

하수 2차 처리수 재이용을 위한 hybrid 응집-UF 막분리 공정의 적용

Application of Coagulation-UF Hybrid Membrane Process for Reuse of Secondary Effluent

이철우¹ · 손정기² · 손인식² · 한승우³ · 강임석^{1,*}

Chul-Woo Lee¹ · Jung-Ki Shon² · In-Shik Shon² · Seung-Woo Han³ · Lim-Seok Kang^{1,*}

1 부경대학교 환경공학과

2 부경대학교 토목공학과

3 부산광역시의회 정책연구소

(2005년 7월 8일 논문 접수: 2005년 10월 11일 최종 수정논문 채택)

Abstract

The objective of this study was to evaluate the factors affecting the optimization of coagulation hybrid UF membrane processes for the reuse of secondary effluent from sewage treatment plant. The experimental results obtained from the UF membrane process showed that organic colloids in the size range of 0.2 μ m~1.0 μ m caused the most substantial influence on the fouling of UF membrane. When using a coagulation pretreatment to UF membrane, alum dosage of 50mg/L resulted in the least reduction in membrane permeate flux. Also, for the rapid mixing process, in-line mixer type was more efficient for organic removal than back mixer type. Therefore, it may be concluded that coagulation-UF hybrid membrane process comparing to UF alone process showed not only higher removal efficiency of organic matter, but also substantial improvement of permeate flux of UF membrane.

Key words: Secondary effluent, Reuse, UF hybrid membrane process, Coagulation, Fouling

주제어: 하수 2차 처리수, 재이용, UF hybrid 막분리공정, 응집, 파울링

1. 서론

하수 처리수의 재이용은 미국을 비롯하여, 영국, 일본 등의 많은 나라에서 이미 오래 전부터 시행되고 있으며, 미국의 경우에는 각 주(state)마다 물 재이용에 따른 가이드라인까지 설정되어 이용되고 있다

(EPA, 1992). 특히 미국의 캘리포니아주 오렌지카운티에서는 1970년 후반부터 하수처리장 방류수를 고도처리시스템(Water Factory 21)을 사용하여 농업용수 및 지하수 함양용수로 재이용하고 있으며, 이러한 고도처리시스템은 다층여과와 활성탄 공정을 비롯하여 역삼투압 막(RO) 공정으로 구성되어 있다(Asano, 1998). 현재 하수처리수의 재이용시스템으로 가장 많

*Corresponding author Tel: +82-51-620-6437, Fax: +82-51-621-8166, E-mail: kangls@pknu.ac.kr (Kang, L.S.)

이 이용되는 방법으로는 응집-침전-모래여과-활성탄 흡착-소독과 같은 공정이며(Asano, 1998; Hamoda et al., 2004), 최근에는 막분리(membrane process)에 대한 기술개발과 경제적 비용의 완화로 인하여 이를 이용한 처리 공정이 많이 연구되고 있으며, 실제로 성공적으로 적용되고 있다(Asano, 1998; Soffer et al., 2000; Ahn and Song, 1999). 또한 재이용수 처리를 위한 효과적인 막분리 시스템에 대한 다양한 연구와 시스템의 개발이 진행되고 있으며, 특히 투과 플럭스가 낮고, 낮은 압력에서 운전이 가능한 MF(Microfiltration)나 UF(Ultrafiltration)에 대한 다양한 연구도 발표되고 있다(Abdessemed et al., 2002; Bourgeois et al., 2001; Shon et al., 2004).

하지만 막 단독 사용시 막오염의 증가로 인해 투과 flux가 빠르게 감소하며, 막의 분자량 크기보다 작은 분자량을 가진 유기물질들은 막을 통과하기 때문에 효과적인 제거가 어려워져 적절한 전처리 공정이 요구된다(Mozia and Tomaszewska, 2004; Tomaszewska et al., 2004). 이에 따라 최근에는 막의 투과 플럭스와 파울링에 영향을 미치는 유기물 및 콜로이드 물질을 효과적으로 제거하기 위한 전처리공정으로서 응집공정 및 분말활성탄 공정이 적용되고 있다(Tomaszewska et al., 2004; Lin et al., 1999). 그러나 이러한 연구는 정수처리 목적으로 다양하게 이루어지고 있으나, 유기물과 콜로이드성 부유물의 특성이 상수원수와는 크게 다른 하수처리장 유출수를 이용하여 연구한 결과는 국내에서는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 하수처리수의 재이용을 위한 hybrid 응집-UF 막분리공정의 적용시 막 파울링 감소에 미치는 응집조건의 영향인자를 파악하여 효율적인 막분리공정의 운전을 위한 기초자료로 활용하고자 본 연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 원수특성

본 연구에 사용된 원수는 부산 N 하수처리장의 생물학적 공정을 거친 2차 처리수로 그 수질특성은 Table 1과 같다. 2차 처리수의 수질분석 결과, 낮은 탁도와 유기물 함량을 가지는 비교적 양호한 수질을 나타내어 재이용수로 사용하기에 적합한 수질조건으

Table 1. Raw water characteristics(Busan N sewage treatment plant effluent)

Parameters	Units	Values
pH	-	7.1~7.6
Turbidity	NTU	0.9~1.5
TOC	mg/L	3.3~5.2
UV ₂₅₄	cm ⁻¹	0.09~0.12
SUVA	m ⁻¹ /mg DOC	2.30~2.72
COD _{Cr}	mg/L	25~32
Color	Pt-Co	18~24
Coliforms	Number/mL	300~700

로 나타났으며, 또한 연구기간(2004. 5~2004. 11) 동안 수질의 변화가 적은 안정적인 수질조건을 가지는 것으로 나타났다.

2.2. 실험장치

응집-UF 막분리 공정을 위한 응집실험에 사용된 jar tester는 Phipps & Bird사 제품으로 paddle(two-blade)의 크기는 2.5^W × 7.5^Lcm이며, jar는 2L용량의 사각형 jar를 사용하였으며, 교반의 조건은 급속혼화 250rpm($G = 550\text{sec}^{-1}$)에서 1분간 교반하였다. 또한 혼화기에 종류에 따른 영향을 알아보기 in-line mixer를 사용하였으며, 크기는 내경이 0.91cm, 관 길이는 10cm로 5개의 elements로 구성되어 있다. 관 내의 수두 손실은 차압계(differential pressure transducer)를 이용하여 측정하였으며, 이를 이용하여 혼화강도(G)를 계산하였다. 그리고 실험에 사용된 batch type UF membrane 장치는 전량여과(dead end filtration) 형태로 Fig. 1과 같다. 실험에 사용된 막(membrane)은 Millipore사에서 제조된 평막으로 MWCO(molecular

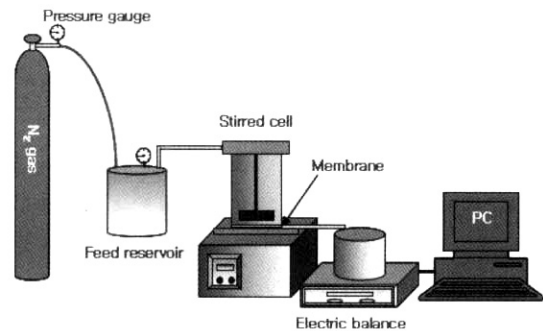


Fig. 1. Schematics of batch type UF membrane filtration assembly.

weight cut-off)가 100kDa인 친수성(hydrophilic regenerated cellulose)재질 막을 사용하였으며, 적용압력은 1.0bar로 하였다.

2.3. 실험방법

응집-UF 막분리 공정을 위한 응집공정은 급속혼화 조건만을 적용하였는데, 이는 급속혼화(1분)-UF공정과 급속혼화(1분)-완속혼화(30분)-UF공정의 예비실험에서 투과 플럭스의 차이가 거의 나타나지 않아, 공정의 단순화를 위하여 급속혼화조건만을 적용하여 실험을 실시하였다. 또한 응집의 교반조건은 교반속도에 따른 평균속도경사(G value)값을 이용하였으며, 예비실험을 통하여 이를 결정하였다.

소수성과 친수성 유기물질 분류는 XAD-8 이온교환수지(Supelco, USA)를 이용하였으며, 유기물의 분자량 분포 측정은 UF장치(Millipore, USA)를 사용하였으며, MWCO가 1, 3, 10, 100kDa인 멤브레인 필터(Millipore, USA)를 사용하였다

3. 결과 및 고찰

3.1. 하수 2차 처리수의 수질특성

Fig. 2와 같이 하수 2차 처리수의 유기물 특성을 분석한 결과, 응집을 통해 제거가 비교적 어려운 친수성(hydrophilic acid) 유기물의 성상이 60% 이상으로 나타났으며, SUVA(specific UV absorbance)도 2.3~2.7m⁻¹/mg DOC로 나타나 응집에 의한 유기물의 효과적인 제거가 어려울 것으로 판단할 수 있다. 황(1999)은 수원에 따른 유기물 특성분류에서 하수처리장의 방류수에서 인위적인 오염으로 인해 hydrophobic 성분보다 hydrophilic 성분이 더 높게 나타났다고 하였다. 이는 하수처리수중에 포함된 대부분의 유기물이 합성유기화합물로 구성되어져 있어 나타난 것으로 판단된다고 하였다. 한편 Schnitzer and Khan(1972)는 하수 2차 처리수중에 존재하는 유기물의 분자량은 수백에서 수만 Da에 이르기까지 넓게 분포하는 복합물질로 구성되어져 있다고 하였다. 하지만 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 N 하수처리장의 하수 2차 처리수의 분자량 분포를 시험한 결과 대부분의 유기물 분자량이 10kDa 이하의 비교적 낮은 분자량을 가지는 것으로 나타났다.

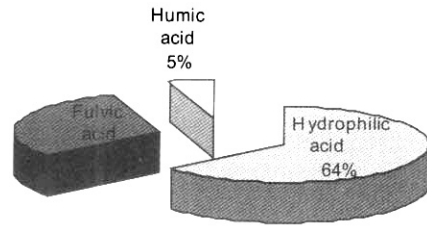


Fig. 2. TOC fraction of organic matters in secondary effluent of Busan N wastewater treatment plant.

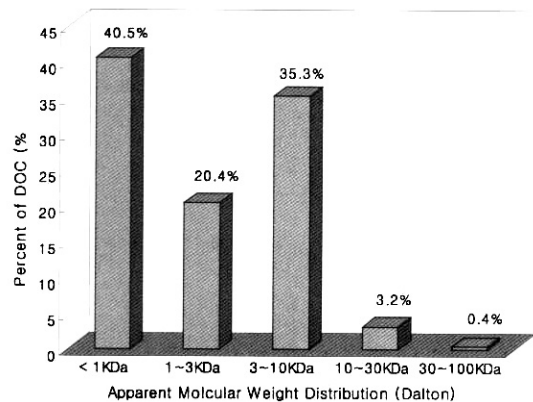


Fig. 3. AMW distribution of secondary effluent for DOC.

3.2. 막 파울링 유발물질의 특성

하수 2차 처리수의 탁도 유발물질은 대부분 생물학적 처리를 거친 생물학적 미세플록, 유기성 콜로이드와 세포의 파편들로 구성되어 있다(Asano, 1998). 따라서 이러한 유기성 플록과 콜로이드가 막의 파울링에 미치는 영향을 알아보기 위해 부유물질농도가 비교적 높은 2차 침전지 전단부에서 시수를 채수한 후 prefilter하여 이들 물질의 영향을 살펴보았다.

Fig. 4는 2차 처리수를 1.2μm GF/C 필터와 0.2μm mixed cellulose membrane 필터로 각각 여과한 후 투과 플럭스를 측정된 결과이다. 먼저 실험에 사용한 시료의 탁도는 4.6 NTU이었으며, 1.2μm 필터로 여과한 후에는 0.32 NTU, 0.2μm으로 여과한 후에는 0.15 NTU로 나타났다. Fig. 4에 나타난 결과에서 1.2μm 필터로 여과한 경우와 여과하지 않은 경우에서 투과 플럭스의 차이는 거의 나타나지 않았는데, 이는 1.2μm 이상의 비교적 큰 입자상물질은 100kDa의 UF 막에서 파울링을 유발하지 않는 것으로 판단된다. 일반적으로 막의 파울링에 큰 영향을 미치는 물질들은

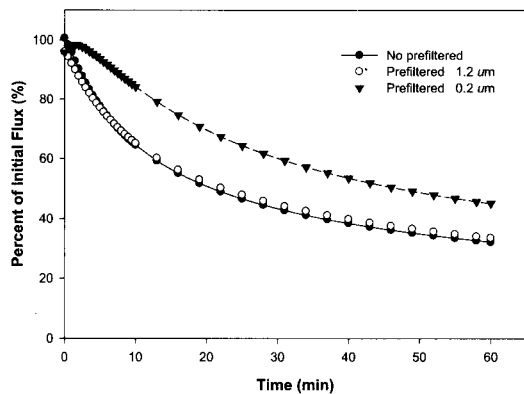


Fig. 4. Flux decline of secondary effluent after prefiltering through 1.2µm and 0.2µm filter.

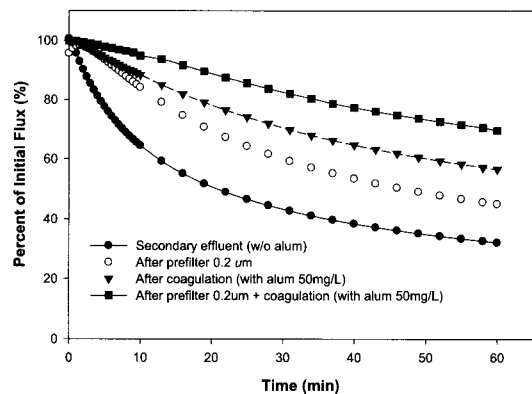


Fig. 6. Changes in flux of UF membrane under various pretreatment conditions.

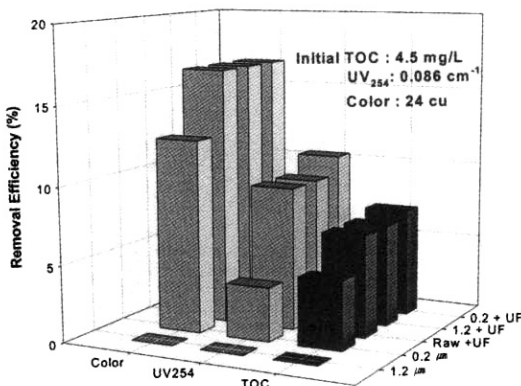


Fig. 5. Effect of prefiltration on TOC and UV₂₅₄ removal efficiency.

콜로이드상 물질과 분자량이 큰 용존 유기물질이라고 알려져 있다(Howe and Clark, 2002). 따라서 입자의 크기가 수에서 수백 μm 의 크기를 가지는 입자가 투과 플럭스에 미치는 영향은 아주 작다고 판단할 수 있다. 하지만 0.2 μm 필터로 여과한 경우 다른 두 조건보다 투과 플럭스가 상당히 증가됨을 확인할 수 있는데, 이는 Fig. 5의 결과와 같이 prefilter에 의한 유기성 콜로이드 물질의 제거에 따른 영향으로 판단할 수 있다. Lahoussine-Turcaud et al. (1990)은 0.2 μm 부근의 크기를 가지는 입자가 빠른 파울링을 유발시킨다고 하였는데, 이는 이러한 물질이 브라운 확산에 의해 전달되어지기에는 너무 크며, 전단력이나 회전력에 의해 표면으로부터 빠져 나오기에는 너무 작은 크기 때문이라고 하였다. 또한 3.0 μm 보다 큰 입자들은 투과 flux에 미치는 영향이 적다고 하였다. 한편

Howe and Clark(2002)는 막의 오염을 유발하는 용존 유기물의 영향을 파악하기 위하여 Ohio river를 이용한 sequential filtration 실험을 실시한 결과, 실제적인 막 오염물질은 전체 용존물질의 5%보다 적은 부분이라고 하였다.

이에 따라 응집공정과 prefilter의 적용에 따른 막 파울링의 영향을 알아보기 위하여 2차 처리수, 0.2 μm 필터한 2차 처리수, 급속혼화한 2차 처리수, 0.2 μm 필터한 후 급속혼화한 2차 처리수를 각각 막분리한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6의 결과와 같이 각 조건에 따른 투과 플럭스의 영향은 전처리 없이 2차 처리수를 UF 단독 적용한 것에 비해 0.2 μm 필터로 전처리 하였을 때는 13%, alum 50mg/L을 주입하여 급속혼화 시에는 24.4%, 0.2 μm 필터로 여과한 후 alum 50mg/L을 주입하여 급속혼화 시에는 40%의 투과 플럭스가 향상됨을 보였다. 이러한 결과를 통해 0.2 μm 부근의 크기를 가진 입자는 응집공정을 적용할 경우와 그렇지 않은 경우 모두에 있어서 막 파울링에 영향을 주는 것으로 나타났다.

또한 Table 2에 나타난 것처럼 0.2 μm 필터로 여과한 후 UF 공정을 적용한 경우 UF 단독공정에 비해 TOC나 UV₂₅₄ 제거율은 1% 밖에 차이가 나지 않았지만 투과 플럭스는 13%가 향상됨을 보였다. 또한 0.2 μm 필터로 여과한 후 응집처리 한 경우의 투과 플럭스는 UF 단독공정에 비해 약 40% 증가되었으며, TOC 제거율은 약 29% 증가하였다. 일반적으로 콜로이드 물질의 제거를 통해 파울링 형성의 20% 또는

Table 2. Percentage of initial flux and removal of UV₂₅₄ and TOC under various pretreatment conditions

Pretreatment Condition	Percent of initial flux (%)	Removal (%)	
		UV ₂₅₄	TOC
UF alone	32.1	9.3	6.67
0.2μm prefilter + UF	45	10.4	7.1
Alum 50mg/L + UF	56.5	33.7	22.2
0.2μm prefilter + alum 50mg/L + UF	70	38.3	28.8

이보다 작게 감소시킬 수 있다고 하였으며, 나머지 파울링을 유발하는 80%의 물질은 용존유기물질에 의한 영향이라고 하였다(Howe and Clark, 2002). 따라서 이러한 전처리 조건에도 제거되지 않고 막에서 지속적으로 파울링을 유발하는 물질은 응집을 통해 쉽게 제거되기 어려운 물질이라고 생각된다.

3.3. 응집제 주입량에 따른 투과 플럭스의 영향

Fig. 7은 응집제 주입량에 따른 하수 2차 처리수의 막 투과 flux 변화를 알아보기 위하여 alum을 10, 30, 50, 70mg/L로 주입한 후 혼화강도 $G = 550 \text{ scc}^{-1}$ 의 조건에서 1분간 급속혼화 후 막분리 실험을 실시한 결과이다. 실험결과와 같이 응집제 주입 없이 막분리를 한 경우 투과 flux가 급격히 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나 응집제의 주입량이 증가함에 따라 투과 flux가 증가하다가 과량의 주입량인 70mg/L에서는 저 주입량에 비해 flux가 오히려 더 감소하였는데, 이는 과량의 응집제 주입시 막의 파울링을 유발시키는 chemical precipitate의 과다형성으로 인한 것으로 판단되어진다. 응집처리 후 막의 파울링은 응집에 의해 제거되지 않은 유기물의 일부분과 높은 응집제 주입시 형성되는 점착성의 aluminum micro-flocs 상태의 케이크층이 형성되어 유발한다고 알려져 있다(Bian et al., 1999). 한편 Howe and Clark(2002)는 순수에 50mg/L alum을 주입한 후 침전과정 없이 바로 막분리를 실시하였을 때 초기 투과 flux보다 20% 가량의 flux 감소가 나타났다고 하였는데, 이는 높은 응집제 주입량과 침전 없이 바로 여과시 aluminum precipitate에 의한 영향으로 볼 수 있다고 하였다. 또한 그들은 막의 파울링 형성력(fouling potential)의 계산을 통해 응집한 경우와 응집하지 않은 경우 플럭스 감소의 변화를 쉽게 알 수 있다고 하였으며, 다음과 같은 식

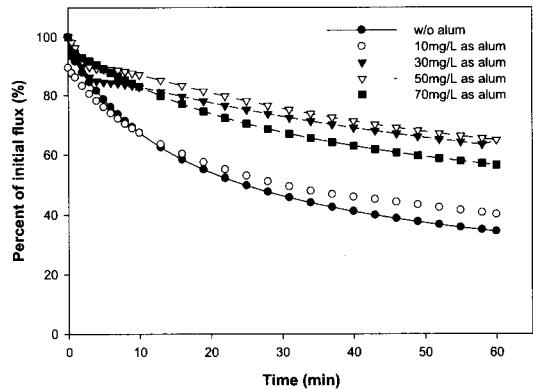


Fig. 7. Changes in flux of UF membrane under various coagulant doses.

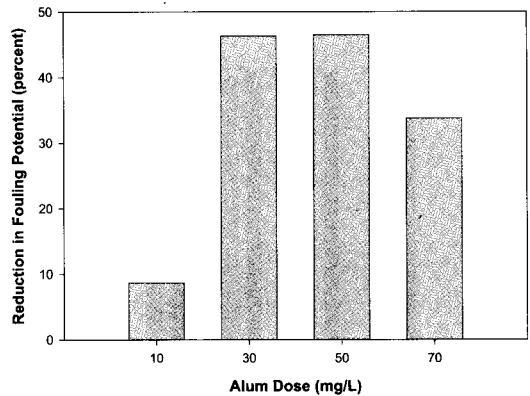


Fig. 8. Reduction of fouling potential with alum dose.

(1)으로 나타낼 수 있다.

$$\Phi = \frac{(J_C - J_R)}{(100 - J_R)} \times 100 \quad (1)$$

여기서: Φ = Reduction in fouling potential (percent)

J_R = Final flux with raw water (percent of initial permeability)

J_C = Final flux with coagulated water (percent of initial permeability)

즉, Fig. 8은 Fig. 7의 final flux 값을 이용하여 reduction in fouling potential을 나타낸 것으로 alum 주입량이 30mg/L와 50mg/L 경우 Φ 값이 각각 46%이지만 10mg/L와 70mg/L의 경우 8.6%와 33%으로

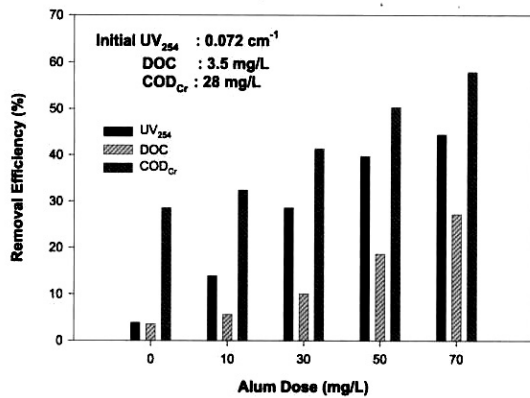


Fig. 9. Effect of coagulant dose on the removal of UV₂₅₄, DOC and COD_{Cr} for UF membrane.

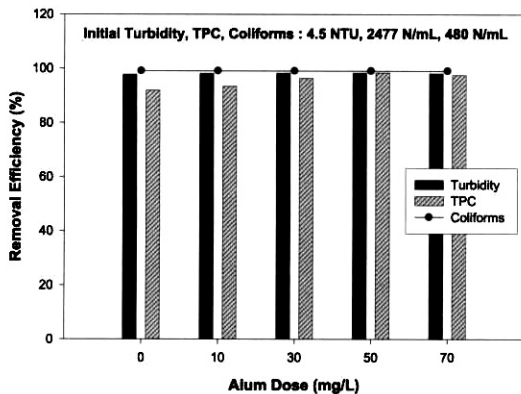


Fig. 10. Effect of coagulant dose on the removal of turbidity, TPC and coliforms for UF membrane.

낮게 나타났다. 이는 Φ 값이 클수록 flux 감소율은 적은 것이고 Φ 값이 적을수록 flux 감소율이 크다는 것을 의미하는데, 10mg/L와 70mg/L의 alum 주입량에서 더 높은 fouling potential을 가지는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 7, 8과 동일한 실험의 결과로 유기물의 제거율을 나타낸 것으로, 응집제 주입량 증가에 따라 유기물의 제거율도 증가함을 보여주고 있다. 하지만 응집제를 주입하지 않고 막 단독 적용시 DOC 및 UV₂₅₄의 제거율은 각각 3.5%와 3.8%로 아주 낮게 나타났지만 COD_{Cr}의 경우 입자상 유기물질의 제거에 따른 영향으로 비교적 높은 16.5%의 제거율을 나타내었다.

또한 동일한 실험에서 탁도와 총입자계수(TPC)와

대장균군의 제거율을 Fig. 10에 나타내었으며 탁도는 0.1NTU 이하로 98% 이상, TPC는 91% 이상, 대장균군은 검출되지 않아 100%의 제거율을 나타내었다. 하지만 하수 처리수의 재이용은 목적용도에 따라 달라지며 하천유지용수 및 레크레이션 용수(EPA, 1992)와 같은 목적으로 사용될 경우, 신체의 접촉 가능성이 예상되어 후속공정으로 소독공정이 필요하다. 따라서 막 공정 적용시 입자상물질 및 대장균군의 제거율이 매우 높더라도 인체와 접촉이 일어날 수 있는 경우 소독공정은 반드시 필요하며, 다만 처리수의 소독제의 주입량 감소와 동시에 소독효과는 증가시킬 수 있다고 판단된다.

3.4. 금속혼화 장치의 영향

금속혼화장치에 따른 막의 투과 플럭스 영향을 알아보기 위하여 back mixer type과 in-line mixer type의 혼화기를 사용하였으며, 이때 혼화강도(G)는 각각 550sec⁻¹, 630sec⁻¹이며, 혼화시간은 60초와 1.2초로 하였다. Fig. 11은 혼화장치에 따른 투과 플럭스를 나타낸 것으로, alum을 50mg/L 주입하여 금속혼화 후 막분리 실험을 수행하였다. Fig. 11의 결과와 같이 back mixer type에 비해 in-line mixer type에서 투과 플럭스 감소가 낮게 나타나고 있음을 확인할 수 있는데, 이는 혼화강도가 크고, 혼화시간이 짧은 in-line mixer type에서 보다 효과적인 응집조건을 형성하여 발생한 결과라 판단된다.

Fig. 12는 응집제 주입량에 따른 두 혼화장치의 제타전위(zeta-potential)를 비교한 것으로 먼저 2차 처리수의 제타전위는 -33mV로 나타났다. Back mixer type과 in-line mixer type의 혼화기를 이용하여, alum 50mg/L를 주입한 후 각각 금속혼화한 후 입자의 제타전위는 -14mV, -9mV로 나타나, 혼화강도가 크고, 혼화시간이 짧은 in-line mixer에서 보다 효과적인 전하중화가 발생된 것으로 판단할 수 있다. 이러한 결과는 Table 3에서 나타난 바와 같이 높은 혼화강도를 유발하는 in-line mixer type이 back mixer type에 비해 더 많은 유기물의 제거가 일어남을 알 수 있다. 상수 원수를 이용한 정 등(2003)의 연구결과에서도 in-line mixer type의 혼화기가 더 높은 전하중화(Adsorption/Charge Neutralization, A/N) 메커니즘을 유발하여 더 많은 유기물의 제거가 일어났다고 하였다.

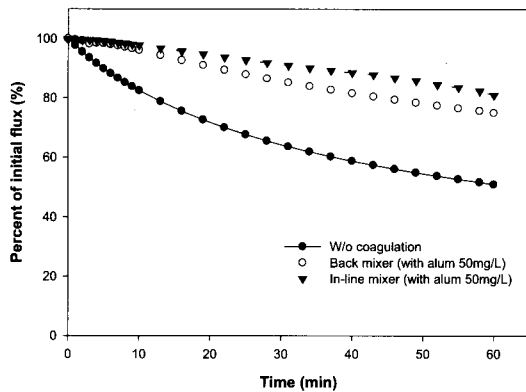


Fig. 11. Effect of rapid mixing type on flux decline of UF hybrid membrane.

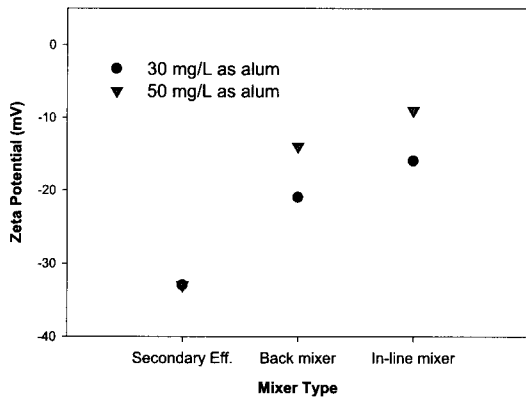


Fig. 12. Effect of rapid mixing type on zeta potential.

Ventresgue and Bablon(1988)은 혼화강도가 400sec⁻¹인 back mixer type과 in-line ejector에 의한 급속혼화를 비교한 결과 in-line ejector에서 효과적인 전하중화가 일어나 응집효율이 더 높게 나타났다고 하였다. 따라서 막분리 공정의 전처리로 응집공정의 적용시 in-line mixer type이 back mixer type에 비해 더 많은 유기물의 제거가 가능하며, 이에 따라 막의 파울링을 더욱 감소시킬 수 있다고 판단된다. 또한 back mixer type의 경우 혼화장치에서 막으로 유체를 보내기 위해서는 펌프가 필요하며, 펌프를 통과하면서 플럭의 깨짐 현상이 일어나 효율적이 못하다는 연구결과도 제시되고 있다(김 등, 2004). 따라서 back mixer type에 비해 in-line mixer type의 혼화장치는 유기물의 제거 측면에서 동일하거나 또는 이보다 높은 제거율을

Table 3. Effect of rapid mixing type on the removal of UV₂₅₄ and DOC for UF hybrid membrane

Mixing Conditions	Removal (%)	
	UV ₂₅₄	DOC
Back mixer	51.7	38.1
In-line mixer	53.5	45.1

가지면서 동력비 · 부지면적 감소 등의 여러 가지 장점이 있어 응집-UF 막분리 공정의 급속혼화장치로서 효과적인 장치라고 판단된다.

4. 결 론

하수 2차 처리수의 재이용을 위한 hybrid 응집-UF 막분리 공정의 적용에서 막 파울링과 유기물 제거 등에 미치는 기초적인 영향 인자에 대한 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구대상 원수인 부산 N 하수 처리장의 2차 처리수의 유기물 특성의 경우 hydrophilic acid가 64%, humic acid 5%, fulvic acid 31%로 나타났으며, 분자량 분포의 경우 10kDa 이하의 작은 분자량의 구성으로 나타났다.

2. 100kDa UF 막에서 파울링에 상당한 영향을 미치는 물질은 0.2 μ m~1.2 μ m 크기 범위의 유기성 콜로이드 물질이었으며, 1.2 μ m 이상의 크기를 가지는 입자상물질은 파울링에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

3. Alum 응집제 주입량에 따른 하수 2차 처리수의 막 투과 flux 감소가 가장 작게 나타난 것은 50mg/L의 alum 주입량으로 나타났으며, 70mg/L 이상의 과 주입량에서는 Al chemical precipitate의 과다형성으로 인해 투과 플럭스 감소가 더 크게 나타났다.

4. 급속혼화 장치에 따른 막 파울링의 영향에서 back mixer type에 비해 in-line mixer type의 적용이 더 효율적인 전하중화를 유발하여 막 파울링의 예방에 효율적인 것으로 판단되었다.

5. Hybrid 응집-UF membrane 공정의 적용은 0.1 NTU 이하의 높은 탁도제거와 완벽한 대장균의 제거와 동시에 상당량의 유기물의 제거를 이룰 수 있어 효과적인 하수 재이용수 처리시스템으로 평가되었다.

사 사

이 논문은 2004학년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 김수한, 박회경 (2004) 인라인 주입방식을 활용한 응집-정밀여과 공정의 효율향상. *대한환경공학회지*, **26**(1), pp. 7-14.
- 정철우, 강민수, 최시환, 정수일, 손인식, 강임석 (2003) 응집공정에 적합한 In-Line 정적혼화기를 이용한 혼화공정의 개선. *상하수도학회지*, **17**(3), pp. 451-459.
- 황정은 (1999) 정수공정에 의한 유기물의 특성변화. 부경대학교 석사 학위논문.
- Abdessemed, D., Nezzal, G. and Ben Aim, R. (2002) Fractionation of secondary effluent with membrane separation, *Desalination*, **146**2, pp. 433-437.
- Ahn, K.H. and Song, K.G. (1999) Treatment of domestic wastewater using microfiltration for reuse of wastewater, *Desalination*, **126**, pp. 7-14.
- Asano, T. (1998) Wastewater reclamation and reuse, CRC press, USA: Technomic publishing company.
- Bian, R., Watanabe, Y., Tambo, N. and Ozawa, G. (1999) Removal of humic substances by UF and NF membrane systems, *Wat. Sci. Tech.*, **40**(9), pp. 121-129.
- Bourgeois, K.N., Darby, J.L. and Tchobanoglous, G. (2001) Ultrafiltration of wastewater: effects of particles, mode of operation, and backwash effectiveness, *Wat. Res.*, **35**(1), pp. 77-90.
- EPA, (1992) Manual-guideline for water reuse, EPA/625/R-92/004, U.S. environmental protection agency and U.S. agency for international development, washington, DC.
- Hamoda, M.F., Al-Ghusain, I. and Al-Mutairi, N.Z. (2004) Sand filtration of wastewater for tertiary treatment and water reuse, *Desalination*, **164**, pp. 203-211.
- Howe, K.J. and Clark, M.M. (2002) Coagulation pretreatment for membrane filtration, AWWA Research Foundation, Denver, AWWARF & AWWA.
- Lahoussine-Turcaud, V., Wiesner, M. R. and Bottero, J. Y. (1990) Fouling in tangential flow ultrafiltration: The effect of colloid size and coagulation pretreatment, *J. Memb. Sci.*, **51**, pp. 173-190.
- Lin, C.F., Huang, Y.J. and Hao, O.J. (1999) Ultrafiltration processes for removing humic substance: effect of molecular weight fractions and PAC treatment, *Wat. Res.*, **33**(5), pp. 1252-1264.
- Mozia, S. and Tomaszewska, M. (2004) Treatment of surface water using hybrid process-adsorption on PAC and ultrafiltration, *Desalination*, **162**, pp. 23-31.
- Schnitzer, M. and Khan, S.U. (1972) Humic substances in the environment, Marcel dekker, New York.
- Shon, H.K., Vigneswaran, S., Kim, I.S., Cho, J. and Ngo, H.H. (2004) Effect of pretreatment on the fouling of membranes: application in biologically treated sewage effluent, *J. Memb. Sci.*, **234**, pp. 111-120.
- Soffer, Y., Ben Aim, R. and Adin, A. (2000) Membrane for water reuse: effect of pre-coagulation on fouling and selectivity, *Wat. Sci. Tech.*, **42**(1-2), pp. 367-372.
- Tomaszewska, M. and Mozia, S. and Morawski, A.W. (2004) Removal of organic matter by coagulation enhanced with adsorption on PAC, *Desalination*, **161**, pp. 79-87.
- Ventresque, C. and Bablon, G. (1988) New Coagulant Injection Process. In: Pretreatment in Chemical Water and Wastewater Treatment, H.H. Hahn and R. Klute (eds.), Springer, Berlin Heidelberg New York.