

## 도시지역 점원, 비점원에서 유출되는 병원균 지표미생물의 사멸률

김건하<sup>†</sup>

한남대학교 공과대학 토목환경공학과

### Mortality Rates of Pathogen Indicator Microorganisms Discharged from Point and Non-point Sources in Urban Area

Kim, Geonha<sup>†</sup>

Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University

(Received 18 August 2006, Accepted 14 October 2006)

#### Abstract

In this research, mortality rates of pathogen indicator microorganisms discharged from various point sources and diffuse sources in urban area were measured. Water samples were taken at domestic sewer, combined sewer overflow, effluent from a wastewater treatment plant, urban river, and sediment of an urban river. Mortality rates of indicator microorganisms in domestic sewer estimated by assuming the first order kinetics at 20°C were as follows: total coliform = 0.092/day, fecal coliform = 0.185/day, *E. coli* = 0.252/day, and fecal streptococci = 0.281/day. Sensitivity of mortality rates of total coliform on temperature was estimated as  $K_{temp} = K_{20} \times 1.162^{(temp-20)}$  for the range of 10-20°C. Mortality rates due to sunlight were measured as 1.22-1.59 /day while mortality rate due to settling for 40 min were estimated as  $9.21 \times 10^{-3}$  -  $20.0 \times 10^{-3}$ /day.

**keywords** : Coliform, Indicator microorganism, Mortality rate, Non-point sources, Pathogen

## 1. 서 론

수인성 질병은 인간이나 동물의 배설물로 오염된 물을 음용한 결과로 일어난다. 분변에 의한 병원균(pathogen)은 다양한 점원, 비점오염원을 통해 수체로 유입하게 된다. 대표적인 점오염원에는 하수처리장 방류수, 합류식 하수관거 월류수, 분류식 하수관거월류수 등이 있고, 비점오염원으로는 야생동물, 가축시설, 매립지, 목초지 등을 들 수 있다. 그리고 농지에서 사용하는 퇴비와 하수 오니 또한 주요한 비점오염원이다. 병원균은 소화기, 호흡기, 그리고 비뇨-배설기에 있는 점막은 통과할 수 있으므로 내장기관이 가장 흔한 감염 경로가 된다. 이러한 경로에 의하여 전파되는 감염의 형태를 장내감염이라 하는데 콜레라를 일으키는 *Vibrio cholerae*, 장티푸스를 일으키는 *Samonella typhi*, 설사를 일으키는 *Shigella dysenteria* 등이 그 대표적인 병원균이다.

수체내 병원균은 분리와 검출이 매우 까다롭기 때문에 시료의 채취와 분석이 비교적 용이한 미생물을 모니터링하며, 이러한 미생물을 병원균 지표미생물(Pathogen Indicator Microorganism)이라 한다. 이러한 지표미생물로는 대장균군, 분원성대장균군, 대장균, 분원성 연쇄상구균이 빈번히 사용된다. 대장균군(total coliform:TC)은 인간 또는 동물의 장관으로부터 배출되는 대장균과 유사한 성질을 가지고 있

으며 토양이나 물 중에 널리 분포되어 있는 세균을 총칭한다. 그램염색음성 간균으로 호기성 또는 통성혐기성균이 있으며 보통의 배지에 잘 발육하고, 포도당, 유당을 분해하여 산과 가스를 발생시킨다. 일반적으로 대장균군은 병원균보다도 외부 스트레스에 강한 세균으로, 방류수를 염소 소독할 때 대장균의 감소율에 따라 병원균의 유무를 판정할 수 있으며 또 오수처리에 있어서 정화기능 판단에 도움이 된다. 대장균(*Escherichia coli*: EC)는 온혈동물의 장내에 상주하는 세균으로서, 그램음성이고 편모를 가지고 있는 간균이다. 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. 이는 젖산균의 한 종류로서 비강 및 인두, 소화관, 질 등의 동물체내의 정상균총의 일부를 구성한다. 분원성 연쇄상구균은 대장균군보다 수중에서 생존기간이 짧으므로 상수도에서 발견되면 오염되지 않았음을 유추할 수 있다(송 등, 2002).

병원균이 수중에 배출된 후 사멸률은 햇볕, 온도, 염도, 포식자, 영양분, 독성, 침전/부상, 재성장 등 많은 물리적, 생물학적 요인에 의하여 영향을 받는다(Thomann et al., 1987). 박테리아 또는 미생물의 1차 사멸률은  $K_B(1/day)$ 로 나타낼 수 있으며 다음과 같은 구성으로 표현할 수 있다(Thomann et al., 1987).

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

kimgh@hannam.ac.kr

$$K_B = K_{B1} + K_{BL} + K_{BS} + K_A \quad (1)$$

$K_{B1}$  = basic mortality rate as a function of temperature, salinity, predation

$K_{BL}$  = mortality rate due to sunlight

$K_{BS}$  = net loss (gain) due to settling (resuspension)

$K_A$  = aftergrowth rate

병원성 병원균은 숙주를 떠나면 급속히 사멸을 하게 되지만 자연계 내에서 사멸률이 작을 때가 많은 것으로 알려져 있다. 김 등(1985)는 자연하천에서 대장균과 오염도간 상관관계를 실험적으로 구하였다. 오염도가 높을수록 포식자의 수도 많아지지만 오염물질을 양분으로 하여 대장균이 성장하므로 사멸률이 작아진다고 하였다. 또한 지표수 중 존재하는 지표미생물의 사멸률은 수온, 탁도, 부유물질과도 밀접한 관계가 존재한다(장 등, 2003). 그러나 다양한 점원, 비점원에서 발생하는 지표미생물의 사멸률을 측정하려는 시도는 적었다.

병원균 지표미생물중 대장균군은 수질기준에 포함되어 있으므로 상당히 중요한 수질항목일 뿐 아니라 도시하천의 위락목적이 강조되는 최근 추세에 비추어 더욱 중요하다. 수질관리를 위하여 지표미생물의 사멸률은 매우 중요한 정보이며 지표미생물 농도를 예측하기 위한 수질모형의 중요한 입력인자로 사용된다.

따라서 본 연구의 주 목적은 지표수 수질관리를 위한 인자로 사용하기 위하여 도시지역의 점원, 비점오염원에서 발생하는 병원균 지표미생물의 사멸률을 측정하는 것이다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 시료채취 지점

지표미생물 사멸률 측정을 위한 시료채취는 도시하수, 합류식하수관거 월류수, 하수처리장 방류수, 도시하천수 및 도시하천 퇴적물을 대상으로 하였다. 도시하수 및 합류식하수관거 월류수 시료채취지점은 대전시 오정동에 위치하고 있다. 도시하천수와 도시하천 퇴적물은 2006년 5월부터 7월 사이 대전시 갑천에서 채취하였으며 환경부 시료채취지점(지점명: 갑천3)과 동일지점이다. 시료는 차집관거 유입 직전에서 수심 중앙에서 임의 채취하였다. 하수처리장 방류수는 활성슬러지법을 사용하는 도시하수처리장 1개소의 방류수를 비강우시 임의채취하였다. 해당 하수처리장은 고도처리시설과 살균시설이 없으며 분뇨를 유입수와 혼합하여 처리하고 있다.

### 2.2. 사멸률 측정방법

시료를 채취 즉시 실험실로 4°C의 냉장상태로 옮겨 사멸률 측정 실험을 실시하였다. 시료의 유기물 농도를 파악하기 위하여 유기물 농도(BOD<sub>5</sub>, SBOD<sub>5</sub>, COD<sub>cr</sub>, SCOD<sub>cr</sub>, SS, VSS)를 측정하였다. 초기 지표미생물 농도를 측정하였으며 1 L의 시료를 배양기에 넣고 미리 정한 시간 간격으로 시료를 채취하였다. 2개의 동일한 시료를 다른 배양기에 넣

어 실험하였다.

단순 침전에 의한 지표미생물의 제거량을 파악하고자 침전실험을 실시하였다. 도시하수를 1 L 용량 칼럼에 채운 후 5분, 10분, 30분, 60분, 120분 침전 후 상등수의 화학적 산소요구량(COD<sub>cr</sub>), 부유물질(SS), TC 농도를 분석하였다. 각 분석항목별, 침전시간별 다른 칼럼을 사용하였으며 TC항목은 3회 중복실험을 실시하여 그 평균값을 사용하였다.

햇빛의 자외선에 의한 지표미생물 사멸률을 측정하였다. 도시하수와 도시하천수를 1 L 용량 투명한 플라스틱 4개에 넣고 20°C 항온수조에 넣은 후 그림자가 없는 건물 옥상에서 2개의 플라스틱만 5시간 동안 햇빛에 노출시키고 일정 시간 간격으로 시료를 채취하여 지표미생물 농도를 분석하였다.

온도차이에 의한 사멸률 차이를 파악하고자 실험을 실시하였다. 도시하수를 이용하였으며 온도는 10°C, 15°C, 20°C 등 3가지 온도에서 실시하였다. 침전에 의한 지표미생물 사멸률 측정을 제외하고 모든 분석시료 채취시 시료를 천천히 혼합한 후 시료를 채취하였다.

생존한 상태의 미생물 개체수  $N$ 은 시간  $t$ 에 따라 감소하며 많은 경우 다음과 같은 1차식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dN}{dt} = -kN \quad (1)$$

$N$  = 생존한 지표미생물의 농도;  $k$  = 사멸률이다. 식 (1)을 적분하면 다음 식 (2)와 같다:

$$N = N_0 e^{-kt} \quad (2)$$

$N_0$  = 생존한 지표미생물의 농도이다. 식 (2)를 Chick's law라고 한다.

사멸률을 나타낼 수 있는 다른 방법은 1차식을 가정하여 초기농도의 90%가 사멸하는 시간을 나타내는 것이다. 90% 사멸시간,  $t_{90}$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$0.10 = \exp(-K_B t_{90}) \quad (3)$$

$$t_{90} = \frac{2.3}{K_B} \quad (4)$$

사멸률은 20°C를 기준으로 측정하며 온도에 따른 식으로 나타낼 수 있다. 즉 다음과 같다:

$$K_{temp} = K_{20} \times \text{constant}^{(temp-20)} \quad (5)$$

$K_{temp}$  = 10-20°C 범위내 특정온도의 사멸률,  $K_{20}$  = 20°C에서 측정된 사멸률이다.

### 2.3. 시료의 분석

BOD<sub>5</sub>, SBOD<sub>5</sub>, COD<sub>cr</sub>, SCOD<sub>cr</sub>, SS, VSS의 분석은 Standard Methods(APHA, 1998)에 준하여 실시하였다. 지표미생물은 막여과법을 이용하여 측정하였다. 총대장균(Total coliform: TC)은 Standard Methods의 9222B에 준하여 M-Endo medium을 이용하여 35°C에서 24시간 배양하여 분석하였다. 분원성 대장균군(Fecal coliform: FC)은 Standard Methods의 9222D에 의하여 M-FC medium을 이용하여 44.5°C에서 24시간 배양하여 분석하였다. EC는

Standard Method의 9230C에 의하여 nutrient agar-MUG을 이용하여 35°C에서 24시간 배양하여 분석하였다. 연쇄상구균(Fecal streptococci:FS)은 Standard Methods의 mE method를 이용하여 35°C에서 48시간 배양하였다.

채취된 시료는 즉시 실험하였다. 채취 및 분석의 일관성을 유지하기 위하여 연구 시작부터 최종 분석까지 동일 분석자가 분석하도록 하였다. 한 시료를 3회 반복실험하여 그 평균값을 분석치로 사용하였다.

Table 1. Concentrations of organic matters and microorganisms in domestic sewer samples

	Domestic sewer 1 <sup>st</sup> sampling (5/19/06)	Domestic sewer 2 <sup>nd</sup> sampling (7/12/06)	Sediment of an urban stream (7/24/06)	Surface water of an urban stream (7/24/06)	Effluent from a wastewater treatment plant (7/24/06)
BOD (mg/L)	96	63	NM <sup>5</sup>	NM	NM
SBOD (mg/L)	52	32	NM	NM	NM
TCOD (mg/L)	128	173	NM	NM	16.2
SCOD (mg/L)	95	76	NM	NM	3.0
TSS (mg/L)	114	65	NM	5.0	15.0
VSS (mg/L)	75	55	NM	2.0	10.0
TC <sup>1</sup> (/100 mL)	1,276,000	4,576,000	466,000	112,000	390,000
FC <sup>2</sup> (/100 mL)	912,000	4,544,000	353,000	72,000	270,000
EC <sup>3</sup> (/100 mL)	606,500	3,936,000	222,000	44,000	135,000
FS <sup>4</sup> (/100 mL)	463,000	3,896,000	175,000	32,000	121,000

<sup>1</sup>Total coliform, <sup>2</sup>Fecal coliform, <sup>3</sup>*E. coli*, <sup>4</sup>Fecal streptococci, <sup>5</sup>Not measured

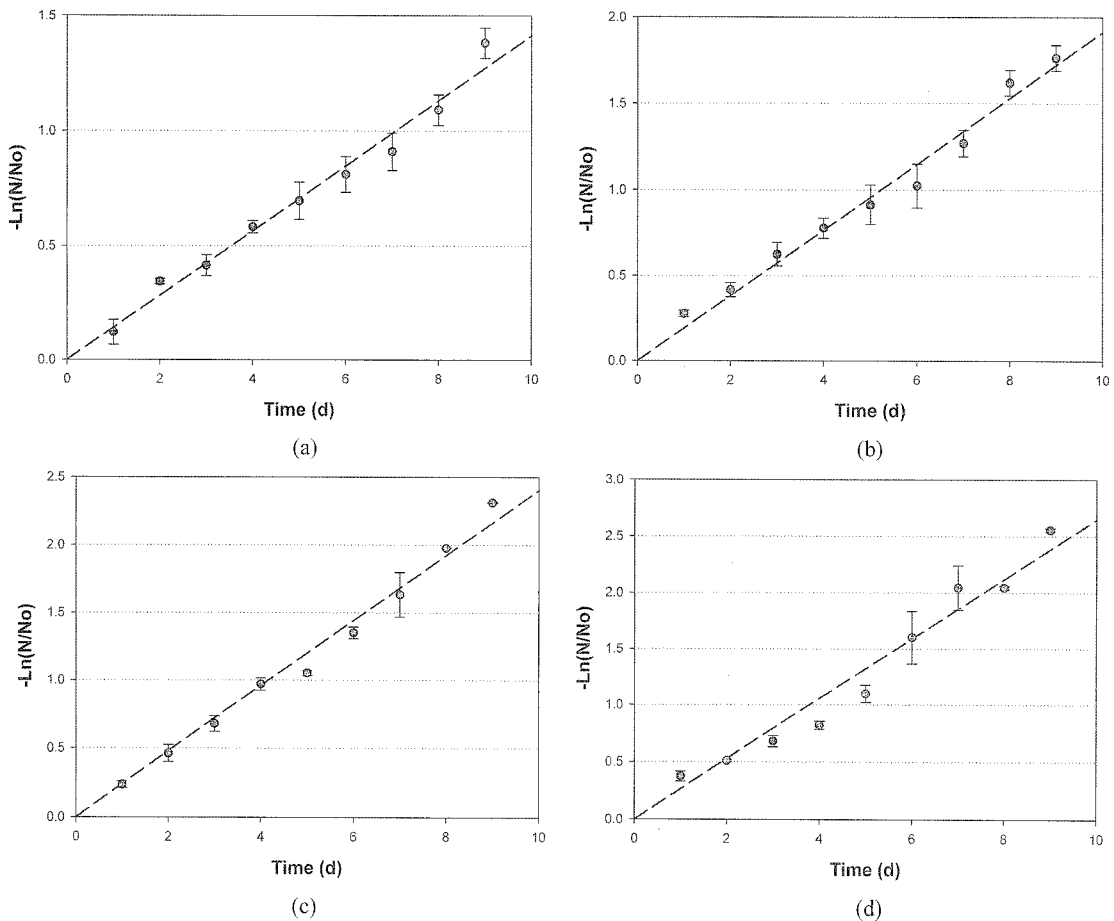


Fig. 1. Determination of mortality rate ( $k_d$ ) of domestic wastewater by Chick's law as functions of initial enumeration count( $N_0$ ) and enumeration count( $N$ ): (a) Total coliform; (b) Fecal coliform; (c) *E. coli*; (d) Fecal streptococci.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 건기시 도시하수의 사멸률 측정결과

Table 1은 사멸률을 측정하기 위하여 채취한 도시하수 시료의 유기물 농도와 미생물 농도 특성을 보이고 있다. 두번 모두 같은 장소에서 정오경에 채취하였으나 지표미생물의 농도가 상당히 다른 것을 알 수 있다. 추가 모니터링이 필요하겠으나 유기물질 농도와 지표미생물 농도는 비례하지 않았다. 따라서 도시하수에 있어서 BOD와 SS는 지표미생물 농도를 예측할 수 있는 인자가 되지 못하였다.

Fig. 1은 1차 시료를 이용하여 사멸률을 측정된 그래프를 보이고 있다. x축은 시간이며 y축은 초기농도에 대한 지표미생물 농도의 자연로그이므로 기울기는 사멸률을 나타낸다. TC의 사멸률은 0.092/day이었으며 FC는 0.185/day, EC는 0.252/day, FS는 0.281/day이었다. 문헌에서 보고되고 있는 사멸률 값은 햇볕이 있는 상태에서 측정된 것이 대부분이므로 직접 비교할 수 없으나 FS의 경우 네 가지 지표미생물 중 가장 큰 사멸률을 보여 연쇄상구균의 사멸률이 지표미생물중 가장 크다는 송 등(2002)의 결과와 일치하였다. 식 (4)를 이용하여 계산한 1차 실험의 TC에 대한  $t_{90}$ 은 25 day이며 FS에 대한  $t_{90}$ 은 8.2 day이다.

Fig. 2는 온도에 대한 영향을 파악하기 위한 사멸률 실험

결과를 보이고 있다. 사멸률 값은 온도에 따라 매우 민감하게 변하고 있음을 알 수 있다. Fig. 3은 온도에 따른 사멸률 변화를 보여주고 있으며 식 (5)를 적용하여 각 지표미생물에 대한 상수값을 구하여 나타내었다. Table 2에 정리한 각 지표미생물의 사멸률 값은 햇볕이 없고, 침전의 영향이 없는 지표미생물 자체의 사멸률을 나타낸다.

Fig. 4(a)는 연구 지역의 생활하수의 침전실험 결과이다. 전반적으로 SS, COD, TC 농도는 10분 정도의 침전에 많이 침전하며 그 후의 침전율은 감소하는 추세를 보이고 있다. TC 농도는 10분 침전시 41% 감소하였으며, 같은 시간 동안 SS는 33%, COD는 23% 감소하였는데, 이로 보아 침전에 의해 지표미생물을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 강우유출수에 존재하는 coliform이 부유물질과 흡착된 상태로 유출됨은 이미 여러 실험 연구에서 보고된 바 있다(Borst et al., 2003; Crainiceanu et al., 2003; Ferguson et al., 2003; Schillinger et al., 1985). Fig. 4(b)는 침전실험으로 구한 TC제거율을 나타냈으며, 원수 정상에 따라 침전에 의한 제거율이 상당히 달랐다. 침전에 의한 제거율(KBS)은  $9.2 \times 10^3 - 20.0 \times 10^3/day$ 로 측정되었다. 이는 침전이 미생물제거에 매우 효과적임을 의미한다. 다만 배출된 병원균이 햇볕에 노출되기 전에 침전한다면 매우 오랜기간 수체에 존재할 수 있으며, 따라서 퇴적물의 부상이 병원미

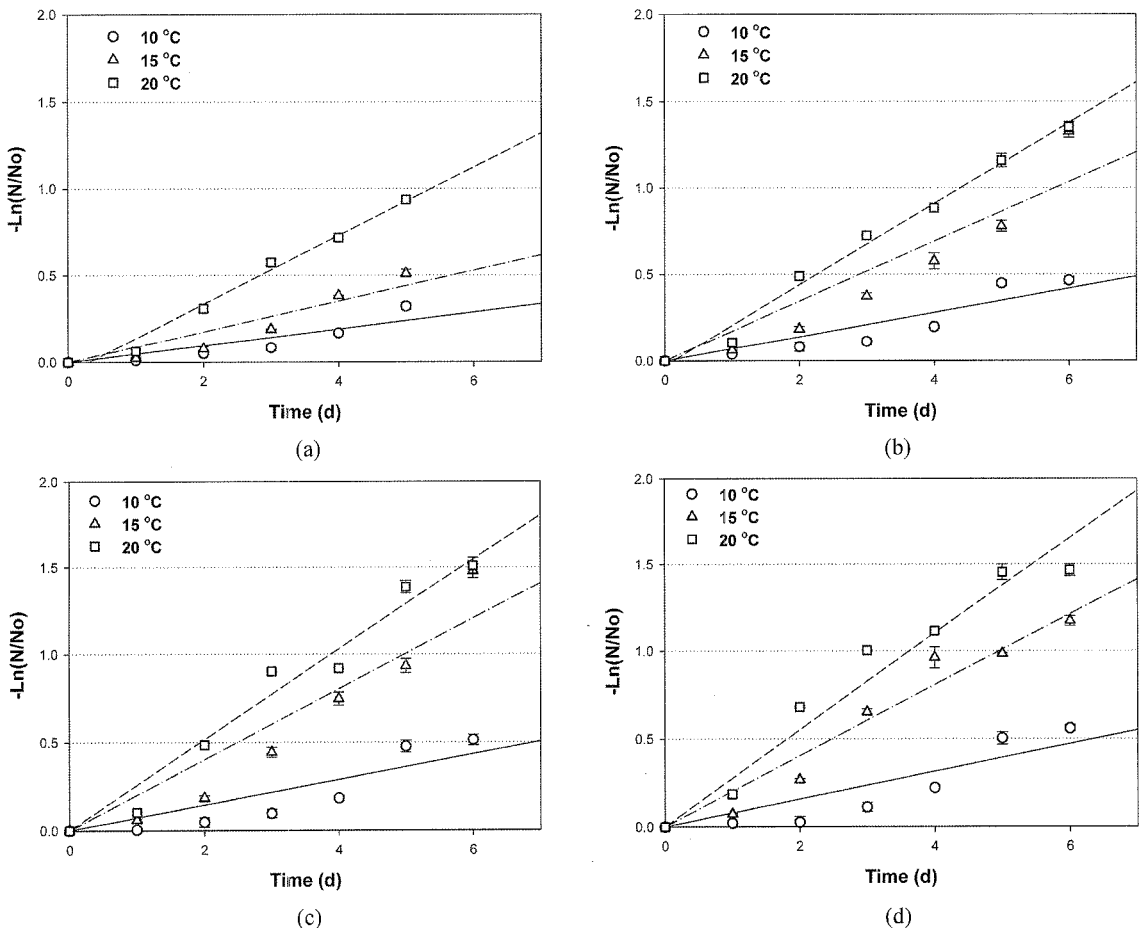


Fig. 2. Determination of mortality rate ( $k_d$ ) of wastewater by Chick's law as functions of initial enumeration count( $N_0$ ) and enumeration count( $N$ ): (a) Total coliform; (b) Fecal coliform; (c) E. coli; (d) Fecal Streptococci.

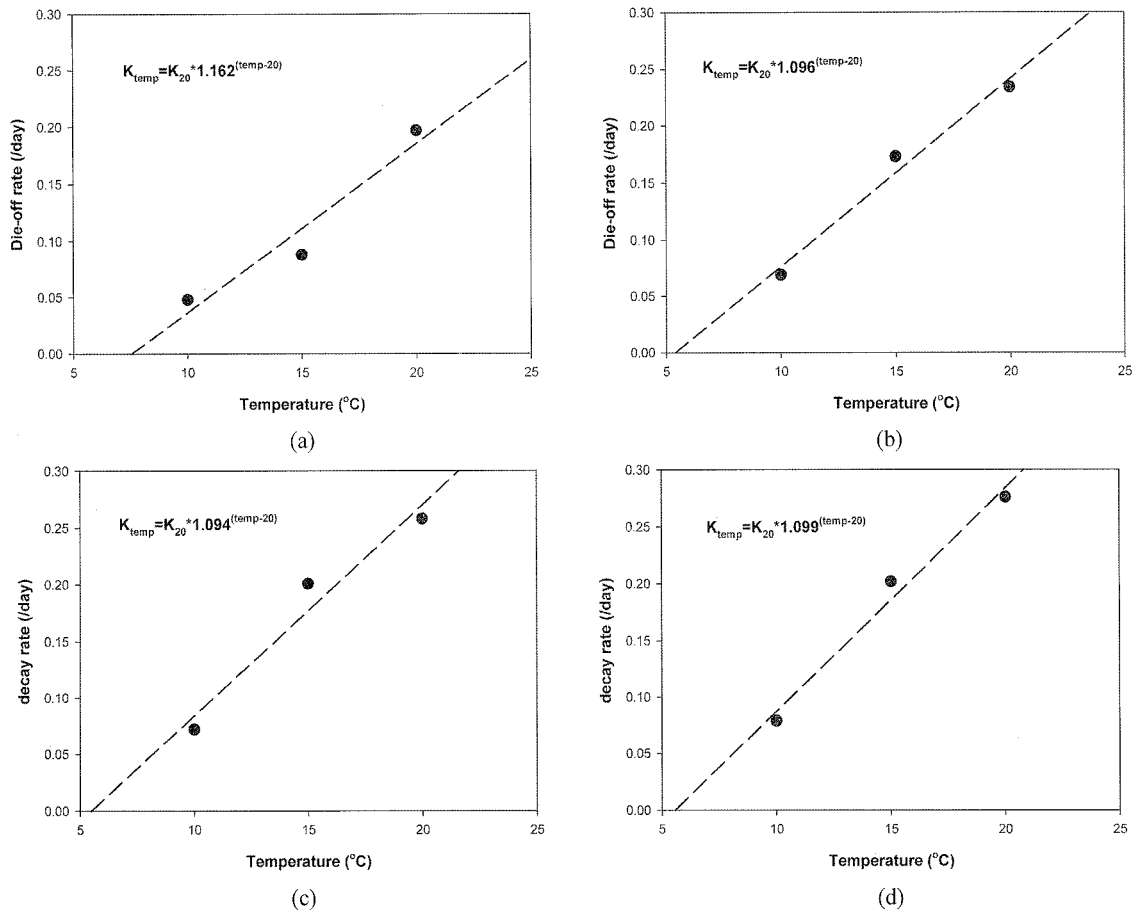


Fig. 3. Determination of empirical equations for estimating mortality rate ( $k_d$ ) considering temperature effects: (a) Total coliform; (b) Fecal coliform; (c) *E. coli*; (d) Fecal Streptococci.

Table 2. Summary of mortality rate of indicator microorganisms in domestic sewer (unit: /day)

Water	Domestic Sewer (10°C)	Domestic Sewer (15°C)	Domestic Sewer (20°C)
Total Coliform	0.048	0.088	0.197
Fecal Coliform	0.069	0.173	0.234
<i>E. coli</i>	0.072	0.201	0.258
Fecal streptococci	0.079	0.202	0.276

생물과 관련된 주요한 수질 오염요인이 될 수 있으므로 이에 대한 추가 연구가 필요하다고 사료된다.

Fig. 5는 자외선에 의한 사멸률을 측정된 결과이다. 지표미생물의 사멸률은 1.22/day-1.59/day로 추정되었는데 이는 자체 사멸률값보다는 크지만, 침전에 의한 사멸률값과 비교하여 작은 값을 나타내고 있다. 이는 Yukselen 등(2003)의 값인 25.5°C, 23.7 cal/cm<sup>2</sup>의 햇볕에서 2.3/d인 자료와 비교하여 작은 값이다. 이는 시료의 높은 부유물질 농도로 인

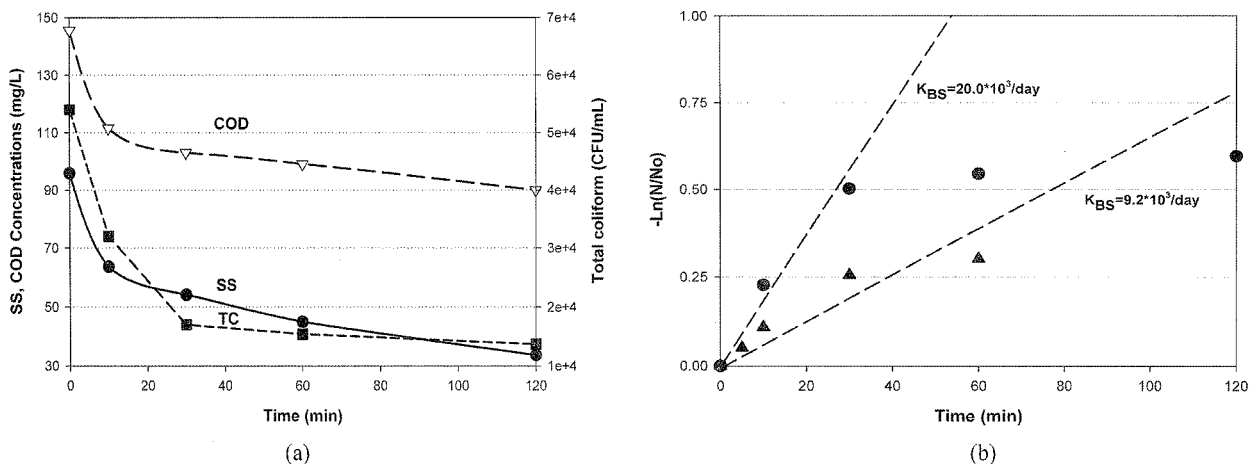


Fig. 4. Settling test results of domestic wastewater discharged from the study watershed for suspended solid (SS), chemical oxygen demand (COD), and total coliform (TC) concentrations.

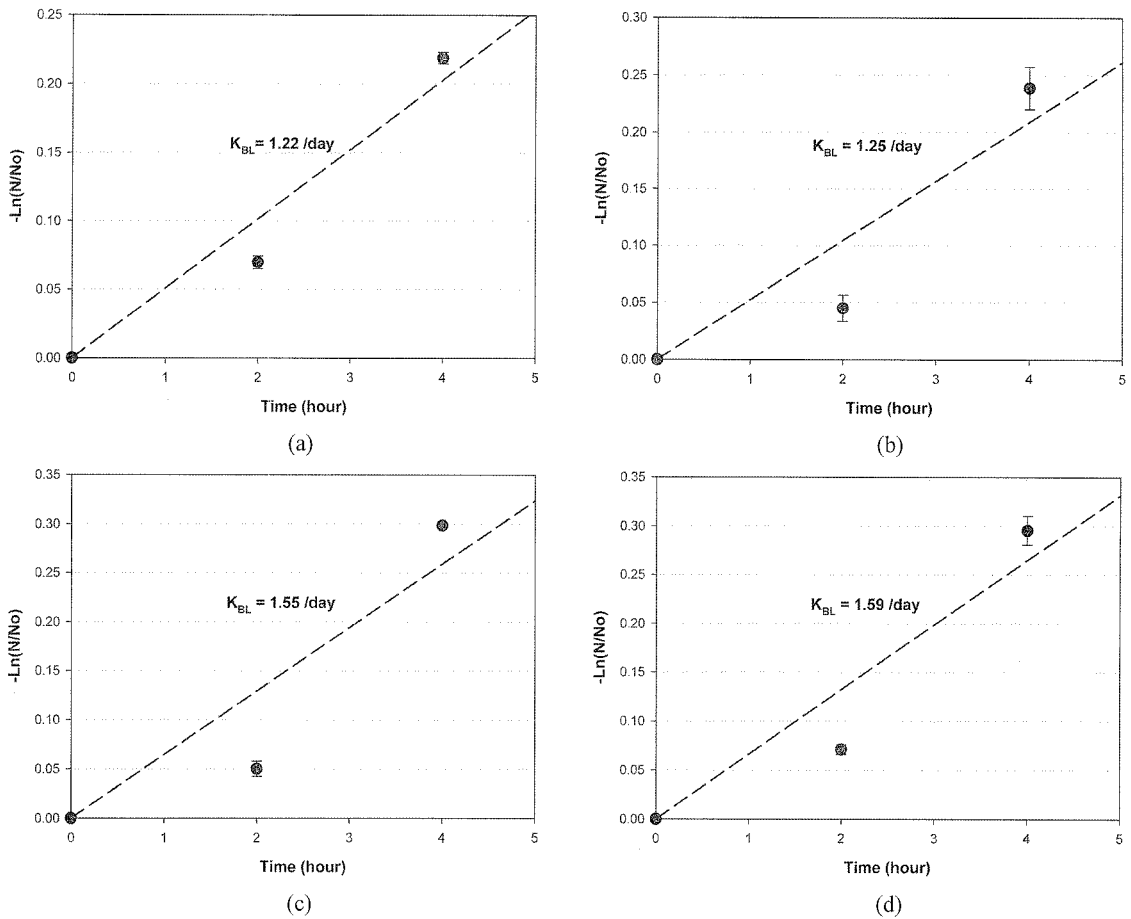


Fig. 5. Effects of sunlight on mortality rate ( $k_d$ ) of wastewater by Chick's law as functions of initial enumeration count( $N_0$ ) and enumeration count( $N$ ): (a) Total coliform; (b) Fecal coliform; (c) *E. coli*; (d) Fecal Streptococci.

Table 3. Summary of mortality rate of indicator microorganisms in various water samples measured at 20°C (unit: /day)

Water	Sediment of an urban stream	Surface water of an urban stream	Effluent from a wastewater treatment plant
Total Coliform	0.2127	0.2507	0.2187
Fecal Coliform	0.2265	0.2577	0.2259
<i>E. coli</i>	0.2218	0.2755	0.2127
Fecal streptococci	0.1933	0.2441	0.2333

하여 자외선에 의한 사멸률이 작아진 것으로 생각된다.

Table 3은 도시하천수와 도시하천 퇴적물, 하수처리장 방류수의 지표미생물 사멸률 측정결과이다. 하수처리장 방류수 중 검출되는 지표미생물은 하수처리장에서 분뇨를 합병 처리하고 또 최종방류수의 소독공정이 아직 설치되지 않았기 때문이다. 이들 세균의 상수원 유입시 대장균군 농도 및 분변오염도에 영향이 예상된다.

#### 4. 결론

본 연구의 주 목적은 지표수 수질관리를 위하여 도시지역의 점원, 비점오염원에서 발생하는 병원균 지표미생물의 사멸률을 측정하는 것이다. 대장균군의 사멸률은 0.092/day이었으며 분원성 대장균의 사멸률은 0.185/day, 대장균의 사멸률은 0.252/day, 분원성 연쇄상구균의 사멸률은

0.281/day이었다. 전체 농도의 90%가 사멸하는 시간인  $t_{90}$ 은 대장균군은 25 day이며 분원성 연쇄상구균의  $t_{90}$ 은 8.2 day이었다. 대장균군의 온도에 대한 민감도는 10-20 °C 범위내에서  $K_{temp}=K_{20} \times 1.162^{(temp-20)}$ 로 나타낼 수 있었다. 침전에 의한 제거율은  $9.2 \times 10^3$ - $20.0 \times 10^3$ /day로 측정되었으며 햇볕에 의한 지표미생물의 사멸률은 1.22/day-1.59/day로 추정되었다.

#### 사 사

본 연구는 대전환경기술개발센터의 2006년도 연구개발사업 지원을 받았습니다. 시료의 채취와 분석은 이규진, 한경민, 성미경씨의 도움을 받았으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김치경, 김근식, 하천수에서 *Escherichia coli*의 생존율에 대한 실험실 및 원위치 실험방법의 비교연구, *한국미생물학회지*, **23**, pp. 49-55 (1985).
- 송홍규, 오계현, (최신) *환경미생물학*, 동화기술, p. 461 (2002).
- 장현정, 이목영, 최선영, 이의광, 오세종, 박수환, 먹는물의 대장균군 검출을 위한 시험관법, 막여과법, 효소발색법 동시 비교평가, *한국물환경학회지*, **18**(5), pp. 501-508 (2002).
- 장현정, 이용욱, 상수원 수질관리를 위한 분변오염 지표세균에 관한 연구, *한국환경위생학회지*, **29**(1), pp. 19-27 (2003).
- APHA, AWWA, WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20<sup>th</sup> ed. (1998).
- Borst, M. and Selvakumar, A., Particle-associated Microorganisms in Stormwater Runoff, *Water Res.*, **37**(1), pp. 215-223 (2003).
- Crainiceanu, C. M., Stedinger, J. R., Ruppert, D., and Behr, C. T., Modeling the US National Distribution of Waterborne Pathogen Concentrations with Application to *Cryptosporidium parvum*, *Water Resour. Res.*, **39**(9), p. 1235 (2003).
- Ferguson, C., Husman, A.M.D., Altavilla, N., Deere, D., and Ashbolt, N., Fate and Transport of Surface Water Pathogens in Watersheds, *Critical Rev. Environ. Sci. Technol.*, **33**(3), pp. 299-361 (2003).
- Schillinger, J. E. and Gannon, J. J., Bacterial Adsorption and Suspended Particles in Urban Stormwater, *J. Wat. Pollut. Cont. Fed.*, **57**(5), pp. 384-389 (1985).
- Thomann, R. V. and Mueller, J. A., *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*, Harper Collins, New York, p. 233 (1987).
- Yukselen, M. A., Calli, B., Gokyay, O., and Saatci, A., Inactivation of coliform bacteria in Black Sea waters due to solar radiation, *Env. Int.*, **29**, pp. 45-50 (2003).