하수 방류수 중 분변오염 지표세균의 분포특성 조사

이희수*, 이지영, 민성은, 길혜진, 김현주, 성지홍
인천보건환경연구원 환경생태과

A Survey of Distribution Characteristics of Bacterial Indicators of Fecal Contamination for Sewage Effluent

Hee-Su Lee*, Ji-Young Lee, Sung-Eun Min, Hye-Jin Kil, Hyun-Ju Kim, Ji-Hong Seong

Division of Environmental Ecology, Incheon Research Institute of Public Health and Environment

Abstract

This study analyzed the bacterial indicators for fecal pollution, including total coliforms, fecal coliforms, *Escherichia coli*, *Enterococcus*, and other factors of water quality from February to November in 2021. The influent and effluent at eight public sewage treatment plants located in Incheon. This analysis would analyze the correlations among the indicators, and the treatment efficiency of the sewage treatment plants and investigate the effluent water quality standards. Total coliforms were investigated 1.5×10^8 ~ 3.1×10^9 CFU/100mL in the influent and 1.6×10^4 ~ 2.6×10^5 CFU/100mL in the effluent. 2.5×10^5 CFU/100mL on average were found at S-1 ~ 4; 4.3×10^4 CFU/100mL on average at S-5 through 8. The bacteria population was approximately 5.8 times lower at S-5 ~ 8. Fecal coliforms of the total coliforms in the effluent accounted for 33.0 % (9.3 ~ 71.0); *E. coli*, 15.8 % (2.1 ~ 31.1); *Enterococcus* and 11.3 % (0.7 ~ 30.1). There was no statistically significant correlations between the items and incidators in the influent. However, in the effluent, the correlations among the BOD ($r=0.50$, $p<0.01$), SS ($r=0.42$) and total coliforms were high. The analysis of the treatment efficiency and operating status of each sewage treatment facility was revealed that the annual average treatment efficiency of the BOD, SS, and total coliforms was overall more than 95%. However, the treatment efficiency of the BOD was relatively lower at S-2 and 4. The SS was relatively lower at S-1 and 3. S-1 ~ S-3, worn-out plants, have been operated more than 20 years, found that the treatment efficiency is relatively lower and the inflow rate of waste water produced from industrial complexes of the drain areas is higher. S-4 ~ 8 used the MBR process and have recently been installed, by comparison, the treatment efficiency was relatively lower at S-4. Actually, there were problems during the process of the plants, and it was found that the processing plants were improving. The improvement of comprehensive facility is underway according to Incheon swage maintenance plan for 2035, therefore, it is expected that the treatment efficiency will be increase in the future.

Key words : Fecal contamination indicator bacteria, Sewage effluent water quality standard, Total coliforms

Ⅰ. 서론

현재 도시하천의 상당수는 평상시 유지유량이 확보되지 못하여 건천화 되어있으며 이에 따른 이수, 치수기능은 물론 수 생태계 유지, 주민 정서함양 등의 환경기능이 상실되어 이에 대한 대안으로 하수처리시설 방류수를 하류로부터 압송하여 상류로 도수한 후 자연유하로 하천의 유지유량을 확보하고 있다(권영국, 2006). 인천도 하천의 유량이 적기 때문에 공촌 하수처리시설에서 방류수를 공촌천 유지용수로 이용하고 있다. 가좌하수처리시설 방류수는 인천교 매립지 유수지, 남항은 갯골 유수지 등 대부분 서해 연안지역이나 하천으로 방류한다. 이 때문에 수생태계 안전성을 확보하기 위하여 수질관리 강화가 더욱 요구되고 있다.

하수처리는 생태계의 파괴나 수계전염병의 전파를 막기 위해 물리화학적 또는 생물학적방법으로 정화한다. 공중보건의 관점에서 수처리의 초점은 병원성 미생물을 제거하거나 불활성화하여 감염성을 저감시켜 질병을 예방하는 것이다(Mcclellan et al., 1999).

병원성 미생물은 그 크기가 작기 때문에 강우유출수 및 기타 유출수에 쉽게 수역에 유입되며, 하천, 호소, 하구에 들어가면 오염된 어패류의 섭취, 피부접촉 또는 음용을 통해 사람의 몸속으로 들어가게 된다. 특히 분원성대장균으로 오염된 강이나 호소에서 수영할 경우 수인성 전염병에 걸릴 확률이 높은 것으로 알려져 있으며, 병원균으로 오염된 위락용수로 인한 감염성 질병으로는 소화기, 호흡기, 눈, 귀, 코, 목, 그리고 피부 관련 질병 등이 포함된다(김동욱, 2007).

수체 내 병원성 미생물은 분리와 검출이 매우 까다롭기 때문에 시료의 채취와 분석이 비교적 용이한 미생물을 모니터링하며, 이러한 미생물을 병원균 지표미생물(Pathogen Indicator Microoraganism)이라 한다. 대표적인 지표미생물로서 총대장균군, 분원성대장균군, 대장균, 분원성연쇄상구균 등이 있다(Baudisova, 1997).

현재 우리나라 공공하수처리시설 방류수 수질은 하수도법에 의하여 BOD, TOC, SS, 생태독성, T-N, T-P, 총대장균군수로 7개 항목으로 관리하고 있으며 특히 총대장균군수는 Ⅰ지역을 제외한 모든 지역에서 3000 개/mL이하의 기준을 적용한다.(Table 3) 반면에 미국, 유럽 등 해외 미생물의 수질기준이 더욱 엄격하게 설정되어 있는데 특히 미국의 경우 청정수법(Clean Water Act)의 NPDES(National Pollutant Discharge Elimination System, 국가오염물질배출삭감제도)를 통해 허가에 의해 수질기준을 정하고 있으며 pH, BOD5, TSS, TP, 대장균(E. coli) 또는 분원성대장균군(Fecal coliforms)을 수질기준에 포함하고 있다(최인철, 2013). 그러므로 하수처리시설 방류수의 공공수역에 미치는 영향을 고려하여 현재 방류수 수질기준인 BOD, TOC, SS, 생태독성, T-N, T-P, 총대장균군수 뿐만 아니라 추가로 분원성대장균군, 대장균등 분변오염 지표세균을 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 공공하수처리시설의 유입수 및 방류수의 분변오염 지표세균의 분포특성 및 수질인자에 대해 조사하였고, 하수처리시설 처리효율 및 공정분석으로 방류수 수질개선을 위한 기초자료로 활용하기 위해 수행하였다.

Ⅱ. 연구방법

2.1. 조사대상

본 연구는 인천환경공단에서 위탁운영중인 하수처리시설 중 8개를 선정하여 조사하였다. 각 공공하수처리시설의 처리용량, 공법 및 소독방법은 (Table 1) 에 표기하였다. 가좌, 승기, 남

항 하수처리시설은 합류식 관거, 공촌, 송도, 송산, 영종, 운북은 분류식 관거를 통해 하수가 유입된다.

2.2. 시료채취 및 항목

2021년 2월부터 11월 까지 가좌, 승기, 남항, 공촌, 송도 하수처리시설은 월 1회, 송산, 영종, 운북 하수처리시설은 분기 1회 시료를 채수하여 총 124건 분석하였다. 시료는 무균채수병에 채수하였으며 즉시 실험이 어려운 경우에는 4 ℃ 이하에서 냉장보관 하여 24시간 이내에 실험하였다. 분석항목은 각 시설의 유입수와 방류수를 대상으로 분변오염 지표세균 4종(총대장균군수, 분원성대장균군, 대장균, 장구균), 수질인자 12종(pH, 수온, NH_3-N, DO, 경도, 전기전도도, 염분, SS, BOD, 유리잔류염소, 결합잔류염소, 생태독성)을 분석하였다.

2.3. 연구방법

2.3.1 분변오염 지표세균 분석

분변오염 지표세균으로 총대장균군수, 분원성대장균군, 대장균, 장구균 총 4개 항목을 수질오염공정시험법 중에서 효소이용정량법을 이용하여 분석하였다. 제조사의 설명에 따라 Quanti-Tray 2000(IDEXX, USD)을 이용하였으며, 정량범위가 2400 MPN/100mL이하가 되도록 시료를 희석하여 총대장균군수, 대장균은 (35 ± 0.5) ℃, 분원성대장균군은 (44.5 ± 0.2) ℃, 장구균은 (41 ± 0.5) ℃에서 24시간 동안 배양하였다.

총대장균군수는 노란빛을 띄는 부분을 양성으로 판정하고 분원성대장균군, 대장균, 장구균은 360 nm UV파장에서 형광 빛을 발색하는 부분을 양성으로 판정하였다. 각각 Colilert, Colilert-18, Enterolert kit의 양성웰(well)수를 산출하여 최적확수법(most probable number, MPN)으로 정량적인수치(MPN/100mL)를 나타냈다.

2.3.2 수질인자 분석

공공하수처리시설에서 유입수 및 방류수 수질의 특성을 파악하기 수질인자 12종을 수질오염공정시험기준에 준하여 분석하였다. SS는 Vaccum Filtration(GF/C)을 이용하여 분석하였고, pH는 pH Benchtop Meter(Thermo), 수온과 DO, BOD는 DO meter(YSI 5100) NH_3-N, 경도는 portable meter(HANNA), 잔류염소는 pocket colorimeter(HACH), 전기전도도 conductivity meter(SUNTEX)를 이용하였다. 생태독성실험은 물벼룩(Daphnia magna Straus)을 이용하여 수질오염공정시험기준에 따라 실험하였으며 단위환산에 의해 생태독성값(TU)을 계산하였다.
($TU=100/EC_{50}$)

Table 1. Capacities and disinfection methods in various sewage treatment plants.

Site		Capacity (m^3/day)	Treatment method	Disinfection methods
S-1	Gajwa	350,000	MLE, 4stage BNR	Cl
S-2	Seunggi	275,000	MLE+Coagulation	Cl
S-3	Namhang	125,000	Bio-SAC	Cl
S-4	Gongchon	65,000	KS-MBR	Cl
S-5	Songdo	42,500	A2O+MBR	Cl
S-6	Songsan	30,000	KS-MBR+URC	Cl
S-7	Youngjong	24,000	MBR(HANT)+URC+O_3	O_3
S-8	Unbook	23,000	A2O+MBR	Cl

2.3.3 총대장균군과 수질인자간 상관성 분석

방류수 수질을 분석하여 도출된 데이터로 총대장균군과 수질인자들과의 상관성 분석을 진행하였다. 2021년 2월부터 11월까지의 월별 및 분기별 데이터를 활용하였으며, Microsoft Excel 프로그램을 이용하여 상관계수를 구하였다.

Ⅲ. 연구결과

3.1. 하수처리시설 공정별 특성

3.1.1. MLE(Modified Ludzack Ettinger)공법

표준활성슬러지공법을 변형한 순환식 질산화 탈질법으로 가좌, 승기하수처리시설에서 사용하고 있다. 주된 목적은 질산성 질소를 제거하기 위한 내부반송과 침전지 슬러지 반송으로 구성되어 있으며 인을 처리하기 위한 설비가 필요하다. A2O공법과 유사하나 혐기성조(Anaerobic Tank)의 인 과잉섭취에 의한 인제거가 없으므로 일반적으로 응집제를 투여하여 인을 제거한다. 그러므로 온도의 영향을 덜 받는 장점이 있고, 유입수 중 유기물의 농도가 낮은 경우 또는 부지가 제한되어 있는 기존 처리시설에 적용이 용이하다. 공법이 비교적 간단하고 내부 반송율이 낮아 동력비가 적지만 약품주입으로 인한 슬러지 발생량이 많아 처리비용이 증가하는 단점이 있다.

3.1.2. Bio-SAC공법

유동상 생물막법 영양염류 제거기술로 유기물 산화, 질산화 및 탈질 등을 담당하는 미생물이 담체 표면에 부착하고, 혼합액 미생물이 함께 반응하여 오염물질을 제거한다. 질산화 및 탈질 속도가 빨라 처리시간이 단축되고 유입부하변동에 대처가 용이하다. 1차 침전지가 필요 없어 건설비가 저렴한 장점이 있으나 미생물을 담체에 고정하는 데 시간이 많이 소요되는 단점이 있다.

3.1.3. MBR(Membrane Bio Reactor)공법

생물학적 고도처리공정과 분리막을 결합한 막분리활성슬러지공법으로 정밀여과막을 호기조에 설치하고 최종침전지 및 소독설비를 설치하여 유기물, 질소, 인, 대장균 등을 동시에 제거한다. 이전 고도처리공정의 패러다임인 하수 내 오염물질의 제거뿐만 아니라 미량물질 및 유해물질처리를 통해 하수를 새로운 수자원으로 재이용하는 것을 목표로 도입하고 있다.

3.2. 분변오염 지표세균의 검출결과 및 분포특성

3.2.1. 분변오염 지표세균의 유입수 검출결과

각 하수처리장 유입수의 분변오염 지표세균을 조사하였으며 그 결과는 (Fig. 1), (Table 2)와 같다. 총대장균군수는 1.5 × 10^8 ~ 3.1 × 10^9 CFU/100mL, 분원성대장균군은 2.0 × 10^8 ~ 8.0 × 10^8 CFU/100mL,

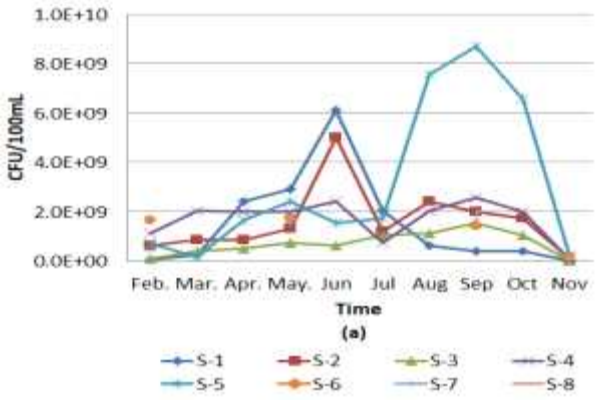

Fig. 1-(a). Concentrations of total coliforms in the influent.

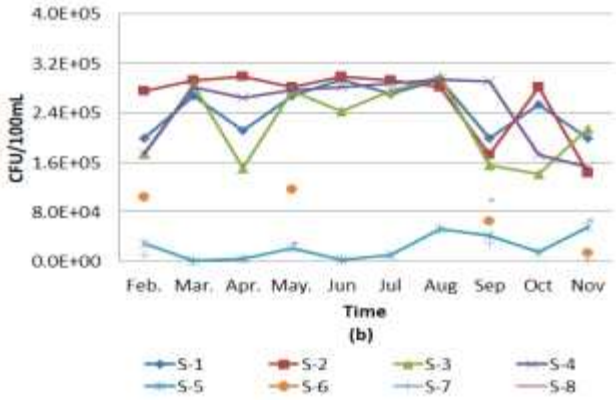

Fig. 1-(b). Concentrations of total coliforms in the effluent.

Table 2. Concentration distribution of fecal indicator bacteria in the effluent of sewage treatment plants.

Site		Total coliforms (MPN/100mL)	Fecal coliforms (MPN/100mL)	E.coli (MPN/100mL)	Enterococci (MPN/100mL)
S - 1	Inf.	1.5 (0.02~6.1)×10^8	4.5 (0.03~16)×10^8	1.4 (0.02~6.9)×10^8	5.9 (0.05~37)×10^7
	Eff.	2.5 (2.0~2.9)×10^5	8.0 (5.3~12.0)×10^4	3.8 (0.7~7.7)×10^4	3.1 (0.3~8.8)×10^4
S - 2	Inf.	1.6 (0.1~5.0)×10^9	6.9 (0.08~16)×10^8	3.1 (0.05~7.3)×10^8	1.1 (0.09~2.8)×10^8
	Eff.	2.6 (1.4~3.0)×10^5	1.1 (0.2~2.0)×10^5	4.4 (0.4~7.3)×10^4	2.7 (0.3~4.6)×10^4
S - 3	Inf.	7.1 (0.2~16)×10^8	2.0 (0.07~4.4)×10^8	8.1 (0.08~22)×10^7	5.4 (0.03~19)×10^7
	Eff.	2.2 (1.4~3.0)×10^5	9.1 (1.8~17.0)×10^5	4.1 (0.3~8.6)×10^4	3.5 (0.4~8.3)×10^4
S - 4	Inf.	1.7 (0.04~2.6)×10^9	8.0 (0.1~13)×10^8	4.1 (0.02~7.3)×10^8	1.8 (0.05~4.0)×10^8
	Eff.	2.5 (1.5~2.9)×10^5	0.7 (0.1~11)×10^5	4.1 (0.8~7.3)×10^4	2.7 (0.1~4.8)×10^4
S - 5	Inf.	3.1 (0.2~8.7)×10^9	8.0 (0.2~16)×10^8	4.0 (0.02~13)×10^8	5.4 (0.2~16)×10^7
	Eff.	2.3 (0.2~5.6)×10^4	0.7 (0.0~2.3)×10^4	0.3 (0.0~1.6)×10^4	2.1 (0.0~7.7)×10^3
S - 6	Inf.	1.2 (0.2~1.7)×10^9	4.3 (0.3~10)×10^8	3.6 (0.1~9.8)×10^8	1.2 (0.04~2.5)×10^8
	Eff.	7.5 (1.4~12)×10^4	1.5 (0.4~2.1)×10^4	6.9 (1.4~12)×10^3	5.3 (0.6~1.0)×10^4
S - 7	Inf.	9.4 (0.6~17)×10^8	2.3 (0.2~5.8)×10^8	1.5 (0.1~4.1)×10^8	4.0 (0.6~5.8)×10^7
	Eff.	1.6 (0.2~2.9)×10^4	4.6 (0.0~8.6)×10^3	2.6 (0.0~6.3)×10^3	1.5 (0.0~3.1)×10^3
S - 8	Inf.	1.2 (0.2~2.0)×10^9	5.7 (0.7~9.8)×10^8	3.0 (0.1~6.1)×10^8	9.4 (0.8~20)×10^7
	Eff.	5.6 (2.8~9.9)×10^4	1.8 (0.6~4.2)×10^4	8.5 (2.4~22)×10^3	5.3 (1.5~8.5)×10^3
Ave.	Inf.	1.6 (0.02~8.7)×10^9	5.5 (0.03~16)×10^8	2.7 (0.01~13)×10^8	9.0 (0.0~40)×10^7
	Eff.	1.7 (0.02~3.0)×10^5	6.0 (0.0~20)×10^5	2.8 (0.0~8.4)×10^4	2.0 (0.0~8.8)×10^4

대장균은 8.1 × 10^7 ~ 4.1 × 10^8 CFU/100mL, 장구균은 2.7 × 10^7 ~ 1.2 × 10^8 CFU/100mL범위로 나타났다.

유입수의 운영현황인 (Fig. 1-a) 분석결과 대부분의 유입수는 매월 유입수질이 비슷하지만 S-1, 2, 5 하수처리시설은 하절기에 총대장균군수가 매우 높게 유입되는 것을 확인하였다. 하수처리시설에서 처리하는 대부분 지역이 합류식 관거로 구성되어있어 강우량에 따라 유입하수량이 증가하는 경향이 있고, 불명수의 유입에 따라서도 유입수에 영향이 있는 것으로 판단된다. (인천광역시, 2020)

3.2.2. 분변오염 지표세균의 방류수 검출결과

각 하수처리장 방류수의 분변오염 지표세균 결과는 (Fig. 1), (Table 2)와 같다. 총대장균군수는 1.6 × 10^4 ~ 2.6 × 10^5 CFU/100mL, 분원성대장균군은 4.6 × 10^3 ~ 9.1 × 10^5 CFU/100mL, 대장균은 2.6 × 10^3 ~ 4.4 × 10^4 CFU/100mL, 장구균은 5.3 × 10^4 CFU/100mL범위로 나타났다.

S-1 ~ 4 하수처리시설에서 평균 2.5 × 10^5 CFU/100mL, S-5 ~ 8 하수처리시설에서 평균 4.3 × 10^4 CFU/100mL로 확인되었다. 시설별로 비교해 보았을 때 S-1 ~ 4에 비해 S-5 ~ 8 하수처리시설에서 세균의 개체수가 약 5.8배 낮은 것으로 나타났다. '2035년 인천광역시 하수도정비계획'에 따르면 유입하수량이 송도와 영종도에서 시설용량보다 적게 유입되기 때문에 처리효율의 차이가 생긴 것으로 판단된다.

또한 S-1 ~ 4시설의 경우 처리구역이 합류식 관거로 설치되어있어 강우에 의한 영향을 많이 받기 때문에 여름철 최종방류수의 소독강화 등 추가 관리를 고려해야할 것으로 판단된다.

3.2.3. 분변오염 지표세균 분포특성

국내 방류수 수질기준은 일본의 영향을 받아 총대장균군수만 포함되어있지만 외국의 경우 인체에 미치는 영향을 고려하여 분원성대장균군, 대장균 등의 기준이 설정되어 있다. (Table 3)을

Table. 3. Water quality of the bacteria for sewage treatment plant.

Items		Total coliforms	Fecal coliforms	E. coli	Remarks
Korea		1,000/mL(district- Ⅰ)[1)] 3,000/mL(except Ⅰ)	-	-	Duplicate (twice within 30min.)
USA	Florida	1,000/100 mL	200/100 mL	-	Monthly ave.(geometric)
	Washington	-	200/100 mL	-	〃
	Massachusetts class B	-	-	126/100 mL 409/100 mL	Monthly ave.(geometric) daily max.
	New Hampshire designated beach	-	-	47/100 mL 88/100 mL	Monthly ave.(geometric) daily max.
Canada		-	400/100 mL	-	Monthly ave.(geometric)
Italy		-	-	5,000/100 mL	River discharge irrigation water
Japan	national	3,000/mL	-	-	Composite(24h)
	local	800~3,000/mL	-	-	〃

[1)] district-1 : 물환경보전법 시행규칙 별표13에 따른 청정지역 등

보면 일본을 제외한 미국과 캐나다, 이탈리아에서 분원성대장균군과 대장균을 수질기준으로 정하고 있으며 우리나라보다 엄격하게 수질관리를 하고 있다. 지표미생물이란 토양이나 수질 등의 오염정도를 간접적으로 나타낼 수 있는 지표가 되거나 바이러스를 포함하는 병원성 미생물 등의 존재를 예측할 수 있는 미생물을 일컫는다.(이규철, 2006) 총대장균군과 분원성대장균군은 병원성 미생물의 존재에 대한 지표미생물로서 널리 알려져 있지만 분변오염에 대한 지표성이 부족하여 대장균과 장구균을 추가하여 검토해볼 필요가 있다. 대장균(O157)은 일부 병원성을 나타내고 장구균(Enterococci)은 면역 저하 환자 또는 병원에 입원중인 환자에게 요로감염, 창상감염, 균혈증 등의 기회 감염증을 유발하는 것으로 알려져 있다.(최현숙, 2016)

국내 하수처리시설 미생물 수질기준의 개선을 위해 여러 나라에서 각자 기준으로 삼는 분변오염 지표미생물을 검사하였으며, 총대장균군 중 분원성대장균군, 대장균, 장구균이 차지하는 분포 결과는 (Fig. 2), (Table 4) 와 같다.

유입수에서 총대장균군 중 분원성대장균군은 38.1(0.9 ~ 87.5) %, 대장균은 16.7(0.8 ~ 69.4) %, 장구균은 7.6(0.3 ~ 31.8) %를 차지하는 것으로 나타났으며, 방류수에서는 분원성대장균군은 33.0(9.3 ~ 71.0) %, 대장균은 15.8(2.1 ~ 31.1) %, 장구균은 11.3(0.7 ~ 30.1) % 차지하는 것으로 나타났다.

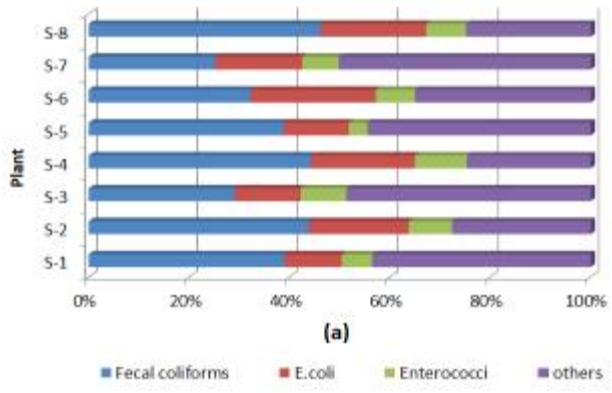

Fig. 2-a. Mean value of percent distribution in the influent

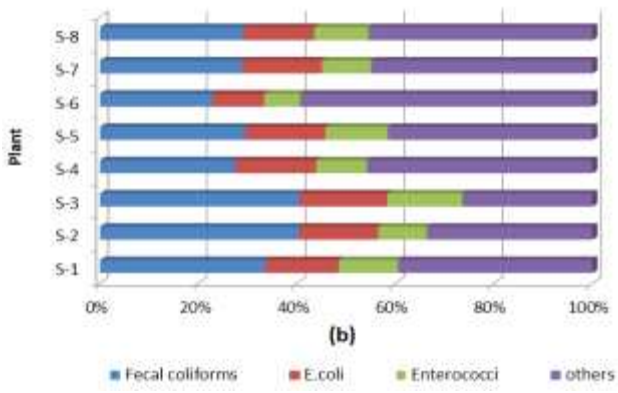

Fig. 2-b. Mean value of percent distribution in the effluent

Table. 4. Ratio of fecal indicator bacteria among the total coliforms.

	FC/TC (%)		E.coli/TC (%)		Enterococci/TC (%)	
	Influent	Effluent	Influent	Effluent	Influent	Effluent
Mean	38.1	33.0	16.7	15.8	7.6	11.3
min	0.9	9.3	0.8	2.1	0.3	0.7
max	87.5	71.0	69.4	31.1	31.8	30.1

(Fig. 2-a)에 유입수, (Fig. 2-b)에 방류수 분변오염 지표세균 평균 분포비율을 나타내었다. 방류수의 하수처리시설별 분변오염 지표세균 분포비율을 살펴보면 S-1 ~ 3시설에서 분원성대장균군이 평균 38.1 %. S-4 ~ 8시설에서 27.5 %를 차지하여 시설별로 분포차이가 있는 것으로 나타났다.

전체 시설에서 연평균 분원성대장균군은 총대장균군의 약 1/3, 대장균은 약 1/5, 장구균은 1/10수준을 나타내었다. (Table 3)에서와 같이 미국의 경우 분원성대장균군을 총대장균군의 1/5 수준으로 관리하거나, 대장균의 기준을 엄격하게 지정하여 관리하고 있다. 그러므로 하수처리시설 방류수의 하천 재이용수로의 활용 및 해안생태계 보호를 위해 농도 분포 특성을 고려하여 미생물 수질기준을 정할 필요가 있는 것으로 판단된다.

3.3. 수질인자간 상관성 분석

공공하수처리시설 유입수 및 방류수의 수질인자간 상관계수는 (Table 5, 6)과 같다. 함수의 상관계수 r값이 1에 가까울수록 상관성이 있으며 0에 가까울수록 상관성이 없다고 판단한다. (오은하, 2015)

유입수에서 총대장균군의 수질인자간 상관관계는 DO에서 약한 음의 상관관계(r=-0.49), pH와 SS에서 약한 양의 상관관계를 보였지만 통계적으로 유의한 수준을 나타내지 않았다. 방류수에서는 BOD(r=0.50, $p<0.01$), SS(r=0.42)와 총대장균군의

Table. 5. Correlation coefficient between analysis items in influent of sewage treatment plant.

items	TU	pH	Temp.	DO	Hardness	Free residual chlorine	NH_3-N	Electric conductivity	Salinity	BOD	SS	Total coliforms
TU	1											
pH	-0.36	1										
Temp.	-0.03	0.00	1									
DO	-0.21	0.21	0.34	1								
Hardness	0.16	-0.52	-0.08	-0.52	1							
Free residual chlorine	0.34	-0.46	-0.07	-0.11	0.55	1						
NH_3-N	-0.04	0.00	0.30	0.32	-0.15	-0.26	1					
Electric conductivity	0.02	-0.15	0.19	0.33	-0.05	-0.14	0.80	1				
Salinity	0.01	-0.05	0.11	0.01	-0.11	-0.11	0.06	-0.09	1			
BOD	0.02	-0.01	-0.06	-0.11	0.07	0.01	-0.14	-0.10	0.00	1		
SS	-0.18	0.34	-0.14	0.01	0.06	-0.02	-0.16	-0.22	0.06	0.08	1	
Total coliforms	-0.11	0.35	0.06	-0.49	0.27	-0.15	0.00	-0.19	-0.11	-0.07	0.31	1

Table. 6. Correlation coefficient between analysis items in effluent of sewage treatment plant.

items	TU	pH	Temp.	DO	Hard ness	Free residual chlorine	NH_3-N	Electric conductivity	Salinity	BOD	SS	Total coliforms
TU	1											
pH	-0.19	1										
Temp.	-0.06	-0.10	1									
DO	-0.02	-0.04	0.32	1								
Hardness	0.17	-0.26	0.18	0.24	1							
Free residual chlorine	-0.02	-0.12	0.12	-0.34	0.09	1						
NH_3-N	0.13	0.14	-0.06	-0.02	-0.09	0.13	1					
Electric conductivity	0.17	-0.08	0.03	0.24	0.27	-0.04	-0.02	1				
Salinity	0.12	-0.26	-0.09	0.05	0.31	0.09	-0.06	0.48	1			
BOD	-0.10	-0.13	0.06	-0.14	-0.10	0.03	0.04	0.12	-0.15	1		
SS	-0.13	-0.16	0.13	0.10	-0.17	-0.01	-0.07	0.06	-0.04	0.53	1	
Total coliforms	0.03	-0.23	-0.05	-0.11	0.25*	0.03	0.11	-0.08*	0.04	0.50**	0.42	1

*p<0.05, **p<0.01, p: significance level

상관성이 높게 나타나 분변오염 지표세균의 관리 시 유기물의 영향을 많이 받으며 방류수 수질관리 시 미생물과 더불어 유기물의 관리가 함께 이루어져야 할 것으로 보인다.

3.4. 하수처리시설 운영 및 처리효율 분석

시설별 유입수 및 방류수 수질인자 분석을 통해 총대장균군과 BOD, SS의 상관관계를 확인하였으며 더불어 BOD, SS, 총대장균군의 처리효율을 (Table 7, Fig. 3)에 나타내었다. 대부분의 시설에서 연 평균 95 % 이상의 처리효율로 분석되었고 총대장균군 처리효율은 대부분 비슷하게 나타났지만 BOD는 S-2(89.8 %), 4(92.6 %)에서, SS는 S-1(93.7 %), 3(92.9 %)에서 비교적 낮은 처리효율을 보였다.

3.4.1. S-1 ~ 3 시설 운영분석

S-1의 시설은 원도심 발생하수와 폐수를 연계처리하며 MLE공법으로 260,000 m^3/day, 4stage BNR공법으로 90,000 m^3/day를 처리하며 관내공공하수처리시설 중 가장 큰 용량으로 운영하고 있다.

Table. 7. Total removal of water quality items.

	BOD (%)	SS (%)	Total Coliforms (%)	Capacity (m^3/day)
S-1	95.5	93.7	99.8	350,000
S-2	89.8	95.1	100.0	275,000
S-3	96.0	92.9	99.9	125,000
S-4	92.6	95.3	100.0	65,000
S-5	97.3	96.9	100.0	42,500
S-6	98.9	98.8	100.0	30,000
S-7	99.2	99.3	100.0	24,000
S-8	99.6	99.2	100.0	23,000
Average	96.1	96.4	99.9	-

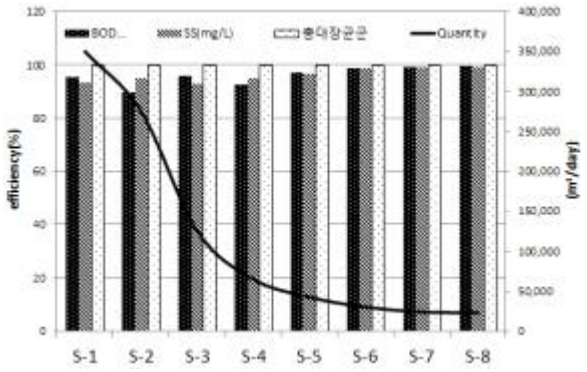

Fig. 3. Total removal of water quality items.

S-2시설도 남동공단 폐수유입으로 고농도 하수유입이 발생하고 연수구, 남동구 등 오수 전용관로 매설지역의 확대로 오염물이 증가하여 처리효율이 떨어지는 것으로 판단된다.

S-3시설에서 시설용량의 68.6 ~ 70.2 %로 저유량의 하수가 유입되고 있지만 해안가에 위치하여 만조시 다량의 해수가 유입되는 문제가 있으며, 처리 구역 내에 전체유입량 대비 43.4 %의 공장폐수 유입이 되고 있다. 일시에 대량으로 공장폐수의 유입시 미생물의 충격부하로 처리효율이 저하되는 문제가 있는 것으로 판단된다.

S-1 ~ 3시설은 가동 후 20년이 지난 노후시설로 활성슬러지공법을 기반으로 한 고도처리공법을 사용하기 때문에 수온이 낮고 미생물 활성이 어려운 겨울철 처리효율에 문제가 생길 가능성이 있다. 또한 처리구역 내 공단이 있어 일시에 대량의 폐수가 유입 될 수 있기 때문에 노후된 시설의 개량이 필요하다. 그래서 현재 '2023년 현대화사업'을 추진하여 시설의 개선 및 주민친화시설로 변화하는 사업이 진행 중에 있다. 따라서 개선 시 처리효율의 증가가 예상된다.

3.4.2. S-4 ~ 8 시설 운영분석

S-4 ~ 8시설은 MBR공정으로 사용하며 처리용량이 적고 비교적 최근 설치되어 전반적으로 처리효율이 높지만 S-4의 경우는 BOD 처리효율은 비교적 낮다. 이는 2012년 설치된 KSMBR공법으로 증설 및 개량을 통해 운전하고 있으나 현재 사용 중인 막의 내구연한인 8년이 도래하여 처리효율이 비교적 낮은 것으로 판단된다. 이런 문제점으로 인해 현재 교체 진행 중이다. S-5 ~ 8시설은 송도, 영종도개발에 따라 설치 및 증설되어 운영 중이며 입주율 증가에 따라 유입하수량이 증가하고 있지만 계획유입수질보다 저농도의 하수가 유입되어 처리효율이 비교적 높은 것으로 판단된다. 현재 진행 중인 2035년 인천시 하수도정비기본계획에 대해 환경부의 승인을 받아 사업추진중이며 인천시 하수처리시설의 개선을 통해 근본적인 해결이 가능할 것으로 보인다.

Ⅳ. 결론

본 연구에서는 인천시 8개 공공하수처리시설의 유입수 및 방류수에 대해 2월 ~ 11월 분변오염 지표세균 및 수질인자를 조사하여 상관성을 확인하고 운영현황과 방류수 수질의 안전성을 검토하고자 하였다.

1. 관내 공공하수처리시설 중 S-1 ~ 3시설에서 활성슬러지공법을 변형한 고도처리공법을, S-4 ~ 8시설에서 MBR공정으로 운영 중이다.
2. 각 하수처리시설의 방류수에서 총대장균군의 농도는 $1.6 \times 10^4 \sim 2.6 \times 10^5$ CFU/100mL 범위로 조사되었다. S-1 ~ 4시설에서 평균 2.5×10^5, S-5 ~ 8시설에서 평균 4.3×10^4 CFU/100mL로 S-5 ~ 8시설에서 세균의 개체수가 약 5.8배 낮았는데, 이는 유입하수량이 송도와 영종도에서 시설용량보다 적게 유입되기 때문에 처리효율의 차이가 생긴 것으로 판단된다.
3. 방류수 분변오염 지표세균 분포조사 결과 총대장균군 중 분원성대장균군 비율은 약 1/3, 대장균은 약 1/5, 장구균은 약 1/10 차지하는 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 하수방류수 내 건강유해 미생물의 존재 가능성을 확인하였고, 공공하수처리시설 방류수 수질기준 개선안으로 분원성대장균군이나 대장균을 추가하여 단계적으로 강화·확대하는 방안을 제시할 수 있다.
4. 각 하수처리시설 유입수 및 방류수의 수질인자 간 상관성을 분석한 결과 유입수에서는 통계적으로 유의한 수준의 상관성이 나타나지 않았다. 방류수에서 총대장균군과 BOD의 상관계수는 0.50, SS는 0.42로 양의 상관관계를 보였으며 분변오염 지표세균의

관리 시 유기물의 영향을 많이 받으며 방류수 수질 관리 시 미생물과 더불어 유기물의 관리가 함께 이루어져야 할 것으로 보인다.

5. 하수처리 시설별 처리효율 및 운영현황을 분석한 결과 BOD, SS, 총대장균군은 평균 95 % 이상 처리효율을 나타냈다. S-1 ~ 3 시설에서 산업단지에서 발생하는 폐수의 유입과 가동 후 20년이 넘은 노후시설로 처리효율이 비교적 낮으며 하수도 정비계획에 따라 종합적인 대수선을 진행하고 있다. S-4 ~ 8 시설의 경우 MBR공정을 사용하고 있으며 비교적 최근 설치되었지만 S-4는 처리효율이 비교적 낮으며 현재 시설개선 중이다. 또한 S-5 ~ 8 시설은 송도, 영종도지역의 경우 입주율이 낮아 저농도 하수가 유입되어 비교적 높은 처리효율이 나타나는 것으로 판단된다.

Ⅴ. 참고문헌

1. 김영준, 정명희, 정두영, 이혜영, (2008), 하수처리장 방류수의 계절별 미생물분포에 관한 연구. 유기물 자원화, 16(1), 53-61.
2. 김동욱, (2007) 물의 병원성미생물 오염관리체계 개선필요, 워터저널 35호.
3. 김건하, (2008), 농지-임야에서 발생하는 지표미생물 유출특성, 대한토목학회논문집 B, 28(1B), 153-160.
4. ECDC : Assessing the potential impacts of climate change on food and waterborne diseases in Europe, ECDC Technical Report. 2012.
5. 유경아, 홍미선, 박지형, 류덕희, (2011), 팔당호에서 강우특성이 대장균군 분포에 미치는 영향, 한국물환경학회・대한상하수도학회 공동춘계학회발표회 논문집, 431~432.
6. 최인철, 정현미, 정원화, 김은석, 이원정, 김지혜, 김영석, 김창수, 장석재, 양미희, 신효진, 이보람, 민병대, (2013), 하수처리장 미생물 수질개선에 관한 연구, 국립환경과학원.
7. 최현숙, 전수진, 최금숙, 최예덕, 차영섭, 배경석, 김교붕, 전재식, 정권, (2016), 하수방류수 수질기준 개선을 위한 분변오염 지표세균의 분포특성 연구, 서울특별시 보건환경연구원보.
8. 환경관리공단, 2003, 고도처리공법
9. 오은하, 영산강 수계 TOC, COD/BOD 특성(2015)
10. 인천광역시, 2020, 2035년 인천광역시 하수도정비기본계획
11. 권영국, (2006), 도시하천의 기능 회복을 위한 방안, 한국지반환경공학회, 4-5, 7(3)