

FC/FS 비율에 의한 분변오염원의 출처파악의 유효성

박지은 · 이영옥[†]

대구대학교 생명과학과

Validity of Fecal Pollution Source Tracking using FC/FS Ratio

Ji-Eun Park · Young-Ok Lee[†]

Department of Biological Science, Daegu University

(Received 13 July 2009, Revised 25 October 2009, Accepted 28 October 2009)

Abstract

This study was conducted to assess the validity of fecal coliforms to fecal streptococci ratio (FC/FS) for distinguishing the human from animal origin of fecal pollution in surface water. FC/FS ratio determined in effluent from municipal wastewater and human feces treatment plant (WWTP) and in downstream close to discharge of human feces was above 4 which indicates human origin. However FC/FS ratios determined seasonally in other water zones of the Nakdong River, even in the same sampling site, varied differently (above 4 or less than 0.7) due to different survival time of FC and FS and other environmental factors such as rainfall in watershed. Compared to other season, FC/FS ratios in winter were much lower regardless of the origin. It is concluded that the FC/FS ratio determined in surface water is not always valid for determining the origin of fecal pollution.

keywords : Fecal coliforms (FC)/fecal streptococci (FS), Fecal pollution origin, Seasonal variation, Surface water

1. 서론

분원성 연쇄상 구균(fecal streptococci, FS)은 대장균과 같은 온혈동물의 장내세균으로 수계의 분변오염도를 평가하는 지표세균으로 이용되고 있다. 우리나라는 먹는 물 관리법을 제외한 여타수질관련 법령에서 분원성 연쇄상 구균을 검출하도록 규정하지 않으므로 현재 우리나라에서는 통상적으로 이들을 검출하지 않고 있다(환경부, 2004). 그러나 미국이나 유럽연합에서는 먹는 물뿐 아니라 수영용수로 사용되는 자연수계에서도 총대장균군(total coliforms), 분원성 대장균군(fecal coliforms)과 함께 분원성 연쇄상구균을 검출하고 있다(EU, 1995; US EPA, 1986). 분원성 연쇄상구균으로 통칭되는 세균에는 *Enterococcus*속(genus)과 *Streptococcus*속 2개가 포함되며 이 중 *Enterococcus*속 세균은 6.5% 염도에서도 생존력이 있으므로 해수의 분변오염도 측정에는 대장균보다 더 유용하게 활용되기도 하지만 이들을 단독으로 계수해 분변오염현황을 파악하기보다는 분원성 대장균군(fecal coliforms, FC)과 분원성 연쇄상구균의 비율(FC/FS)을 산출해 분변 오염원의 출처를 밝히는데 이용되고 있다. 즉 FC/FS의 비가 4 이상인 경우 그 오염원의 출처가 인간인 반면, 0.7 미만인 경우에는 동물이고 2.0~4.0인 경우, 그 오염원이 인분과 축분 혼합이지만 인간에 의한 오염 비중이 크며 반대로 0.7~2.0인 경우에는 동물에

의한 오염 비중이 크다고 하였다(Geldreich and Kenner, 1969). 이와 같이 분변오염원의 출처가 인간 혹은 동물인가를 파악하는 것은 수질 관리 및 공중위생적인 차원에서 매우 중요한 사안이기 때문에 최근 선진국에서는 인간 및 가축(소, 돼지)에 우점하는 대장균이나 *Enterococcus*속, *Streptococcus*속에 있는 특정 유전자 유무를 검색하는 분자기법으로 오염원의 종류를 파악하기도 한다(Blanch et al., 2006; Scott et al., 2005). 따라서 본 연구에서는 실무진들이 다루기 힘든 분자기법대신에 검출이 용이한 분원성 대장균군과 분원성 연쇄상구균을 동시에 검출하여 산출한 FC/FS 비를 이용해 분변오염원의 종류구분이 가능한지를 점검해 보고자 분노와 하수를 병행처리하는 S환경사업소(점오염원)의 방류수에서의 시간별 동태(2005년 7월 5일), 낙동강 본류 유입후의 정점별 변화(2005년 10월 20일), 그리고 실제로 자연수계에서의 FC/FS 비가 계절적으로 어떤 변화 양상을 보이는지를 관찰하기 위해 환경부에서 지정한 목표수질지점 중 낙동강 상·중·하류 및 그 지류 15지점에서 2005년 4월부터 2006년 1월까지 이들을 검출해 그 비의 변화를 조사하였다.

2. 연구 방법

2.1. 연구대상 지점 및 조사기간

본 연구의 조사지점은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 낙동강의 수질을 개선하고자 환경부에서 설정한 42개의 목표수질

[†] To whom correspondence should be addressed.
ecolomi@daegu.ac.kr

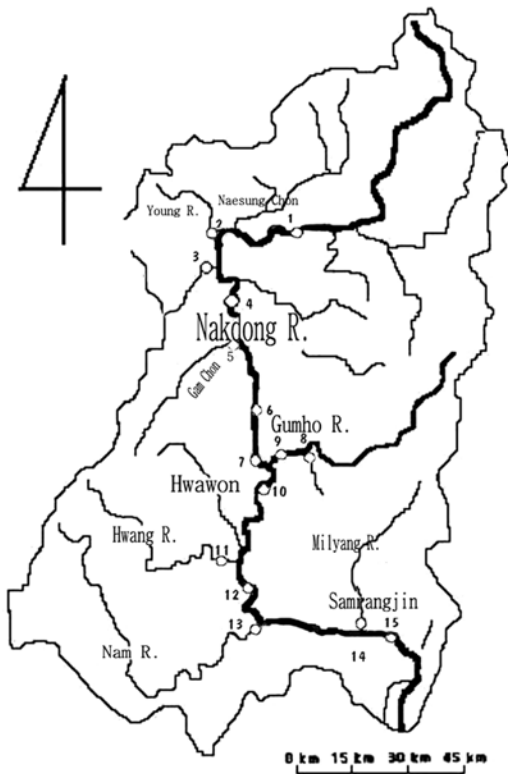


Fig. 1. Sampling sites in the Nakdong River and its tributaries [1(Andong 4), 2(Young River 2), 3(Byungsung-Chon), 4(Sang-Ju 3), 5(Gam-Chon 2), 6(Gumi raw drinking water supply), 7(Jukgok raw drinking water supply), 8(Gumho River 6), 9(Jincheon-Chon), 10(Hwawon-Naru), 11(Whang River 3), 12(Hapchon), 13(Nam River 4), 14(Milyang River 3), 15(Samrangjin)].

지점 중 15개의 주요 지점(본류 7개 지점: 안동4, 상주3, 구미, 죽곡, 화원나루, 합천, 삼랑진; 유입지점의 최하류부 8개 지점: 영강2, 병성천, 감천2, 금호강6, 진천천, 황강3,

남강4, 밀양강3)이다. 채수는 2005년 4월부터 2006년 1월 까지 계절별(봄: 4월 27~28일, 여름: 7월 3~4일, 가을: 10월 27~28일, 겨울: 1월 3~4일), 1회씩 총 4회에 걸쳐 수행하였다. 아울러 점오염원(S환경사업소 방류수)의 FC/FS 비율의 일변화를 조사하기 위해 시간별로 채수해 분원성 대장균(fecal coliforms, FC)과 분원성 연쇄상구균(fecal streptococci, FS)을 검출하였다. 또한 점오염원(환경사업소의 방류수)이 낙동강 본류로 유입된 후의 분변오염 지표세균들의 확산 분포정도를 알아보기 위해 점오염원이 유입되는 진천천, 낙동강 본류와 금호강지류의 각각 2개 정점과, 이 2개의 지점이 낙동강과 합류되는 지점부터 약 12 km 떨어진 수역의 6개 지점(Fig. 2)에서 FC/FS 비를 산출하였다.

2.2. 지표세균의 검출 방법

분원성 대장균군(fecal coliforms)은 환경오염공정시험법 중 막여과법으로, 그리고 분원성 연쇄상 구균(fecal streptococci)을 ISO(ISO 7899-2, 2001)기준에 준해서 역시 막여과법으로 동시에 검출하였고 검출조건은 Table 1에 제시되어 있다. 또한 시료별, 3개의 희석농도와 희석농도별 5개의 배수(replicates)로 plates를 접종해 그 중 plate당 콜로니수가 20~300개 이내인 희석도의 5개 plate를 계수해 그 평균값과 95% 신뢰구간을 산출하였다(박지은 등, 2006).

3. 결과 및 고찰

3.1. 점오염원에서의 FC/FS 비의 시간적 변화

S환경사업소의 방류수를 2005년 7월 5일, 새벽 6시부터 밤 9시까지 시간별로 채수해 검출한 분원성 대장균군(FC)과 분원성 연쇄상구균(FS) 변화양상을 보면(Table 2), 분원성 대장균군은 그 변화폭(19,000~270,000 CFU/100 mL)이 큰 반면 분원성 연쇄상구균의 시간별 변화폭(1,800~6,300



Fig. 2. Sampling sites located at a distance of 2, 3, 5, 7, 10, 12 km from the mixing point (0 km) of Nakdong River, Gumho River and Jinchon-Chon.

Table 1. Detection condition of fecal indicators (FC and FS) by MF method

	Fecal coliforms	Fecal streptococci
Incubation temp. (°C)	44.5 ± 0.2°C	44.5 ± 0.2°C
Medium type	m-FC agar (MERCK)	m-Enterococcus agar (MERCK)
Duration of incubation (h)	24 h	48 h
Incubator type	Water bath	Water bath
Colony color of presumptive FC and FS	Dark blue	Pink, Dark red, Red braun

Table 2. Diurnal Variations of FC and FS, and those ratios at a point source (effluent of municipal wastewater and human feces treatment plant)

Time (h)	CFU/100 mL		FC/FS (ratio)
	Fecal coliforms (95% SD)	Fecal streptococci (95% SD)	
6	270,000 (245,000~295,000)	6,300 (6,000~6,600)	42.9
7	238,000 (201,000~275,000)		
8	117,500 (47,500~187,500)	4,100 (3,400~4,800)	28.7
9	89,500 (12,500~166,500)		
10	17,500 (16,500~18,500)	3,450 (2,650~4,250)	5.0
11	60,000 (54,000~66,000)	3,050 (2,450~3,650)	19.7
12	47,500 (43,500~51,500)	1,800 (1,700~1,900)	26.4
13	65,500 (8,500~122,500)		
14	38,500 (37,500~39,500)	3,400 (2,700~4,100)	11.3
15	19,000 (12,000~26,000)		
16	47,500 (41,500~53,500)	3,450 (2,950~3,950)	13.8
17	55,500 (10,500~100,500)		
18	34,000 (31,000~47,000)	3,650 (2,450~4,850)	9.3
19	38,500 (31,500~83,500)		
20	30,500 (12,500~48,500)	3,950 (3,350~4,550)	7.7
21	43,500 (31,500~88,500)	3,250 (2,650~3,850)	13.4

CFU/100 mL)은 그다지 크지 않았다. 또한 밤 9시 이후부터 아침 9시 전에 검출된 분원성 대장균 개체수가 낮 시간 동안보다 10배 이상 높았다. 이는 아마도 위생사업소에 집하된 정화조 폐액(약 1100톤/일)의 하수처리장으로의 추가적인 유입에 따른 차이로 생각된다. 생활하수와 인분을 병행처리하는 S환경사업소의 방류수에서 산출된 FC/FS 비율은 5~43에서 변화하였는데 FC/FS 비가 4이상이면 분변오염원의 출처가 인간에 의한 것이라는 Geldreich and Kenner (1969)가 제시한 지표에 합당하였다.

3.2. 점오염원 유입 후, 하류에서의 FC/FS비의 변화

Table 3에 분뇨와 생활하수를 병행처리하는 점오염원(S환경사업소)의 방류수가 낙동강 본류로 유입된 후의 정점별 변화를 집중적으로 분석하기 위해 낙동강 본류와 진천천, 금호강의 각각 2개 정점과, 낙동강과 합류되는 지점부터 2 km, 3 km, 5 km, 7 km, 10 km, 12 km 떨어진 총 6개 수역의 횡단면 4~5개 지점(Fig. 2)에서 검출한 FC/FS 비의 변화를 나타냈다. 점오염원(생활하수처리장의 방류수)이 유입되는 지류인 진천천과 대구시를 관통하는 금호강 지류에서 산출된 FC/FS 비가 각각 45.3~78.1, 45~82.5으로 낙동강 본류에서 검출된 FC/FS 비율(10~12.5)을 훨씬 상회하였다. 또한 분뇨와 생활하수를 병행처리하는 S환경사업소의 방류수가 진천천으로 유입되고 진천천이 다시 낙동강 본류와 합류한 지점으로부터 12 km 떨어진 지점(FC, 410~685

CFU/100 mL; FS, 4~12 CFU/100 mL)에서 분변오염 지표 세균들이 진천천 합류전의 낙동강 본류지점(FC, 10~25 CFU/100 mL; FS, 1~2 CFU/100 mL)보다 수십 배 이상의 높은 농도로 검출되었다. 이 결과는 고용량의 고농도 분변오염원이 유입될 경우 12 km 하류에서도 본류의 수질에 미치는 영향이 크다는 것을 시사한다. 아울러 유입된 분변오염원이 수괴에서 완전히 혼합되려면 상당한 이격거리를 필요로 하는 것으로 나타났으므로 이와 같이 분변오염원이 유입되는 수역에서 수질을 측정할 때는 채수지점의 선정에 주의해야 할 것이다. 낙동강에 분변오염원이 유입된 후, 하류 12 km 지점까지 FC/FS 비가 25~290의 범위에서 변화하였으므로 이 또한 FC/FS 비가 4이상이면 오염원의 출처가 인간이라는 Geldreich and Kenner(1969)가 제시한 지표에 부합한다고 할 것이다.

3.3. 낙동강 상·중·하류 및 지류에서의 FC/FS 비의 계절적인 변화

낙동강 상·중·하류 및 그 지류에서의 계절적인 FC/FS비의 변화 양상을 보면(Table 4), 동일지점에서 계절적인 변화가 큰 것으로 나타났다. 우선 낙동강 상류인 안동4와 그 지류인 병성천은 전형적인 농경지 수역이고 갈수기였던 봄(4월)에는 FC/FS 비가 각각 0.2, 0.5로 분변오염의 출처가 동물(가축)인 것으로 판정되지만 여름(7월)과 가을(10월)에는 그 수치가 4이상이어서 인간에 의한 오염으로 판정해

Table 3. Variations of FC and FS, and those ratios depending on the distance from the mixing point of fecal polluted discharge

Sites	CFU/100 mL			FC/FS (ratio)	
	Fecal coliforms (FC)		Fecal streptococci (FS)		
	Mean (95% SD)		Mean		
Nakdong 1	25	(5~45)	2	12.5	
Nakdong 2	10	(8~12)	1	10.0	
Gumho 1	165	(125~205)	2	82.5	
Gumho 2	90	(50~130)	2	45.0	
Jinchonchon 1	14,050	(13,850~14,250)	180	78.1	
Jinchonchon 2	13,150	(11,350~14,950)	290	45.3	
2 km far from mixing point	2-1	25	(15~35)	1	25.0
	2-2	20	(18~22)	1	20.0
	2-3	25	(15~35)	1	25.0
	2-4	18,750	(18,650~18,850)	100	187.5
3 km far from mixing point	3-1	640	(540~740)	30	21.3
	3-2	520	(420~620)	2	260.0
	3-3	725	(595~855)	4	181.3
	3-4	1,075	(895~1255)	16	67.2
5 km far from mixing point	5-1	700	(690~710)	6	116.7
	5-2	945	(865~1,025)	16	59.1
	5-3	1,055	(1,015~1,095)	16	65.9
	5-4	1,290	(1,260~1,320)	14	92.1
	5-5	1,160	(1,150~1,170)	4	290.0
7 km far from mixing point	7-1	845	(795~895)	14	60.4
	7-2	1,090	(1,080~1,100)	16	68.1
	7-3	1,245	(1,205~1,285)	32	38.9
	7-4	1,340	(1,760~1,880)	14	95.7
	7-5	1,075	(1,025~1,125)	14	76.8
10 km far from mixing point	10-1	1,095	(945~1245)	20	54.8
	10-2	1,030	(860~1,250)	24	42.9
	10-3	1,110	(970~1,250)	8	138.8
	10-4	1,050	(1,040~1,060)	16	65.6
	10-5	860	(690~1,030)	20	43.0
12 km far from mixing point	12-1	630	(580~680)	10	63.0
	12-2	685	(635~735)	10	68.5
	12-3	585	(475~695)	12	48.8
	12-4	410	(350~470)	4	102.5

야한다. 또한 겨울에는 각각 1.1, 0.8로 오염원이 인분과 축분 혼합이지만 동물에 의한 오염 비중이 큰 0.7~2.0에 포함된다(Geldreich and Kenner, 1969). 즉 동일한 지점에서 계절적으로 오염원의 출처가 다르게 나타났다. 심지어 분뇨(인분)와 하수를 병행처리하는 처리장의 방류수가 지속적으로 유입되는 진천천에서도 FC/FS 비가 0.7~3.5에서 변화하였는데(4월:0.7, 7월:2.2, 10월:3.5, 1월:1.6) 2.0~4.0인 경우, 그 오염원이 인분과 축분 혼합이지만 인간에 의한 오염 비중이 크며 반대로 0.7~2.0인 경우에는 동물에 의한 오염 비중이 크다는 Geldreich and Kenner(1969)의 주장대로라면 오염원의 출처가 인분과 축분 혼합인 것으로 판정된다. 물론 진천천의 상류에 소규모의 축산단지가 있을 가능성도 있지만 일일 52만톤의 하수 및 1100톤의 분뇨(정화조 폐액)를 통합처리하는 처리장의 방류수가 진천천의 주 오염원일 것이므로 진천천에서 FC/FS비에 의한 오염원이 인

분과 축분 혼합으로 판정하는 것은 적절치 않다. 그러나 진천천과 금호강 지류가 낙동강 본류와의 합류 직후 지점인 화원나루(사문진교)에서는 FC/FS 비가 동절기(1월:2)를 제외하고는 4이상(4월: 8.5, 7월: 8.5, 10월: 8.5)으로 이 수역에 존재하는 분변오염이 인간에 의한 것으로 나타났다. 특히 겨울철(1월)에는 삼랑진(27.8)을 제외한 모든 조사지점에서 FC/FS의 비가 4미만(0.1~3.9)으로 그 외의 계절에 비해 낮게 나타났다. 이처럼 겨울에 FC/FS비가 낮아지는 것은 아마도 저온에서 분원성 연쇄상구균이 분원성 대장균군보다 더 오래 생존하기 때문인 것 같다(Davenport et al., 1976; Van Donsel et al., 1967). Van Donsel 등(1967)은 토양에 노출시킨 분원성 대장균군 수가 90% 감축되는데 여름에는 3.3일이 소요된 반면, 가을에는 13.4일이 소요되고 분원성 연쇄상구균의 경우, 그 수가 90% 감축되는데 여름에는 분원성 대장균군보다 빠른 2.7일이 소요되었고 가을

Table 4. Seasonal variations of FC (fecal coliforms, expressed CFU/100mL) and FS (fecal streptococci, expressed CFU/100mL) and those FC/FS ratios in the Nakdong River (^a: raw drinking source water supply)

Site	April			July			October			January		
	FC (95% SD)	FS (95% SD)	FC/FS ratio	FC (95% SD)	FS (95% SD)	FC/FS ratio	FC (95% SD)	FS (95% SD)	FC/FS ratio	FC (95% SD)	FS (95% SD)	FC/FS ratio
Andong 4	210 (190~230)	1310 (1180~1440)	0.2	420 (380~460)	74 (64~84)	5.7	330 (266~394)	77 (76~79)	4.3	229 (174~284)	204 (196~212)	1.1
Young river 2	36 (30~40)	6 (2~10)	6	380 (350~410)	22 (18~26)	17.3	21 (11~31)	1 (0~2)	21	7 (0~20)	39 (28~30)	0.2
Byung sungchon	230 (200~260)	450 (380~520)	0.5	300 (210~390)	68 (54~82)	4.4	637 (535~738)	43 (30~56)	14.8	1267 (1108~1426)	1648 (1482~1814)	0.8
Sang-ju 3	94 (86~102)	24 (18~30)	3.9	250 (210~290)	16 (6~26)	15.6	24 (13~35)	10 (5~13)	2.4	6 (2~10)	26 (24~28)	0.2
Gamchon 2	14 (10~18)	4 (2~6)	3.5	3900 (2800~5000)	170 (152~188)	22.9	165 (121~209)	37 (27~46)	4.5	62 (42~82)	466 (439~493)	0.1
Gumi ^a							5 (3~8)	6 (2~13)	0.8			
Jukgoka				2320 (2150~2490)	1890 (1670~2110)	1.2	141 (114~169)	9 (6~12)	15.7			
Gumho River 6	50 (46~54)	24 (22~26)	2.1	5300 (4700~5900)	570 (460~680)	9.3	8967 (8038~9896)	1940 (1756~2124)	4.6	50133 (48659~51608)	12920 (12247~13593)	3.9
Jincho-Chon	12100 (11200~13000)	18300 (17900~18700)	0.7	48000 (26000~70000)	21600 (19400~23800)	2.2	22967 (22203~23730)	6600 (6100~7100)	3.5	37067 (27801~46332)	23867 (20800~26933)	1.6
Hwawon- Naru	34 (28~40)	4 (2~6)	8.5	4110 (3200~5020)	486 (428~544)	8.5	2563 (2459~2667)	302 (284~320)	8.5	2167 (1937~2400)	1067 (890~1160)	2
Whang River 3	52 (44~60)	6 (2~10)	8.7	990 (890~1090)	190 (174~206)	5.2	305 (245~366)	92 (84~100)	3.3	10 (8~12)	43 (39~47)	0.2
Hapchon	34 (30~38)	6 (4~8)	5.7	1470 (1390~1530)	214 (162~266)	6.9	48 (37~59)	6 (4~8)	8	29 (26~32)	32 (28~36)	0.9
Nam River 4	2 (0~4)	0 (0)	.	1470 (1230~1710)	322 (268~376)	4.6	71 (49~93)	7 (4~11)	10	3 (1~5)	12 (11~13)	0.3
Milyang River 3	2 (0~4)	0 (0)	.	440 (420~460)	92 (4~110)	4.8	14 (12~16)	5 (4~7)	2.8	2 (2~2)	4 (3~5)	0.5
Samrangjin	2 (0~4)	8 (4~12)	0.3	810 (780~840)	196 (166~226)	4.1	79 (60~99)	4 (3~5)	19.8	862 (795~929)	31 (16~36)	27.8

에는 그보다 긴 20.1일이 소요되었다고 하였다. 한강의 여러 상수원수 취수지점에서 측정된 FC/FS비의 월별 변화도 낙동강에서의 본 연구 결과와 유사하게 동일한 지점에서도 큰 폭의 변화를 보였다(장현정과 이용옥, 2003). 구의 취수장 동일지점에서도 월별 FC/FS비가 0.2~26.2의 범위에서 변화하였으므로 한강 역시 FC/FS비에 준해서 분변오염원을 판별할 수 없을 것이다. 또한 대부분의 지점에서 5~10월에 측정된 FC/FS 비가 높고 수온이 낮은 동절기에 낮은 값을 보였다. 물론 한강에서 측정된 FS의 배양온도(35°C)가 본 연구의 그것(44.5°C)과 달라 두 연구 결과를 단순 비교하기는 어렵지만 한강의 동일 지역에서도 산출된 FC/FS비가

낙동강에서와 마찬가지로 4이상(인분)이기도 하고 0.7이하(축분)인 것만은 확실하다. 반면에 박영빈 등(2009)은 오존처리 등 여러 단계의 정수 및 소독과정을 거친 한강물이 공급되고 일반 시민들의 접촉, 즉 인간에 의한 오염이 예상되는 청계천 수역에서 분원성 대장균군(FC), 대장균, 분원성 연쇄상구균(FS) 등을 검출하였는데 분원성 대장균은 0~86 MPN/100 mL, 분원성 연쇄상구균은 거의 검출되지 않거나 매우 낮은 농도(0~9 MPN/100 mL)로 검출되었다고 보고하였다. 그들의 결과로 FC/FS 비를 산출해 보면 분원성 연쇄상구균이 검출되지 않은 경우에는 산출할 수 없으나 존재하는 경우에는 그 범위가 8~14이므로 인간에 의한

오염이라는 합당한 판정을 할 수 있을 것이다. 즉, 청계천처럼 유하거리가 짧고 자연수계에 비해 주변의 영향이 적은 인공하천에서는 FC/FS비에 의한 오염원의 출처판정이 타당하였다. 그러나 유역의 토지이용도, 지형, 강우패턴 등의 영향이 큰 자연 수계에서는 그와 다른 양상을 나타낸다. 동일 지점에서 건조한 날에는 FC와 FS가 각각 20 MPN/100 mL 정도로 검출되었는데 우기에는 FC와 FS 모두 10,500 MPN/100 mL로 건기의 수백배이상 증가하였고 특히 초기우수에서 많이 검출(160,000 MPN/100 mL)되었다고 보고된 것처럼(Sankaramakrishnan and Guo, 2005) 본 연구에서도 유사한 양상을 보였다. 여름인 7월에는 우중에 채수해 분석하였는데 우선 모든 정점에서 분원성 대장균군(FC)과 분원성 연쇄상구균(FS)의 숫자가 모두 증가하였지만 특히 분원성 대장균군(FC)수가 더 많이 증가해 결국 FC/FS비가 증가하였다. 또한 분원성 연쇄상구균(FS)에 속하는 세균간에도 자연 수계에서의 생존률 차이가 커서 *Enterococcus*속은 분원성 대장균군(FC)보다 오래 생존하지만 *Streptococcus*속은 더 빨리 죽으며(McFeters et al., 1974) *Ent. faecalis*는 인분과 가금류 분뇨에 우점하고 *Strep. bovis*는 우분 및 돈분에서 주로 검출된다고 하였다(Pourcher et al., 1991). 이와같이 지표수에서는 수온에 따른 FC와 FS의 생존률(survival)의 차이(Van Donsel et al., 1967), 건기에 비해 우기 시에 비점오염원의 영향으로 급증하는 분변오염 양상(Sankaramakrishnan and Guo, 2005)으로 인해 동일지점에서도 FC/FS비가 변화하므로 Feachem (1975)은 Geldreich and Kenner(1969)가 제시한 지표를 변용하여 동일지점에서의 FC/FS비가 4이상이었다가 감소하면 그 수역은 인분에 의해 오염된 것이며 0.7이하였던 FC/FS비가 증가하는 추세를 보이면 그 수역은 축분에 의해 오염된 것으로 평가할 것을 제안하였다. 즉 다양한 환경요인의 영향을 받는 지표수에서 FC/FS비를 분변오염원의 종류 판별을 위한 지표로 사용하는데에는 많은 문제점들이 있다.

FC/FS비가 가진 이런 문제점으로 인해 최근에는 분자생물학적인 기법을 이용해 인분 및 축분에 주로 존재하는 대장균 및 연쇄상구균 등의 특정 유전자 유무를 검색하는 방법으로 분변오염원의 종류 및 출처(source)를 파악(Microbial Source Tracking, MST)해 상수원수의 안전성을 도모하려는 추세이다(Blanch et al., 2006; Scott et al., 2005; Simpson et al., 2002). 그러나 분자기법에 의한 분변 오염원의 정량평가는 아직 어려우며 정성평가에도 한계가 있는 것으로 알려져 있다. 인분에서 주로 발견되는 연쇄상구균, *Ent. faecium*에 있는 특정유전자(*esp gene*)의 검출한계가 시료 당 균수가 10개 이상일 때 가능하다고 보고되었다(Scott et al., 2005). 이는 본 연구대상지인 낙동강의 많은 수역에서 연쇄상구균(FS)이 10 CFU/100 mL 이하로 검출되었는데(Table 4), 이처럼 분변 오염 정도가 계절적으로 혹은 수리 및 환경적인 요인에 의해 다변하는 자연수계에서는 그 적용에 한계가 있음을 시사한다. 또는 수중에 함유된 표백제, 세제, 카페인, flouride 등 우리가 흔히 일상에서 사용하는 화학물질들의 농도와 분변오염 지표세균들 간에는 유의

적인 상관성이 있으므로 지표세균과 이같은 화학물질을 동시에 측정해 수질의 인간 영향 유무를 판정하거나(Sankaramakrishnan and Guo, 2005) 인간과 동물이 가진 스테롤계 물질(fecal sterol)의 차이를 이용해 분변오염원의 출처를 구분하기도 한다(Blanch et al., 2006). 이와 같은 분변오염원의 출처를 파악하기 위한 노력은 오염원의 종류를 알아야 그 제어가 가능하고 결국 위생적으로 안전한 수질을 확보할 수 있기 때문이다. 그러므로 이를 위해서 우리나라 앞으로는 상수원수 관리 차원에서 분변오염원의 출처파악을 위해 다양한 연구방법들을 우리 수계에 적용해보고 그 중 우리 수계에 적합한 방법을 선택해 표준화한다면 위생적인 안전성이 중요시되는 상수원수 및 위탁용수 등의 수질을 보다 합리적으로 관리할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

우리나라 자연수계에서 통상적으로 검출하지 않는 분원성 연쇄상 구균(fecal streptococci, FS)에 대한 분원성 대장균군(fecal coliforms, FC) 비율(FC/FS)은 분변오염의 출처가 인간 혹은 동물인지를 구분하는 지표로 사용되고 있다. 본 연구는 우리나라 수계에서도 FC/FS비를 이용해 분변오염원의 출처파악이 가능한지를 점검해 보고자 분뇨와 하수를 병행처리하는 S환경사업소(점오염원)의 방류수에서의 시간별 FC/FS비 변화, 그 방류수가 낙동강 본류와 합류한 후의 정점별 FC/FS비 변화, 그리고 실제로 자연수계인 낙동강본류와 그 지류에서의 계절적인 FC/FS비의 변화를 조사하였다.

- 1) 점오염원인 생활하수 및 분뇨 처리장의 방류수에서의 시간별 FC/FS비는 5~43 범위에서 변화하였으므로 FC/FS비가 4이상이면 분변오염원의 출처가 인간이라는 Geldreich and Kenner(1969)가 제시한 지표에 합당하였다.
- 2) 낙동강 본류에 1의 분변오염원이 유입된 후, 하류 12 km 지점까지의 FC/FS비는 25~290의 범위에서 변화하였으므로 이 또한 FC/FS 비가 4이상이면 오염원의 출처가 인간이라는 Geldreich and Kenner(1969)가 제시한 지표에 부합하였다. 또한 분변오염원이 낙동강 본류로 유입된 후 유입지점으로부터 12 km 떨어진 지점(FC, 410~685 CFU/100 mL; FS, 4~12 CFU/100 mL)에서도 오염원 유입이전의 낙동강 본류지점(FC, 10~25 CFU/100 mL; FS, 1~2 CFU/100 mL)보다 수십 배 이상의 높은 분변오염도를 나타냈다.
- 3) 그러나 낙동강 본류 및 그 지류의 15개 동일 지점에서 연 4회 계절별로 측정된 FC/F비는 동일지점에서도 4이상(인간에 의한 오염)이거나 0.7미만(가축에 의한 오염)이었다. 특히 겨울에 FC/FS비가 낮게 산출되었는데 이는 분원성 대장균에 비해 분원성 연쇄상 구균이 저온에서 더 오래 생존하는 것과 연관이 있는 것 같다. 그 외에 유역의 토지이용도, 강우패턴 등도 FC/FS비에 영향을 미칠 것으로 생각된다.

결론적으로 FC/FS비를 이용한 분변오염원의 출처(인분/

축분)평가는 해당오염원을 처리하는 처리장의 유출수나 그 유출수가 유입되는 하류의 일부 구간에 국한되어 가능하였다. 따라서 일반적인 자연수계에서 FC/FS비를 산출해 오염원의 종류를 파악하는 것은 문제가 있으므로 분변오염원의 종류 및 출처를 보다 정확히 파악하기 위해 최근 도입된 분자기법 등 다양한 연구방법들을 우리수계에 적용해보아야 할 것이다. 그 중 우리 수계에 적합한 방법을 선택해 표준화한다면 특히 위생적인 안전성이 중요시되는 상수원수 및 위락용수 등의 수질을 보다 합리적으로 관리할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 낙동강 물환경 연구소의 환경기초조사 연구사업 및 2007년도 대구대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 박영빈, 이희태, 김세윤, 고헌표(2009). 청계천 복원구간 내 분변오염도 평가와 미생물 군집 연구. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(1), pp. 76-83.
- 박지은, 김선덕, 조주래, 김상현, 이해진, 이영욱(2006). 지표수에서의 분변오염지표세균(대장균군) 검출방법의 비교 연구. *수질보전 한국물환경학회지*, **22**(6), pp. 1052-1059.
- 장현정, 이용욱(2003). 상수원 수질관리를 위한 분변오염 지표세균에 관한 연구. *한국환경위생학회지*, **29**(1), pp. 19-27.
- 환경부(2004). 수질오염공정시험방법, 환경부고시 제2004-188호.
- Blanch, A. R., Belanche-Munoz, L., Bonjoch, X., Ebdon, J., Gantzer, C., Lucena, F., Ottoson, J., Kourtis, C., Iversen, A., Kühn, L., Laura Mocé, L., Muniesa, M., Schwartzbrod, J., Skrabber, S., Papageorgiou, G. T., Taylor, H., Wallis, J., and Jofre, J. (2006). Integrated Analysis of Established and Novel Microbial and Chemical Methods for Microbial Source Tracking. *Appl. Environ. Microbiol.*, **79**(9), pp. 5915-5926.
- Davenport, C. V., Sparrow, E. B., and Gordon, R. C. (1976). Fecal indicator bacteria persistence under natural conditions in an ice-covered river. *Appl. Environ. Microbiol.*, **32**(4), pp. 527-536.
- European Union (1995). Proposed for a Council Directive concerning the quality of water intended for human consumption. Com (94) 612 Final. *Offic. J. Eur. Union*, **131**, pp. 5-24.
- Feachem, R. (1975). An improved role for faecal coliform to faecal streptococci ratios in the differentiation between human and non-human pollution sources. *Wat. Res.*, **9**, pp. 689-690.
- Geldreich, E. E. and Kenner, B. A. (1969). Comments on fecal streptococci in stream pollution. *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, **41**, pp. R336-R341.
- ISO 7899-2 (2001). International standard, Water quality - Detection and enumeration of fecal streptococci - part 2: method by membrane filtration 1.ed. ISO (the International Organization for Standardization), Switzerland.
- McFeters, G. A., Bissonnette, G. K., Jezeski, J. J., Thomson, C. A., and Stuart, D. G. (1974). Comparative survival of indicator bacteria and enteric pathogens in well waters. *Appl. Microbiol.*, **28**, pp. 823-829.
- Pourcher, A. M., Devriese, L. A., Hernandez, J. F., and Delattre, J. M. (1991). Enumeration by a miniaturized method of *Escherichia coli*, *Streptococci bovis* and enterococci as indicators of the origin of faecal pollution of waters. *J. Appl. Bacteriol.*, **70**(6), pp. 525-530.
- Sankararamkrishnan, N. and Guo, Q. (2005). Chemical tracers as indicator of human fecal coliforms at storm water outfalls. *Environ. Int.*, **31**(8), pp. 1133-1140.
- Scott, T., Jenkins, T. M., Lukasik, J., and Rose, J. B. (2005). Potential use of a host associated molecular marker in *Enterococcus faecium* as an index of human fecal pollution. *Environ. Sci. Technol.*, **39**, pp. 283-287.
- Simpson, J. H., Santo Domingo, J. W., and Reasoner, D. J. (2002). Microbial Source Tracking: State of the science. *Environ. Sci. Technol.*, **36**(24), pp. 5279-5288.
- US EPA (1986). United States Environmental Protection Agency. Ambient water quality. Criteria - 1986. EPA440/5-84-002. Washington, DC.
- Van Donsel, D. J., Geldreich, E. E., and Clarke, N. A. (1967). Seasonal Variations in Survival of Indicator Bacteria in Soil and Their Contribution to Storm-water Pollution. *Appl. Microbiol.*, **15**(6), pp. 1362-1370.