

응집·한외여과 공정에서 역세척 조건 결정 및 막오염 특성에 관한 연구

문성용[†] · 이상협 · 이병천 · 윤종섭^{*} · 김승현^{*}

한국과학기술연구원 수질환경및복원연구센터

^{*}경남대학교 토목공학과

A Study on the Determination of Backwash Condition and Fouling in Coagulation/Ultrafiltration Membrane System

Moon, Seong-Yong[†] · Lee, Sang-Hyup · Lee, Byoung-Cheun · Yun, Jong-Sub^{*} · Kim, Seung-Hyun^{*}

Water Environment & Remediation Research Center, Korea Institute of Science and Technology

^{*}Department Civil Engineering, Kyungnam University

(Received 22 July 2005, Accepted 23 September 2005)

Abstract

This study is about backwash condition and membrane fouling at continuous coagulation/ultrafiltration process in water treatment. The capacity of pilot plant was 0.06 m³/d. The result of the test, Backwash cycle time and duration time had a significant effect on the efficiency of system and backwash. Backwash duration time was determined to be fixed in 30 seconds for the system with more than 95% recovery rate, It needed 30 minute backwash frequency. During the continuous operation, membrane fouling was analyzed by determining the filtration resistance (R_f) and cake layer resistance (R_c). At the initial stage, filtration resistance highly influenced the fouling behavior. But after 1.5 hours, cake layer resistance became more important than filtration resistant.

keywords : Backwash, Coagulation, Fouling, Membrane, Resistance Ultrafiltration

1. 서론

막여과는 수처리에서 최근 가장 주목받고 있는 공정이다. 국내의 경우 하수처리수 재이용과 생물활성막여과(Membrane bioreactor, MBR) 및 분리막 정수처리 시설 등에 다양하게 적용되고 있다(이 등, 2004; Fan et al., 2001; Teodosiu et al., 1999). 현재 국내의 막여과 기술은 실증화 초기 단계이며, 많은 연구단체에서 공정의 효율 향상과 운전 특성 및 경제성에 관한 연구를 다양하게 진행하고 있다. 일부 기업에서는 자체 분리막 생산능력을 갖추고 시제품을 생산하고 있다. 그렇지만 실증화 시설의 대부분이 선진국의 기술을 도입하는 형태를 벗어나지 못하고 있어 국내의 원수 수질과 수요자의 요구에 맞는 기술축적이 부족하며, 아직까지 막여과에 대한 법적인 기준이 마련되어 있지 않은 상태이다. 따라서 현장 플랜트의 연속 운전을 통한 실증화 단계의 연구와 선진국에 비해 많이 부족한 막 제조기술에 관한 연구가 요구되고 있다.

막여과 공정에서 핵심적인 제한인자는 막오염이다. 따라서 막오염 제어가 가장 중요한 운전변수라 할 수 있다. 막오염은 운전압력 증가와 투과수량 감소의 원인이 되며, 결과적으로 전체 시스템의 처리효율에 영향을 끼친다. 막오염

제어를 위해서는 전처리를 통한 오염 부하를 감소시키거나 막표면에 형성된 오염층을 효과적으로 제거하는 세척 기술이 요구된다. 국내의 경우 정수처리 원수로 대부분 지표수를 이용하고 있으며, 지표수의 경우 오염물질의 종류가 다양하고 농도가 높은 것이 특징이다. 막여과 공정을 직접 사용하는 것보다는 전처리 공정을 병행하는 시스템이 효과적이다. 본 연구에서도 막여과 공정으로 한외여과를 선정하고, 전처리 공정으로는 응집·침전을 적용하였다. 막오염이 진행된 후에는 효과적인 세척이 매우 중요하다. 일반적인 세척방법에는 화학적 방법과 물리적 방법이 있다. 전자는 가수분해, 용해도, 확산, 분산 등을 이용한 방법으로서 산과 염기에 의한 화학 반응을 기초로 하고 있으며(Ebrahim, 1994), 물리적 방법은 표면세정, 역세척, 교란, 공기세정 등이 있다(Tragardh, 1989). 실제 공정의 운전에서 화학적인 방법은 물리적 세정이 한계에 도달한 경우에 실시하고, 운전 주기가 수개월 이상 걸리기 때문에 단시간에 주기적으로 실시하는 물리적 세척이 중요하게 작용한다. 가장 일반적인 방법은 처리수를 이용한 역세척과 표면 세정이 있다.

역세척은 막분리 공정의 운전 특성에 영향을 끼치는 중요한 인자이며, 투과 반대 방향으로 투과수를 흐르게 하여 막표면 또는 내부에 부착된 오염물질을 물리적으로 제거하는 공정을 말한다. 이때 화학약품을 첨가하기도 하며, 역세

[†] To whom correspondence should be addressed.
moonjada@hanmail.net

적 효율은 세척 주기, 지속시간 그리고 적용압력 등에 의해 결정된다. 기존 연구 결과들에 의하면 세척주기에 의한 영향이 지속시간이나 세척수 수질에 의한 영향보다 큰 것으로 보고되고 있다(이 등, 2004; Chen et al., 2003). 그렇지만 본 연구와 같이 응집공정을 추가함으로써 전처리에 의해 오염 부하를 크게 감소시킬 수 있기 때문에 일정한 역세척 지속시간을 유지시킬 수 있으며, 지속시간의 증가에 의한 세척 효율에도 변화가 있을 것으로 예상된다. 일반적으로 역세척 주기를 짧게하고 지속시간을 길게하면 막오염 속도를 감소시킬 수 있으나 전체 시스템의 회수율이 감소하여 경제성이 떨어지는 문제가 있다.

역세척을 실시하면 막오염의 특성 변화를 예측할 수 있다. 즉, 일반적으로 막오염은 역세척에 의해 제거 가능한 가역적인 부분과 그렇지 못한 비가역적인 부분으로 구분하여 설명할 수 있다. 이러한 제거 특성을 이용하여 장기 운전 조건에서 막오염 특성 변화를 조사하였다.

본 연구에서는 하천수를 대상으로 0.06 m³/d 용량의 응집·한외여과 공정을 구성하고, 주기적인 역세척을 실시하면서 연속운전을 실시하였다. 이 과정에서 효과적인 역세척 적용방법을 제시하고, 운전 조건과 막오염 특성의 관계를 관찰하여 실증화 시설의 설계와 관리에 필요한 운전인자를 제안하고자 하였다.

2. 원수 수질 및 모형플랜트 구성

2.1. 원수 수질

낙동강 하류의 하천수를 채수하여 실험의 원수로 사용하였다. 실험이 진행되는 기간의 대상 원수의 수질을 Table 1에 제시하였다. 평균 탁도는 10 NTU 이상으로 높았으며, 수중 유기물 양을 대표하는 TOC 농도는 평균 3.4 mg/L로 국내의 다른 하천에 비해 다소 높게 조사되었고, 식물성 플랑크톤의 농도를 나타내는 Chl-a 농도는 최대 172.9 mg/m³로 매우 높게 나타났다(김 등, 2002). 또한 유기물 제거 특성을 나타내는 SUVA 값은 평균 2.0 L/mg·m으로 조사되었다. SUVA 값이 3.0 이하일 경우 유기물의 특성이 친수성에 가깝고, 응집에 의한 제거가 불리한 것으로 알려져 있다. 그러나 높은 탁도와 유기물 농도 그리고 식물성 플랑크톤의 안정적인 제거를 위해 응집 공정이 가장 효과적인 전처리 공정이라고 판단된다.

Table 1. Water quality data during the experimental period

Item	Unit	Concentration
Turbidity	NTU	7.0-16.5(12.3)*
TOC	mg/L	2.9-5.2(3.6)
UV ₂₅₄	cm ⁻¹	0.059-0.089(0.068)
SUVA	L/mg·m	1.8-3.1(2.0)
pH	-	8.1-9.0(8.5)
Alkalinity	mg/L (CaCO ₃)	63-72(68)
Chl-a	mg/m ³	5.9-172.9(97.9)

* () is average value.

2.2. 모형플랜트 구성 및 운전조건

본 연구에 적용된 응집·한외여과 조합공정은 1일 생산수량 0.06 m³ 규모로 제작되었다. 주요 공정은 응집, 분리막, 역세척 그리고 제어 및 계측으로 구성하였다. 각 단위공정의 운전인자는 실험실 규모의 사전 실험을 통해 결정하였다. 본 연구에 적용된 응집·한외여과 조합공정의 개략도를 Fig. 1에 제시하였다.

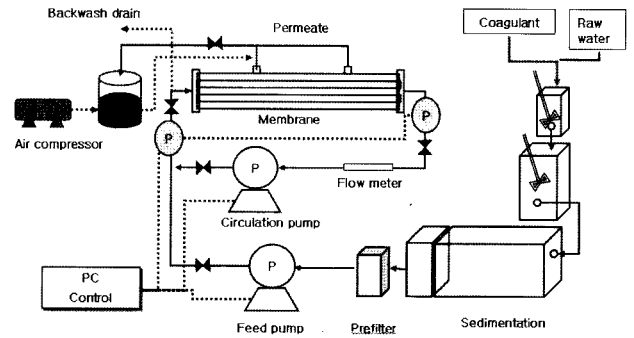


Fig. 1. Schematic diagram of coagulation/Ultrafiltration membrane system.

2.2.1. 응집공정

응집공정은 응집제 주입, 급속교반, 완속교반 및 침전 등을 포함하며, 전체 공정은 연속적인 흐름을 유지하였다. 응집제는 원수 유입부에 직접 주입하여, 급속교반조로 동시에 유입되도록 하였다. 각 단위공정의 운전인자인 응집제 주입량, 응집제 종류, 교반강도와 시간 및 침전시간 등은 실험실 규모의 실험을 통해 결정하였다(문 등, 2004). 실험 결과를 바탕으로 급속교반은 속도경사(G) 230 s⁻¹에서 평균 체류시간 1분, 완속교반은 속도경사(G) 25 s⁻¹에서 평균 체류시간 5분을 적용하였다. 침전지의 체류시간은 평균 60분을 적용시켜 설계하였다.

2.2.2. 분리막 공정

분리막 공정은 전처리 필터, 유입펌프, 순환펌프, 한외여과 그리고 역세척으로 구성하였다. 전처리 필터는 적용된 증공사형막의 내경이 1 mm인 점을 고려하여 유입펌프 전 단계에 평균공극 크기 200 μm의 정밀여과막을 추가하였다. 유입펌프와 순환펌프는 정량펌프를 이용하여 유입수량을 일정하게 유지하는 정량여과 방식을 채택하고, 십자형흐름(Cross flow)이 가능하게 하였다. 투과 플럭스는 145±5 LMH(25°C 기준)로 빠른 막오염을 유도하기 위해 다소 높게 유지시켰고, 선속도는 0.5±0.1 m/s로 적용하였다. 분리막 모듈은 수평상태를 유지하였다. 막오염 현상의 관찰을 용이하게 하기 위해 염소 주입은 실시하지 않았다. 공정에 적용된 한외여과막은 Polysulfone 재질의 제품으로 막공 평균지름이 0.01 μm이고, 내압형의 증공사막이다. 각 모듈은 유효면적 0.0034 m²를 가지며, 10가닥으로 하나의 모듈을 구성하였다.

2.2.3. 역세척 공정

역세척은 공기 압축기를 이용하여 정압운전이 가능하게 하였으며, 평균압력은 150±10 kPa를 적용시키고, 역세척수는 분리막 투과수를 이용하였다. 역세척 주기와 지속시간의 조절이 용이하도록 설계하였다.

2.2.4. 제어 및 계측공정

시스템은 PLC(programmable logic controller)를 이용하여 전공정을 자동적으로 제어하였다. 압력계측은 한외여과막 유입부와 유출부에서의 압력을 디지털 신호로 변환하여 PC에 자동저장되도록 제작하였다. 막오염 특성은 측정된 압력자료를 바탕으로 막간차압(transmembrane pressure, TMP)의 변화로 표현하였다. 이외에 유량, 탁도 등을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

낙동강 하천수를 대상으로 응집·한외여과 조합공정에 의한 정수처리 장치를 구성하였고, 역세척 조건 결정 및 역세척에 의한 막오염 특성을 관찰하였다. 역세척 조건은 지속시간과 주기이며, 세척 방법과 시스템 효율과의 관계를 파악하여 결정하였다. 그리고 역세척에 의한 막저항 값의 변화를 통해 운전시간에 따른 막오염 형태를 파악하여, 효과적인 공정 운영을 위한 방법을 모색하였다.

3.1. 역세척 지속시간 및 주기 결정

역세척 조건은 세척 시간과 주기를 변화시키는 실험을 통해 결정하였다. 응집·침전·막여과 공정을 연속적으로 운전하며, 이 때 응집제는 황산반토 30 mg/L, 플럭스는 145±5 LMH(25°C 기준), 선속도는 0.5±0.1 m/s를 적용하였다. Fig. 2에 지속시간에 따른 막오염 특징 변화를 막간차압으로 나타내었다.

Fig. 2에 적용된 역세척 주기는 30분이며, 역세척 지속시간은 각각 10초, 30초, 60초를 적용하였다. Fig. 2의 결과에서 역세척 지속시간에 따른 막간차압 변화는 뚜렷하게 발견되지 않았다. 특히, 운전 초기의 압력값은 규칙적인 경향

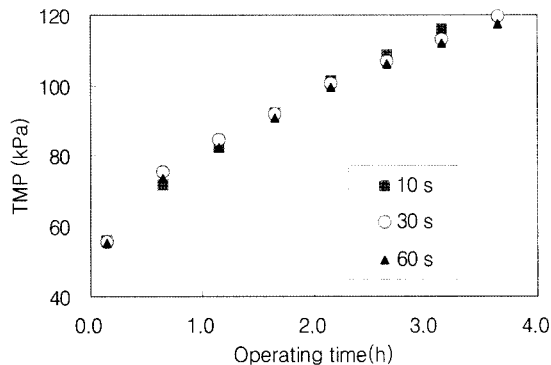


Fig. 2. Variation of transmembrane pressure (TMP) as a function of operating time at different backwash durations.

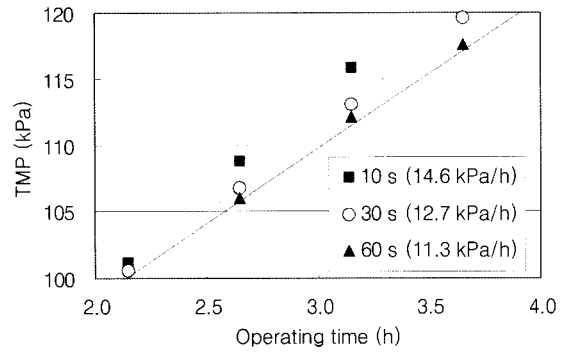


Fig. 3. Variation of transmembrane pressure (TMP) as a function of operating time at different backwash durations after 2 hr.

성을 발견할 수 없었고, 일정시간이 경과한 후에는 미세한 압력 변화가 관찰되었다. 이러한 결과를 확인하기 위해서 압력 변화가 나타나기 시작하는 약 2시간 이후의 측정값을 구체화 시켜서 나타내었다. Fig. 3은 Fig. 2의 결과에서 운전시간 2시간 경과 이후의 결과만을 나타내고 있다.

Fig. 3에 의하면 역세척 지속시간이 막간차압 변화에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 각 시간조건에서 막간차압 증가율은 14.9 kPa/h, 12.7 kPa/h, 11.3 kPa/h였다. 즉, 세척 시간이 길어질수록 연속운전에서 막오염 증가는 감소하는 것으로 조사되었다. 이 결과는 일정시간 이상의 지속시간이 필요하다는 것을 설명하고 있으며, 역세척 지속시간의 경우 운전 초기에는 큰 영향을 미치지 못하지만 일정시간 운전 이후에는 막오염에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이 결과를 역세척 효율로 다시 설명해보고자, Fig. 4에 지속시간에 따른 역세척 효율을 제시하였다.

Fig. 4에 의하면 운전초기 역세척 횟수가 3회까지는 지속시간에 따른 변화를 관찰할 수 없지만, 이후에는 지속시간 10초의 경우 효율이 상대적으로 낮게 유지되고 있는 것을 알 수 있었다. 이 결과에서 운전 초기 조건에서는 지속시간에 따른 세척효율 차이가 나타나지 않았지만 운전이 지속되면서 점차 역세척 효율이 변화하는 것으로 나타났다. 따라서 실증플랜트 규모의 연속운전에서는 역세척 지속시

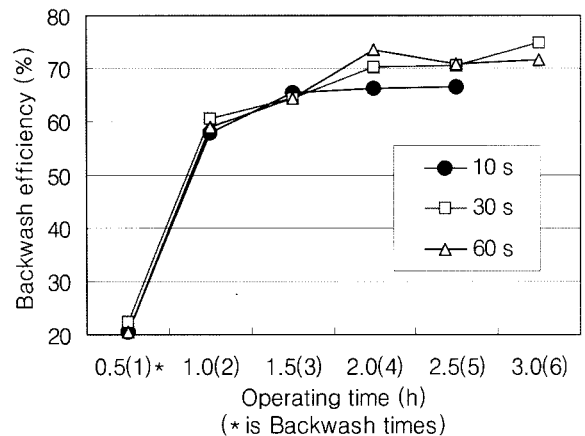


Fig. 4. Backwash efficiency as a function of operating time at different backwash durations.

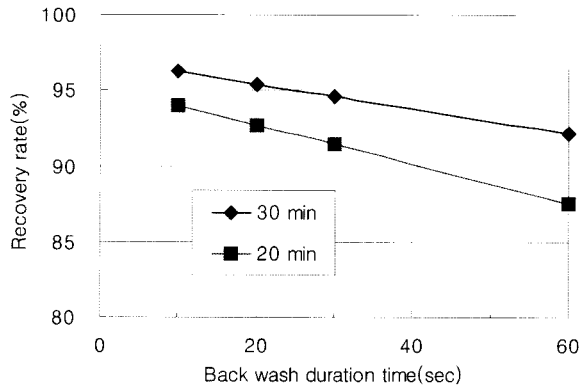


Fig. 5. Recovery rate as a function of backwash duration at different operating cycles.

간이 중요한 운전인자가 될 수 있으며, 본 연구에 적용된 시스템의 경우 지속시간을 30초 이상으로 유지하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 그렇지만 지속시간을 증가시킬 경우 시스템의 전체 효율에 영향을 미치기 때문에 적절한 지속시간의 결정이 필요하다. 지금까지 적용된 지속시간 조건에서의 시스템 효율과 다른 연구에서 중요하게 다루어졌던 역세척 주기에 의한 영향을 종합적으로 평가하여 Fig. 5에 제시하였다.

Fig. 5는 역세척 주기가 20분과 30분일 경우, 역세척 지속시간에 따른 전체 시스템의 회수율 변화를 나타낸 것이다. 여기서, 시스템 회수율은 화학적 세정과 시스템의 초기 필요수량을 포함하지 않고, 유입수량과 최종 생산수량의 비에 의해 조사된 결과이다. Fig. 5에 의하면 전체 회수율은 30분 운전의 경우가 20분의 경우보다 2.2~4.6% 높게 나타났고, 지속시간 증가에 따라 점차 감소하고 있다. 본 연구에 적용된 공정의 시스템에서 95% 이상의 고효율을 목표로 한다면 30분 이상의 세척주기가 필요한 것을 알 수 있었다.

이상에서 역세척 주기와 역세척 지속시간은 전체 시스템의 효율과 역세척 효율을 감안할 경우 역세척 지속시간은 30초로 결정될 수 있으며, 도출된 지속시간 조건에서 95%에 가까운 높은 회수율을 얻기 위해서는 30분 이상의 역세척 주기가 필요한 것으로 판단된다.

3.2. 역세척을 통한 막오염 특성

막오염 특성은 저항값으로 나타낼 수 있으며, 일반적으로 막저항을 세분화하면 전체저항(R_T)은 여과저항(R_f)과 케이크 저항(R_c) 그리고 분리막과 시스템에 의한 자체저항(R_m)으로 표현된다. 식 (1)에 이들의 관계를 나타내었다.

$$R_T = R_f + R_c + R_m \quad (1)$$

식 (1)으로 연속운전의 막저항 변화를 표현하기가 힘들다. 따라서 식 (1)을 연속운전에 적용 가능한 식으로 수정할 수 있다. 1회 역세척 주기를 기준으로 변화된 저항 값을 표현하면 고유의 자체저항(R_m)이 생략되고, 전체 저항의

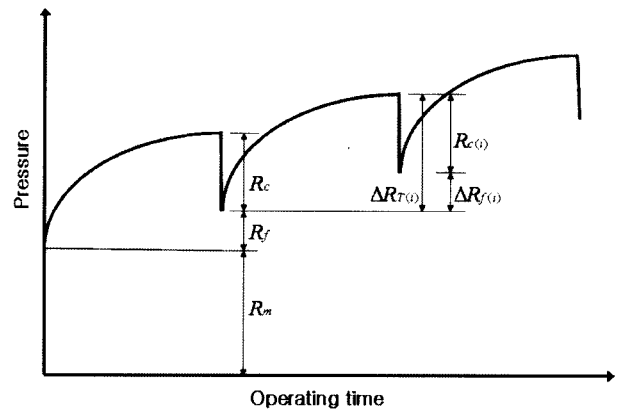


Fig. 6. Schematic representation of resistance in membrane process.

변화량($\Delta R_{T(i)}$)은 식 (2)로 표현될 수 있다. Fig. 6에 식 (1)과 식 (2)의 저항값들을 도식화하여 제시하였다.

$$\Delta R_{T(i)} = \Delta R_{f(i)} + R_{c(i)} \quad (2)$$

식 (2)에서 전체 저항값의 변화량은 여과저항 증가량과 막표면에 형성된 케이크 저항의 합으로 정의된다. 단, 식 (1)과 식 (2)에서 가역적인 성격을 가지는 케이크 저항은 충분한 세척이 이루어졌다는 가정에서 적용이 가능하다. 식 (1)을 바탕으로 각 지속시간에서의 막저항을 Fig. 7에 제시하였다.

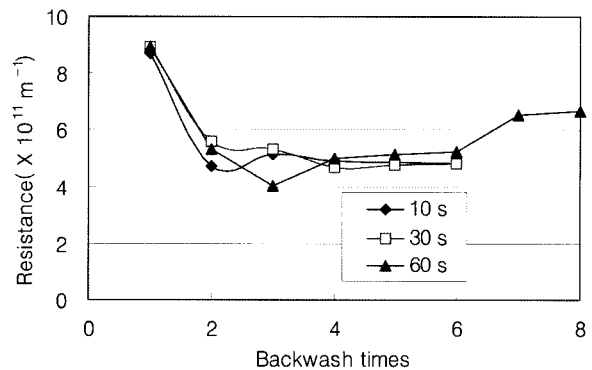


Fig. 7. Variation of total resistance with backwash time at alum coagulation of 30 mg/L.

Fig. 7에 의하면 역세척 진행에 따른 막오염 변화를 관찰한 결과 지속시간에 관계없이 운전 초기에는 빠른 감소를 보이며, 역세척 2~3회 실시 이후에는 일정한 값을 유지하거나 다소 증가하는 것으로 나타났다. 운전 초기의 전체저항은 지속시간에 영향을 받지 않으며, 일정시간이 지난 후부터 지속시간의 영향을 받아 일정한 증가를 보이는 것을 관찰할 수 있었다. 이것은 전체저항 값이 운전시간에 따라 선형적으로 변화하지 않는 것을 의미하며, 전체저항과 세부 저항값과의 관계를 설명하기 위해 식 (2)를 적용하였다. Fig. 8에 지속시간 60초 조건에서의 각 저항 값의 변화를 제시하였다. 이때 지속시간을 60초로 결정한 것은 충분

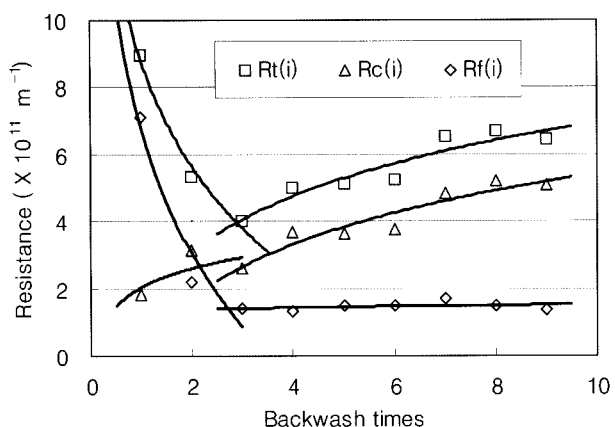


Fig. 8. Fraction of membrane resistance with backwash time at alum coagulation of 30 mg/L.

한 물리적 세척이 이루어진다는 가정에 가장 근접하는 조건이기 때문이다.

Fig. 8에서 전체저항의 주기 변화량($\Delta R_{T(i)}$)은 여과저항 변화량($\Delta R_{f(i)}$)과 케이크저항($R_{c(i)}$)값의 합이다. Fig. 7과 Fig. 8에 의하면 전체저항은 약 3회까지는 급격한 감소를 보이고, 그 이후에는 점차 증가하는 것으로 조사되었다. 이 결과를 저항값이 증가하기 시작하는 부분을 기준으로 전과 후로 구분하고, 이때 각 저항값의 변화 추세를 표현한 결과 전체 저항값은 여과저항과 케이크저항의 변화에 깊은 관계가 있다는 것을 확인할 수 있었다. 운전 초기의 급격한 저항 감소는 여과저항의 감소에 의한 것이며, 케이크저항은 오히려 증가하고 있다. 이때의 막오염은 막내부로 유입되는 오염물의 빠른 흡착에 의해 이루어지게 된다는 것을 예상할 수 있으며, 본 연구조건에서는 1.5시간(역세척 3회) 이후에 낮은 범위의 일정한 값을 나타내었다. 즉, 운전 초기 비가역적인 저항에 의한 막오염 영향은 1.5 시간 내외의 매우 짧은 시간에 끝나고, 이후에는 가역적인 저항이 전체 막오염을 지배하였다.

후자의 경우 전체저항은 케이크저항과 거의 동일한 변화를 나타내고 있었다. 즉, 여과저항은 거의 일정한 값을 유지한 반면, 케이크저항은 일정한 증가를 나타내고 있어, 점차 증가하는 케이크저항에 의해 막오염이 결정되게 된다고 할 수 있다. 이때의 여과저항은 막표면에 형성된 케이크층의 여과효과와 농도차에 의한 농도분극현상에 의해 결정되지만 거의 일정한 값을 유지하는 것으로 나타났다.

이상에서 응집·한외여과 공정의 막오염 특성을 조사한 결과 전체 막오염을 결정하는 것은 운전 초기에는 비가역적인 여과저항이며, 그 시간간격은 매우 짧아서 1.5시간 이내에서 거의 대부분 결정된다. 여과저항의 증가율이 낮아진 이후에는 케이크저항이 지배적인 역할을 하는 것으로 조사되었다. 이 결과를 이용한다면 운전 초기의 비가역적인 여과저항을 감소시킨다면 전체 공정의 연속운전에 있어 큰 효과를 가져 올 것으로 판단된다. 또한 전처리 공정이 운전 조건을 결정하는 기준이 될 수 있을 것이다.

4. 결론

낙동강 하천수를 대상으로 응집·한외여과 조합공정에 의한 정수처리 장치를 구성하고 역세척 조건에 따른 막오염 특성을 관찰하였다.

역세척 주기와 역세척 지속시간은 전체 시스템의 효율과 역세척 효율을 감안할 경우 역세척 지속시간은 30초가 적당한 것으로 나타났으며, 도출된 지속시간을 기준으로 하여 95%에 가까운 높은 회수율을 얻기 위해서는 30분 이상의 역세척 주기가 필요한 것으로 조사되었다.

응집·한외여과 공정의 막오염 특성을 조사한 결과 전체 막오염을 결정하는 것은 운전 초기에는 비가역적인 여과저항이며, 여과저항의 증가율이 낮아진 이후에는 케이크저항이 지배적인 역할을 하는 것으로 확인되었다. 특히, 비가역적 여과저항의 지배시간이 1.5시간 내외로 아주 짧다는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

권은미, 유명진, UF를 이용한 용존성 유기물질 제거시 운전 조건이 파울링에 미치는 영향, *대한환경공학회지*, **22**(7), pp. 1183-1191 (2000).

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

문성용, 이상협, 김승현, 문병현, 응집·한외여과 공정에서 응집조건 결정에 관한 연구, *한국물환경학회지*, **21**(4), pp. 379-384 (2004).

이석현, 권지향, 최양훈, 안규홍, 전처리로 응집공정을 이용한 정밀여과 공정에서 응집 플록 특성에 따른 막오염 연구, *상하수도학회지*, **18**(6), pp. 785-793 (2004).

황덕홍, 김동윤, 낙동강 수계에 대한 정수처리공정에서 응집공정의 DOC 제거특성, *상하수도학회지*, **13**(2), pp. 66-73 (1999).

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

Chen, J. P., Kim, S. L. and Ting, Y. P., Optimization of Membrane Physical and Chemical Cleaning by a Statistically Designed Approach, *Journal of membrane science*, **219**, pp. 27-45 (2003).

Collins, M. R., Amy, G. L. and King, P. H., Removal of Organic Matter in Water Treatment, *ASCE National Conference on Environmental Eng.*, Boston, July 1-3, pp. 850-864 (1985).

Ebrahim, Cleaning and Regeneration of Membranes in Desalination and Wastewater Applications: State-of-the-art, *Desalination*, **96**, pp. 225-238 (1994).

Edzwald, J. K. and Benschoten, J. E., Aluminum Coagulation of Natural Organic Matter, Chemical water of wastewater treatment, Springer-Verlag, Berlin, pp. 341-359 (1990).

Fan, L., Harris, J. L., Roddick, F. A. and Brooker, N. C., Influence of the Characteristics of Natural Organic Matter on the Fouling of Microfiltration Membrane, *Water*

- Research*, **35**(18), pp. 4455-4463 (2001).
- Krasner, S. W. and Amy, G., Jar-test Evaluation of Enhanced Coagulation, *J. AWWA*, **87**(10), pp. 93-107 (1995).
- Lin, C. F., Huang, Y. J., and Hao, O. J., Ultrafiltration Processes for Removing Humic Substances, *Water Research*, **33**(5), pp. 1252-1264 (1999).
- Mallevalle, J., Odendaal, P. E. and Wiesner, M. R., *Water Treatment Membrane Processes*, McGraw-Hill, chapter 4, 16 (1996).
- Mulder, M., *Basic Principles of Membrane Technology*, KLUWER ACAD-EMIC PUBLISHERS, chapter 2~4 (1996).
- Teodosiu, C. C., Kennedy, M. D., Van Straten, H. A. and Schippers, J. C., Evaluation of Secondary Refinery Effluent Treatment Using Ultrafiltration Membrane, *Water Research*, **33**(9), pp. 2172-2180 (1999).
- Tragardh, G., Membrane Cleaning, *Desalination*, **71**(3), pp. 325-335 (1989).