

응집-UF 정수공정을 위한 최적응집조건의 결정

이철우 · 안수경 · 강임석[†]

부경대학교 환경공학과

(2004년 4월 8일 접수, 2005년 7월 26일 채택)

Determination of Optimal Coagulation Condition for Coagulation-UF Water Treatment Process

Chul-Woo Lee · Su-Kyong An · Lim-Seok Kang[†]

Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

ABSTRACT : Applying coagulation process before membrane filtration showed not only reducing membrane fouling, but also improving the removal of dissolved organic materials that might otherwise not be removed by the membrane alone. Also, slow mixing didn't affect the reduction of membrane fouling, and rapid mixing using an in-line static mixer was more effective than using backmixer. In addition, only 11 percent of dissolved organic matter in raw water was the primary cause of fouling. Furthermore, the primary foulant of UF membrane was hydrophobic substance, which can easily be removed by coagulation.

Key Words : Rapid Mixing, Coagulation, UF Membrane, Fouling

요약 : 응집-UF 정수공정시 응집 전처리 공정에 있어 완속혼합없이 급속혼화만으로 충분한 응집의 효과를 기대할 수 있으며, 급속 혼화장치로 in-line static mixer를 사용한 경우가 기존의 back mixer를 사용 한 경우보다 높은 DOC 제거효율을 얻을 수 있었다. 또한, 적정 주입량인 16 mg alum /L에서 막의 투과 flux 감소가 가장 적게 나타났으며 적정 주입량보다 너무 적거나 또는 너무 많은 경우 모두 막의 투과 flux 감소가 크게 나타났다. 또한 막의 fouling에 크게 영향을 미치는 것은 hydrophobic 물질로 이는 응집 전처리 시 효과적으로 제거되어짐으로써 막의 투과 flux 감소를 줄일 수 있었다.

주제어 : 급속혼화, 응집, 한외여과막, 막오염

1. 서론

최근 상수원의 오염이 심각해지고 정수수질에 대한 관심과 고도정수처리에 대한 요구가 증가하여 기존의 정수처리 시설에 대한 보완이나 새로운 공정의 도입에 대한 연구가 활발히 진행되어지고 있다. 하지만 기존의 정수시설의 보완이나 새로운 고도정수처리시설을 도입하고자 할 경우 효율성과 부지확보를 포함하여 많은 어려움이 뒤따르고 있다. 이에 따라 최근에는 막분리공정이 새로운 대안으로 제시되고 있으며, 이러한 막분리 공정은 기존의 고도처리공정과 달리 원수의 수질변화에도 효과적으로 대응할 수 있고 소요부지면적이 적으며 기존에 설치된 재래식 처리공정을 대신하여 사용할 수 있는 간결하고 유지관리가 용이한 처리공정으로 평가받고 있다.¹⁾ 그러나 막분리 단독공정으로는 효과적인 유기물을 제거하지 못하며 막의 fouling을 크게 유발하여, 투과 flux를 감소시키므로 적절한 전처리가 요구된다.^{2,3)}

따라서 본 연구에서는 원수의 유기물 제거를 강화하기 위해 전처리공정인 응집 공정의 최적조건을 결정하고 막의 fouling을 유발하는 DOM(dissolved organic matter) 성분의 특성을 파악하였다. 또한 응집 전처리를 보다 간결하게 하기 위한 방안으로 급속혼화의 방법으로 기존에 가장 보편적으로 사용되고 있는 backmixer와 일반적으로 높은 혼화강도와 극히 짧은 혼화시간을 제공하여 주는 in-line 정적혼화기를 비교 적용하고, 이를 pilot 실험에 적용하여 응집-UF hybrid system의 최적 운전조건을 파악하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 원수의 수질 특성

본 실험은 낙동강 하류부의 상수원수를 사용하였으며 그 특성을 Table 1에 나타내었다. 먼저 응집-막분리 공정에 따른 유기물질의 거동을 조사하기 위하여 채수한 시수를 1.2 µm filter를 이용하여 입자상 물질을 제거한 후 실험을 실시하였다.

그리고 필요시 용존유기물의 fraction은 Croue 등⁴⁾에 따라 Amberlite XAD-8과 XAD-4 수지를 이용하여 humic 물질과 nonhumic 물질을 분리하였다.

[†] Corresponding author
E-mail: kangls@pknu.ac.kr
Tel: 051-620-6437

Fax: 051-621-8166

Table 1. Characteristics of raw water (Nakdong river water)

Item	Unit	Range
Temp.	°C	13~22
pH	-	7.4~7.8
Turbidity	NTU	Before filter: 4~5
		After filter: 1.2~1.8
UV ₂₅₄	cm ⁻¹	0.041~0.072
TOC	mg/L	2.5~3.4
SUVA	m ¹ /mg/L	1.64~2.1
Alkalinity	mg/L as CaCO ₃	30~45

Table 2. Experimental conditions for four different types of processes

Process	Conditions
UF alone	UF process alone
Rapid mixing + UF	Applying UF process after rapid mixing
Slow mixing + UF	Applying UF process after rapid and slow mixing

2.2. 실험장치 및 방법

2.2.1. Backmixer 장치

응집 실험에 사용된 jar-tester는 2 L용량의 사각형 jar로 2.54^W × 7.6^L cm 크기의 paddle (two-blade)식 임펠러를 사용하였으며 응집제는 alum (Al₂(SO₄)₃ · 16H₂O)을 사용하였다. Table 2와 같이 UF 공정과의 결합을 위한 전처리공정으로서 응집공정은 급속혼화만 실시한 시료를 UF에 적용하였거나 (Rapid mixing + UF), 급속-완속혼합을 거친 후의 시료를 침전과정 없이 UF에 적용하였다 (Rapid mixing + Slow mixing + UF).

2.2.2. 정적혼화기(In-line static mixer)

실험에 사용된 정적혼화기 관의 내경은 0.91 cm, 관의 길이는 10 cm이었으며, 관 내부에 장착된 element의 형상은 Fig. 1과 같다. 관내의 수두손실은 차압계 (differential pressure transducer)를 이용하여 압력손실 (ΔP)을 측정하였고 완속 혼합시는 정적혼화기를 거친 후 2 L용량의 사각형 jar를 사용하였으며, 정적혼화장치를 이용한 실험 장치 구성도를 Fig. 2에 자세히 나타내었다.

Backmixer에서의 교반강도 (G)는 식 (1), in-line 정적혼화기에서 G는 식 (2)를 사용하여 계산하였다. 식 (2)에 나타난

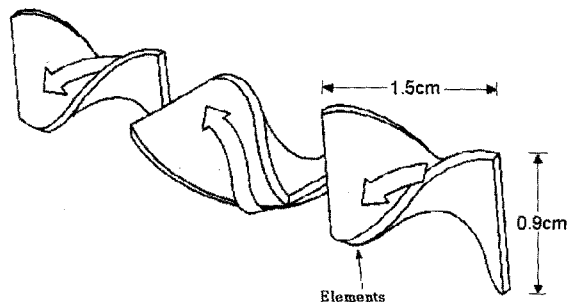


Fig. 1. Schematics of in-line static mixer element.

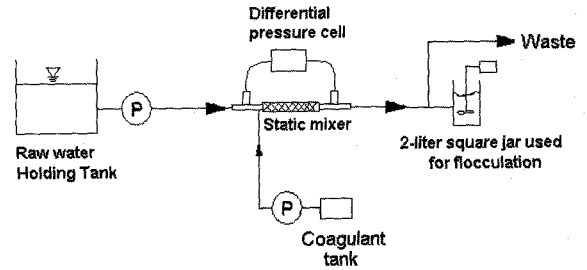


Fig. 2. Experimental setup of a static mixer for rapid mixing and slow mixing.

바와 같이 정적혼화기 내의 유속 또는 유량에 따라 변화하는 수두손실 (h_L)을 차압계로 측정하여 교반강도를 속도경사 (G)로 나타낼 수가 있다.

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \tag{1}$$

$$G = \sqrt{\frac{g u h_L}{L v}} \tag{2}$$

- 여기서, P = 혼화조로의 유입동력 (kg · m²/sec³)
- V = 혼화조의 부피 (m³)
- μ = 유체의 점성 (kg/m · sec)
- v = 동점성계수 (m²/sec)
- u = 유속 (m/sec)
- g = 중력가속도 (m²/sec)
- L = element 길이 (m)

2.2.3. 회분식 UF막 장치

본 실험에 사용된 batch type UF membrane 장치는 막힘형 형태로 Fig. 3과 같다. 사용된 막은 Millipore 사에서 제조된 평판 disc 형태의 막으로 지름은 76 mm, 막면적은 4.54 × 10⁻³ m²이며 100 kDa의 UF막으로 예비실험결과 유기물에 의한 막 오염이 비교적 적은 친수성 재질의 막을 사용하여 실험을 실시하였다. 또한 압력적용은 질소가스를 이용하여 1 bar로 일정하게 UF cell에 주입하였으며 투과 flux는 투과수를 전자저울을 이용하여 측정한 후 비중을 1.0으로 가정하여 산정하였다.

2.2.4. 연속식 UF막 장치

Pilot scale의 dead-end UF 장치는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 pore size 0.01 μm, 직경 1.4 mm, 길이 1 m의 hollow fiber module에 총 유효 막면적 약 160 cm²인 장치를 이용하여

Table 3. Characteristics of UF membrane used

Items	Flat type membrane	Hollow fiber membrane
Material	regenerated cellulose	polysulfone
Area	4.54 × 10 ⁻³ m ²	0.016 m ²
MWCO	100 kDa	100 kDa
Operation pressure	1.0 bar	1.0 bar

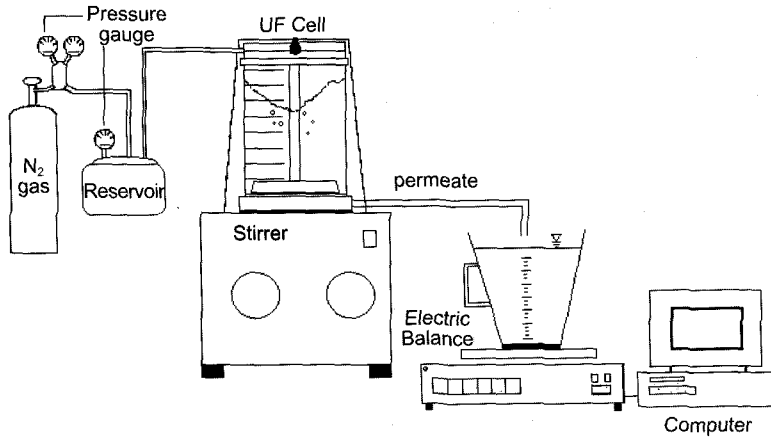


Fig. 3. Schematics of batch type UF membrane filtration assembly.

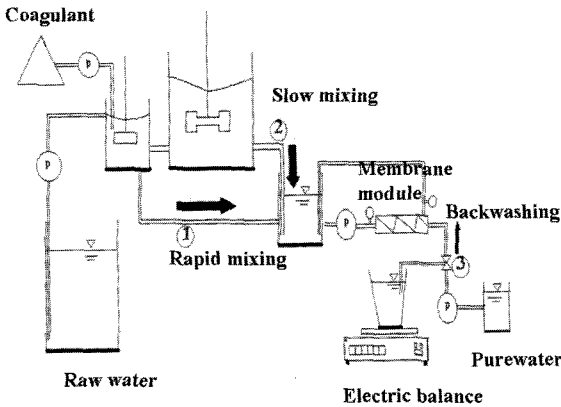


Fig. 4. Schematics of dead-end type UF membrane filtration assembly.

outside-in type으로 운전하였다. 본 연구에 사용한 평막 및 중공사막의 세부적인 특성을 Table 3에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Backmixer를 이용한 응집-UF막 공정의 적용

Fig. 5는 교반조건에 따른 flux의 변화를 알아보기 위해 먼저 응집 전처리시 급속혼화만 실시한 경우와 급속혼화 + 완속혼합을 실시한 후, 100 kDa의 친수성 막을 이용하여 막분리를 실시하였다. 그림에서와 같이 6 mg alum/L의 응집제 주입량에서 급속혼화 ($G = 550 \text{ sec}^{-1}$, 1 min) + 완속혼합 ($G = 22 \text{ sec}^{-1}$, 30 min) 후와 급속혼화 ($G = 550 \text{ sec}^{-1}$, 1 min)만 실시한 경우 투과 flux 감소의 차이가 거의 나타나지 않음을 알 수 있었다. 이는 급속혼화 응집 과정만으로도 제거대상이 되는 대부분의 용존성 유기물이 입자상물질로 상(相)변화가 이루어졌음을 알 수 있다. 이는 급속혼화 중에 용존성 유기물질이 침전물 (precipitate)이나 microfloc으로 전환이 일어나고 있으며 급속혼화과정에 Al(III) 가수분해 반응이 일어나는 동안 용존성 유기물이 입자상으로 상(相)변화를 일으킨다고 판단된다. Mhaisalkar 등⁵⁾은 급속혼화 중 교반조건에 따른 입도분포의 변화에 대한 실험결

과를 통하여 급속혼화의 강도와 시간에 따라 급속혼화 중 microfloc의 크기분포가 다양하게 나타나며 이러한 영향이 응집효율에도 크게 영향을 미친다고 하였다.

Table 4는 투과 flux 측정 후 투과수 (permeate)의 수질을 나타낸 결과로, 탁도의 경우 UF 단독 및 전처리조건에 상관없이 0.1 NTU의 아주 낮은 탁도를 나타내었다. 또한 DOC와 UV₂₅₄의 경우 UF 단독 적용시 제거효율이 각각 12.5%, 23.5%로 낮은 제거율을 보인 반면 응집전처리를 할 경우 각각 50%, 25%로 증가함을 보였고, 급속혼화+UF와 급속+완속혼합+UF의 혼화조건에 따른 차이는 거의 나타나지 않았다.

Table 4. Removal of turbidity, DOC and UV₂₅₄ under various pretreatment conditions

	pH	Turbidity (NTU)	DOC (mg/L)	UV ₂₅₄ (cm ⁻¹)
Raw water	7.41	4.22	2.81	0.068
UF alone	7.36	0.11(97.4)*	2.46(12.5)	0.052(23.5)
Rapid mixing + UF	6.95	0.09(97.8)	2.11(25.0)	0.034(50.0)
Rapid + Slow mixing + UF	6.95	0.09(97.8)	2.10(25.3)	0.033(51.0)

* Removal Efficiency(%)

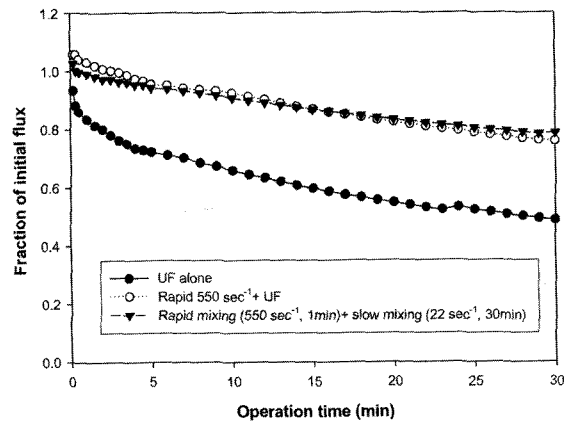


Fig. 5. Changes in flux of UF membrane after rapid and slow mixing condition (MWCO: 100 kDa, dose: 16 mg/L as alum).

따라서 backmixer를 이용한 UF 막분리 전처리공정으로서 급속혼화만 적용한 경우와 급속+완속혼합을 적용 후 막분리 공정을 적용한 경우, 모두 UF 단독공정에 비해 flux 감소율이 낮은 것을 알 수 있다. 또한 응집 전처리 공정시 완속혼합 공정없이 급속혼화만으로도 동일한 유기물 제거효과와 투과 flux를 얻을 수 있다고 판단된다.

3.2. In-line 정적혼화기에서 응집-UF막 공정의 적용

Fig. 6은 정 등⁶⁾의 응집공정에 적합한 in-line 정적혼화기를 이용한 혼화공정의 개선에 관한 연구결과를 토대로 in-line 정적혼화기의 최적급속혼화조건인 관의 유입부분에 3개의 elements, 관의 유출부분에 2개의 elements를 설치((3+2) element, $G = 1,116 \text{ sec}^{-1}$, $Q = 2 \text{ L/min}$)하여 응집 전처리 (급속+완속혼합 (30 sec^{-1} , 30 min)) 후 100 kDa의 친수성 막으로 막분리를 실시한 실험결과이다. 응집제 주입량은 backmixer에 의한 급속혼화공정과 동일한 16 mg alum/L의 응집제량에서 실험을 실시하였다. 그림에서와 같이 in-line 정적혼화기를 이용하여 급속혼화를 실시한 실험에서도 급속혼화만 실시한 경우와 급속혼화 + 완속혼합의 응집 전처리를 실시한 후 막분리시 투과 flux의 감소율이 비슷하게 나타남을 알 수 있다. 즉, in-line 정적혼화기를 이용하여 100 kDa의 막으로 막분리 시에도 급속혼화만으로 충분한 유기물 응집의 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 backmixer와 in-line 정적혼화기의 적용에 따른 투과 flux를 비교한 결과로서, backmixer ($G = 550 \text{ sec}^{-1}$)와 in-line 정적혼화기 ($G = 1,160 \text{ sec}^{-1}$)로 급속혼화 후 완속혼합 조건은 동일하게 $G = 22 \text{ sec}^{-1}$ 에서 5분간 교반 후 100 kDa의 hydrophilic 막으로 막분리를 실시하였다. 그림에서와 같이 backmixer 적용시와 in-line 정적혼화기의 적용시 투과 flux 감소율이 거의 동일하게 나타남을 알 수 있다. 이에 따른 투과수의 수질을 Table 5에 나타내었으며, 탁도 제거율은 98% 이상의 높은 제거율을 나타내고 있으며, UV_{254} 와 DOC의 제거효율은 in-line 정적혼화기의 경우, 각각 54.4%, 40.2%로 backmixer의 각각 50.0%, 25.0%에 비해 높게 나타났다. 이는 micromixing과 극히 짧은 시간에 순간혼화를 유발하는 in-line

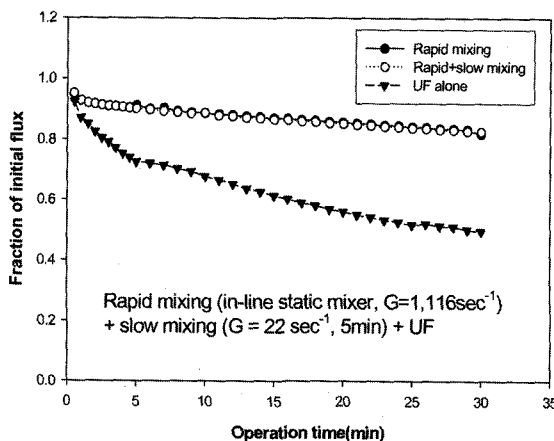


Fig. 6. Changes in flux of UF membrane after rapid mixing (in-line static mixing) and slow mixing condition (MWCO: 100 kDa, dose: 16 mg/L as alum).

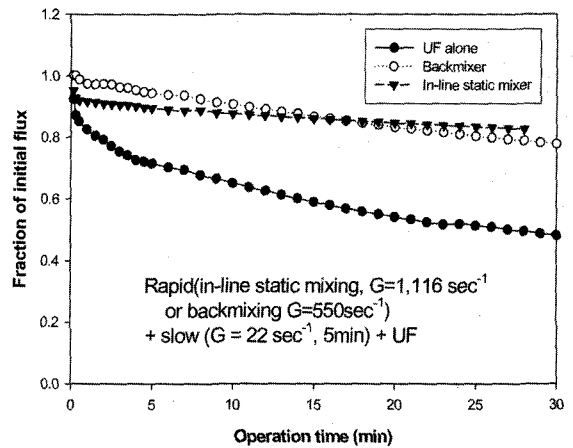


Fig. 7. Changes in flux of UF membrane after rapid (in-line static mixing or backmixing) and slow mixing condition (MWCO : 100 kDa, dose : 16 mg/L as alum).

Table 5. Removal of turbidity, DOC and UV_{254} on pretreatment conditions

	Turbidity(NTU)	DOC(mg/L)	$UV_{254}(cm^{-1})$
Raw water	4.22	2.81	0.068
Backmixer	0.089(98.0)*	2.11(25.0)	0.034(50.0)
In-line mixer	0.087(98.0)	1.68(40.2)	0.031(54.4)

* Removal Efficiency(%)

정적혼화기가 backmixer에 비해 더 높은 전하중화를 유발하여 일어난 결과로 판단된다.

최⁷⁾는 in-line 정적혼화기에서의 유체의 혼합 특성은 backmixer에 비하여 보다 효과적인 micromixing을 유발하며, 이에 따라 더 작은 와류(eddy)를 형성함으로써 응집제의 가수분해 및 Al 가수분해 종에 의해 탁도와 유기물의 반응이 보다 효과적으로 일어났기 때문이라고 하였다. 따라서 응집 전처리 공정시 in-line 정적혼화기로 운전했을 경우가 backmixer로 운전했을 경우에 비해 효과적으로 유기물을 제거할 수 있으며, 부가적으로 적은 소요부지 요구와 무동력으로 운전할 수 있어 효율적인 급속혼화 장치라고 판단된다.

3.3. 용존성 유기물질에 의한 UF 막의 fouling mechanism

3.3.1. 응집제 주입량에 따른 UF 막 공정의 적용

Fig. 8은 응집제 주입량에 따른 투과 flux 감소에 대해 알아보자 교반조건 $G = 550 \text{ sec}^{-1}$, 1분의 혼화조건에서 급속혼화 (backmixing) 후 막분리를 실시하였다. Alum 주입량을 3, 9, 16, 32, 48, 64 mg/L로 변화시키면서 투과 flux 변화를 관찰한 결과 3 mg/L과 같은 저주입량에서는 UF 단독공정과 같이 fouling으로 인한 flux 감소율이 매우 크게 나타났다. 그러나 3 mg/L 이상에서 16 mg/L까지의 주입량에서는 투과 flux 감소가 적어지다가 16 mg/L 이상의 주입량에서는 투과 flux 감소율이 다시 증가함을 알 수 있었다. 이는 과량의 응집제 주입시 막의 fouling을 유발하는 $Al(OH)_3(s)$ (precipitate)의 과다 형성으로 인한 것으로 생각되어지며, 정⁸⁾의 연구에서도 순수에서 응집제량이 증가할수록 용존성

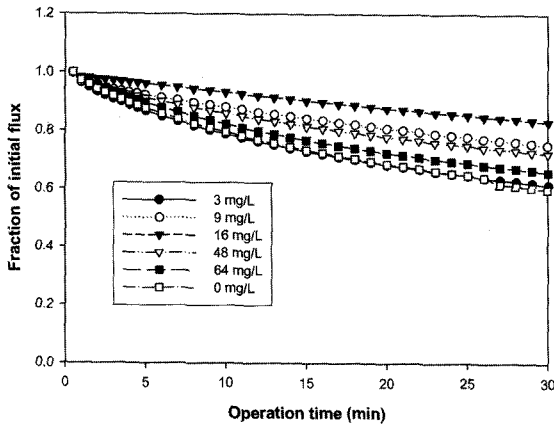


Fig. 8. Changes in flux of UF membrane under various coagulant (Rapid mixing + UF, MWCO: 100 KDa).

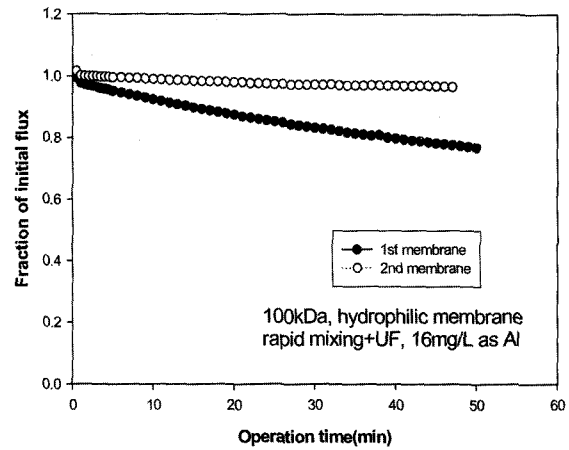


Fig. 10. Flux decline for Nakdong river water through sequential membrane filtration (Dose: 16 mg/L as alum).

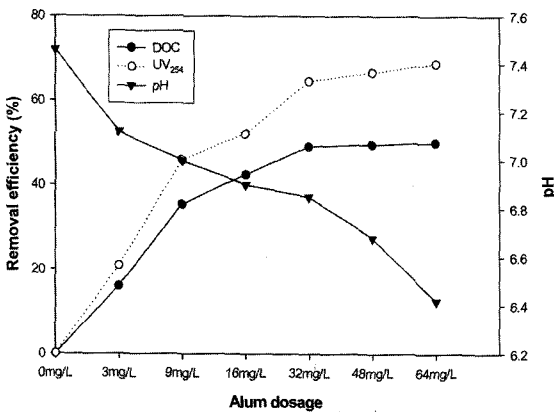


Fig. 9. Effect of coagulant dose on the removal of DOC, UV₂₅₄ and pH for coagulation+UF membrane.

Al(III)보다는 precipitate 형태의 Al(III) 종이 더 많이 존재하게 되어 막분리시 더 큰 flux 감소를 유발한다고 보고하였다. 또한 응집제 주입량별 jar test를 실시한 결과에서는 TOC 제거를 위한 최적 응집제 주입량이 32 mg/L이었지만 투과 flux는 최적의 응집제 주입량보다 적은 16 mg/L의 주입량에서 flux 감소율이 가장 적은 것으로 나타났다. Bian 등⁹⁾의 연구에서도 UV₂₅₄의 제거에 있어 최적의 응집제 주입량보다 적은 응집제 주입량에서 flux 감소율이 적으며 이보다 많은 응집제 주입량에서는 막표면에 침착성의 cake 층을 형성하여 막표면에 달라붙는 aluminum micro floc을 형성하여 flux 감소율이 커진다고 하였다.

응집제 주입량에 따른 막분리 실험 후 투과수의 수질을 Fig. 9에 나타내었다. UV₂₅₄와 DOC 제거율은 응집제량이 증가할수록 유기물의 제거율이 증가함을 알 수 있었으나, 탁도 제거율은 응집제 주입량에 관계없이 일정하게 99% 이상의 높은 제거율을 나타냈었다.

3.3.2. 연속식 막여과 실험 (Sequential Filtration Test)

Fig. 10은 막의 fouling에 영향을 주는 용존성 유기물질의 특성을 알아보려고 동일한 막을 사용하여 sequential filtration test를 실시한 것이다. 16 mg alum/L의 주입량에서 응집 전처

Table 6. DOC and UV₂₅₄ absorbance from sequential filtration test of Nakdong river

Sample	UV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	DOC (mg/L)
1st membrane feed	0.023	1.35
1st membrane permeate	0.020	1.20
2nd membrane permeate	0.019	1.20

리 (급속혼화 G = 550 sec⁻¹, 1 min)하여 형성된 미세플록의 영향을 없애기 위하여 1.2 μm 필터로 거른 후 100 kDa, hydrophilic membrane을 이용하여 막분리 실시하였으며, 일차 투과수 (1st permeate = 2nd feed water)를 다시 동일한 깨끗한 막을 사용하여 막분리를 실시하였다. 그림에서와 같이 1차 membrane으로부터 나온 투과수를 2차 membrane에 다시 투과하였을 경우 2차 membrane의 추가 flux 감소가 나타나지 않음을 알 수 있다. 즉, 응집-UF 공정 적용 후 제거되어진 유기물을 제외한 잔류 용존성 유기물은 더 이상 막의 fouling을 크게 일으키지 않는다는 것으로 막의 fouling을 유발하는 물질은 응집에 의해 선택적으로 제거되어지는 물질로 판단된다. 또한 Table 6과 같이 응집-UF에서 1차 membrane feed, 1차 membrane permeate, 2차 permeate의 DOC 값이 각각 1.35 mg/L, 1.20 mg/L, 1.20 mg/L로 나타나 DOC의 약 11%만이 주로 막의 fouling을 유발한다는 것을 알 수 있다. Kerry와 Mark¹⁰⁾의 연구에서도 DOM의 대부분인 85~95%가 막의 fouling을 일으키지 않으며, 그 나머지 일부인 5~15%가 막의 fouling을 일으킨다고 보고한 바가 있다.

3.3.3. 용존성 유기물의 각 fraction이 UF막 공정에 미치는 영향

Fig. 11은 fouling을 일으키는 DOM의 성분을 확인하기 위한 실험으로 원수를 non-acid hydrophilic, fulvic acid, humic acid로 fraction 한 후 100 kDa의 hydrophilic 막으로 막분리를 실시한 결과이다. 각 non-acid hydrophilic, fulvic acid, humic acid의 초기 TOC는 0.549, 0.686, 0.464 mg/L이며 pH는 7 ± 0.2이다. 그림에서와 같이 flux 감소율은 fraction을 실시하지 않은 원수를 막분리 한 경우(UF alone)가 가장 크

게 나타났으며, humic acid를 막분리 공정 적용시는 원수와 가장 유사하게 나타나고 있다. 다음은 fulvic acid, non-acid hydrophilic 순으로 나타났다. 이는 앞서 Fig. 10의 결과와 같이 막의 fouling을 유발하는 물질로는 hydrophilic 물질보다는 hydrophobic 물질이며, 그 중에서도 보다 hydrophobic인 humic acid로 나타났다. Jucker와 Clark¹¹⁾도 fulvic acid보다 humic acid가 막에 있어 보다 큰 흡착력을 가진다고 하였으며 Schäfer 등¹²⁾은 fulvic acid보다 humic acid가 막의 투과 flux를 더욱 감소시킨다고 하였다. Nilson과 DiGiano¹³⁾는 지표수를 fraction 한 후 막분리한 결과, 소수성 DOM이 NF 막의 투과 flux를 감소시킨다고 하였다. 따라서 응집 전 처리로 막의 fouling 유발물질인 hydrophobic 물질을 제거함으로써 막의 fouling을 더욱 감소시킬 수 있으며, 이에 따라 투과 flux를 더욱 증가시킬 수 있을 것이다.

Fig. 12는 Fig. 11의 막분리 실험 후 투과수의 유기물 제거율을 나타낸 것으로 flux 감소가 가장 큰 humic acid 부분이 UV₂₅₄, DOC의 제거율이 각각 30%, 19%로 가장 컸으며 fulvic acid가 각각 4%, 2%이며 non-acid hydrophilic이 각각 0%, 4%의 순으로 나타났다.

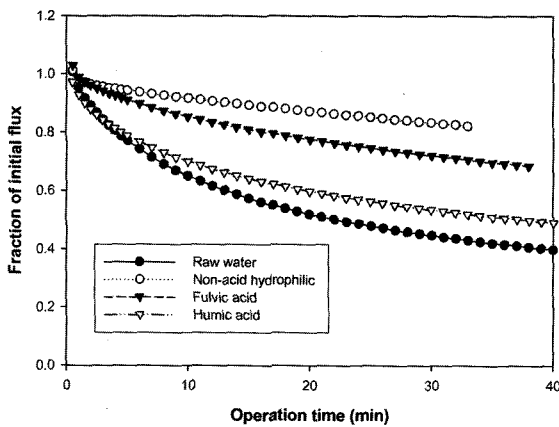


Fig. 11. Changes in flux of UF membrane for the NOM fractions (MWCO : 100 kDa, hydrophilic membrane).

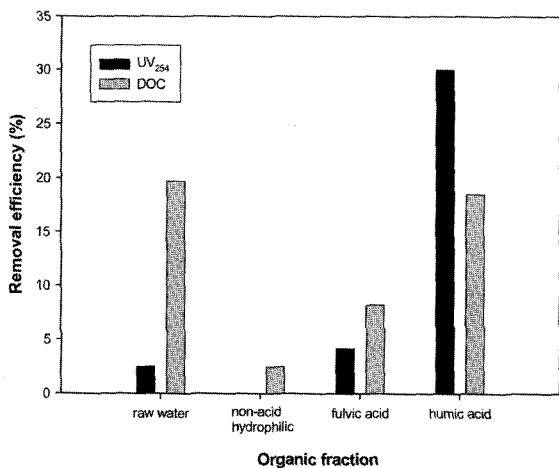


Fig. 12. Removal efficiency of DOC and UV₂₅₄ for NOM fraction after UF membrane.

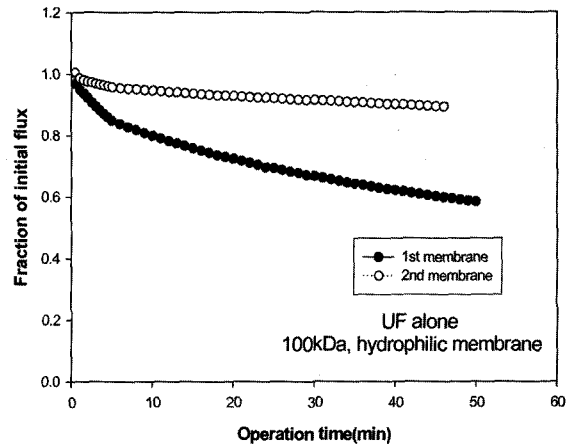


Fig. 13. Flux decline for Nakdong river water through sequential hydrophilic membranes filtration (w/o coagulation).

이는 원수를 응집 공정없이 UF막 단독으로 사용하여 sequential filtration test한 Fig. 13에서와 같이 1차 membrane에서 hydrophobic 물질이 다소 제거되어 집으로 인해 2nd membrane feed water에는 대부분 막의 fouling을 일으키지 않는 hydrophilic 물질로써 2차 membrane의 fouling을 거의 일으키지 않음을 알 수 있었다.

3.4. 응집-UF막분리 공정의 pilot-plant 적용

Fig. 14는 pilot 장치를 이용해 dead-end 방식으로 연속식 막분리 실험을 실시한 것이다. 실험조건은 16 mg alum/L의 응집제량으로 급속혼화 ($G = 550 \text{ sec}^{-1}$, 1 min) 후 막분리를 실시한 경우와 급속혼화 ($G = 550 \text{ sec}^{-1}$, 1 min) + 완속혼합 ($G = 22 \text{ sec}^{-1}$, 5 min) 후 UF 공정을 적용한 후 $300 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ 의 투과 flux를 유지하면서 시간에 따른 ΔP (transmembrane pressure)를 측정하였다. 물리적 역세척은 20분 간격으로 2 bar의 압력에서 초순수를 이용하여 실시하였다. 그림에서와 같이 막공정 단독으로 운전하였을 때보다 응집 전처리 공정을 적용한 경우가 운전시간이 2배 이상 길어짐을 알 수 있으며, 응집 전처리 적용시 급속혼화만 실시한 경우와 완속혼합까지 실시한 경우의 차이가 비교적 크게 나타나지 않음을 알 수 있다. 또한 투과수의 수질분석 결과, 탁도 제거율은 원수만을 막분리 했을 때와 응집 전처리 후 막분리 했을 때 모두 99% 이상의 높은 제거효율을 얻었으며, UV₂₅₄ 제거효율은 UF 단독 공정시와 급속혼화 + UF 공정, 완속혼합 + UF 적용시가 각각 21%, 55%, 56%이며 DOC 제거효율은 각각 10%, 43%, 45%로 나타났다. 이는 응집 전처리 공정 적용시 용존성 유기물질의 응집으로 여과에 용이한 큰 입자를 형성하여 UF 단독공정보다 30% 이상 제거효율이 향상되는 것을 알 수 있다.

Fig. 15는 pilot 공정 적용시 응집제 주입량에 따른 ΔP 의 변화를 알아보기 위한 실험으로 실험조건은 Fig. 14와 같으며 응집제 주입량은 16 mg/L, 32 mg/L as alum에서 급속혼화 후 막분리를 실시하였다. 본 실험에서도 32 mg/L의 주입

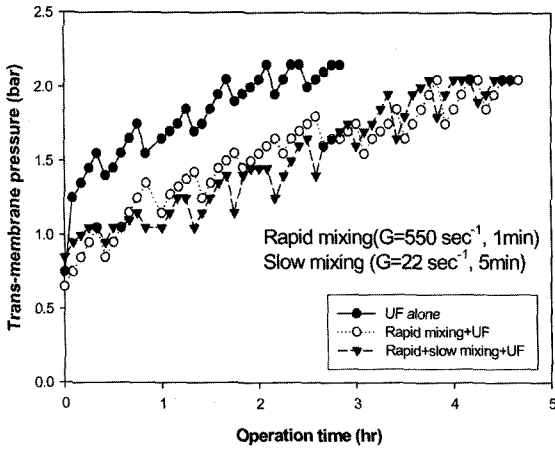


Fig. 14. Changes in flux of UF membrane after rapid and slow mixing condition (Constant flux: 300 L/m² · hr, dose: 16 mg/L as alum).

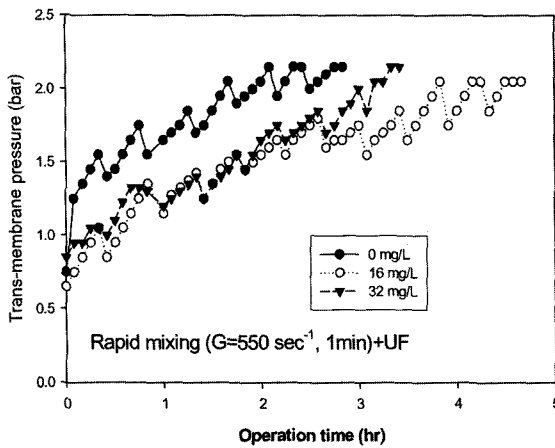


Fig. 15. Changes in flux of UF membrane after rapid mixing under different doses (Constant flux: 300 L/m² · hr, dose: 16, 32 mg/L as alum).

랑에서 운전했을 경우 16 mg/L 주입량일 때보다 운전시간이 1시간 가량 줄어들음을 알 수 있었다. 이는 앞선 실험 결과와 같이 높은 응집제 주입량에서는 점착성의 cake 층을 형성하여 막표면에 달라붙는 aluminum micro floc을 형성하여 ΔP의 증가가 빠르게 일어난다는 것을 알 수 있다. 응집제 주입량에 따른 유기물의 제거율을 살펴보면 16 mg/L, 32 mg/L의 주입량에서 UV₂₅₄의 제거율은 각각 55%, 65%이며 DOC의 제거율은 각각 43%, 49%로 ΔP의 변화와는 상관없이 응집제 주입량에 따라 유기물제거율은 높아짐을 알 수 있었다.

4. 결론

응집-UF 정수공정을 위한 최적응집조건을 결정하기 위한 연구결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 막분리 전처리 공정으로 응집 공정을 적용 시 UF 단

독으로 운전하였을 경우보다 투과 flux 감소가 20% 이상 작게 나타났으며, 유기 물체거울 또한 2배 이상 높게 나타났다.

2) 막분리 공정의 전처리로서의 backmixer를 이용한 응집 공정 적용시 1분의 급속혼화 ($G = 550 \text{ sec}^{-1}$) 시간만으로도 급속 + 완속혼합시와 동일한 투과 flux를 기대할 수 있었으며, 완속혼합에 따른 영향은 크지 않음을 알 수 있었다.

3) 전처리 응집 공정에서 16 mg/L as alum 주입량에서 back-mixer ($G = 550 \text{ sec}^{-1}$)와 in-line 정적혼화기 ($G = 1,160 \text{ sec}^{-1}$)로 급속혼화시 약 50% 정도의 유사한 UV₂₅₄의 제거율과 투과 flux 감소를 보였다. 그러나 DOC 제거율은 빠른 교반시간과 micromixing 환경을 조성하는 in-line 정적혼화기의 특성상 10% 정도 나은 제거율을 보였다.

4) 응집제 주입량에 따른 투과 flux의 영향에서 16 mg/L의 alum 주입량에서 투과 flux 감소가 가장 적게 나타났으며, 저주입량과 과주입량에서는 오히려 투과 flux 감소가 보다 크게 나타나 반드시 적정 응집제 주입량의 산정이 필요하다고 생각된다.

5) 막의 fouling을 유발하는 물질은 전체 용존유기물질 중에서 작은 부분으로 분자량이 크며 소수성물질과 콜로이드 물질이라고 판단되며, 이들의 물질은 응집과 같은 전처리공정을 적용하여 제거함으로써 막 오염을 줄일 수 있었다.

6) Pilot 운전 적용시 응집 - UF 공정이 UF 단독 공정보다 2배 이상 운전지속시간이 길어지며 유기물 제거율 또한 2배 이상 증가하였다. 또한 물리적 역세척을 적용시 막의 회복율면에서도 응집 전처리 공정을 적용한 경우가 보다 높게 나타남을 알 수 있었다.

참고문헌

1. James C. V., Mark A. T., and Uday G. K., "The use of membrane filtration in conjunction with coagulation processes for improved NOM removal," *Desalination*, **102**, 57~61(1995).
2. Laine, J. M., Clark, M. M., and Mallevalle, J., "Ultrafiltration of lake water : effect of pretreatment on the partitioning of organics, THM formation potential, and flux," *J. AWWA*, **82**(12), 82~87(1990).
3. 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 characteristic in coagulation - microfiltration process for water treatment," *Environ. Sci. Technol.*, **34**(17), 3780~3788(2000).
4. Croue, J. P., Lfebvre, E., Martin, B., and Legube, B., "Removal of dissolved hydrophobic and hydrophilic organic substances during coagulation/flocculation of surface wastes," *Water Sci. & Tech.*, **27**(11), 143~152(1993).
5. Mhaisalkar, V. A., Paramasivam, R., and Bhole, A. G., "Optimizing physical parameters of rapid mixing design for coagulation-flocculation of turbid waters," *Water Res.*,

- 25(1), 43~52(1991).
6. 정철우, 강민수, 최시환, 정수일, 손인식, 강임석, “응집 공정에 적합한 In-Line 정적혼화기를 이용한 혼화공정의 개선,” 상하수도학회지, **17**(3), 451~459(2003).
 7. 최시환, “정수공정 개선을 위한 급속혼화조건에 대한 연구,” 부경대학교 환경공학과 대학원 박사학위 논문(2003).
 8. 정철우, “정수공정에서 유기물질의 제거를 위한 응집-한외여과(UF)막분리 공정의 적용,” 부경대학교 환경공학과 대학원 박사학위 논문(2002).
 9. Bian, R., Watanabe, Y., Ozawa, G., and Tambo, N., “Removal of humic substances by UF and NF membrane systems,” *Water Sci. Technol.*, **40**(9), 121~129(1999).
 10. Howe, K. J. and Clark, M. M., “Coagulation pretreatment for membrane filtration,” *AWWA report foundation*, 156~158(2002).
 11. Jucker, C. and Clark, M. M., “Adsorption of aquatic humic substances on hydrophobic ultrafiltration membranes,” *J. Membr. Sci.*, **97**(27), 37~52(1994).
 12. Schäfer, A. I., Schwicker, U., Fischer, M. M., Fane, A. G., and Waite, T. D., “Microfiltration of colloids and natural organic matter,” *J. Membr. Sci.*, **171**(30), 151~172(2000).
 13. Nilson, J. A. and DiGiano, F. A., “Influence of NOM composition on nanofiltration,” *J. AWWA*, **88**(5), 53~66 (1996).