

하천유지유량을 이용한 일최대 오염허용부하량 산정 방안

정은성[†] · 김경태* · 김상욱** · 이길성*

서울대학교 공학연구소

*서울대학교 건설환경공학부

**서울대학교 BK21 안전하고 지속가능한 사회기반건설사업단

Calculation of Total Maximum Daily Load using Instreamflow Requirement

Eun-Sung Chung[†] · Kyung-Tae Kim* · Sang-Ug Kim** · Kil Seong Lee*

Engineering Research Institute, Seoul National University

*Department of Civil and Environmental Engineering

**Seoul National University BK21 Safe and Sustainable Infrastructure Research Group

(Received 25 February 2008, Accepted 25 March 2008)

Abstract

This study developed the methodology to calculate the total daily maximum load (TMDL) using the instreamflow requirement because the previous TMDLs were too simple to easily achieve. Instreamflow requirement which was the average low flow (Q_{275}) in the previous planning cannot consider the seasonal variation of streamflow. Therefore, this study used the instreamflow requirement which is a maximum value among hydrologic drought flow (Q_{355}), and environmental flows for ecology and scenery. The environmental flows for ecology were calculated using Physical HABitat SIMulation system (PHABSIM) which can estimate the necessary flow for fish survival by life cycle. Using the proposed method, all monthly TMDLs of streams in the Anyangcheon were calculated for the application.

keywords : Anyangcheon, Instreamflow requirement, Physical HABitat SIMulation system (PHABSIM), Total maximum daily load (TMDL)

1. 서론

하천의 허용오염부하량을 고려하지 않고 배출허용 기준만을 고려하는 기존의 농도 규제방식은 오염수의 양적 팽창에 따른 오염부하의 증가를 통제할 수 없는 근본적인 한계를 안고 있다. 또한 기존 농도 규제에서의 수질관리 및 수처리 기술은 배출허용기준을 만족하기 위한 배출시설 관리에 제한되지만, 총량관리제에서는 이를 포함하여 유역의 환경정보 조사, 오염물질 유출에 대한 분석, 예측 및 저감 기술은 물론 유량 확보 등 총체적인 수질관리 수단이 유도되고 적용될 수 있다.

현재까지 공공수역인 하천의 수질관리에 있어서 수용할 수 있는 오염물질 부하량을 고려하지 않은 농도규제방식은 오염원이 비교적 적은 상류유역에서는 지나치게 엄격한 규제가 되고 오염원이 과도하게 밀집한 중·하류유역에서는 오히려 관대할 수 있는 비합리적인 제도라 할 수 있다. 이를 보완하기 위해 현재 우리나라 4대강에서 오염총량관리제도를 실시하고 있다. 한강수계의 경우 ‘팔당호 등 한강수계 상수원 수질관리종합대책’을 마련하였고 이 계획의 시

행방안으로 1999년 ‘한강수계 상수원 수질개선 및 주민지원 등에 관한 법률’을 제정함으로써 임의제 형태의 수질오염총량관리제를 도입하였으며 낙동강, 금강, 영산강 및 섬진강 수계는 의무제로 시행하는 특별법이 2002년에 제정, 공포되었다.

현재 환경부에서 개정한 오염총량 관리계획 수립지침(환경부, 2006)에 오염총량관리계획에 대한 전반적인 내용들이 명시되어 있다. 그러나 1999년부터 현재까지 약 10년 동안 시행되어 온 오염총량관리제도에는 다음과 같은 문제점들이 지적되고 있다(김영일과 이상진, 2006; 문현주와 황석준, 2005).

- 기준유량 설정의 문제점: 현재 환경부 고시 기준유량인 저수량(Q_{275})의 한계
- 목표수질 설정의 문제점: 목표수질 설정하는데 과도한 노력 투입, 제시된 목표수질의 타당성 여부 판단의 어려움
- 기본계획 및 시행계획 수립을 위한 기술지침의 문제점: 수계별로 통일된 원단위 및 부하량 산정과 관련된 각종 계수들의 불확실성으로 인한 지역 특성의 배제, 비점부하량 추정의 어려움
- 유량 및 수질자료의 문제점: 홍수기 위주의 자료 편중, 자료 부족으로 수질 모형의 보정·검증이 어려움, 수량

[†] To whom correspondence should be addressed.
cool77@snu.ac.kr

및 수질 자료 측정 및 관리의 통일성 결여
- 안전율, 부하량 할당에 대한 문제점

따라서 현행 수계오염총량관리제도가 가지고 있는 이러한 문제점들을 보완하여 합리적인 결과를 도출해 내는 것이 중요하다고 할 수 있다. 이렇게 도출된 오염총량제를 이용하여 최근 급격한 근대화로 인해 우리나라가 겪고 있는 수질오염 문제를 해결하고 또 유역에 속한 지자체 및 지역주민들의 적극적인 협조와 노력으로 수질을 향상시키고 보전하는 것은 우리 인간뿐만 아니라 동·식물을 위해 쾌적한 환경을 만드는데 꼭 필요한 일이다. 이러한 오염총량관리방안에 관한 국내의 연구는 다음과 같다.

이혜영과 박석순(2004)은 미국에서 우리의 오염총량관리제도와 유사한 Total Maximum Daily Load (TMDL) 산정에 널리 이용되고 있는 의사결정 지원시스템인 Watershed Analysis Risk Management Framework (WARMF)를 수도권 상수원인 팔당호에 유입되는 경안천에 적용하여 오염총량을 산정하였고 오염총량제도의 기준유량인 저수기에 비점오염원에 대한 영향을 고려하기 힘들다는 점을 고려하기 위하여 점오염원의 일정 비율감소에 따른 비점오염 부하량의 허용 부하량을 산정하였다. Chen 등(2004)은 비점오염원까지 고려할 수 있는 TMDL 산정을 위한 의사결정 지원시스템 (decision support system, DSS)인 WARMF를 개발하였으며 Endreny 등(2003)은 최근에 U.S. Environmental Protection Agency (US EPA)에서 강조하는 TMDL 관리모델인 Better Assessment Science for Integrating point and Nonpoint Source (BASINS)의 Hydrologic Simulation Program - FORTRAN for Windows (WinHSPF)와 Geographic Information System (GIS)를 기반으로 한 ArcView를 이용하여 TMDL 산정을 위한 유출량을 모의하였다. Kang 등(2006)은 SWAT과 TMDL 산정 모델인 TOLOS를 이용하여 경기도 수원시 발안지역의 벼농사지역을 대상으로 연별 TMDL을 산정하였다. Tufail and Ormsbee(2005)는 Louisville Kentucky에 있는 Beargrass Creek을 유역을 대상으로 하여 연역적 모형(deductive models)인 HSPF, WASP5 그리고 CEQUAL과 AI (Artificial Intelligence)기술, 즉 Artificial Neural Network (ANN)와 Genetic Algorithms (GA)과 같은 귀납적 모형(inductive models)을 비교하여 TMDL 산정하였다. 김봉석 등(2006)은 전라북도에 위치한 만경강의 수질오염총량관리를 위해 할당방법을 달리하여 시나리오별 삭감부하량과 할당부하량을 산정하고 비교하였고, 김영일과 이상진(2006)은 현재 시행중인 수질오염총량관리제도의 계획수립 과정에서 발생하는 문제점들을 살펴보고 이를 개선하기 위한 방안을 제시하였다. 류동경 등(2006)은 낙동강 유역에 Biochemical Oxygen Demand (BOD)의 유기물지표로써의 단점을 Total Organic Carbon (TOC)로 보완을 하였으며, 박재홍 등(2006)은 수질오염총량관리제도를 위한 관리대상물질에 대해서 BOD의 문제점 및 한계성을 제시하고 이화학적 수질오염지표인 Chemical Oxygen Demand (COD), DO, TN, TP 등과 생물학적 수질오염지표인 대장균군, 클로로필

-a의 특징들을 낙동강 수계의 본류구간 및 지류구간에 적용하여 BOD외의 수질오염지표들의 적용 타당성을 분석하였다. Culver 등(2004)은 이미 TMDL이 실행중인 Virginia의 Muddy Creek과 Dry River 유역을 대상으로 HSPF를 이용하여 수량과 수질을 모의하였고 특히 nitrate TMDL를 재산정하고 결과를 토대로 현재 실행중인 TMDL의 성공과 실패요인을 분석한 바 있다.

본 연구에서는 현재 사용되고 있는 오염총량관리제의 문제점 중 기준유량 설정방법의 불확실성과 유출의 계절적 변화를 고려하기 위해 하천유지유량 개념을 도입하였다. 기존 평균저수량(Q_{275})을 기준유량으로 산정하는 방법에는 유량이 과대하게 산정되어 허용오염총량 역시 과대하게 산정되게 되며 우기에는 과소하게 산정되어 허용오염부하량이 과소하게 산정될 수 있다. 하지만 하천유지유량은 수문학적 갈수량(Q_{355})과 생태유지유량, 경관유지유량, 수질보전 유지유량 등을 고려하여 가장 큰 유량을 설정한다. 기존 방법은 유출량의 계절적 변화를 전혀 고려할 수 없지만 하천유지유량은 생태유지유량을 산정하므로 월별로 다른 유지유량을 산정할 수 있다.

2. 연구방법

본 연구에서 제안하는 TMDL을 결정하는 과정은 Fig. 1과 같다. 우선 대상 수계의 목표유량 및 목표물질 파악하고, 기준유량으로 하천유지유량을 결정한 후 목표물질의 수

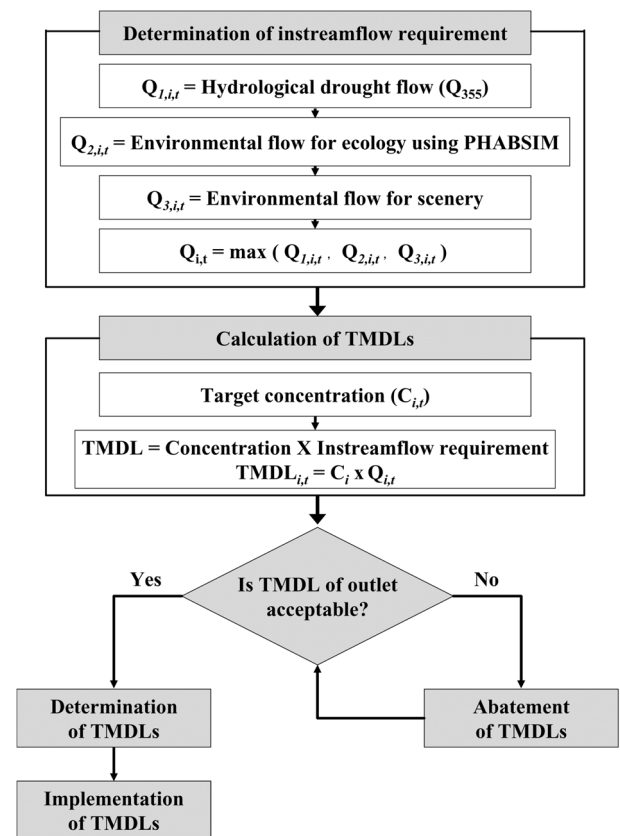


Fig. 1. Flowchart for TMDL calculation.

질을 결정하여 TMDL을 계산한다. 마지막으로 계산된 TMDL이 수계에 합당한지 출구점에서 TMDL의 만족여부를 확인하고 합당하다면 TMDL을 결정하여 실행하고 그렇지 않다면 각 증유역별 부하량을 감소시켜 다시 TMDL의 합당 여부를 판단한다. 본 연구에서는 BOD에 대해 TMDL의 실행을 제외한 나머지 부분을 수행하였다.

2.1. 유지유량

2.1.1. 개요

하천유지유량은 하천에 흘러야 할 최소유량으로 정의된다. 하천유지유량은 갈수량을 기준으로 선정하되, 하천 수질 보전, 하천 생태계 보호, 하천 경관 보전, 염수 침입 방지, 하구막힘 방지, 하천시설물 및 취수원 보호, 지하수위 유지를 위한 필요유량을 감안하여 산정한다. 여기서 갈수량은 과거 자연상태의 하천에서 갈수기에 흘렀던 유량으로서 자연과 사람이 공유할 수 있는 최소한의 유량을 말하며 기준갈수량, 평균갈수량을 산정한 후 하천의 규모나 특성 및 유량공급 가능성을 고려하여 결정한다(한국수자원학회, 2005).

기본적으로 하천유지유량은 현재상태와 비교하여 앞으로 하천의 수리·수문과 환경 조건 등이 크게 변하지 않는 이상 변경될 수 없는 유량이지만 하천에 따라 새롭게 자연적 기능을 강화하거나 수요에 의해 인위적 기능이 증감될 경우에는 이에 맞추어 변경될 수 있다(오규창 등, 1991). 우리나라에서는 하천법 제20조에서 건설교통부 장관으로 하여금 기준지점을 정해 하천유지유량을 설정하여 고시하도록 명시하고 있다. 그러나 이와 같은 방법은 10대 하천 및 10대 하천의 제1지류(주로 국가하천) 정도의 중·대하천을 주요대상으로 한다(김규호 등, 1996). 따라서 지방2급 하천과 같은 중·소하천들에 대한 연구는 현재 미흡한 실정이며, 측정된 유량자료가 없어 대부분이 인근 주요수위표를 이용한 비유량법을 사용하여 산정한 갈수량을 이용하여 하천유지유량으로 채택하고 있다.

2.1.2. 산정방법

김규호 등(1996)은 하천유지유량 결정 절차를 다음과 같이 제시하였으며 Fig. 1에 모식도로 작성되어 있다.

- (1) 하천환경 및 하천특성의 파악
 - 하천유황, 하천의 각종 유출입량, 하도상황, 자연환경과 사회환경 등
- (2) 하천의 하도구분 및 대표지점의 설정
 - 하도구분: 하천 이용과 기능 검토 시 해당 하천의 하천환경 특성을 바탕으로 복수 구간으로 설정하고 각 구간별로 갖는 특성을 검토
 - 대표지점: 기준지점과 보조기준지점으로 나뉘며, 기준지점은 해당 하천의 이수 또는 저수관리를 적절하게 실시하기 위한 기준이 되는 지점을 설정함. 보조기준지점은 기준지점에서 하천유지유량을 검토할 경우에 기준지점을 보완하기 위한 지점이며 필요에 따라 복수로 설정할 수 있음

- (3) 갈수량 및 항목별 필요유량의 검토 및 설정
 - 필요유량: 하천수질, 생태계(어류), 하천경관, 수상이용, 기타(염수침입방지, 하구막힘 방지, 하천관리시설 보호, 지하수위의 유지)
- (4) 구간별 하천유지유량의 설정
 - 각 항목별로 대표지점 또는 하도구간에서 선정된 조사지점의 필요유량과 갈수량을 비교하여 큰 값을 하천유지유량으로 결정

2.1.3. 갈수량

한국수자원학회(2005)에서는 하천유지유량 산정 시 기준갈수량과 평균갈수량을 산정한 후 해당 하천의 규모나 특성 및 유량공급 가능성을 고려하여 결정한다고 하였으며 본류는 평균갈수량을 산정하였고, 상류의 댐 등과 같이 하류에 유량을 공급할 수 있는 시설이 없는 지류에는 기준갈수량을 산정하였다. 계측구역의 갈수량은 과거의 유량자료로부터 임의의 지속기간의 유황곡선을 작성한 후, 매년 초과확률 또는 최저치 유량을 나열하고 그로부터 산술평균 또는 빈도분석을 통해 산정하게 된다. 그러나 과거 유량자료가 없거나 부분적으로 존재하는 미계측구역은 유역내 또는 인근지역의 계측구역 자료나 수문모형 결과를 이용하여 갈수량을 추정해야 한다.

2.1.4. 수질보전을 위한 필요유량

한국수자원학회(2005)에서는 하천유지유량 산정시 하천수질 보전을 위한 필요유량을 감안하여 산정해야한다고 제시하였다. 하천에 유입되는 오염수를 처리하는 목표연도별 환경기초시설의 완성여부에 따라 하천수질을 예측하여 하천수질 환경기준, 즉 해당하천에 따라 정해진 목표 수질을 만족시키기 위한 필요유량을 산정한다. 이를 위해 일반적으로 QUAL2E 모형이 사용되며 수질을 예측하고 예측된 수질이 목표수질을 만족할 수 있는 필요유량을 유도해낸다.

2.1.5. 생태를 고려한 필요유량

Physical HABitat SIMulation system (PHABSIM; USGS, 2001)은 하천유량 관리 문제를 처리하는 개념적이고 분석적인 구조인 Instream Flow Incremental Methodology (IFIM)의 일부분이다(Stalnaker et al., 1995). 어류가 수리학적 환경변동에 따라 직접 반응한다는 가정을 바탕으로 개별 유기체가 가장 좋아하는 유지조건(habitat suitability criteria)을 선택하는 경향이 있어서 유지조건이 점점 나빠지면 서식처 선호도도 감소하여 서식어류가 점점 적어진다고 하는 전제를 배경을 하고 있다(Milhous et al., 1989; Stalnaker and Arnette, 1976). PHABSIM은 임의의 유량에 대한 수리모의를 수행하고, 모의결과를 서식처 적합곡선과 결합하는 서식처 모의를 통해 가중가용면적과 유량과의 관계를 얻어내는 모형이다. 유량을 점차 증가시키면서 가중가용면적과 유량의 관계곡선을 얻어낸 후 최대의 가중가용면적에 해당하는 유량을 생태계 보존을 위한 필요유량으로 채택한다. 최근 국내에서는 자연 및 생태에 대한 관심이 고조되면서

서 PHABSIM을 이용한 물고기의 서식처 확보를 위한 유지유량 산정에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 상세한 모형에 대한 설명과 이론은 강정훈 등(2004), 성영두 등(2005), USGS(2001)에 수록되어 있다.

2.1.6. 경관을 고려한 필요유량

경관을 고려한 필요유량은 하천이 풍부하고 정서적으로 안정된 분위기를 제공할 수 있는 자연공간으로 유지될 수 있도록 시각적으로 만족감을 느낄 수 있는 최소한의 유량을 말한다. 한국건설기술연구원(1995)에서는 경관을 고려한 필요유량을 산정하기 위한 비교적 간단하고 적용하기 쉬운 방법을 다음과 같이 제시하였다.

- 수면폭: 유량이 많고 적음에 대한 느낌은 수면이 차지하는 비율 등 대상간의 비율과 대상공간의 점용율에 의한다. 이때 공간비율의 지표로써 수면폭(W)과 하천폭(B)의 비(W/B)를 들 수 있다. 유량감을 느낄 수 있는 최소비율은 하천폭의 20%이다.
- 유속: 도시를 관류하는 하천이므로 느긋한 흐름의 경관이 바람직하다. 어느 정도의 흐름을 느낄 수 있는 유속은 0.2 m/s이다.
- 수심: 급격한 경관 변화가 일어나지 않도록 주요 하상재료가 수면으로 드러나지 않는 평균수심인 0.1 m를 확보한다.

2.2. 일최대오염부하량

환경부가 고시한 '한강수계 오염총량 관리계획 수립지침'에서는 대상지역의 관리목표량을 위에서 산정한 목표 수질과 기준유량을 이용하여 다음과 같이 수립한다.

$$L_i = Q_i \times C_i \times 10^{-3} \quad (1)$$

여기서 L_i 는 대상하천 관리지점 i 의 관리목표 오염부하량(kg/일), Q_i 는 대상하천 관리지점 i 의 기준유량(m^3/s), C_i 는 대상하천 관리지점, i 의 오염총량관리 목표수질(mg/L)이다.

기준유량은 총량관리단위유역 및 소유역별 오염부하량 할당의 기준이 되는 유량을 말한다. 강우집중도가 높아 하상계수가 큰 우리나라의 하천은 갈수기 상류지역의 경우 상당수가 건천화되고 있어 갈수기 기준의 총량관리가 용이하지 않아 제1차 총량관리의 기준유량은 대단위 댐 등의 인공시설물에 의한 관리유량을 포함한 과거 10년간 평균 저수량으로 설정한다.

수질개선을 위해 오염총량을 관리하는 대표적인 나라인 미국에서는 TMDL의 정의를 다음과 같이 하였다. TMDL은 합리적으로 예상가능한 오염물질의 증가를 포함하여 수체가 감당할 수 있는 오염원으로부터의 일최대배출부하량의 총량을 의미한다. 즉 TMDL은 점오염원(point source)의 오염할당부하량(wasteload allocation, WLA)과 자연 부하량(natural background)을 고려한 비점오염원(non-point source)의 할당부하량(load allocation, LA)에 안전율(margin of safety, MOS)을 고려한 합이다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$TMDL = LC = \sum WLA + \sum LA + MOS \quad (2)$$

여기서, LC는 수질기준을 만족하며 수체가 받을 수 있는 최대 부하량/loading capacity)이고, LA는 계절적 변화(seasonal variation)가 존재하며 올바른 TMDL은 반드시 이를 고려해야 한다(US EPA, 1999). 하지만 우리나라의 오염총량제는 비점오염원과 부하량의 계절적, 변화를 전혀 고려하지 않고 있으므로 건기의 비강우시에만 적용될 수 있는 특정한 관치체제라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 유출량의 계절적 변화를 감안하기 위해 기준유량을 평균저수량 대신 2.1절에서 제시한 하천유지유량을 사용하는 간단한 방법을 제안하였다. 즉 하천유지유량은 생태 필요유량, 수문학적 갈수량, 경관유량을 비교하여 가장 큰 유량으로 결정하는데 생태 필요유량은 계절따라 다르게 결정되므로 다음과 같은 수식을 이용하면 월별 다른 TMDL을 수립할 수 있다.

$$L_{i,t} = Q_{i,t} \times C_i \times 10^{-3} \quad (3)$$

여기서 $L_{i,t}$ 는 대상하천 관리지점 i 의 t 시점에서의 관리목표량(kg/일), $Q_{i,t}$ 는 대상하천 관리지점 i 의 t 시점에서의 기준유량(m^3/s), C_i 는 대상하천 관리지점 i 의 오염총량관리 목표수질(mg/L)이다. 본 연구에서 TMDLs를 산정하는 절차는 Fig. 1에 제시된 바와 같다.

2.3. 대상유역

본 연구의 대상유역은 Fig. 2와 같이 안양천 유역이다. 안양천은 국가하천이며 한강의 제1지류로서 경기도 의왕시 지지대고개에서 발원하여 북류하면서 경기도와 서울시를 경유하고 한강에 유입되는 대표적인 도시하천이다. 유역의 위치는 서울의 남서쪽으로 동경 126° 47' ~ 127° 04', 북위 37° 18' ~ 37° 33'이며 유역면적은 286.55 km^2 이고 서울시의 7개구(강서구, 양천구, 영등포구, 구로구, 동작구, 관악구, 금천구)와 경기도 7개시(과천시, 의왕시, 군포시, 안양시, 광명시, 시흥시, 부천시)에 걸쳐있다. 또한, 11개의 지방 2급하천 제1지류와 9개의 지방2급하천 제2지류가 포함되어 있으며, 하천망과 DEM을 고려하여 Fig. 1과 같이 20개의 지천 중유역과 본류 인접유역으로 구분된다. 안양천 유역의 연도별 Landsat 영상을 이용하여 토지이용현황을 분석한 결과, 1975년 유역 면적 287.15 km^2 중 녹지 145.34 km^2 로 50.61%, 도시지역 47.69 km^2 로 16.61%, 농업지 88.71 km^2 로 30.89%, 기타 5.36 km^2 로 1.89%를 차지하던 비율이 2000년 유역 면적 287.15 km^2 중 녹지 119.69 km^2 로 41.68%, 도시지역 124.25 km^2 로 43.27%, 농업지 37.37 km^2 로 13.01%, 기타 5.84 km^2 로 2.04%로 각각 변화되었다. 즉, 1975년 16.61%에 불과했던 도시지역이 2000년에는 유역 전체면적의 절반가까이 차지하는 전형적인 도시하천으로 변모했음을 알 수 있다. 각 유역별 특성을 제시하면 Table 1과 같다.

Table 1. Characteristics of the Anyangcheon Subwatersheds (2000)

Stream orders	Category Name of subwatershed		Steam length (km)	Watershed area (km ²)	Population		Landuse			
					Total population (person)	Population density (person/km ²)	Urban		Forest	
							Area (km ²)	Ratio (%)	Area (km ²)	Ratio (%)
1-2-3	Main	AY	32.38	286.55	3,876,278	13,527	123.31	43.03	114.03	39.79
1	Wanggok	WG	3.82	3.78	7,484	1,980	0.26	6.96	3.08	81.51
1	Ojeon	OG	2.85	4.26	26,370	6,190	0.33	7.65	3.30	77.48
1	Dangeong	DJ	4.02	5.33	84,930	15,934	3.04	57.09	1.48	27.73
1	Sanbon	SB	4.32	10.30	132,390	12,853	4.15	40.34	4.99	48.49
1-2	Hakwui	HW	9.26	44.55	311,709	6,997	10.16	22.82	25.60	57.47
1	Suam	SA	5.50	8.07	49,960	6,191	1.52	18.90	5.86	72.61
1-2	Samseong	SS	5.30	13.18	45,476	3,450	1.04	7.88	10.97	83.21
1	Sambong	SB1	2.76	4.59	23,695	5,162	0.53	11.52	3.16	68.91
1	Siheung	SH	2.68	3.26	109,364	33,547	1.48	45.31	1.50	46.15
1-2	Mokgam	MK	13.52	56.07	473,077	8,437	17.82	31.71	19.92	35.44
1-2	Dorim	DR	14.33	41.64	982,804	23,602	25.91	62.27	12.84	30.87

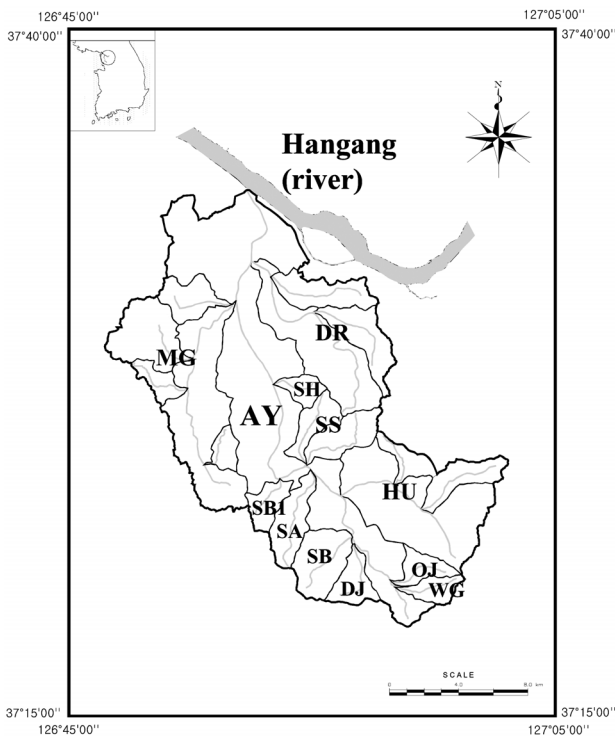


Fig. 2. Sub-watersheds map of the Anyangcheon.

3. 결과 및 고찰

3.1. 목표유지유량

대상유역의 경우 대부분의 주요지점에 대해 이삼희(2001)가 한국수자원학회(2005)의 설정방법에 따라 하천유지유량을 산정하였고 또 당정, 산본천 유역과 같은 복개하천의 경우에는 하천정비기본계획에서 제시한 바가 있으나 모두 10년 이상 전의 것으로 현재의 하천 현황과 상태를 반영하지 못한다. 따라서 앞에서 설명한 바와 같이 PHABSIM을 이용하여 산정한 생태유지유량과 갈수량 및 경관을 고려한 필요유량을 비교하여 큰 값을 하천유지유량으로 결정하였다.

3.1.1. 생태를 고려한 필요유량 산정

3.1.1.1. 대표어종 및 서식처 적합도 곡선

대상하천의 대표 어종을 선정하기 위하여 해당 하천의 우점종을 조사하였다. 이기영(2003)에서 조사한 결과를 살펴보면, 안양천 본류 기아대교 지점은 붕어, HU는 피라미, WG, OJ, SA는 버들치가 우점종으로 나타나 있으므로 이를 각 하천의 대표어종으로 선정하였다. DJ, SB, SS, SB1는 버들치를 대표어종으로 선정하였다. 한국건설기술연구원(1995)과 김규호(1999)가 제시한 대표어종의 서식처 수리조건은 Table 2와 같다.

3.1.1.2. 수리모의

수리모의는 유량을 점차적으로 늘려가면서 그에 대한 수위와 유속을 모의하는 과정이다. 수리모의 수행을 위해 ‘안

Table 2. Habitat suitability criteria

Name of fish	Water depth (cm)			Velocity (cm/sec)		
	Spawning	Fry	Adult	Spawning	Fry	Adult
Rhynchocypris oxycephalus	10 ~ 20 (Apr., May)	20 ~ 30 (summer ~ autumn)	30 ~ 50 (spring ~ autumn)	10 ~ 30	20 ~ 40	30 ~ 120
Zacco platypus	10 ~ 30 (Apr., May)	10 ~ 40 (summer ~ autumn)	10 ~ 70 (spring ~ autumn)	10 ~ 30	10 ~ 40	20 ~ 60
Carassius auratus	20 ~ 50 (May, Jun.)	10 ~ 40 (summer ~ autumn)	30 ~ 200 (spring ~ autumn)	5 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 30

양천 유역종합치수계획(현대 Eng., 2005)에서 구축한 HEC-RAS 모형의 횡단면 자료와 조도계수를 사용하였다. 수위 모의는 기 구축된 HEC-RAS를 이용하여 수행하였으며 유속모의는 Manning 공식을 이용하는 PHABSIM의 VELSIM을 이용하여 수행하였다.

3.1.1.3. 서식처 모의

서식처 모의는 수리 모의와 서식처 적합도 곡선을 결합하여 가용한 서식처를 양적으로 표현하는 과정이다. 본 연구에서는 가장 일반적으로 사용하는 곱셈방법을 사용하여 복합 적합도(composite suitability)를 산정하고 각 셀의 표면적에 곱한 후, 이를 종합하여 가중가용면적과 유량과의 관계를 모의하였다. 가중가용면적이 가장 큰 값을 가지는 경우의 유량을 어류가 서식하는데 가장 양호한 생태유지유량으로 선정한다(성영두 등, 2005; 임동균 등, 2007).

3.1.2. 평균갈수량 산정

조탁근 등(2007)은 우리나라 특성을 반영하는 보편적인 평균갈수량을 산정하기 위해 지역회귀기법(regional regression method)을 사용하였다. 상류부에 인위적 유량조절이 없는 6개 댐유역(소양강댐, 괴산댐, 대청댐, 안동댐, 임하댐, 합천댐)과 9개 수위관측소 유역(이목정, 백옥포, 영양, 청송, 동곡, 고로, 이평교, 탄부교, 기대교)을 이용하여 평균갈수

량 회귀식을 다음과 같이 산정하였다.

$$Q = 0.0357A^{0.55} \tag{4}$$

여기서, Q 는 평균갈수량(cms), A 는 유역면적(km²)이다. 본 연구에서는 가장 최근에 우리나라의 자료를 이용하여 산정한 식 (4)를 이용하였다.

3.1.3. 경관을 고려한 필요유량 산정

안양천 유역의 경우 현대 Eng.(2005)에서 사용한 하천 단면자료와 2.1.6절에서 제시된 방법을 사용하여 경관 유량을 산정하였다.

3.1.4. 하천유지유량 산정

PHABSIM을 이용하여 산정한 생태를 고려한 필요유량과 지역회귀기법에 의해 결정된 안양천의 평균 갈수량, 경관을 고려한 필요유량을 비교하여 산정한 하천유지유량은 Table 3과 같다. 대부분 하천에서 생태유지유량이 평균갈수량보다 크므로 4-10월은 생태유지유량을, 11-3월은 평균갈수량을, 일부에서는 경관유량을 하천유지유량으로 설정하였다.

3.2. 목표오염부하량 산정

3.2.1. 목표수질 제시

Table 3. Target instreamflow requirement of the Anyangcheon (unit: cms)

Name of stream	Representative fish	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
WG	RO*	0.100	0.100	0.100	0.160	0.160	0.400	0.400	0.400	0.760	0.760	0.100	0.100
		V**	V	V	S	S**	F**	F	F	A**	A	V	V
OJ	RO	0.079	0.079	0.079	0.16	0.16	0.4	0.4	0.4	0.76	0.76	0.079	0.079
		D**	D	D	S	S	F	F	F	A	A	D	D
DJ	RO	0.090	0.090	0.090	0.26	0.26	0.46	0.46	0.46	0.60	0.60	0.090	0.090
		D	D	D	S	S	A	A	A	A	A	D	D
SB	RO	0.128	0.128	0.128	0.33	0.33	0.76	0.76	0.76	0.93	0.93	0.128	0.128
		D	D	D	S	S	F	F	F	A	A	D	D
HU	ZP*	0.288	0.288	0.288	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	1.50	1.50	0.288	0.288
		D	D	D	S	S	F	F	F	A	A	D	D
SS	RO	0.112	0.112	0.112	0.20	0.20	0.56	0.56	0.56	0.70	0.70	0.112	0.112
		D	D	D	S	S	F	F	F	A	A	D	D
SA	RO	0.090	0.090	0.090	0.26	0.26	0.46	0.46	0.46	0.60	0.60	0.090	0.090
		D	D	D	S	S	A	A	A	A	A	D	D
SB1	RO	0.082	0.082	0.082	0.10	0.10	0.26	0.26	0.26	0.50	0.50	0.082	0.082
		D	D	D	S	S	A	A	A	A	A	D	D
SH	RO	0.068	0.068	0.068	0.10	0.10	0.26	0.26	0.26	0.60	0.60	0.068	0.068
		D	D	D	S	S	F	F	F	A	A	D	D
MG	CA*	0.326	0.326	0.326	0.65	0.326	0.326	0.326	0.326	0.65	0.65	0.326	0.326
		D	D	D	A	D	D	D	D	A	A	D	D
DR	CA	0.277	0.277	0.277	1.10	0.40	0.40	1.05	1.05	1.10	1.10	0.277	0.277
		D	D	D	A	S	S	F	F	A	A	D	D
Outlet	CA	0.800	0.800	0.800	3.80	0.80	0.80	1.20	1.20	3.80	3.80	0.800	0.800
		D	D	D	A	S	S	F	F	A	A	D	D

* RO: Rhynchocypris Oxycephalus, ZP: Zacco Platypus, CA: Carassius Auratus
 ** V: View, S: Spawning period, F: Fry period, A: Adult period, D: Drought flow

현재 안양천의 목표수질은 1991년 환경부고시에 따라 전 구간에 대하여 5등급으로 설정되어 있지만, 달성년도인 2002년이 경과하였고 현실적인 하천의 이용목적, 주민들의 친수공간 등을 종합적으로 검토한 목표수질이 없는 상태이다. 하지만 2005년 현재 안양천의 대부분 구간에서 5등급을 만족하고 있고, 안양천 본류를 포함하는 각각의 지자체에서는 새로운 목표수질을 설정한 상태이다. 이에 환경부에

서는 새로운 수질지표 및 각 하천에 대한 수질등급을 재조정하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 새로운 수질지표와 목표수질이 제시되기 전이므로 2011년을 중간 목표년도로 정하고 안양천 본류를 포함하는 각 지자체가 설정한 목표수질을 바탕으로 설정하였다. 안양하수처리장의 처리수 방류지점을 기준으로 상류구간에는 II(2) 등급, 하류구간에는 IV(4) 등급으로 목표수질로 하였다. 이 구간에서 본류로 유

Table 4. Monthly TMDL and target total daily load abatement (unit: kg/day)

Name of sub-watershed		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
WG	TDL	25.7	25.7	26.0	64.3	59.4	75.7	104.9	132.8	132.2	59.0	38.8	27.8
	New TMDL	25.9	25.9	25.9	41.5	41.5	103.7	103.7	103.7	197.0	197.0	25.9	25.9
	Previous TMDL	28.74											
	Reduction	0	0	0.1	22.8	17.9	0	1.2	29.1	0	0	12.9	1.9
OJ	TDL	25.9	25.8	26.0	65.8	61.6	76.7	114.3	149.7	142.0	66.8	40.8	28.5
	New TMDL	20.5	20.5	20.5	41.5	41.5	103.7	103.7	103.7	197.0	197.0	20.5	20.5
	Previous TMDL	30.64											
	Reduction	5.4	5.3	5.5	24.3	20.1	0	10.6	46.0	0	0	20.3	8.0
DJ	TDL	31.0	30.9	32.3	126.0	123.3	119.0	139.7	177.7	169.7	62.9	60.7	33.9
	New TMDL	23.3	23.3	23.3	67.4	67.4	119.2	119.2	119.2	155.5	155.5	23.3	23.3
	TMDL	31.49											
	Reduction	7.7	7.6	9.0	58.6	55.9	0	20.5	58.5	14.2	0	37.4	10.6
SB	TDL	21.2	20.8	22.1	149.7	151.0	147.9	188.8	252.0	241.2	69.0	61.9	24.0
	New TMDL	33.2	33.2	33.2	85.5	85.5	197.0	197.0	197.0	241.1	241.1	33.2	33.2
	TMDL	53.09											
	Reduction	0	0	0	64.2	65.5	0	0	55.0	0.1	0	28.7	0
HU	TDL	252.4	241.9	316.1	856.9	747.8	724.2	834.1	1,161.2	1,121.0	370.0	286.6	201.3
	New TMDL	74.6	74.6	74.6	155.5	155.5	155.5	155.5	155.5	388.8	388.8	74.6	74.6
	TMDL	240.74											
	Reduction	177.8	167.3	241.5	701.4	592.3	568.7	678.6	1,005.7	732.2	0	212.0	126.7
SA	TDL	1.1	0.6	1.5	86.7	91.8	91.7	129.7	177.6	170.8	38.0	25.0	2.9
	New TMDL	29.0	29.0	29.0	51.8	51.8	145.2	145.2	145.2	181.4	181.4	29.0	29.0
	TMDL	52.15											
	Reduction	0	0	0	34.9	40.0	0	0	32.4	0	0	0	0
SS	TDL	1.7	1.0	2.2	133.6	141.5	147.9	212.5	289.2	281.5	56.5	33.6	4.6
	New TMDL	46.7	46.7	46.7	85.5	85.5	197.0	197.0	197.0	241.1	241.1	46.7	46.7
	TMDL	107.26											
	Reduction	0	0	0	48.1	56.0	0	15.5	92.2	40.4	0	0	0
SB1	TDL	5.6	5.4	6.1	78.6	76.0	73.0	88.1	120.8	113.9	29.4	32.3	7.0
	New TMDL	21.3	21.3	21.3	25.9	25.9	67.4	67.4	67.4	129.6	129.6	21.3	21.3
	TMDL	24.10											
	Reduction	0	0	0	52.7	50.1	5.6	20.7	53.4	0	0	11.0	0
SH	TDL	0.7	15.5	6.7	76.7	63.8	68.1	88.1	105.2	102.5	29.4	29.6	9.9
	New TMDL	35.3	35.3	35.3	51.8	51.8	134.8	134.8	134.8	311.0	311.0	35.3	35.3
	TMDL	6.27											
	Reduction	0	0	0	24.9	12.0	0	0	0	0	0	0	0
MG	TDL	2,355	2,384	2,272	4,758	3,758	4,770	7,629	8,593	7,873	5,176	2,252	2,724
	New TMDL	169.0	169.0	169.0	337.0	169.0	169.0	169.0	169.0	337.0	337.0	169.0	169.0
	TMDL	169.0											
	Reduction	2,186	2,215	2,103	4,421	3,589	4,601	7,460	8,424	7,536	4,839	2,083	2,555
DR	TDL	1.6	89.0	32.1	467.2	385.5	413.5	522.3	616.0	594.1	162.3	165.2	60.4
	New TMDL	143.6	143.6	143.6	570.2	207.4	207.4	544.3	544.3	570.2	570.2	143.6	143.6
	TMDL	291.27											
	Reduction	0	0	0	0	178.1	206.1	0	71.7	23.9	0	21.6	0

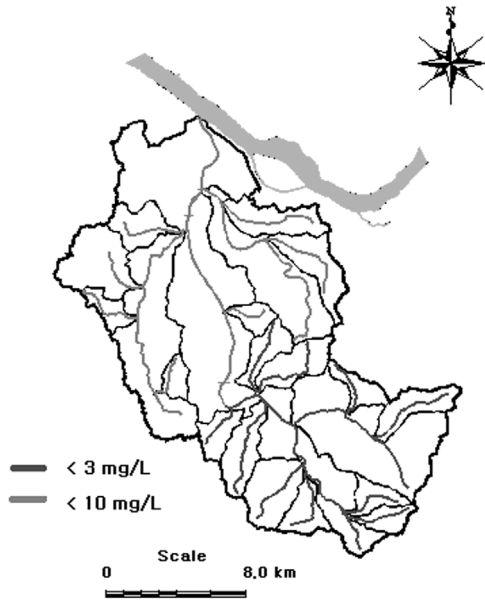


Fig. 3. Target Water Quality of the Anyangcheon.

입하는 지천의 등급도 분류와 같게 한다. 이를 유역도에 나타내면 Fig. 3과 같다.

3.2.2. 산정결과

안양천 유역에 대해 식 (3)을 이용하여 TMDL을 월별로 제시하면 Table 4와 같다. 유지유량은 Table 3의 결과를 이용하였으며 목표 농도는 Fig. 3의 결과를 사용하였다. 더 나아가 평균저수량을 이용하여 하나의 목표량만 산정하는 기존의 방법의 결과도 Table 3과 같이 제시하였다. 이때 사용한 평균저수량은 실측이나 기존의 관측 값으로 도출할 수 없는 값이므로 이길성 등(2007)이 HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran) 모형을 이용하여 모의한 값을 사용하였다. 삭감부하량을 산정하기 위해서는 현재 대상유역의 일부하량이 필요한데 이 또한 HSPF 모형의 모의결과를 이용하여 제시하였다.

본 연구에서는 안양천의 지방2급 제1지류 11개와 안양천 전체의 모의 결과와 TMDL을 비교한 결과는 Fig. 4와 같다. 기존의 평균저수량을 기준으로 단일 TMDL을 산정하는 것에 비해 겨울철과 여름철의 TMDL이 실제 오염부하량을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 이렇게 유량에 따라 달리 수립되는 TMDL은 목표의 달성 가능성을 높여주므로 보다 현실적인 계획이 될 수 있다. 하지만 목감천(MG)과 안양천 전체와 같이 하수처리장이 존재하는 유역의 경우 목표유지유량은 실제 유출량보다 훨씬 작고 하수처리수의 농도가 목표 수질을 만족하지 않으므로 값의 차이가 많이 보임을 알 수

있다. 또 학의천(HU)은 하수처리수 재이용수(일 최대 용량 16,500 m³, 평균 BOD 농도 5 mg/L)를 하천의 유지용수로 활용하므로 모의 결과의 값이 상대적으로 높게 나타났다. 따라서 이에 대한 하천유지유량과 TMDL의 산정에 대한 연구가 요구된다. 두 결과를 이용하여 목감천과 안양천 전체를 제외한 월별 삭감부하량을 산정하면 Table 3과 같다.

3.2.3. QUAL2E 모형을 이용한 검토

각 중유역별로 월별 TMDL을 만족하였을 경우에도 안양천 유역의 출구점에서 TMDL을 유지할 수 없을 수도 있으므로 이에 대한 분석이 수행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 QUAL2E를 사용하여 각 중유역이 월별로 목표 유지유량과 TMDL을 만족할 경우 전체 유역 출구점에서의 총 부하량을 월별로 모의하였다.

모의에 사용된 QUAL2E 모형은 이길성(2007)에서 구축된 것을 보완하였다. 모의 구간은 왕곡천 합류 전부터 시흥천 합류전까지 구축되었던 구간을 한강합류점인 안양천 하류까지 총 30.4 km의 길이로 연장하였고 하천별 수리학적 특성이 비슷한 13개의 reach로 구분하였으며 각 reach에서 0.2 km 단위로 element를 나누어 모의하였다. 안양 하수처리장 및 각 지류들은 점오염원으로 입력되었다. Fig. 5는 안양천에 대한 모형의 모식도이다.

모의 결과는 Table 5와 같다. 모의결과 각 중유역별 TMDL을 만족할 경우 안양천 전체 TMDL을 모두 만족하므로 Table 4의 TMDL이 적절함을 알 수 있다. 만약 이를 만족하지 않았을 경우 Fig. 1의 절차에 따라 각 중유역의 TMDL을 감소(abatement)시키는 계획이 필요하며 결국 출구점의 TMDL을 만족하도록 구성해야 한다.

4. 결론

본 연구는 기존의 국내 오염총량관리방안 수립을 위한 허용오염총량 산정방식을 우리나라의 유출특성에 맞게 개선하여 월별로 수립할 수 있는 방안을 제시하였다. 기존 TMDL의 기준유량은 평균 저수량을 사용하여 연중 하나의 유량을 목표로 산정하였는데 이는 연중 확실적인 목표량을 설정하여 유출의 계절성이 분명한 우리나라에서는 합리적이지 않다. 하지만 본 연구에서는 생태 및 경관 필요유량, 수문학적 갈수량을 모두 고려하는 월별 하천유지유량을 사용하였으므로 연중 계절의 변화로 인한 유출량의 변화를 고려할 수 있으므로 현실적인 목표량을 제시할 수 있었다. 또 중유역별 TMDL을 만족하였을 경우에 전체 출구점에서 TMDL을 유지할 수 있는지 확인하는 분석도 QUAL2E를

Table 5. TMDL of outlet and simulated total daily loads at the satisfied TMDL of all sub-watersheds (unit: kg/day)

Category	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
TMDL of outlet	414.7	414.7	414.7	1969.9	414.7	414.7	622.1	622.1	1969.9	1969.9	414.7	414.7
Simulated total daily load	249.5	249.5	249.5	1295.6	250.7	249.0	391.0	391.0	1228.5	1228.5	249.5	249.5

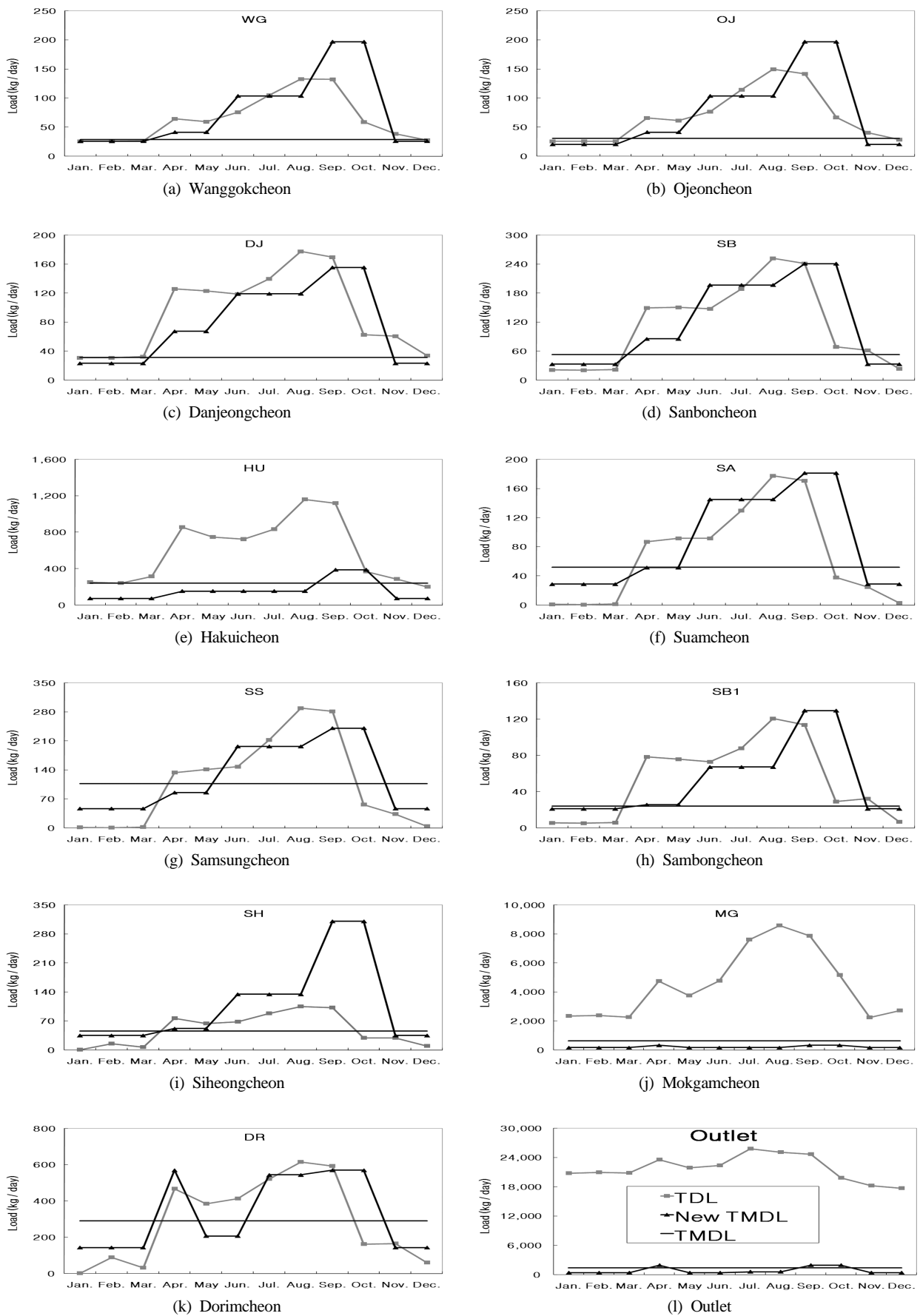


Fig. 4. Comparison of TMDLs and total daily loads of HSPF.

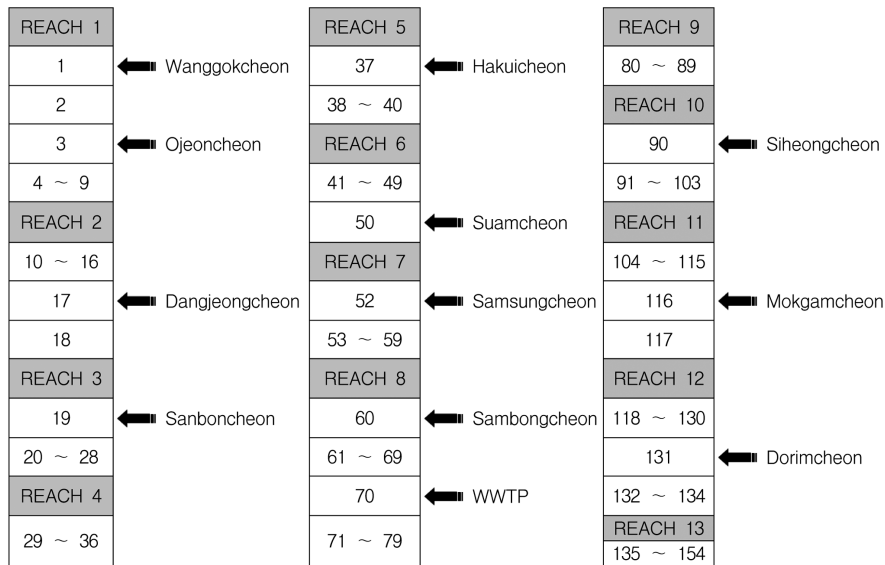


Fig. 5. Schematic Diagram of QUAL2E for the Anyangcheon.

이용하여 수행함으로써 상하류 간의 일관성을 유지할 수 있도록 하였다.

본 연구의 결과는 우리나라의 강우의 계절별 변동성을 적극 반영하므로 향후 하천 및 유역관련 계획 수립은 물론 현재 전국에 활발하게 수립되고 있는 오염총량제에도 적극 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단(과제번호 1-7-3)의 서울대학교 공학연구소를 통한 연구비 지원(90%)과 BK21 Safe and Sustainable Infrastructure Research (SIR)의 연구비 지원(10%)에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

강정훈, 이은태, 이주헌, 이도훈(2004). 어류의 서식처 조건을 고려한 하천의 필요유량 산정에 관한 연구. *한국수자원학회논문집*, **37**(11), pp. 915-927.

김규호(1999). 하천 어류 서식 환경의 평가. *한국수자원학회 논문집*, **33**(2), pp. 10-23.

김규호, 이진원, 홍일표, 우효섭(1996). 하천유지유량 결정 방법의 개발 및 적용: 1. 산정방법. *한국수자원학회논문집*, **29**(4), pp. 161-176.

김봉석, 김용삼, 박윤희, 김태근(2006). 수질오염총량관리에 따른 부하량 할당방법에 관한 연구. *공동춘계학술발표회 논문집*, 한국물환경학회 · 대한상하수도학회, pp. 146-155.

김영일, 이상진(2006). 수질오염총량관리 계획수립의 개선방안에 관한 연구. *한국물환경학회지*, **22**(6), pp. 977-981.

류동경, 배상득, 장재용, 박제철, 류재근(2006). 낙동강수계 수질오염총량관리 대상물질에 관한 연구-TOC 유기물 중심으로-. *공동춘계학술발표회 논문집*, 한국물환경학회 ·

대한상하수도학회, pp. 1181-1188.

문현주, 황석준(2005). *총량관리제 하에서의 지역환경 관리 연구보고서*. 한국환경정책 · 평가연구원.

박재홍, 오승영, 박배경, 공동수, 류덕희, 정동일(2006). 수질 오염총량관리를 위한 관리대상물질. *한국물환경학회지*, **22**(6), pp. 1004-1013.

성영두, 박봉진, 주기재, 정관수(2005). 하천의 어류 서식환경을 고려한 생태학적 추천유량 산정. *한국수자원학회 논문집*, **38**(7), pp. 545-554.

오규창, 정상만, 박상진, 유영석(1991). 한강에서의 하천유지유량 산정. *한국수자원학회논문집*, **24**(1), pp. 119-128.

이기영(2003). *안양천 살리기 종합대책*. 경기개발연구원, 경기도.

이길성(2007). *안양천 유역의 물순환 건전화 기술 개발*. 서울대학교, 과학기술부.

이길성, 정은성, 이준석, 홍원표(2007). HSPF 모형을 이용한 안양천 유역의 물 및 오염물질 순환 분석. *한국수자원학회논문집*, **40**(8), pp. 585-600.

이삼희(2001). *안양천 살리기 종합계획*. 한국건설기술연구원, 안양시.

이혜영, 박석순(2004). 오염총량관리를 위한 의사결정 지원 시스템 적용. *한국물환경학회지*, **20**(2), pp. 151-156.

임동균, 정상화, 안홍규, 김규호(2007). 피라미에 대한 보철거 구간에서의 물리서식처 모의(PHABSIM) 적용. *한국수자원학회논문집*, **40**(11), pp. 909-920.

조탁근, 김영오, 이길성(2007). 국내 미계측유역의 갈수량 산정 개선. *한국수자원학회논문집*, **40**(2), pp. 113-124.

한국건설기술연구원(1995). *하천유지유량 결정방법의 개발 및 적용*. 한국수자원공사, 건설교통부.

한국수자원학회(2005). *하천시설 설계기준*.

현대 Eng.(2005). *안양천 유역종합치수계획 보고서*. 서울지방국토관리청, 건설교통부.

환경부(2006). *한강수계 오염총량 관리계획 수립지침*.

Chen, C. W., Herr, J. and Weintraub, L. (2004). Decision support system for stakeholder involvement. *Journal of Environmental Engineering*, **130**(6), pp. 714-721.

Culver, T. B., Yu, S. L., Zhang, H. X., Naperala, T., Potts,

- A. and Neeley, K. (2004). Nitrate TMDL Development for the Muddy Creek/Dry River Watershed, Virginia: Success and Failure. World Water Congress 2001.
- Endreny, T. A., Somerlot, C. and Hassett, J. M. (2003). Hydrograph sensitivity to estimates of map impervious cover: a WinHSPF BASINS case study. *Hydrological process*, **17**, pp. 1019-1034.
- Kang, M. S., Park, S. W., Lee, J. J. and Yoo, K. H. (2006). Applying SWAT for TMDL programs to a small watershed containing rice paddy fields. *Agricultural Water Management*, **79**, pp. 72-92.
- Milhous, R. T., Updike, M. A. and Schneider, M. (1989). *Physical Habitat Simulation System Reference Manual-Version 2*. Instream Flow Information Paper 26, USDI Fish and Wildlife Services, Biology Report 89(16).
- Stalnaker, C. B. and Arnette, S. C. (1976). *Methodologies for Determination of Stream Resource Flow Requirements: An Assessment*. US Fish and Wildlife Services, Office of Biological Services Western Water Association.
- Stalnaker, C. B., Lamb, B. L., Henrikson, J., Bovee, K. D., and Bartholow, J. M. (1995). *The Instream Flow Incremental Methodology, A Primer for IFIM*. Biological Report 29, National Biological Service, Fort Collins, Colorado.
- Tufail, M. and Ormsbee, L. (2005). Development of Inductive Receiving Water Model for Application in TMDLs. *World Water and Environmental Resources Congress 2005*.
- US Environmental Protection Agency (1999). Proposed revisions to the water quality planning and management regulations, proposed Rule 40 CFR Part 130, *Federal Registers*, **64**(162).
- US Geological Survey (2001). *PHABSIM for Windows, User Manual and Exercises*. Midcontinent Ecological Science Center, Fort Collins, Colorado.