

YEF(Yonsei End Free) 중공사막 모듈의 활성슬러지 여과 특성

장진호*, 권오성, 노수홍
(주)삼호특수, 연세대학교 환경공학부

Filtration Characteristics of YEF(Yonsei End Free) Hollow Fiber Membrane Module

Jin Ho Chang*, Oh Sung Kwon, Soo Hong Noh
Samho Specialty Ltd.*, Yonsei University

1. 서론

침지형 분리막 생물반응조를 운영하는데 있어서 막오염 현상의 메커니즘과 막오염을 제어하는 방법들 그리고 막 투과 유속을 증가시키는 방법에 대하여 연구해 왔고 계속 연구가 진행되고 있다. 그 중의 한 방법이 유체 역학적인 방법에 의하여 농도 분극과 막오염을 감소시키는 방법으로 막 표면의 유속을 증가시켜 전단력을 크게하여 막오염을 억제하는 방법이나 이 방법은 분리막 모듈이 폭기조에 침지된 형태가 아닌 외압형의 형태에서 많이 연구되었으며 막표면의 유속을 증가시키기 위하여는 고용량의 펌프를 사용해야 하는 등의 에너지가 많이 소비되는 문제점들이 있다[1].

본 연구에 사용된 분리막 모듈은 중공사막을 이용한 침지형 수처리용 분리막 모듈로서 형태는 막 표면에 발생하는 케이크층과 농도분극층을 최소화하기 위하여 모듈 중앙에서의 폭기장치를 이용하는 프리엔드(free-end) 형태로 구성되었고 강한 폭기에 의해 중공사막이 파손되는 현상을 보완하기 위해 중공사막을 피복 하였다. 본 연구의 목적은 침지형 중공사막 모듈을 이용하여 활성슬러지를 여과하는데 있어서 폭기되는 공기량과 농도의 변화에 따라 각 압력에서의 임계플럭스의 변화를 확인하고 투과율을 비교하며 폭기량의 증가가 막 표면에 형성된 케이크층 제거에 미치는 영향을 규명하는데 있다.

2. 고전단 여과모델(high-shear filtration model)

Romero와 Davis[2,3]는 플럭스가 시간에 따라 감소하는 십자흐름 정밀여

과(cross-flow microfiltration)의 이론적인 모델식을 개발하였는데 그 모델은 전단력이 도입된 수력학적 확산에 기초하고있다. 이러한 모델식을 기초로하여 Silva[4]등은 다음과 같은 모델식을 개발하여 시간에 따른 플럭스의 변화를 나타내는 식으로 표현하였다.

$$J(t) = \frac{\Delta P}{\left[\sqrt{\frac{\Delta P \Phi_b \eta_0 \eta \widehat{R}_c}{k_f \tau_w} \left(1 - e^{-\frac{-2k_f \tau_w t}{\eta(\Phi_c - \Phi_b)}} \right)} \right] + \eta_0 (R_m + R_f)} \quad (1)$$

위의 모델식을 확인하기 위하여 a 와 b , 두개의 파라미터를 정의한다.

$$a = \frac{\widehat{R}_c}{k_f \tau_w} \quad (2)$$

$$b = \frac{\widehat{R}_c}{\eta(\Phi_c - \Phi_b)} \quad (3)$$

위의 두 식을 식 (1)에 대입하고 fouling에 의한 저항인 R_f 를 무시할 수 있다고 가정하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있으며 이 식을 이용하여 파라미터 a 과 b 값을 계산할 수 있다.

$$J(t) = \frac{\Delta P}{\left[\sqrt{\Delta P \Phi_b \eta_0 \eta a (1 - e^{-2(b/a)t})} \right] + \eta_0 R_m} \quad (4)$$

3. 실험 방법

3.1. YEF 중공사막 모듈

Fig. 1에 나타나있는 YEF 모듈은 콜렉터가 하부에 위치하고 하부의 콜렉터로부터 중공사막들이 상부를 향해 뻗어 있게 제작하였고 그 끝이 자유롭게 움직여 물의 흐름에 의하여 모듈 내부로 들어온 부유물질들이 바로 모듈의 상부로 빠져나가 중공사막들 사이에 엉켜 플럭스를 감소시키는 현상을 최소화하는 형태를 취하였다. 이때 중공사막이 위쪽으로 뻗어있으므로 발생하는 쓰러짐을 방지하고, 모듈 중앙에서 폭기되는 공기 방울 모두

를 중공사막의 진동과 스크리빙 효과를 일으키는데 사용하여 투과율을 향상시키기 위하여 아크릴 재질의 가드를 사용하였다. 본 연구에 사용된 중공사막은 SK케미칼에서 제공된 폴리설펜(PSf, polysulfone) 재질의 막으로 공경(pore size) $0.1\mu\text{m}$ 의 정밀여과막이며 내경 0.7 mm, 외경은 1.1 mm였다.

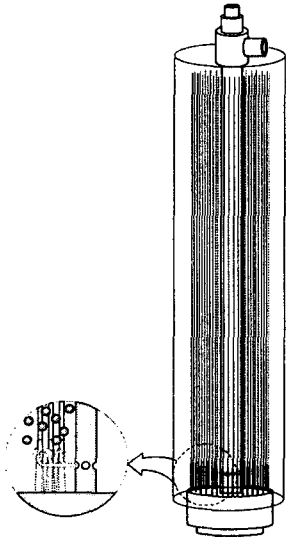


Fig.1. Schematic diagram of YEF hollow fiber membrane module.

3.2. 실험 방법

본 실험에 사용된 활성슬러지는 연세대학교 원주 캠퍼스의 기숙사 하수처리장의 폭기조에서 채취하여 사용하였다. 초기 활성슬러지의 농도는 8000 mg/L 로 하였으며 수리학적 체류시간은 플럭스를 $10\text{ L/m}^2\text{hr}$ 로 유지하였을 경우는 12시간, $20\text{ L/m}^2\text{hr}$ 로 유지하였을 경우에는 6시간이었으며 시간에 따른 압력의 변화율을 조사하였다. 유입수는 욕실, 부엌 사용수와 화장실 사용수가 같이 합해져 들어오는데 하수처리장으로 유입되는 유입수와 같은 하수를 사용하였으며 드럼 스크린(CBDS-500, Cheonbo eng. Inc.)으로 걸러진 후 반응조로 유입되었다.

활성슬러지의 여과를 위한 실험 장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 반응조의 총 부피는 2 m^3 이며 유효 부피는 1.6 m^3 가량되었다. 반응조의 중앙에 YEF 모듈을 위치시키고 모듈의 중앙에서 폭기를 실시하였고 활성슬러지의 침전을 방지하기 위하여 반응조 바닥에 산기관을 설치하여 폭기하였다.

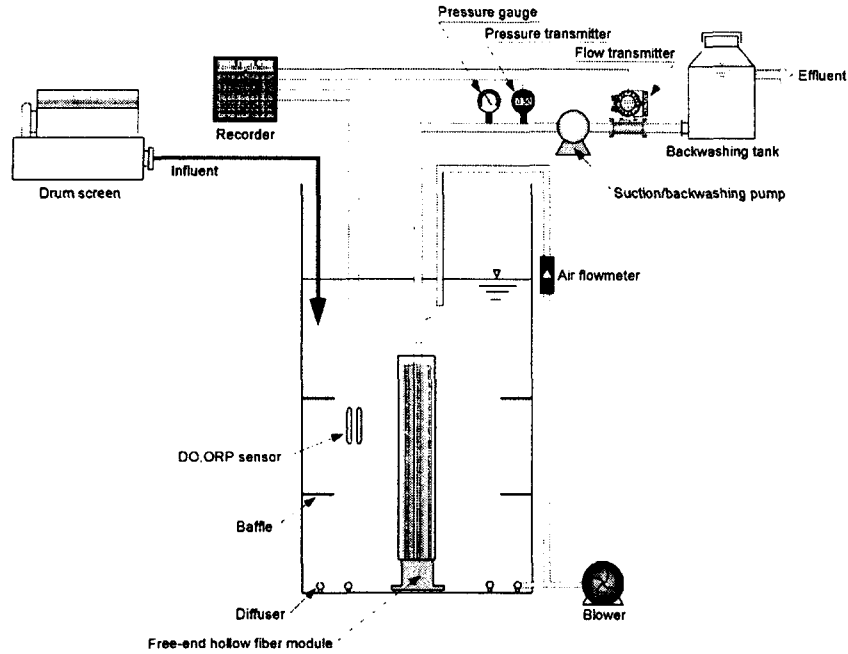


Fig. 2. Experimental setup for filtration of MLSS for upward free-end module.

4. 결과 및 토론

4.1. 활성슬러지의 여과

먼저 압력에 따른 플럭스의 변화(Fig. 3)를 보면 활성슬러지의 농도가 5,000과 8,000 mg/L에서는 낮은 압력에서 플럭스가 직선적으로 증가하다가 압력이 증가할 수록 플럭스의 증가량이 감소하는 곡선을 나타내었으나 활성슬러지의 농도가 12,000과 15,000 mg/L에서는 낮은 압력과 높은 압력에서 전반적으로 압력이 증가하여도 플럭스는 거의 일정한 값들을 나타내었으며 이는 활성슬러지의 점도가 1,100 cps 이상이 되어 활성슬러지 농도의 증가에 따른 점도가 급격히 증가하여 폭기가 진동과 스크러빙에 의하여 막 오염을 막는 효과를 감소시킨데 따른 것으로 판단된다.

다음은 압력에 따른 플럭스의 변화 실험에서 구하여진 임계플럭스에서 폭기량에 따른 플럭스의 변화를 보기위하여 폭기량을 감소시키면서 실험을 하였다. 활성슬러지의 농도가 5,000과 8,000 mg/L에서는 각각 25와 20 L/m²hr의 임계플럭스를 구할 수 있었으므로 임계플럭스에서 실험하였으나 12,000와 15,000 mg/L에서는 임계플럭스를 구할 수 없었으므로 10 L/m²hr

의 플럭스에서 실험하였다. 각각의 농도와 폭기량에서 플럭스가 일정하거나 또는 감소하다가 정상상태 플럭스를 나타내는 값들을 Fig. 4에 나타내었다. 활성슬러지의 농도가 5,000과 8,000 mg/L에서는 폭기량에 따라서 계속적으로 증가하다가 80 L/min 이상이 되면 플럭스가 변하지 않는 구간이 나타나나 활성슬러지의 농도가 12,000과 15,000 mg/L에서는 폭기량의 증가에 따라 플럭스의 증가가 나타나기는 하지만 그 정도는 미미하며 슬러지의 점도가 약 1,700 cps인 15,000 mg/L의 경우에는 더욱 심한 것으로 나타났다.

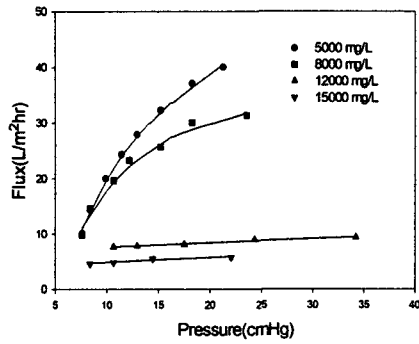


Fig. 3. Variations of steady-state flux for each MLSS concentration with transmembrane pressure

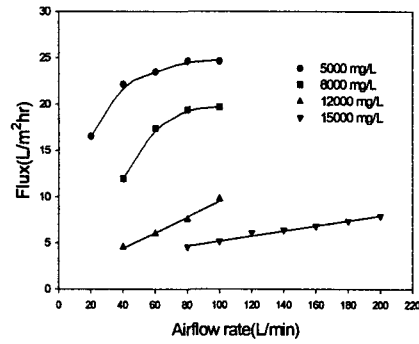


Fig. 4. Variations of steady-state flux for each MLSS concentration with airflow rate.

4.2 고전단 여과 모델식의 적용

활성슬러지 15,000 mg/L의 농도에서 압력에 따른 플럭스 변화와 폭기량에 따른 플럭스의 변화 데이터에 적용하여 모델식의 적합성을 확인하여 보았다. Fig. 5와 6에서 보여지는 바와 같이 두개의 그래프 모두에서 실험에 의한 값과 모델에 의한 값이 거의 비슷한 경향을 나타내는 것을 볼 수 있다. 그러나 각각의 압력과 폭기량 조건에서 초기값은 모델에 의한 값이 실험에 의한 값보다 크고 후반의 값은 실험에 의한 값이 모델에 의한 값보다 큰 경향을 나타낸다. 이렇게 실험값과 모델값이 차이가나는 이유에 대하여 알아보면 먼저 각각의 조건에서 초기값이 실험값보다 모델값이 더 큰 이유는 fouling에 의한 저항 R_f 를 무시할 수 있다고 정의하여 식을 구성하였으며 플럭스가 정상상태가 될 때의 값들을 보면 실험에 의한 값이 모델에 의한 값보다 크게 나타나는데 그 이유는 모델식을 유도하는 과정에서 전단력

의 영향을 받는 파라미터 a 를 구할 때 시간 t 가 아주 길다고 가정하였기 때문이다.

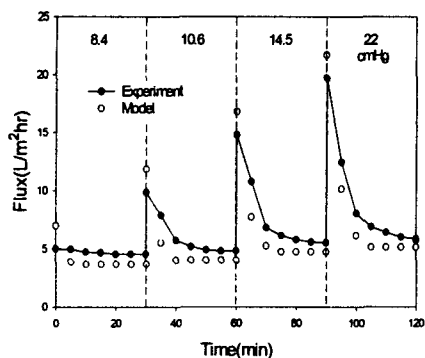


Fig. 5. Comparison of experimental and estimated flux for each pressure by the high-shear filtration model.

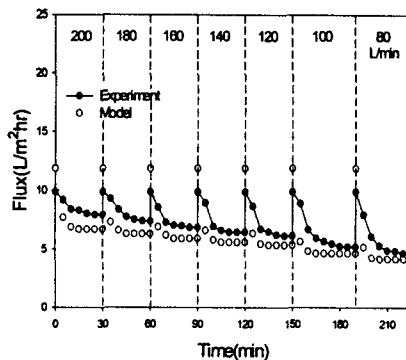


Fig. 6. Comparison of experimental and estimated flux for each airflow rate by the high-shear filtration model.

5. 참고문헌

1. J. H. Chang, "Permeation characteristics of YEF hollow fiber membrane module", Ph.D. Thesis, Yonsei University(2002)
2. C. A. Romero and R. H. Davis, "Transient model of crossflow microfiltration", *Chem. Eng. Sci.*, 45(1), 12(1990)
3. R. H. Davis, "Modeling of fouling of crossflow microfiltration membranes", *Sep. Purif. Methods*, 21(2), 75(1992)
4. C. M. Silva, D. W. Reeve, H. Husain, H. R. Rabie and K. A. Woodhouse, "Model for flux prediction in high-shear microfiltration systems", *J. Membr. Sci.*, 173, 87(2000)
5. R. Liu, X. Huang, C. Wang, L. Chen and Y. Qian, "Study on hydraulic characteristics in a submerged membrane bioreactor process" *Process Biochemistry*, 36, 249(2000)