

금강유역 비점원에서 발생하는 미생물 오염 및 수질에 대한 영향

김건하[†]

한남대학교 공과대학 토목환경공학과

Microorganism Contamination from Diffuse Sources and Its Impacts on Water Quality in the Geum River Basin

Kim, Geonha[†]

Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University

(Received 19 December 2005, Accepted 26 January 2006)

Abstract

In order to estimate microbial contaminant discharge from diffuse sources, rainfall runoff was monitored at forestry, agriculture and urban watersheds. Total coliform and *E. coli* were monitored at the study watersheds as they are regulated by the environmental laws. Concentration and EMC (Event Mean Concentration) of coliform of rainfall runoff at the urban watershed were the highest followed by those from agricultural and forestry watersheds. By monitoring coliform concentrations of overlying water and sediment at five monitoring points in the downstream of the Geum River, average concentration from spring to summer was higher than those values from fall to spring. Coliform concentrations in the pore water were higher compared to those of overlying water and closely related with flow rate of the river.

keywords : Coliform, Diffuse sources, Event Mean Concentration (EMC), Microbial contaminant, Sediment, Water quality

1. 서론

지표수는 미생물 오염에 의한 잠재적 위험성 때문에 세균, 바이러스, 원생동물, 기생충을 보유하는 인간 또는 동물의 배설물로부터 오염되지 않아야 한다. 수인성 감염증은 수질과 관련된 가장 보편적이며 광범위하게 퍼지는 건강상의 위협요소이다. 대다수의 수인성 질병은 인간이나 동물의 배설물을 음용한 결과로 나타난다. 질병에 걸린 사람이나 동물 혹은 증후가 없는 보균자의 배설물에 포함된 병원체는 물속으로 확산되어 그 물을 마시거나 그 물로 경작하거나 씻은 농작물을 섭취함으로써 체내로 들어간다. 입을 통해 감염되는 수인성 병원체는 크게 세균, 바이러스, 원충, 기생충으로 분류할 수 있다. 자연적으로 존재하는 기회성 감염균도 건강상의 위해를 미치는 미생물로 포함할 수 있는데, 이는 AIDS 환자와 같이 방어능력이 손상된 사람에게 질병을 유발시킨다(WHO, 1993).

병원균에 오염된 물은 인간 활동에 다양한 부분에서 악영향을 미치게 된다. 첫째, 미생물로 오염된 물에서 수영과 같은 레크리에이션 활동을 하게 될 때 피부 접촉 또는 물을 삼키게 될 경우 질병을 유발할 수 있으며, 둘째, 미생물로 오염된 수체는 어패류의 생육에 악영향을 끼치게 되고, 셋째, 미생물로 오염된 수체를 상수원으로 사용할 경우 염소

소독으로도 제거되지 않는 *Cryptosporidium*, *Giardia lamblia* 같은 미생물을 제거하기 위해서는 여과와 같은 고도처리를 하여야 하므로 수처리 비용을 증가시킬 수 있고, 네 번째는 미생물의 제거를 위하여 염소소독을 하게 될 경우 THM과 같은 부산물 생성에 의해 인간에게 악영향을 끼치게 된다.

병원균은 다양한 점원, 비점오염원을 통해 수체로 유입하게 된다. 대표적인 점오염원에는 하수처리장 방류수(Wastewater treatment plant), 합류식 하수관거 월류수(CSOs: Combined Sewer Overflows), 분류식 하수관거월류수(SSOs: Sanitary Sewer Overflows) 등이 있고, 비점오염원에는 불법적인 방류, 야생동물, 부패조, 가축시설, 매립지, 목초지 등을 들 수 있다. 그리고 농지에서 사용하는 비료와 하수오니 또한 큰 오염원이 된다. 이와 같은 오염원들은 강우에 의해 수체로 유입되게 된다. 분변성 병원균은 숙주를 떠나면 급속히 사멸을 하게 되지만 자연계내에서 사멸률이 작을 때가 많은 것으로 알려지고 있다. Crabill 등(1999)은 퇴적물 내 분변성 대장균 농도가 높을 때 수체의 대장균 농도가 높음을 보고하였다. 대장균의 제거를 위하여 염소소독이 가장 효율적이지만 침전(sedimentation)에 의하여 상당부분의 대장균을 제거할 수 있다(Gannon et al., 1983).

수체내의 병원성 미생물은 분리 및 검출이 매우 까다롭기 때문에 시료의 채취와 분석이 비교적 용이한 미생물을 모니터링하며 이러한 미생물을 병원균 지표미생물(Pathogen Indicator Microorganism)이라 한다. Fig. 1은 병원균 지표미

[†] To whom correspondence should be addressed.
kimgh@hannam.ac.kr

생물의 종류와 상호관계를 보이고 있다. 인간 또는 동물의 장관으로부터 배출되는 대장균과 이 대장균과 유사한 성질을 가지고 있으며 토양이나 물중에 널리 분포되어 있는 세균을 총칭하여 대장균군(coliform bacteria)이라 한다. *E. coli*는 온혈동물의 장관에 상주하는 세균으로써 그람음성이고 편모를 가지고 있는 간균이다. *E. coli*는 fecal coliform의 하위속이며 따라서 *E. coli*의 검출은 분변에 의한 미생물 오염이 발생하였음을 의미한다. 병원균 지표미생물의 다량 검출은 레크레이션 활동, 음용수로의 이용, 수생환경 등을 통해 인간의 건강에 유해한 영향을 미칠 수 있으므로 여러 나라에서 이 분야에 대한 연구와 다양한 수질 기준을 정하여 관리하고 있다. Table 1은 우리나라 및 다른 나라의 미생물과 관련된 수질기준을 요약한 것이다. 우리나라의 경우는 1990년도에 제정된 환경정책기본법상 상수원수 1급은 총대장균 50 MPN/100 mL 기준이다. 수영용수는 2급수 기준인 총대장균군 1000 MPN/100mL이 기준으로 되어 있으며 수산용수 1급인 경우에도 2급수인 1000 MPN/100 mL이 기준으로 되어 있다. United Nations Environmental Program(UNEP)와 World Health Organization (WHO)는 위락용수의 대장균 농도를 규제하고 있는데 5개 이상의 중복 시료의 분원성 대장균의 평균농도는 시료 수의 50% 누적확률이 100 CFU/100 mL 이하이고 90% 누적확률이 1000 CFU/100 mL 이하이어야 한다. 미 환경국 (U.S. EPA)은 5개 이상의 시료에 대하여 *E. coli*의 30일 평균농도가 126 CFU/100 mL 이하가 되도록 규정하고 있다. 이 기준은 위락용수로 사용할 경우 1000명중 8명 이하의 급성위장

질환(acute gastrointestinal illness) 발생회수를 기준으로 산정한 수치이다. 병원균 지표미생물은 미국의 TMDL에서도 규제인자 중의 하나이다(US EPA, 2001).

인체건강성 측면에서 수질을 평가할 때 미생물과 그 오염원을 평가하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 비점원에서 발생하는 병원균 지표미생물로서 현재 수질기준에 포함된 총 대장균군과 대장균 농도를 모니터링하고 하천의 수질에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 연구재료 및 방법

2.1. 금강유역 현황

금강 유역은 우리나라의 중앙부 서쪽에 위치하며 유역의 개략적인 경위도는 동경 126° 41' - 128° 25', 북위 35° 35' - 37° 05'이다. 유역 면적은 9,810 km²로 본류의 길이는 약 396 km에 달한다. Fig. 2(a)는 금강유역의 위치를 보이고 있다. 금강은 침식계곡을 따라서 발달하여 있으며 풍화 와 침식작용이 활발하여 낮은 경사의 저구릉지가 발달하였고 분지형 지형에서 나타날 수 있는 수지상 수계가 발달하여 있다. 금강의 상류는 대부분 변성암으로 구성되어 있으며 중류와 하류는 중생대 화강암류가 주로 분포되어 있다. 본류 중류부에는 토사의 유출이 많아 천천천 현상을 보이고 있다. 금강 유역의 61.2%가 임야로 지목분류상 가장 큰 면적을 차지하며, 시가지지역은 약 4.6%, 농경지 면적은 전체 유역면적의 27.4%에 해당된다(국가수자원관리 종합정보시스템, 2006)

2.2. 비점원 측정 소유역

강우유출수 농도 및 부하를 측정하기 위하여 임야, 농업, 도시 등 3종류 토지이용에 따른 3개의 소유역을 선택하였다.

도시유역(유역명: Urban)은 대전시 오정동에 위치하고 있으며 관거는 합류식이고 인구는 16,289인이다. 유역면적은 136.2 ha, 토지이용현황은 주거지역이 73.4%, 상가 5.5%, 비개발지역 6.8% 및 도로가 14.2%를 차지하고 있어서 대전시 토지이용을 비교적 잘 나타내고 있다. 주거지역의 유출계수를 0.65, 상가지역 0.7, 경사진 비개발지역 0.3, 그리고 도로의 유출계수를 0.8로 가정할 때(Novotny et al.,

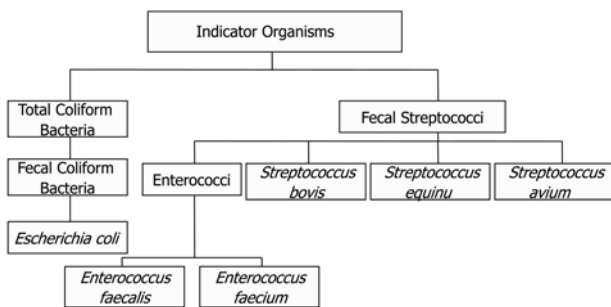


Fig. 1. Species and relationship among pathogen indicator organisms.

Table 1. Microbiological quality required by the water quality criteria of Korea and foreign countries (unit: /100 mL)

Country	Primary Contact Recreation			Protection of Indigenous Organisms		Shellfish Harvesting		References
	TC ^a	FC ^b	Other	TC	FC	TC	FC	
Korea	<1000 MPN	-	-	<50 MPN	-	<1000 MPN	-	환경정책기본법(1990)
WHO	-	50%<100, 90%<1000	-	-	-	-	80%<10, 100%<100	WHO(1977)
USEPA	-	<200 CFU	<i>E. coli</i> <126 CFU	<100 CFU	<20 CFU	<70 MPN	14 MPN	USEPA(1986)
EU	95%<10000	95%<2000	-	-	-	-	-	EEC (1976)
Japan	<1000 MPN	-	-	<1000 MPN	-	<70 MPN	-	JEA(1981)

^aTotal Coliform

^bFecal Coliform

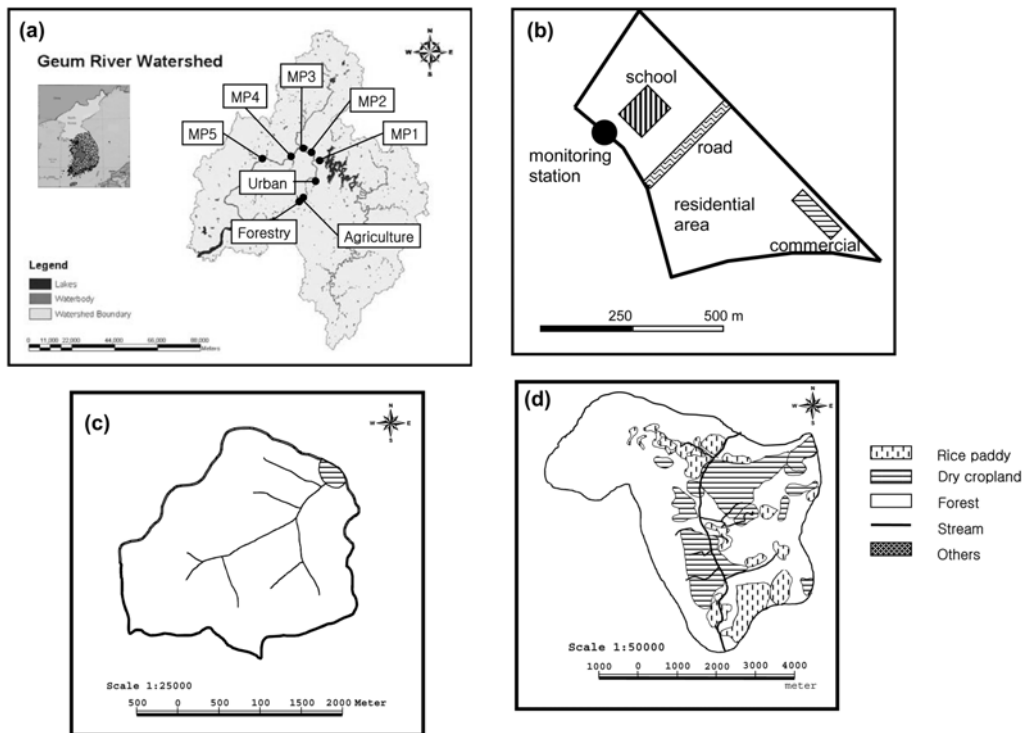


Fig. 2. Description of monitoring station: (a) The Geum River basin; (b) Urban Watershed; (c) Forestry Watershed; (d) Urban Watershed.

1993) 면적비에 의한 추정유출계수는 0.65이다. 대상유역의 지도 및 직접답사를 통하여 산출한 평균 경사도는 2%이었으며 관망도를 이용하여 산출한 관거 길이는 2,500 m였다. 이 유역의 CSO는 대전광역시 중심부를 관통하는 3대 하천의 하나인 대전천으로 방류된다(Fig. 2(b)).

대전시 유성구에 위치한 임야유역(유역명: Forestry)은 면적이 3.38 ha이고 하도길이가 2.875 km이며 평균 경사가 62.61%이다(Fig. 2(c)). 토지이용은 임야가 99.5%이며 도로가 0.1%, 기타 토지이용이 0.4%로 구성되어 있다. 대전시 유성구에 위치한 농지유역(유역명: Agriculture)은 면적이 27.37 ha이고 하도길이 6.173 km, 평균경사가 5.9%이다. 논이 35.9%이고 임야 44.8%, 도로 4.7%, 주거지 13.3%,

기타토지이용 1.3%로 구성되어 있다(Fig. 2(d)).

비점원에서 발생하는 병원균 지표미생물의 영향을 파악하기 위하여 금강하류 5개 지점의 모니터링 지점(현도, 매포, 부강, 금남, 공주)을 선택하였다. 이곳은 건교부 국가수질측정망과 환경부 수위관측소가 동시에 설치되어 있는 지점이다. 공주지역은 금남에서 14.9 km 하류에 위치한 지점으로 건교부에서 관할하는 T/M 수위관측기가 설치되어 있으며, 동 기관 관할 T/M 강우관측기가 설치되어 있다. 하구로부터 88.8 km 상류에 위치하고 있으며, 유역면적은 7,150 km²이다. 수면폭은 약 150 m이고 평균유속은 약 0.84 m/s이다(건설교통부, 1999). Table 2는 시험유역 및 모니터링 지점(Monitoring Points: MP)의 현황을 요약한 것이다.

Table 2. Description of study watersheds and monitoring points

Code	Name	Land use description	Drainage area (km ²)	Location and/or shape description
Forestry	Sutong	Forest 99.5%, Road 0.1%, Other 0.4% ^a	3.38 ^a	Length = 2.875 km, mean slope = 62.61%
Agriculture	Shinhung	Rice paddy 35.9%, Forest 44.8%, Road 4.7%, Residential 13.3%, Others 1.3% ^a	27.37 ^a	Length = 6.173 km, mean slope = 5.97%
Urban	Ojung	Urban runoff, Residential = 73.2%, Commercial = 5.5%, road = 1.4%, other = 6.8% ^a	1.362 ^a	Total sewage pipe length = 2500 m, average slope of the watershed = 2%
MP1	Hyundo	Population-196,824, Cattle; Cow-41,603, Pig-61,670 ^b	43.33 ^b	6.8 km downstream from Daechung Reservoir
MP2	Maepo	Same as MP1	58.78 ^b	6.8 km downstream from MP1
MP3	Bukang	Same as MP1	58.78 ^b	7.7 km downstream from MP2
MP4	Geumnam	Same as MP1	86.14 ^b	10.1 km downstream from MP3
MP5	Gongju	Same as MP1	98.70 ^b	14.9 km downstream from MP4

^adata were taken from GIS using Maps provided by National Geological Information System.

^bdata were taken from the database provided by Korean Water Company, Ltd.

2.3. 모니터링 프로그램

비점원에서 발생하는 대장균군과 대장균 농도를 측정하기 위하여 3개 시험유역에서 강우유출수 모니터링을 실시하였다. 임야지역 및 농업유역에서는 2002년 4월부터 9월까지 각 10회 강우유출수를 모니터링하였으며, 도시유역에서는 2003년 4월부터 9월까지 5회 강우유출수를 모니터링하였다. 비점원에 의한 지표수 수질영향을 평가하기 위하여 금강 하류유역의 5 지점에서 2002년 10월부터 2003년 4월까지 6개월간 일주일 단위로 수질을 24회 측정하였으며 2005년 6월부터 9월까지 4개월간 1개월 간격으로 수질 및 퇴적물을 4회 측정하였다.

2.4. 시료의 채취

강우유출수 시료채취는 자동 시료 채취기(Xian 1000 Portable Waste Water Samper, Hach Lange Ltd., Salford, UK)를 사용하였다. 매 강우사상마다 강우초기에는 15분 간격, 강우 후반에는 1시간 간격으로 시료채취빈도를 조정하였다. 시료는 시료의 성장, 유량, 유속, 등의 시간에 따른 변화를 고려하여 현장수의 성질을 대표할 수 있도록 채취하였으며, 수질 또는 유량의 변화가 심하다고 판단될 때에는 오염상태를 잘 알 수 있도록 인력채취를 하여 채취횟수를 늘렸다.

임야유역은 시료채취지점의 하상단면이 암반이어서 단면적이 일정하므로 측량으로 하상 단면을 측정하였고 간이수위계를 교각에 설치하였다. Probe형 유속계(Global Water® FP-101 of Plano Molding Company, USA.) 및 전파유속계를 이용하여 수위-유량 관계곡선을 작성하였다. 농지유역의 경우 강우유출수 측정 전마다 측량으로 하상단면을 측정하였으며 임야유역과 같은 방법으로 수위-유량곡선을 작성하였다. 도시유역은 차집관거에서 유입 직전에 설치되어 있는 장방형 조목스크린에서 수위-유량곡선을 작성하여 유량을 측정하였다.

수질시료는 1리터 용량의 플라스틱 용기에 담아서 4°C 냉장보관 하였으며 실험실로 즉시 이동하여 분석을 시작하였다. 수중미생물은 한 지점의 수역에서 수평적, 수직적으로 종류와 농도가 다르고 수질변화가 크므로 채취장소는 가능한 한 여러 곳을 선정하였다. 시료는 항상 흐르고 있는 20-30 cm 수심을 선택하였다.

퇴적물시료를 채취할 때 부시료(Subsample)를 채취하고 보관하였으며 분석하는 과정에서 퇴적물 시료의 성상이 바뀌지 않도록 주의하였다. 매번 3개 이상의 시료를 같은 장소에서 같은 양을 채취하여 채취시료의 대표성을 갖도록 하였다. 채취 시 용기는 현장의 채취시료로 3회 이상 세척한 이후에 가능한 시료가 공기에 접촉하지 않도록 용기 담았으며 용기 안에는 공기가 전혀 남지 않도록 채취하였다.

2.5. 시료의 분석

현장에서 DO, ORP, pH를 측정하였다. 대장균군의 농도는 Standard Methods(APHA et al., 1998)의 Heterotrophic plate count- Spread plate method, #9215(평판집락시험방법)

를 이용하여 분석하였다. Heterotrophic plate count method의 단위는 CFU/100mL이며 MPN/100 mL의 단위로 표시되는 multiple-tube fermentation technique(최적확수시험법)과 비교하여 높은 값을 나타낸다. Heterotrophic plate count method는 쉽고 간편하게 미생물의 계수할 수 있는 장점이 있다(Lisle, 1993).

현장에서 측정하는 DO, ORP, pH의 경우 매 측정마다 보정을 시행하여 정확도를 유지하였다. 채취된 시료는 즉시 실험하는 것을 원칙으로 하였으며, 그렇지 못한 경우에는 수질오염공정시험방법의 시료 보존방법에 따라 보존하고 8시간 내에 실험하였다. 시료 채취자와 각 항목에 대한 분석자는 채취 및 분석의 일관성을 유지하기 위하여 연구 시작부터 최종 분석까지 동일 분석자가 분석하도록 하였다. 분석된 3개의 결과 중 중간 수치의 결과로부터 10% 이상의 오차범위가 나타나는 시료가 발생할 경우 반복시험을 실시하여 정밀도를 관리하였다.

3. 결과 및 고찰

Table 3은 본 조사연구에서 측정한 강우사상의 요약이다. Forestry와 Agriculture는 인접한 지역이고, 따라서 같은 강우량계 자료를 사용하였다. 모니터링을 실시한 강우량의 합은 658.7 mm이므로 이 지역 연평균 강우량 1353.8 mm의 50% 정도이며, 10 mm 이하 강우사상 1회, 10-30 mm 강우사상 2회, 30-50 mm 강우사상 4회, 50-100 mm 강우사상 1회, 100 mm 이상 강우사상 2회 등, 소규모 강우사상 및 호우사상을 고루 모니터링 하였다. Forestry 유역의 평균 유출계수(유출량/강우량)는 0.26이었으며 Agriculture 유역의 평균유출계수는 0.25였다. 도시지역의 모니터링은 2004년 4월부터 6월까지 실시하였으며 5회의 강우사상중 1회차의 강우는 1.5 mm밖에 되지 않았으므로 강우유출수의 발생이 미미하였으므로 2-5회까지 4회에 걸친 강우유출수 자료를 사용하였다.

Table 4는 시험유역에서 측정한 강우유출수 농도의 기술 통계(descriptive statistics)이다. 자료의 분석을 위한 통계처리는 SPSS ver. 12.0 K를 이용하였다. 도시유역에서 강우유출수의 평균 대장균군 농도는 3.4×10^6 CFU/100 mL으로 농지유역, 임야유역보다 훨씬 높은 값을 보였다. 이 수치는 Doran 등(1981)이 측정한 강우유출수의 값인 5.8×10^6 - 5.8×10^6 CFU/100 mL의 범위에 든다. 건기시 도시유역에서 채취한 하수의 대장균군 평균농도는 $2.45.8 \times 10^6$ CFU/100 mL이었는데 이는 문헌(Metcalf et al., 1991)상의 값인 10^7 - 10^{11} CFU/100 mL 보다 약간 낮은 값이지만 우리나라 합류식 하수관거의 저농도를 고려한다면 인정되는 수치이다. 도시유역에서 강우유출수의 대장균군 농도가 건기시 하수농도보다 높은 값을 보이므로 합류식하수관거월류수가 하천의 미생물 오염의 주요한 원인이 됨을 짐작할 수 있다. 농업유역에서 발생하는 강우유출수의 평균 대장균군 농도는 3.0×10^4 CFU/100 mL로써 문헌(Doran et al., 1981)상의 값인 3.2×10^3 - 14.5×10^5 CFU/100 mL의 범위 내에 있다. 농

Table 3. Description of rainfall events monitored in this study

Event #	Forestry ^a			Agriculture			Urban		
	RAIN ^b	T ^c	DRYDAY ^d	RAIN	T	DRYDAY	RAIN	T	DRYDAY
1	18.5	67.5	5	18.5	67.5	5	1.5	1.5	7
2	66.5	60.7	12	66.5	60.7	12	15	10.0	13
3	14.4	26.5	3	14.4	26.5	3	13	7.6	14
4	43.5	36.0	2	43.5	36.0	2	8.5	10.5	15
5	44.5	47.6	1	44.5	47.6	1	34	15.5	6
6	259.8	123.8	11	259.8	123.8	11	-	-	-
7	35.0	41.3	1	35.0	41.3	1	-	-	-
8	4.5	22.3	4	4.5	22.3	4	-	-	-
9	37.0	30.0	3	37.0	30.0	3	-	-	-
10	135.0	60.0	2	135.0	60.0	2	-	-	-

^awatershed

^bprecipitation depth (mm)

^crainfall duration time (hr)

^ddry days since last rainfall event (day)

Table 4. Descriptive statistics of concentration range of coliforms at study watersheds

		Watershed	n ^a	Average ^b	SD ^c	SE ^d	Min.	Max.
Wet weather	Total coliform	Forestry	147	4.2×10 ³	6.2×10 ³	5.1×10 ²	nd ^e	3.2×10 ⁴
		Agriculture	143	3.0×10 ⁴	2.5×10 ⁴	2.1×10 ³	4.0×10 ²	1.5×10 ⁵
		Urban	55	3.4×10 ⁶	3.8×10 ⁶	5.1×10 ⁵	8.0×10 ⁴	1.5×10 ⁷
	<i>E. coli</i>	Forestry	147	1.6×10 ²	3.9×10 ²	3.2×10 ¹	nd	3.2×10 ³
		Agriculture	143	1.1×10 ⁴	1.3×10 ⁴	1.1×10 ³	nd	7.1×10 ⁴
		Urban	55	3.9×10 ⁵	3.3×10 ⁵	4.5×10 ⁴	4.0×10 ³⁴	1.2×10 ⁶
Dry weather	Total coliform	Forestry	24	8.5×10 ²	1.2×10 ³	2.6×10 ²	nd	4.8×10 ³
		Agriculture	24	1.1×10 ⁴	1.5×10 ⁴	3.1×10 ³	3.0×10 ²	8.0×10 ⁴
		Urban	12	2.4×10 ⁶	5.9×10 ⁵	1.7×10 ⁵	1.5×10 ⁵	3.3×10 ⁶
	<i>E. coli</i>	Forestry	24	2.2×10 ¹	5.2×10 ¹	1.1×10 ¹	nd	2.0×10 ²
		Agriculture	24	1.7×10 ³	1.8×10 ³	3.6×10 ²	nd	6.7×10 ³
		Urban	12	7.4×10 ⁵	2.2×10 ⁵	6.4×10 ⁴	4.6×10 ⁵	1.2×10 ⁶

^anumber of samples taken at the designated watershed.

^baverage of the designated watershed.

^cstandard deviation.

^dstandard error.

^enot detected.

업유역에서 비강우시 측정된 대장균군 평균농도 또한 1.1×10⁴ CFU/100 mL로써 상당히 높은 값을 보이고 있다. 임야유역 강우유출수에서 발생하는 대장균군 농도에 대한 문헌값은 찾을 수 없으나 본 조사연구에서는 4.2×10³ CFU/100 mL로 상당히 높음을 알 수 있다. 우리나라 임야면적이 65%임을 생각해 보면 임야에서 발생하는 대장균군이 하천수 수질에 미치는 영향이 상당할 것이다. Table 4에서 표준편차가 매우 큰 것을 알 수 있는데, 강우사상과 계절적 요인, 유역환경의 차이 등의 많은 인자가 미생물 농도에 영향을 미친다. 따라서 보다 정확한 미생물 배출양상의 파악을 위하여 더 많은 모니터링이 필요하다.

Fig. 3은 이 조사연구에서 모니터링한 임야, 농지, 도시 지역의 병원균 지표미생물의 유출 경향을 보이고 있다. Fig. 3(a)는 토지이용이 임야가 대부분인 Forestry 유역의 10회차 강우사상 강우유출수의 모니터링 결과를 보이고 있다. 유량과 부유물질 농도변화는 비슷한 형태를 보이고 있으나 침투유량 이전에 부유물질의 침투농도가 발생하고

있으며 시간이 경과할수록 감소하는 추세를 보이고 있다. 대장균군 농도의 변화는 부유물질 침투농도 이전에 증가하고 있다. 대장균의 농도는 대장균군의 농도 변화에 비하여 작은 값을 보이고 있으나, 신뢰성 있는 값을 보이지 않으므로 일부 나타내지 않았다. Fig. 3(b)는 농지유역의 9회차 강우사상의 강우유출수 모니터링 결과를 보이고 있다. 침투유량과 부유물질 침투농도가 같은 양상을 보이고 있다. 대장균군 농도는 침투유량의 증가시에 증가하는 양상을 보인다. 그림에서 대장균군과 대장균간의 비율이 비교적 일정한 것을 볼 수 있는데, 이는 이 논문에서 보이지 않았지만 청천시 그 비율이 불규칙한 것과 비교하여 보면 상당히 흥미롭다. 이는 유출되는 유속이 빨라서 사멸률이 비교적 일정하게 영향을 미치는 것으로 생각된다. 또한 부유물질과 결합한 상태로 배출되는 것 또한 영향을 미친다 (Kim et al., 2005). Fig. 3(c)는 도시유역인 Urban의 2회차 강우사상 강우유출수 모니터링 결과를 보이고 있다. 특히 하계도 대장균군 농도는 강우유출 초기부터 발생하여 감

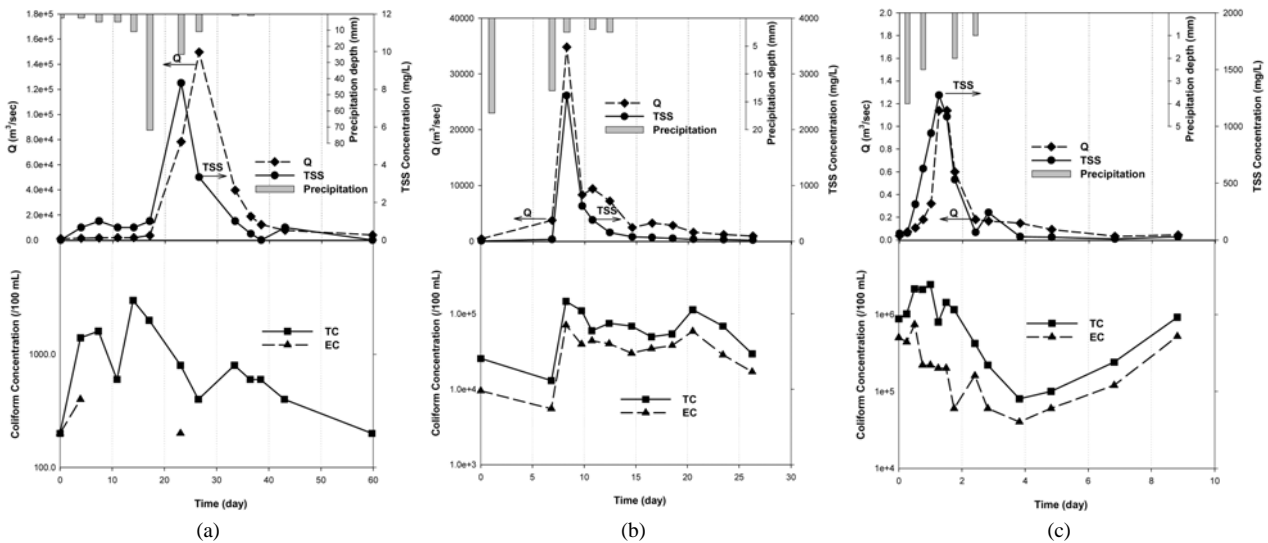


Fig. 3. Precipitation depth, hydrograph, total suspended solid concentration change (top), concentration change of total coliform and E. coli (bottom): (a) Tenth rainfall event at Forestry watershed; (b) Ninth rainfall event of Agriculture watershed; (c) Second rainfall event of Urban watershed.

소하는 추세를 보이고 있으며 강우 후기에는 다시 증가하는 양상을 보이고 있는데 이는 하수의 희석효과 때문이다. 강우유출수에 존재하는 coliform이 부유물질과 흡착된 상태로 유출됨을 여러 논문에서 보고된 바 있다(Schillinger et al., 1985). 이는 coliform의 사멸률이 낮은 이유가 될 것이다.

강우유출수의 수질이 지표수의 수질에 영향을 미치지만 농도의 변화보다는 총 부하량이 중요한 수질영향 및 결정 변수이다. 이는 수질 농도의 변화보다는 오염물질이 수체에 유입되면 확산 및 혼합 등의 과정을 거쳐 수체에 영향을 미치기 때문이다. 이와 같은 이유로 강우사상에 대한 평균농도 또는 유량가중 평균농도(Event Mean Concentration: EMC)는 강우 유출수와 함께 유출되는 오염물질을 평가하는데 가장 적절한 인자로 인식되고 있으며, 가장 널리 이용되고 있다(Novotny et al., 1993).

강우 사상에 따라서 관측된 유량자료와 이에 해당하는 수질 자료를 이용한 EMC 농도는 아래 식 (1)에 의해서 계산할 수 있다.

$$EMC_i = \frac{\sum Q_i C_i}{\sum Q_i} \quad (1)$$

Q_i 는 관측시간 t에서의 유출량(m³/hr), C_i 는 오염물질 농도(mg/L), EMC는 강우사상에 대한 평균농도(mg/L)이다. 본 연구와 같이 강우사상당 산정 되는 EMC 농도는 1) 직관적으로 요약 할 수 있으며, 2) 서로 다른 유역과 강우 사상에 대해 상호 비교평가가 가능하며, 3) 어떤 강우 사상으로부터 발생하는 총 강우 유출수내 오염물질 농도를 발생빈도 개념을 도입해서 해석할 수 있으며, 4) 해석상 오류를 범할 수 있는 자료를 활용자의 취사선택을 위해 보다 더 유용한 형태로 보고 할 수 있다는 장점이 있다.

Table 5는 소유역에서 측정된 EMC의 기술통계치를 보이고 있다. 원단위(AAUL:average annual unit load)는 다음과 같이 계산할 수 있다:

$$AAUL = Q \times EMC = C \times P \times EMC \quad (2)$$

AAUL = 년평균원단위(CFU/ha/yr), Q = 유출유량, EMC =

Table 5. Descriptive statistics of EMCs for study watersheds

		(unit: CFU/100 mL)					
	Watershed	n ^a	Average ^b	SD ^d	SE ^c	Minimum	Maximum
Total Coliform	Forestry	10	3,930	3,270	1030	608	10,480
	Agriculture	10	36,900	26,600	8,430	16,664	104,050
	Urban	4	3,914,000	2,504,000	1,252,000	1,141,900	7,104,300
E. coli	Forestry	10	175	224	71	0	726
	Agriculture	10	14,000	14,700	4,640	1,580	51,800
	Urban	4	405,000	245,900	122,940	187,600	752,800

^anumber of samples taken at the designated watershed.

^baverage of the designated watershed.

^caverage of all four study watershed.

^dstandard deviation.

^estandard error.

^fnot detected.

EMC 평균값(CFU/100 mL), C = 유출계수(무차원), P = 연간평균강수량(mm)이다. 원단위 산정결과 임야유역은 1.38×10^7 CFU/ha/yr, 농촌유역은 1.25×10^8 CFU/ha/yr, 도시유역은 도시유역은 3.44×10^{10} CFU/ha/yr이었다.

각 시험유역의 EMC 자료를 취합한 후 이를 크기 순서로 작은 것부터 나열해 비초과확률을 아래와 같은 도시공식(plotting position formula)에 의해 계산한다.

$$F_Q(EMC) = i / N \quad (3)$$

여기서 $F_Q(EMC)$ 는 크기순서로 작은 것부터 나열했을 때 그 순서가 i 번째인 EMC 자료 $EMC(i)$ 의 비초과확률을 의미하며 N 은 자료수이다. EMC 별로 비초과확률을 계산한 후 다음 식을 이용해 초과확률을 계산할 수 있으며 이를 이용해 x 축(확률스케일)을 초과확률로 y 축(로그 스케일)을 EMC로 하여 도시한다.

$$EP_Q(EMC) = 1 - F_Q(EMC) \quad (4)$$

$EP_Q(q)$ 는 EMC 자료 q 에 해당하는 초과확률이다. Fig. 4는 임야, 농촌, 소유역에서 측정된 값을 나타내고 있다. Fig. 4를 이용하면 누적확률에 따른 EMC를 초과 누적확률에 따라 간편하게 찾을 수 있다. 대장균군과 대장균의 EMC는 도시유역이 가장 높으며, 농촌, 임야의 순으로 나타났다.

Table 6은 2002년 10월부터 2003년 4월까지 1주일에 1회씩 24회에 걸쳐 금강의 5개 지점에서 측정된 대장균군 및 대장균의 기술통계값과 2005년 5월부터 9월까지 1개월에 1회씩 상등수와 퇴적물의 대장균군과 대장균 농도의 기술통계값이다. 대장균군의 평균을 보면 MP1지점의 농도가 가장 낮으며, R2를 지나 R3지점까지 농도가 증가하지만 MP4지점의 농도부터는 감소하는 경향을 보인다. 상등수보다 퇴적물이 coliform의 농도가 높음은 여러 문헌에서 보이고 있다(An et al., 2002; Crabill et al., 1999).

Fig. 5는 2002년 10월부터 2003년 4월까지 금강의 공주 지점 및 2005년 6월부터 2005년 9월까지 같은 지점의 상등수 및 퇴적물의 총대장균 농도값을 도시한 것이다. 2002

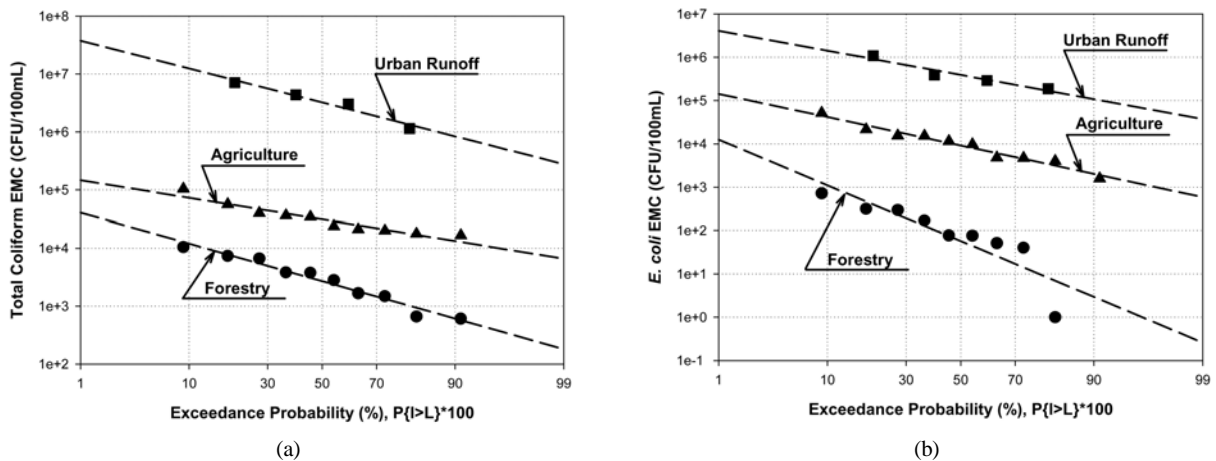


Fig. 4. Cumulative probability distribution of Event Mean Concentrations for study watershed. (a) Total Coliform, (b) *E. coli*.

Table 6. Concentration range of coliform bacteria at monitoring points (unit: CFU/100 mL)

	Site	Total coliform			<i>E. coli</i>			
		Ave.	Max	Min	Ave.	Max	Min	
Fall, 2002 -Spring, 2003	Overlying Water	MP1	1,720	14,400	nd	17	200	nd
		MP2	5,640	15,000	1,700	4,600	2,300	nd
		MP3	8,510	17,700	3,500	700	2,100	nd
		MP4	6,980	16,000	1,900	620	5,800	nd
		MP5	5,020	1,640	2,000	330	5,200	nd
Spring, 2005 -Fall, 2005	Overlying Water	MP1	12,100	25,000	3,000	2,500	4,000	nd
		MP2	4,880	7,000	3,000	1,500	3,000	nd
		MP3	11,400	29,000	3,000	2,750	5,000	nd
		MP4	10,200	14,000	8,800	3,000	3,000	3,000
		MP5	9,200	16,000	3,000	3,500	8,000	nd
	Sediment	MP1	165,000	380,000	8,200	9,600	18,000	3,000
		MP2	187,000	650,000	3,000	75,900	290,000	nd
		MP3	42,500	110,000	4,000	3,400	3,800	3,000
		MP4	26,500	35,000	20,000	3,200	3,800	3,000
		MP5	29,300	53,000	11,000	2,800	5,000	nd

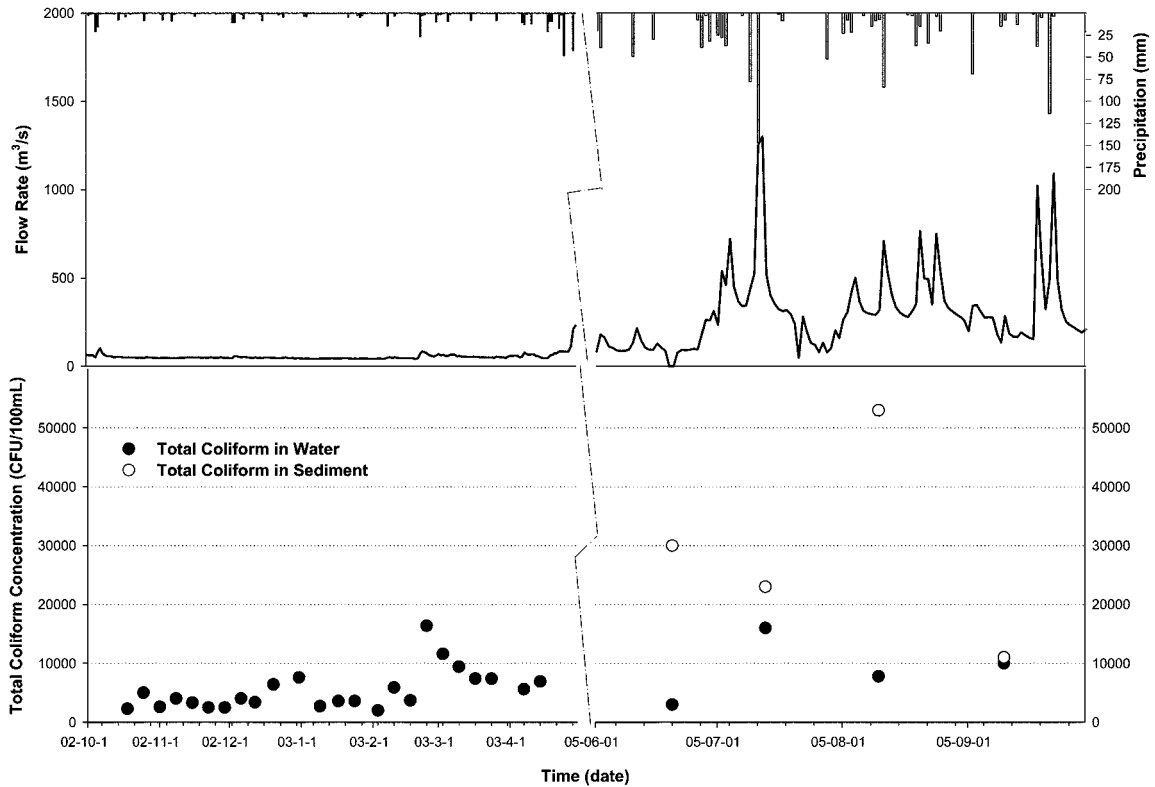


Fig. 5. Total coliform concentration change in water and sediment at Gongju (MP5).

년 10월부터 2003년 4월까지 1주일 간격으로 농도를 측정
한 결과 10월부터 2월까지의 농도는 1000-5000 CFU/100
mL 범위에 있으나 봄에 비가 온 이후에는 농도가 증가하
여 비점원의 역할이 큰 것을 나타내고 있다. 공주지점의
유속과 지표미생물 농도의 상관도 분석을 실시하면 99%
신뢰수준으로 0.7 이상의 값을 나타낸다. 지표미생물의 농
도와 강우시 발생하는 부유물질은 결합하여 배출하며 유속
이 작을 때 하상에 퇴적하였다가 유속이 클 경우 부상하여
배출된다(Kim et al., 2005).

4. 요약 및 결론

비점원에서 발생하는 미생물학적 오염을 추정하기 위하
여 임야, 농지, 도시 등 3종류의 소유역을 선정하여 강우유
출수 모니터링을 실시하였다. 측정항목은 대장균군(total
coliform)및 대장균(E. coli)를 대상으로 하였다.

강우유출수의 농도 및 EMC(Event Mean Concentration)
은 도시유역이 가장 높았으며 농지, 임야의 순서로 나타났
다. 도시지역의 강우유출수의 대장균군 농도는 생하수보다
높아서 하천수 오염의 주요한 발생원이다. 금강 하류의 5
개 지점에서 수질 및 퇴적물의 대장균 농도를 측정할 결과
가을부터 다음해 봄까지의 평균 대장균 농도보다 봄부터
가을까지의 평균농도가 높았다. 하상 퇴적물의 대장균 농도
는 수체의 농도보다 높았으며 하천의 유속과 밀접한 관계
를 보였다.

참고문헌

건설교통부 한강홍수통제소, *한국수문조사연보(유량편)* (1999).
국가수자원관리종합정보시스템, <http://www.wamis.go.kr> (accessed
Feb 2006).
환경부, *환경정책기본법* (1990).
An, Y., Kampbell, D. H. and Breidenbach, G. P., *Escherichia
Coli and Total Coliforms in Water and Sediments at Lake
Marinas, Environmental Pollution*, **120**, pp. 771-778 (2002).
APHA, AWWA, WEF, *Standard Methods for the Examination
of Water and Wastewater, 20th ed.* (1998).
Crabill, C. D., Raven, J., Snelling, R., Foust, R. and Southam,
G., *The Impact of Sediment Fecal Coliform Reservoirs of
Seasonal Water Quality in Oak Creek, Arizona, Water
Resources*, **33**(9), pp. 2163-2171 (1999).
Doran, J. W., Schepers, J. S. and Swanson, N. P., *Chemical
and Bacteriological Quality of Pasture Runoff, Journal of
Soil and Water Conservation*, May-June, pp. 166-171 (1981).
European Economic Community (EEC), Council directive of 8
December 1975 concerning the quality of bathing water,
Official Journal of the European Communities, **19**, p. 31
(1976).
Gannon, J. J., Busse, M. K. and Schillinger, J. E., *Fecal
Coliform Disappearance in a River Impoundment, Water
Research*, **17**, pp. 1595-1601 (1983).
Japan Environmental Agency, *Environmental laws and regula-
tions in Japan (III) water, Journal of American Water
Works Association*, **88**, pp. 66-79 (1981).
Kim, G. and Lee, S., *Particle Associated Discharge of
Pathogen Indicator Organisms from Diffuse Sources in*

- Agricultural-Forestry Watersheds, *Proceeding of Particle Separation 2005*, IWA Specialized Conference, Seoul, pp 711-718 (2005).
- Lisle, J., *An Operator's Guide to Bacteriological Testing*, American Water Works Association, Denver (1993).
- McFeters, G. A. (ed.), *Drinking Water Microbiology: Progress and Recent Developments*, Brock-Spinger Series in Contemporary Bioscience, New York. p. 231 (1990).
- Metcalf and Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse*. 3rd ed. McGraw-Hill, New York, pp. 471-472 (1991).
- Novotny, V. and Olem, H., *Water Quality: Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution*, Van Nostrand Reinhold, New York, p. 484 (1993).
- Schillinger, J. E. and Gannon, J. J., Bacterial Adsorption and Suspended Particles in Urban Stormwater, *Journal Water Pollution Control Federation*, 57(5), pp. 384-389 (1985).
- U.S. EPA, *Ambient Water Quality Criteria for Bacteria-1986*, EPA-A440/5-84-002. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. (1986).
- U.S. EPA, *Protocol for Developing Pathogen TMDLs*, EPA 841-R-00-002, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. (2001).
- WHO, *Health Criteria and Epidemiological Studies Related to Coastal Water Pollution*, World Health Organization, Athens, pp. 1-4 (1977).
- WHO, *Guidelines for Drinking-Water Quality: Recommendations*, 2nd ed., World Health Organizations, pp. 21-40 (1993).