

응집·한외여과 조합공정에서 플럭스와 선속도가 막오염에 미치는 영향에 관한 연구

A Study on Membrane Fouling by Flux and Linear Velocity in Coagulation/Ultrafiltration Membrane System

문성용^{1,*} · 이상협¹ · 김승현² · 윤조희³

Seong-Yong Moon^{1,*} · Sang-Hyup Lee¹ · Seung-Hyun Kim² · Cho-Hee Yoon³

1 한국과학기술연구원 환경공정연구부 수질환경 및 복원연구센터

2 경남대학교 토목공학과

3 경남대학교 에너지화학공학과

(2005년 4월 8일 논문접수 : 2005년 8월 5일 최종 수정논문 채택)

Abstract

A coagulation/ultrafiltration membrane hybrid system was operated to treat river water with capacity of 0.06 m³/d. The impact on membrane fouling by flux and linear velocity was investigated. It is known that pressure increase is proportional to flux increase. However, pressure increase was much faster than theoretical value in the pilot plant test. So it was suggested that flux was an important factor in ultrafiltration of continuous operation.

Membrane fouling was decreased when linear velocity was increased. This phenomenon was found more obviously without coagulation. With the combination of coagulation and sedimentation, membrane fouling was not reduced conspicuously. Big particles formed during coagulation and sedimentation were destroyed by feed and circulation pumping, which resulted in little effect on membrane fouling reduction. The degree of destruction was similar at various linear velocities. In this study, the hollow fiber membrane was used and the system was operated in pressure type module. In case of the system used in this study, membrane fouling has been affected lightly by linear velocity variation when coagulation pretreatment was applied.

Key words: Membrane, Coagulation, Linear velocity, Fouling, Water treatment

주제어: 막여과, 응집, 선속도, 막오염, 정수처리

*Corresponding author Tel: +82-2-958-5850, FAX : +82-2-958-5839, E-mail: moonjada@hanmail.net (Moon, S.Y.)

1. 서 론

국내에서 막여과 기술이 정수처리 분야에 적용된 사례는 많지 않으며, 적용된 대부분이 실험실 규모의 실험에 그치고 있다. 따라서 아직 까지 많은 기초 연구와 모형플랜트 규모의 연구가 필요한 실정이다. 정수장 원수는 대부분 지표수로 부유성 물질과 유기물질에 의한 오염이 심하며, 계절적인 영향에 의해 수질의 변화가 큰 특징을 가진다. 국내 하천수의 유기물 농도는 평균 TOC(total organic carbon) 1.5~6.0 mg/L 범위이고, 식물성플랑크톤은 저수지와 거대 하천의 하류지점을 중심으로 봄철과 여름철에 농도가 급증한다. 또한 강우기에는 유입수 탁도가 100 NTU 이상 높게 조사되기도 한다. 고탁도와 유기물 및 식물플랑크톤 등은 막여과 공정에 매우 불리한 조건으로 작용한다. 즉, 막여과 공정에 있어 막오염의 원인 물질로 작용하여, 운전효율에 막대한 영향을 끼치게 된다. 이처럼 막여과 공정을 국내의 하천수에 직접 적용할 경우 급격한 막오염이 예상되며, 응집, 활성탄흡착, 고도산화 등과 같은 전처리를 적용하여, 안정적인 유입수 수질을 유지할 필요가 있다. 본 연구에서는 탁질과 유기물 제거에 있어 가장 안정적인 공정으로 평가되고 있는 응집을 한외여과의 전처리 공정으로 적용하였다. 선행 연구를 통해 응집공정의 운전인자들을 결정하고(문 등, 2002), 응집·한외여과 조합공정을 구성하였다.

막여과 공정에서 운전인자는 단위투과수량(플럭스), 내부선속도(Linear velocity, LV), 역세척, 운전압력, 흐름방식 등이다. 여기서, 플럭스는 단위면적당의 투과수량으로 LMH(L/m²·hr) 단위로 표현되며, 내부선속도는 내압형 막의 내부 단면을 지나치는 평균속도로 유량과 내부 단면적의 비로 계산된다. 이들 운전인자는 운전방식과 적용되는 막의 특징에 의해 다양하게 적용된다. 예로 내압형(Inside-out flow), 중공사형(Hollow-fiber) 막을 이용하고, 정량여과 방식인 경우 중요한 운전인자는 단위투과수량, 내부선속도, 역세척 방법이다. 즉, 막여과 공정의 운전인자 결정을 위해서는 각각의 인자들에 대한 특성을 파악하고, 연속운전을 통해 최적의 운전 인자를 결정할 필요가 있다.

본 연구는 응집·한외여과 공정에서 운전인자가 미치는 영향을 평가하기 위해 국내의 하천수를 대상으로 0.06m³/d 용량의 응집·한외여과 조합공정을 구성하고, 막여과 공정의 중요한 운전인자인 플럭스와 내부선속도가 막오염에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 원수 수질 및 모형플랜트 구성

2.1. 원수 수질

우리나라 대표 하천인 낙동강을 원수로 사용하였다. 실험 기간 동안 대상 수원의 수질을 Table 1에 제시하였다. 평균 탁도는 10 NTU 이상으로 높고, 유기물 농도를 나타내는 TOC는 평균 3.4 mg/L로 국내의 다른 하천에 비해 다소 높게 조사되었으며, 식물성플랑크톤 농도를 나타내는 Chl-*a* 농도는 실험기간 중에 최대 172.9mg/m³로 높게 조사되었다(김 등, 2002). 또한 유기물 특성을 나타내는 SUVA 값은 3 이하로 친수성에 가깝고, 유기물 특성 조사를 위한 NOM(natural organic matter) 분석 결과에서도 소수성 보다는 친수성의 구성비율이 다소 높게 조사되었다. 이처럼 대상 하천수는 오염물질의 농도가 높고, 친수성 유기물의 농도가 높아 응집과 분리막 공정에 의한 유기물 제거가 불리한 것으로 조사되었다(Edzwald & Benschoten, 1990; 정 등, 2002). 이상의 수질 특성을 가지는 원수에 하나의 전처리 공정을 적용할 경우 가장 효과적인 공정은 응집으로 판단된다. 응집은 다른 전처리 공정에 비해 현탁물질, 유기물 및 조류 등의 제거에 있어 매우 안정적이고 높은 제거율을 가지기 때문이다.

Table 1. Water quality data measured during the study period

	Unit	March & April, 2002
Turbidity	NTU	8.8~14.3(12.1)
TOC	mg/L	2.7~4.1(3.4)
UVA254	cm ⁻¹	0.057~0.078(0.068)
SUVA	L/mg·m	1.8~3.1(2.0)
Alkalinity	mg/L (CaCO ₃)	63~72(68)
NOM (DOC, %)	Hydrophobic	30~42(40)
	Transphilic	18~30(25)
	Hydrophilic	25~40(33)

* () is average value.

2.2. 수질 분석

수질 분석 항목은 탁도, TOC, DOC, UV₂₅₄, pH와 입자수 등이다. 탁도는 HF scientific사의 DRT 100B 모델을 사용하여 측정하였으며, TOC는 고온연소 방식의 SHIMADZU-5000A를 사용하였다. DOC는 공경 0.45 μm의 여과지(Nylon)로 여과한 후 TOC 분석법과 동일하게 분석하였다. UV₂₅₄ 흡광도는 입자상 물질의 흡수에 의한 오차를 줄이기 위해 시료를 여과지(Millipore type AP40)로 전처리한 후에 SHIMADZU-1201를 사용하여 254nm에서 측정하였다. 입자수 측정은 Chemtrac사의 pc2000 Particle Counter를 이용하였으며, 이 기기는 2~200 μm의 측정 범위를 가지며, 입자의 측정 구간 결정은 예비 실험과 병원성 미생물인 Cryptosporidium(4~6 μm), Giardia(8~12 μm)의 검출을 고려하여 2~4, 4~7, 7~11, 11~20, 20~50, 50 μm 이상으로 세분화 하였다.

2.3. 모형플랜트 구성 및 운전조건

본 연구에 적용된 응집·한외여과 조합공정은 낙동강 하류 지점의 지표수를 수원으로 하고 1일 생산수량 0.06m³ 규모로 제작되었다. 플랜트의 주요 공정은 응집, 한외여과, 제어 및 계측 공정으로 이루어진다. 각 단위 공정의 운전인자는 실험실 규모의 사전 실험을 통해 결정되어 졌다. 본 연구에 적용된 응집·한외여과 조합공정의 개략도를 Fig. 1에 제시하였다.

2.3.1. 응집공정

응집공정은 응집제 주입, 급속교반, 완속교반 및 침전공정을 연속적으로 운전이 가능하도록 구성하였다. 각 단위공정의 운전인자인 응집제 주입량, 응집제 종류, 교반강도와 시간 및 침전시간 등은 실험실 규모의 시험을 통해 결정하였다(문 등, 2002). 실험 결과를 바탕으로 급속교반은 속도경사(G) 230s⁻¹에서 평균 체류시간 1분, 완속교반은 속도경사(G) 30s⁻¹에서 평균 체류시간 5분을 적용하였다. 침전지는 체류시간 60분을 적용하였다.

2.3.2. 한외여과 공정

한외여과 공정은 전처리 필터, 유입펌프, 순환펌

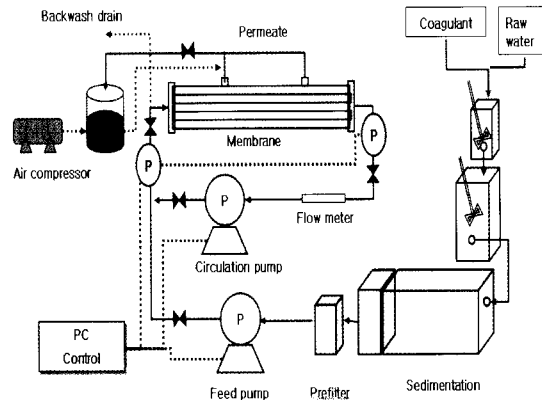


Fig. 1. Schematic diagram of coagulation/UF membrane system.

프, 한외여과막 그리고 역세척으로 구성하였다. 전처리 필터는 적용된 중공사형막의 내경이 1mm인 점을 고려하여 유입펌프 전단계에 평균공극 크기 200 μm의 정밀여과(Microfiltration, MF)막을 적용하였다. 유입펌프와 순환펌프는 정량펌프를 적용하여 유입수량을 일정하게 유지하는 정량여과 방식을 적용하고, 십자형흐름(Cross flow)이 가능하게 하였다. 역세척은 공기압축기를 이용한 정압 세척법으로 30분 주기로 32초(역세척 30초 + 표면세척 2초)간을 기본으로 하고, 필요에 따라 세척주기를 달리하여 적용하였다. 역세척수는 처리수를 직접 사용하였으며, 막오염 현상의 관찰을 용이하게 하기 위해 염소는 주입하지 않았다. 공정에 적용된 한외여과막은 Polysulfone 재질의 제품으로, 막공 평균지름이 0.01 μm이고, 내압형의 중공사형 막이다. 모듈은 유효면적 0.0034m²의 크기를 가지는 10가닥의 막으로 구성하였다.

2.3.3. 제어 및 계측공정

계측은 한외여과막 유입부와 유출부에서 압력을 디지털 신호로 변환하여 PC에 자동저장 되도록 제작하였다. 시스템 제어는 PLC(programmable logic controller)를 이용하여 전공정을 자동화 하였다.

3. 결과 및 고찰

낙동강 하천수를 대상으로 응집·한외여과 조합공정에 의한 정수처리 장치를 구성하고, 막여과 공정의 운전인자인 플럭스와 내부선속도에 따른 막오염 특징

변화를 관찰하였다.

3.1. 플럭스의 영향

플럭스는 정량여과를 적용하고 있는 막여과 공정에서 중요한 운전인자이다. 즉, 플럭스 증가는 투과수량을 증가시켜 시스템 회수율을 높이지만, 막오염에 의한 운전압력 증가로 인해 물리·화학적 세정주기의 단축과 전체 시스템의 효율을 감소시키게 된다. 따라서 적정 플럭스의 결정은 막여과 공정에서 아주 중요한 문제이다. 본 연구에서는 플럭스의 변화에 따른 막오염 특성을 관찰하여 막오염에 미치는 플럭스의 영향에 대해 파악하였다

일반적으로 플럭스와 막오염의 관계는 다음의 Darcy 공식으로 간단히 설명할 수 있다(Joel et al., 1996).

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_m} \quad (\text{식 1})$$

(식 1)은 막오염이 진행되지 않은 깨끗한 분리막에 오염물질이 존재하지 않는 이상적인 조건에서의 플럭스(J)를 나타내는 식이다. 여기서, μ 는 점수계수이며, R_m 은 막 고유저항이다. 그리고 ΔP 는 운전압력 변화량을 의미한다. (식 1)에서 플럭스와 운전압력 변화량은 비례 관계가 성립하고, 막 고유저항과 온도가 동일할 경우 플럭스는 막오염을 대변할 수 있는 운전압력 변화량과 직접비례 관계가 성립한다. 그렇지만 실제 유체에 있어서는 막 고유저항 이외에 용질에 의한 수리학적 저항이 고려되어짐으로 플럭스는 (식 2)에 의해 결정된다.

$$J = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + \sum R_i)} \quad (\text{식 2})$$

(식 2)에서 ' R_i '는 시간의 함수로 고려되는 용질의 저항을 의미하며, 일반적으로 농도분극화, 겔층형성, 침적, 흡착 등의 현상에 관계된다. (식 2)에 의하면 플럭스는 시간에 따른 용질 저항값의 증가로 인해 이상조건(식 1)보다는 빠른 증가율을 나타내게 된다.

실제 공정에서 (식 2)에 근거한 플럭스와 막오염의 관계를 설명하기 위해 세 종류의 다른 플럭스 조건에서 운전시간에 따른 막간차압(Transmembrane pressure, TMP)의 변화를 관찰하였다. 적용된 운전 플

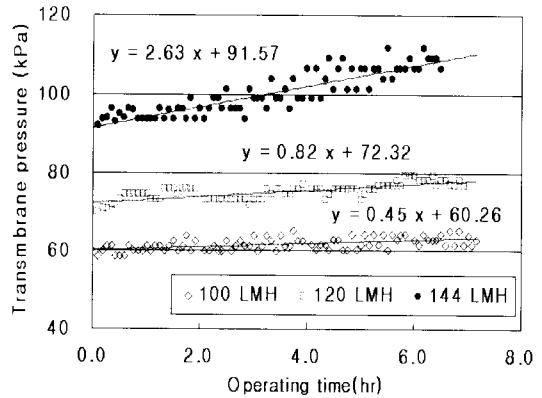


Fig. 2. Variation of transmembrane pressure as a function of operating time at different fluxes.

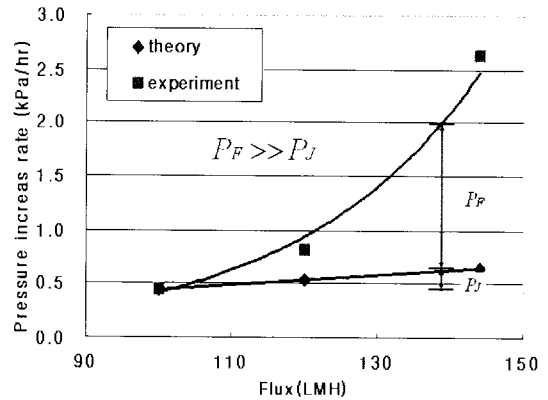


Fig. 3. Variation of operating pressure with coagulation/ Ultrafiltration hybrid system.

럭스는 100LMH(L/m²·hr), 120 LMH, 144 LMH이며, 운전조건으로 응집제는 황산반토 30mg/L를 주입하고, 막내부 선속도는 0.2m/s의 층류(Re = 175) 조건을 유지하였다. 그 외의 원수 특성 및 응집조건 등은 2절에 제시한 방법과 동일하게 적용하였다. Table 2와 Fig. 2에 실험 결과를 제시하였다.

Fig. 2의 결과에서 플럭스가 증가함에 따라 막간차압 증가율이 큰 폭으로 커지고 있다. 여기서, 막간차압 증가율은 운전시간과 막간차압의 비를 의미한다. 플럭스 100 LMH에서 막간차압 증가율은 0.45kPa/h이고, 120 LMH와 144 LMH로 증가되면서 0.82 kPa/h과 2.63kPa/h로 급증하는 것으로 나타났다. 이 결과를 100 LMH를 기준으로한 증가율로 설명하면

플럭스 증가율은 각 1.2배, 1.44배였지만 막간차압 증가율은 1.8배, 5.8배로 매우 높게 나타났다. 막간차압 증가율을 순수 플럭스의 영향과 운전시간 경과에 따른 막오염의 영향으로 구분하여 나타낼 수 있으며, Fig. 3에 이들의 관계를 도식화 하였다.

Fig. 3에 의하면 플럭스 증가에 따른 막간차압 증가율에 비해 막오염에 의한 증가율이 월등히 높은 것으로 나타났다. 144 LMH 조건에서 플럭스에 의한 증가율(P_f)은 0.2kPa/hr이며, 막오염에 의한 증가율(P_r)은 2.0kPa/hr로 P_r 가 P_f 에 비해 매우 높은 것으로 조사되었다. 이처럼 한외여과 연속운전에서 플럭스는 막간차압 증가와 막오염에 매우 중요한 인자임을 확인 할 수 있었다. 플럭스 증가에 따른 막간차압 증가율은 1차 비례식(식 1)에 의한 증가율 보다 월등히 높은 값을 가지며, 이것은 플럭스에 의한 직접적인 영향 보다는 막오염에 의한 간접적인 원인이 더 큰 영향을 끼치기 때문이다.

막오염에 미치는 플럭스의 영향을 나타내는 다른 방법으로 저항값을 기준으로 조사해 보았다. Fig. 2의 실험결과에서 Table 2에 운전시간 '0'에서의 압력은 'y' 절편값으로 시스템 전체의 내부저항과 분리막 자체 저항의 합이며, 시간 변화에 따라 증가한 압력은 막오염에 의한 증가부분이 된다. 이러한 값들을 저항값으로 계산하여 Table 2에 제시하였다.

Table 2에서 막오염에 의한 저항값은 최초 6시간까지의 막간차압 변화량을 기준으로 하였다. 시스템과 막 고유저항($R_s + R_m$)은 $2.23 \pm 0.06m^{-1}$ 로 거의 일정한 값을 보였고, 막오염에 의한 저항값은 플럭스 증가에 따라 크게 증가하였다. 즉, 플럭스 증가에 의해 저항 값이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

이상에서 플럭스는 막오염과 막간차압 및 시스템 효율에 매우 큰 영향을 미치는 중요한 운전인자이다. 따라서 실증화 시설의 설계를 위해서는 원수수질과 시스템 구성에 따른 적정 플럭스의 결정이 선행되어야 한다. 또한 높은 플럭스를 유지하기 위해서는 막오염을 제어할 수 있는 전처리 공정과 효과적인 세척 방법 등이 제시되어야 할 것이다.

3.2. 선속도의 영향

내압형의 중공사막의 경우 십자흐름형(Cross-flow) 운전이 가능한 것이 특징이다. 투과방향에 수직함 흐

Table 2. Membrane resistance at different fluxes [Unit: m^{-1}]

Flux(LHM)	$R_s + R_m$	ΣR_i
100	2.17×10^{12}	9.71×10^{10}
120	2.17×10^{12}	1.48×10^{11}
144	2.29×10^{12}	3.94×10^{11}

* R_s is resistance of system

름을 발생시키게 되면 막표면 마찰력에 의해 일정 크기의 입자는 횡방향력을 가지게 된다. 이때의 투과방향에 수직함 흐름 속도를 내부선속도라고 한다. 즉, 속도가 증가하면 막 표면에서 외부로 향하는 물리적 힘(관성양력, inertial life)이 증가하게 되어, 막표면에서의 오염물 축적이 감소한다. 이때의 관성양력에 의한 횡방향 속도(v)는 (식 3)와 같이 표현된다(Joel et al., 1996).

$$v = 0.1182 \frac{\rho u^2 r_p^2}{\mu b} \quad \text{[식 3]}$$

여기서, ρ 는 용질의 밀도, u 는 내부선속도(평균속도), r_p 는 입자의 직경, μ 는 점성계수, b 는 중공사막 내부 반지름이다. (식 3)에 의하면 횡방향 속도는 내부선속도(u)와 입자직경의 2승에 비례한다. 즉, 선속도를 증가시킬 경우 용질 속의 입자는 막의 표면에서 더 빨리 멀어지려고 하기 때문에 막오염이 감소하게 된다. 반면, 내부선속도에 의해 유입된 입자가 파괴될 경우 입자의 크기가 감소하게 되어 횡방향 속도는 감소한다. 이러한 내부선속도의 막오염 저감효과를 조사하기 위해 실험실 규모의 응집·한외여과 공정을 운전하였다. 응집공정을 적용하지 않은 경우와 응집제로 황산반토 30mg/L를 주입한 경우를 비교하였다. 이때 적용된 선속도는 0.1m/s(Re: 88)와 1.0m/s(Re: 877)로 모두 층류(laminar flow)의 조건이며, 빠른 막오염 유발을 위해 역세척 주기를 2시간으로 하였다. 실험결과를 Fig. 4과 Fig. 5에 제시하였다.

Fig. 4는 전처리 공정 없이 원수를 직접 분리막 공정에 유입하여 막오염을 관찰한 결과이고, Fig. 5는 황산반토 30mg/L을 이용한 응집·침전공정을 거친 뒤에 분리막 공정에 유입시킨 결과이다. Fig. 4와 Fig. 5의 결과에 의하면 선속도에 관계없이 응집 전처리 공정의 적용을 통해 막오염 증가율이 크게 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 4에 의하면 선속도 0.1m/s 조

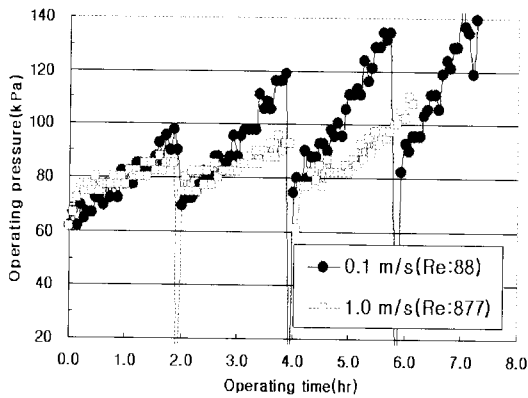


Fig. 4. Variation of operating pressure with time without coagulation.

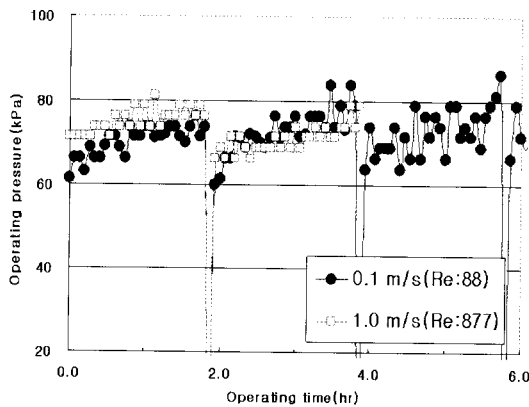


Fig. 5. Variation of operating pressure with time alum coagulation of 30mg/L.

건에서는 막간차압이 빠르게 증가하지만, 1.0m/s 조건에서는 증가율이 크게 감소한 것을 관찰 할 수 있다. 즉, 전처리 없이 대상 원수를 막여과 공정에 직접 적용할 경우 선속도의 증가에 의해 막오염이 크게 감소할 수 있다는 것을 의미한다. 이것은 (식 3)에서 제시된 바와 같이 내부선속도인 u 의 증가로 인한 관성 양력의 증가에 의한 것으로 입자가 막표면에서 멀어지는 힘이 강하기 때문이다. 반면, 응집 전처리를 적용한 Fig. 5에 의하면 두개의 선속도 조건에서 막간차압 변화가 비슷한 양상을 띄고 있다. 이것은 응집 전처리를 적용할 경우 선속도의 효과가 크지 않다는 것을 설명하고 있다. 각 조건에서의 평균 운전압력 증가율을 Table 3에 제시하였다.

Table 3. Increase rate of operating pressure

Linear velocity	[unit: kPa/hr]	
	0.1m/s	1.0m/s
Without coagulation	0.27-0.68(0.49)*	0.14-0.22(0.17)
Alum coagulation (30mg/L)	0.09-0.13(0.11)	0.06-0.07(0.07)

* () is average value

Table 3에서 응집을 적용하지 않은 경우의 평균압력증가율을 비교하면 선속도 0.1m/s에서 0.49kPa/hr였고, 1.0m/s에서 0.17kPa/hr로 조사되었다. 이것은 선속도를 증가할 경우 막오염이 크게 감소하는 것을 의미하며, (식 3)의 이론식에 부합하는 결과이다. 반면, 응집공정을 적용한 경우 0.1m/s와 1.0m/s에서 각 0.11kPa/hr와 0.07kPa/hr로 선속도 증가에 따른 효과가 크지 않은 것으로 나타났다. 이것은 응집공정과 유입공정에서 입자 특성이 변화되었기 때문인 것으로 판단되며, (식 3)를 기준으로 가정할 경우 선속도는 증가하지만 다른 요소인 입자 크기가 감소하였기 때문인 것으로 예상할 수 있다. Fig. 6은 내부순환을 적용하고 있는 막 공정에서 입자크기 조사를 위한 측정 지점을 나타내고, Table 4에는 조사지점에서 측정된 입자의 크기 분포를 제시하였다.

Fig. 6에서 전처리 공정인 응집·침전을 거치면서 크기가 커진(Point A) 입자들은 다음 공정인 유입펌프와 순환펌프를 거치면서 다시(Point B, C) 파괴되는 것을 예상할 수 있다. Table 4에 의하면 유입펌프와 순환펌프에 의한 입자파괴가 뚜렷하게 발견되었다. 펌프를 통과하면서 20~100 μ m 크기의 큰 입자는 감소하고, 2~7 μ m 크기의 작은 입자수는 크게 증가한 것을 알 수 있다. 또한 선속도 증가에 의해 큰 입자는 감소한 반면 작은 입자는 거의 동일한 것으로 나타났다. 일반적으로 미세 입자외 경우가 큰 입자에 비해 막오염에 중요한 인자이며, 횡방향력의 영향을 적게 받기 때문에(AWWA, 1999; Joel et al., 1996) 선속도의 영향이 뚜렷하게 나타나지 않는 것이다. 즉, 선속도 증가에 의해 횡방향력이 상승하면 큰 입자의 경우 막표면에서 멀어지려는 성질이 강하지만, 이 힘에 영향을 적게 받는 미세입자는 선속도에 관계없이 막표면이나 막내부에서 막오염을 유발시키는 것이다.

이상에서 응집·침전 공정을 결합한 한외여과 공정에서는 선속도에 의한 막오염 저감효과가 뚜렷하게

Table 4. Particle number at each process

Particle size μm	After coagulation and sedimentation (Point A)	After pumping (Point B or C)	
		Flux: 100LMH LV: 0.12m/s	Flux: 250LMH LV: 0.23m/s
2~7	2,182	2,748	2,784
7~20	2,633	2,865	2,609
20~100	89	23	17
Total	4,904	5,636	5,410

* Used pump & tubing: masterflex L/S 16

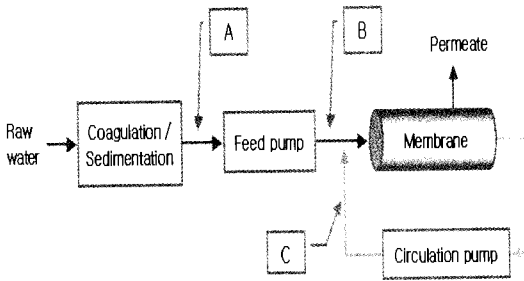


Fig. 6. Schematic diagram of coagulation/UF system.

나타나지 않았다. 이것은 응집·침전 공정에서 크기가 커진 입자가 유입펌프와 순환펌프에 의해 파괴되고, 이 과정에서 막오염에 중요한 역할을 하는 미세입자의 분포가 선속도 변화에 관계없이 일정하게 유지되기 때문이다. 결과적으로 내압형 중공사막에서 응집을 전처리 공정으로 적용할 경우 내부선속도 증가에 의한 막오염 저감 효과는 크지 않다고 할 수 있다.

4. 결론

하천수를 대상으로 0.06m³/d 규모의 응집·한외여과 조합공정의 연속운전을 실시하여, 막여과 공정의 운전인자인 플럭스와 내부선속도가 막오염에 미치는 영향을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

한외여과 연속운전에서 플럭스는 막간차압 증가와 막오염에 매우 중요한 인자임을 확인 할 수 있었다. 플럭스 증가에 따른 막간차압 증가율은 이론식에 의한 증가율 보다 월등히 높게 나타났으며, 이것은 플럭스에 의한 직접적인 영향 보다는 막오염에 의한 간접적인 원인이 더 큰 영향을 끼치기 때문이다. 이러한 점에서 실제 공정의 운전이나 설계를 위해서는 원

수수질과 시스템 구성에 따른 적정 플럭스의 결정이 선행되어야 한다. 또한 높은 플럭스를 유지하기 위해서는 막오염을 제어할 수 있는 전처리 공정과 효과적인 세척방법 등이 제시되어야 할 것이다.

응집·침전 공정을 결합한 한외여과 공정에서는 선속도에 의한 막오염 저감효과가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이것은 응집·침전 공정에서 크기가 커진 입자가 유입펌프와 순환펌프에 의해 파괴되고, 이 과정에서 막오염에 중요한 역할을 하는 미세입자가 선속도 변화에 관계없이 일정하게 유지되기 때문이다. 결과적으로 내압형 중공사막에서 응집을 전처리 공정으로 적용할 경우 내부선속도 증가에 의한 막오염 저감 효과는 크지 않다고 할 수 있다.

참고문헌

권은미, 유명진 (2000) UF를 이용한 용존성 유기물질 제거 시 운전조건이 파울링에 미치는 영향, *대한환경공학회지*, 22(7), pp. 1183-1191

김미숙, 정영륜, 서의훈, 송원섭 (2002) 낙동강 부영양화와 수질환경요인의 통계적 분석, *한국조류학회지*, 17(2), pp. 105-115.

문성용, 김승현 (2002) 응집조건이 한외여과막 공정에 미치는 영향에 관한 연구, *대한상하수도학회·한국물환경학회 공동발표회*.

정철우, 한승우, 강입석 (2002) 막의 재질에 따른 유기물질 성장별 흡착 특성, *대한환경공학회지*, 24(8), pp. 1339-1348.

APHA, AWWA, WPCF (1998) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th ed, Washington DC, USA.

AWWA, (1999) Water Quality & Treatment. 15th ed, McGraw-Hill.

Botes, J.P. et al (1998) Long-term evaluation of UF pilot plant for potable water production, *Desalination*, 115, pp 229-238.

- Cho, J.W. et al (2000) Membrane filtration of Natural organic matter: factors and mechanisms affecting rejection and flux decline with charged ultrafiltration (UF) membrane, *Journal of Membrane Science*, **164**, pp 89-110.
- Edzwald, J.K. and Benschoten, J.E. (1990) Aluminum coagulation of natural organic matter, *Chemical water of wastewater treatment*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 341-359.
- Joel M., Peter E.O. and Mark R.W. (1996) *Water Treatment Membrane Processes*, McGraw-Hill.
- Paul Fu et al (1995) A Pilot study on groundwater natural organics removal by low-pressure membranes, *Desalination*, **102**, pp. 47-56.