
산업폐수 재활용에 관한
기술 및 경제성 평가



윤 창 한 박 사
(생산기술연구원)

제 1 장 서 론

현대 산업에서의 공장건설은 규모가 대형화되고 상품품질의 고급화를 요구하므로 공장용수는 대용량과 고품질을 필요로 하고 있으며 생활용수 역시 인구의 증가와 인간의 문화수준 향상으로 수요량이 점차 증가되고 있으며 고품질을 요한다. 그러나 공장용수와 생활용수의 공급원은 일반적으로 상수도, 지하수(천정호수 및 심정호수) 및 지표수(하천, 호소 및 강물)등으로 한정되어 있으므로 가까운 장래에 물(공업, 농업 및 생활용수)의 부족현상이 발생할 것으로 전망되며 또한 지표수와 지하수의 수질은 공장폐수와 생활오수로 인해 계속 나빠질 것으로 예상된다.

표 1-1. 용수 수용량

(단위 : 백만톤)

연 도	1994	2001	2006	2011
용수 수요량	29,901	33,640	34,991	36,652
용수 공급량	32,319	34,290	34,541	34,655
과부족량	2,318	650	-450	-1,997

☞참고자료 :물관리종합대책(1996. 8. 12)

따라서 물의 부족현상과 공장폐수, 생활오수로 인한 지표수와 지하수의 수질악화는 상수도료 및 하수도료를 상승시키고 공장용수화를 위한 정화시설 비용을 인상시키고 있다. 또한 정부에서는 물의 오염을 줄이기 위하여 각 업체에 대해서 오염물질 절감부하량 만큼 배출부담금(Effluent Charge)을 적게 부담시키는 배출허용기준을 농도규제에서 총량규제로 전환함과 동시에 중수도를 설치한 업체에 대하여 용수비 감면 및 조세감면 혜택을 주고 있다. 그러므로 각 공장에서는 공업용수를 절약하기 위하여 공정개선, 생산공정 개선, 부대시설의 개선등 환경청정기술 개발에 노력을 하고 있으며 또한 폐수를 재사용하기위한 방법을 고려하고 있다.

폐수재사용 System Process 선정방법은 폐수의 수질과 양, 처리수의 용도, 운전유지관리비, 운전용이성, 물의 회수율, 용지 사용면적, 시설투자비(감가상각비), 대외여건 등을 고려하여 선정된다.

현재 적용되고 있는 폐수재사용 Unit Process는 소독(염소처리, 오존처리, 자선방사법), 여과(Sand Filter, Multi Media Filter),활성탄 흡착(Activated Carbon Filter), Microfiltration(CMF, SDMF, Thread Filter), Ultratfiltration(외압형, 냉압형), Nanofiltration, Reverse Osmosis(Disc type, Spiral Wound) 등이 사용되고 있으며 설비투자의 고려사항에 따라 Unit Process를 알맞게 조합하여 적용함으로써 설치목적을 달성할 수 있다.

본 자료는 반도체 생산공장, 타이어 생산공장, 자동차 생산공장, 음료수 Can 생산공장 등에 설치되어 있는 폐수재사용 Process들의 현황을 분석하여 향후 폐수재사용관련 설비를 설치하고자 하는 업체에 참고할 수 있는 자료가 되도록 작성하였다.

제 2 장 관련기술 조사

RO의 전처리기술로는 용해도의 조정과 화학반응(산화, 침전반응, 킬레이트화)을 일으키는 화학약품의 첨가에 의해 방지하는 방법과 사전에 문제를 야기하는 물질을 제거하는 방법으로 분류할 수 있다. 본 내용에서는 주로 사전에 문제를 야기하는 물질을 제거하는 기술과 RO기술을 요약하여 표 2-1과 내용에 설명하였다.

표 2-1. 폐수재활용기술

처리공정	제거대상	처리기술	막 유입수 기준
소독설비	미생물	염소처리, 오존처리, 자외선방사법(UV)	10 ³ ATP 이하
여과설비	부유물질, Colloid성 물질	모래여과, MMF, 정밀여과(TMF, SDMF, CMF) 한외여과(내압형, 외압형)	SDI 5이하
유기물제거설비	유기물	활성탄흡착, 고급산화(AOP)	?
경수연화설비	경도성분	Lime softening, Nano여과	총경도 150ppm 미만
염류제거설비	염류	이온교환, 역삼투(R/O), 전기투석(ED/EDR)	-

MMF : Multi Media Filter

TMF : Thread Filter

SDMF : Stacked Disc type Microfiltration

CMF : Continuous Microfiltration

2.1 소독

소독(Disinfection)은 미생물을 제거하기 위하여 사용되는 공정으로써 주로 사용되는 공정은 염소처리, 오존처리, 자외선 방사법(UV Irradaition)등이 있으며 각 처리법의 특징은 표 2-2와 같다.

표 2-2. 소독의 종류 및 특징

처리법	특징
염소처리	<ul style="list-style-type: none"> · 현재 상수와 폐수의 소독 대부분에 사용되고 있음. · 낮은 농도에서도 효과적이며, 가격이 저렴. · 충분한 양을 투여하면 잔류염소 형태로 존재하여 소독효과가 일정시간 동안 유지. · 바람직하지 못한 결과를 초래하는 Trihalomethane과 염소화된 유기 생성물 등이 발견.
오존처리	<ul style="list-style-type: none"> · 유기성 산화, 살균, 탈색에 효과적이다. · 과량 사용에서 오는 2차오염의 우려도 없으며, Fe, Mn의 산화제거 및 계면활성제도 분해시킬 수 있다. · 전처리의 경우 유기물의 부하절감시 사용할 수 있으며 후처리시에는 살균, 잔류유기물(BOD, COD)의 제거 및 탈취, 탈색의 목적으로 사용 가능.
자외선 방사법	<ul style="list-style-type: none"> · 폐수와 상수의 소독에 효과적이거나 탁도 또는 SS가 존재할 경우 처리효율이 떨어짐.

2.2 여과(Sand Filter, Multi Media Filter)

폐수처리중 용해성 오염물질(0.001 μ m 이하)이 아닌 Colloid성 입자크기 이상 오염물이 함유되었을 경우에만 적용이 가능하다. Sand를 Tank에 충전한 Sand Filter와 Anthracite, Sand, Garnet을 Tank에 충전한 Multi Media Filter가 주로 사용되며 설비가 단순하여 운전이 쉽고 운전비가 적게 소요된다.

2.3 활성탄 흡착(Granular Activated Carbon Filter)

흡착이란 용액중의 분자가 물리적 또는 화학적 결합력에 의해 고체 표면에 붙는 현상으로서 이 때 분자가 부착할 수 있도록 표면을 제공하는 물질을 흡착제라고 하고 표면에 부착되는 물질을 피흡착제라고 한다. 흡착제는 다공성으로서 내부 표면이 크고 흡착성이 좋은 고체 물질인데 일반적으로 활성탄, 실리카겔, 활성알루미나 등이 사용되어 진다. 과거에는 폐수처리에 흡착공정이 그다지 사용되지 않았으나 보다 나은 수질이 요구되면서 최근에는 활성탄 흡착 공정의 이용이 크게 증가되고 있다.

2.4 Microfiltration(CMF, SDMF, Thread Filter)

정밀여과법이라고 불리워지는 Microfiltration은 크기가 0.1~10 μ m정도인 입자를 분리하는 공정으로 Pore Size가 0.01~10 μ m정도이고 주로 입자를 분리대상으로 하는 점이 한외 여과법(Ultrafiltration)과 구별된다.

다음의 표 2-3에 최근들어 새로 개발되어진 자동역세형 MF의 특징을 요약하여 놓은 것이다.

표 2-3. 자동역세형 MF의 특징

MF type	Manufacturer	Min. pore size(μm)	Backwash action	Volume of Reject	Price	Size	Feed SS Conc.
CMF	Memtec	0.2	Good	Large	High	Small	Very low
SDMF	Filtrex	3	Very high	Small	Med.	Small	High Low in precoat
TMF	Filtration	3	Very poor	Large	High	Small	Very low

CMF : Continuous MF

SDMF : Stacked Disc MF

TMF : Thread type MF

2.5 Ultrafiltration

Ultrafiltration이란 분자크기가 10~10,000Å에 달하는 Macromolecule이나 콜로이드 입자를 분리하는 공정으로 막의 Pore Size는 20~500Å 범위이다. 한외여과막은 막의 형태에 따라 Tubular Type, Spiral Wound Type, Hollow Fiber Type, Plate and Frame Type으로 분류되어진다. 주로 수처리에는 Hollow Fiber Type이 사용되고 있으며 최근 일본의 Toray사에서는 외압형의 Hollow Fiber Type막을 개발하여 역세를 쉽게 하였다.

2.6 Reverse Osmosis

역삼투압법(RO)이란 역삼투현상을 이용하여 폐수중의 수질(저분자 및 고분자, 이온물질)을 반투막을 경계로 분리시키는 방법으로 막의 특성, 폐수의 물리·화학적 특성 그리고 압력에 따라 효과가 발생한다.

R/O는 한외여과막과 같이 막의 형태에 따라 Hollow Fiber, Tubular, Spiral Wound, Disc Tube 및 Plate & Frame으로 분류되며 R/O운전시 유입수 성상에서 중요한 기준인자는 미생물수, 경도, 유기물농도, Silt Density Index(SDI)등이 있다. 이중 SDI가 특히 중요시되며 막의 형태에 따라 SDI기준은 Spiral Wound type, Hollow Fiber type은 SDI₁₅ 5이하, Tubular SDI 10이하, Disc type의 SDI는 15이하 이어야 한다. 따라서 전처리시설 선정시 상기 SDI 조건을 만족시킬 수 있는 Process를 선정하여야 한다.

제 3 장 폐수재사용 System 사례조사

막을 이용한 폐수재사용 System은 신수사용량을 줄여 용수공급 단가를 낮추는 목적으로 적용되는 면이 있으나 현재는 지역특성상 폐수방류가 어렵거나 배출부담금이 높은 지역에 폐수처리수를 무방류 또는 저부하 방류하여 대외여건을 달성하는 목적으로 적용되고 있다. 따라서 폐수재사용 System 도입 결정시 알맞은 사용처를 선정하지 못하는 경향이 있다. 또한 폐수재사용 System 도입시 System에 대한 정확한 기술검토가 이루어지지 못하여 많은 시행착오를 겪는 경향이 있으므로 이에 대한 주의가 필요하다.

3.1 반도체 생산공장

3.1.1 폐수 및 system의 특징

- 1) Silicon wafer 세척폐수로 원수 중 과수의 함량이 300 ppm 정도로 높아 이에 의해 COD가 유발되고 있음.
- 2) Silicon wafer 공장의 세척 수는 극초순수(17 MΩ 이상)를 사용하여야 하기 때문에 R/O 여과수는 2차에 걸친 Mixed Bed로 재 처리하고 있으며 R/O 전처리에 활성탄 흡착 및 Ozone/UV 등을 이용하여 COD를 제거하고 있으나 TOC 제거는 R/O 및 R/O 후단의 Mixed Bed에 의존하고 있음.
- 3) 1994년 11월에 system을 완공 하였으나 세척폐수 외에 불산 폐수, 연마폐수 등이 섞인 종합폐수를 처리하다 보니 막오염이 심하여 이를 폐수처리장으로 분리 제외시키고 Ozone/UV 및 활성탄 흡착탑을 전처리에 추가 시킴으로써 1995년 8월 부터 정상 가동됨.

3.1.2 폐수 처리 공정도

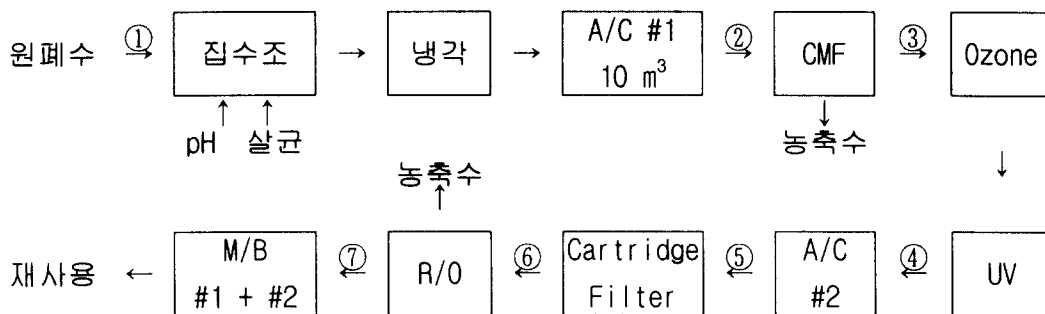


그림 3-1. 반도체 생산공장의 폐수재사용 System

3.1.3 수질

표 3-1. 반도체 생산공장 폐수재사용 Syatem의 수질

항목	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
Q(m ³ /d)	1,400		1,260				880
COD(ppm)	200	10	10	0.5			
TOC(ppm)						30	4
Cond.(μ S/cm)						500	50
SS(ppm)	80	30	0				
SD I ₁₅			2-2.8	2.8	Max.	4-5	

3.1.4 운전 조건

- 1) 온도: 25℃
- 2) CMF 역세주기: 15 분
- 3) CMF CIP주기: 7 일
- 4) CMF recovery rate: 90-95 %
- 5) R/O feed 압력: 15 Kg/cm
- 6) R/O array: 8" module 총72개
1단(6 elements/train×4 trains)×2단(6 elements/train×2 trains)×2 sets
- 7) Cartridge filter 교환주기: 7 일
- 8) CIP 주기: 3 개월
- 9) R/O recovery rate: 70 %

3.1.5 각 장치 특성 및 Spec.

1) A/C #1 - COD 흡착 및 분해

활성탄에 미생물을 부착시킨 미생물 고정형 Bio-reactor로 폐수에 용존되어 있는 유기물질 분해를 목적으로 설치하였으나 폐수에 혼입되어 있는 과수(300 ppm)에 의해 미생물 부착이 안될 뿐 아니라 후단의 CMF 역세에 악영향을 미치는 관계로 현재는 활성탄 흡착탑으로만 사용하고 있음.

흡착된 유기물질은 폐수에 용존되어 있는 과수에 의해 분해되고 있는 것으로 추정됨.

2) CMF(Continuous Micro Filtration) - SS 제거

- ① 평균 기공크기: 0.2 μ m
- ② 재질: polypropylene
- ③ Module type: hollow fiber

- ④ 장치가격: 7억원
- 3) Ozone/UV - COD 및 TOC 분해
 - ① Ozone 발생량: 1kg of ozone/hr
 - ② Ozone generator 제작사: (주)챔푸
 - ③ Ozone contactor(reactor) size: 1.5 m ϕ × 5 mL
 - ④ Ozone contactor의 폐수체류시간(RT): 1 시간
 - ⑤ UV 파장: 185 nm
 - ⑥ 유출수의 DO: 20 ppm
- 4) A/C #2 - 잔존 과수 분해
 폐수에 잔존되어 있는 용존산소에 의해 미생물이 번식하고 있음.
- 5) Cartridge Filter - SS 제거
 - ① 평균 기공크기: absolute 20 μ m (normal 5 μ m)
 - ② Module type: Cartridge type
 - ③ Size: 4 " ϕ × 20 "L × 19 ea × 3 sets
- 6) R/O system - TOC 및 salt 제거
 유입수의 압력은 15 기압이며 원설계에서는 3단 설제로 고농축을 목표로 하였으나 현재는 2단으로 운전되고 있음. (운전에 문제가 있었던 것으로 추정됨.)

3.1.6 경제성 분석

- 1) R/O system까지의 투자비: 20 억원
- 2) 운전비: 1,600 원/생산수 톤(감가상각, 이자, 인건비 포함)
 108 원/생산수 톤(전력비, 막교체비, 약품비)

☞ 감가상각(10%/년)	:	2 억원/년
이 자(10%/년)	:	2 억원/년
인건비(220만원/달/인 × 3인 × 12달)	:	72.6 백만원/년

총 계 : 472.6 백만원/년

3.1.7 결론

본 R/O system을 정상가동 하기 까지에는 10개월의 시행오차를 있었고 이 동안에 전 membrane을 교체하는 등의 큰 손실도 있었지만 전사 적인 노력에 의해 현재는 정상적인 운전을 하고 있다. P사의 경우 지난 3년간 반도체 업계의 호황에 힘입어 92년 공장 규모의 3배로 증설되었으며 이 과정에서 수원의 확보는 절대절명의 위기 이었다. 실제로 R/O system에 의한 폐수재활용이 없었다면 2번째 증설은 물 공급 부족으로 불가능 했었다.

- 1) P사 R/O system에 의한 폐수 재사용 공정 가동에 성공 할 수 있었던 가장 큰 요인은 R/O system에 적절한 폐수를 분리한 후 처리하였다는 것과 그 폐수에 적절한 전처리 시설을 과감히 투자하였기 때문인 것으로 판단됨.
- 2) 폐수전처리 성능이 타사와 비교가 안될 정도로 고급화 되어 있어 R/O system 유입수의 수질 향상에 의해 전체적인 운전비가 생산수 톤당 110원 정도로 저감 되어 진 것으로 판단됨.

3.2 타이어 생산공장(K사)

3.2.1 폐수 및 system의 특징

- 1) 원폐수의 COD 유발물질은 carbon black과 같은 SS 물질이 주종이며 이외에 N-H에 해당되는 용존성 oil임.
- 2) Sand Filter(S/F) 및 Activated Carbon Filter(A/C)에 의해 COD가 5ppm 정도로 처리되고 있음.
- 3) 원 설계는 Electro-Dialysis(E/D)까지 처리했을 때 96% 물 회수를 목표로 하고 있고 농축수는 Drum Dryer(D/D)로 증발시키는 것이었으나 현재는 E/D의 trouble 및 운전 단가 상승에 의해 약 60%의 물만 R/O system에서 회수하고 농축수는 방류 하고 있음.

3.2.2 폐수 처리 공정도

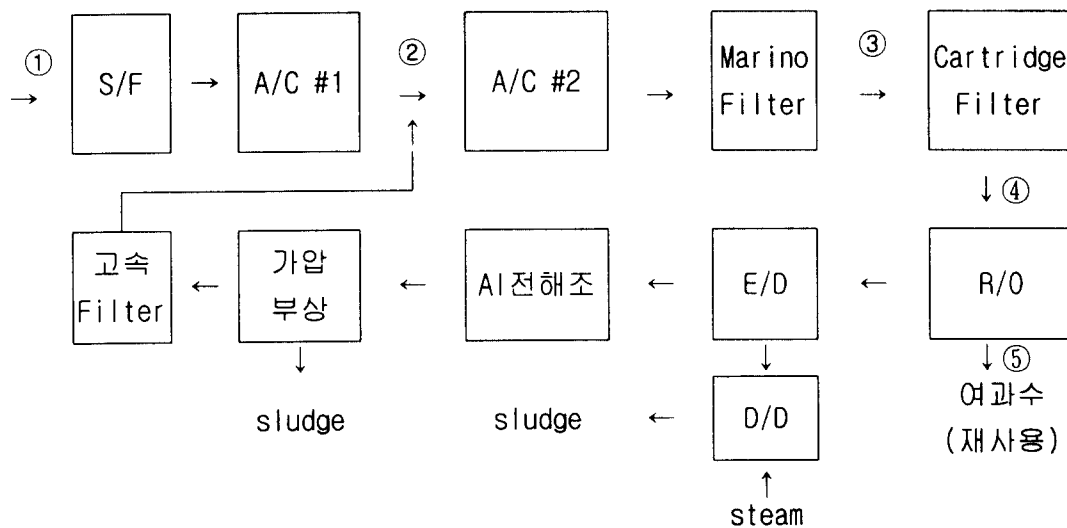


그림 3-2. 타이어 생산공장 폐수재사용 System

3.2.3 수질

표 3-2. 타이어 생산공장 폐수재사용 Syatem의 수질

항목	①	②	③	④	⑤
Q (ton/day)	240-300	←	←	←	144-180
BOD (ppm)	95	4			1
COD _{Mn} (ppm)	150	4	2.5	2.7	1.1
COD _{Cr} (ppm)			3.5	4.0	
SS (ppm)	120	3	0.7	0.5	
SD ₁₅			27.8	16.3	
SD ₅			12.5	11.0	
N-H (ppm)	28	0.5			
TDS (ppm)		1,500			81.5
Cond. (μS/cm)		2,000			95.9
T-hardness	117	140			2
TOC (ppm)		1,607			
Turbidity		2-4			

3.2.4 운전조건

- 1) 온도: 34℃
- 2) R/O feed 압력: 11.5 Kg/cm
- 3) Cartridge filter 교환주기: 15 일
- 4) CIP 주기: 28 일
- 5) R/O recovery rate: 60 %

3.2.5 결론

- 1) R/O 유입수 수질이 대단히 좋아 운전원의 전문지식이 필요 없을 정도임.
- 2) E/D system의 운전 불안정으로 R/O system만 운전 중임.
- 3) SDI값이 높으며 SDI₅를 10정도로 낮출 수 있는 전처리 장비가 필요함.

3.3 자동차 생산공장(H사)

3.3.1 재활용 설비 도입 배경

- 1) 공장 건설 당시에는 폐수를 COD_{Mn} 10이하로 처리후 육상관로 및 해저관로를 설치하여 바다에 방류하기로 계획.
- 2) 그러나, 관로매설비용이 120억으로 매우 고가이므로 폐수 무방류 설비안 검토.
- 3) 폐수 무방류 설비 투자안 검토결과 투자비 60억.

3.3.2 폐수 특성 및 system 개요

- 1) 오폐수 병합으로 설계유량은 5,000m³/day이며, 오폐수의 비율은 1 : 2로 설정
- 2) 현재 폐수 발생량이 2,000m³/day이며 오폐수 비율은 1 : 1
- 3) 원폐수의 COD_{Mn}은 300ppm으로 폐수처리 공정에서 50ppm이하로 처리가능
- 4) RO 유입수의 전도도는 3,000~4,000 μS/cm, 경도는 max. 200 ppm
- 5) System은 활성탄 흡착탑 → 약산성 양이온 교환수지(킬레이트수지) → 3μm cartridge filter → RO로 구성되어 있으며, 농축수 처리는 vacuum evaporator → vacuum dryer로 구성.
- 6) System 구성상 SS 또는 colloid성 물질 제거설비가 없다고 할 수 있으나, 폐수 내에 SS가 거의 존재하지 않아 3μm cartridge filter의 교체주기가 월 1회 정도로 매우 양호.
- 7) RO membrane의 유입수 온도는 heater를 사용하여 25℃로 조정.

3.3.3 폐수처리 공정도

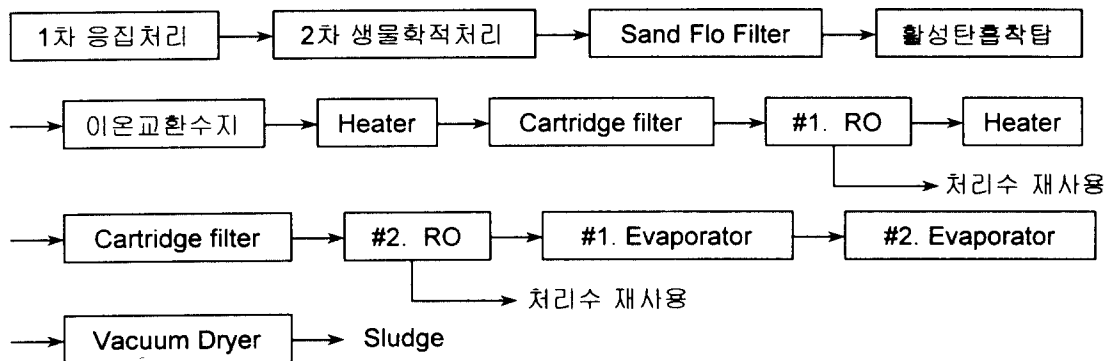


그림 3-3. 자동차 생산공장 폐수재사용 System

3.3.4 System 특성 및 운전현황

- 1) 활성탄 흡착탑은 재생로까지 갖추고 있으며, service중 연속 재생방식.
- 2) 경도를 낮추기 위해 약산성 양이온 교환수지(킬레이트 수지) 사용.
- 3) RO
 - ① 운전온도 : 25℃
 - ② 배열
 - No.1 RO : Filmtec BW30 12 : 6 : 3 × 2 blocks (6 elements/vessel)
 - No.2 RO : Filmtec SW30 8 × 1 block (4 elements/vessel)

③ 운전압력

No.1 RO : 13 kg/cm², No.2 RO : 40 kg/cm²

④ 유입압력 조절 : 유입 pump와 membrane사이에 자동 control v/v를 설치하여 조절.

⑤ 회수율은 95%로 설계하였으나 현재 80% 정도로 운전

⑥ CIP는 2~3주 1회 정기적으로 하고 있으며 사용약품은 NaOH, Citric Acid 사용.

4) 증발농축기

① 1차, 2차 증발 농축후 3차는 vacuum dryer로 구성

② 현재는 농축수를 원수조로 보내고 있으나 우수가 함께 유입되어 전도도의 농축현상이 발생하고 있지 않음.

3.3.5 결 론

96년 8월 폐수 재활용 system을 운전 후 2년이 되고 있으나 특별한 문제없이 운전되고 있으며, 폐수 재활용 system으로 인하여 현재 환경친화기업으로 지정되어 있음.

1) H사의 폐수재활용 system이 성공적으로 운전되고 있는 이유는 설비의 safety factor를 크게하여 농축수를 안정적으로 처리하기 때문인 것으로 판단됨.

2) 폐수 재활용 system의 모든 장치와 배관을 일본에서 들여와 설치하였으며, 설비를 견학한 후 설계 및 시공 등의 engineering측면이 매우 잘 되었다는 인상을 받음.

3) 폐수 재활용 설비는 토목 공사 제외한 투자비가 60억이며 운전비는 RO 400 원/m³, 증발농축비 400 원/m³(인건비 포함).

3.4. 음료수 Can 생산공장(L사)

3.4.1 폐수 특성 및 system 개요

1) 폐수발생량이 700m³/day이며 유분(90ppm)을 함유하고 생분해성 유기물질이 낮게 포함되어 있음.

2) 원수를 응집부상처리설비로 처리한 결과 유분은 90ppm에서 1ppm이하로 제거되었으며 COD (140ppm)은 60% 제거됨.

3) 응집부상처리수를 MMF와 A/C Filter로 처리할 경우 입자의 제거특성으로 SDI 값이 5이하를 나타냄.

3.4.2 폐수재활용 공정도

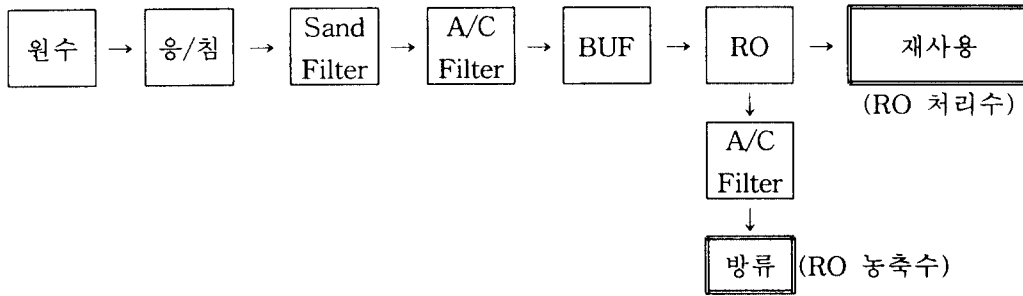


그림 3-4. 음료수 Can 생산공장 폐수재사용 System

3.4.3 수질

표 3-3. 음료수 Can 생산공장 폐수재사용 System의 수질

		원수	응 침 처리수	Sand filter 처리수	A/C filter 처리수	BUF 처리수	RO 처리수	RO농축수→ A/C filter
COD _{Cr}	측정값 (ppm)	362	142	135	10	10	5	32→18
	제거율 (%)	-	60	5	92	-	-	43
COD _{Mn}	측정값 (ppm)	52	36	34	3	3	1	10→5
	제거율 (%)	-	30	7	91	-	-	50
Turbidity	측정값 (ppm)	-	0.53	0.45	0.35	0.30	0.15	2.90→2.86
	제거율 (%)	-	-	15	22	-	50	3
TDS	측정값 (ppm)	1,580	1,690	1,690	1,680	1,680	80	4,700→4,650
	제거율 (%)	-	-	-	-	-	95	-

3.4.4 System 특성 및 운전현황

- 1) 활성탄 흡착탑의 COD 제거효율이 높으므로 교체주기가 1개월.
- 2) BUF처리수의 SDI는 3이하를 나타냄.
- 3) RO

① 운전온도 : 25℃

② 배열

No.1 RO : Filmtec BW30 3 : 2 : 1 × 1 blocks (6 elements/vessel)

③ 운전압력

No.1 RO : 13 kg/cm²

④ 회수율은 75%로 운전중.

3.4.5 결 론

98년 12월 폐수 재활용 system을 운전 후 특별한 문제없이 운전되고 있으며 폐수 재활용설비의 투자비는 8억원(응집부상설비 포함)이며 운전비는 약 800 원/m³(응집 부상, 활성탄처리 운전비 570원/m³)이 소요되고 있음.