



세라믹 막여과의 성능향상을 위한 응집 전처리의 적용

Application of coagulation pretreatment for enhancing the performance of ceramic membrane filtration

강준석¹·송지영¹·박서경¹·정아영¹·이정준¹·서인석²·채선하²·김성수²·김한승^{1*}
Joon-Seok Kang¹·Jiyong Song¹·Seogyong Park¹·Ahyoung Jeong¹·Jeong-Jun Lee¹·Inseok Seo²·
Seonha Chae²·Seongsu Kim²·Han-Seung Kim^{1*}

¹명지대학교 환경에너지공학과, ²K-water 연구원 스마트워터연구소
¹Department of Environmental Engineering and Energy, Myongji University
²Water Supply Resurch Center, K-water Institute

ABSTRACT

In this study, it is estimated that ceramic membrane process which can operate stably in harsh conditions replacing existing organic membrane connected with coagulation, sedimentation etc. . Jar-test was conducted by using artificial raw water containing kaolin and humic acid. It was observed that coagulant (A-PAC, 10.6%) 4mg/l is the optimal dose. As a results of evaluation of membrane single filtration process (A), coagulation-membrane filtration process (B) and coagulation-sedimentation-membrane filtration process (C), TMP variation is stable regardless of in Flux 2 m³/m²·day. But in Flux 5 m³/m²·day, it show change of 1-89.3 kpa by process. TMP of process (B) and (C) is increased 11.8, 0.6 kpa each. But, the (A) showed the greatest change of TMP. When evaluate (A) and (C) in Flux 10 m³/m²·day, TMP of (A) stopped operation being exceeded 120 kpa in 20 minutes. On the other hand, TMP of (C) is increased only 3 kpa in 120 minutes. Through this, membrane filtration process can be operated stably by using the linkage between the pretreatment process and the ceramic membrane filtration process. Turbidity of treated water remained under 0.1 NTU regardless of flux condition and DOC and UV₂₅₄ showed a removal rate of 65-85%, 95% more each at process connected with pretreatment. Physical cleaning was carried out using water and air of 500kpa to show the recovery of pollutants formed on membrane surface by filtration. In (A) process, TMP has increased rapidly and decreased the recovery by physical cleaning as the flux rises. This means that contamination on membrane surface is irreversible fouling difficult to recover by using physical cleaning. Process (B) and (C) are observed high recovery rate of 60% more in high flux and especially recovery rate of process (B) is the highest at 95.8%. This can be judged that the coagulation flocs in the raw water formed cake layer with irreversible fouling and are favorable to physical cleaning. As a result of estimation, observe that ceramic membrane filtration connected with pretreatment improves efficiency of filtration and recovery rate of physical cleaning. And ceramic membrane which is possible to operate in the higher flux than organic membrane can be reduce the area of water purification facilities and secure a stable quantity of water by connecting the ceramic membrane with pretreatment process.

Key words: Ceramic membrane, Coagulation, Sedimentation, Membrane Flux, Microfiltration

주제어: 세라믹 막, 응집, 침전, 막여유속, 정밀여과

Received 10 July 2017, revised 8 November 2017, accepted 10 November 2017
*Corresponding author: Han-Seung Kim (E-mail: kimhs210@mju.ac.kr)

pp. 481-490
pp. 491-499
pp. 501-510
pp. 511-519
pp. 521-527
pp. 529-537
pp. 539-549
pp. 551-566
pp. 567-575
pp. 577-586
pp. 587-597
pp. 599-609
pp. 611-618
pp. 619-628

1. 서 론

산업이 발전하면서 탁도물질, 유기물질, 무기물질 및 색도유발물질에 의한 수질오염이 심화되면서 깨끗한 물을 얻고자 환경에 대한 관심과 충분한 수자원 확보를 위한 노력이 증가되고 이를 제거하기 위한 정수처리 공정의 연구가 진행되고 있다(Lee and Oh, 1999; Guigui et al., 2002; Choksuchart et al., 2002). 기존의 재래식 정수처리공정은 여과층 사이의 세균번식과 유기, 무기물질의 제거에 어려움이 있어 활성탄을 이용한 흡착공정이나 오존산화처리와 같은 후처리가 필요하다(kwon et al., 2008; Lee and Oh, 2003). 한편, 고도정수처리 공정인 막 분리 공정을 사용하면서 기존보다 우수한 처리수질을 얻을 수 있게 되었고 이를 적용함에 따라 설비의 간소화, 부지 면적의 최소화 및 자동화로 인한 안정적인 수질확보 등의 이점이 생기게 되었다(Kim and Park, 2001). 현재 막여과 수처리 공정에서는 주로 유기막을 사용하고 있지만 고온, 고압에서 운전의 어려움 및 낮은 재생성과 생물, 화학적 안정성 등의 문제 때문에 이를 대체할 모든 조건에서 안정적으로 장기간 운전 가능한 세라믹막에 대한 개발이 수요가 높아지고 있다(Hyun, 1993; Uhlhorn et al., 1992; Chan and Brownstein, 1991). 세라믹 분리막의 경우, 유기계 막에 비해 원료가격 및 제조공정 등의 단점이 있지만 고온 및 고압 하에서도 특성유지가 가능하고 유기막보다 단순한 형상과 배열(configuration)을 갖기 때문에 오염되었을 때 세척이 용이해 고농도의 농축 및 높은 투과율을 일정하게 유지할 수 있으며 고탁도, 고집도 용액에 적용 가능한 장점이 있다. 또

한 내화학성 및 내마모성이 우수하여 유기용매나 산-알칼리 용액에 장기간 노출시켜도 막에 손상이 가해 지지 않고, pH 1-14의 전 범위에서 안정하기 때문에 강산, 강염기 용액에 적용이 가능하다. 유기막의 경우 정수처리 공정에서 약품세정에 의한 막 재질의 손상이나 변형이 발생하는 반면, 세라믹 막은 우수한 내화학성으로 인해 약품세정에 의한 손상이 적기 때문에 반영구적 사용이 가능한 장점이 있다(Kim, 1993; Charpin et al., 1987; Shimizu et al., 1988). 또한, 세라믹 막은 친수성의 특성을 가지고 있어 정수처리 공정에서의 일반적인 여과 플럭스가 2.0~4.0 m³/m²·일로 유기막에 비해 2~3배 이상으로 높아 동일한 막여과 시설 대비 다량의 투과수량을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다(Cha and Chi, 2011; Moritz et al., 2011b). 유기막과 세라믹막의 주요 특성 비교는 Table 1에 제시하였다(Ha, 2013).

국내의 경우 수자원공사의 연초정수장은 기존정수장의 제한된 부지조건을 극복하고 조류발생으로 인한 맛·냄새 및 소독부산물 처리와 조류와 철·망간에 의한 막오염 현상을 극복하기 위하여 오존 및 화학약품에 내구성이 강한 세라믹 분리막을 적용한 것으로 알려져 있다(You et al., 2014). 연초정수장은 평시 막여과 유속 1.5 ~ 2 m³/m²·일의 조건(최대 3m³/m²·일)으로 운영하며 이는 일반적인 유기막 정수장의 막여과 유속 1 ~ 1.5 m³/m²·일보다 높은 조건으로 부지면적 대비 높은 생산수량을 확보하고 있다.

막 분리 공정 적용 시 고려해야 할 점은 자연유기물과 콜로이드성 및 입자성 물질 등의 오염물질의 제거율을 높여 막의 오염을 최소화 시키고 처리 수질과 수량을

Table 1. Main Features of ceramic membranes (Vs. polymeric membranes)

Attributes	Deficiencies
<ul style="list-style-type: none"> - High flux (up to 400 l/mh) at relatively low pressure – high permeability - High recovery (99%) - Very high backwash flux possible (50 times than forward flux) – water: up to 5 bar; air: up to 2 bar; strong CEB possible) - High durability against oxidants, strong acids, bases, and temperature – can be aggressively cleaned - Hydrophilic membrane surface - High security regarding membrane integrity – resistance to physical breakage - Long service life/wear-resistant (approximately 20 years) 	<ul style="list-style-type: none"> - Relatively small packing density (m²/m³) - Relatively high price (per m²) - Sensitive to crack formation



향상시키는 것이다(Ahn et al., 2005). 자연수에 포함된 유기물질은 정수처리 공정에서 맛, 냄새, 색도를 유발시키고 응집제 및 소독제의 소비량을 증가시킨다(White et al., 1997). 무엇보다 자연유기물질 (NOM)은 산화 및 소독에 사용되는 염소와 반응하여 인체에 유해한 THMs (Trihalomethanes)와 HAAs (Haloacetic acids)와 같은 할로겐화된 소독부산물(DBPs ; Disinfection by-products)을 생성한다고 알려져 있다(Crozes et al., 1995). THMs를 줄이기 위한 가장 효율적인 방법은 전구 물질인 NOM을 사전에 제거하여 THMs를 저감하는 방법이며 기존 시설에 적용 가능하여야 한다. 또한, 원수 내의 문제가 되는 탁도 유발 물질 중 콜로이드성 물질은 표면이 음전하를 띠고 서로간의 반발력으로 인해 가라앉지 않고 안정적으로 부유한 상태이다(Gregory, 1988). 이에 응집제를 주입하면 가수분해 되면서 짧은 시간 내에 균일하게 확산되어 원수 내의 오염물질을 중화 및 응집시켜 침전성이 우수한 큰 플록을 생성하여 제거할 수 있다(Gregory and Duan, 2001). 기존의 응집공정과 막여과 연계공정은 대부분 유기막을 적용한 여과공정에서의 전처리 효율을 평가한 연구는 많이 있는 반면 세라믹 막 여과에 효율 및 성능에 대한 연구가 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 세라믹 막의 장점을 활용하여 높은 막여과 유속조건에서 안정적인 수량 및 수질 확보 가능성을 평가하고 공정별 막간차압변화량 (TMP; Trans-membrane Pressure)을 통해 응집 및 침전 전처리 연계공정에 따른 세라믹 분리막의 여과효율을 평가하고자 한다. 전처리 연계 공정별 막간차압 관찰을 통해 전처리 공정이 막여과 공정에 미치는 영향을 검토하고 막여과 유속을 2, 5, 10 m³/m²·일로 조정하여 높은 막여과 유속조건에서의 운영가능성을 확보하고자 한다.

2. Methods

2.1 실험원수

인공원수는 DI water에 탁도 유발물질로 kaolin (SHOWA)을 주입하여 50mg/L를 농도로 제조하고, 유기물질로는 humic acid (SIGMA-ALDRICH) 1,000mg/L를 제조하여 Glass Microfiber Filters (GF/C 47mm, Whatman)로 여과한 후 25배 희석하여 Table 2와 같이 조제하였다. 제조된 인공원수의 평균 탁도는 23.7 NTU, DOC 농도는 약 4 mg/L이다.

Table 2. Characteristics of water quality in synthetic feed water

Parameters	Range		
	Maximum	Minimum	Average
Temperature (°C)	24.3	21.0	22.6
Turbidity (NTU)	28.7	22.4	23.7
UV ₂₅₄ (1/cm)	0.3460	0.2032	0.2840
DOC(mg/L)	5.321	2.684	4.016

2.2 응집실험 (Jar-test)

제조된 인공원수의 응집특성과 최적 응집제 주입량 확인을 위해 회분식 응집실험을 진행하였다. 응집제로는 10.6% A-PAC(High Basicity Poly Aluminium Chloride, EYOUNG chemical)를 DI water로 희석하여 1%의 stock solution을 제조하여 사용하였다. 응집실험은 급속교반 (120rpm, 15sec), 완속교반 (20rpm, 20min), 침전 (0rpm, 20min)의 조건으로 진행하였다.

2.3 Lab-scale 세라믹 평가장치

실험에 사용된 세라믹 분리막의 특징은 Table 3에 나타내었다. 0.1µm의 pore를 갖는 MF ceramic membrane을 이용하였으며 Fig. 1의 Lab-scale 막여과 장치를 통해 여과하였으며 여과시간 동안의 막간차압 변화량(TMP)을 측정하고 처리수질을 분석하였다. 막여과 장치는 막간차압 변화에 따른 처리수의 유량 감소를 자동으로 제어하여 일정한 막여과 유속을 유지하는 정유량제어 방식으로 운전하였으며 여과시간은 120분으로 설정하였다. 여과 후에는 물과 공기를 이용해 500 kpa의 압력으로 물리세척을 실시하여 여과에 의한 막의 오염도와 물리세척에 의한 회복률을 관찰하였다.

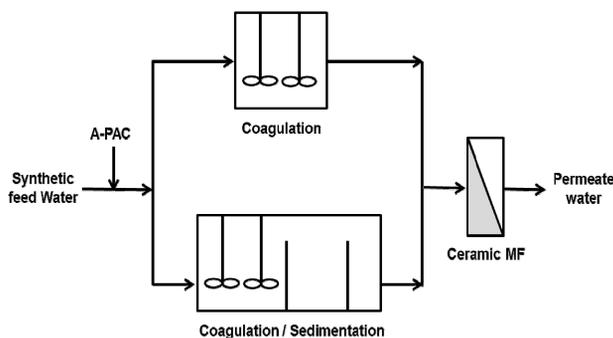


Fig. 1. Schematic of seawater desalination pretreatment system using Ceramic MF.

pp. 481-490
pp. 491-499
pp. 501-510
pp. 511-519
pp. 521-527
pp. 529-537
pp. 539-549
pp. 551-566
pp. 567-575
pp. 577-586
pp. 587-597
pp. 599-609
pp. 611-618
pp. 619-628

Table 3. Characteristics of Membrane

Ceramic membrane Type	Contents	Membrane Module
Material	Ceramic (Al ₂ O ₃)	
Type	Inner-pressured type monolith	
Nominal pore size	0.1μm	
Dimension	(Φ)30mm × 100mm(L)	
Size of channel	f 2.0mm	
Number of channel	55	
Membrane surface area	0.035m ²	
pH range of acceptable	1~14	
Max. Operating pressure	20kgf/cm ²	
Manufactory	Metawater	

2.2 분석방법

원수와 처리수의 수질 분석 항목은 pH, 탁도, DOC, UV₂₅₄ 등을 분석하였다. Turbidity는 HACH사의 2100N Turbidimeter를 통해 측정하였고, UV₂₅₄ 흡광도는 Shimadzu사의 UV-1800, Shimadzu를 사용하여 254nm에서 측정하였다. DOC 분석에는 Shimadzu사의 TOC-V를 사용하여 NPOC(Non-purgeable organic carbon)를 측정하였다. UV₂₅₄, DOC 분석시료는 0.45μm PVDF filter (Syringe Filter, Whatman)로 여과하여 사용하였다.

3. Results and Discussion

3.1 전처리 조건 선정

응집제 주입량에 따른 응집효율과 최적응집제 주입량을 평가하기 위해 진행된 Jar-test는 A-PAC (10.6 % as Al)를 10,000 ppm으로 제조하여 5 ~ 30 mg/L의 농도로 주입하였다. 또한, 원수 pH에 따른 응집/침전 효율을 평가하기 위하여 0.1 N NaOH를 이용해 pH를 8과 10으로 조절하여 Jar-test를 진행하였으며 결과는 Fig. 2와 같다. 탁도 제거율은 침전이 포함된 공정에서 pH에 관계없이 응집제 5 mg/L 주입 시 가장 좋은 효율을 보였으며 UV₂₅₄와 DOC는 5 ~ 15 mg/L 범위에서 높은 효율을 보였다. pH 10으로 조정하여 평가한 결과에서 탁도 제거율은 pH 조건에서 큰 차이를 보이지 않지만 응집제 주입에 의한 pH 강하 정도에 따라 탁도 제거율의 차이를 보이는 것으로 확인되었다. Jar-test를 통해 최적 응집제 주입량의 범위가 5 ~ 10 mg/L임을 확인하였으며 세부 최적응집제 주입량 평가

를 위해 추가적으로 응집제 1 ~ 10 mg/L의 농도에서의 평가를 진행하였다. Jar-test 결과 혼화/응집 공정과 혼화/응집-침전 공정에서 4 mg/L 주입시 탁도, UV₂₅₄, DOC 최저농도로 확인되어 최적응집제 주입량은 4 mg/L로 선정하였다. (Fig. 3-4) SUVA의 분석값을 보았을 때, 자외선흡광도 254nm 파장에서 흡수되는 용존 유기물 중 벤젠류와 불포화 지방족 물질들이 많이 포함된 소수성의 고분자 물질인 humic acid가 응집 및 침전에 의해 효과적으로 제거된 것을 확인하였다.

응집제의 알루미늄 형태는 Al₃⁺로 존재하며 적정 pH의 범위에서 수중의 OH⁻와 결합하여 (+) 이온인 Al₆(OH)₄⁺의 형태로 존재하게 되며 이때 하전 중화력에 의해 가장 효율적인 응집 및 침전이 일어나는 것으로 판단된다. 적정 pH 이하로 강산성화 될수록 OH⁻가 부족하여 응집이 발생하지 않으며 이로 인해 응집제 10 mg/L 이상 주입 시 응집 floc을 형성하지 못한 잔류 응집제에 의해 탁도 제거율이 감소하는 것으로 판단된다.

3.2 전처리 공정 별 막여과 평가

전처리 공정과 막여과 공정의 조합을 통한 전처리 수질관리로 막여과 유입수의 수질을 안정적으로 처리할 수 있는 전처리 공정의 선정과 조건을 도출하기 위하여 전처리 공정에 따른 막여과 수질 및 차압변화를 관찰하였다. 원수-막여과(A), 혼화/응집-막여과(B), 혼화/응집-침전-막여과(C) 공정으로 진행하였다. 혼화/응집공정의 응집제 주입량은 앞에서 진행된 Jar-test 결과인 4 mg/L로 진행하였으며 Membrane Flux는 2 m³/m²·day로 평가하였다. 전처리 공정에 따른 막여과 공정의 효율을 평가한 결과는 Fig. 5에 제시하였다.

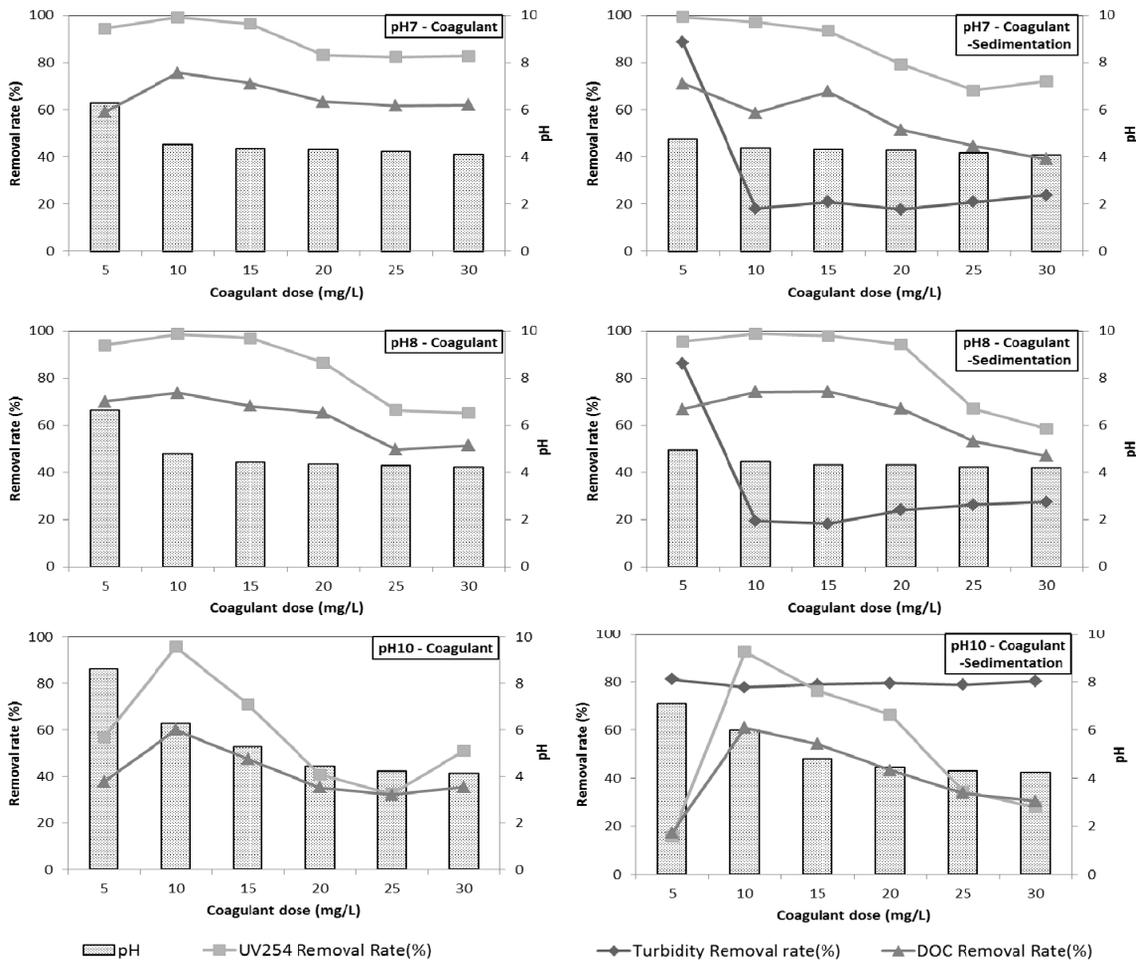


Fig. 2. Comparison of permeate water quality at pH 7, 8, 10.

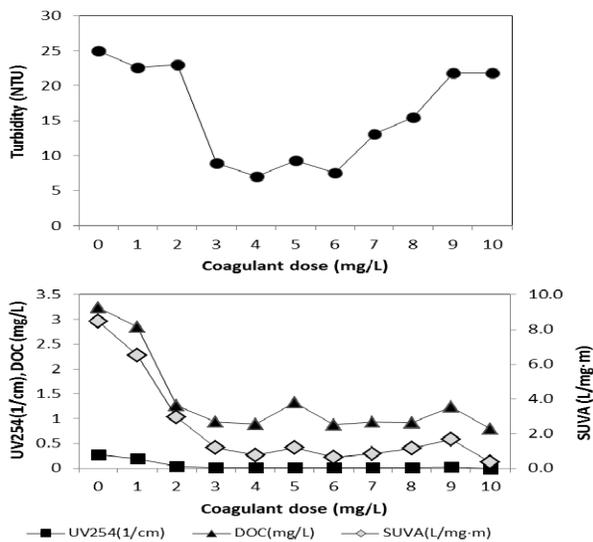


Fig. 3. Water quality of coagulation/flocculation pretreatment (pH 7).

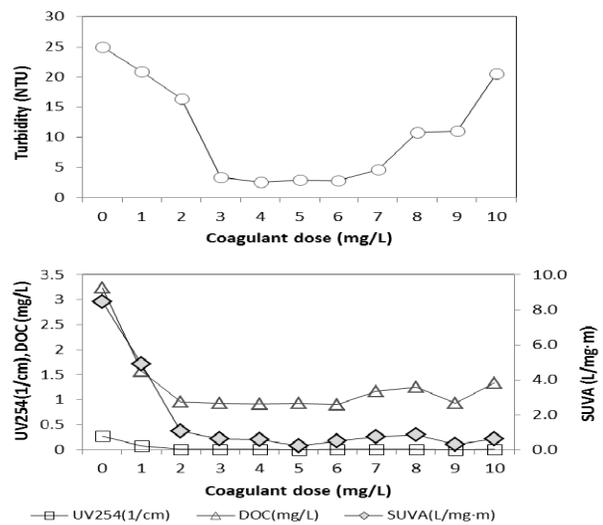


Fig. 4. Water quality of coagulation/flocculation-sedimentation pretreatment (pH 7).

pp. 481-490
pp. 491-499
pp. 501-510
pp. 511-519
pp. 521-527
pp. 529-537
pp. 539-549
pp. 551-566
pp. 567-575
pp. 577-586
pp. 587-597
pp. 599-609
pp. 611-618
pp. 619-628

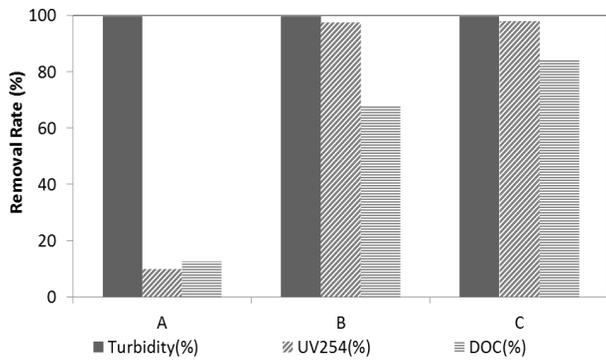


Fig. 5. Removal rate of each pretreatment combined MF process.

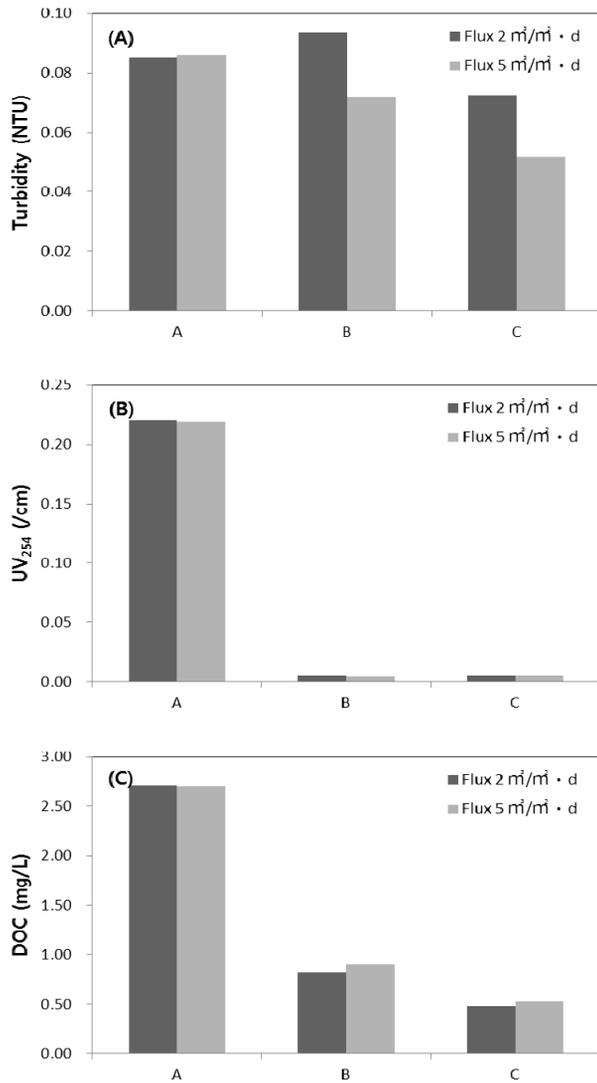


Fig. 6. Concentration of permeate water at different conditions ((A) Turbidity, (B) UV₂₅₄, (C) DOC).

탁도 제거율은 모든 조건에서 99 % 이상의 높은 제거율을 보였다. 단독여과 공정인 A 공정의 탁도 제거율은 99.7 %로 다른 공정과 큰 차이를 보이지 않는 것으로 확인되었다. 유기물 제거율은 응집 연계 공정인 B, C에서 UV₂₅₄ 제거율은 95% 이상, DOC 제거율은 65 - 85%로 확인되었다.

flux 조건에 의한 영향을 확인하기 위하여 동일한 조건에서 flux를 2와 5 m³/m²·day로 조절하여 평가하였다. 세라믹 막은 유기막에 비해 상대적으로 높은 flux로 운영이 가능하므로 높은 flux에 따른 특성변화를 관찰하기 위하여 전처리 공정별 처리수를 이용하여 flux조건이 막여과 공정에 미치는 영향을 확인하였다. (Fig. 6) Flux를 2와 5 m³/m²·day로 조정하여 평가한 결과, flux 조건에 관계없이 처리수질은 탁도 0.1 NTU 이하를 유지하였으며 UV₂₅₄와 DOC 결과 또한 유사한 경향을 보였다.

3.3 전처리 공정 별 차압변화 관찰

MF 공정의 유입수질에 따른 차압변화를 관찰하기 위하여 전처리 공정과 flux조건 별 TMP변화를 관찰하였으며 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 전처리 공정별 처리수를 막여과 유입수로 2시간 여과하였으며 flux를 2와 5 m³/m²·day로 조정하였다. Flux 2 m³/m²·day조건에서 전처리 공정 별 TMP 변화는 120분간 0.5 - 1.4 kpa로 큰 변화를 보이지 않았으나 flux 5 m³/m²·day에서는 1 - 89.3 kpa로 전처리 공정에 따라 큰 차이를 보였다. 침전 공정이 포함된 C 공정은 120분간 flux 조건 별 차압변화가 0.6 kpa로 매우 안정적인 TMP 변화를 보였으나, 원수를 직접 여과하는 A 공정은 89.3 kpa로 본 실험에 적용된 전처리 중 가장 큰 차압변화를 보였다. Flux 5 m³/m²·day에서 A 공정은 초기차압 20.7 kpa에서 30분동안 큰 변화를 보이지 않았으나 이후 점차 증가하여 60분 이후 급격하게 차압이 상승, 120분 후에는 110.0 kpa로 120분간 89.3 kpa의 TMP가 상승한 것으로 확인되었다. 침전이 없는 B 공정은 초기차압 17.7 kpa에서 60분 이후 점차적으로 차압이 상승하였으며 120 min 후에는 11.8 kpa 증가한 29.5 kpa로 확인되었다. 침전이 포함된 공정의 경우, 탁도와 유기물 같은 막오염을 유발시키는 물질을 일차적으로 제거함으로써 막여과 공정에서 안정적인 TMP를 유지하는 것으로 확인되며 막여과 공정에서 전처리 공정의 중요성을 확인하였다.

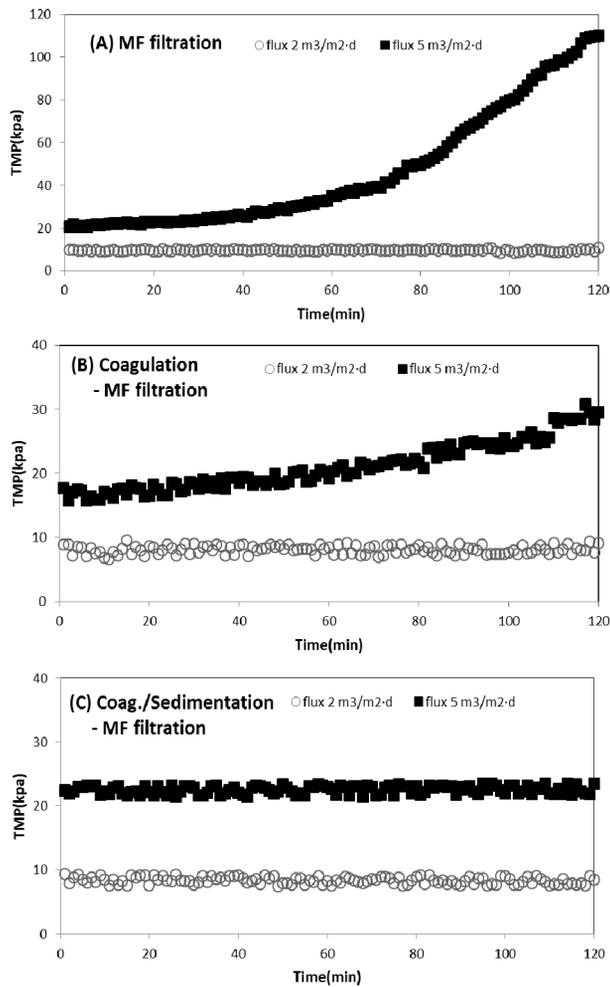


Fig. 7. Comparison of TMP by pretreatment process and operating conditions.

Flux $10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 조건에서 운영가능성 확인을 위해 가장 안정적인 TMP 변화를 보인 C공정과 flux $5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 의 조건에서 급격한 TMP 상승을 보인 A 공정을 비교평가 하였으며 실험결과는 Fig. 8 - 9에 제시하였다. 이는 현장 적용 시 막모듈의 세정시기 또는 계열 설비 이상 등으로 설비의 일부를 중단할 경우에 안정적인 용수공급이 가능한지 여부에 대한 평가이다. 처리수질은 다른 flux 조건과 유사한 경향을 보였으나 flux가 상승할수록 UV₂₅₄와 DOC의 제거율이 상승하는 경향을 확인하였다. 이는 막오염(Membrane Fouling)으로 인해 막표면에 형성된 Cake layer에 의해 MF 막여과 공정에서 제거가 어려운 유기물질의 일부가 Cake filtration 현상에 의해 제거되는 것으로 판단된다. Flux $2 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 와 $5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 조건에서 막여과

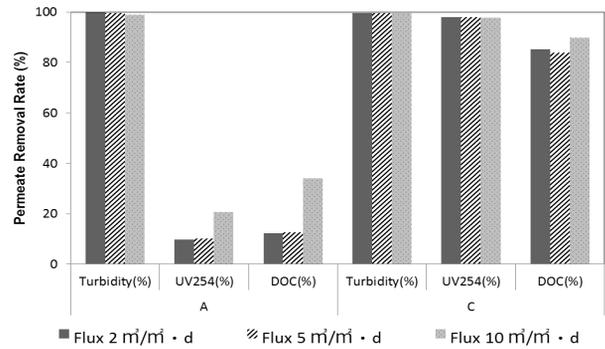


Fig. 8. Removal rate of concentration at different flux.

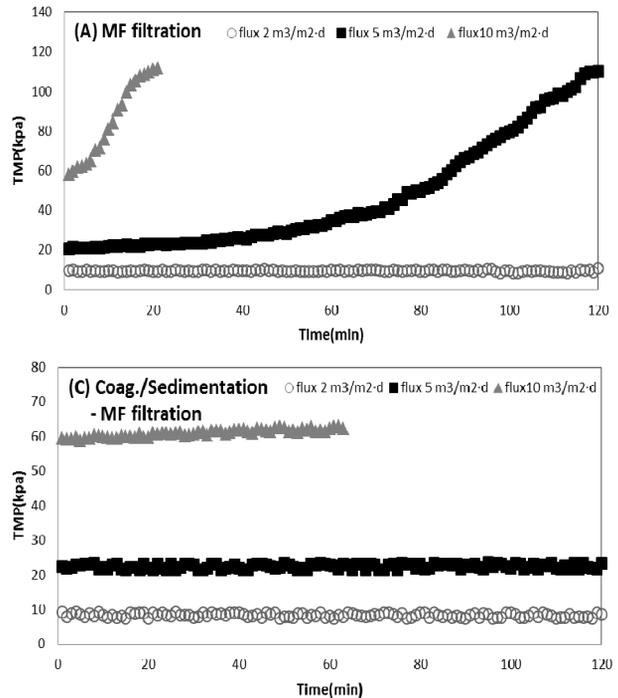


Fig. 9. Change in TMP on A and C process by flux conditions.

단독 공정의 UV₂₅₄ 및 DOC 제거율은 15% 이하로 나타났으나 Flux $10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 조건에서 UV₂₅₄는 약 20%, DOC는 약 34%의 제거율로 확인되었다. 하지만 이는 비가역적 오염을 초래함으로써 막오염이 빠르게 진행되어 화학세정 주기를 앞당기는 문제가 발생하게 된다. 반면에 침전 공정이 포함된 C 공정에서는 flux 변화와 관계없이 안정적인 처리수질을 보였다. C의 경우도 마찬가지로 Flux $10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 의 조건에서 상대적으로 DOC 제거율이 상승하는 경향을 보였으나 TMP변화는 크게 나타나지 않아 막여과 시설에서 전처리 공정에서의 유입수질 관리를 통해 한시적으로 적용이 가능할 것으로 사료된다. (Fig. 9)

pp. 481-490
pp. 491-499
pp. 501-510
pp. 511-519
pp. 521-527
pp. 529-537
pp. 539-549
pp. 551-566
pp. 567-575
pp. 577-586
pp. 587-597
pp. 599-609
pp. 611-618
pp. 619-628

3.4 전처리 공정 별 물리세척에 의한 회복

응집 공정 조합이 세라믹 막여과에 미치는 영향을 관찰하기 위해 조합공정 별 막여과를 진행한 뒤 물리세척을 실시하여 각 공정 별 물리세척에 의한 회복 정도를 확인하였다. 물리세척 조건은 120분간 여과 후, 물과 공기를 이용해 500 kpa의 압력으로 물리세척을 실시하였으며 다시 약 10분간 여과공정을 진행하여 물리세척 후의 여과차압 변화를 측정하였다. Flux $2 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 조건에서 A 공정의 초기차압은 9.2 kpa이며 120분간 여과 후 10.6 kpa, 물리세척 후의 여과차압은 10.2 kpa로 물리세척에 의한 회복은 0.4 kpa이며 초기차압 대비 1 kpa 상승하였으며 물리세척에 의한 회복률은 약 28.6 %이다. 응집 연계 공정인 B와 C 공정은 초기차압 대비 0.2 kpa 상승하였으며 물리세척 회복률은 71.4, 66.7 %로 A공정에 비해 물리세척에 의한 회복률이 높은 것을 확인하였으며 이를 통해 응집 연계 공정이 막여과 공정의 유지관리 측면에 영향을 미치는 것을 확인하였다. A 공정의 물리세척 회복률은 Flux가 높아질수록 물리세척 회복률이 감소하는 것을 확인 하였다(Fig. 11.). Flux $10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 조건에서 물리세척에 의한 회복률은 약 70 % 이하로 Flux $5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 에 비해 낮은 회복률을 나타냈다. 이는 막여과 단독공정인 A공정의 경우, 막표면에 축적되는 오염물질이 높은 Flux 조건에 의해 압밀되어 물리세척으로 회복이 어려운 비가역적 오염 (Irreversible fouling)을 형성하는 것으로 판단된다(Lee et al., 2000). 반면 응집연계 공정인 B와 C 공정은 Flux가 증가하여도 물리세척 회복률이 유지되거나 높아지는 것을 확인하였다. 응집에 의해 형성된 floc을 침전으로 제거한 C 공정은 Flux 5, $10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 에서 물리세척에 의한 회복률이 70 %로 나타났으며 원수에 응집 floc을 함유하여 처리한 B 공정의 물리세척 회복률은 Flux $5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 조건에서 95.8 % 로 가장 높게 나타났다. 이는 막표면에 축적된 응집 floc이 cake층을 형성된 것으로 판단되며 형성된 cake층은 물리세척에 의해 효율적으로 제거되는 가역적 오염(reversible fouling)을 형성하여 물리세척에 의한 회복률이 높은 것으로 판단된다(Kweon et al., 2004). 무기막의 물리세척은 500 kpa 압력의 물과 공기를 이용하며 이는 일반적인 유기막의 물리세척 조건에 비해 매우 높은 압력 조건이다. 향후 유기막을 이용한 전처리 연계공정 운영평가

와 막오염 특성별 물리세척 효율 평가를 통해 무기막과 유기막에서 발생하는 막오염 특성을 관찰하고 물리세척 조건별 비교평가를 수행하고자 한다.

Eq.1 Equation of recovery rate by physical backwashing

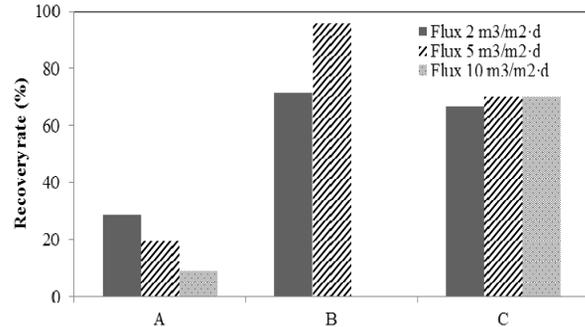


Fig. 10. Recovery rate of TMP on each process by physical backwashing.

4. Conclusions

본 연구에서는 유기막에 비하여 높은 flux로 운영이 가능한 세라믹 분리막과 전처리 연계공정에서 적정공정 선정에 관한 연구를 진행하였으며 차압변화 및 수질 안정성, 물리세척에 의한 회복률 평가를 진행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 혼화/응집, 침전 등의 전처리 공정과 막여과 연계공정을 평가한 결과, 처리수질의 경우 탁도 제거율은 공정에 관계없이 0.1 NTU이하를 유지하였으며, 응집 연계 공정의 경우 전처리 공정에서 막오염 유발물질인 탁도와 UV_{254} , DOC를 우선적으로 일부 제거함으로써 단독여과 공정에 비해 안정적인 차압을 유지 가능함을 확인하였다.

2) 단독 여과공정에서 Flux 조건 별 막여과 공정의 차압변화를 관찰한 결과, Flux가 높아질수록 막표면에 축적된 오염물질이 압력에 의해 압밀되어 막오염이 빠르게 진행되며 120분 여과 후 Flux $5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ 조건에서 차압이 89.3 kpa 상승하였으며 Flux $10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ 조건에서는 60분 만에 120 kpa을 초과하였다. 또한 물리세척 결과, 고 Flux 조건에서 물리세척에 의한 회복률이 매우 낮게 나타났으며 이는 막 표면에 형성된 막오염이 물리세척에 의해 회복이 어려운 비가역적 오염(Irreversible fouling)으로 판단된다.

3) 응집 연계공정의 경우, Flux가 높아질수록 여과



에 의한 차압변화가 크게 나타났으나 물리세척에 의한 회복률은 Flux에 관계없이 약 70 %이상으로 효과적임을 확인하였으며 물리세척 후의 여과차압은 초기 차압 대비 1 kpa 이내 상승하는 것으로 확인되었다. 이는 응집-침전을 통해 오염물질을 사전에 제거하거나 응집 floc 함유수를 유입수로 적용할 경우, 막 표면에 형성되는 막오염의 형태가 비가역적 오염도보다 가역적(Reversible) 오염도가 높은 것을 의미한다. 전처리 연계공정을 통해 세라믹 막 표면에 형성되는 막오염의 제어가 가능하며 이를 통해, 막여과 공정의 물리세척 효율의 향상과 장기간 운영이 가능함을 알 수 있다.

4) Flux 10 m³/m²·d에서 막여과 단독공정과 혼화/응집-침전 전처리 연계공정을 비교한 결과 막여과 단독공정은 20분만에 차압이 급증하였던 반면 혼화/응집-침전 공정은 120분간 1 kpa 상승하여 안정적인 수질/수량 확보가 가능한 것을 확인하였다. 이는 기존의 유기막에 비하여 고 Flux로 운영이 가능한 세라믹 막을 전처리 공정과 연계하여 적용할 경우 기존시설에 비하여 부지면적 및 설비용량 절감 등의 경제성과 안정적인 수질/수량 공급 등의 효율성을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비 지원(과제번호 : 16AWMP-B113766-01)에 의해 수행되었습니다.

References

Ahn, Y. T., Lee, C. Y., Jang, H. S. and Shin, H. S. (2005). Direct observation of membrane fouling in PAC-MF process, *J. KSWW, KSWE*, 91-95.

Cha, B. J. and Chi, S. D. (2011). Recent Trends and Prospect in Microfiltration Membrane, *KIC News*, 14(6), 29-37.

Chan, K. K. and Brownstein, A. M.(1991). Ceramic Membranes - Growth Prospects and Opportunities, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 70(4), 703-707.

Charpin, J., Bergez, P., Valin, F., Barnier, H., Maurel, A., Martinate, J.M.(1987). Inorganic membranes : Preparation, Characterization, Specific Application, *High Tech*

Ceramics(P. Vincenzini, ed.), Elsevier, Amsterdam, 2211-2225.

Choksuchart, P., Heran M. and Grasmick A. (2002). Ultrafiltration enhanced by coagulation in an immersed membrane system, *Desalination*, 145, 265 - 272.

Crozes, G., White, P. and Marshall, M. (1995). Enhanced Coagulation: its Effect on NOM Removal and Chemical cost, *J. AWWA.*, 87(1), 78-89.

Gregory, J.(1988), Colloidal interactions, *Material Science Forum*, 25-26, 125-144.

Gregory, J. and Duan, J. (2001). Hydrolysing metal salts as coagulants, *Pure Appl. Chem.*, 73(12), 2017-2026.

Guigui, C., Rouch, J.C., Durand-Bourlier, L., Bonnelye, V. and Aptel P. (2002). Impact of coagulation conditions on the in-line coagulation/UF process for drinking water production, *Desalination*, 147, 95 - 100.

Ha, C. W. (2013). Ozonation and/or coagulation-ceramic membrane hybrid for filtration of impaired-Quality source waters, Doctor of Philosophy's Thesis, King Abdullah University of Science and Technology Thuwal, Kingdom of Saudi Arabia, 50-51.

Hong, S. H., Bae, C. H., Huh, W. S. and Zhoh, C. K. (1999). Removal of heavy metals and natural organic matter by chemical treatment in drinking water-The study for the removal of natural organic matters and the behavior of activated carbon adsorption with coagulation condition, *J. KSEE*, 21(3), 525-535.

Hyun, S. H. (1993). Present Status and Preparation Technology of Ceramic Membrane, *J. Korean Membrane*, 3(1), 1-11.

You, S. J., Park, S. H., Lim, J. L., Suh, J. M., Jang, S. H., Hong, S. C., Yi, P. I.(2014). Removal characteristics of NOM in advanced water treatment using ceramic MF membrane, *JSKWW*, 367-376.

Kim, C. S., Choi, S. I. and Lee, G. C. (2000). Effect of Coagulation on Adsorptive Capacity of Powdered Activated Carbon, *J. KSWQ*, 16(2), 211-222.

Kim, E. O. (1993). Application of Ceramic Membrane, *J. Korean Membrane*, 3(1), 12-21.

Kim, M. H. and Park, J. Y. (2001). Membrane Fouling control Effect of periodic Water-back-flushing in the Tubular Carbon Ceramic Ultrafiltration system for Recycling Paper wastewater, *Car, J. Korean Membrane*, 11(4), 190-203.

Kweon, J. H., Choi, Y. H., Lee, S. H., Ahn, K. H. (2004). "Coagulation Characteristics of a Natural Water and the Effects on Microfiltration", Proceedings of the autumn Co-Conference of the Korean society on Water Environment and Korean Society of Water and wastewater,

pp. 481-490

pp. 491-499

pp. 501-510

pp. 511-519

pp. 521-527

pp. 529-537

pp. 539-549

pp. 551-566

pp. 567-575

pp. 577-586

pp. 587-597

pp. 599-609

pp. 611-618

pp. 619-628

- 3-4, November, 2004, Daejeon, Korea.
- Kwon, H. S., Kim, S. J., Yeon, Y. C., Kim, J. W. and Jung, D. M. (2008). Optimal Dose of Powdered Activated Carbon for 2-MIB and Organic Matters Removal, *J. KSEE*, 804-810.
- Lee, J., Lee, S., Jo, M., Park, P., Lee, C. and Kwak, J. (2000). Effect of Coagulation Conditions on Membrane Filtration Characteristics in Coagulation-Microfiltration Process for Water Treatment, *Environmental Science & Technology* 34(17), 3780-3788.
- Lee, Y. T. and Oh, J. K. (1999). A study on the Optimization of Process and Operation Condition for Membrane System in Tap Water Treatment, *J. KOR. Korean Membrane*, 9(4), 193-201.
- Lee, Y. T. and Oh, J. K. (2003). Membrane Fouling Effect with Organic-Inorganic Materials Using the Membrane Separation in Drinking Water Treatment process, *J. Korean Membrane*, 13(4), 219-228.
- Miltner, R. J., Speth, T., Endocott, D. and Reionhold, J. (1987). Final Internal Report on Carbon Use Rate Data., U. S. EPA, Cincinnati, Ohio, USA
- Moritz, T., Benfer, S., Árki, P. and Tomandl, G. (2001). Influence of the surface charge on the permeate flux in the dead-end filtration with ceramic membranes. *Separation and Purification Technology*, 25(1 - 3), 501-508.
- Ok, C. S., Kim, J. A. and Bae, K. C. (1992). The Adsorption Removal Characteristics of Trace Organic By - Products in Disinfection of Drinking Water by Biological Activated Carbon (BAC), *J. KOR, KSEE*, 14, 53-68.
- Shimizu, Y., Matsushta, K., Miura, I., Yazawa, T., Eguchi, K.(1988). Characterization of pore geometry of alumina membranes, *J. JPN. Ceram. Soc.*, 96, pp. 556-560
- Uhlhorn, R. J. R., Huis In't Veld, M.H.B.J., Keizer, K. and Burggraaf, A. J. (1992). Synthesis of Ceramic Membranes, Part I Synthesis of Non-supported and Supported γ -Alumina Membranes without Defects, *J. Mater. Sci.*, 27, 527-537.
- White, M. C., Thompson, J. D., Harrington, G. W. and Singer, P. C.(1997). Evaluating criteria for enhanced coagulation compliance, *J. AWWA*, 89(5), 64-77.