

RO분리막 공정에서 온도와 압력이 유량에 미치는 효과

박영규 · 오세현 · 오호영 · 장일현 · 송석룡

울산시 동구 전하동 1번지 현대중공업 현대종합연구소 환경연구실

1. 서론

폐수와 하수처리에서 양질의 재생수를 얻기위하여 고분자막을 이용한 폐수재활용에서 나타나는 공정상 문제점을 고찰하였다. 본 연구에서 사용한 폐수는 처탑공장의 폐수로서 RO막을 이용한 폐수의 재이용공정개발을 목표로하고 있으며, pilot실험을 토대로 폐수의 적용성 검토가 행하여졌다. 사용된 막의 종류는 중공사막형의 막으로서 막내의 층류 흐름의 응용은 투석막, 기체분리, 증금속의 추출등 상당한 관심속에 있다. 여기서 중공사막과 같은 관(Cylindrical)형의 막 구조에서 물질과 에너지 이동현상은 막분리공정을 이해하는 중요한 물리적으로찰로서 막투과도를 높일수 있을 뿐만 아니라 운전온도에의해 중공사막 RO막내의 유량변화에 주요한 변수가 될 수 있다.

2. 이론

중공사막의 원통형관에서 층류의 흐름은 정상상태에서 Viscous항이 무시된 상태에서 에너지방정식을 이용 하였고, cylindrical 에너지방정식중 $v_x \partial T / \partial x$ 항은 무시 되지않지만 막 관내에서 완전히 발달된 층류의 흐름에서는 $v_r=0$ 이고 원통형의 좌표에서 얻어진 미분방정식은 다음과 같이 표현될 수있다.

$$2\rho C_p V_m \left[1 - \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 \right] \frac{\partial T}{\partial x} = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (1)$$

여기서 V_m 은 평균유속이고, T 는 온도, k 는 열전도도, C_p 는 비열 그리고 ρ 는 액체의 밀도이다. 방정식 (1)에서 적용된 경계조건들은 원통형관 중앙($r=0$)에서 온도는 일정하고 중공사막 표면($r=R$)에서 온도는 일정($T=T_o$)하다고 할때 방정식(1)은 Reynold수와 Prantl수에 의해 무차원화 시킬수있다. $(k/\rho C_p) \partial^2 T / \partial x^2$ 항은 막관내 입구가까이를 제외하고는 상당히 적으므로 여기서는 무시하였고 그 결과는 다음과 같다.

$$(1-r^*) \frac{\partial T^*}{\partial x^*} = \frac{1}{N_{Re} N_{Pr}} \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left(r^* \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right) \quad (2)$$

x^* 와 r^* 는 좌표상의 무차원항이며 방정식(2)에서의 온도의 분포는 흐르는 관류의 유속으로 표시될 수있다. 방정식(2)의 계산은 점근적(Asymptotic)방법에 의해 풀이되었다.

3. 실험

그림1에서와 같이 pilot plant는 전·후처리로 나누어서 생각해 볼 수있으며 전처리에서 Filter와 UF막을 이용하였다. 원수는 lime clarifier로 처리된 배출수이며, 막모들의 scale침착을 방지하기위해 pH의 조정과 lime clarifier에서 부유물질로 부터 고압펌프및 막보호를 위해 고

압펌프앞에 카트리지 필터를 설치하였다. UF의 재질은 polysulfone의 중공사막이고 후처리인 RO로서 재질은 polyamide composite의 나권형막을 이용하였다. 막의 가수분해 현상을 방지하기 위해 산주입으로 pH를 5.5정도로 조정하였고 UF와 media filter의 이용은 전처리공정중 유기물과 무기물 제거를 비롯하여 흡착과 정밀여과를 거쳐 비용절감을 위해 단순화 하였다.

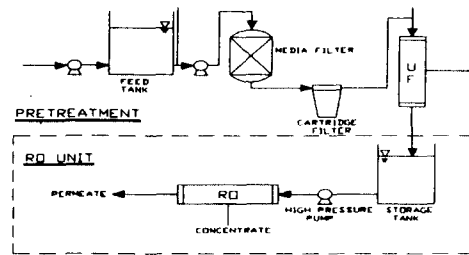


그림 1: 폐수재활용을 위한 전·후처리 공정도

4. 결과와 고찰

본 연구에서 사용된 운전조건에 따라 막공정상의 유량은 달라 질 수있다. 폐수재활용을 위해 RO운전압력은 $10, 15 \text{ kg/cm}^2$ 와 온도 $5\text{-}25^\circ\text{C}$ 범위에서 적용되었는데 막을 통과하는 물의 유속은 온도에 따라 달라질 수 있는데, 막의 유속은 1°C 의 온도 상승에 따라 2.5~3% 가량 변하게 된다. 예를들면, 그림 2에서 보듯이 10kg/cm^2 , 20°C 에서 운전되는 막 공정에서 공급되는 물의 온도가 25°C 로 증가하게 되면 22% 가량의 증가를 나타낸다. 온도는 물의 유속에 영향을 주지만 RO 시스템에서 막내의 오염이 없이 이상조건에서 작동된다면 작동시간에 따라 물의 유속은 줄어들게 되는데, 이 유속의 감소는 막의 치밀함(Compaction)에 의해 일어난다. RO막을 압력증가와 함께 투과유속이 직선적으로 증가 하는데 그림2에서 얻어진 결과에서 실제 유출유량은 운전압력에 비례하며, 15kg/cm^2 인 경우에는 온도 5°C 증가에 원수의 Flux는 그림3에서 볼수 있듯이 40%이상 증가하였다. 높은 온도에서는 높은 물의 유속으로 25°C 에서 보다 30°C 에서는 15%이상 더 높아지는데, 1년을 기준으로 하였을 경우에 25°C 에서는 물의 유실이 21% 적게 유출되고 30°C 에서는 최초의 유출물의 양과 비교하였을때 15% 정도 적게 유출 된다. 이와같이 물의 유속과 온도와의 관계는 Hollow fiber막에서 다음과 같은 식을 이용하여 계산해 볼 수 있다. 방정식(1)로부터 막관내에서의 유속과 온도와의 관계를 도출해 볼수있다. 방정식(2)에서 Reynold수(N_{Re})변화에 따른 온도변화는 층류인경우에서 Creeping지역에 비교해서 유속의 흐름의 속도가 증진 할수록 온도변화는 크게 변화지 않음을 알수 있다. 그러나 Reynold수가 낮은 영역에서는 온도의 변화의 분포도가 크다. 또 다른 온도 조건은 막의 재질의 가수분해 현상이 온도와 함께 증가 되므로, 막 재질에 따른 막 성능의 올바른 보정에 대한 정보가 있어야 한다. 그러므로 과도의 온도 조건하에서 막 공정을 운전하게 되면 공정내에서의 온도와 압력조건의 부적합으로 실패할 수 있다. 그러므로, 막 공정상에서는 적절한 온도조건을 유지하기 위해 열교환기를 부착해야 하며, 온도조절은 최상의 성능을 유지하면서 막이 치밀해져서오는 유실을 막을 수 있다.

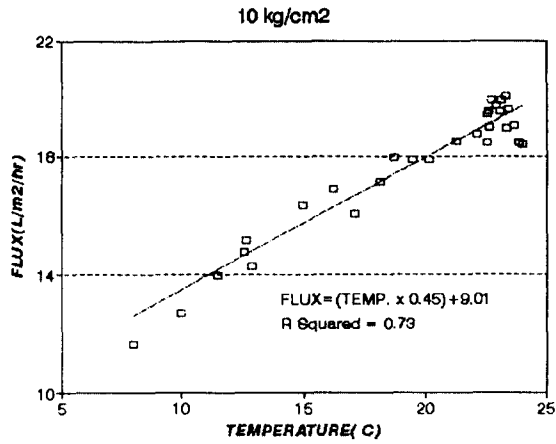


그림2: 압력 10kg/cm²에서 온도변화에 따른 유량변화

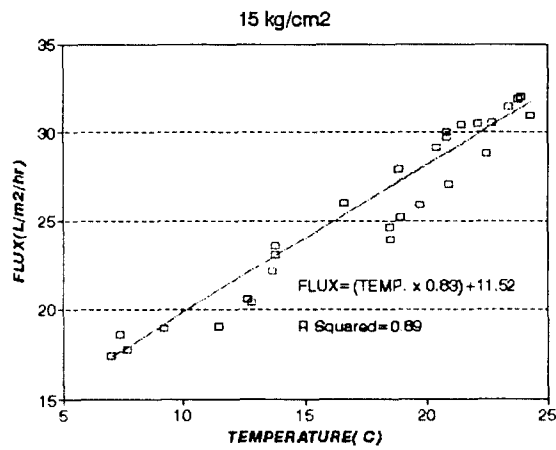


그림3: 압력 15kg/cm²에서 온도변화에 따른 유량변화

온도 차이에 따른 막의 수축과 이완.