

분리막공정을 이용한 재활용 국외기술 사례 및 현황

김 정 학

(주) KROSYS, 경기도 시흥시 시화공업단지 3라 726
(2000년 11월 3일 접수, 2000년 12월 20일 채택)

State of Art of Membrane Processes for Water Re-use

Jeong-Hak Kim

KROSYS Co. Ltd., 3Ra-726 Shihwa Industry Complex, Shihung, Kyunggido, Korea
(Received November 3, 2000, Accepted December 20, 2000)

1. 서 론

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

지구의 표면에는 14억 1천만 km³의 물이 덮여 있으며 지구의 총 면적 중 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 강우 등에 의해 이제는 처리없이 사용할 수 있는 물은 거의 존재하지 않는 현실이며 수처리기술의 도입역사 100년 끝에 이제는 고도수처리, 재활용 등의 기술이 요구되고 있는 실정이다.

현재 사용하고 버리는 물을 재활용해야 하는 지역은 인구가 집중된 지역, 편중된 강우 및 수자원의 부족으로 수급이 원활치 않은 지역, 지사막화, 온난화 및 이상기후의 현상으로 영향을 받는 지역 등으로서 사용해야 할 물공급량의 절대부족 현상을 나타내는 지역이다. 또한 생산공정에 필요한 Utility의 비용이 급증하는 가운데, 특히 수처리 비용 및 폐수처리 비용 또는 환경보존을 위한 부담액 등으로 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 물재활용 기술과 현황에 대해 소개하고자 하며 특히 일본에서 성공적으로 수행된 Aqua Renaissance Project 및 중수도 현황과 미국 California주 Orange County의 Water Factory 21의 폐수재활용 현황에 대해 사례를 중심으로 하여 검토해 보고자 한다.

2. Aqua Renaissance project

2.1. 개 요

日本の 通商産業省에서는 1985년 부터 6개년 계획으로 水綜合再生利用 System의 연구개발(Aqua Renaissance '90계획)을 실시하였다. 수종합재생이용시스템은 Bioreactor에 분리막을 복합화시켜 고농도의 미생물을 반응에 사용하는 방법으로서 폐수 중의 유기물로부터 Methane을 회수하고 오니의 발생을 최소화시키며 우수한 수질의 처리를 얻을 수 있는 것이 특징이다. System의 개념도는 Fig 2.1과 같다.

2.2. 연구개발 항목

이와 같이 종합적인 물재사용 Project가 7가지 종류의 폐수를 대상으로 Bench-scale의 소형시험장치에 의한 운전연구와 2기의 Pilot Plant에 의해 실증운전을 실시하였다. 본 Project의 연구개발 항목은 다음과 같다.

- (1) 혐기성 Bio-reactor개발(요소기술)
 - 고효율의 Methane발효 가능한 반응기로서

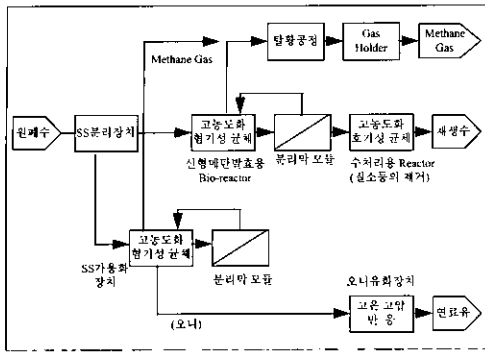


Fig 2.1. 水綜合再生利用 System의 개념도

Methane gas의 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) 계속제어시스템(요소기술)

- 형광화상처리에 의한 Methane생성균의 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 Reactor개발

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

(6) 오니油化기술 개발

- 배출유기성오니를 고온, 고압하(300℃, 100 kg/cm²)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

2.3. 중점연구개발내용 및 성과

2.3.1. 혐기성 Bioreactor

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

Table 2-1. Aqua Renaissance 90 Project 혐기성 Bioreactor 연구결과

Bioreactor형태	처리방법	주요결과															
Sludge Blanket형 Bioreactor	- 반응조 저부에서 폐수유입 상승류와 발생가스의 유동에 의해 부착 담체 없이 미생물 응집화, 입상화 - 고농도 미생물 유지, 높은 용적 부하가능	- MLVSS변화 (mg/ℓ) <table border="1"> <tr> <td></td> <td>초기</td> <td>6개월 후</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> - 3개월 후 유기물 제거율(%) <table border="1"> <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>		초기	6개월 후	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	6개월 후															
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	- 미생물 부착담체를 상향류로 유동화시켜 폐수와의 접촉 효율을 높이는 방법 - SS는 전처리로서 분리농축하여 분리막과 복합화한 가용화 Methane발효 병행	- 합성폐수(TOC200 mg/ℓ, BOD 400~500 mg/ℓ)의 무가온메탄올 발효에 의해 HRT 5 Hrs, TOC60~80% 제거 - SS가용화 : 산발효가 일어나지 않는 범위에서 메탄발효 진행시 최고율이며 中溫 메탄 발효에서 TOC가용화를 약 50%, 高溫메탄올에서 약 60% 가능															
고정상형저농도 Bioreactor	- 충전된 부직포 담체에 미생물을 부착시켜 고활성된 상태에서 고농도의 미생물을 유지시키며 부직포의 높은 공극률을 이용하여 높은 반응성유도	- 적절한 상승류 적용으로 부직포의 구멍막힘, pH의 저하 방지가능. - 산발효조와 메탄발효조의 최적용적비(1:2)에 의해 Total HRT를 10Hrs, BOD 부하 2kg/m ³ d로 약 75%의 가스화율 가능															

Bioreactor형태	처 리 방 법	주 요 결 과
포말(包沫) 담체유동상형 저농도Bioreactor	- PVA Gel에 Phenol 분해오니를 포괄시켜 이것을 생체촉매로 사용 - PVA Gel제조시 미량의 유기물 첨가에 의해 균일한 그물구조를 가지는 PVA Gel 제조가능	- Phenol함유 폐수의 고효율 처리가능 - 300 mg/ℓ의 Phenol함유폐수를 처리하여 Phenol을 거의 제거하는 것이 가능하였고, TOC기준 가스화를 59~63%
이상식(二相式) 중고농도 Bioreactor	- 생산성균과 Methane생성균을 분리하여 각각의 미생물 반응을 별도의 Reactor에서 행하여 처리효율 및 안전성을 향상시킨 공정 - 산발효 Reactor후단에 막처리법을 조합	- 산발효 후 막을 적용한 경우에 99%의 BOD 제거
유동상형 중고농도 Bioreactor	- 미생물 집합체가 내부에 모여 핵이되는 담체를 상향류에 의해 부유, 유동시켜 고효율의 미생물을 선택적으로 부착, 증식. - 적당한 간격으로 담체를 분산시켜 효율적 처리유도	- 교반효율이 높고, 극부적인 Dead-zone, 폐쇄등이 없고 전체가 균일하므로 급격한 부하변동에서도 안정적으로 반응이 가능하다.
고정상형 중고농도 Bioreactor	- Reactor에 담체를 충전시켜 혐기성 미생물을 부착시켜 고정상형 Bioreactor를 가동 시킴.	- 가용성 유기성폐수에 적합 - Reactor에 오니를 발송할 필요가 없다.
Sludge Blanket형 중고농도 Bioreactor	- UASB 형 Reactor - 혐기성미생물의 자기 造粒化 기능을 이용한 Reactor	- 침강성이 좋은 그레놀을 고농도로 유지. - 부하변동에 강하고 운전휴지 중 그레놀의 감쇄가 적으므로 계절조업형 폐수에도 적용 가능.

2.3.2. 막모듈의 개발

(1) Plate & Frame 유기막 모듈

주 요 규 격	특 징	적 용 결 과
- PSF MWCO 2,000,000 Flat sheet Membrane - Module : PPF - Plate 자동분리장치 (유압식) - 0.8 m ² /sheet, 20 m ² /block - Plate를 요철로 만들고 오염시 자동으로 Frame을 분리하여 스폰지로 세정	- 난류축진에 의한 SS가 높은 폐수에 대해서도 투과 유속 높음 - 물리적 세정으로서 막표면 자동세정장치 및 약품 세정에 의해 장기적 성능유지	- 종이, Pulp의 Condensate 폐수 : i) MLSS(Methane발효액) : 10,200 mg/ℓ ii) BOD제거율 : 94% iii) COD제거율 : 89%

(2) Capillary형 유기막 모듈

주 요 규 격	특 징	적 용 결 과															
- PSF UF막의 외표면에 내오염성이 좋은 PVA를 도포, 가공시킨 분리막 - MWCO 8,000, 1.2/2.0 mm (ID/OD) - 외압식여과방식 및 막다발 엘리먼트와 하우징 분리형	- 한쪽 끝부분만 Potting하고 막충진밀도를 낮게 (충진율 19%) 하여 섬유상SS를 포함한 고농도 발효액의 처리에 적합 - 막모듈은 2-3개 직렬 연결접속하여 사용	- 대규모 하수의 SS가용화 Methane 발효 Reactor와 복합화 운전 (단위 : mg/ℓ)															
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>항 목</th> <th>원 수</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><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>	항 목	원 수	투과수	TDS	25,000	950	MLSS	21,000	<1	COD	33,000	48	BOD	4,600	16
항 목	원 수	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
- 0.27/0.41 mm(ID/OD) 외압식여과방식이면서 막표면에서의 폐수 흐름의 선속도가 크도록 고안	- 막 Element를 Housing으로 부터 분리할 수 있고 多重化, 多別化 가능하여 대규모처리에 적합	- 전분폐수 Bench-scale Test: 막표면에서의 SS농도 20,000 mg/ℓ의 고농도 영역에서의 역압세정만으로 장기연속운전가능

(4) Tubular외압형 무기막 모듈

주요 규격	특징	적용 결과										
- Pore size 0.1 μm의 알루미 나계 비대칭막 - 9/13 mm(ID/OD), 길이 750 mm의 막 - 3.2 m ² 의 직각형모듈 (폭 260 mm × 높이 150 mm × 길이 830 mm) - Pump 흡인식으로 운전, 반응내에 액면에 대해 수평으로 적층시켜 사용	- 막모듈 Casing이 불필요 - 반응조 내에서 막모듈이 점유하는 용적은 5% 정도이므로 효과적임 - 15,000~20,000 mg/ℓ의 MLSS를 가진 고효율 미생물 반응이 가능함	- 하수오니 열처리 분리액의 Methane 발효 처리 결과 <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>항 목</th> <th>결 과</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>	항 목	결 과	COD	4.2	BOD	2.2	TOC	1.4	SS	0
항 목	결 과											
COD	4.2											
BOD	2.2											
TOC	1.4											
SS	0											

(5) Tubular내압무기막 모듈

주요 규격	특징	적용 결과
- Type A : 내경 3.7 mm × 길이 500 mm의 Tubular 막200가닥 집속 - Type B : 내경 24 mm × 길이 1,000 mm의 단일 Tubular 막구조 - 소재 : Alumina - 0.1 μm Pore의 MF	- A Type은 저점도 저동력 운전에 적합하고 B Type은 고점도액에 적합 (55,000 mg/ℓ 수준)	- 종이, 펄프폐수, 하수SS 가용화 - 기액 2상 Crossflow여과 방식을 적용하여 안정적인 Flux얻음 (A Type : 0.64 m ³ /m ² d, B Type : 1 m ³ /m ² d)

(6) 평판형 무기막 모듈

주요 규격	특징	적용 결과
- 4장의 막소재를 高耐食性 고무로 일체화시켜 만든 모듈로서 각 Space와 교대로 적층시켜 막모듈 제작. - 0.2 μm Aluminad MF막 및 EPDM, 막면적 0.35 m ² , 500 L × 200 W × 3 t - 상한온도 60℃	- 내부유조에 Dead space가 없고 막표면을 균일하게 흘려주므로 막투과 유속이 높고 폐쇄발생이 극히 적다. - 역압세정가능	- 전분폐수의 발효산Reactor에 조합 적용 ; 20,000 mg/ℓ 이상의 고SS 농도에서 장기적 성능 유지가능함.

2.3.3. 계측제어시스템 개발

계측제어시스템의 개발과제 및 주요결과는 다음과 같다.

(1) Methane균 활성 계측기술 :

- 형광성보호소를 사용하여 화상처리에 의한 Methane균식별.
- 분산처리하는 전처리 탄으로 혼합계로 부터

Methane균을 선택적으로 농도측정

(2) Methane발효 제어기술

- Methane회수에너지량과 여과동력을 조화시켜 제어기술개발
- 유입부하 변동에 따라 막투과수량을 조절.

(3) 감시제어시스템

- 혐기성 Reactor에 대한 지식을 Base로 전문적

감시, 재어가 가능한 Software 개발.

2.3.4. 현탁물질의 분리·농축기술

현탁물질의 분리농축을 위해서 다음 기술이 연구되었다.

- (1) 粒狀포집형 현탁물질 포집재 충전식 공정
 - PU스폰지를 사용하여 현탁물을 고효율로 제거
 - 하수중의 SS 농도 및 유량변화가 있어도 균일한 성능유지 (SS를 80% 이상 제거하여 농축수의 SS농도를 10,000 mg/l 이상으로 공급)
- (2) 立型 원통형 Screen방식
 - 원통형스크린을 통해 내측에서는 농축액을 외측으로는 여과액을 얻는 공정으로서 Compact한 Process
 - SS제거율 약 50%이며 농축수는 5,000 mg/l의 SS농도, 첨가제(고분자응집제 5 mg/l)를 비량 넣으면 SS제거율 80%, 농축수 의 농도는 SS 10,000 mg/l)

2.3.5. 수처리 Reactor 개발

생물학적인 질소제거방법의 제문제점은 질화반응이 속도올수록로서 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 m³/m³d의 통수량이 1.6 m³/m³d까지 유지되었다.

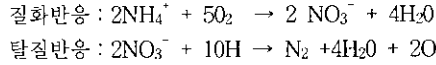
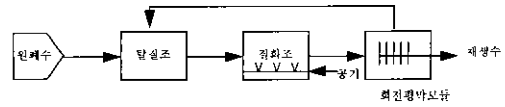


Fig 2-2. 회전평판모듈을 이용한 생물학적 질소제거 Flow

탈질소 반응용 첨가유기물로서 MeOH를 사용하였 으며 이것은 NO₃-N량의 3배량으로서 저침가에 의한 MeOH비용을 반으로 절감하였다. 또한 MLSS농도를 9,000 mg/l로부터 15,000 mg/l로 증가시키는 것에 의해 질소제거율이 10% 향상되었다. 생물학적 질소제거 Flow는 Fig. 2-2와 같다.

2.3.6. 오니 유화기술

효율적인 오니 처리기술로서 Aqua Renaissance Project에서는 오니 油化연속처리시스템을 고온 고압 (약 300℃, 100 kg/cm²)에서 운전하여 중유상의 Oil로 변화시키는 공정을 개발하였다. 운전결과 유출액의 Oil회수율은 11-16%에 달하였다.

2.3.7. 운전결과 및 경제성

Bench 및 Pilot Plant의 운전을 통해 얻어진 실험 결과를 토대로 실제 규모로 Scale-up한 경우를 계산 하여 각각의 경제성을 평가하였다. 경제성 평가에 기초를 둔 것은 물론 일본의 90년대 초 상황이며 다음 에 의거했다.

Table 2-2. 경제성평가 산출내역

고정비산출방법	고정비 (¥/m ³) = (α + β)(1+k) M/QN α : 이자율(연리 8%) β : 감가상각비 = (1-Z/100)/T - T : 설비평균수명 : 15년 - Z : 잔존가액 5% M : 건설비 (¥) k : α × 0.4 × 공기 = 0.016(공기 0.5년의 경우) Q : 처리수량 (m ³ /d) N : 연간 운전일수 (d/y), 하수는 365, 기타 300
오니처분비용	¥15,000/ton
인건비	¥ 4,000,000/인 · 년
막교체비	유기막(3년) : ¥20,000/m ² 무기막(15년) : ¥150,000/m ²
전력비	¥20/kwh
Methane회수비	¥47.7/10,000kcal (Methane발열량 8,000 Kcal/Nm ³)
보수비용	건설비의 0.5% /년

Table 2.3. 각 공정별 경제성 분석

배 수		대규모 하 수		소규모 하 수		유 지, 단백계폐수		전분계 폐 수		알콜계 폐 수		종이펄프계 폐 수		분 뇨	
처리규모 (m ³ /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 ³ 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 ²)		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 ³ /m ³ 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 중류폐수수질
- (2) 종이펄프계 폐수에서 원수수질의 ()는 고농도 메탄발효처리 대상수
- (3) 분뇨에서 처리수 FN은 2.5배 희석되어지므로 1,200 mg/ℓ 도 된다.

2.4. 결 론

Aqua Renaissance Project에서는 하수, 분뇨, 산업 폐수 등의 각종 유기폐수를 대상으로 Biotechnology 와 막분리기술의 복합화에 의해 고효율로 경제성이 높은 새로운 형태의 Bioreactor System을 개발하는 좋은 성과를 얻었다. 에너지 자원으로로서 Methane가스의 회수와 발생오니의 최소화와 동시에 수자원으로서 재생가능한 처리수를 얻는 것을 목표로 실험이 진행 되었으며 활용가능한 결과를 얻을 수 있었다. 산업폐 기물이 증가되고 있는 상황에서 오니로 부터 重油상 태의 오일을 얻을 수 있는 기술은 환경, 에너지 측면 에서 좋은 방향 제시라고 볼 수 있다. 폐수처리분야에 분리막을 본격적으로 적용하므로써 여기서 얻어진 결 과들이 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 과제로써 의미가 클수가 있다고 보며 이과제를 중심 으로 MAC21, 고도처리 MAC21, ACT 등의 과제를 추진케 한 원동력이 되었다고 본다. 국내에서도 일본 과 같이 산·학·연이 Consortium을 형성하여 환경·수처리 분야에 대한 핵심기술 및 요소기술을 개발하고 우리만이 가지는 독특한 기술을 확보하므로써 국제 경쟁력을 확보하며 국토의 환경보전을 할 수 있 기를 기대한다.

3. 중수도

우리나라에서도 1991년 수도법을 개정하여 중수도제 정도입의 법칙근거를 마련한 것을 시작으로 이제 중수

도는 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.

3.1. 일본의 건물폐수에 의한 중수도 적용현황

1980년대초까지 일본에서의 중수도 도입사례는 사무소 빌딩, 점포빌딩, 학교, 연구소, 사업소 등에서 80건 정도의 실시예가 있었으며, 물부족 및 수도물값의 인상에 따른 문제의 인식에 의해 실시되는 사례가 급증하게 되었다. 원수는 잡배수, 수세변소용수가 많고 냉각배수 하수처리 등도 있다. 잡용수 용도의 대부분은 허드렛물로 쓰이며 개별순환방식이 일반적이며 시가지 재개발 지구를 중심으로 지구순환방식도 실시하고 있다. 대부분의 중수도 규모는 100~500 m³/d의 수준이다.

빌딩폐수를 처리하여 잡용수로 재이용하는 사례에 대해 日本국토청에서 최근 20년간의 실적을 보고하였다. Table 3-1과 같이 약 2,100군데의 건물에서 320,000 m³/d를 재이용하고 있다. 또 잡용수의 용도는 Table 3-2와 같다.

Table 3-1. 잡용수 이용현황(1996, 일본국토청)

방 식	지역수	건수	水量(m ³ /d)
개별순환식	-	1,366	176,714
지역순환식	48	109	18,190
광역순환식	59	627	128,693
합 계	-	2,102	323,597

Table 3-2. 건물폐수의 잡용수 이용현황(1998)

용 도	건 수
화장실 세척수	1,269
散水용수	429
냉각·냉방용수	248
환경·조경용수	170
정소용수	148
세정용수	136
세차용수	135
기 타	212
합 계	1,606*

*유효회답수 1,606건에 대해 분류하였음.

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

Table 3-3. 처리원수의 종류

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

3.2. 일본의 건물폐수에 대한 중수도 적용 Process

중수도처리공정을 Table 3-4에 나타내었다. 생물처리가 353건으로 가장 많고 생물처리가 포함되지 않은 공정은 34건에 불과하다. 이 표에서는 활성오니법의 침전조 대신에 분리막을 사용하는 방법(막분리형호기)가 18% 정도로 많은 것이 주목된다. 고도처리의 단위공정으로서 Sand와 활성탄 흡착을 채용한 것이 많다.

Table 3-4. 처리공정의 채택현황

Process	채택건수	비 율 (%)
활성 오니법	99	30
생물 여과	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
합 계	725	-

1) 접촉산화: Honey Comb, 회전원반법 등.

불제생을 위한 공정은 Table 3-5와 같다. 원수의 종류에 따라서 다음과 같은 경향으로 처리됨을 알 수 있다.

- (1) 숯시설에 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 2단공정 + 고도처리가 31%로 가장 많다.
- (3) 잡배수만을 대상으로한 경우
 - 생물 + 여과(+고도처리)가 26%로 가장 많다.

Table 3-5. 재생처리시스템의 구성

처리공정	구분		전체		종합폐수		잡배수	
	건수	%	건수	%	건수	%	건수	%
생물 단독	41	12	0	0	17	14		
생물 2단	16	5	5	8	2	2		
생물 2단+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 2단	27	8	5	8	12	10		
물리화학+생물	18	5	0	0	3	3		
합계(332)	332	100	62	100	119	100		

※ 주 (1) 고도처리: A/C, 오존
 (2) 물리화학처리: 응집침전, 가압부상, Sand

3.3. 하우스덴보스의 중수도

3.3.1. 개요

하우스덴보스는 Nagasaki-ken이 민간기업과 합작하여 투자한 Water Front Resort인데 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 38,050명(상주인구 1,000명 숙박객 4,050명, 하루관광객 30,000명, 종업원 3,000명)으로 되어있다. 하루 최대 오수량은 3,400 m³/d이다. 하우스덴보스내에는 6 km의 운하가 있고 오수는 별도의 배관으로 수집되어 상수와 중수도로 사용된다. Table 3-6에 하우스덴보스의 계획처리수질을 나타내었다.

Table 3-6. 계획처리수질 (mg/ℓ)

항목	원수	2차 처리수	고도 처리수
BOD	320	20	5 이하
COD	150	50	10
SS	220	30	10 이하

3.3.2. 폐수처리 및 재활용 공정

Fig. 3-1에 처리공정을 나타내었다. 2차처리까지는

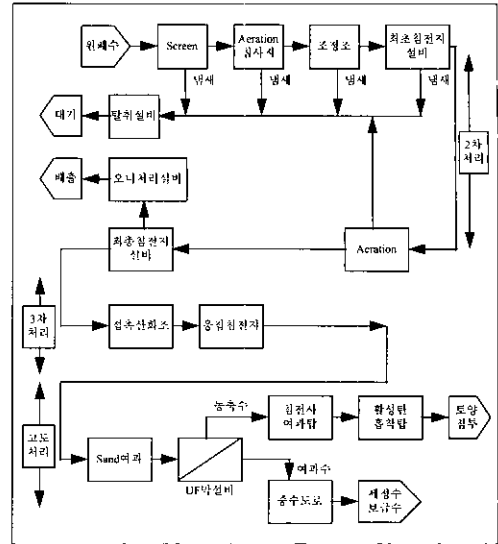


Fig 3-1. 하수처리시설 Flow

보통의 하수처리공정으로 처리하며 표준 활성오니법을 채용하고 있다. 그후에 3차처리 고도처리로써 접촉산화, 응집침전, 사여과, 한외여과 등에 의해 여과수는 재활용되고, 농축수는 응집사여과, 활성탄흡착 등을 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 PAN소재의 MWCO 13,000, 모듈의 막면적은 12.3 m²이다. UF System은 3계열이고, 인버터 사용에 의해서 일정한 여과압력을 유지하는 방법을 사용하였다.(1~2 kg/cm²운전)회수율은 80%로서 처리수량 3,400 m³/d 중 2,700 m³/d를 중수도로 공급할 수 있다. 농축수 700 m³/d은 침전사여과탑과 활성탄 흡착탑을 거쳐NaOCl로 소독시킨 후 토양침투시킨다.

3.4. Sumitomo Twin빌딩의 중수도 시설

住友 Twin빌딩은 사무소 빌딩으로서 총면적 128,000 m²이며 변기세정수 공급용중수도의 목적으로 각건물에서 135 m³/d 및 80 m³/d의 재생이용설비를 설치하였다. 수질목표는 SS 5 mg/ℓ, BOD 5 mg/ℓ, COD 20 mg/ℓ 이하. 색도 30도 이하이며 원폐수는 배설물과 잡배수로 한다. 원폐수 및 재생이용수의 수질은 Table 3-8과 같다.

주요기기로는 Screen(1차, 2차), UF Membrane block, Blower, 벌균설비, pH조정장치, 활성탄탑, 제어반 등으로 구성되어 있다. 폭기조 내에서 미생물에 의

Table 3-8. 원폐수 및 재생이용수의 수질

재수종류	항 목		계 획 수 질	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
재생용수	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

해 BOD가 완전분해되면 배설물 중에 포함된 요소 등의 질소성분이 소화되어 폭기조 내의 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 백색변이가 착색될 가능성이 있다. 따라서 색도제거를 위해 활성탄탑이 설치되었다.

건물폐수를 재활용하는 경우 수질외에 가장 중요한 것을 취기의 제거대책에 대한 문제이다. 취기발생원으로서 원생수조, 배출조, 폭기조, 유량조정조, 오니조 등으로 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 1.2~1.5배의 풍량으로 환기하고 수조 내를 항상 부압으로 견디게 한다.

4. Water Factory 21

4.1. Water Factory 21 추진배경

미국 California의 Orange County는 인구 250만의 지역으로서 이지역은 원래 풍부한 지하수백위에 위치하고 있다. 이지역에서는 OCWD(Orange County Water District)가 수도사업에 대해 관리하고 있으며 미국 북서부지역의 수도공급의 75%를 담당하고 있다. 나머지 25%는 Colorado강으로 부터 얻어진다. Orange County의 년평균 강우량은 300 mm로서 매우 작으므로 지하수가 수자원이 될 수 밖에 없다. 이러한 이유로 1956년에 그 지역으로부터 농업용수로서 지하수가 파이프채취된 것이 원인이 되어 결국 지하수의 수위가 해변보다 낮아지게 되었다. 따라서 해수가 해안보다

5마일이나 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 2마일 떨어진 지점에 7개의 호정을 뚫어 해수를 함유한 지하수를 뽑아내 바나로 돌리는 작업을 하였다. 특히 내륙부에는 직렬로 23개의 호정을 뚫어 담수를 강제 주입하므로써 해수의 진입을 방지하는 방법의 고안되었다.

주입용수로서 여러 가지 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.

특별히 하수처리수를 사용하기로 결정한 이유는

- 매년 바다에 투기되는 15,000 acre-feet의 폐수를 준일수 있고(1 acre-foot는 325,900gal)으로서 1년간 두가정이 사용하는 물임).
- Colorado강과 State Water Project에 의존성을 감소시킬 수 있고
- 해수침입을 막는 것이 우선적이므로 공업용수나 상수도를 적용하는에는 Risk가 있다. 폐수는 거의 일정하게 발생되는 특징이 있으므로 항상 일정한 수량을 공급할 수 있는 재생수를 선택하였다.

4.2. 처리공정

WF21은 57,000 m³/d, 연간 최대 2.34×10⁷ m³의 하수처리수를 재생할 수 있는 능력을 가지고 있다. 이것은 Orange County가 사용하고 있는 지하수의 약 10%

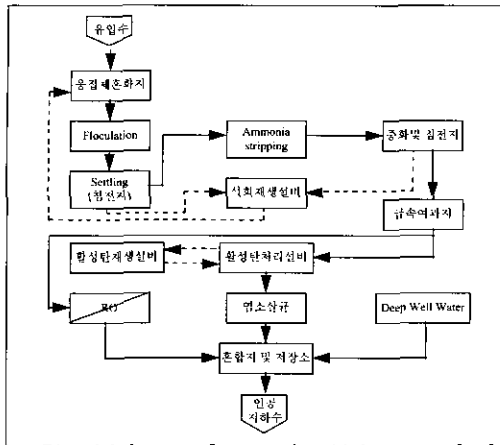


Fig 4-1. WF21 Flow Diagram

에 해당한다. WF21의 처리 Flow를 Fig. 4-1에 표시하였다. WF21에서는 최종처리로서 여과지에서 활성탄처리공정으로 보내는 양을 전체의 2/3, 나머지 1/3을 RO로 처리한 다음 각 공정의 처리수를 섞어서 지하수로 주입한다.

하수처리수는 석회혼화지에서 석회와 혼합교반시켜 flocculation시킨 후 응집침전처리를 한다. 석회의 첨가농도는 400 mg/l로서 인의 제거와 경도의 조절을 주로 한다. 응집침전지에서 침전된 칼슘 침전물은 회수되어 소각되어 생석회로 재사용된다.

처리수는 pH가 11이상되므로 중화조에서 석회소각시 발생한 CO₂를 이용하여 폭기하므로써 중화시킬 수 있다. 중화시 발생된 CaCO₃침전물은 제거한다. 중화된 처리수는 급속여과지를 거쳐 활성탄 및 RO공정으로 보내진다. 급속여과지를 통과한 처리수는 활성탄공정과 RO공정에 보내진다. 활성탄 처리의 접촉시간은 약 30분 정도이며 오염된 활성탄은 소각로에서 태워 약 90%이상 재생 활용한다.

RO Element로서 현재 Cellulose acetate 소재의 8인치 엘리먼트가 사용되며, 7열×6단이 하나의 Block으로서 총 6개의 Block (RO, 8엘리먼트 252개)이 설치되어 있다. RO처리압력은 14~39 kg/cm²이며 RO처리로 TDS 90% 이상이 제거된다. 각 공정에서의 수질은 Table 4-1과 같다. 또한 건설비 및 운전비용을

Table 4-1. 원수 및 각 공정의 수질

Constituent	Units	OCWD Influent from OCSD	RO Product water	Deep Well blend Water	WF-21 Blended Product Water	Regulatory 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
Electrical Conductivity	μmho	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
Physical Characteristics						
Color	Color units	34.6	<5.0	35	11.1	None
Turbidity	JTU	6.2	<0.01	-	0.27	None
Coliform	MPN/100mL	7.2×10 ⁵	2.5	-	0.11	None
Heavy Metals						
Arsenic	μg/L	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	50
Barium	μg/L	93.5	1.1	0.11	6.6	1000
Cadium	μg/L	9.3	0.07	<1.0	0.2	100
Chromium	μg/L	33	0.82	1.4	0.5	50
Copper	μg/L	49.3	3.9	15	4.9	1000
Iron	μg/L	113.8	2.8	60	22.2	300
Lead	μg/L	4.7	0.6	<1.0	0.1	50
Manganese	μg/L	56	0.1	6.2	2.1	50
Mercury	μg/L	0.3	0.3	<0.5	0.4	2
Selenium	μg/L	<5.0	<5.0	<5	<5.0	10
Silver	μg/L	1.6	0.1	<0.1	0.2	50
Organics						
COD	mg/L	53.4	0.8	11	3.5	30
TOC	mg/L	14.7	0.7	4.5	1.4	-
Thm's	μg/L	6.0	2.7	-	-	-

Tabel 4-2. Capital and Construction costs

CAPITAL AND CONSTRUCTION COSTS				
	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
Totals	\$20,837,000	\$7,330,000	\$3,276,000	\$10,231,000

Tabel 4-3. Operating Costs

OPERATING COSTS*				
	\$/AF	\$/100gal.	\$/m'	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 Wastewater, 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.

Table 4-2와 Table 4-3에 나타내었다.

5. 결 론

일본의 Aqua Renaissance Project에서 수행한 하수, 분뇨, 산업폐수 등의 각종 유기폐수를 대상으로 Biotechnology와 막분리기술의 복합화에 의해 고효율로

경제성이 높은 새로운 형태의 Bioreactor System 개발, 건물폐수의 중수도 적용을 위한 분리막 공정의 활용, 미국 California의 Orange County에서 수행한 Water Factory21에 의한 수자원 확보를 위한 분리막 공정의 활용에 대한 세계적인 추세에 발 맞추어 국내의 수자원 확보를 위한 분리막 공정의 개발 및 활용에 대한 연구가 요구된다.