

정수처리 응집·한외여과 시스템의 연속운전을 통한 운전조건 결정 및 막오염 특성에 관한 연구

Determination of operating factor and characteristics of membrane fouling on hybrid coagulation pretreatment-UF system in drinking water treatment

문성용^{1*} · 윤종섭² · 김승현²

Moon, Seong-Yong^{1*} · Yun, Jong-Sub² · Kim, Seung-Hyun²

1 엔바로테크(주) 나노응용연구소, 2 경남대학교 토목공학과

(2008년 2월 11일 접수 ; 2008년 4월 11일 채택)

Abstract

This study is about efficiency of pretreatment process and operating factor to membrane process at continuous coagulation/ultrafiltration process in water treatment. The capacity of pilot plant was 0.06 BCD/d. The raw water used was from Nakdong stream which was characterized by high organic matter and high turbidity. The result of the test was that coagulation is good process as to high removal rate to organic matter and turbidity but it caused problem to membrane pore blocking. This paper is to determine the membrane fouling potential under different membrane flux, backwash pressure and linear velocity. Backwash pressure and flux is important parameter on operation of membrane system. Those are directly affected on membrane system. When backwash pressure increased from 150 kPa to 200 kPa, the result showed that fouling (pressure increase rate) changed from 3.69 kPa/h to 0.93 kPa/h and the recovery rate changed from 90.7 % to 82.0 %. Linear velocity had slightly effect on fouling. Linear velocity increased from 0.2 m/s to 0.5 m/s, the corresponding pressure rate changed from 0.93 kPa/d to 0.77 kPa/d.

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

주 제 어 : 막여과, 응집, 선속도, 막오염, 정수처리

1. 서론

막분리 기술을 이용한 정수처리 공정은 최근 국내 수처리 시장에서 주목받고 있는 기술 중의 하나이다. 미국과 일본 등의 선진국을 중심으로 막분리를 이용한 정수처리 공정의 적용은 급격한 증가 추세이며, 특히나 경제성을 높이기 위해 다공성막을 이용한 고회수율 시스템의 적용이 빠르게 진행되고 있다. 또한 분리막 제조 기술 발달로 타공정에 비해 경제성이 점차 높아지고 있다. 반면, 국내에서는 분리막 제조 기술, 공정기술, 실증화 기술 등에서 아직은 많은 연구개발이 요구되는 단계이다. 정수처리 공정에 막여과 공정을 적용할

경우 일반적으로 안전한 수질 및 안정적인 수량 확보가 가능하다. 반면 막오염과 유지관리비 등이 문제가 된다. 막오염은 운전과정에서 막표면에 입자성 또는 용해성 오염물이 부착 또는 흡착되는 현상으로, 투과량 감소와 운전압력 증가의 원인이 된다. 막오염이 빠르게 진행될 경우 물리적·화학적 세정주기가 짧아지게 되고, 막의 사용기간 단축과 운전 효율 감소의 원인이 된다. 따라서 막분리 공정은 효율적인 전처리 공정이 필요하게 되며, 국내의 경우 대부분 정수장의 취수원수가 하천수나 호소수로 고탁도의 원수를 처리대상으로 하고 있어, 고탁도의 원수가 직접 분리막 공정으로 유입될 경우 운전 상에 상당한 어려움이 발생할 수 있다. 막여과 공정에서

*Corresponding author Tel: +82-55-249-2665, FAX: +82-55-249-2664, E-mail: moonjada@naver.com, (Moon, S.Y.)

전처리의 목적은 막오염 원인물질 제거 및 오염부하 감소에 있다. 현재까지 적용되고 있는 공정에는 응집, 활성탄 흡착, 산화철(FeO_2) 흡착, 전오존 처리 등이(Carroll 등, 1999; Guigui 등, 1999; Mori 등, 1998) 있으며, 각 공정들은 시스템 구성, 원수 수질 및 목표 수질에 따라 선택적으로 적용이 가능하게 되며, 운전인자는 단위투과수량(Flux), 세척 조건 및 내부선속도(Liner Velocity, LV) 등의 제어를 가능하게 한다. Lipp 등 (1998)과 Parameshwaran 등 (2001)은 낮은 투과수량으로 운전하는 것이 장기적인 측면에서 유리하다고 발표하였으며, Chen 등 (2003)은 한외여과막과 역삼투막을 이용한 다양한 세척 조건 실험을 통해 역세척이 매우 중요한 운전인자임을 설명하였다. 그리고 Belfort 등 (1994)은 내압형(inside-out flow) 방식의 중공사막에서는 내부선속도가 막오염 변화에 중요한 인자임을 제안하였다. 막분리 공정을 실제 정수처리에 적용하기 위해서는 실험실 규모의 연구는 물론이고 현장적용을 위한 모형플랜트 연구가 다각도로 진행되어야 한다. 본 연구는 이러한 국내의 막분리 기술의 도입 시점에 있어 중요한 역할을 담당하고 있다고 판단되며, 장기간의 모형플랜트 운전을 통해 연속운전에 따른 문제점을 파악하고 보완하고, 실증화 시설의 제작과 운전에 필요한 인자들을 제안하고자 하였다. 주 공정으로 한외여과를 적용하고, 대상 수원인 낙동강 하류의 수질 특성인 고탁도와 높은 유기물 농도를 고려하여 오염물 제거율이 안정적인 응집을 전처리로 적용하였다. 응집의 운전인자인 응집제 주입량과 교반강도 등은 사전 연구를 통해 결정하였다 (문 등, 2005). 본 연구는 크게 두 가지를 목적으로 한다. 첫째, 응집·한외여과 혼성공정에서 운전인자의 결정이며, 둘째, 전처리인 응집 공정의 효율과 적용성을 평가하는 것이다. 단, 본 연구에서 응집 공정은 약품응집에 의한 침전공정까지를 포함한다. 공정의 운전인자로는 단위투과수량, 역세척 압력 및 내부 선속도를 적용하여 최적의 적용값을 제안하였으며, 전처리에 의한 처리수 수질은 탁도와 유기물 농도 변화를 조사하였다. 추가적으로 연속운전을 통해 발생된 문제점을 제시하고, 문제점 보완 방안을 제안하였다.

2. 원수 수질 및 모형 플랜트 구성

낙동강 하천수를 원수로 하고, 운전 기간은 2002년 10월부터 2003년 6월까지로 하며, 분리막은 중공사형 한외여과막으로 내압형(Inside-out flow)을 적용하였다. 응집공정의 운전 조건은 실험실 실험을 통해 결정하였고, 연속운전이 가능하게 하였다.

2.1. 원수 수질

실험 기간 동안의 원수 수질을 Table 1에 제시하였다.

Table 1. Water quality data measured during the study period

parameter	Unit	concentration(average)
Turbidity	NTU	3.5~15.4(7.8)
Temperature	°C	1.0~20.2(10.2)
TOC	mg/L	3.2~5.4(4.5)
UVA ₂₅₄	cm ⁻¹	0.054~0.073(0.066)
Alkalinity	mg/L (CaCO ₃)	60~88(71)

실험기간은 10월부터 다음해 6월초 까지로 평균 수온이 10.2°C로 대체로 낮고, 탁도 및 유기물 농도는 겨울철 낮은 범위에서 안정적이었고 초봄이 되면서 농도가 증가하는 형태로 나타났다.

2.2. Ultrafiltration membrane

적용된 분리막은 프랑스 Aquasource사의 중공사형 한외여과막이다. 내압형(Inside-out flow)으로, 모듈의 전체길이를 1.1 m로 하고, 10가닥으로 하나의 모듈을 구성하였다. Fig. 1에서처럼 모듈은 수평형으로 설치되었다. 적용된 막의 특성을 Table 2에 제시하였다.

2.3. 응집공정

응집공정은 응집제 주입, 교반 및 침전으로 구성하였다. 응집제 및 운전조건은 사전 연구를 통해 결정되었으며(문 등, 2005), 응집제로 $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 를 적용하였다. 전체 공정은 연속 흐름이 가능하도록 하고 용기의 크기와 수위조절을 통해 체류시간을 조절하였다. 교반은 급속교반과 완속교반으로 구성되며, 급속교반은 150rpm에서 5분간, 완속교반은 30rpm

Table 2. Characteristics of Ultrafiltration Membrane

Item	Units	Condition
Pore size	μm	< 0.01
Materials	-	Polysulfone
Operating Pressure	kPa	< 120
Inner diameter	mm	1.0
Filter surface area	cm ²	345

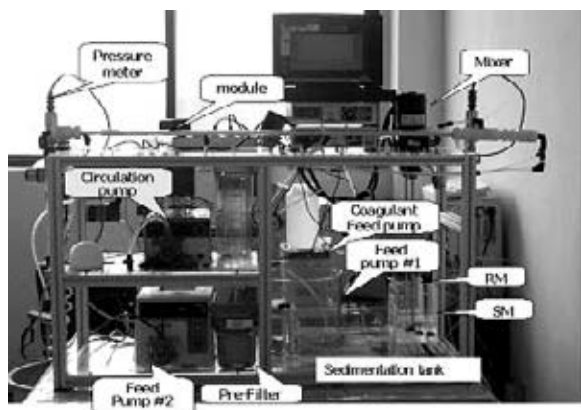


Fig. 1. Result of Operating at Run I.

Table 3. Operating Condition as Coagulation

Process	Condition
Coagulant	FeCl ₃ · 6H ₂ O, 30mg/L
Mixing	Rapid G = 220 s ⁻¹ (150 rpm) RT : 5 min
	Slow G = 25 s ⁻¹ (30 rpm) RT : 15min
Sedimentation	60min

에서 15분간 실시하였다. 침전시간은 30분과 60분, 두 조건을 비교한 뒤 효율이 안정적이라고 평가된 60분을 적용하였다. Table 3에 응집조건을 제시하였다.

2.4. 한외여과공정 운전조건

침전공정 이후의 한외여과막 공정은 모듈을 수평형으로 설치하고, 정량여과 방식으로 내부 흐름을 가지는 교차형 흐름(Cross flow)을 적용하였다. 연속운전은 2002년 10월부터 2003년 6월 까지 실시되었으며, 전체 운전기간을 막의 특성과 운전 방법 등을 기준으로 Run I과 Run II 두 단계로 구분하였다. Run I은 적정 플럭스 결정을 목적으로 하고, Run II는 역세척 압력과 내부선속도 결정을 목적으로 하였다. Table 4에 한외여과 공정의 연속운전 조건을 제시하였다.

Run I은 적정 단위투과수량(Flux, L/m²·hr) 결정을 목적으로 하며, 운전에 적용된 플럭스는 100LMH와 80LMH이다. 이때 역세척 압력은 150kPa, 내부선속도는 1m/s를 적용하였다. Run I에서 적용된 분리막은 약 1년 동안 실험실 실험에 사용된 한외여과막으로 여러 차례 화학적 세정을 실시한 상태였다. 운전압력은 유입단과 농축수 유출단의 압력을 측정하여 막간차압(transmembrane pressure)으로 표현하고, 최대 적용압력은 120kPa로 하였다.

Run II는 막여과 공정의 중요한 운전인자인 역세척 압력과 내부선속도 결정을 목적으로 하고, 역세척 압력을 160~200kPa, 내부선속도를 0.2~0.5m/s 범위에서 비교 조사하였다. 이때 적용된 플럭스는 80 LMH 이다. 내부선속도 값을 Run I에 비해 낮게 적용한 것은 응집 전처리를 적용할 경우 선속도가 막오염에 미치는 영향이 크지 않다는 연구 결과(문, 2004)를 근거로 하였다. 역세척 조건은 30분 정상운전 후, 30초 동

Table 4. Operating Condition for Ultrafiltration Process

Item	Run I	Run II
Date	2002. ct.~Dec.	2003. Jan.~June
Membrane	Used (1 year)	New
Flux at 25°C, LMH	100 & 80	80
Back wash pressure	150 kPa	200 kPa
Recovery rate	-	< 90%
Liner velocity(cross flow rate)	1 m/s	0.2~0.5 m/s
Back wash time	30sec(frequency : 30min)	

안의 역세척과 2초간 표면세정을 적용하였다. 배출된 세척수는 별도 처리공정에 의해 처리하였다.

3. 결과 및 고찰

한외여과 공정은 정량여과 방식으로 일정한 투과수량으로 운전되며, 운전 시간 경과에 따라 막오염이 증가하게 된다. 일반적으로 정량여과 방식에서 막오염은 운전압력 증가로 표현된다. 정량여과 방식 막여과 공정의 운전인자는 플럭스, 역세척 방법 및 내부선속도 등이 있다. 본 연구에서는 운전인자들 중에서 플럭스와 역세척 압력 그리고 내부선속도를 결정하고자 하였다. 플럭스는 Run I의 운전 결과를 통해 결정하고, 역세척 압력과 내부선속도는 Run I에서 결정된 플럭스 조건을 적용한 Run II의 운전 결과를 통해 결정하였다. 추가적으로 막여과 공정의 장점인 안정적인 처리수질 확보가 가능하지를 조사하였다. 특히, 응집 전처리 공정을 적용할 경우의 공정별 오염물 제거 특성을 조사하였다. 연속운전을 통해 제시된 문제점을 파악하고 개선 방안을 제시하였다. 수질 분석 항목은 탁도, TOC, UV₂₅₄ 등을 중점적으로 조사하였다.

3.1. 플럭스 결정(Run I)

막여과 공정에서 플럭스는 매우 중요한 운전인자이며, 막오염에 직접적인 영향을 미친다. 모형 플랜트의 운전에서 플럭스는 원수의 수질에 영향을 크게 받기 때문에 현장 조건에 맞는 적정 플럭스의 결정이 요구된다. 본 연구에 적용된 원수 수질 조건에 맞는 투과수량 결정을 위해 2002년 10월부터 12월까지 연속운전을 실시하였다. 플럭스 결정을 위한 Run I은 운전 시기와 조건에 따라 네 부분으로 구분되고, 적용 플럭스는 100LMH와 80LMH이다. 이때 유입수 수온 분포는 10.0~20.0°C로, 평균 14.5°C이며, 수온의 일변화가 큰 특징을 보였다. 이 점을 고려하여 적용된 플럭스는 1일 2회 온도 보정(Mallevalle 등, 1996)을 실시하였다. 초기 플럭스인 100LMH는 동일한 분리막을 사용하고 비슷한 수질 조건의 하천수를 대상으로한 연구(Jacangelo 등, 1992)에서 약 2주 후에 막간차압이 크게 증가하는 점을 고려하여 선택

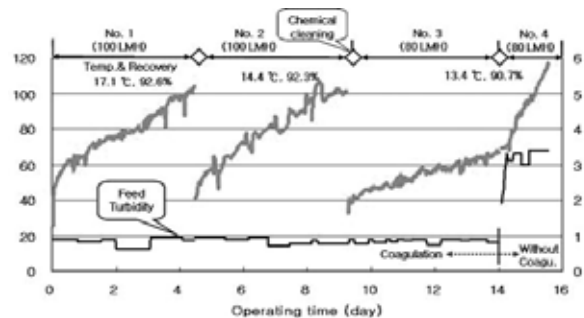


Fig. 2. Result of Operating at Run I.

하였고, 상대적으로 낮은 플럭스인 80LMH를 비교값으로 적용하였다. Run I의 연속운전 결과를 Fig. 2에 제시하였다. Fig. 2에서 No. 1과 No. 2는 100LMH 조건이며, No. 3은 80LMH 조건이다. 그리고 No. 4는 응집 전처리 공정의 효율을 평가하기 위해 적용된 것으로 80LMH 조건에서 응집제 공급이 중단된 경우이며, 원수는 침전 공정만 통과하고 바로 막으로 유입된다.

Fig. 2의 운전 결과에서 플럭스가 막오염에 막대한 영향을 끼치는 것을 확인할 수 있었다. 플럭스 100LMH 조건인 No.1과 No. 2는 운전기간 약 9.3일까지이며, 평균 막간차압 증가율이 0.62kPa/h였다. 반면, 80LMH 조건인 No. 3에서는 0.21kPa/h로 약 3배의 막오염 감소 효과가 있는 것으로 나타났다. 여기서, 막간차압 증가율은 단위시간(h) 동안 변화한 막간차압(kPa)의 크기이며, 이 값이 클 경우 막간차압 증가가 크고 막오염이 빠르게 진행된다고 할 수 있다. 반면 플럭스 변화에 의해 시스템의 전체 회수율은 각 92.6%와 92.3%에서 90.7%로 소폭 감소하였다. 이상에서 낮은 플럭스 조건인 80LMH에서 막오염이 크게 감소하였고, 90% 이상의 시스템 회수율을 얻을 수 있었다.

응집 전처리 공정의 효율을 평가하기 위해 적용된 No. 4의 경우 유입수 탁도값이 빠르게 증가하면서 막간차압도 급한 상승을 보였으며, 막간차압 증가율이 1.55kPa/h로 매우 높게 나타났다. 응집 공정 유무에 의해 유입수 탁도는 약 2.5NTU 변화하였으며, 이로 인해 막오염 증가속도가 응집제 주입조건에 비해 7.4배 빠르게 진행되었다. 이 결과는 응집제에 의한 응집공정이 막오염 저감에 매우 효과적이 전처리 공정임을 역설한다고 할 수 있겠다.

시스템의 효율을 설명할 수 있는 방법 중의 하나로 화학적 세정주기를 적용할 수 있다. 화학적 세정 주기를 나타내는 Specific throughput는 1회 세척주기 동안의 처리수 투과량을 의미하며(Lipp et al., 2002), 단위 면적당 총 투과량을 압력 증가량으로 나눈 값이다. 이 값이 클수록 화학적 세척 주기가 길고, 시스템 효율이 높다고 할 수 있다. Lipp 등은 한외여과막을 이용한 연구에서 약 22.0m³/m²/kPa의 Specific throughput 값을 확인할 수 있었다. Run I의 운전 결과 전체의 Specific throughput 값은 각각 0.17, 0.13, 0.45 m³/m²/kPa로 조사되었다.

즉, 80LMH 조건이 100LMH 조건보다 운전효율 측면에서 월등하게 높은 특징을 가지는 것으로 나타났다. 또한 응집을 적용하지 않은 경우 0.06m³/m²/kPa로 매우 낮게 나타났으며, 이 결과에서 응집 전처리 공정을 적용하지 않을 경우 80LMH 조건이 매우 높은 플럭스라고 할 수 있으며, 원수를 직접 막여과 공정에 적용할 경우의 적정 플럭스는 80LMH 보다 낮은 값에서 결정될 것으로 예상된다. 그리고 전체 결과가 매우 낮은 값을 기록하였는데, 이것은 유입수의 수질이

크게 다르고, 막 자체의 손상과 역세척 과정에서 빠른 막오염 유발을 위해 산 세정을 적용하지 않은 점 등이 원인으로 평가된다. 이상의 결과에서도 낮은 플럭스 조건에서 높은 운전 특성을 가지는 것으로 나타났다.

Fig. 2에서 유입수 탁도값은 1NTU 이하로 매우 안정적이었다. 이것은 전처리 공정으로 적용된 응집·침전에 의한 것이며, 응집제 주입이 중단되면서 탁도값이 증가하고, 막오염이 빠르게 진행되었다. 이 처럼 전처리 공정으로 적용된 응집·침전이 매우 효과적임을 확인할 수 있다. 이상에서 본 연구에 적용된 시스템과 원수 조건에서는 80LMH가 효과적인 플럭스임이며, 응집·침전 전처리 공정의 효율이 매우 높다는 것을 확인할 수 있었다.

3.2. 역세척 압력 및 내부선속도 결정 - Run II

Run I의 운전 이후, 분리막을 교체하여 연속운전을 실시하였다. 운전 기간은 2003년 1월부터 6월까지이며, 역세척 압력과 내부선속도의 결정을 목적으로 진행하였다. 연속운전은 운전 조건과 화학적 세정 등을 기준으로 6단계로 구분하였다. 또한 운전과정에서 몇 차례 문제점이 발생되면서 플럭스에 의한 영향과 온도 등에 의한 영향이 제시되었다. 각 영역의 운전 조건을 Table 5과 Fig. 3에 제시하였다.

Table 5에서 전체 운전 기간은 계절적으로 겨울과 봄에 해당되며, 수온은 No. 6를 제외하고 대부분 10℃ 미만을 유지하였다. 플럭스는 Run I에서 결정된 80LMH를 적용하였다. No. 1은 동일한 운전 조건으로 역세척 압력 200kPa, 내부선속도 0.2m/s를 적용하였다. No. 2는 내부선속도를 0.5m/s로 증가시킨 경우이고, No. 3과 No. 4는 역세척 압력을 변화시켰다.

Table 5. Operating condition and results

Items	No. 1(a)	No. 1(b)	No. 2(a)	No. 2(b)	No. 3	No. 4
Flux(LMH) at 25℃	80	114	80	112	80	80
Temp. (℃)	5.8~8.6	1.0~4.7	4.6~10.0	6.5~11.5	8.8~13.7	13.2~20.2
Back wash pressure (kPa)	200	200	200	200	150	180
Linear velocity(m/s)	0.2	0.2	0.5	0.5	0.5	0.2
Average recovery(%)	80.1	-	84.6	87.6	90.7	90.4
Specific throughput (m ³ /m ² /kPa)	-	-	-	0.50	0.50	1.86

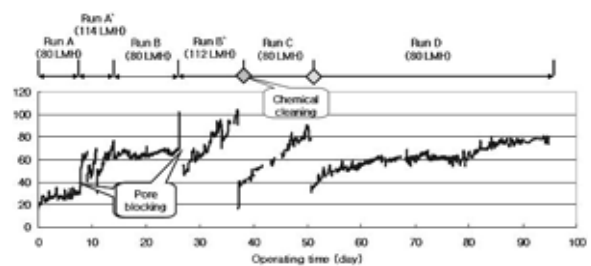


Fig. 3. Result of continuance operating.

No. 1(b)와 No. 2(b)는 연속운전 과정에서 발생된 문제로 인하여 플럭스가 순간적으로 증가한 경우이다. 공정의 운전 결과인 시스템 회수율은 전체 유입수량과 최종 생산수량의 비로 결정되며, 80.1~90.7% 까지 큰 변화를 나타내었다.

운전 결과 No. 1(a)의 압력변화는 매우 안정적이었으며, 운전 초기를 제외하고 대부분 30±5 kPa 범위에서 안정화 되었다. No. 1(b)은 원수의 유입이 일시 중단되면서 막내부가 막히는 현상이 발생했고, 유입이 정상화 되면서 계속 동일한 플럭스를 유지하였다. No. 1(b)로 구분된 운전시간 8일에서 12일까지는 No. 1(a)의 운전 중 원수 공급중단의 문제로 인해 전체 10가닥 중, 3가닥이 막히면서 막내부 압력이 급격하게 증가한 결과이다.

즉, No. 1(b)에서 운전된 이론 플럭스는 114LMH이며, 두 번의 물리적 세정을 실시하였지만 매우 높은 압력증가를 나타내었다. No. 2는 No. 1(b)에서 증가한 플럭스를 보정하여, 80LMH 조건에서 운전된 결과이다. 플럭스가 114LMH에서 80LMH로 감소되면서 압력은 거의 일정한 값으로 안정되었다. 이것은 공정의 압력증가가 투과 플럭스에 크게 영향을 받는다는 것을 설명하고 있다. 이후 다시 원수 공급에 의한 막내부 막힘이 발생하여 급격한 압력증가가 나타났고, No. 2(b)에서 물리적 세정을 실시하고, 높아진 112LMH 조건에서 운전이 계속되었다. 이 결과 압력 증가가 빠르게 진행되었다. No. 2(b) 조건에서 약 12일 만에 막간차압이 100kPa에 도달하였고, 화학적 세정을 실시하였다. No. 3은 화학적 세정 실시 후, 운전 플럭스를 80LMH로 유지하면서 역세척 압력을 150kPa로 선속도를 0.5m/s로 조정하여 운전한 결과이다.

화학적 세정을 하였지만, 압력 증가가 매우 빠르게 진행되었다. 이 결과는 역세척 압력을 감소시킨 원인으로 판단되며, 역세척 압력 역시 매우 중요한 운전인자라고 할 수 있다. No. 4는 역세척 압력을 180kPa까지 증가시키고, 내부 선속도를 0.2m/s로 변화시킨 결과이다. 이 결과 초기 운전압력은 No. 2나 No. 3과 비슷하게 빠른 상승을 보였지만 일정시간 이후에는 안정적인 값을 유지하는 것으로 나타났다. 이 결과에서 역세척 압력이 매우 중요하게 작용되고 있으며, 내부 선속도는 운전에 큰 영향을 끼치지 못함을 이야기하고 있다.

3.2.1. 내부선속도의 영향

Fig. 3에서 No. 1(a)와 No. 2(a)는 내부선속도를 다르게 적용하고, 나머지 조건을 동일하게 적용한 결과이다. No. 1(a)의 경우 0.2m/s를 No. 2(a)는 0.5m/s를 적용한 결과이다. 운전결과 각 조건에서 막간차압 증가율은 0.93kPa/d (1.0~7.8 d)와 0.77kPa/d(17.8~26.1 d)로 내부선속도 증가에 의해 약 17%의 막오염 감소효과가 나타났다.

그렇지만 그 차이는 동일한 내부선속도 조건인 No. 2(a)와 No. 3의 비교에서 No. 3의 막간차압 증가율이 3.69kPa/d

(37.7~49.7 d)로 나타난 점과 비교한다면 감소율이 크지 않은 것이라 평가할 수 있으며, 동일한 내부선속도 조건에서의 막오염 차이는 내부선속도에 관계없이 다른 영향인자들에 의해 막오염이 결정된다는 것을 간접적으로 확인할 수 있다.

즉, 응집과 침전 공정을 전처리로 적용한 내압형 한외막 공정에서 막오염에 미치는 내부선속도의 영향이 크지 않다는 것을 확인할 수 있다. 이상의 연속운전 결과에서 내부선속도는 막오염에 큰 영향을 미치지 못하며, 이것은 실험실 규모의 연구결과에서 제시된 결론에 일치한다(문 등, 2005).

3.2.2. 역세척 압력의 결정

막오염에 미치는 역세척 압력의 영향을 조사하기 위해 Run II의 연속운전을 통해 200, 180, 150 kPa를 적용하였다. Run II의 연속운전 결과에서 No. 1과 No. 2은 역세척 압력을 200 kPa 조건 운전된 결과이며, No. 3와 No. 4의 경우 각 150kPa과 180kPa에서 운전된 결과이다.

다른 역세척 압력 조건에서의 평균 막간차압 증가율을 조사하였다. Fig. 4 역세척 압력 변화에 따른 평균 막간차압 증가율과 회수율을 비교하였다.

Fig. 4에서 역세척 압력이 감소할수록 막오염은 빨라지고, 반면 시스템 회수율은 증가하게 되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 막오염 정도를 나타내는 막간차압 증가율은 180kPa까지는 큰 차이를 보이지 않지만 150kPa 조건이 되면서 매우 빠르게 증가한다.

그렇지만 시스템 회수율은 180kPa과 150kPa 조건에서 각 90.4%와 90.7%로 나타나, 큰 차이를 보이지 않고 있다. 즉, 역세척 압력은 일정 이상의 압력 요구되며, 본 연구에 적용된 모형플랜트의 경우 180kPa이 가장 효과적인 적용압력임을 확인할 수 있었다.

이상의 결과에서 역세척 압력이 막오염이나 시스템 회수율에 미치는 영향이 매우 큰 것을 확인할 수 있었고, 원수의 수질 특성과 공정 특성에 의해 적절한 압력 범위가 존재한다는 것을 알 수 있다.

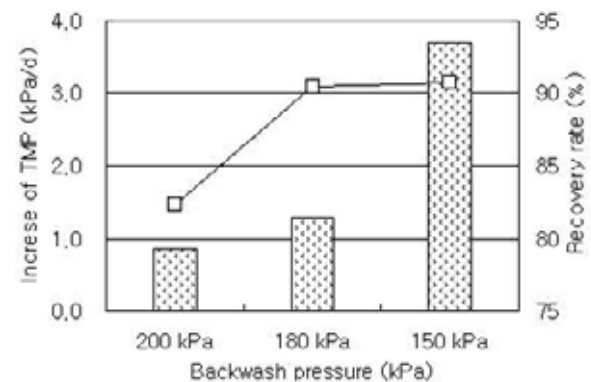


Fig. 4. Change of TMP & Recovery rate as a function of backwash pressure.

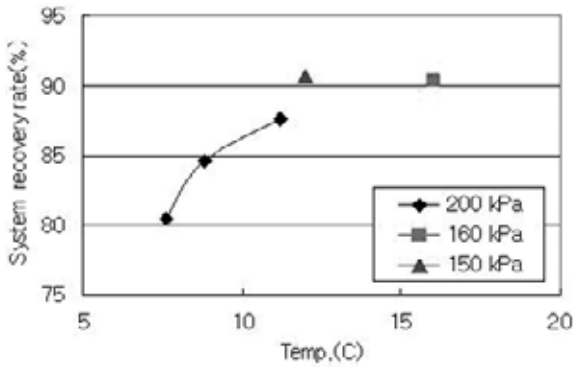


Fig. 5. System recovery as a function of Temperature and backwash pressure.

3.2.3. 시스템 회수율과 수온의 관계

이상에서 역세척 압력과 플럭스가 매우 중요한 인자이고, 내부순속도에 의한 영향은 크지 않다는 것을 확인할 수 있었다. 역세척 압력 이외에 수온에 의한 영향도 관찰되었다. 연속 운전의 결과에서 시스템 효율을 역세척 압력과 수온 변화의 함수로 나타내었다. 여기서, 시스템 효율은 전체 공정의 회수율이며, 회수율은 유입 수량과 최종 생산수량의 비이다. Fig. 5에 역세척 압력과 수온에 따른 시스템 효율을 제시하였다.

Fig. 5에 의하면 역세척 압력이 증가할수록 시스템 효율이 낮아진다는 일반적인 결과를 확인할 수 있었다. 이것은 최종 생산수량은 투과수량에서 역세척 수량을 감한 값이므로, 역세척 압력이 증가할 경우 투과수량은 일정하고, 역세척 수량은 증가하게 된다. 이러한 이유로 최종생산수량은 감소하고 효율이 낮아지게 된다. 수온의 영향은 동일한 압력 조건에서 온도가 증가할수록 시스템 회수율이 증가한다. 이 결과는 매우 흥미로운 것이며, 수온이 막투과 수량에 미치는 영향을 설명하고 있다. 결과에 의하면 수온이 증가하면 세척수량은 일정한 반면 연속운전에 의한 투과수량은 온도보정에 의해 일정하게 증가하게 된다. 일반적인 경우 수온 1°C 증가에 의해 약 3%의 투과수량 증가가 발생하는 것으로 알려져 있다 (Mallevalle, 1996). 또한 수온 감소에 의한 회수율 감소 현상은 10°C 이하의 낮은 수온 범위에서 더욱 뚜렷하게 나타났으며, 회수율이 낮은 경우 더 뚜렷하게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

3.2.4. 수질 특성

연속운전에서 응집·막여과 공정의 운전 특성을 파악하기 위해 공정별 수질을 조사하였다. 수질 항목은 탁도와 UV₂₅₄를 대상으로 하였다. Fig. 6에 공정별 수질을 나타내었다.

Fig. 6에 의하면 유입 원수의 수질은 운전기간 동안 다양한 분포로 조사되었다. 유기물 농도를 나타내는 UV₂₅₄ 원수 농도는 0.062±0.011 cm⁻¹ 범위였고, 탁도는 3.5~15.4NTU

범위인 것으로 조사되었다.

이 후 응집·침전 공정을 거치면서 막여과로 유입되는 유입수의 수질은 거의 일정하게 유지 되었다. 탁도는 0.9±0.4NTU, UV₂₅₄는 0.038±0.005cm⁻¹의 분포를 나타내었다. 최종 처리수의 탁도는 0.1NTU 이하의 안정적인 값을 유지하였고, UV₂₅₄의 경우는 유입수 농도에 따라 변화를 나타내지만 평균 0.031cm⁻¹의 농도를 유지하였다. 이상의 수질 분석 결과에서 탁도의 경우 유입수 수질에 관계없이 일정 농도 이하를 유지하지만 유기물의 경우는 유입수 수질에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히, 유기물과 탁도 모두 대부분 응집·침전 공정에서 대부분 제거가 이루어짐을 확인할 수 있었다. Fig. 7에 공정별 제거율을 제시하였다.

Fig. 7는 연속운전 결과를 바탕으로 응집·침전(Coagulation)에 의한 제거율과 막여과를 거친(Coagulation+UF) 최종 제거율을 비교하고 있다.

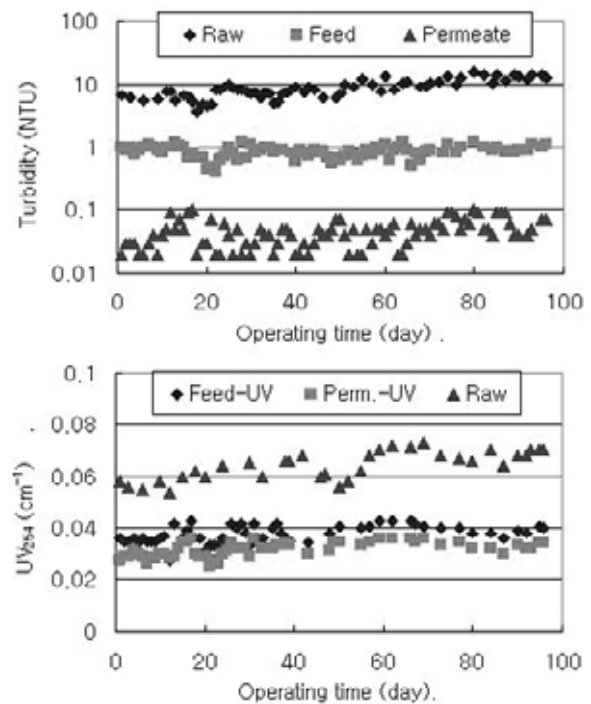


Fig. 6. Water quality (a) Turbidity, (b) UV₂₅₄.

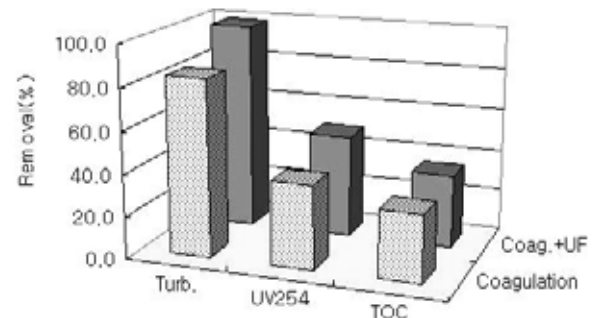


Fig. 7. Removal rate of pollutant in water process.

Fig. 7에 의하면 적용된 공정의 최종 제거율은 탁도의 경우 99%로 매우 높았고, TOC와 UV₂₅₄는 35~45%의 제거율로 나타났다. 또한, 세 항목 모두 응집·침전 공정이 전체 제거율의 80% 이상을 차지하고, 이후 공정인 막여과 공정에 유입되는 오염부하가 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 점에서 응집·침전공정은 안정적인 유입수 수질 확보 측면에서 매우 효과적인 전처리 공정이라고 할 수 있다.

3.3. 연속 운전에서 발생한 문제점

본 연구에 적용된 막여과 시스템은 내압형 구조로 외압형에 비해 Cross-flow 적용이 용이한 반면 내부 막힘현상 등의 문제점 때문에 안정적인 전처리 공정이 요구된다. 또한 역세척 주기가 짧은 반면 세척 효율은 상대적으로 높다고 할 수 있는데, 일반적으로 외압형의 경우 모듈의 중심부 또는 유출부의 세척 효율이 떨어져서 장기적으로는 미생물 오염의 원인이 될 수 있지만, 상대적으로 내압형의 경우 세척수 배출방식과 주기가 결정된다면 막내부 전체가 고르게 세척이 이루어진다고 할 수 있다. 이처럼 내압형 구조에서는 전처리공정이 매우 중요한 운전 인자이며, 본 연구에서 수행된 연속운전 결과에서도 안정적인 전처리공정의 중요성을 확인할 수 있었다. Fig. 3의 Run A'와 B'의 시작점은 막내부가 막히면서 막간차압이 급격하게 상승한 것을 나타내고 있다. 이외에도 응집제의 주입 중단으로 인하여 빠른 막오염이 진행되는 현상이 발견되었다. Fig. 8에 실제 운전에서 발견된 내부막힘 현상을 제시하였다.

Fig. 8에서 지점 I의 경우 원수 공급이 일시적으로 중단된 경우이다. 이때 공정의 구조상 공기가 막내부로 유입되어 막 내부 농도가 높아지면서 급격한 압력증가가 발생되고, 심할 경우 원형의 막 내부가 오염물질로 막히게 된다. 지점 II의 경우 초기 10가닥의 중공사 막중 2~3가닥이 막히면서 운전 압력이 순간적으로 상승한 결과이다. 이후 정상 조건으로 조절하였지만 운전압력의 회복은 어려웠다. 지점 II은 응집제 주입이 중단되어 유입수의 오염부하가 급증하게 되면서, 막오염이 빠르게 진행된 경우이다.

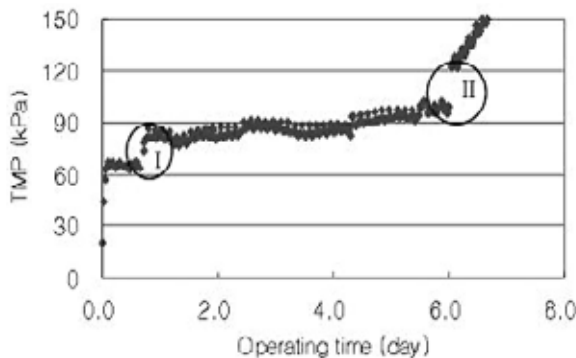


Fig. 8. Increase of TMP as pore blocking.

즉, 내압형 시스템에서는 무엇보다 안정적 전처리공정이 중요하게 작용되며, 전처리공정의 성능이 직접 막여과공정에 영향을 끼친다는 것을 확인할 수 있었다. 반면, Fig. 8의 실험결과는 응집제 주입에 따른 막오염 감소 효과를 간접적으로 설명하고 있다.

이상에서 실증화시설의 설계에 있어서는 전처리 공정에 대한 검토와 보완이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

하천수를 대상으로 응집·침전 전처리를 적용한 막여과 공정의 연속운전을 실시하였다. 예비실험을 통해 적정 플럭스를 결정하고, 막여과 공정의 운전인자인 역세척 압력과 내부선속도에 의한 막오염 특성을 조사하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 플럭스가 막오염에 큰 영향을 끼치는 것을 확인할 수 있었고, 연구에 적용된 조건에서의 적정 플럭스는 80LMH 범위인 것으로 평가되었다.
- 2) 역세척 압력에 의한 막오염 특성 변화가 뚜렷하게 나타났다. 역세척 압력 증가는 막오염을 저감시킴으로서 운전 압력 증가를 완화시킨 반면 전체 회수율이 감소하는 문제점이 확인되었으며, 회수율 감소현상은 동일한 역세척 압력조건에서 수온이 낮은 경우 크게 감소하는 것으로 나타났다.
- 3) 응집·침전 공정을 전처리로 적용한 경우 내부선속도 변화는 막오염에 큰 영향을 미치지 못하였다.
- 4) 응집·침전 공정의 처리수 수질은 탁도와 유기물 모두 안정적 이었으며, 오염물질의 약 80% 이상이 제거되어 오염부하 감소 측면에서 매우 효과적인 전처리 공정으로 평가되었다.
- 5) 공정상 발생 가능한 유입수 공급 중단과 응집제 주입량 감소 등은 막오염과 시스템 전체 효율 감소에 직접적인 영향을 끼치는 것으로 조사되어, 내압형 막여과에서는 전처리 공정의 처리효율 이외에도 연속운전에 따른 수질 및 공정의 안정성이 중요한 것으로 확인되었다.



참고문헌

1. 권은미·유명진(2000) UF를 이용한 용존성 유기물질 제거시 운전조건이 파울링에 미치는 영향, *대한환경공학회지*, 22(7), pp. 1183-1191
2. 문성용·김승현(2002) 응집공정에 의한 자연유기물 제거 특성

- 에 관한 연구, *수처리기술*, 10(2), pp. 57-67
3. APHA, AWWA, WPCF(1998) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th ed, Washington DC, USA.
 4. AWWA, (1999) *Water Quality & Treatment*. 15th ed, McGraw-Hill.
 5. Belfort, G., Davis, R.H. and Zydney, A.L. (1994), The Behavior of Suspensions and Macromolecular Solutions in Crossflow Microfiltration, *Journal of Membrane Science*, 96(1), pp. 1-58
 6. Botes, J.P. and Jacobs, S.M., (1998) Long-term evaluation of UF pilot plant for potable water production, *Desalination*, 115, pp 229-238.
 7. Chen, J.P., Kim, S.L. and Ting, Y.P. (2003) Optimization of Membrane Physical and Chemical Cleaning by a Statistically Designed Approach, *Journal of membrane science*, 219, pp. 27-45
 8. Fu, P., Ruiz, H., Lozier, J., Thompson, K. and Spangenberg, C. (1995) *A Pilot study on groundwater natural organics removal by low-pressure membranes*, *Desalination*, 102, pp. 47-56
 9. Jaeweon Cho, Amy, G. and Pellegrino, J. (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.
 10. Lipp, P., Baldauf, G., Schick, R., Elsenhans, K. and Stabel, H.H. (1998) Integration of ultrafiltration to conventional drinking water treatment for a better particle removal -efficiency and costs, *Desalination*, 119, pp. 133-142
 11. Lipp, P. and Baldauf, G. (2002) Application of out-in MF/UF-systems for drinking water treatment with air supported backwash-three case studies, *Desalination*, 147, pp. 63-68.
 12. Mallevialle, J., Odendaal, P.E. and Wiesner, M.R., (1996) *Water Treatment Membrane Processes*, McGraw-Hill.
 13. Mori, Y., Oota, T., Hashimoto, M., Takamura, M. and Fujii, Y. (1998) Ozone-microfiltration system, *Desalination*, 177, pp. 211-218.
 14. Mulder, M.(1996) *Basic Principles of Membrane Technology*, KLUWER ACAD- EMIC PUBLISHERS.
 15. Porter, M.C., (1988) *Handbook of industrial membrane technology*, NOYES PUBLICATIO-NS.
 16. Teodosiu, C.C., Kennedy, M.D., Van Straten, H. A. and Schippers, J. C. (1999) Evaluation of Secondary Refinery Effluent Treatment Using Ultrafiltration Membrane, *Water Research*, 33(9), pp. 2172-2180.