

# 수질모형 매개변수 추정을 위한 전문가 시스템 구축

Development of Expert System for Estimating the Water Quality Model Parameters

배덕효<sup>1)</sup>, 한건연<sup>2)</sup>, 최철관<sup>3)</sup>

## 1. 서론

일반적으로 모형 매개변수의 정확한 추정은 가장 어렵고도 중요한 문제이며, 이러한 매개변수의 추정과정은 오랜 기간을 통하여 시행착오법, 최적화 알고리즘에 의한 자동산정법, 1차오차분석법 등과 같은 다양한 형태의 방법들이 제시되어왔다. 이러한 연구와 더불어 인간의 지적인 능력을 모방하는 시스템의 개발에 많은 관심을 가져 왔으며 이를 다양한 분야로의 적용이 시도되었다. 그러나 국내에서는 이러한 인공지능분야로의 접근과 적용에 대한 연구가 적었으며, 특히 2차원 수질 모형의 적용을 위한 매개변수의 추정 및 보정에 관한 연구가 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 2차원 수질모형내의 여러 매개변수들간의 관련성을 평가하는 민감도 분석을 기반으로한 추론기관의 개발과 대표적인 GIS 도구인 ArcView의 Avenue를 활용하여 전문가 시스템을 구축함으로써 비전문가라 할지라도 기본적인 지식만 있다면 모의를 실시하여 객관적이고 정확한 출력결과를 얻을 수 있는 기법을 제시하고자 한다.

## 2. 전문가 시스템

전문가 시스템은 인공지능(Artificial Intelligence)의 응용분야 중 하나로서 전문가가 가지고 있는 지식을 인위적으로 컴퓨터에 부여하여 비전문가라 할지라도 컴퓨터에 입력된 전문가의 지식을 이용하여 상호대화를 통하여 의사결정에 필요한 정보를 제공할 수 있도록 개발된 프로그램이다(김화수 등, 1998). 전문가 시스템의 개념적인 구조는 그림 1과 같이 5가지의 기본요소들로 구성되어있다.

지식베이스모듈은 전문가의 지식, 판단 등을 포함한 기본적인 지식을 저장하는 역할을 수행하며, 지식획득모듈은 지식기술자가 전문가의 데이터베이스 또는 관련자료로부터 지식을 만들거나 확장하는 장치이다. 추론엔진모듈은 사용자의 입력자료를 지식베이스와 비교·탐색하여 결론을 이끌어 내는 장치이며, 설명모듈은 추론과정을 사용자에게 설명함으로써 사용자의 의문을 해소하고 신뢰를 얻을 수 있도록 하는 장치이다. 마지막으로 사용자 인터페이스 모듈은 전문가 시스템과 사용자가 실제로 접촉할 수 있는 부분으로 디스플레이의 제어나 대화기능을 수행하는 부분이다.

- 
- 1) 창원대학교 토목공학과, 부교수
  - 2) 경북대학교 토목공학과, 교수
  - 3) 창원대학교 토목공학과, 석사과정

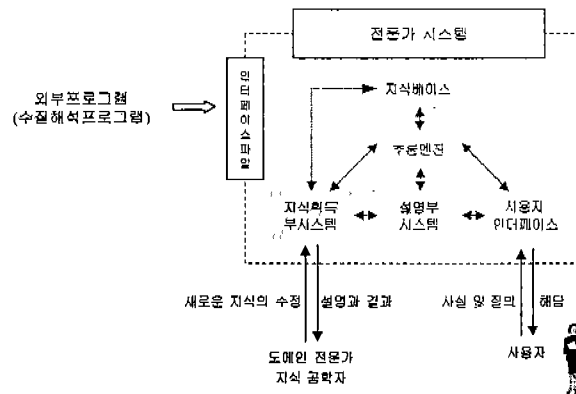


그림 1 전문가 시스템의 개념적 구조

### 3. 2차원 수질모형

하천에서 가장 큰 수질변화 양상은 흐름방향에 대하여 발생하며 1차원 모형이 일반적이지만, 폐수 방출부 및 두 개 하천의 합류부와 같은 경계조건이 복잡하고 흐름 및 오염물질 거동이 다양하게 변하는 국부적인 영역에서는 오염물질의 확산현상의 해석 등에 어려움이 존재하고 있다. 이러한 경우, 수질오염예측을 위해서는 2차원 수질모형의 적용이 필수적으로 여겨지고 있다. 2차원 수질해석을 위한 기본방정식은 이송-확산방정식이 적용되며 오염물질이 연직으로 잘 혼합된 것으로 가정하여, 식(1)과 같이 나타낼 수 있다(이을래, 2000).

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(pC)}{\partial x} + \frac{\partial(qC)}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} [h(E_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + E_{xy} \frac{\partial C}{\partial y})] - \frac{\partial}{\partial y} [h(E_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + E_{yy} \frac{\partial C}{\partial y})] - \delta(x-\bar{x}_s)\delta(y-\bar{y}_s)Q = 0 \quad (1)$$

여기서,  $C$ 는 오염물질의 농도,  $Q$ 는 오염물질의 생성 및 소멸항을 나타내며,  $E_{xx}$ ,  $E_{xy}$ ,  $E_{yx}$  및  $E_{yy}$ 는 확산계수이고,  $\delta = \text{dirac-delta}$  함수로서 영역내에서 생성항 벡터  $(\bar{x}_s, \bar{y}_s)$ 에 위치하게 된다.  $x$ 와  $y$ 는 흐름방향 및 흐름의 횡방향,  $p$ 와  $q$ 는  $x$ ,  $y$ 방향의 단위폭당 유량,  $h$ 는 수심을 나타내고 있다.

### 4. 매개변수 추정을 위한 전문가시스템 구축

2차원 수질모형들은 배경이론이 복잡하고, 그에 따라 입력자료나 매개변수가 복잡해지며 매개변수들간의 영향과 상호작용을 인식하는 것이 매우 어렵게 되어 초보자의 경우 타당한 매개변수를 선택하기가 쉽지 않다. 따라서 수질매개변수 추정 등의 작업에 있어 전문가의 기능을 어느 정도 대신할 수 있는 전문가 시스템과 수질모형이 상호 유기적으로 통합환경 내에서 구현된다면 서로 분리되어 존재하는 시스템보다 매가된 능력을 발휘할 수 있을 것이다.

본 연구의 전문가 시스템 개발에 사용된 언어는 Avenue로써 이는 ArcView에 포함되어 있는 객체지향 프로그램 언어이며, 비교적 단순한 문법구조를 가지고 있다. 또한 Request라 불리는 다양한 라이브러리 함수를 이용하여 프로그램 작성을 지원함으로써 ArcView의 모든 기능을 바로

이용할 수 있는 개발환경이네. 자료를 수정·보완하기나 새로운 분석기능을 추가하여 완전한 응용 프로그램을 개발할 수 있는 장점이 있다(ESRI, 1998). 이러한 장점을 가지는 Avenue는 도형정보와 속성정보에 접근하여 쉽게 연산할 수 있으므로 전문가시스템에서 요구하는 Rule을 효과적으로 구축할 수 있고 수질모형과 연계가 용이하다. 또한 수질모형의 해석결과를 그래픽으로 도시함으로써 수질현황을 객관적으로 판단할 수 있다.

전문가 시스템의 추론기법을 개발하기 위하여 매개변수가 모형의 계산결과에 미치는 영향을 파악해야한다. 이를 위하여 각 매개변수들의 의미 및 적용범위 등을 조사하여 민감도분석을 실시하였다(이병희, 1998). 특정 매개변수에 대한 민감도를 결정하기 위한 방법으로 다른 매개변수들의 값은 표 1에 제시된 기준치로 고정시키고 해당 매개변수의 적용범위 내에서 변화시키면서 모형의 계산을 수행하였다. 계산된 민감도 값이 0.1보다 작은 경우에는 해당 매개변수의 민감도는 작은 것으로 고려하여 제거하였으며, BOD의 경우 그림 2와 같이 횡방향 확산계수와  $K_1$ ,  $K_3$ 에 민감하게 나타났다.

표 1 매개변수의 정의 및 적용범위

반응 계수	정의	하한 치	기준 치	상한 치
X-d	x방향의 확산계수	-	70	-
Y-d	y방향의 확산계수	-	0.5	-
$K_1$	탄소성 BOD의 탈산소계수	0.02	0.261	3.4
$K_2$	탄소성 BOD의 침전계수	-0.36	0.0	0.36
$K_3$	하상산소요구량	0.07	0.7	7.0
$\beta_1$	암모니아성 질소의 1차감쇠율	0.02	0.089	0.4
$\sigma_1$	유기질소의 침전율	0.001	0.01	0.1
$\beta_2$	암모니아성 질소의 상화율	0.1	0.316	1.0
$\sigma_2$	암모니아성 질소의 하상 증가율	0.0004	0.027	1.8
$\beta_3$	아질산성질소의 산화율	0.2	0.632	2.0
$\beta_4$	유기인의 감소계수	0.01	0.084	0.7

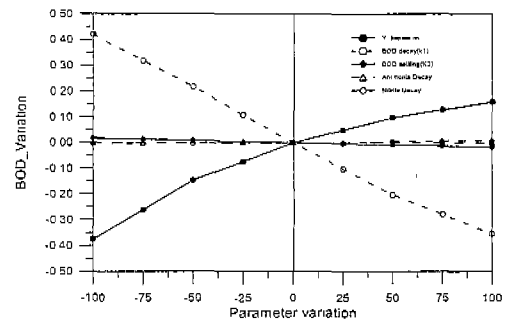


그림 2 매개변수민감도분석(BOD)

매개변수의 추정은 모형에 의해 산정된 모의값 ( $L_{OBS}$ )과 관측값 ( $L_{CAL}$ )의 차이가 일정한 범위내로 접근하는 경우 종결하는데, 식(2)을 이의 목적함수로 사용하여 새로운 매개변수 추정을 위한 추론전략을 표 2과 같이 구성하였다.

$$\begin{bmatrix} DO \\ BOD \\ ORG-N \\ NH_3 \\ NO_2 \\ NO_3 \\ ORG-P \\ PO_4 \end{bmatrix} = \frac{L_{OBS} - L_{CAL}}{L_{OBS}} \quad (2)$$

표 2 매개변수 추정을 위한 추론전략

Parameter		X-D	Y-D	$K_1$	$K_3$	$K_4$	$\beta_3$	$\sigma_4$	$\beta_1$	$\sigma_3$	$\beta_2$	$\beta_4$	
Appearance	DO	high	-	↑	↑	-	-	↑	-	↑	-	↑	-
	DO	low	-	↓	↓	-	-	↓	-	↓	-	↓	-
BOD	high	-	↓	↑	↑	-	-	-	-	-	-	-	-
	low	-	↑	↓	↓	-	-	-	-	-	-	-	-
ORG-N	high	-	↓	-	-	-	↑	↑	-	-	-	-	-
	low	-	↑	-	-	-	↓	↓	-	-	-	-	-
NH <sub>3</sub>	high	-	↓	-	-	-	↓	↑	↑	-	-	-	-
	low	-	↑	-	-	-	↑	↓	↓	-	-	-	-
NO <sub>2</sub>	high	-	↓	-	-	-	↓	-	↓	-	↑	-	-
	low	-	↑	-	-	-	↑	-	↑	-	↓	-	-
NO <sub>3</sub>	high	-	↓	-	-	-	↓	-	↓	-	↓	-	-
	low	-	↑	-	-	-	↑	-	↑	-	↑	-	-
ORG-P	high	-	↓	-	-	-	-	-	-	-	-	↑	-
	low	-	↑	-	-	-	-	-	-	-	-	↓	-
PO <sub>4</sub>	high	-	↓	-	-	-	-	-	-	-	-	↓	-
	low	-	↑	-	-	-	-	-	-	-	-	↑	-

이러한 매개변수 추론전략을 통하여 매개변수의 증가 및 감소에 따른 모의결과의 변화양상을 알 수 있었다. 즉 관측값과 모의값을 비교하여 그 결과에 영향을 미치는 매개변수를 선정하고, 그 차이를 감소시킬 수 있는 방향으로 매개변수를 변화시킴으로써 적절한 매개변수들은 추정하도록 하였다. 이러한 수질모형의 매개변수 추정과정은 그림 3과 같이 도식화될 수 있다.

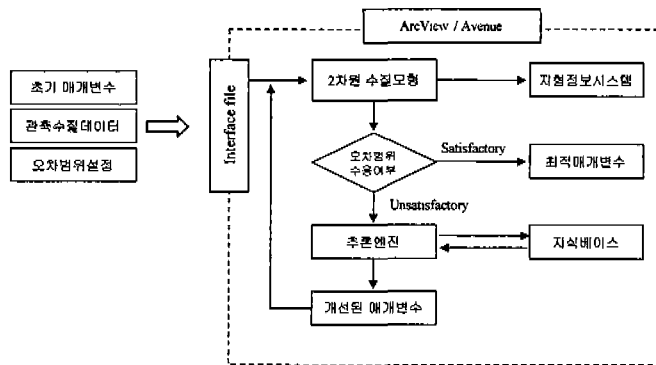


그림 3 매개변수 추정과정

### 5. 전문가 시스템의 적용

연구 대상구간은 경기도 팔당댐 직하류부터 한강 인도교까지의 구간이며, 종단거리는 약 35.3km이며, 이 구간은 왕숙천, 탄천, 중량천 등의 지류들이 유입되고 있다. 연구구간의 하도 단면 자료는 횡단측량 성과가 모두 존재하며 크게 서울시 구간과 경기도 구간으로 나누어 하도 단면의 특징을 설명할 수 있다. 한강의 서울시 관내구간은 하폭 750~1,200m 사이로 비교적 안정된 폭원을 유지하고 있으며, 1982년에서 1986년까지 한강종합개발사업으로 하도가 정비되어 저수로 폭 650~900m에 최소수심 2.5m을 유지하면서 상시유량이 유하하고 있다(서울특별시, 1998). 한강의 경기도구간은 1993년 9월 미사리 지역의 개발사업이 완료되어 팔당댐에서 미사리 지역에 이르는 구간을 제외한 본 연구의 모든 대상구간은 하도정비가 이루어진 상태이다.

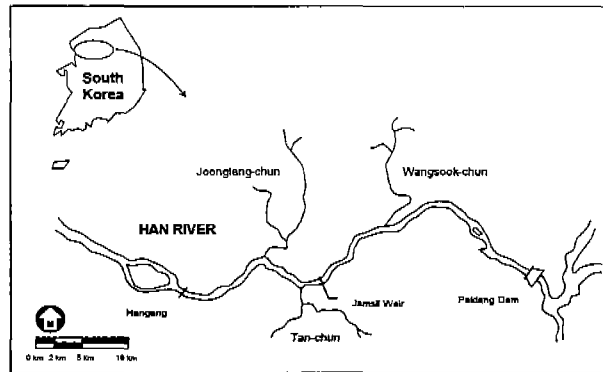


그림 4 연구대상 유역도

본 연구에서 개발된 수질모형 매개변수 추정을 위한 전문가 시스템은 기본적으로 시스템의 질문에 대해 사용자가 대답을 함으로써 모형이 수행되도록 하여 마치 전문가와 사용자가 대화를 통해 문제해결을 하는 듯한 상호대화형 질의 응답방법으로 구성하였다. 개발된 전문가 시스템의 검증을 위해서 수질측정망 운영계획(환경부, 1999)에 의한 수질자료를 활용하였으며 관측값과 모의값의 오차수용범위는 5%로 지정하여 모의하였다. 초기매개변수와 개선된 매개변수 추정과정을 계산의 진행과정을 통하여 정리하면, 표 3과 같으며 매개변수의 개선과 함께 수질관측값에 근사함을 알 수 있다. 그림 5는 대상유역에서 지형도와 BOD오염도를 합성하여 도시함으로써 사용자에게 좀 더 합리적이고 과학적인 판단이 가능하도록 하였다. 또한 ArcView의 Table Document를 활용하여 모형의 출력값을 Table로 작성함으로써 데이터의 편집 및 산술적인 계산이 가능하도록 하였다.

표 3 매개변수 추정과정

반복횟수	1	2	3	4	5	6	· ·	11	12	13	14	관측값
초기매개변수												
Y-d	0.095	0.095	0.918	0.887	0.834	0.784	· ·	0.582	0.553	0.520	0.503	-
$K_1$	0.200	0.180	0.160	0.140	0.130	0.120	· ·	0.080	0.070	0.080	0.080	-
$K_3$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	· ·	0.01	0.01	0.01	0.01	-
$\beta_3$	0.36	0.34	0.32	0.30	0.29	0.28	· ·	0.24	0.23	0.23	0.22	-
$\sigma_4$	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	· ·	0.04	0.04	0.04	0.04	-
$\beta_1$	0.85	0.77	0.69	0.62	0.56	0.50	· ·	0.30	0.27	0.24	0.22	-
$\beta_2$	1.84	1.78	1.72	1.66	1.60	1.55	· ·	1.30	1.26	1.26	1.26	-
$\beta_4$	0.65	0.58	0.52	0.47	0.42	0.38	· ·	0.31	0.31	0.31	0.31	-
오염물질농도												
DO	7.238	7.113	7.017	6.998	6.890	6.770	· ·	6.620	6.437	6.227	5.990	5.872
BOD	2.458	2.524	2.584	2.645	2.665	2.685	· ·	2.761	2.788	2.733	2.725	2857
ORG-N	1.092	1.125	1.154	1.184	1.193	1.202	· ·	1.217	1.225	1.213	1.224	1.163
NH3-N	0.831	0.867	0.903	0.932	0.964	0.997	· ·	1.105	1.117	1.143	1.148	1.279
NO2-N	0.373	0.356	0.336	0.316	0.299	0.280	· ·	0.201	0.186	0.168	0.154	0.128
NO3-N	1.983	1.932	1.828	1.827	1.781	1.736	· ·	1.566	1.540	1.517	1.500	1.442
ORG-P	0.027	0.030	0.032	0.034	0.037	0.038	· ·	0.038	0.038	0.037	0.037	0.043
PO4-p	0.071	0.069	0.066	0.061	0.059	0.056	· ·	0.053	0.052	0.052	0.052	0.046

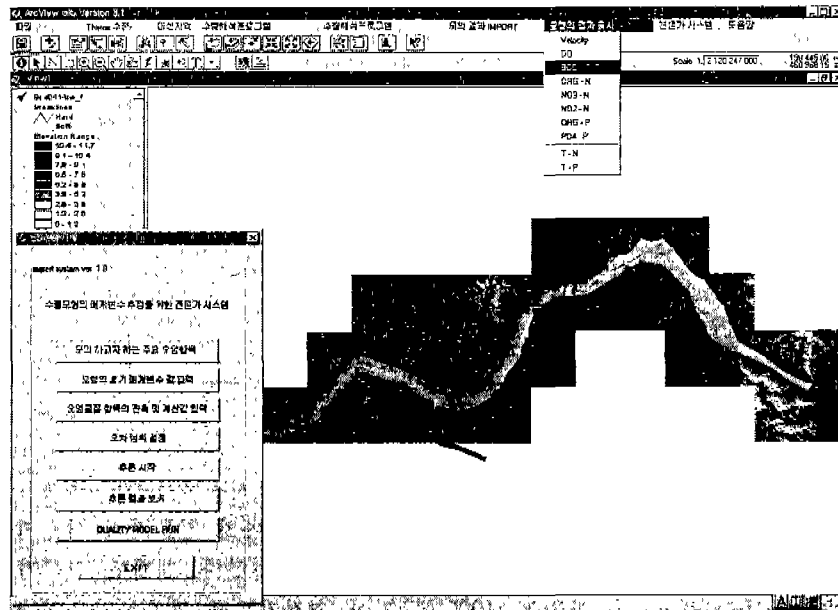


그림 5 지형도와 BOD오염도

## 6. 결론

GIS 및 수질모형과 연계하여 개발된 전문가 시스템은 매개변수와 같이 모형 출력값에 상당한 영향을 주며 사용자의 경험이나 지식이 필요한 부분을 지원함으로써 비전문가라 할지라도 기본적인 지식만 있다면 모의를 실시하고 계산된 결과를 그래픽으로 도시하여 수질현황을 객관적으로 판단할 수 있는 기능을 제공하였다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 98-0601-0401-3)의 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김화수, 조용범, 최종욱.(1998). 전문가시스템, 집문당.
2. 이을래(2000). "수계오염의 최적관리를 위한 동수역학적 수치모형의 개발." 박사학위논문, 경북대학교.
3. 환경부(1999). 수질측정망 운영계획.
4. 서울특별시(1998). "한강수로 용역보고서." 한강관리사업소.
5. ESRI(1998). "Programming with Avenue". Environmental System Research Institute, INC.
6. 이범희.(1998). "지리정보 체계 및 전문가 시스템을 이용한 도시유출 및 수질모형의 개발." 박사학위논문, 서울대학교.