

일반강연 II-11

파일럿 투과증발장치에서 투과액의 상전이의 체류액의 온도강하에 관한 연구

송 규민, 홍 원희
한국과학기술원 화학공학과

1. 서론

투과증발은 일반 막공정과 달리 투과물의 상전이와 이로 인한 체류액의 온도강하가 존재하기 때문에 열전달현상을 간과할 수 없다. 즉 막을 통한 열전달이 다른 막공정에 비해 현저하게 차이가 난다는 것이다. 이러한 현상은 모듈의 길이가 짧거나 모듈을 항온조에 담가 수행하는 실험실 규모의 투과증발조업에서는 거의 발견되지 않는다. 그러나 투과증발장치가 커져 모듈의 항온유지가 불가능하고 사용되는 막도 상업화되어 투과속도가 비교적 큰 것을 사용하는 파일럿 규모의 실험에서는 쉽게 나타나는 현상이다. Rautenbach 등이 셀룰로오즈 아세테이트 막을 이용한 물의 투과증발 실험에서 막간 온도강하가 5 ~ 12 K 정도 일어났음을 보고한 바 있었다. 이때 온도강하는 조업조건에 따라 달라졌으며 유속이 낮을 수록 증가함을 보였다. 본 연구에서는 투과증발이 일어나는 모듈내에서 열전달현상을 열공급비를 정의하여 해석하였으며, 상전이 현상이 막분리효율에 끼치는 영향을 설명하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구를 위해 설치된 파일럿 투과증발장치는 이미 상업화되어 잘 알려진 Carbone Lorraine사의 상품명 PERVAP² separator였다. 사용된 모듈방식은 관틀형으로 체류액과 접촉하는 막의 총면적은 1 m²이었다. 막의 유효층을 구성하는 성분은 가교된 PVA(polyvinylalcohol)이다. 공급액의 에탄올농도는 약 93 wt.%였고, 저장용기에 들어가는 초기공급액의 양은 15 L였다. 공급액의 온도는 67, 71 그리고 76 °C, 유속은 20, 40 그리고 60 L/hr로 하였고 응축기와 포집기의 온도는 0 °C였다. 시간에 따른 체류액과 투과액의 에탄올 농도와 투과액의 양을 시간에 따라 측정하였으며, 측정된 값으로부터 투과증발막의 선택도와 플럭스를 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

열공급비는 투과액이 증발하는데 투입된 총에너지 중에서 막상부의 유체로부터 공급된 에너지의 비로 정의되며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\phi = - \frac{\rho' FC' \Delta T_z}{PA_p \Delta H_v} \quad (1)$$

따라서 상전이에 필요한 체류액으로부터 전부 공급받는 경우 열공급비 ϕ 는 1이 되며, 이때는 ΔT_z 이 최대값을 갖는다. 따라서 열공급비 ϕ 는 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\phi = \frac{\Delta T_z}{(\Delta T_z)_{\max}} \quad (2)$$

열공급비가 모듈내 온도구배에 미치는 영향을 계산하면 열공급비값이 증가할 수록 유출액의 온도강하가 커짐을 알 수 있다. 열공급비 ϕ 는 식 (1)에서 이미 정의한 것과 같이, 열공급비가 커진다는 것은 투과액이 증발하는데 필요한 열에너지를 모듈내를 통과하는 유입액으로부터 더 많이 공급 받는다는 것을 의미한다. 따라서 열공급비가 커질 수록 모듈내 입구로부터 출구로의 온도구배는 더욱 커지게 된다. 위의 조건에서 ϕ 가 0.1일 때는 약 15 °C 정도의 온도강하가 일어났지만, ϕ 가 0.3일 때는 약 25 °C, ϕ 가 0.5일 때는 약 31 °C 정도의 온도강하가 일어났다. 또한 공급액의 온도에 따라 모듈내 온도변화도 영향을 받게 된다. 공급액의 온도가 증가할 수록 온도강하폭은 점점 커진다. 즉 공급액의 온도가 62 °C일때의 온도상하는 약 17 °C인 반면, 76 °C일 때는 약 25 °C으로 증가하였다. 이렇게 공급액의 온도가 증가할 수록 모듈내 온도강하가 커지는 이유는 상전이에 필요한 에너지가 더 많이 필요하기 때문이다. 즉 공급액의 온도가 높아지면 그 만큼 투과액이 증기하게 되고 상전이에너지가 더 필요하게 된다. 따라서 동일조건에서 공급액의 온도가 증가할 수록 모듈내 온도강하는 커지게 되는 것이다.

4. 결론

파일롯 부과증발장치를 이용한 에탄올 탈수공정에서 모듈내 온도강하를 측정하여 열공급비를 계산하였다. 이때 공급액의 유속이 증가할 수록 열공급비는 감소하였다. 열공급비가 커질수록 모듈내 입구로부터 출구로의 온도구배는 더욱 커졌다. 이로 인해 물질전달계수의 감소폭이 증가하였다. 따라서 공급액의 유속변화는 막상부에서의 물질전달저항의 변화 뿐만 아니라, 상전이에 필요한 에너지 공급문제에 의해 나타나는 온도강하차이를 통해 투과플럭스를 변화시킬 수 있다. 이러한 현상은 상전이가 없는 다른 막공정에서는 전혀 고려의 대상이 되지 않았지만, 투과증발과 같이 상전이가 존재하는 공정에서는 간과할 수 없음을 보여준다.