

한국수자원공사에서 막여과 정수공정의 시범적용 연구

김충환

한국수자원공사 수자원연구소

1. 서론

상수원수의 수질악화 및 먹는물 수질기준의 강화 추세에 따라 기존의 정수처리 공정으로는 양질의 수돗물 공급이 어려워 새로운 정수처리 공정의 도입이 필요한 정수장이 증가 추세에 있고, 또한 효율적인 수도경영을 위하여 경제적인 운영이 가능한 정수기술의 개발이 요구되고 있는 실정이다.

이러한 추세에 따라, 최근 정수수질의 고도화와 시설의 자동화, 소규모화 및 약품주입량의 저감화에 의한 정수시설 운영의 효율화를 특징으로 하는 막여과 정수기술이 선진외국에서 개발되어 활용되고 있으며, 일본, 미국, 프랑스를 중심으로 하루 수십~수만 m^3 규모의 정밀여과 및 한외여과 정수시설이 도입되고 있다. 한편, 우리나라에서도 정수수질의 고도화 및 시설의 효율적인 운영을 위하여 응집·침전·여과공정을 대체할 막여과 정수처리시스템 도입의 필요성이 대두되고 있으나, 아직은 시설이 전무한 상태로 상대적으로 정수처리에 어려움을 겪고 있는 소규모정수장 및 시설의 개량이 필요한 중/대규모정수장을 중심으로 장래 도입이 기대되고 있다.

따라서 본 고에서는 한국수자원공사에서 정수기술의 선진화의 일환으로 추진되고 있는 막여과 정수공정 시범적용 연구에 대해 소개하고자 한다.

2. 막여과 정수처리기술

2.1 수도에 막여과기술의 도입배경

국내외의 수도현황은 원수의 수질악화 및 먹는물 수질기준의 강화 추세에 따라 급속모래여과를 중심으로 하는 기존의 정수처리공정으로는 양질의 수돗물 공급이 어려워 고도정수처리기술 등 새로운 정수처리공정의 도입이 필요한 정수장이 증가 추세에 있다. 고도정수처리기술은 생물처리, 활성탄여과 및 오존처리 등을 기존의 응집-침전-여과 공정과 연계한 시설이 도입되고 있고, 최근에는 재래식 정수처리의 문제점을 어느 정도 해결하고 정수수질의 고도화 및 정수시설 운영의 효율화를 위하여 막여과형 정수처리시설의 도입이 증가되고 있다.

특히 막여과기술은 최근 수도에서 話頭가 되고 있는 *Cryptosporidium* 등의 위생문제 해결을 위한 "제로 콤마 NTU의 저탁도 규제", 수도경영의 효율화를 위한 "절약형 수도기술"에 대응이 가능한 기술로서 중소규모수도를 중심으로 실적이 증가하고 있는 추세에 있다.

- 수도기술자의 부족 → 유지관리가 쉬운 기술의 필요성
- 원수수질의 악화 → 안정성이 높은 정수처리기술의 필요성
- 용지부족 → 콤팩트한 설비의 필요성
- 응집제 첨가에 의한 슬러지 폐기문제 → 응집제 주입 저감기술의 필요성
- 건설공기의 장기화 → Pre-Fab (조립)기술의 필요성

2.2 막여과기술의 개요

2.2.1 막여과법의 종류

수처리에 사용하는 대표적인 막을 분리경의 크기에 따라 분류하면 정밀여과(Microfiltration, MF)막, 한외여과(Ultrafiltration, UF)막, 나노여과(Nanofiltration, NF)막의 3가지로 분류할 수 있으며, 이러한 막을 이용한 분리법의 개략은 표 2.1에 나타낸 것과 같다. 특히 정수처리에서 탁도성분의 제거를 위해 응집/침전/여과공정 대신에 한외여과 및 정밀여과공정을 도입한다.

표 2.1 분리막의 명칭·종류 및 분류

명 칭	막종류	분리크기	운전압력 (kgf/cm ²)	수도에서 제거대상물질
정밀여과법	정밀여과막 (MF막)	입 경 0.01 μ m 이상	약 2 이하	부유물질, 콜로이드, 세균, 조류, 원충 등
한외여과법	한외여과막 (UF막)	분획분자량(MWCO) 1,000~300,000정도	약 3 이하	부유물질, 콜로이드, 세균, 조류, 원충, 부식물질 등
나노여과법	나노여과막 (NF막)	분자량 최대 100 정도	약 2~15	THMF, 농약, 취기물질, 경도성분 등

2.1.2 모래여과와 막여과 기술의 비교

(1) 모래여과기술

모래여과, 특히 급속모래여과는 20세기에 주 정수공정으로서 널리 사용되어 왔다. 종래의 응집/침전/모래여과기술은 수 nm~수 μm 의 콜로이드현탁질에 알루미늄염 등의 응집제를 첨가하여 응집후, 침전지와 여과지에서 분리하는 조작이다. 모래층 내에서 탁도성분의 감소는 모래층 깊이에 대한指數현상으로 알려져 있다.

특히 모래입자와 입자사이에는 수백 μm 정도의 크기를 가진 공극이 있으며 60 cm정도의 여층 중에는 작은 공극이 백단정도 직렬로 연결되어 있다. 침전지에서 제거되는 알루미늄플록의 제거효율은 수중의 불순물과 결합하는 기회의 대소에 따라, 모래여과에서는 모래표면에 접촉하여 제거되는 기회의 대소에 따라 결정되는 것으로 어떠한 경우에도 확실적인 제거조작으로 일정비율의 콜로이드성분이 제거되지 않고 남게 된다. 모래여과수 탁도와 세정빈도를 고려하여 모래여과지 유입수 탁도를 응집, 침전에 의해 1 NTU까지 유지하는 것이 일반적이다.

(2) 막여과기술

정밀여과와 한외여과는 모래여과와는 전혀 다른 機構로 고액분리가 이루어지는 것으로 막여과는 분리크기보다 크기가 큰 물질을 막표면에 포착시키고, 분리경보다 작은 물질만을 통과시키는 것으로 분리에 명확한 한계가 있는 방법이다. 모래여과의 백수십 μm 정도의 크기를 가진 공극을 백단정도 직렬로 연결시켜 불순물을 확실적으로 제거하는 것에 비하여, 정밀여과막(MF)은 0.01~0.1 μm 정도의 입자를, 한외여과막(UF)은 0.005~0.01 μm 이상의 입자가 수 마이크로미터의 얇은 막을 통과하면서 거의 제거된다. 막여과법과 급속여과법의 설치면적의 비교는 표 2.2에 나타낸 것과 같다.

표 2.2 500 m³/일 시설의 설치면적의 개략 비교

처리방식	설치면적(m ²)	면적비율(%)	면적비율(%)
막여과	85~136(8.5×10~16)	16~25	34~54
급속여과	250(15×17)	46	100
완속여과	540(15×36)	100	-

2.1.3 막여과시설 도입 경제성

일본 후생성에서 '91~'93년 동안 실시한 MAC 21 계획의 결과에 의하면 원수 취수설비 등 8가지 항목을 제외한 조건에서 초기투자비 (건설비)를 산정한 결과 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = (1.7 \sim 2.7) \times X^{0.74}$$

(여기서 Y : 건설비 (백만엔), X : 계획정수량 (m³/일))

운전비용에 대해서는 MAC 21에서 연속 6개월 간의 운전결과로부터 막의 수명을 예측하는 것은 어렵기 때문에 막의 교환비는 유기막의 경우 3년 정도, 세라믹 막은 7년 정도로 가정하여 산출하면 약품비, 전력비를 포함하여 처리수 1 m³당 20~55엔 정도로 나타났다. 정밀여과막 및 한외여과막 도입 정수장의 비용특성에 대해 J. AWWA (미국수도협회지)의 1996, 88(5), p22~31의 "Characteristics and costs of MF and UF plants"의 자료에 의하면, 1993년에서 1995년까지 도입된 3,800 m³/일 이하 규모의 건설비용 및 유지관리비는 정밀여과막이 막교환비 및 소비전력량이 한외여과막 보다 낮기 때문에 전체적인 유지관리비도 낮은 것으로 조사되었다. 한국수자원공사에서 산정한 자료에서는 막여과공정과 일반공정에 대해 2,000 m³/일에서 10,000 m³/일까지 건설비 및 유지관리비를 비교 검토한 결과 건설비는 약 14 %에서 55 %범위에서 저렴하였으며, 인건비, 원수대 및 전기료, 약품비, 막교체비 등을 포함하는 관리비는 일반공정이 저렴하였다. 이와 같이 유지관리비는 일반공정이 저렴하나 건설비는 막여과공정이 저렴한 것으로 자본비 (내구연수15년)와 유지관리비를 포함하면 약 6,000 m³/일 이하에서는 막여과공정이 일반공정보다 경제성 면에서 유리한 것으로 나타났다. 막여과공정과 일반공정의 경제성비교 (자본비 포함)에서 일본의 경우는 약 10,000 m³/일 까지, 한국수자원공사에서 검토한 자료에서는 약 6,000 m³/일 까지 막여과공정이 저렴한 것으로 조사되었다. 이러한 막여과공정과 일반공정의 경제성 비교에서는 인건비가 중요한 요소로서 인력의 투입형태에 따라 막여과공정의 경제적 우위 규모가 결정된다.

일반적으로 막여과공정은 자동화가 일반공정보다 유리하여 인건비를 줄일 수 있는 공법으로 알려져 있다.

3. 막여과 시범사업

한국수자원공사 막여과정수공정 시범사업은 간이상수도 및 한국수자원공사 정수장에 설치하여 시범운영을 통한 설계 및 운영기술 개발과 제도 방안 마련 및 사업화 모델을 개발하고자 한다. 특히 운영기술의 개발에서는 유지관리, 운용 등에 대해 막여과공정, 막여과공정과 기존의 정수처리공정과 연계운영 등에 중점을 두고 추진하고자 한다.

특히 시범사업을 통한 연구는 2002년부터 2005년까지 추진되는 것으로 연구과제는 다음과 같다.

- 2002-2004: 간이상수도 막여과 정수공정 시범적용 연구
- 2003-2005: 막여과 정수공정 설계 및 유지관리기준 수립
- 주요연구내용
 - 막여과 시설의 운전성능 평가 및 운영비용 산출
 - 수질, 수량변화에 따른 평가
 - 약품 및 전기 사용량 산출
 - 막여과시설 운전관리메뉴얼의 최적화
 - 장치 점검, 보수, 진단
 - 수질 및 수량관리, 소독관리
 - 설계 및 유지관리 가이드라인
 - 설계: 막선정기준, 단위공정, 소독공정
 - 유지관리: 수량관리, 수질관리, 세정관리, 막파손감지
 - 막여과시설 도입에 관한 법적제도 마련
 - 수도법/령/규칙(환경부)
 - 막인증(관련단체와 연계)
 - 소독기준(관련단체와 연계)

3.1 간이상수도

지자체 간이상수도에 도입하기 위한 설계 및 운영기술을 개발하는 것으로 김천시 지례정수장에 300 m³/일 규모로 추진하고 있다.

□ 김천시 지례정수장

- 시설용량 : 800 m³/일
- 처리공정 : 원수(복류수) → 완속여과 → 염소소독
- 급수인구 : 958명 (2000년)
- 1일평균급수량 : 219 m³/일

□ 설계조건

(1) 설계기본

- 원 수: 수온 5 ℃, 탁도 5 NTU 미만, pH 6.5-8.5
- 생산수: 탁도 0.1 NTU 이하
- 기 타: 바이러스제거율이 4log(99.99 %) 이상 검증된 한외여과막

(2) 계획회수율 및 계획수량

- 회수율
 - 막 공급수량에 대한 막여과수량의 비율

$$\text{회수율(\%)} = \frac{Q_p}{Q_f} \times 100$$

여기서, Q_f : 막 공급수량 Q_p : 막여과수량

- 회수율 결정
 - 운전효율 및 처리수질 안정성 고려하여 회수율 90 % 이상
- 계획수량
 - 계획회수율 : 90 %
 - 계획공급수량 : 일최대 300 m³/일
 - 계획수량

계 획 공 급 수 량	Qa	300 m ³ /일
배출수량(90%회수율)	Qb	Qa/90×(100-90) = 30 m ³ /일
막여과장치 계획수량	Qc	Qa+Qb = 300 + 30 = 330 m ³ /일

□ 막여과시설 설치

(1) 전체시스템의 구성

- 공정: 원수(복류수)→스크린→한외여과막→소독(지레정수장설비)→정수
- 시설용량: 300 m³/일(150 m³/일×2계열)

(2) 막여과설비(그림 1)

- 건 물: 조립식건물 L7m×W8m×H4.5m
- 막사양: -종류: 중공사 한외여과막(MWCO 80,000)
 - 재질: 폴리아크릴로나이트릴(PAN)
 - 설계 Flux: 1m³/m²·일 (차압 1 kgf/cm²)
- 모듈수: 8개(4개/1계열)
- 운전방식: Cross-flow/정유량운전
 - 펌프가압방식, 정유량 조절 밸브
- 세정방식: 공기/물 세정

(3) 장치운전

- 현장 및 원격제어/감시에 의한 자동운전
- 제어/감시방법: 원거리통신 : 초고속 국가망 전용회선 이용
- 막여과시설 ↔ 수자원연구소
- 제어: 취수펌프, 공급펌프 등
- 감시: 수온, 수량, 차압, 탁도, 운전시간 등
- 막과손감지시스템(저탁도계): 막여과수 탁도와 입자수를 연속적으로 측정하여 이상을 감지(표 2.3)

표 2.3 저탁도계의 사양

항 목	사 양
제조회사	일본 水道機工社, STP-PM형
탁도(NTU)	0.0000~2.0000
입자계수	총입자수(0.1 μm 이상) 0~10,000 개/mL, 2 μm 이상 0~1,000 개/mL
특 징	- 측정방식: 레이저광투과/산란광방식 - 크기: W23cm×D36cm×H15.6cm (무게: 6.5kg)

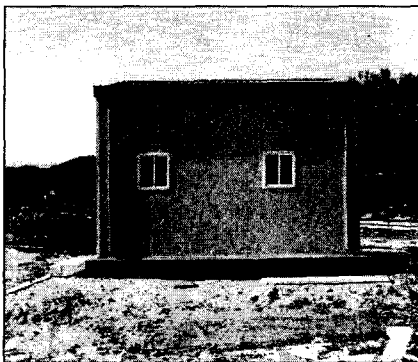


그림 1 김천시 지례정수장 막여과시설의 모습

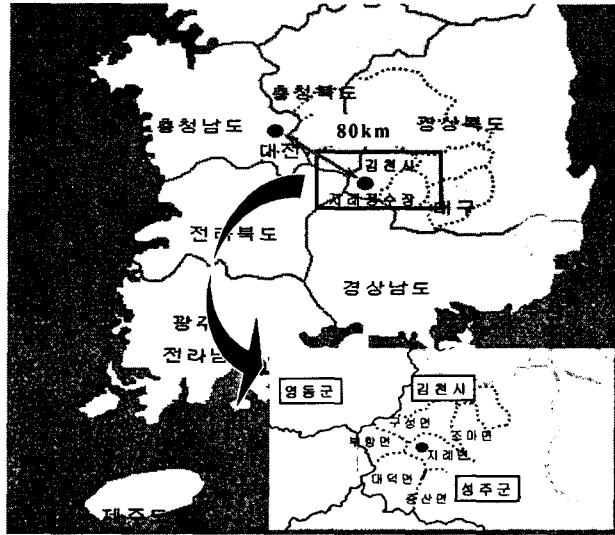


그림 2 김천시 지례정수장의 위치도

3.2 시흥정수장

시흥정수장 막여과공정 시범사업은 기존 정수처리 공정과 수질 및 경제성을 비교 평가하고 막여과 시설 설계·운영기술을 개발하여, 향후 전개될 노후 정수시설의 개보수 및 공정변경에 따른 막여과공정의 보급확대 기반을 마련하기 위하여 추진한다.

□ 사업개요

- 장소: 시흥시 소재 한국수자원공사 시흥정수장
- 시설용량 : 3,600 m³/일
- 실시설계 : 2002. 11 ~ 2002. 1
- 설치기간 : 2003. 5 ~ 2003. 12

□ 연구내용

- 과제명: “막여과 정수공정 설계 및 유지관리기준 수립”과 연계
- 연구기간: 2003 ~ 2005
- 연구내용
 - 막여과 정수공정의 설계 및 유지관리기술 개발
 - 경제성 비교평가, 활용계획 수립

- 일반 공정과 연계한 운용기술 개발
- 시흥정수장 막여과공정의 운영 최적화

□ 설계조건

시흥정수장 막여과공정은 일괄입찰방식으로 설계를 추진하였으며 한국수자원공사에서 설계조건으로 제시한 주요내용은 다음과 같다.

○ 정수처리수질 목표

수질항목	수 질 목 표
탁 도	각각의 모든시료에 대해 측정값이 0.1NTU를 초과하지 않을 것
Giardia	99.9%이상 제거 또는 불활성화
바이러스	99.99%이상 제거 또는 불활성화
망간	0.05mg/L 이하
잔류염소	정수지 유출수에서 1mg/L이하 유지

○ 막선정

- 분획분자량 300,000이하의 UF막 또는 이에 상응하는 MF막
- 내염소 재질이 우수하고 오염도가 적은 재질의 막

○ 막장치

- 상시 3,600 m³/일의 먹는물 생산이 가능한 시설
- 1계열 정지시 계획수량 생산가능
- 회수율은 최소 90%이상
- 여과방식은 전량여과방식 또는 Cross-flow방식
- 운전방식은 정유량제어를 원칙으로 하되 정압제어도 가능
- 화학세정은 현장에서 가능토록 세정탱크 및 펌프 등 설치

○ 배출수 처리시설

- 수질환경보전법 15조 및 방류수수질 기준에 저촉 여부
- 막여과 정수시 배출되는 역세척수 유입에 따른 기존 배출수처리시설 검토

○ 설비제어

- 주요감시항목: 유량, 압력, 온도, 탁도, pH, 잔류염소
- 제어항목: 종류별 원수펌프, 막여과펌프
- 수질계기: 탁도계, 온도계, 수온계, pH계, 잔류염소계, 입자계수기 등
- 컴퓨터: 운전관리 및 유지관리 적합
- 경보장치: 수량, 수압, 수조수위, 처리수탁도(각 계열별 0.1 NTU 이상시), 정전, 펌프류 및 밸브류 이상

□ 시설 개요

(1) 전체시스템의 구성

- 공정: 원수(호소수)→스트레이너→한외여과막→소독→정수
- 시설용량: 3,600 m³/일(1,200 m³/일×3계열)

(2) 막여과설비

- 건 물: 지상 1층, 지하 1층, 철근콘크리트식 건물, 연면적 206평
 - 원수조정조: W2.0m×L3.2m×H4.2m×3지
 - 정수지: W5.0m×L8.0m×H4.4m×2지
 - 농축수저류조: W0.9m×L1.0m×H4.2m×2지
- 막사양: -종류: 중공사 한외여과막(MWCO 80,000)
 - 재질: 폴리아크릴로나이트릴(PAN)
 - 설계 Flux: 1m³/m²·일 (차압 1 kgf/cm²)
- 모듈수: 108개(36/1계열)
- 운전방식: Cross-flow
 - 펌프가압방식, 정유량 조절 밸브
- 세정방식: 공기/물 세정

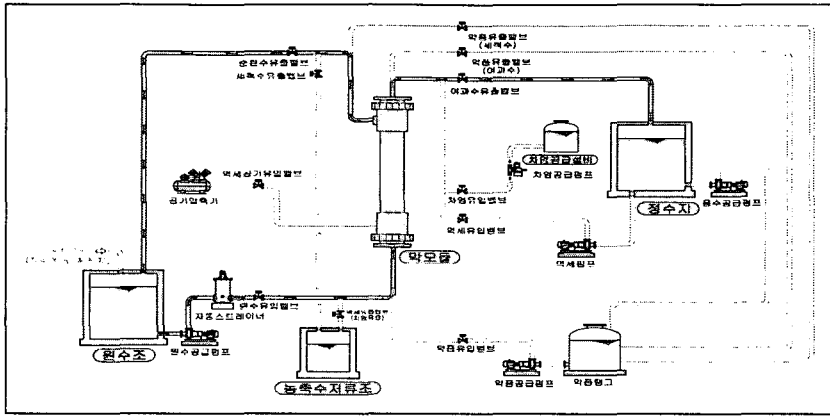
(3) 막 모듈 개요

구	분	개	요
규	격	ø0.14m×L2.227m	
유	면	41.0m ² /Modules	
계열	모	3Unit(36Modules/계열)	
분	자	80,000Daltons	
재	질	Polyacrylonitrile(PAN)	
중공사	내경/외경	0.8/1.4(mm)	

(3) 장치운전

- 현장 자동운전
- 감시항목: 유량, 압력, 온도, 탁도, pH, 잔류염소 등
- 막과손감지시스템(저탁도계): 막여과수 탁도와 입자수를 연속적으로 측정하여 이상을 감지

□ 기본공정도



□ 건물조감도



4. 결론 및 제언

4.1 결론

- (1) 막여과기술은 외국에서 '90년대 초반부터 탁도를 제거하기 위한 정밀여과 및 한외여과를 중심으로 도입되고 있으며,
- (2) 우리나라에서는 아직 설계 및 운영기술이 부족하고 제도가 미정비되어 도입되지 못하고 있으나, 한국수자원공사에서는 설계 및 운영기술의 개발 및 제도정비 등을 목적으로 시범사업을 추진하고 있으며,

(3) 이러한 결과를 바탕으로 제도를 개선하여 기술인력의 부족에 대처할 수 있는 유지관리의 편리성, 탁도규제 등에 대비할 수 있는 수질의 안정성 및 친환경성에 중점을 두고 소규모시설을 중심으로 도입하여 경험을 축적한 후 장래 중대규모 시설로 확대 보급하여야 할 것이다.

4.2 제언

막여과기술은 점토성탁도의 제거가 유기성탁도의 제거보다 유리하다는 점, 기존의 급속모래여과 정수시설과 조합하면 유지관리가 용이하다는 점 등과 원수의 수질이 탁도를 제외하고는 먹는물의 수질기준을 만족할 수 있는 원수를 사용하여야 한다는 것 등을 고려하면 상류부의 하천수를 원수로 취수하는 정수장, 이취미나 부영영화가 발생하지 않는 호소수를 취수하는 정수장 중 시설의 확장이나 갱신이 요구되는 정수장이 막여과시설의 도입을 우선적으로 고려해볼 수 있을 것이다. 그러나 이러한 기준은 외국의 도입실적을 근거로 고려한 것으로, 우리나라에서 막여과 정수처리시설을 도입하는데 있어서, 외국에서 개발된 기준을 그대로 답습하여 도입하는 것으로는 곤란하며, 실제 시설의 도입에서는 신설의 정수장이나 확장 및 갱신의 정수장이든 관계없이 타당성조사를 실시하여 결정하여야 할 것이다.

비록 현재 상태에서 도입기술이 준비되어 있다고 하더라도, 막여과 관련 제도가 미비하고 설계기준 및 유지관리도 마련되어 있지 않은 상황이다. 따라서, 수처리 및 막여과와 관련한 관, 민, 학계에서 수도시설로 막여과공정을 도입하기 위한 법제도 마련, 국내현실에 맞는 공정개발, 막여과시설의 설계, 평가 및 유지관리기준에 관한 포괄적인 연구가 추진되어야 할 것으로 생각된다. 또한, 막여과시설의 보급에 있어서는 우선 소규모시설에 확대 보급하여 설계 및 유지관리기술의 경험을 축적한 후, 중대규모시설로 적용해 나가는 것이 바람직 할 것이다.

참고문헌

1. 한국수자원공사, 2001, 막여과 고도정수처리 적용방안 연구
2. 한국수자원공사, 2002, 막여과 정수처리공정 시범적용