大 韓 土 木 學 會 論 文 集
第28卷 第1B號・2008年 1月
pp. 153 ~ 160

농지-임야에서 발생하는 지표미생물 유출 특성

Discharge Characteristics of Indicator Microorganisms from Agricultural-Forestry Watersheds

김건하*
Kim, Geonha

Abstract

To estimate microbial contaminant loading discharged from diffuse sources, rainfall runoff of six rainfall events were monitored at three study watersheds of forestry and agricultural land use. Monitored indicator microorganism constituents were total coliform (TC), fecal coliform (FC), Escherichia coli (EC), and fecal streptococcus (FS). Soil loss during elevated flow rate caused higher suspended solid concentrations. Indicator microorganism concentrations were closely related with flow rate. TC event mean concentration (EMC) from unpolluted forestry was 5.3×10^3 CFU/100 ml, FC EMC was 1.4×10^3 CFU/100 ml, EC EMC was 1.1×10^3 CFU/100 ml CFU/100 ml, and FS EMC was 2.9×10^2 CFU/100 ml. From a watershed with agricultural-forestry land use, TC EMC was 1.7×10^5 CFU/100 ml, FC EMC was 8.5×10^4 CFU/100 ml, EC EMC was 8.9×10^4 CFU/100 ml, and FS EMC was 3.4×10^4 CFU/100 ml. Mixed land use of agricultural-forestry with bigger area, TC EMC was 1.9×10^5 CFU/100 ml, FC EMC was 9.6×10^4 CFU/100 ml, EC EMC was 7.0×10^4 CFU/100 ml, and FS EMC was 5.1×10^4 CFU/100 ml.

Keywords : *microbial contaminant, diffuse sources, coliform, event mean concentration, water quality, sediment*

요 지

농지-임야유역의 비점원으로부터 발생하는 미생물학적 오염물질 부하량을 추정하기 위하여, 농지와 임야가 혼합된 3개 시험유역에서 동일한 2개 강우사상에 대한 지표미생물 유출 특성을 조사하였으며, 지표미생물항목은 대장균군(total coliform: TC), 분원성 대장균(Fecal coliform: FC), 대장균 (Escherichia coli: EC), 분원성 연쇄상구균(Fecal streptococcus: FS)이었다. 농지-임야 유역의 강우시 유량변화에 따라 토사유실로 인하여 부유물질 농도가 상당히 증가하였다. 지표미생물 농도는 유량변화와 상당히 밀접한 관계를 보였다. 대부분 오염되지 않은 임야로 구성되어 있는 첫번째 유역의 강우유출수 TC EMC(Event Mean Concentration)는 5.3×10^3 CFU/100 ml이었으며, FC EMC는1.4×10^3 CFU/100 ml, EC EMC는 1.1×10^3 CFU/100 ml, FS EMC는 3.9×10^2 CFU/100 ml이었다. 임야유역과 농지유역이 혼합되어 있는 제 2 유역의 지표미생물에 대한 EMC는 TC EMC가 1.7×10^5 CFU/100 ml, FC EMC가 8.5×10^4 CFU/100 ml, EC EMC가 8.9×10^4 CFU/100 ml, FS EMC가 3.4×10^4 CFU/100 ml로 나타났다. 농지와 임야가 혼재되어 있으나, 유역면적이 큰 제 3 시험유역의 지표미생물에 대한 EMC는 TC EMC가 1.9×10^5 CFU/100 ml, FC EMC가 9.6×10^4 CFU/100 ml, EC EMC가 7.0×10^4 CFU/100 ml, FS EMC가 5.1×10^4 CFU/100 ml로 나타났다

핵심용어 : 미생물학적 오염, 비점원, 대장균, 유량가중농도, 수질, 퇴적물

1. 서 론

지표수는 미생물 오염이 가지고 있는 잠재적 위험성 때문에 여러 세균(bacteria), 바이러스(viruses), 원생동물(protozoans), 기생충(parasites)을 가지고 있는 인간 또는 동물의 배설물로부터 오염되지 않아야 한다. 이러한 병원성 미생물은 다양한 점원, 비점오염원을 통해 수체로 유입하게 된다. 대표적인 점오염원에는 하수처리장 방류수(Wastewater treatment plant), 합류식 하수관거 월류수(CSOs: Combined Sewer Overflow), 분류식 하수관거월류수(SSOs: Sanitary Sewer Overflow)등이 있고, 비점오염원에는 불법방류, 야생동물, 부패조, 가축시설, 매립지, 목초지 등을 들 수 있다(Doran *et al.*, 1981; Murray *et al.*, 2001).

수체내 병원성 미생물은 분리와 검출이 매우 까다롭기 때문에 시료의 채취와 분석이 비교적 용이한 미생물을 모니터링하며, 이러한 미생물을 병원균 지표미생물(Pathogen Indicator Microorganism)이라 한다. 대표적인 지표미생물로서 대장균군, 분원성대장균군, 대장균, 분원성 연쇄상구균 등이 있다(Baudisova, 1997). 대장균군(total coliform: TC)은 인간 또는 동물로부터 배출되는 대장균과 유사한 성질을 가

*정회원・한남대학교 공과대학 토목환경공학과 교수 (E-mail : kimgh@hnu.kr)

지고 있으며 지표수나 지하수 중에 널리 분포되어 있는 세균을 총칭한다. 일반적으로 대장균군은 병원균보다도 외부 스트레스에 강한 세균으로, 방류수의 소독할 때나 정화기능의 효율 판정에 사용한다. 대장균(*Escherichia coli*: EC)은 온혈동물의 장내에 상주하는 세균으로서, 보통 장내에서는 병원성을 갖지 않지만, 요도나 담도에 들어가서 방광염, 신우염, 담낭염을 일으키는 경우가 있으며 또 소아에게는 급성 장염을 일으킨다. 분원성 연쇄상구균(Fecal streptococcus: FS)은 동물배설물이 오염된 것을 확인하는데 오염의 지표가 된다. 분원성 연쇄상구균은 대장균군보다 수중에서 생존기간이 짧은 것으로 알려져 있다(U.S. Environmental Protection Agency, 2001; Baudisova, 1997).

지표미생물 종의 비율을 사용하여 점원, 또는 비점원 발생원을 추적할 수 있음은 여러 연구에서 제시된 바 있다. 예를 들어 FC은 인간의 분변에 다량 존재하며 FS는 동물의 분변에 다량 존재한다고 하며 따라서 FC/TC의 비는 온혈동물에서 발생하는 지표미생물 비율을 나타낼 수 있다. 이 비율은 청천시에는 0.09이나 강우시에는 0.48-0.95로 증가하는데, 이는 유역내 동물, 분뇨 등이 강우유출수 지표미생물 농도 증가의 주요 원인이다. 또한 FC/FS의 비율은 지표미생물 발생원을 추적하는 용도로 사용될 수 있음이 제시된 바 있는데 FC/FS의 비가 4 이상인 경우에는 인간으로부터 발생한 것이며 0.7 이하인 경우는 동물로부터 발생한 것이라고 한다(Thomann and Mueller, 1987; Jagals *et al.*, 1995; Feachem, 1975; Murray *et al.*, 2001).

우리나라는 산지와 농지가 80%로 구성되어 있으며, 임야에서 발생한 강우유출수는 농지를 거쳐 도시지역으로 유입하므로, 임야와 농지에서 유출되는 강우유출수는 도시지역의 수질을 관리하기 위한 중요한 정보가 된다. 지표미생물은 지표수의 수질을 결정하는 중요한 기준이지만, 그 농지 및 임야에서 발생하는 강우유출수 수질 모니터링 자료가 많지 않다. 따라서 본 연구의 목적은 지표수 수질에 많은 영향을 미치는 농지 및 임야에서 발생하는 강우유출수 지표미생물 농도 및 유출부하를 모니터링하여 지표수 수질관리에 필요한 자료를 공급하는 것이다.

2. 연구재료 및 방법

2.1 비점원 측정 소유역

농지와 임야 유역 강우유출수의 지표미생물 농도 및 부하량 측정을 위하여 농지-임야 혼합유역 3곳을 시범유역으로 설정하였다. Fig. 1(A)는 시범유역의 상대적인 위치와 강우유출수의 유출방향을 개략적으로 보이고 있다. 유역은 대전의 서남부, 호남고속도로 유성 톨게이트에서 가까우며 갑천의 지류인 성전천, 화산천, 진잠천을 형성하는 유역으로 구성되어 있다. Fig. 1(A)에 보이는 유역의 면적은 27.37 km^2이며, 임야에서 발생한 강우유출수가 농지를 거쳐 북동쪽으로 유출되는 양상을 보이고 있다. 시료채취지점 1은 화산천 상류에 있으며, 시료채취지점 2는 성전천 하류에 있고, 시료채취지점 3은 진잠천의 성전천 합류 전에 위치하고 있다.

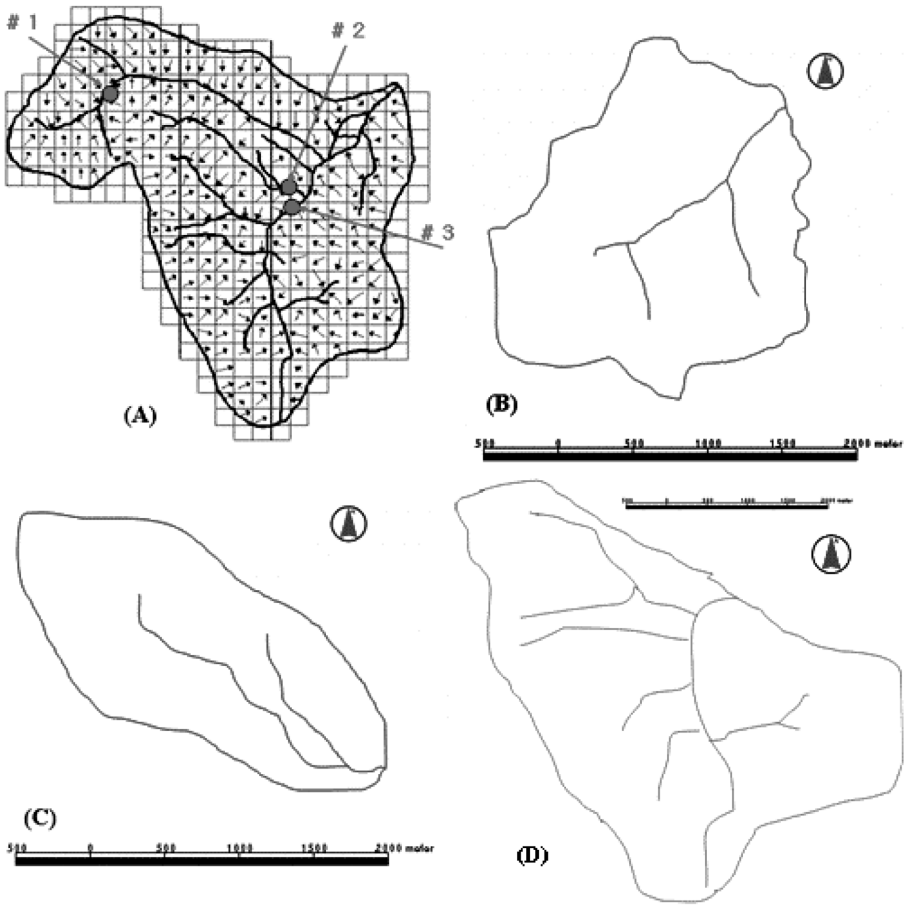


Fig. 1 Schematic Representation of Study Watersheds: (A) Location of Watersheds; (B) Study Watershed 1(Sutong); (C) Study Watershed 2(Sungjeon); (D) Study Watershed 3(Jinjam)

Table 1. Schematic description of the study watersheds

Watershed	Name	Area *A* (ha)	Land use (%)
1	Sutong	23.3	forest 99, road 1
2	Sungjeon	14.0	rice paddy 8.2, forest 91.8
3	Jinjam	69.3	rice paddy 33.0, residential 4, forest 63

Fig. 1(B)는 제1 시험유역(유역명: Sutong)을 보이고 있다. 25000:1 축적 지도를 이용하여 구한 유역면적이 23.27 ha이고 하도길이가 2.875 km이며 평균 경사가 62.61%이다. 토지이용은 임야가 99%이며 도로가 1% 정도를 차지하고 있으나, 도로가 강우유출수 수질에 미치는 영향은 미미할 것으로 판단된다. Fig. 1(C)는 제 2 시험유역(유역명: Sungjeon)을 보이고 있다. 유역면적이 14 ha이고 임야 91.8% 및 농지 8.2%로 구성되어 있다. 시료채취지점은 성전천 하류에 위치하며 진잠천과 합류된다. Fig. 1(D)는 제 3 시험유역(유역명: Jinjam)을 보이고 있다. 유역면적이 69.3 ha이고 임야가 63%, 농지 33% 및 주택지 4%로 구성되어 있다. Table 1은 시험유역 및 모니터링 지점의 현황을 요약한 것이다.

농지-임야 유역에서 발생할 수 있는 오염원으로 발생하는 축산발생 오염원으로, 돼지, 소, 비둘기, 닭의 분뇨를 측정하였다. 채취한 분뇨 1 g을 1 L의 증류수로 100배 희석한 후 여러 차례 사전실험을 통하여 결정한 최적 희석배수로 추가 희석하여 지표미생물 농도를 측정하였다. 또한 분뇨의 함수율과 고형물 농도, 화학적 산소요구량 농도를 측정하였다. 축산으로부터 고형물 발생량은 문헌자료(Oshiro and Fujioka, 1995; Choi, 1991)를 참고하였다.

2.2 모니터링 프로그램

수질 모니터링 항목은 SS(Suspended Solid), COD (Chemical Oxygen Demand), TC, FC, EC, FS로 하였다. 비강우시 농도를 각 모니터링 지점에서 3회 측정하였다. 비점원에서 발생하는 미생물학적 오염을 측정하기 위하여 시험유역에서 동일한 강우사상에 대하여 강우유출수 모니터링을 2회 실시하였다.

2.3 시료의 채취

시료는 시료의 성상, 유량, 유속 등 시간에 따른 변화를 고려하여 현장수의 성질을 대표할 수 있도록 인력 채취하였으며, 수질 또는 유량의 변화가 심하다고 판단될 때에는 오염상태를 잘 알 수 있도록 채취횟수를 늘렸다.

임야유역은 시료채취지점의 하상단면이 암반이어서 단면적이 일정하므로 하상 단면을 작성한 후 간이수위계를 교각에 설치하였다. Probe형 유속계(Global Water® FP-101 of Plano Molding Company, USA.)를 이용하여 수위-유량 관계곡선을 작성하였다. 농지-임야 유역의 경우 강우유출수 측정 전마다 측량으로 하상단면을 측정하였으며 임야유역과 같은 방법으로 수위-유량곡선을 작성하였다.

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

2.4 시료의 분석

지표미생물의 농도는 TC, EC와 더불어 분변성대장균(Fecal Coliform: FC), 연쇄상구균(Fecal Streptococci: FS)의 농도를 막여과법을 사용하여 측정하였다. 총대장균(Total coliform: TC)은 Standard Methods(APHA *et al.*, 1998)의 9222B에 의하여 M-Endo medium을 이용하여 35°C에서 24시간 배양하여 분석하였다. 분원성 대장균(Fecal coliform: FC)은 Standard Methods의 9222D에 의하여 M-FC medium을 이용하여 44.5°C에서 24시간 동안 배양하여 분석하였다. *E. coli*(EC)는 Standard Methods의 9230C에 의하여 Nutrient agar-MUG을 이용하여 35°C에서 24시간 동안 배양하여 분석하였다. 연쇄상구균(Fecal streptococci: FS)은 Standard Methods의 mE method(9230C)를 이용하였으며 35°C에서 48시간 동안 배양하였다.

채취된 시료는 즉시 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 관리 하였다.

3. 연구결과 및 토론

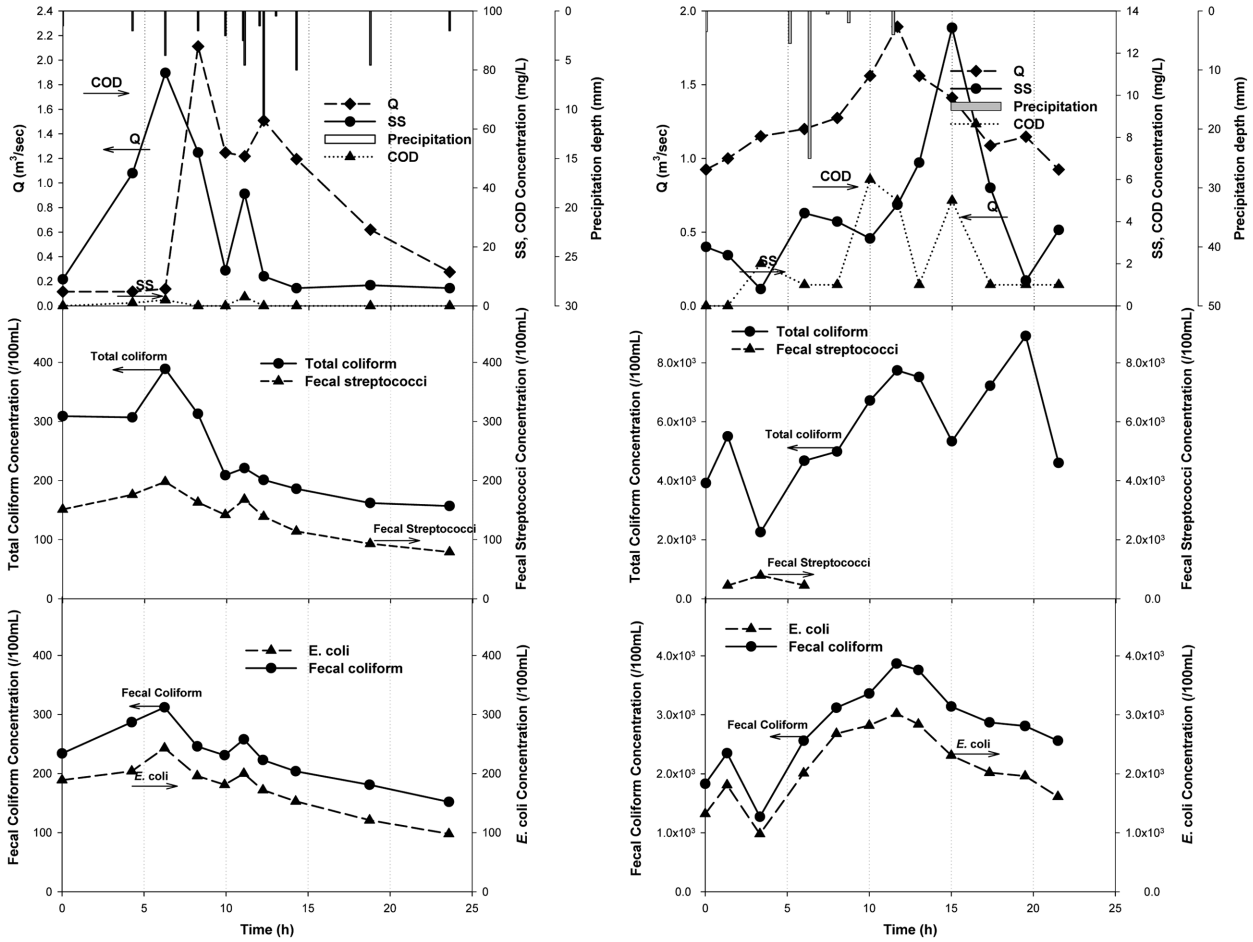
3.1 비점원 배출 특성

본 연구에서 선정한 3개 시험유역에서 2회 동일한 강우사상에 대한 강우유출수를 측정하였다. Table 2는 본 연구에서 측정한 강우사상을 요약한 것이다. 1차 강우의 강우고는 48 mm이었으며 2차 강우의 강우고는 40.5 mm 이었다. 2차 강우의 강우고가 약간 작지만, 유출 농도에 영향을 미칠 수 있는 최대강우강도가 높고, 강우전 청천일수가 1차 강우에 비해 길다.

Fig. 2는 제 1 시험유역에서 측정한 강우유출수 농도변화를 보이고 있다. Fig. 2(A)의 1차 강우사상의 강우유출수 농도변화를 보면, 강우개시 후 토사유실로 인하여 부유물질 농도가 강우초기 79 mg/L까지 증가하였으며 첨두농도는 첨두유량보다 먼저 나타나고 있는 양상을 보였다. 지표미생물 농도 변화는 유량의 변화보다는 부유물질 농도 변화와 같은 양상을 보이고 있다. 강우유출수에 존재하는 지표미생물이 부유물질과 흡착된 상태로 유출됨은 여러 논문에서 보고된 바 있다 (Schillinger and Gannon, 1985; Borst and Selvakumar,

Table 2. Description of rainfall events monitored in this research

	1st event	2nd event
Rainfall depth (mm)	48.0	40.5
Rainfall intensity (mm/hr)	3.2	3.7
Maximum rainfall intensity (mm/hr)	11.5	20.0
Rainfall duration time (hr)	15.0	11.0
Antecedent dry days (day)	3	5



(A) (B)

Fig. 2 Precipitation, flow rate (Q), suspended solid (SS), and chemical oxygen demand (COD) (top), total coliform and fecal streptococci (middle), *E. coli* and fecal coliform (bottom) for the first watershed (A) 1st rainfall event; (B) 2nd rainfall event

2003). 모니터링한 지표미생물 농도는 모두 같은 농도변화를 보이고 있으나 강우초기 TC의 농도가 다른 지표미생물과 비교하여 큰 것을 볼 수 있다. 이는 병원균뿐만 아니라 토양 내 미생물이 TC농도를 유발시킬 수 있으므로 강우초기 유출되는 토양미생물에 의하여 TC농도가 증가된 것으로 생각된다. 이러한 강우유출수 농도변화는 2차 강우사상의 유출에도 같은 추세를 보이고 있다(Fig. 2(B)). 2차 강우사상의 FS농도는 신뢰성 부족으로 삭제하였다. 2차 강우사상에도 TC의 농도변화는 다른 지표미생물의 유출경향보다 큰 것을 알 수 있다.

강우 사상에 따라서 관측된 유량자료와 이에 해당하는 수질 자료를 이용한 유량가중농도(EMC: Event Mean Concentration) 농도 (CFU/100 mg/l)는 아래 Eq. (1)에 의해서 계산할 수 있다.

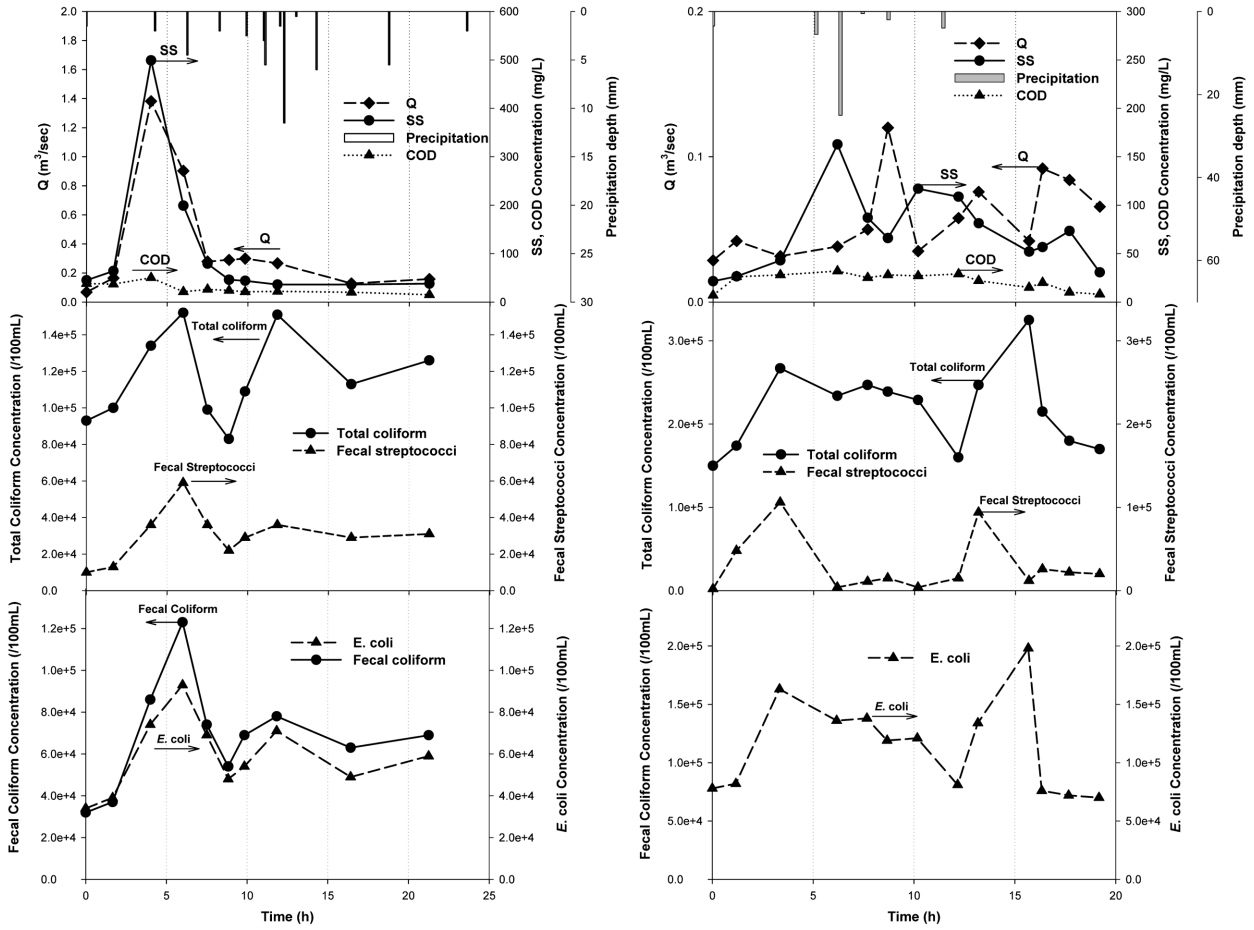
$$EMC_i = \frac{\sum Q_i C_i}{\sum Q_i} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

Q_i는 관측시간 t에서의 유출량(m^3/hr), C_i는 오염물질 농도(CFU/100 mg/l)이다.

Table 3은 제 1 시험유역의 비강우시, 강우시 유기물질, 지표미생물에 대한 농도 측정결과와 EMC 산정값을 보이고 있다. 오염되지 않은 임야에서 비강우시 TC 농도가 1.3×10^4 CFU/100 ml으로 상당히 높음을 알 수 있다. 비강우시 COD 농도가 7.1 mg/L로 상당히 높은 값을 보였는데, 이는 임야에서 강우시 발생하는 난분해성 유기물질이 원인(Kim *et al.*, 2007)일 것이다. 임야유역에서의 유출은 부유물질 농도는 청천시와 비교하여 증가하고 있으나, 유기물질 농도 및 지표미생물 농도는 대체로 비슷하거나 약간 낮다. 강우유출수 농도를 보면 1차 강우유출수 농도보다 2차 강우유출수 농도가 대체로 높은데, 이는 강우량과 더불어 청천일수, 강우강도 등 다양한 강우특성이 유출특성에 영향을 미침을 뜻한다(Brezonik and Stadelmann, 2002). 임야유역 강우유출수에서 발생하는 지표미생물 농도에 대한 문헌은 찾을 수 없으나 본 조사연구에서는 TC 농도가 1.6×10^2-8.9×10^3 CFU/100 ml로 상당히 높음을 알 수 있다. TC EMC는 2.3×10^2, 5.0×10^3 CFU/100 ml이었으며, FC EMC는 2.3×10^2, 2.6×10^3, EC EMC는 1.8×10^2, 2.0×10^3, FS EMC는 1.4×10^2, 4.3×10^2 CFU/100 ml이었다. 이는 도시지역 합류식 하수관거 월류수의 TC EMC인 3.0×10^3-3.6×10^6 MPN/100 ml(Ellis and Yu, 1995)에 비하여 낮지만 우리나라의 토지이용 중 임야가 차지하는 면적이 매우 넓음을 생각할 때 임야에서 발생되는 지표미생물 부하가 매우 큰 것을 알 수 있다. FC/TC의 비는 TC중 온혈동물에서 발생하는 지표미생물 비율을 나타내는데, 청천시에는 0.09이나 강우시에는 0.48-0.95가 되어 임야유역 내 야생동물에서 발생한 분뇨 등 오염물질이 지표미생물 농도 증가의 주요 원인

Table 3. Concentration variation during dry weather and wet weather and event mean concentrations (EMCs) for the first study watershed

	Concentration during dry weather (n=3)	Runoff Concentration		EMC	
		1st event (n=10)	2nd event (n=12)	1st event	2nd event
Suspended Solid (mg/L)	0.8-4.4 (2.6)	6-79 (26)	0.8-13.2 (4.4)	25.3	4.6
Chemical Oxygen Demand (mg/L)	1.2-13.0 (7.1)	0-3 (0.6)	0-6.0 (2.0)	0.5	2.3
Total Coliform (CFU/100 ml)	1.9×103-2.4×104 (1.3×104)	1.6×10^{2}-3.9×10^{2} (2.5×10^{2})	2.3×10^{3}-8.9×10^{3} (5.8×10^{3})	2.3×10^{2}	5.0×10^{3}
Fecal coliform (CFU/100 ml)	1.1×10^{3}-1.2×10^{3} (1.2×10^{3})	1.5×10^{2} -3.1×10^{2} (2.3×10^{2})	1.3×10^{3}-3.9×10^{3} (2.8×10^{3})	2.3×10^{2}	2.6×10^{3}
E. coli (CFU/100 ml)	2.0×10^{2}-8.0×10^{3} (5.0×10^{2})	9.8×10^{1}-2.4×10^{2} (1.8×10^{2})	9.8×10^{2}-3.0×10^{3} (2.1×10^{3})	1.8×10^{2}	2.0×10^{3}
Fecal Streptococci (CFU/100 ml)	2.0×10^{2}-3.0×10^{2} (2.5×10^{2})	7.9×10^{1}-2.9×10^{2} (1.4×10^{2})	4.5×10^{2} -7.9×10^{2} (5.6×10^{2})	1.4×10^{2}	4.3×10^{2}



(A) (B)

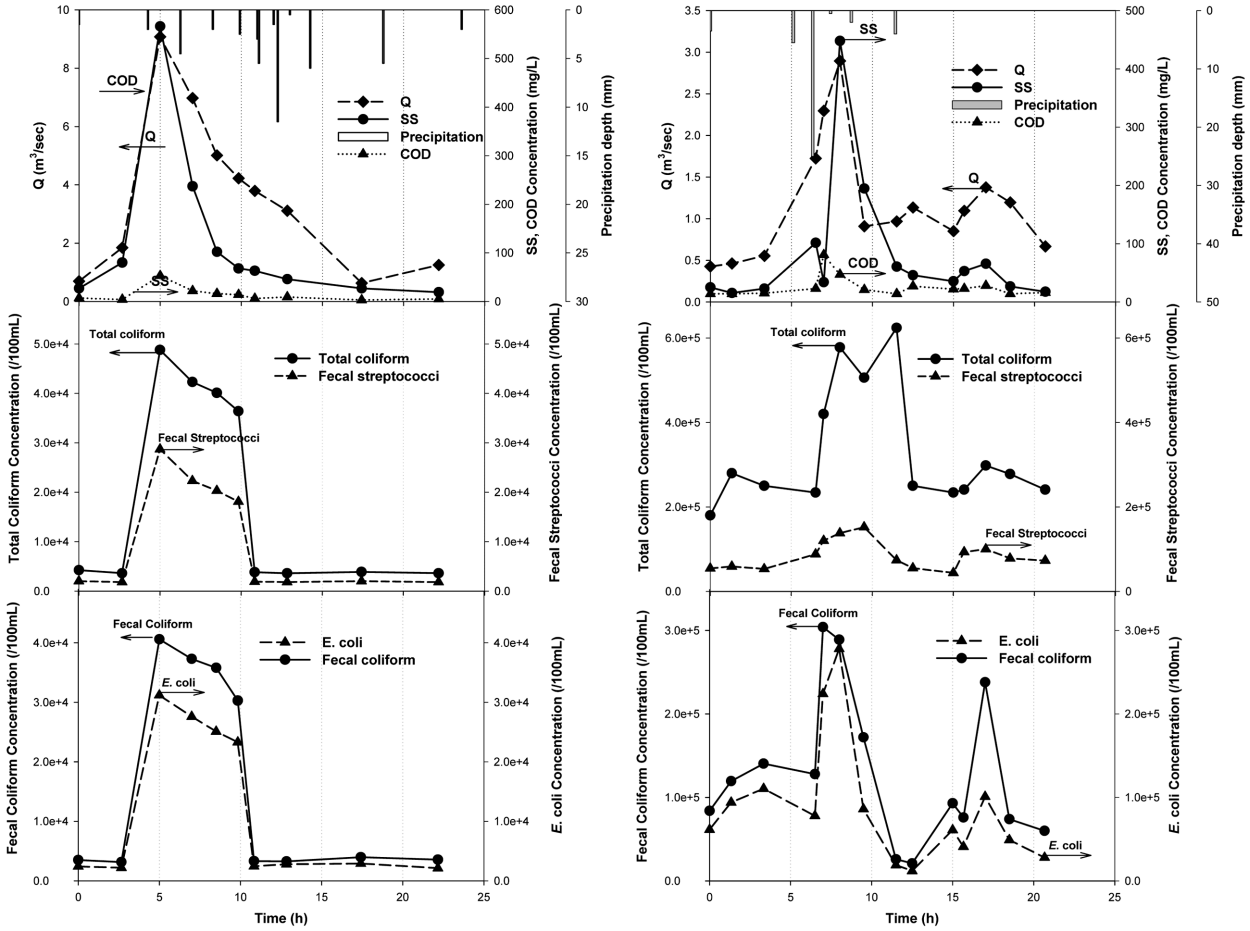
Fig. 3 Precipitation, flow rate (Q), suspended solid (SS), and chemical oxygen demand (COD) (top), total coliform and fecal streptococci (middle), *E. coli* and fecal coliform (bottom) for the second watershed (A) 1st rainfall event; (B) 2nd rainfall event

임을 알 수 있다. FC/FS의 비율이 4 이상인 경우 인간으로부터 발생한 것이며 0.7 이하인 경우는 동물로부터 발생한 것이라 하였으나(Thomann and Mueller, 1987), 인간으로부터 발생한 오염이 거의 없는 임야유역의 유출수의 FC/FS의 비율이 청천시 4.6, 강우시 1.64-4.95의 비율을 보여 FC/FS 비율을 사용한 오염원 추적방법은 신빙도가 낮음을 보이고 있다.

Fig. 3은 제 2 시험유역의 강우유출수 변화를 보이고 있다. 1차 강우에 대한 강우유출수 농도변화를 보면 강우초기 유량 증가와 함께 부유물질 농도가 증가하고 있다. 부유물질 농도는 500 mg/L 정도까지 상승하고 있는데, 이는 제 2시험유역의 상당부분이 임야이지만 시료채취지점 부근에 위치한 논에서 강우시 발생하는 토사유출 때문이다. 지표미생물 농도 또한 강우초기에 전반적으로 증가한 후 감소하고 있으나, 강

Table 4. Concentration variation during dry weather and wet weather and event mean concentrations (EMCs) for the second study watershed

	Concentration during dry weather (n=3)	Runoff Concentration		EMC	
		1st event (n=10)	2nd event (n=13)	1st event	2nd event
Suspended Solid (mg/L)	68-176 (122)	36-499 (108)	21-163 (71)	241	70
Chemical Oxygen Demand (mg/L)	12.8-17.0 (14.8)	15-50 (27)	7-32 (21)	32	21
Total Coliform (CFU/100 ml)	1.1×10^5-2.6×10^5 (1.7×10^5)	8.3×10^4-1.5×10^5 (1.2×10^5)	1.5×10^5-3.3×10^5 (2.2×10^5)	1.3×10^5	2.2×10^5
Fecal coliform (CFU/100 ml)	4.1×10^4 -1.8×10^5 (1.2×10^5)	3.2×10^4-1.2×10^5 (6.9×10^4)	-	8.5×10^4	-
E. coli (CFU/100 ml)	1.7×10^4 -1.3×10^5 (7.2×10^4)	3.4×10^4-9.3×10^4 (5.9×10^4)	7.0×10^4-1.9×10^5 (1.1×10^5)	7.1×10^4	1.1×10^5
Fecal Streptococci (CFU/100 ml)	4.0×10^4-6.2×10^4 (2.7×10^4)	1.0×10^4-5.9×10^4 (3.0×10^3)	2.0×10^3-1.1×10^5 (2.9×10^4)	3.8×10^4	2.9×10^4



(A) (B)

Fig. 4 Precipitation, flow rate (Q), suspended solid (SS), and chemical oxygen demand (COD) (top), total coliform and fecal streptococci (middle), *E. coli* and fecal coliform (bottom) for the third watershed (A) 1st rainfall event; (B) 2nd rainfall event

우가 지속되면서 유량의 증가가 뚜렷하게 보이지 않는 상태에서도 지표미생물 농도가 증가하고 있다. 2차 강우사상의 지표미생물 농도 변화 또한 유량변화와 같은 증감 경향추세를 보이고 있다. 2차 강우사상의 FC농도는 신뢰성 부족으로 삭제하였다. Table 4는 제 2 시험유역의 비강우시, 강우시 유기물질, 지표미생물에 대한 농도 측정결과와 EMC 산정값을 보이고 있다. 비강우시 유기물질과 지표미생물 농도는 임야유역과 비교하여 약 2배 값을 보이고 있다. 제 2 유역의 지표미생물에 대한 EMC는 TC EMC가 1.7×10^5 CFU/100 ml, FC EMC가 8.5×10^4 CFU/100 ml, EC EMC가 8.9×10^4 CFU/100 ml, FS EMC가 3.4×10^4 CFU/100 ml로 나타났다. 이는 문헌(Doran *et al.*, 1981)상의 밭에서 유출되는 강우유출수 농도 값인 TC 3.2×10^3-1.5×10^5 CFU/100 ml, FS가 1.7×10^3-3.9×10^4 CFU/100 ml, FC가 1.2×10^1-$1.4\times$

Table 5. Concentration variation during dry weather and wet weather and event mean concentrations (EMCs) for the third study watershed

	Concentration during dry weather (n=3)	Runoff Concentration		EMC	
		1st event (n=10)	2nd event (n=14)	1st event	2nd event
Suspended Solid (mg/L)	22-49.6 (35.8)	19-566 (123)	16-488 (82)	223	126
Chemical Oxygen Demand (mg/L)	17-41 (27.03)	3-53 (14)	14-81 (26)	23	33.6
Total Coliform (CFU/100 ml)	2.5×10^5-7.0×10^5 (4.5×10^5)	3.6×10^3-4.9×10^4 (1.9×10^4)	1.8×10^5-6.2×10^5 (3.3×10^5)	3.1×10^4	3.7×10^5
Fecal coliform (CFU/100 ml)	6.4×10^4-6.1×10^5 (3.0×10^5)	3.2×10^3-4.1×10^4 (1.7×10^4)	2.1×10^4-3.0×10^5 (1.30×10^5)	2.7×10^4	1.7×10^5
E. coli (CFU/100 ml)	4.7×10^4-5.0×10^5 (2.3×10^5)	2.1×10^3-3.1×10^4 (1.2×10^4)	1.2×10^4-2.8×10^5 (8.9×10^4)	2.0×10^4	1.2×10^5
Fecal Streptococci (CFU/100 ml)	2.0×10^3-9.8×10^5 (3.5×10^5)	1.8×10^3-2.9×10^4 (1.0×10^4)	4.4×10^4-1.5×10^5 (8.4×10^4)	1.7×10^4	8.5×10^4

Table 6. Concentrations and unit generation rates of indicator microorganism of night soils from livestock raising

	Pig	Cow	Pigeon	Chicken
Water Content	74 %	80 %	20 %	70 %
Unit night soil generation rate	2.15 kg/head/d[1)]	21.9 kg/head/d[1)]	53 g/head/d[2)]	89 g/head/d[1)]
COD	2.17×10^5 mg/g 4.66×10^8 mg/head/d	9.56×10^4 mg/g 2.09×10^9 mg/head/d	2.34×10^5 mg/g 1.2×10^7 mg/head/d	7.95×10^4 mg/g 7.07×10^6 mg/head/d
Total Coliform	1.3×10^9 CFU/g 2.9×10^{12} CFU/head/d	1.2×10^8 CFU/g 2.7×10^{12} CFU/head/d	1.4×10^{10} CFU/g 7.6×10^{11} CFU/head/d	5.3×10^8 CFU/g 4.7×10^{10} CFU/head/d
Fecal coliform	9.7×10^8 CFU/g 2.1×10^{12} CFU/head/d	8.5×10^7 CFU/g 1.9×10^{12} CFU/head/d	1.0×10^{10} CFU/g 5.4×10^{11} CFU/head/d	3.6×10^8 CFU/g 3.2×10^{10} CFU/head/d
E. Coli	7.3×10^8 CFU/g 1.6×10^{12} CFU/head/d	5.1×10^7 CFU/g 1.1×10^{12} CFU/head/d	8.3×10^9 CFU/g 4.4×10^{11} CFU/head/d	2.4×10^8 CFU/g 2.1×10^{10} CFU/head/d
Fecal Streptococci	4.9×10^8 CFU/g 1.1×10^{12} CFU/head/d	3.3×10^7 CFU/g 7.1×10^{11} CFU/head/d	6.8×10^9 CFU/g 3.6×10^{11} CFU/head/d	1.8×10^8 CFU/g 1.6×10^{10} CFU/head/d

[1)]Choi, 1991
[2)]Oshiro *et al*. 1995

10^4 CFU/100 ml의 범위 내 값이다. FC/TC의 비율은 청천시 0.68, 강우시 0.59를 보이고 있는데, 이는 청천시에도 분변이 상당 부분 하천에 유입되고 있음을 나타내는 것이다. FC/FS의 비율은 청천시 4.34, 강우시 2.24를 보이고 있다.

Fig. 4은 제 3 시험유역의 강우유출수 변화를 보이고 있다. 1차 강우시 강우 초기에 유량이 증가하면서 부유물질 농도가 같이 증가하였다가 감소하고 있다. 지표미생물 농도 또한 급격히 증가하였다가 감소하여서, 농지와 임야가 혼합되어 있는 유역에서 지표미생물 농도는 강우와 밀접한 관계가 있음을 보이고 있다. 2차 강우사상 또한 유사한 경향을 보이고 있다. 유량 증가시, 지표미생물 농도가 증가하였다가 감소하는 경향을 보이고 있다. Table 5는 제 3 유역에서 측정한 비강우시 농도 측정결과와 강우유출수 농도의 요약을 보이고 있다. 청천시 TC 평균농도는 4.5×10^5 CFU/100 ml로써, 제 2 유역과 비교하여 높은 농도를 보이고 있다. 제 3 시험유역의 지표미생물에 대한 EMC는 TC EMC가 2.0×10^5 CFU/100 ml, FC EMC가 9.6×10^4 CFU/100 ml, EC EMC가 7.0×10^4 CFU/100 ml, FS EMC가 5.1×10^4 CFU/100 ml로 나타났다. EMC 값 또한 제 2 시험유역과 비교하여 높은 값을 나타내고 있는데, 2차 강우의 TC EMC는 3.7×10^5 CFU/100 ml로써, CSO 농도와 거의 비슷한 값을 보이고 있다. FC/TC의 비 또한 제 2 유역과 유사한 경향을 보이고 있는데, 청천시 0.67, 강우시 각각 0.86, 0.39를 보이고 있다. FC/FS의 비는 청천시 0.86, 강우시 각각 1.63, 1.54를 보이고 있다. 제3시험유역은 제2시험유역보다 농지가 더 포함되어 있어 높은 지표미생물 부하가 발생할 개연성이 높으나, 제 2시험유역 유출부하량보다 큰 차이를 보이고 있지 않다. 이 오염물질이 많으나, 유출된 오염물질 부하는 크지 않다. 이는 제3시험유역의 면적이 크기 때문에 부유물질에 부착되어 있는 지표미생물이 유하과정에서 침전 제거되기 때문으로 사료된다.

비점원으로 배출되는 축산분뇨는 소량으로도 하천 수질에 큰 악영향을 미친다. Table 6은 여러 종류 축산분뇨의 농도를 측정한 결과이다. 돼지의 TC 농도는 1.3×10^8 CFU/100 ml 이었으며, FC/TC 비율은 0.73, FC/FS 비율은 1.96 이었다. 소의 TC 농도는 1.2×10^7 CFU/100 ml 이었으며, FC/TC 비율은 0.68, FC/FS 비율은 2.59 이었다. 비둘기의 TC 농도는 1.4×10^9 CFU/100 ml 이었으며, FC/TC 비율은 0.70, FC/FS 비율은 1.49 이었다. 닭의 TC 농도는 5.3×10^7 CFU/100 ml 이었으며, FC/TC 비율은 0.68, FC/FS 비

율은 2.02 이었다.

4. 요약 및 결론

농지와 임야에서 발생하는 강우유출수는 지표수의 수질을 결정하는 배경농도로서 수질관리에 있어 매우 중요하다. 본 연구에서는 농지와 임야가 혼합된 3개 시험유역에서 동일한 2개 강우사상에 대한 지표미생물 유출 특성을 조사하였다. 대장균군(total coliform:TC), 분원성 대장균(Fecal coliform: FC), 대장균(*Escherichia coli*: EC), 분원성 연쇄상구균(Fecal streptococcus:FS)을 측정하였다.

농지-임야 유역의 강우시 유량변화에 따라 토사유실로 인하여 부유물질 농도가 상당히 증가하였다. 지표미생물 농도 변화는 부유물질 농도변화 추세와 상당히 밀접한 관계를 보였다. 대부분 오염되지 않은 임야로 구성되어 있는 첫번째 유역의 강우유출수 TC EMC는2.3×10^2, 5.0×10^3 CFU/100 ml 이었으며, FC EMC는 2.3×10^2, 2.6×10^3 CFU/100 ml, EC EMC는 1.8×10^2, 2.0×10^3 CFU/100 ml, FS EMC는 1.4×10^2, 4.3×10^2 CFU/100 ml 이었다. 임야유역과 농지유역이 혼합되어 있는 제 2 유역의 지표미생물에 대한 EMC는 TC EMC가 1.7×10^5 CFU/100 ml, FC EMC가 8.5×10^4 CFU/100 ml, EC EMC가 8.9×10^4 CFU/100 ml, FS EMC가 3.4×10^4 CFU/100 ml로 나타났다. 제 3 시험유역의 지표미생물에 대한 EMC는 TC EMC가 2.0×10^5 CFU/100 ml, FC EMC가 9.6×10^4 CFU/100 ml, EC EMC가 7.0×10^4 CFU/100 ml, FS EMC가 5.1×10^4 CFU/100 ml로 나타났다.

온혈동물에서 발생하는 지표미생물 비율을 나타내는 FC/TC의 비는 강우시 증가하여 야생동물 분뇨 등이 강우시 지표미생물 농도증가의 주요원인임을 알 수 있었으며, FC/FS 비율을 이용한 분변오염원 추적이 신빙성이 떨어짐을 알 수 있었다. 이 논문에서 제시한 모니터링 자료는 매우 한정되어 있으므로 지표미생물의 비점원 발생양상을 파악하기 위하여 추가적인 장기모니터링이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 한남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었습니다. 시료의 채취와 분석은 이규진, 한경민, 성미경씨의 도움을 받았으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

APHA, AWWA, and WEF (1998) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed.* APHA.

Baudisova, D. (1997) Evaluation of Escherichia coli as the main indicator of of faecal pollution. *Water Sci. Technol.*, Vol. 35, No. 11-12, pp. 333-336.

Borst, M. and Selvakumar, A. (2003) Particle-associated microorganisms in stormwater runoff. *Water Res.*, Vol. 37, No. 1, pp. 215-223.

Brezonik, P.L. and Stadelmann, T.H. (2002) Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA. *Water Res.*, Vol. 36, No. 7, pp. 1743-1757.

Choi, E. (1991) *Research on estimation of unit generation rate of nutrients*. Seoul: Koean Reseach Council of Environmental Science.(in Korean).

Doran, J.W., Schepers, J.S., and Swanson, N.P. (1981) Chemical and bacteriological quality of pasture runoff. *J. of Soil and Water Conserv.*, Vol. 36, No. 3, pp. 166-171.

Ellis, J.B. and Yu, W. (1995) Bacteriology of urban runoff - the combined sewer as a bacterial reactor and generator. *Water Sci. Technol.*, Vol. 31, No. 7, pp. 303-310.

Feachem, R. (1975) Improved role for fecal coliform to fecal streptococci ratios in differentiation between human and non-human pollution sources. *Water Res.*, Vol. 9, No. 7, pp. 689-690.

Jagals, P., Grabow, W.O.K., and Devilliers, J.C. (1995) Evaluation of indicators for assessment of human and animal fecal pollution of surface run-off. *Water Sci. Technol.*, Vol. 31, No. 5-6, pp. 235-241.

Kim, S., Hong, S., Kim, G., Sohn, J., and Choi, E. (2007) Source identification and characterization of the non-biodegradable organics in korean reservoirs. *J. of Environ. Manage.*, doi:10.1016/j.jenvman.2007.05.011.

Murray, K.S., Fisher, L.E., Therrien, J., George, B., and Gillespie, J. (2001) Assessment and use of indicator bacteria to determine sources of pollution to an urban river. *J. of Great Lakes Res.*, Vol. 27, No. 2, pp. 220-229.

Oshiro, R. and Fujioka, R. (1995) Sand, soil, and pigeon droppings - sources of indicator bacteria in the waters of hanauma bay, oahu, hawaii. *Water Sci. Technol.*, Vol. 31, No. 5-6, pp. 251-254.

Schillinger, J.E. and Gannon, J.J. (1985) Bacterial adsorption and suspended particles in urban stormwater. *J. Water Pollut. Contr. Fed.*, Vol. 57, No. 5, pp. 384-389.

Thomann, R.V. and Mueller, J.A. (1987) *Principles of surface water quality modeling and control*. New York, NY: Harper Collins Publishers.

U.S. Environmental Protection Agency (2001) *Protocol for developing pathogen TMDLs*. Washington, DC.: United States Environmental Protection Agency.

(접수일: 2007.10.17/심사일: 2007.11.17/심사완료일: 2007.11.17)