

하수 방류수 수질기준 개선을 위한 분변오염 지표세균의 분포특성 연구

먹는물분석팀·수질화학팀*

최현숙·전수진·최금숙·최예덕*·차영섭·배경석*·김교봉·전재식·정 권

Distribution Characteristics of Bacterial Indicators of Fecal Contamination for Improvement of Sewage Effluent Water Quality Standards

*Drinking Water Analysis Team · Water Chemistry Team**

Hyun-suk Choi, Su-jin Jeon, Geum-sook Choi, Ye-duk Choi*,
Yeong-seop Cha, Kyung-seok Bae*, Kyeo-bung Kim,
Jae-sik Jeon and Kweon Jung

Abstract

This study was performed to investigate the distribution characteristics of bacterial indicators of fecal contamination in sewage treatment plants of Seoul for enhancing the water quality standards of sewage effluent. Indicator bacteria were investigated in the effluent samples, and the following ranges were reported: total coliforms $0\sim 8.0\times 10^5$ CFU/100 mL, fecal coliforms $0\sim 2.2\times 10^5$ CFU/100 mL, *Escherichia coli* $0\sim 4.4\times 10^4$ MPN/100 mL, *Enterococcus* $0\sim 1.3\times 10^4$ MPN/100 mL. Total coliform analysis was performed by the pour plate and membrane filtration methods. It was observed that the membrane filtration method had higher accuracy and sensitivity compared to the pour plate method. Percent distributions of bacterial indicators of health hazards(total coliforms) were fecal coliforms, 22.3%, *E. coli*, 10.3%, and *Enterococcus*, 4.9%. In addition, biochemical identification of total coliforms showed that *Klebsiella* and *Enterobacter* comprised 34.8% and 26.1% of the total population, respectively. *E. coli* accounted for 13.0% of total coliforms and 73.9% of fecal coliforms. Total coliforms include bacteria that are widespread in the natural world, and even extraneous to fecal contamination. Therefore, fecal coliforms and *E. coli* are suitable water quality indicators that can precisely determine fecal contamination. Improvements for strengthening and expanding bacterial indicators of fecal contamination for the current quality standards of effluent water are needed to maintain the river ecology.

Key words : Fecal contamination indicator bacteria, Sewage effluent water quality standard, Biochemical identification

서 론

병원성미생물은 그 크기가 작기 때문에 강우 유출수 및 기타 유출수에 의해 쉽게 수역에 유입되며, 하천, 호소, 하구에 들어가면 오염된 어패류의 섭취, 피부접촉 또는 음용수의 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(1).

최근 많은 연구에서 기후변화가 수인성 병원균에 의한 질병에 잠재적인 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으며, 우리나라 역시 빈번한 집중호우로 인하여 미처리 하수의 공공수역 배출이 증가함에 따라 병원성미생물의 발생과 하천의 오염부하량이 증가하고 있다(2, 3). 또한 하수처리수의 재이용율이 증가함에 따라 공공수역에 하수 방류수

가 미치는 영향이 크며, 수인성 질병을 야기할 수 있는 미생물에 대한 수질관리 강화가 더욱 요구된다(4).

우리나라 공공하수처리시설의 방류수 미생물 수질기준은 「하수도법」에 의해 총대장균군수로 관리되고 있으며, I 지역을 제외한 나머지 지역에 대해 3,000개/mL 이하로 설정되어 있다(5)(표 1). 그러나 미국, 유럽의 경우 국내기준 보다 엄격한 기준을 적용하고 있으며, 일본을 제외한 대부분의 선진국에서는 분원성대장균군이나 대장균을 수질 기준으로 정하고 있다(4, 6). 특히 이들 국가에서는 물놀이로 이용될 수 있는 위락용수에 대해 분변오염 지표미생물로 대장균(*E. coli*)이나 장구균(Enterococci)에 대한 가이드라인을 설정하여 관리하고 있어 기타 분변오염 지표미생물에 대한 추가 기준 설정을 검토해 볼 필요가 있다(표 2)(7, 8). 무엇보다 현행 방류수 수질기준의 총대장균군은 분변오염에 대한 지표성이 부족하며, 환경정책 기본법의 하천 수질환경기준과 연계성이 부족하여

Table 1. Bacterial water quality standard for sewage treatment plant(4)

Items	Total coliforms	Fecal coliforms	<i>E. coli</i>	Remarks
Korea	1,000/mL(district- I) 3,000/mL(except I)	-	-	Duplicate (twice within 30min.)
USA(Florida)	1,000/100mL	200/100 mL	-	Monthly ave.(geometric)
USA(Washington)	-	200/100 mL	-	"
USA(Massachusetts) class B	-	-	126/100 mL 409/100 mL	Monthly ave.(geometric) daily max.
USA(New Hampshire) designated beach	-	-	47/100 mL 88/100 mL	Monthly ave.(geometric) daily max.
Canada	-	400/100 mL	-	Monthly ave.(geometric)
Italy (Milano Nosedo)	-	-	5,000/100 mL 10/100 mL	River discharge irrigation water
Japan(national)	3,000/mL	-	-	Composite(24h)
Japan(local)	800~3,000/mL	-	-	"

실제 하천 수질에의 영향 평가 등에 충분히 활용되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 수계에서의 병원성미생물 오염관리체계 개선을 위해서는 하천의 수질환경기준과 연계해 주요 오염원인 하수 방류수에서의 지표미생물 수질기준 항목을 확대할 필요가 있으며, 미생물학적 안전성 확보를 위해서 선진국 수준의 보다 강화된수질기준을 마련할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 서울시 소재 물재생센터를 대상으로 하수처리수내 분변오염 지표세균의 분포 특성에 대해 조사하였으며, 방류수 수질기준 개선을 위해 분변오염의 실제 수질지표와 총대장균군 시험방법에 대한 검토를 실시하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상 및 시료채취

하수 내 분변오염 지표세균의 분포특성을 조사하기 위해 서울시 소재 4개 물재생센터(중랑, 난지, 서남, 탄천)를 대상으로 2015년 1월부터 12월 까지 분기별로 유입수 및 방류수 13개 지점에 대해 총 52건의 시료를 채수하였다. 시료는 잔류염소의 영향을 배제하기 위해 멸균된 10% 티오황산나트륨 용액이 들어있는 무균채수병에 채수하여

실험실로 운반직후 분석하였으며, 즉시 실험이 어려운 경우에는 4℃ 이하에서 냉장 보관하여 24시간 이내에 실험하였다.

2. 분석방법

1) 분변오염 지표세균 시험방법

지표세균으로 총대장균군, 분원성대장균군, 대장균, 장구균 총 4개 항목을 분석하였으며, 시험방법은 수질오염공정시험기준(10)과 Standard Method(APHA)를 참고하였다(11). 총대장균군은 향후 시험방법 개선을 위해 현행 방류수 수질기준이 적용되는 평판집락법과 막여과법을 비교 실험하였다. 총대장균군의 평판집락법은 Desoxycholate agar(Difco, USA)를 사용하여 1 mL를 기준으로 실험하였으며, 막여과법은 막여과장치(Millipore Microfil system, USA)를 이용하여 직경 47 mm, 여과경 0.45 μm 크기의 멸균된 멤브레인 필터로 여과 한 후, 선택배지인 mENDO(Difco, USA) 고체배지를 사용하여 (35.0±0.5)℃ 인큐베이터에서 (24±2)시간 배양하였다. 배양 후 여과지 위에 형성된 전형적인 금속성 광택을 나타내는 콜로니를 계수하여 100 mL당 총대장균군 수치로 정량하였다. 분원성대장균군은 총대장균군과 동일한 막여과법을 사용하였으며, 선택배지로 mFC(Difco, USA)를 사용하여 (44.5±

Table 2. Guidelines for indicator bacteria for recreational water in various country(9)

Country	Indicator bacteria(/100mL)			
	Total coliforms	Fecal coliforms	<i>E. coli</i>	Enterococci
Korea	1,000 ^a	200 ^a	500 ^b	NA
France	2,000	500	-	100
Japan	1,000	-	-	-
USA	-	-	126 ^c	33 ^c
Colombia	1,000	200	-	-
Poland	-	-	1,000	-
Europe Economy community	-	-	500	200

a: Level II grade of water quality standard for life environmental on river.

b: Guideline for recreational water.

c: Geometric mean value with more than 5 samples during 30 days in fresh water.

0.2)°C 인큐베이터에서 (24±2)시간 배양한 후 여과지 위에 형성된 전형적인 파란색 콜로니를 계수하여 100 mL당 분원성대장균군 수치로 정량하였다. 또한 대장균, 장구균은 제조사의 지시에 따라 Quanti-Tray 2000(IDEXX, USA)을 이용하였으며, 정량범위가 2,400 이하가 되도록 시료를 희석하여 대장균은 (35±0.5)°C, 장구균은(41±0.5)°C에서 24시간 배양한 다음 360 nm UV 파장에서 형광 빛을 발색하는 부분을 양성으로 판정하였다. 각각 Colilert, Enterolert kit의 양성 웰(well) 수를 산출하여 최적확수법(most probable number, MPN)으로 정량적인 수치(MPN/100 mL)를 나타냈다.

2) 세균의 분리 및 동정

총대장균군과 분원성대장균군의 종 분리를 위해 각각의 선택배지에서 자란 전형적인 집락 중 분리 가능한 집락을 TSA배지에서 단일 균주로 순수분리 배양한 후, GN(gram negative) test kit로 VITEK2-compact(BioMerieux, USA)를 사용하여 생화학적 동정을 실시하였다.

3) 오염물질간 상관성 분석

방류수 수질 중 총대장균군과 다른 수질항목과의 상관성 분석을 위해 물재생센터 수질자료를 참고하였다. 2013년 1월부터 2015년 9월까지 수온, pH, 생물화학적산소요구량(BOD), 화학적산소요구량(COD), 부유물질(SS), 총인(T-P), 총질소(T-N), 총대장균군, 음이온 계면활성제(ABS)의 분기별 데이터를 활용하여 SPSS 통계분석을 수행하였으며, 통계학적 유의수준 p-value 0.05로 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 물재생센터별 분변오염 지표세균의 검출 결과

중랑, 난지, 서남, 탄천 4개 물재생센터에 대해 2015년 분기별로 유입수 및 방류수의 분변오염 지표세균을 조사하였으며 그 결과는 표 3과 같다.

먼저 하수 수질기준에서 정한 평판집락법에 따른 총대장균군수는 유입수의 경우 $1.0 \times 10^4 \sim 3.0 \times 10^5$ CFU/mL 이고 방류수의 경우 $0 \sim 4.3 \times 10^3$ CFU/mL 범위로 조사되었다. 서남물재생센터의 9월 채수에서 한차례 수질기준 이상으로 분석되었으나 이는 채수당일 강우 후 일부 1차 처리수가 방류수에 혼합(over flow)되어 나타난 결과이며, 이를 제외한 모든 센터에서 연평균 방류수가 수질기준 이내로 안정적으로 처리되는 것으로 나타났다. 4개 센터 방류수의 총대장균군 기하평균은 0.2×10^3 CFU/mL로 수질기준 3,000개/mL의 약 1/15 수준이었다. 한편, 외국의 기준을 참고하여 총대장균군, 분원성대장균군, 대장균 및 장구균을 조사한 결과, 총대장균군은 유입수에서 $6.0 \times 10^6 \sim 3.4 \times 10^7$ CFU/100 mL, 방류수에서 $0 \sim 8.0 \times 10^5$ CFU/100 mL 범위로 조사되었고, 분원성대장균군은 유입수 $1.4 \times 10^6 \sim 1.8 \times 10^7$ CFU/100 mL 방류수 $0 \sim 2.2 \times 10^5$ CFU/100 mL 범위로, 대장균은 유입수 $1.3 \times 10^6 \sim 5.8 \times 10^6$ MPN/100 mL 방류수 $0 \sim 4.4 \times 10^4$ MPN/100 mL 범위로, 장구균은 유입수 $3.6 \times 10^5 \sim 2.8 \times 10^6$ MPN/100mL 방류수 $0 \sim 1.3 \times 10^4$ MPN/100mL 범위로 조사되었다.

이러한 결과는 2011년 수행된 윤 등(12)의 조사와 비교해서 유입수 농도가 다소 상승하였으며, 방류수는 비슷한 분포 양상을 나타내었다. 특히 표 1과 표 2에서 미국을 포함한 선진외국에서 정한 총대장균군의 수질기준은 1,000/100 mL이며, 우리시 물재생센터 방류수 평균 수질은 기준의 약 10~200배 가량 상회하는 것으로 조사되었다. 센터별 유입수 및 방류수의 지표세균 평균농도는 그림 1과 같으며, 총대장균군수의 경우 유입수는 탄천물재생센터가 방류수는 서남물재생센터가 타 처리장에 비해 높은 것으로 나타났다. 또한 그림 2의 분기별 총대장균군수의 농도 변화를 살펴보면, 유입수에 비해 방류수 수질 변화가 큰 편이고, 특히 센터별로 다소 차이는 있으나 서남 2처리장, 난지 2처리장을 제외한 대부분의 처리장에서 6~9월 총대장균군 농도가 상승하는 것으로 나타나 여름철 최종 방류수내 소독 강화 등 미생물 관리가 필요할 것으로 판단된다.

Table 3. Distribution of fecal indicator bacteria in the influent and effluent of sewage treatment plants during 2015

Facility	Type	Total coliforms (CFU/mL)	Total coliforms (CFU/100mL)	Fecal coliforms (CFU/100mL)	<i>E. coli</i> (MPN/100mL)	<i>Enterococci</i> (MPN/100mL)
Jungrang (JR)	Influent(#2)	$1.1(0.7\sim 1.6) \times 10^5$	$1.4(0.7\sim 3.1) \times 10^7$	$5.1(3.4\sim 8.4) \times 10^6$	$3.8(2.7\sim 5.8) \times 10^6$	$1.4(1.2\sim 1.6) \times 10^6$
	Effluent(#2)	$0.2(0.0\sim 4.0) \times 10^2$	$1.2(0.2\sim 5.3) \times 10^4$	$0.3(0.1\sim 2.1) \times 10^4$	$1.8(0.8\sim 9.1) \times 10^3$	$0.6(0.2\sim 1.2) \times 10^3$
	Influent(#3)	$1.2(0.9\sim 1.5) \times 10^5$	$1.7(1.3\sim 2.1) \times 10^7$	$0.8(0.4\sim 1.8) \times 10^7$	$3.9(2.4\sim 5.5) \times 10^6$	$1.4(0.4\sim 2.8) \times 10^6$
	Effluent(#3)	$1.0(0.4\sim 2.6) \times 10^3$	$2.0(1.8\sim 2.5) \times 10^5$	$3.1(1.6\sim 4.8) \times 10^4$	$1.2(0.5\sim 3.7) \times 10^4$	$0.5(0.2\sim 1.3) \times 10^4$
Nanji (NJ)	Influent	$0.7(0.1\sim 1.9) \times 10^5$	$1.2(0.6\sim 1.8) \times 10^7$	$4.0(3.6\sim 4.5) \times 10^6$	$2.3(1.3\sim 3.7) \times 10^6$	$7.9(5.9\sim 9.9) \times 10^5$
	Effluent(#1)	$0.1(0.0\sim 8.4) \times 10^2$	$0.1(0.0\sim 4.3) \times 10^4$	$0.2(0.0\sim 5.6) \times 10^3$	$0.2(0.0\sim 3.6) \times 10^3$	$0.1(0.0\sim 2.0) \times 10^3$
	Effluent(#2)	$2.8(0.6\sim 6.1) \times 10^2$	$2.6(0.8\sim 8.6) \times 10^4$	$0.5(0.1\sim 1.3) \times 10^4$	$2.2(0.8\sim 3.9) \times 10^3$	$0.8(0.1\sim 3.0) \times 10^3$
	Influent	$0.9(0.1\sim 2.6) \times 10^5$	$1.2(0.9\sim 2.2) \times 10^7$	$3.3(1.4\sim 4.6) \times 10^6$	$1.9(1.4\sim 3.3) \times 10^6$	$5.3(3.6\sim 7.3) \times 10^5$
Seonam (SN)	Effluent(#1)	$0.7(0.1\sim 4.3) \times 10^3$	$1.6(0.2\sim 8.0) \times 10^5$	$0.2(0.04\sim 2.2) \times 10^5$	$0.7(0.1\sim 3.3) \times 10^4$	$1.7(0.3\sim 6.1) \times 10^3$
	Effluent(#2)	$0.6(0.1\sim 2.1) \times 10^3$	$1.2(0.3\sim 2.4) \times 10^5$	$1.7(0.7\sim 4.2) \times 10^4$	$0.7(0.1\sim 2.3) \times 10^4$	$1.8(0.6\sim 9.3) \times 10^3$
	Influent	$1.8(1.0\sim 3.0) \times 10^5$	$2.5(1.2\sim 3.4) \times 10^7$	$0.6(0.2\sim 1.4) \times 10^7$	$3.1(2.0\sim 5.5) \times 10^6$	$1.7(1.2\sim 2.3) \times 10^6$
	Effluent(#1)	$2.1(1.2\sim 5.6) \times 10^2$	$6.2(4.2\sim 9.0) \times 10^4$	$1.6(1.1\sim 3.5) \times 10^4$	$3.1(1.6\sim 5.8) \times 10^3$	$1.0(0.4\sim 1.9) \times 10^3$
Tancheon (TC)	Effluent(#2)	$0.5(0.1\sim 1.4) \times 10^3$	$0.9(0.2\sim 3.4) \times 10^5$	$2.6(0.7\sim 9.6) \times 10^4$	$1.6(0.6\sim 4.4) \times 10^4$	$0.5(0.3\sim 1.0) \times 10^4$
	Influent	$1.0(0.1\sim 3.0) \times 10^5$	$1.6(0.6\sim 3.4) \times 10^7$	$0.5(0.1\sim 1.8) \times 10^7$	$2.9(1.3\sim 5.8) \times 10^6$	$1.1(0.4\sim 2.8) \times 10^6$
	Ave.					
	4 plants	$0.2(0.0\sim 4.3) \times 10^3$	$0.4(0.0\sim 8.0) \times 10^5$	$0.1(0.0\sim 2.2) \times 10^5$	$0.3(0.0\sim 4.4) \times 10^4$	$0.1(0.0\sim 1.3) \times 10^4$

* Geometric mean (Min ~ Max).

2. 분원성대장균군, 대장균, 장구균의 분포 특성

국내 방류수 수질기준에는 포함되지 않지만 선진외국의 경우 인체에 미치는 영향을 고려하여 분원성대장균군, 대장균, 장구균의 기준 또는 가이드라인을 설정하여 관리하고 있다. 대장균(*E. coli*)의 일부(O157)는 병원성을 나타내고 장구균(*Enterococci*)은 면역 저하 환자 또는 병원에 입원중인 환자에게 요로감염, 창상감염, 균혈증 등의 기회 감염증을 유발하는 것으로 알려져 있으며, 특히 *Enterococcus faecalis*, *Enterococcus faecium*은 대표적인 반코마이신 내성을 가진 장구균으로 일부 하수로부터 유입되어 최근 많은 이슈가 되고 있다(13). 따라서 향후 국내 수질기준에 이와 같은 지표세균이 추가 확대될 경우 적절한 수질기준 선정을 위해 총대장균군 중 이들 항목들이 차지하는 분포 특성에 대해 조사하였다. 표 4 및 그림 3(a)에 그 결과를 나타내었으며, 그림 3(a)에서 총대장균군 농도를 전체 100%로 보

고 각각의 항목들의 분포 비율을 나타내었다. 유입수에서 총대장균군 중 분원성대장균군은 36.8(11.7~90.0)%, 대장균은 21.3(8.1~57.8)%, 장구균은 7.9(1.8~17.8)% 차지하는 것으로 나타났으며, 방류수에서는 분원성대장균군은 22.3(2.7~55.0)%, 대장균은 10.3(1.4~40.5)%, 장구균은 4.9(0.5~28.0)% 차지하는 것으로 나타났다. 현재 국내에서는 방류수에 대해 총대장균군수로만 관리되고 있어 기타 분변오염 지표미생물에 대한 실태조사가 미흡한 실정이며(12), 최근 국립환경과학원에서 하수처리시설 공정별 미생물 거동 특성을 분석한 사례가 있다(4). 본 연구에서는 장구균을 추가하여 실험하였으며, 그림 3(b)에서와 같이 분원성대장균군은 총대장균군의 약 1/5, 대장균은 약 1/10, 장구균은 약 1/20 수준을 나타내었고, 이러한 농도 분포 특성은 향후 수질기준 설정에 고려될 수 있을 것으로 판단된다.

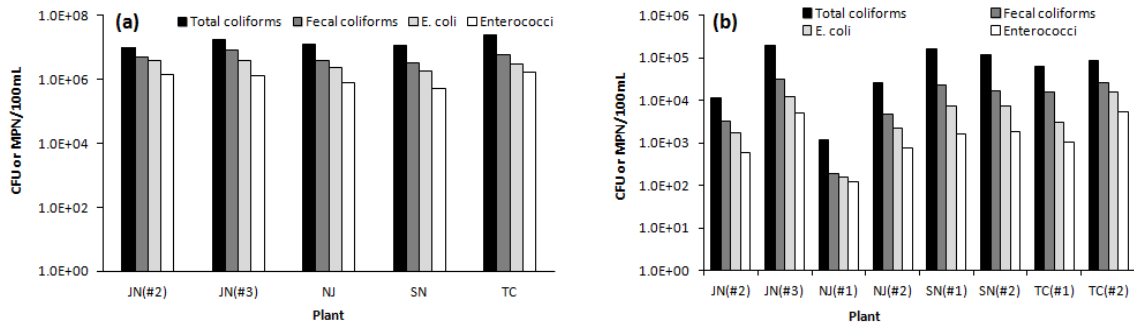


Fig. 1. Mean concentrations of fecal indicator bacteria in the (a)influent and (b)effluent of sewage treatment plants.

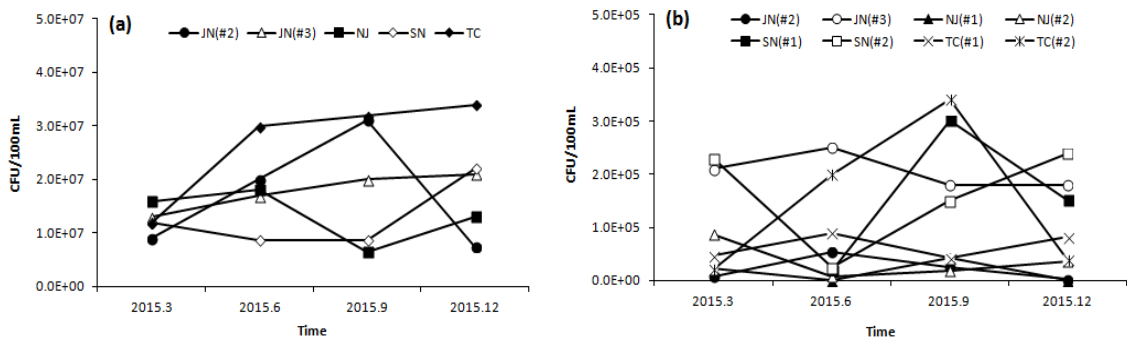


Fig. 2. Quarterly concentrations of total coliforms in the (a)influent and (b)effluent of sewage treatment plants.

Table 4. Percent distribution of fecal indicator bacteria among the total coliforms

Item	FC/TC(%)		<i>E. coli</i> /TC(%)		Enterococci/TC(%)	
	Influent	Effluent	Influent	Effluent	Influent	Effluent
Mean	36.8	22.3	21.3	10.3	7.9	4.9
Min	11.7	2.7	8.1	1.4	1.8	0.5
Max	90.0	55.0	57.8	40.5	17.8	28.0
STD	19.4	11.8	12.0	8.3	4.6	5.9

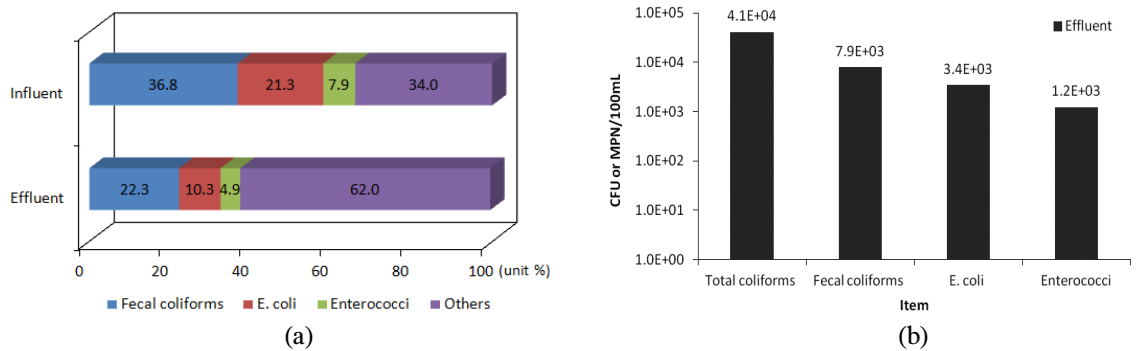


Fig. 3. Mean values of (a)percent distribution and (b)fecal indicator bacteria for 4 plants.

3. 총대장균군 및 분원성대장균군의 생화학적 동정 특성

분변오염을 평가하는데 유용한 지표를 알아보기 위해 방류수에서 검출된 총대장균군 및 분원성대장균군에 대해 생화학적 동정을 실시하였다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 총대장균군은 *Klebsiella pneumoniae* 34.8%, *Enterobacter* 속 26.1%,

E. coli 13.0%로 나타난 반면, 분원성대장균군은 *E. coli* 73.9%, *Klebsiella pneumoniae* 17.4%를 차지하는 것으로 나타났다. 본 연구와 동일한 서울시 물재생센터 방류수를 대상으로 사전 수행된 윤 등(12)의 연구 결과에서는 주로 검출되는 총대장균군은 *Citrobacter*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *E. coli* 그룹으로 나뉜다고 보고하여

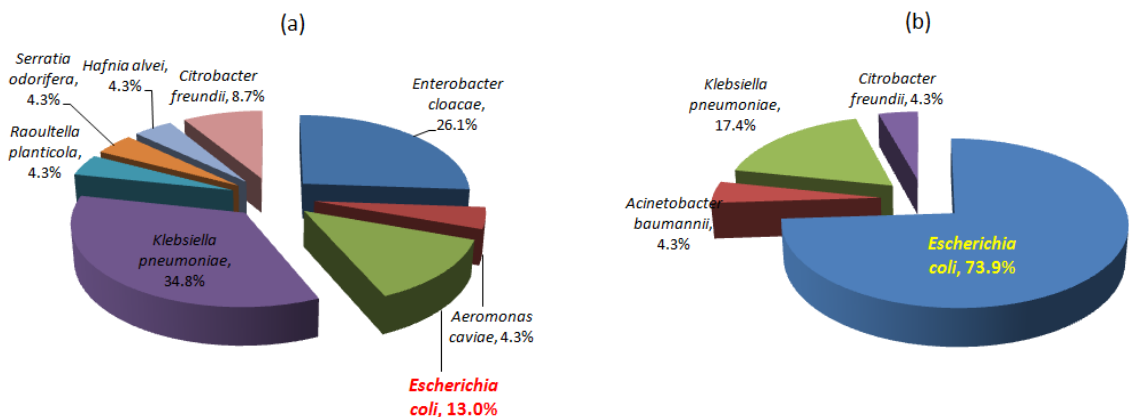


Fig. 4. Identification of (a)total coliforms and (b)fecal coliforms species in the effluent(n=46).

유사한 결과를 나타내었으나, 분원성대장균군은 *E. coli* 53%, *Klebsiella pneumoniae* 22%, *Shigella* 16%로 분류되어 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 16S rRNA를 이용한 동정 및 계통분석 결과로 *E. coli* 그룹에 *Shigella* 그룹이 혼재 되어 있다고 보고하였다. 또한 장 등(14)이 하수 방류수가 유입되는 한강 취수원수에서 총대장균군의 동정 결과 *Enterobacter* 속 32%, *Klebsiella* 속 24%, *E. coli* 7%를 차지하며, 박(15)이 대구지역 생활하수에서 분원성대장균군의 동정 결과 *E. coli* 71.4%, *Klebsiella* 속 14.3%로 우세하다는 보고와도 유사하였다. 총대장균군에 속하는 세균 중에 *E. coli*, *Klebsiella pneumoniae*는 분변유래균이지만, 기타 *Klebsiella* 속, *Enterobacter* 속, *Citrobacter* 속 등은 분변 및 자연계에 모두 존재하는 중간형이고, *Serratia* 속 등은 식물, 토양, 물 등에서 유래하는 자연환경형균으로 알려져 있다(16~18). 임 등(19)은 약수터를 대상으로 조사한 결과 *E. coli*, *Klebsiella pneumoniae* 50%, 중간형이 34.8%, 자연환경형균 10.5%를 차지한다고 보고하였으며, 비록 하수를 대상으로 실험하지 않았지만 많은 연구에서 다양한 환경시료 중 총대장균군은 주로 “비분원성” 대장균군까지 포함한다고 보고하고 있다(20~23). 이에 반해, 대장균(*E. coli*)은 총대장균군, 분원성 대장균군보다 분원성 오염에 대한 특이성이 높아 가장 신뢰할 수 있는 분원성 오염지표로 알려져 있다(24, 25). 따라서 하수 방류수내 총대장균군은 분변오염과 관계없이 자연계에 널리 존재하는 세균도 포함되어 분변오염에 대한 지표성이 부족한 반면, 분원성대장균군은 *E. coli*가 70% 이상을 차지하는 것으로 나타나 대장균(*E. coli*) 검사와 함께 분변오염을 보다 정확하게 파악할 수 있는 수질지표로 판단되며, 향후 수질기준에 항목 추가가 필요할 것으로 사료된다.

4. 오염물질간의 상관성 분석

물재생센터 2013년 1월부터 2015년 9월까지의 방류수 수질자료를 이용해 오염물질간의 상관성(Pearson correlation)을 표 5에 나타내었다. 총대장균군과 다른 수질항목과의 상관성 분석결과

통계학적 유의수준 $p < 0.05$ 를 만족하는 것은 수온, BOD, COD인 것으로 나타났으며, 각각 상관계수 $r=0.250, 0.226, 0.216$ 순으로 약한 양(+)의 상관성을 나타내었다. 이는 방류수내 총대장균군 농도에 계절적 요인과 유기물 농도가 관련성이 있는 것으로 보이며, 향후 재이용수를 포함한 방류수의 BOD기준 강화, 소독 강화 등의 처리효율 향상이 수반된다면 총대장균군 개체수 감소에도 효과적일 것으로 판단된다.

5. 총대장균군 시험방법 검토

본 연구는 방류수에서 다양한 분변오염 지표세균의 분포특성을 조사하여 향후 수질기준 개선을 위한 기초 자료로 활용하기 위해 수행되었으며, 수질기준 강화에 따른 시험방법 개선 필요성에 대한 사전 검토도 함께 실시하였다. 현행 방류수 수질기준이 적용되는 평판집락법은 측정이 간단하며 절차가 단순한 것이 가장 큰 장점이다. 그러나 향후 총대장균군의 수질기준이 강화 될 경우 시료량이 1 mL로 제한되는 단점이 있으며, 「환경정책기본법 시행령」 제2조(26)에서 규정하는 하천의 수질환경기준과 「물재이용촉진및지원에관한법률」 제8조제2항(27)은 100 mL를 기준으로 막여과법을 사용하고 있어 이에 대한 검토가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 평판집락법과 막여과법 두 가지 시험방법을 비교해 보았으며, 표준균주를 이용해 저농도와 고농도에서의 정확도와 오차율을 살펴보고, 분기별 현장시료에 대해 각각의 실험값을 비교해 보았다. 먼저 표준균주(Bioball사, *E. coli*, 10,000 cells)를 희석하여 50, 1000 cells/mL의 농도에서 시험방법간 오차율은 50 cells/mL에서 평판집락법은 4.0%, 막여과법은 2.0%를 나타내었으며, 1,000 cells/mL에서 평판집락법은 7.2%, 막여과법은 2.5%를 나타내었다. 모든 방법에서 오차율 10% 이내를 만족하였으며, 특히 막여과법이 평판집락법에 비해 정확도가 다소 높은 것으로 나타났다. 또한 분기별 현장시료에 대해 두 가지 시험방법으로 총대장균군을 분석한 결과, 표 6에서와 같이 막여과법이 평판집락법에 비해 유입수 평균 1.9배, 방류수 평균 3.1배 가량 높게 검출되었으며, 특히 방류수에서 시험방법간 결과값이 최

대 20배 가량 큰 차이를 보였다. 이는 1 mL에서 는 검출되지 않지만 시료량을 많이 할 경우 총대 장균군이 검출 될 수 있음을 의미한다. 실제로 4 개 센터 방류수 기하평균은 평판집락법에서 $0.2 \times$

10^3 CFU/mL로 수질기준 3,000개/mL의 약 1/15 수준인 반면, 막여과법으로 분석한 결과를 1 mL로 환산하면 0.4×10^3 CFU/mL로 수질기준의 약 1/7~1/8 수준으로 평판집락법에 비해 높게 검출

Table 5. Correlation between total coliforms and other environmental parameters(n=88)

		BOD	COD	SS	TN	TP	Total coliforms	pH	Temp.	ABS
BOD	r	1	0.188	0.492	0.255	0.176	0.226	0.175	0.009	-0.092
	p		0.079	0.000	0.016	0.101	0.034	0.102	0.934	0.393
COD	r	0.188	1	0.293	0.441	0.028	0.216	0.175	0.059	-0.270
	p	0.079		0.006	0.000	0.799	0.043	0.103	0.583	0.011
SS	r	0.492	0.293	1	0.306	0.108	0.151	-0.009	0.131	-0.104
	p	0.000	0.006		0.004	0.318	0.161	0.931	0.224	0.335
TN	r	0.255	0.441	0.306	1	0.124	0.061	0.169	0.002	-0.049
	p	0.016	0.000	0.004		0.251	0.574	0.116	0.982	0.649
TP	r	0.176	0.028	0.108	0.124	1	0.133	-0.018	-0.047	0.063
	p	0.101	0.799	0.318	0.251		0.218	0.866	0.663	0.560
Total coliforms	r	0.226	0.216	0.151	0.061	0.133	1	0.056	0.250	0.084
	p	0.034	0.043	0.161	0.574	0.218		0.606	0.019	0.434
pH	r	0.175	0.175	-0.009	0.169	-0.018	0.056	1	0.137	-0.125
	p	0.102	0.103	0.931	0.116	0.866	0.606		0.203	0.247
Temp.	r	0.009	0.059	0.131	0.002	-0.047	0.250	0.137	1	0.173
	p	0.934	0.583	0.224	0.982	0.663	0.019	0.203		0.108
ABS	r	-0.092	-0.270	-0.104	-0.049	0.063	0.084	-0.125	0.173	1
	p	0.393	0.011	0.335	0.649	0.560	0.434	0.247	0.108	

* Correlation is significant at the 0.05 level(2-tailed).

Table 6. Comparison of two methods from total coliforms results

Item	Influent			Effluent		
	TC ^a (CFU/mL)	TC ^b (CFU/mL)	Ratio (TC ^a /TC ^b)	TC ^a (CFU/mL)	TC ^b (CFU/mL)	Ratio (TC ^a /TC ^b)
Mean	1.6×10^5	1.0×10^5	1.9	0.4×10^3	0.2×10^3	3.1
Min	6.4×10^4	1.1×10^4	0.5	0	0	0.0
Max	3.4×10^5	3.0×10^5	7.8	8.0×10^3	4.3×10^3	20.0
STD	8.7×10^4	7.9×10^4	1.7	1.6×10^3	9.1×10^2	3.8

a : Membrane filtration method, b : Pour plate method.

되었다. 막여과법의 경우 정확도와 측정감도가 높고 다량의 시료량을 취할 수 있는 장점이 있어 향후 기준 강화 시 적용 가능성을 검토해 볼 수 있으나, 이러한 결과는 위양성에 대한 특이도 평가가 수행되지 않은 결과로 추가 연구가 필요하며 낮은 농도의 방류수 측정 시 시험방법 변경에 대한 충분한 사전 검토가 필요할 것으로 사료된다.

결론

서울시 소재 물재생센터를 대상으로 하수처리수 내 분변오염 지표세균의 분포특성에 대해 조사하였으며, 향후 방류수 수질기준 개선을 위해 분변오염의 실제 수질지표와 시험방법 검토 등 사전 평가를 실시하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 물재생센터 방류수에서 평판집락법에 따른 총대장균군은 $0 \sim 4.3 \times 10^3$ CFU/mL 범위이며, 기하평균 농도는 0.2×10^3 CFU/mL로 현행 방류수 수질기준 3,000개/mL의 약 1/15 수준으로 조사되었다. 또한 외국의 기준을 참고하여 총대장균군(막여과법), 분원성대장균군, 대장균 및 장구균을 분석한 결과, 총대장균군 $0 \sim 8.0 \times 10^5$ CFU/100 mL, 분원성대장균군 $0 \sim 2.2 \times 10^5$ CFU/100 mL, 대장균 $0 \sim 4.4 \times 10^4$ MPN/100 mL, 장구균 $0 \sim 1.3 \times 10^4$ MPN/100 mL의 범위로 나타났으며, 평균 수질은 미국을 포함한 선진외국의 기준보다 약 10~200배 가량 높은 것으로 조사되었다.
2. 방류수 총대장균군 중 분원성대장균군, 대장균, 장구균이 차지하는 비율은 각각 평균 22.3%, 10.3%, 4.9%이며, 분원성대장균군의 경우 총대장균군의 약 1/5, 대장균은 약 1/10, 장구균은 약 1/20 수준으로 나타났다.
3. 총대장균군은 주로 *Klebsiella pneumoniae* 34.8%, *Enterobacter* 속 26.1%, *E. coli* 13.0%로 동정되어 분변오염과 관계없이 자연계에 널리 존재하는 세균도 포함된 반면, 분원

성대장균군은 *E. coli* 73.9%를 차지하여 분원성대장균군 또는 대장균 검사가 분변오염을 보다 정확하게 파악할 수 있는 수질지표로 확인되었다.

4. 시험방법 개선을 위한 평판집락법과 막여과법의 비교실험에서 막여과법이 평판집락법에 비해 유입수 평균 1.9배, 방류수 평균 3.1배 가량 높게 검출되었고, 특히 방류수에서 최대 20배 가량 큰 차이를 보여 시험방법 변경에 대한 사전 검토가 필요할 것으로 사료된다.
5. 본 연구를 통해 하수처리수내 건강유해 미생물의 존재 가능성을 확인할 수 있었으며, 방류수 수질기준 개선안으로써 분원성대장균군 기준을 추가하고 현행 수준보다 강화된 수준이거나, 향후 *E. coli*를 추가하여 단계적으로 강화하는 방안을 제시할 수 있으며, 이를 통해 효율적인 수질관리는 물론, 안전한 수환경 제공에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 김동욱 : 물의 병원성미생물 오염관리체제 개선 필요, 워터저널 35호, 2007.
2. ECDC : Assessing the potential impacts of climate change on food and waterborne diseases in Europe, ECDC Technical Report, 2012.
3. 유경아, 홍미선, 박지형, 류덕희 : 팔당호에서 강우특성이 대장균군 분포에 미치는 영향, 한국물환경학회 · 대한상하수도학회 공동춘계학술발표회 논문집, 431~432, 2011.
4. 최인철, 정현미, 정원화, 김은석, 이원정, 김지혜, 김영석, 김창수, 장석재, 양미희, 신호진, 이보람, 민병대 : 하수처리장 미생물 수질 기준 개선에 관한 연구, 국립환경과학원, 2013.
5. 환경부 : 하수도법 시행규칙 [별표 1], 2014.
6. USEPA : National Pollutant Discharge

- Elimination System(NPDES) Permit Writers' Manual, 2010.
7. Ministry of the Environment : Microbial water quality guidelines for marine and freshwater recreational area. New Zealand, 2003.
 8. U.S Environmental Protection Agency : Ambient water quality criteria for bacteria, 1986.
 9. 윤태호, 이근영, 조현석, 최현숙, 임귀철, 이광식, 윤호균, 김갑수, 조수석, 이태호, 길혜경, 전재식 : 청계천 친수활동을 위한 수질 및 집중강우 후 하수 유입에 의한 수질변화 조사, 서울특별시 보건환경연구원보, 50:273~286, 2014.
 10. 환경부 : 수질오염공정시험기준, 2014.
 11. APHA : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st ed., 2005.
 12. 윤태호, 이향, 최금숙, 이승주, 이목영, 여인학, 이민환, 채영주 : 물재생처리시설 방류수의 분변오염 지표세균 검출 특성, 서울특별시 보건환경연구원보, 47:223~236, 2011.
 13. 질병관리본부 : 감염병실험실진단, 3개정판, p296~308, 2005.
 14. 장현정, 이용욱 : 상수원 수질관리를 위한 분변오염 지표세균에 관한 연구, 한국환경위생학회지, 29(1):19~27, 2003.
 15. 박지은 : 우리나라 지표수계의 분변오염 파악을 위한 대장균 검출방법 비교연구, 대구대학교 대학원 석사학위논문, 2005.
 16. 박석기 등 : 해설 먹는물의 수질관리, 동화출판사, p.53~61, 1998.
 17. 송희봉 등 : 대구 달비약수터의 수질인자와 영향인자, 대한환경공학회지, 25(12):1570~1577, 2003.
 18. 김양희 등 : 도내 약수터 수질의 미생물학적 조사연구, 경기도보건환경연구원보, 18, 2005
 19. 임효상 등 : 음용수에서 검출된 총대장균군(Total Coliforms)의 균 동정 및 분포 조사연구, 부산시보건환경연구원보, 18(1):162~168, 2008.
 20. Brenner, KP, Rankin, CC, Roybal, YR, Stelma, Jr., GN, Scarpino, PV and Dupour, AP : New medium for the simultaneous detection of total coliforms and *Escherichia coli* in water, *Appl. Environ. Microbial.*, 59:3534~3544, 1993.
 21. Burlingame, GA, McElhaney, J, Bennett, M and Pipes, WO : Bacterial interference with coliform colony sheen production on membrane filters, *Appl. Environ. Microbial.*, 47:56~60, 1987.
 22. Ewing, WH : *Edward and Ewing's Identification of Enterobacteriaceae*(4th ed.), New York : Elsevier science publishing Co., 1986.
 23. Reasoner, DJ and Geldreich, EE : A new medium for the enumeration and subculture of bacteria from potable water, *Appl. Environ. Microbial.*, 49:1~7, 1985.
 24. 양철신, 현익현, 현성수, 양민영, 좌원홍 : 제주지역 지하수의 총대장균군 동정연구, 제주특별자치도보건환경연구원보 25:13~43, 2014.
 25. Atalas, RM and Bartha R : *Microbial Ecology Fundamentals and applications*, 3rd ed., the Benjamin/cummings publishing company, Inc. CA. U.S.A., p.376~380, 1993.
 26. 환경부 : 환경정책기본법 시행령, 2012.
 27. 환경부 : 물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률 시행규칙, 2014.