

정수처리용 응집 · 한외여과 혼성공정에서 응집 효과에 관한 연구

문성용[†] · 이상협 · 김승현* · 윤조희**

한국과학기술연구원 수질환경및복원연구센터 · *경남대학교 토목공학과 · **경남대학교 에너지화학공학과

(2005년 5월 4일 접수, 2005년 8월 11일 채택)

Effect of Coagulation in Coagulation/Ultrafiltration Hybrid System in Water Treatment Process

Seong-Yong Moon[†] · Sang-Hyub Lee · Seung-Hyun Kim* · Cho-Hee Yoon**

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

*Department of Civil Engineering, Kyungnam University · **Energy & Chemical Engineering, Kyungnam University

ABSTRACT : Coagulation influence was evaluated as the pretreatment for ultrafiltration. Coagulation was expected to improve water quality, reduce membrane fouling and increase backwash effect. Continuous operation of UF was employed in order to investigate the influence of coagulation. Alum, PACS and Ferric chloride were used as coagulants separately. From the result of the research, coagulation can improve the treated water quality greatly. Organic removal was increased more than turbidity and showed an improvement of 30.6% at most. All three coagulants presented conspicuous reduction of membrane fouling, among which PACS was the most effective with long term run. Backwash effect differed with different coagulants while Ferric chloride turned out to be the most effective one. The optimum dosage of coagulant resulted in the highest backwash efficiency.

Key Words : Membrane, Coagulation, Ultrafiltration, Water Treatment

요약 : 한외여과 공정의 전처리 공정으로 응집을 적용하였으며, 막여과 공정에 미치는 응집공정의 영향을 평가하였다. 예상되는 응집 효과는 수질 개선, 막오염 저감 및 역세척 효율 향상 등이며, 응집 · 한외여과 막여과 공정을 연속운전을 통해 조사하였다. 이때 적용된 응집제는 황산반토, PACS, 염화제2철이다. 연구 결과 응집을 통해 처리수 수질을 크게 향상 시킬 수 있었으며, 현탁물질 보다는 유기물을 제거율에 높은 효과가 있었고, 최대 30.6%의 제거율 향상을 나타내었다. 막오염 저감에 있어서는 세 종류의 응집제 모두 뚜렷한 효과를 관찰할 수 있었으며, 특히 장기간에 있어서 PACS가 가장 효과적이었다. 역세척 효율은 철염응집제가 가장 효과적이었다. 적정 응집제 투입량에 가까울수록 효율이 향상되는 것으로 나타났다.

주제어 : 막여과, 응집, 한외여과, 정수처리

1. 서 론

분리막을 이용한 정수처리 막여과 공정은 국내 · 외에서 가장 주목하고 있는 새로운 처리 공정이다. 막여과 공정은 적용되는 막의 특성에 따라 다공성의 정밀여과(microfiltration, MF)와 한외여과(ultrafiltration, UF) 그리고 비다공성의 나노여과(nanofiltration, NF)와 역삼투여과(reverse osmosis filtration, RO) 방법이 있으며, 최근에는 운전 효율과 경제성이 개선된 다공성막의 사용이 증가하고 있는 추세이다.¹⁾ 다공성막의 정밀여과와 한외여과는 수십 μm 이하의 미세한 공극을 가지고 있다.²⁾ 정수처리에서 이들의 적용을 통해 입자성 물질과 미생물은 대부분 제거가 가능하지만 공극보다 작은 미세입자나 용해성 물질에 대한 제거율은 충분하지 못하다. 따라서 효과적인 전처리 공정을 통해 제거율과 운전효율을 높이는 연구가 꾸준히 진행되고 있다.³⁻⁹⁾ 전처리 공정으로

가장 많이 적용되고 있는 것은 응집이다. 응집은 기존 공정의 연계성이 높고 안정적인 제거율이 장점이다. 또한 응집공정은 막여과 공정 운전의 가장 큰 문제점이라고 할 수 있는 막오염과 세척에도 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.⁵⁾ 이것은 막오염의 주요 원인물질인 유기물 제거로 인해 흡착에 의한 내부 막오염의 저감과 막표면에 형성된 케이크층의 특성 변화로 물리적 세정 효과가 커지기 때문이다. Carroll 등⁹⁾의 연구결과에 의하면 황산반토를 이용한 정밀여과 실험 결과 응집제 투입으로 NOM(natural organic matter)의 제거가 가능하고, NOM의 제거로 인해 막오염이 감소하며, Guigui 등¹⁰⁾은 연속 응집 · 한외여과 시스템의 운전에서 철염계 응집제를 5 mg/L 이상 투입하여 충분한 막오염 저감 효과를 나타낼 수 있다고 발표하였다. 또한 정 등¹¹⁾은 낙동강 원수를 이용한 연구에서 평관형 한외여과막 공정에서 응집공정의 적용을 통해 한외여과 단독공정에 비해 막투과 유속을 크게 증가시켰다고 발표하였다. 이상의 연구결과들은 응집공정을 한외여과 전처리 공정으로 적용할 경우 막오염 감소에 효과적이라는 것을 설명하고 있다.

[†]Corresponding author
E-mail: moonjada@hanmail.net
Tel: 02-958-5846

Fax: 02-958-5839

전처리 공정으로서의 응집 효과는 분리막에 유입되는 오염물 부하 감소, 미세입자 감소 및 입자 평균 크기 증가 등이며, 이로 인해 막오염 저감을 기대할 수 있다. 또한 응집공정에 의한 높은 오염물 제거율로 처리수 수질 향상이 예상된다. 본 연구에서는 예상되는 응집 효과를 근거로 하여 세 종류의 응집제를 이용해서 막오염에 미치는 응집 효과를 구체적으로 조사하였다. 또한, 응집 전처리에 의한 막여과수 수질 개선 효과 및 역세척 효율을 종합적으로 평가하였다. 특히, 오염물 제거율, 막오염 저감 효과와 역세척 특성을 비교하여 막여과 공정에 미치는 응집제별 특성을 제시하였다.

2. 실험 방법 및 시스템

2.1. 원수 수질

본 연구는 우리나라 대표 하천인 낙동강의 하천수를 원수로 사용하였으며, 실측한 결과를 근거로 하여, Table 1에 대상 수원의 수질을 제시하였다. Table 1에서 pH 값이 7.6~9.5의 범위로 높고, 평균 탁도의 경우도 10 NTU 이상으로 높았다. 그리고 유기물 농도를 나타내는 TOC는 평균 3.4 mg/L로 국내의 다른 하천에 비해 다소 높게 조사되었다. 또한 유기물 특성을 나타내는 SUVA(specific UV absorbance) 값은 3 이하로 친수성에 가깝고,¹²⁾ 유기물 특성 조사를 위한 NOM 분석 결과에서도 소수성 보다는 친수성의 구성 비율이 높게 조사되었다.

2.2. 모형플랜트 구성 및 운전조건

본 연구에 적용된 응집·한외여과 조합공정은 낙동강 하류 지점의 하천수를 수원으로 하고 1일 생산수량 0.06 m³ 규모로 제작되었다. 플랜트의 주요 공정은 응집, 침전, 막여과, 제어 및 계측 공정으로 이루어진다. 각 단위 공정의 운전인자인 교반강도, 교반시간 및 침전지 용량 등은 실험실 규모의 사전 실험을 통해 결정되어 졌다.¹³⁾ 본 연구에 적용된 응집·한외여과 조합공정의 개략도를 Fig. 1에 제시하였다.

Table 1. Water quality data measured during the study period

	Unit	Concentration
Turbidity	NTU	8.8~14.3(12.1)*
pH		7.6~9.5(8.4)
TOC	mg/L	2.7~4.1(3.4)
UV ₂₅₄	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.

Fig. 1의 공정에서 응집제와 원수가 급속교반 전단에서 직접 주입되고, 급속교반과 완속교반 및 침전을 거친 상등수는 임시 저장조에 저장된다. 이 후 유입펌프에 의해 한외여과 전단부로 이송되고, 막여과 공정을 거치면서 투과수와 농축수가 분리된다. 투과수는 저장조를 거친 뒤 방류되고, 농축수는 다시 순환펌프에 의해 한외여과 전단부로 유입된다. 역세척은 처리수에 공기 압축기로 압력을 가하여 투과의 반대 방향으로 처리수가 흐르게 하였다. 공정의 운전 특성은 막여과 공정 양단에 있는 압력측정기에 의해 측정된다.

1) 응집공정

응집공정은 응집제 주입, 급속교반, 완속교반 및 침전공정으로 구성되며, 수리학적 특성에 의해 연속운전이 가능하도록 설계하였다. 단위공정의 운전인자인 교반강도와 체류시간 및 침전시간 등은 실험실 규모의 실험을 통해 결정되었으며, 급속교반은 속도경사 값(G) 230 s⁻¹에서 평균 체류시간 1분, 완속교반은 속도경사 값(G) 30 s⁻¹에서 평균 체류시간 5분을 적용하였다. 응집약품은 황산반토(aluminum sulfate, alum), 폴리수산화염화규산알루미늄(poly aluminum hydroxide chloride silica, PACS), 염화제2철(FeCl₃ · 6H₂O, ferric chloride)의 세 종류를 사용하였고, 황산반토와 PACS는 실제 정수

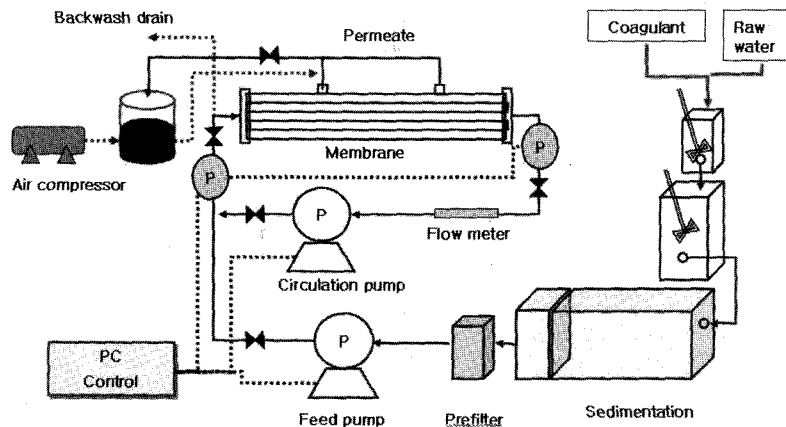


Fig. 1. Schematic diagram of coagulation/UF membrane system.

장에서 현재 사용되고 있는 응집제이며, 염화제2철은 실험용 제품으로 유기물 제거율이 높고 막오염 저감에 효과적인 것으로 알려져 있다.¹⁰⁾ 응집제 주입 방법은 일정비로 희석한 뒤, 급속교반조 입구에 직접 주입하고, 원수와 희석된 응집제의 부피비는 100:1을 적용하였다. 침전지는 체류시간 60분, 폭과 길이의 비를 1:3.5로 설계하고, 유출부는 원형 웨어를 적용하였다.

2) 막여과 공정

막여과 공정은 전처리필터, 유입펌프, 순환펌프, 한외여과막 그리고 역세척으로 구성하였다. 전처리필터는 본 연구에 적용된 중공사형 한외여과막의 내경이 1 mm인 점을 고려하여 유입펌프 전단계에 평균공극 200 μm 크기의 관형여과 장치를 적용하였다. 유입펌프와 순환펌프는 정량펌프를 적용하여 유입수량을 일정하게 유지하는 정량여과 방식을 채택하고, 십자형흐름(cross flow)이 가능하게 하였다. 투과 플럭스(flux)는 150±10 LMH로 빠른 막오염을 유도하기 위해 다소 높게 유지하였고, 선속도는 0.5±0.1 m/s를 적용하였다. 분리막 모듈은 수평상태로 운전을 하였다.

역세척은 공기압축기를 이용한 정압 세척법으로 정상운전 30분 후, 32초(역세척 30초+표면세척 2초)간 실시하고, 역세척수는 처리수를 직접 이용하였으며, 운전압력은 150±5 kPa을 적용하였다. 막오염 현상의 관찰을 용이하게 하기 위해 공정에 염소는 주입하지 않았다. 공정에 적용된 한외여과막은 Polysulfone 재질의 제품으로, 막공 평균지름이 0.01 μm이고, 내압형의 중공사막이다. 유효면적은 0.0034 m²의 크기이며, 10가닥으로 하나의 모듈을 구성하였다.

3) 제어 및 계측공정

시스템 제어는 PLC(programmable logic controller)를 이용하여 전공정을 자동화 하였다. 압력계측은 한외여과막 유입부와 유출부에서의 압력을 디지털 신호로 변환하여 PC에 자동저장 되도록 제작하였다. 막오염 특성은 측정된 압력자료를 바탕으로 막간차압(transmembrane pressure, TMP)의 변화로 표현하였다.

3. 결과 및 고찰

막오염에 미치는 응집 효과를 구체적으로 파악하기 위해 다양한 응집제와 주입량을 적용하였다. 모형 플랜트 실험에 사용된 응집제는 황산반토, PACS, 염화제2철이며, 주입량은 황산반토의 경우 1, 10, 125 mg/L(황산반토), PACS의 경우 1, 10, 200 mg/L(PACS) 그리고 염화제2철의 경우 1, 10, 60 mg/L(염화제2철)를 적용하였다. 주입량 1 mg/L는 미량주입에 따른 효과를 관찰하기 위해서이며, 10 mg/L는 최적주입점 이전에서의 응집 효과를 관찰하기 위해 선정하였다. 그리고 최대주입량은 유기물 제거에 효과적인 pH를 기준으로 하여 결정하였다. 황산반토와 PACS의 경우 유기물 제거율이 높은 pH 범위인 6.0~6.5를 기준으로 125 mg/L

(pH 6.2)와 200 mg/L(pH 6.0)를 선정하였고, 염화제2철의 경우는 색도 발생으로 인하여 최대주입량을 60 mg/L(pH 6.8)로 다소 낮은 주입량을 적용하였다. 응집제를 주입하지 않는 조건은 약품주입 없이 일정시간 응집지와 침전지를 거친 뒤, 막여과 공정에 유입시켰다. 이처럼 응집제의 종류와 주입량을 다양화 하여, 막여과 공정에 미치는 응집의 효과를 폭 넓게 관찰하였으며, 예상되고 있는 수질개선과 막오염저감 및 역세척 효율 향상 등에 관한 결과를 검토하였다.

3.1. 수질개선 효과

막분리 공정의 가장 큰 장점은 안정적인 처리수질이라고 할 수 있다. 그렇지만 정밀여과나 한외여과 단독공정으로는 유기물 제거율이 다소 낮다는 문제점을 가지고 있다. 따라서 처리수 수질 향상을 위해 응집공정을 전처리로 적용하였으며, 전처리 공정에 의한 처리수의 수질 변화를 관찰하였다. Table 2에 탁도와 UV₂₅₄ 측정 결과를 유입수와 처리수로 구분하여 제시하였다.

Table 2에 의하면 탁도 제거율은 응집제 종류와 주입량에 관계없이 전체 공정을 거치면서 98.6% 이상의 높은 제거율을 나타내었다. 전체 제거율 중 응집·침전 공정에 의해서 12.5~70.4%가 제거 되고, 한외여과 공정에서는 유입농도에 관계없이 0.1 NTU 이하의 안정적인 제거율을 나타내었다. 주입량별 제거율을 살펴보면 미량 주입(1 mg/L) 조건에서 응집·침전공정에 의해 15% 이하로 나타나, 전체 제거율의 80% 이상이 막여과 공정에 의존하는 것으로 나타났다. 따라서 미량 주입 조건에서는 막여과 공정에 많은 오염물이 유입되어 막오염의 원인일 될 것으로 판단된다. 반면, 염화제2철 60 mg/L 주입 조건에서는 전처리 과정에서 70.4%의 제거율을 나타내어 막여과 공정에 유입되는 농도가 아주 낮게 나타났다. 이상에서 응집·막여과 공정에 의한 탁도 제거 특성은 응집제 주입량에 관계없이 일정한 처리수질을 나타내며, 응집제 종류에 관계없이 비슷한 제거 특성을 보이는 것으로 조사되었다.

Table 2. Water quality improvement by coagulation/UF hybrid system

Coagulant & dosage mg/L	after Sedimentation		after UF		
	Turbidity NTU	UV ₂₅₄ cm ⁻¹	Turbidity NTU	UV ₂₅₄ cm ⁻¹	
Without coagulation	4.6	0.053	0.07	0.044	
Alum	1	4.2	0.057	0.05	0.043
	10	-	0.051	-	0.043
	125	-	0.033	-	0.029
PACS	1	4.1	0.057	0.04	0.043
	10	2.5	0.043	0.06	0.039
	200	-	0.034	-	0.032
Ferric chloride	1	4.0	0.056	0.04	0.043
	10	2.7	0.0481	0.06	0.039
	60	1.6	0.029	0.04	0.028

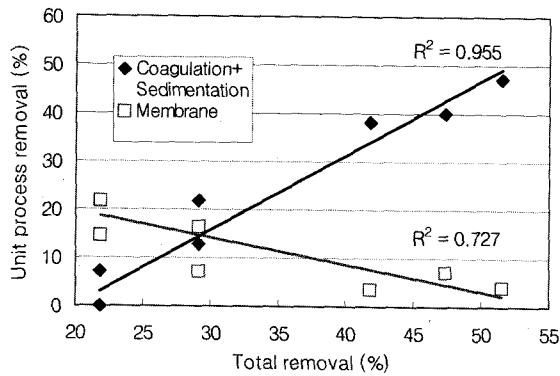


Fig. 2. Relation between the total removal and the unit process removal.

유기물(UV₂₅₄) 제거 특성은 응집제 종류와 주입량에 따라 다르게 나타났다. 특히, 주입량에 따른 전체 제거율 차이가 뚜렷하게 나타났는데, 주입량 1 mg/L 조건에서는 거의 제거가 이루어지지 않은 반면, 10 mg/L에서는 11.1~31.7%, 최대주입량 조건에서는 41.8~51.5%로 조사되었다. 이 결과는 응집·한외여과 공정에서 유기물 제거율은 응집제 주입량과 높은 상관성을 가지는 것을 의미한다. Fig. 2에 전체 제거율과 단위 공정의 제거율 관계를 제시하였다.

Fig. 2에 전체제거율과 응집·침전공정의 제거율이 높은 상관성을 가지며, 비례관계에 있다는 것을 잘 설명하고 있다. 또한 전체제거율과 막여과 공정의 제거율은 오히려 반비례의 경향을 나타내고 있다. 이것은 응집·한외여과 조합공정에서 유기물 제거는 응집제 종류와 주입량에 따라 크게 다르며, 제거율은 막여과 공정보다는 응집공정에 크게 의존한다는 것을 증명하고 있다.

또한 Table 2의 결과에서 막여과 공정에 의한 제거율이 응집제 주입량 증가에 의해 감소하고 있는 것을 보이고 있다. 즉, 응집조건이 최적조건에 가까울수록 막여과 공정에서 유기물 제거율은 감소한다. 이결과는 응집공정을 거치면서 제거된 유기물의 대부분이 막분리 공정에서 제거 가능한 유기물이며, 결론적으로 응집과 막여과에서 제거되는 유기물의 성질이 유사하다는 것을 설명하고 있다. 응집공정에서 제거되는 유기물 특성은 친수성보다는 소수성이 많은 부분을 차지한다는 것은 이미 알려진 사실이며, 막여과 공정의 유기물 제거 특성에 관한 연구결과인 강 등¹⁰⁾에 의하면 유기물 중에서 분자량이 상대적으로 크고, 소수성의 특징을 가지는 휴믹산이 막표면에 빠르게 흡착되는 것으로 보고하였다. 이처럼 막여과 공정에서 분리되는 유기물 특징과 응집·침전공정에서 제거될 수 있는 유기물은 소수성에 가까우며, 응집에 의해 소수성 유기물이 제거되기 때문에 막여과 공정에서 분리 가능한 유기물은 감소하게 된다. 즉, 막여과 공정에 유입되는 유기물의 농도가 낮고, 흡착 가능한 부분이 적기 때문에 막오염이 감소하는 효과가 나타나 는 것이다.

이상에서 응집공정에 의한 처리수 수질개선 효과를 조사한 결과 탁도의 경우 응집제 종류와 주입량에 관계없이 일

정한 제거가 관찰되었고, 유기물의 경우 응집이 전체 제거율에 직접적인 영향을 미치며, 막여과 단독공정에 비해 제거율을 크게 향상시키는 것으로 조사되었다. 또한 응집 주입량 증가에 따라 막여과 공정의 제거율이 감소하는 것으로 나타났는데, 이것은 응집과 막여과에서 제거되는 유기물의 성질이 유사하기 때문으로 판단된다. 그리고 응집제 종류별 수질 개선 효과는 비슷한 형태를 나타내었다.

3.2. 막오염 저감 효과

낙동강 하천수를 대상으로 세 종류의 응집제를 이용한 응집·한외여과 혼성공정을 운전 하였다.최대 적용 압력은 막간차압을 기준으로 최대 110±10 kPa까지이며, 투과수량은 막오염 관찰을 목적으로 일반적인 투과수량보다 높은 150±10 LMH를 적용함으로써 단시간에 막간차압 증가가 발생하도록 하였다. 역세척은 처리수를 이용하여 150 kPa 압력에서 30분 주기로 30초간 실시하고, 추가로 표면세정을 2초간 실시하였다. 온도의 영향은 Pohland가 제안한 식을 적용하여 보정하였다.^{14,15)} Fig. 3에 세 종류의 응집제를 이용한 응집·한외여과 조합공정의 막간차압 변화를 제시하였다.

Fig. 3에 의하면 세 종류의 응집제 모두 막간차압 증가를 크게 감소시키는 것으로 나타났다. 응집제를 주입하지 않은 경우 막오염이 빠르게 진행되는 것으로 관찰되었는데, 운전 시간 약 1.2시간 후에 100 kPa에 도달하였다. 반면, 응집제를 주입한 경우 막간차압 증가율은 응집제와 응집제 주입량 변화에 따라 다양한 결과를 보였다.

황산반토의 경우 최소주입량으로 적용한 1 mg/L 주입조건에서 2.8시간 동안 운전이 가능했고, 10 mg/L에서는 약 5.6시간 동안 운전이 가능한 것으로 나타났다. 그리고 유기물 제거율을 기준으로 적용한 125 mg/L 조건에서는 약 22.5시간 동안 운전이 가능한 것으로 나타나 응집제 주입량이 증가할수록 막오염 증가율이 크게 감소하는 것으로 나타났다.

PACS의 경우는 황산반토 결과와 마찬가지로 응집제 주입에 의해 막간차압 증가율이 크게 감소하는 효과를 보였다. 막간차압 100 kPa 도달시간을 기준으로 1 mg/L 주입 결과 3.0시간, 10 mg/L와 200 mg/L에서 각각 11.3시간과 13.8시간으로 나타났다. 황산반토의 경우처럼 응집제의 주입량 증가에 의해 막오염이 크게 감소하였다. 그렇지만 주입량 10 mg/L과 200 mg/L에서 유사한 압력증가를 나타냈는데, 이것은 응집 공정에서 최적주입량이 존재한다는 것을 의미하며, 주입량 200 mg/L(pH 6.0)는 최적주입량을 초과하였기 때문으로 판단된다.

염화제2철의 경우 낮은 주입량 조건에서는 황산반토 및 PACS와 비슷한 압력변화를 나타내었다. 기준압력인 100 kPa에 도달시간은 1 mg/L 주입의 경우 2.5시간, 10 mg/L는 5.0시간이었다. 그러나 60 mg/L를 주입한 결과 25시간까지 운전을 실시하였지만 막간차압이 72.5 kPa에 머물러, 다른 응집제에 비해 상대적으로 높은 막오염 저감 효과가 있음을 알 수 있었다.

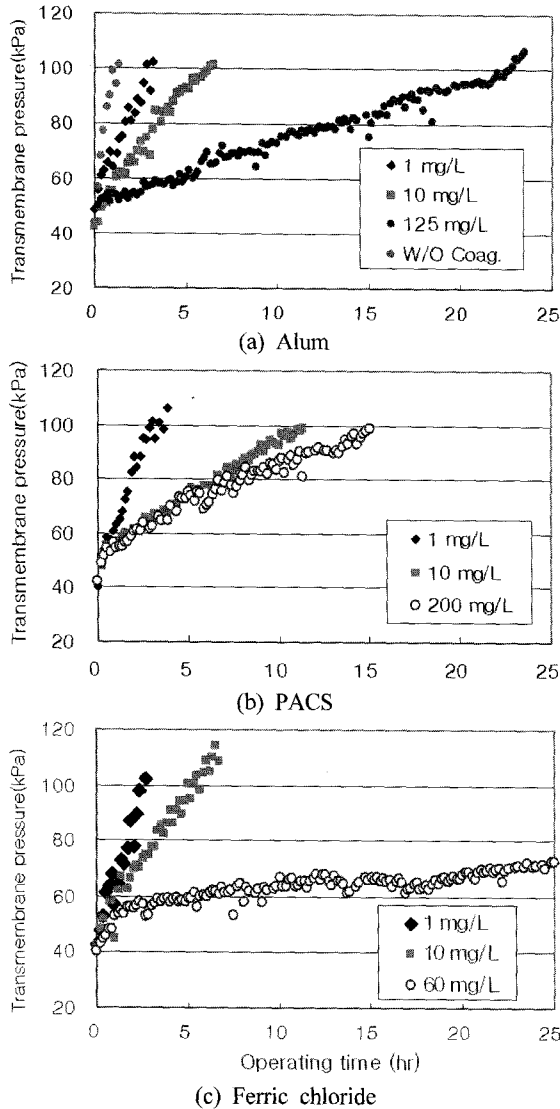


Fig. 3. Change the transmembrane pressure as a function of coagulants and dosages.

이상의 결과에서 세 종류의 응집제 모두, 주입량에 관계 없이 막간차압 증가율을 크게 감소시키는 것으로 나타났다. 그렇지만 막오염 저감 효과는 응집제의 종류와 주입량에 따라 다르게 나타났다. 응집제별 막오염 특성 검토를 위해 비투과수량(Specific flux)을 적용하였다. 비투과수량은 아래의 [식 1]에 의해 결정된다.

$$SF = \frac{J}{\Delta P} \quad (1)$$

여기서, J (LMH, $L/m^2 \cdot h$)는 투과수량이고, ΔP (kPa)는 막간차압의 변화를 나타낸다. 적용된 시스템은 투과수량(J)은 일정하고, 운전시간의 경과에 따라 막오염이 진행되어 막간차압은 증가한다. 따라서 비투과수량은 운전시간과 막오염의 진행에 따라 점차 감소되며, 비투과수량의 감소는 막오염과 직접적인 관계에 있는 것이다. Table 3에 응집제 종류별 비투과수량 감소율을 운전시간을 기준으로 나타내었다.

Table 3. Comparison of specific flux decline among various coagulants [Unit: hr]

Dosage	1 mg/L		10 mg/L	
% decline	30%	50%	30%	50%
Alum	0.3	2.4	2.4	5.7
PACS	0.9	2.2	2.7	9.0
Ferric chloride	0.7	2.2	2.2	5.0
without coagulant	0.2	0.7		

Table 3에서 감소율 30%와 50%는 운전시간 경과에 의한 비투과수량의 감소율이며, 황산반토 1 mg/L 조건에서 비투과수량이 초기 30%까지 감소하는데 0.3시간 소요되었다는 것을 의미한다. 감소율 30%와 50%를 기준으로 막오염 변화를 제시한 이유는 1회 역세척 주기인 0.5시간 이내에 막오염 증가율이 빠르게 증가하여 30% 전·후의 증가율을 나타내었기 때문이며, 이후에는 증가율이 크게 감소하였기 때문에 약 20%의 추가적인 증가율을 적용하였다.

Table 3의 결과에 의하면 응집제를 주입한 모든 조건에서 비투과수량의 감소 속도가 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 미량 주입조건인 1 mg/L 주입에서는 세 응집제 모두 비슷한 결과를 나타내어 응집제 종류에 따른 특성변화가 크지 않다는 것을 알 수 있다. 반면 주입조건 10 mg/L에서는 초기 30%까지의 감소시간은 각각 2.4, 2.7, 2.2시간으로 비슷하지만 이후 50%까지 감소하는데 걸린 시간은 황산반토의 경우 3.3시간, 염화제2철의 경우 2.8시간 그리고 PACS의 경우는 6.3시간으로 조사되어, PACS의 경우가 다른 응집제에 비해 약 2배의 막오염 감소효과가 있다는 것을 알 수 있다.

이 결과는 일정 시간이 경과한 후, 장기운전 조건에서 PACS의 막오염 저감 효과가 탁월하다는 것을 의미한다. 이러한 응집제별 차이는 유입수 수질 특성에서 그 원인을 설명할 수 있다. Table 2에 제시된 수질측정 결과에 의하면 PACS의 경우 막여과 공정으로 유입되는 유기물(UV₂₅₄) 농도가 0.043 cm^{-1} 으로 가장 낮았고, 막여과 공정을 거치면서 제거되는 양이 가장 적다는 것을 알 수 있다. 즉, 막오염 형태에서 내부 흡착에 의한 오염은 물리적 세척에 의해 제거되지 않는 비가역적인 성격을 가지고 있으며, 이것은 주로 유기물에 의해 유발된다. 따라서 본 연구에서 PACS의 경우 연속운전이 진행되면서 유기물에 의한 비가역적인 오염 정도가 다른 응집제에 비해 낮기 때문에 운전 중 막오염 발생이 적은 것이다.

이상의 결과에서 응집의 막오염 저감효과를 조사한 결과 본 연구에 사용된 세 종류의 응집제 모두 막오염을 크게 감소시킬 수 있었다. 응집제 종류와 주입량별 특성을 비교한 결과 미량 주입조건에서 응집제 종류별 막오염의 특성 차이가 뚜렷하지 않았지만, 10 mg/L 주입조건에서는 큰 차이를 나타내었다. 이러한 차이는 운전 초기 보다 일정시간 운전 이후의 장기운전 조건에서 더 뚜렷하게 나타났다. 본 연구 결과에서는 장기운전 조건에서 PACS가 가장 효과적

이었으며, 그 이유는 유기물 농도에 의한 것으로 설명 할 수 있다. 결과적으로 유기물 농도는 일정시간 이후의 연속 운전에서 막오염을 결정하는 매우 중요한 요소라고 할 수 있다.

3.3. 역세척 효율 향상

역세척은 연속운전을 실시할 경우 중요한 운전요소가 되기 때문에 역세척 효율이 높을수록 장시간의 운전이 가능하게 된다. 본 연구에서는 역세척 효율을 역세척 회복율로 나타내었다. 여기서, 역세척 회복율은 1회 역세척 주기를 기준으로 막간차압 증가량과 역세척 공정을 거치면서 감소된 막간차압의 비를 의미한다. Fig. 4에 응집제 종류와 주입량별 역세척 회복율을 제시하였다.

Fig. 4에 의하면 응집제를 주입하지 않은 경우의 평균 역세척 회복율은 66.1%로 아주 높았고, 응집제를 주입한 경우 역세척 회복율이 상대적으로 낮게 조사되었다. 황산반토 1 mg/L 주입에서는 39.6%로 가장 낮았고, 10 mg/L 조건에서는 53.5%로 회복율이 상승하였다. PACS의 경우는 각 42.6%와 57.1%로 나타났고, 염화제2철의 경우는 66.4%와 68.3%로 가장 높은 회복율을 기록하였다. 응집제를 주입하지 않은 조건에서의 회복율이 높은 것은 투과과정에서 막간차압의 증가율이 매우 빨라서 내무 막힘보다는 케이크 층 형성에 의한 가역적인 막오염이 주를 이루고 있기 때문이다.

응집제 주입량 증가에 의해 역세척 회복율이 증가하는 이유는 응집공정의 적용으로 비가역적인 막내부 오염이 감소하기 때문이며, 응집제 주입에 의해 막내부 오염을 감소시킬 수 있다는 것을 의미한다. 특히, 가장 높은 회복율을 나타낸 염화제2철의 경우 막내부 오염을 감소시키는 효과가 크며, 역세척에 유리한 막오염 층을 형성시킨다고 할 수 있다. 이처럼 철염계 응집제의 역세척 향상은 Benjamin 등¹⁵⁾이 HIOPs(heated iron oxide particles)를 이용한 연구에서 막표면에 형성된 케이크층의 구조가 단단한 결정형으로 역세척에 유리한 형태를 가지고 있기 때문에 연속운전에서 막오염 증가율이 높지 않다는 결론에서도 설명된바 있다.

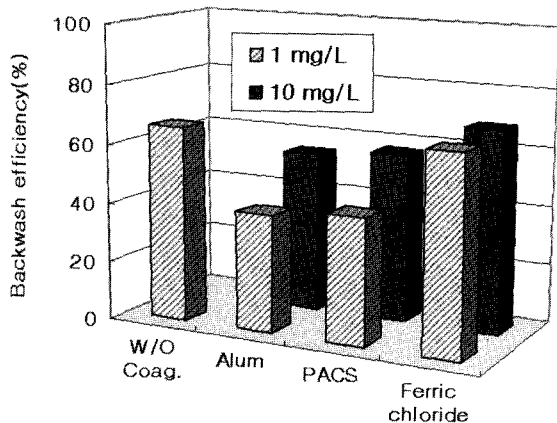


Fig. 4. Comparison of backwash efficiency among various coagulants.

이상에서 응집의 적용을 통해 역세척 효율을 향상시킬 수 있었다. 적정 응집제 주입을 통해 비가역적인 막내부 오염이 감소하고, 역세척 회복율이 증가하는 형태를 관찰할 수 있었으며, 본 연구에서는 염화제2철의 역세척 회복율이 가장 뛰어난 것으로 조사되었다.

4. 결론

막오염에 미치는 응집 효과를 구체적으로 파악하기 위해 다양한 응집제와 주입량 조건에서 응집·한외여과 공정을 적용하였다. 실험에 사용된 응집제는 황산반토, PACS, 염화제2철로 주입량은 1~200 mg/L의 범위이고, 응집공정의 적용을 통해 예상되는 수질개선 효과, 막오염 감소와 역세척 효율 향상 등을 조사하였다. 본 연구에서 막여과에 미치는 응집 전처리 공정의 효과를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 도출 할 수 있었다.

- 1) 응집이 한외여과 공정의 처리수 수질에 미치는 영향을 조사한 결과 최종 처리수의 탁도 값은 응집제 종류와 주입량에 관계없이 0.1 NTU 이하로 일정하였다.
- 2) 유기물 제거는 응집·침전공정의 적용에 의해 전체 제거율을 50% 이상까지 향상시킬 수 있었다. 또한 전체 제거율은 응집·침전 공정의 효율에 크게 영향을 받으며, 응집제 주입량이 최적 조건에 가까울수록 전체 제거율이 높게 나타났다.
- 3) 막여과에 의한 유기물 제거율은 전처리 공정의 제거율 향상에 의해 감소되었는데, 이것은 전처리 공정인 응집·침전 공정에서 제거되는 유기물 특성과 막여과에서 제거 가능한 유기물의 특성이 유사하다는 것을 설명하고 있다.
- 3) 응집제 종류별 유기물 제거율 형태는 비슷하게 나타났다.
- 4) 응집의 막오염 저감효과를 조사한 결과 본 연구에 사용된 세 종류의 응집제 모두 막오염을 크게 감소시킬 수 있었다. 응집제 종류와 주입량별 특성을 비교한 결과 미량 주입조건에서 응집제 종류별 막오염의 특성 차이가 뚜렷하지 않았지만, 10 mg/L 주입조건에서는 큰 차이를 나타내었다. 본 연구 결과에서는 장기운전 조건에서 PACS가 가장 효과적이었으며, 그 이유는 유기물의 유입 농도와 흡착에 의해 제거된 농도에 의한 것으로 판단되었다.
- 5) 응집의 적용을 통해 역세척 효율을 향상시킬 수 있었다. 적정 주입량에 가까울수록 응집에 의해 비가역적인 막내부 오염이 감소하고, 역세척 회복율이 증가하는 것으로 나타났고, 본 연구에 적용된 세 종류의 응집제 중에서는 염화제2철의 역세척 회복율이 가장 뛰어났다.

참고문헌

1. Kiso, Y., "Membrane filtration in water treatment: Pressure state, Market, Perspective," 대한상하수도학회 · 한국물환

- 경학회 공동학술발표회 논문집(2002).
2. Mallevalle, J. et al., *Water Treatment Membrane Processes*, McGraw-Hill(1996).
 3. Zhang, M., Li, C., Benjamin, M. M., and Chang, Y., "Fouling and natural organic matter removal in adsorbent/membrane systems for drinking water treatment," *Environ. Sci. Technol.*, **37**, 1663~1669(2003).
 4. Carroll, T., King, S., Gray, S. R., Bolto, B. A., and Booker, N. A., "The fouling of microfiltration membranes by NOM after coagulation treatment," *Water Res.*, **34**(11), 2861~2868(2000).
 5. Matsui, Y., Colas, F., and Yuasa, A., "Removal of a synthetic organic chemical by PAC-UF systems. II Model application," *Water Res.*, **35**, 464~470(2001).
 6. Lee, J. D., Lee, S. H., Jo, M. H., Park, P. K., Lee, C. H., and Kwak, J. W., "Effect of coagulation conditions on membrane filtration characteristics in coagulation microfiltration process for water treatment," *Environ. Sci. Technol.*, **34**(17), 3780~3788(2000).
 7. Choksuchart, P., Heran, M., and Grasmick, A., "Ultrafiltration enhanced by coagulation in an immersed membrane system," *Desalination*, **145**, 265~272(2002).
 8. Fu, L. F. and Dempsey, B. A., "Effects of charge and coagulation dose on NOM removal and membrane fouling mechanisms," *Proceeding of the AWWA Membrane technology conference*, New Orleans, 1043~1058(1997).
 9. Jucker, C. and Clark, M. M., "Adsorption of aquatic humic substances on hydrophobic ultrafiltration membrane," *J. Membrane Sci.*, **97**, 37~52(1994).
 10. Guigui, C., Rouch, J. C., Durand-Bourlier, L., Bonnelye, V., and Aptel, P., "Impact of coagulation conditions on the in-line coagulation/UF process for drinking water production," *Desalination*, **147**, 95~100(2002).
 11. 정철우, 한승우, 강임석, "막의 재질에 따른 유기물질 성장별 흡착 특성," *대한환경공학회지*, **24**(8), 1339~1348(2002).
 12. 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).
 13. 문성용, 이상협, 김승현, 문병현, 응집·한외여과 공정에서 응집조건 결정에 관한 연구, *한국물환경학회지*, **21**(4), 361~371(2005).
 14. Mulder, M., *Basic Principles of Membrane Technology*, KLUWER ACAD-EMIC PUBLISHERS(1996).
 15. Benjamin, M., Zhang, M., Li, C., and Chang, Y. J., Interaction of adsorbent particles with NOM in UF systems, *대구대학교 산업기술연구소 환경기술국제학술 심포지움*, pp. 73~93(2002).
 16. APHA, AWWA, WPCF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th ed, Washington DC, USA(1998).