

제주도 대체수자원 확보를 위한 하수처리장 방류수 재이용 연구

강봉래, 김건태*, 고기원, 허 목**

제주도광역수자원관리본부, * 코오롱건설(주) 기술연구소 ** 제주대학교 환경공학과 (brkang@provin.jeju.kr)

<요약문>

제주지역 하수종말처리장에서 발생하는 방류수(2차 처리수)를 재이용함으로써 지하수에 편중된 제주도의 용수 이용패턴을 다원화 하는 대체수자원으로 활용하기 위하여 2001년 6월부터 하수처리장 방류수 재이용 방안연구를 실시하였다. 제주도내에서 운영 중인 3개 하수종말처리장의 방류수에 대한 장기적인 수질검사 결과, 염소이온 함량이 높아 재처리를 하지 않은 상태로 재이용 하기는 곤란한 것으로 파악되었다. 따라서, 재처리를 위한 최적의 공정을 선정하기 위해 pilot test를 실시한 결과, 방류수를 MF(정밀여과)막 전처리 + RO(역삼투)막 처리의 재처리 공정으로부터 재처리된 물(3차 처리수)의 수질은 먹는물로 사용하더라도 전혀 문제가 없을 만큼 깨끗하게 처리되었다. 따라서 방류수 배출량이 많은 제주시 도두하수처리장과 서귀포 보목하수처리장의 방류수를 재처리하여 비음용 생활용수, 골프장 관개수용수, 농업용수, 지하수 인공 함양용수 등으로 재이용하는 방안을 제시하였다.

key word : filtration, reverse osmosis, water reuse

1. 서론

일반적으로 하수처리장 방류수는 가뭄이 들어도 일정량이 지속적으로 발생하므로 선진 외국에서는 이를 재처리하여 대체수원으로 활용해 오고 있다. 미국 캘리포니아 오렌지 카운티 「Water Factory 21」에서는 방류수를 RO 및 활성탄으로 처리해 1일 85,540m³의 용수를 지하수 인공함양 용수로 재이용하고 있으며, 플로리다주에서는 1일 2,176천m³을 재처리하여 농장, 골프장, 학교, 지하수 인공함양 등에 사용하고 있다. 싱가포르의 경우, 「NEWater Factory」에서는 방류수를 RO로 재처리하여 1일 10,000m³의 물을 간접음용수, 72,000m³의 물을 비음용수로 재이용하고 있다.

제주도의 연평균 강수량은 1,978mm에 이르지만 다우년(1999년 2,944mm)과 과우년(1996년 1,422mm) 간의 편차가 1,500mm에 이를 정도로 매우 커 지하수 함양량과 적정 개발량은 안정된 상태를 유지 못하고, 강수량에 따라 불안정한 상태를 유지하고 있지만, 용수이용은 전적으로 지하수에만 의존하고 있어 극단적인 이상 가뭄 시에는 물 부족으로 인한 경제적 손실이 우려되고 있다. 이러한 제주도의 취약한 수자원 부존여건을 극복하기 위한 방안으로서 하수처리장 방류수의 재활용을 고려할 수 있다. 방류수를 재이용하는 경우, 극단적인 가뭄시 농업용수 부족문제 해결은 물론 지하수자원의 수량보전, 지하수 일변도의 물이용 패턴 다원화, 청정한 바다환경과 해양생태계의 안정성 유지 등의 효과를 기대할 수

있다. 본 연구에서는 하수처리장에서 배출되는 방류수의 수질에 대한 평가를 통하여 재이용에 따른 수질적인 문제점을 도출하고, 이를 해결하는데 필요한 최적의 재처리공정을 개발함과 아울러, 외국의 방류수 재이용 사례 및 수질기준에 대한 조사를 바탕으로 제주지역에 적용 가능한 방류수 재이용 방안을 연구하였다.

2. 제주지역의 하수 처리량 및 방류수의 수질

2003년 8월 현재 제주도 내에 운영중인 하수종말처리장은 제주시 도두를 비롯하여 서귀포시 중문(서부) 및 보목(동부)의 3개소이며, 시설용량은 165,000m³/일이고, 일평균 처리량은 111,491m³이며, 2006년 완공목표로 진행 중인 군 지역 하수처리장 5개소가 준공되면 기존 하수처리장을 포함해 1일 약 140,000m³의 방류수가 발생할 것으로 전망되고 있다. 방류수에 포함된 일반 오염물질을 비롯한 미량성분 30개 항목의 농도를 파악을 하기 위해 2001. 8~2002. 4월까지 월 1회(중금속류는 4회 분석)씩 분석한 결과, 염소이온은 최대 117.6~3,523.9mg/ℓ를 나타내 내륙지역 하수처리장 방류수보다 높았으며, BOD 26.5~2.9mg/ℓ, 대장균군은 3,200~42개/100mℓ, NO₃⁻-N 2.1~27mg/ℓ을 나타냈다. TCE를 비롯하여 페놀, 유기인, As, CN, Cd, Cr⁶⁺, Hg 등 유해물질은 검출되지 않았고, Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺, Na⁺ 등의 이온성분들은 대체로 10~50mg/ℓ 범위의 농도를 나타내었다. 제주지역 하수처리장의 방류수 수질성과 외국의 방류수 재이용 수질기준 또는 권장사항을 고려할 때, 상기와 같은 수질의 방류수를 재이용하기 위해서는 염분 및 미생물 제거가 요구된다.

표 1 하수처리장 방류수 수질분석 결과

구 분	제주시			서귀동부			서귀서부		
	최대	최소	평균	최대	최소	평균	최대	최소	평균
pH	7.4	6.2	7	7.3	6.1	6.9	7.5	6.2	6.8
BOD(mg/ℓ)	20	3.7	13.8	26.5	2.9	10	15	5.4	8.6
COD(mg/ℓ)	16.4	6.8	12.2	17	5	9.5	24	11.6	15
SS(mg/ℓ)	13.3	1.8	5.3	7	2.3	3.8	18.6	5	10.9
Cl-(mg/ℓ)	1,082.9	492.7	730	721	382.2	529.6	3,523.9	117.6	643.2
NO ₃ -N(mg/ℓ)	13.5	2.1	6	16.6	4.6	8	27	7.5	15.3
T-N(mg/ℓ)	24.9	13.4	19.5	21.9	14.2	17.1	34	26.2	29
T-P(mg/ℓ)	1.9	0.6	1.4	2.7	1.1	1.7	3	1.6	2.5
대장균군(개/100mℓ)	1,400	97	600	3,200	290	930	700	42	400
Ca(mg/ℓ)	23.8	15.1	19.7	15.1	10.4	12.7	14	12.3	13.1
HCO ₃ ⁻ (mg/ℓ)	131.9	53.5	87.6	75.9	38.6	55.1	87.3	41.1	61
K(mg/ℓ)	46.9	20.3	30.7	31.9	9.6	15.8	34.5	12.9	24.5
Mg(mg/ℓ)	11.7	5	9.7	9.9	5.4	8	8.2	6.3	6.9
Na(mg/ℓ)	50.1	23.4	32	39.9	26.2	32	41.5	21.3	31.4
Pb(mg/ℓ)	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0.1	0.1	0.1
SiO ₂ (mg/ℓ)	21.7	15	18.1	18.3	12.2	15.4	23.7	21.8	22.5
SO ₄ ²⁻ (mg/ℓ)	62.6	10.8	40.3	42.4	25.9	31.8	29	15.3	21.3
Zn(mg/ℓ)	0.1	0	0	0.2	0	0.1	0	0	0

3. 방류수 재처리를 위한 Pilot Tset

제주지역 3개 하수처리장의 방류수 수질에 대하여 연구를 실시한 결과, 방류수를 재처리하지 않은 상태로 농업용수나 조경용수 등으로 이용할 수 없는 것으로 밝혀짐에 따라 재이용이 가능한 수질로 재처

리하는 방안에 대한 연구를 실시하였다. 현장 접근성, 방류수 발생량, 향후 방류수 재이용사업 등을 고려하여 제주시 도두하수처리장을 대상으로 Pilot Test를 실시하였다.

3-1. 전처리 공정 선정

제주시 도두하수처리장 방류수에는 SS가 1.8~13.3mg/ℓ 정도 함유되어 있어 막오염 방지 및 막 수명 연장 등을 위해서는 이를 적정수준 이하로 제거하기 위한 전처리공정이 요구된다. 분리막 전처리 공정 선정을 위해 Particle 분석을 실시한 결과, 약 3,000 개/ml가 함유되어 있는 것으로 분석되었다. 또한, 유입하수에서 발견되는 입자는 대부분 10~100μm 범위 크기이나 방류수에는 2~11μm 크기의 입자들이 약 95% 차지하고 있는 것으로 분석되었다. sand filter 공정에 의한 부유물질 및 입자제거 평가결과, 부유물질 총량은 최저 84% 이상의 제거효율을 나타냈으나 RO 막에 침착되는 미세부유물질 중 20μm 이하의 입자가 약 98%를 차지하고 있어 sand filter공정으로는 이들 물질을 제거하기 어려운 것으로 판단되어 본 연구에서는 세공크기 0.1 μm의 BMF 분리막을 전처리 설비로 채택하였다.

3-2. 분리막 공정 선정을 위한 분리막 평가

방류수 재이용을 위한 재처리 주 공정을 선정하기 위하여 UF, NF, RO 분리막 종류별 처리성능 평가를 실시하였다. 이 평가에는 제주시 도두하수처리장 방류수를 사용하였으며, 모든 분리막에는 MF에 의한 전처리 공정을 거친 물을 통과시켜 EC, pH, BOD₅, COD_{Mn}, COD_{Cr}, SS, Cl⁻ 항목의 제거율에 대해 평가를 수행 하였다. 그 결과, BOD는 3가지 분리막에서 모두 효과적으로 제거되었으나 전기전도도와 Cl⁻는 RO막을 제외한 분리막 공정은 10% 미만의 낮은 제거율을 나타내 염분농도가 높은 제주지역 하수처리장 방류수의 재처리에는 역삼투막공정이 가장 적합한 것으로 평가되었다.

3-3. Pilot Tset 결과

본 연구에서는 제주시 도두하수처리장 방류수를 Pilot Plant에 의해 실제로 재처리하는 과정을 통하여 방류수(원수) 특성에 따른 시스템의 성능평가를 수행함으로써 최적의 재처리시스템을 구성함과 아울러, 운전인자를 확보하기 위하여 1일 20m³ 규모의 Pilot Plant를 설치·운영하였다. Pilot Plant를 통해 재처리되는 처리수의 수질을 평가하기 위하여 방류수(원수), MF 전처리수, RO 처리수 각각에 대해 월 1회씩 30개 항목에 대한 수질분석을 실시한 결과는 표 1과 같다. 본 연구에서 수행한 Pilot Plant RO 처리수의 수질은 국내는 물론 외국의 하수처리장 방류수 재처리 사례와 비교하더라도 전혀 손색이 없이 처리되고 있음을 확인할 수 있었다. 특히, 방류수 재이용에 가장 큰 걸림돌로 작용했던 과도한 염소이온과 염분농도 문제가 완전히 해결됨으로써 농업용수는 물론 조경용수, 공업용수, 지하수 인공함양 용수 등으로 재이용할 수 있는 것으로 사료된다.

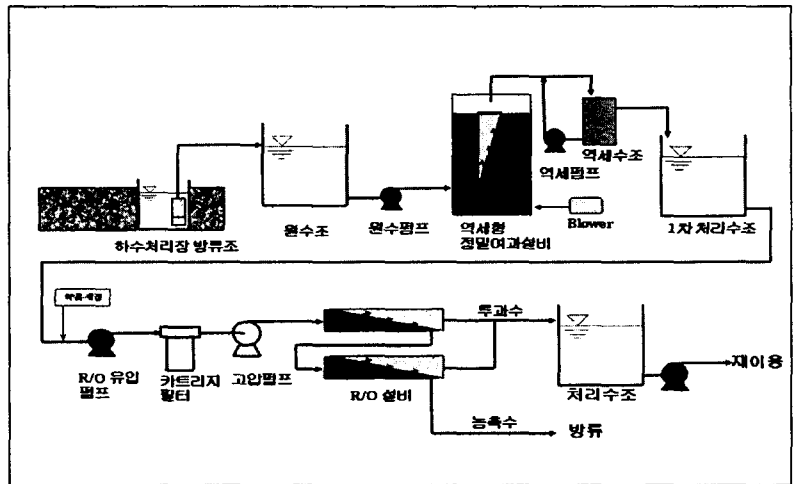


그림 1. 제주시 도두하수처리장 방류수 재처리 Pilot Plant 공정도

표 2. 분리막 공정별 방류수 중의 오염물질 제거성능 평가결과

항 목	방류수	MF 처리수	UF 처리수	NF 처리수	RO 처리수
EC($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2,170~4,380	2,170~4,160	2,030~4,040	1,785~3,535	35~77
pH	7.3~7.2	7.15~7.2	7.12	6.9~7.0	5.9
BOD(mg/ℓ)	2.9~8.7	0.6~0.9	0.6~0.9	0.5~0.9	-
COD _{Mn} (mg/ℓ)	10.8~1.8	7~11.2	4.2	4	0.3
COD _{Cr} (mg/ℓ)	19~26	10~15	5~10	5~10	-
SS(mg/ℓ)	3.8~7.7	0.6	-	-	-
Cl(mg/ℓ)	390~480	-	385~465	358~423	3.4~7.5

4. 제주지역 하수처리장 방류수 재이용 방안

제주지역 하수처리장 방류수의 재이용은 우선적으로 방류량이 많은 제주시 도두 및 서귀포시 보목하수처리장을 대상으로 실시하는 방안을 제시하였다. 즉, 하수처리장에서 발생하는 방류수를 재처리(3차 처리)하여 농업용수·골프장 조경용수·공업용수·지하수 인공함양 용수 등 직접적 비음용 용수로 재이용을 함으로써 한정된 지하수자원을 보전하는 대체수자원으로 적극 활용하는 방안이다.

제주시 도두하수처리장의 방류수를 재이용하는 방안으로는 ① 제주공항 주변에 입지 예정인 “제주공항 자유무역지역”에 비음용 생활용수로 공급함과 아울러, 서부관광도로 주변의 해발 약 430m까지 중산간도로를 따라 가압·이송 후, 골프장 용수·공장용수·농업용수·지하수 인공함양 용수 등으로 재이용하는 방안과 ② 제주공항 주변에 입지 예정인 “자유무역지역”에 비음용 생활용수로 공급하고, 나머지는 1100도로를 따라 제주도축산진흥원(해발 약 300m) 주변지역까지 가압·이송한 후, 지하수 인공함양 용수로 이용하는 방안, ③ 제주공항 주변에 입지 예정인 “제주공항 자유무역지역”에 비음용 생활용수로 공급하고, 나머지는 북제주군 애월읍 장전리(해발 약 160m)까지 약 11km 가압·이송한 후, 이 지역에 농업용수로 공급하고, 농업용수 수요량이 적은 때에는 인공함양 용수로 활용하는 방안이다.

서귀포시 보목하수처리장 방류수의 재이용 방안으로는 ① 방류수를 재처리한 후 일부는 보목동 및 효돈동 지역에 농업용수로 공급하고, 나머지는 남원읍 하례2리(해발 약 160m)까지 약 7km 가압·이송한 후, 위미리 지역까지 농업용수로 공급하고, 잉여 수량은 지하수 인공함양 용수로 활용하는 방안, ② 보목동과 효돈동 지역에만 농업용수로 공급하는 방안을 고려해 볼 수 있다.

5. 결 론

제주도의 취약한 수자원 부존여건을 극복하기 위한 방안으로서 하수처리장 방류수를 재이용하기 위해, 방류수의 수질에 대한 평가를 통하여 재이용에 따른 수질적인 문제점을 도출하고, 이를 해결하는데 필요한 최적의 재처리공정으로 개발함과 아울러, 외국의 방류수 재이용 사례 및 수질기준에 대한 조사를 바탕으로 제주지역에 적용 가능한 방류수 재이용 방안을 연구한 결과 재처리 공법으로서 MF + RO를 조합한 공정이 연구 목적에 부합된다는 결론을 얻을 수 있었으며, 이를 응용하여 제주지역 하수처리장 방류수 재이용 방안을 제시하였다.

6. 사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 지원(과제번호 4-1-1)을 받는 광주과학기술원 물 재이용기술센터 연구비에 의해 수행되었습니다.