

응집공정이 세라믹 정밀여과막 파울링에 미치는 영향

Effect of coagulation on ceramic microfiltration membrane fouling

황영진¹ · 임재림^{1*} · 최영종¹ · 왕창근²

Young Jin Hwang¹ · Jae Lim Lim^{1*} · Young Jong Choi¹ · Chang Gun Wang²

1 한국수자원공사, 2 충남대학교

(2009년6월17일 접수 ; 2008년8월11일 수정 ; 2009년8월13일 채택)

Abstract

It is well known that coagulation pretreatment can reduce foulants prior to membrane filtration. The purpose of this research was to investigate the effects of coagulation on fouling of ceramic microfiltration membrane(0.1 μm) using pilot plant of 150 m³/day/train capacity. Train A membrane system has pretreatment process of ozonation and coagulation while train B has only coagulation. Two types of coagulation operation were investigated: back mixer(rapid mixing with or without slow mixing) which is a conventional mechanically stirred mixer and an inline static mixer. Ozone dose rate for train A was 1 mg/L and ozone contact time was 12 min. The coagulation dose(PACl 10% as Al₂O₃) rate was changed 20~40 mg/L according to experimental schedule. In this experimental conditions, the coagulation of back mixer type with rapid mixing(GT=72,000) and slow mixing(GT=45,000) was the best effective in reduction of ceramic membrane fouling regardless preozonation. Especially, the effect of inline static mixer was sensitive to change in water quality. Ozonation mainly affected irreversible fouling rather than reversible fouling in accordance with less adsorption of NOM on the membrane surface. Thus, the increase rate of the normalized TMP(trans membrane pressure) at 25°C for train A was relatively lower than that of train B under same coagulation process with same coagulant dosage. The best performance of ceramic membrane appeared in case of combined process with ozonation, therefore this integrated process is able to archive less coagulant dosing and secure a stability of ceramic membrane system.

Key words : preozonation, ceramic microfiltration membrane, fouling, TMP, coagulation

주제어 : 전오존, 세라믹 정밀여과막, 파울링, 차압, 혼화

1. 서론

응집을 막여과 전처리로 사용하는 주요 목적은 응집으로 막여과 저항을 감소시켜 차압증가율을 감소시키고, 처리 수

질을 향상시키기 위한 것이다. 즉, 응집을 정밀여과 공정의 전 단계에 도입 시 플록의 크기가 증가하여 막 표면에 쌓이는 케이크 층의 여과저항을 감소시킬 수 있고, 비가역적 막 오염물질인 용존 유기물을 플록 안에 고정화시킬 수 있어 이로

* Corresponding author Tel:+82-42-870-7523, Fax:+, E-mail: jllim@kwater.or.kr(Lim, J.L.)

인한 막오염을 감소시켜 막투과 속도를 증가시킬 수 있는 것으로 보고되었다(조민호 등, 2001; 권지향 등, 2004; 안용태 등, 2006). 또한 막여과 단독 운전의 경우에 비해서 유기물 제거효율이 향상되어 소독 부산물 (DBPs)의 전구체인 휴믹성분의 제거도 가능하다.

Wiesner 등(1996)은 응집 전처리로 투과 플록스가 향상되는 원인으로 크게 3가지를 제시하였다. 첫째는 장기 운전 시 비가역적 막오염을 일으키는 용존 유기물(DOM)을 응집에 의해 막세공으로의 접근, 투과를 감소시키기 때문이며, 둘째는 크기가 큰 플록이 형성되어 막표면의 케이크 층의 비저항이 감소하기 때문이라고 하였다. 그러나 입자의 크기 외에 케이크의 조밀성이 비저항에 영향을 줄 수 있는데 응집제 혹은 미세 플록이 큰 플록 사이에 형성된 공극을 채우게 되면, 조밀성이 증가해 오히려 비저항이 증가하게 된다. 셋째는 응집에 의하여 입자의 크기가 커지면 역수송 속도가 증가하여 막표면에 쌓이는 케이크층이 감소하기 때문인 것으로 보고하였다.

혼화응집-정밀여과 공정에서는 기존의 혼화응집-침전-모래여과 공정에서와 같이 침강성이 좋은 플록을 얻는 것이 필수조건이 아니라 막 오염을 최소화 시키는 혼화응집공정이 필요하다. 따라서 정밀여과막과 환외여과막을 위한 응집조건을 도출하기 위하여 급속혼화방식과 응집제 종류 등에 대한 다양한 연구가 진행되고 있으며, 이들 연구결과들(Wiesner et al., 1996; Lee et al., 2000; Kim et al., 2001)로부터 응집-정밀여과 공정에서는 Sweep coagulation 조건보다는 전하중화 조건이 막여과 공정의 효율 면에서 우수하다는 것이 보고되었다. 즉, 전하중화 조건에서의 응집은 입자의 표면전위를 "0"에 가깝게 유지하도록 교반을 효율적으로 하여 하전 중화에 사용되는 응집제를 원수 내에 균일하게 분산시키는 것이 매우 중요하다. 따라서 응집-막여과 공정에서는 응집(flocculation) 보다는 급속혼화가 더 중요함을 알 수 있다.

그러나 연구결과들이 적용된 막의 종류와 원수수질에 따라 다양한 특성을 나타내고 있어 Y정수장에 도입될 세라믹 정밀여과막에 적용하기에는 어려움이 있다. 특히 본 연구에 사용된 모노리스형 세라믹 정밀여과막은 채널($\phi=2.5$ mm) 내에서의 독특한 유동특성으로 인하여 채널 내에서 효율적으로 응집이 일어나는 것으로 알려져 있다(米川 均, 2005).

따라서 본 연구에서는 Y정수장 수질조건과 막의 특성에 적합한 혼화응집공정을 선정하기 위하여 응집제 투입량을 변화시키며 관내 혼화(Inline mixer) 및 기계식 혼화(Back mixer) 방식에 의한 혼화응집이 막차압 증가에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 실험방법 및 장치

본 연구는 국내 최초로 도입되는 세라믹 정밀여과막 시스템 설계 및 운영인자 도출을 위하여 Y담 하류에 설치된 모형 플랜트 시설을 활용하였다. 모형플랜트는 크게 두 계열로서, A계열은 전오존-혼화-응집-세라믹 정밀여과막-(후오존)-입상활성탄 공정으로, B계열은 혼화-응집-세라믹 정밀여과막 공정으로 구성되었다. 계열당 처리용량은 150 m³/일로서 다양한 수질조건과 공정실험이 가능하도록 구성되어 실험을 수행하였다.

본 장치에 사용된 세라믹 재질의 막은 공경 0.1 μ m의 정밀여과(MF)막으로 내압식이며 막면적은 모듈당 25 m²이다. 막의 형태는 모노리스형으로 직경 216 mm, 길이 2,244 mm의 케이싱수납형 모듈이며, 두개의 모듈이 한 계열을 이루고 있다.

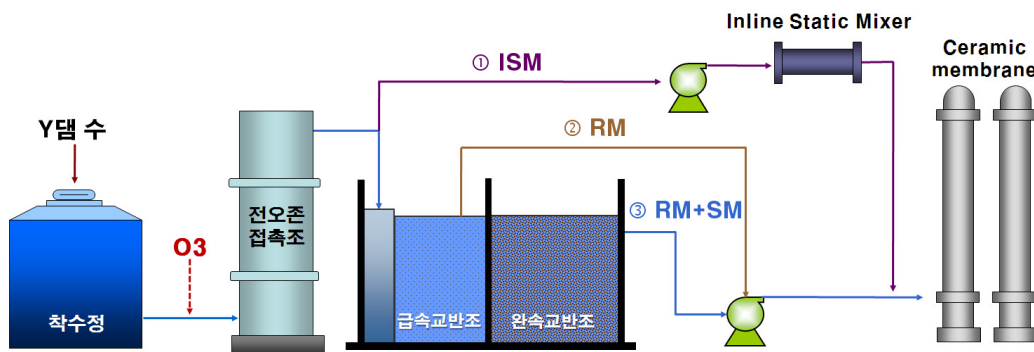
막여과는 전량여과방식으로 운전되며, 평가기간 동안 Flux 2.5 m³/m²·일의 속도로 120분간 여과 후 일반역세를 실시하는 것을 11회/일 수행하고 12번째는 0.3% 황산 또는 200 ppm의 차아염소산나트륨을 번갈아 사용하여 유지세정(CEB, Chemical Enhanced Backwash)을 1회/일을 수행하였다. 역세척은 고압력(5 kgf/cm²)의 역세수를 이용하여 막 표면의 케이크층을 분리한 후 Air Flushing 단계에서 고압 공기(2 kgf/cm²)를 이용하여 분리된 펠렛이 짧은 시간(3초) 안에 외부로 배출되도록 한다. 유지세정은 약액을 막모듈 내에 5분간 침지시키는 것을 제외하고 역세척 방법과 동일하게 운영된다(Table 1).

세라믹 막여과 공정을 위한 최적 응집공정을 선정하기 위하여 관내혼화(Inline mixer)와 기계식 혼화(Back mixer) 방식의 혼화-응집 장치를 이용하여 평가하였다(Fig. 1). Inline static mixer (ISM)는 관내 나선형태의 고정식 장치가 설치되어 난류(와류)를 발생시켜 응집제를 혼화시키는 방식이며, back mixer는 속도경사(G)가 240 sec⁻¹에서 5분간 급속교반(rapid mixer, RM)만 수행하는 것과, G 50 sec⁻¹으로 15분간 완속교반(slow mixer, SM)을 추가로 수행하는 두 가지 방식에 대하여 평가하였다. A계열과 B계열의 상세운전조건은 Table 2와 Table 3에 나타난 바와 같다.

혼화방식별로 약 일주일간 평가를 실시하였으며, 한 장치에 대한 평가가 끝나면 유지세정으로 보정차압을 0.3 kgf/cm² 이하까지 감소시킨 후 다른 장치에 대한 평가를 실시하였다.

Table 1. 일반 역세 및 유지세정 조건

구성 FLUX	여과 공정	세 정 공 정						
		역세정(생산수)					급 수	
2.5 (m ³ /m ² · d)	120분	물리세정						
		15초	15초	3초		15초	60초	
		준비	역세	공기세정		감압	원수	
	정지	50L	800L/모듈		정지	86.8 L/분		
	120분	유지세정						
		15초	15초	300초	15초	3초	15초	60초
준비		역세	침지	역세	공기세정	감압	원수	여과수
정지	50L	50L	50L	800L/모듈	정지	86.8 L/분	86.8 L/분	



- 1계열 : 전오존 → 응집 → 막여과
- 2계열 : 응집 → 막여과

① ISM : Inline Static Mixer ② RM : Rapid Mixer ③ RM+SM : Rapid Mixer+ Slow Mixer

Fig. 1. 세라믹 정밀여과막 모형플랜트 공정도

혼화방식에 따른 평가는 일반역세 직후 수온 25℃에서 보정한 초기차압(TMP, Trans Membrane Pressure)의 상승률(ΔP, kgf/cm²/일)을 구하여 수행하였으며, 평균 차압 상승률은 같은 조건하에서 구한 차압상승률을 평균한 값이다. 아울러 막여과 유속을 보정차압으로 나누어 나타내는 Specific Flux를 구하여 막여과 저항을 살펴보았다.

응집제로는 일본 세라믹 막여과 도입 정수장 및 국내에서도 널리 사용되고 있는 폴리알루미늄클로라이드(PACl, 10% as Al₂O₃)를 사용하였다. 응집공정의 pH는 황산을 이용하여 6.8±0.05로 조절되었다. 응집제 주입량에 따른 차압변화를 살펴보기 위하여 응집제 주입량을 혼화방식별로 20~40 mg/L로 변경 주입하면서 실험을 실시하였다.

Table 2. A계열 혼화방식 평가를 위한 운전조건

Run	평가기간	혼화방식	PACl(mg/l)	Flux(m/d)	비고
Run 1	2/17 ~ 2/20	ISM	30	2.5	
Run 2	2/21 ~ 2/22	ISM	20	2.5	
Run 3	2/23 ~ 2/26	RM	30	2.5	
Run 4	2/26 ~ 3/1	RM	20	2.5	
Run 5	3/2 ~ 3/5	RM-SM	30	2.5	
Run 6	3/5 ~ 3/8	RM-SM	20	2.5	

Table 3. B계열 혼화방식 평가를 위한 운전조건

Run	평가기간	혼화방식	PACI(mg/l)	Flux(m/d)	비고
Run 1	2/17 ~ 2/20	ISM	30	2.5	
Run 2	2/20 ~ 2/21	ISM	20	2.5	
Run 3	2/21 ~ 2/20	ISM	40	2.5	
Run 4	2/23 ~ 2/26	RM	40	2.5	
Run 5	2/26 ~ 3/1	RM	30	2.5	
Run 6	3/2 ~ 3/8	RM-SM	30	2.5	
Run 7	3/5 ~ 3/8	RM-SM	20	2.5	

평가기간 동안 A계열의 전오존 주입농도는 1 mg/L이었으며, B계열은 전오존 공정 없이 직접 Y댐 원수가 공급되었다.

존재하였다. 평가기간동안 원수 내 총 철의 농도는 0.06~0.14 mg/L(평균 0.093 mg/L)의 범위에서 유입되어 큰 변화가 없었음을 알 수 있다.

3. 연구결과

3.1 원수 수질 특성

평가기간 동안 원수의 평균 탁도는 6.18 NTU (3.83~10.2 NTU)으로 큰 변화가 없었으며, 원수의 수온은 기온에 따라 7.0~12.1°C도 변화하여 유입되었다. 원수의 용존유기물 농도(DOC)는 평균 2.37 mg/L이었으며, UV254 흡광도 값을 DOC로 나눈 SUVA(L/mg-m) 값은 평균 1.88로서 평가기간동안 큰 변화가 없었음을 알 수 있다 (Fig. 2).

아울러 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 평가기간 동안 유입원수의 총 망간의 평균농도는 0.046 mg/L (0.037~0.064 mg/L)로 높지 않았으며, 평균적으로 약 20%가 용존성으로

3.2 Inline Static Mixer(ISM) 혼화방식이 막간차압에 미치는 영향

수처리 공정에서 가장 일반적으로 사용되어온 혼화방식은 Back mixer를 이용한 기계식 혼화이다. 그러나 최근 기계식 혼화장치가 필요로 하는 긴 체류시간과 과도한 에너지 소비 및 유지관리비용 문제 등과 같은 단점을 극복하기 위하여 관내 혼화장치(Inline mixer)의 적용성이 증가추세이다. 특히, 앞서 언급되었듯이 혼화-응집-정밀여과 또는 한외여과 공정의 경우 전하중화가 Flocculation 보다 중요하기 때문에 막여과 공정에는 기계식 혼화장치보다 혼화가 순간적으로 균일하게 일어나게 하는 관내 혼화방식이 더 많이 도입되는 추세이다(Kim, et al. 2007; Choi et al., 2004).

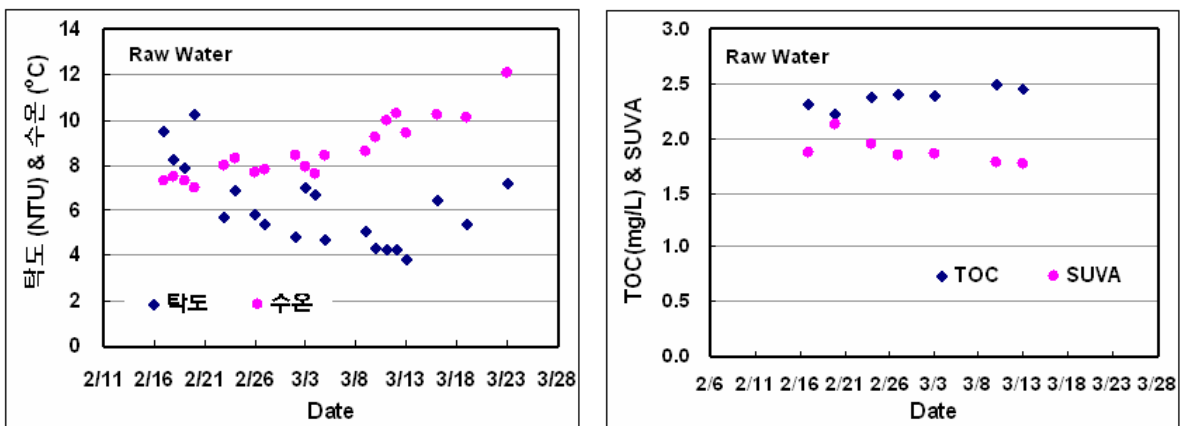


Fig. 2. 혼화방식 평가기간 동안 원수 탁도, 수온, DOC, SUVA 변화

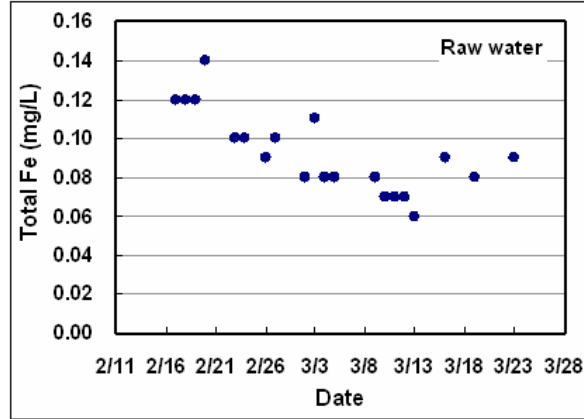
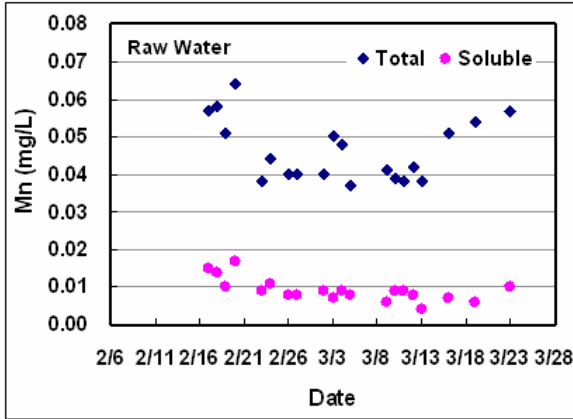


Fig. 3. 혼화방식 평가기간 동안 원수 철·망간 변화

즉, 관내 혼화장치는 전화중화에 의한 불안정화를 일으키는 가수분해 종이 콜로이드와 0.01~0.1 초 이내에 반응이 이루어진다는 사실에 기초를 두고 고안된 것으로서 상대적으로 적은 응집제 주입 시에도 혼화효율이 우수한 것으로 보고되고 있다(Clark et al., 1994, 박대진 등, 2008). 그러나 현재 까지 보고된 결과가 고분자 유기물질로 만든 정밀여과막과 한외여과막을 대상으로 하고 있어 세라믹 정밀여과막 공정에 적용하기에는 어려움이 있다. 따라서 모형플랜트에 설치된 Inline static mixer를 이용하여 막여과 차압변화에 미치는 영향을 살펴보았다.

Fig. 4(a)는 Flux 2.5 m³/m²/일에서 전오존 처리된 원수를 Inline static mixer로 급속교반 시킨 후 막여과를 적용 시 응집제 농도에 따른 보정차압을 보여주고 있다. 응집제 주입량이 30 mg/L 일 때 큰 차압증가 없이 안정적으로 운영되었으나 응집제의 농도를 20 mg/L로 감소시킨 결과 A계열의 차압상승률이 2배 이상 증가하다 안정성을 찾았다. 그러나 여과 2시간 동안 차압상승률은 현저하게 증가하였음을 알 수 있다. 막차압과 마찬가지로 막여과 저항값의 역수인 specific flux도 응집제 주입량 감소에 따라 초기에 크게 감소하였으나 다시 안정을 유지하였다(Fig. 4(b)). 그러나 여과 2시간 동안 차압상승률은 현저하게 증가하였음을 알 수 있다. 즉, 응집제 농도를 감소시키면 상대적으로 증가된 미세플록이 세라믹막 채널 내로 유입되어 막의 공경을 막을 확률이 증가하여 파울링을 유발시킬 수 있다. 아울러 막 표면에 침적 및 성장되는 플록의 크기가 작아 역수송되는 양이 상대적으로 적기 때문에 막표면에 더 많은 케이크 층을 형성하므로써 막 여과 저항을 증가시켜 여과시간 동안 차압이 크게 증가된 것으로 판단된다. 또한 응집제 주입량 감소에 따라 막오염을 일으키는 자연유기물의 제거율이 감소되어

장기적 운전 시 유기물의 흡착 등으로 유발되는 비가역적 막오염이 증가되어 물리세정 후 막의 초기차압이 서서히 증가된 것으로 판단된다.

Fig. 5는 전오존 전처리 없이 Inline static mixer로 혼화만을 수행 후 막여과를 적용시 응집제 농도에 따른 보정차압을 보여주고 있다. B계열의 경우 A계열과는 달리 응집제 주입량이 30 mg/L 일 때 평균 0.032 kgf/cm²/일 속도로 막차압이 계속적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 급속혼화공정만으로는 비가역적 막 오염을 일으키는 유기물 성분이 충분히 제거되지 못하기 때문이다. 즉, 오존처리는 막오염을 유발하는 자연유기물 성분을 제거할 뿐만 아니라 혼화효율 개선효과(Langlais et al., 1991; Rakness, 2005)도 있어 여과시간 동안의 차압증가율을 감소시킨다는 것을 알 수 있다.

특히, 응집제 농도를 20 mg/L로 감소 시 차압상승률이 5배 이상 크게 증가하였다. 이때 Jar test를 수행한 결과 오존처리수의 경우 응집제 주입량이 10 mg/L 이하일 때 플록이 제대로 형성되지 않는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 결과로부터 응집제 주입량이 너무 적을 경우 플록을 형성하지 않은 콜로이드성 물질과 유기물질들에 의해 세라믹 막이 가역적, 비가역적으로 심각하게 오염될 수 있다는 것을 알 수 있다.

차압이 계속적으로 증가할 경우 후속 실험에 영향을 미칠 수 있어 B계열의 응집제 농도를 40 mg/L로 다시 증가시킨 결과 차압상승률이 0.054 kgf/cm²/일로 감소하였다. 이는 응집제 30 mg/L를 주입한 경우보다 높은 수치이나 장기적으로 평가 시 차압증가율이 더 감소할 것으로 예측된다.

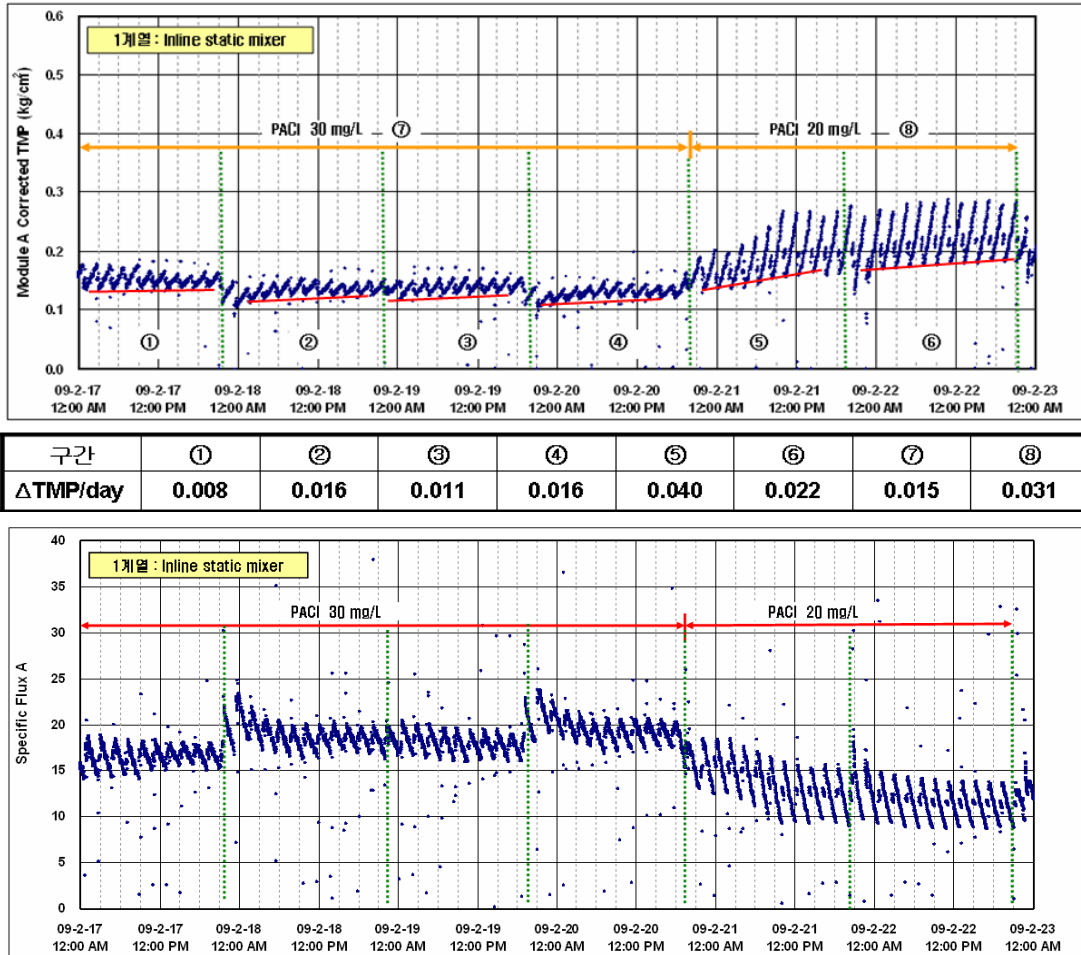


Fig. 4. A계열 Inline static mixer(ISM) 적용 시 차압 변화: (a) 보정차압 (b) Specific flux

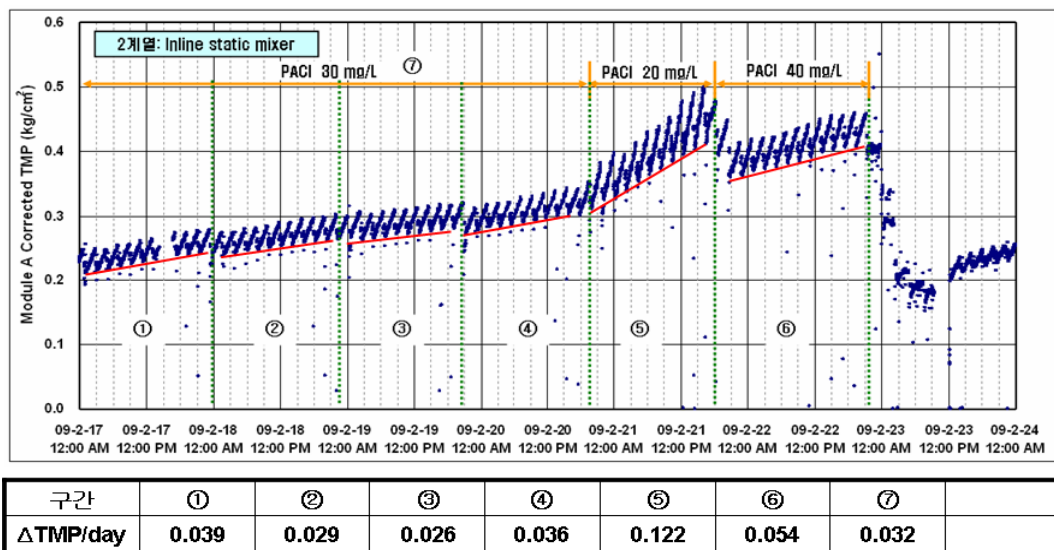


Fig. 5. B계열 Inline static mixer(ISM) 적용 시 차압 변화

3.3 Back Mixer 혼화방식이 막간차압에 미치는 영향

Fig. 6은 $G 240 \text{ sec}^{-1}$ 에서 5분간 급속교반만을 시킨 경우 A계열과 B계열의 차압변화와 상승률을 보여주고 있다. A계열의 경우 응집제 30 mg/L와 20 mg/L 주입 시 차압증가율이 Inline static mixer를 적용 시와 유사한 결과를 나타냈다. 즉, 응집제 주입량이 30 mg/L 일 때에는 큰 차압 증가 없이 안정적으로 운영되었으나 응집제 주입량을 20 mg/L 감소시켰을 때 차압이 다소 증가하는 경향을 나타냈다. B계열의 경우 응집제를 20 mg/L 주입 시 차압이 크게 증가하

여 후속 평가에 영향을 미칠 것으로 판단되어 응집제 주입량을 40 mg/L로 증가시킨 후 차압변화를 살펴본 결과 응집제 농도가 높아짐에 따라 여과 시간동안의 차압상승률이 감소하였음을 알 수 있다(Fig. 7). 아울러 이때 평균 차압상승률이 $0.026 \text{ kgf/cm}^2/\text{일}$ (Fig. 7에서 ①~③의 평균)로서 Inline static mixer의 약 50%인 것으로 나타났다. 즉, Inline static mixer의 결과가 1일 차압증가율에 불과하여 정확한 비교가 될 수 없으나 응집제 주입량이 40 mg/L일 경우 Back mixer 방식으로 급속교반만을 수행한 경우가 Inline static

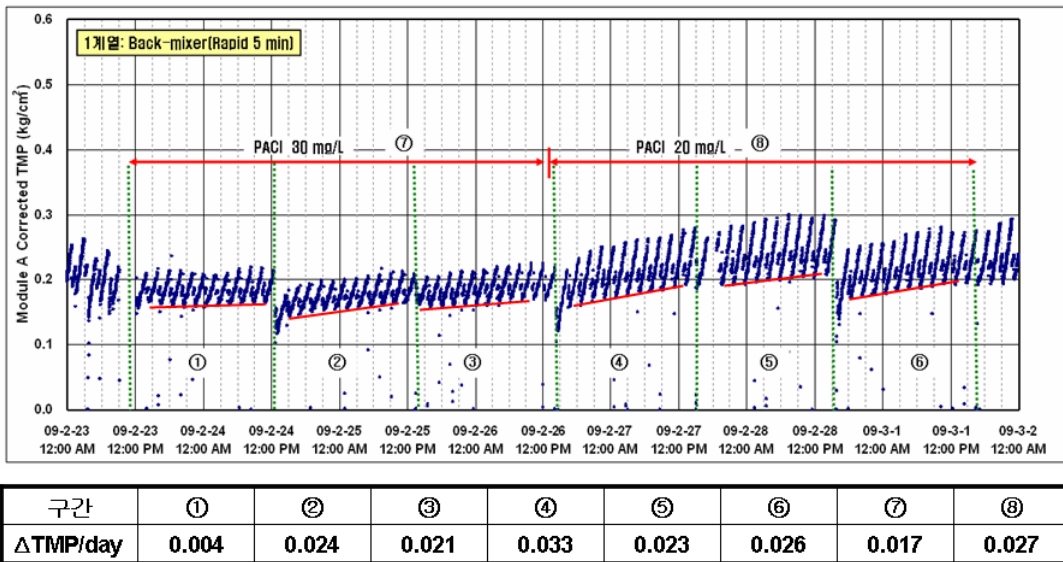


Fig. 6. A계열 Back mixer (rapid mixing only, RM) 적용 시 차압 변화

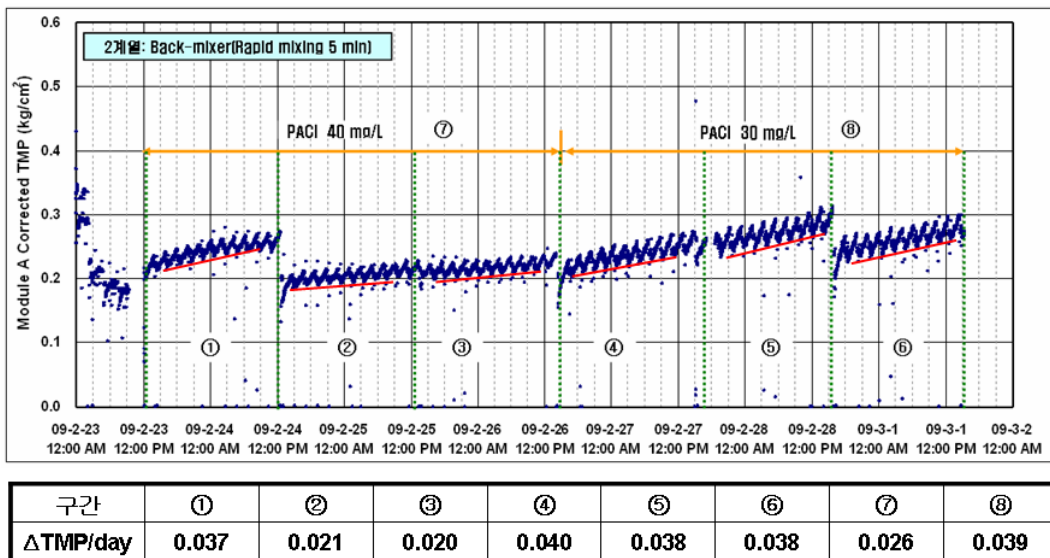


Fig. 7. B계열 Back mixer (rapid mixing only, RM) 적용 시 차압 변화

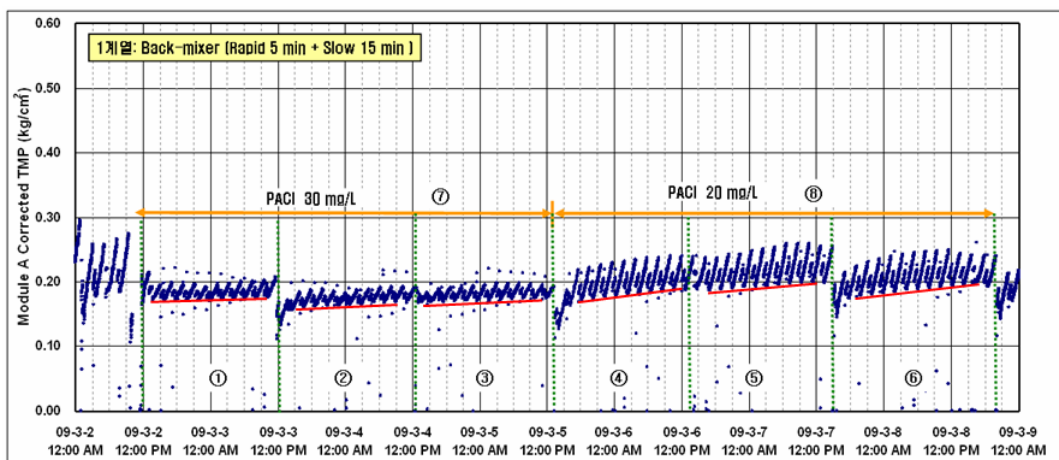
mixer를 사용하는 것보다 차압이 안정적인 것으로 예측된다. 그러나 A계열과 비교할 때 응집제 20 mg/L 주입 시와 비슷한 수치를 보여 전오존 처리 도입 시 응집제 사용량을 크게 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 7에서 볼 수 있듯이 B계열의 응집제 주입량을 다시 30 mg/L로 감소시킨 결과 차압증가율이 다시 약 50% 증가하였고, Inline static mixer의 결과와 비교 시 응집제 주입량이 40 mg/L일 때와 달리 다소 높은 차압증가율을 보였다. 또한 응집제 주입량이 30 mg/L 일 때의 A계열 차압증가율이 B계열의 60%에 불과한 것으로 나타났으며, 이는 앞서 언급된 바와 같이 전오존 처리의 효과임을 알 수 있다.

조민호 등(2001)은 응집-정밀여과 공정에서 급속교반만을 수행한 것보다 완속교반을 수행 시 막 오염이 감소되고, 특히 완속교반 시간이 증가할수록 플록의 크기가 증가하여 막 오염이 감소되었다고 보고하였다. 이는 플록의 크기가 커지면 플록의 밀도는 작아지는 반면에 플록의 공극률이 커지며 막 표면에 플록으로 형성된 케이크층의 비저항 값이 작아지기 때문인 것으로 설명된다. 반면에 유기막을 대상으로 한 많은 연구들에서 급속교반만을 수행한 경우와 완속교반까지 수행한 경우 모두 비슷한 막 오염 저감효과를 발휘하는 것으로 나타났다(권지향 등, 2004; 김수현, 2005). 그러나 이들 연구결과들은 연속운전이 아닌 회분식 운전을 통해서 얻어진 점과 세라믹 정밀여과막을 대상으로 하지 않았다는 점에서 정수장 설계에 반영하기 위한 한계를 가지고 있다. 따라서 세라믹 정밀여과막 모형플랜트를 이용하여 완속교반이 막차압에 미치는 영향을 살펴보았다.

급속교반은 앞서 급속교반만 수행한 경우와 동일한 조건을 적용하였으며, 완속교반은 $G 50 \text{ sec}^{-1}$ 조건하에서 15분간 수행되었다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 급속교반만 시킨 경우보다 A계열 차압증가율이 응집제 농도에 따라 25% 이상 낮아져 매우 안정적으로 운영되었다. 아울러 여과시간 동안의 차압증가율도 급속교반만을 수행한 경우보다 더 낮아졌으나 응집제 농도를 30에서 20 mg/L로 감소시킬 때의 증가폭은 약간 증가하는 것으로 나타났다.

결과적으로 완속교반 과정에서 세라믹 정밀여과막에 가역적, 비가역적으로 오염을 유발시키는 오염원이 감소된 것을 알 수 있다. 즉, 세라믹 막 채널 내에서의 막 표면에 침적된 플록이 유체의 흐름 방향으로 재부상하는 최소 역수송 크기는 막투과 유속이 동일할 때 입자의 크기가 클 때 유리하다. 따라서 완속교반에 의해 상대적으로 조대해진 플록이 세라믹 막 채널 내로 유입되므로서 역수송이 잘 일어나 여과저항을 일으키는 케이크층의 형성이 덜 일어나고, 이때 케이크층도 급속교반만을 수행한 경우보다 조대한 플록에 의해 형성되었기 때문에 조민호 등(2001)의 연구결과처럼 여과비저항이 감소하여 가역적 막오염이 상대적으로 적게 일어났다고 볼 수 있다. 또한 완속교반을 통한 플록 형성과정에서 유기물이 플록으로 흡착될 수 있는 기회가 증가되어 유기물이 막에 흡착되어 일으킬 수 있는 비가역적 막 오염을 감소시킨 것으로 판단된다. 따라서 응집제 사용량을 감소시켜 안정적으로 운영하기 위해서는 완속교반을 추가적으로 수행하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.



구간	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
ΔTMP/day	0.007	0.013	0.008	0.022	0.014	0.023	0.009	0.020

Fig. 8. A계열 Back mixer (rapid+slow mixing, RM+SM) 적용 시 차압

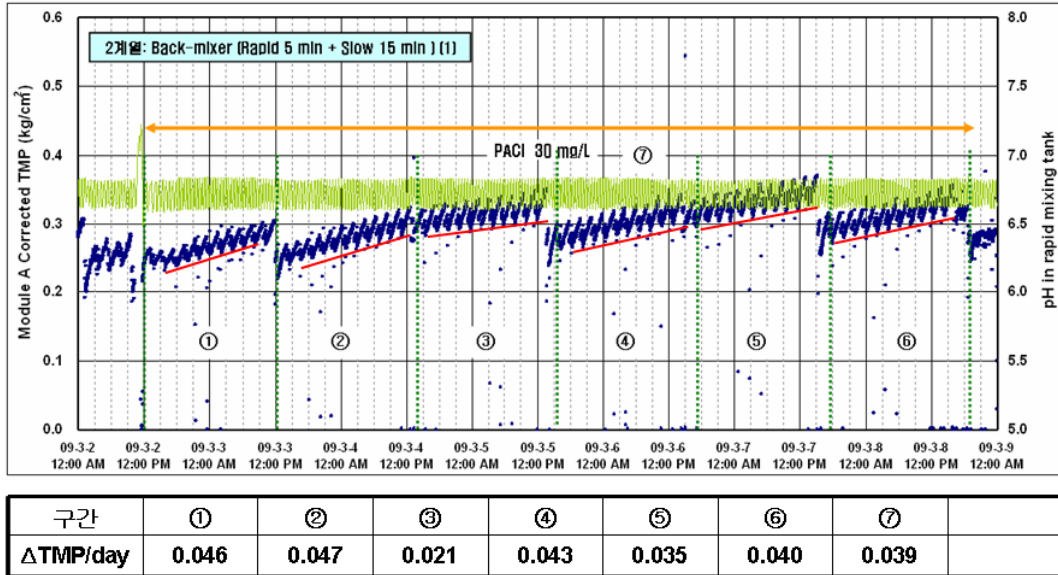


Fig. 9 B계열 Back mixer (rapid+slow mixing, RM+SM) 적용 시 차압

B계열의 경우 응집제가 30 mg/L 주입된 경우에는 급속교반만을 수행한 경우와 완속교반을 추가적으로 수행한 경우 평균 차압증가율과 여과시간 동안의 차압증가율이 거의 유사한 것으로 나타났다(Fig. 9). 그러나 응집제 주입량이 40 mg/L인 경우(결과 미 제시)에는 완속교반을 수행한 경우의 평균 차압증가율이 약 60% 감소된 것으로 나타났으며, 이는 A계열의 응집제 주입량이 30 mg/L 일 때와 유사한 결과이다.

결국 전오존 전처리가 없는 B계열의 경우 응집제 주입량 30 mg/L은 완속교반 과정에서 Sweep floc을 형성하여 추가적으로 유기물을 제거하기에 부족하여 차압증가율이 상승하였다. 응집제 주입량 40 mg/L은 완속교반 과정에서 유기물을 추가적으로 제거하므로 차압증가율을 크게 감소시킨 것으로 판단되며, 오존이 주입되지 않는 B계열의 경우면 기계식 혼화방식으로 급속교반과 완속교반을 모두 수행하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

3.3 혼화조건이 막 오염에 미치는 영향

앞서 응집제 주입량을 변경시키면서 혼화방식이 막의 차압 변화, 즉 막 오염에 미치는 영향을 살펴보았다. 막 오염은 물리적 역세척에 의해 제거될 수 있는 가역적 오염과 약품에 의해 제거될 수 있는 비가역적 오염으로 구분되며, 본 평가에서 여과시간 동안(역세척 사이)의 차압상승은 가역적 오염이라고 볼 수 있으며, 역세척 후 초기차압의 상승은 비가역적 오염에 의한 것이라고 볼 수 있다.

Fig. 10은 혼화방식별로 역세척 사이의 여과시간 동안 평균 차압증가율을 보여주고 있는 것으로서 동일 혼화방식에서 응집제 주입량을 감소시킬 경우 역세간 차압상승률이 증가하였다. 이는 응집제 주입량 감소에 따라 상대적으로 증가된 미세플록에 의한 막 공정의 막힘과 막 표면에서 조밀한 케이크 생성량의 증가가 원인이 될 수 있다.

응집제 주입량 변화에 따라 역세간 차압 상승률이 크게 변한다는 것을 수질변동에 민감하게 반응하는 것으로 간주할 경우 Back mixer가 Inline static mixer에 비해 수질변동에 안정적인 것으로 나타났다. Back mixer를 사용한 경우 동일한 응집제 주입량에서는 급속교반과 완속교반을 모두 수행한 경우가 역세간 차압증가율이 낮았으나 응집제 주입량을 감소시킨 경우 차압증가율의 변화폭은 유사하였다. 이는 동일한 급속교반 방식일 때 응집제 주입량 감소가 가역적 막오염에 미치는 영향은 완속교반 유·무에 무관하다는 것을 알 수 있다. B계열의 경우 응집제 주입량이 30 mg/L일 때 ISM, RM, RM+SM 방식 모두 유사한 역세간 차압증가율을 나타냈으며, 동일한 응집제 주입조건 하에서 A계열에 비해 2배 이상 차압증가율이 큰 것으로 나타났다.

이러한 결과들로부터 동일한 양의 응집제가 주입될 때 완속교반 유·무보다는 오히려 오존주입 유·무가 가역적 막오염에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 즉, 세라믹 정밀여과막 공정에서 오존처리는 가역적, 비가역적 막오염 저감에 크게 기여하는 것으로 나타났다.

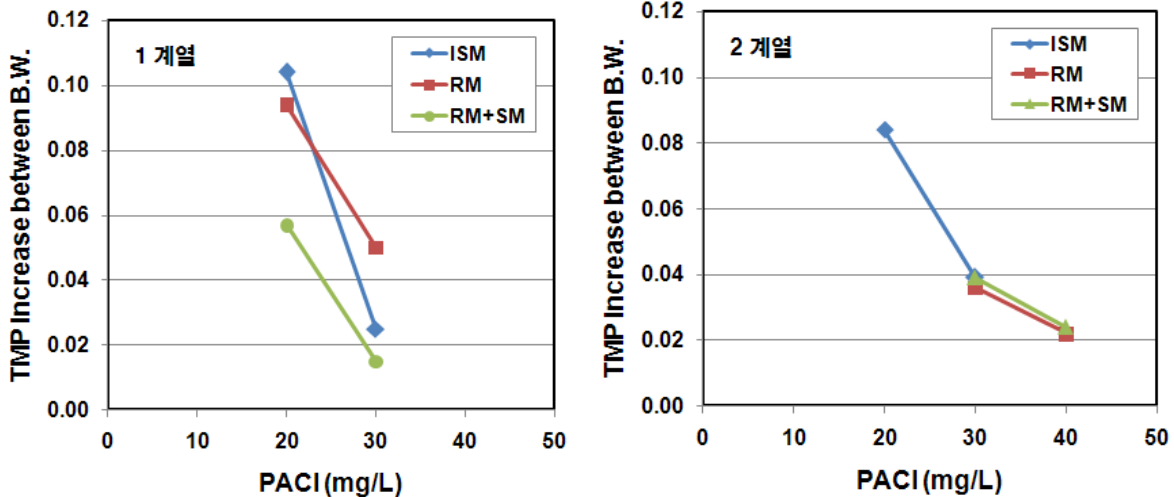


Fig. 10. 혼화방식에 따른 역세간 차압 증가량 (좌: A계열, 우: B계열)

4. 결 론

본 연구에서는 막 파울링 저감을 위한 적정 혼화응집 공정을 선정하기 위하여 관내혼화방식과 기계식 혼화방식에 대한 평가를 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

A계열과는 달리 전오존 처리공정이 없는 B계열의 경우 응집제 주입율이 높은 경우 혼화방식에 영향을 더 많이 받으며, 동일한 양의 응집제가 주입될 때 A계열에 비해 2배 이상의 차압증가율이 높은 것으로 나타나 오존처리가 막의 비가역적 막오염 저감에 크게 기여하고 있음을 알 수 있다. 따라서 막의 안정적인 운영과 효율적 유지관리 측면을 고려할 때 수질에 따라 적절한 양의 오존과 응집제 주입조건 하에서 기계식 혼화방식으로 급속교반과 완속교반을 수행하는 것이 막 파울링 저감에 가장 효과적일 것으로 판단된다. 아울러 혼화응집공정의 단독 적용보다 오존공정과 조합공정이 파울링 저감에 보다 효과가 있으며, 이러한 조합공정을 통해 응집제 주입량을 저감 할 수 있으며, 시스템 안정성을 확보할 수 있다.

참고문헌

- 권지향, 최양훈, 이석현, 안규홍, 자연원수에 대한 응집특성이 정밀여과 막에 미치는 영향, *한국물환경학회·대한상하수도학회 공동추계학술발표회 논문집*, 2004년 11월 3일~4일, 대덕 컨벤션타운, 대전, A-8
- 김수현 (2005) 응집조건이 응집-UF 공정의 막오염에 미치는 영향, 석사학위논문, 부경대학교 환경공학과
- 박대진, 박영오, 박노석, 김성수, 왕창근 (2008) CFD모사 기법을 이용한 관내 혼화장치 내 흐름특성 평가, *상하수도학회지*, **22**(3), pp. 351-358
- 안용태, 이장현, 신항식, 노경언, 이체영, 응집을 통한 막 분리 정수처리 공정의 효율 향상 및 막 오염 저감에 관한 연구, *한국물환경학회·대한상하수도학회 공동추계학술발표회 논문집*, 2006년 4월 21일 방송통신대학교, 인천, E-5
- 조민호, 이정학, 응집-정밀여과 공정에서 교반조건이 막 분리에 미치는 영향, *한국물환경학회·대한상하수도학회 공동추계학술발표회 논문집*, 2001년 10월 19일, 한국수자원공사 연구원, 대전, D-1
- 米川 均 (2005) 淨水處理用モノリス型セラミック膜システムのろ過特性に関する研究, 박사학위논문, 일본 홋카이도대학교
- AWWA (2005) Microfiltration and ultrafiltration membrane for drinking water (M53), pp. 1~6
- Choi, K.Y. and Dempsy, B.A. (2004) In-line coagulation with low-pressure membrane filtration, *Wat. Res.*, **38**, pp. 4271~4281
- Clark M.M., Srivastava, J.S., Lang R.R., Trussell L.J., McCollum, D., Bailey, J.D. and Christie, G.S. (1994) Selection and design of mixing process for coagulation, AWWARF, Denver, USA
- Kaiya, Y., Itoch, Y., Fujita, K., and Takizawa, S. (1996) Study on fouling materials in the membrane treatment process for potable water, *Desalination*, **106**, pp. 71~77
- Kim, J.S., Akeprathumchai, S., Wickramasinghe, S.R. (2001) Flocculation to enhance microfiltration, *J.*

- Membr. Sci.*, **182**, pp. 161~172
12. Kim, S. Park, N.S., Kim, T. and Park, H. (2007) Reaggregation of flocs in coagulation cross-flow microfiltration, *J. Environ. Eng.*, 133(5), pp. 507~514
 13. Langlais, B., Reckhow, D.A., Brink, D.R. (Eds.), 1991. Ozonation in Water Treatment. Applications and Engineering. Cooperative Research Report, AWWRF and Compagnie Generale des Eaux. Lewis Publishers
 14. Lee, J.D., Lee, S.H., Jo, M.H., Park, P.K., Lee, H., Kwak, J.W. (2000) Effect of coagulation conditions on membrane filtration characteristics in coagulation-microfiltration process for water treatment, *Environ. Sci. Technol.*, **34**, pp. 3780~3788
 15. Rakness, K. L. (2005) Ozone in drinking water treatment: process design, operation, and optimization, American Water Works Association
 16. Wiesner, M.R. Clark, M.M, and Mallevialle, J (1989) Membrane filtration of coagulated suspension, *J. Environ. Eng.*, 115(1), pp. 20~40