

막분리 기술을 이용한 상수도 처리

지 은 상, 심 순 섭*

환경·생명연구소

* 원광대학교 토목환경공학부

본 연구는 물 속에 함유된 유기물질(Natural Organic Matter : NOM)들이 소독 약제와 결합한 부산물의 제거방안과 효과적인 미생물제거 그리고 기존의 환경 약품 사용에 따른 슬러지 문제등을 해결할 수 있는 막분리기술의 실험을 통하여 가능성 및 경제성등을 검토코자한다.

1. 서론 (Introduction)

우리나라는 약 800개 급수구역내에서 전체인구의 85% 이상이 상수도 혜택을 받고 있다.

이러한 상수도 보급정책은 도시지역 중심으로 추진되어 읍에 따라 농어촌의 상수도 보급율은 약 20 %정도 수준에 머무르고 있는 실정이며, 상수도의 수질도 고도의 산업발전으로 새로운 유해성오염물질이 배출되어 생활하수 및 산업폐수의 증가는 상수도 수질 오염을 가중시키며 최근에는 낙동강과 영산강등 일부지역 정수장에서는 추가적인 시설 즉 고도 정수처리방식 도입의 필요성 이 대두되고 있는 실정이다.

뿐만 아니라 기존의 낡은 수도관과 부적절한 저수조 관리등으로 수도꼭지에서 녹물 발생등과 같은 이물질의 유입으로 일부 국민들은 수돗물에 대하여 불신을 하고 있는데 주원인은 수돗물을 만드는 과정에서 소독제로 사용되는 「염소」 화학약품에 의해 소독냄새와 부산물 (Disinfection by-products : DBPs)형으로 국민건강문제와 연관되어 심심찮게 보도가 되고 있으며 최근에는 수돗물의 Virus검출유무로 논쟁도 일어나고 있으며, 실제로 소독처리 후에는 THM도 0.015까지 검출되기도 하였다.

이로서 국민들은 안전한 먹는물을 위해 약수터로 그리고 정수기와 생수를 구입하는데 막대한 비용을 소비하고 있으며 이로써 부작용도 일어나고 있는 실정이다. 본 연구에서는 미국, 캐나다 등의 선진국에서 상수도공정에 채용하고 있는 막분리 기술(Membrane Separation Technology)에 대하여 국내에 적용 가능성을 실험하고자 한다..

2. 실험장치 및 방법

2.1 준비사항

본격적인 현장 실험을 실시하기 전에 다음 사항들을 수행하였다.

- 원수 분석 (Determination of source water quality)
- 실험대상 멤브레인 선정
(Identification and acquisition of candidate membranes)
- 실험 장비 구성 및 제작
(Construction of pilot-testing apparatus)

멤브레인 선정은 시판되고 있는 제품에 대하여 본 실험에 적절한 Size(Diameter and length)를 고려하여 결정을 하였다.

2.2 멤브레인 선정과정

현장 시험에 앞서 사용코저하는 멤브레인에 대하여 정밀여과막(MF), 한외여과막(UF) 그리고 나노여과막(NF)에 대하여 원수(Feed Water)를 통해 SS, Bacteria 그리고 Flux 감소등의 변화를 아래와 같은 측정항목들에 대해 실험하였다. 또한 현장시험에 사용된 원수는 Table 1과 같은 항목들을 분석을 하였다. Fig. 1은 기존 수돗물 생산 과정을 나타낸 것이다.

Table 1. 각각의 Membrane에 대한 측정항목

Parameter \ Membranes	MF	UF	NF	Remark
Electrical Conductivity	×	×	×	
pH	×	×	×	
Flow	×	×	×	
Pressure	×	×	×	
Cl	-	-	×	
SO ₄ ²⁺	-	-	×	
Ca ²⁺	-	-	×	
Mg ²⁺	-	-	×	
Bacteria	×	×	×	

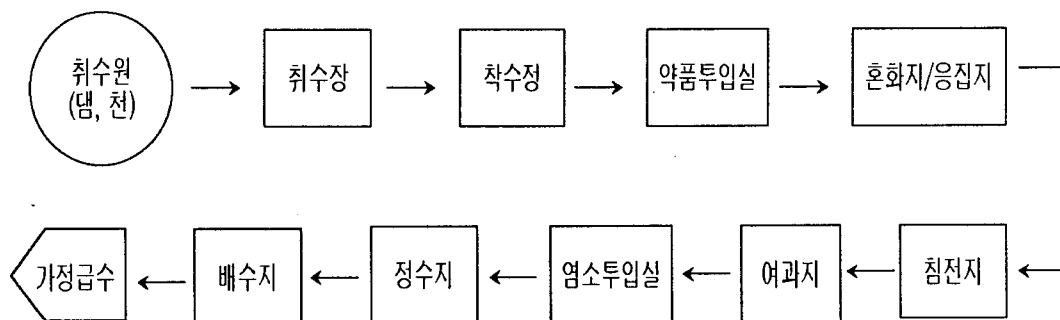


Fig. 1, 수돗물 생산과정 계통도

2.3 Membrane Testing Apparatus

- 1) SW (Spiral Wound: 나권형) Type

사진1과 같이 장치를 구성하여 Spiral Wound Configuration Membrane을 동시에 장착하였다.

Fig. 2는 SW Type의 Pilot test 장비의 계통도를 나타낸 것이다. 전처리 (Pretreatment)는 공히 Sand/Anthracite Media Filter 그리고 Prefilter로 Cartridge(pore size : $5\mu\text{m}$)을 설치하였다.

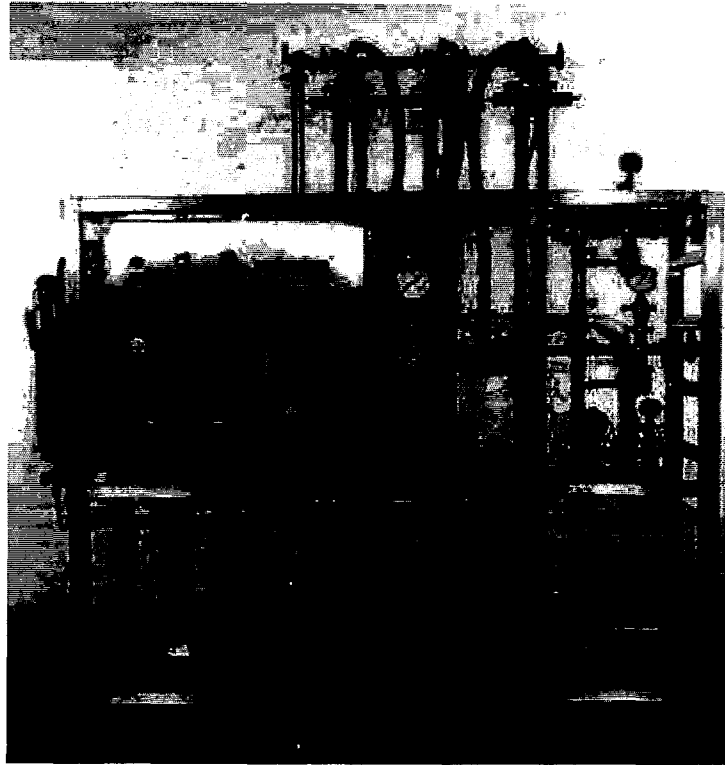


사진 1, RO PILOT TEST UNIT

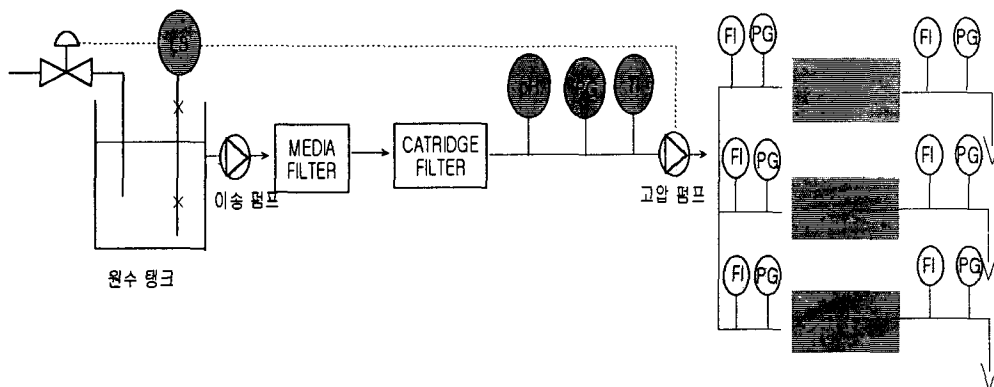


Fig. 2, SW용 PILOT TEST 처리 계통도

2) Vibration Shear Enhanced Processing (VSEP : 진동막분리)

Vibration Shear Enhanced processing (VSEP: 진동막분리) 시험기기는 미국의 NLI회사에서 사진 2에서 구입하여 사용하였다(사진 2).

처리계통도는 Fig. 3과 같으며 본 Pilot test unit은 전처리(Pretreatment)가 없이 원수를 직접 진동 막분리로 시험하였으며, Fig. 4은 나권형막과 같은 기존의 Cross Flow Filtration과 진동막분리(VSEP)의 처리원리를 비교하여 나타낸 것이다.

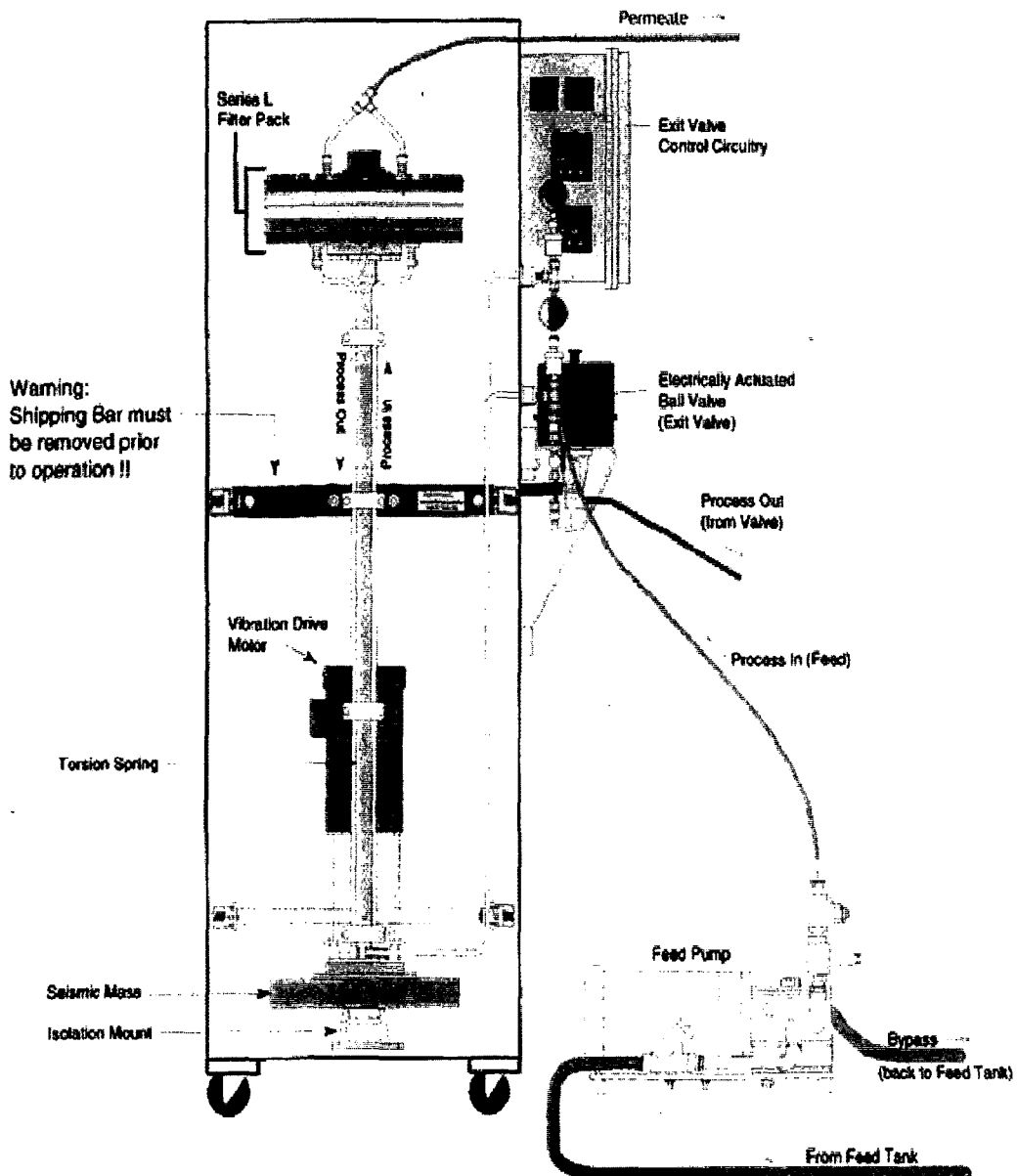


사진 2, VSEP PILOT TEST UNIT

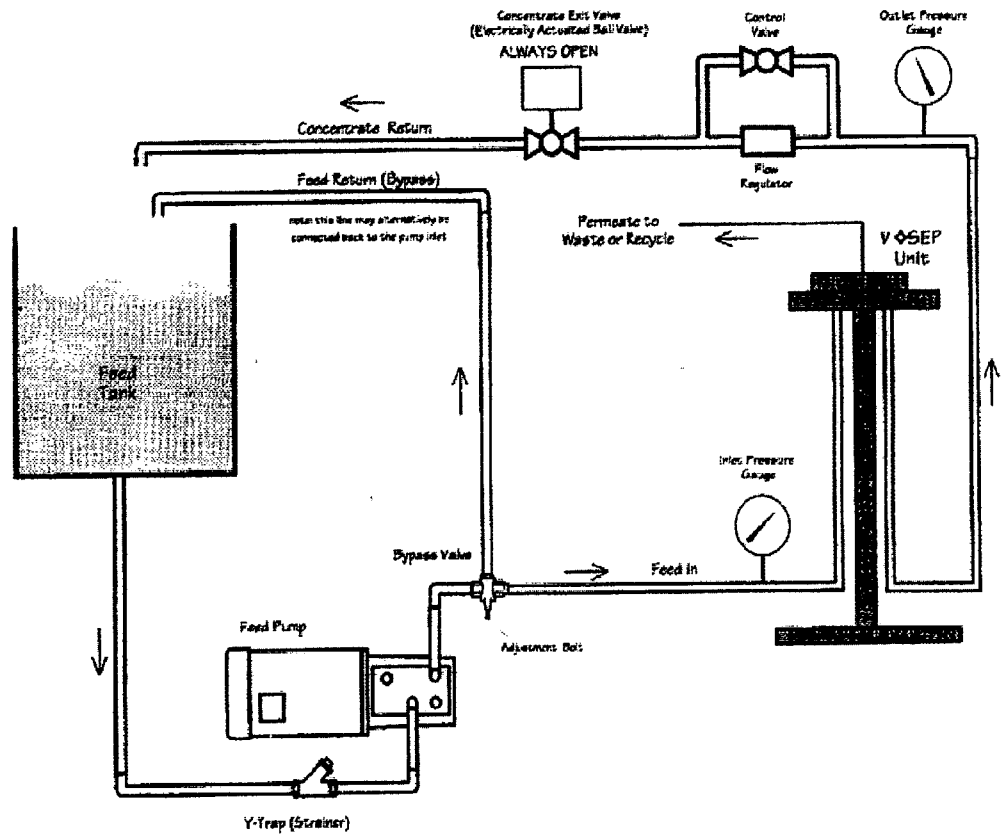


Fig. 3, 진동막 분리 처리 계통도

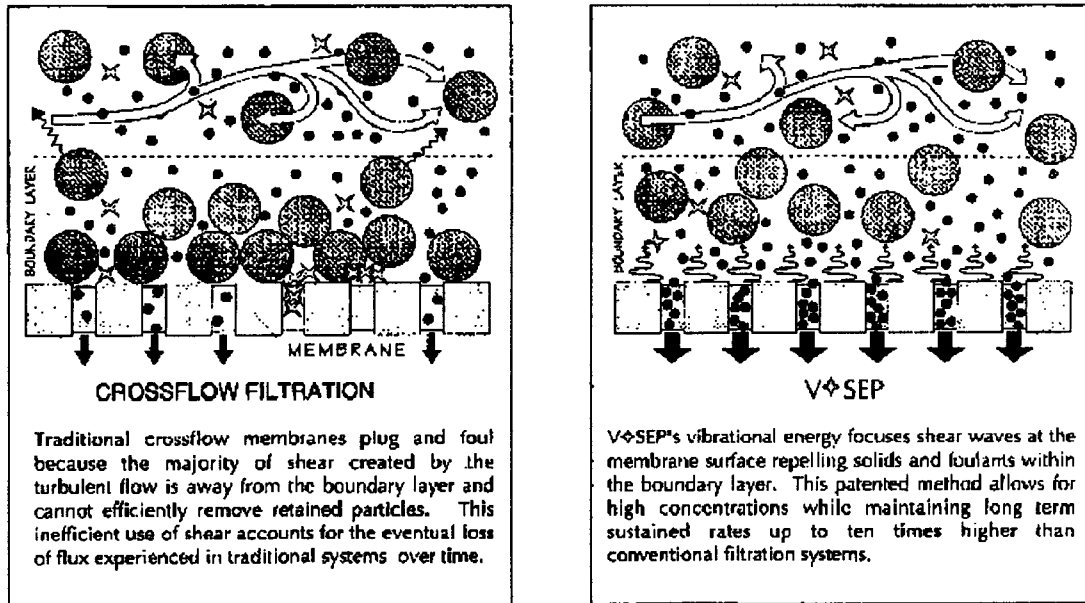


Fig. 4, Crossflow vs VSEP

3. 결과 및 고찰

3.1 나권형 역삼투막 분리시험

3.1.1 Microfiltration (MF)

Table 2와 같이 수온에 따라 원수의 변동이 있었다. MF막은 수온등을 고려하여 PVDF재질 한가지에 대하여 실시하였고 사양은 Table 3과 같고, 계절별 시험한 결과는 Fig. 5와 같았다.

Table 2. Raw water Quality of Source waters

Parameter	Concentration (mg/ l)											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
pH	7.0	7.0	7.3	7.2	7.1	7.0	7.0	6.9	6.9	6.9	6.9	6.8
COD	1.4	2.2	0.4	1.4	1.4	2.0	0.6	1.2	1.0	1.4	1.2	1.4
SS	0.4	0.4	0.8	0.6	1.4	0.5	0.7	5.5	0.6	6.6	1.8	2.6
DO	19.3	11.2	11.0	11.0	11.0	10.0	10.2	7.3	7.5	7.7	10.5	9.8
E-col:	6	3	0	1	35	30	10	3	16	10	2	10
NO ₃ -N	1.2	0.6	0.6	0.8	0.6	0.8	ND	1.2	1.4	1.1	1.0	1.4
Electrical Conductivity(μ s/cm)	63	61	48	45	49	46	50	78	58	51	47	53
Temperature (°C)	4.8	4.9	6.3	8.3	13.5	18.5	20.5	21.1	21.0	20.7	16.5	7.1
Turbidity (NTU)	1.6	1.8	2.1	2.1	2.8	3.9	4.2	4.0	3.6	2.3	2.5	1.9
Ca ⁺²	14	17	17	15	16	19	22	16	14	13	15	16
Mg ⁺²	6	4.2	3.0	6.1	4.1	6.0	3.3	4.1	6.0	6.2	5.4	5.0
SO ₄ ²⁻	6	7.8	8	8	10	9	7	9.5	8	9.8	10	10
Cl ⁻	13	11.5	11	11	19	17	15	16	16	14	13	13

Table 3, Membrane의 Specification

MODEL	Pore size (Micron)	Material	Manufacture	m ³ /d	Active Area
J×4040F	0.3	PVDF	DESAL	143.6	8.4

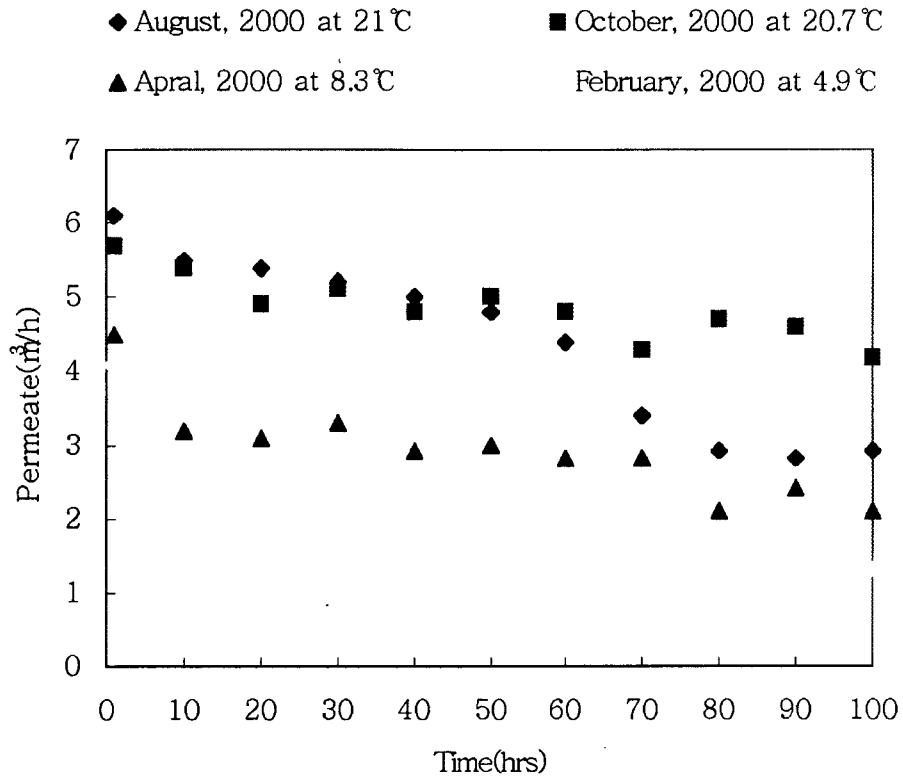


Fig. 5, 계절별 수온에 따른 투과유량 변화 (JX4040F)

또한 수온에 따라 적용압력도 Fig. 6과 같이 변화가 있었다.

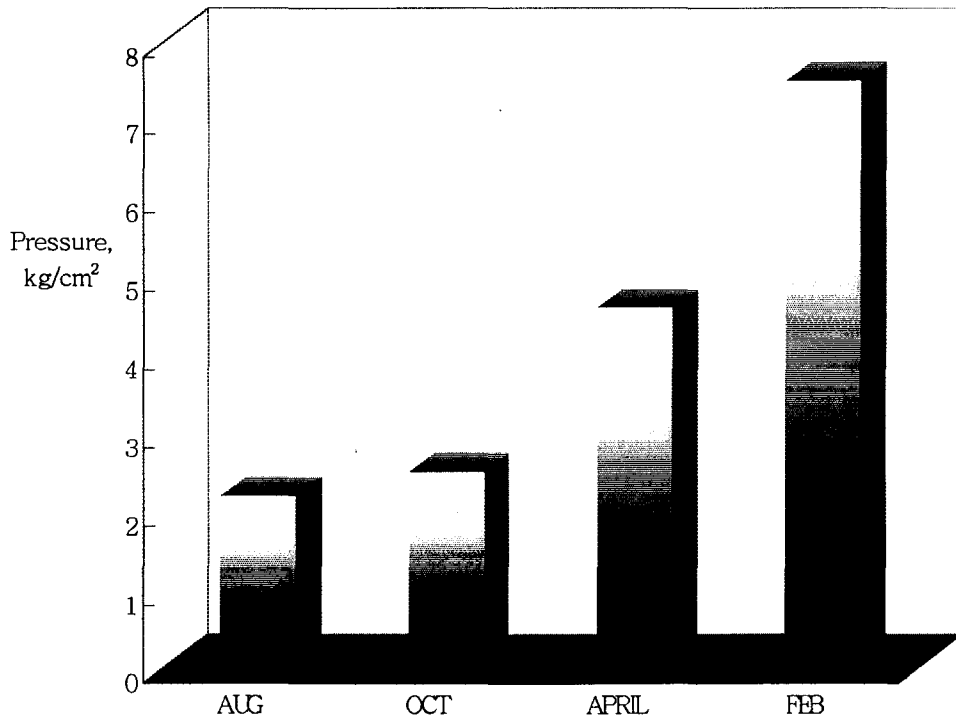


Fig. 6, 수온에 따른 MF(JX4040F)막의 압력변화

Table 4. 계절별 MF 처리전, 후 수질비교

계절별 항목	Feb. 2000		Apr. 2000		Aug. 2000		Oct. 2000	
	처리전	처리후	처리전	처리후	처리전	처리후	처리전	처리후
SS(mg/l)	0.4	불검출	0.6	불검출	5.5	불검출	7.1	불검출
COD(mg/l)	2.2	불검출	1.4	불검출	1.2	불검출	1.4	불검출
E-Coli	3	음성	1	음성	3	음성	10	음성
Turbidity (NTU)	1.8	불검출	2.1	불검출	4.0	불검출	2.3	불검출

3.1.2 Ultrafiltration (UF)

UF막은 2종류를 대상으로 시험을 실시하였다.

Table 5, Ultrafiltration(UF)막의 Specification

MODEL	MWCO(Da)	Material	Manufacture	m ³ /d
GK 4040F	3,500	PA,Thin-Film	DE-SAL	5,67
PES 4321	10,000	PES	Fluid systems	15.9

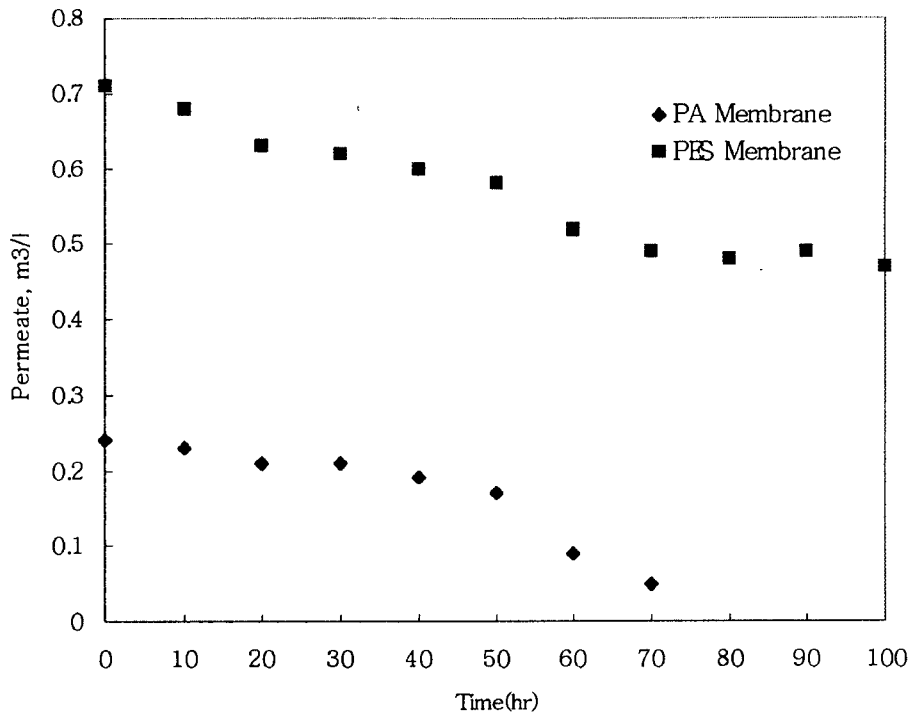


Fig. 7. Flux-decline : PA vs PES at the same pressure(5.0kg/cm²) and Temperature(23°C)

상기의 자료는 막의 여과 면적은 8.5m²로 4“(지름) x 40”(길이)를 가지고 실시를 하였다.

Table 6. UF처리전후 수질비교

계절별 항목	FEB		APR		AUG		OCT	
	원수	투과수	원수	투과수	원수	투과수	원수	투과수
Turbidity (NTU)	1.8	불검출	2.1	불검출	4.0	불검출	2.3	불검출
COD _{Mn} (mg/l)	1.5	0.24	1.35	< 0.1	1.2	< 0.1	1.6	< 0.1
E-coli	8	음성	1	음성	5	음성	10	음성

상기의 Data는 계절별로 4회 실시한 data로서 PA와 PES막이 비슷한 값을 나타내었다.

3.2 진동막 분리 시험

진동막 분리시험은 표7와 같이 총 5가지 멤브레인을 대상으로 시험을 실시하였다.

3.2.1 막의 종류

Table 7. Characterization of Various Membranes

■ MF

Model	Pore Size(μ m)	Material	Manufacture
	0.2	PTFE	Tetratex

■ UF

Model	MWCO(Da)	Material	Manufacture	Pressure (Psi)	Flow (GFD)
AF-10	5,000	PVDF	AMT	200-300	78

■ NF

Model	% Rej Nacl	Material	Flow (GFD)	Pressure (Psi)
ESNA	85	Composite PA	80	
ATF-50	50	PA	16	250~450
TS-40	40	PA	25	400~600

Note : 상기의 멤브레인 막 면적은 공히 0.4785 Ft²로 실시하였음.

3.2.2 진동막분리장치를 이용한 시험결과

MF막은 일정시간이 지나면 막의 오염이 거의 없이 투과유량을 보였고 수온이 낮아도 크게 그림8과 같이 문제가 없었다.

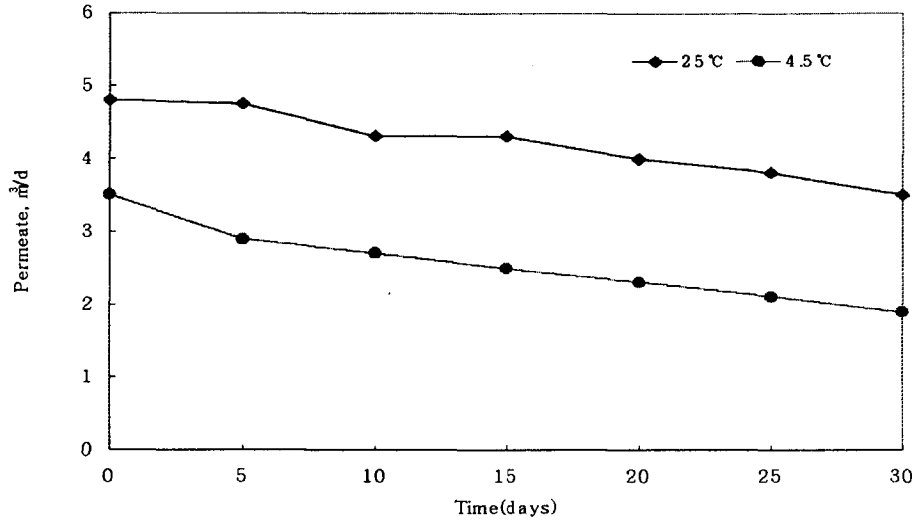


Fig. 8. 수온에 따른 MF(0.2 μm) 막시험 결과

UF막도 투과유량이 일정하게 Fig. 9와 같이 나타내었다.

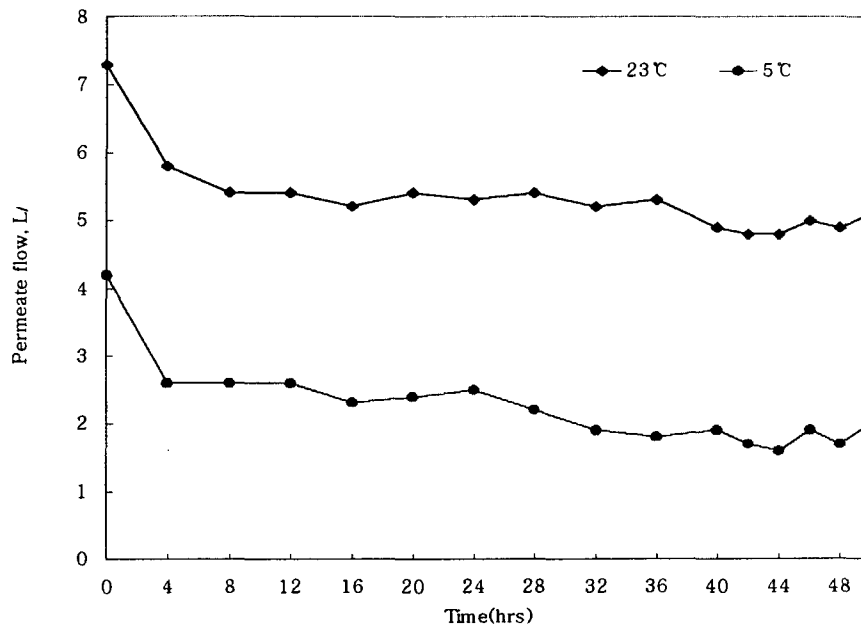


Fig. 9. UF(AF-10) Membrane을 통한 온도별 투과유량변화

NF막의 시험에서 TS-40막외에는 급격한 투과량 변화가 발생함을 Fig. 10과 같이 확인할 수 있었다.

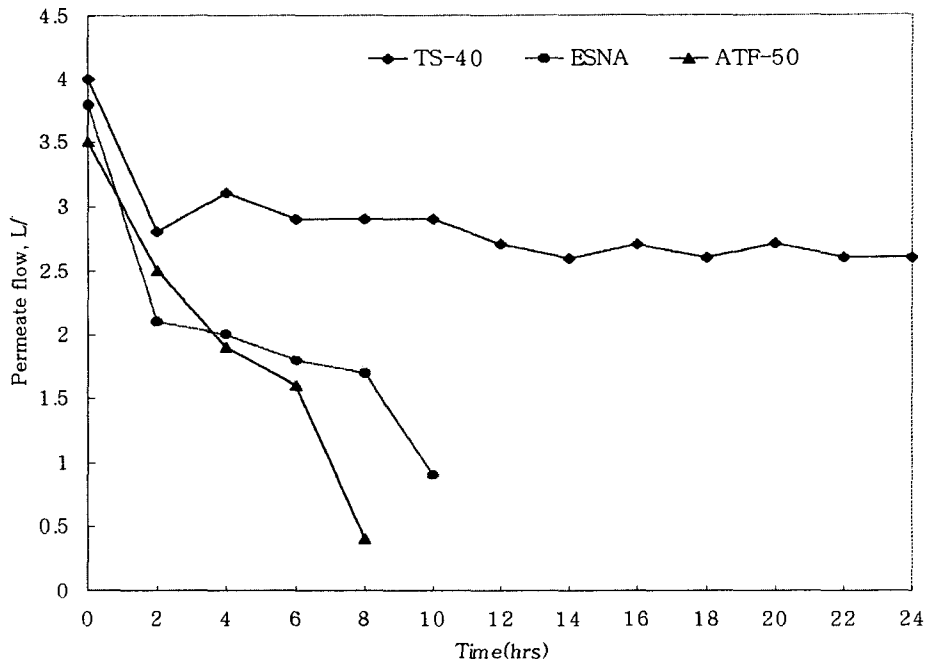


Fig. 10. NF Membrane에 대한 동일압력(12kg/cm²)과 동일 수온(5°C)에서 투과유량변화

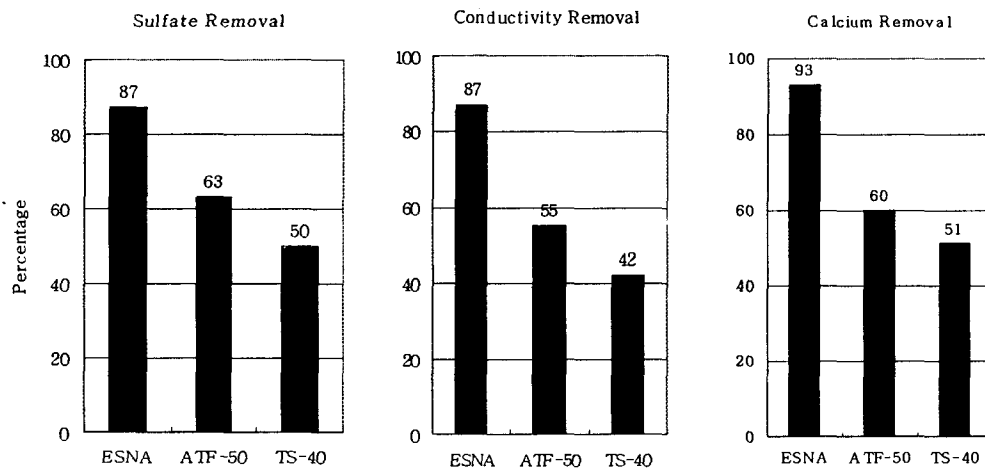


Fig. 11. Results of on-site testing(Nov. 2000)

Fig. 11은 원수의 농도가 48 μs/cm을 18.5°C에서 실시한 것이다.

4. 결 론

나권형막(Spiral Wound)와 진동형 평막(Plate & Frame)을 이용한 상수도 처리를 통하여 나타나는 결과는 다음과 같다.

1) 막의 오염성

- 원수(Feed Water)가 양호하여 막의 오염은 예상보다 크게 나타나지 않았으며 PVDF (Polyvinylidene Difluoride) 재질의 막은 수온에 따라서는 투과유량은 변화가 다소 있었으나 막의 세정은 1주일 1회정도면 충분하였다.

- SW Membrane 중 PES(UF)재질은 약 50시간 경과 후 오염으로 Flux감소가 되었다.

- 진동형막 분리는 막의 오염이 하절기에는 공히 크게 심하지 않았으나 동절기에는 NF(ESNA와 ATF-50)막은 12시간내에 막의 오염이 나타났다.

2) 투과 유량

- 나권형막보다 진동형막이 동일면적에 투과율이 2.5~4배까지 증가하였으며 회수율도 나권형막에 비해 5배이상을 나타내었다.

- 동일한 막에서도 제조업체에 따라 투과유량의 변화가 있음을 알 수 있었다.

3) 처리수질

- 처리코저하는 오염물질이 무기성물질과 저분자 유기성물질을 제외한 상수도 수질기준으로 볼때 MF막으로 처리하여도 기존의 처리수질보다 양호하였다.

- 전기전도도(또는 총용해성고형물질)과 저분자 유기성물질을 효과적으로 제거하기 위해 NF막을 사용할 경우, 처리수질은 ESNA가 우수하였고, TS-40와 ATF-50은비슷하였으나 막의 오염성과 투과유량을 고려해 볼 때 TS-40막이 우수하였고 전도도제거율도 40%이상을 나타내었다.

4) 최근에 언론에서 논쟁이 되는 원생동물이나 바이러스 검출등과 관련하여 향후 MF, UF 그리고 NF막을 적절히 취수원수에 따라 적용시 THM문제와 함께 해결을 할 수 있으리라 전망된다.

5) 이번 실험의 통해 우리나라의 상수도 처리에 있어서 막분리기술의 적용을 할 경우 기존의 물리, 화학적 처리방법보다는 유지관리비용이나 처리수질을 비교해 볼 때 경쟁력이 있을 것으로 사료되며, 향후 막분리기술적용에 대해서는 더 많은 검토와 시험이 실시되어야 할 것이다.

6) 막분리기술 적용을 활성화하기 위해서는 다음사항들을 고려하여야 할 것으로 사료된다.

첫째, 막의 오염 최소화나 투과유량 및 유지관리비 측면에서 막의 형태 선정이 중요하다. (침지형, 진동형, 역세형, 회전형등)

둘째, 막의 재질과 제거범위도 원수에 따라 선정이 중요하다. (PVDF, PTFE, PES등)

셋째, 계절별 수온변화와 이에 따른 원수의 변동도 심하므로 고려하여야 한다.

넷째, 막분리 기술에 대한 전문인력 확보가 요구된다.

7) 운전비용

• 기존의 정수처리 운영비는 원수 단가 100.40원/m³(2000년 11월 1일 이후)와 약 품비등을 고려할 경우 215.47원/m³ ~ 230원/m³이나 MF막을 이용하여 처리할 경우 실제 운전비는 50원/m³~100원/m³내외로 예상된다.(동절기 기준)

참고 문헌

1. 한국막학회, 『막분리』, 자유아카데미, 1996, pp. 4~21, pp. 191~245.
2. 지은상, 『막분리개론』, 도서출판 대도, 1995, pp. 1~29, pp. 185~261
3. 지은상, 『막분리공학』, 태양사, 1998, pp. 1~60
4. Culkin, B., " Vibratory Shear Enhanced Processing : A new separation technology for the paint and coating industry", Paint and Coating Industry Magazine, 1990, pp. 220~ 221
5. New Logic International Inc., Handbook of VSEP, 2000
6. "Handbook of RO, UF, Pure Water System", Osmonics Inc., 1992.
7. "Desalination Membrane Products", Desalination Systems, Inc., 1996.
8. "Toray Reverse Osmosis Elements" Toray Industries, Inc., 1992.
9. "Engineers Catalogue", Hydranautics, 1991. 1999. 2000.
10. "Membrane Products", Fluids Systems, 1994. 2000.
11. DOE, Membrane Separation Systems, U.S. Department of Energy, 1990. pp. 1~9
12. Philip A. schweitzer, Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineers, McGRAW-HILL Book Company, 1986, pp. 2~89
13. Dow Chemical, " Technical Manual of Dow Liquid Separations", 1993
14. Jakob Murkes and Claes-Goran Cailsson, Crossflow Filtration, John wiley & Sons, 1998, pp. 127~129
15. S. Sourirajan, Reverse Osmosis, Academic Press, 1970, pp. 1~13
16. Thomas O. Brock, Membrane filtration, Science Tech. Inc., 1983, pp. 282~285
17. Blpin S. Parekh, Reverse osmosis technology, Marcel Dekker, Inc., 1998, pp. 20~55
18. Robert E. Lacey, " Industrial Processing with Membranes" 1979, pp. 123~189
19. S. Sourirajan and Takeshi Matsuura, " Reverse Osmosis and Ultrafiltration" American Chemical Society, Washington. D.C. 1985.
20. Robert E. Lacey and Sidney Loeb, " Industrial Processing with Membranes"