

---

---

분리막공정을 이용한 재활용  
국외기술 현황 및 사례 연구

---

---



김 정 학 박사  
(SK 케미칼 중앙연구소)

# 분리막공정을 이용한 재활용 국외기술 현황 및 사례연구

SK 케미칼 중앙연구소  
김 정 학

세계의 도처에서 환경문제와 함께 수자원의 오염과 부족현상으로 인하여 물이용에 대한 희비가 엇갈리고 있다. 물부족 및 오염현상은 여러가지 요인이 작용하여 일어나고 있는데 세계인구의 폭발적인 증가, 무분별한 개발, 인구집중화, 부적절한 수자원의 관리, 가용수자원의 환경오염, 이상기후로 인해 물사정이 악화일로에 있다.

지구의 표면에는 14억 1천만 km<sup>3</sup>의 물이 덮여 있으며 지구의 총면적중 71%에 달한다. 그러나 98.4%가 해수이므로 담수는 겨우 1.6%이며 이중 98%가 얼음이므로 실제 사용가능한 물은 많지 않다고 볼 수 있다. 지역별의 수질오염과 편중된 강우등에 의해 이제는 처리없이 사용할 수 있는 물은 거의 존재하지 않는 현실이며 수처리기술의 도입역사 100년 끝에 이제는 고도수처리, 재활용등의 기술이 요구되고 있는 실정이다.

현재 사용하고 버리는 물을 재활용해야하는 지역은 인구가 집중된 지역, 편중된 강우 및 수자원의 부족으로 수급이 원활치 않은 지역, 지구사막화, 온난화 및 이상기후의 현상으로 영향을 받는지역 등으로서 사용해야 할 물공급량의 절대부족 현상을 나타내는 지역이다. 또한 생산공정에 필요한 Utility의 비용이 급증하는 가운데, 특히 수처리 비용 및 폐수처리 비용 또는 환경보존을 위한 부담액등으로 경쟁력에 문제가 있으며 계절적으로 강우량의 변화로 인해 수질의 변동이 크고 갈수기에는 심각한 물부족 문제를 안고 있는 기업에서 재활용에 대한 수요가 증가되고 있다.

본고에서는 해외에서 적용되고 있는 물재활용기술과 현황에 대해 소개하고자 하며 특히 일본에서 성공적으로 수행된 Apua Renaissance Project 및 중수도 현황과 미국 California 주 Orange County 의 Water Factory 21의 폐수재활용 현황에 대해 사례를 중심으로 하여 검토해 보고자 한다.

# 1. Apua Renaissance project

## 1.1 개요

日本の 通商産業省에서는 1985 년 부터 6 개년 계획으로 水綜合再生利用 System 의 연구개발(Apua Renaissance '90 계획)을 실시하였다. 수종합재생이용 시스템은 Bioreactor 에 분리막을 복합화시켜 고농도의 미생물을 반응에 사용하는 방법으로서 폐수중의 유기물로부터 Methane 을 회수하고 오니의 발생을 최소화시키며 우수한 수질의 처리수를 얻을 수 있는 것이 특징이다. System 의 개념도는 그림 1.1 과 같다.

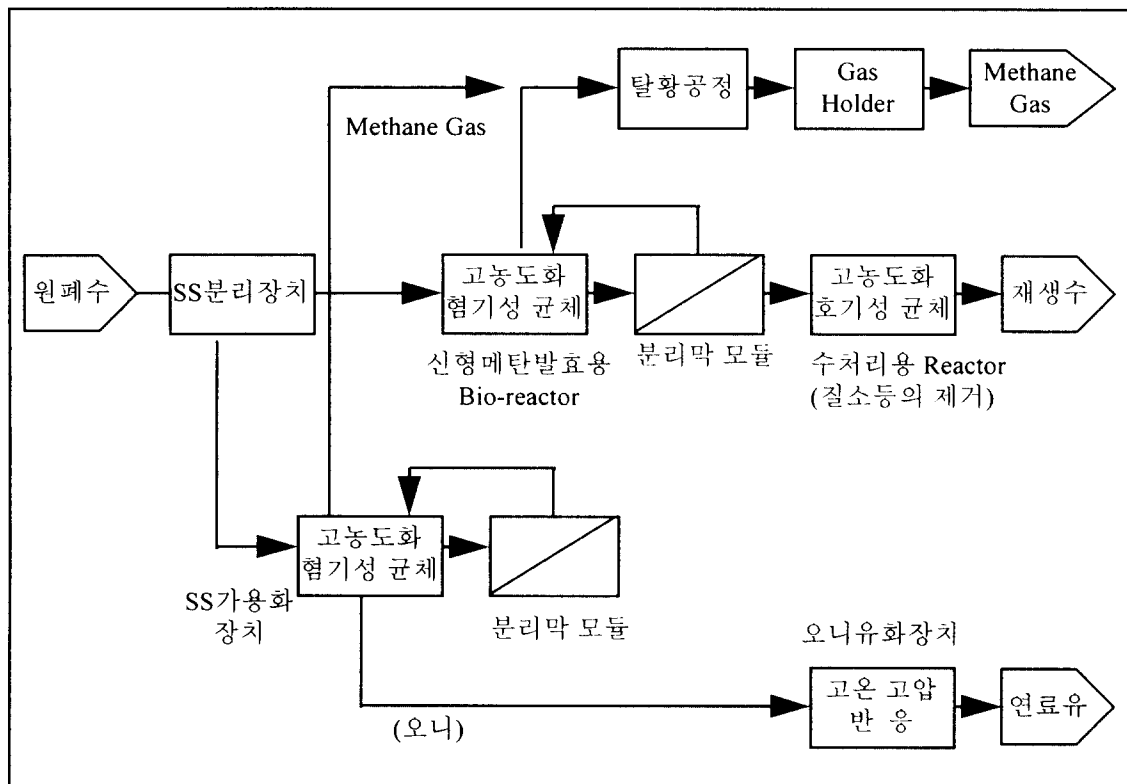


그림 1.1 水綜合再生利用 System 의 개념도

## 1.2 연구개발 항목

이와 같이 종합적인 물재사용 Project 가 7 가지 종류의 폐수를 대상으로 Beach-scale 의 소형시험장치에 의한 운전연구와 2 기의 Pilot Plant 에 의해 실증운전을 실시하였다. 본 Project 의 연구개발 항목은 다음과 같다.

### (1) 혐기성 Bio-reactor 개발(요소기술)

고효율의 Methane 발효 가능한 반응기로서 Methane gas 의 회수율을 높이고 오니발생을 최소화 시키는 공정.

(2)막모듈개발(요소기술)

SS가 높은 폐수를 처리할 수 있고 오염에 강하며 세정이 용이한 분리막 모듈로서 유기막 3가지, 무기막 3가지 평가.

(3)계측제어시스템(요소기술)

형광화상처리에 의한 Methane 생성균의 활성도 측정기술, Membrane Bioreactor의 Simulation.

(4)현탁물 분리 농축기술의 개발(요소기술)

현탁물을 분리하여 별도 가용화 및 Methane 발효처리를 위한 분리농축장치. PU Foam을 포집재로 사용.

(5)수처리 Reactor 개발

하수, 폐수에 함유된 질소 및 유기물을 효율적으로 제거하여 재사용 가능한 처리수를 얻는 기술로서 회전평막 Module을 사용한 생물학적 질소제거 Bioreactor

(6)오니油化기술 개발

배출유기성오니를 고온, 고압하(300℃, 100 kg/cm<sup>2</sup>)에서 촉매없이 열화학적 처리로 重油狀의 액체연료를 얻는 기술.

(7)Bench Plant의 운전연구(시스템화 연구)

(8)Pilot Plant의 운전연구(실증연구)

저농도 및 고농도 폐수에 대한 Pilot Test 실시

### 1.3 중점연구개발내용 및 성과

#### 1.3.1 혐기성 Bioreactor

Apua Renaissance 90 Project에서는 8가지의 유형에 의한 혐기성 Bioreactor를 모델로 하여 성능을 평가하였다. 사용된 방법 및 주요결과는 다음과 같다.

표 1-1. Apua Renaissance 90 Project 혐기성 Bioreactor 연구결과

Bioreactor 형태	처 리 방 법	주 요 결 과															
Sludge Blanket 형 Bioreactor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 반응조 저부에서 폐수유입 상승류와 발생가스의 유동에 의해 부착 담체 없이 미생물 응집화, 입상화</li> <li>- 고농도 미생물 유지, 높은 용적 부하가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- MLVSS 변화 (mg/ l ) <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td></td> <td>초기</td> <td>6 개월후</td> </tr> <tr> <td>人工造粒種菌體</td> <td>10,700</td> <td>11,600</td> </tr> <tr> <td>非造粒種菌體</td> <td>13,400</td> <td>8,370</td> </tr> </table> </li> <li>- 3 개월후 유기물 제거율(%) <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td></td> <td>제거율(%)</td> </tr> <tr> <td>人工造粒種菌體</td> <td>40-70</td> </tr> <tr> <td>非造粒種菌體</td> <td>30-50</td> </tr> </table> </li> </ul>		초기	6 개월후	人工造粒種菌體	10,700	11,600	非造粒種菌體	13,400	8,370		제거율(%)	人工造粒種菌體	40-70	非造粒種菌體	30-50
	초기	6 개월후															
人工造粒種菌體	10,700	11,600															
非造粒種菌體	13,400	8,370															
	제거율(%)																
人工造粒種菌體	40-70																
非造粒種菌體	30-50																
유동상형저농도 Bioreactor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 미생물부착담체를 상향류로 유동화시켜 폐수와의 접촉 효율을 높이는 방법</li> <li>- SS 는 전처리로서 분리농축하여 분리막과 복합화한 가용화 Methane 발효 병행</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 합성폐수( TOC200 mg/ l , BOD 400~500 mg/ l )의 무가온메탄올 발효에 의해 HRT 5 Hrs, TOC60~80%제거</li> <li>- SS 가용화 : 산발효가 일어나지 않는 범위에서 메탄발효 진행시 최고율이며 中溫 메탄발효에서 TOC 가용화율 약 50%, 高溫메탄올에서 약 60%가능</li> </ul>															
고정상형저농도 Bioreactor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 충전된 부직포 담체에 미생물을 부착시켜 고활성된 상태에서 고농도의 미생물을 유지시키며 부직포의 높은 공극률을 이용하여 높은 반응성유도</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 적절한 상승류 적용으로 부직포의 구멍막힘, pH 의 저하 방지가능.</li> <li>- 산발효조와 메탄발효조의 최적용적비(1:2)에 의해 Total HRT 를 10Hrs, BOD 부하 2 kg/m<sup>3</sup> d 로 약 75% 의 가스화율 가능</li> </ul>															

Bioreactor 형태	처 리 방 법	주 요 결 과
포말(包抹) 담체유동상형 저농도 Bioreactor	- PVA Gel 에 Phenol 분해오니 를 포괄시켜 이것을 생체 촉매로 사용 - PVA Gel 제조시 미량의 유 기 물 첨가에 의해 균일한 그물구조를 가지는 PVA Gel 제조가능	-Phenol 함유 폐수의 고효율 처리가능 -300mg/ℓ 의 Phenol 함유폐수 를 처리하여 Phenol 을 거의 제거하는 것이 가능하였고, TOC 기준 가스화율 59~63%
이상식(二相式) 중고농도 Bioreactor	-생산성상과 Methane 생성상 을 분리하여 각각의 미생물 반응을 별도의 Reactor 에서 행하여 처리효율 및 안전성 을 향상시킨 공정 -산발효 Reactor 후단에 막처 리법을 조합	-산발효후 막을 적용한 경우 에 99%의 BOD 제거
유동상형 중고농도 Bioreactor	-미생물 집합체가 내부에 모여 핵이되는 담체를 상향 류에 의해 부유, 유동시켜 고활성의 미생물을 선택적 으로 부착, 증식. -적당한 간격으로담체를 분산 시켜 효율적 처리유도	-교반효율이 높고, 국부적인 Dead-zone, 폐쇄등이 없고 전체가 균일하므로 급격한 부하변동에서도 안정적으로 반응이 가능하다.
고정상형 중고농도 Bioreactor	-Reactor 에 담체를 충전시켜 협기성 미생물을 부착시켜 고정상형 Bioreactor 를 가동 시킴.	-가용성 유기성폐수에 적합 -Reactor 에 오니를 발송할 필요가 없다.
Sludge Blanket 형 중고농도 Bioreactor	-UASB 형 Reactor -협기성미생물의 자기 造粒化 기능을이용한 Reactor	- 침강성이 좋은 그레놀을 고농도로 유지. -부하변동에 강하고 운전휴지 중 그레놀의 감쇄가 적으며 로 계절조업형 폐수에도 적용 가능.

### 1.3.2. 막모듈의 개발

#### (1) Plate & Frame 유기막 모듈

주요 규격	특징	적용 결과
- PSF MWCO 2,000,000 Flat sheet Membrane - Module : PPF - Plate 자동분리장치 (유압식) - 0.8 m <sup>2</sup> /sheet, 20 m <sup>2</sup> /block -Plate 를 요철로 만들고 오염시 자동으로 Frame 을 분리하여 스폰지로 세정	-난류촉진에 의한 SS 가 높은 폐수에 대해서도 투과 유속 높음 -물리적 세정으로서 막표면 자동세정장치 및 약품 세정에 의해 장기적 성능유지	-종이, Pulp 의 Condensate 폐수 : i)MLSS(Methane 발효액) : 10,200mg/ℓ ii)BOD 제거율 : 94% iii)COD 제거율 : 89%

#### (2) Capillary 형 유기막 모듈

주요 규격	특징	적용 결과															
- PSF UF 막의 외표면에 내오염성이 좋은 PVA 를 도포,가교시킨 분리막 -MWCO 8,000 ,1.2/2.0 mm (ID/OD) -외압식여과방식 및 막다발 엘리먼트와 하우징 분리형	-한쪽 끝부분만 Potting 하고 막 충전밀도를 낮게 (충진율 19%)하여 섬유상 SS 를 포함한 고농도 발효액의 처리에 적합 -막모듈은 2-3 개 직렬 연결접속하여 사용	-대규모 하수의 SS 가용화 Methane 발효 Reactor 와 복합화 운전 (단위 : mg/ℓ) <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>항목</th> <th>원수</th> <th>투과수</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>TDS</td> <td>25,000</td> <td>950</td> </tr> <tr> <td>MLSS</td> <td>21,000</td> <td>&lt; 1</td> </tr> <tr> <td>COD</td> <td>33,000</td> <td>48</td> </tr> <tr> <td>BOD</td> <td>4,600</td> <td>16</td> </tr> </tbody> </table>	항목	원수	투과수	TDS	25,000	950	MLSS	21,000	< 1	COD	33,000	48	BOD	4,600	16
항목	원수	투과수															
TDS	25,000	950															
MLSS	21,000	< 1															
COD	33,000	48															
BOD	4,600	16															

(3) 중공사형 유기막 모듈

주요 규격	특징	적용 결과
- 0.27/0.41mm(ID/OD) 외압식여과방식이면서 막표면에서의 폐수흐름 의 선속도가 크도록고안	- 막 Element 를 Housing 으로 부터 분리할 수 있 고 多重化, 多別化가능 하여 대규모처리에 적합	-전분폐수 Bench-scale Test ;막표면에서의 SS 농도 20,000 mg/ ℓ 의 고농도 영역에서의 역압세정만 으로 장기연속운전가능

(4) Tubular 외압형 무기막 모듈

주요 규격	특징	적용 결과										
-Pore size 0.1 μm의 알루미 나계 비대칭막 -9/13mm(ID/OD), 길이 750mm 의 막 -3.2 m <sup>3</sup> 의 직각형모듈 (폭 260mm×높이 150mm ×길이 830mm) -Pump 흡인식으로 운전, 반응내에 액면에 대해 수평으로 적층시켜 사용	-막모듈 Casing 이 불필요 -반응조내에서 막모듈이 점유하는 용적는 5% 정도이므로 효과적임 -15,000 ~ 20,000 mg/ ℓ 의 MLSS 를 가진 고효율 미생물 반응이 가능함	-하수오니 열처리 분리액 의 Methane 발효 처리 결과 <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>항목</th> <th>결과</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>COD</td> <td>4.2</td> </tr> <tr> <td>BOD</td> <td>2.2</td> </tr> <tr> <td>TOC</td> <td>1.4</td> </tr> <tr> <td>SS</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	항목	결과	COD	4.2	BOD	2.2	TOC	1.4	SS	0
항목	결과											
COD	4.2											
BOD	2.2											
TOC	1.4											
SS	0											

(5) Tubular 내압무기막 모듈

주요 규격	특징	적용 결과
-Type A : 내경 3.7mm× 길이 500mm 의 Tubular 막 200 가닥 집속 -Type B : 내경 24mm× 길이 1,000mm 의 단일 Tubular 막구조 -소재 : Alumina -0.1 μm Pore 의 MF	-A Type 은 저점도 저동력 운전에 적합하고 B Type 은 고점도액에 적합 (55,000mg/ ℓ 수준)	-종이, 펄프폐수, 하수 SS 가용화 -기액 2 상 Crossflow 여과 방식을 적용하여 안정적 인 Flux 얻음 (A Type : 0.64 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d, B Type : 1 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d )



(6) 평판형 무기막 모듈

주요 규격	특징	적용 결과
-4 장의 막소재를 高耐食性)고무로 일체화시켜 만든 모듈로서 각 Space 와 교대로 적층시켜 막 모듈 제작. -0.2 $\mu\text{m}$ Aluminad MF 막 및 EPDM, 막면적 0.35 m <sup>2</sup> , 500L×200W×3t -상한온도 60℃	-내부유조에 Dead space 가 없고 막표면을 균일하게 흘러주므로 막투과 유속이 높고 폐쇄발생이 극히 적다. -역압세정가능	- 전분폐수의 발효 산 Reactor 에 조합적용 ; 20,000mg/ℓ 이상의 고 SS 농도에서 장기적 성능 유지가능함.

1.3.3. 계측제어시스템 개발

계측제어시스템의 개발과제 및 주요결과는 다음과 같다.

(1) Methane 균 활성 계측기술 :

- 형광성보호소를 사용하여 화상처리에 의한 Methane 균식별.
- 분산처리하는 전처리 만으로 혼합계로 부터 Methane 균을 선택적으로 농도측정

(2) Methane 발효 제어기술

- Methane 회수에너지량과 여과동력을 조화시켜 제어기술개발
- 유입부하 변동에 따라 막투과수량을 조절.

(3) 감시제어시스템

- 혐기성 Reactor 에 대한 지식을 Base 로 전문적감시, 제어가 가능한 Software 개발.

1.3.4 현탁물질의 분리 농축기술

현탁물질의 분리농축을 위해서 다음 기술이 연구되었다.

(1) 粒狀포집형 현탁물질 포집재 충전식 공정

- PU 스폰지를 사용하여 현탁물을 고효율로 제거
- 하수중의 SS 농도 및 유량변화가 있어도 균일한 성능유지 (SS 를 80%이상 제거하여 농축수의 SS 농도를 10,000mg/ℓ 이상으로 공급)

(2) 立型 원통형 Screen 방식

- 원통형스크린을 통해 내측에서는 농축액을 외측으로는 여과액을 얻는 공정으로서 Compact 한 Process
- SS 제거율 약 50%이며 농축수는 5,000mg/ℓ의 SS 농도, 첨가제(고분자응집제 5mg/ℓ)를 미량 넣으면 SS 제거율 80%, 농축수 의 농도는 SS 10,000mg/ℓ)

1.3.5 수처리 Reactor 개발

생물학적인 질소제거방법의 제문제점은 질화반응이 속도율속단계로서 제거율이 낮고 반응조가 크게 되는 것이다. 이것은 증식속도가 낮은 질화균을 반응조내에 높은 농도로 유지시킬 수 없기 때문이다. 미생물의 고농도 유지를 위해 회전 평판형 모듈을 개발하였다.

고농도의 미생물을 유지하기 때문에 반응조 용적은 종래의 1/3 정도로 가능하였고 질소제거율이 안정적으로 80%이상을 나타내었다. 또한 6개월간 연속 운전시 초기 1.8 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> d의 통수량이 1.6 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> d 까지 유지되었다.

탈질소 반응용 첨가유기물로서 MeOH 를 사용하였으며 이것은 N03-N 량의 3 배량으로서 저첨가에 의한 MeOH 비용을 반으로 절감하였다. 또한 MLSS 농도를 9,000mg/ℓ로부터 15,000 mg/ℓ로 증가시키는 것에 의해 질소제거율이 10%향상되었다. 생물학적 질소제거 Flow 는 다음과 같다.

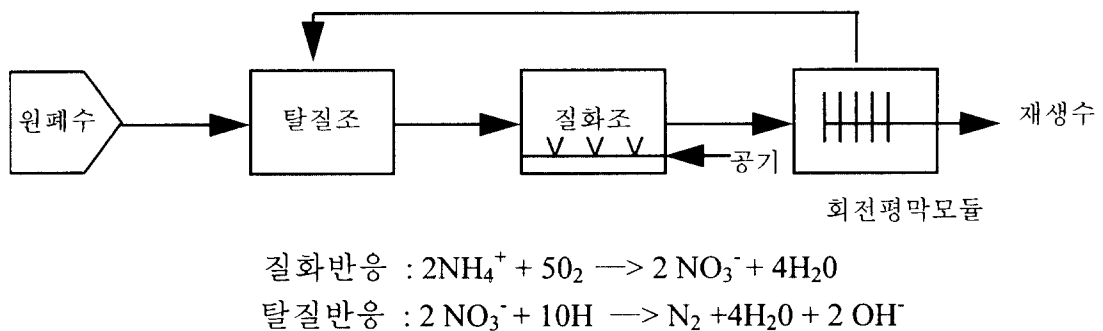


그림 1-1. 회전평판막모듈을 이용한 생물학적 질소제거 Flow

1.3.6. 오니 유화기술

효율적인 오니 처리기술로서 Aqua Renaissance Project 에서는 오니 油化 연속처리시스템을 고온 고압(약 300℃, 100 kg/cm<sup>2</sup>)에서 운전하여 중유상의 Oil 로 변화시키는 공정을 개발하였다. 운전결과 유출액의 Oil 회수율은 11-16%에 달하였다.

1.3.7. 운전결과 및 경제성

Bench 및 Pilot Plant의 운전을 통해 얻어진 실험 결과를 토대로 실제 규모로 Scale-up한 경우를 계산하여 각각의 경제성을 평가하였다. 경제성 평가에 기초를 둔 것은 물론 일본의 90년대초 상황이며 다음에 의거했다.

표 1-2. 경제성평가 산출내역

고정비산출방법	$\text{고정비 (¥/m}^3\text{)} = (\alpha + \beta)(1+k) M/QN$ <p> <math>\alpha</math> : 이자율(연리 8%)  <math>\beta</math> : 감가상각비 = <math>(1-Z/100)/T</math>                      - T: 설비평균수명 : 15년                      - Z: 잔존가액 5%                      M: 건설비 (¥)  <math>k</math> : <math>\alpha \times 0.4 \times \text{공기} = 0.016</math>(공기 0.5년의 경우)                      Q: 처리수량 (m<sup>3</sup>/d)                      N: 연간 운전일수 (d/y), 하수는 365, 기타 300                 </p>
오니처분비용	¥15,000/ton
인건비	¥ 4,000,000/인·년
막교체비	유기막(3년): ¥20,000/m <sup>2</sup> 무기막(15년): ¥150,000/m <sup>2</sup>
전력비	¥20/kwh
Methane 회수비	¥47.7/10,000kcal (Methane 발열량 8,000Kcal/N m <sup>3</sup> )
보수비용	건설비의 0.5%/년

표 1-3. 각 공정별 경제성 분석

폐수		대규모 하수		소규모 하수		유지, 단백질폐수		전분계 폐수		알콜계 폐수		종이펄프계 폐수		분뇨	
처리규모 (m <sup>3</sup> /d)		50,000		1,000		500		500		142		160,000 (500)		100	
		종래법	제안법	종래법	제안법	종래법	제안법	종래법	제안법	종래법	제안법	종래법	제안법	종래법	제안법
원수수질 (mg/ℓ)	BOD	200		200		860		12,000		10,800 (44,500)		200 (25,000)		10,200	
	SS	250		200(FN30)		500		3,500		5,170 (25,000)		150		11,800 (FN3,450)	
처리수질 (mg/ℓ)	BOD	<10	<10	<5	<5	<20	<20	<50	<50		<20	<20	<20	<15	<15
	SS	<10	<10	<5 (FN30)	<5 (FN30)	<20	<20	<90	<90		<20	<30	<30	<40 (FN30)	<40 (FN3000)
시설투자 (用地포함) (억엔)		191.8	159.4	6.1	5.5	3.9	3.9	8.9	7.5	0.9	2.8	107.3	97.4	18.1	12.3
처리 Cost (고정비포함) (엔/m <sup>3</sup> 폐수)		137.5	101.2	305.8	279.7	442.1	436.9	1073.3	941.7	1197.0	1136.9	41.7	35.5	10513	6999
소요대지면적 (m <sup>2</sup> )		30,600	27,460	1,512	1,188	1,650	1,350	2,100	1,200	484	890	42,000	33,000	7,500	5,100
Methane 발생량 (N m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> 폐수)		0.04	0.07	0	0.046	0	0.38	5.07	5.21	0	5.8	0	0.034	0	6.5
오니발생량 (Kg-DS/d)		6,440	3,220	128	98	210	31	1,128	890	15.2	404	16,000	10,785	940	436

(주) (1) 알콜폐수에서 원수수질의 ( )는 증류폐수수질

(2) 종이펄프계 폐수에서 원수수질의 ( )는 고농도 메탄발효처리 대상수

(3) 분뇨에서 처리수 FN은 2.5 배 희석되어지므로 1,200mg/ℓ 도 된다.

#### 1.4 결론

Apua Renaissance Project 에서는 하수, 분뇨, 산업폐수등의 각종 유기폐수를 대상으로 Biotechnology 와 막분기술의 복합화에 의해 고효율로 경제성이 높은 새로운 형태의 Bioreactor System 을 개발하는 좋은 성과를 얻었다. 에너지 자원으로서 Methane 가스의 회수와 발생오니의 최소화와 동시에 수자원으로서 재생가능한 처리수를 얻는 것을 목표로 실험이 진행되었으며 활용가능한 결과를 얻을 수 있었다. 산업폐기물이 증가되고 있는 상황에서 오니로부터 重油상태의 오일을 얻을 수 있는 기술은 환경, 에너지 측면에서 좋은 방향 제시라고 볼 수 있다. 폐수처리분야에 분리막을 본격적으로 적용하므로서 여기서 얻어진 결과들이 최근 널리 보급되고 있는 침지형 모듈에 의한 Membrane Bioreactor 등에 적용되는 중요한 교두보 역할을 하였다고 볼 수 있다. 또한 이러한 대형과제는 국가차원에서 지원하고 기업들이 필요에 의해 추진한 과제로서 의미가 클수가 있다고 보며 이과제를 중심으로 MAC21, 고도처리 MAC21, ACT 등의 과제를 추진케 한 원동력이 되었다고 본다. 국내에서도 일본과 같이 산·학·연이 Consortium 을 형성하여 환경·수처리 분야에 대한 핵심기술 및 요소기술을 개발하고 우리만이 가지는 독특한 기술을 확보하므로서 국제 경쟁력을 확보하며 국토의 환경보전을 할 수 있기를 기대한다.

## 2. 중수도

우리나라에서도 1991년 수도법을 개정하여 중수도제정도입의 법칙근거를 마련한 것을 시작으로 이제 중수도는 공공건물 및 물을 많이 사용하는 사업장에서 볼 수 있는 시설이 되었다. 중수도기술 역시 우리나라와 수자원환경이 유사한 일본으로부터 많은 영향을 받았고 분리막이나 처리공법도 일본으로부터 이전받은 경우가 많다. 본고에서는 일본에서의 중수도 적용현황과 실제 적용하고 있는 건물의 사례를 검토해 보고자 한다.

### 2.1 일본의 건물폐수에 의한 중수도 적용현황

1980년대초까지 일본에서의 중수도 도입사례는 사무소 빌딩, 점포빌딩, 학교, 연구소, 사업소등에서 80건 정도의 실시예가 있었으며, 물부족 및 수도물값의 인상에 따른 문제의 인식에 의해 실시되는 사례가 급증하게 되었다. 원수는 잡배수, 수세변소용수가 많고 냉각배수 하수처리등도 있다. 잡용수용도의 대부분은 허드렛물로 쓰이며 개별순환방식이 일반적이며 시가지 재개발 지구를 중심으로 지구순환방식도 실시하고 있다. 대부분의 중수도 규모는 100~500 m<sup>3</sup>/d의 수준이다.

빌딩폐수를 처리하여 잡용수로 재이용하는 사례에 대해 日本국토청에서 최근 20년간의 실적을 보고하였다. 표 2-1과 같이 약 2,100군데의 건물에서 320,000 m<sup>3</sup>/d를 재이용하고 있다. 또 잡용수의 용도는 표 2-2와 같다.

표 2-1. 잡용수 이용현황(1996, 일본국토청)

방 식	지 역 수	건 수	水量(m <sup>3</sup> /d)
개별순환식	-	1,366	176,714
지역순환식	48	109	18,190
광역순환식	59	627	128,693
합 계	-	2,102	323,597

표 2-2 건물폐수의 잡용수 이용현황(1998)

용 도	건 수
화장실 세척수	1,269
散水 용수	429
냉각·냉방용수	248
환경·조경용수	170
청 소 용수	148
세 정 용수	136
세 차 용수	135
기 타	212
합 계	1,606*

\*유효회답수 1,606 건에 대해 분류하였음.

처리원수는 표 2-3 과 같다. 폐수전량을 사용하는 경우는 20%정도로 매우 작고, 주방폐수는 68%(48+20), 화장실폐수를 함유하는 경우는 56%, 함유되지 않은 경우는 36%(잡배수)이다.

표 2-3 처리원수의 종류

원 수	건 물 수	비 율(%)
종 합 폐 수	68	20
주 방 폐 수	162	48
화장실 폐수	121	36
잡 폐 수	119	36
빗 물	33	10
합 계	(503)	-

## 2.2 일본의 건물폐수에 대한 중수도 적용 Process

중수도처리공정을 표 2-4에 나타내었다. 생물처리가 353건으로 가장 많고 생물처리가 포함되지 않은 공정은 34건에 불과하다. 이 표에서는 활성오니법의 침전조 대신에 분리막을 사용하는 방법(막분리형호기)이 18% 정도로 많은 것이 주목된다. 고도처리의 단위공정으로서 Sand와 활성탄 흡착을 채용한 것이 많다.

표 2-4 처리공정의 채택현황

Process	채택건수	비율(%)
활성 오니법	99	30
생물여과	45	13
접촉산화	146	44
탈질소	3	1
막분리형호기	60	18
응집침전	11	3
응집여과	3	1
침전	13	4
가압부상	25	7
사여과(Sand)	147	44
오존산화	18	5
활성탄 흡착	93	28
한외여과막	59	18
역삼투막	3	1
합계	725	-

1) 접촉산화 : Honey comb, 회전원반법 등.

물재생을 위한 공정은 표 2-5와 같다. 원수의 종류에 따라서 다음과 같은 경향으로 처리됨을 알 수 있다.



(1) 쏠시설에 대한 처리시스템

- 막분리호기가 17%로 가장 많다.
- 생물 + 여과가 11%, 고도처리를 합하면 24%
- 생물 + 막(+고도처리)가 10%

(2) 종합폐수를 대상으로 한 시설의 처리시스템

- 생물 2 단공정 + 고도처리가 31%로 가장 많다.

(3) 잡배수만을 대상으로 한 경우

- 생물 + 여과(+고도처리)가 26%로 가장 많다.

표 2-5 재생처리시스템의 구성

구분 \ 처리공정	전 체		종 합 폐 수		잡 배 수	
	건수	%	건수	%	건수	%
생물 단독	41	12	0	0	17	14
생물 2 단	16	5	5	8	2	2
생물 2 단+고도처리	34	10	19	31	3	3
생물 + 여과	35	11	8	13	19	16
생물+여과+고도처리	43	13	7	11	12	10
생물 + 막	19	6	0	0	10	8
생물+막+고도처리	14	4	0	0	7	6
생물+물리화학	22	7	15	24	12	10
막분리형호기	56	17	3	5	18	15
물리화학 단독	7	2	0	0	4	3
물리화학 2 단	27	8	5	8	12	10
물리화학+생물	18	5	0	0	3	3
합 계 (332)	332	100	62	100	119	100

※ 주 (1)고도처리 : A/C, 오존

(2)물리화학처리 : 응집침전, 가압부상, Sand

## 2.3 하우스덴보스의 중수도

### 2.3.1 개요

하우스덴보스는 Nagasaki-ken 이 민간기업과 합작하여 투자한 Water Front Resort 인데 해수담수화시설 및 중수도 시설로 유명하다. 하우스덴보스의 하수처리의 특징은 고도처리와 처리수의 토양침투이다. 이렇게 하는 이유는 하우스덴보스가 大村灣의 수질환경보전이라는 측면에서 도입되었기 때문이다. 토양침투에 의해 하수처리수의 바다에 대한 직접방류를 막고 있으며 고도처리는 일부처리수의 다목적 이용을 위해 사용된다.

이 시설물은 계획처리구역 150 ha, 계획처리인구 38,050 명(상주인구 1,000 명 숙박객 4,050 명, 하루관광객 30,000 명, 종업원 3,000 명)으로 되어 있다. 하루 최대 오수량은 3,400 m<sup>3</sup>/d 이다. 하우스덴보스내에는 6 km의 운하가 있고 오수는 별도의 배관으로 수집되어 상수와 중수도로 사용된다. 표 2-6 에 하우스덴보스의 계획처리수질을 나타내었다.

표 2-6 계획처리수질(mg/ℓ)

항 목	원 수	2 차 처리수	고도 처리수
BOD	320	20	5 이하
COD	150	50	10
SS	220	30	10 이하

### 2.3.2 폐수처리 및 재활용 공정

그림 2-1 에 처리공정을 나타내었다. 2 차처리까지는 보통의 하수처리공정으로 처리하며 표준 활성오니법을 채용하고 있다. 그후에 3 차처리 고도처리로서 접촉산화, 응집침전, 사여과, 한외여과등에 의해 여과수는 재활용되고, 농축수는 응집사여과, 활성탄흡착등을 거쳐 토양에 침투시킨다.

폐수의 재생이용(중수도)목적으로서 화장실세정수 뿐만 아니라 냉각탑보급수 및 식물散水등에도 활용한다. 특히 인체에 접촉했을때의 안정성을 고려하여 제균을 목적으로 중공사막 모듈을 설치 하였다. 사용된 중공사막은 PAN 소재의 MWCO 13,000, 모듈의 막면적은 12.3 m<sup>2</sup>이다. UF System 은 3 계열이고, 인버터 사용에 의해서 일정한 여과압력을 유지하는 방법을 사용하였다.(1~2 kg/cm<sup>2</sup>운전)회수율은 80%로서 처리수량 3,400 m<sup>3</sup>/d 중 2,700 m<sup>3</sup>/d 를 중수도로 공급할 수 있다. 농축수 700 m<sup>3</sup>/d 은 침전사여과탑과 활성탄 흡착탑을 거쳐 NaOCl 로 소독시킨후 토양침투시킨다.

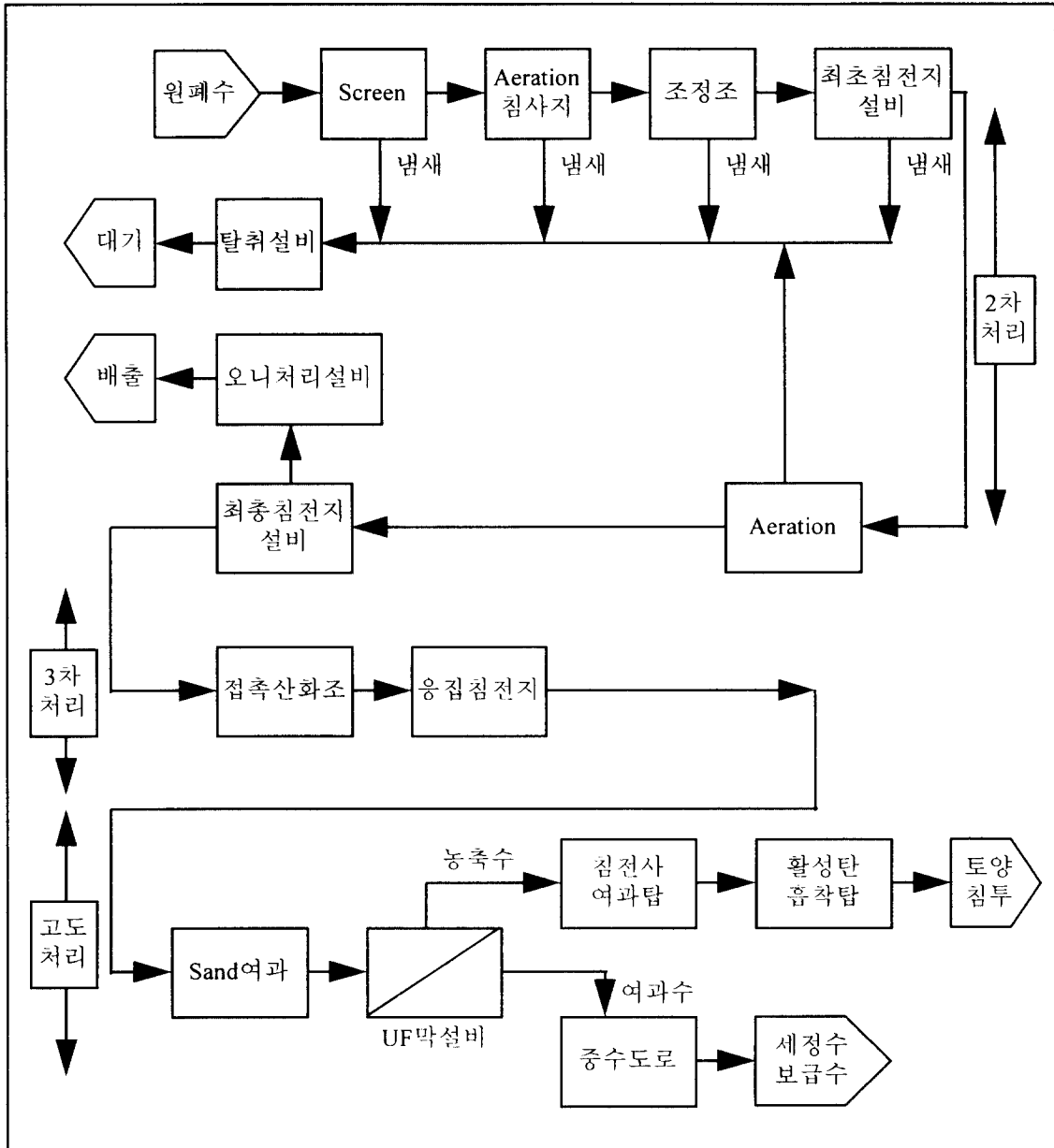


그림 2-1 하수처리시설 Flow

#### 2.4 Sumitomo Twin 빌딩의 중수도 시설

住友 Twin 빌딩은 사무소 빌딩으로서 총면적 128,000 m<sup>2</sup>이며 변기세정수 공급용중수도의 목적으로 각건물에서 135 m<sup>3</sup>/d 및 80 m<sup>3</sup>/d의 재생이용설비를 설치하였다. 수질목표는 SS 5mg/l, BOD 5 mg/l, COD 20 mg/l 이하. 색도 30도 이하이며 원폐수는 배설물과 잡폐수로 한다. 원폐수 및 재생이용수의 수질은 다음과 같다.

표 2-8. 원폐수 및 재생이용수의 수질

채수종류	항 목		계획수질	수 질
원수	PH	-	5~8	7.4~7.9
	BOD	mg/ l	450	210~388
	COD	mg/ l	300	160~203
	SS	-	500	147~250
재생이용수	PH	-	5.8~8.6	6.4~7.5
	BOD	mg/ l	5	1 이하
	COD	mg/ l	20	2~13
	SS	mg/ l	5	1 이하
	ABS	mg/ l	0.5	0.02 이하
	색도	도	30 이하	15 이하
	대장균군수	개/ml	불검출	0

주요기기로는 Screen(1 차, 2 차), UF Membrane block, Blower, 멸균설비, pH 조정장치, 활성탄탑, 제어반등으로 구성되어 있다. 폭기조내에서 미생물에 의해 BOD가 완전분해되면 배설물중에 포함된 요소등의 질소성분이 소화되어 폭기조내의 활성오니의 pH가 저하되기 때문에 가성소다를 재생수에 주입하여 중성으로 유지시킨다. 배설물에 내포되는 색소는 폭기조내의 미생물처리로는 완전히 제거할 수 없다. 이때문에 재생수의 색도가 40-80도 정도되고 소량의 황갈색계 색도에 의해 백색변기가 착색될 가능성이 있다. 따라서 색도제거를 위해 활성탄탑이 설치되었다. 住友 Twin 빌딩의 중수도 Flow를 그림 2-2에 나타내었다.

건물폐수를 재활용하는 경우 수질외에 가장 중요한 것을 취기의 제거대책에 대한 문제이다. 취기발생원으로서 원생수조, 배출조, 폭기조, 유량조정조, 오니조등으로 부터 냄새가 발생한다. 또한 반응조에는 부패방지를 위해 공기를 주입하고 있으므로 조내의 환기가 필요하게 된다. 취기에 대한 대책으로서 밀폐형구조를 사용하는 것이 가장 효과적이나 폭기를 행하는 수조에 대해서 폭기풍량의 1.2~1.5 배의 풍량으로 환기하고 수조내를 항상 부압으로 견디게 한다.

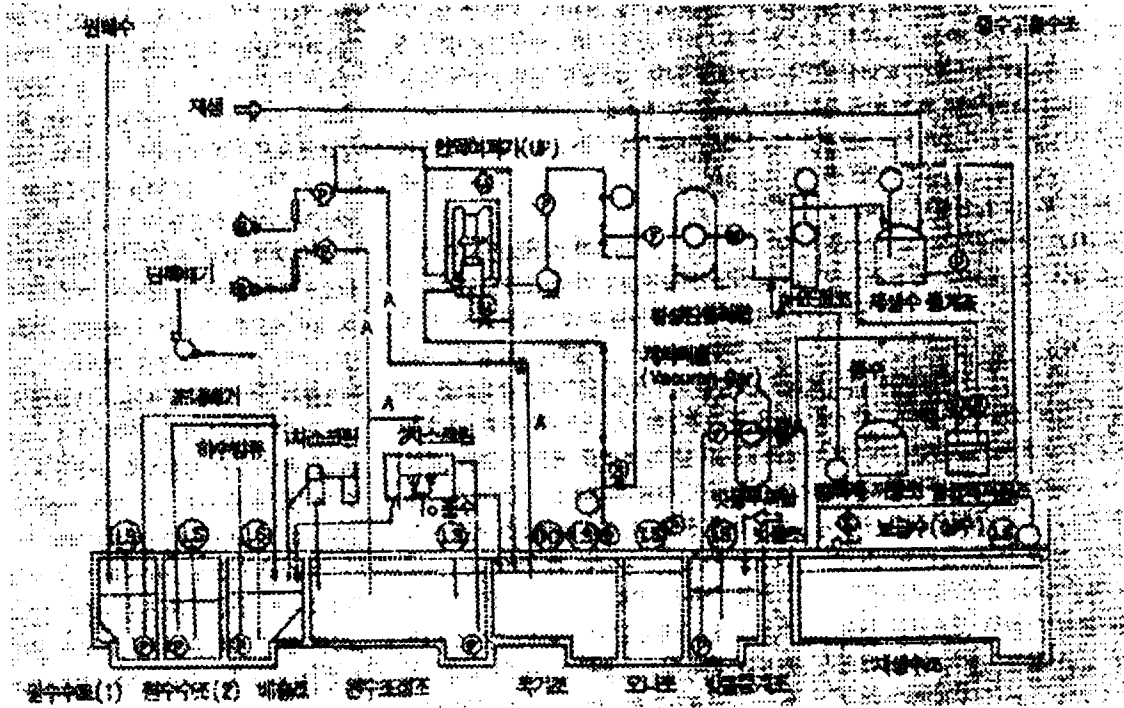


그림 2.2. 住友빌딩의 중수도처리 Flow

### 3. Water Factory 21

#### 3.1 Water Factory 21 추진배경

미국 California 의 Orange County 는 인구 250 만의 지역으로서 이지역은 원래 풍부한 지하수맥위에 위치하고 있다. 이지역에서는 OCWD(Orange County Water District)가 수도사업에 대해 관리하고 있으며 미국 북서부지역의 수도 공급의 75%를 담당하고 있다. 나머지 25%는 Colorado 강으로 부터 얻어진다. Orange County 의 년평균 강우량은 300mm 로서 매우 작으므로 지하수가 수자원이 될 수 밖에 없다. 이러한 이유로 1956 년에 그 지역으로부터 농업용수로서 지하수가 과잉채취된 것이 원인이 되어 결국 지하수의 수위가 해면보다 낮아지게 되었다. 따라서 해수가 해안보다 5 마일이나 지하수에 침투되어 지하수의 오염이 일어난 것이 판명되었다.

이에 대한 대책으로서 담수를 지하수 맥에 강제로 주입하는 방법이 사용되었지만(Costal Barrier Project) 충분한 효과는 없었다. 그래서 거대한 해수의 침투를 막기 위하여 해안으로 부터 2 마일 떨어진 지점에 7 개의 호정을 뚫어 해수를 함유한 지하수를 뽑아내 바다로 돌리는 작업을 하였다. 특히 내륙부에는 직렬로 23 개의 호정을 뚫어 담수를 강제 주입하므로서 해수의 진입을 방지하는 방법의 고안되었다. 그림 3-1 과 그림 3-2 에 Orange County 북서부지역의 지하단면구조와 Costal Seawater Barrier Project 의 지역을 나타내었다.

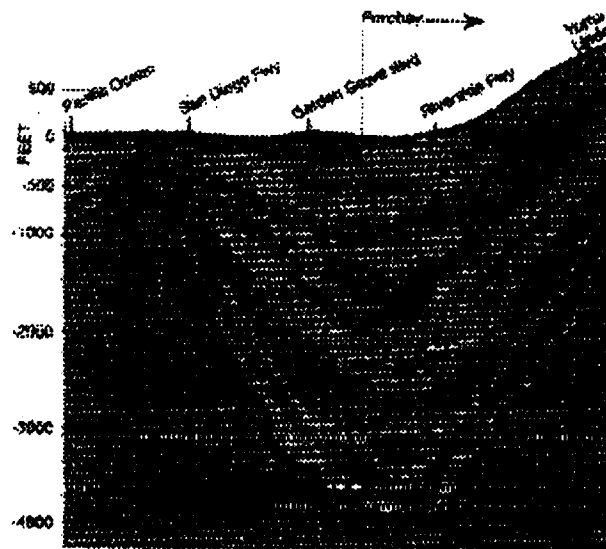


그림 3-1 Orange County 북서부지역의 지하단면

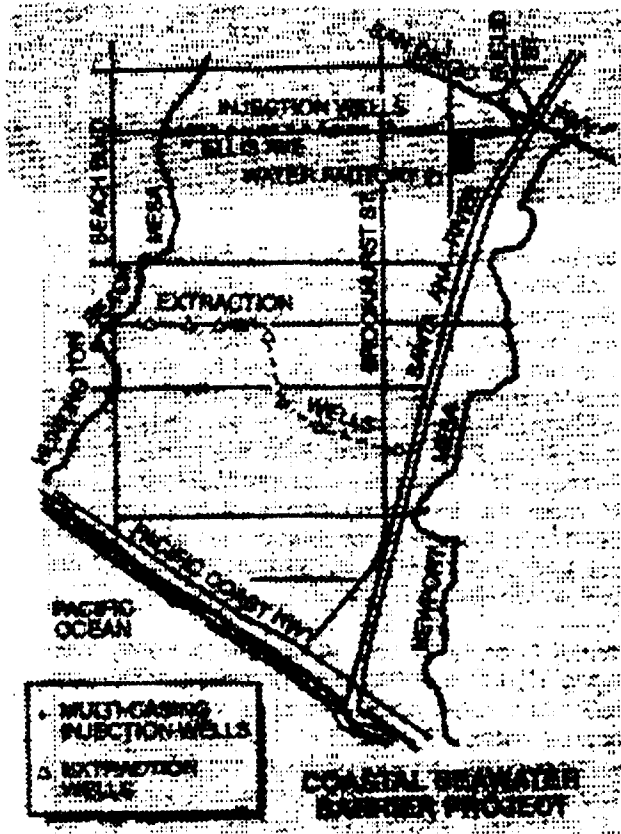


그림 3-2 Coastal Seawater Barrier Project

주입용수로서 여러가지 검토가 이루어졌는데 최종적으로 하수처리수를 고도처리한 것과 깊은 곳에서 뽑아올린 지하수를 혼합한 것을 사용하게 되었다. 이러한 고도처리 시설이 [Water Factory 21]이다. 그리하여 1976년 10월 처음으로 하수처리재생수를 인공지하수로 주입하게 되었다. 물론 재생수의 수질은 음용수 수질기준을 만족시켜야 한다.

특히 하수처리수를 사용하기로 결정한 이유는

- 매년 바다에 투기되는 15,000 acre-foot의 폐수를 줄일수 있고(1 acre-foot는 325,900gal으로서 1년간 두가정이 사용하는 물임).
- Colorado 강과 State Water Project에 의존성을 감소시킬 수 있고
- 해수침입을 막는 것이 우선적이므로 공업용수나 상수도를 적용하는데는 Risk가 있다. 폐수는 거의 일정하게 발생하는 특징이 있으므로 항상 일정한 수량을 공급할 수 있는 재생수를 선택하였다.

### 3.2 처리공정

WF21은 57,000 m<sup>3</sup>/d, 연간 최대 2.34×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>의 하수처리수를 재생할 수 있는 능력을 가지고 있다. 이것은 Orange County가 사용하고 있는 지하수의 약 10%에 해당한다. WF21의 처리 Flow를 그림 3-3에 표시하였다. WF21에서는 최종처리로서 여과지에서 활성탄처리공정으로 보내는 양을 전체의 2/3, 나머지 1/3을 RO로 처리한 다음 각공정의 처리수를 섞어서 지하수로 주입한다.

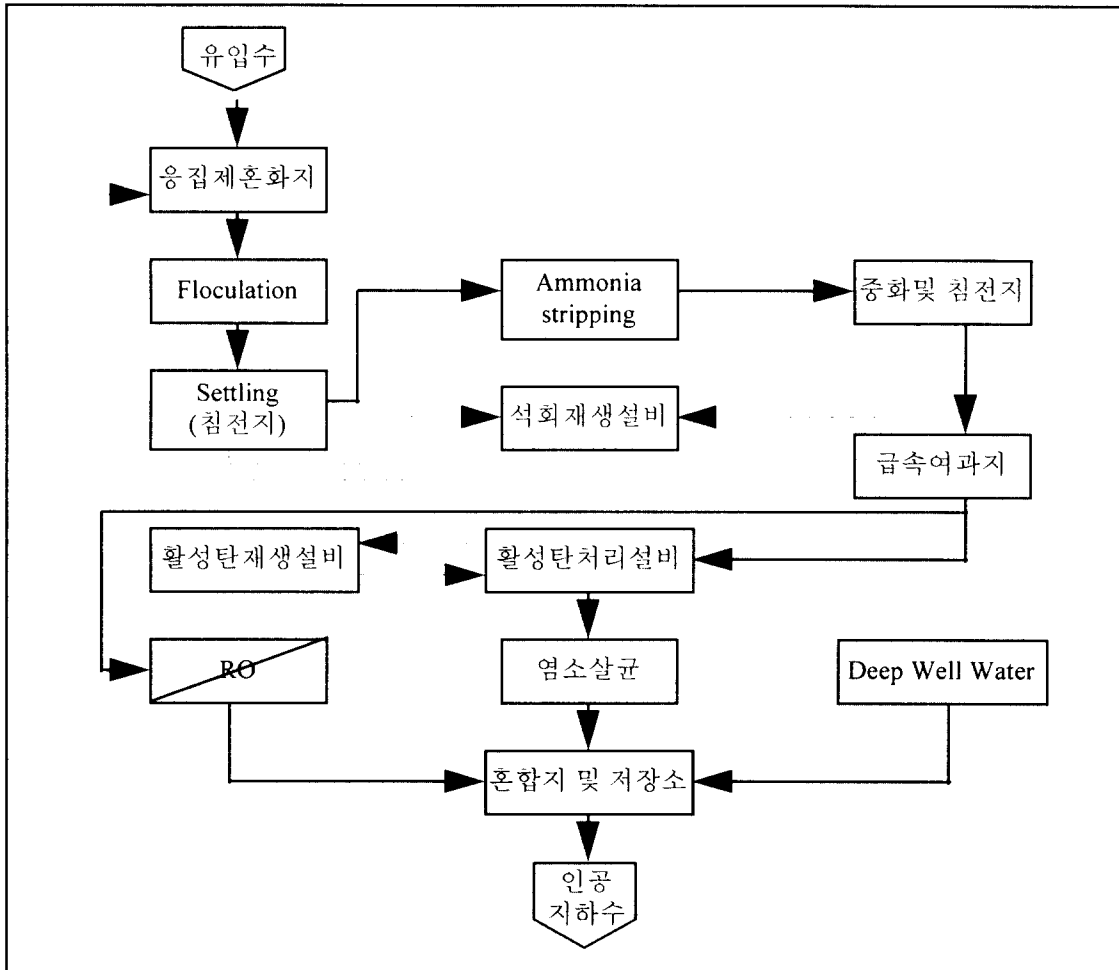


그림 3-3 WF21 Flow Diagram

하수처리수는 석회혼화지에서 석회와 혼합교반시켜 floculation시킨후 응집 침전처리를 한다. 석회의 첨가농도는 400 mg/ℓ로서 인의 제거와 경도의 조정을 주로 한다. 응집침전지에서 침전된 칼슘 침전물은 회수되어 소각되어 생 석회로 재사용된다.



처리수는 pH가 11 이상되므로 중화조에서 석회소각시 발생한 CO<sub>2</sub>를 이용하여 폭기하므로써 중화시킬 수 있다. 중화시 발생된 CaCO<sub>3</sub> 침전물은 제거한다. 중화된 처리수는 급속여과지를 거쳐 활성탄 및 RO 공정으로 보내진다. 급속여과지를 통과한 처리수는 활성탄 공정과 RO 공정에 보내진다. 활성탄 처리의 접촉시간은 약 30 분정도이며 오염된 활성탄은 소각로에서 태워 약 90%이상 재생활용한다.

RO Element로서 현재 Cellulose acetate 소재의 8 인치 엘리먼트가 사용되며, 7 열 x 6 단이 하나의 Block 으로서 총 6 개의 Block (RO, 8"엘리먼트 252 개)이 설치되어 있다. RO 처리압력은 14~39 kg/cm<sup>2</sup>이며 RO 처리로 TDS 90%이상이 제거된다. 각 공정에서의 수질은 표 3-1 과 같다. 또한 건설비 및 운전비용을 표 3-2 와 표 3-3 에 나타내었다.

표 3-1 원수 및 각 공정의 수질

Constituent	Units	OCWD	RO	Deep	WF-21	Regulatory
		Influent From OCSD	Product Water	Well Blend Water	Blended Product Water	Limits
Total Nitrogen	mg/L	31	2.7	0.1	3	10.0
Boron	mg/L	0.85	0.52	0.2	0.4	0.5
Chloride	mg/L	256	29	14	57	120
<b>Electrical</b>						
Conductivity	$\mu\text{m ho}$	1,848	150	369	419	None
Flouride	mg/L	1.4	0.16	0.64	0.40	1.0
pH	mg/L	7.5	6.9	8.8	7.2	6.5-8.5
Sodium	mg/L	231	21	73	65	115
Sulfate	mg/L	300	1.4	19	37	125
Total Hardness	mg/L	298	4.7	19	34	180
Cyanide	mg/L	33.4	2.3	-	6.3	200
TDS	mg/L	1067	82	224	232	500
<b>Physical Characteristics</b>						
Color	color units	34.6	< 5.0	35	11.1	None
Turbidity	JTU	6.2	< 0.01	-	0.27	None
Coliform	MPN/100mL	$7.2 \times 10^5$	2.5	-	0.11	None
<b>Heavy Metals</b>						
Arsenic	$\mu\text{g/L}$	< 5.0	< 5.0	< 5.0	< 5.0	50
Barium	$\mu\text{g/L}$	93.5	1.1	0.11	6.6	1000
Cadium	$\mu\text{g/L}$	9.3	0.07	< 1.0	0.2	100
Chromium	$\mu\text{g/L}$	33	0.82	1.4	0.5	50
Copper	$\mu\text{g/L}$	49.3	3.9	15	4.9	1000
Iron	$\mu\text{g/L}$	113.8	2.8	60	22.2	300
Lead	$\mu\text{g/L}$	4.7	0.6	< 1.0	0.1	50
Manganese	$\mu\text{g/L}$	56	0.1	6.2	2.1	50
Mercury	$\mu\text{g/L}$	0.3	0.3	< 0.5	0.4	2
Selenium	$\mu\text{g/L}$	< 5.0	< 5.0	< 5	< 5.0	10
Silver		1.6	0.1	< 0.1	0.2	50
<b>Organics</b>						
COD	mg/L	53.4	0.8	11	3.5	30
TOC	mg/L	14.7	0.7	4.5	1.4	-
Thm's	$\mu\text{g/L}$	6.0	2.7	-	-	-

☒ 3-2 Capital and Construction costs

<b>CAPITAL AND CONSTRUCTION COSTS</b>				
	Total	Federal	State	OCWD
Investigations and improvements	\$2,275,000	\$ 130,000	\$ 0	\$2,145,000
Wastate water reclamation	13,400,000	6,850,000	3,116,000	3,434,000
Injection Barrier Facilities	1,430,000	350,000	160,000	920,000
Deep Wells	732,000	0	0	732,000
Reverse Osmosis	3,000,000	0	0	3,000,000
<b>Totals</b>	<b>\$20,837,000</b>	<b>\$7,330,000</b>	<b>\$3,276,000</b>	<b>\$10,231,000</b>

☒ 3-3 Operating Costs

<b>OPERATING COSTS*</b>				
Since water and energy are so closely related, the enerth requirement for producing water through <b>Water Factory 21</b> has also been included.				
	\$/AF	\$/100gal.	\$/m <sup>3</sup>	kwh/AF
Advanced Wastewater Treatment (AWT)excluding RO	206	0.63	0.17	1,660
Reverse Osmosis(RO)	175	0.53	0.14	1.694
Pumping form Deep Wells	78	0.24	0.06	400
Blended Injection Water (Average)	222	0.68	0.18	1,795
* Based on operating costs to treat 15 MGD of Watewater, 5MGD of which receives all advanced treatment plus RO. The treated wastewater is blended with 6 MGD of deep well water. Figures do not include capital costs.				