

MF/UF막을 이용한 음용수 처리현황 및 전망

김 정 학

Applications of MF and UF Membrane for Drinking Water Treatment

Dr. Kim, Jung-Hak

1996. 9. 20

선경인더스티리 중앙연구소

MF/UF막을 이용한 음용수 처리현황 및 전망

1. 서론

최근 수자원의 오염 및 수도배관의 노화로 인해 정수기의 보급 및 먹는샘물(생수, mineral water)의 보급이 크게 확대되고 있다. 이와같이 사람들의 물에 대한 요구는 더욱 심화되어가고 있으며 안전하고 신선한 물을 공급하기 위해서 수도수 공급을 위한 고도정수처리 특히, 막분리법을 이용한 수처리 기술이 도입되고 있는 실정이다. 또한 아파트등 공동주택 등에서 공급되는 물은 저장탱크를 거치게 되는데 탱크 및 배관의 노화로 인해 매우 질이 낮은 물이 공급되는 경향이 많기 때문에 정수기나 생수를 사용할 수 밖에 없는 현실이다.

수처리에서 사용되는 막은 역삼투막(RO), 정밀여과막(MF) 및 한외여과막(UF)이 주류를 이루고 있는데 지금까지 국내에는 RO막이 정수용으로 많이 보급되고 있는 실정이나 여러 가지 기능이 복합화된 UF 및 MF막을 사용하는 경우가 증가하고 있다.

이웃나라 일본은 UF/MF중공사막 정수기가 대부분이며 시장규모도 4,500억 \times 수준이다. 또한 90년도 이후 매년 20~30%씩 성장률을 보임으로서 향후 정수기 및 먹는 샘물 생산공정에 UF/MF막이 크게 도입될 전망이다. 본 강연에서는 UF/MF 막의 기능과 특징을 살펴보고 향후 정수기 및 먹는물 처리기술 전망을 알아본다. 특히, 우리나라보다 10여년 먼저 UF/MF막이 음용수처리에 도입된 일본의 현황을 검토하였다. 일본에서는 지역상수도로서 분리막(UF/MF)의 적용성을 MAC 21 Project (膜利用型新淨水技術研究)를 통해 평가하였으며 그 가능성이 충분히 입증되었다. 이는 膜 Maker, Engineering업체 및 産學研 공동연구의 결과로서 향후 UF/MF 중공사막이 음용수 처리분야에 크게 적용될 것을 예고한다.

막형 정수기에 있어서 정수능력은 입증되었으나 다각적인 성능평가 결과는 없었다. 그러나 MAC 21 Project는 여러가지 막을 사용한 매우 다양한 실험조건에 대한 결과이므로 이것이 음용수처리에 대한 UF/MF막의 유효성을 증명하는 것으로 판단되어 자세히 기술하고자 한다.

2. MF/UF막의 특징

MF(정밀여과) 막은 유체 즉, 기체 및 액체중에 포함된 입자를 제어하는 막으로서 Pore size는 $0.01\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ 정도의 범위를 가지는데 실제로는 $0.01\mu\text{m}$ submicron 범위의 Pore를 가지는 막을 의미한다. 주로 입자제거 및 제균목적으로 사용되며 Polysulfone, Polyethylene, Polypropylene, Ceramic 소재 등이 사용된다. UF(한외여과)막은 MF막보다 Pore size가 작으며 액체중에 용해되거나 분산된 물질을 입자크기나 분자량 크기별로 분획 할 수 있는 막을 말한다. UF막의 Pore size는 주로 분획분자량(Molecular Weight of Cut-off)으로 나타내는데 HWCO 수천~수백만까지의 범위를 말한다. UF막은 수처리분야에서 콜로이드물질, 입자, 균등을 제거할 목적으로 사용되며 소재로는 Polysulfone, PAN, Cellulose acetate등이 사용된다.

정수처리에 있어서 UF 및 MF막의 기능은 주로 제탁 및 제균이다. MF막이 Pore size가 크기 때문에 상대적으로 수투과성이 UF보다 우수한 반면 입자제거 능력 및 고분자유기물까지 제거할 수 있다는 점에 있어서는 UF가 효과적이다. 또한, 사용시 MF막의 경우 오염물질이 막 내부에 끼어 오염원이 되기도 하고 Pore를 빨리 막히게 하여 장기 사용시 문제점이 될 수 있다. 그러나 간편 System에서는 (소형) MF가 편리한 점도 있다. 중공사형(Hollow Fiber, Capillary), 나권형(Spiral-Wound), 관상형 (Tubular), 적층형(Pleated)등 여러가지 모양이 있으나 정수처리에는 중공사형이 가장 적합한 것으로 평가된다. 정수처리에 적용되는 UF/MF막의 사양을 표 1.에 나타내었다.

표 1. 정수처리에 사용되는 UF/MF막

	MF	UF
Pore Size	$0.01 \sim 1\mu\text{m}$	MWCO 1만~100만
순수투과량(LMH)	500~10,000	100~2,000
막구조	관절막,비대칭막	비대칭막
막재질	CA, PC, PE, PP, PTIFRE, PSF, Ceramic	PSF, CA, PAN PVA, PVDF, Ceramic
여과압력	감압~2 kg/cm^2	감압~5 kg/cm^2
제거대상	미립자, 세균, 바이러스, 조류	미립자, 세균바이러스, 조류, 부기·유기, 콜로이드물질, 유기물

3. 음용수 처리에 대한 UF/MF막의 적용

3-1. 가정용 정수기

1990년 이후 환경오염이 심각해지면서 물에 대한 인식이 날로 변하고 있다. 특히 하천수오염 및 배관노화로 인해 국민들의 불신감은 커지면서 막형 정수기 및 먹는 샘물시장이 크게 증가하고 있다.

일반적으로 수도수에서 문제가 되고 있는 것은 잔류염소(Cl_2), 배관 녹찌꺼기, 곰팡이, 조류, 박테리아등 미생물, 입자등이다. 지금까지 수도수의 안전성에 대해 많은 논란이 있었으나 결론적으로 염소, 균, 입자, 유기물 등이 물맛을 나쁘게 하고 건강에 침해를 주는 요인으로 밝혀졌다.

국내에서는 RO막을 사용한 정수기가 주류를 이루고 있으나, 이는 상업적 요소에 의한 것이지 기능차원에서 RO밖에 사용할 수 없다는 개념은 아니다. 일본에서는 연간 350만대의 UF/MF 중공사막 정수기가 판매되고 있으며 국내에서도 최근 UF/MF 중공사막 정수기로 전환되고 있는 실정이다. 이러한 이유가 UF/MF 막이 물속의 미네랄성분을 통과시키기 때문이라고 생각할 수도 있으나 수질면에서 안전성이 있고, RO에서는 어려운 장점도 가지고 있으며 물맛 또한 좋기 때문이라고 생각된다. 물론 여과기능 측면에서는 RO막이 더 완벽하다고는 생각되지만 음용수 제조에 굳이 이를 사용할 정도는 아니라고 판단된다.

막형 정수기는 막자체만이 사용되는 경우는 없으며 전처리여과필터, 활성탄필터, UF/MF/RO등 3가지 공정이 사용되는 것이 보편적이다. 정수기의 구성요소별 제거성능을 표 2.에 나타내었다.

염소의 제거는 가정용 정수기에 있어서 매우 중요하며 이것은 막으로는 해결할 수 없는 성분이며 활성탄으로 제거가 가능하다. 염소는 물속의 세균, 대장균, 바이러스를 죽이기 위해 사용되는데 완벽한 살균을 기대할 수 없다. 이들 미생물은 현탁물질에 흡착하려는 경향이 있고 Cl_2 에 의해 살균해도 보호되기 쉽다. 또한 잔류염소가 제거되면 다시 증식될 가능성이 높다. 그러나 UF/MF막으로 걸러낸다면 이러한 문제점을 해결할 수 있다.

표 2. 각종 정수기의 불순물 제거능력

분 류	항 목	활성탄	활성탄 + MF	활성탄 + UF	활성탄 + RO	연수기 (양이온교환)
유 기 물	THM	○	○	○	○	×
	곰팡이냄새 원인물질	○	○	○	○	×
	농약	○	○	○	○	×
	계면활성제류	△	△	○	○	×
무 기 이 온	칼슘, 마그네슘	×	×	×	○	◎
	나트륨, 칼륨	×	×	×	○	×
	철, 망간	△	△	△	○	×
	음이온류	×	×	×	○	×
미 립 자	녹찌거기	×	○	◎	◎	×
	점토성분	×	○	◎	◎	×
	석면	×	○	◎	◎	×
미생물	대장균, 일반세균	×	◎	◎	△	×
유리염소(Cl ₂)		○	○	○	○	×

RO막에 비해 UF/MF막이 가지는 장점은 다음과 같다.

- 소형규모에서도 단위 시간당 통수량이 많으므로 경제적이며 용도 확대의 이점이 있다.
- 저압운전으로 Pump의 사용이 불필요하다.
- 말단필터로 적용하며 여과액 보관탱크가 필요 없다.
(보관탱크에서 미생물 번식이 큰 문제가 되고 있다)
- 농축폐수의 발생이 (거의) 없다.
- 미네랄 성분은 유지시킨다

UF/MF 막을 사용함에 따라 정수장치가 Compact해 질 수 있으므로 지금까지 대형 장치개념에서 소규모장치 또는 가전제품과 같은 개념으로 전환될 가능성이 있다. 우리가 일상생활에서 요구하는 물은 여러가지이기 때문에 수도수 자체를 완벽히 정제한다는 것은 오히려 낭비일 수도 있으므로 가정용 정수기는 음용수만을 정제한다는 점에서 바람직하다고 본다. 그러나 통수량이 적어 제한된 즉, 마실 물로만 사용하는 개념에서 벗어나 인체에 필요한 모든 부분에 대해 정수된 물을 사용할 수 있게 하기 위해서는 UF/MF막의 도입이 요구될 것이다.

3-2. 水道淨水를 위한 UF/MF막의 실용화

일반적으로 수도수는 가장 질 좋은 수원으로부터 얻어진 원수를 응집침전→Sand 여과 → 염소살균의 과정을 거쳐 가정으로 보내지게 된다. 앞서 기술한 바와같이 이제는 환경오염으로 인해 수질이 크게 저하되었으며 소비자의 요구도 고급화되어감에 따라 고도처리 방법으로 전환되며 광역상수도에서 지역상수도 개념으로 바뀌고 있다. 고도처리정수는 위의 일반처리 방법에 Ozone처리 또는 성탄 처리를 추가한 것이 보통인데 이제는 실용성 검증용 거침으로서 UF/MF막이 사용될 수 있게 되었다. 이러한 의미는 먹는물 처리에 있어서 UF/MF막이 안전하고 효율적이다라는 점을 시사한다.

일본에서는 1991년부터 3년간 厚生省의 주도하에 산학연 합동 Project인 「膜利用型新淨水System 개발연구 (MAC 21)」를 실시하였는데 막에 의한 정수기술의 상용화를 모색한 것이다.

수도수중에 함유된 유기물, 농약, 소독 부생성물(THM), 냄새제거, 균, 입자제거를 목적으로 이 Project는 실시되었는데 UF/MF막의 적용성이 입증되었다. MAC 21 Project는 수도정수기술의 기본인 「응집침전-침전-Sand여과」를 막분리 기술로 대체하는 것으로서 소규모 수도수 제조에 대한 Guideline이 되었다. 이 기술의 이점은 원수중의 현탁입자를 완벽히 제거할 수 있고 설치, 운전측면에서 매우 효과적이라는 점이다. 이러한 기술을 입증하기 위해 매우 많은 분리막이 사용되었으며 여러 엔지니어링 회사에서 다각적으로 추진하였는데 여기에 사용된 막 분리공정은 표 3.과 같다.

표 3. MAC 21 Project에 사용된 공정

구분	막재질	형태	여과형식	막소재 (Pore Size, MWCO)	여과방식	구동방식
UF	유기막 (12)	중공사막 (12)	외압(2)	PAN (13,000 , 200만)	Cross-flow Dead-end	가압(13)
			내압(10)	PSF (13,000 , 20,000) PES (30,000) PAN (13,000 , 50,000) Cellulose (100,000) CA (150,000)	Cross-flow	
	무기막 (1)	다발관 (1)	내압 (1)	Ceramic (300,000)		
MF	유기막 (16)	중공사막 (14)	내압(2)	PSF (0.1 μ m)	Dead-end(2)	가압(2)
			외압(12)	PP (0.05 μ m, 0.2 μ m) PSF (0.05 μ m, 0.1 μ m) PAN (0.01 μ m) PE (0.1 μ m)	Cross-flow(4) Dead-end(8)	가압(9) 흡인(2) 수위차(1)
		평막(2)	외압(2)	PSF (0.1 μ m) PET (0.4 μ m)	Cross-flow(1) Dead-end(1)	흡인(1) 가압(1)
	무기막 (6)	다발관(4)	내압(4)	Ceramic (0.1 μ m, 0.2 μ m)	Cross-flow(1) Dead-end(3)	가압(4)
		관상(2)	외압(2)	Ceramic (0.1 μ m)	Cross-flow(2)	흡인(2)

MAC21 Project는 대상으로 하는 물질이 입자 (유기·무기현탁물질, 대장균군, 일반세균등)이고 따라서 MF와 UF막이 사용되었다. 고분자막에 의한 압력변동이 적고 가능한 세정을 하지않고 오랜시간 안정된 운전을 하는 것이 필수적 요소이다. 이를 위해서는 전처리 조건 및 오염방지 또는 회복 기술이 중요하다. 사용된 운전 조건은 표 4.와 같다.

표 4. 막분리공정의 운전조건 (Hollow Fiber)

분류	막소재	종류	Pore Size (MWCO, μm)	전처리	세정	투과유속 ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)
A-1	CA	UF	150,000	Prefilter	역세+약품	1.93
A-2	CA	UF	150,000	Prefilter	역세+약품	1.68
A-3	PAN	UF	13,000	Prefilter	역세+약품	1.48
B-1	PP	MF	0.2	응집제	공기역세+약품	1
B-2	PP	MF	0.2	응집제	공기역세+약품	2
B-3	친수화PSF	MF	0.1	응집제	공기Flushing+약품	0.6>
C	PSF	MF	0.1	생물처리	역세+약품	1
D	PP	MF	0.2	Prefilter + 응집제	역세+Air Flushing	1.7
E	PAN	UF	13,000	생물+Prefilter	역세	0.94
F-1	친수화PP	MF	0.05	Prefilter	역세+Air	0.36
F-2	PSF	UF	13,000	Strainer	역세	1.3
G-1	친수화PE	MF	0.1	염소+응집제	역세+Air	0.72
G-2	친수화PE	MF	0.1	염소+응집제	Air	0.72
G-3	PAN	UF	2,000,000	염소+응집제	역세+Air	0.5
G-4	PSF	UF	13,000	염소+응집제	Air	1.5

3-2-1. 전처리 및 세정효과

표 4.에서 나타난 바와 같이 UF막의 투과유속이 MF막 보다 큰 경향을 보였다. 이는 상식적으로는 이해가 되지 않는 것 같지만 실제로 MF는 기공이 크기 때문에 구멍 막힘이 심각하다. 특히 MF는 막 내부에 입자가 끼여들어 역세효과가 UF에 비해 나쁘다. 약품세정은 NaOH, HCl, NaOCl을 주로 사용하는데 약품세정을 행하면 전처리 및 막의 종류에 관계없이 높은 투과유속을 얻을 수 있다.

응집제를 첨가하게 되면 Prefilter를 사용한 경우보다 투과유속이 적은 것을 알 수 있다. 이는 응집침전 후 많은 SS 물질이 발생되기 때문이다.

물리적 세정방법은 역세와 Air Flushing이 주류를 이루고 있는데 Air Flushing에 의한 진동작용으로 막표면의 오염물질을 제거하는 것이 역세보다 훨씬 효과적이라는 점이 입증되었다. 이는 비단 수도수 정제 측면뿐만 아니라 가정용 정수기에 있어서도 마찬가지로의 결과를 유추할 수 있다.

- MF막은 UF막보다 초기 투과수량은 크지만 오염이 쉽게 일어나므로 일정 시간 경과후 UF가 더욱 좋은 투수성을 가진다.
- 가정용 정수기는 Dead-end Filtration이므로 MF막을 사용할 경우 내부에 오염물질이 끼게되고 안정성에 문제가 될 수 있으므로 UF막이 이상적이다.
- 가정용 정수기도 Flushing이 가능토록 설계할 수 있다. 즉 막표면에 오염된 물질을 간헐적인 Flushing 또는 Bubble(Air) Flushing을 통해 오염물질을 제거할 수 있으므로 효과적으로 사용할 수 있다.

3-2-2. 여과수의 수질

MAC 21 Project에서 얻어진 여과수의 수질은 음용수로서 수질기준을 만족시키며 특히 현탁물질 및 균체거는 매우 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 그 결과를 표 5에 나타내었다.

보통 정수 처리에서 염소소독으로 대장균을 살균하는데 잔류염소가 없으면 다시 회복하여 증식할 가능성이 있다. 따라서 막으로 균체를 거르는 것이 효과적이다. 그러나 막을 이용한 수도수의 정제를 행하더라도 가정에 공급되면 균에 대한 문제가 다시 대두 될 수 있으므로 음용수 사용 전에 UF/MF막으로 걸러서 사용하는 것이 안전하다고 할 수 있겠다. 즉 Point-of-use개념의 정수기는 안전한 음용수를 얻기 위한 필수적 요소라고 할 수 있겠다.

표 5. MAC 21 Project에 의한 오염물질 제거 성능

항 목	원 수		처 리 수	
	범 위	평 균	범 위	제거율(%)
탁도(도)	3.36 - 51	14.1	0.00 - 0.17	98.9 - 100
색도(도)	7 - 22	11	1.6 - 4	60 - 84
KMnO ₄ 소비량	3.3 - 17.6	6.9	1.4 - 3.1	46 - 84
암모니아성 질소	<0.01 - 0.60	0.17	0.01 - 0.30	0 - 84
총 망간	0.024 - 0.130	0.049	0.004 - 0.034	23 - 100
총 철	0.25 - 3.8	0.80	0.00 - 0.01	98 - 100
Aluminum	0.19 - 2.7	0.83	0.00 - 0.09	90 - 100
THM 생성능	0.030 - 0.057	0.042	0.017 - 0.045	0 - 66
일반세균(개/ml)	4,100-160,000	-	290 - 9,700	-
대장균(개/ml)	52 - 1,900	-	0 - 180	-

4. 향후 방향

최근 RO막으로 형성된 국내 가정용 정수기의 시장이 국산막 개발에 따라 UF/MF형으로 전환되고 있는 실정이다. 물론 RO 역시 우수한 정수능력을 보유하고 있으나 장단점을 보완한 형태로서 직수형 및 진정한 의미의 Point-of-use 형태로써 UF/MF막이 확대되는 양상이다. 우리나라는 폐수에 대한 국민들의 관심이 날로 증가하고 있으므로 정수개념이 「맛있는 물」 개념보다는 「완벽한 물」을 요구하는 경향이 크다.

UF/MF막은 맛과 안전성 모두를 추구할 수 있는 공정이라고 평가된다. 그리고 정수기를 수처리 System의 개념으로 도입하였으나 이제는 가전제품의 개념으로 전환되고 있고, 소비자도 보다 간편하고 값싸며 취급이 간단한 제품을 선호하고 있다. 정수기는 「마시는 물」 개념에서 조리수, 목욕수, 냉장고 공급수등 다양한 용도로 전개가 가능하며 소비자가 장시간 신뢰하며 사용할 수 있는 제품이 확산될 것이다.

국내 실정상 실제 문제가 되는 것은 배관 녹찌거기, 과량 염소 사용으로 인한 THM 발생, 균, 곰팡이등이다. 이런 요소를 해결하는 방법으로서 활성탄과 UF/MF를 조합한 기술이 보편적이며 국산 막의 등장으로 가격도 저렴해질 것으로 전망된다. 단, 상업용 정수기의 정착을 위해서는 다음과 같은 선결 과제가 요구되고 있다.

- (1) 분리막, 정수기 부품 및 제품의 규격화
- (2) 정수기 부품 및 제품 생산 업체의 자격심사 및 등록제도
- (3) 정수기 관련, 수질 관련 전문 연구기관의 설립, 연구지원
- (4) 핵심소재의 국산화
- (5) 유통질서 조정에 의한 소비자 보호차원의 가격절감
- (6) 수출 주도 산업으로의 육성

또한, 분리막 산업은 기술적 서비스가 필수적인 사업으로서 Key Factor는 분리막에 대한 성능과 전문설계능력, 운전유지에 대한 노하우 습득이다. 이런 것들에 대한 수준이 향상될 때 음용수처리에 있어서 신뢰성 있고 안전하며 국민의 보건에 기여할 수 있는 정수기사업으로 발전할 것을 믿어 의심치 않는다.