

## 복류수를 이용한 한외여과공정의 장기운전 평가

### Long Term Evaluation of UF Membrane process using River-bed Water

김충환·임재림\*·강석형·김수한

Chung H. Kim · Jae L. Lim\* · Suk H. Kang · Su H. Kim

한국수자원공사 수자원연구원

(2008년 5월 8일 접수 ; 2008년 7월 10일 수정 ; 2008년 7월 28일 채택)

#### Abstract

Membrane system has been increasingly considered as a safe and cost-effective water treatment process especially in case of small scale water works. This research is a basis of membrane application in water works through a long period test with obtaining operation skills and evaluation of water quality and cost competitiveness. For the research, the UF membrane system was installed in small water treatment plant that uses river-bed water as raw water. The system was consisted of 2 stage membrane and operated in constant flow mode (Flux: 1.5, 1.0, 0.9, 0.6). In each different flux condition, TMP trends were showed better results at lower flux condition. And through the high flux condition test, it is certified that membrane system could deal with breakdown of one stage. Water quality of permeate was satisfied the water quality standards especially turbidity. To know what mainly causes fouling on membrane, the test by membrane with several cleaning agents and EDX analysis have done in lab. Through the tests, ferrous concentration in raw water, backwashing water and membrane surface etc. was high and it causes fouling inside and outside of membrane. So acid cleaning using organic acid such as oxalic acid is necessary in Chemical in Place (CIP). At the economical aspect the electrical cost of membrane system is higher than that of slow sand filtration but labor cost can be reduced by automation. However, the use of labor should be determined considering effectiveness and stability of operation. Because during the operation, there are several breakdown such as electrical shock by lightning, water drop in summer, etc.

**Key words :** Ultrafiltration, membrane system, TMP, iron, CIP

**주 제 어 :** 한외여과, 막여과시스템, 막차압, 철, 화학세정

#### 1. 서론

상수원수의 수질 악화 및 수질 기준의 강화 추세에 따라 새로운 정수공정의 도입이 절실해지는 현시점에서 더욱이

소규모 정수시설은 유지관리의 어려움과 시설의 노후화 등으로 인해 원수 수질변동 대처능력이 떨어지고, 높아진 수도 사용자의 요구를 충족시키지 못하고 있는 실정이다. 그로인해 안정되고 안전한 운전이 가능하며 원격제어 및 감시가 가

능한 막여과공정이 그 대안으로서 주목받게 되었다 (Madaeni, 1994; Jacangelo et. al., 1995; 정 등, 1999; Hajime, 2002). 특히 막여과기술은 최근 정수분야에서 화두가 되고 있는 Cryptosporidium 등의 위생문제 해결을 위한 “제로콜마 NTU의 저탁도 규제”, 수도경영의 효율화를 위한 “절약형 수도기술”에 대응이 가능한 기술로서 소규모 수도를 중심으로 실적이 증가하고 있는 추세이다. 하지만 막여과공정의 국내 도입시기가 길지 않으며, 도입사례 역시 미미하여 실제 운전에서 따른 사고와 고장, 화학세정의 최적화 등의 문제점에 대한 대처방안이 충분히 마련되지 못하였다 (한국수자원공사, 2003; Edwards et. al., 2001).

따라서 본 연구에서는 복류수를 원수로 사용하는 소규모 정수장에 막여과공정 도입에 앞서 실제 필요한 운영기술 축적을 위하여 처리용량 300 m<sup>3</sup>/일 규모의 한외여과막 시설을 도입하여, 장기간 운전에서 따른 수질 및 수량변동에 관한 공정의 적용 가능성을 평가하였다. 아울러 1계열 고장 등으로 인하여 문제점 발생 시 나머지 계열로 요구수량을 확보하는 방안과 화학세정방법에 대한 평가를 수행하여 최적 운영방안을 제시하고자 하였다.

## 2. 실험방법 및 장치

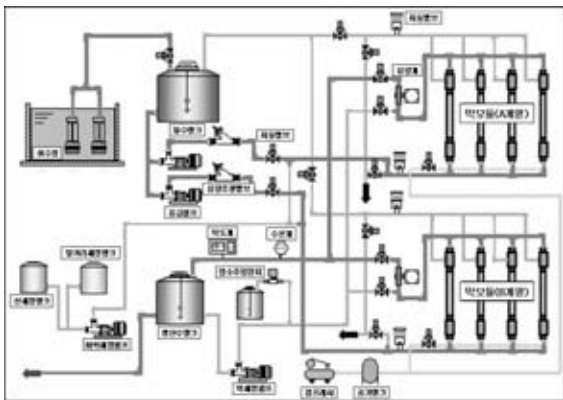


Fig. 1. 막여과장치의 구성도.

### 2.1. 실험장치

처리용량이 300 m<sup>3</sup>/일 (150 m<sup>3</sup>/일 x 2계열) 규모인 막여과 모형플랜트는 경북 김천시 J정수장 내에 설치되었다. 막여과 시스템은 원수 중의 협잡물이나 이물질 제거를 목적으로 설치된 전처리설비, 원수탱크, 공급펌프, 역세정펌프, 막모듈, 밸브류 및 계측기기로 구성된 막여과설비, 막모듈의 공기세정 및 자동운전을 위한 공기압축기와 공기탱크로 구성된 공기주입설비, 막모듈의 화학세정 시 필요한 화학세정탱크 및 펌프로 이루어진 화학세정설비로 구성되어 있다 (Fig. 1). 아울러 현장에서 자동 및 수동운전이 가능한 구조로 하였으며, 현장과 수자원연구원간에 전용회선을 이용하여 원격제어/감시가 가능하도록 구성하였다. 설치된 막모듈은 일본 Asahi-Kasei사 PAN(Polyacronitryl) 재질의 중공사형 한외여과막으로서 세부 특성은 Table 1에 나타난 바와 같다. 막여과 장치는 2계열로 구성되었으며 한 계열에 4개의 모듈이 설치되어있다.

### 2.2. 실험방법

막공급 원수는 J정수장 완속여과지의 원수로 사용되는 복류수를 사용하였으며, 200 mesh의 스트레이너를 통과한 원수는 공급수조에 유입되어 순환수와 혼합되어 막모듈로 공급된다. 여과방식은 순환여과(Cross flow) 방식으로서 정유량 조절밸브에 의하여 여과 80%, 농축 20%로 조절되며, 운전은 두 계열 모두 막여과수량을 일정히 유지하도록 막압차(막의 1차측과 2차측 압력)를 자동제어 하는 정유량방식으로 운전된다. 운전주기는 여과 20분이 경과되면 여과수에 의한 역세정이 30초간 실시되며, 여과/역세가 72회 반복된 후 공기와 원수를 이용하여 물리세정이 1회 실시된다. 즉, 공기세정+ 플러싱 60 초, 공기세정 60 초, 플러싱 60 초의 순으로 물리세정이 실시되며, 막간차압(TMP, transmembrane pressure)이 180 kPa 이상에 도달했을 때 화학세정을 하였다.

두 계열 모두 초기에 Flux 1 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-일로 가동을 시작하였으나 A계열의 경우 Flux를 감소시키며, B계열의 경우 Flux를 증가시키며 운전하며 차압변화를 살펴보았다. 계열

Table 1. 막모듈 사양 및 장치

항 목	모 들 사 양	막여과 장치
막모듈 종류	일본 Asahi-Kasei사 LOV-5210 한외여과 중공사막	
분리특성(MWCO)	80,000 dalton	
초기투과수량(25°C, 1.0 kgf/cm <sup>2</sup> )	0.3~0.7 m <sup>3</sup> /hr	
운전 조건 허용압력(kgf/cm <sup>2</sup> )	최대 3	
허용 pH	2~10	
유효 막여과 면적 (m <sup>2</sup> )	41	
모듈 길이(cm)/외경(mm)	222.7 / 140	
막 재질PAN	(Polyacronitryl)	

Table 2. 운영기간에 따른 유량 및 Flux 운전조건 변화

	A 계열		B 계열		비고
	유량(m <sup>3</sup> /hr)	Flux(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> -일)	유량(m <sup>3</sup> /hr)	Flux (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> -일)	
03.06.09~04.04.03	6.8	1.00	6.8	1.00	· 03.10.24 B계열 1차 화학세정
04.04.04~04.10.07	6.2	0.91	6.2	0.91	· 03.11.21 A계열 모듈 1
04.10.08~04.10.22	4.2	0.61	8.2	1.20	본 B계열 화학세정 모듈로 교체, B계열 1본 새로운 막으로 교체
04.10.23~04.11.23	2.2	0.32			
04.10.23~05.03.06			10.2	1.49	· 04.03.16 A계열 1차 화학세정
05.03.14~05.10.27	4.1	0.60	4.1	0.60	· 04.09.17 B계열 2차 화학세정
05.10.27~05.12.14			10	1.46	

별로 기간에 따른 유량과 Flux의 상세 변화조건은 Table 2와 같다.

한계차압에 먼저 도달한 B계열에 대한 화학세정(2003.10.23)은 3단계로 진행되었다. 1단계는 2% HNO<sub>3</sub>, 2단계는 1,000 mg/L NaOCl과 0.4% NaOH, 3단계는 다시 HNO<sub>3</sub>으로 pH를 2로 조정한 후 산세정은 1시간, 알칼리 세정은 2시간 동안 순환시켜 실시하였으며, 각 단계별 화학세정 실시 후 막 표면에 남아있는 화학세정액을 세정하기 위하여 린싱과 플러싱을 pH 7이 될 때까지 실시하였다. 그러나 2004년 3월 16일에 수행된 A계열의 1차 화학세정과 2004년 9월 17일에 실시된 B계열 2차 화학세정은 미니모듈을 이용하여 다양한 세정약품에 대한 평가를 수행한 후 가장 높은 회복율을 나타낸 방법을 적용하여 실시하였다. 즉, 1단계는 2% HNO<sub>3</sub>과 2% 옥살산, 2단계는 1,000 mg/L NaOCl과 0.4% NaOH, 3단계는 다시 2% HNO<sub>3</sub>과 2% 옥살산으로 각각 2시간 동안 순환시켰으며, 각 단계별로 린싱과 플러싱을 실시하였다.

막여과 생산수의 탁도 및 입자수 변화에 의한 막파손 여부를 감지하기 위한 방법으로 저탁도 및 입자수측정기(탁도 측정범위 0.0001~2.0000 NTU, 입자수 측정범위 0~10,000 개/ml)를 장착하여 연속 측정하였다. 수질분석은 원수 및 막여과 생산수에 대해 탁도, 철, 망간, DOC(용존유기탄소) 및 UV<sub>254</sub>를 측정하였으며, 수온, 압력, 유량, 탁도는 현장시설에서 자동측정되어 컴퓨터에 저장되도록 하였다. 아울러 EDX (Energy Dispersive X-ray Spectrometry)를 이용하여 막과 세정수의 특성분석을 행하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 수질평가

J정수장은 복류수를 원수로 사용하는 정수장으로서 조사기간('03.08~'05.10)동안 원수의 탁도는 0.11~3.52 NTU(평균 0.52 NTU)로서 계절적 변화가 거의 없는 것으로 조사되었다. 막여과수의 탁도는 평균 0.0004 NTU (0.0001~

0.0038 NTU)인 반면에 J정수장 완속여과지 처리수의 탁도는 평균 0.1 NTU(0.05~0.28 NTU)로서 막여과수가 재래식 공정의 처리수보다 양호하다는 것을 알 수 있다.

조사기간동안 J정수장 원수의 용존유기물질(DOC)의 농도는 평균 1.73 mg/L(0.87~2.59 mg/L)이고 완속여과 처리수는 평균 1.62 mg/L(0.90~2.51 mg/L)로서 약 6%가 제거되었음을 알 수 있다. 그러나 막여과 생산수의 경우 A, B계열 모두 평균 1.82 mg/L로 원수보다 더 높은 값을 나타내었으며 이는 막여과방식이 순환여과방식으로 유입수의 20%에 해당하는 농축수가 막여과 원수탱크에 회수되어 취수된 복류수와 함께 섞여서 다시 A, B계열 원수로 공급되기 때문이다. 즉, 막여과 원수의 평균 DOC는 1.82 mg/L(0.91~2.88 mg/L)로 취수된 복류수보다 높으며, 고분자 유기물의 경우 일부 UF막에서 제거될 수 있다는 보고와는(Yoon et al. 2005; Lahoussine-Turcaud et al., 1990) 달리 DOC가 막여과공정에서 거의 제거되지 않았음을 알 수 있다. 일반적으로 복류수는 하천수나 호소수보다 유기물 농도가 낮으나 J정수장의 경우 주변에 산재되어 있는 축사에서 배출되는 오염물질이 지하로 침투되어 복류수 수질에 영향을 미친 것으로 사료된다.

유입원수 내 철과 망간의 농도범위는 각각 0~0.26 mg/L(평균 0.068 mg/L)와 0~0.087 mg/L(평균 0.024 mg/L)로서 망간의 농도가 상대적으로 낮았고, 계절적 변화특성은 관찰되지 않았다. 막여과 생산수에서 철과 망간의 농도는 각각 평균 0.048 mg/L(0~0.174 mg/L)와 평균 0.022 mg/L(0~0.091 mg/L)로서 거의 용존형태로 존재하여 입자상 철과 망간이 막여과 과정 중에서 제거되었음을 알 수 있었다. 완속여과지 처리수에서 철과 망간의 평균농도는 각각 0.037 mg/L과 0.001 mg/L로서 막여과 공정보다 철과 망간의 제거효율이 높은 것으로 나타났으며, 이는 완속여과지 내에서 식하는 미생물의 분해작용에 의한 것으로 사료된다(Elmer et al., 1999).

#### 3.2. 차압의 변화

수온은 막생산수량 및 차압변화에 영향을 미치는 중요한

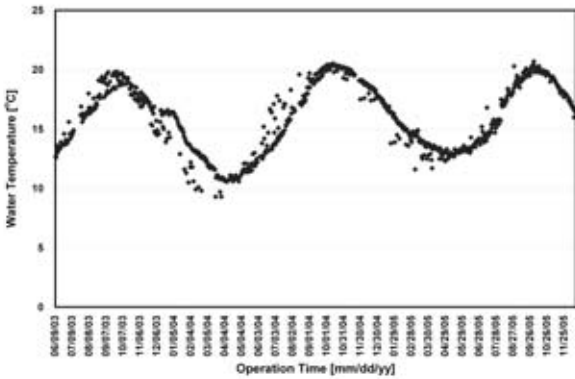
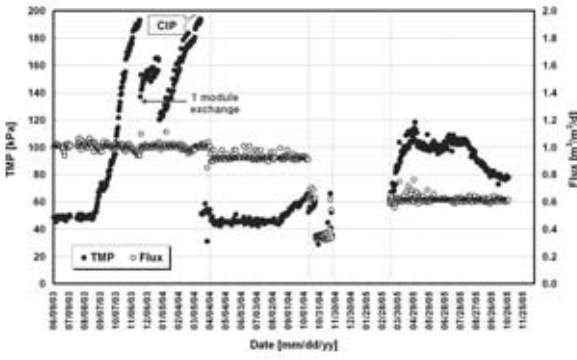


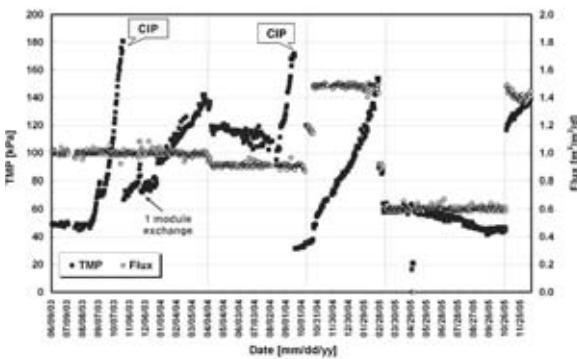
Fig. 2. J 정수장 원수의 계절별 수온변화.

인자로서 Fig. 2에 2003년 6월부터 2005년 12월까지 실험기간 중의 수온변화를 나타내었다. 지표수와는 달리 계절적으로 수온분포 변동이 크지 않은 복류수의 특징을 알 수 있었다. 특히, 일교차가 크지 않은 가을에는 대체적으로 여름보다 수온이 높으며, 여름과 겨울의 수온차는 낮시간에만 차이나고 밤에는 차이가 없는 것으로 조사되었다. 따라서 복류수의 경우 겨울철 저수온에 의한 급격한 차압증가 없이 안정적인 운영이 가능함을 알 수 있다.

Fig. 3은 Table 2의 운전조건 하에서 운영기간에 따른 A계



(A계열)



(B계열)

Fig. 3. Flux 변화와 운영기간에 따른 막간차압 변화특성 (상: A계열, 하: B계열).

열과 B계열의 막간차압의 변화를 보여주고 있다. 2003년 6월 9일부터 Flux  $1 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{일}$ 로 운전이 가동된지 약 80일이 지난 후부터 차압이 급격히 상승하여 A와 B계열 모두 NaOCl을 이용하여 유지세정을 실시하였으나 효과가 없었다. 그 후 B계열의 경우 차압이 계속 상승하여 약 140여일 운전 후 한계차압인 180kPa에 이르러 막모듈 제조업체가 제시한 방법으로 1차 화학세정을 실시하였으며 세정 후 차압이 67kPa로 회복되었다. 그러나 화학세정 후 회복률이 약 65%에 불과하여 화학세정방법에 대한 검토를 위하여 B계열의 화학세정된 4본의 막모듈 중 1본을 새로운 막모듈로 교체하고, 제거된 B계열 막모듈은 A계열의 오염된 막모듈 1본과 교체하였다. B계열과 마찬가지로 A계열도 운전 약 150일째에 차압이 180kPa까지 상승하였으나 B계열과는 달리 화학세정을 실시하지 않고 차압이 193 kPa까지 상승한 시점에서 B계열의 화학세정된 막모듈 1본을 오염된 막모듈과 교체한 결과 차압이 137kPa로 감소하였다.

B계열을 대상으로 2계열 운전 시 1계열의 고장 또는 생산량 증대에 대비하여 막투과 Flux를 상승시킬 경우 운전조건 설정을 위한 실험을 실시하였다. 즉, 2004년 4월 4일부터 2005년 3월 6일까지 B계열의 Flux를 0.9, 1.2,  $1.5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{일}$ 로 점차 변화시켰을 경우에 차압변화를 관찰하였다. 우선 B계열 Flux를 1에서  $0.9 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{일}$ (‘04.4.4~’04.10.7)로 낮춘 결과 약 5개월동안 차압이 약 140에서 100kPa로 서서히 감소하다 2004년 8월 13일 갑자기 차압이 증가하기 시작하여 Flux  $0.9 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{일}$ 로 운전된지 약 6개월인 2004년 9월 17일에 차압이 약 170kPa까지 증가하여 2차 화학세정을 실시하였다. 화학세정 후 차압이 31kPa까지 회복되었으며, 약 20일동안 Flux  $0.9 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{일}$ 로 운전하다  $1.2 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{일}$ 로 증가(‘04.10.8~’04.10.22)시킨 결과 차압이 크게 증가하지 않았다. 그러나 Flux를  $1.5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{일}$ 로 증가시킨 후 차압이 서서히 증가하여 화학세정 후 약 4개월 후인 2005년 2월 25일에 차압이 154kPa에 도달하였다. 즉, 고 Flux 조건하에서는 6개월 이상 화학세정 없이 운전하기가 어렵다는 것을 알 수 있다.

A계열은 B계열과 달리 화학세정 후 Flux를  $0.9 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{일}$ (‘04.4.4~’04.10.22)에서  $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{일}$ (‘04.10.23~’04.11.23)로 감소시켜 운전하다 약 3개월간 수량 부족으로 운전을 정지한 후 2005년 3월 14일부터 Flux  $0.6 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{일}$ 로 운전을 재개하였다. Flux  $0.9 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{일}$ 로 운전 시 약 4개월 동안 차압이 약 45kPa로 거의 일정하게 유지되다가 B계열과 마찬가지로 2004년 8월 13일경부터 차압이 서서히 증가하여 약 2개월 후에 66 kPa에 도달하였다. Flux를 0.9에서  $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{일}$  감소시킨 결과 차압이 다시 35kPa까지 감소하였으며 약 한달동안 일정하게 유지되었다.

2005년 3월 6일 Flux  $1.5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{일}$ 로 운전하던 B계열의

Flux를 0.6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·일로 낮춘 결과 막차압이 154에서 64 kPa로 떨어졌고, A계열은 3월 14일 B계열과 동일한 Flux로 운전 재개한 결과 운전 정지시 35kPa이었던 차압이 61 kPa로 증가되어 개시되었다. A계열의 경우 차압이 빠르게 증가한 후 일정하게 유지되다 다시 감소한 반면에 B계열의 경우 차압이 서서히 감소하였다. 즉, 고 Flux조건에서 급격히 상승한 막차압은 Flux를 낮춤으로써 쉽게 회복되는 것으로 보아 비가역파울링물질이 축적된 것이 아닌, 단순한 막간 차압에 의한 케이크층의 압밀로 인한 차압 증가현상으로 사료된다. 아울러 A계열의 경우 정지시 NaOCl이 미량 들어있는 상태로 막모듈을 보관하였지만, 정지된 상태에서의 보관이 막차압의 상승을 일으켰던 것으로 판단된다. 따라서 막모듈을 보관시 세정 등을 실시한 뒤 적절한 보존액으로 보관하여야 할 것이다.

### 3.3. 화학세정방법 및 막모듈 오염특성 평가

일반적으로 산세정으로는 무기이온이 제거되고, 알칼리세

정으로는 유기물질이 제거되는 것으로 알려졌다(김한승 등, 2006) Flux 1 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·일로 운전이 가동된지 약 140여 일 후에 한계차압인 180kPa에 이르렀을 때 B계열 막모듈을 Table 3에 나타난 방법으로 화학세정을 실시하였다. 최초 화학세정 조건은 막제조사에서 설정한 기준으로 세정 결과 전체 회복율이 65%에 불과하여 화학세정방법의 재검토가 요구되었다. 이때 2% 질산을 이용한 산세정 결과 다른 무기물 성분 중에서 철 성분이 가장 높은 농도로 검출되어 주요 오염물질임을 알 수 있었으며, 알칼리 세정 폐액의 색깔이 노란색을 띠는 것은 부식물질에 기인한 것으로 추측되었다.

최적 화학세정방법을 도출하기 위하여 약 5개월 운전하였던 B계열 막모듈 1본을 해체한 후 오염된 파이버를 이용하여 옥살산, 질산, 황산, 수산화나트륨, 차아염소산나트륨 등을 적당하게 조합하여 Table 4와 같은 조건으로 화학세정방법을 평가하였다. 실험결과 전체적으로 산세정이 알칼리세정보다 세정효과가 컸고, 특히 2% 질산+2% 옥살산이나 5% 황산을 이용하는 것이 효과적임을 알 수 있었다. 또한 세정시

Table 3. B계열 화학세정 결과

횟수	일시	방법	B계열			
			회복차압 (Kpa)	회복율 (%)	폐액중 Mn (mg/m <sup>2</sup> 막면적)	폐액중 Fe (mg/m <sup>2</sup> 막면적)
1차	03.10.23	세정 전	180	23.3		
		1. 2% HNO <sub>3</sub> (1시간)			ND	55
		2. 0.1% NaOCl+0.4% NaOH (2시간)			ND	ND
		3. pH 2 HNO <sub>3</sub> (1시간)			-	-
		세정 후	67	65		
2차	04.09.17	세정 전	170	21.2		
		1. 2% HNO <sub>3</sub> +2% 옥살산 (2시간)			54	2825
		2. 0.1% NaOCl+0.4% NaOH (2시간)			ND	ND
		3. 2% HNO <sub>3</sub> +2% 옥살산 (2시간)			2	14
		세정 후	32	116		

Table 4. 화학세정 방법에 따른 세정효과

세정방법	회복률(%)
세정 전	12
1 2% Oxalic acid (1 hr)	83
2 5% Nitric acid (1 hr)	76
3 30% Nitric acid (1 hr)	85
4 5% Chloric acid (1 hr)	84
5 5% Sulfuric acid (1 hr)	86
6 5% Citric acid (1 hr)	46
7 2% Nitric acid + 2% Oxalic acid (1 hr)	79
8 1000ppm NaOCl (1 hr)	12
9 0.4% NaOH (1 hr)	28
10 1000ppm NaOCl + 0.4% NaOH (1 hr)	28
11 pH2 Nitric acid (2hr)	16
12 2% Nitric acid (1 hr) → 1000ppm NaOCl + 0.4% NaOH (2hr) → pH2 Nitric acid (1 hr)	62
13 5% Sulfuric acid (1 hr) → 1000ppm NaOCl + 0.4% NaOH (2hr) → 5% Sulfuric acid(1hr)	86
14 2% Nitric acid + 2% Oxalic acid (1 hr) → 1000ppm NaOCl + 0.4%NaOH (2hr) → 2% Nitric acid + 2% Oxalic acid (1 hr)	83
15 2% Nitric acid + 2% Oxalic acid (2hr) → 1000ppm NaOCl + 0.4% NaOH (2hr) → 2% Nitric acid + 2% Oxalic acid (2hr)	92

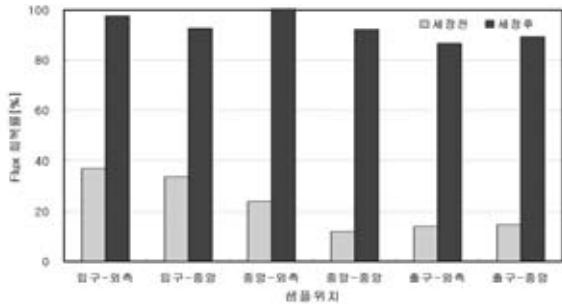


Fig. 4. 5개월 사용된 막모듈 부위별 세정 전·후의 Flux 회복률.

강도 산세정 1시간, 알칼리 세정 2시간 보다는 산세정도 2시간 하는 것이 효과가 높았다. 특히 B계열의 1차 세정조건이었던 2% 질산 1시간 세정 → 1000 ppm NaOCl + 0.4% NaOH 2시간 세정 → pH 2 질산 1시간 세정시 회복율이 62%로 충분한 세정효과를 얻지 못함을 재확인 하였다.

초기운전 530여일 후인 2004년 9월 17일에 B계열을 대상으로 위 실험에서 가장 높은 회복율을 나타낸 방법으로 3단계의 화학세정이 실시되었다. 즉, 1단계 화학세정은 2% 질산 + 2% 옥살산으로 2시간, 2단계 화학세정은 1,000 ppm NaOCl+0.4% NaOH로 2시간, 3단계는 2% 질산+2% 옥살산으로 2시간 실시하였다. 화학세정폐액의 성분분석 결과 1단계 산세정폐액에는 철이 1544.3 mg/L, 망간이 29.3 mg/L 그리고 규소가 14.5 mg/L 검출되었다. 2단계 알칼리세정폐액에서는 철과 망간은 검출되지 않았으며, 규소만 5.9 mg/L 검출되었다. 3단계 화학세정폐액에서도 철, 망간, 규소가 검

출되었으나 첫 번째 세정폐액에서 검출되었던 농도보다 훨씬 낮은 수치를 나타내었다. 이를 통하여 막오염을 일으키는 주요 오염물질이 철성분임이 거듭 확인되었으며, 회복율은 116%로 크게 개선되었다. 이는 산세정 단계에서 옥살산이 첨가되어 철과 망간 제거율이 증가하였고, 아울러 세정시간도 2배 증가하였기 때문인 것으로 판단된다. 5개월 사용된 막의 신도 및 강도 측정결과는 출하시의 성능을 100%로 간주하였을 때 강도유지율은 96%, 신도유지율 82%로 뚜렷한 저하는 없는 것으로 나타났다.

막모듈의 부위별 Flux 회복율을 측정할 실험에서는 모듈의 길이 방향으로 3부분(입구, 중앙, 출구), 단면방향의 2부분(외측, 중앙)으로 총 6부분에 대하여 세정전·후의 Flux 회복률을 조사하였다. 세정방법은 세정효과실험에서 가장 효과가 높은 것으로 나타난 2% 질산+2% 옥살산 2hr → 1,000ppm NaClO+0.4% NaOH 2hr → 2% 질산+2% 옥살산 2hr으로 하였다.

Fig. 4에서 볼 수 있듯이 세정 전에는 입구 쪽보다 막모듈 중앙 특히 내측의 회복률이 낮게 나와 상대적으로 오염이 높은 것을 알 수 있다. 그러나 화학세정에 의해 각 부위 모두 85% 이상의 회복률을 나타내었다.

사용막의 EDX분석(촬영조건: 가속전압 15kV, 제작사: 호리바제작소 EMAX-5770, 전처리: SEM과 동일)분석결과 세정 전 외표면에는 C, O 이외에 Fe, Ca, Si, Al 등 다량의 금속원소가 검출되었으며, 특히 Fe의 피크가 높게 나타났다(Fig. 5). 반면, 세정 전 내표면에는 금속원소 중 Fe만이 검출되어 Fe이 차압증가의 주요 원인임을 확인할 수 있었다.

이와 같이 막모듈의 물리화학적 특성을 조사한 결과 막모듈의 육안 관찰에서 상당한 오염이 관찰되었고, SEM관찰에 의해서도 외표면 뿐만 아니라 내표면에도 오염물질이 부착되어 있는 것을 알 수 있었다. 아울러 EDX분석에서도 내표면에 Fe이 검출된 결과로부터 내표면의 오염원인이 막여과수에 존재한 용해성 Fe 성분이 역세시의 NaClO에 의해 산화되어 내표면에 석출되었기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 화학세정시 산세정 약품으로 무기산이 아닌 Fe과 Mn 제거에 효과적인 옥살산과 같은 유기산을 사용하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

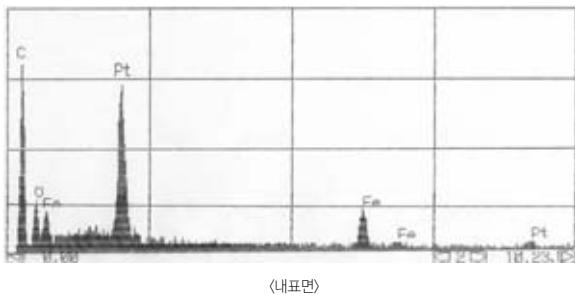
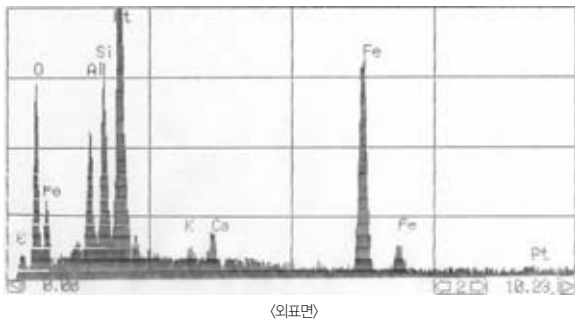


Fig. 5. 세정 전 막표면의 EDX 분석결과.

### 3.4. 경제성평가 및 고장사례

K시 J정수장 완속여과시설을 막여과시설(규모 300m<sup>3</sup>/일)의 운영비용 평가 모델시설로 선정하였다. 비용평가 시 변동비로 전력비와 소모품비(약품비), 고정비로 인건비, 막교환비, 일반관리비(통신비, 수질분석비 등), 보수자재비 및 자본비를 포함시켰다. 실제 지자체의 정수시설은 국고 및 지방비로 설치하기 때문에 자본비는 제외하는 경우와 포함하는 경우로 구분하였으며, 대부분 시설의 가동률이 저조하기 때

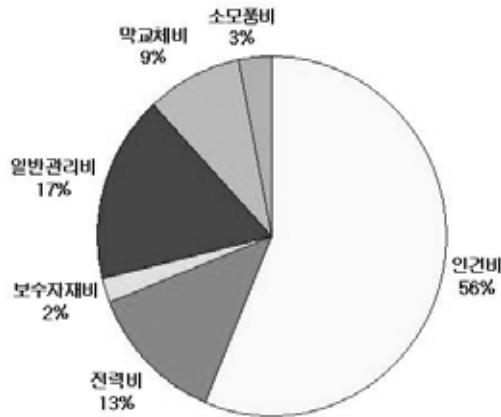


Fig. 6. 막여과시설의 생산수 비용 구성비.

문에 설계유량으로 가동시, 75% 가동, 50% 가동 시로 나누어 평가하였다. 이때 전력비는 월간 전력소비량 6,000kWh 기준으로 막여과시설만 고려하여 계약전력 20kW로 산정하였으며, 인건비는 1인당 200만원/월로, 막교체비는 막모듈 내용년수 5년 기준, 보수지재비는 총건설비의 0.5%/월로 산정하였다.

즉, 본 막여과 시스템에서 자본비와 인건비를 고려하지 않고 전력비, 막교환비, 기타비용을 고려한 300 m<sup>3</sup>/일 생산비용은 174 원/m<sup>3</sup>, 인건비가 포함된 조건은 396m<sup>3</sup>/원으로 2배 이상 차이가 나타났으며, 가동률이 75% 및 50%로 낮아지는 경우에는 생산수비용이 100% 가동 시 보다 각각 23%, 71% 상승하였다. 이와 같이 생산비용은 인건비의 유·무와 가동시간에 따라 차이가 크므로 경제적인 운영을 위해서는 인건비를 줄이거나, 가능한 많은 물량을 생산하여 상대적인 고정비의 부담을 줄이는 설계 및 운영기법이 필요한 것으로 조사되었다. Fig. 6은 막여과시설에의 비용구성 비율을 나타낸 것으로 인건비가 막여과수 생산비용에서 가장 큰 제한요소를 알 수 있다.

K시 수도요금에 520원/m<sup>3</sup> 일때 완속여과시설과 막여과시설(운영인원 2인 기준)의 생산비용은 각각 881과 953원/m<sup>3</sup>으로 완속여과시설은 361원/m<sup>3</sup>, 막시설은 433원/m<sup>3</sup>의 적자이나 막여과시설을 무인운전 시 303원/m<sup>3</sup>의 흑자이다. 또한 2003년 9월에 완속여과시설과 막여과시설의 생산수량 당 전기원단위는 각각 0.51과 52 kWh/m<sup>3</sup>로서 비슷하지만 막여과시설은 송수펌프를 제외한 것이다. 따라서 송수펌프를 포함하는 경우 막여과시설이 전력소모가 더 많은 것으로 나타났다.

고장사례로는 원격제어/감시를 통한 가동기간 동안 시설의 가동중단이 수회 발생하였다. 가동중단의 원인은 낙뢰에 의한 누전, 에어컴프레서의 고장 등이었고, 가동이 중단되지 않은 고장으로는 정유량 조절밸브의 오작동, 염소주입관의

부식 등이 있었다. 특히 현장과 연구원간 전용회선의 통신단절이 강우와 낙뢰의 영향으로 수 회 발생하였다. 일단 통신이 단절되면 시설가동이 중지되는 경우도 있기 때문에 현장에 반드시 운영요원이 직접 방문하여 조치하여야 하고, 전용회선 상에 이상이 발생하는 경우에는 한국통신 점검요원이 조치하여야 한다.

복류수는 표류수보다 온도변화가 거이 없어 막여과시설을 안정적으로 운영할 수 있는 반면에 여름철(6~9월)에는 상대적으로 수온이 기온보다 2~7℃ 정도 낮고 겨울철(11~2월)에는 수온이 5~20℃ 정도 높아 결로현상이 우려된다. 결로란 배관 내부온도가 노점온도(공기 중의 수증기가 물로 응결하는 온도) 이하로 떨어지는 때에 생기는 것으로 2000~2003년까지의 6~9월까지의 평균 월별 기온 및 상대습도를 추출하여 Goff-Gratch 식을 이용하여 결로 발생 여부를 검토한 결과 7~8월에 결로 발생이 우려되었다. 그러나 실제 2003~2004년도 가동시 6월 초순에서 9월 초순까지 심한 결로발생이 관찰되었다. 결로방지 대책으로는 배관이 위치하는 공간의 습도를 낮추도록 제습을 하는 방법과 배관 온도를 노점온도 이상으로 유지할 수 있도록 단열하는 방법이 있다. 아울러 결로된 수분이 바닥에 흘러내려 정제하지 않도록 시공시 바닥을 경사면으로 시공하는 등의 대책을 세워야 한다.

복류수를 사용하여 겨울철 수온이 높을지라도 정지 시에 대비하여 동결대책을 세워야 한다. 즉, 운전 중에는 동파될 우려가 없으나 시설 정지시 배관 및 막모듈에 물이 정제하여 동파될 우려가 있다. 동결대책으로 막여과시설 전체를 보온하는 방법이 있으나 난방비가 소요되는 문제점으로 일본에서는 막모듈 부위만 보온하는 방법을 사용하기도 한다.

#### 4. 결론

복류수를 원수로 하여 300m<sup>3</sup>/일 규모의 한외여과막 시설을 장기간 운전하며 막차압의 변화, 처리수질의 평가, 유지관리비용 분석 등을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 한외여과에 의해 탁도와 입자상 물질은 효과적으로 제거되었으나, 용존성물질은 거의 제거되지 않음을 알 수 있었다.
- 2) 본 한외여과막 시설을 화학세정없이 6개월 이상 안정적으로 운영하기 위해서는 Flux를 1 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·일 이하로 운전해야 한다.
- 3) Flux 1.5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·일의 고 Flux로 운전시 비가역적 파울링물질에 의해 안정적 운영시기 없이 0.87kPa/일의 속도로 차압이 급격히 증가하나 Flux를 낮춤으로써 차압을 쉽게 회복시킬 수 있다.
- 4) 운전이 정지된 상태에서 막을 장기간 보관할 경우 재가

동시 막차압 상승을 유발시키므로 보관시 화학세정 등을 실시한 뒤 적절한 보존액으로 보관해야한다.

- 5) 본 연구에서 원수로 사용된 복류수는 탁질과 유기물 농도는 낮으나 철의 농도가 높아 막오염의 주요 원인물질인 것으로 나타났으며, 약품종류와 약품의 조합을 달리 하여 화학세정효과를 평가한 결과 1단계는 2% 질산 + 2% 옥살산으로, 2단계는 1,000 mg/L NaOCl + 0.4% NaOH, 3단계는 1단계와 동일한 방법으로 각각의 단계별로 2시간 세정하는 방법이 가장 좋은 것으로 조사되었다.
- 6) 막여과시설을 무인운전 할 경우, 기존 정수처리공정에 비해 경제성인 있는 것으로 판단되나 인건비 유무와 가동시간 등의 조건에 따라 생산비용의 변화가 크므로 경제성을 확보하기 위한 설계 및 운영기법이 뒷받침되어야 할 것이다.
- 7) 원격제어/감시시스템, 낙뢰, 결로 및 동결에 대한 대책이 필요하며, 밸브, 에어컴프레서 등의 기기에 대한 주기적인 관리가 필요하다. 아울러 매뉴얼화 작업을 통한 사례별 DB화 구축이 필요하다.



## 참고문헌

1. 정팔진 · 이성우 · 김충환 · 채선하 (1999) 오염된 지표수의 상수 처리를 위한 정밀여과막 적용, *한국물환경학회지*, 15(1), pp. 53~63
2. 한국수자원공사 (2003) *간이상수도막여과 정수처리공정 시범 적용(2차년도 보고서)*, 한국수자원공사 수자원연구원
3. 김한승, 김충환, 오정인, 정범석 공역 (2006) *수도막*, 동화기술, 서울
4. Edwards et. al. (2001) Membrane solution to a significant risk Cryptosporidium groundwater source, *Desalination*, 137, pp. 193~198
5. Hajime T. G. (2002) The results of implementing membrane filtration facilities in Japan, Water Environment Symposium with Japan and Korea
6. Jacangelo, J.G., Adham, S.S., and Laine, J.M. (1995) Mechanism of *Cryptosporidium*, Giardia, and MS2 virus removal by MF and UF, *AWWA*, 87(9) pp. 107~121
7. Lahoussine-Turcotte, V., Wiesner, M.R., Bottero, J.Y., Mallevaille, J. (1990) Coagulation pretreatment for ultrafiltration of a surface water, *AWWA*, 82(12), pp. 76-81
8. Madaeni, S. S. (1999) The application of membrane technology for water disinfection, *Wat. Res.*, 33(2), pp. 301~308
9. Sommerfeld, E.O. (1999) *Iron and manganese removal handbook*, AWWA publication, Denver
10. Yoon, Y., Amy, G., Cho, J., and Her, N. (2005) Effects of retained natural organic matter (NOM) on NOM rejection and membrane flux decline with nanofiltration and ultrafiltration, *Desalination*, 173, pp. 209~221