

중공사형 한외여과막 수처리 공정의 기능성과 막을 사용한 수처리공정의 경제성에 관한 연구

왕진수 · 김병직[†] · 최수형*

승실대학교 공과대학 환경·화학공학과, *전북대학교 화학공학부
(1997년 10월 25일 접수, 1998년 10월 7일 채택)

Technical Feasibility for Hollow-Fiber Ultrafiltration Water Treatment System and its Economic Aspects

Jin-Soo Wang, Byung-Jick Kim[†], and Soo Hyoung Choi*

Department of Chemical & Environmental Engineering, College of Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

*School of Chemical Eng. and Tech., Chonbuk University, Chonju 561-756, Korea

(Received October 25, 1997; accepted October 7, 1998)

요약: 상수를 처리하기 위한 공정으로 막여과 수처리 공정을 택하였다. 재래식 수처리 공정과의 비교를 위하여 막사용 수처리 공정의 기능성과 경제성에 관한 연구를 하였다. 기능성을 보기 위해서 막분리층에서 막의 기공의 크기가 0.01 μm 인 한외여과막을 선택하여 탁도 제거 성능을 실험하였다. 탁도 제거 실험은 유입원수의 탁도를 임의로 10에서 85 NTU로 조절하여 세 가지 탁도에서 실험을 하였다. 모든 실험에서 여과막을 통과한 처리수의 탁도는 균질하게 1 NTU 이하로 측정되었다. 이 결과는 한외여과막 공정은 원수의 탁도가 증가하여도 일정한 탁도의 처리수를 생산함을 나타낸다. 막여과 공정의 경제성을 검토하기 위하여 막여과처리 비용계산 프로그램을 작성하였다. 실험은 한외여과막으로 한정하여 실시하였지만, 막여과처리 비용계산은 정밀여과막, 한외여과막, 그리고 저압역삼투압 방식을 포함하였다. 먼저 비용계산 프로그램을 사용하여 생산량 및 단위 면적당 투과량이 따른 처리수 생산단가의 변화를 보았다. 그 결과 생산량 및 투과량이 감소할수록 처리비용이 급격히 증가하였다. 그리고 처리용량을 달리 하였을 때 정밀여과막, 한외여과막, 저압역삼투압, 재래식공정, 그리고 고도처리 공정의 다섯 가지 공정에 대하여 총 비용을 계산하였다. 그 결과 막여과 공정은 재래식 공정 및 고도 처리공정과 비교하여 경제성이 있게 나타났고 막분리층에서도 한외여과막은 중용량 (157.5 m^3/hr) 생산량 이상에서 다른 막분리공정과 비교해서 생산가 경쟁력이 있는 것으로 나타났다.

Abstract: This research was undertaken to do the technical and economical feasibility study of membrane water treatment system. For the technical feasibility study, batch water treatment system using UF(ultrafiltration) was set up and several experiments were carried out. The performance of the UF membrane was tested in terms of turbidity. The experimental results showed that the UF membrane process produced less than 1 NTU water regardless of input water turbidity. For the economical feasibility study, the cost model was analyzed and programmed for simulation. Also costs of the membrane water treatment and the conventional treatment were evaluated. The simulation results showed that the unit production cost increased when design flow or permeate flow decreased. The production cost of membrane water treatment system was lower than that of the conventional system. Both technical and economical feasibility study showed that the UF membrane water purification system was a very competitive water purification process.

Key words: Cost Model, Simulation, Water-treatment, Membrane, Ultrafiltration

1. 서 론

상수원의 오염이 날로 심화함에 따라 안심하고 마실 수 있는 물을 얻을 수 있는 방법에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 그 중에서 프랑스를 중심으로 한 유럽과 미국을 중심으로 한 북미에서는 막을 이용한 수처리 방법에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 이미 연구결과가 상용화되어 프랑스, 미국, 일본 등 여러 나라에서 가동되고 있는 실정이다. 그러나, 국내에서는 아직 이 분야에 대한 연구실적이 상대적으로 빈약하고 정수처리장에서는 사용되지 않고 있다.

지금까지 국내에서 사용되어 온 재래식 정수공정은 원수의 수질이 양호할 경우에는 음용수 수질 기준에 적합한 수돗물을 생산하지만, 원수가 오염되거나 불안정한 경우에는 재래식 정수공정만으로는 적합한 수돗물을 생산하기가 어렵다. 그러한 경우는 재래 공정에 오존 산화나 활성탄 흡착공정 등을 연계한 고도 처리 공정으로 수돗물을 생산하고 있다. 그러나 위의 고도 처리 공정이라 할지라도 안전한 수돗물을 일정하게 얻기 위해서는 각 단위 공정들을 잘 관리해야만 가능하며, 원수가 심하게 오염되어 있을 경우에는 고도 처리 공정으로도 충분하지 못한 경우가 발생한다. 또한 고도 정수처리는 대규모의 장치와 장소를 필요로 하므로 간이상수도에는 적합하지 않다. 이와 같은 문제점의 해결을 위하여 막을 이용한 정수 방법의 개발이 필요하다. 막 공정의 특징은 분리할 때 단순히 압력 차를 구동력으로 하여 분리한다는 것이다. 막을 이용한 정수

[†] 주 저자 (e-mail: bjkim@saint.soongsil.ac.kr)

공정은 상변화가 없이 고도 미세 분리 정제가 가능하므로 기존의 에너지 다소비형 공정과 비교하여 상당히 에너지를 절감할 수 있으며, 그 원리 및 공정이 간단하여 새로운 첨단 기술의 하나로서 에너지 절약, 자원 절약, 환경 보존 등의 측면에서 유리한 것으로 평가되고 있다. 또한, 원수 수질과 여과 조건에 관계없이 막의 기공보다 크기만 하다면 부유물질이나 콜로이드 입자뿐만 아니라 병원성 미생물들도 제거할 수 있어 안전한 수돗물을 생산할 수 있으며, 더하여 소규모 공간에 장치의 설치가 가능하고, 운전 조작 및 유지 관리가 편리한 부가적인 장점이 있다.

그 중에서 한외여과막 (ultrafiltration, UF) 공정은 기존의 재래식 정수공정에 비하여 다음과 같은 장점을 가지고 있다고 알려져 있다. 먼저, 탁도와 미생물 제거성능이 기존 공정보다 우수하며, 응집제, 응집보조제, 소독제 등 화학약품의 사용이 불필요하다. 또한, 일반세균, 바이러스, 원생동물 등의 처리율이 높으면서, 슬러지 생산량이 적고, 설치소요면적이 기존 공정보다 매우 작아 경제적이다. 한외여과막 공정은 간단한 모듈 시스템이므로 시설확장이 용이하고, 운전과 유지관리 비용이 적게 든다는 장점을 가지고 있다 [1-5].

그러므로 본 연구에서는 한외여과막 공정을 선택하여 탁도제거 실험을 통해서 그것의 기능성을 보고자 한다. 또한 막 공정에 있어서의 처리비용을 계산할 수 있는 프로그램을 개발하고, 그 모사 프로그램을 이용하여 여러 조작변수(처리용량, 플럭스 등)에 따른 막 공정의 처리비용의 변화를 산출하고, 여러 막 공정들간의 처리비용의 비교 및 재래식 공정과의 생산가 경쟁력을 살펴보고자 한다.

2. 실험 및 모사

2.1. 실험장치

2.1.1. 실험에 사용된 막 모듈의 규격

막 모듈의 형태는 중공사 형태로 프랑스의 루엘 말메종 (Rueil Malmaison)에서 제조한 한외여과막 모듈을 사용하였다. 모듈 하나는 10개의 단섬유 (fiber)로 구성되어 있다. 단섬유의 길이는 20 cm이며, 직경은 0.93 mm, 표면적은 45 cm²이었다. 또한, 단섬유의 세공크기 (poresize)는 0.01 μm이었다. 모듈의 최적 조작압력은 0.5~1.5 bars 사이이며, 최고 조작압력은 2.0 bar이다.

2.1.2. 장치의 개요

막분리장치의 운전방식은 회분식 (batch), 유출입식 (feed-and-bleed)과 단통과식 (single-pass)의 세 가지 방법으로 나눌 수 있다. 그 중에서, 본 실험에서는 원수 중 막을 통과하지 못하고 남은 원수가 다시 원수공급 펌프로 되돌려지는 회분식 (dead-end batch operation)을 적용했다[1,19]. 실험장치의 개략도는 Figure 1에 나타나 있다. 실험장치를 살펴보면 원수를 전처리장치로 보내주기 위하여 진동펌프 (Pulsatron co.)를 사용하였고 비교적 큰 입자들을 제거하는 전처리장치로 200 μm 여과기 (Lexington MA 02173)를 사용하였다. 전처리를 통하여 나온 처리수를 막으로 일정한 유속으로 보내주기 위하여 매스터플렉스 펌프 (Masterflex L/S variable-flow digital drive, Masterflex L/S standard pump head)를 사용하였고, 같은 종류의 펌프를 사용하여 역세척(처리수를 역으로 막을 통과시켜 막의 기공에 낀 물질들을 제거함)을 하였다.

2.2. 카올린 용액을 이용한 한외여과 공정의 탁도제거 실험

중공사형 한외여과막 (hollow-fiber UF membrane) 장치의 성능 평가를 위해서 카올린 용액 (kaolin solution)을 사용하였다. 증류수에 인위적으로 카올린 분말(탁도유발물질)을 주입한 후, 충분히 교반하여 실험에 사용될 원수를 제조하였다. 실험은 농도범위를 15

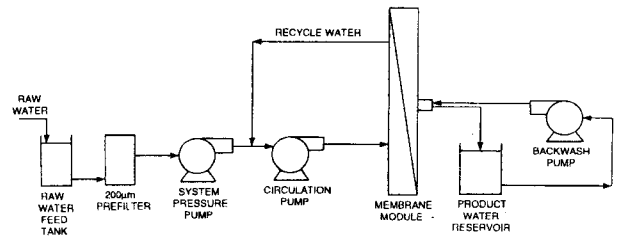


Figure 1. Schematic of ultrafiltration plant using experiments.

NTU전후, 40 NTU전후, 그리고 80 NTU전후로 조절하여 각각 3 회씩 반복하여 실시하였다. 시료는 유입원수, 전처리한 직후의 처리수, 그리고 100 mL를 막으로 처리한 후의 최종처리수에서 채취 하였다. 탁도 측정은 Horiba社의 수질측정기 (water quality checker U-10)를 사용하였다. 이 장치의 측정범위는 0-800 NTU이다.

2.3. 막 공정의 비용산출

2.3.1. 비용산출 모사 프로그램

막 공정의 경제성분석을 위해서 비용모사 프로그램을 작성하였다. 막 공정에서의 총 비용은 자본비용 (capital cost)과 조작비용 (operating cost)으로 구성되어 있다. 일반적으로 자본비용은 단위 용량의 물을 생산하기 위하여 필요한 투자로 볼 수 있으며, 이 투자는 수처리 설비를 위한 대지비용, 공학적인 전문지식, 기계류, 그리고 다른 물자들을 포함한다. 여기서의 자본비용은 크게 막 비용 (membrane cost)과 막 이외의 비용 (non-membrane cost)으로 나뉜다. 막 이외의 비용은 막의 사용을 위해 필요한 모든 도구와 설비(펌프, 감지장치, 밸브, 자동화시스템, 그리고 스킴드 등)에 들어가는 비용을 말하며, 막 비용은 막의 초기 구입에 들어가는 비용을 말한다. 조작비용은 설비를 작동시키기 위한 에너지, 전처리를 위한 화학약품, 막 교체, 그리고 농축된 폐수와 관련된 비용을 말한다. 총비용을 구성하는 항목들을 Figure 2에 나타내었다.

비용모사 프로그램은 크게 세 부분으로 구성되어 있다. 첫째 부분은, 데이터 파일로부터의 조작변수값의 입력과 계산식들을 이용하여 변수와 비용의 계산이 이루어지는 부분, 둘째 부분은 계산된 비용을 부분별(자본비용, 조작비용, 총비용)로 선택하여 보여주는 부분, 그리고 마지막부분은 어떤 한 조작변수값의 변화에 따른 비용을 계산하여, 이를 표와 그래프(막대 그래프, 입체 막대 그래프, 선 그래프의 3종류)로 보여주는 부분으로 구성되어 있다. 이 프로그램에 대한 순서도를 Figure 3에 나타내었다. Figures 4~10은 비용모사 프로그램을 실행시켰을 때의 화면에 나타나는 것을 지면에 출력시킨 것이다. 참고로 이 프로그램에 사용된 비용 계산식 및 계수들은 Pickering과 Wiesner의 보고서를 참조하였다[12, 13].

2.3.2. 막 공정의 비용계산

막공정 비용모사 프로그램을 이용하여 한외여과막 공정의 기초 설계를 위한 자료와 막공정과 재래식 공정과의 비교 및 여러 막공정간의 경제성분석을 위한 자료를 산출하였다. 공정의 기초설계를 위한 자료로는 조작변수가 총비용에 미치는 영향을 살펴보았다. 조작변수로는 처리용량 (design flow)과 투과량 (permeate flow)를 택하였다. 그리고 경제적 타당성조사를 위해서 세 가지 용량에서 정밀여과막, 한외여과막, 그리고 저압역삼투막 공정들의 자본비용 및 조작비용, 총비용 (total cost)을 산출하였다. 또는 현재 국내에서 사용중인 재래식공정과 고도처리공정(오존처리와 활성탄처리를 연계한 재래식공정)의 비용을 산출하여 여러 종류의 막 공정의 비용을 비교하였다.

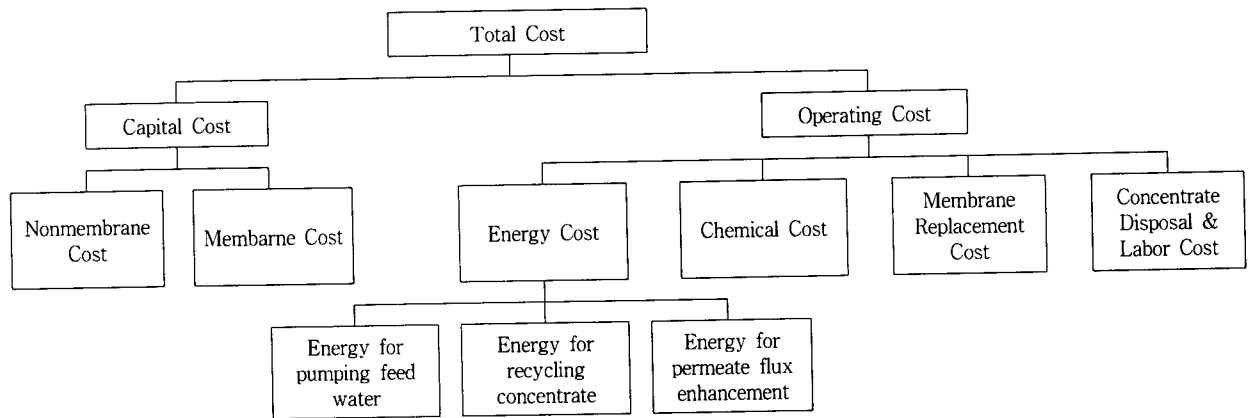


Figure 2. Items consist of the total cost.

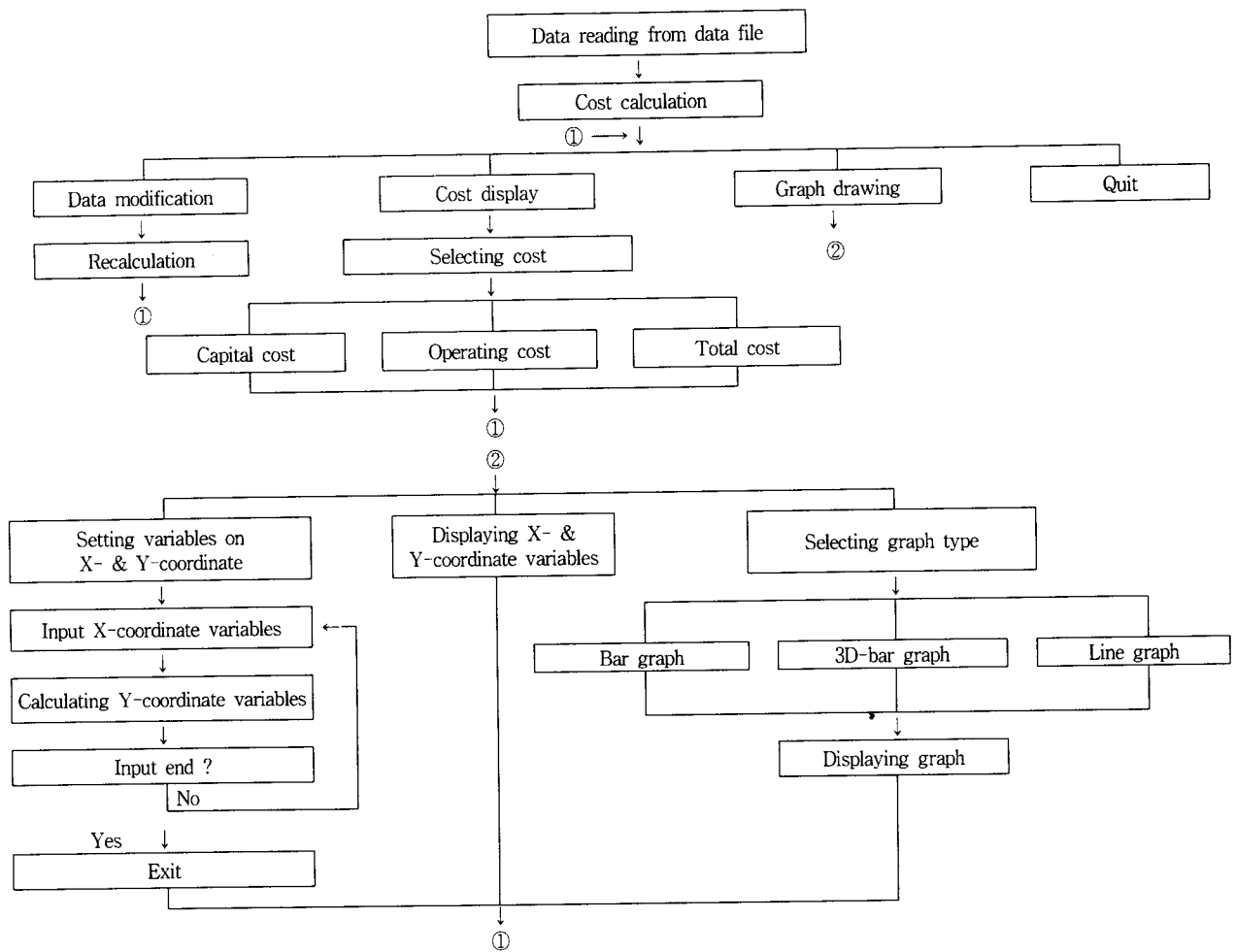


Figure 3. Flow-chart of cost calculation program.

3. 실험 및 모사결과

3.1. 카울린 용액을 이용한 한외여과 공정의 성능실험

카울린을 이용한 용액의 탁도 제거 실험의 결과는 Figure 4에 나타나 있다. 유입원수의 탁도 범위를 13~17 NTU, 37~44 NTU, 79~84 NTU의 세 단계로 조절하여 통수시킨 결과, 처리수의 탁도

범위는 1 NTU로 나타나 제거율은 92.9~98.8%이었다. 위의 결과는 카울린 용액에 포함된 탁도유발물질은 한외여과막 장치에 의해 거의 대부분 제거할 수 있음을 나타내고 있다. 그리고 유입원수의 탁도에 상관없이 최종 처리수의 탁도는 거의 일정하게 나타나, 한외여과막 장치의 처리후 탁도는 유입원수의 탁도에 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있었다.

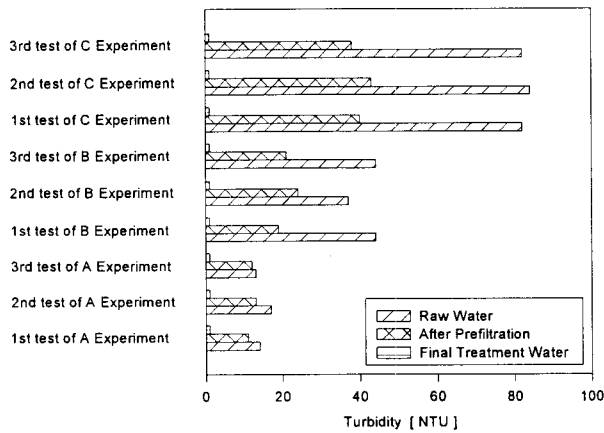


Figure 4. Comparison of turbidity removal rate according to the quality of raw water.

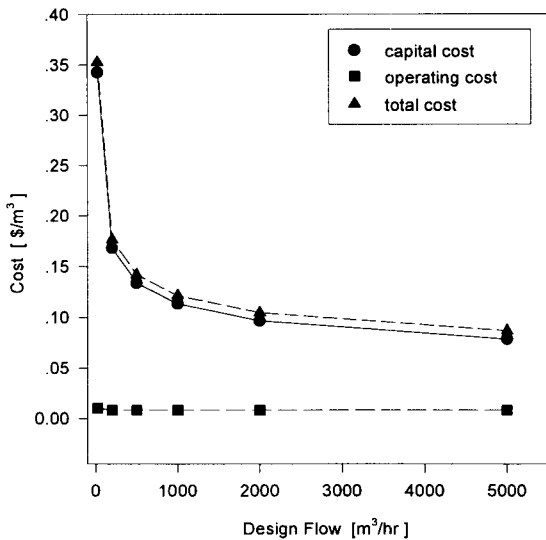


Figure 5. Treatment costs per unit volume of filtered water as function of design flow in hollow-fiber UF plant.

3.2. 막 공정에서의 비용 계산 결과

3.2.1. 처리용량에 따른 막 공정의 비용

처리용량을 변경시키면서 그에 따른 중공사형 한외여과막 공정에서의 처리비용을 계산하여, Figure 5에 나타내었다. 단위 생산량당 처리비용은 처리 용량이 커짐에 따라 감소하였다. 처리용량이 1000 m³/hr로까지는 처리비용은 급격히 감소하였고, 그 이상의 처리용량에서는 서서히 감소하였다. 처리용량이 20 m³/hr일 때 1 m³당 처리비용이 282원이었던 것이 200 m³/hr로 증가함에 따라 단위 처리비용이 141원이 되었고, 다시 500 m³/hr로 증가함에 따라 단위 처리비용이 114원이 되었다. 수처리 막공정에서 처리용량이 커짐에 따라 단위 처리비용이 감소하는 이유는 처리비용의 구성을 살펴보면 알 수 있다. 처리비용의 90% 이상을 자본비용이 차지하고 있으며, 운영비용은 처리비용의 10% 이하로 거의 영향을 미치지 못한다. 처리용량이 증가할수록 전체적인 비용은 증가하게 되나, 비용 증가는 처리용량 증가에 미치지 못한다. 구체적인 숫자로 살펴보면 처리용량이 10배가 되면, 막 비용은 거의 10배로 증가하나, 막 이외의 비용은 5~6배 밖에 증가하지 않기 때문에 전체비용은 약 7배 증가한다. 이는 처리용량의 증가에 따른 단위 처리비용의 감소

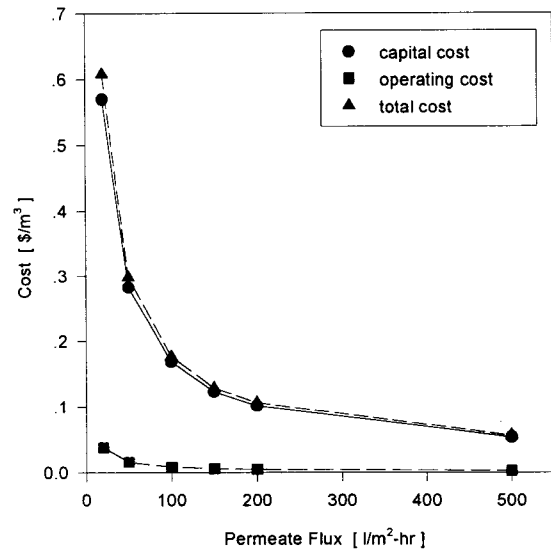


Figure 6. Treatment costs per unit volume of filtered water as function of permeate flux in hollow-fiber UF plant.

는 막 이외의 비용의 증가율 감소에 기인함을 알 수 있다.

3.2.2. 투과량에 따른 막 공정의 비용

작동압력을 일정하게 하였을 경우 단위 면적-시간당 투과량 즉 플럭스 (flux)는 원수의 수질에 따라 변화하고 일정량의 생산을 위한 총비용에 영향을 미친다. 플럭스는 막 공정의 처리비용을 결정짓는데 가장 중요한 변수로서, 플럭스의 감소는 원하는 처리용량을 얻기 위하여 필요한 모듈수의 증가를 가져옴으로써 자본비용이 증가하게 되고, 매년 교체되는 모듈 수를 증가시킴으로써 운영비용도 증가시킨다. 즉, 플럭스의 변화는 모듈수를 변화시켜 처리비용에 민감한 영향을 미치게 된다. 플럭스의 변화에 따라 처리비용을 산출하였고 그 결과를 Figure 6에 나타내었다. 단위 생산량당 처리비용은 플럭스가 커짐에 따라 감소하였다. 플럭스가 150 L/m²-hr까지는 처리비용은 급격히 감소하였고, 그 이상의 처리용량에서는 서서히 감소하였다. 처리비용은 플럭스가 20 L/m²-hr일 때 1 m²당 486원이었던 것이 50 L/m²-hr로 증가함에 따라 238원이 되었다. 그중 자본비용은 456원에서 226원으로, 운영비용은 30원에서 12원으로 감소하였다. 다시 플럭스가 50 L/m²-hr 에서 100 L/m²-hr로 증가함에 따라 1 m²당 처리비용이 140원이 되었고, 자본비용은 134원, 운영비용은 6원이 되었다. 자본비용이 처리비용의 93.8% 이상을 차지하고 있어서 플럭스와 단위비용과의 관계는 처리용량과 단위 비용의 관계와 유사한 추세를 보였다.

3.2.3. 세 종류의 막 공정 및 재래공정의 비용 비교

공정의 비용모사를 위해서 사용된 자료는 Pickering과 Wiesner의 보고서를 참조하였고, 그 자료를 Table 1에 나타내었다. 그리고 처리용량이 각각 저용량(15.75 m³/hr), 중용량(157.5 m³/hr), 그리고 대용량(787.5 m³/hr)일 때의 막공정 및 기존 공정의 처리비용을 자본비용과 운영비용으로 나누어 Figure 7, 8, 9에 각각 나타내었고, Figure 10에는 Figure 7, 8, 9에서 총처리비용을 발췌해서 비교를 위해서 하나의 그림에 나타냈다.

1) 처리용량에 따른 처리비용 각 막 공정의 처리비용의 비교

정밀여과막이나 저압 역삼투압막의 경우도 한외여과막 공정과 같이 처리용량이 증가할수록, 처리수 1 m³당 처리비용이 감소하는 것을 알 수 있었다. 그 중에서 지하수 (ground water: GW)를 유

Table 1. Data Used for Calculation of the Treatment Costs in the Cost Calculation Program

Operating Variables	MF(RW) tubular	MF(GW) tubular	UF(GW) hollow-fiber	NF(GW) spiral-wound
A_{mod} [m ² /module]	7.3	7.3	50	30
A_x [cm ² /fibers(tubes)]	0.126	0.126	0.00679	0.0182
A/F [%]	0.0105	0.0105	0.0182	0.0182
A/P [%]	0.105	0.105	0.105	0.105
c [mg alum/l]	60	60	0	0
c_b [\$/kg]	0.25	0.25	0.25	0.25
c_{aw} [\$/kW-hr]	0.04	0.04	0.04	0.04
c_{mod} [\$/module]	14600	14600	4000	1200
J_{bj} [L/m ² -hr]	5.224	5.224	6.42	0
J_m [L/m ² -hr]	300	800	100	30
J_p [L/m ² -hr]	300	800	100	30
n_f [fibers(tubes)/module]	684	684	14261	6282
Operation time[hr]	8640	8640	8640	8640
P_1 [kPa]	100	100	100	800
P_{bj} [kPa]	600	600	200	0
ΔP [kPa]	80	80	70	650
Q_{reqd} [m ³ /hr]	200	200	200	200
R [%]	90	90	90	70
t_{bf} [sec]	1	1	45	0
t_{ff} [sec]	5	5	15	0
t_o [sec]	120	120	1800	86400
u_{ff} [cm/s]	210	210	90	0
u_o [cm/s] = CFV	170	170	70	15
η_1 [%]	70	70	70	70
η_2 [%]	70	70	70	70
η_3 [%]	70	70	70	70

- A_{mod} : membrane area per module [m²/module]
- A_x : cross-sectional area of single hollow fiber or tube [cm²/fibers(tubes)]
- A/F : uniform series sinking fund factor [%]
- A/P : uniform series capital recovery factor [%]
- c : coagulant dose [mg/L]
- c_b : cost of bulk coagulant [\$/kg]
- c_{aw} : cost of one kilowatt-hour of electricity [\$/kW-hr]
- c_{mod} : cost of one membrane module [\$/module]
- J_{bj} : flux of clean water through [L/m²-hr]
- J_m : average permeate flux [L/m²-hr]
- J_p : permeate flux (constant) [L/m²-hr]
- n_f : number of hollow fibers or tubes per module [fibers(tubes)/module]
- P_1 : feed pressure [kPa]
- P_{bj} : backflush pressure [kPa]
- ΔP : pressure drop through a membrane element [kPa]
- Q_{reqd} : plant capacity [m³/hr]
- R : recovery [%]
- t_{bf} : duration of backflush [sec]
- t_{ff} : duration of fast-flush [sec]
- t_o : time between backflushes [sec]
- u_{ff} : entrance velocity of fast-flush water [cm/s]
- u_o : velocity of feed at element inlet [cm]
- η_1 : efficiency of feed pump [%]
- η_2 : efficiency of recycle pump [%]
- η_3 : efficiency of backflush pump [%]

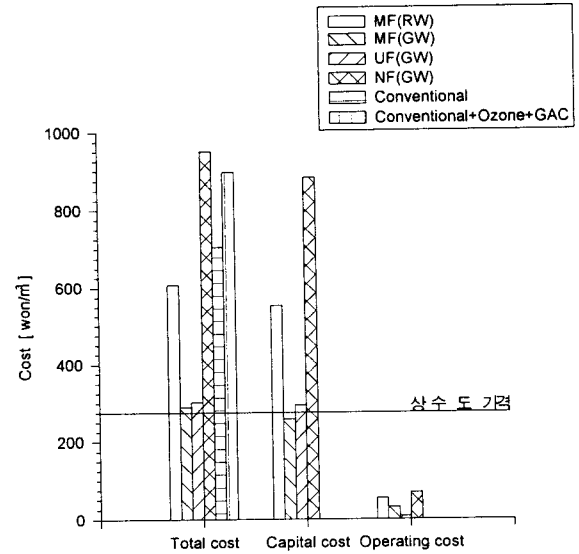


Figure 7. Comparison of estimated cost for MF, UF, NF, Conventional, and Conventional + Ozone + GAC facilities producing 15.75 m³/hr.

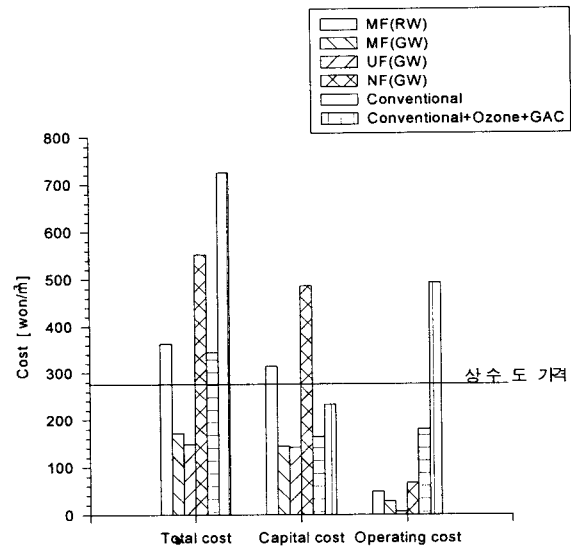


Figure 8. Comparison of estimated cost for MF, UF, NF, Conventional, and Conventional + Ozone + GAC facilities producing 157.5 m³/hr.

입원수로 사용한 중공사형 한외여과막 공정은 처리용량이 15.75 m³/hr, 157.5 m³/hr, 787.5 m³/hr로 증가함에 따라 처리수 1 m³당 처리비용이 각각 302원, 148원, 102원으로 처리비용이 감소함을 보여주었다. 비용 감소의 주원인은 자본비용의 감소이었다.

중용량의 처리능력을 갖는 막 공정들간의 처리비용은 지하수를 유입원수로 사용한 중공사형 한외여과막 공정이 1 m²의 처리수를 생산하는데 드는 비용이 148원으로 가장 적게 드는 것으로 나타났다. 저용량의 공정에서는 지하수를 이용한 관형 정밀여과막 (tubular MF) 공정이 289원으로, 한외여과막 공정이 302원인 것에 비해 적은 비용이 드는 것으로 나타났으나, 대용량의 공정으로 갈수록 한외여과막 공정이 더 경제적 우위에 있음을 알 수 있었다. 이는 한외여과막 공정의 자본비용이 가장 저렴하기 때문이다. 중공사형 한

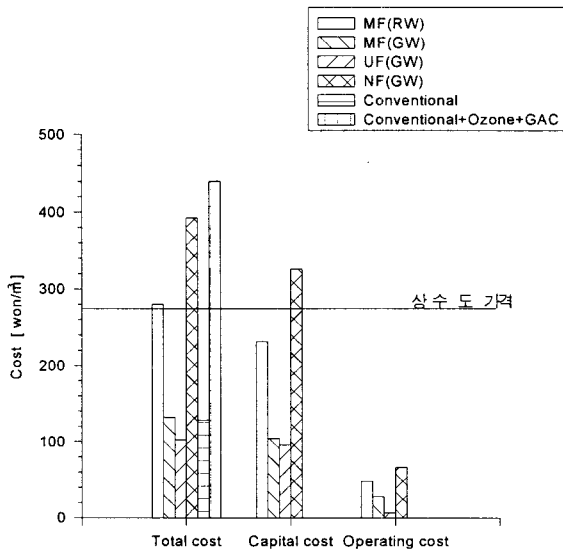


Figure 9. Comparison of estimated cost for MF, UF, NF, Conventional, and Conventional + Ozone + GAC facilities producing 787.5 m³/hr.

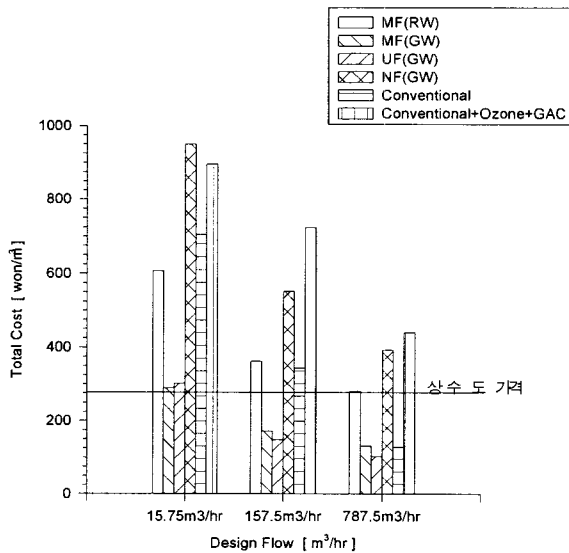


Figure 10. Comparison of estimated total cost for MF, UF, NF, Conventional, and Conventional + Ozone + GAC facilities according to design flow.

외여과막 모듈의 가격은 모듈당 3,200,000원이었고, 관형 정밀여과막 모듈은 11,680,000원이었다. 또한, 중공사형 한외여과막 모듈은 모듈당 표면적이 50 m²인 반면에, 관형 정밀여과막 모듈은 7.3 m²이었다. 이와 같이, 동일한 처리량을 얻기 위하여 필요한 표면적을 위하여 필요한 모듈의 수가 한외여과막(지하수 원수) 공정이 27개, 정밀여과막(지하수 원수) 공정이 31개로 비슷하였으나, 모듈의 비용에서 한외여과막 모듈이 매우 저렴하므로 자본비용이 가장 저렴하였다. 모듈에 들어가는 비용이 적으므로 막 교체비용 또한 감소하게 되어 운영비용이 감소됨을 알 수 있었다.

2) 동일 막 공정간의 처리비용 비교

같은 막을 사용한 공정이라도 유입원수의 종류에 따라 처리비용이 다르게 나타났다. 같은 관형 정밀여과막 공정(중용량)을 사용한

경우, 강물 (river water)를 유입원수로 사용한 경우는 1 m³의 처리수를 얻는데 드는 비용이 362원인 반면에, 지하수를 사용한 경우는 171원으로 강물을 원수로 사용할 때보다 많은 차이가 나는 것을 알 수 있었다. 지하수의 수질은 탁도가 10 NTU 이하, DOC가 2 mg/L이하였으며, 강물의 수질은 탁도가 25~100 NTU, DOC가 6~10 mg/L이었다. 이와 같이 정밀 여과막 공정의 처리비용은 유입원수의 수질에 따라 상당한 차이를 나타냄을 알 수 있었다.

3) 막 공정과 재래식 공정간의 처리비용 비교

처리용량이 증가할수록 재래식 공정과 비교하였을 때 처리비용의 차가 적어짐을 알 수 있었다. 저용량의 공정에서는 1 m³당 정밀여과막 (GW) 공정과 한외여과막 (GW) 공정이 각각 289원, 302원이었고, 재래식 공정과 오존처리와 활성탄처리를 연계한 재래식 공정은 704원, 896원이었다. 그러나, 처리용량이 787.5 m³/hr로 증가함에 따라 정밀여과막 공정, 한외여과막 공정이 각각 132원, 102원이었고, 재래식 공정과 오존처리와 활성탄처리를 연계한 재래식 공정은 128원, 440원이었다. 여기에서 보는 바와 같이 비용면에서 볼 때, 재래식 공정의 경우에는 저용량의 공정에서 막 공정에 비해 2.3~3.1배의 처리비용이 드는 것에 비해, 대용량의 공정에서는 막 공정과 비슷한 정도의 처리비용이 드는 것으로 나타났다. 그것은 저용량의 설비가 필요할 때, 즉 소규모 간이 상수도에서 막공정은 다른 기존의 공정에 비해 월등한 경제적 우위에 있음을 알 수 있었다.

4) 현재의 상수도가와의 가격 비교

상수와 지하수를 유입원수로 사용한 중공사형 한외여과막 공정에서 생산한 처리수간의 가격을 비교하여 보았다. 참고로 일반 가정의 상수도의 공급가격은 1톤당 275원을 기준으로 하였다. 막 공정의 경우에는 처리용량에 따라 가격에 차이가 있다. 처리용량이 저, 중, 대용량인 경우에 각각 1톤을 생산하는데 드는 처리비용이 302원, 148원, 102원으로 처리용량이 저용량인 경우를 제외하고는 상수도의 53.8%, 37.1%에 불과하여 저용량의 공정이 아니라면, 상수도보다 매우 저렴한 가격으로 식수를 공급할 수 있어 대규모 상가나 아파트 등의 지역에 적합하리라 생각된다.

4. 결 론

원수의 수질이 오염되어 있어도 안전한 물을 공급할 수 있는 것으로 알려진 막여과수처리 공정을 택하여 기본설계를 위한 자료를 제시하기 위해서 기능성과 경제성에 관한 연구를 하였다. 기능성 실험을 위해서는 한외여과막을 선택하여 탁도 제거 실험을 수행하였고 경제적 타당성분석을 위해서는 비용모사 프로그램을 작성하여 조작변수에 따른 처리 비용의 민감도 및 막공정과 기존공정의 비교를 하였다. 그 결과를 요약하면 아래와 같다.

1) 중공사형 한외여과막 공정을 이용한 탁도 제거율은 92.9~98.8%으로 효과적이며, 유입원수의 수질에 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

2) 처리용량이 처리비용에 미치는 영향은 처리용량이 적을수록 매우 큰 폭으로 증가함을 알 수 있었다. 또한, 플럭스의 변화 역시 플럭스가 적을수록 처리비용은 큰 폭으로 증가함을 알 수 있었다.

3) 막을 이용한 공정은 저용량의 공정일수록 재래식 공정에 비해 경제적 우위에 있음을 알 수 있었으며, 동일 용량의 막 공정들 간에서는 저용량(15.75 m³/hr)의 공정의 경우에는 지하수를 원수로 한 관형 정밀여과막 공정이 우위에 있었으나, 용량이 증가할수록 지하수를 원수로 한 중공사형 한외여과막 공정이 가장 경제적인

1) 재래식 공정과 오존처리와 활성탄처리를 연계한 재래식 공정에 대한 처리비용은 12, 13번 참고문헌에서 발췌하여 사용하였다.

막 공정으로 나타났다. 같은 막을 이용한 공정이라도 유입원수의 수질에 따라 처리비용이 변화함을 알 수 있었다. 관형 정밀여과막 공정을 사용한 경우, 유입원수를 강물과 지하수의 두 종류를 사용한 결과 강물을 사용한 경우가 지하수를 사용한 경우보다 처리비용이 2.1배 많음을 확인할 수 있었다. 또한, 중공사형 한외여과막 공정으로 식수를 생산하는 것이 국내상수가격보다 보다 저렴할 수 있음을 알 수 있었다.

감 사

이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단 대학부설연구소 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다. 연구비지원에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Mark C. Porter, "Handbook of Industrial Membrane Technology", 604, Noyes Publications, New Jersey(1990).
2. W. S. Winston Ho, Kamalesh K. Sirkar, "Membrane Handbook", 954, Chapman & Hall, New York(1992).
3. R. W. Baker et. al., "Membrane Separation Systems", 451, Noyes Data Corporation, New Jersey (1991).
4. 화학공학편람편집회, "화학공학편람", 1389, 집문사, 서울(1995).
5. 박영규, 수도, 제22권 4호, 5(1995).
6. Joseph G. Jacangelo et al., *J. AWWA*, 81, 68(1989).
7. Conlon W.J. and Click J.D., *FS AWWA FPCA and FW & PCOA 58th Ann. Tech. Conf.* (Nov. 1984).
8. Taylor J.S. et al., *EPA 600/2-85*, 138(Nov. 1985).
9. Olsen O.J. and Haagenen U.H., *Desalination*, 47:257(1983).
10. 임인건, "터보C 정복", 1271, 가남사, 서울(1992).
11. "Borland C++ Library Reference", Borland Co(1993).
12. Karen D. Pickering and Mark R. Wiesner, *J. Env. Eng. Div.-ASCE*, 119:5:772(1993).
13. Mark R. Wiesner et al., *J. AWWA*, 33(Dec. 1994).
14. James S. Taylor et al., *J. AWWA*, 52(Nov. 1989).
15. Joseph H. Baier et al., *J. AWWA*, 55(Aug. 1987).
16. James S. Taylor et al., *J. AWWA*, 72(Aug. 1987).
17. Massoud Pirbazari et al., *J. AWWA*, 95(Dec. 1992).
18. Trisha J. Blau et al., *J. AWWA*, 104(Dec. 1992).
19. Munir Cheryan, "Ultrafiltration Handbook", 375, Technomic Pub. Co., Pennsylvania (1986).