

십자형 응집-UF 막분리 공정 적용시 전처리 응집조건에 따른 막오염 메커니즘 규명

정철우[†] · 손희종*

울산산업진흥TP 전략산업기획단
683-804 울산시 북구 연암동 758-2
*부산광역시 상수도사업본부 수질연구소
621-813 경남 김해시 상동면 매리 421-1
(2008년 2월 29일, 2008년 4월 7일 채택)

The Evaluation of Fouling Mechanism on Cross Flow Precoagulation-UF Process

Chul-Woo Jung[†] and Hee-Jong Son*

Ulsan Regional Innovation Agency, Ulsan Industry Promotion Techno Park, 758-2, Yeonamdong, Bukgu, Ulsan 683-804, Korea

*Busan Water Quality Institute, 421-1 Maeri, Sangdongmyun, Kimhae 621-813, Korea

(Received 29 February 2008; Accepted 7 April 2008)

요 약

십자형 응집-한외여과 막분리 공정 운전시 응집조건에 따른 영향을 살펴보면 급속교반-UF 공정과 응집-침전-UF 공정에서 투과 flux의 변화는 크게 나타나지 않았으며 UF막의 막오염 억제 측면에서는 응집전처리공정으로서 1분간의 짧은 급속혼화만으로도 충분한 것으로 나타났다. 교반강도에 따른 투과 flux의 변화결과 교반강도에 따라 형성되는 floc의 크기가 거의 유사하게 형성되어 교반강도에 따른 영향은 나타나지 않았다. 응집제 주입량에 따른 투과 flux변화를 살펴보면 응집제 주입량이 증가함에 따라 유기물의 제거가 크게 일어나 유기물 부하의 감소와 floc의 크기가 증가함에 따라 다공성 케이크층의 형성에 따른 막저항의 감소로 인하여 투과 flux가 향상되었다. 막의 재질과 전처리 응집공정 적용에 따른 여과메커니즘 분석결과 막의 재질에 따라서는 친수성 재질의 막에 비하여 소수성 재질의 막의 경우 막의 공극속으로 입자의 침투가 발생하여 침적·흡착되는 현상과 막의 표면에서 형성되는 cake층에 의한 투과 flux 감소가 주원인이 되었으며 응집공정을 전처리공정으로 적용시 UF단독공정에 비하여 막오염 발생이 저감되었다.

Abstract – The objectives of this research are to (1) observe changes in particle size distribution due to formation of microflocs during coagulation process (2) identify the membrane fouling potential on cross flow system (3) investigate the mechanism of membrane fouling. The rate of flux decline for the hydrophobic membrane was significantly greater than for the hydrophilic membrane, regardless of pretreatment conditions. The pretreatment of the raw water significantly reduced the fouling of the UF membrane. Also, the rate of flux decline for the hydrophobic membrane was considerably greater than for the hydrophilic membrane. Applying coagulation process before membrane filtration showed not only reducing membrane fouling, but also improving the removal of dissolved organic materials that might otherwise not be removed by the membrane. That is, during the mixing period, substantial changes in particle size distribution occurred under rapid and slow mixing condition due to the simultaneous formation of microflocs and NOM precipitates. Therefore, combined pretreatment using coagulation not only improved dissolved organics removal efficiency but also flux recovery efficiency.

Key words: Membrane Fouling, Cross Flow, Pretreatment, Coagulation, NOM

1. 서 론

현재 상수원수내의 각종 유기성 오염물질은 기존의 정수공정에서 효과적으로 제거되지 못하고 있는 실정에 있다. 이에 따라 효율적으로 제거되지 않은 유기물질은 염소소독 과정을 거치면서 트리할로메탄 (THMs)과 각종 할로겐 화합물과 같은 발암성 물질을 형성

하며, 또한 수도관이나 물탱크에 잔류하여 세균번식의 원인이 되는 등 수도물의 안정성에 커다란 위협적인 요인이 되고 있다[1-4]. 이에 따라 막분리 공정(membrane process)은 유기성 오염물질의 효율적인 제거와 점차 강화되는 수도물 수질기준에 대처하기 위하여 현재 기존 정수공정의 대안으로 최근 구미각국에서 많은 연구가 진행 중이다[5-7]. 막분리 공정을 정수처리법에 적용할 경우 막의 종류 및 모듈의 선정이 중요시 되며 운전방법에 따라 분리막에서의 효율과 경제성에 커다란 차이가 나타날 수 있다[8-9]. 또한 자연유기물질과

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: cwjung@uria.or.kr

입자상 물질로 인하여 발생하는 막오염은 막분리 공정의 적용을 위한 또다른 제한요인이 되고 있으며[10-14]. 원수특성에 적합한 막의 선택과 운전은 막분리 공정에서 중요한 요소라 할 수 있다. 따라서 상수원수에 함유된 유기물의 물리·화학적 특성을 파악하여 수질 특성에 적합한 막의 재질과 종류를 선택하여 최상의 막분리 공정을 도입하여야 할 것이다. 또한 막분리 공정으로만 효과적인 유기물 제거에 있어 운전상의 어려움에 따라 막분리 공정에 앞서 전처리 공정을 도입하여 유기물 제거에 적합한 막분리 공정에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 특히 막분리 공정의 전처리 공정으로 응집공정과 분말활성탄 공정이 많이 사용되고 있으며 응집공정의 적용은 효과적인 전처리 공정으로 널리 알려져 있다[15-18]. 그러나 응집공정에서 교반조건과 응집제 주입량 등 세부적인 운전인자에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 그리고 현재 전국 정수장에서 1일 생산량이 1만톤 이하의 소규모 정수장이 약 70%정도를 차지하고 있는데 이런 소규모 정수장의 운전이 제대로 이루어지지 않아 양질의 수도물 생산에 많은 문제점이 있는 실정이다. 그러므로 소규모 정수장에서는 다소 운전이 어려운 응집·침전·여과·소독의 재래식 정수공정보다는 간단한 조작으로 운전이 용이한 막분리 공정을 기존정수장의 일부공정(즉, 응집·침전·여과)과 대체할 수 있는 방법의 모색이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 십자형 응집·환외여과 막분리 공정 운전시 전처리 응집조건에 따른 투과 flux에 미치는 영향을 파악하고자 하였으며 전처리 응집공정 적용에 따른 막오염 메커니즘을 규명하고자 하였으며 또한 막의 재질에 따른 막오염 메커니즘을 조사하여 원수성상에 적합하며 막오염을 최소화 할 수 있는 전처리 응집조건과 막분리 공정의 운전인자를 도출하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2-1. 시수특성

본 실험에 사용된 원수는 상수원으로 사용되는 낙동강원수와 역삼투막(RO, Hydronautics, ESNA-2540)을 이용하여 낙동강원수를 농축한 농축수를 이용하였다. 농축수 제조과정은 유효경 0.45 mm, 균등계수 1.5이하인 모래여과조를 거친 낙동강원수를 UF를 이용하여 전처리후 RO공정으로 유입하여 순화시켜 제조하였다. UF는 중공사막 형태의 polyacrylonitrile(PAN) 재질로 공극의 크기는 0.01 μm이며 막면적은 10 m²이다. RO 경우 외관형 polyamide 재질로 구성되어 있으며 막 면적은 7.4 m²이며 염배제율은 99.4%이다. RO를 거친 처리수는 방류하였으며 농축수는 농축조에 모아 다시 MF를 거쳐 RO 공정으로 유입하여 원하는 농도로 농축하여 사용하였다[19].

2-2. 응집전처리공정

응집실험에 사용된 급속교반조건은 250 rpm(G=550 sec⁻¹ at 20 °C)에서 1분, 완속교반조건은 30 rpm(G=22 sec⁻¹ at 20 °C)에서 30분동안 운전하였으며 급속·완속교반후 침전시간은 30분동안 실시

Table 1. Characteristics of concentrated NOM

Item	Unit	Raw water	Concentrated water
Temp.	°C	18~20	18~20
pH	-	7.2	7.2
Turbidity	NTU	1.3~1.7	0.5
TOC	mg/L	3.75~5.27	25
Alkalinity	mg/L as CaCO ₃	45~50	45~50

Table 2. Experiment conditions for four different types of presses

Process	Conditions
UF alone	Only UF process
Rapid mixing+UF	Applying UF process after rapid mixing (1 min)
Sedimentation+UF	Applying UF process after rapid mixing, slow mixing and sedimentation (30 min)

하였다. 또한 급속교반조건에 대한 영향을 살펴보기 위하여 교반조건을 250 rpm(G=550 sec⁻¹)과 100 rpm(G=150 sec⁻¹)에서 각각 실험을 실시하였으며 응집실험에 사용된 응집제는 알루미늄계 응집제인 Alum(Al₂(SO₄)₃ · 16H₂O)을 사용하였다. 응집제 주입을 위한 응집제 농도는 0.25M stock solution을 제조 하여, 실험중 응집제의 급격한 성상변화에 의한 영향을 최소화하기 위해서 24시간 전에 10 g/L dosing solution을 제조하여 사용하였다[20].

UF공정과 결합을 위한 전처리공정으로서 응집공정은 급속교반만 실시한 시료를 UF에 적용하였거나(Rapid mixing+UF), 응집·침전공정을 거친 후 UF공정에 적용하였다(Sedi.+UF). Table 2에 각각의 실험조건을 세부적으로 나타내었다.

2-3. 십자형 (Cross-flow) 한외여과 장치

본 실험에 사용한 십자형(cross flow) UF장치는 Fig. 1에 나타내었다. 십자형 UF장치는 적용압력, 막면유속(cross-flow velocity)을 고려하여 설계하였으며 막분리 본체, 유입펌프, 압력게이지, 유량계로 구성되었다. 막분리 본체는 아랫부분과 윗부분으로 2개의 아크릴로 구성되어 있으며 평판형 막은 cell 본체의 아랫부분과 윗부분의 중간에 위치하게 된다. 시수의 유입은 cell 본체의 아랫부분으로 유입되어 막표면을 가로질러 통과하게 되며 투과수는 막을 통과한 후 cell 윗부분으로 투과된다. 사용된 막의 형태는 평판형으로 막의 크기는 가로 10 cm, 세로 5 cm 이며 유효 막 면적은 2.62×10⁻³ m²이다. 유입유량이 통과하는 흐름면적(cross-section area)은 3.2×10⁻⁵ m²이며 높이는 0.1 cm이다. 유입 펌프는 시료의 유입시 입자의 변형을 방지하기 위하여 peristaltic 펌프를 이용하여 pulse 발생을 최대한으로 줄였다. 온도에 대한 영향을 없애기 위하여 모든 실험은 항온항습실에서 20±2°C를 유지하며 실시하였다. 여과는 정압여과를 실시하였으며 정압여과에 의하여 시간에 따라 투과 flux 감소가 발생하기 때문에 투과 flux는 유량계를 이용하여 측정하였으나 보다 정확한 값을 얻기 위해서 전자저울을 이용하여 시간에 따른 투과수의 무게를 측정하여 투과 flux를 산정하였다. 막면유속은 막에서 발생하는 막오염을 통제하기 위한 중요한 변수로서 작용한다. 막

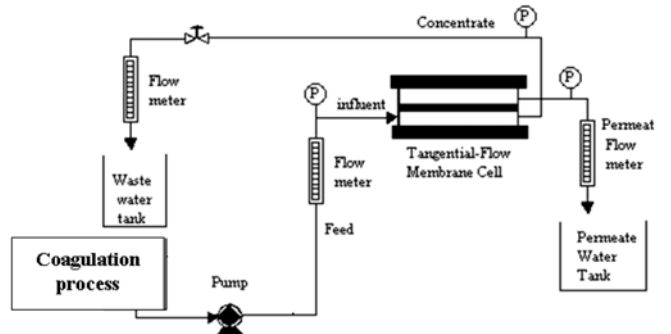


Fig. 1. Schematics of Cross flow type UF membrane filtration assembly.

Table 3. Constant pressure filtration models

Model	Equation	Description
Complete blocking	$\ln J = -k_b t + \ln J_0$	Particles arriving to the membrane block some pore or pores with no superposition of particles.
Intermediate blocking	$J_0/J = (1 + k_i t)$	Particle can settle on other particle previously arrived and already blocking some pores or it can also directly block some membrane area.
Standard blocking	$J_0/J = (1 + k_s t)^2$	Particle arriving to the membrane was deposited onto the internal pore wall leading to a decrease in the pore volume.
Cake filtration	$J_0/J = (1 + k_c t)^{1/2}$	Particle locates on other already arrived and already blocking some pores and there is no room for a direct obstruction of any membrane area.

- 1) J = Permeate flux per membrane area at time.
- 2) J₀ = Initial permeate flux per membrane area at time 0.
- 3) k_b = Kinetic constants of complete blocking k_i = Kinetic constants of intermediate blocking
k_s = Kinetic constants of standard blocking k_c = Kinetic constants of cake filtration

막면유속은 유입되는 유량을 막의 흐름면적으로 나누어 산정되며 식 (1)에 의하여 계산되어진다.

$$CFV = \frac{Q_i}{T \times w_{cell}} \quad (1)$$

CFV는 막면유속이며, Q_i는 유입되는 유량, T는 cell과 막사이의 두께, w_{cell}은 cell에서 실질적인 막의 넓이를 나타낸다.

2-4. 막오염 메카니즘 현상

다양한 실험조건에 따라 발생하는 투과 flux 감소의 영향을 살펴 보기 위하여 일반적으로 많이 사용되고 있는 여과 메카니즘 모델을 사용하였다. Hermia는 4가지 여과 메카니즘 모델을 제시하였으며, complete blocking 모델, intermediate blocking 모델, standard blocking 모델, cake filtration 모델이다[21]. 각각의 모델은 무교반 막힘형 막 여과시스템에서 유효하게 적용되었으며 각 여과 메카니즘 모델에 대한 자세한 내용은 Table 3과 같다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 막의 재질과 응집조건에 따른 투과 flux 변화

Fig. 2와 Fig. 3은 막의 재질과 응집제 주입량에 따른 막투과 flux 변화를 나타내었다. 막의 전처리 응집공정은 급속교반후와 응집-침전후 각각 UF공정에 적용하였다. 사용된 응집제는 alum이었으며 응

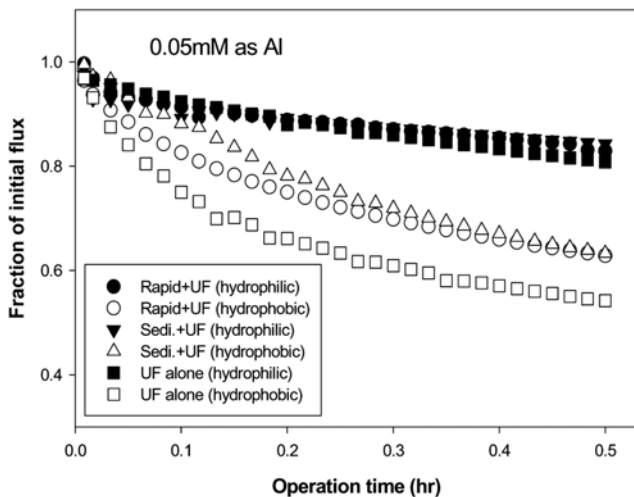


Fig. 2. Changes in flux of UF membrane after coagulation pretreatment (MWCO: 100 kDa, Alum dose: 0.05 mM Al).

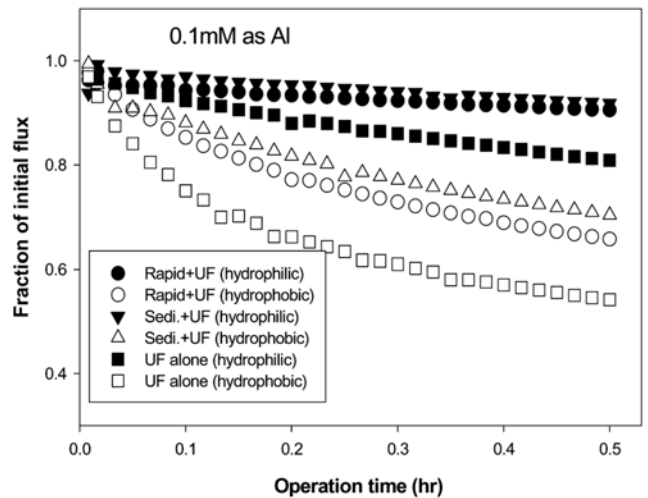


Fig. 3. Changes in flux of UF membrane after coagulation pretreatment condition (MWCO: 100 kDa, Alum dose: 0.1 mM as Al).

집제 주입량은 0.05 mM과 0.1 mM에서 실시하였다. 적용압력은 1 bar에서 막면유속은 0.1 m/s로 일정하게 유지하며 실시하였다. 사용된 원수는 낙동강원수를 농축하여 사용하였으며 초기 DOC 4.6 mg/L이며 탁도는 0.1NTU 이하였다. Fig. 2에 나타난바와 같이 막의 재질에 대한 영향을 살펴보면 친수성 재질의 막의 경우 소수성 재질의 막에 비하여 투과 flux 감소가 낮게 나타나고 있다. 이는 소수성 재질의 막의 경우 친수성 재질의 막에 비하여 막의 공극에서 흡착에 의한 막오염이 주 메카니즘으로 작용하기 때문이다. Jonsson (1991)의 연구에서도 소수성 재질의 막이 막오염 유발물질과 흡착성이 크게 작용하여 flux감소가 크다고 보고하였다[22]. 응집전처리 공정을 적용할 경우 친수성 재질의 막의 경우 투과 flux 향상에 큰 영향을 미치지 못하였으나 소수성 재질의 막은 UF단독공정에 비하여 투과 flux가 향상되고 있었다. 이는 십자형흐름 형태의 운전시 막면유속의 영향이 작용하여 막면유속에 따른 유기물 흡착율의 감소하기 때문이라 판단된다. Wakeman(1994)의 연구에서도 막면유속의 증가에 의하여 막표면에서 침적층의 감소를 유발하며 막표면에서 침적층의 감소에 의하여 투과 flux의 증가를 보여주었다[23]. 또한 응집조건에 따른 영향을 살펴보면 급속교반후와 침전후 UF공정의 적용결과 투과 flux의 변화는 크게 나타나지 않았다. 따라서 UF 막의 막오염 억제 측면에서는 응집전처리공정으로서 1분간의 짧은 급속혼화만으로도 충분한 것으로 판단된다. Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 실험조건하에서 응집제 주입량을 0.1 mM로 증가하였을 때의 실

험결과를 나타내고 있다. 막의 재질에 따라서는 Fig. 2과 유사하게 소수성 재질의 막이 투과 flux의 감소가 크게 나타나고 있다. 그러나 응집공정을 적용한 경우 소수성 재질의 막은 급속교반후에 비하여 침전후 UF공정에 적용시 높은 투과 flux를 유지하고 있었다. 이는 응집제 주입량이 증가함에 따라 응집-침전공정을 거침에 따라 유기물 제거가 효과적으로 일어나며 그에따른 유기물 부하가 감소하므로 막에서 유기물 흡착이 일어나는 부분이 감소되기 때문이다. Fig. 2과 Fig. 3에서 응집제 주입량에 따른 투과 flux변화를 살펴보면 응집제 주입량을 0.05 mM에서 0.1 mM로 증가시켰을 경우 막의 재질에 따라 투과 flux가 향상됨을 알 수있다. 이는 응집제 주입량이 증가함에 따라 유기물의 제거가 크게 일어나 유기물 부하의 감소와 flocc의 크기가 증가함에 따라 막의 표면에서 역확산이 크게 일어나거나 다공성 케이크층의 형성에 따른 저항의 감소로 인하여 투과 flux가 향상된다고 볼 수 있다. Turcaud *et al.*(1990)의 연구에서 응집에 의하여 보다 큰 입자의 형성은 막의 투과 flux를 향상시킨다고 보고하였다[24].

응집공정과 급속교반강도에 따른 투과 flux 변화를 살펴보기 위하여 낙동강 원수에 대하여 응집공정중에 교반강도에 따른 투과 flux 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 낙동강원수는 채수후 1 μm filter로 여과후 실험을 실시하였으며 응집제는 alum 응집제를 사용하였으며 응집제 주입량은 0.05 mM(as Al)로 주입하였다. 또한 사용된 막은 친수성 재질의 MWCO 100kDa를 사용하였다. Fig. 4에서 나타난바와 같이 앞서 농축수를 이용한 Fig. 2와 Fig. 3의 실험결과에서와 같이 응집공정의 적용에 따른 투과 flux 변화결과 UF단독공정의 경우 응집공정을 적용한 경우에 비하여 투과 flux 감소가 크게 나타나고 있다. 약 30분의 운전이 실시된 후의 투과 flux 변화결과 급속교반+UF경우 20%, 급속-완속-침전+UF경우 18%의 flux 감소를 보이고 있었으나 UF 단독공정의 경우 약 50%의 투과 flux 감소를 보이고 있다. 이는 급속교반이 진행됨에 따라 flocc의 형성이 이루어짐에 따라 막의 표면에서 다공성이 큰 케이크층이 형성되므로 투과 flux가 크게 유지되고 있으며 응집-침전공정을 거침에 따라 유기물 부하 감소에 따른 막오염 감소로 인하여 투과 flux가 높게 유지됨을 알 수 있다. 그러나 Fig. 2의 농축수에 비하여 UF단독공정의 경우 더 큰 투과 flux 감소를 보이고 있다. 이는 낙동강원수의 경우 미세입자가 농축수에 비하여 상대적으로 많이 존재하기 때문이라 판단된다. 또

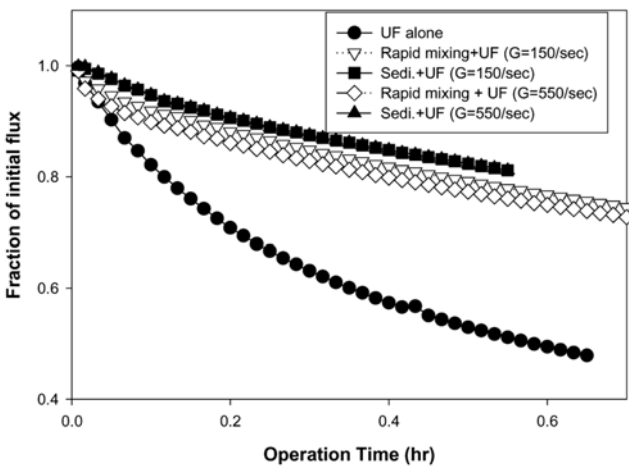


Fig. 4. Changes in flux of UF membrane on mixing conditions during coagulation process.

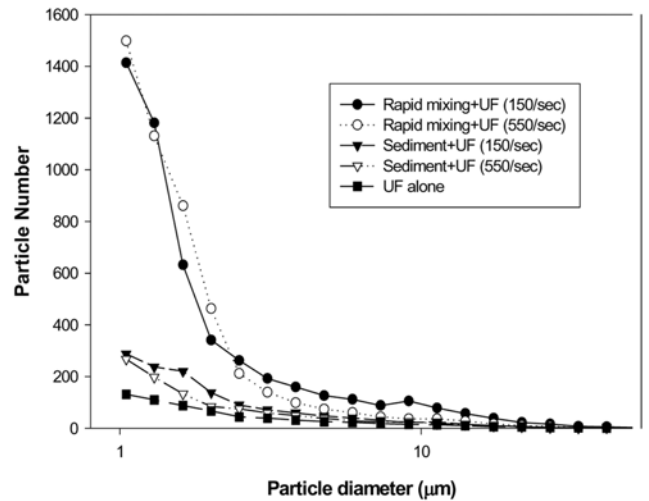


Fig. 5. Change in particle size distribution under different coagulation conditions.

한 급속교반중에 발생하는 교반강도에 따른 투과 flux 변화를 조사하기 위하여 교반강도를 $G=550 \text{ sec}^{-1}$, 150 sec^{-1} 로 변화시키며 실시하였으며 이때 적용된 GT 값은 33,000으로 동일한 조건에서 실시하였다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 교반강도와 교반시간에 따른 투과 flux의 변화는 크게 나타나지 않았으며 교반강도에 따른 영향은 나타나지 않았다. 이는 교반강도에 따라 형성되는 flocc의 크기가 거의 유사하게 형성되어지기 때문이라 판단되어지며 이러한 결과를 확인하기 위하여 각 공정에서 발생하는 입도분포를 측정하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 원수에 비하여 응집공정을 적용한 경우 입도분포가 증가하여 나타나고 있는데 이는 용존성 유기물질이 입자상으로 전환되어 형성되어짐을 나타내며 교반강도에 의한 영향은 크게 나타나지 않았다. 그러나 급속교반후에 비하여 침전공정후에 입도분포가 감소함을 보여 주고 있는데 이는 침전하는동안에 형성된 flocc이 침전하기 때문이라 판단되어진다.

3-2. 전처리 응집조건에 따른 막오염 메커니즘의 분석

앞선 투과 flux 변화에 대한 실험결과에서 막의 재질에 따른 flux

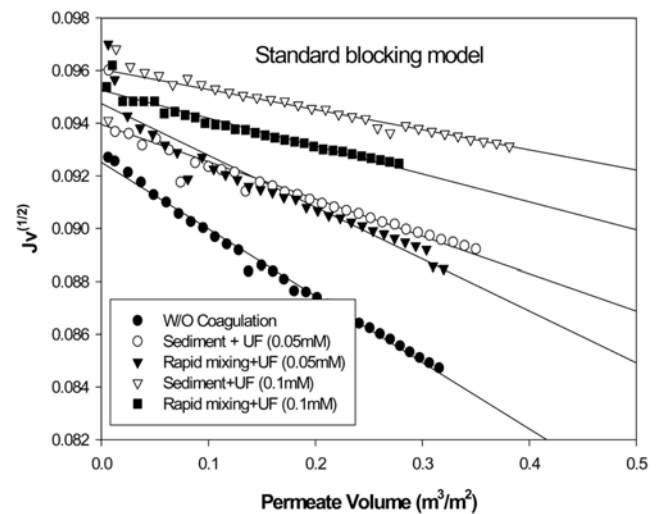


Fig. 6. Standard blocking model as a function of coagulation conditions (Hydrophilic membrane).

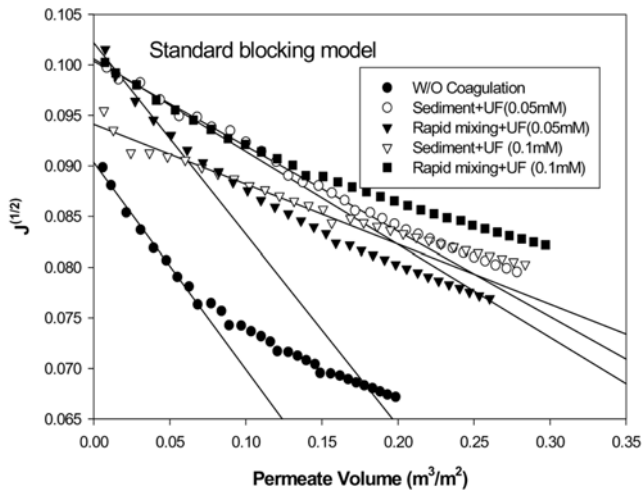


Fig. 7. Standard blocking model as a function of coagulation conditions (Hydrophobic membrane).

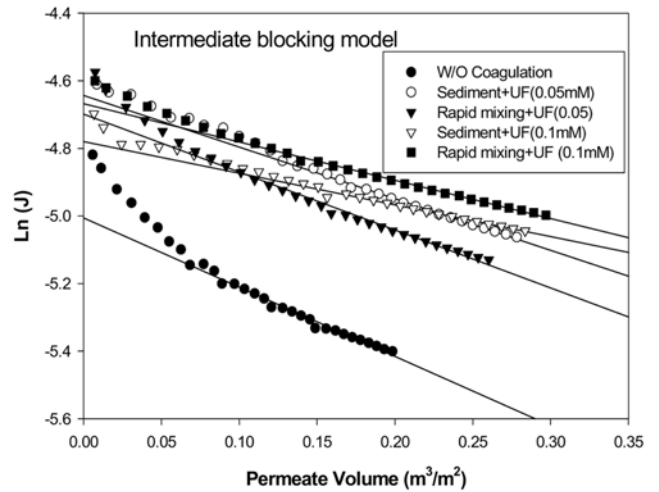


Fig. 9. Intermediate blocking model as a function of coagulation conditions (Hydrophobic membrane).

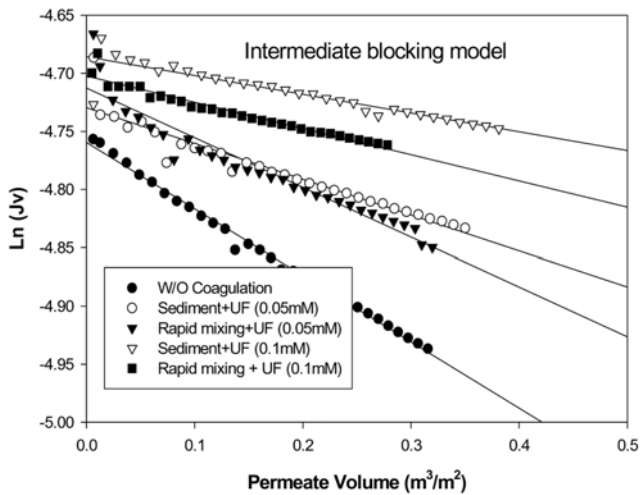


Fig. 8. Intermediate blocking model as a function of coagulation conditions (Hydrophilic membrane).

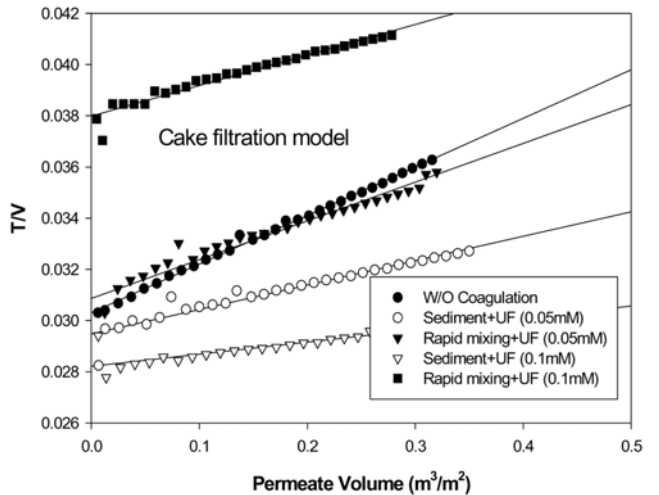


Fig. 10. Cake filtration model as a function of coagulation conditions (Hydrophilic membrane).

감소의 원인을 세부적으로 알아보기 위하여 막오염 메커니즘의 분석을 실시하여 Fig. 6~Fig. 11에 나타내었으며 각 실험 조건별 막오염 동역학 상수를 구하여 Table 4에 나타내었다. 각 실험조건은 Fig. 2~Fig. 4 투과 flux 변화 실험조건과 동일하게 실시하였으며 각 여과메커니즘의 모델은 여과시간에 따른 투과되는 여과수 부피와 투과 flux (J)를 나타내고 있다. Fig. 6과 Fig. 7은 막의 재질과 응집제 투입량에 따른 standard blocking model을 적용한 결과를 나타내었으며 Table 4에 동역학 상수를 구하여 나타내었다. Standard blocking model은 입자가 공극의 내부 벽에 직접적으로 침적·흡착하여 공극의 크기가 감소하는 현상을 나타낸다. 막의 재질에 따라 여과 메커니즘 분석결과 소수성 재질의 막이 친수성 재질의 막에 비하여 더 큰 standard blocking 상수(K_s) 값을 나타내고 있었다. 이는 소수성 재질의 막이 친수성 재질의 막에 비하여 공극속에서의 미세입자의 흡착으로 인한 공극크기 감소로 인하여 투과 flux가 감소하는 standard blocking 메커니즘이 크게 작용하는 것으로 판단된다. 또한 응집 전처리공정을 적용할 경우에 비하여 UF단독공정의 경우 미세입자의 침투와 용존성 유기물의 흡착으로 인하여 standard blocking model이 주된 메커니즘으로 작용된다. 이는 소수성 재질의 막의 경

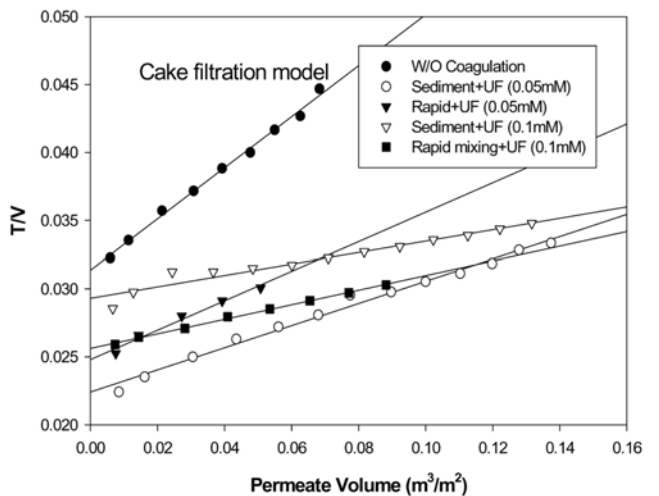


Fig. 11. Cake filtration model as a function of coagulation conditions (Hydrophobic membrane).

우 친수성 재질에 비하여 흡착강도가 크기 때문에 공극속에서 입자의 흡착율이 더 크게 나타나 공극의 크기를 감소시켜 투과 flux감소

Table 4. Estimation of kinetic constant for each filtration model

Coagulant (Dose: mM as Al)	$K_s (m^{-3})$					
	hydrophilic membrane			hydrophobic membrane		
	UF alone	Rapid+UF	Sedi.+UF	UF alone	Rapid+UF	Sedi.+UF
Alum (0.05 mM as Al)	0.025	0.020	0.014	0.205	0.189	0.084
Alum (0.1 mM as Al)	0.025	0.011	7.65×10^{-3}	0.205	0.059	0.092
Coagulant (Dose: mM as Al)	$K_i (m^{-1})$					
	hydrophilic membrane			hydrophobic membrane		
	UF alone	Rapid+UF	Sedi.+UF	UF alone	Rapid+UF	Sedi.+UF
Alum (0.05 mM as Al)	0.571	0.428	0.308	2.051	1.714	1.527
Alum (0.1 mM as Al)	0.571	0.226	0.162	2.051	1.132	0.936
Coagulant (Dose: mM as Al)	$K_c (min/m^8)$					
	hydrophilic membrane			hydrophobic membrane		
	UF alone	Rapid+UF	Sedi.+UF	UF alone	Rapid+UF	Sedi.+UF
Alum (0.05 mM as Al)	0.019	0.015	9.55×10^{-3}	0.188	0.108	0.081
Alum (0.1 mM as Al)	0.019	0.012	4.70×10^{-3}	0.188	0.053	0.042

Table 5. Estimation of kinetic constant for each filtration model

Mixing Condition	$K_s (m^{-3})$		
	hydrophilic membrane		
	UF alone	Rapid mixing+UF	Sedi.+UF
G=150 sec ⁻¹	0.085	0.020	0.019
G=550 sec ⁻¹	0.085	0.021	0.019
Mixing Condition	$K_i (m^{-1})$		
	hydrophilic membrane		
	UF alone	Rapid mixing+UF	Sedi.+UF
G=150 sec ⁻¹	0.54	0.103	0.113
G=550 sec ⁻¹	0.54	0.104	0.115
Mixing Condition	$K_c (min/m^8)$		
	hydrophilic membrane		
	UF alone	Rapid mixing+UF	Sedi.+UF
G=150 sec ⁻¹	0.193	0.027	0.031
G=550 sec ⁻¹	0.193	0.028	0.031

를 가져온다. 응집제 주입량에 따라서는 응집제 주입량이 증가할수록 낮은 standard blocking model 상수를 보이고 있었다. Fig. 8과 9는 intermediate blocking model을 적용하였으며 Table 4에 동역학 상수를 구하여 나타내었다. Intermediate blocking은 입자들이 서로 축적되어 공극을 막는 현상으로 장기간의 운전시 입자들의 축적으로 인하여 발생하게 된다. 전반적으로 standard blocking model과 유사한 경향을 보이고 있다. Fig. 10와 11은 cake filtration model을 적용하여 나타내었으며 Table 4 동역학 상수를 측정하여 나타내었다. UF 단독공정의 경우 응집+UF공정에 비하여 cake filtration 상수가 크게 나타나고 있다. 이는 UF 단독공정의 경우 미세입자에 의한 비다공성 cake형성으로 인한 저항의 증가로 인하여 flux 감소율이 크게 나타나며 응집공정을 적용할 경우 floc 형성으로 인한 입자크기의 증가로 인하여 flux 감소가 낮게 나타나고 있다. 이상의 여과메카니즘 분석결과 flux 감소는 공극의 막힘현상과 공극내부에 미세입자의 침투·흡착 그리고 시간에 따른 cake 층의 형성등 복잡한 메카니즘에 의하여 flux 감소가 발생하게 된다. 그러나 여과메카니즘 분석결과 막의 재질에 따라서는 소수성 재질의 막의 경우 막의 공극속으로 입자의 침투가 발생하여 침적흡착되는 현상과 막의 표면에서 형성되는 cake층에 의한 flux 감소가 주원인이 됨을 알 수 있

었다. 또한 응집공정을 전처리공정으로 적용시 UF단독공정에 비하여 flux 감소율이 낮게 나타나고 있는데 이는 응집공정을 적용함에 따라 입자크기의 증가와 용존성 유기물의 부하가 감소함에 따라 나타난다고 볼 수 있다. Table 5는 교반조건에 따른 막오염 메카니즘 분석을 실시하여 각 실험 조건별 막오염 동역학 상수를 구하여 나타내었다. 교반조건에 따른 막오염 메카니즘 분석은 앞서 실시한 응집조건에 따른 막오염 메카니즘 분석 방법과 동일하게 실시하였으며 사용된 막은 친수성 재질의 막을 사용하였으며 응집제는 alum을 사용하였으며 응집제 주입량은 0.05 mM(as Al)로 주입하였다. Table 5에서 알 수 있듯이 막오염 발생시 여러 복합적인 현상이 상호작용하여 투과 flux감소가 나타나고 있는 것을 알 수있다. 응집공정을 적용한 경우 UF 단독공정에 비하여 막오염 상수가 낮게 나타나고 있었으며 급속교반후와 침전후의 값의 차이는 크게 나타나지 않았다. 또한 교반강도에 따른 영향을 살펴본 결과 G=550 sec⁻¹, 150 sec⁻¹에서 유사한 경향을 보이고 있으며 교반강도에 따른 영향은 크게 나타나지 않고 있었다.

4. 결 론

(1) 응집조건에 따른 영향을 살펴보면 급속교반후와 응집-침전후 UF공정의 적용한 결과 투과 flux의 변화는 크게 나타나지 않으므로 UF막의 막오염 억제 측면에서는 응집전처리공정으로서 1분간의 짧은 급속혼화만으로도 충분한 것으로 나타났다. 교반강도에 따른 투과 flux의 변화결과 교반강도에 따라 형성되는 floc의 크기가 거의 유사하게 형성되어 교반강도에 따른 영향은 나타나지 않았다.

(2) 응집제 주입량에 따른 투과 flux변화를 살펴보면 응집제 주입량이 증가함에 따라 유기물의 제거가 크게 일어나 유기물 부하의 감소와 floc의 크기가 증가함에 따라 다공성 케이크층의 형성에 따른 막저항의 감소로 인하여 투과 flux가 향상되었다.

(3) 막의 재질과 전처리 응집공정 적용에 따른 여과메카니즘 분석 결과 막의 재질에 따라서는 친수성 재질의 막에 비하여 소수성 재질의 막의 경우 막의 공극속으로 입자의 침투가 발생하여 침적·흡착되는 현상과 막의 표면에서 형성되는 cake층에 의한 투과 flux 감소가 주원인이 되었으며 응집공정을 전처리공정으로 적용시 UF단독공정에 비하여 막오염 발생이 저감되었다.

참고문헌

1. Amirtharajah, A. and O'Melia, C. R., "Coagulation Process: Destabilization, Mixing, and Flocculation. In Water Quality and Treatment;" 4th ed, McGraw-Hill, New York, 269-365(1990).
2. LeChevallier, M. W., Welch, N. J. and Smith, D. B., "Full-scale Studies of Factors Related to Coliform Regrowth in Drinking Water;" *Appl. Environ. Microbiol.*, **62**(7), 2201-2211(1996).
3. Drikas, M., Morran, J. Y., Pelekani, C., Hepplewhite, C. and Bursill, D. B., "Removal of Natural Organic Matter-a Fresh Approach"; *Water Science and Technology: Water Supply*, **2**(1), 71-79(2002).
4. Laine, J. M., Hagstrom, J. P., Clark, M. M. and Mallevalle, J., Effects of Ultrafiltration Membrane Composition, *J. AWWA.*, **81**(11), 60-67(1989).
5. Taylor, J. S., Mulford, A., Duranceau, S. J., and Barrent, W. M., "Cost and Performance of a Membrane Pilot Plant;" *J. AWWA.*, **81**(11), 52-60(1989).
6. Dykes, G. M. and Conlon, W. J., "Use of Membrane Technology;" *J. AWWA.*, **81**(11), 43-46(1989).
7. Conlon, W. J., Hornburg, C. D., Waston, B. M. and Kedfer, C. A., "Membrane Softening: The Concept and its Application to Municipal Water Supply;" *Desalination*, **78**, 157-175(1990).
8. Jacangelo, J. G., Aieta, E. M., Carns, K. E., Cummings, E. W. and Mallevalle, J., "Assessing Hollow-Fiber Ultrafiltration for Particulate Removal;" *J. AWWA.*, **87**(11), 68-75(1995).
9. AWWA Membrane Technology Research Committee, 1998 Committee Report; *Membrane Process.* AWWA. **90**(6), 91-105(1998).
10. Bian, R., Watanabe Y., Tambo N. and Ozawa G., "Removal of Humic Substances by UF and NF Membrane Systems;" *Wat. Sci. Tech.* **40**(9), 121-129(1999).
11. Fane, A. G. and Fell, C. J. D., "A Review of Fouling and Fouling Control in Ultrafiltration;" *Desalination*, **62**, 117-136(1987).
12. Fu, L. F. and Dempsey, B. A., "Modeling the Effect of Particle Size and Charge on the Structure of Filter Cake in Ultrafiltration;" *J. Membrane. Sci.*, **149**, 221-240(1998).
13. Jones, K. L. and O'Melia, C. R., "Ultrafiltration of Protein and Humic Substances; Effect of Solution Chemistry on Fouling and Flux Decline;" *J. Membrane. Sci.*, **193**, 163-173(2001).
14. Wei, Y. and Andrew, L. Z., "Humic acid Fouling During Micro-filtration;" *J. Membrane. Sci.*, **157**, 1-12(1999).
15. Chang, Y. J., Choo, K. H., Benjamin, M. M. and Reiber, S., "Combined Adsorption-UF Process Increases TOC Removal;" *J. AWWA.* **90**(5), 90-102(1998).
16. Thiruvengkatachari, R., Shim, W. G., Lee, J. W., and Moon, H., "Powdered Activated Carbon Coated Hollow Fiber Membrane: Preliminary Studies on its Ability to Limit Membrane Fouling and to Remove Organic Materials;" *Korean J. Chem. Eng.*, **22**(2), 250-255(2005).
17. Jang, N.Y., Watanabe, Y. and Ozawa, G., "The Study on Micro-filtration Membrane Process Combined with Pre-ozonation;" *JWWA.*, **71**(2), 1-13(2002).
18. Jang, N.Y., Watanabe, Y., Minegishi, S. and Bian, R., "The Evaluation of Dead-end Ultrafiltration Membrane Process Combined with Pre-coagulation/sedimentation;" *JWWA.*, **70**(2), 1-14(2001).
19. Jung, C. W., Son, H. J., Shin, H. S. and Son, I. S., "Effect of Organic Molecular Weight and Functional Group on Membrane Fouling;" *Korean Chem. Eng. Res.*, **45**(6), 669-676(2007).
20. Shin, H. S., Jung, C. W., Son, H. J. and Son, I. S., "Effect of Membrane Materials on Membrane Fouling and Membrane Washing;" *Korean Chem. Eng. Res.*, **45**(5), 500-505(2007).
21. Hermia, J., Constant pressure blocking filtration laws: application to power-law non-Newtonian fluids, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **60**, 183(1982).
22. Jonsson, A. S. and Jonsson. B., "The Influence of Nonionic and Ionic Surfactants on Hydrophobic and Hydrophilic Ultrafiltration Membranes;" *J. membrane Sci.*, **56**, 49-76(1991).
23. Wakeman, R. J., visualization of cake formation in crossflow microfiltration, Masters, Thesis, 1995, AIT (1994).
24. Turcaud, L. V., Wiesner, M. R. and Bottero, J. Y., Fouling in Tangential flow Ultrafiltration: The effect of colloid size and coagulation pretreatment, *J. Membrane Sci.*, **52**, 173-190(1990).