지 손실에 많은 영향을 미친다. 그러나 파울링은 그 예측이나 감소 또는 제거가 매우 어려운 것으로 인식되어 왔다. 작동유체 자체를 청결하게 유지함으로써 파울링을 감소할 수도 있으나 작동유체 자체의 특성 때문에 본질적으로 작동유체를 청결하게 유지할 수 없는 경우가 대부분이다. 즉, 폐열 회수의 대상이 되는 액체가 하천수나 생활하수인 경우 작동유체를 청결하게 유지함으로써 파울링을 저감시키는 방법은 타당치 않다. 일본의 폐열회수 프로젝트와 담수화 프로젝트에서 특이한 점은 두 가지 프로젝트에서 열교환기면의 파울링 문제 해결을 전열 축진의 내용과 거의 비슷한 비중으로 다루고 있다는 점이다. 파울링은 오래 전부터 열시스템설계자의 주요 관심사였으나 큰 진전은 없었다. 그러나 현재는 주변기술이 발달로 더 이상 연구 불가능 영역은 아닐 듯 싶다.

참고문헌

- (1) Klaren, D. G., 1981, "Fluid Bed Heat Exchangers," *Resources and Conservation*,

- Vol. 7, pp. 301~314.
- (2) Rautenbach, R., Erdmann, C. and Kolbach, J. St., 1991, "The Fluidized Bed Technique in the Evaporation of Wastewaters with Severe Fouling/Scaling Potential-Latest Developments, Applications, Limitations," *Desalination*, Vol. 81, pp. 285~298.
- (3) Darby, R., 1986, "Hydrodynamics of Slurries and Suspensions," *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, by N. P. Cheremisinoff, Gulf Publishing Co., Vol. 5-1, p. 49~91.
- (4) Barnea, E. and Mizrahi, J., 1973, *Chem. Eng. I.*, Vol. 5, p. 171.
- (5) Durand, R., 1953, *Proceed. Minn. Hydraulic Conv.*
- (6) McAdams, Heat Transmission
- (7) J. Feng, H. H. Hu and Joseph, D. D., 1994, "Direct Simulation of Initial Value Problems for the Motion of Solid Bodies in a Newtonian Fluid, *Part 1. Sedimentation*, *J. Fluid Mech.*, Vol. 261, pp. 95~134.
- (8) Andrew J. Hogg, 1994, "The Initial Migration of Non-neutrally Buoyant Spherical Particles in Two-Dimensional Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 272, pp. 285~318.
- (9) Jeffrey, R. C. and Pearson, J. R. A., 1965, "Particle Motion in Laminar Vertical Tube Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 22, pp. 721~735.
- (10) Bott, T. R., 1995, "Design and Operation of Heat Exchange Equipment for fouling Conditions," *Proc. Fouling Mitigation of Industrial Heat Exchanger*.
- (11) Yiantsions, S. G. Andritsos, N. and Karabelas, A. J., 1995, "Modeling Heat Exchanger Fouling: Current status, Problems and Prospects," *Proc Fouling Mitigation of Industrial Heat Exchanger*.
- (12) Hill, R. A. and Barber, B. P., 1995, "Producing Light from a Bubble of Air," *Scientific American, February*, pp. 78~80.

