전북지역 하수처리수 재이용 방안 연구

A Study on Reuse of Reclaimed Water in Jeonbuk Province

조창우^{*} · 김진태 · 박정제 · 송주훈 · 이미선 · 정주리 · 류재웅

Changwoo Cho^{*} · Jintae Kim · Jeongjae Park · Juhoon Song

Miseon Lee · Juri Jeong · Jaewoong Ryou

전라북도보건환경연구원

Public Health Environment Institute of Jeollabuk-do

(Received July 11, 2016; Revised December 5, 2016; Accepted March 30, 2017)

Abstract : This study was aimed at investigating effluent water quality and proposing reuse possibilities for 12 sewage treatment plants discharged more than 5,000 m³/day in order to recycle the sewage treatment plant effluent of Jeollabuk-do effectively. Additionally, a laboratory scale test for reprocessing water discharge was performed. Categories of reclaimed sewage water reuse were divided into 7 topics and analyzed a total of 28 items including 16 heavy metals based on water quality standard. As a results, color, BOD, TN, chloride and Electrical Conductivity (EC) exceeded reused water quality standard. In particular, color and TN exceeded in 8 and 5 sewage treatment plants, respectively. The value of chloride and EC were high in sewage treatment plants including the food and industrial wastewater. At 4 sewage treatment plants were possible to reuse without re-treatment. The laboratory scale test was conducted to SandFilter (SF)-Granular Activated Carbon (GAC)-MicroFiltration (MF)-Reverse Osmosis (RO). Both the removal efficiencies and economic feasibility of total *E. coli*, color and Suspended Solid (SS) suited in case using the SF-GAC treatment method. The removal of chloride and EC had little effect in the case of SF-GAC-MF system, but RO showed over 90% of removal efficiency. After using SF-GAC process only, the concentration of UV₂₅₄ decreased sharply from 0.3651 /cm to 0.0306 /cm and it showed over 92% of removal efficiency rate. In conclusion, for the effective reuse of sewage discharged water, water quality and the surrounding terrain of treatment plants should be all taken into account. If it needed for the reprocessing, both the selection for treatment and economic combination treatment methods will have to be considered.

Key Words : Reclaimed Sewage Water Reuse, Laboratory Scale Test, Sandfilter (SF), Granular Activated Carbon (GAC), Micro-Filtration (MF), Reverse Osmosis (RO)

요약 : 본 연구는 전라북도 내 하수처리장 방류수를 효율적으로 재이용하기 위해 일일 방류량이 5,000 m³ 이상 되는 12개 하수처리장을 대상으로 방류수 수질을 조사하고 처리장 주변 현황을 파악하여 용도별 재이용 가능성을 제안하는데 목적을 두었다. 추가적으로 방류수를 재처리하기 위한 실험실규모의 실험도 수행하였다. 방류수는 7개 용도별 수질기준에 근거하여 중금속 16개 항목을 포함한 총 28개 항목을 수질 분석하였다. 분석결과 부적합 항목은 색도, BOD, TN, SS, 염화물, 전기전도도 등 6개 항목이며, 색도와 TN이 각각 8개소, 5개소로 가장 높았다. 유입원수가 공단폐수 및 음식물처리수가 유입되는 처리장의 경우 염화물과 전기전도도가 높았다. 방류수 재처리없이 직접 재이용수로 가능한 처리장은 4개소였다. 실험실 규모의 실험(Lab test)은 모래여과(SF)-활성탄흡착(GAC)-정밀여과(MF)-역삼투압(RO) 순으로 실험을 수행하였다. 총대장균군, 색도, 부유물질(SS) 제거는 SF와 GAC조합이 경제성과 처리 효율면에서 가장 적절하였으며, 염화물과 전기전도도는 SF, GAC, MF에서는 큰 효과가 없었으며, RO처리 후 90% 이상의 제거효율을 보였다. UV₂₅₄는 원수가 0.3651 /cm에서 SF-GAC공정 후 0.0306 /cm로 92% 이상의 높은 제거효율을 보였다. 중금속 중 총붕소(B-total)는 SF-GAC-MF-RO 처리 후 0.7054 mg/L에서 0.0854 mg/L로 88% 제거효율을 보였다. 결론적으로 각 처리장은 방류수 수질분석결과와 주변 지형을 고려하여 방류수 재이용 용도를 선택하여야 한다. 또한 재처리가 필요한 경우 처리할 수질 항목과 처리비용을 고려한 처리방법을 결정하는 것이 적절하다고 판단된다.

주제어 : 하수 재이용, 실험실규모실험, 모래여과, 활성탄흡착, 정밀여과, 역삼투압

1. 서론

1.1. 연구배경 및 목적

물은 인간생명의 가장 기본적인면서 필수요건 중 하나이다. 이러한 물의 사용량은 전 세계적으로 꾸준한 인구증가와 급속한 산업화, 도시화 그리고 기후변화로 인해 급증하고 있는 추세이다. 그러나 물 수요량에 비해 공급량은 갈수록 감소하고 있어 대체 수자원 확보의 중요성이 대두되고 있다.

2015년 기준으로 우리나라의 연평균 강수량은 948.6 mm로, 1973년 이후 최소 세 번째로 적은 강수량을 보였으며 이중 2/3가 홍수기인 6~9월과 태풍기간에 집중되어 있다.¹⁾ 과거 기록에서도 우리나라 연평균 강수량은 1,245 mm (1974~2003년 평균)로 세계 평균 강수량 880 mm와 비교하여 약 1.4배로 높으나 인구밀도가 높기 때문에 1인당 연강수량은 2,591 m³로 세계 평균의 약 1/8에 불과하다. 또한 연간 1인당 수자원 이용량은 540 m³로 OECD 연간 1인 평균이용량 920 m³보다도 적으며 30개 OECD 국가 중 17위를 차지하

^{*} Corresponding author E-mail: sheri92@korea.kr Tel: 063-290-5246 Fax: 063-290-5218

고 있어 물 부족국가로 평가되고 있다.²⁾ 물 이용면에서는 2003년 기준으로 생활용수 사용량은 1965년보다 33배, 공업용수는 6배, 농업용수는 4배 이상 증가하였으며 하천 기능을 유지하기 위한 하천유지용수의 수요도 증가하는 추세이다.³⁾

2030년에는 전 세계의 수자원 공급량의 약 40%가 부족할 것으로 예상되며, 공급 효율성을 개선한다고 해도 20% 정도만 해결된다는 비관적인 전망도 있다.³⁾ 우리나라의 경우도 2020년에는 연간 4.4억 톤의 물이 부족할 것으로 전망하고 있어 물 관리정책의 필요성이 대두되고 있다.²⁾

따라서 정부는 물 부족 문제를 해결하고 공급위주에서 수요관리 중심으로의 정책전환을 위해 2000년 3월 「물 절약 종합대책」을 수립하고, 2001년 1월 「수도법」을 개정하여 물 절약을 위한 의무화 규정을 신설하고, 2011년 6월 「물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률」을 제정하여 빗물, 중수도, 하·폐수 처리수의 재이용을 할 수 있도록 규정했다.⁴⁾ 이 중 하수재이용이란 하수처리수를 유용하게 재활용하는 것을 말하며, 하수를 이용목적에 맞게 재처리하여 쓰는 것을 의미한다. 하수재이용은 로마시대부터 비롯되었지만 체계적인 재이용은 19세기 이후이며, 1960년대부터 하수재이용을 위한 수처리 공정과 수질기준을 정비하게 되었다.⁵⁾

2012년 기준으로 우리나라의 물 재이용량은 약 12억 m^3 으로 전체 수자원 총 사용량인 337억의 3.6% 수준이다. 이 중 빗물재이용은 829만 5천 m^3 , 중수도 재이용은 3억 2천 m^3 그리고 하수처리수 재이용은 8억 7천 m^3 을 차지하고 있다. 특히 하수처리수 재이용 시에는 5천톤 규모 이상의 처리장에서는 10% 재이용을 의무화하고 있다.⁶⁾ 선진국인 미국의 경우에서도 아리조나, 캘리포니아, 플로리다, 텍사스 등 건조한 남부 및 남서부 지역에서는 수자원의 효율적 활용을 위해 용수의 재이용을 적극적으로 권장하고 있으며 요구수질기준, 처리공정, 이용시설 등에 대해 종합적이고 세부적으로 규정하고 있다.⁷⁾

이러한 관점에서 물 재이용 산업은 과거 기존 수자원에만 의존하던 것과 달리 새로운 대체 수자원을 이용할 수 있는 각광 받는 산업이며 특히 하수처리장 최종 방류수 재이용은 갈수기에도 안정적인 유량 확보가 가능하다. 또한 활성탄을 이용한 색도와 유기물질 제거,⁸⁾ 한외여과나 역삼투법을 이용한 하수재이용 처리기술의 발전⁹⁾으로 양질의 처리수가 방류되기 때문에 재처리를 위한 많은 연구가 수행중이다.

따라서 본 연구에서는 「물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률」에 기초하여 전라북도 내 하수처리장 방류수를 효율적으로 재이용하기 위해 하수처리장을 현장 방문하여 주변 현황조사 및 방류수의 수질을 파악하며, Lab scale test를 이용하여 재이용 용도에 맞는 맞춤형 실험을 통해 각 처리장에 가능성을 제안하는데 목적을 두며 그 범위는 다음과 같다.

첫째, 대상지점은 도내 일일 하수 방류량이 5,000 m^3 이

상인 지점으로 선택하였다.

둘째, 대상지점 하수처리장에 대해 현장주변조사 및 방류수에 대한 용도별 수질기준을 맞추어 분석하였다. 셋째, 각 처리장에 재이용 가능성을 제시하기 위해 모래여과-활성탄-정밀여과-역삼투압 기술을 조합한 Lab scale test를 수행하였다.

끝으로, 위의 실험결과를 토대로 각각의 처리장에 용도별 하수재이용 방안을 제시하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상 및 시료채취

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 전라북도 내 공공하수처리장 중 일일 하수처리수 방류량이 5,000 m^3 이상인 처리장 12개소를 연구대상지점으로 선정하였다. 대상기관 선정 기준은 「물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률 시행령 제12조」에서 언급한 1일 하수처리 용량이 5천 m^3 이상인 처리시설을 기준으로 하였다. 하수 처리공법은 주로 CSBR, BNR, SBR, Symbio, Fluidyne SBR 등이 이용되었다.^{11~15)}

시료는 대상 처리장의 최종 방류구 전에서 채취하였으며, 채취기간은 기본적으로 2월, 4월, 6월, 8월 등 4회를 수행하고, Lab scale test시에는 시스템 운전방향에 따라 수시로 채수하였다. 각각의 하수처리장에서 대장균을 제거하기 위해 사용하는 소독방법은 대부분 자외선 소독을 실시하고 있으며 전주 1, 2단계와 익산하수처리장은 염소소독으로 하였다.

Lab scale test에 사용된 대상시료는 하수처리 방류수가 재이용수 기준을 초과하는 항목이 가장 많은 군산하수처리장과 유입원수가 순수하수 뿐만 아니라 음식물처리수, 분뇨처리수, 공단폐수, 매립장 침출수까지 포함된 전주처리장을 선택하였다.

Fig. 1. Sampling points (blue areas) for the reuse study of treated sewage water in Jeonbuk province.

Fig. 2. Process schematic diagram of SF-AC-MF-RO system for Lab scale test.

Fig. 3. The SF-AC-MF-RO system equipment for lab scale test.

2.2. 실험장치의 구성 및 운전조건

각 하수처리장 방류수의 재이용 가능성을 제시하기 위해 재이용 용도에 맞는 맞춤형 Lab scale test를 수행하였다.

Lab scale test용 실험장치의 모식도와 실제 장비사진은 Fig. 2와 3에 나타내었다. 장치구성은 크게 전처리장치와 여과장치로 구분하였다. 색도 및 부유물질 등 부분적인 처리효과를 높이기 위한 전처리 장치로는 모래여과, 활성탄 흡착을 이용하였고, 다음으로 추가 오염물질 제거 및 활성탄 공정에서 흘러나오는 활성탄 찌꺼기로 인한 역삼투(RO) 막 fouling을 최소화하기 위해 정밀여과(MF)막을 설치하고 마지막 후단에 역삼투(RO)막을 설치하였다.

Sand filter에는 크기가 다른 모래를 각각 4 L (2 × 5)와 3.5 L (0.8 × 1.2)을 넣었으며, 그 위에 anthracite 3.5 L (1 × 2)를 추가하였다. Activate carbon filter는 하부에는 1차 걸름을 위해 모래를 4 L (2 × 5) 정도 주입하고 그 위에 Activate carbon 7 L (8 × 30)을 추가하였다. 본 연구에 사용된 AC는 KD-201 (8 × 30 mesh)규격의 경덕탄소산업회사의 제품인

야자계 성분의 활성탄이다. 실험에 사용된 역삼투압 멤브레인은 DOW FILMTECH에서 제작한 제품으로 재질은 현재 폭넓게 사용되고 있는 박막합성 폴리아미드막(polyamide thin film composite)으로 중공사막(Hollow-fiber type)형태로 되어 있다.

2.3. 분석항목 및 방법

공공하수처리시설 방류수의 재이용 활용여부를 판단하기 위한 분석항목은 Table 1에 나타난 것처럼 「물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률 시행규칙 제14조 별표 2 하·폐수 처리수 재처리수 및 온배수 재처리수의 용도별 수질기준」에 준하여 일반 항목은 BOD₅ 등 12개 항목과 추가로 농업용수 수질기준 시 적용되는 중금속 16개 항목 등 총 28개 항목을 분석하였다.

수질분석은 수질오염공정시험기준과 먹는물 수질공정시험기준에 의해 분석을 수행하였다. 중금속 분석의 경우 알루미늄(Al), 붕소(B-total), 코발트(Co), 리튬(Li)은 먹는물 수질공정시험기준에 의해 분석하였고, 나머지 중금속 항목의 분석은 모두 수질오염공정시험기준에 준하였다. 참고로 코발트와 리튬 분석은 먹는물 수질공정시험기준 ES 05400.2에 준하여 분석하며 이 경우 코발트와 리튬의 측정파장은 각각 228.616 nm, 670.784 nm이며 정량한계는 각각 0.01 mg/L와 0.50 mg/L이다.

Lab test시 분석항목은 Table 2와 같이 12개소 처리장에서 각 항목별 4회 평균값이 기준을 초과하는 항목을 선택하였으며, 추가적으로 공단폐수 및 음식물처리수와 같은 유입원수의 영향을 많이 받는 염화물과 전기전도도에 대해서도 제거효율을 알아보았다. 또한, 기준 이하였으나 농업용수 재이용수 기준이 되는 중금속 항목 중 농도가 높게 분석된 총붕소의 제거효과에 대해서도 알아보았다.

Table 1. Recommended water quality standard for reclaimed water usage

Reuse category Parameter	Cleaning· Toilet water	Washing water· waterhead	Landscaping water	Human- friendly water	Stream main- tenance water	Agricultural water	Groundwater recharge water	Industrial water
Total coliform (MPN/100 mL)	MND*	≤1,000	≤1,000	MND	≤1000	Direct MND Indirect ≤200		
Combined residual chlorine (mg/L)	≥0.2	-	-	≥0.1	-	-		
Turbidity (NTU)	≤2	≤2	≤2	≤2	-	Direct ≤2 Indirect ≤5		
BOD ₅ (mg/L)	≤5	≤5	≤5	≤3	≤5	≤8	Water quality standard for drinking water	Decision after consultation between suppliers and customers
Odor	Not unpleasant	Not unpleasant	Not unpleasant	Not unpleasant	Not unpleasant	Not unpleasant		
Color (Pt-Co units)	≤20	-	-	≤10	-	-		
TN (mg/L)	-	-	-	≤10	≤20	-		
TP (mg/L)	-	-	-	≤0.5	≤0.5	-		
pH	5.8~8.5	5.8~8.5	5.8~8.5	5.8~8.5	5.8~8.5	5.8~8.5		
Chloride (mgCl/L)	-		≤250	-	-	-		
ECw** (μs/cm)	-		-	-	-	Direct ≤700 Indirect ≤2000		

* MND means must not be detected, ** ECw means electrical conductivity

(unit : mg/L)							
Aluminum (Al)	Arsenic (As)	Boron (B-total)	Cadmium (Cd)	Chromium (Cr ⁶⁺)	Cobalt (Co)	Copper (Cu)	Lead (Pb)
≤5	≤0.05	≤0.75	≤0.01	≤0.05	≤0.05	≤0.2	≤0.1
Lithium (Li)	Manganese (Mn)	Mercury (Hg)	Nickel (Ni)	Selenium (Se)	Zinc (Zn)	Cyanide (CN)	polychlorinated biphenyl (PCB)
≤2.5	≤0.2	≤0.001	≤0.2	≤0.02	≤2	ND*	ND

* ND means Not Detected

Table 2. Analysis items for lab scale test

Experiment	Analysis items
Lab scale test (SF-AC-MF-RO system)	○ General analysis items (6)
	- Total coliform
	- Color
	- Dissolved total nitrogen
	- Chloride
	- Electrical conductivity
	- UV ₂₅₄
	○ Metal analysis items (1)
	- B-total

3. 결과 및 고찰

3.1. 대상지점별 방류수 분석결과

일일 5,000 m³ 이상 방류하는 전라북도 내 하수처리장 12개소 대상지점에 대한 방류수 분석결과(4회 분석평균값)는 일반항목의 경우 Table 3에 농업용수재이용과 관련된 중금속분석항목결과는 Table 4에 나타내었다.

분석결과 재처리수 용도별 수질기준 12개 항목 중 초과하는 항목은 총대장균군수, 생물화학적산소요구량(BOD₅), 총질소(TN), 염화물, 전기전도도, 색도 등 총 6개 항목이며, 이 중 색도는 8개 처리장에서 기준을 초과하였다. 특히 유입

하수가 순수하수가 아닌 음식물처리수, 침출수, 공단폐수가 혼합되어 있는 경우 염화물과 전기전도도가 높게 측정되었다. 총인의 경우 대부분 처리장에 총인 저감시설이 설치되어 있어 기준보다 매우 낮은 값을 보였다.

친수용수, 하천 등 유지용수 용도로 사용할 경우 총질소가 5개 처리장에서 기준을 초과하여 처리장 자체적으로 처리효율을 높이는 방법이나 추가 재처리를 적용하는 경우 재이용이 가능할 것으로 판단된다. 농업용수 용도인 경우 2개소에서 전기전도도가 기준(직접식용 700 μs/cm 이하)을 초과하였으며, 조경용수의 경우 염화물이 2개소에서 기준을 초과하였다.

농업용수에만 적용되는 중금속은 16개 항목 모두 기준치 이하로 분석되었으나, 총붕소와 망간은 2개소에서 기준에 근접하게 측정되었다.

방류수를 재처리없이 재이용 기준에 적합한 처리장은 익산함열, 남원, 김제, 부안공공하수처리장 등 총 4개소였다. 유입원수성상이 복합하수인 경우 방류수의 염화물과 전기전도도가 높게 측정되므로 용도별 하수 재이용 시 고려해야 할 것으로 사료된다.

3.2. 대상 처리장별 재이용 방안

각각의 하수처리장 방류수 수질분석결과 및 처리장 주변

Table 3. The analysis data of treated water from each sewage treatments

NO.	Items	The analysis results of each sewage treatments												
		Jeonju stage 1,2	Jeonju stage 3	Gunsan	Iksan	Iksan North	Iksan Hamyeol	Jeongeup	Namwon	Gimje	Wanju	Gochang	Buan	Imsil
1	Total coliform (MPN/100 mL)	0	125	300	0	0	0	53	0	0	0	0	0	105
2	Combined residual chlorine (mg/L)	2.2	1.2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
3	Turbidity (NTU)	1.8	1.3	0.7	0.5	0.4	0.3	0.6	0.5	0.3	0.4	0.5	0.4	0.5
4	BOD ₅ (mg/L)	7.9	3.0	3.3	2.2	0.9	0.7	1.9	1.9	1.0	0.9	2.6	1.4	1.8
5	Odor	Not unpleasant	Not unpleasant	Not unpleasant	Not unpleasant	Not unpleasant	Not unpleasant	Not unpleasant	Not unpleasant	Not unpleasant	Not unpleasant	Not unpleasant	Not unpleasant	Not unpleasant
6	Color (Pt-Co units)	26.8	15.1	42.4	14.1	10.7	7.2	15.6	9.2	5.8	9.5	16.1	5.8	11.4
7	TN (mg/L)	7,984	4,744	14,751	10,907	10,974	7,961	12,088	7,242	9,085	11,109	8,732	4,615	6,618
8	TP (mg/L)	0.857	0.186	0.779	0.055	0.031	0.026	0.039	0.049	0.020	0.019	0.329	0.029	0.336
9	pH	7.2	7.1	7.1	7.1	7.0	7.0	7.0	7.2	7.2	7.2	7.1	7.1	7.2
10	Chloride (mgCl/L)	450.0	118.9	659.4	67.8	71.1	63.1	107.3	43.3	64.4	56.6	76.6	83.3	72.7
11	Electrical conductivity (μs/cm)	1,353	555	2,890	527	542	436	908	376	494	379	452	491	588

Table 4. The heavy metal analysis data of treated water from each sewage treatments

NO.	Items (mg/L)	The heavy metal analysis data of each sewage treatment plant												
		Jeonju stage 1,2	Jeonju stage 3	Gunsan	Iksan	Iksan North	Iksan Hamyeol	Jeongeup	Namwon	Gimje	Wanju	Gochang	Buan	Imsil
1	Al	0.016	0.008	0.024	0.053	0.020	0.019	0.085	0.108	0.021	0.026	0.056	0.016	0.035
2	As	ND*	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
3	B-Total	0.063	0.017	0.476	0.006	0.015	0.025	0.313	0.039	0.305	0.009	0.134	0.025	0.573
4	Cd	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
5	Cr ⁶⁺	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
6	Co	0.002	ND	ND	ND	ND	ND	0.004	ND	ND	ND	0.002	ND	ND
7	Cu	0.112	0.069	0.081	ND	0.065	0.067	0.089	0.088	0.056	0.032	0.060	0.039	0.057
8	Pb	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
9	Li	0.038	0.017	0.035	0.007	0.008	0.006	0.011	0.006	ND	0.007	0.020	0.004	0.006
10	Mn	0.134	0.083	0.168	0.048	0.051	0.125	0.076	0.009	0.094	0.031	0.085	0.178	0.074
11	Hg	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
12	Ni	ND	ND	0.020	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
13	Se	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
14	Zn	0.039	0.039	0.140	0.042	0.056	0.042	0.039	0.032	0.059	0.044	0.034	0.036	0.036
15	CN	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
16	PCB	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

*ND : Not Detected

지형을 고려한 대상 하수처리장별 하수 재이용방안은 다음과 같다.

3.2.1. 전주시 공공하수처리장

전주 1, 2단계 하수처리장의 방류수 분석 결과(4회 평균값) 색도, BOD, 부유물질, 총인, 염화물, 전기전도도 등이 각 재이용수 수질기준을 초과하여 용도별 재이용수 사용이 불가하였다. 특히 유입원수가 순수하수가 아닌 음식물 처리수, 공단폐수, 침출수 등 복합적으로 혼합되어 적정 처리에 어

려움이 많을 것으로 예상된다. 그러나 3회(6월 중) 시료 이후부터 수질이 개선되고 있으며, 현재 총인저감시설이 완공되어 수질 개선에 따른 재이용수의 사용 범위도 증가할 것으로 판단된다. 지형적인 면을 고려해보면 전주 1, 2단계 방류수 재이용은 농업용수, 하천유지용수 또는 전주공단 쪽의 공업용수로 재이용을 하는 것이 적절하다고 판단된다. 특히 신평교 하류쪽으로 전주천 수질이 양호한 상태가 아니므로 만경강으로 유입되기 전 하천수질개선을 위해 전주처리장의 역할은 매우 중요할 것으로 사료된다.

전주 3단계 하수처리장의 경우 총대장균군수, 색도, BOD가 각각의 재이용수 기준을 초과하였다. 그러나 BOD의 경우 기준이 3 mg/L인 친수용수인 경우에만 초과되었으며, 색도와 총대장균군의 경우는 처리장 내에서 충분히 개선을 할 수 있으므로 주변 농업지역에 농업용수로의 재이용 및 전주 1, 2단계 방류수와 더불어 하천수질개선 및 용수확보를 위한 하천유지용수로 사용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

3.2.2. 군산시 공공하수처리장

군산하수처리장의 경우 방류수가 다른 처리장과 달리 하천이 아닌 서해로 직접 방류되기 때문에 방류수 수질기준이 높은 편이다. 이러한 이유로 총대장균군이나 색도, 총질소 등이 높아 재이용 수질기준을 초과하고 있다. 또한 유입원수가 하수에 음식물처리수 및 공단폐수 등이 복합적으로 혼합되어 있어 염화물과 전기전도도도 높게 나타났다. 지형적인 면을 고려하면 주변에 공업단지지역임을 감안하여 공업용수로 재이용하는 것이 적절하다고 예상할 수 있다.

3.2.3. 익산시 공공하수처리장

익산시 하수처리장의 경우 대부분 재이용수 수질기준을 초과하지 않았다. 총질소의 경우 4회 평균값이 기준을 약간 초과하였으나 재이용수에 목적을 두면 충분히 처리장에서 조절이 가능할 것으로 판단된다. 주변 지형을 고려하면 처리장 위쪽의 위생매립장 방류수 수질과 하천수질을 고려하여 하천수질개선 및 하천유지용수를 목적으로 재이용하는 것이 적절하며 장내용수와 주변 농업용수로도 재이용이 충분히 가능할 것으로 예상할 수 있다.

3.2.4. 익산북부 공공하수처리장

익산시 북부하수처리장의 경우 색도와 총질소의 경우 기준을 약간 초과하였으나, 나머지 항목은 재이용수 수질기준에 적합하였다. 지형적인 면을 고려하면 주변이 대부분이 농업지역으로 되어 있어서 농업용수로 사용하는 것이 가장 적절하다고 판단된다.

3.2.5. 익산북부 공공하수처리장

익산시 북부하수처리장의 경우 모든 항목이 재이용수 수질기준에 적합하였다.

처리장 주변이 대부분 농업지역이어서 농업용수 사용하거나 일부는 장내 처리시설 세척용수로써 사용하는 것이 가장 적절하다고 판단된다. 방류되는 지점의 산복천과 이 천과 합류되는 함열천의 경우 자체 조사 결과 수질이 양호한 편이어서 건천 시 하천유지용수 용도로도 재이용이 가능할 것으로 사료된다.

3.2.6. 정읍시 공공하수처리장

정읍시 하수처리장의 경우 총대장균군수, 색도, 총질소,

그리고 전기전도도가 기준을 초과하였다. 전기전도도가 높은 이유는 유입원수에 공단폐수가 포함되어 있기 때문이라고 예상할 수 있다. 총대장균군은 UV 소독 시 체류시간을 증가시키면 충분히 기준 이하가 될 수 있다고 판단된다. 색도 및 총질소 또한 처리장 내에서 운영효율을 높이면 충분히 하천유지용수 및 친수용수로 재이용이 가능할 것으로 사료된다. 지형적인 면을 고려하면 주변이 대부분 농지이므로 농업용수로 사용하거나 방류지점 하류로 정읍농공단지와 산업단지의 폐수처리수가 방류가 되므로 하천수질개선 및 하천유지용수로써 재이용 하는 것이 적절하다고 판단된다.

3.2.7. 남원시 공공하수처리장

남원시 하수처리장의 경우 모든 항목이 재이용 수질기준에 적합하여 재처리 없이도 재이용이 가능하였다. 장내용수로도 사용이 가능하며, 지형적인 면을 고려하면 주변이 대부분 농지이므로 농업용수로 사용하는 것이 적절할 것으로 사료된다.

3.2.8. 김제시 공공하수처리장

김제시 하수처리장의 경우 남원처리장과 동일하게 모든 항목이 재이용 수질기준에 적합하였다. 지형적인 면을 고려하면 주변이 대부분 농지이므로 농업용수로 사용하거나 하천수질개선 및 하천유지용수로써 재이용 하는 것이 적절하다고 판단된다.

3.2.9. 완주군 공공하수처리장

완주군 하수처리장의 경우 총질소를 제외하고는 대부분의 항목이 재이용 수질기준이하로 분석되었다. 특히 방류수가 만경강으로 직접 방류되므로 영양염류가 적절히 처리되어야 필요성이 있다. 지형적인 면을 고려하면 현재 처리장 주변으로 생태공원이 조성 중이므로 인공습지용수로 사용하는 것이 가장 적절하다고 판단된다.

3.2.10. 고창군 공공하수처리장

고창군 하수처리장의 경우 친수용수 기준 적용 시 색도를 제외하고는 대부분의 항목이 기준에 적합하였다. 지형적인 면을 고려하면 처리장 주변으로 대부분 농업지역이므로 농업용수로써 재이용하거나 고창천 하천환경 정비사업이 완료된 후 하천 수질개선 및 하천유량유지를 위한 하천유지용수로 사용하는 것이 적절하다고 판단된다.

3.2.11. 부안군 공공하수처리장

부안군 하수처리장의 경우 모든 항목에서 재이용 수질기준이하로 분석되었다.

지형적인 면을 고려하면 처리장 주변으로 대부분 농업지역이므로 농업용수로써 재이용을 하거나 처리장 주변 하장천의 수질을 고려하여 하천수질개선 및 하천유량유지를 위한 하천유지용수로 재이용하는 것이 적절하다고 판단된다.

3.2.12. 임실군 공공하수처리장

임실군 하수처리장의 경우 친수용수 시 색도와 총대장균 군수가 기준을 초과하였는데 그 외 대부분의 항목은 재이용 수질기준 이하였다. 현재 임실하수처리장은 자체 내에서 소규모의 습지공원을 조성하여 일일 약 250 m³ 정도를 습지용수로 재이용하고 있다. 여기서 체류된 방류수는 다시 임실천으로 유입이 되고 있다. 따라서 현재 습지용수의 양을 증가시켜 재이용하는 것이 가장 적절한 방안이라고 사료된다.

3.3. Lab scale test 결과

본 연구에서는 대상지점별 방류수 분석결과를 기초로 하여 재이용 수질기준을 초과한 항목(총대장균군, 색도, 총질소, 전기전도도 및 염화물) 및 중금속 물질에 대한 처리효과를 알아보기 위해 Lab scale test를 수행하였다.

총대장균군, 색도, 총질소의 제거효과는 Fig. 4에 나타내었다.

총대장균군은 모래여과를 통과 후 70% 이상의 제거효율을 보였으며 활성탄흡착 이후에는 불검출로 나타났다. 총대장균군의 크기가 보통 2~4 µm이므로 흡 활성탄 흡착에서 제거가 되지 않은 총대장균군은 공극크기 1 µm 이하인 정밀여과막(MF)에서 완벽하게 제거가 가능함을 기대할 수 있다. 그러나 활성탄 흡착 이후부터 총대장균군이 검출되지 않으므로 운영비를 고려하여 전처리로 모래여과와 활성탄흡착을 조합해서 사용하는 것이 적합할 것으로 사료된다.

색도의 경우 모래여과 시 최대 20% 이하의 제거효율을 보였으나 활성탄 흡착처리 후에는 90% 이상의 높은 제거효율을 보였으며 재이용 기준이 가장 높은 친수용수 기준에도 적합하였다. 정밀여과법과 역삼투법으로 처리 시 제거효과는 높았으나 및 운영비를 고려하면 모래여과와 활성탄흡착을 조합해서 이용하는 것이 활성탄 파과시간도 연장하며 처리효율도 높일 수 있을 것으로 판단된다.

총질소의 경우 실험결과 모래여과나 활성탄에서는 처리효과가 15~20%이며 정밀여과법으로 처리 후 약 30% 전후의 효율을 보였으나 역삼투법 처리수는 98% 이상의 처리효율을 보였다. 2015년 9월 재이용 수질기준이 개정되어 하천 등 유지용수로 재이용하는 경우 수질기준은 하수처리장 방류수 수질기준과 같은 20 mg/L로 기준이 완화되었다. 대상 시설 중 5곳이 재처리 기준을 초과하였으나 초과정도가 기준에 근접한 정도이므로 처리장에서 적절히 운영하면 기준 이내를 유지할 수 있을 것이라 예상되지만 겨울철과 같이 총질소가 적정 처리가 어려운 경우에는 그 대비가 필요할 것으로 사료된다. 원수의 총질소 중 질산성 질소가 전체의 90% 이상이 용존 성분으로 존재하므로 일반적으로는 모래여과나 활성탄흡착, 정밀여과법 처리로는 처리에 한계가 있을 것으로 예상되어진다. 각 대상시설에서 기준을 약간 초과하는 총질소의 경우는 색도와 부유물질을 제거하기 위한 모래여과와 활성탄 흡착공정을 조합하면 기준이하가 가능할 것이라고 판단된다.

Fig. 4. Removal variations of total coliform (a), color (b), and TN (c) using SF-GAC-MF-RO system.

전기전도도 및 염화물 제거효과는 Fig. 5(a)와 (b)에 나타내었다.

전기전도도는 농업용수 재이용시에만 적용되는 항목이며, 대상시설 12개소 중에서 3개소에서 직접식용 기준에 초과되었으며 간접식용 기준에는 1개 시설이 초과하였다.

염화물의 경우 조경용수에만 적용되며, 기준이 초과되는 지점은 2곳이었다. Lab test 결과 전기전도도와 염화물의 제거효과는 비슷한 경향을 나타내었는데 모래여과, 활성탄흡착, 정밀여과법 처리 후에는 총 제거효율이 30%이내로 효과적이지는 않았으나, 역삼투법 처리 후 가장 높은 제거효과를 보였다. 전기전도도나 염화물이 높은 하수처리장 방류수를 재처리하여 조경용수 또는 농업용수로 사용하기

Fig. 5. Removal variations of EC (a), chloride (b), B-total (c) and UV₂₅₄ (d) using SF-GAC-MF-RO system.

위해서는 역삼투압 과정이 필수적이며 만약 유기물이나 부유물질이 높은 경우에는 모래여과와 활성탄공정을 역삼투압 공정 앞에 설치하여 운영비를 최소화해야 할 것으로 적절하다고 사료된다.

중금속 항목의 경우 12개 대상하수처리장 모두 기준을 초과하지 않았으나, 기준에 근접하였던 총붕소(B)에 대한 제거효과는 Fig. 5(c)에서 나타내었다. 각 공정별 처리효과는 모래여과 후, 활성탄 흡착 이후 50% 이상 그리고 MF 거친 후 약 80% 이상의 제거효과를 보여주었다.

UV₂₅₄ 항목은 재이용 수질기준항목에 규정되어 있지 않지만 생분해 가능성을 알아보기 위해 실험을 수행하였다. 하수처리장 방류수의 경우에는 용존 유기물은 대부분 탄소 화합물로 이루어져 있으며 Humic acid나 Fulvic acid가 많이 포함되어 있는 경우 상대적으로 UV₂₅₄ 값도 높게 측정된다. 분석결과 Fig. 5(d)와 같이 모래여과에서는 제거효율이 10% 정도였으나 활성탄 흡착 이후에 90% 이상의 높은 제거효율을 보였다. 이에 따라 UV₂₅₄ 값이 감소한다는 의미는 용존유기물질이 저분자화되어 생분해가 가능한 화합물로 변화될 가능성이 높을 것으로 예상할 수 있다. 이에 따라 제거물질의 종류를 고려하여 Lab test의 공정을 선택하는 것이 운영비와 처리효율면에서 가장 적절하다고 사료된다.

4. 결론

최근 기후변화 및 물 사용량 증가로 인해 물부족 현상을 극복하기 위한 대안으로 연중 일정수량을 공급할 수 있는 장점이 있는 하수처리수 재이용에 관심이 높아지고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 전라북도 내 공공하수처리장 방류수의 재이용 가능성을 제시하고자 현장조사 및 Lab test를 수행하였고 그 결과는 다음과 같다.

1) 공공하수처리장 방류수 수질분석 결과 재처리수 용도별 수질기준 12개 항목 중 총대장균군수, 생물화학적산소 요구량, 총질소, 염화물, 전기전도도, 색도 등 총 6개 항목이 기준을 초과하였으며, 이 중 색도는 8개 처리장에서 기준을 초과하였다. 특히 유입하수가 순수하수가 아닌 음식물처리수, 침출수, 공단폐수가 혼합되어 있는 경우 염화물과 전기전도도가 높게 측정되었다.

2) 재처리수 용도별 수질기준에 모두 적합한 4개 처리장의 경우 상수도 사용을 절감하기 위해 처리장 내 조경관리를 위한 조경용수 및 청소, 세척용수로서 사용하는 것이 효율적이라고 판단된다.

3) 전북지역 하수처리장 방류수는 대부분 하천으로 방류되고 있으나, 처리장 주변이 대부분 농업지역임을 감안하

여 농번기에 농업용수로써 재이용하고, 인공습지공원이 조성된 일부 처리장의 경우 수량유지용수로 사용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

4) Lab test 결과 총대장균군과 색도는 활성탄 흡착만으로도 제거효과는 높으나 활성탄 수명을 고려하여 전단에 모래여과를 설치하여 운영하는 것을 권장한다.

5) 활성탄 흡착으로 제거가 어려운 염화물과 전기전도도의 경우에는 역삼투법 처리로 제거가 가능하나 처리비용 문제를 최소화하기 위해 조경용수 및 농업용수로 재이용하는 경우에만 선택적으로 이용하는 것이 적절할 것으로 예상되어진다.

Acknowledgement

본 연구는 전라북도보건환경연구원 자체연구비의 지원에 의해 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

KSEE

References

1. Korea Meteorological Administration (KMA), "Meteorology Yearbook," pp. 8~14(2015).
2. Ministry of Construction and Transportation (MCT), "Water Vision 2006~2020," pp. 9~11(2006).
3. The World Bank, "Charting our water Future, economic frameworks to inform decision-making," 2030 Water Resources Group, pp. 5~7(2009).
4. Ministry of Environment (MIE), "The act on promotion and support of water reuse,"(2015.9.).
5. Asano, T. and Levine, A. D., "Wastewater reclamation, recycling and reuse: past, present and future," *Water Sci., Technol.*, **33**(10-11), 1~14(1996).
6. Korea Environment Corporation (KECO), "Part 01. policy of reuse of water in Korea," *Water Journal*(2014).
7. Park, S. R., A study on the effective plan for reuse of treated wastewater, Kwangwoon University, Seoul(2009).
8. Ahn, K. H., Song, K. G., Kweon, J. H. and Cha, H. Y., "Removal of color and organic substances using granular activated carbon for wastewater reclamation," *J. Korea Technol. Soc. Water and Wastewater Treat.*, **6**(2), 11~17(1998).
9. Cho, B. D., Possibility of the wastewater reclamation by using ultrafiltration and reverse osmosis membrane, The University of Seoul, Seoul(2010).
10. Shin, D. Y., Operation characteristics evaluation in CSBR sewage treatment plant," Yonsei University, Seoul(2009).
11. Nam, G. S., Comparison of simulation and experimental results in intermittent aeration BNR process, Konkuk University, Seoul(2004).
12. Kim, H. S., A study on the fates of organic matter and nitrogen in the intermittent aeration system with continuous inflow, Yonsei University, Seoul(2000).
13. Jang, S. C., A study on the nutrient removal using a SBR process, Hoseo University, Chungnam(2002).
14. Byun, K. J., "A study on the removal characteristics in mixed water of sewage and stock-raising wastewater by Sym-Bio process," Chonbuk National University, Chonbuk(2008).
15. Yoon, C. H., Im, B. S., Son, D. S. and Park, H. D., "The biodegradability estimation of sewage using fluidyne SBR process," *J. Ind. Technol.*, **13**(2), 147~155(2002).