

신도시 개발 후 도시하천의 장래수질 평가

Estimation of Stream Water Quality Changes Brought by a New Town Development

박지영 · 임현만 · 윤영한 · 정진홍 · 김원재[†]

Ji-Young Park · Hyun-Man Lim · Young-Han Yoon · Jin-Hong Jung · Weon-Jae Kim[†]

한국건설기술연구원 환경연구실

Environment Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

(2013년 11월 28일 접수, 2014년 1월 15일 채택)

Abstract : Water pollution problems of urban rivers due to the urbanization and industrialization have been the subject of public attention. In particular, considering the fact that the characteristics of water cycle of each basin change dramatically through the development of new towns, a large number of concerns about future water quality have been raised. However, reasonable measures to predict future water quality quantitatively have not been presented by this moment. In this study, by the linkage of annual unit load generation based on long-term monitoring results of the ministry of environment (MOE) to a semi-distributed rainfall runoff model, SWMM (Storm Water Management Model), we proposed a new methodology to estimate future water quality macroscopically and testified it to verify its applicability for the estimation of future water quality of a small watershed at G new town. As a result of the estimation using Y-EMC (Yearly based Event Mean Concentration), future water quality were simulated as BOD 18.7, T-N 16.1 and T-P 0.85 mg/L respectively which could not achieve the grade III of domestic river life guidance and these criteria could be satisfied by the reduction of domestic wastewater discharge load by over 80%. The results of this study are shown to be utilized for one of basic tools to estimate and manage water quality of urban rivers in the course of new town developments.

Key Words : Estimation of Future Water Quality, New Town Development, Unit Load Generation, Semi-distributed Rainfall Runoff Model, SWMM

요약 : 도시화 및 산업화 등의 영향으로 인한 도시하천의 수질오염 문제가 사회적 관심의 대상이 되고 있다. 특히, 신도시의 개발로 인하여 유역 내 물순환 특성이 급격하게 변화한다는 사실을 고려할 때, 이에 영향을 받는 도시하천의 장래수질에 대해서도 많은 우려가 제기되고 있다. 그러나 아직 개발이 완료되지 않은 신도시의 장래수질을 정량적으로 예측하는 합리적인 방안은 현 시점까지도 제시되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 환경부가 장기간의 모니터링 결과에 기반하여 제시한 토지계 지목별 발생부하 원단위를 분포형 강우유출모형인 SWMM (Storm Water Management Model)에 연계·적용함으로써 장래 신도시 내 도시하천의 수질을 거시적으로 예측하는 방법론을 제시하는 한편, 현재 신도시 개발이 진행되고 있는 G 신도시 내 대상유역의 장래수질 예측을 위하여 이를 활용함으로써 그 적용성을 검증하였다. ‘연단위 유량기중 평균농도 (Y-EMC; Yearly based Event Mean Concentration)’ 개념을 도입하여 신도시 개발 이후의 장래수질을 예측한 결과, BOD 18.7 mg/L, T-N 16.2 mg/L 및 T-P 0.85 mg/L로 산정되어 목표수질인 하천생활기준 III등급의 달성이 어려운 것으로 나타났으며, 생활계 배출부하량을 80% 이상 저감시켰을 때 이 기준을 만족할 수 있는 것으로 예측되었다. 본 연구의 결과는 신도시 개발에 따른 장래 토지이용 특성의 변화에 대응하여 도시하천의 수질을 효율적으로 예측·관리하기 위한 기초적인 방법론으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주제어 : 장래수질 예측, 신도시 개발, 발생부하 원단위, 분포형 강우유출모형, SWMM

1. 서론

강우에 따른 유출특성은 도시유역 및 전원유역에서 분명하게 구분된다. 불투수지역이 유역의 대부분을 차지하는 도시에서는 지표면 유출이 지배적인 반면, 전원유역에서는 지표면 유출과 함께 넓은 투수유역에 의한 지하수 유출에 대한 고려도 필요하다.¹⁾ 이처럼 유출특성은 유역의 토지이용 특성에 따라 많은 영향을 받는다. 우리나라에서는 1970년대 이후, 도시화 및 산업화의 영향으로 토지이용이 고도화되었고, 불투수면적률이 증가함에 따라 유역이 가지고 있던 원래의 물순환 과정이 크게 왜곡됨으로써²⁾ 갈수기 하천유량을 감소시켜 하천의 건천화 및 수질오염 증가 등의 문제를 초래하는 원인이 되었다.³⁾ 이와 같이 불투수면적률이 유

역의 수환경에 큰 영향을 미치고 있음에도 불구하고 유역 차원에서 이를 전체적으로 조율하고 관리하는 것은 용이치 않은 실정이다.²⁾

현재, 도시하천에서는 오염원을 저감함으로써 적정 수질을 유지하는 관리방안이 요구되고 있다. 이를 위해서는 수계로 유입되는 각 오염원들이 하천의 수질에 미치는 영향에 대하여 정량적으로 평가 및 예측할 수 있는 방법이 필요하다.⁴⁾ 한편, 수계를 대상으로 한 장래수질 예측은 오염현상이 발생하는 유역의 규모가 크고, 여러 가지 복합적인 요인이 상호 영향을 미치는 경우가 많기 때문에 조사연구와 더불어 모의를 통하여 오염현상을 종합적으로 파악하려는 시도를 병행하는 것이 중요하다.⁵⁾

신도시 개발 이후 도시하천의 장래수질을 예측하기 위해

[†] Corresponding author E-mail: wjkim1@kict.re.kr Tel: 031-910-0303 Fax: 031-910-0291

서는 물순환 과정을 통한 오염물질의 유출이 하천의 수질에 미치는 영향에 대한 해석이 필수적이지만 신도시 내 하천의 장래수질을 예측하는 연구는 거의 보고된 바 없을 뿐만 아니라 일부 선도적 연구에서도 초기 강우유출수의 특성에 대한 조사 및 모의 수준에 머무르고 있는 실정이다. 또한 분포형 강우유출모형을 활용하는 경우, 입력해야 하는 파라미터에 대한 조사가 미비하고 국내의 현장 여건에 부합하는 실측치를 채용하기보다는 외국의 문헌자료 등을 참고하는 사례가 많아 결과에 대한 신뢰도 또한 충분히 확보하지 못하고 있는 실정이다.⁶⁻⁸⁾

따라서, 본 연구에서는 신도시 조성 이후 장래에 예상되는 수질변화를 예측하는 거시적/정량적 방법론을 제안하고자 하였다. 준분포형 강우유출모형인 SWMM (Storm Water Management Model)을 활용하였으며, 오염부하량 모형의 핵심적 파라미터들은 환경부(MOE; Ministry of Environment)에서 제시한 토지계 지목별 발생부하 원단위를 활용하여 국내의 실정에 적합하도록 도출하였고, 1년간의 시강우 자료를 입력함으로써 대상유역의 장래수질을 ‘연단위 유량가중평균농도(Y-EMC; Yearly based Event Mean Concentration)’의 개념을 도입하여 예측하고자 하였다. 또한 그 적용성을 검증하기 위하여 현재 신도시 개발이 진행되고 있는 G 신도시를 선정하여 개발 전·후 토지이용 특성 변화에 따른 장래수질을 예측하였다. 생물화학적산소요구량(BOD; Biochemical Oxygen Demand), 총질소(T-N; Total Nitrogen) 및 총인(T-P; Total Phosphorus)에 대하여 장래수질에 대한 정량적 모의와 해석을 실시함으로써 효율적인 하천관리를 위하여 중요한 참고자료를 제시하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. SWMM 모형의 특성

본 연구에서 활용한 SWMM 모형은 미국환경보호국(EPA), 플로리다대학 등을 중심으로 우수관리모형으로 개발된 시스템을 기초로 한 시뮬레이션 소프트웨어이다.⁹⁾ SWMM은 크게 강우손실 모형, 표면유출 모형, 관내수리 모형 및 오염부하량 모형으로 구성된다. 강우손실 모형은 표면저류, 침투 및 증발산에 의한 강우의 손실에 대하여 모형을 구축하고, 지표면에서 유출되는 유효강우를 산정한다. 표면유출 모형은 유효강우가 지표면을 흘러가는 과정을 운동역학적으로 계산하여 노드의 유입량을 산정한다. 관내수리 모형은 표면유출 모형에 의해 산출된 각 노드에서의 하이드로그래프를 이용하여 관거 및 하도 등의 흐름을 해석한다. 오염부하량 모형에서는 지표면 오염물의 퇴적량 및 유출부하량의 산정과 관거 및 하도 등에서 수질의 거동을 해석하는데, 이 때 무강우시 지표면에 퇴적되는 오염부하량은 오염물질축적(Build-up) 모형으로 산정하고, 퇴적된 오염물질이 강우시 우수배제시설로 유출되는 소류과정은 오염물질유출(Wash-off) 모형으로 모의한다.¹⁰⁾

본 연구에서 제안하고 있는 준분포형 강우유출모형(SWMM)과 발생부하 원단위를 활용한 연단위 유량가중평균농도(Y-EMC)에 입각한 도시하천의 장래수질 예측 방법의 상세한 흐름도는 Fig. 1과 같다.

2.2. 대상유역 및 토지이용 특성

본 연구의 대상유역으로 현재 개발이 진행되고 있는 G 신

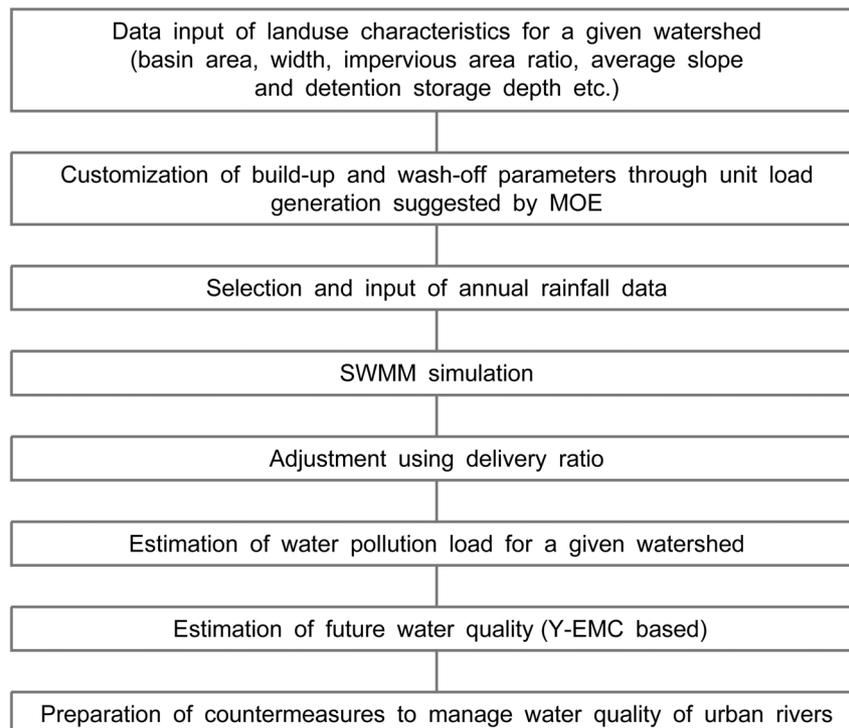


Fig. 1. Basic procedure for estimation of water quality after new town development.

Table 1. Landuse types before new town development

Total area (m ²)	Landuse type		
	Industrial	Forest	Residential
3,316,830	1,554,820	1,413,370	348,640
100%	46.9	42.6	10.5

도시(총 개발면적: 1,118 ha)의 일부 구역(NJ 구역)을 선정하였다. NJ 구역의 면적은 총 337.1 ha로서 개발 전 현재에는 공업지와 산지가 대부분을 차지하고 있으나, 개발 후에는 일반적인 신도시의 모습과 비슷한 형태로서 공원, 주거지, 상업지, 도시지원시설, 학교, 공공청사 및 의료시설 등으로 개발될 예정인 것으로 확인되었다. Table 1, 2 및 Fig. 2에 구역의 개발 전·후 토지이용 특성을 정리하여 나타내었다.

2.3. 오염부하량 모형의 파라미터 산정

2.3.1. 오염물질축적(Build-up) 파라미터

도시지역에서는 구역에서 발생하는 비점오염부하 중 불투수면에서 발생하는 비점오염부하가 가장 큰 비중을 차지한다. 오염물질의 축적에 영향을 미치는 요소로는 선행무강우일수, 토지이용도, 도로청소율, 강우 및 바람 등이 있지만 이를 모두 고려하여 파라미터를 산정하는 것은 현실적으로 불가능한 경우가 대부분이다. 따라서 본 연구에서는 국내 실정을 반영하는 신뢰성 높은 파라미터를 산정하기 위하여 '수계오염총량관리기술지침'²⁾ 상의 토지계 지목별 발생부하량 원단위를 활용하여 토지이용 특성별 비점오염 발생부하량을 분석하였다. SWMM의 오염물질축적 모형에서 이를 반

영할 수 있는 식으로는 Power 식, Exponential 식, Michaelis-Menten 식 등이 있는데, 본 모의에서는 비선형의 점근식 형태를 갖고 있으며 Sartor^{11,12)}에 의해 제안된 이례 분포형 및 준분포형 강우유출모형에서 가장 자주 쓰이고 있는 다음과 같은 Exponential 식을 활용하였다.

$$Pshed = Qfact(1) \times (1 - e^{-Qfact(2)t}) \quad (1)$$

여기서, $Pshed$: 오염물질 축적량(kg)

$Qfact(1)$: 오염물질 축적한계량(kg)

$Qfact(2)$: 지수

t : 선행무강우일수(days)

를 나타낸다.

$Qfact(1)$ 이 오염물질별 축적한계량을 나타내는 계수임에 비해 $Qfact(2)$ 는 오염물질이 축적되는 속도와 관련된 지수로서, 비점오염물질 발생부하량과 일정한 오차 이내로 근사시키는 과정에서는 $Qfact(1)$ 의 민감도가 $Qfact(2)$ 에 비해 매우 큰 특징을 갖는다. 따라서 본 연구에서 $Qfact(2)$ 는 '낙동강 비점오염원 관리방안 마련을 위한 조사사업 보고서'¹³⁾에서 제안하는 값을 차용하고, $Qfact(1)$ 에 대해서만 시행착오법을 활용한 SWMM 모의를 통해 값을 산정하였다. 이를 위하여 NJ구역을 토지이용 특성별로 구분한 다음, 각각에 대하여 환경부에서 제시한 발생부하 원단위와 1% 이내의 오차로 근사하도록 $Qfact(1)$ 을 수렴시킨 후, 이를 활용하여 후속의 모의를 수행하였다. 신도시 개발 전의 토

Table 2. Landuse types after new town development

Total area (m ²)	Landuse type						
	Commercial	Park	School	Medical facilities	Government building	Residential	Urban facilities
3,316,830	485,780	1,275,510	183,800	102,880	170,720	846,530	251,610
100%	14.6	38.5	5.5	3.1	5.1	25.5	7.7

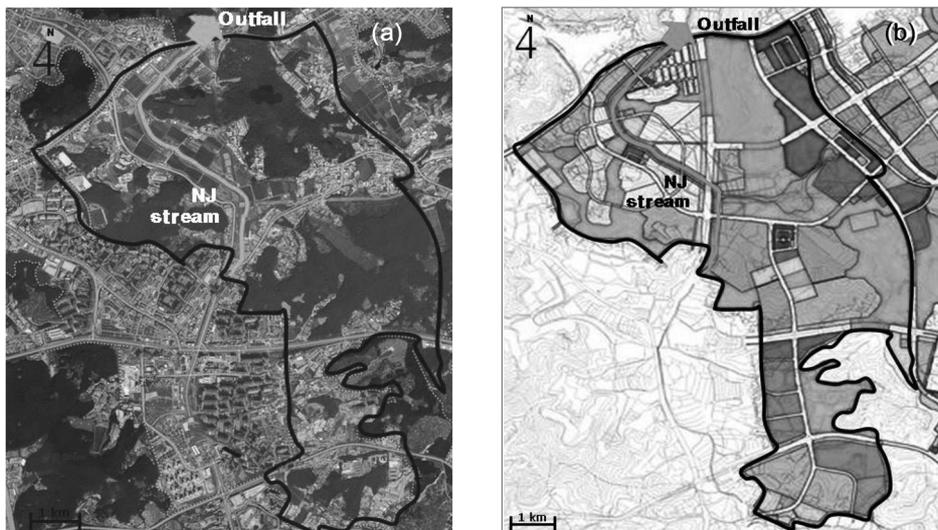


Fig. 2. Variation of landuse characteristics of NJ watershed before (a) and after (b) new town development.

Table 3. Annual unit load generation according to landuse types²⁾
 (unit: kg/km²·day)

Landuse type	BOD	T-N	T-P
Paddy	1,590	9,440	0,240
Dry field	2,300	6,560	0,610
Forest	0,930	2,200	0,140
Land	85,900	13,690	2,100
Etc.	0,960	0,759	0,027

* Land: includes factory, school, road, railroad, physical amusement park, parking lot, religious lot, park, gas station and warehouse sites.

* Etc.: includes miscellaneous landuses such as saltern, dike, cemetery, river and fish farm.

지이용에 대하여 환경부 지목 중 임야 및 대지를 적용하는 한편 각 토지이용별로 불투수면적률을 추가로 세부 조정하였다. 유사하게 신도시 개발 후에는 공원, 주거지, 상업지, 도시지원시설, 학교, 공공청사 및 의료시설 등에 대하여 환경부 지목 중 대지를 적용하는 한편 토지이용 특성에 따라 불투수면적률을 세부 조정하였다. 본 연구에서 참조한 환경부에서 제시하고 있는 토지계 지목별 발생부하 원단위는 Table 3과 같다.

2.3.2. 오염물질유출(Wash-off) 파라미터

오염물질의 유출은 무강우시 유역에 축적된 오염물질이 강우로 인하여 유역의 지표면으로부터 침식 및 용해되는 과정이다. SWMM 모형에서는 오염물질의 소류와 관련하여 Exponential 식, Rating curve 식 및 EMC (Event Mean Concentration) 식 중 하나를 선정하여 모의할 수 있다. 오염물질 유출 파라미터는 매우 다양한 요인에 의해 영향을 받기 때

문에 단기간에 국한된 현장조사만으로는 결과의 신뢰성이 떨어지는 경향이 크므로, 비점오염원 관리방안을 제시하기 위한 조사연구의 일환으로 수행된 ‘낙동강 비점오염원 관리 방안 마련을 위한 조사사업 보고서’¹³⁾의 결과 값을 차용하여 활용하였다. 이 때, 대상유역의 토지이용 특성과 가장 유사한 지역의 결과 값을 채택하였다. 활용된 식은 식 (2)와 같다(Exponential 식).

$$Pshed(t) = Pshed_0 \times e^{-kt} \quad k = Rcoef \times R^{washpo} \quad (2)$$

여기서, $Pshed(t)$: 시간 t 가 지난 후 지표면에 남아있는 오염물질의 양(kg)

$Pshed_0$: 시간 $t=0$ 일 때 축적되어 있는 오염물질의 양(kg)

$Rcoef$: 소류계수

R : 유출률(mm/hr)

$washpo$: 소류지수

를 나타낸다.

2.4. 모의강우 선정

SWMM 모의를 위한 강우 데이터로는 대상유역에서 가장 근접한 I 기상대의 자료를 활용하였다. 기상대의 10년간 (2001~2010)의 강우자료를 분석하여 당해연도 연평균 강우량이 10년 평균 강우량(1,306.1 mm)과 가장 근접한 강우년도의 자료를 대표 모의 강우자료로 선정하였다. 위와 같은 절차에 따라 2004년의 전체 강우사상(연간 누적강우량: 1,307.5 mm)에 대한 시강우 자료를 확보하여 모의에 활용하였다. 2004년도의 강우사상을 본 연구에서 현장조사가 실

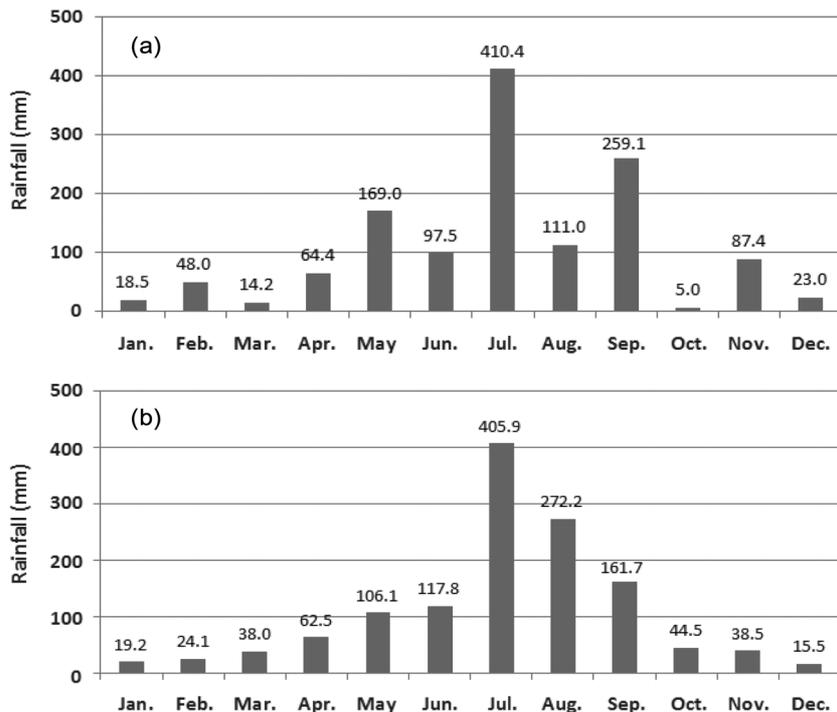


Fig. 3. Monthly rainfall distribution of I weather station (2004 (a) and average during 2001-2010 (b)).

시된 시기(2012년 11월~2013년 3월)와 비교해본 결과, 유사한 전형적인 갈수기의 강우 패턴을 나타냄으로써 대표 모의 강우자료로 활용하는 데 충분한 타당성이 확보된 것으로 판단하였다. Fig. 3은 본 모의에 활용한 I 기상대의 2004년도의 월별 강우량 및 2001-2010년도의 월평균 강우량 분포를 나타낸 그림이다. 2004년도에는 5월부터 9월의 하절기에 걸쳐 많은 비가 내렸으며, 그 외의 기간에는 월간 누적강우량이 100 mm 이하에 그치는 것으로 나타났다. 이 결과는 호우 및 태풍의 영향이 큰 8월(평균: 272.2 mm, 표준편차: 175.3 mm)과 9월(평균: 161.7 mm, 표준편차: 151.7 mm)을 제외하면 2001년부터 2010년까지의 월평균 강우량 그래프와 대체로 유사한 경향을 보였다. 8월과 9월의 경우에도 2004년도 강우량과 2001-2010년도 월평균 강우량과의 편차는 표준편차의 범위 이내에 분포하여 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다.

2.5. 유달률 산정

유달률은 오염원으로부터 배출된 오염물질이 수계의 특정 지점에 도달하는 비율로서, 유역별로 오염물질의 발생부하량과 배출부하량으로부터 산정하며(식 (3)), 유역의 유출특성을 나타내는 지표로서, 유역단위의 수질오염 총량관리, 목표수질 설정 및 할당부하량 등을 결정짓는 중요한 요소이다. 모의를 통하여 장래수질을 예측하고자 할 때 오염물질별 유달률을 반영하는 것이 매우 중요함에도 불구하고, 실측자료의 부족 및 현장조사의 어려움으로 인하여 정확한 산정에는 많은 한계가 따른다.¹⁴⁾

$$\text{유달률} = \frac{\text{토지계 배출부하량}}{\text{토지계 발생부하량}} \quad (3)$$

유달률은 매우 다양한 요인에 의해 영향을 받기 때문에 단위 소유역별로 오염물질별 유달률을 정확하게 산정하는 것은 사실상 불가능하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 현장조사를 통하여 실측한 토지계 배출부하량을 SWMM으로 모의한 토지계 발생부하량으로 나누어 유달률을 산정하였고, 이를 본 연구의 대상유역에도 확대하여 적용함으로써 장래수질의 예측 과정에 반영하였다. 토지계 배출부하량은 G 신도시 내에 위치하는 생활계 오염원의 유입이 없는 별도의 소유역을 선정하여 실측하였다.

2.6. 장래 수질예측

대상유역의 하천 수질에 영향을 미치는 오염원은 생활계 및 토지계로 구분할 수 있는 것으로 나타났다. 토지이용 특성에 따른 토지계 발생부하량은 SWMM 모의를 통하여 산출하고, 토지계 배출부하량은 대상유역 말단의 유출구(out-fall)에서 모의한 배출부하량에 유달률을 곱하여 산정하였으며, 생활계 배출부하량은 현장조사를 통하여 실측한 총 배출부하량에서 토지계 배출부하량을 차감하여 산정하였다. 총 배출부하량은 대상유역의 지구계 말단부에서 2012년 11

월 및 2013년 3월에 수행된 두 번의 실측조사 결과를 활용하여 산출하였다(Table 6). SWMM 모의시 표면유출 모형, 관내수리 모형 및 오염부하량 모형의 계산간격(time-step)이 오염부하 물질수지의 정확성에 큰 영향을 끼치는데, 본 모의에서는 무강우시(dry time-step), 강우시(wet time-step) 및 결과 전송시(routing time-step)의 계산간격을 각각 5분, 5분 및 10초로 설정하였다.

본 연구에서는 생활계 및 토지계 배출부하량의 산정 결과를 바탕으로 장래수질의 거시적/총량적 지표로서 연단위 유량가중평균 농도(Y-EMC; Yearly based Event Mean Concentration)를 예측하였다. 일반적으로 유량가중평균농도(EMC)는 단위 강우사상에 대한 누적 오염부하량을 누적 유출유량으로 나누어 산정하며, 비점오염부하를 나타내는 대표 농도의 하나로 활용되고 있다.¹⁵⁾ 그러나 본 모의에서는 연간 강우사상 전체를 대상으로 모의를 실시하고 있으므로 아래의 식 (4)와 같이 Y-EMC를 새롭게 재정의하여 활용하였다. 이는 대상유역으로부터 유출되는 1년간의 누적 오염부하량을 누적 유출유량으로 나눈 값으로서 도시하천의 장래수질에 대한 거시적 지표의 하나로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 이 때, 연간 누적 오염부하량은 SWMM 모의 결과로부터 일단위의 오염물질별 평균수질과 유출유량을 각각 산출하고, 이를 곱하여 일단위 오염부하량을 산정한 다음 365일에 걸쳐 합산하여 산정하였다. 또한 연간 누적 유출유량은 일단위 유출유량을 합산하여 산정하였다. 여기에서, 일반적으로 도시하천의 수질 모니터링이 무강우시에 실시될 뿐만 아니라 강우시 유출되는 토지계 오염물질 부하가 무강우시의 부하에 비해 크다는 점을 고려할 때, 본 연구에서 제안하고 있는 Y-EMC 또한 무강우시의 수질 모니터링 결과에 비해 높게 산정될 개연성이 있다는 사실에 충분한 주의가 필요하다.

$$Y-EMC = \frac{\text{연간 누적 오염부하량(kg/yr)}}{\text{연간 누적 유출유량(m}^3\text{/yr)}} \quad (4)$$

구체적인 산정 과정에 대해서 상술하면 다음과 같다. 먼저, SWMM 모의를 통하여 개발 전의 발생부하량을 산정하고, 대상유역 말단의 유출구에서 모의한 배출부하량에 유달률을 반영하여 개발 전의 토지계 배출부하량을 산출하였다. 그 다음 현장조사를 통하여 실측한 총 배출부하량에서 토지계 배출부하량을 차감하여 개발 전의 생활계 배출부하량을 산정하였다. 개발 후 토지계 및 생활계 배출부하량의 산정 방법도 위와 동일하다. 이 때, 본 연구에서는 신도시 개발 전과 개발 후에 걸쳐 생활계 배출부하량이 동일한 것으로 단순 가정하였다. 본 대상유역에서의 생활계 배출부하량은 상류부 관거의 추가 정비 여부 및 신도시 개발 후의 관거 상태 등에 따라 달라질 것으로 예측됨에도 불구하고, 이와 같은 가정을 통하여 신도시 개발 과정에서 토지계 및 생활계 오염부하를 구분하여 접근할 수 있을 뿐만 아니라 개발 이후 생활계 배출부하량을 어느 수준까지 저감하여야 하는지에 대한 추가적인 논의가 가능해지는 장점이 크다는 점을 고려하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 Y-EMC를 활용하여 신도시 개발 후 도시하천의 장래수질을 예측하는 방법의 적용성을 검증하기 위하여 현재 신도시로 개발 중인 G 신도시의 일부 유역을 대상유역으로 선정하여 모의를 수행하고, 장래수질을 예측하였다.

3.1. 오염물질축적(Build-up) 및 오염물질유출(Wash-off) 파라미터 산정 결과

‘수계오염총량관리기술지침²⁾’ 상의 토지계 지목별 발생부하 원단위를 활용하여 산출한 파라미터의 산정결과를 개발 전·후로 구분하여 토지이용 특성별로 Table 4에 정리하였다. 이 때, ‘대지(land)’가 나머지 토지이용에 대한 오염물질

축적한계량($Q_{fact}(1)$)보다 큰 수치를 나타내어 도시 개발 후에는 대지로 구분 가능한 토지이용에 따른 불투수면적률의 증가가 오염부하량 상승에 크게 기여하는 것으로 나타났다.

Table 5에는 토지이용 특성별 BOD, T-N 및 T-P의 오염물질유출 파라미터를 나타내었다. 위에서 언급한 ‘낙동강 비점오염원 관리방안 마련을 위한 조사사업 보고서¹³⁾’를 참조하여 대상유역과 가장 유사한 토지이용 특성을 가진 유역의 조사 결과를 활용하였다.

3.2. 유달률 산정 결과

위에서 제시하고 있는 산정 방법에 따라 G 신도시 내에 위치하는 생활계 오염원의 유입이 없는 소유역(GS 소유역,

Table 4. Build-up parameters for BOD, T-N and T-P according to landuse types before and after new town development
 (a) BOD

Parameters	Paddy		Dry field		Forest		Land		Etc.	
	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
$Q_{fact}(1)$	0,37	0,40	0,53	0,57	0,22	0,24	11,25	12,20	0,14	0,15
$Q_{fact}(2)$	1,45	1,40	1,45	1,40	1,45	1,40	1,45	1,40	1,45	1,40

(b) T-N

Parameters	Paddy		Dry field		Forest		Land		Etc.	
	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
$Q_{fact}(1)$	2,25	2,13	1,57	1,48	0,55	0,50	1,80	1,78	0,11	0,11
$Q_{fact}(2)$	1,45	1,40	1,45	1,40	1,45	1,40	1,45	1,40	1,45	1,40

(c) T-P

Parameters	Paddy		Dry field		Forest		Land		Etc.	
	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
$Q_{fact}(1)$	0,073	0,072	0,188	0,185	0,043	0,043	0,365	0,355	0,005	0,005
$Q_{fact}(2)$	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Table 5. Wash-off parameters for BOD, T-N and T-P according to landuse types before and after new town development
 (a) BOD

Parameters	Paddy		Dry field		Forest		Land		Etc.	
	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
R_{coef}	0,20	0,15	0,20	0,15	0,20	0,15	0,20	0,15	0,20	0,15
$Wash_{po}$	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50

(b) T-N

Parameters	Paddy		Dry field		Forest		Land		Etc.	
	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
R_{coef}	0,20	0,23	0,20	0,23	0,20	0,23	0,20	0,23	0,20	0,23
$Wash_{po}$	1,20	1,60	1,20	1,60	1,20	1,60	1,20	1,60	1,20	1,60

(c) T-P

Parameters	Paddy		Dry field		Forest		Land		Etc.	
	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
R_{coef}	0,08	0,10	0,08	0,10	0,08	0,10	0,08	0,10	0,08	0,10
$Wash_{po}$	1,50	1,30	1,50	1,30	1,50	1,30	1,50	1,30	1,50	1,30

Table 6. Delivery ratios of GS watershed (unit: kg/yr)

Classification	BOD	T-N	T-P
Land load generation (SWMM simulation)	12,284	2,780	314
Land discharge load (survey)	670	1,317	14
Delivery ratio	0.055	0.474	0.045

유역면적: 142.1 ha)을 대상으로 한 현장조사 및 SWMM 모형을 활용한 모의를 통하여 오염물질별 유달률을 산정한 결과는 Table 6과 같다. 각 오염물질별 유달률은 BOD 0.055, T-N 0.474 및 T-P 0.045로 도출되었으며, 이 결과를 본 연구의 대상유역에도 동일하게 확대·적용하였다. 본 연구에서 산정된 유달률을 선행 연구결과와 비교해본 결과, 전라남도의 지석천을 대상으로 한 보고에서는 BOD 0.09, T-N 0.22 및 T-P 0.04로 나타나 T-N은 다소 낮으나 대체로 본 연구결과와 유사한 범위의 값을 나타내었고,¹⁶⁾ 소양호 유역에 분포하고 있는 4개의 하천을 대상으로 한 보고의 경우, BOD 0.06~0.14, T-N 0.23~0.30, T-P 0.01~0.03으로서 T-N 및 T-P가 본 연구결과보다 다소 낮은 수치를 나타내었다.¹⁷⁾ 이는 본 연구의 대상유역 주변에 공업지와 도로가 산재하고 있어 이에 기인하는 T-N 및 T-P 등 영양염류의 축적 및 유출이 위에서 인용한 기존연구에 비해 우습하기 때문인 것으로 판단된다.

3.3. 장래수질 예측 결과

대상유역인 NJ 수계의 장래수질 예측을 위하여 실측 조사한 신도시 개발 전의 총 배출부하량, SWMM 모의를 통하여 산정한 토지계 발생부하량 및 배출부하량과 생활계 배출부하량을 Table 7에 나타내었다. 토지계 배출부하량은 유출구에서 모의된 토지계 배출부하량에 유달률을 곱하여 산정하였다. 또한 유사한 절차에 의한 신도시 개발 후의 토지계 발생부하량 및 배출부하량과 생활계 배출부하량의 산정 결과 또한 Table 7에 함께 나타내었다. 산정 결과, 신도시 개발에 따른 토지계 배출부하량은 BOD 22%, T-N 18% 및 T-P 25%의 소폭의 증가에 그치는 것으로 나타났다. 이는 신도시 개발 전에도 대상유역에서 공업지(46.9%) 및 주거지(10.5%)의 비율이 높아 신도시 개발에 따른 불투수면적률의 추가적인 증가가 크지 않은 유역이라는 특징에 기인하는 것으로 판단된다. 신도시 개발 전의 오염부하 중 생활계 배출부하량이 차지하는 비율은 BOD 92%, T-N 87% 및 T-P 97%로서 총 배출부하량에서 생활계 배출부하량이 차지하는 비율이 매우 큰 것으로 나타났다. Fig. 4에 도시한 바와 같이, 신도시 개발 과정에서 생활계 배출부하량의 저감이 없을 경우를 가정하였을 때 오염부하 중에서 생활계 배출부하량이 차지하는 비율은 BOD 91%, T-N 85% 및 T-P 96%로 여전히 매우 높은 것으로 나타나 신도시의 개발 과정에서 생활계 배출부하량의 저감이 시급한 것으로 분석되었다. 대상유역인 G 신도시의 상류지역은 최근 분류식 하수도로 정비되었음에도 불구하고 일부 정비가 미비한 관거로부터 생활하수

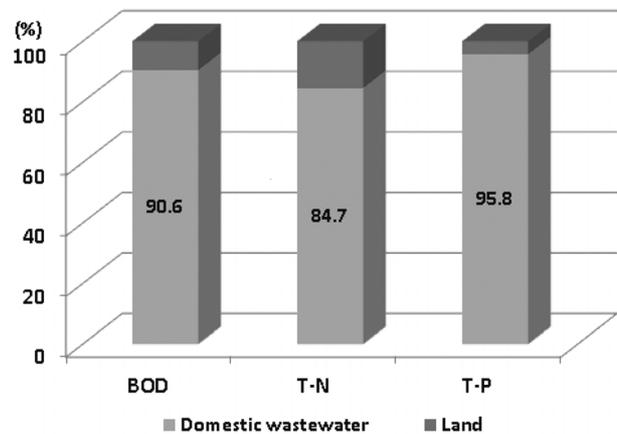
Table 7. Estimation of land and domestic wastewater discharge load of NJ watershed before and after new town development (unit: kg/yr)

Classification	BOD	T-N	T-P
Total discharge load (surveyed)	41,814	35,896	1,916
Land load generation (SWMM simulation)	62,454	10,456	1,527
Land discharge load (SWMM simulation)	60,174	10,108	1,445
Land discharge load ^{a)}	3,282	4,789	64
Domestic wastewater discharge load ^{b)}	38,532	31,107	1,852
Total discharge load (estimated)	42,540	36,736	1,932
Land load generation (SWMM simulation)	76,289	12,294	1,892
Land discharge load (SWMM simulation)	73,492	11,880	1,811
Land discharge load ^{a)}	4,008	5,629	81
Domestic wastewater discharge load ^{c)}	38,532	31,107	1,852

a) land discharge load = land discharge load (SWMM simulation) × delivery ratio

b) domestic wastewater discharge load = total discharge load - land discharge load

c) domestic wastewater discharge load after development = domestic wastewater discharge load before development

**Fig. 4.** Ratios of land and domestic wastewater discharge load after new town development.

가 지속적으로 유입되고 있어서 이에 대한 대책을 마련하는 것이 향후 신도시 내 도시하천의 수질을 관리하는 데 매우 중요한 것으로 나타났다.

생활계 및 토지계 배출부하량 산정 결과를 바탕으로 거시적/총량적 지표로서 장래수질을 대표할 수 있는 Y-EMC를 산정함으로써 신도시 개발 이후의 장래수질을 평가하였다. Table 7에서 산정한 개발 후 도시하천의 총 배출부하량(생활계 및 토지계 배출부하량의 합)을 SWMM으로 모의한 연간 누적 유출유량으로 나누어 Y-EMC를 산정한 결과는 Table 8

Table 8. Estimation results of water quality at NJ watershed

Items	Total discharge load (kg/yr)	Outflow volume (m ³ /yr)	Estimated water quality (mg/L)
BOD	42,540		18.7
T-N	36,736	2,280,000	16.1
T-P	1,932		0.85

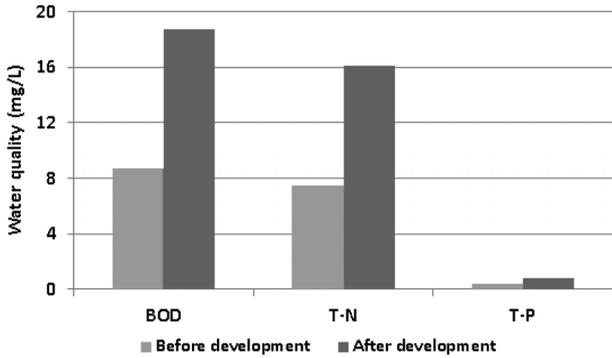


Fig. 5. Comparison of water quality at NJ watershed before and after new town development

및 Fig. 5와 같다. 개발 후 NJ 수계의 BOD는 18.7 mg/L, T-N 16.1 mg/L 및 T-P 0.85 mg/L로 예측되어, 개발 전에 현장조사를 통하여 실측한 BOD 평균 8.7 mg/L, T-N 평균 7.4 mg/L 및 T-P 평균 0.42 mg/L에 비하여 현저하게 수질이 악화되는 것으로 나타났다. BOD 및 T-P의 경우 하천 생활환경기준 III등급(BOD 5 mg/L, T-P 0.2 mg/L)을 만족하지 못하는 것으로 나타남으로써 수질관리를 위한 별도의 대책을 마련할 필요가 있는 것으로 판단된다.

이상에서 살펴본 바와 같이 신도시 내 도시하천의 장래수질을 개선하기 위한 추가적인 대책마련이 필수적인 것으로 판단됨에 따라, 총 배출부하량의 90% 전후의 비율을 차지하고 있는 생활계 배출부하량을 추가로 저감시켰을 경우에 대하여 장래수질을 예측한 결과는 Table 9와 같다. 생활계 배출부하량을 80%까지 저감시켰을 때, BOD 5.2 mg/L, T-N 5.2 mg/L 및 T-P 0.20 mg/L로 예측되어 대체로 하천 생활환경기준 III등급을 만족할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서, 신도시 개발과정에서 하수관거의 정비를 통하여 생활계 배출부하량을 저감하는 한편, 비점오염저감시설 및 저영향개

Table 9. Estimation of future water quality according to load reduction rate due to domestic wastewater (unit: mg/L)

Items	Load reduction rate due to domestic wastewater		
	BOD	T-N	T-P
0%	18.7	16.1	0.85
20%	15.3	13.4	0.69
40%	11.9	10.7	0.52
60%	8.5	7.9	0.36
80%	5.2	5.2	0.20
100%	1.8	2.5	0.04

발(LID; Low Impact Development) 기법을 도입함으로써 토지계 배출부하량의 추가적인 저감을 도모할 경우 하천 생활환경기준 III등급 수준의 수질을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 신도시 개발 과정에서 토지이용 특성의 변화에 기인하는 도시하천의 장래수질을 예측하기 위하여, 환경부에서 제시하고 있는 토지계 지목별 발생부하 원단위를 준분포형 강우유출모형인 SWMM에 연계·적용함으로써 거시적으로 장래수질을 예측하는 방법론을 제시하였다. 또한, 이 방법론을 현재 신도시 개발이 진행되고 있는 G 신도시의 대상유역에 활용함으로써 그 적용성을 검증하였다. 주요한 연구결과는 다음과 같다.

1) 신도시 개발에 따른 도시하천의 장래수질을 예측하는 체계적 방법론이 부재하여 수질관리의 목표를 설정하고, 이에 부합하는 수질관리기법을 도입하는 데 많은 어려움이 따르는 실정이다. 본 연구에서는 장래수질의 오염도를 정량적으로 나타내는 지표의 하나로서 유량가중평균농도(EMC)를 개량한 ‘연단위 유량가중평균농도(Y-EMC; Yearly based Event Mean Concentration)’를 제안하고, 이를 활용하여 신도시 내 도시하천의 장래수질을 거시적으로 예측하는 방법론을 제시하였다.

2) 신도시 개발 후의 장래수질을 예측하기 위해서는 실측 조사와 모의를 상호 보완적으로 병행하여 대상유역의 토지계 발생부하량 및 배출부하량을 합리적으로 산정하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 신뢰성을 높이기 위하여 환경부가 제시하고 있는 토지계 지목별 발생부하 원단위를 준분포형 강우유출모형인 SWMM에 연계·적용하는 방법론을 제시하였다.

3) 본 연구에서 제시한 도시하천의 장래수질 예측 방법론을 검증하기 위하여 현재 개발 중인 G 신도시의 대상유역에 적용한 결과, 총 배출부하량에서 생활계 배출부하량이 차지하는 비율이 BOD 91%, T-N 85% 및 T-P 96%로 나타남으로써, 장래수질의 적정한 관리를 위해서는 생활계 오염원의 유입을 제어하는 데 중점을 두어야 하는 것으로 모의되었다.

4) G 신도시 NJ 수계의 경우, 생활계 및 토지계 배출부하량을 바탕으로 Y-EMC를 산정하여 대상유역의 장래수질을 예측한 결과, 개발 후 BOD 및 T-P가 목표로 하고 있는 하천 생활환경기준 III등급 수준을 만족하지 못하는 것으로 나타나 한층 강화된 하천 수질관리가 도모되어야 할 것으로 판단된다.

5) 본 연구에서 제시한 도시하천의 장래수질 예측 방법론을 통하여 추후 신도시 개발 시 토지이용 특성의 변화에 대응하여 수계 내 오염물질의 유출을 효율적으로 관리하는 한

편, 도시하천의 적절한 수질관리 방안을 마련하는 데 필요한 기초적인 정보를 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 ‘(2014)미이크로그리드 스마트 용수관리 기술 개발’ 및 국토교통부 물관리연구사업(12기술혁신C02)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

KSEE

Reference

1. Kang, T. W. and Lee, S. H., “A study for a reasonable application of the SWMM to watershed runoff event simulation,” *J. Kor. Soc. Hazard. Mitigat.*, **12**(6), 247~258(2012).
2. Ministry of Environment (MOE), Korea Environment Corporation, “A study on the introduction of permeability area ratio for efficient watershed management,” pp. 1~4(2012).
3. Lee, J. M., Hyun, G. H., Lee, Y. S., Kim, J. G., Park, Y. B. and Choi, J. S., “Analysis of water cycle effect by plan of LID-decentralized rainwater management using SWMM-LID model in a low-carbon green village,” *LHI journal of land, housing, and urban affairs*(2011).
4. Lee, B. L., “Water quality prediction of Sincheon using QUAL2E model,” Master’s degree thesis of Keimyung University, pp. 9~12(2001).
5. Jung, N. I., “Analysis and prediction of water quality variation in flow line of Gwangju stream,” Master’s degree thesis of Chonnam National University, pp. 10~18(2007).
6. Kim, M. G., “Study on pollutant discharge characterization of non-point sources distributed around commercial and recreational sites in urban area using SWMM,” Master’s degree thesis of Dongsin University, pp. 1~2(2009).
7. Jung, I. K., Park, J. Y., Joh, H. K., Lee, J. W., Kim, S. J., “Development of stream width and bed-slope estimation equations for preparing data for distributed storm runoff model,” *J. Kor. Soc. Agric. Eng.*, **52**(4), 1~10(2010).
8. Park, J. Y., Lim, H. M., Lee, H. I., Yoon, Y. H. and Kim, W. J., “Water balance and pollutant load analyses according to LID techniques for a town development,” *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **35**(11), (2013).
9. Rossman, L. A., “Storm water management model user’s manual, version 5.0,” EPA/600/R-05/040, United States Environmental Protection Agency (EPA), pp. 1~140(2005).
10. Korea Institute of Construction Technology (KICT), “Application manual of rainfall runoff model at a small suburban area; focused on distributed rainfall runoff models,” Technical Reports of Ecoriver21 Project(2011).
11. Sartor, J. P. and Boyd, G. B., “Water pollution aspects of street surface contaminants,” United States Environmental Protection Agency(EPA), EPA-R2-72-081(1972).
12. Mahbub, P., Goonetilleke, A. and Ayoko, G. A., “Prediction model of the buildup of volatile organic compounds on urban roads,” *Environ. Sci. Technol.*, **45**, 4453~4459(2011).
13. Ministry of Environment (MOE), “Research reports for management of nonpoint source of Nakdong river basin,” pp. 334~352(2003).
14. Park, S. J., “Forecasting of water quality and analysis on pollution load delivery characteristics of Soyang lake basin,” Ph. D. Dissertation of Kangwon National University, pp. 76~94(2011).
15. Bae, S. H., “Characterization of non-point pollutant runoff using a distributed model at a small rural area,” Master’s degree thesis of University of Science and Technology, pp. 30~44(2010).
16. Song, D. W., “A study on estimation the permissible amount of the pollution load for the protection of the water quality of the Yongsan river,” Master’s degree thesis of Chonnam National University, pp. 1~5(2004).
17. Park, S. J., Choi, H. K., Baek, K. W. and Han, Y. S., “Estimation of contribution rate and pollution load delivery rate of Soyang lake basin,” *Journal of Korean Water Resource Association*, pp. 199~203(2011).