

기술보고

RO Membrane System을 이용한 도시하수처리

이 규 현, 안 준 수, 유 제 강

선경건설(주) 부설연구소

The Application of RO Membrane System in Municipal Wastewater Reclamation

Kyu-Hyun Lee, June-Shu Ahn, and Je-Kang Yoo

Sunkyong Engineering & Construction LTD. R & D Center

요 약

미국 캘리포니아주 Orange County에 위치한 Water Factory 21(WF-21)은 생물학적 처리공정을 거친 도시하수를 재생하여, 이 재생수를 지하수지층으로 유입되는 해수의 침투를 막기 위한 Reinjection System에 이용하고 있다. 장치 구성 공정은 Lime처리, Air Stripping, 사여과, 활성탄처리, 역삼투막 및 염소처리 등으로 이루어지며, 이에 대한 각 처리공정의 효율성에 대하여 실험을 실시하였다. 3년간의 장기간에 걸친 실험결과로부터, 도시하수에 대한 RO Membrane 처리수는 음료 수질 기준에 적합한 고수질의 물을 생성할 수 있음을 입증했다. Pilot Plant 실험에선 Lime Clarifier만으로 전처리를 실시하여 성공적인 결과를 얻었으며, 또한 저압(250 psi)이 적용된 새로운 Membrane을 사용하여 에너지 절약을 통한 비용 절감 효과에 대한 실험도 상당한 가능성을 보여주었다.

Abstract

Water factory 21(WF 2) in Orange County California, is a advanced wastewater treatment(AWT) plant designed to reclaim biologically treated municipal wastewater for injection into a seawater barrier system. Processes included are lime treatment, air stripping, filtration, activated carbon adsorption, reverse osmosis(RO), and chlorination. The effectiveness of each treatment process is presented including pretreatment, RO dimineralization. The data collected show that the processes, including RO, used at WF-21 are capable of producing a very high quality water on a reliable basis. Treatment reduced all contaminants, to levels below national primary drinking water regulation maximum contaminant levels. It was found that lime clarified secondary effluent can be used as feedwater to a RO dimineralizer. Experiments with new low pressure membrane(250psi) show great potential for reducing RO cost.

1. 서 론

산업화, 선진화 및 인구의 급격한 도시집중화 현상 등으로 인하여 생활 및 공업 용수의 사용량은 급증하고 있으며, 이로 인한 하·폐수의 발생량도 증가하고 있다. 그렇지만 한정된 수자원을 가지고 용수 확보를 위한 댐등의 건설도 한계가 있으며, 또한 하·폐수의 방류로 인한 환경오염의 측면도 신중히 다루어져야 한다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위한 한가지 방법으로써 하·폐수 재활용 공정이 이용될 수 있으며, 최근

역삼투막 System을 이용한 재활용 공정이 활발한 연구와 실제 적용 사례를 통하여 적용가능성을 입증하고 있다.

본 고에서는 미국 Orange County에서 도시 하수의 2차 처리수에 대하여 재활용공정 System으로 RO Membrane을 적용하여, 이로부터 Product Water인 재생수를 지하수 이용에 따른 해수침투를 막기위해 지하수 지층 주입수로 사용할 목적으로, 3년간의 장기간에 걸쳐 Pilot Plant실험과 Field Plant Test를 실시한 결과를, 요약하여 소개하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2-1 실험장치

2-1-1 Pilot Plant

그림 1에 보여진 바와 같이, Pilot Plant의 용량은 10,000gpd이며 RO Feed water(원수)는 Lime Clarifier로 처리된 배출수이다. 장치는 Membrane Module에 Scale 침적을 방지키위해 pH 조정과 Inhibitor(SHMP)를 첨가시키며, Lime Clarifier에서 Carry Over된 부유물질로부터 고압Pump 및 Membrane Elements 보호용으로 고압Pump앞에 25 μ m Cartridge Filter를 설치하였다. 사용된 Membrane은 Spiral Wound Type의 Cellulose Acetate (CA) 및 Polyamide(PA) Membrane이다.

2-1-2 Full Scale Plant

기본장치는 그림 2에 나타난 바와같이, 전처리공정과 RO 탈염공정으로 대별되며, RO Membrane System의 용량은 5 MGD이다. 여기서 전처리공정은 Chemical Clarification, Nitrogen Removal, Recarbonation, Filtration, A/C Adsorption, Disinfection & Microfiltration 공정으로 구성되어 있다. 사용된 Membrane은 Spiral Wound Type, Asymmetric Cellulose Diacetate Membrane이다.

2-2 실험방법

Pilot Plant실험은 비용절감 목적으로 전처리공정을 단순화하여 Lime/RO공정만으로 실험을 행하였다. 이때 Feedwater의 pH가 11.0으로 매우 높아 CaCO₃침전과 Membrane 가수분해 현상이 발생하므로 이를 방지하기 위해 2단계 산주입으로 최적 pH 5.5~5.8로 조정하였으며, 또한 CaSO₄ Scale 방지를 위해 Inhibitor로써 SHMP, 11mg/l를 주입하였다. 한편, 실제 Plant에 적용된 각 공정에 대한 특성은 다음과 같다.

2-2-1 Chemical Clarification

Chemical Clarification은 급속혼합, 응집, 침전조로 구성되어 있으며, 응집제로서 Lime이 사용된다. Lime은 자동제어에 의해 최적 pH 11.0을 유지하도록 CaO로써 350~400mg/l를 투여한다.

2-2-2 Air Stripping

Air Stripping은 향류로, 공기와 물의 비는 300m³/m³으로 도입된다. Air Stripping Tower는 원래 Feedwater중의 암모니아성질소 제거용으로 운전되었으나, Feedwater중의 암모니아성질소 농도 감소로 인하여, 현재는 휘발성 유기물질 제거에 이용되고 있다.

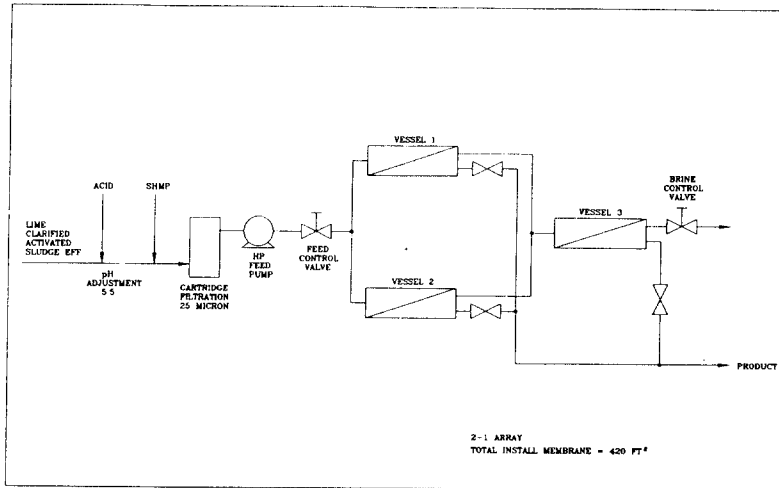


Figure 1. Lime/RO Pilot Plant Flow Diagram

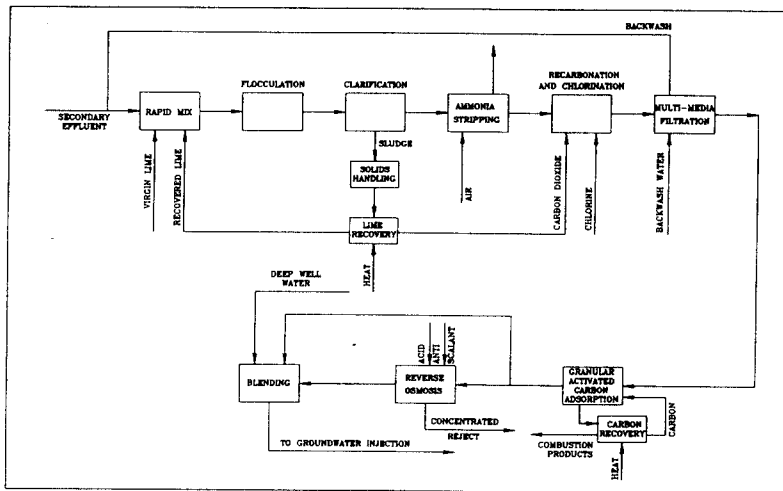


Figure 2. Orange County Water District Water Factory-21 Process Flow Diagram

2-2-3 Recarbonation

Lime Clarification에 의해 pH 11.0까지 높아진 것을 Recarbonation Basin에서 이산화탄소 주입에 의해 약 pH 7.5까지 떨어뜨린다. 또한 이 Basin에서는 염소를 주입하여 살균공정으로도 이용한다. 암모니아성 질소 존재시 Breakpoint Chlorination이 이루어지며, 이때 염소와 암모니아성질소의 비는 중량비로 9 : 1이상이다.

2-2-4 Mixed Media Filtration

Filter Media(여재)는 Coarse Coal, Silica Sand와 Garnet 등으로 구성되어 있고, 수역학적 부하속도는 $0.2m^3/m^2/min$ 으로 설계되었다. Alum과 Polymer가 종종 Clarification을 증진시키기 위해 투여된다.

2-2-5 Activated Carbon Adsorption

Granular Activated Carbon(GAC) Contactors는 Calgon Filtrasorb 3000 Carbon을 함유하고 있고, 병렬로 배치 운전되며, 접촉시간은 34min이다. 수력학적 부하속도는 $0.2\text{m}^3/\text{m}^2/\text{min}$ 이다.

2-2-6 Reverse Osmosis System

RO Membrane Modules에 들어가기전에 Scale Precipitation Inhibitor로써 SHMP, Membrane Module 내의 미생물성장을 억제키위해 염소를 투여하며, 입자제거용 $25\mu\text{m}$ Microfilter를 설치하였다. Membrane 특성에 따라 고압 Pump를 통하여 적절한 압력이 공급되며, Feedwater에 산을 투여하여 Membrane에 최적인 pH 5.5~5.8로 조절한다.

3. 결과 및 고찰

표 1에는 장치내로 들어오는 유입수의 수질 분석결과와 지하수지층에 주입키위한 수질조건을 나타내었다.

Table 1. Average Characteristics of WF-21 Influent & Blended Injection Water

Constituent	Average Concentration	
	Secondary Treated Influent	Blended Injection Water
EC, μmho	1385	613
pH	7.4	7.8
Turbidity, Tu	10.6	0.3
Na, mg/l	168	87
Cl, mg/l	190	95
TOC, mg/l	12.8	3.5
COD, mg/l	46.5	6.7
NH ₃ -N, mg/l	2.1	0.5
TKN, mg/l	5.0	2.1
Total Coliforms, #/100ml	3.3×10^6	<0.3

3-1 Pilot Plant 실험

CA 및 PA Membrane을 적용하여 Membrane 재질에 따른 비교실험과, PA Membrane에 대한 차등 압력 적용에 따른 실험을 실시하였다. RO Membrane에 의한 회수율은 85%로 조작하였다.

3-1-1 Cellulose Acetate(CA) 및 Polyamide(PA) Membrane 비교실험

CA RO System에 대한 실험을 실시한 후 6시간만에 pH Control 실패로 인하여 운전이 중단되었다. 산주입장치의 조정에 대한 몇가지 시도가 있었으나 완전한 해결책을 찾지 못했으며, 결국 2단계 pH조정을 실시키로 하고, 1단계 황산 주입에 의해 pH 11.0에서 pH 8.0으로 감소시키고, 2단계에서 pH 5.5~5.8으로 조정하였다.

CA Membrane에 대한 3000시간의 실험결과, TDS와 COD가 90%이상 제거되었으며, NH₃-N는 거의 100%감소되었다. PA Membrane에 대한 2,400시간의 실험결과, TDS는 약 99%, COD는 95%이상 제거되었으며,

Sulfate, NH₃-N는 거의 100% 제거되었다. 이들 두 Membrane의 실험결과에 대한 수질분석 결과를 표 2에 나타내었다.

Table 2. Pilot Plant Operation
Typical Salt Rejection, COD & NH₃-N Reduction

Constituent	Feed(mg/l)		Permeate(mg/l)		Rejection(%)	
	CA	PA	CA	PA	CA	PA
Sodium	177	159	11	1.4	93.8	99.1
NH ₄	10	0.5	1.1	<0.1	89.0	>80.0
SO ₄	227	320	1.6	1.0	99.3	99.7
Cl	210	186	14	7.5	93.3	96.0
NO ₃	20	11	5.8	0.3	71.0	97.3
TDS	749	885	42	11	94.4	98.8
COD	23	21	2.0	<1.0	91.3	95.2
NH ₃ -N	6.6	1.1	N.D	N.D	—	—

N.D—Not Detectable

한편, 그림 3, 4에는 CA, PA Membrane 각각에 대한 경과시간에 따른 염제거율의 변화를 보여준다. CA Membrane의 경우, 실험후반기에 평균 94~95%의 염제거율을 나타내었다. 여기서, 경과시간 99, 122시점에 염제거율이 약 75%로 떨어졌는데, 이는 pH Control 실패로 인한 강알카리성(고 pH) Feedwater에 Membrane 표면이 노출되어 빠른 가수분해 현상이 발생했기 때문이다. 한편, PA Membrane의 경우 염제거율은 2,400시간 실험시간동안 평균 96~98%를 나타내었다. 그림에서 화살표시는 실험기간중 Performance에 영향을 끼친 Events의 발생을 나타낸 것이며, 표 3, 4에 수록되어있다.

Table 3. Pilot Plant Operation
The Major Events of the Applied CA Membrane

Event Number	Elapsed Time	Event
1	99-122	High pH operation. Membrane badly hydrolyzed
2	226	New membrane elements installed
3	342	Dual media filter bypassed
4	1015-1135	Intermittent high pH operation
5	2402	Membrane elements cleaned
6	2743	Intermittent high pH operation
7	2813	Original Cartridge filters replaced

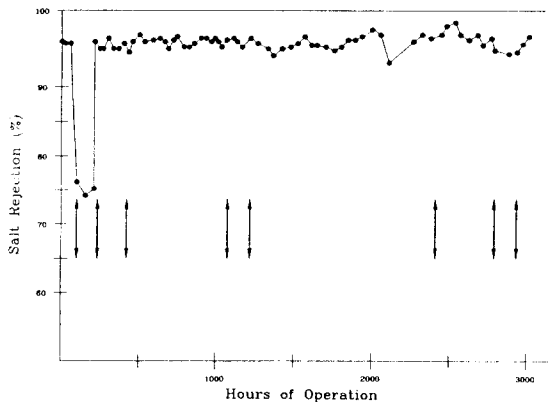


Figure 3. Pilot Plant Operation—Salt Rejection for Cellulose Acetate Membrane

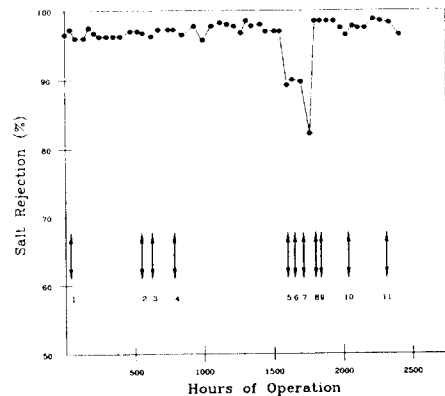


Figure 4. Pilot Plant Operation—Salt Rejection for Polyamide Membrane

Table 4. Pilot Plant Operation
The Major Events of the Applied PA Membrane

Event Number	Elapsed Time	Event
1	2	Replaced all elements in vessels #1 and #3 : replaced one element in vessel #2
2	579	Installed two new elements in vessel #1
3	672	Original cartridge filters backwashed
4	889	Original cartridge filters replaced
5	1531	Membrane elements cleaned and inspected
6	1581	Membrane elements cleaned
7	1667-1826	High conductivity readings on vessel #1
8	1793	Low suction pressure shut-off switch failed to activate—feed pump damaged
9	1826	Replaced all membranes in vessel #1, repaired mechanical leak, returned feed pump to service
10	1990	Solenoid valve replaced
11	2280	Replaced cartridge filter

3-1-2 고압 및 저압 적용 TFC Polyamide Membrane Performance

두번째 실험에서는 Thin Film Composite(TFC) PA Membrane에 대하여 적용 압력이 고압(400psi)인 경우와 저압(200~250psi)인 경우, 즉 압력 조건 영향에 따른 Membrane 성능실험을 실시하였으며, 저압인 경우 고 Flux가 적용되었다. 다른 실험조건은 상기와 동일하다. 조작압력이 400psi인 고압인 경우와 200~250psi인 저압인 경우에 대하여, 각각 6,431시간과 1,185시간동안 실험을 실시하였다. 여기서 저압의 경우, 초기 489시간동안은 200psi, 후기 696시간동안은 250psi 압력을 적용하여 실험을 실시하였다. 표 5에 이들 두 실험결과에 대하여 원수 및 처리수의 수질분석 결과에 대하여 나타내었다.

Table 5. TFC-PA Membrane
Typical Water Quality Performance

Constituent	Feed(mg/l)		Permeate(mg/l)		Rejection(%)	
	A ¹	B ²	A	B	A	B
Sodium	185	219.0	1.8	12.4	99.0	94.3
Nitrate	13	0.2	0.3	<0.1	97.7	>50.0
Ammonia	29	28.0	1.5	4.8	94.8	82.9
Sulfate	405	410.0	0.9	3.6	99.8	99.1
Chloride	210	239.0	10	37.4	95.2	84.4
TDS	1017	1023.0	33	64.4	96.8	93.7
COD	23	29.6	<1.2	1.43	>94.8	95.3

¹Applied High Pressure(400 psi) ²Applied Low Pressure(200~250psi)

그림 5, 6에는 고압이 적용된 경우의 경과 시간에 따른 유량의 변화를 나타내었는데, 초기에 5~5.5gpm의 Product water를 생산하였는데, 6,431시간 후에는 4.2 gpm으로 감소하였다. 한편, 저압의 경우는 그림 7에 나타내었는데, 초기에 11~13 gpm에서, 1185시간후에는 3.7 gpm으로 감소하였다. 이와같은 Flux의 급격한 감소현상은 Feedwater의 유속이 증가함에 따른 Membrane 표면의 Fouling 가속에 기인하는 것으로 사료된다. 한편, 여기서 화살표시는 Events를 나타낸 것이다.

3-2 Full Scale Plant실험

하수처리장으로부터 장치내로 들어오는 유입수는 유기물, 무기물 및 각종 생물학적 오염물질을 함유하고 있다. 이와 같은 오염물질을 제거하는데 있어서 여러처리 공정들이 기여하는데, 각각의 공정들은 특정목적, 즉 수중에 함유된 특정성분을 제거하는데 대하여 효과적으로 적용되어진다. 그러므로, 먼저 전처리 공정의 각 공정의 효율 특성에 대하여 논하고, 다음에 RO Sysetm의 무기물, 유기물 및 그 밖의 오염물 제거에 관한 실험결과를 기술하고자 한다.

3-2-1 Chemical Clarification

탁도, 대장균, COD 및 그 밖의 오염물질에 대한 Lime Clarification에 의한 감소 효과가 표 6에 나타나 있다. Chemical Clarifier에서, 운전시 pH 조건은 pH 10.9이었다. Chemical Clarification에서는 탁도와 인에 대한 제거능이 탁월하여, 탁도의 경우, 시간당 약 75% 감소하며, 인 성분도 시간당 99% 이상 감소하였다. 그밖에 유기물 즉, COD, TOC 성분도 감소하였다. 또한 Lime처리는 높은 pH 조건에서 운전되므로 살균 작용도 매우 효과적이다. 즉 대장균의 경우 99.9% 이상 감소하였다.

Table 6. Removal of General Contaminants by Lime Treatment

Contaminant	Unit	Influent Concentration	Effluent Concentration	Percent Removal
EC	µmho	1717	1638	5
TDS	mg/l	1000	934	6
pH		7.3	10.9	
Turbidity	TU	7.7	0.88	89
PO ₄ -P	mg/l	5.3	0.04	99
COD	mg/l	53.5	30.3	43
TOC	mg/l	14.8	11.0	26
Total Coliform	#/100ml	8.4×10 ⁵	0.9	99
Fecal Coliform	#/100ml	13.5×10 ⁴	0.2	99
Silica	mg/l	22.2	12.9	42
Fluoride	mg/l	1.3	0.8	38
Boron	mg/l	0.7	0.56	20
Organic Nitrogen	mg/l	2.47	1.17	53
Calcium as Ca	mg/l	87.6	78.7	10
Magnesium	mg/l	22.0	1.9	91

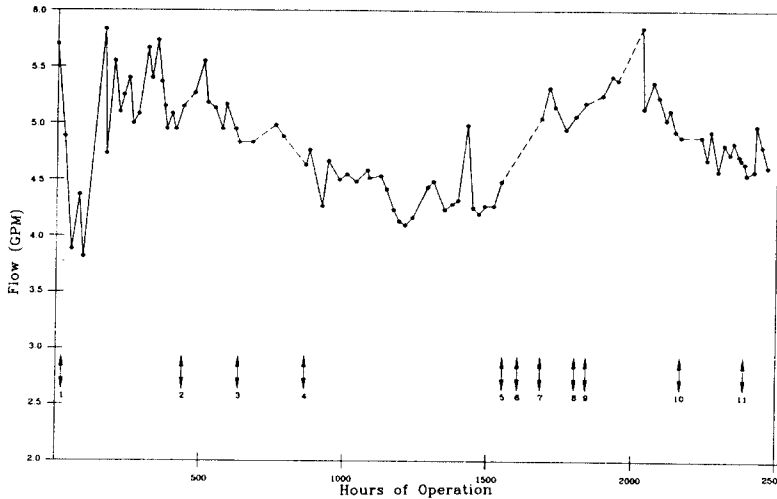


Figure 5. The TFC PA Membrane Performance of the Applied High Pressure(400 psi)
(Dashed lines indicate periods of non-operation)

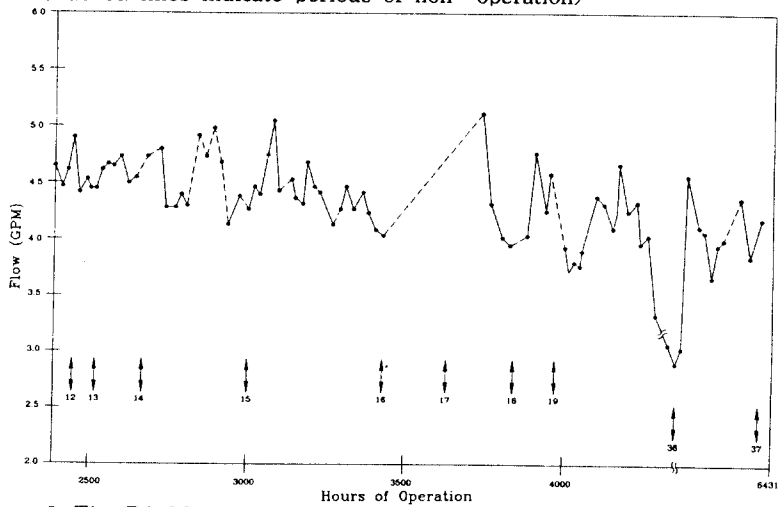


Figure 6. The PA Membrane Performance of the Applied High Pressure(400 psi)
(Dashed lines indicate periods of non-operation)

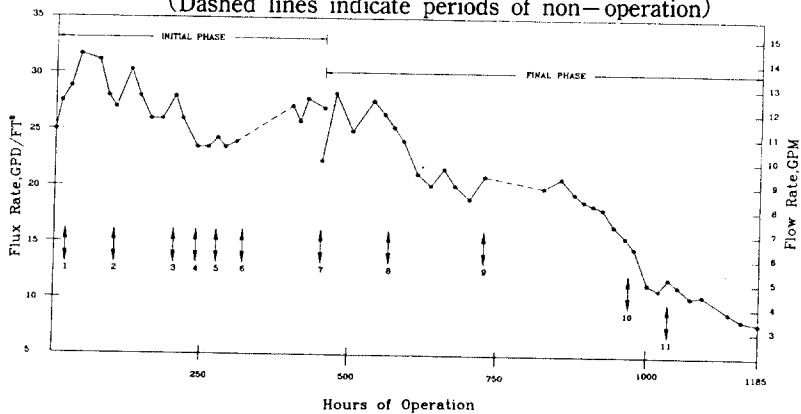


Figure 7. The TFC PA Membrane of the Applied Low Pressure
(Dashed lines indicate periods of non-operation)

일반적으로 중금속도 Lime treatment에 의해 매우 효과적으로 제거될 수 있다. 본 시료에 대한 Lime treatment시, 중금속 제거 효과를 표 7에 나타내었는바, 대부분 50% 이상 제거되었으나, Beryllium, Zinc, Selenium과 Arsenic등은 거의 제거되지 아니하였다.

Table 7. Removal of Heavy Metals by Lime Treatment

Contaminant ($\mu\text{g/l}$)	Influent Concentration	Percent Removal
Silver	1.2	85
Arsenic	<5.0	—
Aluminum	72.6	71
Barium	111.9	61
Beryllium	1.2	—
Cadmium	4.2	74
Cobalt	1.5	63
Chromium	22.0	71
Copper	42.8	84
Iron	117.8	83
Mercury	0.23	52
Manganese	44.2	97
Nickel	62.5	62
Lead	2.9	96
Zinc	84.4	—
Selenium	<5.0	—

3-2-2 Air Stripping

Air Stripping은 원래 강제 공기 순환에 의해 수중의 암모니아성질소 성분을 제거하도록 설계 되어졌다. 그렇지만 장치내 유입수의 암모니아성 질소 농도가 80~85% 감소되었기 때문에 이에 대한 처리 효과 보다는 수중의 여러가지 유기물질들에 대한 제거용으로 대체되었다.

Air Stripping에 의해선 특히 저분자량 휘발성 성분에 대하여 효과적이라는 것이 발견되었으며, 표 8에 제거성분에 대한 결과를 나타내었다.

Table 8. Removal of Trace Organics(VOA) by Air Stripping

Contaminant	Influent Conc. ($\mu\text{g/l}$)	Average Removal(%)
1, 1, 1-Trichloroethane	6.4	97
Trichloroethylene	1.5	93
Tetrachloroethylene	8.7	97
Bromodichloromethane	0.77	87
Chloroform	3.4	80
Dibromochloromethane	0.98	83
Bromoform	0.55	64

3-2-3 Activated Carbon Adsorption

활성탄 흡착은 하수의 일반적인 2차 처리후에 유기성분을 제거할 목적으로 사용된다. A/C Columns은 수력학적 부하속도가 5gpm/ft², 체류시간 34분, Down Flow로 운전되었다. 표 9에 COD, TOC 및 몇몇 유기물질에 대한 제거 효율을 나타내었다.

Table 9. Removal of Organic Materials By GAC

Contaminant	Influent Conc.	Average Removal(%)
Bromoform	1.42	83
Bromodichloromethane	3.26	82
COD	28.6	66
Carbon Tetrachloride	0.18	66
Chloroform	5.7	64
TOC	12.3	55

* Geometric mean concentration in µg/l except TOC and COD, which are in mg/l

중금속에 대한 제거 효과를 표 10에 나타내었는바, 알루미늄과 카드뮴은 오히려 증가하였고, Arsenic, Barium, Beryllium, 코발트, 납, Selenium, 은, Zinc등은 변화가 없었다. 알루미늄이나 카드뮴 성분의 증가는 탈착에 기인하거나 분석상의 오차로 사료된다.

Table 10. Removal of Heavy Metals by Granular Activated Carbon Adsorption

Contaminant	Influent Concentration	Percent Removal
Silver	0.21	-
Arsenic	<5.0	-
Aluminum	24.7	+5
Barium	42.0	-
Beryllium	<1.0	-
Cadmium	0.78	+50
Cobalt	1.0	-
Chromium	5.7	23
Copper	18.4	76
Iron	162.9	82
Mercury	0.53	20
Manganese	4.79	37
Nickel	21.0	19
Lead	<0.1	-
Selenium	<5.0	-
Zinc	<100.0	-

* Geometric mean concentration in µg/l

3-2-4 RO Membrane System Performance

RO Membrane System으로부터 실제 Product Water 유량은 직접적으로 수온과 준조작압력(펌프에 의한 적용압력-삼투압)에 비례한다. 3년여(27개월)의 실험기간 동안, Feedwater에 대한 TDS와 평균수온이 그림 8에 나타나 있다. 평균값은 Plant를 운전한 한달 동안의 매일 측정값을 평균한 값이다. 수온은 계절에 따라 변화 하였는데, 최고치는 '79년 8월의 85.1°F이었고, 점차적으로 감소하여 '80년 1월에 75.8°F이었다. 2월에 약간 상승하였다가 3월에 갑자기 72.7°F로 떨어졌는데, 이것은 Ammonia Stripping Fan을 작동했기 때문이다.

27개월 동안의 실험결과, 연중 수온 변동 폭은 약 10°F, 즉 75~85°F이었으며 최고치는 8월에 최저치는 1~3월에 나타났다.

Feed Water의 월단위 TDS는 '79년 9월의 746mg/l로부터 '81년 3월의 1264mg/l까지 변화하였다.

그림 8에 보여진 바와같이 Feed Water의 평균 TDS는 초기 5개월 동안은 750~800mg/l, 다음 두달동안은 850~975mg/l, 이후 16개월 동안은 1000~1275mg/l, 그리고 마지막으로 4개월 동안은 점차적으로 감소하여 755~976mg/l이었다. 이와같은 TDS변화의 주요한 원인은 Feedwater 취수원 차이 때문이다.

Feedwater의 TDS변화는 삼투압의 증감을 가져오며, 이로 인하여 Product water의 Flux에 직접 영향을 끼친다. 그렇지만 본 실험의 경우, 27개월 동안 Feedwater의 삼투압 변동 폭은 7.5~12.5psi로 조작압력(400psi)과 비교하여 1%이하까지도 떨어져 큰 영향을 주지는 아니하였다.

장치운전에 대한 결과 Data가 표 11과 그림 9에 나타나 있다. 이들 Data는 실험실시 기간동안 각 월별로 평균값을 나타낸 것이다.

Plant 용량은 '79년 7월에 4.05mgd로부터 '80년 1, 2월에 5mgd까지 증가하였는데, 이는 유입수의 증가에 대처하기 위해 새로운 Membrane이 설치되었기 때문이다. '80년 2~3월에 용량이 감소한 것은 membrane Fouling과 Feedwater의 수온 강하에 기인하고, 4~5월의 미소한 증가는 수온의 점진적 상승에 따른 것으로 사료된다. 그렇지만 그 이후로 하절기의 수온상승에도 불구하고 용량이 지속적으로 감소하였는데, 이는 Membrane Fouling이 그 주원인인 것으로 사료된다.

Plant의 총 염제거율은 초기 '79년 7월에 87.88%에서 점차적으로 증가하여 '80년 3월에 96.27%까지 증가하였는데, 이는 아마 Foulant 물질의 Plugging에서 연유한 Membrane 표면의 미세한 결함보강 때문으로 사료된다.

그 이후로는 12개월에 걸쳐 점차적으로 감소하여 '81년 3월에 89.15% 이었으며, 3~8월에는 89.15~91.96%까지 미소한 변화를 나타내었다.

Table 11. Total Plant

Mean Product Flow and Rejection versus Operating Month

Month	Product Flow, mgd	Percent Rejection
<u>1979</u>		
July	4.05	87.88
August	4.08	86.76
September	4.14	88.07
October	4.63	89.34
November	4.66	91.11
December	4.64	92.59

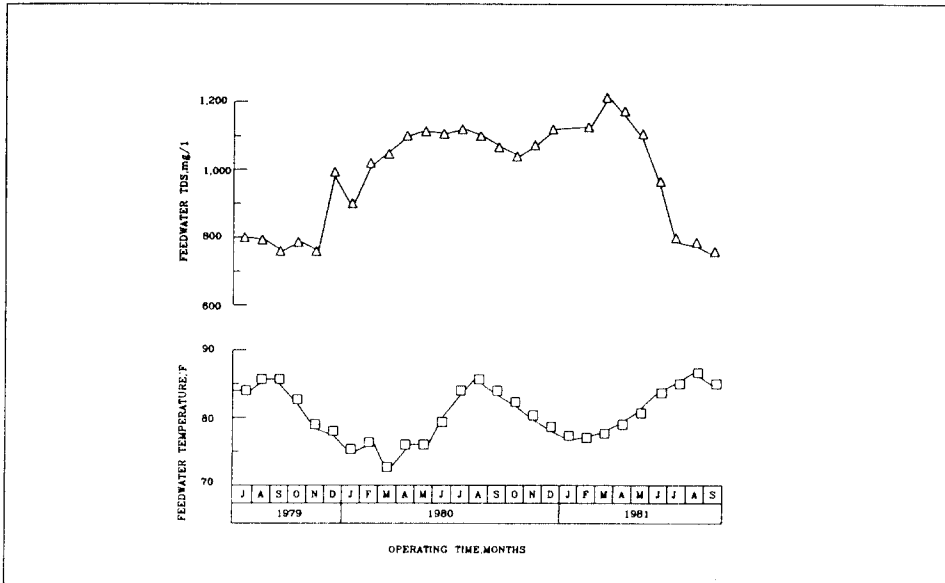


Figure 8. The Temperature and Total Dissolved Solids of Feedwater to Full Scale RO Plant(5mgd)

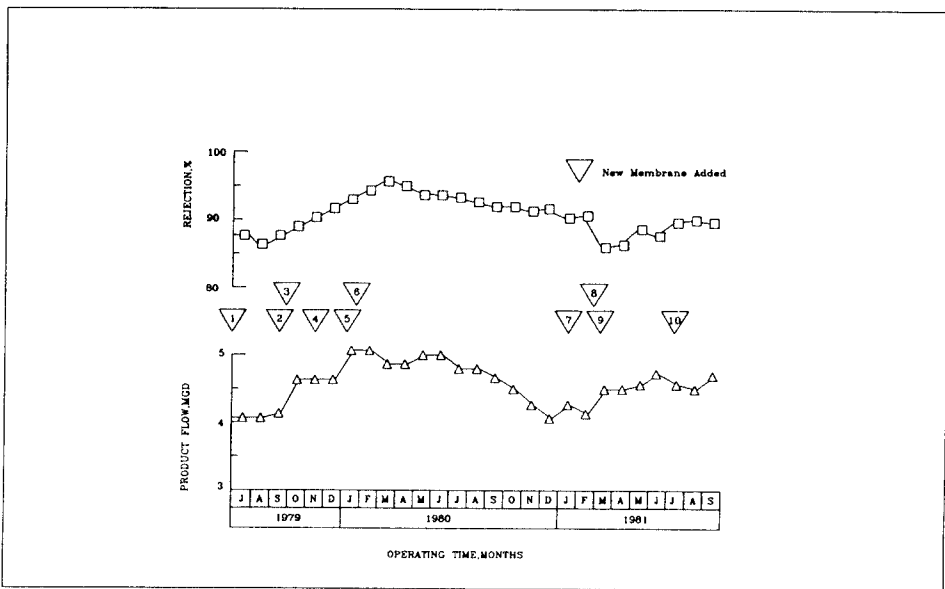


Figure 9. Total Plant Product Flow and Rejection over an Extended Period of Operation

Month	Product Flow, mgd	Percent Rejection
<u>1980</u>		
January	4.97	93.61
February	5.02	95.00
March	4.79	96.27
April	4.80	95.90
May	4.95	94.70
June	4.93	94.82
July	4.73	94.15
August	4.74	93.59
September	4.61	93.24
October	4.36	93.21
November	4.06	92.68
December	3.77	92.84
<u>1981</u>		
January	4.03	91.48
February	3.86	91.89
March	4.30	89.15
April	4.33	89.56
May	4.40	90.64
June	4.60	90.23
July	4.44	91.58
August	4.36	91.96
September	4.56	91.27

표 12에는 후반기 12개월 동안의 Feedwater중의 각 이온들과 암모니아, COD, TOC등에 대한 제거율을 나타낸다. 이들 농도값은 1개월동안 매일 측정값의 평균값을 나타낸 것이다. 예측했던 바와 같이, 2가이온이 1가이온 보다 제거가 더 잘되었다. 즉 Sodium이온 제거율은 '80년 10월의 90%에서, '81년 1월 83%까지 감소하였으며, 염소이온 제거율도 유사했다. 이 두이온의 급격한 감소현상은 장치 운전이 정지되고, Membrane이 Formaldehyde 1% 용액 속에 함침되어 있는 이후에 발생하였다.

그렇지만 2가이온의 경우, 칼슘이온 제거율은 '80년 1월 이후 계속 100%이었으며, 또한 Sulfate 제거율은 최고 99%에서 최저 93%까지 변화하였으며 연중 평균 제거율은 97%이었다. 이와같은 현상으로 미루어 보아 Membrane 표면의 이상이나 심각한 가수분해 현상이 없음을 입증하는 것이다.

장치 정지 전후의 제거율에 있어 1가이온의 뚜렷한 감소현상과 2가이온이 변화가 없는 원인은, 정지기간동안 Membrane이 1% Formaldehyde용액에 함침되어 이 함침기간동안, 미세한 Membrane 결함으로부터 Fouling물질이 제거됨으로 인해 1가이온의 Membrane투과 Flux가 증가한 것으로 사료된다. Feedwater중의 암모니아 농도는 꽤 높은 반면 Nitrate 농도는 낮았다. 다행히 CDA Membrane은 Nitrate 이온보다 암모늄이온을 더 잘 제거하였다. 즉, 암모니아 제거율은 초기 3개월은 약 86.8%, 장치 정지 이후에는 감소하여 80.0~87.0%

이었고, Nitrate의 경우 초기 3개월 동안은 45~65%, 장치 이후에는 20~40%이었다.

TOC 제거율은 최고 91.4%에서 최저 83.1%, 평균 87%이었고, COD제거율은 최고 98.5, 최저 83.8%, 평균 90.4%이었으며, 장치 정지 이후에도 큰 영향은 없었다. 이와같은 실험결과로부터 R/O Plant는 TOC나 COD를 제거하는데 있어서도 매우 효과적인 장치임을 알 수 있었다.

Table 12. Average Rejection of Ions, TOC and CO

Time(M) Constituents		1980			1981									Mean Rejection
		10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Sodium	Inf. ¹	233	244		213	224	261	233	220	200	159	161	155	86
	Eff. ²	23	24	25	37	38	42	35	27	26	23	21	23	
	Rej. ³	90	89	90	83	83	84	85	88	87	86	87	85	
Calcium	Inf.	68	75	80	70	73	89	83	78	132	94	73	78	100
	Eff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Rej.	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Chloride	Inf.	282	271	293	291	288	345	323	290	218	233	216	210	86
	Eff.	29	36	35	51	41	57	52	47	37	34	28	27	
	Rej.	90	87	88	82	86	83	84	84	83	85	87	87	
Sulfate	Inf.	226	239	274	203	214	234	234	226	228	195	169	176	97
	Eff.	1	6	4	2	2	11	9	8	6	5	5	12	
	Rej.	99	97	99	99	99	95	96	96	97	97	97	93	
NH ₃ -N	Inf.	68	75	80	70	73	89	83	78	132	94	73	78	85
	Eff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Rej.	86	87	88	86	87	84	85	81	85	82	87	80	
NO ₃	Inf.	22	23	24	21	30	31	27	27	20	17	15	10	40
	Eff.	3	3	3	3	4	5	4	5	3	3	2	2	
	Rej.	60	50	50	40	40	50	33	0	0	33	29	18	
TOC	Inf.	7.2	5.8	7.3	-	7.4	9.0	9.0	10.5	-	-	11.4	13.0	87
	Eff.	0.9	0.5	0.9	-	0.9	1.3	1.3	1.3	-	-	1.5	2.2	
	Rej.	88	91	88	-	88	86	86	88	-	-	87	83	
COD	Inf.	18.6	9.6	16.2	13.4	13.7	20.3	17.8	23.5	17.3	26.3	26.7	29.0	90
	Eff.	1.5	1.0	1.0	0.2	1.1	2.5	2.0	2.6	1.5	2.8	3.2	4.3	
	Rej.	91	90	94	99	92	88	89	89	91	89	88	85	

Feedwater중의 중금속성분 제거의 경우, 전처리공정 중 Lime Clarification과 A/C Filter에서 음료용 수질기준 이하로 처리되었지만, RO System을 통과하면서 더욱 감소되었다. 이에 대한 수질 분석 결과가 표 13에 나타나 있다. 여기서 보여지는 바와 같이, 전처리공정에서 처리된 수중에는 미량만이 함유되어 있어, 실험 분석상의 한계치에 이르러 종종 실험상의 오차를 야기하는 경우가 있었다. 중금속농도가 더 많은 경우에 대하여는 제거율이 결과치보다는 더 높은 것으로 사료된다.

Table 13. Average Rejection of Trace Metals*

Trace Metal	Influent	Effluent	Rejection(%)
Silver	0.30	0.05	83.3
Arsenic	<5.0	<5.0	—
Aluminum	24.7	7.4	70.0
Barium	41.8	1.8	95.7
Beryllium	<1.0	<1.0	—
Cadmium	0.70	0.04	94.3
Cobalt	0.50	0.02	96.0
Chromium	2.8	0.5	82.1
Copper	8.0	3.7	53.8
Iron	41.0	3.5	91.5
Mercury	0.2	0.2	—
Manganese	1.70	0.07	95.9
Nickel	21.0	0.5	97.6
Lead	<1.0	<2.0	—
Selenium	<5.0	<5.0	—
Zinc	<100	<100	—

* All concentrations expressed as µg/l

3-3 System Modification

도시하수의 재생수단으로써 RO Membrane System이 검토된 것은 '60년대 후반이며, 1970년에 이르러서 첫번째 상업적 RO Membrane System이 건설되었다.

Process Development 초기단계에 1, 2차 하수처리수인 Feedwater내에 함유되어있던 Biological Debris가 RO Membrane 표면에 Fouling을 유발시켜 System의 성능저하를 가져왔다.

이와같은 실험결과를 통하여, RO Membrane System을 이용한 도시하수 재생공정은 효율적인 전처리 공정과 함께 Membrane Cleaning이 Key Point라는 결론에 이르게 되었다.

한편, 지난 24년간에 걸친 경험을 토대로, 현재의 Technology와 더욱 효율적인 대체전처리 System을 사용한 Technology를 비교 연구 검토하였다.

3-3-1 Lime Clarification을 생략한 RO 전처리 System

그림 10에 보여진 바와 같이 RO 전처리 공정에서 Lime Clarification을 사용하지 않고 Coagulant Aid Addition-Rapid Mix-Flocculation & Multimedia Filtration-Chlorination으로 구성하였다.

Lime Clarification을 사용하지 않으므로 해서 Site Space를 보다 더 효율적으로 이용할 수 있으며, 운전 유지비도 상당히 절감될 수 있음이 입증되었다.

3-3-2 전처리 System에 UF Membrane Module 적용

그림 11에 나타난 바와 같이, Feedwater중에 함유된 Biofoulant 농도를 감소시킬 목적으로 UF Membrane Module을 전처리 System에 적용시켰다.

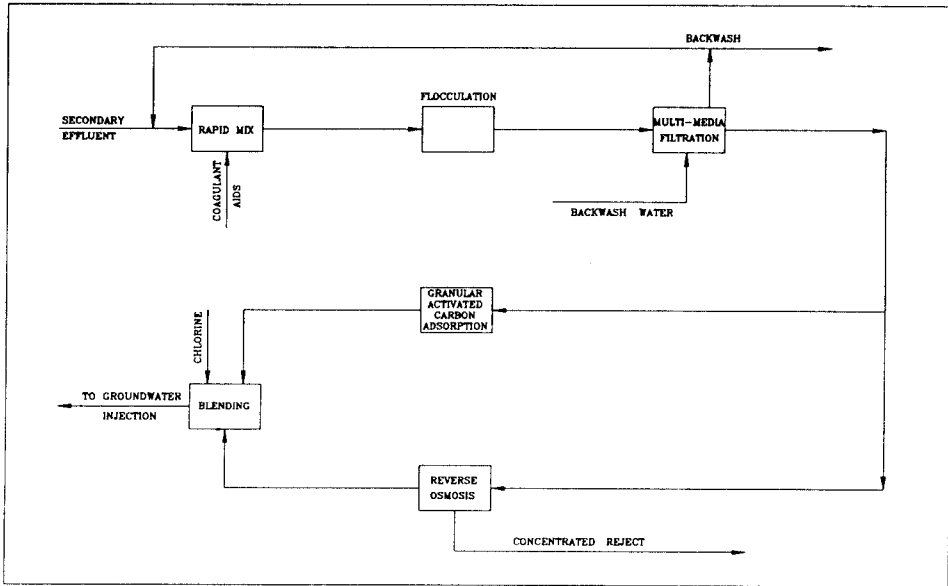


Figure 10. The Process Flow Diagram with the Simplified Pretreatment

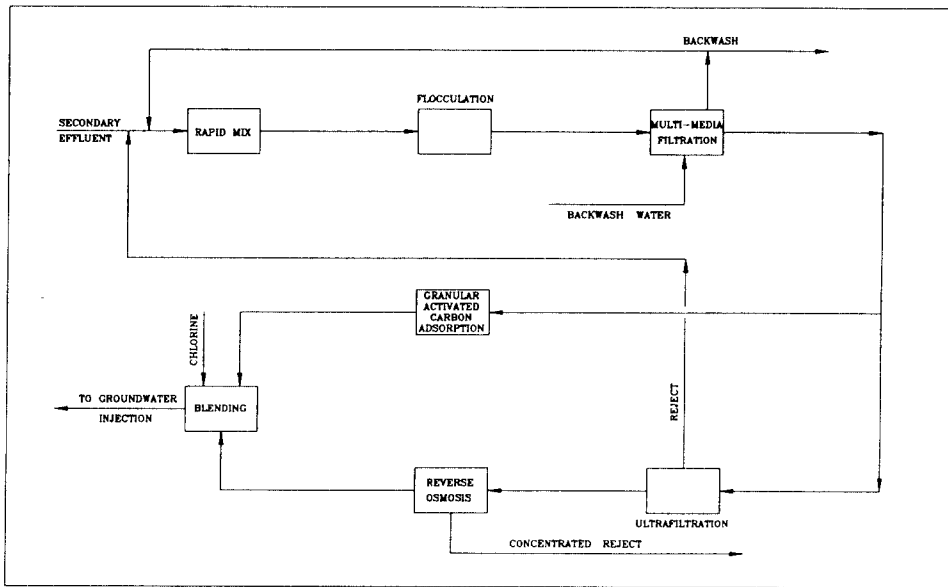


Figure 11. Advanced Process Flow Diagram including UF Membrane Module

전처리 System에서 Lime Clarification이 생략된 경우, RO Feedwater는 이 속에 함유된 Biofoulant가 Membrane 표면에 Gel층을 형성하였고, 이 Gel층은 Membrane Flux를 급격히 감소시켰다.

UF Membrane Module을 통과한 처리수질은 탁도 90% 이상, Bacteria 99% 이상 제거되었으며, Feedwater중의 TDS가 낮은 경우에 있어 RO Module없이도 수질 향상 목적에 사용될 수 있음이 입증되었다.

이와같은 전처리 System의 개선에 관한 연구는, 더 나아가 오존이나 오존과 자외선을 조합한 방법에 의해 TOC Reduction 효율을 평가하기 위해 연구 Project를 진행중에 있다.

3-3-3 Cost Estimates

상기의 세가지 다른 Process Type의 경우에 대한 Cost Estimates를 비교 검토하였으며, 이에 대한 결과를 요약하여 표 14에 나타내었다.

Table 14. Summary of Cost Estimates A, B, and C
15 mgd Reclaimed Municipal Wastewater

Item	A	B	C
Annual O & M Cost	\$ 3,009,659	\$ 2,142,974	\$ 2,626,968
Annual Capital Recovery	2,827,560	2,043,315	2,226,135
Total Estimated Cost	\$ 5,837,219	\$ 4,186,289	\$ 4,853,103
Annual Water Production			
1,000 Gallons	4,927,500	4,927,500	4,927,500
Acre Feet	15,120	15,120	15,120
Reclaimed Water Cost			
\$ / 1,000 Gallons	\$ 1.18	\$ 0.85	\$ 0.98
\$ / Acre Foot	\$ 386.06	\$ 276.87	\$ 320.97

A : Present Process System

B : Simplified Process System without Lime Clarification

C : Advanced Process System including U/F Membrane Module

* Basis & Assumptions

㉠ Feedwater의 TDS : 1000mg/l, 수온 : 75°F

㉡ 회수율 : 85%, Plant용량 : 15mgd

㉢ Chemicals의 단가 : 90% Lime : US\$ 93/ton
 96% 황산 : US\$ 85/ton
 SHMP : US\$ 1.25/lb
 Chlorine : US\$ 302/ton

㉣ 전력비용 : US\$ 0.08/kwh

㉤ Capital Recovery : 기간 : 20년, 이자율 : 8%

㉥ Plant 부지 정지 및 토지 매입 Cost는 포함 되어있지않음

㉦ UF Module Cost : US\$ 600(OD : 8in, Length : 40in)

즉, 현재의 Process System과 Lime Clarification을 생략한 System에 대한 처리 단가를 비교하여 볼때, 전자는 US\$ 386/Acreft이고, 후자는 US\$ 277/Acreft로 28% 비용절감 효과를 얻을 수 있었다. 한편, 후자의 경우 전처리가 불충분하여 UF 장치를 도입할 경우 처리비용은 US\$ 321/Acreft로, 현재 Process System 대비 17%의 비용절감 효과를 얻을 수 있었다.

본 실험 결과는 부지 정치 및 토지 매입 Cost가 제외 되었으므로, 이를 포함시킨다면 전처리 과정에서 Lime Clarification 사용은, 직접 Filtration과 UF 적용 System과 비교하여 처리비용이 훨씬 증가할 것이다.

4. 결 론

- 1) Water Factory 21(WF 21)은 생물학적 처리를 거친 도시 하수를 RO Membrane System을 적용하여 해수 침투를 막기위한 지하수지층의 주입수로 이용하고자할때, 그 가능성에 대하여 실험을 실시하였다.
- 2) RO Membrane System은 전처리공정과 RO Module로 구성되어 있는데, 각각의 전처리공정과 R/O Module의 하수중에 함유된 여러 오염물질에 대한 처리효율에 대하여 실험을 행하였다.
- 3) Pilot 실험에서는, 전처리공정을 단순화한 Lime/RO 공정만으로도 실험을 성공적으로 수행하였으며, 이 실험에서 전처리공정중 Air Stripping, Mixed Media Filtration, A/C adsorption등이 생략되어 상당한 비용절감 효과를 얻을 수 있었다.
- 4) Pilot 실험에서 RO Module에 새로운 Thin film composite(TFC) Polyamide(PA) Membrane을 적용하였다. 실험결과, 매우 높은 염제거율을 나타내었으며, 유기물 및 질산염 등도 효과적으로 제거되었다.
- 5) 저압(200~250psi), 고 Flux용 Membrane을 사용한 Pilot 실험에서, 염제거율은 90% 이상, Flux는 11~13 gpm에 이르렀다. 하지만 저압 Membrane 적용 가능성은 성공적이었지만, Feed의 유속이 증가함에 따른 Membrane 표면의 Fouling 가속으로 인하여 시간이 경과함에 따라 Flux가 급격히 감소하였다.
- 6) 3년여간의 Full Scale Plant(5mgd)의 운전결과, RO Membrane System을 이용한 하수의 재생공정은 하수중의 오염물질, 즉, 무기물, 중금속, 세균등에 대하여 매우 효과적으로 제거할 수 있음이 입증되었다.
- 7) 전처리 System의 효율성을 증가시키기 위한 Modification으로써 Lime Clarification을 생략한 경우와, Bio-foulant 문제를 해결키 위해 UF Membrane Module을 적용시킨 System을 비교한 결과, 처리 비용면에서, 현재의 System과 비교하여 전자는 28%, 후자는 17%의 비용절감 효과를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) Evaluation of Membrane Processes and Their Role in Wastewater Reclamation, Orange County Water District to OWRT, November Volume I(1979).
- 2) Evaluation of Membrane Processes and Their Role in Wastewater Reclamation, Orange County Waer District Report to OWRT, November Volume II(1980).
- 3) Evaluation of Membrane Processes and Their Role in Wastewater Reclamation, Orange County Waer District Report to OWRT, November Volume III(1981).
- 4) D.G. Argo and J.G. Moutes, Wastewater Reclamation by Reverse Osmosis, JWPCF, 51, 590(1979)
- 5) R.G. Sudak and LNusbaum, System Design Parameters for Municipal Wastewater Reclamation by Reverse Osmosis, of the Water Reuse Symposium, August(1984)
- 6) G.S. Richard, D. William and G.R. Martin, "Municipal Wastewater Reclamation and Reverse Osmosis" National Water Supply Improvement Association, Volume I, 225(1990)