

디스크 필터의 카올린 분리특성

박 혜 정 · 김 대 천* · 김 형 성** · 정 건 용[†]

서울과학기술대학교, 화공생명공학과, *에너지환경대학원, *(주)엘라이저
(2014년 8월 12일 접수, 2014년 10월 17일 수정, 2014년 10월 21일 채택)

Kaolin Separation Characteristics of the Disc Filters

Hye Jung Park, Dae Chun Kim*, Hyung Sung Kim**, and Kun Yong Chung[†]

Department of Chemical and Biomolecular Engineering

*Graduate School of Energy and Environment, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 137-743, Korea

**Elyzer

(Received August 12, 2014, Revised October 17, 2014, Accepted October 21, 2014)

요 약: 본 연구에서는 디스크 링 형태에 패터닝된 막막을 적층시킨 모듈의 분리특성을 규명하고자 투과실험을 수행하였다. 먼저, 본 연구에서 자체 제작한 5가지 형태의 디스크 필터의 순수 투과도를 측정하였으며 그 값은 0.25 내지 2.24 L/m² · hr · bar이었다. 0.1 wt% 카올린 수용액을 투과시키면 순수 투과율이 가장 높은 모듈의 투과유속이 가장 높았고, 순수 투과율이 가장 낮았던 모듈의 카올린 투과유속이 가장 낮게 나타났다. 그러나 모든 모듈의 카올린 투과유속이 순수 투과율에 비례하지는 않았다. 또한 0.1 wt% 수용액으로 장시간 운전하기 위하여 디스크 필터 모듈 1에 주기적으로 역세척을 실시하였으며 가장 효율적인 운전조건은 투과시간 8분, 역세척 2분 주기임을 확인하였다.

Abstract: The permeation experiments were carried out to examine the separation characteristics of the modules which were piled up the disc-ring shape patterned membranes in this study. First of all, permeability of the pure water was measured for the self-made 5 shape disc filters, and varied from 0.25 to 2.24 L/m² · hr · bar. The module showed the maximum pure water permeability was the maximum permeation flux, and the module showed the minimum pure water permeability was the minimum permeation flux for 0.1 wt% kaolin solution. However, all of the modules were not proportioned to the pure water permeability. Also, the backwashing was performed periodically for the module 1 in order to operate with 0.1 wt% kaolin solution for a long time. The most efficient operating condition was the 8 minute permeation and 2 minute backwashing cycle.

Keywords: disc filter, depth filter, kaolin, backwashing, permeation flux

1. 서 론

분리막 여과 공정은 상·하수도의 고도처리 및 산업 폐수를 처리하여 방류하거나 또는 재활용이 가능한 효율적인 수처리 기술로서 폭넓게 응용되고 있다. 더욱이 장치가 비교적 간단하고 처리 효율이 우수하며 에너지 소비가 매우 낮은 경제적인 공정이다. 하지만, 막여과가 진행됨에 따라서 수용액 중에 입자가 분리막의 세공을

막거나 또는 분리막 세공벽에 흡착되어 세공을 좁히는 세공막힘과 막 표면에 누적되어 케이크층을 형성하여 투과저항을 증가시키므로 운전 시간에 따라서 투과유속이 감소하고 분리막의 수명을 저하시키는 등 여러 가지 문제점이 발생하고 있다[1,2]. 따라서 분리막의 응용을 확대하기 위하여는 이와 같은 막오염을 완화시키고 운전비용을 최소화할 수 있는 경제적인 운전방식의 개선이 필수적이다[3]. 그중 막오염을 방지시키는 방법은 막여과 전처리로 막오염 물질을 효율적으로 제어하는

[†]Corresponding author(e-mail: kychung@snut.ac.kr)

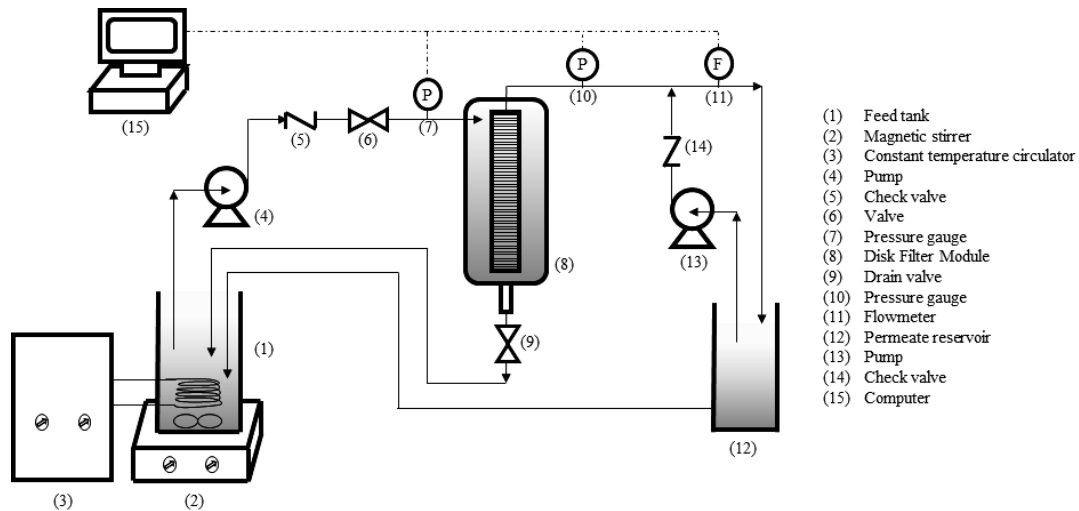


Fig. 1. Schematic flow diagram of the disc filter module filtration.

방법과 역세척을 이용한 방법으로 투과속도를 증대시키며, 침전물이 분리막 표면에 완전히 형성되거나 압밀화 되기 전에 케이크 등을 효과적으로 제거 가능한 방법이 있다[4,5]. 또한 유체의 와류, 회전 또는 진동 등의 원리를 적용하여 분리막 표면에 높은 전단력을 발생시켜 막오염을 감소시키는 기술이 개발되고 있다[5].

최근에는 막의 제조 과정에 패터닝의 기술을 도입하여 평평한 플라스틱 링에 고분자 물질을 코팅시키고 코팅층의 높이나 각도를 적절하게 설계하여 일정한 패턴을 갖는 플라스틱 박막을 적층하여 여과기로 사용하기도 한다. 이와 같은 플라스틱 박막 형태의 링은 박막과 박막 사이에 고분자 프린팅의 높이로 인하여 형성된 수 μm 규모의 세공을 활용하여 선택적으로 분리를 할 수 있는 모듈로 사용할 수 있다[6]. 따라서 고분자 재질의 분리막의 경우는 분리막의 세공이 광범위하게 분포되지만, 패터닝 박막을 적층시킨 여과기는 세공의 분포가 일정하고 유로를 자유롭게 설계할 수 있으므로 높은 투과속도와 높은 선택적 분리도를 기대할 수 있다. 또한 패턴이 프린팅된 각도 및 높이와 원수의 입자들 특징으로 인한 막오염의 영향이 상당하므로 각각의 모듈에 따른 최적의 운전조건을 모색하는 것이 더욱 중요해졌다.

따라서 본 연구에서는 (주)엘라이저에서 설계 제작한 디스크 링 형태에 패터닝된 박막을 적층시킨 모듈의 분리특성을 규명하고자 투과실험을 수행하였다. 원료 용액으로는 0.1 wt% 카올린 수용액을 사용하였으며 주기적인 역세척을 시행하여 연속적으로 디스크 필터를 운전할 수 있는 기법과 효과를 검토하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1. 실험 장치

실험장치에 대한 개략적인 흐름도를 Fig. 1에 나타내었다. 20 L 크기의 원료탱크(1) 내부에는 교반기(2)를 설치하여 카올린 입자가 침전되지 않도록 혼합하였으며 또한 항온순환기(3)와 연결된 냉각코일을 사용하여 일정한 온도를 유지하도록 하였다. 원료탱크 내 용액은 펌프(4)로 가압하여 체크밸브(5)와 유량 및 압력을 조절할 수 있는 밸브(6) 그리고 압력계(7)를 통하여 디스크 필터(8)로 공급된다. 유입된 용액은 전량투과 방식으로 운전되거나 또는 디스크 필터 하단부에 드레인 밸브(9)를 통하여 일부분을 원료탱크로 재순환할 수 있다. 디스크 필터로 여과된 처리수는 출구부분의 압력계(10)를 지나 유량계(SMWF, PumpGood)(11)에서 투과속도를 측정 후, 투과액 탱크(12)에 모여 주기적으로 원료탱크로 반송하였다.

디스크 필터 표면에 쌓인 입자를 역세척할 경우 투과액 탱크에 있는 처리수를 이용하여 펌프(13)로 가압한 후 역류를 방지하기 위한 체크밸브(14)을 지나 디스크 필터에 공급된다. 이때 디스크 필터 출구부분의 설치된 압력계로 역세척압력을 확인하며 디스크 필터에서 역세척수는 드레인 밸브를 거쳐서 원료탱크로 순환된다.

모든 실험의 운전압력과 투과유량은 실시간으로 컴퓨터(15)에 그 자료에 저장하였으며 역세척의 운전 주기는 펌프에 타이머를 연결하여 전원을 공급 또는 중단시켜 조절하였다.

Table 1. Pore Size and Pure Water Permeability for the Various Disk Filter Modules

module number	pore size [μm]	permeability [$\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{bar}$]
1	6.9	2.24
2	6.0	0.75
3	5.3	0.41
4	3.6	0.45
5	2.4	0.25

2.2. 디스크 필터 및 모듈

본 실험에서 사용한 디스크 필터의 구체적인 형태와 모듈을 Figs. 2와 3에 각각 나타내었다. Fig. 2(a)에서와 같이 각각의 디스크 필터(A)의 두께는 약 40 μm 정도이며, 그 위에 0.1~5 μm 높이로 잉크 인쇄된 유로(B)로 구성되어 있다. Fig. 2(b, c)는 디스크 필터의 표면을 전자현미경으로 관찰한 결과이다. Fig. 2(b)에서와 같이 표면에 인쇄된 물질로 인하여 유로가 형성됨을 확인할 수 있으나 이를 더욱 확대하면 Fig. 2(c)와 같이 표면이 μm 단위로 거칠게 형성되었음을 확인할 수 있었다. 각각의 디스크 필터에 대한 유체의 흐름을 나타내면 Fig. 3(a)에서와 같이 외부에서 원료용액이 공급되며 그중 입자를 제외한 투과수가 내부로 여과되며 역세척은 이와 반대 방향이다. Fig. 3(b)는 직경이 7 cm인 디스크 필터 530 g을 적층시켜 제작한 모듈로써 높이가 27 cm, 유효 여과면적이 594 cm^2 가 되고 1.0 cm인 디스크 필터 폭을 통과하여 depth 필터 방식으로 여과하게 된다. 따라서 디스크 필터의 외부표면 근방만 오염이 되고 디스크 필터의 폭을 따라 내부까지 오염되지 않았을 경우에 훨씬 효과적으로 역세척할 수 있을 것으로 추정된다. 하지만 디스크 필터의 내부 폭까지 오염되더라도 Fig. 3(b)에서와 같이 모듈 양단 부분을 풀어서 각각의 디스크 필터를 물리적으로 세척할 수도 있다.

본 실험에서는 Table 1에서 나타낸 바와 같이 디스크 필터 표면에 인쇄된 형태, 즉 유로인 세공의 크기가 2.4~6.9 μm 인 5종류의 디스크 필터를 사용하여 여과실험을 수행하였다.

2.3. 실험 방법

세공의 크기가 다른 5종류의 디스크 필터 모듈에 대한 순수저항을 측정하기 위하여 25°C의 초순수로 압력을 증가시키면서 투과실험을 수행하였다. 그 후, 카울린

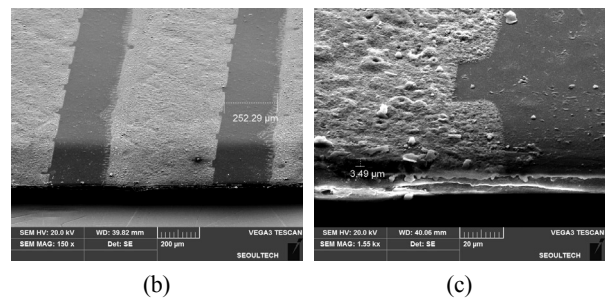
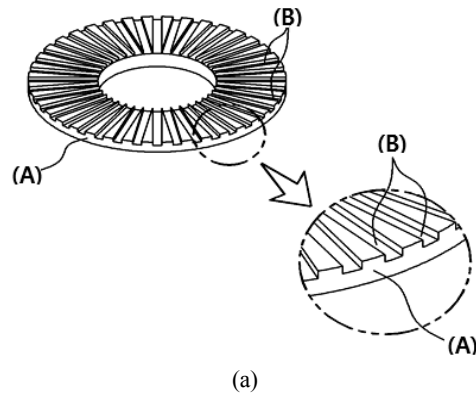


Fig. 2. (a) Details of the typical disk filter[7], (b) SEM picture of the disk filter surface (150 x) and (c) SEM picture of the disk filter surface (1,550 x).

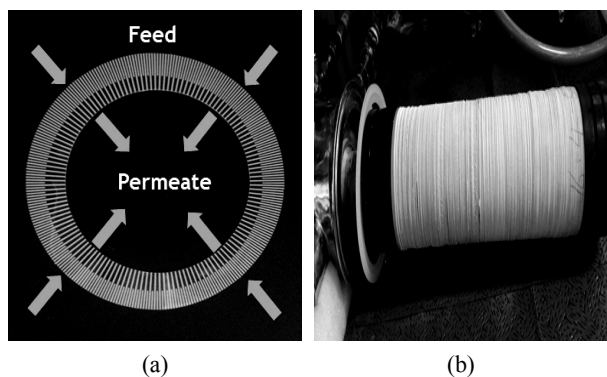


Fig. 3. (a) The flow direction for a disk filter and (b) the picture of a disk filter module.

($\text{H}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Samchun) 0.1 wt% 용액 20 L를 제조하여 원수의 탁도를 확인한 후 25°C에서 압력을 증가시키면서 투과실험을 진행하였다. 이상의 모든 실험을 수행하기 이전에 디스크 필터 모듈을 가정용 세제(향균 트리오, 애경)와 구연산($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Daejung)이 각각 0.05 wt% 함유된 수용액으로 채워진 초음파 세척기에서 충분히 세척한 다음, 초순수 투과 실험으로 세척 상태를 확인 후 투과실험을 실시하였다.

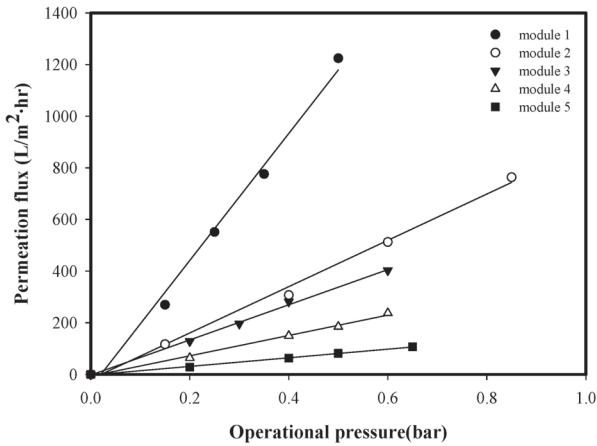


Fig. 4. Permeation flux for pure water for the disc filter modules at 25°C.

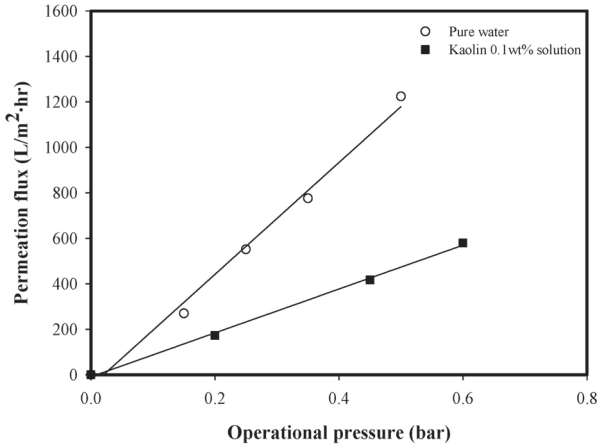


Fig. 5. Permeation flux for 0.1 wt% kaolin solution for the disc filter modules at 25°C.

실험의 마지막 조건인 모듈에 따른 실험은 (주)엘라이저에서 제작한 모듈 1을 사용하여 여과시간 및 역세척 시간에 따른 최적의 운전시간을 규명한 후 이 결과를 기준으로 다른 모듈 2에서 5까지 적용하여 실험을 진행한다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 순수 투과실험

25°C의 초순수로 압력을 증가시키면서 투과실험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 운전압력에 대한 투과유속의 변화율, 즉 기울기에 해당하는 각각의 모듈의 투과도를 세공크기와 함께 Table 1에 나타내었으며 투과도는 다음 Hagen-Poiseuille 식의 k 값

에 해당된다.

$$J = \frac{\varepsilon d_p^2 \Delta p}{32\mu L} = k \Delta p \quad (1)$$

여기에서 J 는 투과유속, ε 는 세공도, d_p 는 세공크기, Δp 는 압력차, μ 는 점도 그리고 L 은 투과유로의 길이에 해당한다. 세공이 6.9 μm 로 가장 큰 모듈 1에 대한 투과도가 2.24 $\text{L/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{bar}$ 로 가장 크게 나타났으며 세공이 가장 작은 모듈 5의 투과도가 0.25 $\text{L/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{bar}$ 로 가장 낮았다. 그러나 모듈 2는 모듈 1과 비교하여 세공크기는 15% 정도 작지만 투과도는 1/3인 0.75 $\text{L/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{bar}$ 밖에 도달하지 못하였다. 이는 식 (1)에서와 같이 투과도는 세공크기 뿐만 아니라 모듈의 세공도와 투과액이 통과하는 유로에 따른 유체역학적 저항이 작용하기 때문이다.

3.2. 카올린 투과실험

카올린 0.1 wt% 용액을 20 L 제조하여 원수의 탁도를 확인한 후 25°C에서 압력을 증가시키면서 투과실험을 수행하여 Fig. 5에 나타내었다. 투과실험 중, 초기 20분간은 투과유속이 일정하게 유지되었으며 0.2, 0.45, 0.6 bar일 때 투과유속은 각각 170, 410, 570 $\text{L/m}^2 \cdot \text{hr}$ 이었다. 투과유속은 압력에 따라서 선형적으로 증가하였으며 카올린 용액에 대한 투과도는 1.04 $\text{L/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{bar}$ 로 순수 투과율의 46%에 해당되었다. 또한 원수 및 처리수의 탁도를 측정하여 카올린 제거율을 측정된 결과 99% 이상이 제거됨을 확인하였다.

3.3. 역세척 효과

3.3.1. 역세척 시간에 따른 투과 유속

모듈 1을 사용하여 투과시간 10분으로 일정하게 유지하고 역세척 시간을 각각 30초, 1분, 2분, 4분의 주기로 반복적으로 투과 실험을 진행할 경우, 시간에 따른 투과유속을 Fig. 6에 나타냈다. 이상의 4가지 역세척 조건에서의 초기 투과유속은 약 340 $\text{L/m}^2 \cdot \text{hr}$ 정도로 비슷하였지만, 4 내지 5시간 정도까지는 급격히 감소하였다가 10시간 이후에는 거의 일정하게 투과유속이 유지됨을 알 수 있다. 4분 또는 2분의 역세척 시간에 대한 투과유속은 각각 185 $\text{L/m}^2 \cdot \text{hr}$ 로 비슷하였다. 그러나 역세척 시간을 1분으로 줄이면 투과유속이 141 $\text{L/m}^2 \cdot \text{hr}$ 까지 감소하였으며 역세척 시간을 30초까지 더욱 줄

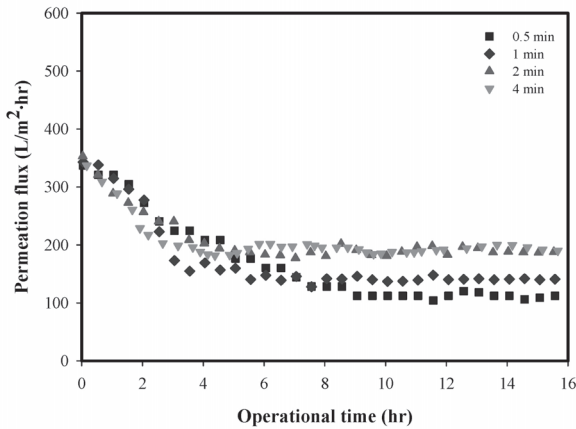


Fig. 6. Permeation flux with respect to backwashing time after 10 minute permeation in the module 1 for 0.1 wt% kaolin solution at 0.4 bar and 30°C.

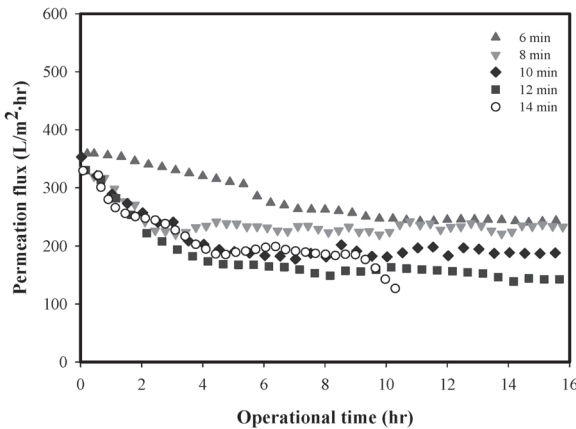


Fig. 7. Permeation flux with respect to permeation time with 2 minute backwashing in the module 1 for 0.1 wt% kaolin solution at 0.4 bar and 30°C.

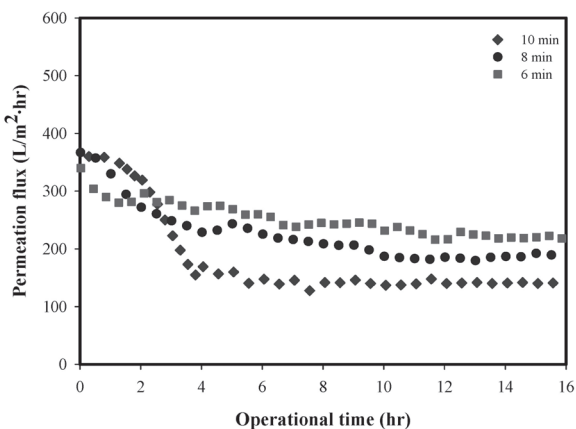


Fig. 8. Permeation flux with respect to permeation time with 1 minute backwashing in the module 1 for 0.1 wt% kaolin solution at 0.4 bar and 30°C.

Table 2. Ratio of the Initial to the Final Permeation Fluxes Multiplying the Permeation Time Out of the Total Operation Time for the Module 1 with 0.1 wt% Kaolin Solution

$J/J_0 \times (\text{permeation time}/\text{total operational cycle time})$	
$J = \text{Final flow rate}, J_0 = \text{Initial flow rate}$	
10 min / 0.5 min	34.0%
10 min / 1 min	41.0%
10 min / 2 min	49.3%
10 min / 4 min	42.3%
6 min / 2 min	55.4%
8 min / 2 min	57.1%
12 min / 2 min	36.0%
14 min / 2 min	0%
6 min / 1 min	57.0%
8 min / 1 min	49.3%

이면 투과유속은 112 L/m²·hr까지 급감함을 알 수 있다. 또한 초기 투과유량에 대한 최종 투과유량의 비 (J/J₀)를 나타내면 역세척 시간이 2분 이상일 때 59.2%로 높게 유지됨을 확인할 수 있었다.

3.3.2. 투과 시간에 따른 투과유속

모듈 1에서 역세척 시간 2분에 따른 각각 6, 8, 10, 12, 14분의 투과시간을 한주기로 실험을 진행했을 때 시간에 따른 투과 유량의 변화를 Fig. 7에 나타냈다. 초기의 유속은 약 340 L/m²·hr로 비슷하였으며 투과시간 6분을 제외하고 거의 4시간이 경과될 때까지 꾸준히 유속이 감소하였다. 그러나 4시간 이후 투과시간이 짧은 주기일수록 유속이 높은 상태에서 유지가 되었다. 투과시간 14분일 때는 약 10시간이 지나자 막오염이 심각하여 투과가 전혀 이루어지지 않았다. 최종 안정화된 유량은 투과시간이 길수록 높은 값을 얻었다.

Fig. 8은 모듈 1에서 역세척 시간을 1분으로 줄이고 투과시간을 각각 10, 8, 6분의 주기로 실험을 진행했을 때 시간에 따른 투과 유량의 변화를 나타낸 것이다. 초기의 유속은 비슷하였으며 시간이 지남에 따라 유량은 감소하였다. 최종적으로 투과유량이 일정해졌을 때 투과시간 10분의 경우는 약 141 L/m²·hr, 8분은 184 L/m²·hr, 6분은 208 L/m²·hr으로 투과시간이 줄어들수록 투과유량이 현저하게 증가하였다.

역세척에 따른 여과 처리능력 감소효과를 고려하기 위하여 Figs. 6~8에 해당하는 J/J₀ 값에 투과 및 역세척

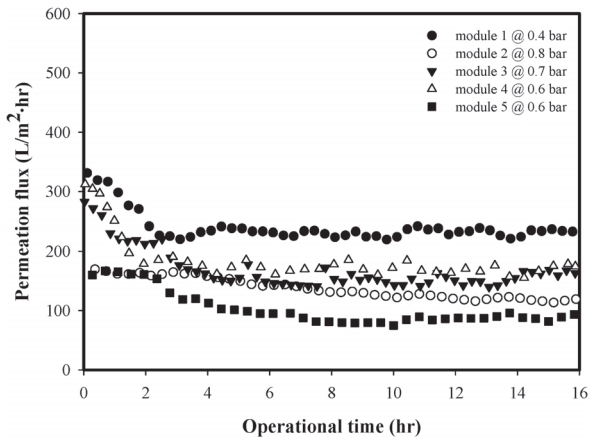


Fig. 9. Permeation flux with respect to various disc filter modules for 0.1 wt% kaolin solution with 2 minute back-washing after 8 minute permeation operation at 30°C.

시간을 합한 총 운전시간에 대한 투과 시간을 곱한 결과를 Table 2에 나타내었다. 투과시간이 10분일 경우 최적의 역세척 시간은 2분으로 49.3%이었고 역세척 시간이 2분일 경우 투과시간이 8분일 때 57.1%이었다. 또한 투과시간 6분이고 역세척 시간이 1분일 경우에도 57.0%로 높은 값을 나타내었지만, 펌프의 운전방향 시간 변경에 인한 과부하와 시스템의 안정성을 고려한 최적의 운전조건은 투과 8분 및 역세척 2분 운전 주기인 것으로 판단된다.

3.4. 디스크 필터에 따른 투과 유속

Table 1에서 표시한 5종류의 디스크 필터 모듈에 대하여 모듈 1의 최적 운전조건인 투과 8분, 역세척 2분으로 여과실험을 수행하여 Fig. 9에 나타내었으며 각각의 모듈의 특성상 0.4 내지 0.8 bar 압력에서 운전되었다. 모듈 1의 투과유속이 16시간에서 232 L/m²·hr로 가장 높은 나타났으며 모듈 3과 4의 투과유속은 각각 174, 163 L/m²·hr이었다. 모듈 2와 5의 초기 투과유속은 각각 169와 159 L/m²·hr로 매우 낮았으며 모듈 5는 16시간 후에 96 L/m²·hr까지 감소하였으나, 모듈 2는 16시간 후에도 119 L/m²·hr으로 30% 정도로 상대적으로 적게 감소하였다. Table 1에 순수 투과율과 비교하면 순수 투과율이 가장 높았던 모듈 1의 경우가 카울린 용액의 경우에도 가장 높은 투과유속을 보였으며 가장 낮은 순수 투과율을 보였던 모듈 5가 카울린 투과유속도 가장 낮게 나타났다. 그러나 순수 투과율이 0.75 L/m²·hr·bar이었던 모듈 2의 경우는 여과 초기

부터 낮은 투과율은 지속적으로 유지하는 특이한 현상을 보였다.

4. 결 론

순수 투과율이 다른 5가지 종류의 디스크 필터 모듈에 0.1 wt% 카울린 수용액을 투과시키면 순수 투과율이 가장 높은 모듈 1의 투과유속이 가장 높았고, 또한 순수 투과율이 가장 낮았던 모듈 5의 카울린 투과유속이 가장 낮게 나타났다. 그러나 순수 투과율이 0.75 L/m²·hr·bar이었던 모듈 2의 경우는 여과 초기부터 상대적으로 낮은 투과유속을 유지하였다.

또한 디스크 필터 모듈 1에 역세척을 실시하면서 0.1 wt% 카울린 수용액을 장기간 여과 실험한 결과, 투과 시간 8분, 역세척 2분일 때 모듈의 오염을 최소화하여 경제적인 운전이 가능함을 확인하였다.

감 사

이 연구는 산업통상자원부의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

Reference

1. S. Judd, "The status of membrane bioreactor technology", *Trends in Biotechnology*, **26**, 109 (2008).
2. S. T. Nam and M. J. Han, "Back flushing behavior of microfiltration membrane fouled by alumina colloidal suspensions", *Membrane Journal*, **19**, 34 (2009).
3. S. H. Lee and C. H. Lee, "Comparison of filtration characteristics and efficiencies between dead-end and crossflow tubular microfiltration in drinking water production system", *The Membrane Soc. of Korea (Spring Meeting)*, 83 (1999).
4. S. J. You, H. W. Ahn, S. H. Park, J. L. Lim, S. C. Hong, and P. I. Yi, "The study on optimum operation conditions of ceramic MF membrane process in Y water treatment plant", *Membrane Journal*, **24**, 201 (2014).
5. H. C. Lee, J. H. Cho, and J. Y. Park, "Effect of

- water-back-flushing time and period in advanced water treatment system by ceramic microfiltration”, *Membrane Journal*, **18**, 26 (2008).
6. K. Y. Chung and J. P. Kim, “Energy-saving membrane technology”, A-Jin Publishing Co., Korea (2010).
7. H. S. Kim, “Laminated disc filter and filter unit using the same”, *Korea Patent* 10-1361156, February 12 (2014).