

## 장애물에 의하여 형성된 난류가 물질전달에 미치는 영향

김의정, 정건용\*  
 울산대학교, 화학공학과  
 \*한국과학기술연구원, CFC대체기술센터

## The Effect of Turbulent Flows Induced by Obstacles on Mass Transfer

Eui Jung Kim, Kun Yong Chung\*  
 Department of Chemical Eng., University of Ulsan  
 \*CFC Alternatives Technology Center, KIST

## 서론

분리막은 혼합물중에 특정성분만을 선택적으로 통과시키며 용질을 배제시킨다. 그러나 용질의 물질 확산계수는 작아서 용질이 막 표면에 축적되고 더 나아가서 용질층 (cake) 을 형성할 수도 있다. 이같은 농도분극화 현상은 유체 이동현상에 직접적으로 영향을 주는 용액의 점도 증가등 물리적 성질을 변화시킬 수 있으며 삼투압의 증가와 물질 경계층내에 유체 역학적 저항등을 증가시키므로 분리 성능을 급격히 저하시키는 주요 원인이다. 농도 분극화 현상을 감소시키는 방법은 크게 세가지 정도로서 (1) 화학적 처리로 분리막 표면의 특성 전환, (2) 원료 용액의 전처리등으로 고형 함유량 조절 그리고 (3) 난류 또는 유체의 불안정성을 이용한 물질전달 계수 향상등이다<sup>(1)</sup>. 본연구에서는 유체역학에 입각한 방법으로 모듈내에 장애물을 설치하여 난류를 형성시킴으로써 이로 인한 용질의 물질전달에 미치는 영향을 이론적으로 고찰하였다. 장애물에 의하여 형성된 와류는 분리막에서 배제된 용질이나 현탁입자들을 Bulk solution 과의 혼합을 촉진시켜 농도분극화 현상을 감소시킬 수 있으며 궁극적으로 분리 성능을 크게 향상시킬 수 있다.

## 이론

본 연구에서 설정한 해석모델은 Figure 1 에 나타난 바와 같으며 수치적으로 모델내의 속도, 압력 그리고 농도분포를 구하였다. 분리막은 직각형태의 장애물이 위치한 상하면에 놓여 있으며 Centerline (C/L) 을 중심으로 상하가 대칭이고 분리막의 폭이 충분히 넓다고 (z 방향) 가정하였다. 따라서 설정한 수치계산 영역은 유로의 절반이며 (x,y) 2차원적 해석을 시도하였다. 유체이동 현상을 해석하기 위한 운동방정식, Low Reynolds형  $k-\epsilon$  난류방정식<sup>(2)</sup> 및 용액농도에 관한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{D(\rho u_i u_j)}{Dt} = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( (\mu + \mu_t) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial (\rho k)}{\partial x_i}$$

$$\frac{D(\rho k)}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) - \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G - \rho \varepsilon - 2\mu \left( \frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_i} \right)^2$$

$$\frac{D(\rho \varepsilon)}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) - \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon) + \frac{2\mu \mu_t}{\rho} \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \right)^2$$

$$\frac{D(\rho C)}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho D - \frac{\partial C}{\partial x_i} \right)$$

여기에서

$$G = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad \mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}$$

$C_\mu$	$C_1$	$C_2$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

적용한 경계 및 입구조건은 아래와 같다. 원료 공급속도에 대한 투과선속 ( $v_w$ )의 비는  $10^{-5}$  내지  $10^{-3}$  로 x 축에 따라서 일정하다고 가정하였으며 이 범위는 역삼투로부터 한외여과와 정밀여과를 포함한다.

- inlet :  $u = u_o, v = 0, C = C_o$
- centerline :  $\frac{\partial u}{\partial y} = 0, v = 0, \frac{\partial C}{\partial y} = 0$
- obstacles:  $u = v = 0, \frac{\partial C}{\partial n} = 0$
- membrane:  $u = 0, v = v_w, vC - D \frac{\partial C}{\partial y} = 0$
- outlet:  $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial x} = 0$

기본방정식을 이상의 경계/입구 조건과 함께 Patankar<sup>(3)</sup>에 의해서 제안된 Finite Volume Method 를 기본으로 하여 유한 차분화하였으며 수치해를 위하여 SIMPLER (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation Revised) 알고리즘<sup>(3)</sup>을 사용하였다.

## 결 과

Reynolds 수는 24,000 까지, 장애물의 높이는 유로높이 ( $h$ ) 의 25 - 75 % 까지 변경시켜 계산하였다. 두 장애물 사이의 거리를 변경시키면서 장애물 중간인 B 점에서의 농도를 나타내면 Figure 2 와 같다. B 점이 첫번째 장애물로 부터 떨어짐에 ( $x$  값이 증가) 따라서 분리막을 통하여 용매가 제거되므로 Bulk solution 중 용질의 농도는 증가하며 일반적으로 분리막 표면에서의 농도도 증가한다. Reynolds 수가 증가하면 분리막 표면에서 용질의 물질전달 효과가 커져서 농도분극 현상이 감소하고 분리막 표면에서의 농도도 감소한다. 그러나 Reynolds 수가 2,400 인 경우, 두 장애물간 거리 B 에서의 농도는 위치에 따라서 최저점이 존재하며 최저점 이상에서는 농도분극화 현상이 더욱 심각하다. 또한 분리막 투과선속이 증가함에 따라서 분리막에서 제거되는 용질이 증가하므로 분리막 표면농도가 급격히 증가한다. 따라서 농도분극화 현상을 극소화 시킬 수 있는 Reynolds 수, 투과선속 그리고 장애물의 최적형태가 존재함을 알 수 있다.

### 참고문헌

1. Belfort, G., Davis, R. H. and Zydney A. L.: J. Memb. Sci., 96, 1 1994.
2. 保原 充, 大宮司 久明, "數値流體力學", 東京大學出版會, 243, 1992.
3. Patankar, S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill, 1980.

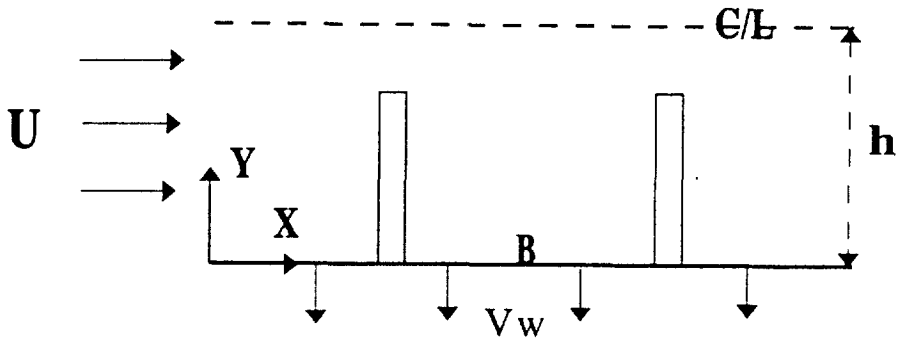


Figure 1: Flow Channel Configuration

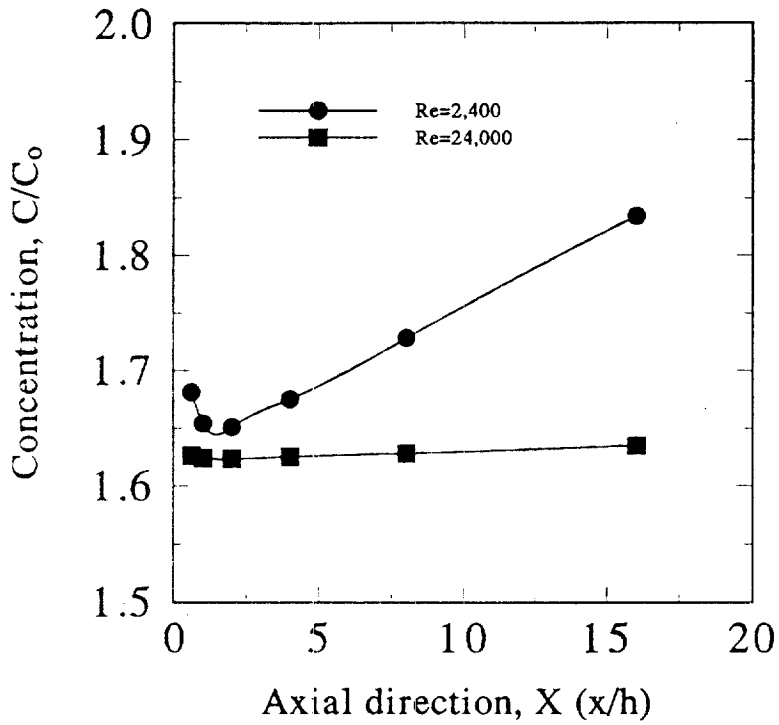


Figure 2: Concentration at the various B point (center of the obstacles in Fig. 1)