

GIS 기반의 자동화된 오염물질 배출부하의 산정과 분석

이철용 · 김계현 · 이 혁

인하대학교 지리정보공학과

GIS Based Automated Estimation and Analysis of Water Pollution Discharge

Cholyoung Lee · Kye Hyun Kim · Hyuk Lee

Department of Geoinformatic Engineering, Inha University

1. 서론

날로 심각해지는 수질오염을 개선하기 위하여 환경부에서는 효율적이고 과학적인 수질 관리와 보전 방안으로 1999년에 오염총량관리계획지침을 고시하여 수질오염총량관리제도(TMDL, Total Maximum Daily Loads)를 본격적으로 시행함으로써 적극적인 수질 개선과 하천 보호에 힘쓰고 있다. 수질오염총량관리제도는 각 유역별로 하천으로 유입되는 총배출오염부하의 절대량을 할당 받은 할당부하량 이하로 관리 배출하여 정해진 유역에 대해 목표수질을 달성하기 위한 제도이다.

수질오염총량관리제도는 현재 우리나라 4대 수계인 한강수계, 금강수계, 영산강수계, 낙동강수계 중 한강을 제외한 3개의 수계에서 의무제로써 시행중에 있으며, 한강수계에 대해서는 일부 지역만 임의제로써 시행중에 있다. 향후 수질오염총량관리제도의 성공적 추진에 따라 향후 우리나라 전 유역에 대해서 의무제로 시행하는 것으로 정책 추진이 이루어지고 있다. 따라서 앞으로 수질오염총량관리제도를 지원하기 위한 다양한 인프라가 계속해서 구축될 것으로 예상되고, 또한 이와 함께 다양한 정책 입안을 지원하기 위한 시스템도 개발 및 발전될 것으로 기대하고 있다.

그러나 이런 기대와는 달리 현재 수질오염총량제도를 적절히 지원하기 위한 시스템의 개발은 초보 단계에 머무는 실정이다. 특히 일부에서 수질오염총량제도를 지원하기 위한 시스템을 개발하여 시범 운영하고 있으며 대부분의 경우 수작업에 의한 발생 및 배출 오염부하량 계산이 이루어지고 그 결과를 바탕으로 정책 결정을 하는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 수질오염총량제도를 효율적으로 지원하고 과학적 의사결정을 지원하기 위해 환경부 고시 "오염총량관리계획지침"의 기술지침에 따라 GIS 기법을 이용하여 소유역별 발생 및 배출 오염부하량을 자동으로 산정하는 수질관리지원시스템을 개발하였다. 또한 일부 연구 대상 지

역에 대하여 개발된 시스템을 이용한 산정 결과를 제시함으로써 관리방안에 대한 고찰 역시 가능함을 보여주고자 하였다.

2. 연구내용

2.1. 연구대상지역

GIS 기반의 자동화된 발생 및 배출 부하량 산정시스템의 개발을 위해 연구대상지역으로써 경기만 일대를 선정하였다(Fig. 1). 이곳은 서울시, 인천시와 경기도, 충청남도를 일부 포함하는 유역이다. 현재 수질오염총량제도가 의무제로 시행되고 있는 유역은 아니지만, 향후 수질오염총량제도에 포함될 가능성이 높은 유역으로써 서해 수질 오염에 직접적인 영향을 미치는 유역이다. 인구 및 공장이 밀집하여 하수와 폐수를 포함한 각종 오염물 배출관리를 소홀히 할 경우 경기만의 오염을 가중시킬 것으로 우려되기 때문에 수질관리의 필요성이 높게 대두되고 있다.

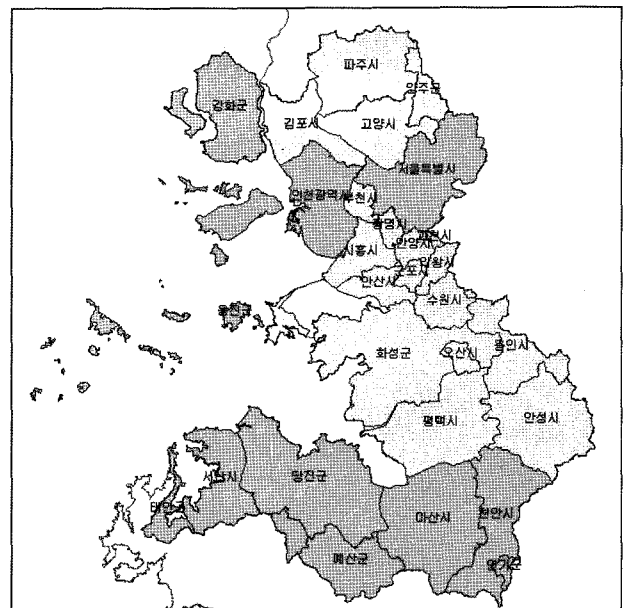


Fig. 1. Study Area.

E-mail: kye Hyun@inha.ac.kr

Tel: 032-860-7602

Fax: 032-863-1506

Table 1. Types of graphic data

구분	세분류	자료형태	축척	출처
지형도	9개 주제 포함	line	1:5,000	국토지리정보원
행정구역	시·도	polygon	“	국토지리정보원
	시·군·구	polygon	“	
	동·리	polygon	“	
유역	대권역	polygon	“	건설교통부
	중권역	polygon	“	
	표준유역	polygon	“	
하천	국가하천	polygon	“	건설교통부
	지방 1,2급 하천	polygon	“	
하천구간	배수구역하천구간	polygon	“	환경부
	총량관리단위하천구간	polygon	“	
	목표수질하천구간	polygon	“	
처리구역	하수처리구역	polygon	1:5,000	환경부
	분뇨처리구역	polygon	“	
	축산폐수공공처리구역	polygon	“	
	폐수종말처리구역	polygon	“	
환경기초시설	하수종말처리시설	point	1:5,000	환경부
	분뇨처리시설	point	“	
	축산폐수공공처리시설	point	“	
	산업폐수종말처리시설	point	“	
	농공폐수종말처리시설	point	“	
	매립지침출수처리시설	point	“	
	농어촌 폐기물종합처리장	point	“	
	광역상수-공업용수 (취수장)	point	“	
	광역상수-공업용수 (정수장)	point	“	
	취수장	point	“	
	정수장	point	“	
양수장	point	“		
저수지	point	“		
토양도	토양의 특성별 분류	polygon	“	농촌진흥청
폐수배출업소	제반 업소 위치 등	point	“	환경부

2.2. 발생 및 배출 부하량 산정 시스템

우선 연구대상지역에 대한 지역적 특성을 파악하고 오염원의 배출경로 및 집적경로를 파악하기 위해 도형자료 및 속성자료를 수집하여 데이터베이스를 구축하여 시스템에 반영하였다. 지형도의 경우 국립지리원 수치지도를 이용하여 각각의 레이어별로 구축하였으며, 유형에 따라 종이지도를 디지털이정하거나 스캐닝하여 구축하였다. 속성자료 데이터베이스는 2004년의 리동별 오염원 현황 자료와 오염부하 원 단위, 환경기초시설 등의 환경부 자료를 이용하여 구축하였다. Table 1과 2는 대상 지역의 도형자료와 속성자료 구축 현황을 각각 보여준다.

부하량 산정은 수질총량 기술지침에 근거하여 시스템 내에서 이루어지도록 하였고, 오염원을 생활계, 축산계, 산업계, 양식계로 이루어진 4가지의 점오염원과 토지이용계로 이루어진 비점오염원으로 구분하였다. 그리고 오염원별 배출 경로 특성을 고려하여 발생 및 배출 부하량이 산정되도록 하였다. 산정한 발생 및 배출 부하량은 표준 소유역별로 정리하여 시스템 상에서 조회가 가능하도록 하였다.

2.2.1. 발생 부하량 산정

대상지역에서의 발생부하량은 2004년의 오염원 현황자료를 기초로 인구, 축산, 폐수배출시설, 양식장, 토지이용 등

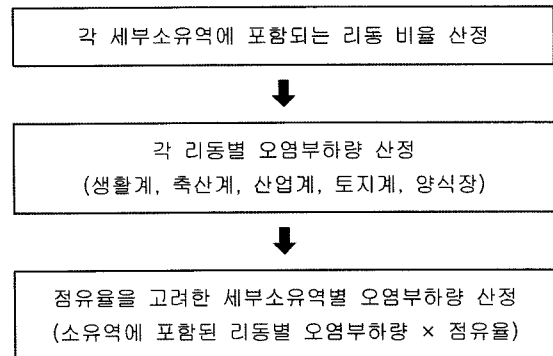


Fig. 2. Process of estimation of pollutant loadings considering the ratios of the areas of individual administration units within each watershed.

Table 2. Types of attribute data

대분류	중분류	소분류
오염원 현황	인구현황	총가구수, 총인구수, 수거식가구수, 수거식인구수, 수세식가구수, 수세식인구수
	가축 현황	한우사육두수, 젖소사육두수, 돼지사육두수, 가금사육두수, 말사육두수, 사슴사육두수, 산양사육두수, 개사육두수, 토끼사육두수, 기타사육두수(허가, 신고, 미규제)
	토지 이용 현황	면적 합계, 전, 답, 대지, 임야, 목장, 과수원, 광천지, 염전, 공자유지, 학교용지, 철도용지, 하천, 제방, 구거, 유지, 수도용지, 공원, 체육용지, 유원지, 종교용지, 사적지, 묘지, 잡종지, 미복구지
	폐수배출업소 현황	업소명, 소재지, 종별, 업종, 주생산품, 폐수발생량, 폐수배출량, BOD 유입농도, BOD 유출농도
	환경기초시설 현황	각 처리장별 시설명, 소재지, 시설용량, 오염물질 유입량, 배출량, 처리전·후 오염물질농도, 제거율
	양식장 현황	소유주, 양식장명, 소재지, 양식어종, 면허기간, 시설면적, 허가면적
수질 현황	수온, 염도, PH, DO, COD, BOD, SS, T-N, NH4-N, NO3-N, NO2-N, Chl-a, T-P, Po4, Cu, Pb, Mn, Zn	

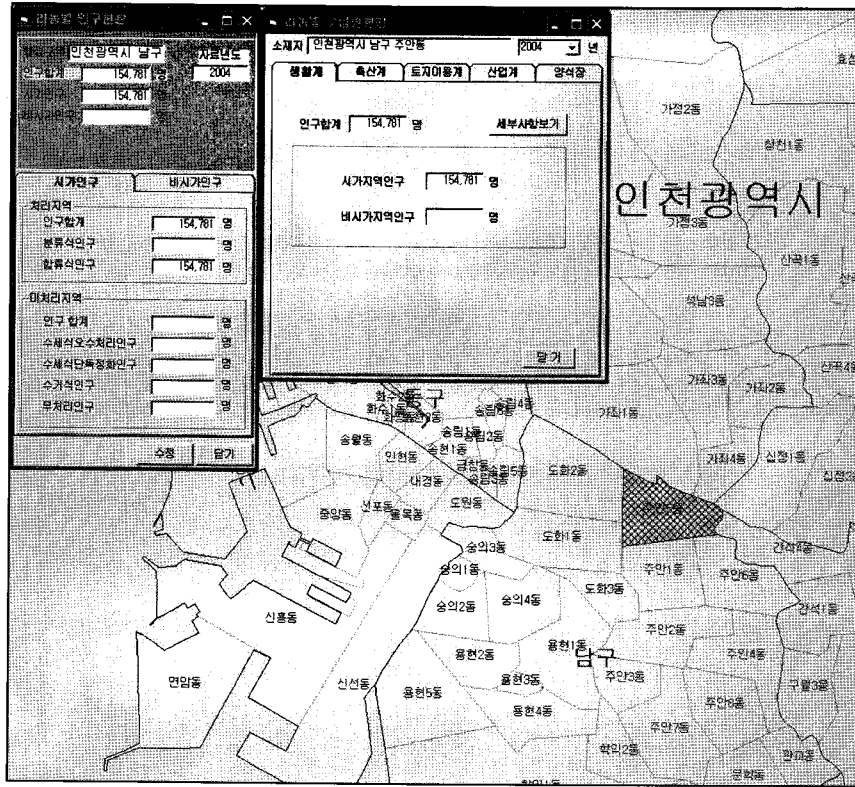


Fig. 3. Graphic and attribute data linked to individual administration units.

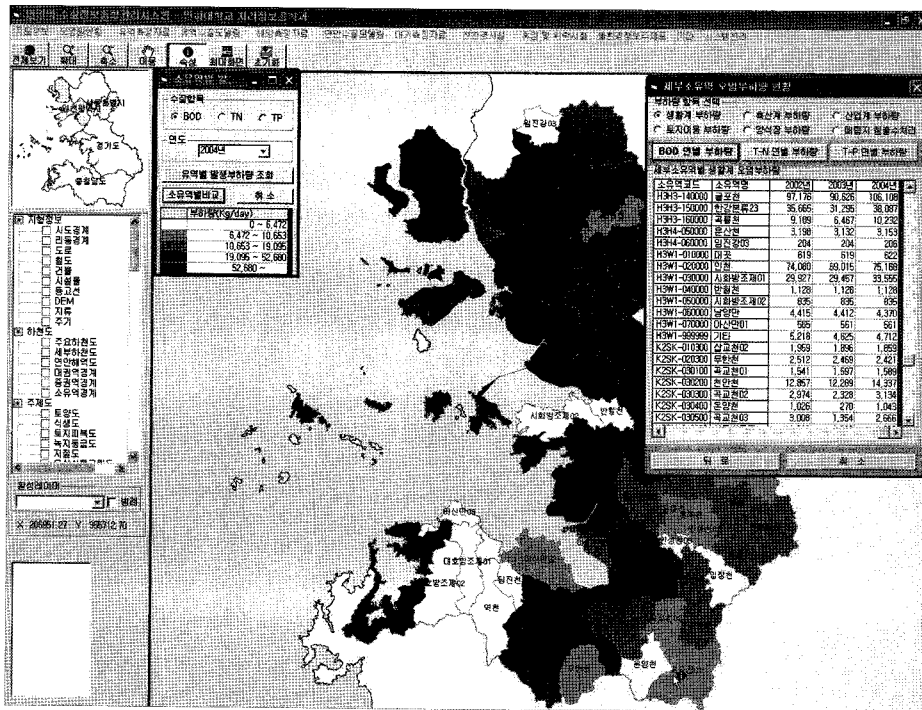


Fig. 4. Estimated amount of generated water pollutants.

오염원별로 고시된 발생원단위를 적용하여 산정하였다. 생활계, 축산계, 산업계, 양식계의 점오염원과 토지이용계로 분류된 비점오염원에 의한 발생부하량을 소유역 내 포함되어 있는 법정동·리별로 산정한 후, 소유역별로 합산하였다. 일부 유역경계와 법정동·리가 일치하지 않는 곳에 대해서는 분

할에 대한 점유율을 반영하였는데, 분할된 면적이 7% 미만일 경우 분할된 면적자체를 오차로 가정하여 분할면적이 큰 유역에 포함하는 것으로 계산하였다(Fig. 2).

생활계 발생부하량은 법정동·리별로 해당지역에 거주하는 인구에 발생원단위를 곱하여 산정하였다. 인구는 시가화인구

Table 3. Unit loading coefficients for generated pollutant loadings

구분		BOD (g/인·일)	T-N (g/인·일)	T-P (g/인·일)
시가화	가정	50	10.5	1.2
	영업	26	8.0	0.7
비시가화	가정	49	13.2	1.5
	영업	26	8.0	0.7

와 비시가화인구로 구분하였고 각각의 인구를 다시 가정 인구와 영업장 인구로 구분하여 원단위를 적용하였다. Table 3은 오염총량관리계획의 기술지침에 기재되어 있는 발생오염원 단위를 보여주는 것으로 오염발생부하량 산정에 이용되었다.

발생원단위를 이용하기 위해 발생원단위에 맞추어 속성정보를 정리 구성하여 데이터베이스를 구축하였다. 속성정보 데이터베이스는 시스템 상에서 클릭을 통해 조회가 가능하도록 설계되었는데 이를 통해 오염원의 현황을 알 수 있으며

(Fig. 3) 유역별 오염부하량 산정을 위하여 관련 오염원 속성 자료가 GIS 내에서 자동적으로 추출되어 계산되도록 하였다.

축산계 발생부하량의 경우 축종별로 분 및 노에 대해 별도로 추정된 발생원단위를 적용하여 산정하였다. 산업계 발생부하량은 기본적으로 개별 폐수배출시설에서 배출되는 처리되기 전 원폐수의 실측 유량과 농도(일평균)를 사용하여 산정하였지만, 만약 실측자료가 없는 경우에 대해서는 약 140종으로 구분된 표준산업분류별 발생원단위를 적용하여 산정하였다. 양식계 발생부하량은 양식장의 시설면적에 발생원단위를 곱하여 산정하였다. 토지의 유출로 발생하는 비점오염원에 의한 발생부하량은 해당지역의 지목별 토지면적에 대해 발생원단위를 적용하여 산정하였다(Fig. 4).

2.2.2. 배출부하량 산정

배출부하량은 모든 오염원별로 처리경로를 고려하고 처리 시설별 또는 방법별 삭감효율을 고려하여 산정하였다. 배출

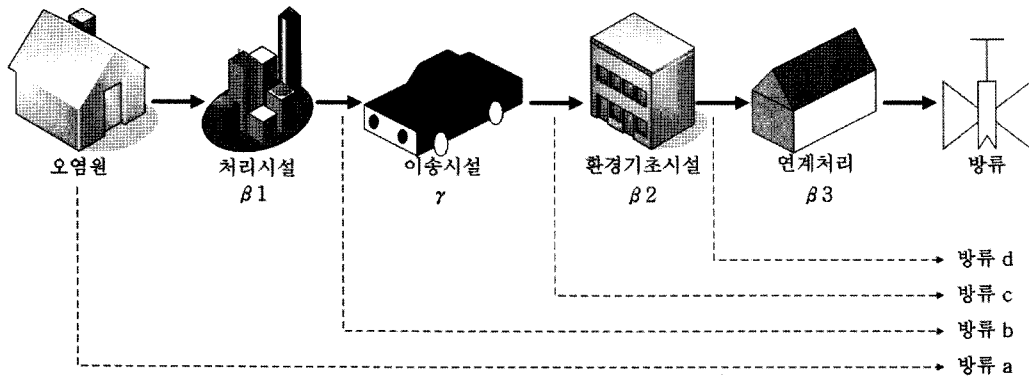


Fig. 5. Discharging routes of water pollutants.

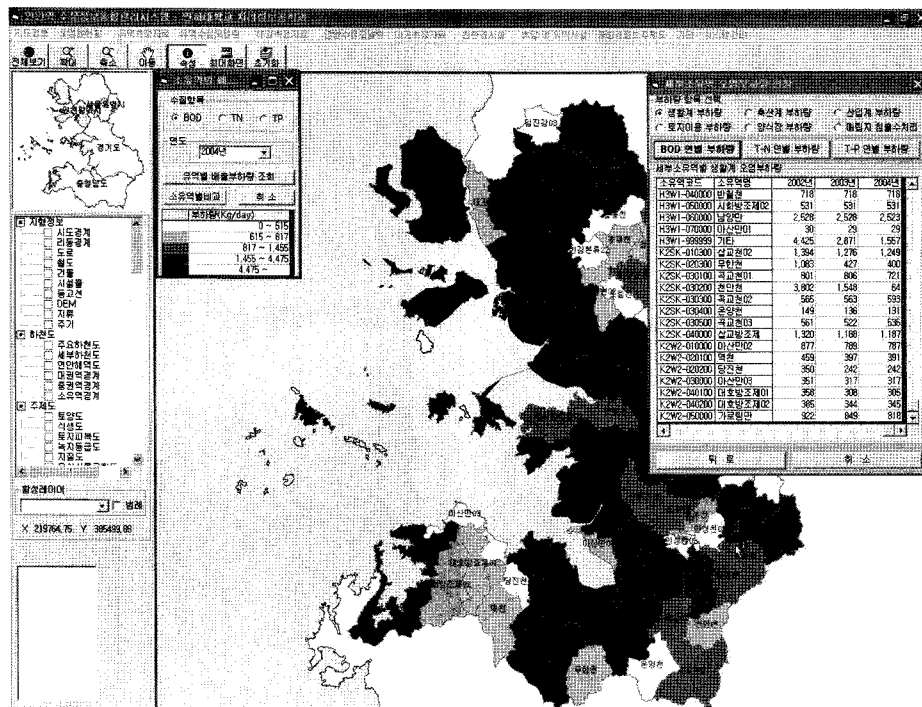


Fig. 6. Estimated amount of discharged water pollutants.

경로에 따라 삭감되거나 변화하는 양상을 정량적으로 파악하여 산정 계산식에 반영하였고, 이를 통해 정확한 배출부하량 산정이 가능하도록 하였다(Fig. 5).

각 처리시설과 방류경로에서의 처리효율은 하수종말처리시설, 분뇨처리시설, 축산폐수공공처리시설, 폐수종말처리시설 등 공공처리시설의 배출량은 실측치를 사용하였으며, 정화시설, 축산폐수처리시설, 폐수배출시설 등 개별처리시설의 처리효율은 기준처리율, 방류수 수질기준, 배출허용기준을 적용하였다. 한편, 소유역 경계와 행정경계가 일치하지 않는 곳에 대해서는 발생부하량 산정 때와 마찬가지로 소유역별 점유율을 고려하여 산정에 반영하였다(Fig. 6).

2.3. 발생 및 배출 부하량 분석

구축한 발생 및 배출 부하량 산정 시스템을 이용하여 실제 발생 및 배출 부하량 결과를 분석하였다. 분석은 인천 일대를 포함하는 굴포천 소유역과 인천 소유역에 대해서 이루어졌다. 현재 이 지역은 오염총량관리제도 의무 시행 대상지역이 아니지만, 서해 수질 환경에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 지리적 위치와 오염원의 밀집에 기인하여 향후 의무 시행 대상지역으로 편입될 가능성이 높은 지역이다. 특히 인천의 경우 인구가 밀집되어있고, 산업화가 빠르게 진행된 광역시 중에 하나로서 수질 오염 정도 및 인근 하천과 바다에 대한 수질 오염 기여도에 대하여 크게 우려되는 도시이다. 그러나 그동안 발생 및 배출 부하량에 대한 정량적인 분석이 미흡하여 오염총량관리제도 도입에 대비하여 체계적인 관리계획의 수립이 시급한 실정이다.

분석을 위하여 인천 일대에 대하여 수집한 2004년 오염원 데이터를 구축한 시스템의 구성에 맞춰 데이터베이스화하였고, 시스템 내부에 입력해 놓은 발생원단위로서 발생 및 배출 부하량을 산정하였다. 시스템 상에서 소유역별 발생 및 배출 부하량의 합산 결과는 물론 오염원의 종류에 따른 부하량 산정 결과의 조화가 가능하게 하여 이를 바탕으로 산정 결과를 정리 고찰하였다.

3. 연구결과 및 고찰

앞에서 구축한 발생 및 배출 부하량 산정 시스템을 이용하여 2004년 경기만 일대 연구대상지역에 대한 BOD(화학적 산소요구량), T-N(총질소), T-P(총인) 발생 및 배출 부하량을 소유역별로 산정하였다. 그 중에서 시범적으로 오염원 분석을 위하여 앞에서 선정된 굴포천 소유역과 인천 소유역의 발생 및 배출 부하량을 각각의 Table 4와 5에 생활계, 산업계, 축산계, 양식계의 점오염원과 토지이용의 비점오염원으로 구분하여 정리하였다.

두 소유역 모두에서 생활계 오염원에 의한 발생부하량이 BOD, T-N, T-P 모든 환경지표에 대해 가장 많은 부분을 차지하고 있음을 Table 4와 5에서 각 합계에 대한 생활계 발생부하량을 비교함으로써 확인할 수 있다. 수질 관리 및 보전을 위한 오염물질 처리에 있어 생활계 하수에 대해 다른

Table 4. Amounts of generated and discharged pollutant loadings of Gulpocheon watershed

구 분	세분류	BOD (Kg/day)		T-N (Kg/day)		T-P (Kg/day)	
		발생량	배출량	발생량	배출량	발생량	배출량
점오염원	생활계	106,108	32,373	22,306	5,880	2,549	691
	산업계	21,499	1,395	1,538	799	222	113
	축산계	2,008	53	534	134	212	12
	양식계	204	204	41	41	11	11
비점오염원	토지이용	6,017	1,504	1,639	410	193	48
합 계		135,836	35,529	26,058	7,264	3,187	875

Table 5. Amounts of generated and discharged pollutant loadings of Incheon watershed

구 분	세분류	BOD (Kg/day)		T-N (Kg/day)		T-P (Kg/day)	
		발생량	배출량	발생량	배출량	발생량	배출량
점오염원	생활계	75,168	14,690	16,075	2,055	1,836	240
	산업계	21,719	8,608	10,144	5,367	468	728
	축산계	1,625	74	440	112	171	10
	양식계	1,160	401	232	232	62	62
비점오염원	토지이용	6,283	1,571	1,504	376	181	45
합 계		105,955	25,344	28,395	8,142	2,718	1,085

오염원보다 더 많은 비용의 투입과 고효율 처리 과정의 도입이 필요한 실정이다. 또한 향후 오염물질 삭감 정책에 있어 생활계 하수를 근본적으로 고려해야 한다. 특히 Table 4의 굴포천 소유역에서의 발생부하량을 살펴보면, 생활계 오염원에 의한 T-N 발생부하량이 전체 발생부하량에 대하여 약 85%로써 거의 대부분을 차지하고 있음을 확인할 수 있다. 만약 굴포천 소유역 인근 하천이나 지천에서 T-N에 의한 오염이 진행되고 있다면, 굴포천 소유역에서는 생활계 하수에서 발생하는 T-N의 저감 및 삭감 처리에 더욱 주력해야 할 것으로 본다.

한편, 산업계 오염원에 의한 발생부하량은 두 소유역 모두에서 그 다음으로 큰 부분을 차지하고 있다. 특히 Table 5의 인천 소유역에서의 산업계 오염원에 의해 발생하는 T-N 부하량을 살펴보면 합계에 대해 약 35%로써 간과할 수 없는 양임을 알 수 있다. 인천 소유역에 대해서는 산업계 오염원에 의한 T-N 발생부하량에 대한 관리 방안 모색이 필요하다. 정확한 원인 규명을 통해 산업계 오염원에 의해 발생하는 T-N의 삭감방향을 결정해야하고, 절대 발생량을 줄이기 위한 삭감을 위하여 T-N을 많이 발생시키는 공장의 인허가 제한 등의 방안도 고려해야 한다.

가축이나 양식장에 의한 발생부하량은 그다지 많지 않으며, 토지이용을 이용하여 산정한 비점오염원에 의한 발생부하량은 모든 환경지표에 대해 전체 발생부하량 중 5~6% 정도로 나타나서 대체로 두 소유역에 있어 고른 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 도로나 건축물의 확장, 건설로 인해 불투수층의 증가가 이루어지면 이 또한 커질 수 있으므로 주의가 필요하다.

배출부하량은 삭감 및 처리 과정을 거치면서 발생부하량에 대해 전체적으로 그 양이 크게 줄었다. 그러나 삭감 및 처리 과정 후에도 여전히 생활계 오염원에 의한 배출부하량이 다른 오염원에 의한 배출부하량에 비해 많고 하천 오염의 주원인이 되고 있음을 확인할 수 있다. 특히 Table 4의 굴포천 소유역에서의 BOD 배출부하량을 살펴보면, 생활계 배출부하량이 전체 배출부하량에 대해 약 91%를 차지하고 있다는 것을 확인할 수 있다. 이는 경기도 일대와 인천 서구, 계양구 일부지역이 하수 미처리 지역으로 남아있고 이 지역의 오염처리 효율이 낮음에 기인한다고 본다. 따라서 이에 대한 대책과 관리가 시급하며 굴포천 소유역에 대한 생활계 하수처리시설의 확충이나 분뇨 수거를 제고, 처리효율 제고 등의 대책을 수립함으로써 생활계 오염원에 의한 배출부하량의 삭감에 힘써야 한다.

아울러 산업계 오염원에 의한 T-N 배출부하량을 살펴보면, 굴포천 소유역에서 799 Kg/day, 인천 소유역에서 5,367 Kg/day로써 각각의 발생부하량 1,538 Kg/day, 10,144 Kg/day에 대해 삭감 및 처리 효율이 50% 미만인 것을 알 수 있다. 그리고 이로 인해 인천 소유역에서 배출되는 T-N의 경우, 산업계 오염원에 의한 배출부하량이 생활계 오염원에 의한 배출부하량을 능가, 수질 오염 기여도가 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 이에 대하여 공장의 폐수 방류 기준의 강화 및 폐수처리시설의 고도화를 통해 처리 효율을 높여 산업계 오염원에 의한 배출부하량을 줄임으로써 수질 오염 기여도를 낮춰야 한다.

한편, Table 5에서 인천 소유역에서의 산업계 오염원에 의한 T-P 배출부하량이 발생부하량보다 많음을 확인할 수 있다. 이는 오염원 자료 입력과정에서 일부 산업계 배출시설에 대한 오염원 발생유량 정보는 누락된 반면, 방유유량 정보는 입력되어 발생한 오차로 판단된다. 효율적인 유역관리를 위한 정확한 배출부하산정을 위해서는 과학적인 모니터링 체계를 통한 신뢰성 있는 데이터의 수집이 정확한 분석을 위해 무엇보다 중요하다 하는 것을 다시한번 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 효율적이고 과학적인 수질 관리 지원을 위한 방안으로 GIS 기법을 이용하여 경기만 일대에 대하여 발

생 및 배출부하량 산정시스템을 개발하였다. 또한 개발한 시스템을 이용하여 실제 수질 오염 분석을 하기 위해서 인천 일대를 시범지역으로 선정하고 2004년 오염원 속성정보를 데이터베이스화하여 발생 및 배출 부하량을 산정하여 그 결과를 정리 고찰하였다.

인천 일대는 급격한 도시화와 산업화가 그 원인이 되어 많은 오염물이 발생, 배출되고 있음을 개발한 오염부하산정시스템의 결과를 통해 확인할 수 있었다. 또한 발생 및 배출부하량을 정량적으로 구함으로써 삭감 계획 및 처리 방안에 대해서도 고찰이 가능하다는 것을 확인하였다. 향후 수질 관리를 위한 정책 입안 및 삭감 계획 작성에 있어 개발된 시스템의 기여도가 높을 것으로 사료된다.

한편, 본 연구 과정 중에 데이터베이스의 무결성에 문제가 발생하면 실제와 다른 산정 결과를 얻을 수 있음도 확인할 수 있었다. 따라서 데이터베이스 구축에 있어 신중함을 기해야 하며, 체계적이고 정확한 데이터 수집이 선행되어야만 정확하고 신뢰할 수 있는 결과를 얻어 실질적인 의사 결정에 활용이 가능하다. 이를 위하여 기존의 오염원 수집체계의 문제점을 정밀 분석하고 정부차원의 지원과 지자체의 자발적 참여를 통해 건설하고 정확한 오염원 데이터베이스의 구축이 선행되어야 한다. 이와 함께 보다 체계적이고 정확한 데이터 수집 방법에 관한 연구도 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 이혁, "GIS 기반의 통합유역관리시스템 구축 방법에 관한 연구," 석사학위논문, 인하대학교(2005).
2. 황의호, 김계현, 이광야, "GIS 기반의 수질·수문 모델의 연계시스템 개발에 관한 연구," 대한환경공학회 춘계학술연구발표회논문집(2003).
3. 한국환경정책평가연구원(KEI), "우리나라 오염총량관리제 특성 및 발전방안," 수질관리 세미나 자료집, pp. 25~45 (2002).
4. 국립환경연구원, "수계오염총량관리 기술지침"(2002).
5. 환경부, "한강수변구역관리 기본계획 및 설계"(2001).
6. 환경부, "한강수계 오염총량관리계획수립지침," 고시 1999-143호(1999).