

Feed-and-discontinuous Bleed 방식으로 운전되는 정수처리용 관상형 한외여과막 시스템의 평가

최 혁 · 서영우 · 김형수 · 임종성* · 황선진**

성균관대학교 토목환경공학과

*금호건설(주) 기술연구소

**경희대학교 환경·응용화학부

(2000년 9월 1일 접수, 2000년 10월 18일 채택)

Evaluation of System operated by Feed-and-discontinuous Bleed Mode using Tubular Type Ultrafiltration Membrane for Water Treatment

Hyeok Choi · Young-Woo Seo · Hyung-Soo Kim · Jong-Seong Im* · Sun-Jin Hwang**

Department of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University

**Institute of Technology, Kumho Industrial Ltd.*

***School of Environment & Applied Chemistry, Kyunghee University*

ABSTRACT

A water treatment system using membrane separation technology can provide stable effluent quality and its maintenance is relatively easy comparing to the conventional water treatment system. In addition, the membrane filtration system is very compact such that it can replace existing water treatment processes of coagulation/sedimentation/filtration by only one process. However, a major problem associated with membrane filtration is flux decline with operating time due to concentration polarization and fouling, so a systematic study on evaluation of long-term filtration performance is necessary. A membrane filtration system using tubular type ultrafiltration membranes with MWCO of 30,000 Da was constructed for this study and it had been operated in a feed-and-discontinuous bleed mode. Flux was stabilized after operation of 1,500 hours and maintaining above 25 LMH until 4,000 hours. Contaminants causing SS and turbidity were almost completely removed while the UV₂₆₀ and DOC removals were 55% and 49%, respectively. A simple mass balance equation was developed to predict maximum concentrations of SS, turbidity, UV₂₆₀ and DOC in a operation cycle. For SS and turbidity the measured max. concentrations in each cycle agree well with the

predicted values while the measured max. concentrations of UV₂₆₀ and DOC were 59% and 37% of the predicted values, respectively.

Key Words : Ultrafiltration, Fouling, Flux Decline, Feed-and-discontinuous Bleed Mode

요 약 문

막분리 기술을 이용한 정수처리시스템은 안정된 수질을 제공할 수 있으며 기존의 정수처리 시스템에 비해 유지관리가 비교적 간편하다. 또 막여과 시스템은 매우 콤팩트한 기술로서 용집/침전/여과로 구성된 기존의 정수처리 공정을 단일공정만으로 대체할 수 있다. 그러나 막여과는 운전시간의 경과와 함께 농도분극과 막오염으로 인한 플럭스의 감소라는 중요한 문제점이 있다. 따라서 장기간 연속운전의 평가에 관한 체계적인 연구가 필요하다. 본 연구는 분획분자량 30,000 Da인 관상형 한외여과막을 이용한 막여과 시스템을 구성하고 feed-and-discontinuous bleed 방식으로 운전하였다. 플럭스는 1,500시간 운전후에 안정되었고 4,000시간까지 25 LMH 이상을 유지하였다. SS와 탁도를 유발하는 물질은 거의 완전히 제거되었으며 UV₂₆₀과 DOC의 제거율은 각각 55%와 49%였다. 하나의 운전주기동안 SS, 탁도, UV₂₆₀과 DOC의 최대농도를 예측하기 위해 간단한 물질수지를 만들었다. 그 결과 SS와 탁도는 각 주기동안 관측된 최대농도와 예측치가 잘 일치한 반면 UV₂₆₀과 DOC의 관측농도는 예측치의 약 59%와 37%였다.

주제어 : 한외여과, 파울링, 플럭스 감소, feed-and-discontinuous bleed 방식

1. 서 론

최근 급속한 산업의 발전과 인구의 증가로 수자원의 수요가 급격히 증가하고 있으며, 또한 상수원오염으로 인하여 고도처리에 대한 요구가 증가하면서 기존 정수시설에 대한 보완이 요구되고 있으나 부지 확보를 비롯한 여러 가지 어려움이 예상되고 있는 실정이다.¹⁾ 따라서 안정된 수질뿐만 아니라 콤팩트하고 운전 및 유지관리가 용이한 시스템의 개발이 요구되면서 고급산화, 오존처리, 활성탄흡착, 막분리 등이 제시되고 있다. 특히 막분리 기술은 다른 고도정수처리와는 달리 원수의 수질이 변해도 처리수의 수질에 큰 영향을 주지 않는다. 이는 분리막의 공칭공경 이상의 크기의 물질은 분리막을 투과할 수 없기 때문인데²⁾ 이 점이 장래에 예상되는 원수의 수질악화에 적절히 대처할 수 있는 최대의 장점이라 생각된다.

막분리법을 이용한 정수처리공정은 기존의 용집

→ 침전 → 여과의 공정을 하나의 단일공정으로 대체할 수 있으므로 공정자체가 콤팩트하고 단순하기 때문에 처리시간이 짧고 필요한 부지면적이 작다.^{3,4)} 또한 trihalomethane과 같이 유해한 소독부산물의 문제가 심각해지면서 물리적으로 병원균을 제거함으로써 소독제의 첨가량을 줄여줄 뿐만 아니라 소독부산물의 전구체인 휴민산 등의 유기물도 제거할 수 있으므로 막분리 기술이 소독부산물 문제를 해결하는데 핵심적인 기술로 떠오르고 있다.

현재 선진국에서는 상수 및 오·폐수 등 여러 곳에서 막분리 기술을 적용하고 있으며 특히 미국은 '60년대 RO(reverse osmosis)막을 중심으로 해수담수화를 시작하였고 현재 미국, 프랑스, 호주, 일본을 중심으로 MF(microfiltration)막과 UF(ultrafiltration)막을 사용한 정수처리장이 설치되어 가동되고 있다.^{5,6)} 현재 우리나라는 기초적 실험단계 수준으로 기존의 수처리 시스템과 달리 적절한 운전인자 등이 제시되지 못하고 있으며 각각의 수질에

따라 적용 가능한 막이 제시되는 실정에 있다.

또 막분리 기술은 시간의 경과에 따른 플럭스의 감소(여과압의 상승)라는 치명적인 단점을 보완하지 않고서는 막을 고도정수처리에 적용할 때 낮은 플럭스와 처리수량의 시간적 변동과 같은 수공급의 문제 그리고 잦은 세정과 막의 교체에 따른 경제성이 문제가 될 것이므로 실규모의 장기실험을 통해 안정된 수질과 플럭스를 얻을 수 있음을 검증할 필요가 있다.

정수처리에서 관상형 막을 크로스플로우방식으로 운전할 때 여러 가지 방법들이 고려되고 있다. 그 중 feed-and-bleed 방식은 처리수가 목적하는 물질일 때 사용되는데 이 방식은 막에 의한 저지물질이 유로내에서 농축되고 이런 농축물질을 정기적으로 bleed시킴으로써 막내 농도를 비교적 일정하게 유지시킬 수 있어 시스템을 보다 안정한 상태로 운전시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.⁷⁾ 따라서 본 연구는 관상형 한외여과막을 사용하여 feed-and-bleed 방식으로 운전시 유로 내에서의 농축정도, 플럭스의 변화, 그리고 막에 의한 저지물질의 농도를 계산하였다.

2. 장치 및 방법

2.1. 대상원수

상수원수를 정수처리하기 위한 대상원수로 용인 H대학의 조경용 저수지수를 사용하였는데 실험이 시작된 겨울철에 강우가 적은 관계로 폐쇄성 수역의 성격을 띄었고 취수지점이 호소저지에 위치한 관계로 강우시 고탁도의 원수가 유입되었다. 대상원수의 성상을 Table 1에 나타내었다.

2.2. 분리막의 사양

실험에 사용된 분리막은 현탁물질은 물론 일부의 용존성 유기물의 제거를 분리막 시스템으로 대체하는 것을 목적으로 하고 있고 막투과물질은 후속처리로 제거하는 것을 기본으로 하고 있기 때문에 한외여과막을 사용하였으며⁸⁾ 자세한 사양은 Table 2와 같다.

Table 1. Characteristics of raw water

Parameter	Range	Average
Turbidity (NTU)	3.5~7.5	5
SS (mg/L)	4~12	7
UV ₂₅₀ (1/cm)	0.15~0.30	0.22
DOC (mg/L)	2~5.5	3.5

Table 2. Characteristics of UF membrane

Type	Tubular
MWCO (Da)	30,000
Material	Polysulfone
Specific surface area (m ² /module)	0.5
Pure water flux (L/m ² · hr)	300 (at 25°C, 2kgf/cm ²)
Inner diameter of membrane tube (mm)	13
Module length (m)	2
Number of membrane tubes per module	7
Cleaning resistance as chloride (mg/L)	300

비대칭막으로 표면은 얇은 스킨층으로 이루어져 주된 분리기능을 가지고 스킨층을 통과한 물질은 여과 저항이 매우 작은 지지체를 통과하도록 되어 있다.

2.3. 실험장치의 구성

Fig. 1은 실험장치를 나타낸 것인데 펌프에 의해 공급된 원수는 0.1 mm 스크린을 거쳐 유량조절조에 저류시키고 처리수로 빠져나간 양만큼 레벨센서에 의해 원수조로 공급되게 하였다. 다음으로 원수조에 있는 물은 순환펌프에 의해 막분리 장치로 가압시켜 공급하고 가압된 원수는 내압식 모듈의 내부로 들어가고 처리수는 막의 표면을 통해 빠져 나와 처리수조로 들어가게 된다. 막을 빠져나가지 못한 물은 크로스플로우되고 원수조로 다시 들어가지 못하도록 open loop의 밸브를 잠그므로써 다시 막내부로 들어가 막모듈과 배관(이하 loop) 내에서 농축이 일어나게(close loop)할 수 있도록 하였다. Loop 내의 부피는 0.25 m³이다. 농축된 순환수는 빠져나간 처리수만큼 들어오는 원수와 혼합되어 다시 분리막의 내부로 공급되게 하였으므로 따라서 loop내에

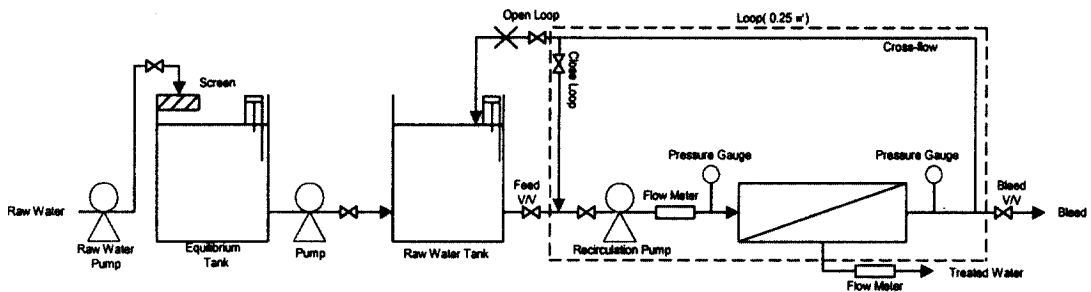


Fig. 1. Schematic diagram of tubular type UF membrane system operated feed-and-discontinuous bleed operation.

서는 투과수량에 비해하여 지속적으로 저지된 물질의 농도가 상승하게 되는데 처리수량에 맞추어 bleed 양을 연속적으로 조절하면 loop 내의 농도를 비교적 일정하게 유지시킬 수 있지만 플럭스가 시간 경과와 함께 계속적으로 떨어지기 때문에 bleed 양을 연속적으로 조절하지 못하고 운전중 주기적으로 bleed 밸브를 열어 고농도의 농축수를 배제하여 농도를 떨어지게 하였다. 또 순환펌프 전후단의 밸브를 조작하여 원하는 압력과 막면유속을 조절하였으며 모든 조작은 programmable logic controller로 자동조작되게 하였다.

막유니트의 구성은 42개의 막을 직렬로 6단, 병렬로 7단을 구성하여 펌프에 의해 7개의 관으로 분지되어 가압되도록 하였다. 막유니트의 유입 및 유출 부분에 압력계를 설치하였고 막면유속을 측정하기 위해 유입부분에 유량계를, 그리고 처리수량을 측정하기 위해 처리수배관에 유량계를 설치하여 레코더에 기록하였다. 또 막처리수의 탁도가 0.2 NTU를 초과할 경우 경보를 알리는 장치도 부착하였다.

2.4. 실험방법

운전 방식은 원수가 막내부로 들어가서 막외부로 빠져나오는 내압식으로 운전하였고 막면에 쌓인 물질을 제거하기 위해 막면유속을 4.7 m/s로 충분히 주어 크로스플로우시켰으며 정량운전방식인 경우에는 농축농도를 일정하게 유지시키기 위해 농축된 저지물질을 연속적으로 bleed할 수 있지만 정압운전인 관계로 시간에 따른 플럭스감소가 예상되었기 때문에 4시간을 하나의 주기(cycle)로 약 1분 동안

0.5 m³의 양을 bleed시킴으로써 시간이 경과할수록 회수율은 계속적으로 떨어지게 하였다. Bleed 직후부터 다음 bleed까지를 하나의 주기로 농축 및 bleed로 인한 회석이 반복되면서 농축율이 계속적으로 변화하게 되고 플럭스에 변화를 미치게 하였다.

따라서 각 주기의 시작과 끝에서 시료 및 플럭스를 분석하여 loop 내에서의 농축정도, 플럭스의 변화, 그리고 loop 내에서의 저지물질의 최대농도를 계산하였다.

또 안정된 플럭스와 지속시간 등을 알아보기 위해 경제성과 운전비용 등은 일단 고려하지 않고 물리·화학적 세정없이 연속적으로 운전하기로 하였다.

Table 3은 실험에 사용된 운전조건을 요약한 것이다.

2.5. 분석방법

모든 시료의 분석은 항목별로 Standard Methods와 환경오염 공정시험법에 의거하여 시료 채취 후 즉시 수행하였다. 탁도는 Turbidimeter(Hach

Table 3. Experiment conditions

Loop type	close
Inlet pressure (kg/cm ²)	3.5
Outlet pressure (kg/cm ²)	1.1
TMP (kg/cm ²)	2.3
Surface velocity (m/s)	4.7
Initial flux (L/m ² · hr)	214.3
Recovery (%)	99.10 → 68.55
Number of bleed / day	6
Total bleed volume / day (m ³)	3

2100P), UV₂₆₀은 Spectrophotometer(Shimadzu 1201), DOC는 TOC Analyzer(Shimadzu 5000A)를 사용하여 기기분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 플럭스의 변화

3.1.1. 원수 및 처리수 수온의 변화

겨울(12월)에서 봄(5월)까지의 원수수온은 Fig. 2와 같이 계속적으로 상승하였으며 처리수의 수온은 펌프에 의한 순환열에 의해 통상 원수의 수온보다 5~10℃ 정도가 높았다. 운전초기에는 처리수량이 비교적 많아 수온이 낮은 원수가 feed되는 속도가 빨랐기 때문에 펌프에 의한 온도상승이 낮았지만 플럭스가 계속적으로 하강하여 안정되기 시작한 1,500시간 후에는 온도상승이 10℃ 정도로 일정하게 유지되었다.

3.1.2. 매 주기마다의 실제적인 플럭스의 변화

매 주기마다의 실제적인 플럭스의 변화는 Fig. 3과 같은데 매 주기가 시작되는 점에서는 bleed로 인한 밸브의 열림으로 약간의 압력강하와 수온이 낮은 원수의 feed로 'A'와 같이 일시적인 플럭스의 강하가 있었으며 다시 bleed가 끝나면 압력이 원래의 trans membrane pressure를 유지하고 계속해서 농축수가 펌프에 의해 순환되면서 그 마찰열로 인해 온도가 상승하여 flux가 'B'와 같이 단시간내에 상승하다가 최대 정점, 즉 최대플럭스에 이르면 더 이상 온도상승이 일어나지 않고 계속적으로 저지물질이 loop내에 농축되면서 'C'와 같이 플럭스가 하강하여 최소플럭스에 이르는 주기를 반복하게 된다.

여기서, i) 한 주기의 최대플럭스와 최소플럭스와의 차는 4시간 동안의 파울링에 의한 플럭스의 감소량 'f'와 농축에 따른 농도증가로 인한 플럭스의 감소량 'c'를 동시에 나타내며, ii) 어떤 주기의 최대플럭스(또는 최소플럭스)와 다음 주기에서의 최대플럭스(또는 최소플럭스)와의 차이는 4시간 동안의 파울링에 의한 플럭스의 감소량 f를 나타내므로 iii)

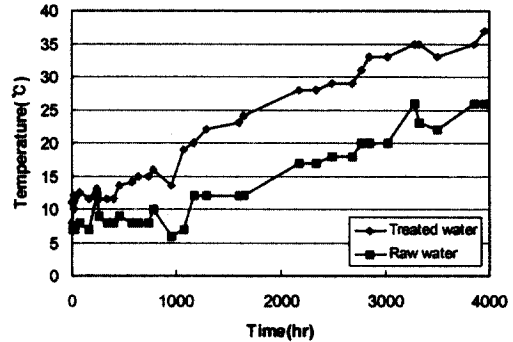


Fig. 2. Variation of temperature of raw and treated water.

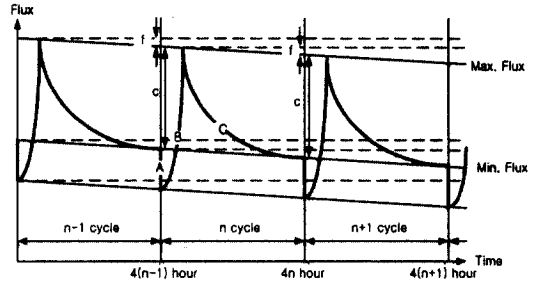


Fig. 3. Schematic flux variation during feed-and-discontinuous bleed operating cycles.

결국 한 주기 동안의 농축에 따른 농도증가에 의한 플럭스의 감소량은 $(c+f) \cdot f$ 임을 알 수 있다. 운전 초기에는 상당한 양의 농축이 발생하고 또 파울링의 속도가 빠르기 때문에 플럭스의 감소에 대한 f와 c의 영향 모두가 크지만 운전시간이 지남에 따라 농축율이 줄어들고 또 파울링의 속도가 상대적으로 느리기 때문에 f와 c 모두가 작아지게 되고 만약 운전이 임계상태에 이르면 f의 영향은 없고 c의 영향만으로 플럭스가 변화하게 될 것이다.

3.1.3. 전체적인 플럭스의 변화

시간에 따른 전체적인 플럭스는 운전초기 214.3 LMH로 시작하여 2시간만에 120 LMH까지 떨어진 후 직선적으로 계속해서 감소하다가 1,500시간 경과 후 30 LMH에서 감소속도가 둔화되면서 안정된 값을 보이다가 4,000시간까지 25 LMH 부근에서 안정된 값을 보이며 지속적인 플럭스의 감소는 나타나지 않았다. 이 값은 이전의 pilot plant 운전시에

비해 1/3 정도로 매우 낮은 값인데⁹⁾ 그 이유로 생각되는 것은 원수상황이 극히 악화되었고 운전방식 또한 이전의 pilot plant에서 적용한 운전방식인 batch with topped off와 달리 본 연구에서 운전한 feed-and-discontinuous bleed방식의 경우 loop내에서 저지물질이 계속적으로 고농도로 농축 및 배출이 반복되므로 파울링의 가능성이 매우 클 것으로 생각되지만¹⁰⁾ 실제 대규모의 플랜트에서는 회수율을 일정하게 맞추기 위해 bleed양을 계속적으로 연속되게 조절하면 loop내의 농도를 일정하게 유지시킬 수 있으므로 전반적인 플럭스의 상승을 가져올 수 있다.

Fig. 4는 파울링에 의한 전체적인 플럭스의 변화와 회수율을, 그리고 Fig. 5는 거의 같은 시간에 얻은 두 개의 점, 즉 bleed전후 최대플럭스와 최소플럭스를 분리해서 나타내었는데 두 개의 곡선사이의 차이가 농축율에 따른 플럭스의 변화임을 알 수 있는데 운전초기 농축율이 31배였을 때의 플럭스의 차이가 13%이였지만 1,500 hr 후 농축율이 10배 이하로 떨어진 후에는 농축과 회수에 따른 플럭스의 차이가 1% 정도로 거의 변화가 없었다.

3.2. 제거효율

3.2.1. 부유물질의 제거

부유물질의 제거정도를 알아보기 위해 SS와 탁도를 실험한 결과 Fig. 6(a), (b)에서 보는 바와 같이 막에 의해 거의 100% 제거가 되기 때문에 플럭스가 높은 운전초기 loop내의 SS가 300 mg/L까지 상승하여도 처리수에는 검출되지 않았으며 처리수의 탁도 또한 0.2 NTU 이하로 농축수의 농도와 상관없이 매우 안정된 값을 보였는데, 이는 분획분자량 이상의 물질을 배제하는 분리막의 특성을 잘 보여주고 있다. Loop 내의 부유물질의 변화는 플럭스가 안정되기 시작한 1,500시간 후부터 50 mg/L 이하로 비교적 일정한 값을 유지하였다.

3.2.2. 유기물의 제거

용존성 유기물의 제거정도를 알아보기 위해 DOC와 THM전구물질의 간접지표로서 UV₂₆₀을 측정하였다. Fig. 6(c)와 (d)에서 보는 바와 같이 처리수

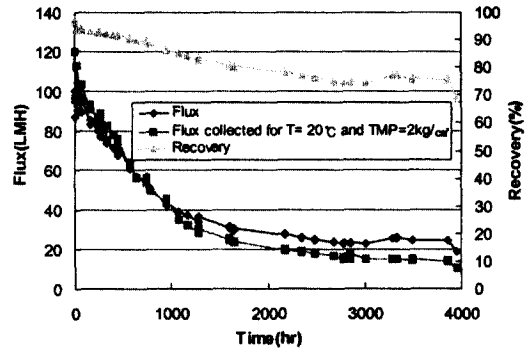


Fig. 4. Variation of flux and recovery.

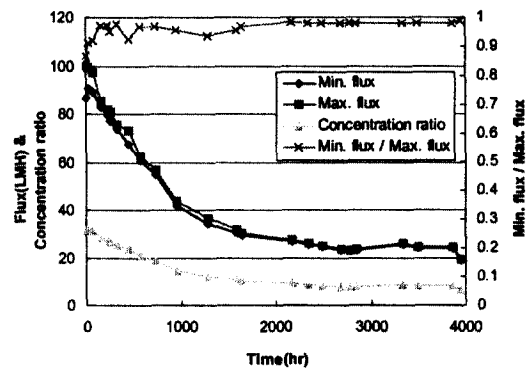


Fig. 5. Variation of flux and concentration ratio.

의 UV₂₆₀은 운전초기에는 다소 변동은 있었지만 플럭스가 안정되기 시작한 1,500시간 후부터는 안정된 값을 유지하면서 0.1 cm⁻¹ 정도의 값을 나타내었고 제거율은 원수기준으로 약 55%를 보였다.¹¹⁾ 그러나 실제로 막이 제거하는 대상의 물은 농축된 loop내의 물이므로 그 제거율은 그보다 훨씬 더 높지만 UV₂₆₀ 유발물질중 막에 의해 저지되는 물질은 계속해서 빠져나가지 못하고 농축이 되기 때문에 농축수 대비의 제거율은 별 의미가 없다고 생각된다. UV₂₆₀과 마찬가지로 처리수의 DOC 또한 운전초기에는 2 mg/L 정도에서 변화하였지만 flux가 안정되기 시작한 1,500시간 후부터는 안정된 값을 유지하면서 1.6 mg/L 정도의 값을 나타내어 전체적으로 1.8 mg/L 정도로 제거율은 원수기준으로 약 49%를 보였다.¹¹⁾ 따라서 30,000 Da의 분획분자량을 가진 막의 용존유기물의 제거율은 원수의 성상에 따라 상이하겠지만 대략 50% 정도임을 알 수 있다.

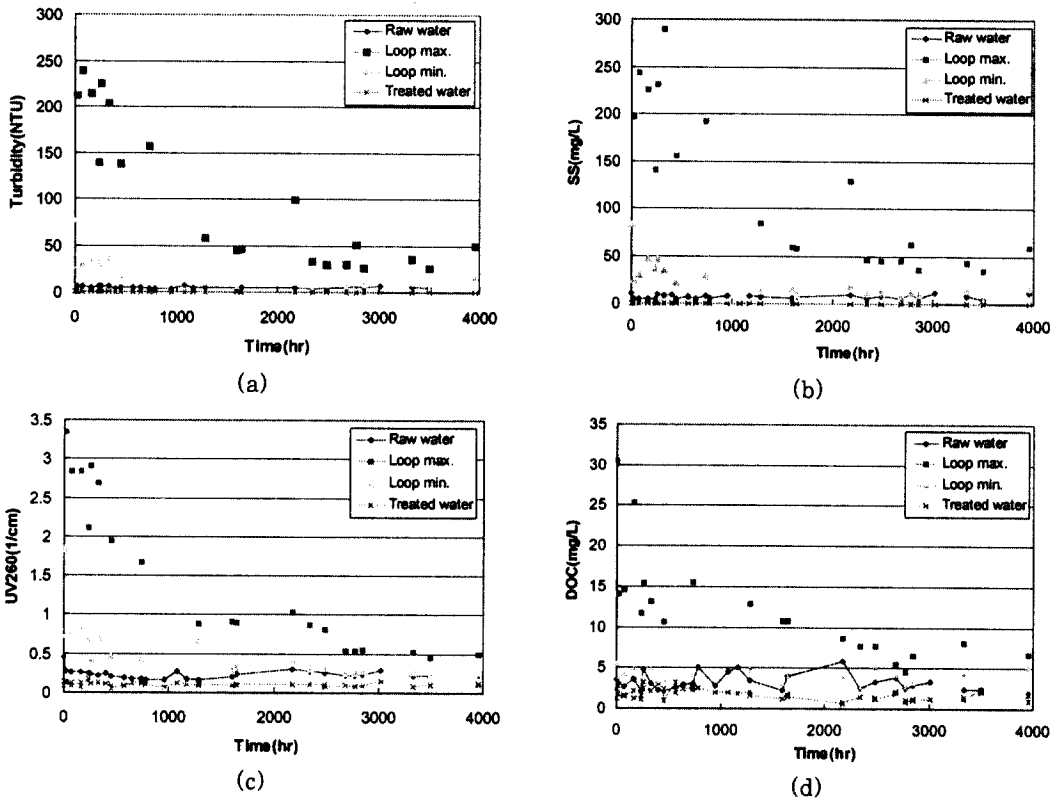


Fig. 6. Variation of water quality; (a) Turbidity, (b) SS, (c) UV₂₆₀, (d) DOC.

3.3. 매주기 loop내의 최대농도 계산

3.3.1. 물질수지

Fig. 6에서 얻어진 수질자료를 기초로 loop 내의 저지물질의 주기당 최대농도는 막면에 흡착되거나 분해와 같은 현상은 없으며, 산술적인 비례관계가 성립한다는 가정 아래 다음과 같은 간단한 물질수지^{12,13)}를 각 운전주기에 대해 적용하여 저지물질의 loop내의 최대농도를 계산하였다.

$$V_f \cdot C_f + V_{loop} \cdot C_{min} = V_p \cdot C_p + V_{loop} \cdot C_{max} \quad (1)$$

$$C_{max} = \frac{(V_f \cdot C_f + V_{loop} \cdot C_{min} - V_p \cdot C_p)}{V_{loop}} \quad (2)$$

여기서, $V_f \cdot C_f$: 원수로부터 loop내로 공급되는 물질의 양
 $V_p \cdot C_p$: loop내에서 처리수로 빠져나가는 물질의 양

$V_{loop} \cdot C_{min}$: bleed 직후 최대플러시일 때 loop내 잔류 물질의 양

$V_{loop} \cdot C_{max}$: bleed 직전 최소플러시일 때 loop내 잔류 물질의 양

3.3.2. 부유물질의 계산결과

Fig. 7(a)와 (b)에서 보는 바와 같이 실제로 관측된 자료는 계산한 자료와 거의 일치하고 있으며 이는 막에 의한 분리메카니즘 자체를 그대로 반영하고 있음을 보여준다. 물론 일부 부유물질이 막에 케익층을 형성하겠지만 그 양은 매우 작아서 계산값에 영향을 주지 않으리라 생각된다.

3.3.3. 유기물의 계산결과

Fig. 7(c)와 Fig. 7(d)에서 보는 바와 같이 실제로 관측된 자료는 UV₂₆₀의 경우 계산값의 약 59%의 값을, DOC는 상관성은 매우 떨어지지만 37%의 값을 나타내었다.

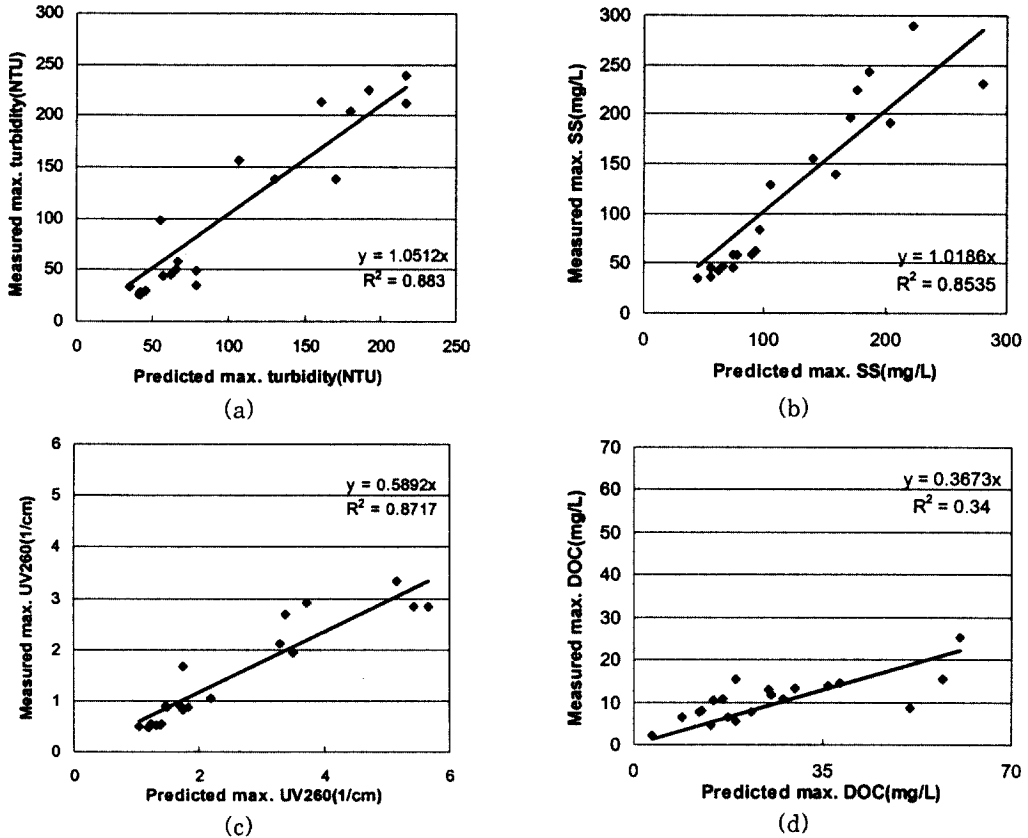


Fig. 7. Comparison between predicted max. concentration and measured max. concentration: (a) Turbidity, (b) SS, (c) UV₂₆₀, (d) DOC.

UV₂₆₀과 DOC가 계산값보다 작게 관측된 이유로 여러 가지 요인을 생각할 수 있으며, 첫째로 SS나 탁도유발물질과 달리 UV₂₆₀과 DOC유발물질이 용존물질인 관계로 부유물질의 농도가 증가함에 따라 접촉기회가 잦아지므로 입자성물질에 의해 흡착성을 보이므로 SS성분으로 발현될 가능성이 클 것으로 생각되며, 둘째로 원수와 농축수의 UV₂₆₀과 DOC 유발물질은 분포범위가 상대적으로 틀리므로 단순한 산술관계가 성립되지 않음을 생각할 수 있으며, 셋째로 UV₂₆₀이 유발물질의 농도와 흡광도가 직접적으로 비례한다는 가정하에 측정된 것으로 농축된 실제양을 측정값이 제대로 반영을 해 주지 못함을 생각할 수 있으며 넷째로 막에 흡착되거나 분해의 가능성도 생각할 수 있다.^{14,15)}

4. 결 론

기존의 정수처리 공정, 즉 응집·침전·여과의 단일 대체공정으로서의 막분리 기술을 정수처리에 적용하기 위해 분획분자량 30,000 Da의 관상형 한외여과막을 feed-and-discontinuous bleed방식으로 운전한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 플럭스는 1,500시간 경과 후 30 LMH에서 안정된 값을 유지하여 4,000시간 동안 25 LMH 이상으로 유지되었는데 실제 대규모의 플랜트에서는 loop 내의 농도를 일정하게 유지시킬 수 있으므로 전반적인 플럭스는 향상될 수 있다.
- 2) 부유물질의 농축율이 운전초기 31배에서 운전종료시 6배로 변화하는 동안 각 주기에서 13~1%의 플럭스의 차이를 보였으며 농축율

이 10배 이하에서는 플럭스의 차이는 거의 없었다. 한 주기에서의 플럭스의 차이는 농도증가에 의한 플럭스의 감소와 비교적 짧은 시간 동안의 파울링에 의한 플럭스의 감소를 같이 설명할 수 있다.

- 3) 부유물질은 예상대로 거의 100%가 제거되었으며 UV₂₆₀과 DOC의 제거율은 원수기준으로 각각 55%와 49%를 보였다.
- 4) Loop내의 각 주기에 있어서 SS와 탁도의 최대농도는 물질수지로 예측한 값과 측정치가 매우 근접하며 UV₂₆₀과 DOC의 측정치는 예측치의 각각 59%, 37%로 매우 낮게 나타났다.

참 고 문 헌

1. 김정현, 권순범, 이동주, "정수처리기술 현황," 대한상하수도학회지, **13**(1), 13~27(1999).
2. Mallevalle, J., Odendall, E. P., and Wiesner, M. R., Water Treatment Membrane Process, McGraw-Hill, New York, pp. 2.1~2.24(1996).
3. 中尾眞一, "膜分離技術의 現狀과 動向," 대한상하수도학회지, **9**(4), 29~38(1995).
4. 藤田賢二, "膜分離技術による淨水場の 試設計," 水道協會雜誌, **59**(4), 10~18(1993).
5. 水道淨水プロセス協會, 水道における 膜ろ過法 Q&A(1995).
6. 이정학, "막분리기술의 현재," 첨단환경, **7**(12), 2~15(1999).
7. Munir, C., Ultrafiltration and Microfiltration Handbook, 1st Ed., Technomic Publishing Co. Inc., Pennsylvania, pp. 293~343(1998).
8. 박세호, 최상일, 김형수, 황용우, "정수처리용 최적분리막 선정용 위한 수질 비교," 대한상하수도학회지, **12**(1), 102~107(1998).
9. 박대수, 정수처리에 적용한 분리막의 운전인자와 투과플럭스의 관계에 관한 연구, 성균관대학교 석사학위논문, pp. 69~73(1998).
10. Marcel, M., Basic Principal of Membrane Technology, 1st Ed., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 416~463(1996).
11. Thebault, P. et al., "Long term estimation of operating cost and water quality," in *Proceedings of the Conference Euromem-brane*, Paris, pp. 127~132(1992).
12. Steven C. C., Surface Water-Quality Modeling, 1st Ed., McGraw-Hill, New York, pp. 47~64 (1997).
13. 松本幹治, 使用者ユーザーのための 實用膜分離技術, 初版, 日刊工業新聞社, 東京, pp. 44~52 (1996).
14. 김형수, 藤田賢二, "오존세정에 의한 막폐색 억제에 관한 연구," 대한상하수도학회지, **9**(3), 78~85(1995).
15. Ying, J. Y., "Adsorption characterization of mesoporous materials," in *Proceedings of the 1st International Symposium*, Baltimore, pp. 77~84(1998).