

화옹유역 남양천의 수질관리를 위한 QUAL2E 적용과 위해성 평가

장재호 · 윤춘경* · 정광욱 · 김형철

(건국대학교 환경과학과)

Application of the QUAL2E Model and Risk Assessment for Water Quality Management in Namyang Stream in Hwaong Polder. *Jang, Jae-Ho, Chun-Gyeong Yoon*, Kwang-Wook Jung and Hyung-Chul Kim (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)*

The Namyang Stream in Hwaong polder was planned for several water uses including recreation, where people can contact the water and consume some amount during the recreational activity. A human health risk was assessed from exposure to *E. coli* in the Namyang Stream, which receives partially treated wastewater from watershed. The QUAL2E model was applied to simulate stream water quality, and this model was calibrated and verified with field monitoring data. The calibration result showed a high correlation coefficient of greater than 0.9. The mean concentration of *E. coli* in the Namyang Stream from the QUAL2E output was in the range of 5,000~8,000 MPN 100 mL⁻¹, which exceeded national and international guidelines. The Beta-Poisson was used to estimate the microbial risk of pathogens ingestion and the Monte-Carlo analysis (10,000 trials) was used to estimate the risk characterization of uncertainty. The Microbial risk assessment showed that the risk ranged from 7.9×10^{-6} to 9.4×10^{-6} . Based on USEPA guidelines, the range of 10^{-6} to 10^{-8} was considered reasonable levels of risk for communicable disease transmission from environmental exposure, and the risk above 10^{-4} was considered to be in the danger of infection. Therefore, water quality of the Namyang Stream might not be in the danger of infection although it exceeded national and international guidelines. However, it was in the range of communicable disease transmission, and thorough wastewater collection and treatment at the source is recommended to secure safe recreation water quality.

Key words : Microbial risk assessment, Monte-Carlo simulation, QUAL2E model, recreation water, Beta-Poisson model, *E. coli*

서 론

하천은 생명의 근원인 물의 이동 통로이며, 생태계 순환 과정의 중심축으로서 하천환경이 국민생활에 미치는 영향은 매우 크다. 본 연구의 대상인 화옹유역은 방조제

가 체결된 후 수질관리상의 문제로 화옹호에 염도가 높은 해수가 유통되고 있으나, 일부 노출된 간석지는 간수 등에 의한 염의 세탈이 이루어지면서 해안성 염습지에서 담수습지로의 천이가 활발하게 일어나며 다양한 생물 서식환경 및 경관이 창출될 것으로 예상된다. 이러한 생태환경이 변함에 따라 간척 중기와 말기로 구분하여 개발

* Corresponding author: Tel: (02) 450-3747, Fax: (02) 446-2543, E-mail: chunyoan@konkuk.ac.kr

용도를 크게 생물 서식처 및 생태 체험·교육 공간, 수질 정화·관리 공간, 편의·관리·상업 공간, 레저·휴양 공간 등으로 구상하였고, 간척 말기에 서식처 및 기능을 보전하는 범위 내에서 방문자의 심신 수련 및 건전한 야외 활동이 추가되었다(성지영, 2005). 화옹간척지구를 생태 공원 및 레저·휴양 공간으로 조성하기 위해서는 인공 담수호 및 상류 하천의 수질 개선 및 생물 서식공간과 다양한 토지 용도가 고려되어야 한다. 화옹유역은 수질이 양호한 상류부에서 비도시 시가지역을 거치면서 개별 정화조 유출, 불명수의 유입, 축산 및 비점원오염으로 인해 급격하게 수질이 악화되는 특징을 갖고 있다. 그 과정에서 하구 담수호는 유역말단에 위치하는 지형적인 특징으로 많은 양의 오염물질이 유입된다. 따라서 건강한 수생태계를 유지하기 위해서는 특별한 노력이 필요하다.

하천수질의 적절한 관리를 위해서는 유역 내에서 발생할 수 있는 물리, 화학, 생물학적인 현상을 이해해야 하고 다양한 상황을 잘 묘사할 수 있는 수질모형의 적용이 필요한데, 이를 위해 많은 과학적 연구가 수행되어 왔고, 이론과 실험을 바탕으로 여러 가지 수질 모형들이 개발되었다. 국내 모형연구가 시작된 이래로 지금까지 하천 수질모의에 가장 널리 사용되어 온 QUAL2E는 USEPA가 수년간 환경기술을 통합하여 개발한 다인자 하천 수질모형이다(Brown and Barnwell, 1985). 국내에서는 전국 주요 하천 기초조사시 QUAL2E 모형을 사용하였고, 한강유역 환경보전 종합계획 사업시 적용된 바 있다(환경부, 1983). 박청길(1993a, b) 등은 QUAL2E 모형을 낙동강 유역에 적용하여 용존산소에 대한 물리, 화학 및 생물학적인 과정을 규명하였다. 이건호(1999) 등은 한강 수계 상류에 위치하고 있는 평창강과 주천강 유역을 대상으로 QUAL2E 모형을 이용하여 유역 오염부하량 저감 효과 및 유출 토사의 영향을 예측한 바 있고, 충청남도 보건환경연구원(2005)은 유구천을 대상으로 QUAL2E 모형을 이용하여 유구천의 수질오염도와 강수량에 따른 하천 유량의 변화가 하천의 수질 변화에 어떠한 영향을 미치는가를 평가하였다. 국외에서는 Tolman(1992)과 DeGasperi and Khangaonkar(1997)가 하천의 DO 개선과 조류 제어 위해 적용하였고, Steynberg *et al.*(1995)과 Venter *et al.*(1997)은 QUAL2E 모형을 사용한 미생물의 수질관리 가능성에 대하여 논의하였다. Wangne and Tisdale(1996)은 호소에서의 유로에 따른 인의 거동을 평가하기 위해 QUAL2E 모형을 적용하였고, 대만의 Kao-Ping River에서는 수자원의 재분배와 오염원 방지법의 효과를 조사하기 위해 적용하였으며(Ning *et al.*, 2001), 미처리된 하수가 유입되는 지표수에서의 세제 성분 등의 오염물질

이 생태에 미치는 위험을 평가하기 위해 적용하였다(McAvoy *et al.*, 2003). 이와 같이 QUAL2E 모형은 하천의 수질관리를 위해 다양하게 적용되어 왔다.

하천이나 담수호에서 수영, 수쿠버다이빙, 낚시, 윈드서핑 등의 레저활동을 즐기는 동안 오염된 물을 섭취하거나 접촉할 경우 병원성 세균에 의한 건강상의 위험성이 높다. 국내·외에서는 수영이나 수상레저 등의 활동과 관련해서 병원·위생학적인 안전성 확보가 우선적으로 중요하기 때문에 일반적으로 지표미생물로 사용하고 있는 대장균 군(total coliform, TC), 분원성 대장균 군(fecal coliform, FC), 대장균(*E. coli*) 등을 기준으로 삼아 엄격히 규제하고 있으며, 국제기관에서는 레저용수에 대한 수질기준을 제시하고 있다. USEPA(1986)는 레저, 어패류의 양식, 음용수 등의 물 사용에 따른 보건위생을 위하여 분변성 지표미생물을 적용한 환경 수질기준을 제안하였다. 유럽공동체에서는 수영용수에 대한 지표미생물인 TC, FC, Fecal streptococci, Salmonella 및 Enteroviruses의 수질기준에 대해 제안한 바 있고(EC, 1976), UNEP/WHO(1996)에서는 지중해에 대한 수영용수 환경 수질기준을 제안하였다. WHO(1998)에서는 미생물 기준을 포함한 레저용수 수질기준을 제시하였으며, 인체 위해성 및 수질기준에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 화옹 간척지가 휴양공간으로 안전하게 이용되기 위해서는 담수호와 상류 유역의 수질관리 뿐만 아니라 더불어 위해성 평가를 통한 체계적인 안전성 검토가 필요하다. 위해성 평가를 위해서는 역학조사를 통한 접근이 필요하지만, 국내 하천에서 레저활동으로 인해 발생할 수 있는 위생 문제에 대한 역학적 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 하천이나 담수호에서 레저나 여가 활동시에 오염된 물을 섭취하여 발생할 수 있는 인체 위험에 대해 초점을 두었다. QUAL2E 모형을 이용하여 화옹유역의 남양천 구간의 일반수질인자 및 *E. coli* 농도를 모의하여, 레저활동간 *E. coli*와 같은 병원성 미생물이 인체에 미칠 수 있는 영향에 대하여 미생물학적 위해성 평가를 통하여 화옹 담수호의 안전한 용수 이용에 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

1. 연구 대상 지역

대상 지역은 화옹 간척지의 상류 유역으로 동경 126° 45'~126° 55', 북위 37° 10'~37° 15'에 위치하고 있다. Fig. 1에서와 같이 남양천, 자안천, 어은천 등 3개의

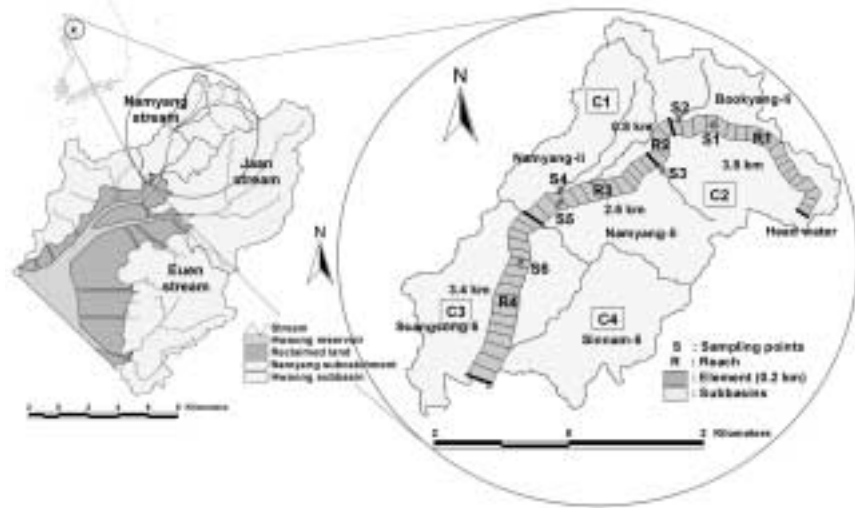


Fig. 1. QUAL2E segmentation and sampling locations in the Namyang Stream of Hwaong watershed.

Table 1. Land use of Hwaong subbasins.

Sub-basin	Residential		Paddy		Upland		Forest		other		Total area (ha)
	Area (ha)	%	Area (ha)	%	Area (ha)	%	Area (ha)	%	Area (ha)	%	
C1	40.7	9.3	112.7	25.8	90.1	20.7	191.5	43.9	1.3	0.3	436.2
C2	124.6	10.1	181.7	14.8	257.0	20.9	631.2	51.4	34.1	2.8	1228.6
C3	7.4	1.7	175.6	41.0	17.6	4.1	225.6	52.7	1.9	0.4	428.1
C4	28.5	6.0	179.3	37.5	114.1	23.9	149.9	31.4	6.4	1.3	478.2
Total	201.1	6.8	649.3	29.8	478.8	17.4	1198.2	44.8	43.7	1.2	2571.1

소규모 하천이 담수호로 유입되고 있으며, 남양천의 경우에는 수질이 양호한 상류부에서 비도시 시가지지역인 남양리를 지나면서 급격하게 수질이 악화되는 특징이 있다. 화옹유역의 토지 이용은 농경지와 산림이 대부분을 차지하는 전형적인 비도시지역의 특성을 나타내고 있다. 남양천 유역은 Table 1과 같이 산림과 농경지가 각각 87% 이상을 점유하고 있고, C1과 C2와 같이 도시화가 진행된 지역은 주거지역이 약 9~10%로 대부분의 인구와 경제 활동이 집중하고 있다. 이 지역 하천에서 조사되는 지표성 미생물의 농도가 다른 지역에 비하여 높게 나타났는데, 그 이유는 인구가 밀집되어 있고 정화조 유출이나 불명수의 유입이 주요 오염원인 것으로 추정된다.

2. 수질 측정 및 분석

시료 채취는 화옹 담수호로 유입되는 세 개의 주요하천 중 남양천에서 이루어졌으며, 남양천의 구간별로 S1, S2, S3, S4, S5 및 S6의 6개 지점에서 시료를 채취하였다. 유량은 유속계 (Swoffer Model 3000)를 이용하여 하천의

Table 2. Analytical methods for water quality constituents.

Constituents	Standard methods
DO	SM 4500-C
BOD ₅	SM 5210-B
SS	SM 2540-D
T-N, NO ₃ -N	SM 4500-B
NO ₂ -N	SM 4500-B
NH ₃ -N	SM 4500-F
T-P, PO ₄ -P	SM 4500-D
<i>E. coli</i>	SM 9221-F

유속을 측정하였고, 수심을 측정하여 함께 계산하였다. 수질 분석항목은 DO, SS, BOD₅, T-N, NO₃-N, NO₂-N, NH₃-N, T-P, PO₄-P 및 *E. coli*이며, 모든 항목은 Standard Methods (APHA, 1995)에 의해 분석하였다 (Table 2).

3. QUAL2E 모형 적용

본 연구에서 모형에 적용한 남양천 유로 연장은 10.6

Table 3. Monitoring data at sampling sites.

Sampling site	S1		S2		S3		S4		S5		S6	
	C	V	C	V	C	V	C	V	C	V	C	V
Flow ($\times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)	0.5	1.0	42.6	14.0	19.9	5.0	280.6	93.0	343.6	34.0	363.6	127.0
BOD ₅ (mg L ⁻¹)	1.3	4.9	2.9	11.5	1.5	3.4	49.4	48.5	1.4	6.4	11.9	17.0
T-N (mg L ⁻¹)	6.5	5.7	3.7	5.8	7.0	7.6	11.4	12.7	6.0	7.0	6.2	10.4
NH ₄ -N (mg L ⁻¹)	0.2	1.1	0.5	2.6	1.4	1.3	5.0	8.4	0.5	1.5	2.7	5.3
T-P (mg L ⁻¹)	0.17	0.65	0.17	0.85	0.18	0.18	0.66	0.93	0.18	0.43	0.53	0.87
<i>E. coli</i> (MPN 100mL ⁻¹)	6,400	1,920	6,400	6,400	6,400	1,000	15,000	6,000	1,100	1,800	7,200	6,000

C: calibration data (sampled on 16 December 2004), V: verification data (sampled on 17 August 2005).

km이고, 4개의 모의 channel로 구분하였으며, element의 길이는 0.2 km로 하였다. 본류 구간은 reach 1~4까지이며, S2, S3 및 S4가 포함된 3개의 하천 지류에서 점오염원이 유입되는 것으로 구성하였다. Fig. 1에서와 같이 R1, R2, R3 및 R4의 연장은 각각 3.8 km, 0.8 km, 2.6 km 및 3.2 km이며 19, 4, 13 및 16개의 element로 각각 분할하였다.

모형의 보정 및 검정에 이용된 하천 유량과 수질자료는 각각 현장에서 실측하였다. 조사는 상류의 유입하천과 점오염원으로 가정된 유입지천을 포함하여 6개 지점에서 실시하였다. 모형 입력자료 및 보정을 위해 2005년 8월 17일에 측정한 자료를 이용하였고, 검정자료로는 2004년 12월 16일에 측정한 자료를 이용하였다. 각 지점의 유량과 수질은 Table 3에 나타내었다. 남양천의 수질은 상·하류와 시기에 따라 차이가 있었고, 하천 말단인 S6 지점에서는 BOD₅의 경우 58.2 mg L⁻¹, T-N의 경우 12.7 mg L⁻¹, 그리고 T-P의 경우 0.53 mg L⁻¹로 높게 측정되었으며, 분변성 미생물지표인 *E. coli*도 15,000 MPN 100 mL⁻¹로 높게 검출되었다.

4. 위해성 평가 방법

인체 위해성 평가는 사람이 환경적 위험에 노출되었을 경우, 발생 가능한 영향을 정성 또는 정량적으로 분석하는 과정이다. 즉 인체 유해물질에 대한 역학적, 임상적, 독성학적 및 환경학적 연구결과로부터 수학적 모델을 이용해 노출 조건하에서 인간에 미칠 수 있는 위해 범위를 예측하고 평가하는 것이다. 이러한 평가는 위험성 확인 (hazard identification), 노출 평가 (exposure assessment), 용량-반응 평가 (dose-response assessment) 및 위해도 결정 및 불확실성 분석 (risk characterization)의 4단계를 통해 수행된다.

Beta-Poisson model은 음용수의 병원성 미생물에 의한 감염 위험을 평가하기 위해 개발되어 (Haas *et al.*, 1993)

광범위하게 사용되어 왔다. Beta-Poisson model은 1개의 미생물만으로도 감염을 일으킬 수 있다는 가정하의 경험적 모형이며 식 (1)과 같다.

$$P_I = 1 - \left[1 + \frac{N}{N_{50}} (2^{1/\alpha} - 1) \right]^{-\alpha} \tag{1}$$

여기서, P_I : risk of infection by ingesting pathogens in drinking water; N : number of pathogens ingested; N_{50} : number of pathogens that will infect 50% of the exposed population; α : slope parameter (The ratio N/N_{50} and P_I).

P_I 는 병원성 미생물을 섭취하였을 때 발생할 수 있는 위해도이며, N 은 섭취되는 미생물의 농도, N_{50} 는 섭취한 사람의 50%가 감염될 수 있는 농도, 그리고 α 는 섭취와 발병과의 상관관계를 나타내는 계수이다. 발병 가능성은 병원성 미생물에 감염될 경우 개인의 상태에 따라 질병으로 발전되지 않을 수도 있으며, 이는 개인적인 특성에 따라서 다르다. 따라서 충분한 조사에 의한 분석이 필요하지만, 섭취와 질병과의 뚜렷한 상관성을 찾아내는 것은 매우 어렵다. 발병 가능성은 $P_{D:i}$ 로 구할 수 있으며, 노출된 농도와는 관계없는 값이고 식 (2)와 같다.

$$P_D = P_{D:i} \times P_I \tag{2}$$

여기서, P_D : risk of infected person becoming diseased or ill; $P_{D:i}$: possibility of an infected person developing clinical disease.

발병 가능성은 장내바이러스의 경우 바이러스의 종류와 관찰 대상에 따라 1~97%까지 다양하다. 많은 데이터에 의해 정확한 발병 가능성이 확인되기 전까지는 일반적으로 중간값인 50%를 사용하는데 (Hass *et al.*, 1993), 본 연구에서도 50%로 가정하였다. 음용수 중 병원성 미생물을 섭취할 경우 보통 한 종류 이상이 포함되어 있으며 섭취량, 연령, 건강 상태, 그리고 민감도 등 다양한 형태의 실험 과정을 거쳐 정확한 발병 가능성을 확인할 수

있다. 질병감염에 의해 사망할 확률은 매우 낮지만, 무시할 수준은 아닌 것으로 보고되고 있다.

결과 및 고찰

1. QUAL2E 모형의 보정 및 검정

2회 측정된 현장 자료를 이용하여 보정 및 검정을 실

시하였다. 34개 반응계수 중 본 연구의 모의 대상 수질항목인 BOD, T-N 및 T-P의 생성 및 소멸에 관련된 것으로, 모의 결과에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 BOD 등 13개 항목의 반응계수를 결정하였고, 그 중 $K_1 \sim K_5$ 등의 주요 반응계수를 Table 4와 같다. 남양천에 대한 모형보정은 모델링의 시작지점인 head water와 각 reach의 끝지점의 유량과 수질을 경계조건으로 입력하여 모의 값과 실측값이 일치할 때까지 reach별로 각종 반응계수

Table 4. Coefficients used for sensitivity analysis.

Coefficients	Unit	General range	Final value	Lee <i>et al.</i> , 1992	Jun and Lee, 1993	Baek <i>et al.</i> , 1995	Andreja and Končan, 1996
BOD ₅ decay coefficient (K_1)	day ⁻¹	0.02 ~ 3.4	0.85 ~ 4.00	0.05 ~ 0.11	0.571	0.261 ~ 0.350	0.4 ~ 1.3
Reaeration (K_2)	day ⁻¹	1 ~ 100	1.30	0.3 ~ 0.4	-	-	3.5 ~ 10.6
BOD ₅ setting coefficient (K_3)	day ⁻¹	-0.36 ~ 0.36	0.35 ~ 0.36	0.2 ~ 0.8	0.078	-0.18 ~ 0.0	-
Sediment oxygen demand (K_4)	mg O ₂ m ⁻² · day	Variable	0.15	-	0.126	0.984 ~ 3.002	4.0 ~ 12.0
Coliform decay (K_5)	day ⁻¹	0.5 ~ 4.0	0.5 ~ 4.0	0.1 ~ 0.9	-	-	-

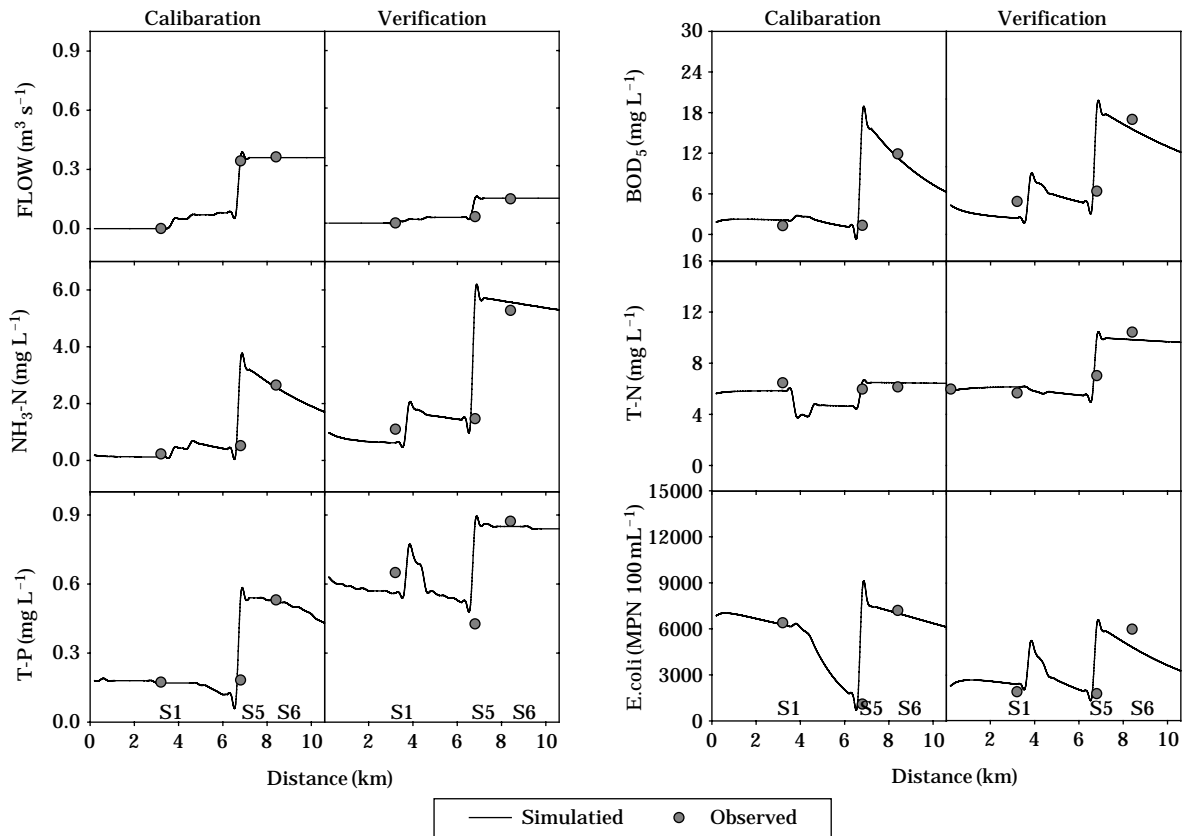


Fig. 2. Calibration and verification results of the Namyang Stream QUAL2E model.

를 수정하여 진행하였다. Fig. 2는 유량, BOD₅, NH₃-N, TN, TP 및 *E. coli*에 대한 보정과 검정을 실시한 결과이며 QUAL2E 모형은 각 수질항목별로 실측치에 대한 재현성이 높은 것으로 나타났다.

QUAL2E 모형의 보정 및 검정 결과에 대하여 통계용 전산프로그램인 SPSS (Ver. 12)를 이용하여 모형신뢰도 분석을 수행하였다. 신뢰도 분석은 상관계수(r)를 활용하였는데, 일반적으로 0.3 이하이면 약한 상관관계, 0.3~0.7은 보통의 상관관계, 0.7 이상이면 강한 상관관계를 의미한다(고광백 등, 1998). 본 연구에서는 검·보정 결과, 실측값과 모의값의 상관성은 상관계수가 보정시 0.90~0.99와 검정시 0.94~0.99로 높았다.

TC, FC 및 *E. coli*는 미생물적 측면에서 수질오염의 평가기준이 되는 지표생물로서, 미생물에 의한 오염으로부터 안전성의 평가 및 모니터링을 위해 일반적으로 사용되고 있다. TC는 자연계의 모든 대장균 군을 나타내며, FC는 온혈동물의 장에서 배출되는 분변성 대장균을 나타내는 항목이고, *E. coli*는 사람과 동물의 분변에 많이 존재하며, 신선 분변 1g 중에 10⁹개의 농도로 추정되고 있다(WHO, 1993). *E. coli*와 같은 병원성 미생물은 분변에 의한 오염을 보다 잘 표현하는 항목으로 음용수의 미생물학적 안전성을 평가하기 위해 오래전부터 사용되어 왔고(USEPA, 1986), 실제 *E. coli*는 장내 질병을 일으키며 구토, 설사, 심지어는 사망을 일으키기까지 하여 그 위험이 널리 알려져 있다. 분변성 미생물은 인간과 기타 온혈동물의 장내에 보편적으로 존재하는 지표미생물로서 분변성 미생물이 수계에 많다는 것은 질병을 일으킬 수 있는 병원성 세균이 존재할 확률이 크다는 의미이다. Erin *et al.* (2001) 등은 레저용수의 1회 채취한 시료에서 FC가 800 CFU 100 mL⁻¹ 수준까지 검출되었는데, FC가 240 CFU 100 mL⁻¹보다 높은 수준에서는 *Cryptosporidium*과 *Giardia*가 검출되었으며, 6~322 CFU 100 mL⁻¹ 범위에서도 장내 바이러스가 검출되었다고 보고한 바 있다. 일반적으로 처리되지 않은 하수나 비점오염원이 수계에 직접 방류되면 하천생태는 오염에 쉽게 노출되며, 그 오염된 하천환경을 이용하는 사람에게도 건강상의 영향을 크게 미칠 수 있다.

병원성 미생물지표는 휴양 용수, 음용수 및 수생태계의 보호를 위해 법률로 규제하고 있으며 미국의 TMDLs의 규제항목에 포함되어 있다(USEPA, 2001). 우리나라 수질환경기준을 살펴보면, 수영이 가능한 상수 용수 2급과 수산용수 1급에서 TC를 1,000 MPN 100 mL⁻¹로 제한하고 있다. USEPA (1986)는 담수호에서 하루에 1,000명의 수영자 중 8명이 발병할 수준으로 *E. coli*는 126 CFU

100 mL⁻¹, 그리고 enterococci는 33 CFU 100 mL⁻¹ 수준으로 휴양 용수 기준을 제안하였고, WHO (1998)는 해수에서 50 intestinal enterococci 100 mL⁻¹과 담수에서 400 *E. coli* 100 mL⁻¹를 기존 수영용수 수질기준에 추가하였다. EU (2002)는 해안에서 *E. coli*에 대하여 excellent quality 250 CFU 100 mL⁻¹와 good quality 500 CFU 100 mL⁻¹로 규제하고 있으며, UNEP/WHO (1996)에서는 12회 샘플 중 80%와 95%의 FC농도가 각각 100 MPN 100 mL⁻¹와 2,000 MPN 100 mL⁻¹ 이하로 규제되어야 한다고 제시하였다. 그 밖에 Poland나 전 USSR에서는 해양 레저용수 기준으로서 *E. coli*에 대해 각각 100 100 mL⁻¹ 이하와 1,000 100 mL⁻¹ 이하로 규제하고 있다(WHO, 1999). 본 연구에서 남양천 구간의 모의 결과 보건위생학적으로 중요한 지표인 *E. coli*의 경우 각 하천 구간마다 element를 평균한 값이 R1은 6.637 MPN 100 mL⁻¹, R2는 5.623 MPN 100 mL⁻¹, R3는 3.687 MPN 100 mL⁻¹, 그리고 R4는 6.759 MPN 100 mL⁻¹으로 모의되었고(Table 4), 휴양 용수에 대한 국내 및 국제적인 수질기준을 초과된 것으로 나타났다.

2. 위해성 평가

본 연구에서는 Beta-Poisson 모형을 사용하여 인체에 대한 미생물 위해성 평가를 하였다. 하천에서 레저활동 중에 오염된 하천수를 섭취했을 때 발생할 수 있는 감염 위험을 Hass *et al.* (1999)에 의해 보고된 $N_{50}=8.6 \times 10^7$ 과 $\alpha=0.1778$ 의 값을 인용하였으며, 인간이 하천에서 수영을 하는 동안 섭취할 수 있는 양을 50 mL hr⁻¹로 제안된 자료에 따라(Dennis, 2002), 본 연구에서도 최대 50 mL hr⁻¹ 섭취기준을 참고로 평가하였다. 본 연구에 사용된 N_{50} 와 α 값은 음용수로 2L를 섭취하였을 때 발생할 수 있는 위험도이며, 섭취량은 1/40 가량 적기 때문에 위험을 1/40로 낮추어 계산하였다.

불확실성을 감소시키기 위한 평가방법으로는 확률론적 위해성 평가를 이용하였는데, 이는 오염물질의 위해도를 평가할 때 사용된 각 인자들의 불확실성까지 포괄하여 고려하는 방법이다. 본 연구에서는 Monte-Carlo simulation을 이용하였으며(Fig. 3), Beta-Poisson모형의 적용에 앞서 QUAL2E 모형을 이용하여 모의된 각 하천구간별 element의 *E. coli* 농도에 대한 평균과 표준편차를 산정하였다. *E. coli* 예측 결과를 Beta-Poisson 모형에 입력하여 참고 섭취량인 50 mL hr⁻¹를 고려한 후 정구분포로 10,000회 반복하여 95% 신뢰구간의 위해도 값을 산정한 결과가 Table 5에 요약되어 있다.

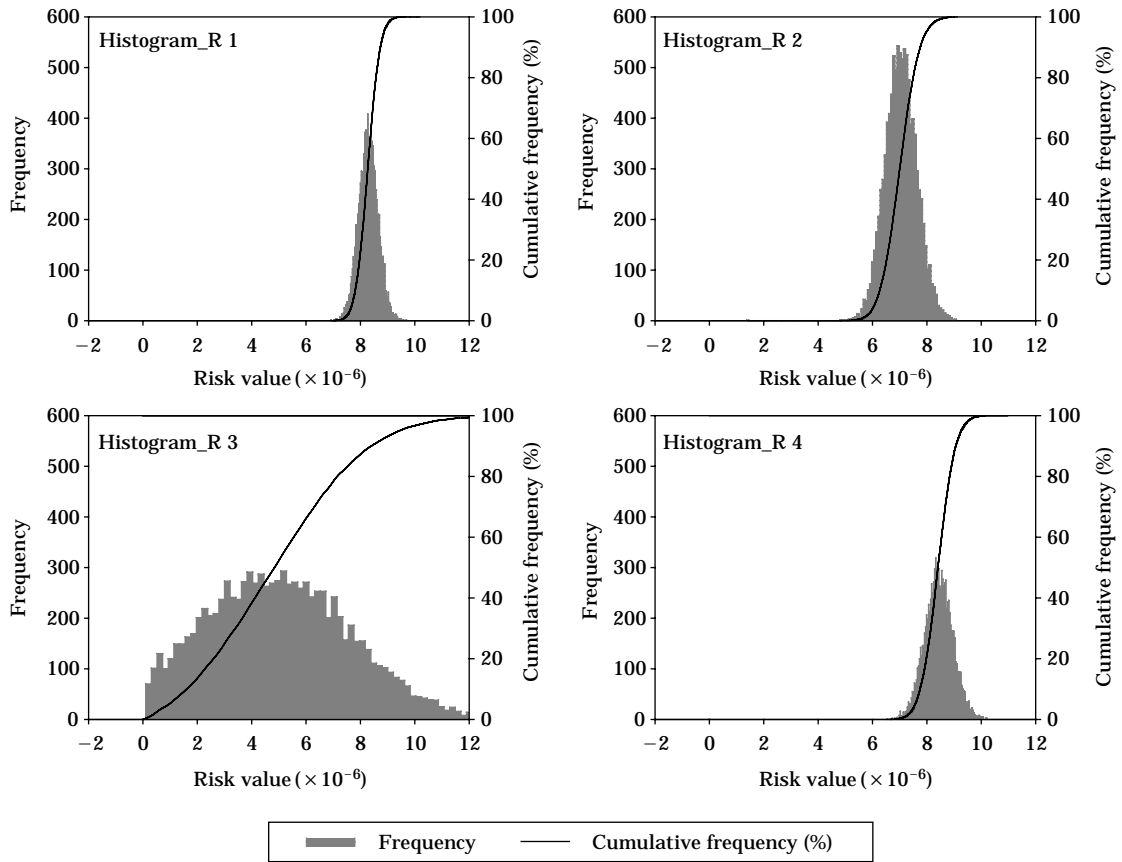


Fig. 3. Microbial risk assessment by Monte-Carlo simulation.

Table 5. Estimated *E. coli* concentrations and risk values in the Namyang Stream.

Reach		R1	R2	R3	R4
<i>E. coli</i> (MPN 100 mL ⁻¹)	Mean ^a	6,637	5,623	3,687	6,759
	S.D. ^b	292	471	2,326	412
Risk value		8.8 × 10 ⁻⁶	7.9 × 10 ⁻⁶	9.4 × 10 ⁻⁶	9.3 × 10 ⁻⁶

^a: geometric mean, ^b: standard deviation.

남양천의 각 구간별 위해도를 산정한 결과 R1은 8.8 × 10⁻⁶, R2는 7.9 × 10⁻⁶, 그리고 R3는 9.4 × 10⁻⁶로 평가되었고, 하천말단인 R4는 9.3 × 10⁻⁶로 하류로 이동하면서 점차 높은 수준의 위해도 값을 나타내었다. USEPA (1992)에서는 하수처리수를 작물에 관개한 경우 사람이 그 작물을 섭취하여 1년 동안 노출되었을 때 장내 질병에 관한 위해도 값이 10⁻⁴보다 작을 경우 질병에 대한 위험이 클것으로 판단하였다. 또한 위해도 값이 10⁻⁶ ~ 10⁻⁸은 자연계에 노출될 경우 질병의 이동이 가능한 수준이며 질병을 일으킬 가능성이 있는 수준으로 평가하고 있다. Tanaka *et al.* (1993)에 의하면 골프코스에 2차 처

리수를 추가처리 없이 관개할 경우 10⁻⁴ 이상의 위해도 값을 가지며, 염소로 소독한 2차 처리수로 관개시 10⁻⁴ ~ 10⁻⁶의 위해도 값을 나타내고, 소독하지 않을 경우에는 10⁻¹ ~ 10⁻²로 높다고 보고하였다.

본 연구에서 측정된 지표미생물의 위해성 평가 결과, 휴양용수로서 사용하는 데에는 큰 위험이 없을 것으로 판단된다. 그러나 10⁻⁶ ~ 10⁻⁸ 정도의 위해도에서는 질병의 이동이 가능한 범위라는 점을 고려한다면, 화용구역의 오염발생원에서 보다 충분한 처리를 통하여 하류측 수계의 수질이 휴양용수로서 사용하는 데에 적합하도록 적절한 조치를 취해야 할 것으로 생각된다.

적 요

화용구역 체절에 따라 조성되는 담수호와 유입하천에서의 레저활동이 안전하게 이루어지기 위해서는 인체건강에 안전한 수질의 확보가 우선되어야 한다. 이 지역의 수질안전을 평가하기 위해서 남양천 소유역에 대해 현장 자료를 이용하여 QUAL2E 모형을 적용하여 모의하였고 유량, BOD₅, NH₃-N, T-N, T-P 및 *E. coli*에 대한 검·보정을 실시하였다. 검·보정 결과에 의하면 모의값이 실측값을 잘 반영하였으며 모형의 검증을 위해 신뢰도를 분석한 결과 r값이 0.90 이상으로 높게 나타났다. 모의 결과에 의하면 현재의 조건에서는 남양천 구간의 지표미생물 *E. coli*의 농도가 국내 및 국제 휴양용수기준을 모두 초과할 것으로 예측되었다.

Beta-Poisson 모형에 의해서 예측한 결과값을 활용하여 위해도 값을 산정하였고, 인자들 간의 불확실성을 고려하여 Monte-Carlo simulation을 적용한 후 95% 신뢰구간의 위해도를 평가하였다. 위해도 평가 결과는 남양천 구간에서 $7.9 \times 10^{-6} \sim 9.4 \times 10^{-6}$ 으로 장내질병을 유발가능한 수준인 10^{-4} 보다 낮은 수준이었다. 그러나, 담수호와 직접 연결되어 낚시나 수영과 같은 레저활동을 하기에 수량이 풍부한 조건을 갖추고 있는 R4 지점 등의 경우에는 위해도 범위가 질병 이동이 가능한 수준인 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 의 수준을 나타내었다. 이러한 결과에 의하면, 현재 상태에서는 남양천 구간의 하천용수를 휴양용수로 사용하는 데에 직접적인 위해성은 낮으나, 질병 이동의 가능성이 있는 범위이다. 따라서 인체에 안전한 휴양용수 수질 확보를 위해서는 유역의 오염발생원에서 오폐수처리를 통해 하천 수질이 휴양용수로서 사용하는 데에 적합하도록 충분한 차집시설과 환경 기초시설의 설치 운영이 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 농림부 농림기술개발사업의 “BASINS 및 WASP을 이용한 화용구역과 호소의 통합수질예측시스템 개발”의 지원에 의해 수행되었습니다.

인 용 문 헌

고광백, 이재준, 전홍석. 1998. 환경통계학 (Statistics for Environmental Engineers), 동화 기술.

- 박청길, 송교육, 박혜영. 1993a. 낙동강 수계 수질관리를 위한 모델링 (1), 수질보전 9: 41-53.
- 박청길, 송교육, 안옥성. 1993b. 낙동강 수계 수질관리를 위한 모델링 (2), 수질보전 9: 54-66.
- 성지영. 2005. 화용지구 간척생태공원 토지이용계획, 2005년 한국농공학회 학술발표회 논문집 72.
- 이건호, 허인량, 정의호, 최지용, 이용석. 1999. 한강상류 유역 수질보전에 관한 연구 (2), 수질보전 15: 305-314.
- 충청남도 보건환경연구원. 2005. QUAL2E모형을 이용한 소하천 관리방안 연구.
- 환경부. 1983. 「한강유역 환경보전 종합계획사업」, 하천수질 예측부문.
- Andreja Drolc and J.Z. Končan, 1996. Water quality modeling of the river Sava, Slovenia, *Water Research* 30: 2587-2592.
- APHA. 1995. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19th Ed. American Public Health Association, Washington, D.C.
- Baek, K.W., S.H. Kim, K.Y. Han and J.W. Song. 1995. Water Quality Analysis by QUAL2E for the Downstream of the Han River. *Journal of Korean Society of Civil Engineers* 15: 451-461. (in Korean).
- Brown, L.C. and Jr.T.O. Barnwell. 1985. Computer program Documentation for the enhanced stream water quality model QUAL2E, U. S. Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory, GA. EPA/600-3-85/065.
- DeGasperi, C.L. and T. Khangaonkar. A steady-state model of the Willamette river: implications for flow control of dissolved oxygen and phytoplankton biomass. *In River Quality Dynamics and Restoration* (A. Laenena and D. A. Dunnette, eds), pages 163-171. New York: Lewis Publishers.
- Dennis, J.P. (ed). 2002. *Human and Ecological Risk Assessment: Theory and Practice*, A John Wiley & Sons, Inc., Publication.
- EC (European Commission). 1976. Council Directive of 8 December 1975 concerning the quality of bathing water (76/160/EEC). *Official Journal of the European Communities* L31: 1-4.
- Erin, K.L., L. Jerzy and B.R. Joan. 2001. Human enteric viruses and parasites in the marine environment, *Methods in Microbiology* 30: 559-588.
- EU (European Union), 2002. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council concerning the quality of bathing water. Document 2002/0254, European Union, Brussels.
- Hass, C.N., J.B. Rose, C. Gerba and S. Regli. 1993. Risk assessment of virus in drinking water. *Risk Analysis*.

- 13: 545-552.
- Haas, C.N., J.B. Rose and C.P. Gerba. 1999. Quantitative Microbial Risk Assessment, John Wiley, New York, Chapter 9: 396-440.
- Jun, K.S. and K.S. Lee. 1993. Application of QUAL2E to the Han River. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater* 4: 43-56. (in Korean).
- Lee, J.J., J.S. Lee and M.H. Lee. 1992. A Water Quality Simulation of the Geum River through the QUAL2E Model by the Development Works in the West Coastal Area. *Annual Report of the KNIT* 13: 163-174. (in Korean).
- McAvoy, D.C., P. Asscheleyn, C. Peng, S.W. Morrall, A.B. Casilla, J.M.U. Lim and E.G. Gregorio. 2003. Risk assessment approach for untreated wastewater using the QUAL2E water quality model. *Chemosphere* 52: 55-66.
- Ning, S.K., N.B. Chang, L. Yang, H.W. Chen and H.Y. Hsu. 2001. Assessing pollution prevention program by QUAL2E simulation analysis for the Kao-Ping River Basin, Taiwan, *Environmental Management*, 61: 61-76.
- Steynberg, M.C., S.N. Venter, C.M.E. de Wet, G. du Plessis, D. Hohls, N. Rodda and R. Kfir. 1995. Management of microbial water quality: new perspectives for developing areas. *Water Science and Technology* 32: 183-191.
- Tanaka, H., T. Asano and G. Tchobanoglous. 1993. Estimating the reliability of wastewater reclamation and reuse using enteric virus monitoring data. *Water Environment Federation 66th Annual Conference and Exposition*, Anaheim, California, USA. October 3-7.
- Tolman, R.A. 1992. Modified QUAL2E modeling of a stream acutely impacted by photosynthesis and respiration. *Water resources planning and management: saving a threatened resource*. In Search of Solutions, Proceedings of the Water Resources Sessions at Water Forum. ASCE, New York, USA 194-199.
- UNEP (United Nations Environment Programme), 1996. Proposals for MED POL-related activities. Document UNEP (OCA)/MED WG.104/3. United Nations Environment Programme, Athens.
- UNEP/WHO (United Nations Environment Programme/ World Health Organization), 1996. Assessment of the state of microbiological pollution of the Mediterranean Sea. Document UNEP (OCA)/MED WG.104/Inf.9. United Nations Environment Programme, Athens.
- USEPA. 1986. Bacteriological ambient water quality criteria for marine and fresh recreational waters, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- USEPA. 1992. Manual, Guidelines for water reuse. USEPA /625/R-92/004. US Agency international development. <http://www.epa.gov>. Assessed 9 Aug. 2002.
- USEPA. 2001. "Protocol for developing pathogen TMDLs", EPA 841-R-00-002, Washington, DC. www.epa.gov/owow/tmdl/pathogen/pathogen.htm.
- Venter, S.N., M.C. Steynberg, C.M.E. de Wet, D. Hohls, G. du Plessis and R. Kfir. 1997. A situational analysis of the microbial water quality in a peri-urban catchment in South Africa. *Water Science and Technology* 35: 119-124.
- Wangne, R.A. and T.S. Tisdale. 1996. Framework for phosphorus transport modeling in the lake Okeechobee watershed. *Journal of American Water Resources Association* 32: 57-73.
- WHO. 1993. Guidelines for drinking-water quality 2nd Edition.
- WHO. 1998. Guidelines for Safe Recreational-water Environments: Coastal and Fresh-waters, EOS/DRAFT/98.14 English only Distribution: Limited, WHO Protection of the Human Environment, Water, Sanitation and Health Series, WHO, Geneva.
- WHO. 1999. Health Based Monitoring of Recreational Waters: The Feasibility of a New Approach (The 'Annapolis Protocol'), WHO/SDE/WSH/99.1, WHO Protection of the Human Environment, Water, Sanitation and Health Series, WHO, Geneva.

(Manuscript received 9 February 2006,
Revision accepted 15 March 2006)