

Original Article

유역모델 STREAM 기반 대장균 모의 모듈의 개발

이태환¹ · 정의상² · 구분경³ · 박성은⁴ · 조홍래^{5,†}

¹(주)하이드로코어 유역환경연구소 책임연구원

²(주)하이드로코어 유역환경연구소 수석연구원

³(주)하이드로코어 유역환경연구소 이사

⁴국립수산과학원 해양환경연구과 해양수산연구소

⁵(주)하이드로코어 유역환경연구소 대표이사

Development of a E. coli Simulation Module for a Watershed Model STREAM

Taehwan Lee¹, Euisang Jeong², Bhon Kyoung Koo³, Sung-Eun Park⁴, and Hong-Lae Cho^{5,†}

¹Research Scientist, Hydrocore Ltd. Watershed Environment Research Institute, Seoul 08501, Korea

²Senior Research Scientist, Hydrocore Ltd. Watershed Environment Research Institute, Seoul 08501, Korea

³Director, Hydrocore Ltd. Watershed Environment Research Institute, Seoul 08501, Korea

⁴Research Scientist, Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

⁵CEO, Hydrocore Ltd. Watershed Environment Research Institute, Seoul 08501, Korea

요 약

본 연구에서는 유역규모에서 대장균의 사멸과 운반을 모의하기 위해 분포형 유역모델 STREAM에서 구동되는 대장균 모듈을 개발하였다. 대장균 모듈은 대장균의 사멸과 운반을 모의하고, 수체에서의 대장균 부하량, 이동량, 사멸량, 저장량의 시공간적 분포를 출력 가능하도록 개발되었다. 개발된 대장균 모듈에 대해 퇴액비 농도, 토양 내 유출유량, 그리고 토양 및 수체 특성 관련 매개변수에 대해 민감도 분석을 수행한 결과 대장균 농도에 가장 크게 영향을 미치는 매개변수는 토양에서 대장균의 20°C 기준 온도 사멸계수인 것으로 분석되었다. 개발된 대장균 모듈을 강진만 지역에 적용하여 환경부 수질측정망 지점의 자료와 비교해본 결과, 모의값의 PBIAS값은 절대값 기준 41.5~120.5의 범위를 보였다. 모의치와 관측치 각각의 농도분포 누적도수곡간의 R² 값은 0.68~0.95로 농도값의 분포 상관성은 높은 것으로 평가되었다. 모듈의 예측 정확성은 보다 개선될 필요가 있으며, 개발된 모듈에 대한 입력자료 및 매개변수도 함께 보완해 나가야 할 필요가 있다.

Abstract – In this study, a mathematical module to be operated in the distributed watershed model STREAM was developed to simulate the death and transport of E. coli at the watershed scale. The E. coli module simulates the death and transport of E. coli across the watershed and estimates the spatiotemporal distribution of E. coli loads, death, transport, and storage in the water body. A sensitivity analysis of the module for certain parameters related to compost concentrations, soil water discharges, biophysical properties of soil, and water body showed that the most sensitive parameter to E. coli concentration was the inactivation coefficient of E. coli in soil at 20 °C. In an application study of the E. coli model to the Gangjin Bay watershed, the simulated E. coli concentrations were compared with the E. coli concentrations measured at monitoring stations of the National Institute of Environmental Research, and the resultant PBIAS values ranged from 41.5 to 120.5 in absolute terms. Frequency curves shows a good correlation between simulated and observed concentrations frequency (R²= 0.68~0.95). It is considered the prediction accuracy of the model, model input data and parameters need to be further improved.

Keywords: Watershed Model(유역모델), STREAM Model(STREAM 모델), E. coli(대장균), Mathematical Module Development(수치모듈 개발), Management of Coastal Waters(연안해역 관리)

[†]Corresponding author: hlcho@hydrocore.co.kr

1. 서 론

분변계대장균(Fecal Coliform)은 인간을 포함한 온혈동물의 배설물에서 발생하며, 인체에 직접적인 유해성은 없으나 위생상태 및 오염 정도를 나타내는 환경지표로 사용된다. 해양수산부는 제2018-166호(패류 생산해역 수질의 위생기준) 고시를 통해 해역에서의 분변계대장균 위생기준을 제시하여 관리하고 있다. 미국의 경우, 국가 패류위생관리 프로그램(National Shellfish Sanitation Program, NSSP)을 통해서 연체동물(조개, 굴, 홍합, 전복 등)에 대한 위생관리 기관과 생산업자가 준수해야 하는 위생관리 가이드라인(Guide for the Control of Molluscan Shellfish)을 제시하여 관리하고 있으며, EU에서는 패류생산해역 관리를 위한 Regulation 854/2004의 규정(Annex 2)에 따라, 패류 중의 대장균(E. coli) 수치에 따라 A 등급, B 등급, C 등급 중 하나의 등급으로 해역을 구분하여 패류 수확 해역의 위치를 설정하고 그 경계를 정하고 있다. 분변계대장균은 패류 생산지정해역의 위생관리를 위해 반드시 고려되어야 할 항목이며 효과적인 위생관리를 위해서는 육상의 배수유역에서 유입되는 분변계대장균 유입특성에 대한 평가가 이루어져야 한다. 이와 관련된 연구결과를 살펴보면 국외의 경우, 대장균을 포함한 수체 내 병원균 관리의 중요성을 강조하며 관련 제도와 지속적인 연구를 수행하고 있다. 특히 유역모델을 적용한 대장균 모의사례가 다수 존재한다. Thériault and Duchesne[2015]는 캐나다 Quebec에 위치한 도시유역인 Beauport 유역을 대상으로 강우 시 및 강우 사상 이후 하천으로 배출되는 대장균 배출량과 농도를 SWMM (Storm Water Management Model) 모델을 적용하여 산정한 바 있으며 Cho *et al.*[2012]은 미국 Massachusetts 주에 위치한 Wachusette 저수지 유역을 대상으로 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)을 적용하여 대장균(fecal coliform)을 모의하였다. 또한 Hellweger and

Masopust[2008]은 기계적인 구조를 가지며, 시간을 조절할 수 있는 3차원 수리수질 모델을 COMSED와 RCA 모델링 프레임워크를 이용하여 모델을 개발하여 모니터링과 함께 표층수 대장균의 거동 및 이동을 조사한 바 있다. 국내의 경우 Kim *et al.*[2012]이 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)을 이용하여 소유역별 하천 유입 유량 및 비점오염부하량을 해석하고, QUALKO2와 연계하여 하수 처리수가 유입되는 하천에서의 구간별 수질(BOD, TN, TP 및 대장균)을 모의함으로써, 하수처리수의 간접재이용에 따른 관개수질을 분석한 연구가 있으며, Kim *et al.*[2009]은 대장균(*Escherichia coli*)의 위해성 평가를 위해 BASIN 및 HSPF 모델을 화성 유역에 적용한 사례가 있지만 관련 연구가 부족한 상황이다. 또한, 현재 국내에서 많이 사용되고 있는 SWAT, HSPF, SWMM 등의 유역 모델은 대부분 외국에서 개발된 모델로 국내 적용에 있어 몇 가지 한계를 지닌다. 예를 들면 우리나라의 전형적인 농업지역과 도시지역에서 발생하는 특정 수문현상(논의 물꼬 조작, 우수관로 차집 및 월류 등)을 동시에 모의할 수 없다. 또한 도시지역에 있어서도 합류식, 분류식 관거 시스템에 의한 우수 흐름과 불투수지표면에서의 오염물질 축적과 유출 과정을 명확히 반영할 필요가 있는데, 기존 모델의 경우 이에 대한 고려가 미흡하다. 유역규모에서 대장균의 유출 양상은 유역 내 수문과정에 지배적인 영향을 받게 되는데, 이와 같이 외국에서 개발되어 사용되고 있는 유역모델은 국내 유역의 수문 특성을 충분히 고려하고 있지 않기 때문에 국내 유역에서의 분변계대장균 거동 모의가 한계가 있다. 이러한 단점을 보완한 유역모델 STREAM(Spatio-Temporal River-basin Eco-hydrology Analysis Model)이 개발된 바 있으며(Cho *et al.*[2015]) 본 연구에서는 육상의 배수유역으로부터 유입되는 분변계대장균을 국내 실정에 맞게 정량적으로 모의할 수 있도록 STREAM에서 사용할 수 있는 대장균 모듈을 개발함으로써 대장균 모의기반을 구축하는 것이다.

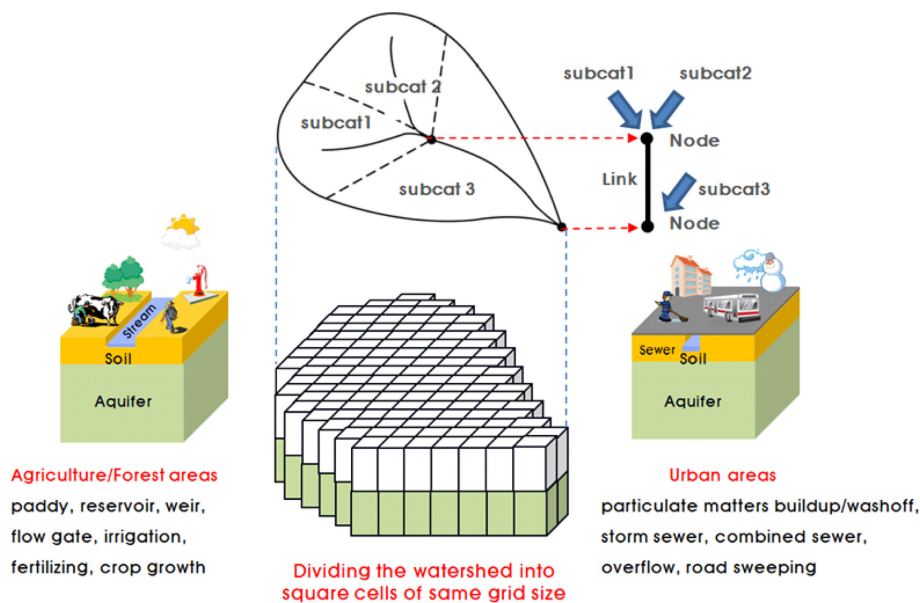


Fig. 1. Representation of a watershed using square grid cells and link-node structures in STREAM (Cho *et al.*[2015]).

2. 재료 및 방법

2.1 유역모델 STREAM

STREAM은 중대규모 유역에서의 수문과정과 물질 변환 및 이동을 모의하기 위해 개발된 격자기반 유역모형으로 금강하구유역(Jeong *et al.*[2018]), 폐류생산 지정해역(Lee *et al.*[2019]) 등 다수의 적용 사례를 가지고 있는 모델이다.

STREAM의 유역 공간분할 구조는 Fig. 1과 같이 정의된다. 모의 대상 유역은 다수의 소유역으로 구분되며 소유역 사이의 상하류 위계관계는 노드-링크의 연결 구조로 표현 된다. 소유역은 다시 일정 크기의 정방형 격자로 분할되며, 각 격자는 다시 지표면, 토양층, 대수층의 수직적 구조를 갖는다(Cho *et al.*[2015]).

STREAM은 객체지향 언어인 VB. NET으로 코딩되었으며, 각 구성 요소가 필요에 따라 용이하게 변경 또는 확장할 수 있도록 모듈 형식으로 개발된 모델로, 본 연구에서는 STREAM에서 사용가능한 대장균 모듈을 개발하였다.

2.2 대장균 모듈의 개발

토양 및 수체에서의 대장균 거동에 대한 기존 연구를 반영하여 대장균 모듈을 개발하였다. 수중에서는 태양복사 에너지의 자외선이 주요 인자로 작용하며(Brookes *et al.*[2004]), 지표 및 10 mm 이상 깊이의 토양에서는 태양복사 에너지보다 온도의 영향을 더 많이 받는다는(Tian *et al.*[2002]) 기존 연구에 따라 대장균의 사멸률은

토양 및 수체의 온도와 태양 일사량에 따라 변동되는 것으로 설정하였다. 또한 대장균은 토양, 수체 유입 후 사멸하며 증식은 하지 않는 것으로 가정하였다.

토양 내 대장균은 강우에 의한 지표와 토양에서의 흐름을 통해 하천 및 지하수로 이동한다. 대장균의 하천 및 지하수로의 이동은 강우유출수(run-off)와 유사 이동(sediment transport)에 의해 수체로 이동하는 지표유출, 토양침투수를 통해 토양 내부로 유입된 대장균이 중간류(inter flow)를 통해 수체로 이동하는 중간류유출, 지하대수층 내 대장균이 지하수를 통해 유출되는 지하수유출로 구분된다(Fig. 2).

대장균의 유입은 다양한 점오염원과 비점오염원을 통해 토양 및 수체로 유입하는데 점오염원은 하수처리장 방류수, 합류식/분류식 하수관거의 월류수를 통해 유입되며, 비점오염원은 야생동물, 가축 시설, 매립지, 목초지, 농지에서 사용하는 퇴비 등을 통해 유입된다. 이러한 점을 반영하여 대장균 모의를 위한 입력자료로는 환경기초 시설방류수, 미처리점오염원, 농경지 퇴액비 사용량, 토지이용별 대장균 유입량자료로 구성하였다. 입력부분과 함께 STREAM 대장균 모듈은 대장균 모의, 결과의 출력 부분으로 구성되며, 모의는 대장균의 사멸과 이동에 대해 수행, 출력은 수체에서의 대장균 부하량, 이동량, 사멸량, 저장량의 시공간적 변동량 자료에 대해 가능하도록 개발하였다(Table 1).

대장균의 증식과 사멸은 대장균의 기작을 이해하고 모의하는데 중요한 요소이며, 생물적 특성을 가지고 있기 때문에 다양한 환경

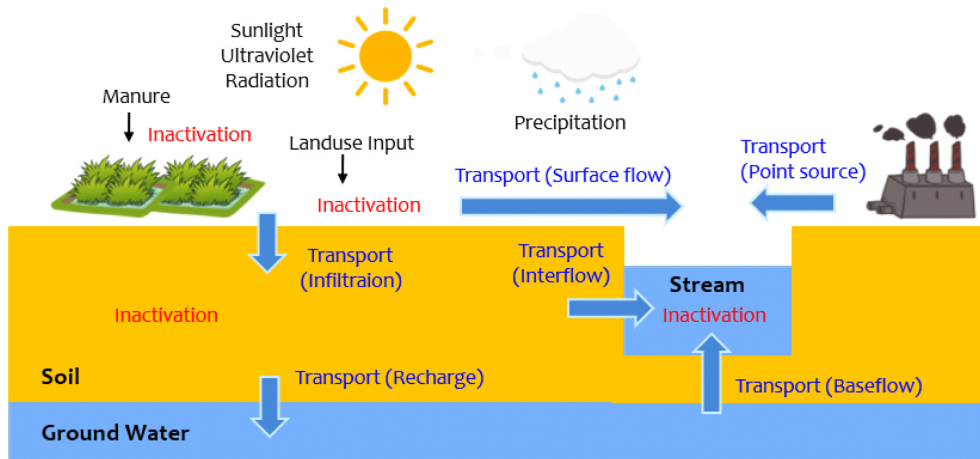


Fig. 2. Schematic diagram of the E.coli sources and transport at the watershed scale.

Table 1. Component of the E. coli model

Type	Components
Input Data	Effluents from Wastewater Treatment Plants (Discharge, E. coli concentrations)
	Manure, Fertilizer(Input time, Input amount)
	Non-Point sources by land use (Urban, Agricultural, Forest)
Simulation Components	Inactivation : Inactivation of E. coli (surface, soil, stream, lake)
	Transport : Transport of E. coli (Infiltration, Surface runoff, Interflow, Recharge, Baseflow)
Output Data	E. coli Loads (CUF/hr)
	E. coli concentration (CFU/100 ml)

변수들의 영향을 받는다. 대장균의 증식과 사멸에 관한 식은 1차 반응식을 주로 이용하며, 여기에 쓰는 사멸속도상수 k 는 토양과 하천의 조건, 대장균의 형태에 따라 달라진다. 대장균의 증식과 사멸에 영향을 미치는 속도변수는 환경 및 생물조건에 따라 다양하고, 토양환경과 수체환경에 따라 다르게 적용된다(Tian *et al.*[2002]; Jamieson *et al.*[2004]; Oliver *et al.*[2005]). 토양환경에 적용되는 인자는 토양수분함량, 토성, 토양온도, pH, 영양분, 경쟁미생물의 존재여부 등이며 수체환경에 적용되는 인자는 온도, 태양복사에너지, pH, 영양분의 이용가능성, 천적의 존재여부, 침전을 등이다. SWAT, ANSWERS-2000 등 유역 규모의 모형에서는 대장균의 사멸속도상수를 고려할 때 온도를 단일변수로 정의한다. Reddy *et al.*[1981]은 유기성 폐기물이 토양에 살포될 때 1차 반응식의 반응속도상수에 영향을 미치는 토양온도, 토양습도, 토양pH, 분뇨 투입 방법 등 다양한 변수를 고려한 식을 제안한 바 있으며, Thomann and Mueller [1987]는 온도 이외에 태양복사에너지와 침전을 고려한 식을 제안하였다. 이와 같이 대장균의 증식과 사멸은 매우 다양한 환경 변수에 영향을 받는다. 그러나 각 환경변수가 대장균에 영향을 미치는 정도는 차이가 있으며, 일반적으로 온도와 일사량이 가장 큰 영향인자인 것으로 알려져 있다. 또한 제시된 환경변수와 관련된 자료는 제한적이며 적용 과정의 불확실성을 고려할 때 관련된 환경변수를 모두 반영하는 것은 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 대장균 사멸과 관련하여 온도와 일사량을 우선적으로 고려하여 대장균 거동 알고리즘을 구성하였다.

본 연구에서 사용한 대장균 사멸의 1차 반응식은 식 (1)과 같다.

$$N_t = N_0 \times \exp(-k \times \Delta t) \tag{1}$$

여기서 N_t, N_0 = the concentration of Total Coliform at time t and initial condition

Δt = simulation time step (sec)

본 연구에서는 수중 및 토양에서의 대장균 사멸에 주요 인자로 작용되는 온도에 의한 사멸과 태양 일사에 의한 사멸 두가지를 고려한 사멸속도상수를 사용하였다(식 (2)).

$$k = k_t + k_i \tag{2}$$

$$k_t = k_{t,20} \times \exp(\theta \times (t - t_{20})) \tag{3}$$

$$k_i = IPC \times H_{short} \tag{4}$$

여기서 k = the inactivation coefficient (sec⁻¹)

k_t = the inactivation coefficient for the temperature (sec⁻¹)

k_i = the inactivation coefficient for the irradiation (sec⁻¹)

$k_{t,20}$ = the inactivation coefficient at 20°C

t = temperature (°C)

t_{20} = 20°C

θ = dimensionless constant which describes the relationship between the rate coefficient and temperature (-)

IPC = irradiance proportionality constant (m²/J)

H_{short} = average irradiance on the soil or water surface (J/m²/sec)

2.3 대장균 모듈 적용 및 보검정

대장균 모듈의 적용 및 보검정은 강진만 유역 내에서 환경부 수질측정망 지점인 곤양천, 남해봉천, 백련천, 사천천 지점에 대해 수행하였다(Fig. 3).

2015년 1월 1일부터 12월 31일까지 1년 기간동안 모의를 수행하였으며 보검정을 위한 측정자료는 강진만 유역에 위치한 환경부 수질측정망 지점인 곤양천, 남해봉천, 백련천, 사천천 지점의 총대장균군 자료를 사용하였다(National Institute of Environmental Research). 모델의 보검정 평가는 시행착오법을 이용하여 모델에 입력된 매개 변수에 대한 적정값을 추정하였다. 대장균의 경우 대장균 자료가 갖는 관측범위의 광범위한 특성 때문에 보검정에 어려움이 있는 것으로

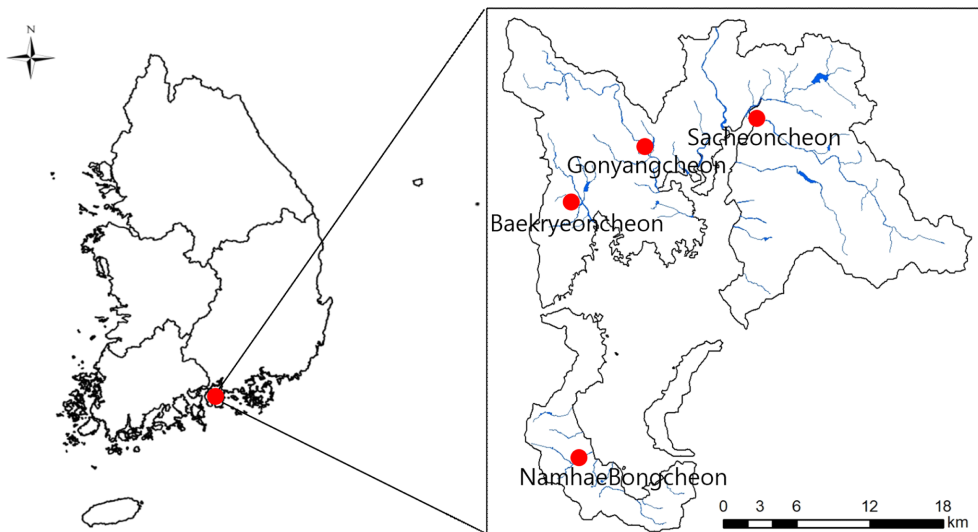


Fig. 3. Application study area for the E. coli model and the stream monitoring stations.

알려져 있다(Abbas *et al.*[2021]). 본 연구에서도 R²과 같은 평가지표를 이용한 보검정 평가에는 어려움이 있어 총량 재현도를 평가하는 PBIAS 기준으로 정량적으로 평가함과 동시에, Morgane *et al.*[2011]에서 사용했던 모의치와 관측치의 농도분포 상관성 검토 방법을 이용하여 대장균 모의결과에 대한 정확도를 검토하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 대장균 모듈 매개변수 민감도 분석

퇴액비, 토양 특성, 수체 특성, 토양 내 유출유량과 관련된 11가지 매개변수에 대한 민감도 분석을 수행하였다(Table 2). 퇴액비 관련 매개변수로는 퇴액비 내 대장균 농도 N_{coli} 에 대해, 토양 특성 관

련 매개변수로는 토양에서 대장균의 20 °C 기준 온도 사멸계수 $K_{t,20_{soil}}$ 토양에서 대장균의 일사량 사멸 조정계수 IPC_{soil} 현재 온도를 고려한 $K_{t,20_{soil}}$ 조정계수 θ_{soil} 에 대해 민감도 분석을 수행하였다.

수체 특성 관련 매개변수로는 수체에서 대장균의 20°C 기준 온도 사멸계수 $K_{t,20_{water}}$ 수체에서 대장균의 일사량 사멸 조정계수 IPC_{water} 현재 온도를 고려한 $K_{t,20_{water}}$ 조정계수 θ_{water} 에 대해 민감도 분석을 수행하였으며, 토양 내 유출유량 관련 매개변수로는 1시간 동안 지표면 대장균 90%를 토양 내부로 침투시키는 침투유량 Q_{90inlf} , 1시간 동안 토양 내부의 대장균 90%를 유출시키는 지표면유출량 Q_{90surf} 1시간 동안 토양 내부의 대장균 90%를 유출시키는 중간류 유출량 Q_{90intf} 1시간 동안 토양 내부의 대장균 90%를 대수층으로 유출시키는 지하수충전량 Q_{90soaq} 에 대해 민감도 분석을 수행하였다.

Table 2. The reference parameter values applied to the E. coli model

Types	Parameter	reference value (unit)
Manure, Liquid fertilizer	N_{coli}	5,000 (MPN/kg)
Soil characteristics	$K_{t,20_{soil}}$	0.05 (/hr)
	IPC_{soil}	0.000001 (m ² /J)
	θ_{soil}	0.1 (-)
Water characteristics	$K_{t,20_{water}}$	0.05 (/hr)
	IPC_{water}	0.0000005 (m ² /J)
	θ_{water}	0.1 (-)
Runoff discharge in soil	Q_{90inlf}	100 (mm/hr)
	Q_{90surf}	100 (mm/hr)
	Q_{90intf}	100 (mm/hr)
	Q_{90soaq}	100 (mm/hr)

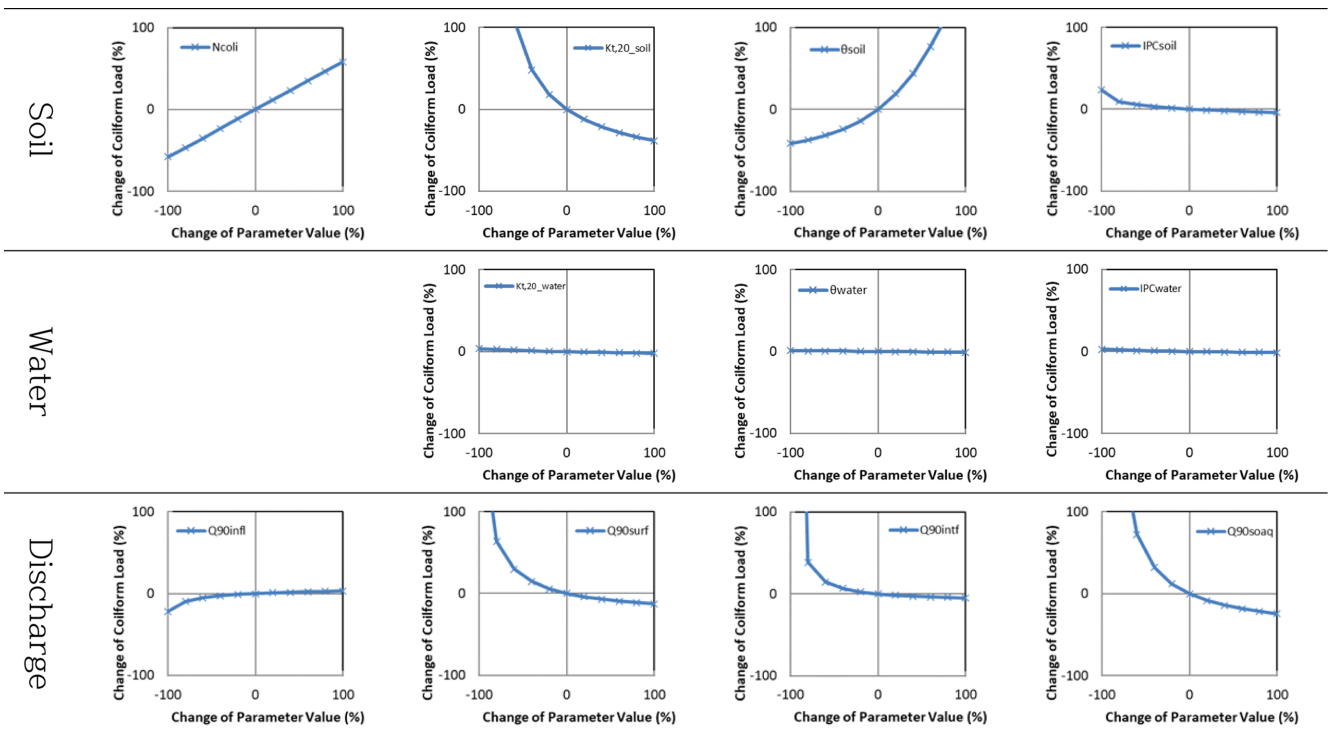


Fig. 4. Sensitivity graph for each of the parameters.

매개변수 변화에 따른 유역출구에서의 대장균유출량 변화를 분석하였으며(Fig. 4), 이때 각 매개변수를 기준값으로부터 ±20% 씩 8회 변화(+80%, +60%, +40, +20, -20%, -40, -60%, -80%)를 주었다. 평가의 일관성을 위해 매개변수별 동일한 변환율을 적용하였다. 다만, 유역의 유출특성과 강우조건에 따라 매개변수가 대장균 유출에 미치는 영향은 달라질 수 있을 것으로 판단된다.

식 (5)를 이용하여 매개변수별 민감도 지수분석을 수행한 결과 대장균 농도에 가장크게 민감한 영향을 주는 매개변수는 토양에서

대장균의 20°C 기준 온도 사멸계수($K_{t,20_{soil}}$)인 것으로 분석되었다. 그 다음으로는 현재 온도를 고려한 $K_{t,20_{soil}}$ 조정 계수(θ_{soil}), 1시간 동안 토양 내부의 대장균 90%를 대수층으로 유출시키는 지하수층 전량(Q_{90soaq})이 민감한 영향을 주는 매개변수인 것으로 분석되었다 (Fig. 5).

$$SI = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_r(i)| \quad (5)$$

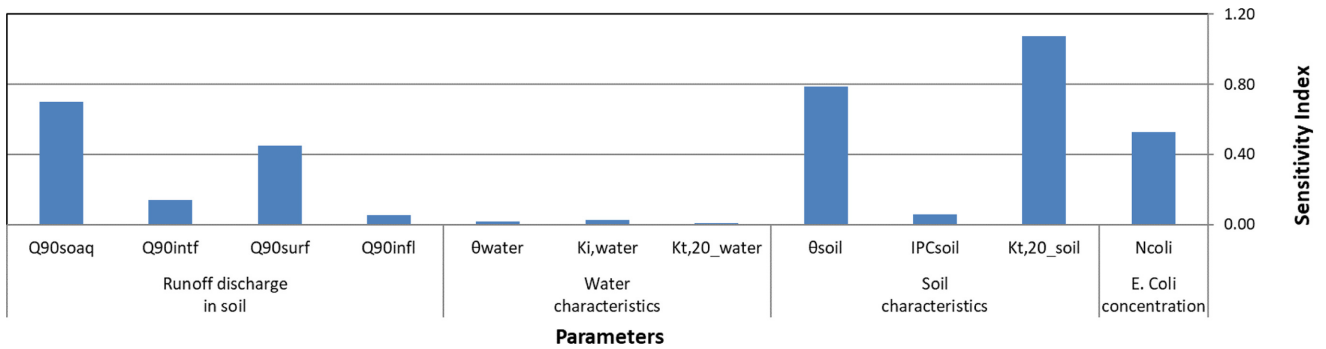


Fig. 5. Sensitivity index for each of the parameters.

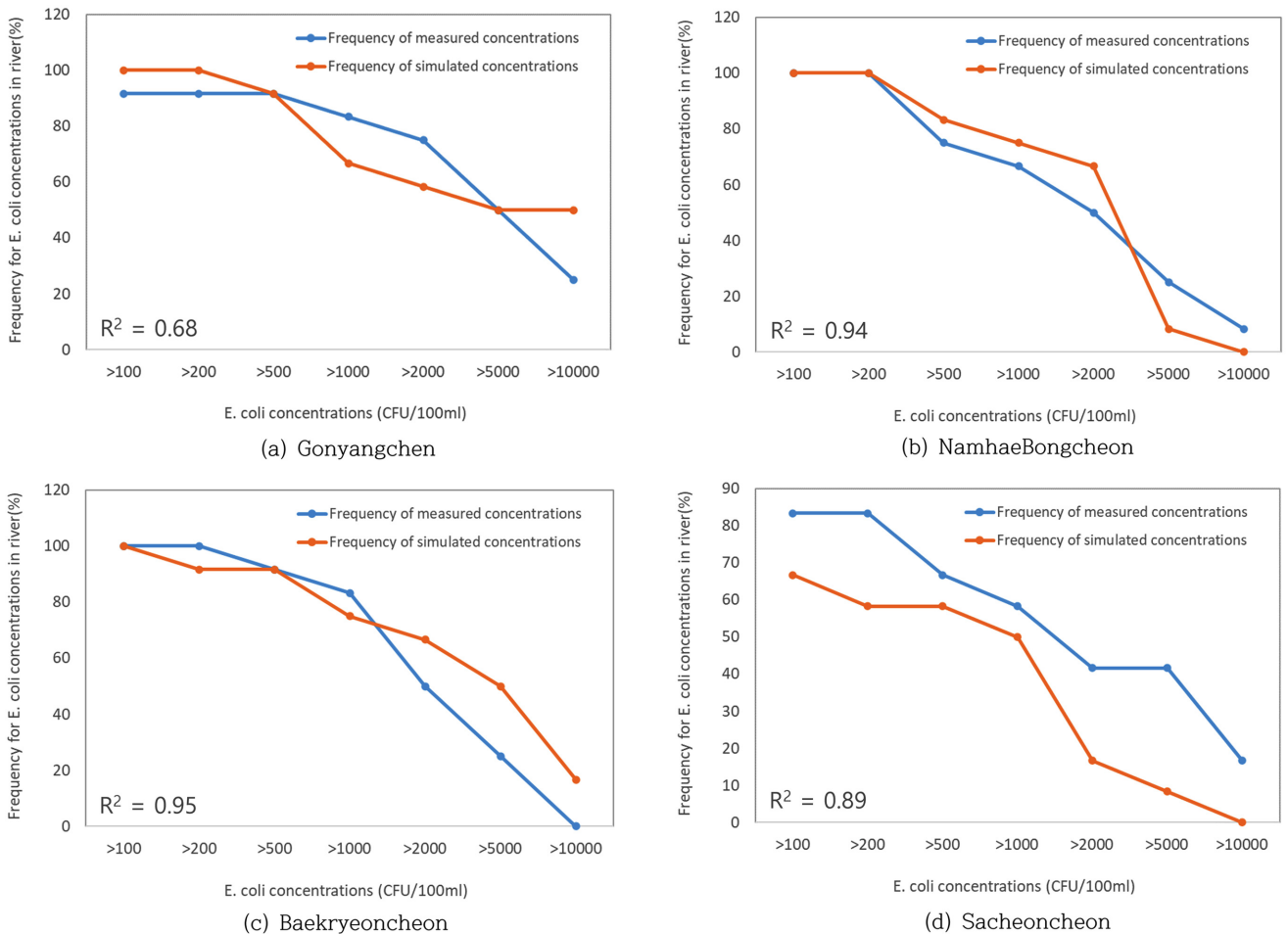


Fig. 6. Cumulative frequency curves (%) for E. coli concentrations at monitoring stations for observed data and simulated data.

$$S_r = \frac{\Delta O/O_b}{\Delta P/P_b} = \frac{(O-O_b)/O_b}{(P-P_b)/P_b} \quad (6)$$

여기서 SI = 민감도 지수

i = 매개변수 변환 순서

S_r = 상대 민감도

N = 매개변수 변환 횟수

O_b = 기준 매개변수에 의한 모의값

O = 변화된 매개변수에 의한 모의값

P_b = 기준 매개변수 값

P = 변화된 매개변수 값

3.2 대장균 모듈 적용 및 보검정 결과

개발된 대장균 모듈에 대한 적용 및 보검정을 수행하였다. 모의 기간동안 환경부 수질측정망 지점의 총대장균군 농도는 곤양천 100~78,000 CFU/100 ml, 남해봉천 240~26,000 CFU/100 ml, 백련천 430~8,400 CFU/100 ml, 사천천 30~11,600 CFU/100 ml의 범위를 보였다. 각 관측값을 모의값과의 PBIAS를 산정해본 결과 곤양천 지점은 -63.1, 남해봉천 지점은 41.5, 백련천 지점은 -120.5, 사천천 지점은 72.8인 것으로 나타나 총대장균군의 모의 농도는 실측치에 비해 적거나 과도하게 산정되는 것으로 나타났다. 절대값 기준으로는 41.5~120.5의 범위로 농도의 변화폭이 큰 대장균군의 특성상 TOC와 같은 다른 분석지표와 같은 수준의 모의는 어려울 것으로

판단된다. 또한 강우시 변동성도 크기에 기존 유역모델 정확도를 정량적으로 평가한 지표를 사용하기엔 한계가 따라 선행연구에서도 다른 방법을 이용하여 평가를 수행한 바 있다. 본 연구에서는 Morgane *et al.*[2011]이 사용했던 방법과 동일하게 대장균의 농도 분포를 누적도수곡선으로 나타내고 이를 이용하여 농도분포의 상관성 검토를 수행하였다. 보정 대상이 되는 4개 하천의 모의치와 관측치 각각의 농도분포 누적도수곡선을 비교한 모습은 그림 Fig. 6과 같다. 누적도수간의 상관관계를 살펴보면 R²값이 곤양천의 경우 0.68, 남해봉천은 0.94, 백련천과 사천천은 각각 0.95와 0.89로 전체적으로 값의 분포 상관성은 높은 것으로 평가되었다. 다만, 전체 경향은 비슷하나, 사천천의 경우 값이 모의치의 누적도수곡선이 관측치보다 모두 낮았다. 또한 곤양천의 경우 R² 값이 0.68로 비교적 낮은 것으로 평가되었는데 이는 곤양천의 모의치 농도범위가 누적도수곡선의 기준농도에 비해 넓기 때문인 것으로 판단된다. 각 지점의 측정결과와 모의결과의 시계열 그래프는 Fig. 7~10과 같다. 모의기간 동안의 모의치 농도범위를 살펴보면 곤양천은 38~772,250 CFU/100 ml, 남해봉천은 7~133,394 CFU/100 ml, 백련천 및 사천천은 각각 14~105,449 CFU/100 ml, 8~36,966 CFU/100 ml의 범위를 보여 네 지점 모두 관측치에 비해 농도 분포 범위가 넓게 모의되었으며, 일부 결과에서 모의치가 관측치의 범위와 유사하거나 농도변화를 재현하는 것으로 판단된다. 하지만 현 수준보다는 모듈 모의 결과의 농도 범위 및 재현성이 개선되고 더 많은 데이터를 이용

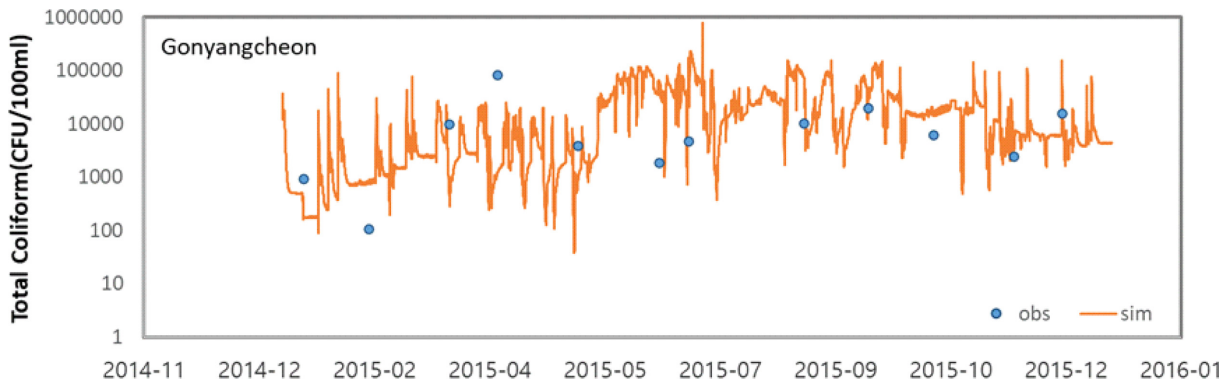


Fig. 7. Comparison of the simulated E. coli concentrations with the total coliform concentrations measured at the Gonyangchen station.

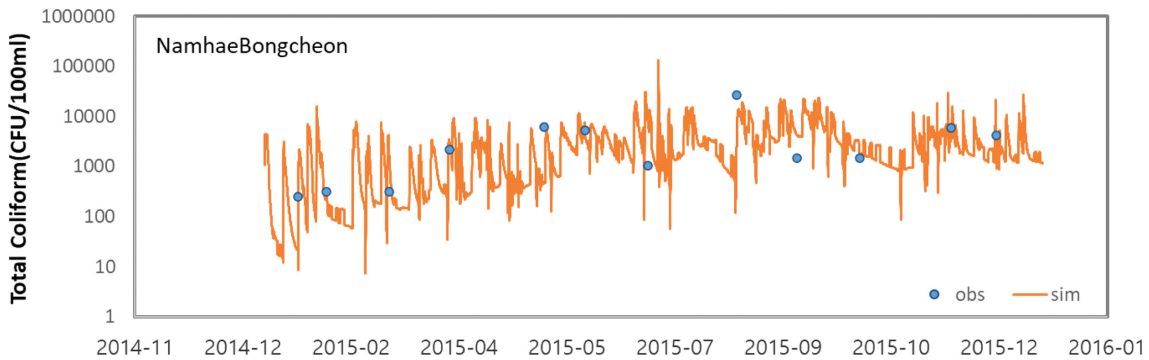


Fig. 8. Comparison of the simulated E. coli concentrations with the total coliform concentrations measured at the NamhaeBongcheon station.

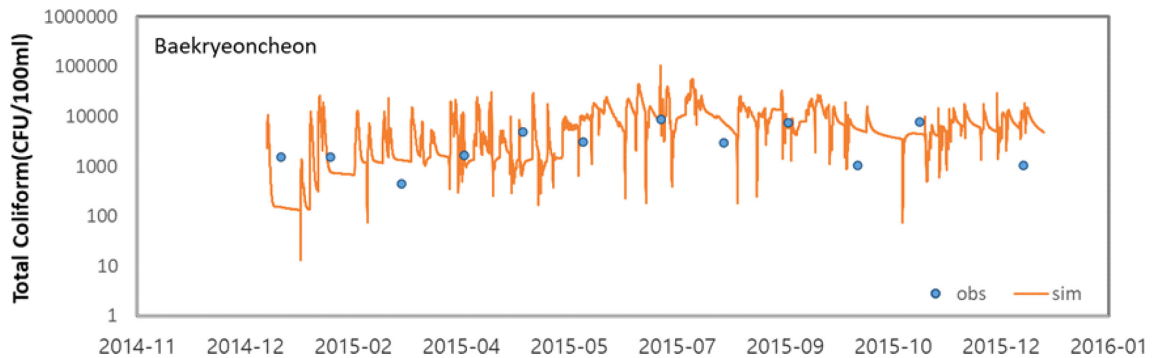


Fig. 9. Comparison of the simulated *E. coli* concentrations with the total coliform concentrations measured at the Baekryeoncheon station.

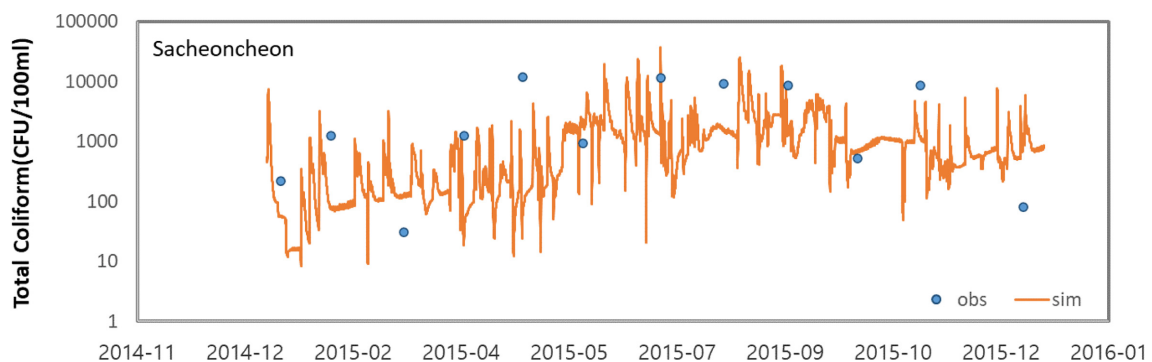


Fig. 10. Comparison of the simulated *E. coli* concentrations with the total coliform concentrations measured at the Sacheoncheon station.

한 모듈의 검증 작업이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2022년도 국립수산과학원 수산과학연구사업(R2022054)의 지원으로 수행되었습니다.

4. 결 론

본 연구에서는 유역규모에서의 대장균 유출이 수문과정에 지배적인 영향을 받는 점을 고려하여, 국내 수문특성을 반영하고있는 유역모델 STREAM 상에서 대장균의 사멸과 유출 과정을 모의할 수 있는 대장균 거동 모듈을 개발하였다. 이와 함께 개발된 모듈을 이용하여 우리나라의 전형적인 농업지역 등의 수문현상을 반영하여 대장균 거동을 정량적으로 모의함으로써 개발된 대장균 거동 모듈의 적용성을 평가하였다. 먼저 매개변수 민감도 분석을 수행하였으며 그 결과 대장균 농도에 가장 크게 민감한 영향을 주는 매개변수는 토양에서 대장균의 20 °C 기준 온도 사멸계수($K_{t,20,soil}$)인 것으로 분석되었다. 적용성 평가를 위해 강진만 유역에 위치한 환경부 수질 측정지점의 데이터를 이용하여 보검정을 수행한 결과 관측값과 모의값의 PBIAS는 절대값 기준으로 41.5%~120.5%의 범위를 보였다. 또한 대장균의 농도분포를 누적도수곡선으로 나타내고 이를 이용하여 농도분포의 상관성 검토를 수행하였다. 4개 하천의 모의치와 관측치 각각의 농도분포 누적도수곡선의 R²값은 0.68~0.95의 범위를 보여 농도값의 분포 상관성은 높은 것으로 평가되었다. 다만, 개발된 대장균 거동 모듈의 신뢰성 확보를 위해서는 관련된 입력자료 및 매개변수에 대한 추가적인 연구가 필요하며, 이를 바탕으로 모델 정확도를 개선하기 위한 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] Abbas, A., Baek, S., Silvera, N., Souleuth, B., Pachepsky, Y., Ribolzi, O. and Cho, K.H., 2021, In-stream *Escherichia coli* modeling using high-temporal-resolution data with deep learning and process-based models. *Hydrology and Earth Syst. Sciences*, 25(12), 6185-6202.
- [2] Brookes, J.D., Antenucci, J., Hipsey, M., Burch, M.D., Ashbolt, N.J. and Ferguson, C., 2004, Fate and transport of pathogens in lakes and reservoirs, *Environ. Int.*, 30(5), 741-759.
- [3] Cho, H.L., Jeong, E.S. and Koo, B.K., 2015, Development of a Hybrid Watershed Model STREAM: Model Structures and Theories, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 31(5), 491-506.
- [4] Cho, K.H., Pachepsky, Y.A., Kim, J.H., Kim, J.W. and Park M.H., 2012, The modified SWAT model for predicting fecal coliforms in the Wachusett Reservoir Watershed, USA. *Water Res.*, 46(15), 4750-4760.
- [5] HELLWEGER Ferdi L., MASOPUST Petr., 2008, Investigating the Fate and Transport of *Escherichia coli* in the Charles River, Boston, Using High-Resolution Observation and Modeling 1.

- JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc., 44(2), 509-522.
- [6] Jamieson, R., Gordon, R., Joy, D. and Lee, H., 2004, Assessing microbial pollution of rural surface waters A review of current watershed scale modeling approaches, *Agric. Water Manag.*, 70(1), 1-17.
- [7] Jeong, E.S., Cho, H.L. and Koo, B.K., 2018, Estimation of Pollution Loads to the Geum-River Estuary for Precipitation Conditions Using a Semidistributed Watershed Model STREAM, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 21(3), 216-227.
- [8] Kim, J.H., Jeong, H.S., Kang, M.S., Song, I.H. and Park, S.W., 2012, Simulation of 10-day Irrigation Water Quality Using SWAT-QUALKO2 Linkage Model, *J. Korean Soc. Agric. Eng.*, 54(6), 53-63.
- [9] Kim, J.S., Yoon, C.G., Rhee, H.P. and Jang, J.H., 2009, Application of BASINS/HSPF for E.coli Simulation and Microbial Risk Assessment in Hwa-Sung Basin, in *proc. of Korean Society on Water Environment·Korean Society of water & Waste-water Fall Meeting*, Songdo, Korea, 189-190.
- [10] Lee, T.H., Cho, H.L., Park, S.E., Kim, Y.M., Kim, C.S. and Kim, J.H., 2019, Estimation of Land-Based Pollution Loads to Jaranman-Saryang Island areas for export using a Watershed Model, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 22(4), 226-235.
- [11] Morgane, B., Jean-C, L.S., Nicolas, P., Claire, B., Marc, R. and Monique, P., 2011, Modeling of Escherichia coli fluxes on a catchment and the impact on coastal water and shellfish quality 1. *JAWRA J. of the Am. Water Resources Association*, 47(2), 350-366.
- [12] National Institute of Environmental Research, Water Environment Information System, http://water.nier.go.kr/web/board/2/1509/?page=2&pMENU_NO=103, 2011-2015 (accessed 2021. 12.04).
- [13] Oliver, D.M., Heathwaite, L., Haygarth, P.M. and Clegg, C.D., 2005, Transfer of Escherichia coli to water from drained and undrained grassland after grazing, *J. Environ. qual.*, 34(3), 918-925.
- [14] Reddy, K.R., Khaleel, R. and Overcash, M.R., 1981, Behavior and transport of microbial pathogens and indicator organisms in soils treated with organic wastes. *J. Environ. Qual.*, 10(3), 255-266.
- [15] Thériault Amélie, Duchesne Sophie, 2015, Quantifying the fecal coliform loads in urban watersheds by hydrologic/hydraulic modeling: Case study of the Beauport River watershed in Quebec, *Water*, 7(2), 615-633.
- [16] Thomann, Robert V., Mueller, John A., 1987, *Principles of surface water quality modeling and control*, Harper & Row Publishers.
- [17] Tian, Y.Q., Gong, P., Radke, J.D. and Scarborough, J., 2002, Spatial and temporal modeling of microbial contaminants on grazing farmlands, *J. Environ. Qual.*, 31(3), 860-869.

Received 27 June 2022

1st Revised 26 August 2022, 2nd Revised 9 February 2023,

3rd Revised 7 August 2023

Accepted 16 August 2023