

## 막여과 고도정수처리 기술개발

### Technology development of Membrane Filtration for Advanced Water Treatment

이길숙<sup>1)</sup>, 이광윤, 이범구, 김영태

Lee, Kil-sook · Lee, Gwang-yun · Lee, Bum-goo · Kim, Young-tae

#### 1. 기술개발의 배경

재래식 정수장은 혼화, 응집, 여과 공정에 의한 물리적 화학적 입자제거 공정과 잔류 병원성 미생물을 불활성화시키는 소독 공정으로 구성되어 있다. 지금까지의 음용수 처리 여과 공정은 모래 등의 입자성 여재를 사용하는 여과방식을 사용하여 왔다. 비록 입자성 여재 여과 방식이 양호한 수질의 처리수를 생산할 수는 있으나, 병원성 미생물의 통과에 대한 완전한 장벽은 되지 못한다. 따라서 공중 보건 측면에서 이러한 미생물을 불활성화 처리를 위한 추가 소독 공정이 필요하다. 그러나 크립토스포리디움(Cryptosporidium)과 같은 몇가지 미생물은 국내에서 보편적으로 사용되는 염소 소독에 내성이 있다. 또한 염소 소독에 의해 발생하는 소독부산물(DBPs, Disinfection byproducts)은 현재의 국내수질기준을 만족하고는 있으나, 먹는 물 수질에 대한 요구 수준은 지속적으로 높아지고 있고, 아울러 수질 기준도 강화되는 추세이므로, 향후 20년 이상의 수질목표를 고려한다면, 염소 투입량을 제한하는 대체공정 기술개발은 피할 수 없는 실정이다.

막여과(Membrane Filtration)는 소독과 DBPs의 서로 상반된 목표를 동시에 달성할 수 있는 대체 공정으로 선진국에서는 그 도입사례가 급격히 증가하고 있는 추세이다. 막(Membrane)은 1960년대 해수의 담수화를 위한 역삼투(RO, Reverse Osmosis)가 사용된 이래, 1980년대에는 연수화와 총유기탄소(TOC, Total organic carbon) 제거를 위한 나노여과(Nano-Filtration)가 사용되었다. 1990년대 이후에는 정밀여과(MF, Micro-Filtration) 및 한외여과(UF, Ultra-Filtration)의 상업화로 정수처리분야에까지 적용이 확대됨으로써 최근 가장 부각되고 있다.

MF 또는 UF는 정수처리공정에서 입자성물질(즉, 병원성 미생물)의 제거를 위한 단일공정, 기존 정수장의 개량시 여과공정의 대체 방안, 초순수제조 또는 해수담수화를 위한 RO 공정의 전처리공정으로서 주로 사용되며, 국내에서도 소규모 정수처리시설 또는 초순수 전처리시설 등으로 점차 설치, 운영되고 있는 경향이다. 아울러 정수장의 유지관리 측면에서, 향후에는 정수처리시설의 효율화, 집적화, 자동화를 고려하지 않을 수 없다. 도시 규모의 증가 또는 발전으로 신규 상수도 수요 발생시에 과거에는 정수처리장 증설이 쉬웠으나, 최근에는 도시화와 남비(Not In My Back Yard) 현상의 심화로 대규모 부지를 필요로 하는 재래식 정수처리공정은 점차 어려워지는 실정이다. 이에 따라 막여과는 소수부지가 적게되는 집적화된 공정기술로서 기존 정수장의 개량만으로도 소정의 수요량을 확보할 수 있는 공법이라 할 수 있다.

또한 MF/UF는 원수 수질에 따른 처리수질이 안정적이고, 자동화 및 무인 운전이 가능하며, 염소, 응집제 및 각종 보조약품의 사용이 절감되어 슬러지 발생량이 적은 친환경적인 기술로서 장래 10~20년 후 정수처리기술의 주류를 이룰 것으로 예상된다. 따라서 국내의 노후된 정수처리시설 개선을 위한 장기적이고 경제적인 대안으로서 막여과 기술의 적극적인 연구가 필요하다.

#### 2. 정밀여과 및 한외여과 개념

정밀여과(MF, Micro-Filtration)와 한외여과(UF, Ultra-Filtration)는 막의 공극(Pore size)을 기초하여 부유 및 콜로이드 입자의 제거능력으로 특징을 나타낸다. 모든 막은 막의 제질 및 제조 공법에 따라 공경이 다양한 분포를 가진다. 그러므로 공경은 공칭공경(Average pore size) 또는 절대공경(Maximum pore size)으로 말하며,  $\mu\text{m}$ 로 표시한다. MF막은 보통 공경이 0.1~0.2 $\mu\text{m}$ (공칭공경 0.1 $\mu\text{m}$ )이며, UF막의 공경은 보통 0.01~0.05 $\mu\text{m}$ (공칭공경 0.01 $\mu\text{m}$ ) 또는 그 이하이다.

UF막은 유기성 분자를 보존하는 능력 때문에, 전통적으로 공경 보다는 분획분자량(MWCO, Molecular weight cut-off)으로 나타내었다. MWCO의 개념은 크기 보다는 원자량에 따른 제거 특성치이며, 단위는 질량 단위인 달톤(Dalton)으로 나타낸다. MWCO로 규정되는 UF막은 MWCO를 초과하는 분자량을 갖는 화합물 또는 분자에 대한 장벽으로 가정된다. 이러한 유기물은 형태적으로 정의하기 어렵고, 부유성 입자형 보다는 용존물로서 발견된다. 따라서 화합물의 형태를 기준으로 논할 때

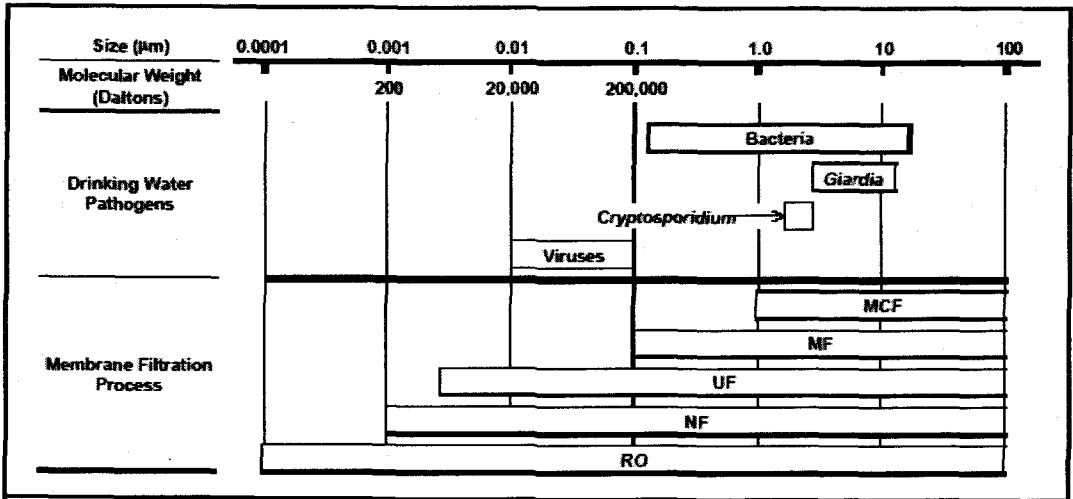
1) (주)대우건설 토목사업본부 부장 (E-mail:leekilsook@dwconst.co.kr)

는 입자공경보다는 MWCO로 UF막을 정의하는 것이 더 편리한 개념이다. UF막의 MWCO범위는 10,000달톤 내지 500,000달톤이며, 정수처리에 사용되는 UF막은 약 100,000달톤이다.

그러나 UF막은 무게 또는 질량에 근거하지 않고, 입자 오염물의 크기에 따라 제거되므로, 정수처리에 사용되는 UF막은 미생물 및 입자 제거능을 공경으로 나타낼 수 있다.

## 2.1 정수처리에서의 정밀여과와 한외여과

(그림1)에서 나타내는 막분리 스펙트럼은 용존물질을 제거하기 위한 역삼투(RO) 및 저압역삼투(NF)에서 미세입자를 제거하기 위한 한외여과(UF) 및 정밀여과(MF)까지 걸쳐 있다.



(그림 1) 막여과 스펙트럼

정수처리에서 한외여과는 막의 활성층의 공경에 따른 크기에 해당하는 가장 미세한 입자까지 제거할 수 있다. 한외여과의 전형적인 제거성능은 0.001 $\mu$ m 내지 0.01 $\mu$ m이다. 정밀여과는 한외여과보다는 한 두 등급 더 조대한, 즉 약 0.1 $\mu$ m 내지 0.2 $\mu$ m, 입자를 대상으로 운전한다.

도시의 수도를 포함하는 일반적인 정수처리에 적용할 때, 한외여과는 0.001 $\mu$ m 내지 0.02 $\mu$ m까지 차단하기 위하여 선정하며, 이는 원수에서 발견되는 가장 작은 바이러스까지 완전히 막을 수 있다. 그러나, 조순수 처리를 할 때는, 완전한 입자제거 및 살균 여과를 위하여, 이 보다 한등급 더 미세한 공경을 적용한다.

정밀여과는 어느 정도의 바이러스를 제거하나, 바이러스의 장벽은 되지 못한다. 그러나 박테리아, 크립토스포리디움 및 지아디아 같은 원생동물류의 기생충 제거가 가능하므로 도시 상수도에 적용된다.

한외여과막과 정밀여과막의 분리 원리는 모래등의 입상여재 여과 또는 섬유상 여재 여과와 같은 재래식 처리장치와는 다르다. 여재여과는 중력식 제거원리에 의존한다. 이의 공칭 공경은 걸러내는 입자보다 상당히 크다. 입상 여재의 여과에서, 낱알의 크기는 100 미크론 이상이며, 공경도 비슷하다. 이러한 여과기의 절대 정격성능은 같은 크기가 될 것이다.

그러나 여재의 깊이와 여층을 이동할 때 꼬불꼬불한 통로를 지나야 하기 때문에, 비교적 높은 제거율을 얻을 수 있다. 150 $\mu$ m의 모래입자로 된 여층은 개략 10 $\mu$ m 내지 20 $\mu$ m까지의 입자에 대하여 90% 내지 99%의 제거율을 얻을 수 있다. 입상여재 여과의 제거율은 일정하지 않고, 환경 및 운전인자에 따라 변동될 수 있음을 의미한다.

반면 한외여과와 정밀여과는 표면제거원리로서 운전되며, 미세 스크린 또는 체와 닮았다. 막 표면의 공경은 매우 균일하며, 좁은 공경 크기로 분포되어 있다. 공경보다 큰 입자는 표면에서 걸려 급수 쪽에 남겨나 옆에 응집되어 제거된다. 공경보다 작은 입자는 함께 막을 통과하여 여과수에 남는다. 이러한 특징으로 막은 항상 일정한 여과수질을 얻을 수 있으며, 수질기준을 정확히 맞추는 데 이상적이다.

높은 제거 효율과 일정한 처리수질을 얻을 것 외에, 재래식 처리법과 비교하여 막은 다른 여러가지 장점이 있다. 막은 보다 간결하며(재래식과 비교하여 33% 적은 면적에 설치 가능), 자동화가 가능하며(보통 집중하지 않는 운전), 약품 사용량이 적다(약품비가 적고, 폐수 발생량이 적다).

## 2.2 한외/정밀여과 개발의 역사

한외여과는 1970년대에 생물공학에서 단백질 분리와 같은 공정에 적용하기 위하여 개발되었다. 초기의 관심은 얇은 필름 합성 RO 나선으로 개발된 기질의 이용이었다. 그러나 한외여과막으로서 기능은 수행하였지만, 막 오염의 문제를 겪게 되었다. 한외여과막의 개발은 관형 및 모세관형의 대체에 초점이 맞추어졌으며, 분획분자량은 3KD에서 50KD의 범위였다. 비록 이 범위의 분획분자량을 갖는 한외여과막은 초순수에는 적용할 수 있었지만, 일반적 정수처리에 적용하기에는 너무 까다로웠다. 투과율은 너무 낮고, 운전 압력은 너무 높았다.

정밀여과는 한외여과보다 한층 먼저 개발되었다. 정밀여과의 목적은 0.22 $\mu$ m의 소독여과 카트리지에 있었으며, 의학 및 생물공학에서 박테리아 제거를 보증하는 것이었다. 십자류 정밀여과는 그때 다양한 범위의 공정과 하수처리를 위하여 개발되었으나, 일반적인 정수처리 분야에서는 1980년대 중반이 되어서야 정밀여과 형식이 소개되었다.

오늘날의 정수처리의 선구자는 1970년대에 발명된 폴리설푼(PS)막이다. 초기에는 초순수 분야 적용과 부대 공정 적용에 한정되었다. 1980년대에는 초산셀룰로스(CA, Cellulose acetate)와 폴리에테르설푼(PES, Polyethersulfone) 한외여과막의 등장과 함께 일련의 중요한 발전이 있었으며, 정수처리용도로의 잠재성이 열렸다. 한외여과에서 핵심적인 발전은 초기 단백질 분리 한외여과막보다 0.01  $\mu$ m 정도의 공경을 어떻게 만들 것인가였다. 정밀여과의 경우는 허용투과율에서 0.2 $\mu$ m을 신뢰성 있게 제거하기 위하여 폴리프로필렌(PP, Polypropylene)의 공경을 제어하는 것이 핵심이었다.

## 2.3 중공사/ 모세관 대 나선형

역삼투(RO) 및 저압역삼투(NF) 제품은 대부분 나선형(Spiral)이다. 반면 한외여과(UF)/정밀여과(MF)는 대부분 중공사/모세관(Hollow Fiber/Capillary) 모듈이다. 중공사의 뜻은 안지름 0.5mm이하를, 모세관의 뜻은 안지름 1.0mm이상을 말한다. 양 단어의 의미는 0.5mm 내지 1.0mm의 중간 영역에도 사용된다.

RO/NF는 다층 합성막으로 만들며, 기질 위에 농축 활성층을 코팅한다. RO/NF 적용에서 미세하게 분리되어야 하며, 용해되어 퍼지는 원리 때문에, 막여과유속을 매우 낮게 할 수 없다면, 다층막에서 처리수를 이탈시키는 것이 쉽지 않다. 다층막을 가장 싸게 생산하는 방법은 평판이며, 평판에서 가장 싸게 모듈을 생산하는 방법은 나선형이다. 그것은 쉽게 농축 가능하며, 생산가가 낮기 때문이다. RO/NF의 막여과유속은 상대적으로 낮으므로, 나선형에서의 고유한 수동력적 한계는 효율 결정에 심각한 영향을 미친다. 그러나 RO/NF의 나선형의 중요한 장점은, 제작사의 생산 치수를 표준화하여 호환성이 있다는 점이다.

UF/MF의 활성층은 RO와 같은 농축이 아니라, 공경이며, 좁은 공경의 배분에 있다. 기질에서의 기공은 단지 활성층에서 조대하게 만들어 투과저항이 무시될 정도로 내릴 필요가 있다. 그러므로 UF막은 단순 고분자 또는 고분자 용해물로부터 비대칭 구조로 만드는 것이 적절하다. 특히 정수처리용으로서, 대부분의 상업적 UF 제품은 다층막이 아니며, 아래층기질에 집적된 활성분리층을 갖는다. 또한 MF막도 다층은 아니며, 활성층의 공경이 약간 큰 비대칭을 만들기 때문에 보통 동질의 구조이다.

## 2.4 내압식 대 외압식

정수처리의 적용에서, 급수는 중공사 내강(lumen)으로 공급하여 여과수를 외곽(shell)으로 뽑아낼 수 있거나, 외곽에서 급수하여 여과수를 내강으로 인발할 수 있다. 이 두가지 선택에서 첫째는 내부 급수식(Inside Feed)이고, 둘째는 외부 급수식(Outside Feed)이다.

대부분의 상업적 정수처리막은 내경(id) 0.8mm, 외경(od) 1.3mm의 중공사이다. 이러한 치수에서는 외표면적이 내표면적의 최소 2배가 된다. 이는 같은 막여과유속에서 외압식은 내압식보다 최소 2배를 생산해야 한다. 그러나, 사실상 다른 제약조건이 이러한 장점을 심각히 제한한다. 일반적인 막여과유속은 약100lmh (litres/m<sup>2</sup>/hr)이다. 이는 급수 수질, 공정 운영 인자에 따라 50-150lmh로 변한다. 이러한 막여과유속은 전형적인 0.8mm 중공사의 길이를 따른 허용 압력강하에 기인된다.

내압식은 여과중에는 내강으로 급수되며, 역세중에는 역방향으로 급수된다. 외곽에 급수되는 많은 역세유량은 내강으로부터 역세 유출수가 제거되어 외곽의 전 길이에 도달한다. 단순 모듈을 병렬로 운영하는 시스템 설계에서는 모듈의 어느 한쪽 끝에서 제거될 수 있으며, 축적된 오염물의 효과적인 제거가 가능하다. 외압식은 여과중에 중공사의 외부로 급수되며, 역세중에는 내부로 급수된다. 여과역세에 필요한 많은 여과수량은 내강 입구에서 우회되므로 단순 역세에 의한 세정효율은 낮은 편이다. 따라서 외압식은 역세공정중에 공기를 이용한다. 공기를 수류와 역방향으로 거꾸로 주입하거나(공기역세), 적은 유량을 중공사 내강으로 역세 통과시키는 중에 공기로서 외부로 분출된다. 공기역세는 중공사에 피로 압박, 파손 등을 유발할 수 있으므로 재질 선정에 한계가 있다.

## 2.5 Vertical vs Horizontal 수직형 대 수평형

UF의 개발 초기에는, 운전 모듈을 병렬로 배열되도록 시스템이 설계되었다. 여건에 따라 모듈은 수평 또는 수직으로 배열할 수 있었다. 그러나, 수직방향은 공기 배제에서 중요한 장점이 있다. 초기 운전에서는 무결점 시험에서만 공기를 사용하였으나, 그 이후 공기 역세를 가능하게 하였다.

1990년대에 새로운 수평형 개념이 개발되었으며, RO/NF의 표준 형상을 모방하였다. 수평설계의 개념에서는 6m 용기 내에 1.5m짜리 4개를 띄어 놓았다. 급수는 6m 용기의 양끝에서 동시에 이루어지며, 1.5m짜리 2개를 직렬로 운전하고, 중앙에 끝점을 두었다. 다열 짜리 설계의 장점은 용기 수가 준다는 것이다. 줄여진 용기에 연결된 배관은 밸브와 함께 같이 줄어든다. 또한 집적화의 개념은 랙 사이의 필요한 공간 없이 용기 끝에서만 접근하는 것이다. 그러나 대규모 시설에서는 수직배열이 블록 개념으로 수평설계의 적재 농도를 맞출 수 있어, 단일열의 배치에 둘 이상의 모듈이 사용된다. 다열 요소 수평 개념의 문제점은 공기에 의한 무결점 시험을 쉽게 할 수 없는 점이다. 섬유에 기계적 충격 없이 끝에서 공기를 가속하기가 어렵기 때문에, 단일 수평모듈 보다는 다열 수평설계에서 시행하기가 더 어렵다.

마지막으로 수직형은 공기 역세공정을 사용할 수 있다는 것이다. 공기는 섬유를 통과하거나, 섬유를 문지르지 않으며, 과도한 압박을 피하면서 기계적으로 부드럽게 해준다. 그 결과 섬유 표면의 오염물질을 높은 효율로 제거한다.

## 2.6 압력식 대 침지식

압력식 (Pressurized module) 모듈에서는, 막은 케이싱에 쌓여 있다. 케이싱은 압력 정격을 가지고 있으며, 필요시 역세 압력에 대응하여 모듈에 급수펌프가 가동되도록 한다. 침지식(submerged system)은 막을 케이싱 없이 운전한다. 보통 막을 개방형 수조에 침수시켜, 진공으로 막의 여과수를 인발한다.

침지식 막은 투과율이 높은 MF 또는 매우 조대한 UF이다. 압력식은 약간 팽팽하며, 반사율이 높고, 투과율이 낮다. 침지식은 압력식과 비교하여 막여과유속이 낮고, 투과 압력(TMP)도 낮다. 이러한 형식은 투과압력이 낮으면 고형물이 공경을 막는 경향이 낮아져 막 오염율이 최소화되므로, 고형물 농도가 높은 급수에 특히 유효하다.

압력식과 침지식의 경제적인 비교에서 여러 인자가 고려될 필요가 있다. 침지식은 포장 비용이 절감된다. 그러나, 운전되는 막여과유속이 낮기 때문에 보다 많은 막여과면적이 필요하다. 막이 케이싱에 비교하여 비싸기 때문에 시설비는 침지식이 높은 경향이다. 그러나, 개수하는 상황에서는 막의 수조설비가 최소 비용으로 공급되므로, 시설비면에서 침지식이 유리하다.

침지식은 막여과유속과 운전압력이 낮기 때문에 급수펌프의 시설비와 운전비를 절감할 수 있다. 침지식이 만일 사업장이 경사진 곳에 건설된다면, 진공펌프 없이 흡입측에서 여과가 가능한 자연수두를 얻을 수 있는 장점이 있다. 만일 사업장이 평지에 건설된다면, 두가지 형식 모두 펌프 시설이 필요하며, 급수를 위한 운전비용은 침지식이 약간 낮을 것이다.

시추펌프 또는 다른 압력원으로부터, 여과수를 고층 처리수조에 올려야 하는 시스템이면, 압력이 죽거나, 재가압이 필요하지 않는 압력식이 유리하다.

## 2.7 직류 대 십자류

UF/MF 막분리는 막 표면 오염균의 과도한 형성을 예방하고, 막 오염율을 제어하기 위하여 십자류(Crossflow)를 이용한다. 십자류 속도는 보통 급수로에서 난류 또는 천이류 체계 또는 조건을 형성하며, 비록 공급되는 고형물량이 많아도, 표면에 축적되는 입자를 씻어내는 방법으로는 매우 효과적이다. 대형시설의 적용에서 십자류의 중요한 단점은 효율적인 속도 유지를 위한 십자류 펌프의 크기와 가격, 급수로의 높은 압력강하에 의한 펌프 에너지이다.

직류운전(Directflow)은 상수처리를 위하여 선택한 막공정으로 도입하였다. 대부분의 수자원에서, 전통적으로 십자류가 적용되는 공정 또는 폐수류에 비하여, 상수의 급수 고형물 부하는 보통 매우 낮다. 이에 따라 십자류에 대한 대안으로 직류가 개발하게 되었다. 처음에는 십자류 속도를 방류속도까지 줄였으며, 모두 정지한 후 간헐적으로 역세하였다. 이런 형식의 운전을 직류(Directflow) 또는 반전량여과(Semi dead end)라 부른다. 십자류가 사라짐에 따라, 여과주기압력강하가 한계인자로 되지 않았기 때문에, 보다 가늘은 급수로의 사용이 가능하게 되었다. 이로 인하여 모듈의 포장 농도는 크게 증가되었으며, 시설비와 운전비가 낮아져 대규모상수처리 적용이 가능하여졌다.

직류의 적정 중공사 크기는 역세유량으로 결정된다. 대부분의 제조자들은 중공사 길이 1.0-1.5m에 대하여 준공사의 안지름은 0.7-0.9mm의 범위가 적절하다고 결론을 내렸다.

## 2.8 친수성(Hydrophilic) 대 소수성(Hydrophobic)

상업적 UF/MF막 시스템은 셀룰로스 아세테이트(CA, Cellulose Acetate) 같은 완전친수성에서, 폴리프로필렌(PP, Polypropylene)까지 넓게 퍼져 있다. 양극단 사이에는 폴리설폰(PS, Polysulfone) / 폴리에테르설폰(PES, Polyethersulfone) 계열과 폴리아크릴라이트릴(PAN, Polyacrylonitrile)과 폴리비닐리덴 플루오라이드(PVDF, Polyvinylidene Fluoride) 계열이 있다.

중공사 및 모세관막은 습방적(Wet spinning) 또는 건방적(Dry spinning) 공정으로 만들 수 있다. 습방적의 경우는 작업을 보다 쉽게 할 수 있게, 고분자 및 고분자 용액을 용매에 녹일 필요가 있다. CA 및 PS/PES는 습방적에 적절한 고분자 계열의 좋은 예이다. 다른 고분자는 서로 용해되어 친수성이 조정되기 때문에, PS/PES의 가용성은 고분자 혼합막의 이상적인 후보가 된다. 습방적의 장점은 선택한 방적 조건에 따라 공경과 막의 성질을 다양하게 변화시킬 수 있는 점이다. PS/PES는 적절한 혼합 폴리머로 친수성이 되게 할 수 있으며, 그로 인하여 CA의 부식성 세정 약품에 약한 초기 단점을 피함과 함께, CA의 장점인 친수성을 얻을 수 있다.

건방적은 PP와 같은 소수성 고분자에 사용된다. 이는 양질의 MF막을 생산할 수 있으나, 습방적 공정의 광범위한 성질 변화를 줄 수 없다. 습방적은 원형의 구멍을 만드는 반면, 건방적은 가늘고 긴 구멍을 만드는 경향이 있다. 가늘고 긴 구멍은 규정된 급수 제거 효율의 유지가 어렵다.

정수처리에서 친수성막은 분명한 장점이 있다. 첫째, 막이 쉽게 젖으며, 이로 인하여 공경에 상대적으로 높은 투과도를 얻을 수 있다. 둘째, 표류수에 종종 나타나는 오염 성분은 유기물인 바, 이는 소수성 표면에 쉽게 부착된다. 친수성 표면은 유기물의 흡착에 의한 부착에 대한 저항성이 있으며, 이러한 표면을 저오염표면이라 한다.

UF 및 MF의 범위에 걸친 공경으로 두루 생산이 가능한 PS/PES와 같은 막은 관심 대상인 오염물 제거를 위하여 공경을 재단할 수 있으므로 정수처리에 장점을 갖고 있다. 초순수처리에서는 상대적으로 미세한 UF로서 살균, 여과되지 않는 입자를 처리한다.

소수성 막은 그렇게 유연하지는 않다. 공경을 조정할 수 있지만, PS/PES처럼 가변 범위가 넓지 않으며, 섬유 강도와 투과율의 희생이 따른다. PP로는 공경 0.2미크론의 MF가 표준이다. 이 공경이 박테리아의 장벽은 되지만, 위한 바이러스제거에는 충분하지 않다. 소수성 PP는 공기 역세의 사용이 허용되며, 대규모의 가성소다 약품세정이 필요하다(PP의 염소 허용치는 매우 낮다.).

## 3. 실증플랜트의 설치 및 운영방안

한강 원수에 대하여 선진국 수준의 수질기준을 맞추고, 자동 운전이 가능하며, 대형 정수장의 적용성을 고려한, 용량 500m<sup>3</sup>/일 규모의 막여과 실증 플랜트를 서울시 구의정수장에 설치하였다.

실증플랜트에는 기존 공정과의 조합을 통한 막여과 공정의 전처리 효율을 평가하기 위한 혼화/응집/침전시설과, 맛, 냄새 및 소독부산물 제거를 위한 고도처리 조합공정의 효율 및 경제성 평가를 위하여 후단에 입상활성탄 칼럼을 설치하였다.

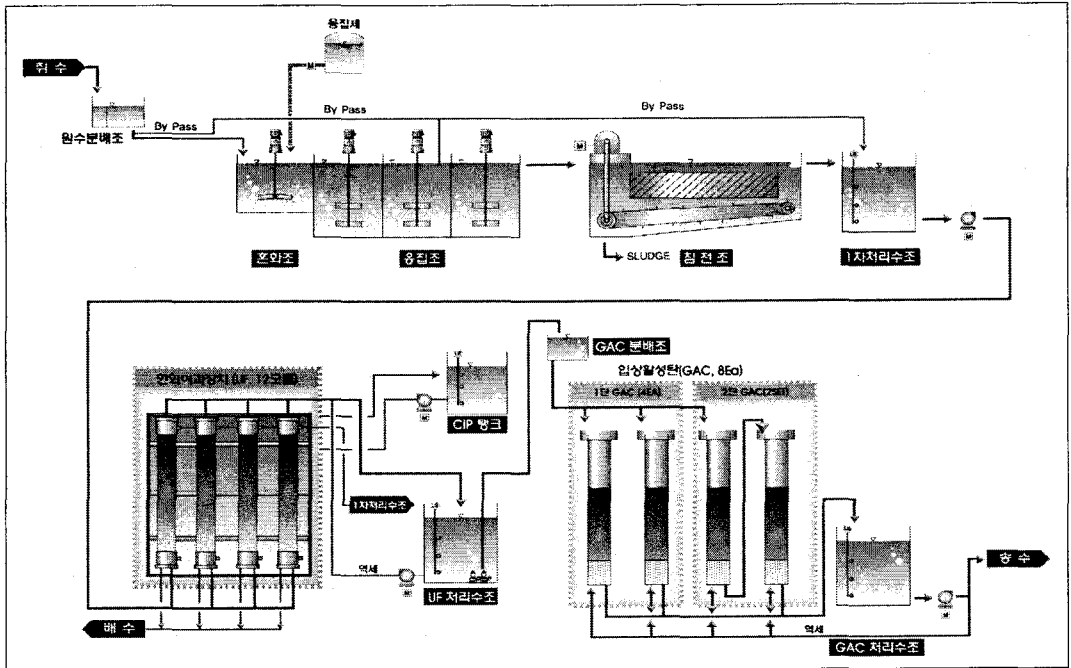
2004년 1월 운전을 시작하여, 겨울철 저수온기, 갈수기 및 조류번성기, 장마철에 대한 UF막에 대한 평가를 실시하였으며, 8월부터 12월까지의 MF막 및 배출수 회수막에 대한 시험 평가를 현재 진행 중에 있다. 본 원고는 1월부터 7월까지 UF막에 대한 1단계 운전에 대한 평가보고이다.

### 3.1 실증플랜트의 구성

서울시의 기존 정수처리시설에서 모래여과공정을 대체할 수 있는 막여과 공정을 중심으로 구성하고, 막여과공정의 최적운전을 위한 전처리 공정으로 활용할 수 있는 기존의 응집/침전 시설을 포함하였으며, 상수원에서 문제가 되는 맛,냄새 제거를 위한 분말활성탄 접촉(PAC contactor) 및 입상활성탄 여과지(post GAC filter)의 처리효율 및 경제성 비교하기 위하여 후처리 시설로 입상활성탄 공정을 추가하였다. 활성탄 공정은 8개의 GAC칼럼으로 구성하였으며, 이 중 4개는 Norit사의 활성탄을 단단으로 구성하였으며, 나머지 4칼럼은 파과기간 연장과 적정 흡착능 증대를 위하여 2단으로 구성하였으며, 실험에 사용된 제품은 Cargon사의 활성탄이다.

(그림2)는 1단계 실증플랜트의 공정이며, 운영 평가된 막은 일본 아사히 카세이사의 UF막인 Microza (LOV 5210 모듈 12개)로서 모듈의 세부사항은 다음과 같다.

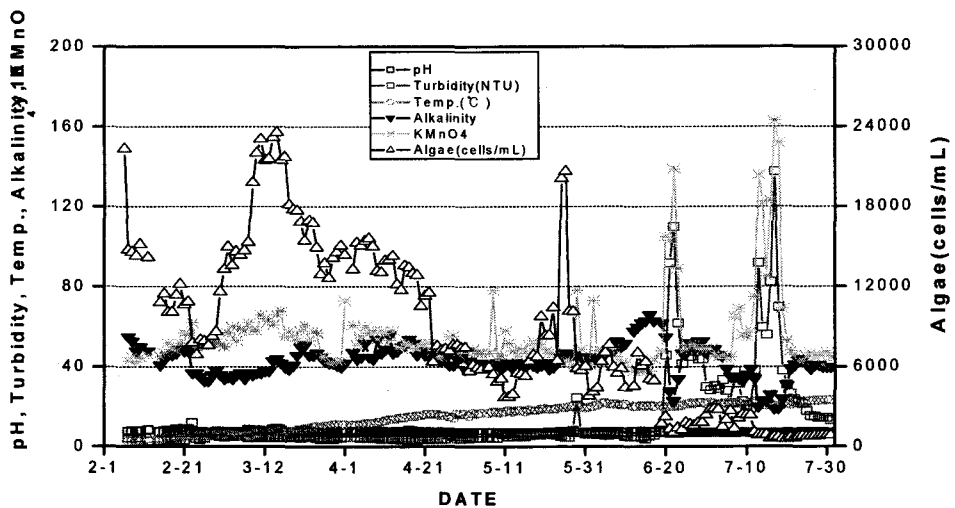
- 여과방식 외압식(Outside-In), 전량여과(Dead-end)
- 중공사(Hollow fiber)막, 규격  $\phi 140 \times L2,227$ , 막면적 41m<sup>2</sup>
- 재질 : 폴리아크릴로니트릴(PAN, Polyacrylonitril)
- 중공사 외경/내경 1.4/0.8mm, 분획분자량(MWCO) 80,000달톤



(그림2) 처리 공정도

### 3.2 원수의 성상

(그림3)은 구의 취수장에서의 일평균 수질이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 탁도의 경우 장마철에 가장 높은 것으로 나타났고, 조류개체수는 실험이 시작된 겨울철부터 갈수기인 2~4월 사이에서는 조류개체수가 급격히 증가하였고, 이후 강우에 의하여 점차 줄었다. 이와 같이 한강원수는 계절별로 큰 차이를 보였으며, 본 연구에서는 전염소 처리된 한강수를 원수로 사용하였다.

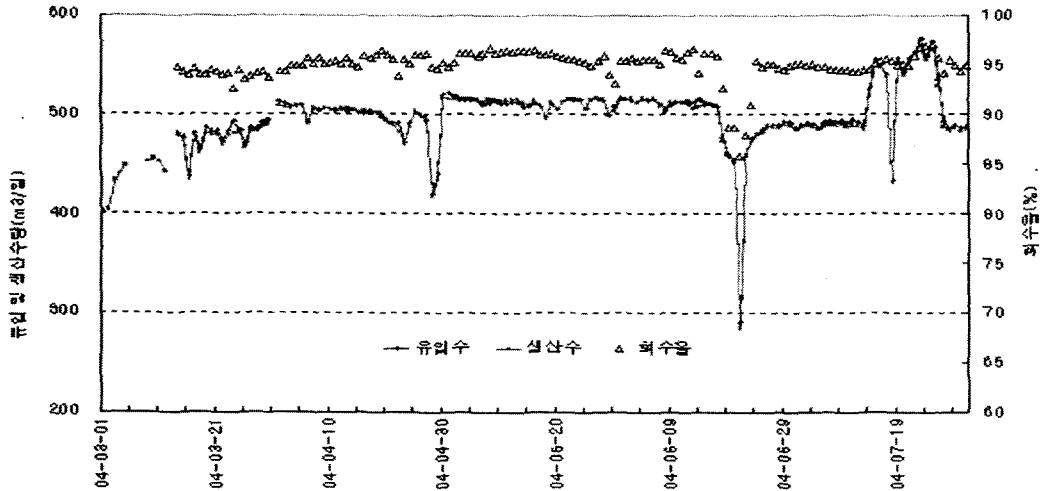


(그림3) 원수의 계절별 특성

#### 4. 운영평가 및 고찰

##### 4.1 유입수량, 여과수량 및 회수율

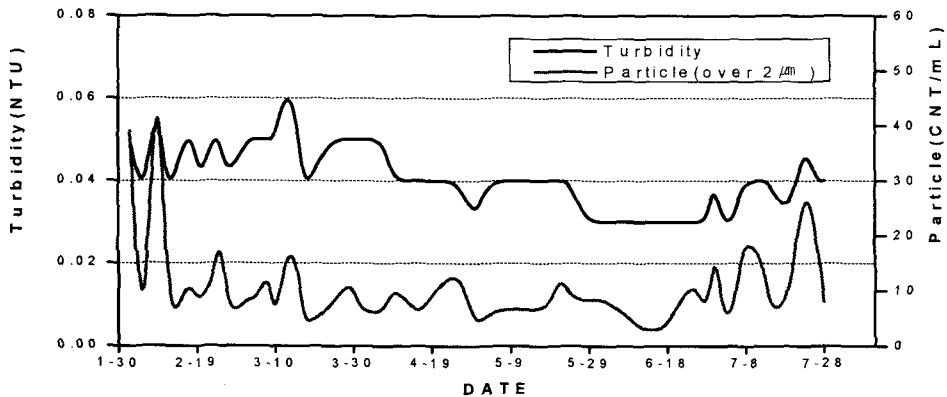
2004년 1월부터 2004년 7월까지 1단계 막 시스템을 운영한 결과 원수 유입량은 최대 576m<sup>3</sup>/일, 최소 290m<sup>3</sup>/일, 평균 500m<sup>3</sup>/일이었으며, 여과수량은 최대 569m<sup>3</sup>/일, 최소 284m<sup>3</sup>/일, 평균 495m<sup>3</sup>/일을 나타내었다. 막 시스템의 자체 회수율(농축수 회수 시스템을 적용하지 않는 경우)은 최고 97.04%, 최저 85.86%로서, 평균은 94.97%였다. 여기에서 회수율이란 연속된 막 운전 사이클에서 유입수에 대한 여과수의 유량비를 말한다.



(그림 4) 유입수량, 여과수량 및 회수율

##### 4.2 처리수질

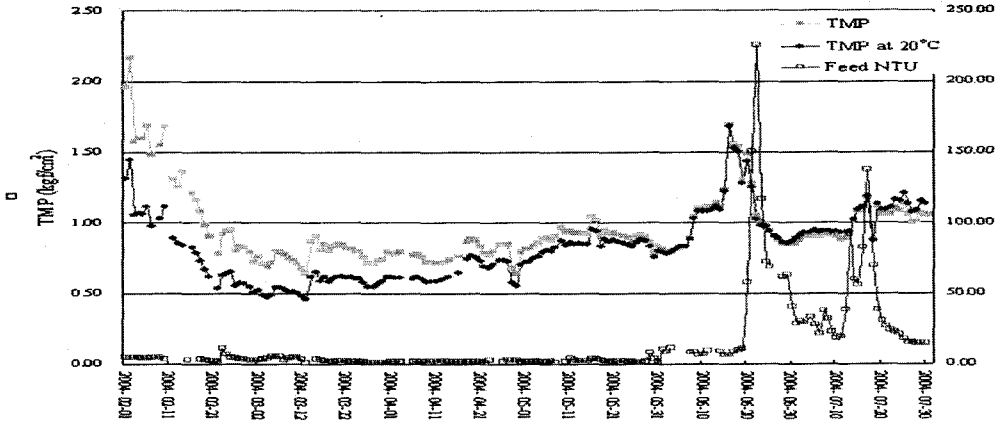
원수 및 막 처리수의 탁도, 입자수, 제거율 등을 측정하여 평가하였다. 막여과 공정 전후에 온라인 계측기를 설치하여 실시간으로 계측하였으며, 보다 신뢰성을 높이기 위하여 서울시 상수도 연구소에서 분석한 자료를 함께 이용하였다. 막 처리수의 탁도는 정상시 0.05이하로 유지할 수 있었으며, 탁도 제거율은 평균 98.72%, 입자 제거율은 3.22log 로 나타났다.



(그림5) 한외여과막(UF Membrane) 여과수의 탁도 및 입자수

### 4.3 원수중의 탁도가 TMP에 미치는 영향

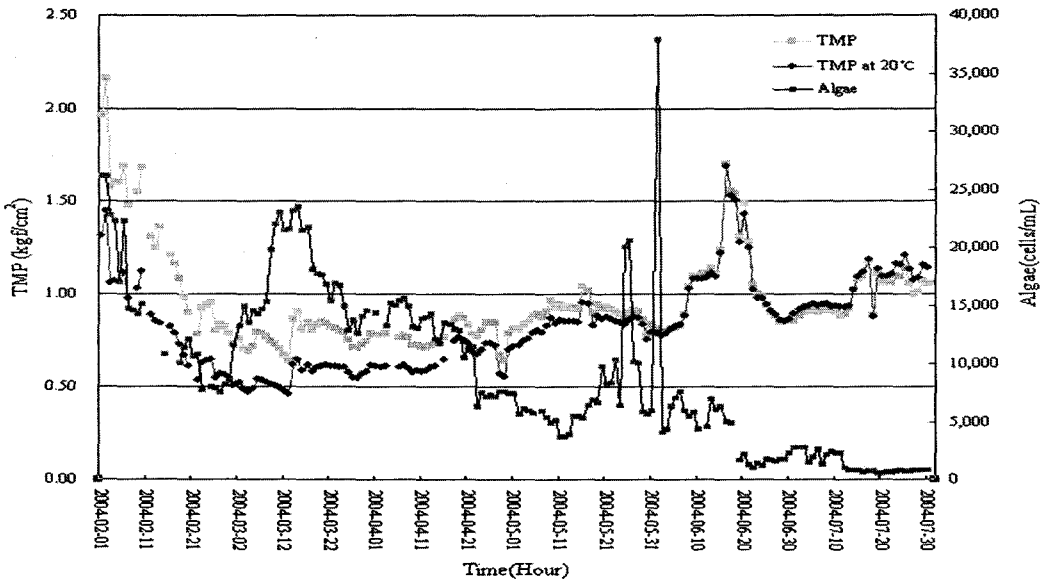
원수 탁도는 6월 중순까지는 큰 고탁도의 유입이 없었으나, 장마의 영향으로 6월 하순부터 7월 중에는 고탁도가 지속되는 날이 많았다. 1월부터 7월까지의 탁도의 평균은 14.7NTU였으며, 최소값은 1.0UTU, 최대값은 장마초기인 6월 말에 225.6UTU를 나타내었다. TMP는 원수에 탁도에 따라 비례하여 상승하는 경향을 보였으나, 단순 역세정으로 회복되었다.



(그림 6) 탁도에 대한 TMP

### 4.4 원수 중 조류 개체수가 TMP에 미치는 영향

2월부터 3월 말까지의 원수의 수질특성은 탁도의 변화는 거의 없는 반면, 조류의 개체수는 최고 25,400 cells/mL로 변동폭이 상당히 큰 것으로 나타났으며, 4월 중순까지 15,000cells/mL 정도를 유지하다가 4월 하순 이후 5월 하순까지 약 5,000cells/mL까지 떨어졌다. 그러나, 5월 하순 이후 조류 유입이 급격히 높아져 20,370cells/mL까지 상승되었다. 6월 1일 최고치인 37,900cells/mL을 기록한 이후 점차 낮아져 고탁도가 시작된 6월 하순 장마철 이후에 조류는 1,000cells/mL이하로 유지되었다.



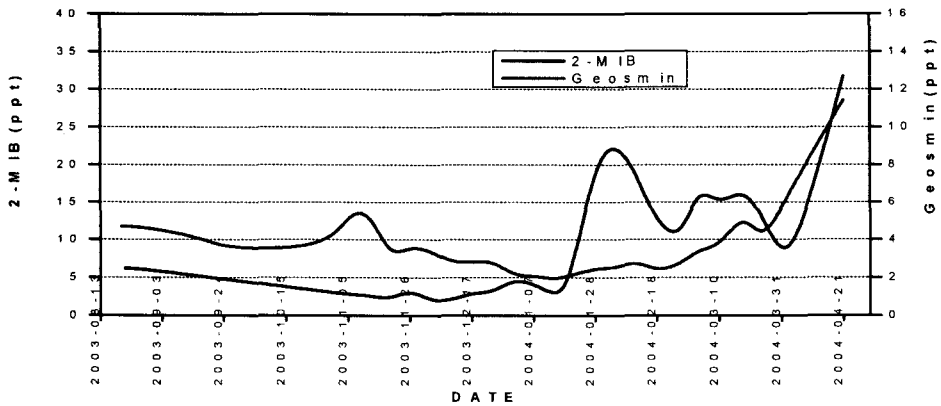
(그림 7) 조류에 대한 TMP



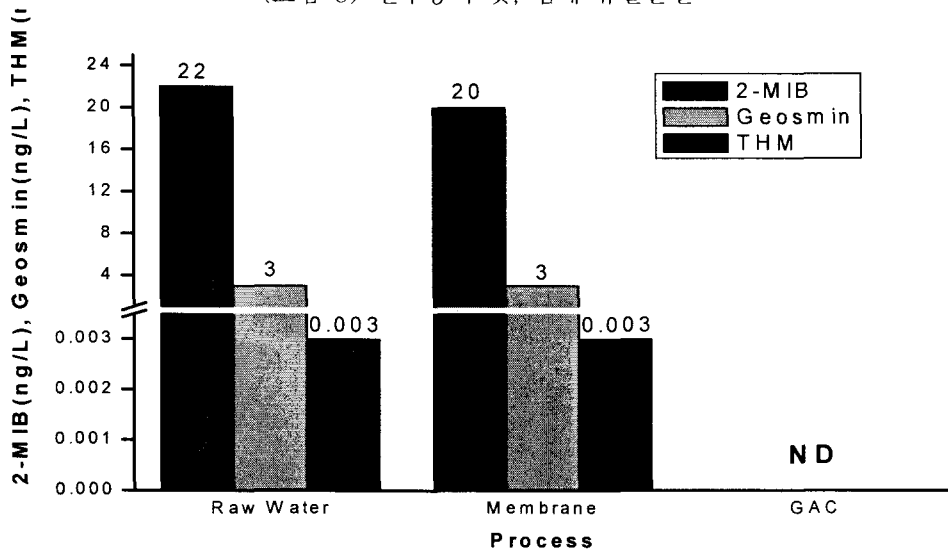
원수를 전처리 없이 직접 막에 공급한 결과, 조류번성기시 조류가 오염원(Foulant)로 작용하여 TMP의 상승을 유발하였으며, 조류의 개체수가 감소함에 따라 TMP 또한 감소하는 경향을 나타내었다. 응집제(10%)를 일정량 주입하면서 혼화-응집-침전공정을 거친 후에는 조류의 개체수가 증가하여도 TMP가 상승하는 현상은 나타나지 않았으며, 이는 전처리 공정에서 대부분의 조류가 침전되어 막에 유입되는 조류의 개체수가 급격히 감소한 결과로 생각된다. 따라서 조류번성기시 원수의 직접여과에 의한 TMP상승과 전력사용량의 증가, 여과시간의 단축, 회수율의 감소를 유발하므로 안정적인 정수의 생산을 위해서는 전처리를 이용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 전처리를 하지 않는 경우에는 역세시 미량의 염소를 투입하여 회복시킬 필요가 있다.

#### 4.5 맛, 냄새 유발 물질의 제거능

원수중 탁도와 입자수의 큰 변화에서도 탁질은 막여과 공정에서 대부분 안정적으로 제거되었지만, 원수중의 용존성 물질, 특히 맛, 냄새 유발물질(2-MIB, Geosmin)은 거의 제거가 되지 않은 것으로 나타났다. 이러한 용존성 물질들은 막여과 공정 후단에 설치된 GAC 공정에서 대부분 제거되었다.



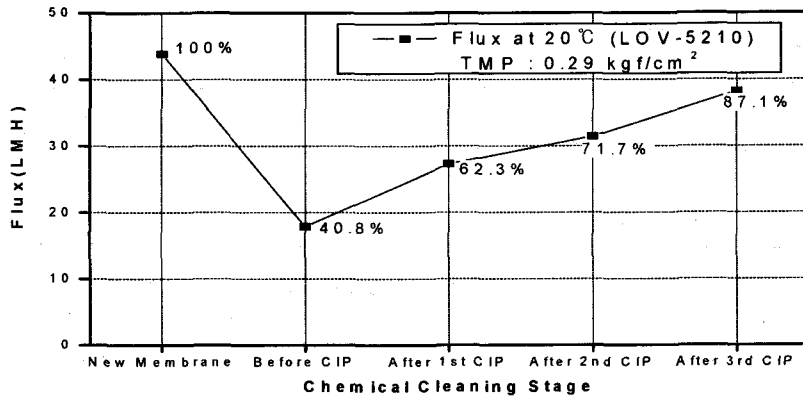
(그림 8) 원수중의 맛, 냄새 유발물질



(그림 9) 공정별 맛, 냄새 및 소독부산물 제거

#### 4.6 화학세정에 의한 막여과 유속 회복

화학세정에 의한 막여과유속(Flux) 회복율을 알아보기 위하여 (그림10)에서 나타난 바와 같이 1, 2, 3단계로, 각각 산-알칼리-산 순서로 실시하였으며, 산 세정 후 막여과유속의 회복율이 알칼리 세정 후의 막여과유속 회복율 보다 높은 것으로 나타났다. 이는 혼화-응집-침전공정을 거치면서 무기물 보다는 유기물의 제거가 더 잘 이루어져 생긴 결과로 생각된다.



(그림10) 화학세정에 의한 여과유속(Flux)의 회복

#### 5. 결론 및 향후계획

막여과 시스템은 기존 정수 처리공정과 조합하여 원수특성 변화에 따른 가변적 공정운영이 가능하며, 변화하는 수질조건에서도 안전하고, 안정적인 처리수질을 보증할 수 있는 수처리 기술로서, 처리수의 탁도 0.05NTU, 입자수 평균 10#/mL 이하의 깨끗한 정수를 얻을 수 있었다. 또한 악조건(원수 고탁도 100NTU 이상, 조류 20,000 cells/mL 이상)의 조건에서도 원활하게 운전되었으며 공정상의 문제점은 발견되지 않았다.

재래식 공정에 비하여 약품주입 및 자동화가 쉬우며, 주입조건 변화에 따른 처리수질 변동이 없어 정수시설의 무인 자동운전이 가능한 기술로서, 7개월 운영기간 동안 원수 수질은 계절에 따라 심한 차이를 보였으나, 공정에 사용한 응집제량은 거의 일정하였는 바, 일시적인 TMP의 변화만 조금 있었을 뿐 처리수질 악화 및 공정 장애 발생은 없었다.

향후 처리효율이 우수하고 경제적이며, 한강원수의 특성에 맞는 최적의 막여과 조합공정을 도출하기 위하여, 다양한 방법의 실증 연구를 지속할 것이다. 우선적으로 8월 부터는 MF막을 사용하여 UF막과의 동일한 비교 실험을 시작하였으며, 아울러 막여과 공정의 회수율을 높이고, 고액 분리 효율이 낮은 기존의 배출수처리 시스템을 획기적으로 개선할 수 있는 관상형 막을 사용하는 배출수 회수 시스템에 대한 연구개발을 시작하였으며, 조만간 결과를 얻을 수 있을 것이다.

끝으로 본 연구에 많은 도움을 주신 서울특별시 상수도 연구소 박수환 소장님을 비롯한 관계자 여러분과 물심양면으로 후원을 해주신 저희 대우건설 박창규 본부장님, 이상한 상무님께 깊은 감사를 드립니다. 아울러 실증플랜트 운영에 노고가 많았던 이권기씨에게도 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. 이성우, 이현동, 한명호, 박동희, 김충환 “고도상수처리 -원리와 응용-”, 2003 동화기술
2. 조봉연 “막여과 -이론과 실제-”, 1999 양서각
3. 조재원 “멤브레인 공학”, 2004 신광문화사
4. EPA “Membrane Filtration Guidance Manual” 2003
5. Hydraunautics “An Introduction to Ultrafiltration Membrane Technology for Water Treatment Application”
6. Asahi Kasei Chemicals Corporation. “UF Pilot test unit for DAEWOO E&C”, 2003