

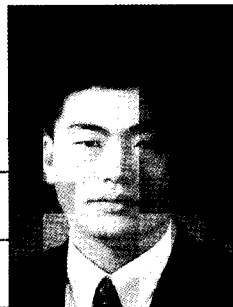
해수 담수화 설비의 전처리용 섬유막 정밀여과장치 개발



김재윤

(KIMM 환경설비연구부)

- '88 - '93 서울대학교 기계공학과(학사)
- '93 - '95 서울대학교 기계공학과(석사)
- '95 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



박상진

(KIMM 환경설비연구부)

- '86 - '90 서울대학교 기계공학과(학사)
- '90 - '92 서울대학교 기계공학과(석사)
- '92 - '96 서울대학교 기계공학과(박사)
- '96 - 현재 한국기계연구원 선임연구원

1. 서론

현재 세계적으로 보편화된 해수담수화기술은 크게 증발식과 막분리식이다. 특히 막분리식 담수화장치는 막기술의 발달과 함께 세계 담수화 시장의 점유율이 크게 증가하고 있다. 이러한 막분리식 담수화 장치에서 막과 함께 중요한 위치를 차지하고 있는 기술이 전처리기술이다.

전처리기술은 막의 상태를 장기간 좋게 유지하기 위해서 원수를 공급하기 전에 미리 막에 나쁜 영향을 미치는 물질을 제거하는 기술이다. 해수중에는 용존성 염류외에 미생물, 미세한 모래, 콜로이드상 물질 등이 존재하고 이것들이 막면에서 막힘 현상을 일으켜 막모듈의 압력손실, 막성능의 저하를 유발한다. 또한 해수는 칼슘 및 마그네슘 농도가 높아 모듈내에서 해수가 농축될 때 칼슘과 마그네슘이 막면에서 석출하기도 한다. 따라서 막분리과정의 성능향상과 주변 기기의 수명 연장을 위해서 해수에 대한 전처리는 필수적이다.

이러한 전처리 기술은 크게 물리적, 화학적, 생물학적 전처리로 구분된다. 물리적 전처리에는 모래나 활성탄을 이용한 여과기술이 있으며, 화학적 전처리에는 각종 화학약품을 투여하여 pH를 조절하거나 막면에서 스케일을 형성할 수 있는 이온들을 응집, 침전시켜 분리하는 기술이 있다. 또한 생물학적 전처리에는 막에서의 생물학적 눈막힘현상을 방지하기 위한 염소나 오존 살균 등의 기술이 포함된다.

현재 담수화설비의 대부분은 대규모의 응집,

침전 시설을 통한 고전적인 전처리장치를 채택하여 가동중에 있다. 그러나 이러한 장치는 오랜 역사를 지닌 안정적인 기술이라는 장점을 지니고 있지만 설비가 차지하는 과대한 소요면적, 화학약품 사용으로 인한 2차오염 유발, 전체 담수화 시스템의 자동화가 어려운 점 등의 한계를 지니고 있다.

따라서 요즘에는 장비가 작고 자동화가 가능하여 담수화설비의 전체 규모를 최소화할 수 있으며 운전에 있어서도 제어 및 자동화를 쉽게 구현할 수 있는 장점을 갖고 있는 정밀여과막을 이용하여 기존의 전처리 장비를 대체하려는 연구들이 활발해지고 있다. 또한 정밀여과막 장치는 담수화의 전처리용 뿐만 아니라 발전소 등의 공급수에 대한 수처리 설비로도 활용되는 등 활용 영역이 증대되고 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 정밀여과 공정역시 막분리 공정이기 때문에 유입수내에 존재하는 입자들에 의해 눈막힘 현상이 일어나 막의 수명이 짧아지고 투과유량이 떨어질 우려가 있기 때문에 이를 최소화하기 위한 기술과 역세주기를 줄이고 역세효과를 증가시킬 수 있는 기술에 대한 연구가 필요한 상황이다.

2. 정밀여과기술

2.1 개요

정밀여과는 입자가 작은 물질에서부터 수 μm 정도의 콜로이드성 물질의 분리에 사용되는데 특히 기체 분리의 경우에는 0.02nm에서 0.3nm 범위의 분자를 분리하는데 이용되고 있다. 막분리공정 중에서 정밀여과막의 세공은 비교적 큰 편에 속하여 주로 분자크기에 의한 선택적 분리를 위해 사용되고 있다.

정밀여과막은 상업적으로 사용되고 있는 가장 오래된 투석막만큼이나 오랜 역사를 가지고 있으며 1846년 니트로셀룰로오스의 발견으로부터 성장을 계속하고 있는데, 1906년에는 고분자의

농도를 달리하여 세공의 크기를 조절할 수 있게 되었으며, 1922년에는 니트셀룰로오즈 용액에 얇은 코팅을 입힘으로써 상업적으로 사용하게 되었다. 이후 고분자 물질의 발전 속도에 힘입어 생물학적인 분야인 균주의 분리에서부터 음용수의 정화에 이르기까지 현재에는 사용처가 계속 늘어가고 있다.

정밀여과막은 현재 식품공업, 생물화학공업 및 의료 분야 등에서 광범위하게 이용되고 있으며 실험실 등 아주 작은 규모의 응용에도 많이 이용되고 있다. 상당수의 정밀여과막 및 모듈은 1회용으로 사용되고 있고 의학이나 약학 분야에서 멸균용으로 사용될 뿐 아니라 반도체 공정에 까지도 이용이 확대되고 있다.

박테리아 중 크기가 최소인 것이 대략 0.3 μm 정도이므로 대부분의 박테리아들이 정밀여과 공정으로 제거될 수 있으므로 무균수 제조나 제약 공정에 사용할 수 있으며 공기정화기 등에도 적용 가능하다. 정밀막의 경우 다른 분리막에 비하여 상당히 저렴한 장점을 가지고 있다. 초순수 제조의 경우 주로 사용되는 수처리 공정은 역삼투 공정이지만 배관이나 장치내부에서 이물질이 발생할 수 있으므로 이들을 최종적으로 제거해야 하는데 이때에도 정밀여과공정이 사용된다.

정밀여과막의 재료로는 고분자와 기체분리용에 쓰이는 금속막, 세라믹막 등이 있으며 모듈의 종류는 다른 분리막과 비슷하다. 정밀여과막에 관한 연구는 막오염 방지기술 개발과 1회용이 아닌 역세척을 통해 재생가능한 시스템 개발 등이 진행되고 있다.

2.2 막분리 메카니즘(Filtration mechanism)

막분리의 메카니즘은 크게 두가지가 있다. 하나는 막세공보다 크기가 큰 입자가 분리될 때의 메카니즘인 표면여과(surface filtration)이고, 나머지 하나는 막세공보다 크기가 작은 입자가 막 내부에 들어 와서 흡착하는 내부여과(depth

filtration)이다. 그림 1은 두 메카니즘에 관한 개략도이다. 표면여과 메카니즘은 체분리(sieving) 메카니즘이라고도 하는데, 정밀여과에서의 대부분의 물질분리는 이 체분리 메카니즘에 의해 발생한다.

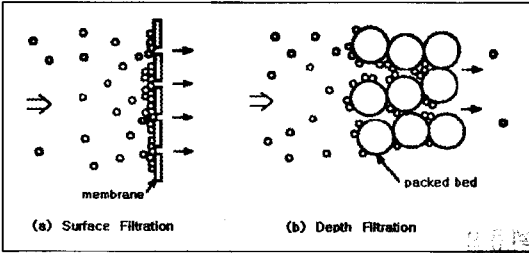


그림 1. 막분리 메카니즘

2.3 교차흐름여과(Crossflow filtration)와 막힘흐름여과(Deadend filtration)

Deadend 방식에서는 유입수가 유입되는 방향이 막에 수직이고, Crossflow 방식은 막과 평행하다. 종래의 막분리방식은 Deadend 방식을 채택하였지만, 점차 Crossflow 방식으로 변해 가고 있고 최근에는 Crossflow 방식이 대부분이다. 두 방법간의 근본적인 차이점은 회수율(Recovery ratio)의 차이이다. Deadend 방식에서는 회수율이 100%이고, Crossflow 방식에서는 회수율이 100% 미만이다. 그림 2는 두 방식의 간단한 특징을 보여주고 있다.

그림 2에서 알 수 있듯이, Crossflow 방식은 유입되는 유체의 흐름이 막을 가로질러 막표면에 평행으로 진행되며 막을 통과하는 투과수의 분율은 비교적 적은 편이다. 이로 인해 얻을 수 있는 Crossflow 방식의 장점은 막에 평행한 유입수의 흐름에 의해 발생하는 전단력으로 인하여 막표면의 케이크층이 어느 정도 제거되기 때문에, Deadend 방식에 비해 케이크 축적으로 인한 막오염 현상이 적게 일어난다는 점이다. Crossflow 방식에서는 회수율을 증가시킬수록, Deadend 방식과 유사한 특징을 보인다. 즉, 막오염 현상의

발생 정도가 커지게 된다. 반면, 회수율의 감소는 막오염 현상의 발생 정도를 줄이는 효과는 있지만, 이는 바로 막투과수의 생산량의 감소를 뜻하기 때문에, 무턱대고 회수율을 줄일 수는 없다. 따라서, 적절한 회수율을 선택하는 것이 경제적인 정밀여과 운전을 위해 필수적인 요건이다.

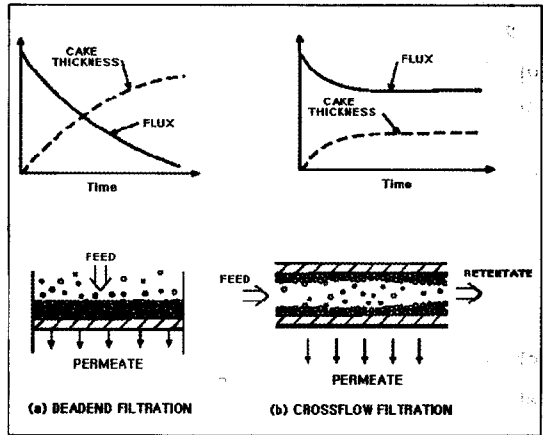


그림 2. 막힘흐름여과와 교차흐름여과의 개략도

2.4 눈막힘(Fouling)

막분리에서 경제성을 좌우하는 가장 큰 요인은 눈막힘에 의한 플럭스 감소 정도이다. 이는 정밀여과에서도 예외는 아니다. 막분리 공정이 경제성을 지니게 되려면, 높은 막투과플럭스는 필수 불가결한 요소이다. 그러나, 대부분의 막분리는 눈막힘으로 인한 플럭스의 감소현상을 보이고 있다. 눈막힘 현상은 보통 막 표면이나 내부공극에 이물질이 부착되어 막의 본래의 기능을 다하지 못하도록 억제하는 것이라 정의된다. 눈막힘 현상은 입자와 막 사이의 화학적, 물리적, 정전기적 상호작용으로 인해 발생하는 매우 복잡한 현상이다.

2.5 Darcy's Law

정밀여과에서 막분리 메카니즘이 모두 체거름 메카니즘이라 가정하면, 원수 내의 입자들은 모

두 막공극에 의해 배제되어 막 표면에 쌓이게 되며 케이크층과 막은 투과하는 원수에 대해 연결된 저항이 된다. 따라서, Darcy's law에 의해 플럭스와 압력간의 관계를 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta p}{\eta_0(R_m + R_c)} \quad (1)$$

이 때, A는 막의 투과면적, V는 투과수의 부피, t는 시간, Δp 는 압력차, η_0 는 투과수의 점성계수(Viscosity Coefficient), R_m 은 막 자체의 저항, R_c 는 막 위에 쌓인 이물질로 이루어진 케이크층으로 인한 저항을 나타낸다. 압력차가 일정한 상태에서는 막 투과수의 플럭스는 막과 케이크층의 저항에 반비례하게 된다. 이 저항들은 눈막힘 현상에 의해 증가하게 된다. 막의 눈막힘에 의해 R_c 와 R_m 같은 투과 저항이 증가한다면, 투과수의 플럭스를 유지하기 위해서는 운전압력을 증가시켜야 하므로 막에 큰 무리가 갈 수도 있고, 플럭스가 줄어들면 투과수 생산량의 저하를 가져와 경제성 측면에서도 상당히 부정적인 효과를 가져올 수 있다.

2.6 농도분극현상(Concentration polarization)

물이 막을 통해 확산함에 따라 막의 원수측에서는 그림 3과 같이 막을 투과하지 못하는 입자들이 막벽에 쌓이게 되어 원수보다 높은 농도를 가지게 되는데 이러한 현상을 농도분극이라 하며 농도경사나 농도분극층이 형성되면, 막 부근의 입자들이 막표면에서 원수측으로 농도경사로 인해 역확산하게 된다. 이 역확산의 정도는 입자의 크기가 클수록, 막의 가로흐름유속(crossflow velocity)이 클수록 커지며 막의 원수측에서의 입자는 막투과 압력에 의해 막을 향한 이동을 하게 되고, 농도구배에 의해 다시 반대방향으로 이동하게 된다.

농도분극이 이루어 짐에 따라 정체된 케이크층이 형성되고 나면 플럭스 저하가 일어나기 시작하고, 케이크층은 점차로 발달해서 플럭스가

계속 감소하다가 케이크층이 더 이상 발달되지 않는 평형점에 도달하게 된다.

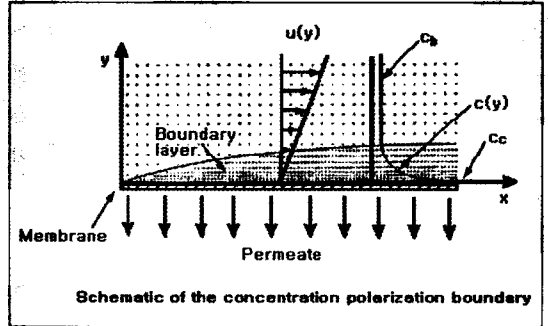


그림 3. 농도분극 경계층

2.7 눈막힘 현상에 대한 대책

정밀여과 운전중에 필연적으로 발생하는 농도분극현상과 이로 인해 형성되는 케이크층의 저항으로 인해 발생하는 플럭스 저하 현상을 감소시키면서 높은 플럭스를 얻으려는 연구가 현재까지 진행되고 있다. 이 연구들은 대체로 주기적으로 케이크층을 제거하는 부분과, 원수의 흐름에 맥동(pulse)을 주거나 막투과 압력과 전단 유속의 적절한 조합을 통해 농도분극 현상을 감소시키거나 케이크 층의 형성을 감소시키는 부분, 이 두가지의 큰 흐름으로 나뉘어 진다. 특히 막분리과정과 반대되는 압력을 가해 막표면에 형성된 케이크를 제거하는 방법을 역세척(backwashing)이라 부른다. 보통 역세척에는 역세척효율을 높이기 위해 화학물질을 첨가하기도 한다. 또한 이러한 역세척을 매우 짧은 주기동안(1-5초) 순간적으로(0.3초) 시행하는 것을 backplushing이라 부르며 실험실 수준의 연구가 진행되고 있다.

3. 섬유막을 이용한 정밀여과 장치

3.1 개요

정밀여과 방법중의 하나인 섬유막을 사용하는

필터는 최근에 주목을 받기 시작한 흥미로운 것으로 많은 장점을 가지고 있다. 장점으로는 쉽고 완벽한 역세척, 적은 운전비용, 폭넓은 제거 범위 그리고 좋은 여과수질이 있다. 필터는 유연한 섬유인 polyester로 만들어져 있기 때문에 역세하는데 짧은 시간과 적은 양의 역세수(또는 압축 공기)면 충분하다. 막 엘레먼트와 시스템의 배치는 기존의 시스템과는 아주 달라 성능을 향상시키고 크기와 비용을 낮출 수 있다.

운전에 들어가면 부유 입자는 섬유위에 피복층(coating layer)을 만들고 이 피복층은 여과막으로의 기능을 하게 된다. 섬유는 단지 피복층을 지지하는 역할만 할뿐이다. 이 층은 작동을 시작한 후 일정시간을 운전(재순환)하게 되면 형성된다. 처리된 물을 공급함에 따라 플럭스는 점차적으로 감소한다. 이는 걸러진 입자에 의한 층의 두께가 두꺼워지기 때문이다. 플럭스가 어느 정도까지 감소되면 역세를 해야한다.

3.2 섬유막 정밀여과 장치의 원리

섬유로 짠 마이크로 여과막은 크게 두 그룹, 교차흐름(cross-flow)과 막힘흐름(dead-end)으로 나뉜다. 교차흐름은 그림 4에서 보여 주는 것처럼 관형 RO 막과 유사하다. 공급수는 섬유로 된 원형관 안쪽으로 흐르고 공급수중 일부는 공급수 탱크로 되돌아온다. 피복층은 섬유관의 안쪽 표면에 형성되고 그것의 두께는 한계치에서 유지된다. 왜냐하면 입자의 침적율은 전단력에 의한 대류 이동율(advection rate)과 균형을 이루기 때문이다. 그래서 최소의 여과 플럭스가 존재하고, 플럭스와 수질의 변동폭이 역세후 초기 단계를 제외하고 공급중에는 상대적으로 작다. 물론 두께는 매우 조금 증가하며 어느 시점에는 역세가 필요하다. 역세주기는 10~1000시간 정도이다. 그러나 전형적인 교차흐름 필터는 큰 설치면적이 필요하고 그것의 배치도 아주 복잡해 설치비는 막힘흐름의 경우보다 훨씬 크다.

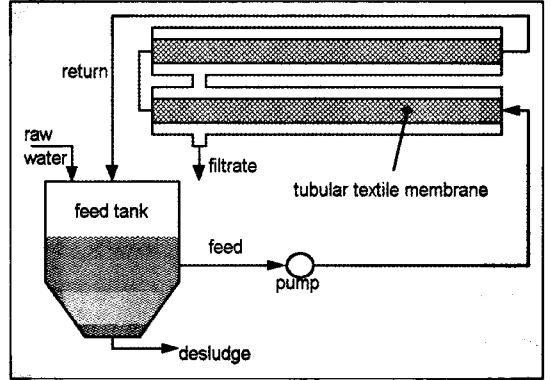


그림 4. 교차흐름형 섬유막 정밀여과 장치

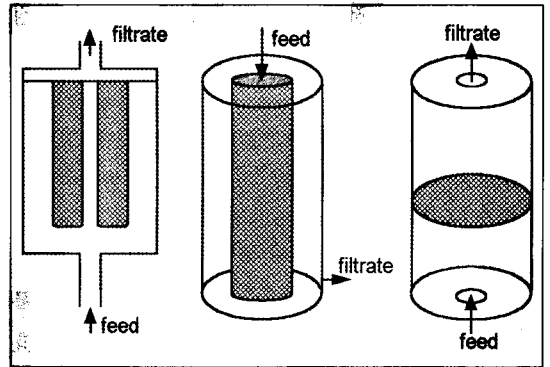


그림 5. 막힘흐름형 섬유막 정밀여과 장치

그림 5는 섬유막을 사용하는 두 종류의 막힘흐름 마이크로 여과의 모습을 보여주고 있다. 이 형태의 가장 큰 두드러진 장점은 교차흐름에 비해 소형이라는 것이다. 소형화와 단순함은 설치비를 낮춘다. 이와는 달리 역세 주기는 연속적인 막의 플러깅(plugging)때문에 교차흐름에 비해 훨씬 짧다(대개 10시간 이하). 투과 유량의 감소기울기는 공급되는 동안에 매우 급하다. 더욱이 막에 대한 압력강하는 교차흐름의 경우보다 상당히 크다.

본 기계연구원에서는 교차흐름과 막힘흐름의 장점을 묶은 반 교차흐름(semi-cross-flow)을 이용한 마이크로 필터를 도입하였다. (그림 6 참조) 이것의 장점은 크기가 소형이고 상대적으로 긴 역세주기를 갖는다는 것이다. 이 반 교차흐름의 경우는 입자를 함유하는 공급수가 섬유막 엘레멘

트의 밖을 흐르고 피복층이 막의 바깥쪽 표면에 형성된다. 공급수중 일부는 재순환을 위해 공급수 탱크로 되돌아 온다. 따라서 막다발의 안쪽에 전단 흐름이 존재해 피복층의 두께가 증가하는 속도는 막힘흐름의 경우보다 훨씬 느리다. polyester로 만든 막은 길고 가는 튜브로 되어있고 끝은 막혀 있으며 스페이서가 막의 안쪽에 삽입되어 여과수를 잘 흐르게 한다. 공급수 압력 때문에 공급(service)되는 동안에 막은 수축되고 가늘고 긴 튜브로 유지된다. 역세는 가압공기와 여과수를 이용한다. 역세중 유연한 섬유막은 상대적으로 높은 내부 압력에 의해 팽창되어 피복층이 막표면에서 쉽게 부스러져 분리된다. 역세후 씻어내기(rinse)와 피복(coating)이 원수에 의해 동시에 행해져 씻어내는 시간과 물을 절약할 수 있다.

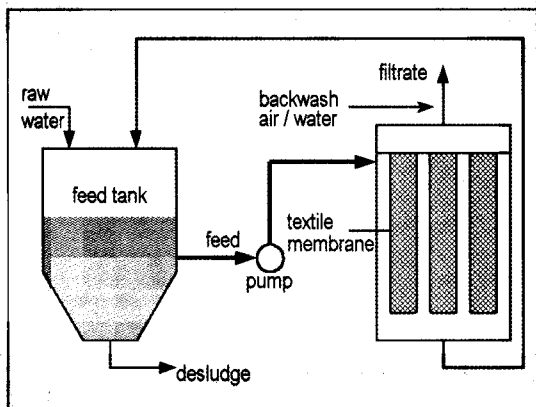


그림 6. 반교차흐름형 섬유막 정밀여과 장치

3.3 파일럿 시험 결과

그림 7은 성능 시험을 위한 파일럿 규모의 반교차흐름 섬유막 마이크로 여과의 모습을 보여 주고 있다. 이 시스템은 필터 모듈, 부스터 펌프, 공급수 탱크와 여과수 버퍼 탱크로 구성되어 있다. 모듈은 4 inch 베셀안에 35개의 가늘고 긴 관형 막 엘레먼트로 되어있다. 막 엘레먼트의 길이는 1,000 mm이고 직경은 약 12~13 mm이다. 이것을 100배 확대한 모습인 그림 8, 그림 9, 그

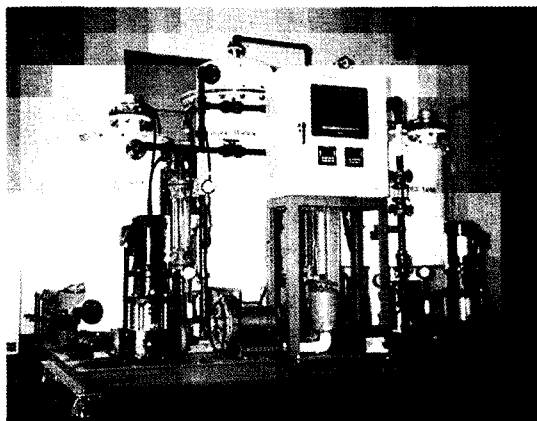


그림 7. 파일럿 시스템 사진, Prefil

림 10은 각각 사용 전, 후, 세척한 후의 사진이다. 세척후 사진과 사용전 사진을 비교해 보면 세척을 통해 거의 제거가 됨을 알 수 있다. 세척은 단지 물을 사용하였다. 파일럿 시험은 두 종류의 콜로이드 입자-황토(loess)와 실트(silt, sea mud)-와 도시 하수를 가지고 수행되었다. 도시 하수를 원수로 하는 시험은 활성탄을 전피복물질(pre-coating material)로 사용한다. 공급 유량은 4.8~5.0m³/hr이고 공급수의 50~70%는 재순환을 위해 공급수 탱크로 되돌아간다. 공급 압력은 약 12~15 psi이고, 막에서의 압력 강하는 12.5 psi를 넘지 않는다. 어떤 화학 약품이나 첨가제도 전체 시험 공정중에 사용하지 않는다. 황토와 실트의 액면 입자 크기는 각각 0.4~1.0 micron과 0.2~0.7 micron이다. 파일럿 시험 데이터는 표 1에서 보여지는 것처럼 좋은 SDI₁₅ 감소 효과를 보여주고 있다. 모든 경우에서 여과수의 SDI₁₅는 3이하이다.

그림 11과 12는 황토와 실트 각각의 운전 시간에 대한 여과수 플럭스의 변동을 보여 주고 있다. 그림에서처럼 플럭스는 운전 시작(또는 역세 후) 직후 급격히 떨어져 점차 한계치에 가까워진다. 이는 최소의 플럭스가 존재하고 피복층의 두께가 어떤 값에서 일정하게 지속된다는 것을 의미한다. 이점이 역세 주기를 길게 하고 여과 수질을 안정적으로 유지시킨다. 처리수를 공급하는

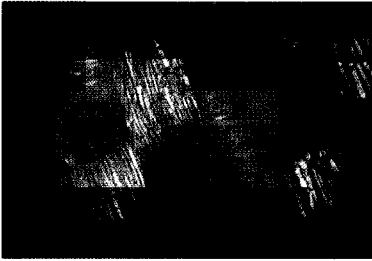


그림 8. 사용전의 섬유막 사진

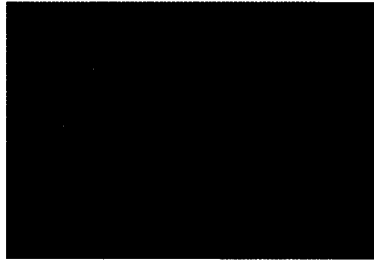


그림 9. 사용후의 섬유막 사진

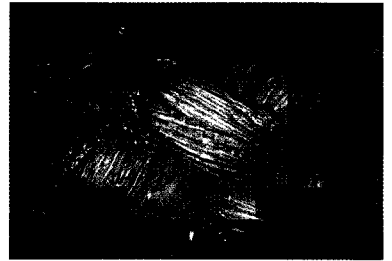


그림 10. 물세척 후의 섬유막 사진

표 1. 파일럿 규모의 성능 시험 결과

입 자	공급수 조건	여과 수질
황토(Loess)	<ul style="list-style-type: none"> 입자 농도 : 대략 140 ppm 탁도 : 250 NTU 이상 	<ul style="list-style-type: none"> 탁도 : 0.05~0.06 NTU SDI₁₅ : 2.43~2.46
실트(Silt, Sea Mud)	<ul style="list-style-type: none"> 입자 농도 : 대략 170 ppm 탁도 : 200 NTU 이상 	<ul style="list-style-type: none"> 탁도 : 0.05~0.07 NTU SDI₁₅ : 2.94~2.98
도시하수	<ul style="list-style-type: none"> 탁도 : 0.7~1.0 NTU 이상 SDI₁₅ : 5.7 	<ul style="list-style-type: none"> 탁도 : 0.05 NTU SDI₁₅ : 1.80

중에 여과수 SDI₁₅의 편차는 2.5%를 넘지 않는다.

피복층을 형성하는데 드는 시간은 약 3~5 분 정도이고, 적당한 역세 주기는 황토의 경우는 20 시간 이상이며 실트의 경우는 6 시간 정도이다. 실트가 황토보다 더 흡착성이 있으며 훨씬 작기 때문에 역세는 더 자주 해야 하며 최소의 플럭스도 훨씬 낮다. 그림 13은 역세를 매 24시간마다 했을 때 황토 80%와 실트 20%를 혼합한(전체 320 ppm) 원수의 경우에 플럭스의 주기적인 변동을 보여주고 있다.

결과로부터 공칭 제거율은 0.3~0.5 micron에서 검토될 수 있다. 정확한 제거율은 피복물질의 종류에 의존한다. 이것은 이 필터가 더 작은 전 피복 물질이 사용될 때 더 작은 입자도 거를 수 있다는 것을 의미한다.

4. 결론

해수담수화 설비의 전처리용으로 개발된 섬유막을 이용한 정밀여과장치에 대해서 살펴보았다. 역

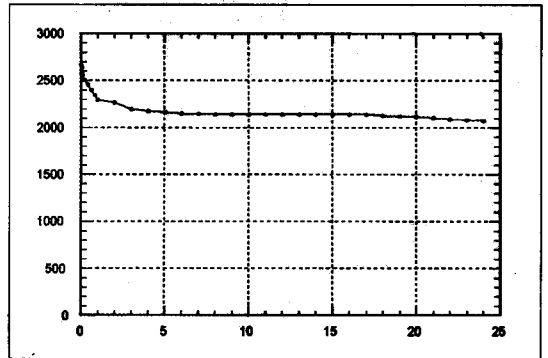


그림 11. 여과 플럭스의 변동 (황토 140 ppm에서)

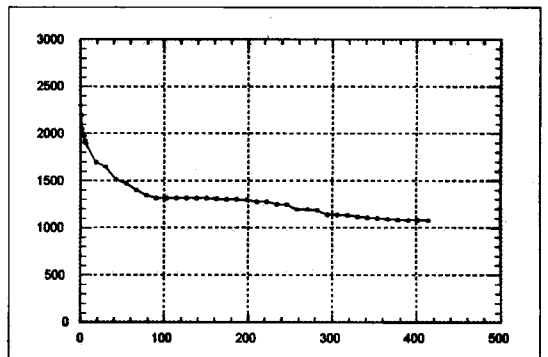


그림 12. 여과 플럭스의 변동 (실트 170 ppm에서)

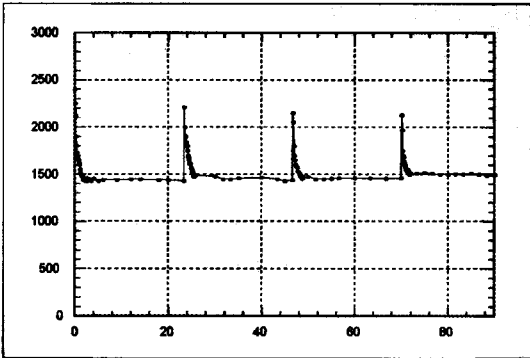


그림 13. 플럭스 변동의 주기적인 흐름
(320 ppm; 80% loess+20% 시트)

세형 반교차흐름 섬유막은 황토와 실트의 파일럿 시험에서 좋은 여과 성능을 보여주고 있다. 이 마이크로 필터는 명칭 0.3~0.5 micron 제거율과 여과수 SDI₁₅를 3이하로 제공한다. 이것의 장점은 규모가 소형이고 넓은 제거 범위, 쉽고 완벽한 역세, 전여과의 불필요, 상대적으로 적은 비용 등이다.

또한 본 연구에서 개발된 섬유막 장치는 본 기계연구원이 운영중인 당사도 해수 담수화 실험기지의 역삼투막 담수화장치의 전처리 설비로 적용하여 2년여의 실증실험중에 있다. 특히 당사도는 서해안에 위치하고 있어 원해수의 탁도가 심한편이지만, 개발된 섬유막장치가 안정적인 여과성능을 보이고 있어 우리나라의 도서지역에 충분히 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에 공동으로 참가한 한국정수공업주식회사는 이 장치를 발전소 수처리설비의 전처리 용으로 공급하고 있다. 이렇듯 정밀여과장치는 RO의 전처리, 수원에서의 부유물의 제거, 폐수의 재활용, 발전소의 산업용수처리 설비 등 그 적용범위가 확대되어가고 있다.

물부족이 심화될 것이라는 보고서들이 제출되고 있는 우리나라의 현실에서 기존 수자원의 재생 및 처리 시설과 대체 수자원으로 부각되고 있는 해수의 이용에 있어서 중요한 위치를 차지하고 있는 정밀여과기술과 본 연구에서 개발된 섬유막장치는 나름대로의 의미를 지니고 있다.

한국기계연구원에서는 이러한 연구결과를 바

탕으로 역세효율과 막의 성능을 향상시킬 수 있는 연구를 통하여 좀 더 안정적이고 효율이 향상된 섬유막 정밀여과장치를 개발할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] Al-Ahmad et al., "Scale Formation and Fouling Problems Effect on the Performance of MSF and RO Desalination Plants in Saudi Arabia", Desalination Vol.93, p.287-310, 1993.
- [2] Belfort, G. et al., "Review : The behavior of suspensions and macromolecular solution in crossflow microfiltration", Journal of Membrane Science, Vol.96 : 1~58, 1994.
- [3] Ebrahim, S. et al., "Microfiltration system as a pretreatment for RO units : Technical and economic assessment", Desalination Vol.109 : 165~175, 1997.
- [4] Gupta, B. B. et al. (1992), "Permeate flux enhancement by pressure and flow pulsations in microfiltration with mineral membranes", Journal of Membrane Science, Vol.70 : 257~266.
- [5] Ho et al., "Membrane Handbook"
- [6] Howell, J. A., "Sub-critical flux operation of microfiltration", Journal of Membrane Science, Vol.107 : 165~171, 1995.
- [7] Kanji, Matsumoto et al., "Cross-flow filtration of yeast by microporous ceramic membrane with backwashing", J. Ferment. Technol., Vol.66, No.2 : 199~205, 1988.
- [8] Kanji, Matsumoto et al., "Separation of yeast by cross-flow filtration with backwashing", J. Ferment. Technol., Vol.65, No.1 : 77~83, 1987.
- [9] Kuruzovich, J. N. and Piergiorganni, P. R., "Yeast cell microfiltration : optimization of

- backwashing for delicate membranes”, Journal of Membrane Science, Vol.112 : 241~247, 1996.
- [10] Kwon, D. Y. et al, “An enhancement of critical flux in crossflow microfiltration with a pretreatment of floating medium flocculator/prefilter”, 6th IAWQ Asia-Pacific Regional Conference Proceeding Vol.2 : 1475~1482, 1997.
- [11] Mallevalle, J., Odendaal, P. E. and Wiesner, M. R., “Water Treatment Mem-brane Processes”, McGraw-Hill, 1996.
- [12] Mavrov, V., Dobrevsky, I., Bonev, B. and Petkov, N., “Effect of Magnesium Hydroxide Formed under Alkaline Conditions on Brackish Water Pretreatment for Reverse Osmosis”, Desalination, Vol.85, pp.335~344, 1992.
- [13] Parnham, C. S. and Davis, R. H., “Protein recovery from bacterial cell debris using crossflow microfiltration with backpulsing”, Journal of Membrane Science, Vol.118 : 259~268, 1996.
- [14] Redkar, Sanjeev et al., “Modeling of concentration polarization and depolarization with high-frequency backpulsing”, Journal of Membrane Science, Vol.121 : 229~242, 1996.
- [15] Riedl, R. W. et al., “Critical flux concept for microfiltration fouling”, “Journal of Membrane Science”, Vol.100 : 259~272, 1995.
- [16] Romero, C. A. and Davis, R. H., “Transient model of crossflow micro-filtration”, Chemical Engineering Science, Vol.45, No.1 : 13~25, 1990.
- [17] Si-Hassen, D. et al, “Optimisation of an intermittent cross-flow filtration process of mineral suspensions”, Journal of Membrane Science, Vol.118 : 185~198, 1996.
- [18] Spiegler, K. S. and Laird, D. K., “Prin-ciples of Desalination”, 2nd. ed., Academic Press, N.Y., 1980.
- [19] Vigneswaran et al., “Application of Microfiltration for Water and Wastewater Treatment, Environmental Sanitation Reviews”, No.31, p.14~19, 1991.
- [20] Walton, “RO Pretreatment-Injecting A Little Chemical Control and Management”, Desalination Vol.82, p.281~301, 1991.
- [21] White, D. A. and Lesecq, P., “Op-timisation of intermittently operated microfiltration processes”, The Chemical Engineering Journal, Vol.52 : 73~77, 1993.
- [22] Yazhen Xu et al., “Optimization of a discontinuous microfiltration-backwash process”, The Chemical Engineering Journal, Vol.57 : 247~251, 1995.
- [23] 김규진, “분리막을 이용한 정수 및 폐수처리”, 대한환경공학회, Vol.17, No.5 : 413~420, 1995.
- [24] 김병덕 등, “역삼투식 복합담수화시스템 개발을 위한 요소기술개발”, 한국기계연구원, 1999
- [25] 김수환, 강석태, 박희경, “RO를 이용한 해수담수화에 있어서의 전처리 최적화 방안”, 대한환경공학회지, Vol.20, No.10 : 1367~1375, 1998.
- [26] 김정학, “An overview of the UF/MF membranes for water treatment: Preparation methods and applications”, 제 6회 한국막학회 심포지움 : 1~54, 1997.
- [27] 민병렬, “막분리 서론, 막분리 기초”, p.1~28, 1996.
- [28] 박영규, “정밀여과, 막분리 기초”, p.29-72
- [29] 윤성훈, 김재신, 이정학, “막분리공정에 의한 정수처리”, 대한환경공학회, Vol.17, No.4 : 307~321, 1995.
- [30] “물대책 청사진”, 조선일보 8월 12일자 사회면, 1996.