

알루미나 현탁액에 의해 오염된 정밀여과막의 역세척 거동

남 석 태[†] · 한 명 진

경일대학교 공과대학 디스플레이화학공학과

(2009년 2월 5일 접수, 2009년 2월 27일 수정(1), 2009년 3월 10일 수정(2), 2009년 3월 10일 채택)

Back Flushing Behavior of Microfiltration Membrane Fouled by Alumina Colloidal Suspensions

Suk-Tae Nam[†] and Myeong-Jin Han

Department of Display and Chemical Engineering, Kyungil University, Buho-ri 33, Hayang-up, Kyungsan-si, Kyungbuk 712-701, Korea

(Received February 5, 2009, Revised(1) February 27, 2009, Revised(2) March 10, 2009, Accepted March 10, 2009)

요 약: Al₂O₃ 현탁액의 폴리에틸렌 정밀여과에 있어 역세척이 막오염에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 현탁액의 투과저항은 역세척을 한 경우가 역세척을 하지 않은 경우보다 작았으나 투과저항 증가율은 역세척을 하지 않은 때보다도 더 컸다. 막오염 형태는 역세척을 한 경우나 하지 않은 경우 운전초기에는 케익오염이 지배적이었으며, 이어 세공막힘오염이 나타났고, 정상상태에 도달하면 투과유속은 다시 케익여과 오염에 의해 지배받는 것으로 나타났다. 한편, 세척공정에 앞선 막은 운전초기에 세공막힘오염이 케익오염에 앞서 일어났다. 총오염에 대한 케익여과 오염의 비율은 역세척에 관계없이 역세척 전에 비하여 증가하였다. 세공크기가 0.24 μm인 막의 투과저항은 세공이 0.34 μm인 막에 비해 더 컸으나, 막오염 형태는 세공의 크기가 0.34 μm인 막에 비해 케익오염이 작았다. 총오염에 대한 성분오염의 비율은 역세척을 한 경우에는 세공막힘이 약 7.8%, 케익오염 약 92.2%이었고, 역세척을 하지 않은 경우에는 세공막힘은 9.6% 그리고 케익오염이 90.4%이었다.

Abstract: Effect of backflushing on the membrane fouling for polyethylene capillary membranes was examined by measuring the flux of Al₂O₃ colloidal suspensions through the cross flow microfiltration. In the comparison of with and without the application of backflushing, the hydraulic resistance to permeate flow of the suspension was less with backflushing, but the increasing rate in permeate resistance was higher. Regardless of backflushing, the cake filtration was dominant at the initial period of filtration with backflushing, being followed by the pore blocking. And at steady state, the fouling mechanism is almost governed by the cake filtration model. On the contrary, the pore blocking preceded the cake filtration in the initial stage of the original membrane before backflushing. And irrespective of backflushing, the ratio of cake filtration to total fouling increased, compared with that for before backflushing. For the membrane with 0.24 μm pore size, the permeate resistance was higher than that of 0.34 μm pore size membrane. but the ratio of cake filtration was smaller than that of large pore membrane. In comparing the ratio of each fouling component to the total fouling for the case with backflushing pore blocking was 7.8% and cake filtration was 92.2%. For the case without backflushing, total fouling was composed of 9.6% pore blocking and 90.4% cake filtration.

Keywords: membrane, microfiltration, flux decline, fouling, backflushing

1. 서 론

막분리 여과공정은 현탁 미립자를 분리하는데 매우 효과적인 분리방법으로 수처리, 오염방지를 위한 전후

처리, 폐수의 재사용을 위한 중수도 시스템 및 식품가공, 화장품공업, 의약품공업 등 산업의 많은 분야에서 응용되고 있다. 그러나 막분리 여과공정은 간편한 공정 조작과 우수한 분리정제능력에도 불구하고 투과유속의 감소가 심하다는 단점이 산업전반에 전천후로 사용함

[†]주저자(e-mail : stnam@kiu.ac.kr)

에 있어 한계점으로 작용한다[1,2].

투과유속을 감소시키는 막오염은 막성능을 저하시키므로 막을 오염시키는 인자를 정확히 파악하여 제어할 수 있어야 분리막 여과공정의 효율성을 향상시킬 수 있다. 막오염에는 입자가 세공을 막거나 또는 세공벽에 흡착되어 세공을 좁히는 세공막힘과 막 표면에 누적되어 케익층을 형성하는 케익여과 등이 있으며, 이들은 투과저항을 증가시키는 원인이 된다. 막 표면에 누적되어 케익층을 형성하는 가역적인 오염은 회전원판 모듈 및 십자류 방식 등 순환속도 및 흐름형태를 변화시킴으로써 어느 정도 제어할 수 있다. 그러나 미세 입자들이 막 표면이나 세공 속에 흡착, 누적되는 비가역적 세공막힘 오염은 단순한 운전조건의 변화로 제어하기보다는 미립자와 분리막 간의 상호작용을 고려한 적절한 막재질과 모듈의 선택 및 흐름속도의 변화 그리고 투과흐름의 방향을 주기적 또는 일시적으로 역방향으로 바꾸는 역세척 등과 같은 운전조건을 함께 변화시켜야 효과적으로 감소시킬 수 있다[3-5].

투과유속 감소에 대한 막오염 형태의 영향을 검토하기 위하여 Jiraratananon 등[6]은 십자류 정밀여과 공정에서 bentonite 현탁액의 투과유속 변화를 정압여과 모델을 도입하여 설명하였다. 그들은 입자크기가 서로 다른 polyethylene glycol, dextran, 단백질 그리고 bentonite와 이들이 혼합된 현탁액의 투과유속 감소원인은 막표면에서의 농도분극과 막표면 및 세공벽 등에 입자들이 침착, 누적되기 때문이라 했다. 입자크기가 큰 bentonite 현탁액의 막오염 형태는 케익여과 모델에 의하여 지배되고, 크기가 작은 입자와 큰 입자가 함께 공존하면 크기가 작은 입자들에 의해 세공이 막히는 내부오염이 표면오염인 케익층과 함께 나타나 투과유속은 더 감소한다고 하였다. 또한, 그들은 알루미나 한외 여과막을 이용한 파인애플 주스의 투과유속 감소원인은 분리막에 의해 배제된 거대입자들이 서로 응집하여 세공의 벽이나 막 표면에 누적, 부착되어 막표면에 분리능이 있는 케익층과 같은 동력막(dynamic membrane)을 형성하기 때문이라 설명했으며, 이 같은 동력막은 순환흐름속도를 증가시켜 막 표면 부근의 전단속도를 증가함으로써 막 표면에서 제거하여 투과저항을 감소시켰다고 하였다[7]. Bowen 등[8]은 정밀 전량여과 공정에서 단백질 용액을 사용하여 폴리카보네이트 막의 투과유속 감소현상을 투과부피유속의 시간변화를 통한 막오염 형태로 해석하였다. 투과유속 감소의 주된 원인은 배제된

입자들에 의한 케익층과 세공막힘이 동시에 또는 연계적으로 발생하기 때문이라 했으며, 투과유속이 감소되는 과정은 운전초기의 미세입자에 의한 세공막힘이 발생한 다음 이에 뒤이어 막 표면에 입자들이 쌓여 케익층을 형성하기 때문이라 보고하였다. 또한, 막 표면에서 전단응력을 증가시킴으로써 단백질과 고분자막의 상호작용시간을 줄여 막표면에 누적되는 단백질의 양을 감소시킨 결과를 보고하였다. Madaeni 등[9]은 금을 함유한 물은 라텍스 혼합 콜로이드 현탁액의 전량여과 투과거동을 운전압력, pH 그리고 교반의 유무에 따라 실험한 바, 운전압력이 낮으면 투과유속의 감소가 완만하게 일어나며, 입자의 투과저항도 낮고 높은 배제율을 나타낸다고 했다. 이러한 현상은 세공이 작고 소수성인 막이 세공이 크고 친수성인 막보다 더 명확하게 나타났으며, 소수성 막에서는 pH가 증가함에 따라 투과유속은 증가한다고 했다. 막오염 기구는 운전초기의 세공막힘에 이어 막 표면에 형성되는 케익층에 의하여 지배되고, 케익층의 비저항은 압력이 증가함에 따라 약간 증가하는데 이는 압력이 증가함에 따른 케익층의 공극율이 감소하기 때문이라 하였다. Rautenbach 등[10]은 순환흐름속도에 의한 전단응력이 투과항력보다 작으면 케익의 두께는 항력에 의해 지배되며, 순환흐름속도를 증가시켜 막표면에 누적된 입자가 막표면에서 이탈하는 역확산 속도를 크게 하여 현탁입자가 막표면에 누적되는 양을 감소시킴으로써 투과유속을 증가시킨 결과를 보고하였다.

역세척은 공기, 물 그리고 투과수 등을 역방향으로 주입시켜 막오염 물질이 막 표면에 부착되는 것을 방지하거나 또는 이미 부착된 오염물질을 제거하기도 하며, 또한 투과압력에 의한 막오염 층의 압밀화를 방지함으로써 막오염 요소를 감소시켜 투과유속을 향상시키는 방법이다. Srijaroonrat 등[11]은 세라믹 막을 이용한 oil/water 에멀전의 한외여과 시, 역세척을 실시함으로써 겔 분극층과 막오염이 감소하여 투과유속은 증가하였고, 여과시간이 길수록 역세척 효과는 낮았으며, 또한 동일 운전조건에서는 운전압력이 높을 때 역세척 효과가 컸고, 처리수의 농도가 높은 경우에는 역세척에 의한 투과유속의 감소가 컸다고 하였다. 박[12]은 세라믹 여과막을 이용하여 제지폐수를 처리할 때 물에 의한 역세척 효과는 역세척의 주기가 짧을수록 유리하나 분리막의 기공이 클수록 장시간 역세척을 하여야 세척효과가 크고, 운전시간이 길수록 막오염이 증가하기 때문에

역세척 시간도 길어야 막오염 제거가 효과적이라 하였다. 이 등[13,14]은 고도정수처리를 위한 세라믹 정밀여과 시스템에서 높은 투과유속을 유지하기 위하여 역세척 실시하였을 때, 주기적인 역세척이 막오염 저항을 감소시켜 비 투과유속을 증가시켰으며, 역세척 시간이 길수록 농도분극 및 막오염이 효과적으로 억제되었음을 확인하였고, 역세척 시간이 짧아도 역세척 빈도가 증가하면 막오염 억제에 유리하다는 결과를 보고하였다.

본 연구는 분리막을 이용하여 콜로이드 현탁액의 정밀여과과정 중 투과유속감소에 영향을 미치는 막오염의 발생형태와 기구에 대하여 분석함으로써 정밀여과 성능을 향상시킬 수 있는 적절한 운전조건을 제시하고자 Al_2O_3 현탁액의 폴리에틸렌 정밀여과과정 중 투과유속감소에 영향을 미치는 막오염의 형태와 운전시간에 따라 투과거동을 지배하는 막오염의 발생기구에 대하여 분석한다. 그리고 투과실험 결과 발생하는 총오염의 크기, 성분오염이 총오염에 차지하는 비율과 성분오염들의 변화 비를 정량적으로 규명하고자 운전압력, 현탁액의 농도, 막의 세공크기 그리고 역세척 등과 같은 운전조건이 투과성을 저해하는 막오염 특성에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 이 론

2.1. 투과유속 및 투과저항

정밀여과공정에 대한 투과유속은 식 (1)과 같이 막 양쪽의 압력차와 총괄저항으로 표시되는 Darcy의 법칙으로 나타낼 수 있다. 압력차를 구동력으로 하는 여과 공정에서 미립자를 함유한 콜로이드 용액의 투과유속은 시간이 지남에 따라 감소하는 현상이 발생한다. 투과유속의 저하현상은 막표면의 세공이 현탁입자에 의해 막혀버리거나 또는 용액중의 현탁입자가 막표면에 누적되어 케익층을 형성하는 등의 막오염이 발생하여 투과저항이 증가하기 때문이다. 투과유속을 감소시키는 투과저항(R)은 막저항(R_0)과 케익저항(R_c) 그리고 세공막힘저항(R_p)의 합으로 표현된다. 세공막힘저항은 투과실험을 끝낸 막을 깨끗이 세척한 후 측정된 초순수의 투과유속으로부터 산출한 저항에서 막저항을 뺀 저항값으로 사용한 시간과 빈도에 따라 비례하여 증가하며, 케익저항은 현탁용액의 투과유속으로부터 구한 전체 투과저항에서 막저항과 세공막힘 저항을 뺀 값이다[6,7].

$$J = \frac{\Delta p}{\mu R} \quad (1)$$

$$R = R_0 + R_c + R_p \quad (2)$$

2.2. 정압여과모델

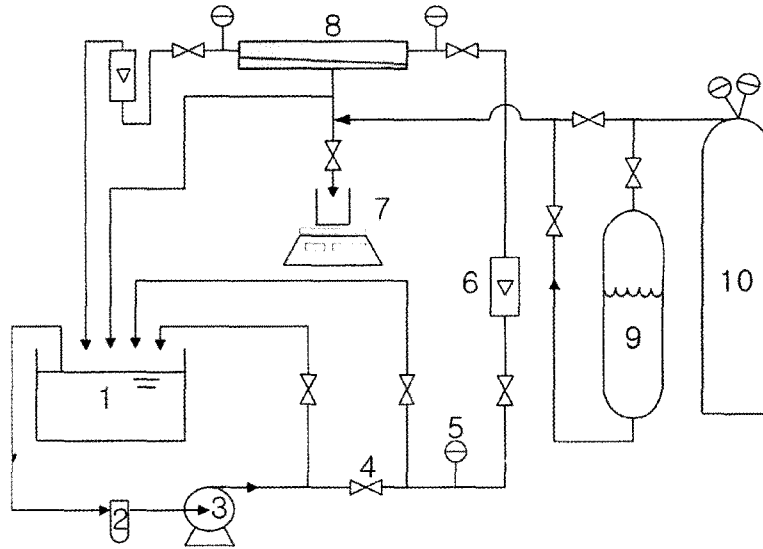
투과유속 감소에 따른 막오염 형태를 나타내는 Hermia [15]의 정압막힘여과(constant pressure blocking filtration)모델은 세공의 크기가 균일하다는 가정에서 유도되었으며, 세공막힘 형태와 케익여과 형태가 있다. 세공막힘 유형으로는 용질입자의 크기와 막의 세공의 크기가 같아서 용질입자가 세공을 완전히 막아버리지만 입자들끼리는 서로 중첩되지 않는 형태로 세공의 수가 감소하는 완전세공막힘(complete pore blocking)과 용질입자의 크기가 막의 세공크기보다 상당히 작아 용질입자들이 막 내부의 세공 속으로 침투하여 세공벽에 부착됨으로써 세공이 좁아져 세공의 부피를 감소시키는 표준세공막힘(standard pore blocking) 그리고 용질입자의 크기가 막의 세공크기보다 커서 이미 세공을 막고 있거나 표면에 존재하는 입자 등에 중첩되어 막 표면에 케익을 형성하는 케익여과(cake filtration) 형태와 그리고 완전세공막힘과 케익여과의 중간형태를 띤 중간세공막힘(intermediate pore blocking) 모델이 있다. 정압여과 공정에서 이들 막오염 형태의 운전시간에 따른 투과유속은 아래 식 (3)과 같이 표현되며, 막오염의 유형별 투과거동을 나타내는 n값은 완전세공막힘 $n = 2.0$, 표준세공막힘 $n = 1.5$, 중간세공막힘 $n = 1.0$, 그리고 케익여과의 경우에는 $n = 0$ 으로 표현된다.

$$J = J_0 [1 + k(2-n)(AJ_0)^{(2-n)}t]^{-\frac{1}{(n-2)}} \quad (3)$$

$$R = \frac{\Delta P}{J} = R_0 [1 + k(2-n)(AJ_0)^{(2-n)}t]^{-\frac{1}{(2-n)}} \quad (4)$$

$$\frac{dR}{dt} = R_0 k (AJ_0)^{(2-n)} [1 + k(2-n)(AJ_0)^{(2-n)}t]^{-\frac{(n-1)}{(2-n)}} \quad (5)$$

$$\frac{d^2R}{dt^2} = (n-1)R_0 k^2 (AJ_0)^{4-2n} [1 + k(2-n)(AJ_0)^{(2-n)}t]^{-\frac{2n-3}{2-n}} \quad (6)$$



1. Feed tank 2. Pre-filter 3. Feed pump 4. Needle valve 5. Pressure gauge
6. Flow meter 7. Electric balance 8. Membrane module 9. Water tank 10. Nitrogen bombe

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

운전압력이 일정할 때 투과유속의 변화는 투과저항의 형태가 변함에 따라 달라지므로 투과저항 R과 투과저항의 시간변화율 dR/dt 을 이용하여 투과저항의 형태를 살펴봄으로써 투과유속 변화거동을 해석하는 것이 매우 효과적이고 유용하다. 투과저항은 식 (4)로 표현된 바와 같이 운전압력과 투과유속의 비로써 간단하게 산출되며, 운전시간이 지남에 따라 투과유속을 감소시키는 막오염 형태의 진행과정은 식 (5)로 표현되는 dR/dt 와 운전시간 t의 관계를 도출함으로써 파악할 수 있다. 투과유속의 감소는 t와 dR/dt 의 관계에서 기울기가 양(+)이면 세공막힘에 의하여 지배되며, 기울기가 음(-)이면 케익여과 모델에 의해 지배된다. 이는 시간에 따른 dR/dt 의 기울기를 나타내는 식 (6)에 의해서 확인할 수 있다. 기울기 d^2R/dt^2 은 $(n - 1)$ 에 비례하며, $n = 0$ 인 케익여과 모델일 때에는 음의 기울기를, $n > 1$ 인 세공막힘 모델에서는 양의 기울기 값을 나타낸다[4].

2.3. 정압여과 회기모델

Hermia의 정압막힘여과(constant pressure blocking filtration)모델식을 막오염 형태에 따른 비 투과유속 식으로 변형하여 사용하면 성분오염에 대한 상대적인 정량적 평가를 할 수 있으며, 이를 통해 오염의 발생시기와 크기를 정확히 알 수 있고, 오염형태에 따른 회기식은 Table 1과 같이 표현할 수 있다[16].

Table 1. Flux Decline Equation for Different Fouling Mechanism

Mechanism	Equation	Regression form
Complete blocking (pore blocking)	$j = \exp(-k_b t)$	$-\ln(j) = k_b t$
Standard blocking (pore constriction)	$j = (1 + 2k_s t)^{-2}$	$j^{-1/2} = 1 + 2k_s t$
Cake filtration	$j = (1 + 2k_c t)^{-1/2}$	$j^{-2} = 1 + 2k_c t$

* $j = J/J_0$

3. 실험

3.1. 재료 및 장치

본 실험에서 현탁액 제조에 사용한 무기 미립자의 크기는 각각 0.6 μm 및 1.0 μm 인 Al_2O_3 (日本輕金, AES 및 A-32)를 사용하였다. 현탁액 제조 및 순수 투과유속 측정에 사용된 물은 초순수 제조장치(Modu Pure, LBMPP 1002)로 처리한 18.2 $\text{M}\Omega/\text{cm}$ 의 초순수이며, 현탁액의 농도는 초순수를 사용하여 1,000 ppm 이내로 제조하였다. 본 실험에서 사용한 정밀여과용 분리막은 세공의 평균크기가 0.24 및 0.34 μm 이고, 내경이 2 mm인 폴리에틸렌 모세관 막(PE Capillary, Asahi kasei)이다. 모세관 막은 실험에 사용하기 전에 에탄올 용액으로 세정한 후 막모듈에 장착하여 사용하였으며, 막모듈은 막을

세정할 수 있도록 제작되었다. 투과성능을 측정하기 위한 실험장치는 Fig. 1에 도시한 바와 같이 원료를 저장하고 공급하기 위한 원료탱크와 이송펌프, 막의 투과성능을 측정하기 위해 막을 장착한 막모듈 그리고 성능시험이 끝난 오염된 막을 세정하기 위한 역 세척용 순수탱크와 질소보배 등으로 구성하였다. 원료탱크에는 공급액의 온도를 자유롭게 제어할 수 있는 가열과 냉각기능이 가능한 전열시스템을 설치하였으며, 예상치 않은 이물질로부터 분리막을 보호하기 위해 세공의 크기가 $3.0\ \mu\text{m}$ 인 폴리프로필렌 필터를 전처리 필터를 설치하였다.

3.2. 실험방법

분리막 여과공정에서 현탁액의 공급형태는 순환흐름의 십자류 방식이었으며, 공급액의 유량과 운전압력은 막모듈의 앞뒤에 설치된 압력조절용 니들밸브와 우회밸브 그리고 유량계를 이용하여 조절하였으며, 운전압력은 $0\sim 2.0\ \text{kg}/\text{cm}^2$, 공급액의 유량은 $0\sim 24\ \text{L}/\text{hr}$ 범위에서 조절하여 실험하였다. 또한, 공급액의 농도를 일정하게 유지하기 위하여 분리막을 투과하지 않고 지나온 배제액과 투과액을 모두 원료탱크로 되돌아가도록 순환시켰다.

역세척에 의한 막오염의 변화거동을 알아보기 위하여 투과시험에 사용했던 막을 공기와 순수로 역세척을 하였다. 역세척(W/BF)은 투과시험을 마친 모세관 막(Before BF)에 압력을 걸지 않은 상태에서 막 바깥쪽에서 막 안쪽으로 역세척 압력을 $0.7\ \text{kg}/\text{cm}^2$ 로 하여 공기와 순수를 각각 10분씩 역방향으로 공급하였다. 그리고 역세척을 하지 않은 경우(W/O BF)에는 압력을 걸지 않은 상태에서 20분간 순수로 순환세척만 하였다.

3.3. 현탁입자의 크기분포

본 실험에서 사용한 콜로이드 용액 속에 분산된 알루미늄 입자의 크기는 광산란 입도계(ELS-8000, Photal)로 측정하여 입자의 크기분포를 Fig. 2에 나타냈다. 현탁액의 분산매로는 초순수를 사용하였고, 현탁액은 농도를 $100\ \text{ppm}$ 으로 조정한 후 입자들의 응집을 방지하기 위해 초음파 세척기로 분산시켜 사용하였다. 입자의 분포는 평균크기가 $1.0\ \mu\text{m}$ 인 알루미늄의 경우 $0.38\ \mu\text{m}$ 인 입자가 약 1%, $0.45\ \mu\text{m}$ 가 약 17%, $0.5\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 가 약 70% 그리고 $0.88\ \mu\text{m}$ 인 입자가 7% 정도이었으며, 입자의 평균크기가 $0.6\ \mu\text{m}$ 인 알루미늄은 크기가 $0.42\sim 0.48\ \mu\text{m}$ 에 집중된 분포를 나타냈다.

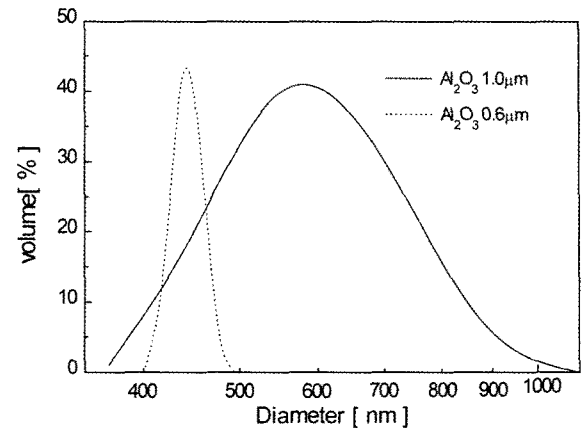


Fig. 2. Size distribution of Al_2O_3 colloidal particle.

4. 결과 및 고찰

4.1. 운전압력의 영향

역세척이 막오염에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 세공의 직경이 $0.34\ \mu\text{m}$ 인 모세관 막에 대하여 입자크기 $1.0\ \mu\text{m}$, 농도 $1,000\ \text{ppm}$ 인 현탁액을 순환흐름속도 $12\ \text{L}/\text{hr}$, 운전압력 $1.0\ \text{kg}/\text{cm}^2$ 과 $2.0\ \text{kg}/\text{cm}^2$ 에서의 역세척을 하기 전과 역세척을 했을 경우와 역세척을 하지 않은 경우의 투과저항과 막오염의 변화형태를 Fig. 3에 나타냈다. 역세척을 하기 전과 역세척을 한 경우 그리고 역세척을 하지 않은 경우의 투과저항의 변화형태는 서로 다른 거동을 보였다. 투과저항은 운전압력이 큰 경우가 운전압력이 작을 때보다 컸으며, 운전시간이 지속됨에 따라 계속 증가하였다. 역세척을 하기 전에는 운전초기의 투과저항 차이는 적었으나 운전시간이 지남에 따라 투과저항의 차이는 점차 커져 약 15.5%까지 증가하였다. 투과저항이 증가하는 속도는 운전시간 10분까지가 이후의 운전시간 60분까지의 증가속도보다 빨랐으며, 증가비율은 운전압력이 $1.0\ \text{kg}/\text{cm}^2$ 인 경우에는 운전초기 10분 25.9%, 이후 60분까지 9.9% 증가하였고, 운전압력이 $2.0\ \text{kg}/\text{cm}^2$ 인 경우에는 각각 32.9%와 7.3% 증가하였다. 그러나 역세척을 했을 때와 역세척을 하지 않았을 때의 투과저항의 변화거동은 역세척 전과 큰 차이를 보이는데 투과저항의 증가속도는 전 운전시간에 걸쳐 계속 증가하는 경향을 보였으며, 투과저항의 증가율은 역세척을 했을 때가 역세척을 하지 않은 때보다도 더 컸다. 운전압력이 $1.0\ \text{kg}/\text{cm}^2$ 일 때, 역세척을 한 경우의 투과저항의 증가율은 초기 투과저항에 대해 2.50배이었고, 역세척을 하지 않은 경우에는 1.70배

이었으며, 운전압력 2.0 kg/cm²에서는 역세척을 한 경우 3.93배, 역세척을 하지 않은 경우 2.55배이었다. 또한, 역세척의 유무에 따른 투과저항의 비, R_{wo}/R_w 는 운전압력이 1.0 kg/cm²인 경우의 운전시간 1분에서 1.83이었으나 운전시간 60분에서는 1.06이었으며, 운전압력이 2.0 kg/cm²인 때에는 각각 1.60과 1.04이었다. 이와 같이 운전압력에 관계없이 역세척의 유무에 따라 운전초기에 투과저항의 차가 큰 결과를 보였는데, 이는 역세척을 함으로써 막오염이 감소하여 운전초기에 투과유속은 크지만 막오염의 빠른 증가로 인한 투과유속의 감소속도가 역세척을 하지 않은 경우보다 빠름을 의미한다. 한편, 역세척을 하기 전 운전시간 30분의 투과유속에 대한 역세척을 했을 때와 하지 않았을 때의 투과유속의 비 J/J_{30} 은 운전압력이 1.0 kg/cm²인 경우에는 J_w/J_{30} 은 0.73이었고, J_{wo}/J_{30} 은 0.58이었으며, 운전압력이 2.0 kg/cm²인 경우에는 J_w/J_{30} 가 0.63, J_{wo}/J_{30} 가 0.56이었다.

역세척 전의 운전압력에 따른 막오염 형태는 운전압력 1.0 kg/cm²에서는 케익여과 형태의 오염이 먼저 나타나지만 운전압력 2.0 kg/cm²일 때에는 세공막힘 형태의 오염이 먼저 나타났다. 한편 역세척을 했을 경우와 하지 않은 경우의 막오염 형태는 운전초기에 강력한 케익여과 형태가 나타났으며, 이후 상대적으로 미약한 세공막힘에 의한 오염이 발생하여 역세척 전의 막오염 형태와 같은 형태를 보였다.

완전세공막힘, 표준세공막힘 및 케익층 형성에 의한 각 오염의 기여도를 알아보기 위하여 Fig. 3을 회귀분석법으로 Fig. 4에 나타냈으며, 총오염에 대해 성분오염이 차지하는 비율은 회귀직선의 기울기인 속도상수(rate constant)로 산출하여 이들 값을 Table 2에 나타내었다. 역세척 전의 압력변화에 따른 성분오염은 운전압력이 1.0 kg/cm²인 경우에는 완전세공막힘 12.2%, 표준세공막힘 8.2%, 그리고 케익오염이 79.6%이었으며, 운전압력이 2.0 kg/cm²인 경우에는 완전세공막힘이 10.2%, 표준세공막힘이 7.1%, 그리고 케익오염이 82.7%이었다. 운전압력을 2.0 kg/cm²로 증가시키기에 따라 성분오염의 변화는 케익에 의한 오염이 3.1% 증가하였다. 이와 같이 운전압력이 높아지면 막표면으로 이동하는 입자의 양이 많아짐에 따라 막표면에 형성된 케익층이 보다 두터워지고 치밀해 진 것으로 해석된다. 그리고 역세척을 했을 경우에 운전압력이 1.0 kg/cm²인 경우에 완전세공막힘 5.7%, 표준세공막힘 4.6% 그리고 케익오염이 89.7%이었으며, 운전압력이 2.0 kg/cm²인 경우에

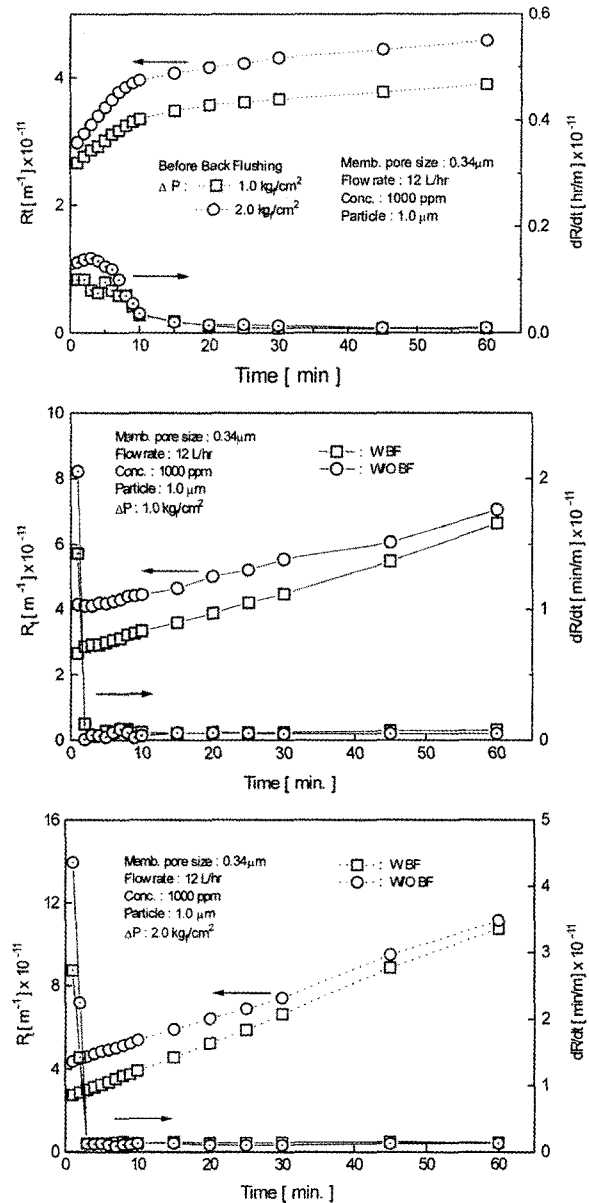


Fig. 3. Resistance data and dR/dt for cross flow filtration for a trans-membrane pressure ; Before BF (top), TMP 1.0 kg/cm² (middle) and 2.0 kg/cm² (bottom).

는 완전세공막힘 3.8%, 표준세공막힘이 3.4%, 케익오염이 92.8%이었다. 운전압력을 2.0 kg/cm²로 증가시키기에 따라 성분오염의 변화는 케익에 의한 오염은 약 3.1% 증가하였다. 한편 역세척을 하지 않은 경우에 운전압력이 1.0 kg/cm²인 경우에 완전세공막힘 7.4%, 표준세공막힘 5.6% 그리고 케익오염이 87.0%이었으며, 운전압력이 2.0 kg/cm²인 경우에는 완전세공막힘 5.0%, 표준세공막힘이 4.5%, 케익오염이 90.5%이었다. 운전

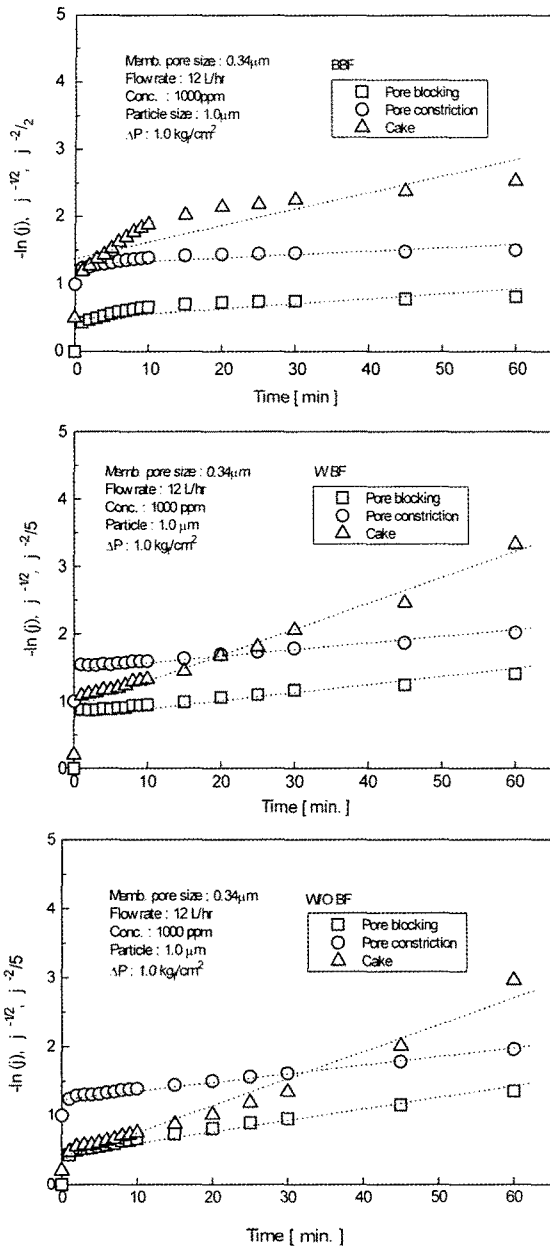


Fig. 4. Comparison of relative permeate flux (symbols) with fouling model in the linear form (dot line) ; Before BF (top), With BF (middle) and Without BF (bottom).

압력을 2.0 kg/cm^2 로 증가시킴에 따라 성분오염의 변화는 케익에 의한 오염이 약 3.5% 증가하였다. 그리고 중간세공막힘 현상은 입자가 직접 세공을 막기도 하지만 이미 막표면에 도달했거나 세공을 막고 있는 입자들의 위에 누적되는 의미를 가지므로 본 실험에서는 중간세공막힘을 별도로 해석하지 않고 케익여과에 포함시켜 해석하였다.

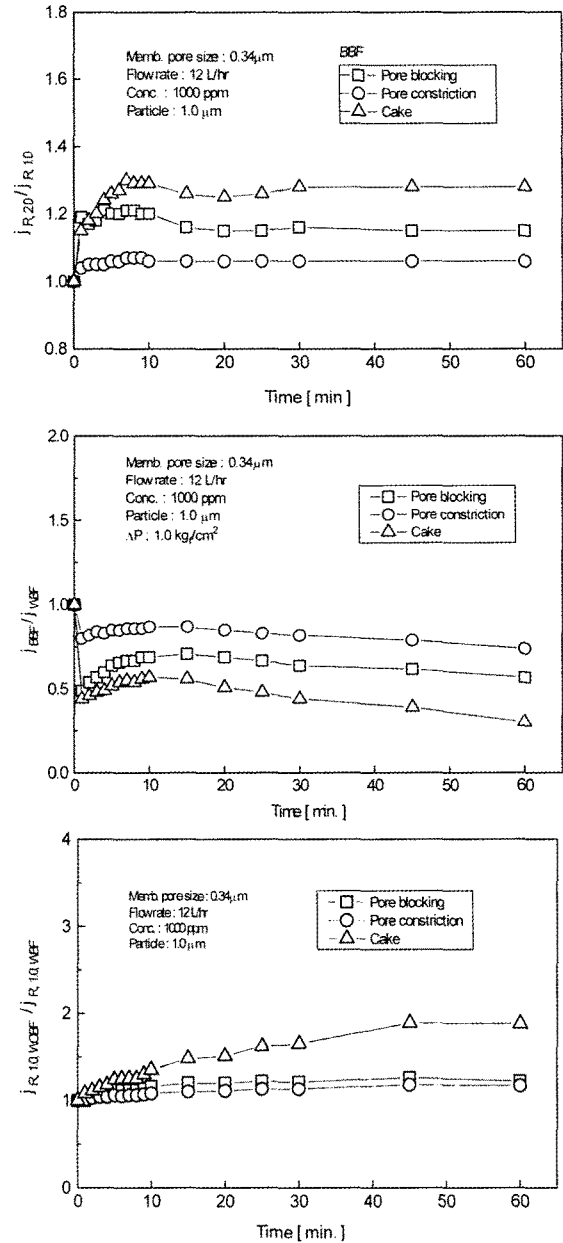


Fig. 5. Effect of back flushing on the ratio of regressed relative permeate flux (j_R) ; ratio of 2.0 kg/cm^2 to 1.0 kg/cm^2 Before BF (top), ratio of Before BF to With BF (middle) and ratio of Without BF to With BF at TMP 1.0 kg/cm^2 (bottom).

운전압력 변화에 따른 성분오염의 변화를 비교하기 위하여 회귀 비 투과유속의 비를 Fig. 5에 나타내었다. 역세척 전의 성분오염의 회귀 비 투과유속의 비($j_{R,2.0}/j_{R,1.0}$)는 모두 1보다 큰 값을 보였다. 이는 운전압력이 증가함에 따라 성분오염과 전체 막오염이 증가하였음을 나

Table 2. Linear Least Squares Regression Results (rate constant and regression coefficient) of Different Fouling Models for Different Permeate Pressure^{a)}

Back Flushing		Complete blocking (pore blocking)		Standard blocking (pore constriction)		Cake filtration	
Mode	TMP (kg/cm ²)	k_b	R^2	k_s	R^2	k_c	R^2
Before	1.0	0.0076	0.6655	0.0051	0.7142	0.0497	0.8197
	2.0	0.0082	0.6293	0.0057	0.6816	0.0662	0.8048
With	1.0	0.0122	0.7089	0.0099	0.7993	0.1933	0.9558
	2.0	0.0175	0.7969	0.0159	0.8874	0.4323	0.9897
Without	1.0	0.0166	0.9211	0.0126	0.9584	0.1956	0.9844
	2.0	0.0278	0.9672	0.0246	0.9916	0.4983	0.9896

* a) rate constants k_b , k_s , k_c are in 1/min.

타난다. 성분오염의 증가크기는 케익오염이 가장 컸고, 표준세공막힘에 의한 오염이 제일 작았다. 표준세공막힘에 의한 회귀 비 투과유속의 비는 운전초기에 약간 증가하였으나 이후 일정한 값을 나타냈지만 완전세공막힘과 케익여과에 의한 회귀 비 투과유속의 비는 운전시간 15분에서 25분 사이에 약간 감소하였다. 한편 역세척을 한 경우와 역세척 전의 회귀 비 투과유속의 비 ($j_{R,BBF}/j_{R,WBF}$)는 역세척을 했을 때에 각 성분오염의 크기가 증가하였으며, 표준세공막힘이 가장 적은 14.9% 증가하였고, 케익오염은 53.8%로 가장 크게 증가하였다. 역세척을 한 경우와 하지 않은 경우의 회귀 비 투과유속의 비($j_{R,1.0WOBF}/j_{R,1.0WBF}$)로부터 성분오염의 증가는 역세척을 하지 않은 경우가 역세척을 한 경우보다 컸으며, 각 성분오염의 평균 증가율은 완전세공막힘이 11.0%, 표준세공막힘에 의한 오염은 8.5% 그리고 케익여과에 의한 오염은 가장 크게 44.0% 증가함을 보였다.

4.2. 농도의 영향

현탁액의 농도를 200 ppm으로 하였을 경우의 운전시간에 따른 투과저항과 막오염 형태의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 투과저항의 변화는 역세척을 하기 전과 같이 운전초기에 투과저항이 약간 급격한 증가를 보여주고 있다. 초기 운전시간 2분 동안에 역세척을 했을 경우에는 투과저항이 9.7% 증가하였고, 역세척을 하지 않았을 경우에는 14.0% 증가하였으며, 운전시간 10분 이후에는 역세척의 유무에 따라 각각 32.8%와 29.4%까지 서서히 증가하는 경향을 보였다. 또한, 운전초기에

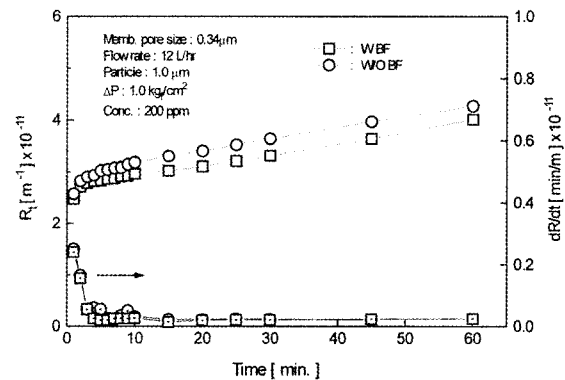


Fig. 6. Resistance data and dR/dt for cross flow filtration for 200 ppm colloidal solution.

역세척의 유무에 따른 투과저항의 차이가 크지 않았는데 이는 현탁액의 농도가 1,000 ppm인 경우 운전초기에 역세척을 했을 때와 역세척을 하지 않았을 때의 투과저항의 차이가 크고, 운전시간이 지속됨에 따라 투과저항의 차이가 점차 감소하는 경향과 반대되는 현상을 나타냈다. 이는 현탁액의 농도가 낮을 경우에는 역세척을 하기 전의 발생한 막오염은 투과거동의 변화에 상대적으로 영향이 적게 미치는 것을 의미한다. 투과저항 변화에 따른 막오염 형태는 역세척을 하였을 경우에는 운전초기에 케익오염이 발생한 후 세공막힘에 의한 오염이 발생하지 않고 정상상태의 거동을 보인 반면 역세척을 하지 않았을 때에는 운전시간 3분에서 미약한 그리고 운전시간 6분에서 명확한 세공막힘에 의한 오염이 발생하였다.

현탁액의 농도가 200 ppm이고 역세척을 한 경우와

Table 3. Linear Least Squares Regression Results (rate constant and regression coefficient) of Different Fouling Models for 200 ppm Colloidal Solution^{a)}

Back Flushing	Complete blocking (pore blocking)		Standard blocking (pore constriction)		Cake filtration	
	k_b	R^2	k_s	R^2	k_c	R^2
With	0.0087	0.8003	0.0059	0.8561	0.0587	0.9399
Without	0.0087	0.7826	0.0060	0.8332	0.0642	0.9371

* a) rate constants k_b , k_s , k_c are in 1/min.

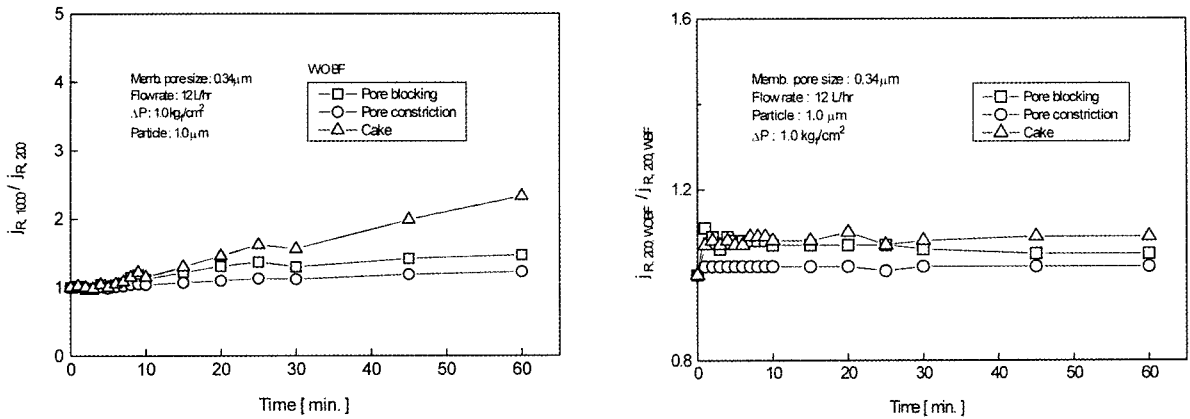


Fig. 7. Effect of back flushing on the ratio of regressed relative permeate flux for 200 ppm colloidal solution ; ratio of 1,000 ppm to 200 ppm Without BF (top) and ratio of Without BF to With BF at 200 ppm (bottom).

역세척을 하지 않은 경우에 각 성분오염이 차지하는 비중은 Table 3의 k_b , k_s , k_c 를 기준으로 산출하였다. 역세척을 하였을 경우의 성분오염의 크기는 완전세공막힘이 11.9%, 표준세공막힘은 8.0% 그리고 케익층에 의한 오염은 80.1%이었으며, 역세척을 하지 않은 경우는 완전세공막힘이 11%, 표준세공막힘은 7.6% 그리고 케익 오염은 81.4%이었다. 이는 동일 운전조건의 현탁액의 농도가 1,000 ppm일 때 역세척의 한 경우와 하지 않은 경우에 세공막힘이 차지하는 비율보다 높았고, 역세척을 하기 전의 총오염에 대한 세공막힘에 의한 오염이 약 20%인 값과 유사한 비율을 나타냈다.

농도변화에 따른 성분오염의 회귀 비 투과유속의 비 ($J_{R,1000}/J_{R,200}$)를 Fig. 7에 나타냈다. 역세척을 한 경우나 하지 않은 경우 모두 성분오염의 회귀 비 투과유속의 비는 모두 1보다 큰 값을 보였으며, 농도가 높은 경우에 표준세공의 변화율은 일정한 경향을 보였으나, 완전세공막힘과 케익여과에 의한 오염은 운전시간 30분을 전후해 증가율이 서로 다른 양상을 보였다. 또한 현탁액의 농도가 200 ppm인 경우 역세척에 따른 회귀 비 투과유속의 비($J_{R,200,WO}/J_{R,200,W}$)를 살펴보면 역세척을 하

지 않았을 때의 성분오염은 표준세공막힘이 작았고, 완전세공막힘과 케익여과에 의한 오염은 비슷한 비율로 역세척을 한 경우 보다 큰 값을 나타냈다.

4.3. 입자크기의 영향

현탁입자의 크기가 투과저항에 미치는 영향을 살펴 보기 위하여 동일조건하에서 입자크기가 0.6 μm인 현탁액의 운전시간변화에 따른 투과유속 거동을 Fig. 8에 도시하였다. 투과저항의 변화형태는 농도가 200 ppm인 경우와 유사한 형태의 거동을 보였으며, 운전초기 2분 동안에 역세척을 한 경우와 역세척을 하지 않은 경우 모두 약 18% 증가한 후 운전시간 10분 이후에는 57% 정도까지 서서히 증가하는 경향을 나타냈다. 그러나 동일한 현탁액의 농도에서 입자크기에 따른 투과저항의 크기는 입자크기가 작은 0.6 μm 현탁액의 경우가 1.0 μm인 경우보다 평균 2.6배 큰 값을 나타냈다. 이는 운전조건이 같을 때, 막표면에 도달하는 미립자의 수는 입자의 크기가 작을수록 많아지고, 크기가 작은 입자들로 형성된 케익층 충전밀도는 큰 입자에 비해 상대적으로 높기 때문이다. 운전시간에 따른 막오염의 형태도 운전

Table 4. Linear Least Squares Regression Results (rate constant and regression coefficient) of Different Fouling Models for 0.6 μm Al_2O_3 particle^{a)}

Back Flushing	Complete blocking (pore blocking)		Standard blocking (pore constriction)		Cake filtration	
	k_b	R^2	k_s	R^2	k_c	R^2
With	0.0127	0.8039	0.0096	0.8682	0.1413	0.9723
Without	0.0133	0.8073	0.0102	0.8708	0.1612	0.9745

* a) rate constants k_b , k_s , k_c are in 1/min.

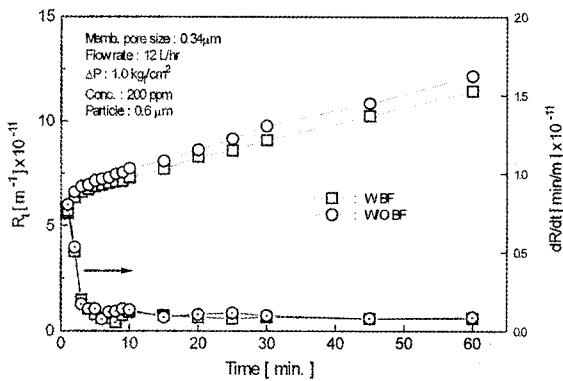


Fig. 8. Resistance data and dR/dt for cross flow filtration for 0.6 μm Al_2O_3 particle.

초기에 케익여과에 이은 세공막힘이 발생하고 있으며, 세공막힘의 발생시점은 역세척을 하지 않았을 때가 역세척을 한 경우보다 2분정도 빨랐다.

전체 막오염에 대한 성분오염을 평가하기 위하여 Table 4의 k_b , k_s , k_c 총량을 기준으로 산출된 성분오염의 크기는 역세척을 한 경우에는 완전세공막힘이 7.8%, 표준세공막힘이 5.9% 그리고 케익오염이 86.3%를 보였다. 반면 역세척을 하지 않은 경우에는 완전세공막힘이 7.2%, 표준세공막힘이 약 5.5%, 그리고 케익오염이 87.3%를 나타내 역세척을 한 경우의 세공막힘 오염이 약간 크게 나타났다. 또한, 이는 같은 농도의 입자크기가 1.0 μm 인 현탁액의 총오염에 대한 세공막힘이 차지하는 비율이 약 19%인데 비하여 입자크기가 0.6 μm 인 경우에는 약 13%를 나타내 총오염 대비 값은 작았지만 총오염의 크기는 1.8배 정도 큰 값을 나타내었다.

입자크기에 따른 성분오염의 회귀 비 투과유속의 비 ($J_{R,0.6}/J_{R,1.0}$)를 Fig. 9에 나타냈다. 역세척을 한 경우의 성분오염의 크기는 동일 운전조건에서 입자크기가 작은 0.6 μm 현탁액이 컸으며, 입자크기가 1.0 μm 현탁액과 비교하여 표준세공막힘은 평균 1.12배로 일정하였으며, 완전세공막힘은 그 값이 표준세공보다 크고 변화

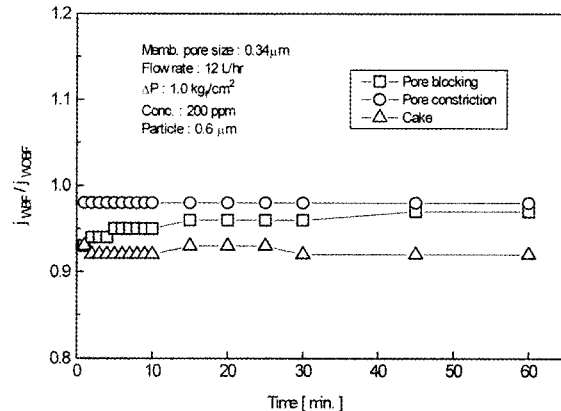
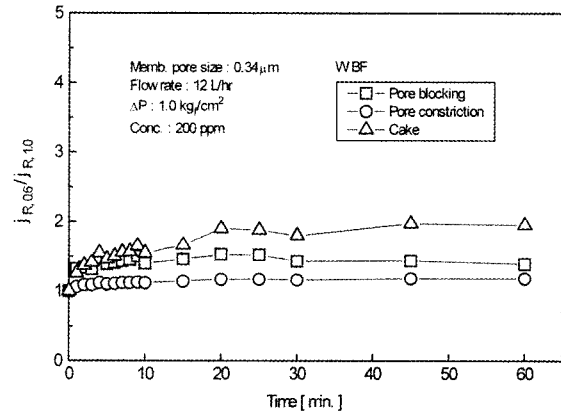


Fig. 9. Effect of back flushing on the ratio of regressed relative permeate flux for Al_2O_3 particle size ; ratio of 0.6 μm to 1.0 μm (top) and ratio of With BF to Without BF at 0.6 μm (bottom).

율도 큰 평균 1.35배였고, 케익여과에 의한 오염은 1.26~1.95배로 편차가 큰 값을 나타냈다. 입자크기가 0.6 μm 인 현탁액의 역세척을 한 경우와 하지 않은 경우의 성분오염의 회귀 비 투과유속의 비($J_{R,W}/J_{R,WO}$)의 크기변화에 따른 성분오염의 크기는 역세척을 한 경우가 작았으며, 표준세공막힘은 거의 일정하게 0.98를 보였고, 케익오염 성분은 0.93~0.98의 값을 보인 반면 완전세공막힘 오염은 0.93~0.97의 값을 나타냈다.

Table 5. Linear Least Squares Regression Results (rate constant and regression coefficient) of Different Fouling Models for 0.24 μm Membrane^{a)}

Back Flushing	Complete blocking (pore blocking)		Standard blocking (pore constriction)		Cake filtration	
	k_b	R^2	k_s	R^2	k_c	R^2
With	0.0157	0.7601	0.0137	0.8516	0.3467	0.9821
Without	0.0208	0.9340	0.0171	0.9723	0.3580	0.9793

* a) rate constants k_b , k_s , k_c are in 1/min.

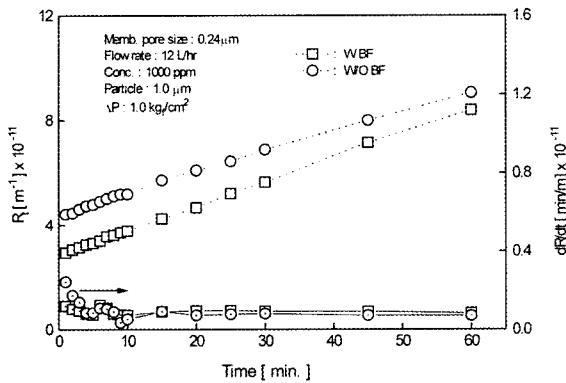


Fig. 10. Resistance data and dR/dt for cross flow filtration for 0.24 μm membrane.

4.4. 세공크기의 영향

분리막의 세공크기가 투과저항에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 세공의 직경이 0.24 μm 인 모세관 막에 대한 투과저항 변화를 Fig. 10에 나타냈다. 막의 세공크기에 따른 투과저항의 크기는 앞서 살펴 0.34 μm 인 막에 비하여 세공크기가 0.24 μm 인 막을 사용했을 경우가 더 컸으며, 역세척을 한 경우에는 평균 28.5% 증가하였고, 역세척을 하지 않은 경우에는 평균 17.5% 증가하였다. 또한, 세공의 크기가 0.24 μm 인 모세관 막을 사용했을 때에도 모든 운전시간 구간에 대하여 막오염이 증가하는 경향을 보였으며, 운전초기에 역세척을 했을 때와 역세척을 하지 않았을 때의 투과저항의 차이가 가장 컸으며, 이 경우에도 역세척을 한 경우의 투과저항의 증가율이 역세척을 하지 않은 때보다 더 큰 결과를 보였다.

투과유속을 감소시키는 막오염 형태는 역세척을 한 경우나 역세척을 하지 않은 경우 모두 세공막힘과 케익에 의한 오염이 함께 나타나는 혼합형태를 보였으나, 세공의 크기가 0.34 μm 인 막에서 운전초기에 나타나는 강한 케익여과에 의한 오염은 약화되고, 역세척을 한 경우와 하지 않은 경우 모두 명확한 세공막힘 현상이

발생하였으며, 역세척을 하지 않은 경우에는 운전시간 9분에서 역세척을 한 경우보다 약간 또렷한 2차 세공막힘 현상이 발생함을 보여준다.

세공크기가 0.24 μm 인 모세관 막의 전체 막오염에 대한 성분오염의 크기는 Table 5의 속도상수 k_b , k_s , k_c 총량을 기준으로 한 각 성분오염을 산출하였으며, 전체 오염에 대해 성분오염의 비율은 역세척을 한 경우에는 완전세공막힘이 4.2%, 표준세공막힘은 3.6% 그리고 케익층에 의한 오염은 92.2%이었고, 역세척을 하지 않은 경우에는 완전세공막힘은 5.3%, 표준세공막힘은 4.3% 그리고 케익층에 의한 오염이 90.4%이었다. 역세척을 한 경우와 역세척을 하지 않은 경우에 모두 완전세공막힘에 의한 오염이 표준세공막힘에 의한 오염보다 조금 큰 값을 나타내고, 역세척을 하지 않은 경우가 총 세공막힘에 의한 오염이 역세척을 한 경우보다도 1.8% 컸다. 그리고 세공의 크기가 0.34 μm 의 경우에는 세공막힘에 의한 오염이 10% 보다 컸으나 세공이 작은 0.24 μm 막에서는 세공막힘에 의한 오염이 10% 미만을 나타냈다.

분리막의 세공크기에 따라 발생하는 막오염의 형태와 성분오염의 상대적인 크기를 비교하기 위하여 성분오염의 회귀 비 투과유속의 비를 Fig. 11에 나타내었다. 세공크기에 대한 $j_{R,0.24\mu\text{m}}/j_{R,0.34\mu\text{m}}$ 의 각 성분오염은 모두 1보다 큰 값을 보였다. 이는 세공의 크기가 작은 0.24 μm 막의 모든 성분오염이 세공이 큰 막보다 크다는 것을 의미하며, 성분오염의 합으로 나타나는 총오염도 당연히 크다는 것을 의미한다. 세공의 크기가 0.24 μm 인 막의 표준세공막힘과 완전세공막힘에 의한 막오염 증가율은 운전 중 거의 일정한 값을 보였고, 완전세공막힘이 평균 8.0% 그리고 표준세공막힘에 의한 오염이 평균 5.5% 증가하였다. 그러나 케익여과에 의한 오염은 운전초기 10분간은 서서히 증가하다가 이후 증가율이 커져 평균 27.5%의 증가하였다. 역세척을 한 경우와 역세척을 하지 않은 경우의 $j_{R,WOBF}/j_{R,WBF}$ 의 값도 1보다

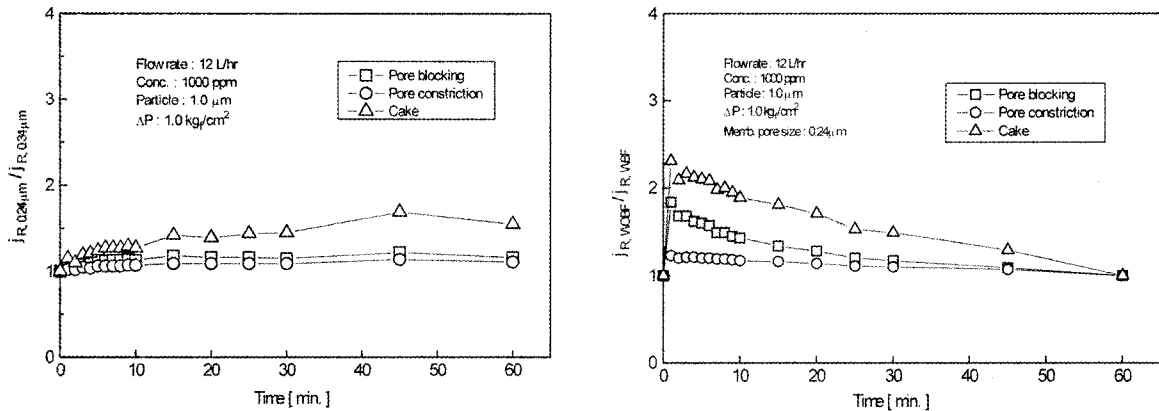


Fig. 11. Effect of back flushing on the ratio of regressed relative permeate flux for membrane pore size ; ratio of 0.24 μm to 0.34 μm (top) and ratio of Without BF to With BF at 0.24 μm (bottom).

큰 값을 나타내고 있으며, 이는 또한 역세척을 하지 않은 경우의 총오염과 성분오염이 모두가 역세척을 한 경우보다 큼을 의미한다. 표준세공막힘 오염은 일정한 값을 보였으나, 완전세공막힘과 케익여과에 의한 오염은 운전초기부터 급격히 증가하다가 서서히 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 완전세공막힘 42%, 표준세공막힘 15% 그리고 케익여과에 의한 오염이 평균 80% 증가하였음을 나타내고 있다.

5. 결 론

정밀여과 폴리에틸렌 모세관 막을 사용한 후 역세척 유무에 따른 Al_2O_3 현탁액의 투과저항과 막오염의 변화거동에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 운전압력에 따른 투과저항의 거동은 역세척을 하기 전에는 운전시간 초기 10분까지 급격히 증가하였으나 역세척을 했을 때와 역세척을 하지 않았을 때는 전 운전시간에 걸쳐 계속 증가하는 경향을 보였다. 투과저항은 역세척을 한 경우가 역세척을 하지 않은 경우보다 작았으나 투과저항 증가율은 역세척을 하지 않은 때보다도 더 컸고, 운전압력에 관계없이 운전초기의 투과저항의 차가 큰 경향을 보였다. 역세척 전에는 운전초기에 세공막힘이 발생하였으나 역세척을 한 경우와 하지 않은 경우에는 운전초기에 강력한 케익오염이 발생하였고, 운전압력이 높을 때가 더 컸다. 총오염에 대한 케익오염의 비율은 역세척을 한 경우가 역세척을 하지 않은 경우보다 컸고, 운전압력이 높을 때가 더 컸다.

2) 현탁액의 농도 200 ppm에서 투과저항은 운전초기에 급격히 증가하였고, 투과저항의 증가율은 역세척을

하지 않은 경우가 역세척을 한 경우보다 컸으며, 운전초기에 역세척의 유무에 따른 투과저항의 차이는 작았다. 성분오염의 총오염에 대한 비율은 역세척을 한 경우 세공막힘이 19.9%, 케익오염은 80.1%이었고, 역세척을 하지 않은 경우는 세공막힘이 18.6% 그리고 케익오염은 81.4%이었다.

3) 입자크기가 0.6 μm 인 현탁액의 투과저항은 운전초기 2분 동안에 역세척을 한 경우, 하지 않은 경우 모두 18% 정도 증가하였고, 입자크기가 1.0 μm 인 경우보다 평균 2.6배 컸다. 막오염의 형태는 운전초기 케익여과에 의한 세공막힘이 발생하였고, 세공막힘의 발생시점은 역세척을 하지 않았을 때가 2분 빨랐다. 성분오염의 크기는 역세척을 한 경우, 하지 않은 경우 모두 세공막힘이 13%, 케익오염이 87% 정도이었다. 입자크기가 1.0 μm 인 현탁액에 비하여 세공오염은 1.8배 정도 큰 값을 보였다.

4) 세공크기가 0.24 μm 인 막의 투과저항이 0.34 μm 인 막에 비해 더 컸으며, 역세척을 한 경우에는 평균 28.5%, 역세척을 하지 않은 경우에는 평균 17.5% 증가하였다. 막오염 형태는 세공의 크기가 0.34 μm 인 막에 비해 케익오염은 약화되고 명확한 세공막힘 현상이 발생하였다. 성분오염의 비율은 역세척을 한 경우에는 세공막힘이 약 7.8%, 케익오염 약 92.2%이었고, 역세척을 하지 않은 경우에는 세공막힘은 9.6% 그리고 케익오염이 90.4%이었다.

감 사

본 연구는 경일대학교 교내연구비지원에 의해 수행된 연구로 이에 감사드립니다.

기 호 설 명

A	membrane area [m^2]
J	permeate flux [L/m^2 hr]
J_o	pure water flux [L/m^2 hr]
j	relative permeate flux [$=J/J_o$]
j_R	regressed j [$-\ln j, j^{1/2}$ and j^2]
k	constant in generalized model [-]
ΔP	trans-membrane pressure [kg/cm^2]
R	permeate resistance [m^{-1}]
R_o	membrane resistance [m^{-1}]
R_c	cake resistance [m^{-1}]
R_p	pore blocking resistance [m^{-1}]
t	time [hr]
μ	viscosity [$pa \cdot s$]

참 고 문 헌

1. W. S. Winston Ho and K. K. Sirkar, Membrane Handbook, Van Nostrand Reinhold, New York, (1992).
2. 木村尚史, 膜學實驗 シリ-ス"-日本膜學會編, p. 86, 共立出版社, 東京 (1993).
3. A. S. Jonsson *et al.*, "Influence of the concentration of a low-molecular organic solute on the flux reduction of a polyethersulphone ultrafiltration membrane", *J. Membr. Sci.*, **135**, 117 (1997).
4. A. B. Koltuniewicz, R. W. Field, and T. C. Arnot, "Cross-flow and dead-end microfiltration of oily-water emulsion. Part I: Experimental study and analysis of flux decline", *J. Membr. Sci.*, **102**, 193 (1995).
5. Y. K. Benkahla, *et al.*, "Cake growth mechanism in cross-flow microfiltration of mineral suspension", *J. Membr. Sci.*, **98**, 107 (1995).
6. R. Jiratananon, D. Uttapap, and C. Tangamornsuksun, "Self-forming dynamic membrane for ultrafiltration of pineapple juice", *J. Membr. Sci.*, **129**, 135 (1997).
7. R. Jiratananon, D. Uttapap, and P. Sampranpi-boon, "Crossflow microfiltration of colloidal suspension with the presence of macromolecules", *J. Membr. Sci.*, **140**, 57 (1998).
8. W. R. Bowen, J. I. Calvo, and A. Hernandez, "Steps of membrane blocking in flux decline during protein microfiltration", *J. Membr. Sci.*, **101**, 153 (1995).
9. S. S. Madaeni, "Ultrafiltration of very dilute colloidal mixtures", *Colloid & Surfaces, A : Physico-chemical and Engineering Aspects*, **131**, 109 (1998).
10. R. Rautenbach and G. Schock, "Ultrafiltration of macromolecular solutions and crossflow micro-filtration of colloidal suspension", *J. Membr. Sci.*, **36**, 231 (1988).
11. P. Srijaroonrat, E. Julien, and Y. Aurelle, "Un-stable secondary oil/water emulsion treatment using ultrafiltration : fouling control by backflushing", *J. Membr. Sci.*, **159**, 11 (1999).
12. 박진용, "세라믹 여과 시스템으로 제지폐수 처리시 회수 효율에 대한 물 역세척 시간의 영향", *멤브레인*, **14(4)**, 329 (2004).
13. 이혁찬, 조재형, 박진용, "세라믹 정밀여과에 의한 고도정수처리 시스템에서 물 역세척 시간 및 주기의 영향", *멤브레인*, **18(1)**, 26 (2008).
14. 이혁찬, 박진용, "다채널 세라믹 정밀여과 및 활성탄 흡착 혼성공정에 의한 고탁도 원수의 고도정수 처리", *멤브레인*, **18(4)**, 325 (2008).
15. J. Hermia, "Constant pressure blocking filtration laws-Application to power law non-Newtonian fluids", *Trans IChemE.*, **60**, 183 (1982).
16. R. Snodhi, Y. S. Lin, and F. Alvarez, "Crossflow filtration of chromium hydroxide suspension by ceramic membranes : fouling and its minimization by backpulsing", *J. Membr. Sci.*, **174**, 111 (2000).