

## 청계천 친수활동 가능구간 관리를 위한 미생물학적 수질 평가

환경미생물팀

윤태호 · 최현숙 · 최금숙 · 이승주 · 이목영 · 어수미

## Evaluation on Microbial Quality for Recreational Water in Cheonggye Stream

*Environmental Microbiology Team*

Tae-ho Yoon, Hyun-sook Choi, Geum-sook Choi,  
Seung-joo Lee, Mok-young Lee and Soo-mi EO

### Abstract

This study was performed to determine whether Cheonggye stream sites were appropriate for recreational use, measured according to certain levels of bacteria. Evaluation of recreational water was based on the analysis of total coliforms, fecal coliforms, and *E. coli*, for sites along the Cheonggye stream during 2013. The standard for recreational water was compared with environmental criteria, with levels less than 1,000/100 mL of total coliforms, and 200/100 mL of fecal coliforms, required for each site on the Cheonggye stream. Water quality levels, which included the Seongbuk and Jeongneung streams which drain into the Cheonggye stream, were found to be in the following ranges: pH 7.6~8.5, BOD 0.1~2.2 mg/L, SS 0.4~16.0 mg/L, DO 5.2~15.2 mg/L, total coliforms 0~260,000/100 mL, fecal coliforms 0~7,000/100 mL, *E. coli* 0~1,700/100 mL, and enterococci 0~160/100 mL. The start point in the stream at the Cheonggye plaza was suitable for recreational water all year round, with criteria of up to 230/100 mL of total coliforms, and 91/100 mL of fecal coliforms. The Mojeon bridge site was suitable for recreational water all year round with criteria of up to 400/100 mL of total coliforms and 180/100 mL of fecal coliforms, but this was in the absence of a sewage spill. The Supyo bridge site required attention to bring it up to the standard of recreational water, as it exceeded the criteria with 27.8% of total coliforms and 33.3% of fecal coliforms. This was due to the accumulation of rainfall and sewage spill. Downstream sites were unsuitable for recreation. The findings indicated that if the Cheonggye stream is to be used for recreation, sewage spills need to be blocked.

**Key words** : Recreational water, Cheonggye stream, Microbial water quality

## 서론

물놀이지역이라 함은 몸 전체가 물에 들어가는 입욕 및 수영행위가 이루어지는 하천, 호소, 계곡 등의 담수를 말하는데 서울시의 경우에는 수상요트, 수영이나 계곡 등의 물놀이 시설 및 자치구에서 설치한 분수대 등 시민들이 이용하는 친수활동구간이 해당된다(1). 환경부에서는 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 시행령에 따라 물놀이지역에서는 대장균(*E. coli*) 항목이 500 개체수/100 mL이 넘지 않아야 한다고 규정하고 있다(2). 미국 질병관리본부에서 조사한 자료에 의하면 위락용수에서 감염된 원인의 경우 세균이 28.1%, 기생충 43.6%, 바이러스 5.1%, 독소 등 화학물질이 2.68%이며 원인불명인 경우가 20.5%이었다고 하며(3) 이와 같이 위락용수에서 발병되는 원인의 대부분은 생물학적인 것으로 볼 수 있다.

우리나라의 물놀이 지역 수질평가 제도는 국민에게 안전한 물놀이 용수를 제공하기 위해 최근에 마련되었는데 물놀이 용수 중 건강에 미치는 영향이 가장 크고 자주 일어나는 질병이 병원성 미생물에 의한 오염이다. 특히 분변에 의한 오염은 물놀이 시설 이용객의 장 관련 질병을 일으키는 원인으로 알려져 있다. 따라서 물놀이 용수에서 병

원성 미생물에 의한 감염사고를 예방하기 위해 분변오염의 지표세균을 검사함으로써 수질의 안전성을 확보 할 수 있다 하겠다.

세계보건기구(WHO)의 연구보고에 의하면 오염된 위락용수(대장균 개체수 500 이상)에 반복적인 노출로 인해 5%의 장염 발생율과 2.5%의 호흡기 질환의 위험성을 나타낸다고 보고하고 있다(4). 이를 참고로 유럽연합(EU)의 경우에는 대장균 권고치를 100 mL당 500개체수로 설정하여 관리하고 있다(표 1). 미국은 물놀이 지역 수질관리를 세분화 하여 관리하고 있다(5). 1986년 미국환경청(USEPA)에서는 위락용수 수질평가 미생물지표 및 기준을 제정하여 수인성 장염과의 상관성을 대장균과 장구균수와 매우 밀접한 관련이 있음을 증명하여 조사 시료에서 장구균(Enterococci)의 경우 33개체수/100 mL, 대장균의 경우 126개체수/100 mL를 초과해서는 안 된다는 규정을 시행하여 관리하고 있으며(표 2) 캘리포니아 등 18개주에서는 대장균을, 뉴저지주 등 6개주에서는 장구균을 미생물 지표항목으로 활용하고 있다(6). 한편 여름철 해수욕장 등에서 이루어지는 수영행위의 위락용수에 대해서는 지표항목으로 신빙성이 더 높은 장구균 검사를 통해 관리하고 있다.

청계천 복원수역은 청계광장으로부터 중랑천 합

**Table 1.** Guidelines for indicator bacteria for recreational water in various country

Country	Indicator bacteria(/100 mL)			
	Total Coliforms	Fecal Coliforms	<i>E. coli</i>	Enterococci
Korea	1000 <sup>a</sup>	200 <sup>a</sup>	500 <sup>b</sup>	NA
France	2000	500	-	100
Japan	1000	-	-	-
USA	-	-	126 <sup>c</sup>	33 <sup>c</sup>
Colombia	1000	200	-	-
Poland	-	-	1000	-
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.

류지점까지 연장 8.12 km에 이르며 자양취수장에서 공급되는 120,000 m<sup>3</sup>/일의 유지용수와 광화문역 등 지하철 유출수 약 20,000 m<sup>3</sup>/일로 수량을 유지하는 자연형 복원하천이다. 청계천은 현재 환경정책기본법 시행령(7)에 따라 수질 및 수생태계의 하천 생활환경 II등급 기준에 따라 관리하고 있으나 강우 시 하수유입과 성북천 및 정릉천 등 인접하천의 영향 등으로 미생물의 농도가 높아지는 경향이 있다(8).

본 연구는 청계천을 대상으로 청계광장 시점부터 중랑천 합류지점 까지 각각의 유하지점에 따라 물놀이 등 친수활동 가능여부를 파악하기 위하여 국내외기준 등에 따라 미생물학적인 평가를 수행하였다.

## 연구대상 및 방법

### 1. 연구대상

청계천에 대한 친수활동 구간으로써 미생물학적인 수질평가를 위해 시작지점인 청계광장을 포함하여 유하거리에 따라 모전교, 수표교, 오간수교, 황학교, 무학교, 고산자교 및 중랑천 합류지점까지 청계천 본류와 유입하천인 성북천 및 정릉천을 대상(그림 1)으로 2013년 1월부터 12월까지 월별 조사를 실시하고 특히 미생물 농도가 높아질 것으로 예상되는 6월부터 10월까지 모전교, 수표교,

오간수교, 무학교, 고산자교 및 중랑합류지점까지 주요지점에 대해서 주간 단위로 집중조사를 11회 실시하였다.

### 2. 분석방법

#### 1) 지표미생물 시험방법

검사방법은 지표세균인 총대장균군, 분원성 대장균군 및 장구균의 경우 환경부에서 고시한 수질 오염공정시험기준(9)을 사용하였으며 장구균은 미국 환경보호청(USEPA)에서 고시한 Method 1600 방법을 사용하였다(10).

청계천 시료의 지표세균 정량을 위해 시료분석량을 100 mL로 조정하여 총대장균군, 분원성대장균군, 대장균과 장구균을 분석하였다. 총대장균군, 분원성대장균군 및 장구균은 막 여과장치(Millipore Microfil system, USA)을 이용하여 직경 47 mm, 여과경 0.45 μm 크기의 멸균된 멤브레인 필터에 집락수가 20~80개가 되도록 희석한 시료를 각각 여과하였고, 대장균은 효소발색기질을 이용하는 Coli-ert kit(IDEXX, USA)를 사용하여 분석하였다.

총대장균군은 수질오염공정시험기준에 따른 선택배지인 mENDO(Difco, USA) 고체배지에 올려 놓고 충분히 배지에 스며들도록 정지한 후 페트리 디쉬를 거꾸로 뒤집어 (35.0 ± 0.5) °C 인큐베이터에서 (24 ± 2)시간 배양하였다. 배양 후 여과지 위에 형성된 전형적인 금속성 광택을 나타내는 콜로

**Table 2.** Criteria for indicators for bacteriological densities<sup>a</sup>(1986, USA)

Water	Bacteria	Acceptable swimming associated gastroenteritis rate per 1000 swimmers	Steady state geometric mean indicator density (/100 mL)	Single sample maximum allowable density(/100 mL)			
				Designated beach area	Moderate full body contact recreation	Lightly used full body contact recreation	Infrequently used full body contact recreation
Fresh	Enterococci	8	33	61	78	107	151
	<i>E. coli</i>	8	126	235	298	409	575
Marine	Enterococci	19	35	104	158	276	501

a: 40 CFR Part 131, Water Quality Standards for Coastal and Great Lakes Recreation Waters; Final Rule (EPA, 2004)

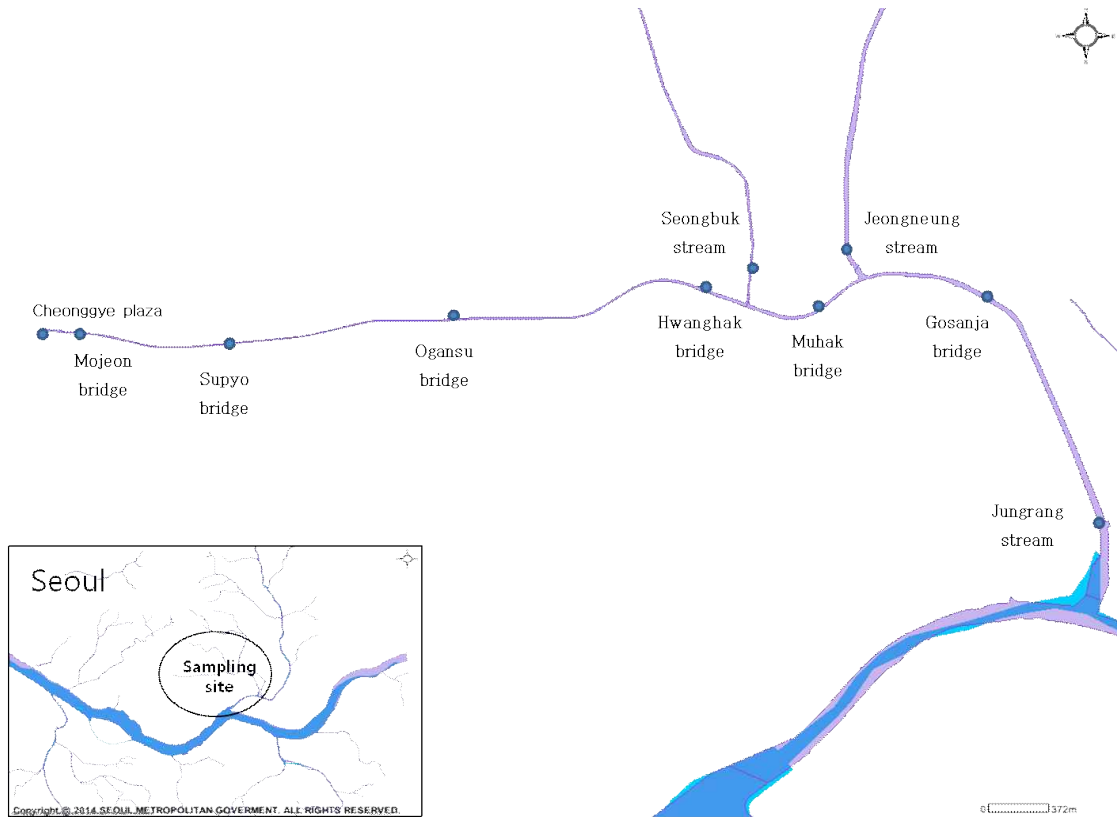


Fig. 1. Sampling sites in Cheonggye stream.

니를 계수하여 100 mL당 총대장균군 수치로 정량하였고, 분원성대장균군은 선택배지인 mFC(Difco, USA)를 사용하여  $(44.5 \pm 0.2)^\circ\text{C}$  인큐베이터에서  $(24 \pm 2)$ 시간 배양한 후 여과지 위에 형성된 전형적인 파란색 콜로니를 계수하여 100 mL당 분원성대장균군 수치로 정량하였다. 대장균은 제조사의 지시에 따라 Quanti-Tray 2000을 이용하여 정량범위가 2,400 이하가 되도록 시료를 희석하여  $(35 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 에서 24시간 배양한 다음 진한 노란색 웰(well)을 총대장균군 양성으로 판정하였고, 360 nm UV 파장에서 형광 빛을 발색하는 부분을 대장균 양성으로 판정하였다. 각각 양성 웰 수를 산출하여 최적확수법(most probable number, MPN)으로 정량적인 수치(MPN/100 mL)를 나타냈다. 장구균은 USEPA에서 제시한 장구균 검출시험법에 준하여 실험하였는데, 우선 여과된 필터를 장구균 선택배지인 mEIA(membrane- Enterococcus

Indoxyl- $\beta$ -D-Glucoside Agar, Difco) 고체배지에 올려놓고 충분히 배지가 스며들도록 정치한 후 펠트리디쉬를 거꾸로 뒤집어  $(41 \pm 0.5)^\circ\text{C}$  인큐베이터에서  $(24 \pm 2)$ 시간 동안 배양하였다. 배양 후 여과지 위에 형성된 전형적인 blue halo 콜로니를 계수하여 100 mL 당 장구균 수로 추정하였다. 장구균 수치로 추정된 집락에 대해서는 확인 실험을 통하여 최종 확정하는데, 여과지에 형성된 장구균 추정 집락을 BHI(Brain heart infusion, Difco) 사면고체배지에 이식하여  $35^\circ\text{C}$ 에서 48시간 배양한 다음 이를 BEA(Bile Esculin Agar, Difco) 배지에 희석 접종하고 6.5% NaCl이 첨가된 BHI 액체배지에 이식하여  $35^\circ\text{C}$ 에서 48시간 배양하였다. 배양 후 BEA 배지에서 검은색 반응과 BHI 액체배지에서 성장여부를 관찰하였고, BHI 액체배지에 이식한 후  $45^\circ\text{C}$ 에서 48시간 배양한 결과도 관찰하여 최종적으로 장구균을 확정하였다.

## 2) 수질기준에 의한 친수가능 구간에 대한 미생물학적 평가

청계천 각 지점에 대한 친수활동 가능구간으로써의 미생물학적인 평가는 현재 국내에서 환경정책기본법 시행령에서 규정하고 있는 하천의 생활환경 기준 II 등급과 물놀이 기준에 따라 평가하였다. 하천 생활환경기준은 각각의 등급별 수질을 규정하고 있는데 수영 등 친수 활동을 할 수 있는 경우 지표미생물은 총대장균군으로써 1,000/100 mL 이하 및 분원성대장균군으로써 200/100 mL로 정하고 있으며, 별도로 수질 및 수생태 보전에 관한 법률 시행령에서는 물놀이 위락용수의 경우 지표미생물인 대장균 항목으로써 500/100 mL로 권고 기준을 정하고 있다. 청계천 시작지점인 청계광장으로부터 중랑천 합류 지점까지 유하거리에 따른 각각의 채수지점에 대해 지표미생물 분석 자료를 근거로 친수활동구간으로써의 적합성여부를 판단하였다. 한편 장래에 미국 등의 기준과 같이 샘플링의 빈도나 친수활동의 정도에 따라 기준을 적용 할 것에 대비하여 지표미생물의 부합여부를 청계천의 각각의 지점들 분석 자료를 이용하여 평가하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 청계천 수질인자 분석

각각의 채수지점으로부터 수질인자들은 표 3과 같이 분석되었다. 하천의 생활환경 기준에서 정하고 있는 수질기준은 수소이온농도(pH), 생물학적 산소요구량(BOD), 부유물질량(SS), 용존산소량(DO)과 지표미생물인 총대장균군과 분원성대장균군으로 판단하게 되어있다. 청계천 및 청계천에 유입하천인 성북천과 정릉천을 포함하여 이들 항목을 분석한 결과 수소이온농도의 범위는 7.6~8.5로 분석되었으며 생물학적산소요구량은 0.1~3.5 mg/L, 부유물질량은 0.4~16.0 mg/L, 용존산소량은 5.2~15.2 mg/L로 분석되어 생활환경 수질기준에서 정하고 있는 II 등급 수질은 연중 유지하고 있는 것으로 나타났다. 지표미생물인 총대장균군은 0~260,000/100 mL로 분석되었고 분원성

대장균군은 0~7,000/100 mL, 대장균은 0~1,700/100 mL, 장구균은 0~160/100 mL로 분석되었다.

이화학적인 인자와 달리 지표미생물군은 생활환경 수질기준 II 등급을 초과하는 경우가 있는 것으로 나타났다. 총대장균군 연평균 농도를 살펴보면 청계광장 시점부터 유하거리 약 2.7 km 지점인 오간수교까지는 수질기준을 만족하였으나 하류지점인 황학교 이후 중랑천 합류지점까지는 총대장균군 농도가 수질기준에서 정하고 있는 1,000/100 mL을 초과하는 것으로 나타났다. 분원성대장균군은 청계광장 시점부터 유하거리 약 0.98 km 지점인 수표교까지는 수질기준인 200/100 mL을 만족하였으나 오간수교를 포함한 하류지점으로 갈수록 농도가 상승하는 것으로 나타났다. 청계천 하류지점으로 갈수록 총대장균군과 분원성대장균군이 증가하는 경향은 환경부에서 주기적으로 측정하는 수질측정망 자료와 매우 유사하다(11). 한편 수질 및 수생태 관련 법규에서 정하고 있는 물놀이 용수로서 대장균 권고치인 500/100 mL로 평가한 결과 연평균 농도는 청계광장 시점부터 유하거리 약 4.7 km 지점인 무학교 지점까지 적합한 것으로 나타났다. 그러나 지표미생물 항목의 경우 청계천 시점부의 하수유입과 강우량 증가 등의 영향을 받는 하천으로써 연평균 농도가 적합한 지점이라도 채수상황에 따라 최상류지역인 모전교 지점 이후 수질기준 등을 초과하는 경우가 있는 것으로 나타나(12) 친수활동을 위해서는 신속한 지표미생물 분석 등으로 수질오염여부를 이용시민들에게 전달할 필요가 있는 것으로 판단되었다.

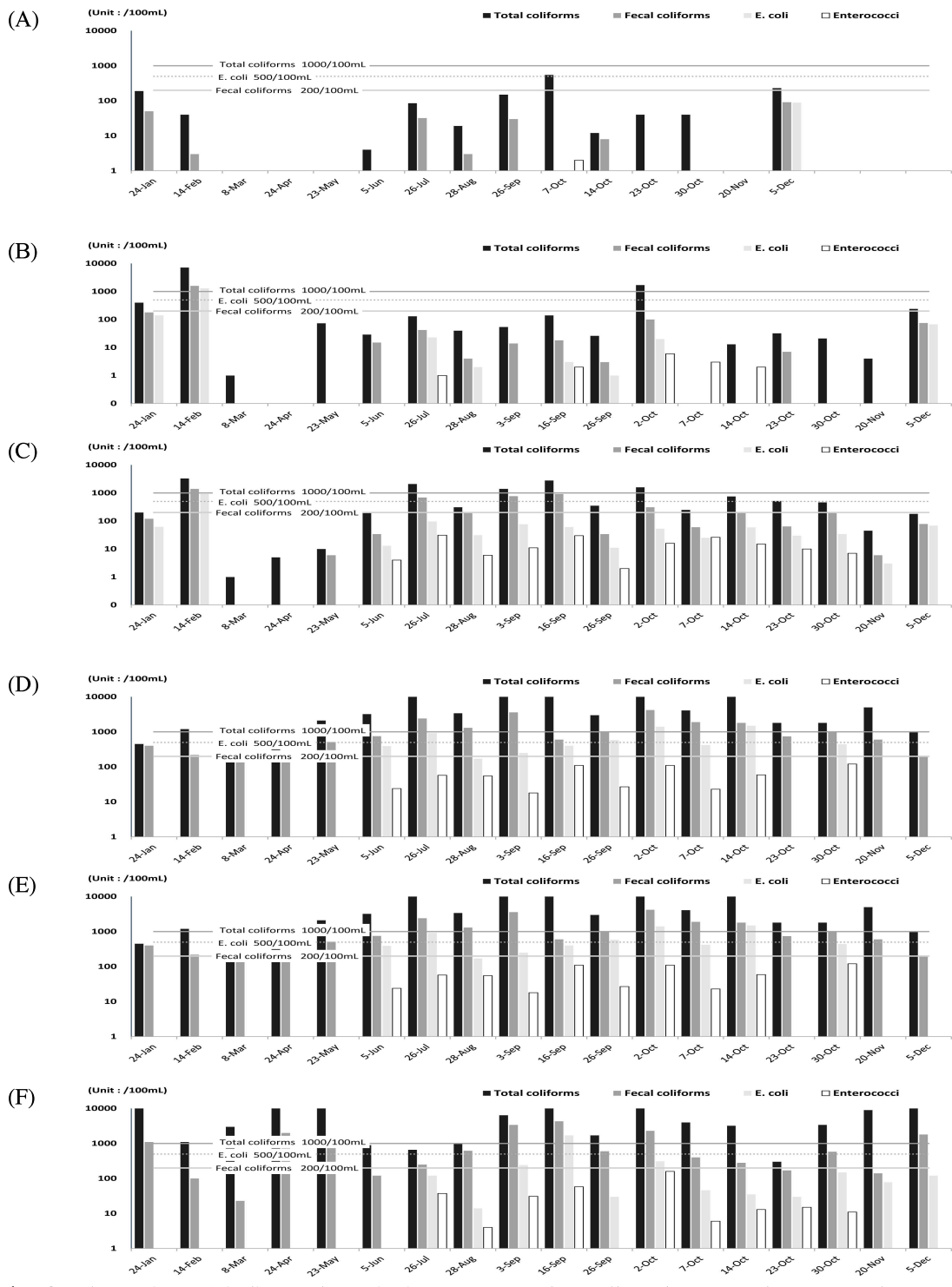
### 2. 지표미생물을 이용한 청계천 친수활동구간 평가

청계천 시점부인 청계광장으로부터 중랑천 합류 지점까지 주요지점에 대해서 2013년 1월부터 12월까지 월간조사를 기본으로 강우량이 많고 기온이 상승하여 오염물 유입 등이 많아질 것으로 예상되는 6월부터 10월까지 집중조사를 실시하여 지표미생물인 총대장균군, 분원성대장균군, 대장균과 장구균 분석결과를 그림 2에 나타냈으며 이를 채수시기별로 수질기준에 따른 친수활동에 적합여부를 평가하였다.

**Table 3.** Summary on water quality of various sites in Cheonggye stream during 2013

Parameters (unit)	Guideline	Mean value of water quality in Cheonggye stream sites(range)									
		Cheonggye plaza (n=15)	Mojeon bridge (n=18)	Supyo bridge (n=18)	Ogansu bridge (n=18)	Hwanghak bridge (n=12)	Seongbuk stream (n=12)	Muhak bridge (n=18)	Jeongneung stream (n=12)	Gosanja bridge (n=18)	Jungrang stream (n=18)
pH	6.5~8.5	8.2 (7.8~8.4)	8.1 (7.7~8.4)	8.2 (7.6~8.5)	8.2 (7.8~8.5)	8.2 (7.8~8.4)	8.0 (7.6~8.3)	8.0 (7.8~8.4)	8.0 (7.5~8.2)	8.1 (7.7~8.4)	8.1 (7.6~8.4)
BOD (mg/L)	≤3	0.9 (0.1~2.3)	0.8 (0.1~2.3)	0.9 (0.1~2.5)	1.1 (0.1~2.4)	1.1 (0.1~2.6)	1.3 (0.1~2.8)	1.1 (0.2~2.5)	1.7 (0.1~3.5)	1.0 (0.2~2.5)	1.6 (0.1~2.9)
SS (mg/L)	≤25	1.6 (0.8~2.8)	1.4 (0.4~2.8)	1.4 (0.4~2.0)	1.2 (0.4~3.6)	1.5 (0.4~2.8)	2.6 (0.4~18.8)	1.4 (0.4~3.6)	2.7 (0.4~16.0)	1.4 (0.4~4.4)	1.5 (0.4~4.0)
DO (mg/L)	≥5	10.2 (7.6~15.2)	10.0 (8.1~14.8)	10.2 (8.7~14.4)	10.3 (8.6~14.2)	10.9 (9.2~14.6)	8.9 (7.2~12.8)	10.0 (8.1~14.0)	9.6 (7.6~12.5)	10.0 (8.0~14.0)	8.2 (5.2~13.2)
Total Coliforms <sup>a</sup> (/100mL)	≤1000	12 (0~550)	31 (0~7,200)	230 (1~3,300)	869 (210~17,000)	1102 (300~61,000)	3807 (120~41,000)	2343 (290~29,000)	6399 (1100~260,000)	3045 (300~29,000)	4577 (300~49,000)
Fecal Coliforms <sup>a</sup> (/100mL)	≤200	1 (0~91)	3 (0~1,600)	55 (0~1,400)	300 (40~2,900)	527 (70~5,400)	358 (14~4,200)	721 (100~7,000)	1210 (400~6,100)	784 (200~4,200)	523 (23~4,300)
E. Coli <sup>a</sup> (/100mL)	≤500	1 (0~88)	1 (0~1,300)	15 (0~920)	128 (35~330)	NA	NA	193 (50~870)	NA	517 (170~1,500)	55 (0~1,700)
Enterococci <sup>a</sup> (/100mL)	-	1 (1~2)	1 (0~6)	11 (2~31)	19 (7~55)	NA	NA	41 (13~130)	NA	49 (18~120)	9 (0~160)
Flow distance from starting point(m)		starting point	10	977	2,717	3,985	4,500	4,650	4,998	5,421	8,120

a: Geometric mean.



**Fig. 2.** Fluctuation of indicator bacteria in water samples collected at (A) Cheonggye plaza, (B) Mojeon bridge, (C) Supyo bridge, (D) Ogansu bridge, (E) Gosanja bridge and (F) Jungrang stream sites in 2013.

청계천 유지용수가 공급되는 최상류지점인 청계광장은 총대장균군 0~230/100 mL, 분원성대장균군은 0~91/100 mL과 대장균은 0~1/100 mL범위로 분석되어 지표미생물 항목 모두 수질기준을 만족하여 년 중 상시 친수활동을 할 수 있는 것으로 나타났다.

모전교는 청계광장으로부터 약 10 m 유하거리에 위치한 지점으로 총대장균군 0~7,200/100 mL, 분원성대장균군 0~1,600/100 mL과 대장균

0~1,300/100 mL 범위로 분석되었으며 지표미생물의 최고농도를 나타낸 2월의 경우는 표 4와 같이 모전교 지점으로 하수 유입이 있었던 것으로 파악됐다. 친수활동이 활발히 이루어지는 시기인 6월부터 10월의 경우 10월 2일 채수시점에서 하수유입 영향으로 총대장균군이 1,700/100 mL로 기준 초과한 경우를 제외하면 모두 지표미생물 항목이 수질기준을 만족한 것으로 나타났다. 모전교의 총대장균군 기준 초과는 하수유입(13)과 관련

**Table 4.** Accumulation of rainfall<sup>a</sup> during 5 days in prior to sampling date in seoul

Sampling date in 2013 yrs. (dd~mmm)	Accumulation of rainfall during 5 days(mm)	Comment
24-Jan	18.6	
14-Feb	1.2	Sewage spill at Mojeon bridge site
08-Mar	0.5	
24-Apr	15.1	
23-May	19.5	
05-Jun	132.2	
26-Jul	153.0	
28-Aug	35.0	
03-Sep	303.6	
16-Sep	110.1	Sewage spill
26-Sep	4.5	
02-Oct	172.6	Sewage spill
07-Oct	0.1	
14-Oct	6.5	
23-Oct	0.0	
30-Oct	0.5	
20-Nov	5.0	
05-Dec	46.9	

a: Reference to Korea Meteorological Administration(<http://www.kma.go.kr/weather/climate>).



있는 것으로 판단되며 하수유입 없는 조건하에서는 친수활동이 가능할 것으로 판단되었다.

수표교는 시점부로부터 약 1 km 하류에 위치한 지점으로 총대장균군 1~3,300/100 mL, 분원성대장균군 0~1,400/100 mL과 대장균 0~9,200/100 mL 범위로 분석되었으며 지표미생물의 최고 농도를 나타낸 2월의 경우는 모전교 지점 하수 유입의 영향으로 지표미생물의 농도가 상승된 것으로 판단되었다. 채수 시기별 지표미생물 수질기준 적정여부를 판단해보면 총대장균군은 총 18회 채수 중 5회(27.8%) 기준을 초과하였고 그 중 7월부터 10월 사이 4회 기준을 초과한 것으로 나타났다. 분원성대장균군은 총 6회(33.3%) 기준을 초과하였으며 마찬가지로 7월과 10월 사이에 집중된 것으로 나타났으며 대장균은 2월 하수유입시기를 제외하고는 기준초과가 되지 않았다. 누적강우량과 지표미생물 농도와의 관계를 살펴보면 기준초과가 많은 시기인 7월에서 10월 사이인 8월 28일, 9월 26일과 10월 7일, 14일, 23일 및 30일에 누적강우량은 0~35 mm로써 7월 26일, 9월 3일, 16일 및 10월 2일의 누적강우량인 110.1~303.6 mm 보다 훨씬 적었으며 이때 총대장균군과 분원성대장균군 농도는 각각 310~750, 34~210/100 mL로 수질기준에 만족하였으나 강우량이 많은 시기의 농도는 1,400~2,800, 310~920/100 mL로 수질기준을 초과하여 강우량이 지표미생물 농도에 영향을 미치는 것으로 판단하였다. 위와 같은 분석 자료를 바탕으로 수표교 지점의 친수활동 가능성을 대해 종합적으로 판단해보면 나타난 바와 같이 하수 유입이나 누적강우량이 높고 수온이 상승하는 여름철에 지표미생물 농도가 상승하여(14, 15) 수질 기준 초과 사례가 빈번하므로 친수활동에 보다 주의를 기울여야 할 것으로 판단되었다.

오간수교는 시점부로부터 약 2.7 km 하류에 위치한 지점으로 총대장균군 210~17,000/100 mL, 분원성대장균군 40~2,900/100 mL과 대장균 35~330/100 mL 범위로 분석되었으며 상류지점에 비해 지표미생물 농도가 높아짐을 확인할 수 있었다. 총대장균군은 총 18회 채수 중 7회(38.9%) 기준을 초과하였으며 분원성대장균군은 18회 중 11회(61.1%) 기준을 초과하였으나 대장균은 6월

조사 이후 기준을 초과하지 않았다. 그러나 7월 이후 누적강우량이 적은 채수시점인 9월 26일과 10월 7일에도 분원성대장균군은 각각 250/100 mL 및 380/100 mL로 수질기준을 초과하였다. 이 지점도 마찬가지로 7월 이후 강우량이 증가하고 하수유입이 있는 경우 지표미생물 농도가 급격히 높아지는 것으로 나타났으나 수표교 지점과는 다르게 누적강우량이 적은 경우에도 분원성대장균군이 초과하여 강우량과는 상관없이 친수활동으로써 적합하지 않은 지점으로 판단되었다.

청계천 하류지점인 고산자교는 시점부로부터 약 5.4 km 하류에 위치한 지점으로, 총대장균군 300~29,000/100 mL, 분원성대장균군 200~4,200/100 mL과 대장균 170~1,500/100 mL 범위로 분석되었으며 오간수교 지점에 비해 지표미생물 농도가 높아짐을 확인할 수 있었다. 총대장균군은 총 18회 채수 중 15회(83.3%) 기준을 초과하였으며 분원성대장균군은 17회(94.4%) 기준을 초과하였으나 대장균은 6월 조사 이후 10회 채수 중 4회(40.0%) 기준을 초과하는 것으로 나타났다. 고산자교 상류로부터 성북천 및 정릉천이 청계천 본류로 유입되는데, 각각 지류하천의 총대장균군과 분원성대장균군 기하평균이 3,807/100 mL 및 358/100 mL과 6,399/100 mL 및 1,210/100 mL로 성북천 합류직전 지점인 황학교와 정릉천 합류직전 지점인 무학교에 비해 매우 높은 것으로 나타나 유입하천의 영향을 받는 것으로 판단되었으며 수질기준 초과가 빈번하여 친수활동이 적합하지 않는 것으로 나타났다. 한편 중랑천과 합류하는 청계천 말단부의 경우도 총대장균군과 분원성대장균군 수질기준 초과가 빈번한 것으로 나타났다.

청계천 상류로부터 하류 끝 지점까지 지표미생물을 이용하여 하천 생활환경기준으로 친수활동 가능여부에 대한 적합성을 종합해보면, 물놀이 등 친수활동이 활발하게 이루어지는 시기인 6월부터 10월까지의 상류 시점부인 청계광장과 모전교 지점은 수질기준을 만족하여 친수활동에 적합하였고 수표교 지점은 친수활동이 가능하나 수온이 상승하고 강우량이 증가하는 여름철에 주의를 요하는 것으로 나타났으며 오간수교 지점 이후 청계천에서는 친수활동이 적합하지 않을 것으로 판단되었다.

### 3. 대장균 농도를 이용한 친수활동 구간 평가

친수활동이 가능한 하천인지를 판단하는 기준으로 하천 생활환경기준 외에 좀 더 규정이 완화됐다고 볼 수 있는 물놀이 지역 권고기준 대장균 500/100 mL 이하와 물놀이형 수경시설 수질기준 대장균 200/100 mL 이하(16)가 있다.

물놀이지역 권고기준인 대장균 농도로 청계천 상류로부터 하류지점까지 친수활동 가능 구간을 판단해보면 청계광장부터 오간수교 구간까지는 대장균 농도가 0~330/100 mL로(2월 모전교 시료 제외) 친수활동이 연중 상시 누적강우량과 상관없이 가능할 것으로 판단되었다. 그러나 시점부인 모전교는 하수 유입에 직접적으로 영향을 받아 2월 채수시료농도가 1,300/100 mL인 점을 감안하면 시점부에서 하수유입은 차단되어야 할 것으로 판단되었다. 한편 물놀이 수경시설의 수질기준으로써 청계천의 친수활동 가능 구간을 판단해보면 0~140/100 mL 농도인 청계광장과 모전교(2월 모전교 시료제외) 지점만이 친수활동이 가능할 것으로 판단되었다. 모전교 이후 오간수교 지점부터는 기준치인 200/100 mL 초과하는 경우가 빈번하여 친수활동에 적합하지 않았다.

한편 표 2와 같이 미국에서는 하천과 바다에 대한 기준을 구분하여 대장균 또는 장구균으로 위락용수를 평가하고 있는데 이러한 기준은 수영 등 입욕행위로 인해 인구 1000명당 8명이 소화기계통의 질병을 유발할 수 있는 농도로 기준을 정하고 있다. 이 기준에 따라 청계천 각 채수지점에 대해 친수활동 평가를 해보면, 대장균은 기하평균 126/100 mL기준에 적합한 지점은 청계천 상류지점인 청계광장 1/100 mL, 모전교 1/100 mL, 수표교 15/100 mL로 나타났으며, 오간수교 지점은 128/100 mL로 적합하지 않았다. 추가적으로 장구균에 대한 기하평균 33/100 mL을 적용해보면 오간수교까지 19/100 mL 이하로 적합할 것으로 판단되었다.

청계천은 한강으로부터 유지용수를 공급하는 자연형 복원하천으로 간주되며 구조상 누적강우량 증가와 하수 월류로 인한 지표미생물 농도가 증가하는 것을 확인하였으며 이용 시민에게 질병을 유

발할 수 있는 가능성이 있으므로 강우 시 지표미생물의 신속 측정이 필요하다 하겠다(17~19).

## 결론

본 연구에서는 서울시에 위치한 청계천에 대해 복원수역 상류인 청계광장으로부터 하류인 중랑천 합류지점까지 각 구간별로 물놀이 등 친수활동 가능 여부를 판단하기 위해 하천 생활환경 수질기준 II 등급 및 물놀이지역의 권고기준을 적용하여 연간 수질변화를 분석하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 청계천 복원수역 시점부인 청계광장 및 모전교로부터 하류지점인 고산자교 및 중랑천 합류지점까지의 본류구간과 성북천 및 정릉천 등 유입 지천들의 주요 수질인자를 분석한 결과 수소이온농도는 7.6~8.5, 생물학적산소요구량 0.1~3.5 mg/L, 부유물질량 0.4~16.0 mg/L, 용존산소량 5.2~15.2 mg/L로 생활환경 수질 기준에서 정하고 있는 II 등급 수질은 연중 유지 하였고 지표미생물은 총대장균군 0~260,000/100 mL, 분원성대장균군 0~7,000/100 mL, 대장균 0~1,700/100 mL, 장구균 0~160/100 mL로 분석되었다.
2. 청계천 각 지점에 대해 하천 생활환경기준 II 등급을 기준으로 친수활동 가능여부를 평가한 결과 상류 시점부인 청계광장은 연중 최대 농도가 총대장균군 230/100 mL, 분원성대장균군 91/100 mL로써 물놀이 등 친수활동에 적합하였으며, 모전교 지점은 하수유입이 없을 경우 최대농도가 총대장균군 400/100 mL, 분원성대장균군 180/100 mL로써 수질기준을 만족하여 친수활동이 가능할 것으로 판단되었다. 그러나 수표교 지점은 강우 누적량과 하수유입 등으로 인해 기준 초과비율이 총대장균군 27.8%, 분원성대장균군 33.3%로 친수활동 시 각별한 주의가 요구하는 것으로 나타났다.
3. 물놀이지역 권고기준인 대장균 500/100 mL를

기준으로 친수활동 가능여부를 평가해보면 청계광장에서 2.7 km 하류인 오간수교 지점까지는 대장균 농도가 0~330/100 mL로 연중 누적 강우량에 상관없이 친수활동이 가능할 것으로 판단되었으나, 모전교 부근의 하수유입이 대장균 농도 증가에 영향을 미치므로 이를 사전 차단해야 하는 것으로 판단되었다

4. 상류지점인 청계광장, 모전교, 수표교까지는 이용시민들의 접근성이 용이하여 물놀이 등 친수활동이 가능하나 누적강우량이 100 mm 이상이거나 하수유입 등이 있을 경우 수질기준 초과가 예측되어 청계천에 대한 친수활동공간으로 활용하기 위해서는 강우에 따른 하수유입을 차단하기 위한 주변 하수 체계의 개선이 필요한 것으로 판단되었다.

### 참고문헌

1. 환경부 : 물놀이지역 수질조사 관리매뉴얼(실무자를 위한 안내서), 2008.
2. 환경부 : 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 시행령 29조2항 별표5, 2012.
3. Centers for Disease Control and Prevention (CDC) : Surveillance for Waterborne Disease and Outbreaks Associated with Recreational Water Use and Other Aquatic Facility-Associated Health Events-United States, 2005-2006. 57(SS09): 1~29, 2008.
4. World Health Organization(WHO) : Guidelines for safe recreational water environments. 2003.
5. U. S. Environmental Protection Agency : Water Quality Standards for Coastal and Great Lakes Recreation Waters; 40 CFR Part 131, 2004.
6. U. S. Environmental Protection Agency : Report of the experts scientific workshop on critical research needs for the development of new or revised recreational water quality criteria. 2007.
7. 환경부 : 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 시행령 29조2항 별표5, 2012.
8. 박영빈, 이희태, 김세운, 고광표 : 청계천 복원구간 내 분변오염도 평가와 미생물 군집연구. 한국물환경학회지, 25(1):76~83, 2009.
9. 환경부 : 수질오염공정시험기준, 2011.
10. U.S Environmental Protection Agency : Enterococci water by membrane filtration using membrane-enterococcus indoxyl- $\beta$ -D-glucoside agar(mEI) method 1600, 2006.
11. 환경부 : 하천수의 수질현황-한강권역, <http://kosis.kr/>(통계청국가통계포털), 2013.
12. 서울시설공단 : 청계천 수질관리방안 학술용역(시민배포용), 2012.
13. Tomoyuki, S, Helen, SG, Lora, EF and Samir, E : Monitoring marine recreational water quality using multiple microbial indicators in an urban tropical environment. Water Research, 38:3119~3131, 2004.
14. Azalea, AM, Katherine, CG and William, AM : Fecal coliform accumulation within a river subject to seasonally-disinfected wastewater discharges. Water Research, 44(16):4776~4782, 2010.
15. Hea, LM and He, ZL : Water quality prediction of marine recreational beaches receiving watershed baseflow and stormwater runoff in southern California, USA. Water Research, 42(10):2563~2573, 2008.
16. 환경부 : 물놀이형 수경시설의 수질관리 지침, 2010.
17. David, K, Jamie, B, Annette, P, Nick A, Mark, DW, Jay, MF, Lorna, F, Alan, R and Gareth, R : Derivation of numerical values for the World Health Organization guidelines for recreational waters.

- Water Research, 38:1296~1304, 2004.
18. Srinivas, M and Dominic, LB : Development of a neural-based forecasting tool to classify recreational water quality using fecal indicator organisms. Water Research, 46(14):4508~4520, 2012.
  19. Robertson, W, Palmateer, G, Aldom, J and Bake, DV : Evaluation of a rapid method for E coli and thermotolerant coliforms in recreational waters. Water Science and Technology, 38(12):87~90, 1998.