

TMDL 지원을 위한 QUAL2E 모델을 이용한 GIS기반의 삭감시나리오 작성 지원시스템 개발에 관한 연구

A Study on the Development of GIS Based Mitigation Scenario Support System Using QUAL2E Model for TMDL

이철용 · 김계현[†] · 이 혁* · 유광현**

Chol-Young Lee · Kye-Hyun Kim[†] · Hyuk Lee* · Kwang-Hyun Ryu**

인하대학교 지리정보공학과 · *국립환경과학원 수질통합관리센터 · **금오공과대학교 환경공학과

Department of Geoinformatic Engineering, Inha University

*National Institute of Environmental Research

**Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology

(2010년 12월 16일 접수, 2012년 3월 28일 채택)

Abstract : This study was mainly focused on the development of GIS based decision support system to easily make mitigation scenarios and to conveniently simulate water quality for TMDL. The study area was the 31km section of upper Sapgyo stream in Geum river basin, and QUAL2E model was adopted. GIS DB was built through the collection of the data which includes point/non-point source attributes and various thematic maps. The amounts of discharged loads of BOD, T-N and T-P from unit watershed were estimated respectively. Finally, the system, which can operate water quality simulation through simply modifying their values, was developed. The hypothetical three mitigation scenarios were applied, thereby the most efficient mitigation scenario could be chosen by comparison of the results based on GIS. Therefore, it is expected that the developed system can facilitate the decision makers to select the best alternative through the analysis of the available BMPs. Also, it can be used to develop new scenarios using different methods and algorithms. In the future, more study need to be made to enhance its applicability in the perspective of developing mitigation scenarios through the management of individual pollutant sources and extending study areas.

Key Words : TMDL, GIS, QUAL2E Model, Mitigation Scenario

요약 : 본 연구는 국내 TMDL 지원을 위하여 삭감시나리오 작성 및 수질모의가 가능한 GIS 기반의 삭감시나리오 작성 지원 시스템을 개발하는 것을 주요 목적으로 하였다. 연구대상지역은 금강수계 내 삼교천 상류 31 km 구간이며, QUAL2E 모델이 시스템에 적용되었다. 점 및 비점오염원 속성과 다양한 지도 자료를 수집하여 공간 DB를 구축하였다. 각 단위유역의 BOD, T-N, T-P 배출부하량을 산정하였고, 삭감시나리오 작성 과정에서 이들의 수치만을 간단히 조작하여 수질모의가 가능하도록 시스템을 개발하였다. 세 가지 삭감시나리오가 적용되었으며, GIS 기반의 결과 비교를 통해 효율적인 삭감시나리오 선정이 가능하였다. 따라서 본 연구에서 개발된 시스템은 향후 최적 의사결정지원에 기여할 것으로 기대된다. 아울러 새로운 삭감시나리오 작성 방법 및 알고리즘 개발에도 활용될 것으로 판단된다. 향후 시스템 고도화를 위해서는 오염원별 관리에 따른 삭감시나리오의 작성 지원, 대상지역의 확대 적용 등의 후속 연구가 필요할 것으로 사료된다.

주제어 : 수질오염총량관리제, 지리정보시스템, QUAL2E 모델, 삭감시나리오

1. 서론

TMDL은 수계내의 단위유역별 오염부하의 총량을 일정량 이하로 유지시킴으로써 목표수질설정 배수지점에서의 수질을 일정 수준 이상으로 만족시키는 것을 목표로 한다.^{1,2)} 이를 위해서 우선 유역 경계지점의 목표수질을 설정하고, 이를 달성하도록 단위유역별 배출부하의 총량을 할당한다. 아울러 허용총량을 초과하는 배출부하량에 대해서는 지자체별 자체 시행계획을 마련하여 삭감토록 한다. 이때 시행계획이 목표수질을 만족시키는 지 정량적으로 확인하기 위한 타당성 검증 과정이 요구되며, 타당성 검증의 근거로는 수질모의에 의한 수질예측 결과가 이용된다. 따라서 수질모의를 위한 수질모델 프로그램은 TMDL 추진을 위한 과학적 근거이자 핵

심요소로 중요도와 활용도가 상당히 높다.

그러나 대부분의 수질모델 프로그램은 수질모의 전문가를 위해 개발된 프로그램이므로 구성이나 실행과정이 매우 복잡하다.³⁾ 즉, 일반 사용자가 일정 수준 이상의 교육 없이 바로 이용하기에는 많은 어려움이 따른다. 또한, 수질모델 프로그램의 모의결과는 대부분 문자와 수치만으로 표출되므로 의사결정자가 이를 즉시 인지하여 정책결정을 위한 의사결정에 반영하기에는 어려움이 많다. 더불어 공간적 수질 변화의 양상이나 주변 환경과의 상호관계 등도 의사결정에 반영하여야 하나, 기존 환경에서는 이러한 모든 사항의 고려를 기대하기는 어려운 실정이다.

이러한 문제의 해결에 있어 GIS (Geographic Information System) 기반의 삭감시나리오 작성 지원시스템은 효율적이

[†] Corresponding author E-mail: kye Hyun@inha.ac.kr Tel: 032-860-7602 Fax: 032-863-1506

고 현실적인 대안이 될 수 있다. GIS는 하천 수질의 수치적 변화를 지도화하여 표출하므로 수질변화에 대한 이해도를 높이고, 공간적 상호관계의 파악을 용이하게 하는 장점이 있다.⁴⁻⁶⁾ 또한, 수질모델 프로그램과의 연동에 있어서도 시스템 개발 과정에서 수질모의 과정을 단순화할 수 있어 의사결정자도 간단한 수치조작만으로 쉽게 수질모의를 수행하고, 모의 결과도 지도상에서 즉시 확인하도록 지원이 가능하다. 이는 의사결정자가 다양한 시나리오에 대한 결과 확인을 용이하게 하므로 현실적이고 효율적이며 창의적인 정책대안을 도출하는데 기여하는 바가 크다.

따라서 본 연구에서는 국내 TMDL의 시행과 관련하여 수질관리 의사결정자가 간단한 수치조작을 통해 쉽고 편리하게 삭감시나리오의 작성 및 수질모의가 가능한 GIS 기반의 삭감시나리오 작성 지원시스템을 개발하고, 적용을 통해 활용성을 확인하고자 하였다. 이를 위해 수질모의 지원을 목적으로 기존에 개발된 유사 시스템 개발 사례를 조사하였고, 이를 바탕으로 시스템 개발 방향을 정의하였다. 연구대상지역으로는 금강수계 내 삽교천 상류 일부 유역을 선정하였고, 수질모델 프로그램으로는 QUAL2E 모델을 적용하였다. 도형 및 속성자료를 수집하여 공간 DB를 구축하였고, 이와 연동하는 GIS 기반의 시스템을 개발하였다. 단위유역별 배출부하량을 산정하고, 이를 기준으로 세 가지의 삭감시나리오를 작성하여 시스템에 적용하였다. 시스템 상에서 각 삭감시나리오에 대한 수질모의 결과를 확인하였고, 이를 통해 시스템 활용성을 고찰하였다.

2. 유사 연구 동향 및 개발 방향

2.1. 수질모의 지원을 위한 시스템 개발 사례

국내 수질모의 지원을 위한 시스템 개발의 사례로는 환경부의 수질정보종합관리시스템 개발⁷⁾ 사례를 들 수 있다. 남한강 유역을 대상으로 수질관리 정책 및 계획 수립 시 의사결정을 지원할 수 있도록 수질관련 DB와 수질모델, 오염물질 처리대안선정시스템을 개발하고 결합함으로써 종합시스템을 구축하였다. 그러나 이 시스템은 TMDL 시행 이전에 개발되어 현재 TMDL 기술지침의 수질관리 방법을 충족시키지 못하고 있다. 또한 수질모의 기능에 있어서도 의사결정자가 즉시 이용할 수 없는 이론적 수준에서 연구가 마무리되었고, 삭감시나리오 작성에 대한 심도 있는 고찰도 부재하였다.

이외 관련 시스템 개발 사례로는 GIS기반의 하천수질관리시스템 개발,⁸⁾ GIS를 이용한 저수지의 수질관리시스템 개발,⁹⁾ GIS를 이용한 새만금 유역의 수질관리 시스템 개발,¹⁰⁾ 유역통합수자원관리를 위한 하천수질 예측시스템 개발¹¹⁾ 사례 등이 있었다. 이들은 공통적으로 전문가 시스템의 형태로 개발되었고, 특히 수질모의 시에는 모델에 필요한 모든 파라미터를 사용자가 직접 입력해야만 실행이 가능하였다. 즉, 수질모의에 필요한 모든 파라미터에 대한 전문지식이

부재한 경우 수질모의가 불가하여 현실적으로 활용이 용이하지 않은 불편함이 있었다.

2.2. 시스템 개발 방향 정의

본 연구에서는 기존의 복잡한 수질모의 과정을 단순화하여 의사결정자가 쉽고 편리하게 다양한 삭감시나리오를 작성하고 그 결과를 즉시 확인할 수 있도록 시스템 개발 방향을 정하였다. 수질모의에 필요한 모든 파라미터는 연구대상지역에 대하여 사전 보정을 거쳐 시스템에 저장하도록 하고, 삭감시나리오 작성에서는 단위유역별 BOD, T-N, T-P 배출부하량 수치만을 수정하여 즉시 수질모의가 가능하도록 설계 방향을 정하였다. 이때 수질모의 과정의 단순화는 시스템에 미리 저장된 유달율을 배출부하량 입력값에 적용하고, 이를 유입지점에서의 유달부하량 및 유입수질로 변환하여 수질모델 입력 자료로 자동 생성하는 모듈을 개발함으로써 가능할 것으로 판단되었다. 수질모의 결과는 지도 및 수치의 형태로 즉시 확인 가능하고, 아울러 유관 GIS자료의 동시 조회도 가능하며, 결과 비교 및 공간 상관관계도 직관적으로 파악할 수 있도록 시스템 개발 방향을 설정하였다.

3. 시스템 개발 및 적용

3.1. 연구대상지역

연구대상지역으로는 금강 수계 내 충청남도 홍성군과 예산군을 포함하는 2개 군, 4개 읍, 8개 면을 선정하였고, 전체 면적은 약 987 km²이다. 이 지역은 근래 홍성군을 중심으로 인구 늘리기 운동의 추진과 함께 아파트 신축이 이루어지면서 인구가 집중되고 있고, 특히 홍성읍은 인구가 4만

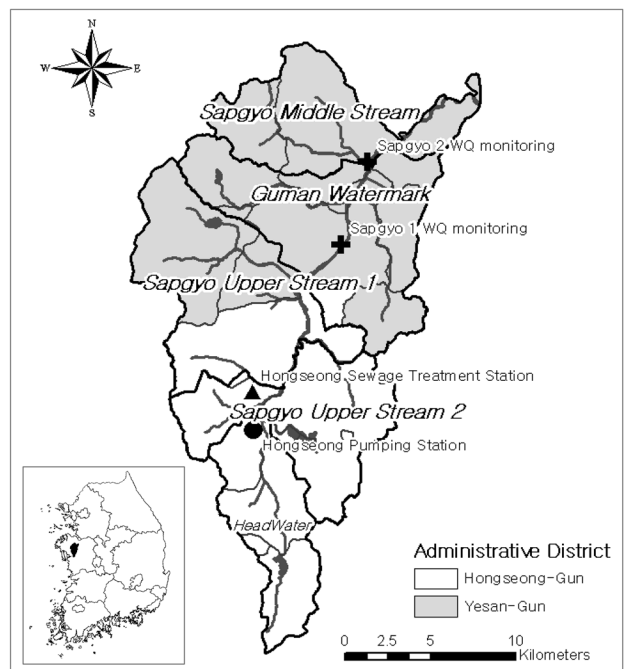


Fig. 1. Study area.

명을 넘으며 도시화가 진행되고 있다.¹²⁾ 아울러 홍성군은 전국 최대 규모의 축산 농가들이 밀집한 지역으로 인구의 유입과 함께 대규모 축산폐기물에 의한 수질악화가 우려되는 지역이다. 따라서 일대 지역은 식수와 농업용수의 확보를 위해서 체계적인 오염원 및 수질 관리가 필요한 실정이다.

삭감시나리오 작성 및 수질모의는 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 충청남도 홍성군과 예산군을 일부 포함하는 유역을 대상으로 하였고, 대상 면적은 약 378 km²이다. 주요 하천은 삼교천으로 예산평야 및 아산평야 일대의 관개수원이 되고 있다. 삼교천 중점에는 당진군과 아산시가 인접한 삼교호가 있으며, 삼교천 본류 구간의 수질은 삼교호의 수질에 직접적인 영향을 미치므로 체계적인 수질관리의 필요성이 대두되고 있다. 삼교천의 총 유로 연장은 약 58.6 km이며, 이 중 31 km구간을 삭감시나리오 작성 및 수질모의를 위한 구간으로 선정하였다.

3.2. 시스템 개발환경

시스템 개발환경으로 프로그래밍 언어는 미국 MS사의 VB 6.0을 기반으로 하였고, 운영체제는 Windows XP SP3을 사용하였다. GIS기반의 정보 조회 및 검색 기능 구현에는 미국 ESRI사의 MapObjects 2.3을 사용하였고, 수질모의 기능은 미국 환경보호청(US EPA)에서 개발한 QUAL2E 프로그램¹³⁾을 연동하여 구현하였다. QUAL2E 모델의 연동을 위해 loose-coupling 방식을 적용하였으며, Fig. 2와 같이 연동되도록 개발하였다. Loose-coupling 방식은 모델에 필요한 입·출력 자료만을 교환하는 방식으로 입력 자료는 GIS를 통해 추출하여 작성되며 ASCII 파일 형식으로 저장된다. 저장된 입력 자료는 수질모의 프로그램에서 직접 불러들여져

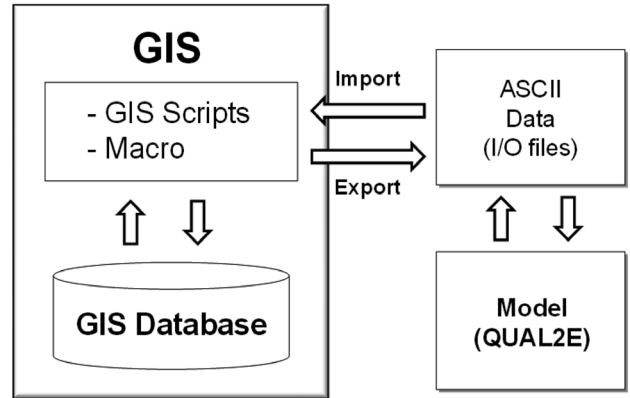


Fig. 2. Loose coupling for linking between GIS and a model.

실행되고, 출력 결과는 ASCII 파일로 저장된 후 다시 시스템으로 불러들여져 코드 해석 모듈을 통해 지도화하여 표출된다.^{14,15)}

3.3. 시스템 구성

Fig. 3은 시스템 구성을 나타내며, 시스템은 크게 도형 및 속성을 저장하는 공간 DB 부분과 삭감시나리오 작성 및 수질모의를 수행하는 기능 부분으로 구분하였다. 공간 DB는 다시 도형 DB와 속성 DB로 구분하였으며, 요구되는 제반 자료를 DB 설계서에 따라 주제별로 입력하였다. 기능 부분은 다섯 가지 주요 기능으로 구성하였고, 세부적으로 도형 자료 조회, 오염원현황 관리, 오염부하량 산정결과 조회, 수질모의, 결과출력을 포함시켰다. 이때 삭감시나리오 작성 및 수질모의 결과 확인은 수질모의의 기능 내에서 이루어지도록 설계하였다.

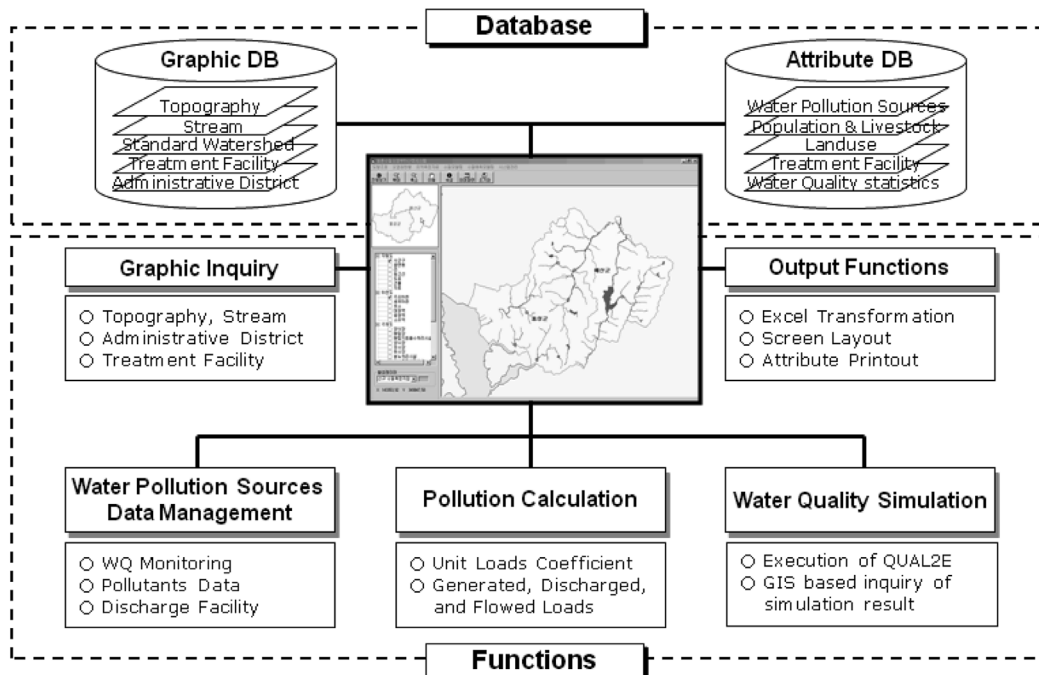


Fig. 3. Components of a GIS based decision support system.

3.4. 공간 DB 자료수집 및 구축

Table 1과 2는 도형 및 속성 DB 자료 구성 내역을 나타낸다. 도형 DB는 시스템 상에서 다양한 주제도를 조회할 수 있도록 하며, 의사결정자는 이를 통해 다양한 공간적 분포 상황 및 상관관계 등을 반영한 의사결정이 가능하다. 속성 DB는 오염원 및 수계환경 자료 등 관련 문자나 수치 정보를 저장하며, 오염부하량 산정 및 삭감시나리오 작성 등에 활용된다. DB 내 자료들 간에는 공통 키(key)에 의해 관계형 결합(relational join)이 가능하고, 키가 일치하는 정보에 대해서는 동시 조회가 가능하도록 설계하였다.

Table 1. List of graphic DB

Category	Theme	Scale	Coverage Type	Custodian
Base maps	Topography	1:25 K	Line	NGII
	Stream (Main, Detail)	1:25 K	Polygon	NGII
	Administrative district	1:5 K	Polygon	NGII
	Building	1:25 K	Line	NGII
	Road	1:25 K	Line	NGII
	Tributary	1:25 K	Line	NGII
	Contour line	1:25 K	Line	NGII
Thematic maps	Standard unit watershed	1:25 K	Polygon	MOE
	Agricultural complex	-	Point	MOE
	Restriction area of discharge facility	-	Point	MOE
	Industrial complex	-	Point	MOE
	Water treatment facility	-	Point	MOE
	Water pumping facility	-	Point	MOE
	Excretion treatment facility	-	Point	MOE
	Landfill	-	Point	MOE
	Landfill leachate treatment facility	-	Point	MOE
	Sewer treatment facility	-	Point	MOE
Waste water treatment facility	-	Point	MOE	
Water quality measurement location	-	Point	MOE	

Table 2. List of attribute DB

Category	Theme	Information items
Water pollution sources	Population	Total population, population of residential/non-residential/commercial areas, household population, etc.
	Livestock	Number of cattle, milk cows, pigs, horses, sheep, deers and fowls
	Landuse	Area of rice field, farmland, ground, forest, road, golf course, etc.
	Industry	Company's name, address, industrial code, product, amount of water supply/used water, waste water (generated, discharged, evaporated, reused, etc.), water quality of discharged water (BOD, COD, SS, TN, TP), etc.
Water quality statistics	Treatment & Discharge facility	Facility's name, address, capacity, treatment population, measuring time, amount of inflow (excretions, sludge) and discharged water, water quality of inflow and discharged water (BOD, COD, SS, TN, TP), etc.
	Measured water quality	Monitoring station's name, measuring time, amount of water, water temperature, amount of bacterium, transparency, pH, BOD, COD, SS, TN, TP, DO, etc.

도형 DB는 수질 오염원의 특성을 파악하기 위한 여러 기본도와 주제도를 수집 및 제작하고, 이를 입력함으로써 구축되었다. 지형도, 주요하천도, 행정구역도 등 기본도는 국토지리정보원 수치지형도를 이용하였다. 공통구역도 및 표준구역도는 국토해양부 및 수자원공사 등 유관기관에서 공통으로 사용하고 있는 구역도를 이용하였다. 기타 수질 및 환경 관련 주제도는 환경부에서 제공하는 자료를 수집하여 변환하거나 직접 제작하여 이용하였다.

속성 DB는 법정동·리 및 구역단위의 오염원 현황, 관측 지점에서의 수질 등의 정보를 입력하여 구축하였다. ‘수계 오염총량관리 기술지침’에 따라 오염부하량 산정에 필요한 자료를 저장하였고, 인구, 축산, 산업, 양식, 토지이용 등 오염원에 대한 자료 조회가 가능하도록 테이블을 구성하였다.¹⁶⁾ 오염원 속성자료는 환경부 「환경기초조사사업」의 전국 오염원조사 자료이며, 2004년 자료가 이용되었다.¹⁷⁾ 아울러 수질모의를 위한 대상 하천의 수질모델 파라미터도 산정하여 저장하였다.

3.5. 단위구역별 배출부하량 산정

단위구역별 배출부하량은 DB 내 오염원 자료를 이용하여 ‘수계오염총량관리 기술지침’에 따라 산정하였다.¹⁶⁾ Fig. 4는 단위구역별 오염부하량 산정 과정을 일반화한 흐름도이다. 우선 단위구역별 행정경계의 포함 면적비를 산정하였고, 각 리·동에 대한 오염원별 부하량을 산정하였다. 산정한 부하량을 포함 면적비로 나누어 단위구역별로 배분하고, 각 리·동별 오염부하량은 각 오염원에 대하여 원단위를 적용하여 산정하였다.

배출부하량은 배출경로에 따른 배출계수를 적용하여 산정하였고, DB에 저장하여 삭감시나리오 작성에서 손쉽게 활용되도록 하였다. 수질모의에 사용되는 유달부하량은 배출부하량에 유달률을 곱하여 산정하였으며, 유달율은 지천 경계 지점의 농도비로써 계산하였다. 사용된 배출계수 및 유달율도 ‘수계오염총량관리 기술지침’에서 제시하는 방법에 따라 산정하였다.¹⁶⁾

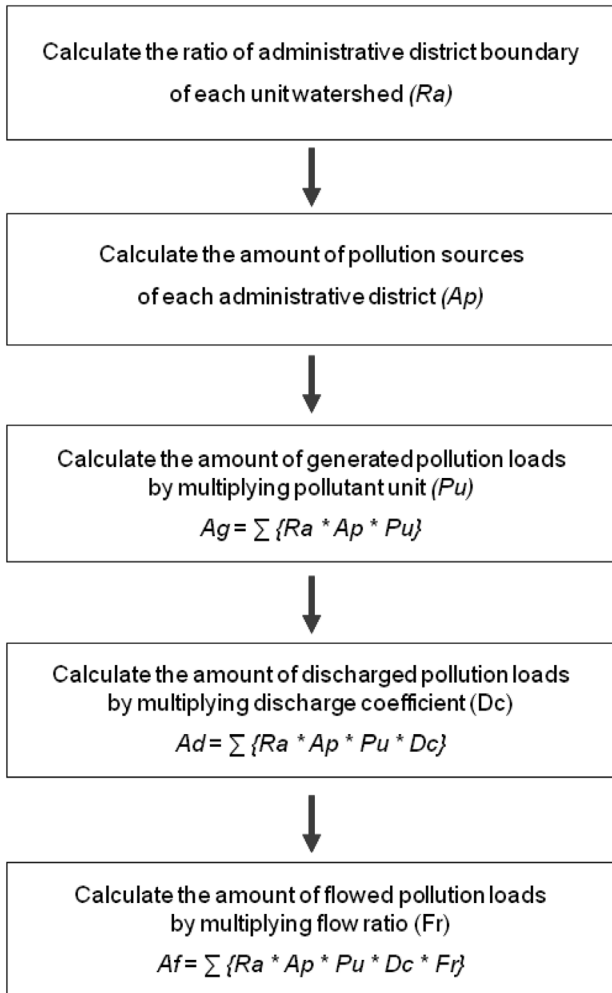


Fig. 4. Process for the calculation of the amount of generated, discharged, and flowed pollution loads.¹¹⁾

3.6. 수질모델 적용

Fig. 5는 수질모의 구간에 대한 모식도를 보여준다. 유출 입지점은 8개이며, 점 유입지점이나 취수지점으로 간주하였다. 수질모의 구간을 포함하는 표준유역은 ‘삽교천상류’, ‘구만수위표’, ‘삽교천중류’가 존재하였다. 이때 ‘삽교천상류’는 오염원이 밀집하여 배출부하량이 상대적으로 클 것으로 예상되었으며, 또한 유입지점도 다른 유역에 비해 많아 유입지점 단위의 관리가 필요할 것으로 판단되었다. 따라서 해당 유역은 하류부터 ‘삽교천상류1’, ‘삽교천상류2’, ‘수원(headwater)’ 순으로 소유역 단위로 세분하였다. 삭감시나리오 적용에서는 최상류 소유역인 ‘수원’은 경계조건으로 고정하였으며, 이외 나머지 4개 소유역 및 표준유역인 ‘삽교천상류2’, ‘삽교천상류1’, ‘구만수위표’, ‘삽교천중류’는 삭감시나리오 적용을 위한 단위유역으로 정하였다.

수질모의 구간의 수리계수는 HEC-RAS 프로그램¹⁸⁾을 이용하여 산정하였고, 전체 모의구간을 5개 대구간(reach)으로 구분하였으며, 이를 1 km 간격의 요소(element)로 분할하여 총 31개의 요소로 구성된 수질모의 구간을 정의하였다. 아울러 계산되는 모든 수리계수는 시스템에 저장하여 수질모의를 위한 입력자료 생성 시 자동으로 입력되도록 하였다. 한편, 수질모의 결과에 대한 보정은 환경부 수질측정지점 중 ‘삽교천1’과 ‘삽교천2’ 지점의 2004년도 수질측정 자료를 이용하여 이루어졌다. Table 3은 시행착오법을 통해 구하여 적용된 반응계수 값을 나타내며, Fig. 6은 BOD, T-N, T-P의 보정결과를 나타낸다.

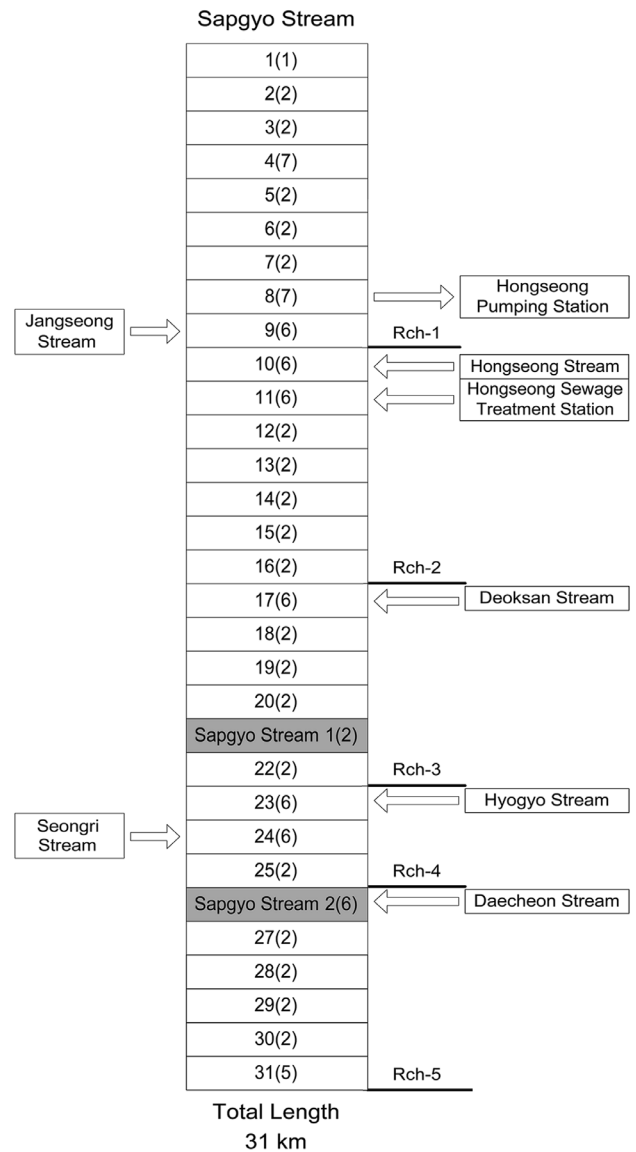


Fig. 5. Diagram of the streamflow to simulate water quality.

Table 3. Applied reaction coefficients in the water quality simulation

Type	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	β ₁	β ₂	β ₃	β ₄	σ ₁	σ ₂	σ ₃	σ ₄	σ ₅	σ ₆
Value	0,020(Rch 1~3) 0,045(Rch 4~5)	opt,3	0,25	1,5	0,08	0,3	0,1	0,7	6,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0

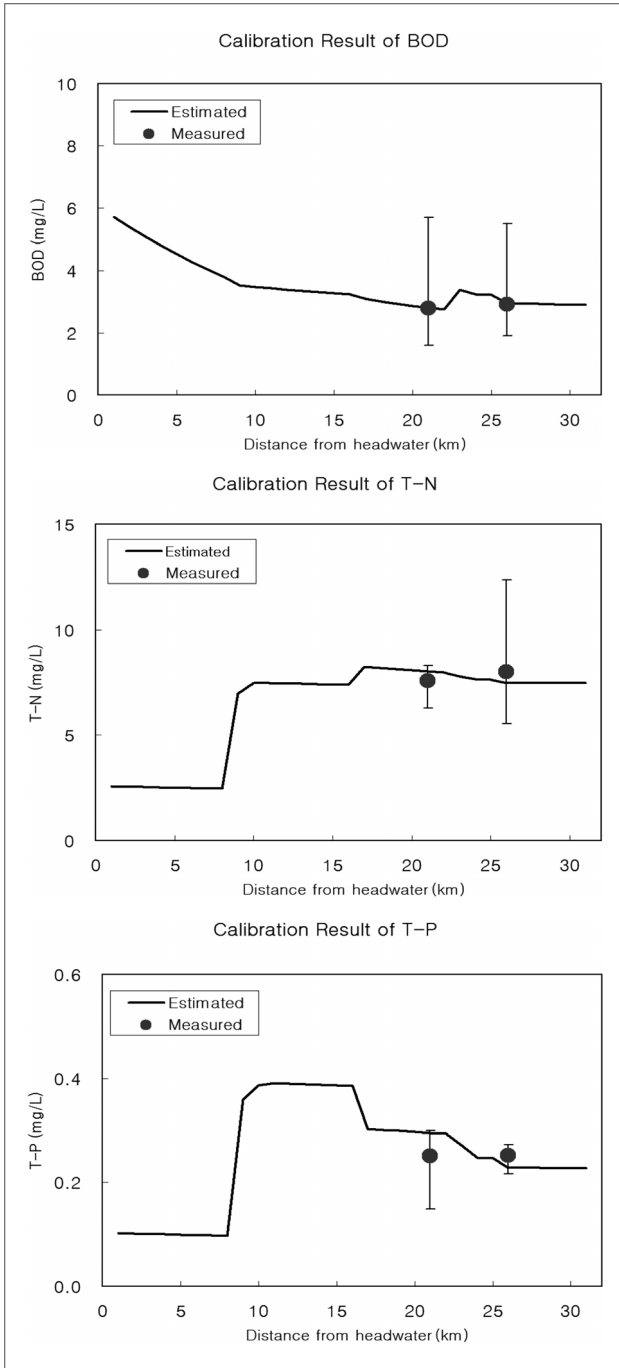


Fig. 6. Calibration results of BOD, T-N, and T-P.

3.7. 삭감시나리오 작성 및 적용 방법

삭감시나리오의 작성 및 적용을 위하여 삭감시나리오 작성 방법에 관한 기존 연구를 조사하였다. 기존 연구에서는 동일물 처리법, 동일농도 배출법, 하천의 오염수준에 따른 할당법 등 총 18가지의 허용총량 할당방법이 소개되었다.^{2,19)} 그러나 본 연구에서는 실험적 적용을 위하여 다양한 허용총량 할당방법 중 쉽게 적용 가능한 방법을 선정하여 세 가지 가상 삭감시나리오를 작성하였다.

삭감시나리오의 기본 전제로 전체 유역에 대한 총 삭감부

하량은 전체 배출부하량의 40%로 가정하였다. Fig. 6의 수질모의 보정결과에서 확인할 수 있듯이 최종배수지점에서의 BOD는 최초 약 3 mg/L이었다. 이때 만약 배출부하량에 따라 수질이 단순 비례로 변화한다고 가정하면, 40% 삭감 이후에는 대략 1.8 mg/L로 수질 개선이 이루어질 것으로 예상할 수 있다. 이는 환경부에 제시하는 하천의 ‘수질 및 수생태계 환경 기준’에서 2 mg/L 이하의 수질등급 ‘ 좋음’(Ib등급)의 수질을 만족한다. 따라서 40% 삭감은 기존 수질을 한 등급 향상시키는 의미 있는 삭감량으로 판단되었다.

이후 서로 다른 기준에 따라 단위유역별 배출허용 오염부하량을 달리 배분하는 방법으로 세 가지 삭감시나리오를 작성하였다. 시나리오 1은 동일물 할당법으로 각 단위유역에 대해 동일한 비율인 40%를 삭감토록 하였다. 시나리오 2는 동일량 할당법으로 전체 삭감량을 단위유역의 개수로 나누어 모든 단위유역에 동일한 양을 삭감토록 하였다. 시나리오 3은 배출부하량이 가장 많은 단위유역에 전부 할당하는 방법으로 유역 내 최대배출원인자에게 전체 책임을 지우도록 하였다.

이때 모든 시나리오에 대하여 단위유역별 최대 삭감가능량은 배출부하량의 75%를 초과할 수 없다고 가정하였다. 이는 본 연구의 삭감시나리오가 가상의 시나리오이기는 하나, ‘수질오염총량관리 업무편람’의 오염원 및 삭감요인별 삭감가능량 기준치에서 확인할 수 있듯이 아무리 처리시설을 늘리고 처리효율을 높인다고 하여도 다양한 오염원에 대하여 배출부하량의 100% 삭감은 불가능하고, 특히 비점오염원은 최대 삭감가능량이 20~30% 미만으로 총 배출부하량의 100% 삭감은 더욱 불가능하기 때문이다.²⁾ 따라서 이를 참고하고 최대 삭감가능량에 대한 일부 현실성을 고려하여 최대 75%까지 삭감이 가능한 것으로 가정하였다. 그리고 단위유역별 삭감가능량을 초과하는 양은 상류 방향 인접 단위유역에 부담시켰다. 그러나 상류에 접한 유역도 75%를 초과하는 경우는 하류 방향에 접한 단위유역에 부담시켰다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 삭감시나리오 작성 지원시스템 개발 결과

상기 개발 방법에 따라 GIS기반의 삭감시나리오 작성 지원시스템을 개발하였다. 공간 DB 내 존재하는 수질 관련 도형 및 속성자료에 대한 GIS기반 조회가 가능한 시스템이 개발되었으며, 단위유역별 배출오염부하량의 입력을 통한 삭감시나리오의 작성 및 수질모의 지원 기능도 시스템 내에서 구현되었다.

Fig. 7은 공간기반 속성조회 기능을 이용하여 리·동별 오염원 정보를 조회한 결과이다. 위치선택에 의해 관심지점에서의 오염원 자료를 공간 DB로부터 쉽게 검색하고 확인할 수 있었다. 이러한 공간선택에 의한 속성조회 기능은 수질관리 의사결정자가 다양한 정보의 위치 및 공간적 상관관계를 시각적으로 파악하기 용이하게 한다. 또한, 방대한 양의 정

보를 입체적으로 이해하고 분석하도록 지원하므로 보다 고차원적이고 창의적인 의사결정에 기여하는 바가 크다.

Fig. 8은 삭감시나리오를 간편하게 작성하고 수질모의도 즉시 수행할 수 있도록 개발된 수질모의 기능의 GUI (Graphic User Interface)이다. 수질모의 과정을 단순화하기 위하여 각 단위유역별 총 배출부하량의 수치만을 입력하여 수질모의가 가능하도록 기능이 구현되었다. 삭감시나리오 작성 및 수질모의 기능의 구동 가능 여부를 확인하기 위하여 단위유역별 총 배출부하량 수치를 시스템에 입력하였고, 그 결과 시

스템 내부에서 QUAL2E 모델 입력파일이 자동으로 생성되고 모델 프로그램에서 생성 파일을 이용하여 수질모의가 정상적으로 이루어짐이 확인되었다.

아울러 수질모의 결과가 GIS기반으로 조회가 가능한지에 대해서도 확인하였다. Fig. 9는 시스템 상에서 수질모의 결과를 지도 및 그래프의 형태로 표출한 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 수질모의 결과파일이 시스템 내부로 불러들여지고 자동 해석모듈에 의해 BOD, T-N, T-P 등 관심 정보가 자동 표출되는 것이 확인되었다. 향후 이러한 기능은 의사결

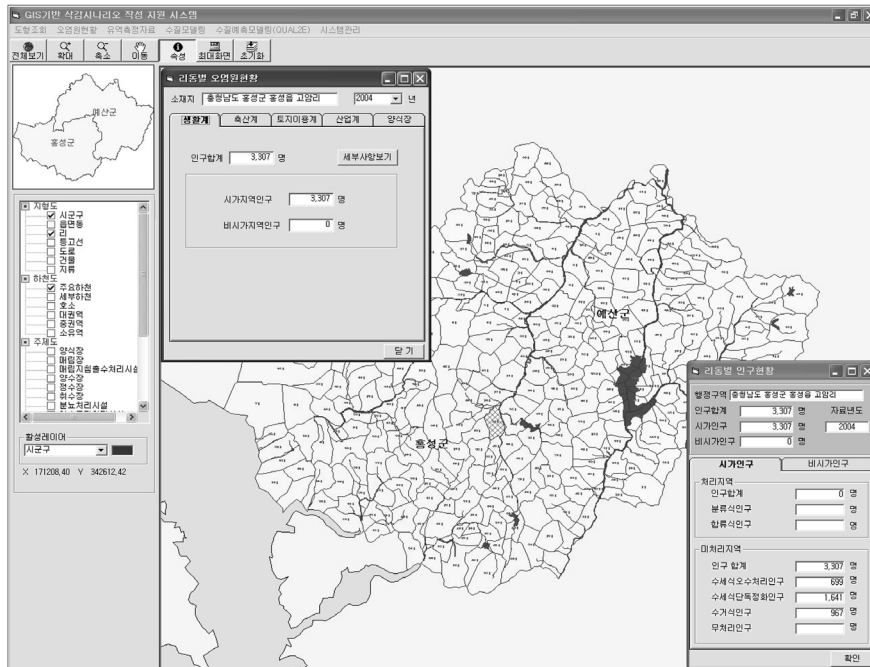


Fig. 7. Inquiry of the pollutant data.

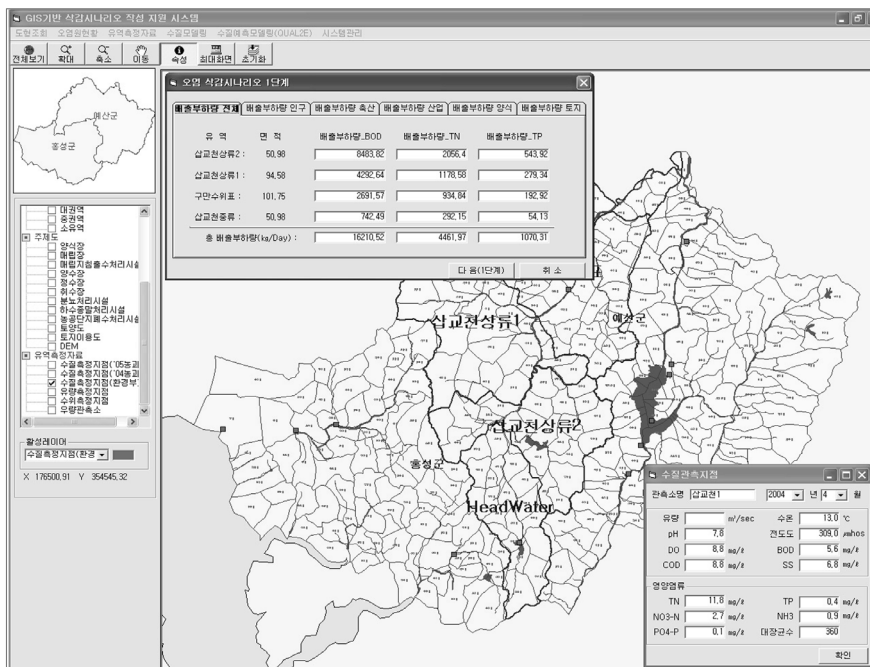


Fig. 8. GUI of the input data for mitigation scenario.

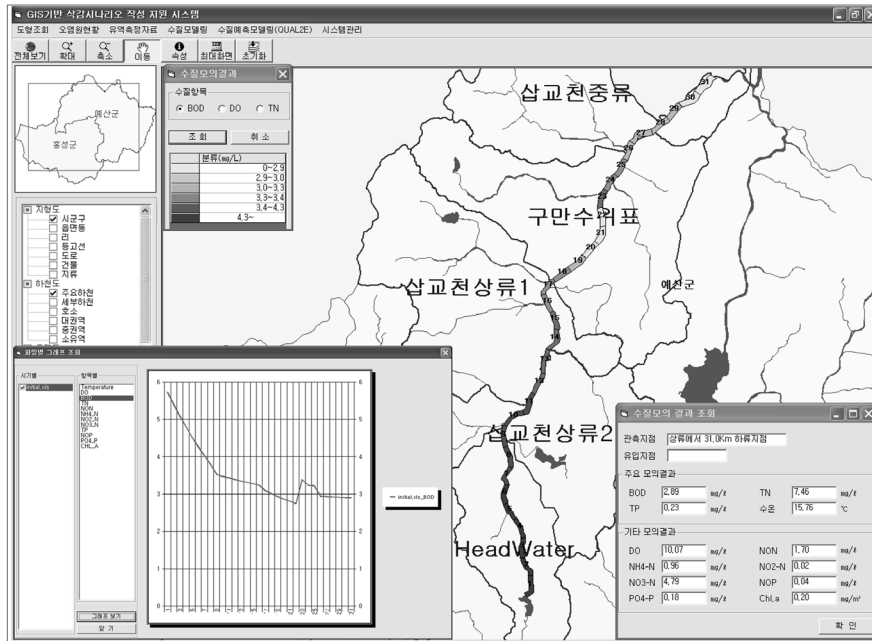


Fig. 9. Inquiry of the water quality simulation results.

정자가 수질 변화를 공간적으로 쉽게 인지하고 이해하는데 많은 도움을 줄 것으로 기대된다.

4.2. 단위유역별 배출부하량 산정 결과

삭감시나리오 작성에 앞서 단위유역별 배출부하량을 산정하였다. Table 4는 각 단위유역 및 오염원별 배출부하량 산정 결과를 보여준다. 4개 단위유역에서 배출되는 총 오염부하량은 BOD가 약 16,210 kg/day, T-N이 약 4,462 kg/day, T-P가 약 1,070 kg/day로 확인되었다. 단위유역별 배출부하량은 모든 수질항목에 대하여 삼교천상류2가 가장 많은 것으로 나타났고, 이후 삼교천상류1, 구만수취표, 삼교천중류의 순으로 많았다. 특히 삼교천상류2의 BOD 배출부하량은

약 8,484 kg/day으로 전체 배출부하량의 절반에 이르렀다. 이는 삼교천상류2가 인근유역에 비해 인구와 축산시설이 밀집되어 있는 흥성읍을 포함하고 있어 발생부하량이 절대적으로 많고, 이와 비례하여 배출부하량도 증가한 것이 주요 원인인 것으로 사료된다.

4.3. 삭감시나리오 적용 결과 및 고찰

Table 5는 삭감시나리오 작성 방법에 따른 단위유역별 허용 배출부하량을 나타낸다. 3.7절의 가정에 따라 대상유역 전체 배출부하량의 40%를 삭감하는 것을 기본전제로 BOD는 약 9,726 kg/day, T-N은 약 2,677 kg/day, T-P는 약 642 kg/day까지 배출을 허용하였다.

Table 4. Results of estimated amount of discharged pollutant loads from each pollutant source (unit: kg/day)

Div.	Unit watershed	Population	Livestock	Industry	Fishery	Landuse	Total
BOD	Sapgyo upper stream 2	4,867.57	2,319.27	22.60	111.22	1,163.16	8,483.82
	Sapgyo upper stream 1	2,462.89	1,173.51	11.43	56.27	588.54	4,292.64
	Guman watermark	1,705.87	302.23	25.53	100.55	557.39	2,691.57
	Sapgyo midstream	454.73	88.04	2.64	7.64	189.44	742.49
	Total	9,491.06	3,883.05	62.20	275.68	2,498.53	16,210.52
T-N	Sapgyo upper stream 2	295.30	1,533.69	3.69	6.86	216.86	2,056.40
	Sapgyo upper stream 1	169.24	879.00	2.12	3.93	124.29	1,178.58
	Guman watermark	252.68	382.11	24.50	43.21	232.34	934.84
	Sapgyo midstream	78.68	121.20	1.23	5.32	85.72	292.15
	Total	795.90	2,916.00	31.54	59.32	659.21	4,461.97
T-P	Sapgyo upper stream 2	107.25	381.02	1.33	4.94	49.38	543.92
	Sapgyo upper stream 1	55.08	195.68	0.68	2.54	25.36	279.34
	Guman watermark	59.83	66.96	6.24	22.00	37.89	192.92
	Sapgyo midstream	17.54	20.65	0.30	2.61	13.03	54.13
	Total	239.70	664.31	8.55	32.09	125.66	1,070.31

Table 5. The amount of allowed pollutant loads discharged from each unit watershed according to various mitigation scenario (unit: kg/day)

Div.	Unit watershed	Initial condition	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
BOD	Sapgyo upper stream 2	8,483.82 (100%)	5,090.29 (60%)	6,862.77 (81%)	2,120.95 (25%)
	Sapgyo upper stream 1	4,292.64 (100%)	2,575.58 (60%)	2,005.03 (47%)	4,171.30 (97%)
	Guman watermark	2,691.57 (100%)	1,614.95 (60%)	672.89 (25%)	2,691.57 (100%)
	Sapgyo midstream	742.49 (100%)	445.49 (60%)	185.62 (25%)	742.49 (100%)
	Total	16,210.52 (100%)	9,726.31 (60%)	9,726.31 (60%)	9,726.31 (60%)
T-N	Sapgyo upper stream 2	2,056.40 (100%)	1,233.84 (60%)	1,610.20 (78%)	514.10 (25%)
	Sapgyo upper stream 1	1,178.58 (100%)	707.15 (60%)	732.38 (62%)	936.09 (79%)
	Guman watermark	934.84 (100%)	560.90 (60%)	261.56 (28%)	934.84 (100%)
	Sapgyo midstream	292.15 (100%)	175.29 (60%)	73.04 (25%)	292.15 (100%)
	Total	4,461.97 (100%)	2,677.18 (60%)	2,677.18 (60%)	2,677.18 (60%)
T-P	Sapgyo upper stream 2	543.92 (100%)	326.35 (60%)	436.89 (80%)	135.98 (25%)
	Sapgyo upper stream 1	279.34 (100%)	167.61 (60%)	143.54 (51%)	259.16 (93%)
	Guman watermark	192.92 (100%)	115.75 (60%)	48.23 (25%)	192.92 (100%)
	Sapgyo midstream	54.13 (100%)	32.48 (60%)	13.53 (25%)	54.13 (100%)
	Total	1,070.31 (100%)	642.19 (60%)	642.19 (60%)	642.19 (60%)

Fig. 10은 초기조건 및 각 삭감시나리오에 따른 수질모의 결과를 비교한 그래프이고, Fig. 11~13까지는 GIS기반 수질모의 결과조회 기능을 이용하여 표출한 각 삭감시나리오 수질모의 결과이다. 시스템을 통해 삭감시나리오를 적용하였을 때 기존보다 수질이 개선되었음을 공간적으로 확인할 수 있었다. 삭감시나리오 적용 이전에는 최종배수지점에서 BOD가 약 2.89 mg/L로 ‘수질 및 수생태계 환경기준’으로 ‘약간 좋음’의 II등급 수질이였다.²⁰⁾ 그러나 삭감시나리오 적용 이후에는 모든 경우에서 BOD의 수질이 개선되어 약 2 mg/L 이하로 한 단계 상위 등급의 수질인 ‘좋음’의 Ib등급을 만족하는 것이 확인되었다.

반면, 서로 다른 방법에 따라 단위유역별 삭감량을 달리 배분함으로써 전체 하천 구간에 대한 수질변화 경향은 차이를 보였다. 삭감시나리오 1은 약 17 km 지점 이후부터 Ib등급 수질을 만족하였고, 삭감시나리오 2는 약 26 km 지점 이

후부터 Ib등급 수질을 만족하였으며, 삭감시나리오 3은 9 km 지점 이후부터 Ib등급 수질을 만족하였다. 한편, 효교천과 성리천의 영향으로 모든 삭감시나리오에서 약 23 km 지점부터 수질이 다시 나빠져 Ib등급 수질을 약간 벗어났다. 이에 따라 삭감시나리오 1에서는 약 17 km 지점 이후부터 약 5 km의 Ib등급 수질 구간이 나타났고, 삭감시나리오 3에서는 8 km 지점 이후부터 약 14 km 정도의 Ib등급 수질 구간이 나타났다. 따라서 Ib등급 수질 구간은 삭감시나리오 1

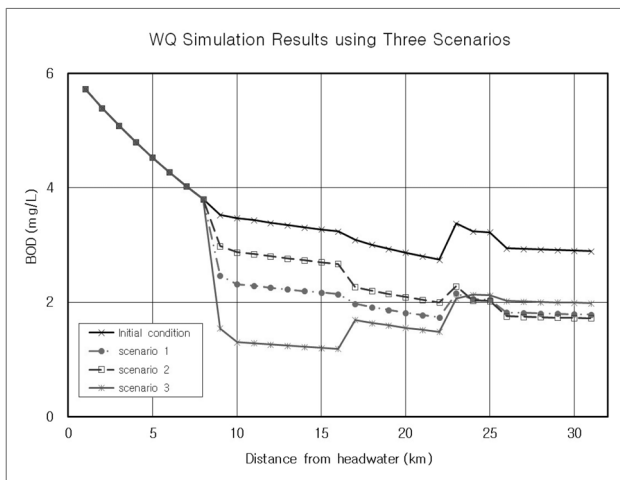


Fig. 10. Water quality simulation results using three scenarios.



Fig. 11. Water quality simulation result according to the mitigation scenario 1.



Fig. 12. Water quality simulation result according to the mitigation scenario 2.



Fig. 13. Water quality simulation result according to the mitigation scenario 3.

에 비해 삭감시나리오 3에서 약 2.8배 정도 더 긴 것으로 확인되었다. 그러나 Table 6에서 확인할 수 있듯이 최종배수 지점에서 수질은 삭감시나리오 2가 1.72 mg/L로 가장 낮은 수치를 나타냈으며, 삭감시나리오 3은 약 1.98 mg/L로 다른

Table 6. Water quality simulation result of the last element (31st element) (unit: mg/L)

Scenario	BOD	T-N	T-P
Initial condition	2.89	7.46	0.23
Scenario 1	1.79	4.53	0.14
Scenario 2	1.72	4.17	0.15
Scenario 3	1.98	5.15	0.13

삭감시나리오보다 약간 높은 수치를 나타냈다.

한편, 이러한 상황에서 의사결정자가 Ib등급 이상의 수질에서 서식하는 어류의 서식지 복원의 극대화를 목표로 최적의 삭감시나리오를 선정한다고 가정한다면, 의사결정자는 삭감시나리오 3을 우선적으로 고려해야 한다. 그 이유는 수질모의 결과에서 확인할 수 있듯이 삭감시나리오 3의 결과가 전체 하천에서 가장 긴 하천 구간에 대하여 Ib등급 수질을 만족시키며 어류 서식지 확대의 극대화를 가능하게 하기 때문이다. 참고로 ‘금강유역 환경생태조사 보고서’에 따르면, 삭교천에 서식 중인 어류는 총 20여종 미만으로 우점종은 붕어, 참붕어, 피라미 등이다.²¹⁾ 여기서 붕어, 참붕어, 피라미는 대개 BOD가 5 mg/L 이상이고 수질등급 중 ‘보통’의 III등급 이하로써 수질이 좋지 않은 곳에서 주로 서식하는 지표종이다. 반면, 연구대상하천과 인접한 지류인 무한천에서는 ‘매우좋음’의 I등급 이상의 수질에서만 서식 가능한 버들치를 비롯하여 총 40여종 이상의 어류가 서식하고 있다. 즉, 삭교천의 수질악화는 삭교천 생태 환경에 악영향을 미쳤고 무한천과 달리 적은 어종만이 서식 가능하도록 하였다 유추할 수 있다. 따라서 삭교천의 생태복원을 위해서는 삭감시나리오 적용을 통한 수질개선이 요구되며, 이때 삭감시나리오 3은 어류 서식지 복원의 극대화를 가능하게 하는 하나의 대안으로 향후 적용을 고려하여도 가능하리라 판단된다.

물론 현실적으로 삭감시나리오 선정에서는 비용·경제적인 측면도 함께 고려되어야 한다. 가상의 삭감시나리오에서와 같이 유역 전체에 대한 삭감량의 합을 동일하게 하여도 전체 삭감비용이 동일한 것은 아니기 때문이다. 각 오염원의 특징 및 지역·환경적 특성이 반영되면 분명 오염원별 부담비용은 달라지고, 더불어 전체 삭감비용도 달라진다. 이렇게 될 경우 삭감시나리오 3은 최적 삭감시나리오가 아닐 수 있다. 삭감시나리오 3에서는 모든 삭감량을 하나의 단위 유역에 부여하였는데, 이는 과중한 비용 부담의 문제를 야기하고 현실적으로 불가능할 수도 있기 때문이다.

결국 최적 삭감시나리오의 선정은 선정을 위해 정의한 기준에 의존적이다. 의사결정자가 어떠한 기준으로 어떻게 중요도의 가중치를 부여하느냐에 따라 그 선정 결과는 달라질 수 있다. 그러나 근본적으로 다양한 수질모의의 결과는 필수이다. 다양한 결과의 비교가 있어야만 그 중에서도 효율성이 높은 시나리오를 찾을 수 있고 이를 최적 시나리오로 선정할 수 있기 때문이다. 아울러 이 과정에서 비교의 대상이 많아지면 많아질수록 효율성을 극대화하는 시나리오를 찾을

수 있는 확률도 높아진다. 따라서 효율성을 극대화하는 시나리오를 찾기 위해서는 가능한 많은 결과의 수집이 필요하다. 이러한 측면에서 본 연구에서 개발한 시스템은 기존보다 다양한 삭감시나리오의 적용 및 신속한 결과의 확인이 가능하여 최적 삭감시나리오 작성 및 선정 과정에서 활용도가 높을 것으로 판단된다.

그러나 이전에서 설명하였듯이 본 연구의 삭감시나리오 작성과 적용에 있어서는 삭감에 따른 비용이나 경제성에 대한 고려가 부재하였고, 가상의 삭감시나리오만을 적용함으로써 다소 비현실적인 분석만이 가능하였다. 따라서 향후 실무 활용을 위해서는 비용 및 경제성을 고려한 삭감시나리오의 작성과 적용에 관한 연구가 뒤따라야 한다. 아울러 본 연구에서 개발된 시스템은 특정 연구대상지역에 국한하여 활용이 가능한 형태로 개발되어 타 지역에 대한 확대 적용이 용이하지 않았고, 타 지역에 대해서는 별개의 시스템이 개발되어야 하는 한계가 있어 이를 개선하기 위한 연구가 뒤따라야 한다. 또한, 배출부하량 입력도 단위유역별 배출총량 단위로만 입력이 가능하여 추후 단위유역 내 오염원별 배출부하량의 확인과 삭감량 설정이 가능하도록 시스템 기능의 일부 개선도 필요할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 국내 TMDL 시행과 관련하여 수질관리 의사결정자가 간단한 수치조작만으로도 쉽고 편리하게 삭감시나리오를 작성하고 수질모의도 가능한 GIS기반 삭감시나리오 작성 지원시스템을 개발하고, 연구대상지역에 대한 적용을 통해 활용성을 확인하였다.

본 연구를 통해 유사 시스템 개발 사례 조사에서는 의사결정지원을 위해 다양한 수질모의 지원시스템이 개발되었으나 전문가 시스템으로 개발되어 의사결정자가 쉽게 활용하기에는 어려움이 있었음이 확인되었다. TMDL의 실무 지원을 위해서는 삭감시나리오 작성 및 수질모의 과정을 단순화하고 이를 지원하는 시스템의 개발이 요구되었으며, 이러한 요구를 충족시키는 방향으로 GIS기반의 삭감시나리오 작성 지원시스템이 개발되었다. 시스템 개발을 통해 구현이 가능하였던 기능들로는 위치 선택에 의한 오염원 속성정보의 조회와 간편한 삭감시나리오 작성 및 수질모의를 위한 GUI 제공, GIS기반의 수질모의 결과 조회 등을 들 수 있었다. 이들 기능들은 의사결정에 필요한 다양한 정보의 빠른 검색과 간편화 된 수질모의의 수행, 공간 이해를 통한 최적 삭감시나리오의 선정 및 의사결정 등을 효과적으로 지원하는 것으로 확인되었다. 특히, 가상의 삭감시나리오를 적용한 수질모의 결과를 바탕으로 생태 측면에서 설정한 기준에 따라 최적 삭감시나리오의 선정도 가능함이 확인되었다.

GIS기반의 삭감시나리오 작성 지원시스템은 향후 TMDL의 추진 및 실무에 있어 적극 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 특히 최적 의사결정과정에서 그 활용도가 높을 것으로

판단된다. 또한, 향후 새로운 삭감시나리오 작성 방법 및 알고리즘 개발에도 활용이 가능하여 TMDL의 발전에도 기여가 클 것으로 기대된다. 반면, 본 연구에서 삭감시나리오에 따른 비용이나 경제성에 대한 고려는 부재하였다. 따라서 향후에는 시스템을 이용하여 비용경제성을 고려한 삭감시나리오의 작성과 적용에 관한 연구가 필요하다. 아울러 대상지역에 대한 확대 적용이 가능하도록 시스템 개선이 필요하고, 오염원별 배출부하량의 확인 및 삭감량 설정이 가능하도록 시스템 기능의 고도화도 요구된다.

사 사

이 논문은 공간정보 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

KSEE

참고문헌

1. 국립환경과학원 물환경정보시스템 홈페이지, <http://water.nier.go.kr/>, May(2010).
2. 환경부, 수질오염총량관리 업무편람(2004).
3. 환경부, 알기 쉬운 수리·수질모델링, 국립환경과학원 수질총량과·수질총량관리센터, pp. 31~312(2006)
4. 이철용, 김계현, “한강과 경기만 지역 GIS 기반 통합수질모의시스템 개발,” 한국공간정보시스템학회지, **10(4)**, 77~88(2008).
5. 엄명철, 조국현, 이광야, 김계현, “GIS 하천수질정보를 활용한 수질모델링시스템,” 한국관개배수학회지, **9(2)**, 51~58(2002).
6. 김계현, 권우석, “시화호유역 환경정보시스템 구축에 관한 연구,” 대한환경공학회지, **21(12)**, 2361~2371(1999).
7. 환경부, “수질정보 종합관리 시스템 개발: GIS 및 원격탐사 기법을 이용한 환경정보 추출 및 수질관리 응용시스템 개발,” 한국과학기술연구원 시스템공학연구소(1995).
8. 최연용, 성동권, 전형섭, 조기성, GIS기반의 하천수질관리 시스템 구축 및 활용에 관한 연구, 한국GIS학회지, **10(2)**, 289~299(2002).
9. 한진연, 백창현, “GIS를 이용한 저수지의 수질관리시스템 구축,” 한국GIS학회지, **12(1)**, 13~27(2004).
10. 김혜영, 정태섭, “GIS를 이용한 새만금 유역의 수질관리 시스템 개발,” 대한환경공학회지, **24(4)**, 599~611(2002).
11. 노준우, 이상욱, 정세용, “유역통합수자원관리를 위한 하천수질 예측시스템의 개발 및 적용,” 물과 미래, **41(1)**, 33~38(2008).
12. 흥성신문, “흥성읍, 인구 늘리기 ‘온힘’-내고장 주민등록 갖기 집중홍보 나서,” <http://www.hsnews.co.kr/news/articleView.html?idxno=33074>, (2007).
13. Brown, L. C. and Barnwell, T. O. Jr., “The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS : Documentation and User Manual,” U.S. EPA/600/3-87/007

- (1987).
14. Goodchild, M., Haining, R. and Wise, S. et al., "Integration GIS and Spatial data analysis: Problems and possibilities," *Int. j. Geographic Inform. System*, **6**(5), 407~423(1992).
 15. Goodchild, M. F., *Environmental Modeling with GIS*, Oxford University Press, pp. 39~42(1993).
 16. 환경부, 수계오염총량관리 기술지침, 국립환경과학원(2002).
 17. 환경부, 2004년도 전국오염원조사 자료, 금강물환경연구소, (2004).
 18. Brunner, G. W., HEC-RAS, River Analysis User's Manual, Ver. 3.1, U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center(HEC)(2002).
 19. 김시현, 임재명, "수질오염총량관리계획의 시행단계에서 오염부하량 할당방안 개선에 관한 연구," *대한위생학회지*, **20**(3), 51~56(2005).
 20. 환경정책기본법시행령, 시행령 제22138호(2010).
 21. 건설교통부, 금강유역조사 VI-3: 환경·생태조사 보고서, 수자원공사(2006).