

매개변수 추정방법의 개선을 위한 전문가 시스템의 개발 Development of an Expert System to Improve the Methods of Parameter Estimation

이 범 희* / 이 길 성**

Lee, Beum Hee / Lee, Kil Seong

Abstract

The methods of development and application of an expert system are suggested to solve more efficiently the problems of water resources and quality induced by the rapid urbanization. Major parameters of the water quantity and quality of urban areas are selected and their characteristics are presented by the sensitivity analysis. The rules to decide the parameters effectively are proposed based on these characteristics. The ESPE(Expert System for Parameter Estimation), an expert system based on the 'facts' and 'rules', is developed using the CLIPS 6.0 and applied to the basin of the An-Yang stream. The results of estimating the parameters of water quantity show a high applicability, but those of water quality imply the necessity of improving the present methods due to both the complexity of estimation processes and the lack of decision rules.

Keywords: expert system, parameter estimation method, urban watershed, water quantity and quality model, SWMM, CLIPS

요 지

급속한 도시화의 영향에 따른 수자원 및 환경문제를 보다 효율적으로 해결하기 위하여 전문가시스템의 개발 및 적용방안을 제안하였다. 이에 따라 도시유역의 유출 및 수질에 영향을 미치는 주요 매개변수들을 선별하고 민감도 분석 등을 통해 그 거동특성을 제시하였으며, 이러한 특성들을 바탕으로 효과적 매개변수 결정법칙 등을 제안하였다. CLIPS 6.0을 적용하여 '사실'과 '규칙'을 기본으로 한 전문가 시스템 ESPE를 개발하였으며, 이를 안양천 유역에 적용하였다. 결과적으로 유출관련 매개변수들의 추정결과는 매우 적용성이 높았으나, 수질관련 매개변수들의 추정결과는 그 모의과정의 복잡성과 의사결정 규칙의 부족 등으로 인하여 제시된 방법들에 대한 개선의 필요가 있음을 보여주었다.

핵심용어 : 전문가시스템, 매개변수 추정방안, 도시유역, 수문 및 수질모형, SWMM, CLIPS

* 한국해양연구소 연안·항만공학연구센터 연수연구원

Researcher, Coastal and Harbour Engrg. Reseach Center, Korea Ocean Research and Development Inst., Ansan, Kyonggi 425-170, Korea

** 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

Prof., Dept. of Civil Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea

1. 서 론

“새로운 상황이나 환경에 대처하기 위하여 배우고, 이해할 수 있는 능력”을 지능이라 정의할 때(김제희, 1988), 인공지능(Artificial Intelligence, AI)이란 컴퓨터에 지능을 부여하기 위하여 다방면으로 노력한 결과 이루어진 새로운 과학분야를 말하며, 이러한 인공지능은 자연언어의 이해, 로보틱스, 자동 프로그래밍, 컴퓨터의 시각/청각인식, 자동 정리증명, 지능적 교육시스템, 전문가 시스템 등 광범위한 분야를 포함한다. 특히 전문가 시스템 (Expert System, ES)은 최근에 들어와 인공지능이 실용화되는 단계에서 가장 각광을 받고 있는 분야로서 이의 정의를 명확히 내리기는 어렵지만, 일반적으로 “전문가의 지식을 컴퓨터라는 환경을 통해 재구성하고, 이를 토대로 추론의 형태로부터 정보를 획득할 수 있는 시스템”(조동섭, 1988), 혹은 “어떤 특정 분야에 대한 인간 전문가들의 전문지식들을 수집·정리하여 그 분야에 전문성이 없는 일반인 혹은 의사결정의 고도화를 이루고자하는 사람들을 위하여 개발된 대화식 컴퓨터 프로그램”(Levin 등, 1986)으로 정의하기도 한다.

결국, 전문가시스템은 인간만이 가질 수 있다고 믿어왔던 지적행위, 언어 및 대화의 이해, 학습, 추론 등을 행할 수 있는 시스템의 구성을 목표로 하는 전산학의 한 분야로서 근래에 들어와 개인용 컴퓨터의 대량 보급 및 데이터베이스 관리 시스템의 진보, 소프트웨어의 급속한 발전에 따라 이의 적용사례가 급격히 늘어날 것으로 기대되고 있다. 이러한 추세와 더불어 다양한 정보와 분석방법들을 적용하여 종합적이고, 체계적인 계획수립 및 평가가 요구되는 수공학 분야에 대해서도 전문가 시스템을 적용하고자하는 필요성과 노력들이 계속적으로 증가하고 있어 본 연구에서도 도시유출 및 수질모의 모형의 효율적 적용을 위하여 매개변수의 추정과정에 전문가 시스템 기법을 적용하여 개선해 보고자 하였으며, 이를 실제 유역에 대하여 적용함으로써 전문가 시스템의 구성과정과 적용의 타당성을 제시하고자 하였다.

2. 연구동향 및 모형의 선정

전문가 시스템의 구성 목적은 특별한 주제에 대한 전문가의 의견과 경험을 사용자에게 제공하려는 것으로서 일반적으로 이에 대한 연구의 시초로는 MIT대학의 John McCarthy가 최초의 인공지능 언어인 LISP를

만들었던 1960년경으로 본다(김기태와 김상용, 1987). 인간의 지능을 흉내내어 생각할 줄 아는 컴퓨터 프로그램을 개발하려고 하였던 인공지능의 연구는 초기 컴퓨터의 용량부족과 접근 방식의 비효율성으로 인하여 진전에 큰 어려움을 겪기도 하였으나, 1970년대 말 자연언어의 처리 및 지식의 표현 등 특정분야에서의 많은 성공을 거두게 됨으로 인하여 세계 최초의 상업용 인공지능 프로그램인 MYCIN과 PROSPECTOR 등을 개발하여 의료 및 광물탐사에 적용할 수 있음을 보였다. 이러한 전문가 시스템의 장점으로서의 유용성과 편의성 등을 들 수 있으나, 전문기술에 대한 일반 대중의 호응이 인간 전문가에 비하여 아직도 상대적으로 낮음을 볼 때, 관련된 문제에 대하여 전문가와 초보자를 돕거나 자문하는 정도의 역할을 담당하는 정도로서 주로 사용되고 있다. 이러한 현실에 따라 전문가 시스템의 장·단점을 인간 전문가와 비교하면, Table 1과 같으며, 일반 프로그램과의 차이는 Table 2와 같다. 이러한 특성에 따라 전문가 시스템의 응용분야는 계속적으로 확장되어 가고있어 농경, 제조, 화학, 수학, 컴퓨터, 의료, 전자, 기상학, 군사과학, 지질, 물리학, 정보

Table 1. Strong and Weak Points of Expert System (Kim, 1988)

	전문가 시스템	인간 전문가
장점	영구적 전달이 쉬움 지식의 추가·수정이 용이 의견의 일관성 저림	창조적 적응적 감각에 의한 경험 광범위하게 적용 상식적 적용
단점	창조성이 부족 지침을 받아야 함 심벌에 의한 입력 작은 범위에 적용 기술적 적용	소멸가능 전달의 어려움 지식의 추가·수정이 어려움 의견의 일관성 부족 고가

Table 2. Differences between Normal Program and Expert System (Kim, 1988)

일반 프로그램	전문가 시스템
데이터를 표현하고 처리 알고리즘을 사용 반복적인 처리 대규모의 데이터베이스의 효과적 처리	지식을 표현하고 처리 휴리스틱(heuristic) 사용 추론적인 처리 대규모의 지식베이스를 효과적으로 처리

처리, 천문학 및 법률 등 다방면으로 응용될 수 있다.

이와 관련하여 성기원(1990)은 지하수의 오염현상과 처리에 관한 의견을 비전문가에게 조언할 수 있는 전문가 시스템을 구성하였으며, 강관원 등(1992)과 김주환(1993)은 신경망이론의 적용을 통한 하천유출의 예측에 전문가 시스템을 적용하였고, 오남선(1996) 역시 신경망이론과 Kalman Filter모형을 이용하여 강우예측 모형에 적용하였다. 서울대학교 보건대학원(1995)에서는 인공지능기법을 포함한 의사결정 지원시스템을 개발하였으며, 이 연구에서는 신경망이론을 도입하고 수질추정치와 자연환경의 특성을 정정보로 수질등급을 결정할 수 있도록 구성하였다.

국외의 연구사례들을 살펴보면, 오염원의 배출과 혼합의 예측을 위하여 전문가 시스템을 개발(Doncker와 Jirka, 1991)하려 하였으며, Purdue대학교의 Baffaut 등(1987)이 SWMM모형의 해석을 돕기 위한 전문가 시스템의 연구를 시도한 바 있고, Baffaut와 Delleur(1989)는 ESCALOS(Expert System for the Calibration of SWMM)라는 이름의 전문가 시스템을 KES(Knowledge Engineering System)라는 도구를 사용하여 구성함으로써 수질 및 수량의 간단한 유역모의에 적용하였다. 한편으로는 유출유량의 매개변수 추정을 위하여 침투유량과 유출량과의 관계 변화를 제시하였으며(Liong 등, 1991; Liong과 Ibrahim, 1994), Jewell 등(1978)은 모의치와 측정치 사이의 차이를 최소화 함으로써 매개변수들을 추정할 수 있는 계산과정을 흐름도로 제시하였다.

2.1 매개변수 추정과정의 개선을 위한 전문가 시스템의 구성

사회·경제적 성장에 따른 급속한 도시화의 영향은 수자원 및 환경 문제를 보다 종합적이고 체계적으로 해석해야 할만큼 매우 복잡하게 만들었으며, 유출 및 수질모의 모형의 계속된 발달은 보다 많은 경우에 대하여 더욱 정확한 모의가 가능할 수 있도록 개선되고 있으나 이러한 노력들은 보다 많아진 매개변수들의 추정과정을 필요로 하게 되는 문제점들을 발생시키게 되어 정확한 입력자료의 생성기법과 함께 매개변수 추정과정의 개선을 요구하게 되었다.

모형의 효율적 적용을 위하여 매개변수의 정확한 추정정은 가장 어렵고도 중요한 일 가운데 하나이며, 이러한 매개변수의 추정과정으로는 오랜 기간을 통하여 다양한 방법들이 제시되어 왔다. 즉, 사용자가 여러 매개

변수들을 임의로 변화시켜가며 예측자료와 실측자료사이의 오차를 줄여나가는 시행착오법을 비롯하여 최적화 알고리즘에 의한 자동산정법을 사용하기도 하였다. 전경수와 이길성(1993)의 연구에서는 영향계수법 및 관측치와 실측치간의 오차제곱합을 최소화하는 2차계획법을 사용하여 최적 매개변수벡터를 추정하기도 하였으며, QUAL2E-U(Brown과 Barnwell, 1987)에서는 1차 오차분석법(First Order Error Analysis)등이 사용되기도 하였다.

본 연구에서는 매개변수들의 민감도 분석을 기반으로 추론기관을 개발하고 이를 이용한 전문가시스템을 구축하여 수질 및 유출모의모형의 매개변수 추정과정에 적용하였으며, 이의 결과를 수작업 결과와 비교하여 적용성을 제시하였다.

전문가 시스템의 구조를 살펴보면, Fig. 1에 제시한 바와 같이 지식베이스(knowledge base), 추론엔진(inference engine), 지식획득 부시스템(knowledge acquisition sub-system), 설명 부시스템(explanation sub-system)과 사용자 인터페이스(user interface) 등으로 구성되어 있다(김기태와 김상용, 1987). 이 중에서 전문가 시스템의 핵을 이루고 있는 부분은 전문가의 전문지식이 파일형태로 저장되는 지식베이스 부분과 사용자의 입력자료를 탐색하여 결론을 이끌어 내는 추론기관을 들 수 있으며, 사용자 인터페이스를 통해 입력된 사용자의 명령에 대하여 추론과정을 통하여 답을 출력하게 된다.

본 연구에서는 도시 유출 및 수질모의모형과 전문가 시스템의 효율적 결합을 위하여 Fig. 2 에서 제시한 과정을 통하여 연구를 수행하였다. 즉, 선정된 대상유역 및 적용모형의 특성파악과정을 통하여 적절한 예측

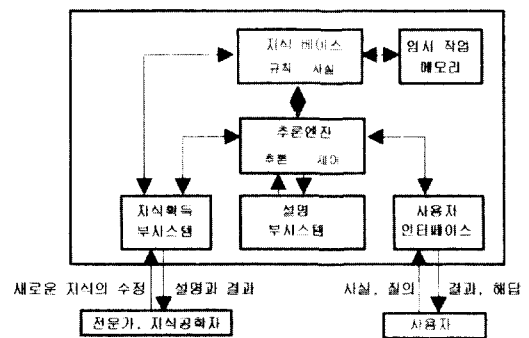


Fig. 1. Structure of Expert System (Kim et al., 1987)

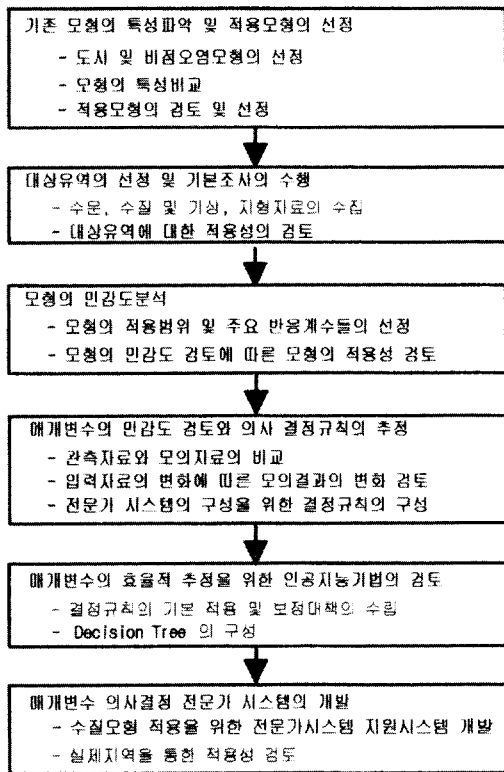


Fig. 2. Research Process of ES Construction

모형을 선정하고 모형의 기본 이론 및 구조와 민감도 분석 등을 통하여 의사 결정규칙을 추정한 후 매개변수의 효율적 추정을 위한 인공지능 기법을 검토하였으며, 전문가 시스템을 개발하여 실제 현상에 적용하였다.

2.2 지식의 구조적 표현 및 제어

특정 분야에 대한 지식베이스를 구축하고, 그러한 지식베이스를 토대로 문제를 해결하기 위해서는 전문지식을 컴퓨터가 이해할 수 있는 프로그램으로 변환하는 작업이 이루어져야 하며, 이 때 전문가 시스템의 구성을 위하여 선행적으로 해결하여야 할 두 가지 문제점들로서는 '인간의 지식을 구조적으로 어떻게 표현할 것인가'와 '표현된 지식을 어떻게 제어할 것인가'로서 이의 해결이 매우 중요하다.

2.2.1 지식의 구조적 표현

전문가 시스템에서 주로 사용하고 있는 지식의 표현 방법으로는 'A이다.', 'B이다.'와 같이 표현되는 '사실들(facts)'과 'A이면 B이다.'와 같이 표현되는 '규칙들

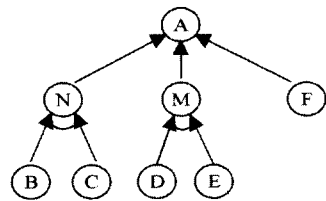


Fig. 3. AND/OR Graph

(Rules)'의 두 가지 방법을 주로 사용하고 있다. 결과적으로 주어진 문제를 해결하기 위해서는 사실과 규칙으로 구성된 지식베이스의 자료들을 사용하여 타당한 결과를 추론하여야 하며, 이러한 과정을 별개의 문제들의 집합으로 축소하여 이해하기 쉽도록 재구성하면, Fig. 3과 같은 형태로 변환시킬 수 있다. 이에 따르면, 문제 A를 해결하기 위해서는 문제 N이나 M, 또는 F 중의 하나를 해결하여야 하고 (OR노드), 문제 N과 M을 해결하기 위해서는 각각 B와 C, D와 E를 해결 (AND노드)하여야 하는 문제 구조를 표시한 것으로서 결국, 문제 A를 해결하기 위해서는 (1)문제 B, C와 N을 해결하거나, (2)문제 D, E와 M을 해결하거나, (3) 문제 F를 해결하여야 하는 3가지의 경우(해)를 나타내고 있다. 여기서, AND노드는 arc로 연결하여 표시하였다. 이와 같이 표현한 구조를 'AND/OR 그래프'라고 부르며, 이 경우 각 노드의 풀이를 위한 일반적인 정의는 다음과 같다.

(1) 선행계산이 필요한 후계노드들을 포함하지 않는 그래프의 종단노드들은 사실(fact)을 나타내며, 이 경우 풀이를 필요로 하지 않는다.

(2) 종단노드가 아닌 노드로서 OR노드를 갖고 있는 노드는, 적어도 후계노드 중의 어느 하나라도 풀이 될 수 있다면 풀이가 가능한 것으로 본다.

(3) 종단노드가 아닌 노드로서 AND노드를 갖고 있는 노드는, 모든 후계노드들이 풀이 될 수 있는 경우에만 풀이가 가능한 것으로 본다.

2.2.2 지식의 제어

큰 시스템의 경우, 풀이과정에서 수행 가능한 규칙이 하나 이상인 경우가 많이 발생하게 되는데 앞에서 예로 들었던 AND/OR 그래프의 경우에서도 A문제를 해결하기 위한 가능경로가 3개 존재하는 경우로서, 이들 수행 가능한 규칙들의 집합을 충돌집합(conflict set)이라 하며 이러한 경우 어느 경로를 선택할 것인가의 결정을 위한 여러 정책들이 제시되어 왔다. 즉,

(1) 작업 메모리에 의하여 만족되는 최초의 규칙: 여기에서 최초라 함은 규칙이 생성 메모리에 놓인 순서를 말할 때 제일 앞에 놓인 것을 말한다.

(2) 가장 높은 우선 순위(priority)를 가진 규칙을 선택: 이를 위하여 프로그래머는 문제 분야의 성격에 따라 각 규칙에 적당한 우선 순위를 부여하도록 한다.

(3) 현재의 작업메모리에 만족되는 가장 특수한 규칙, 즉, 가장 세분화된 조건을 갖는 규칙을 선택: 조건부를 구성하는 논리곱요소(conjunct)가 가장 많은 규칙.

(4) 작업 메모리에 삽입된 가장 최근의 정보에 만족되는 규칙 등의 방법을 사용하여 충돌을 해결(conflict resolution)하였다.

이와 별개로 각 문제들을 해결하는 방법으로서 주어진 규칙('A이면 B이다.')에 대하여 A를 아는 경우 B라는 결론을 추출해내는 전향추론(前向推論)과 B라는 결론을 얻기 위하여 A라는 조건을 추론해 내는 후향추론(後向推論)방법은 각각 추론의 목적과 문제분야의 성격에 의하여 결정된다. 즉, 여러 가지 증상으로부터 병명을 알아내고자 하는 경우에는 전향추론방법을 사용하고, 자동차의 고장 상태로부터 원인을 찾아내고자 하는 경우에는 후향추론방법을 사용하는 것이 유리하다는 예를 들 수 있다.

2.3 모형의 선정

전문가 시스템의 다양한 개발도구들 중, 본 연구에서는 최근에 개발되어 널리 사용되고 있는 CLIPS (C Language Integrated Production System) (Giarratano, 1993)를 선정하여 전문가 시스템을 구성하였다. 이는 1984년 NASA의 Johnson Space Center에서 처음 개발되었으며, 1993년에 버전 6.0이 개발되어 사용되고 있다. 특히, CLIPS는 많은 수학적 함수들을 내장하고 있으며, 추론 기구를 C로 구현하고, CLIPS의 기능을 사용자가 자유롭게 수정할 수 있도록 소스(source)파일들을 제공하고 있어 C언어 및 기타언어(FORTRAN, PASCAL 등)와의 통합이 쉽도록 제공되므로 모형의 매개변수 추정이라는 연구목적에 가장 적합한 것으로 판단하였다. C와 같은 절차적 프로그래밍 방식이며, LISP와 같은 목적 지향적(object-oriented)프로그램으로 다양한 장점을 지니고 있다. 이와 함께, 도시유출·수질 모의모형으로는 SWMM을 선정하였는데, 이는 1971년 미국 EPA의 지원아래 Metcalf & Eddy사가 개발한 모형으로, 도시유역 하

수시스템 내의 유량과 수질을 동시에 모의할 수 있도록 구성되었다(Huber와 Dickinson, 1988). 본 연구에서는 유량과 오염물질의 모의가 동시에 가능한 RUNOFF블록을 적용하였다.

3. 전문가 시스템의 구성과정

전문가 시스템을 구성하여 매개변수의 추정과정을 개선하기 위해서는 Fig. 2에 제시한 바와 같이 모의하고자하는 모형의 매개변수가 무엇인지를 먼저 파악하고, 각 매개변수들의 특성을 민감도 분석을 통하여 정리한 후, 이로부터 추정 규칙을 구성하여야 한다. 본 연구에서는 이와 같은 전문가시스템의 구성과정과 적용을 위하여 전형적인 한국의 도시하천으로 오천천 등의 지류를 지니고 있는 안양천을 연구대상으로 선정하였다. 이는 특히 상류로부터 경기도의 7개시(안양시 등)와 하류로는 서울시의 7개구(관악구 등)를 포함하고 있는 등 안양천을 중심으로 주변도시들이 급격히 발전하고 있어 도시 형태의 변화에 따른 수문 및 수질현상의 변화를 살펴볼 수 있는 좋은 대상으로 판단하였다. 안양천에서의 유출 및 수질자료는 각각 건설부(1982, 1983)와 서울시정개발연구원(1993)의 자료를, 하도의 단면도 및 종단면도 자료는 서울시정개발연구원(1993)과 영등포구청(1991)의 자료를 사용하였다. 적용대상 소유역으로서는 Fig. 4와 같이 분할된 소유역 자료를 사용하였다(이병희, 1998).

3.1 SWMM 매개변수의 구분

도시유역의 강우로 인한 홍수량의 해석 및 오락부하량을 모의하기 위하여 개발된 SWMM은 그 모형의 개발목적과 같이 도시 유역내 강우로 인하여 발생하는 유역 및 배수관망을 통한 유출량, 저류량 등을 모의하는 한편 오염물질에 대한 비강우시의 축적 현상 및 강

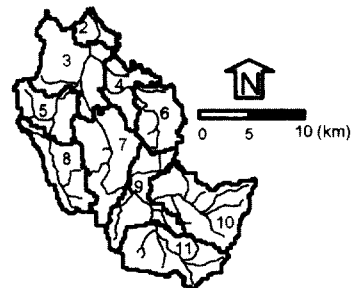


Fig. 4. An-Yang Basin

Table 3. Classifications of SWMM Parameters

		매개변수의 구분	변수의 의미
유출수문곡선의 모의	물리학적 매개변수 (Physical parameter)	소유역 관련 매개변수	소유역의 면적 유역의 평균경사 불투수유역의 면적 (%)
		배수체제관련 매개변수	하도 및 관망의 깊이, 관경, 폭, 경사 등
	수문학적 매개변수 (Hydrological parameter)	Manning 계수	불투수 및 투수유역, 하도 및 관망의 Manning 계수
		요지적류량 (depression storage)	불투수유역 및 투수유역의 표면저류
		침투관련 매개변수 (Horton 식)	최대 초기 침투율, 종기 침투율 침투 감쇠계수
	유역폭	유역폭	
유출수질의 모의	소유역 및 용도별 매개변수	축적방법별 매개변수 (Build up, Power-Linear Method)	오염물의 축적 한계량 오염물의 축적계수 면적오염 부하율 선행 건기일수
	모의 오염원별 매개변수	쓸림 매개변수 (Washoff)	쓸림지수 쓸림계수

위에 의한 쓸림 현상 등을 종합적으로 모의할 수 있어 도시유역에 대한 수량 및 수질의 해석 및 계획을 위한 종합모형으로서의 적용성이 매우 높은 것으로 알려져 있다. 이에 따라 SWMM모형의 구조를 크게 두 분야로 구분하면, Table 3에 정리한 바와 같이 강우에 의한 유출수문곡선의 모의와 유출수질의 모의 부분으로 크게 구분할 수 있으며, 관련된 매개변수들을 중심으로 해석 결과치에 미치는 영향들을 분석하였다.

3.2 매개변수별 민감도 분석

매개변수의 추정에 있어서 도시유출 및 수질모형의 매개변수 추정에서는 1차적으로 추정을 요구하는 매개변수의 수가 매우 많고, 각 매개변수의 추정시 그 집단별 특성에 따른 고려에 따라 그 산정 노력에 많은 차이가 발생하게 되므로, 이에 대한 매개변수의 구분에 유의하여야 한다. 즉, 본 연구에서는 (1) hydro-meteorologic parameter(강우 및 증·발산 등)의 경우에는 관측자료들을 사용하고, (2) physical parameter(유역의 면적·기울기, 하도경사 등)는 지리정보체계 등에 의한 값을 중심으로 추정하되, 매개변수의 산정이 어려운 (3) process parameter(침투, 수질 등 유역의 반응)의 경우에는 그 유역의 특성을 사용자

가 판단하여 선정된 초기치에 의하여 추정하는 방법을 사용하였다(Fleming, 1977).

민감도 분석은 모형의 적용결과에 미치는 각 인자들의 중요성을 체계적으로 파악하려는 과정으로서 관측 값과 모의 값이 근사하도록 하는 적정 매개변수의 추정과정이 선행되어야 하며, 이렇게 구해진 매개변수 값들을 기준으로 하여 민감도 분석을 실시하였다. 이 때, 각 매개변수들을 일정범위 내에서 변화시키면서 모형을 실행시키되, 다른 모든 매개변수들은 고정시킨 상태에서 하나의 매개변수를 기준 값으로부터 일정비율만큼 변화시켜가면서 모의결과를 비교한다(Nix, 1994). 이에 따라 각 대상유역에 대하여 적용된 실적 경우들은 Table 4에 제시된 바와 같으며, 모의항목으로는 유출의 경우 침투유량과 총유출량을 중심으로 모의하였고, 비점오염의 경우 SS, BOD, T-P, S-P, TKN, NO₂-N, NO₃-N 등의 7가지 항목이 도시유역 유출수의 특성을 잘 나타내 주는 항목으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 서울시정개발연구원(1993)의 수질자료를 이용하기 위하여 측정된 자료가 없는 S-P를 제외하고, DO를 포함한 7가지 항목에 대하여 모의를 시행하였다.

유출 매개변수 및 수질 매개변수의 민감도 특성을 파악하기 위한 기준 값을 선정하기 위하여 측정값과

Table 4. Rainfall Data for Parameter Estimation and Verification

대상유역	Estimation			Verification		
	대상강우	총강수량(mm)	지속기간(시간)	대상강우	총강수량(mm)	지속기간(시간)
5+8번 유역	1983. 7.14. 07:00 -7.14. 18:00	50.0	11	1982.8.14. 07:00 - 8.15. 21:00	126.0	38
4+6번 유역	1982.11.27. 20:00 -11.28. 18:00	104.0	22	1983.7.14. 07:00 - 7.14. 18:00	51.0	11
10번 유역	1981. 8.25. 10:00 - 8.25. 23:00	112.0	13	1982.7.28. 14:00 - 7.29. 06:00	114.0	16
11번 유역	1982. 7.28. 12:00 7.29. 01:00	117.0	13	1982.8.20. 06:00 - 8.21. 06:00	98.5	24

가장 근사한 모의치를 갖도록 매개변수들을 시행착오법에 의하여 선정하되, 이들 추정 매개변수들의 검증을 위하여 각 대상유역에 대한 강우사상의 변화를 통하여 살펴보았으며, 대상유역의 변화에 따른 수질 매개변수의 변화를 살펴봄으로써 수질 매개변수들을 검증해 보

았다. 유출 및 수질 매개변수의 추정과 검증결과를 몇 예를 통하여 제시하면, Fig. 5~Fig. 8과 같으며, 유출 및 수질계산을 위한 각 인자들의 변화가 모의 값에 미치는 영향을 분석하기 위하여 앞에서 추정된 적정 매개변수 값들을 기준으로 $\pm 10\%$ 씩 단계적으로 변화시

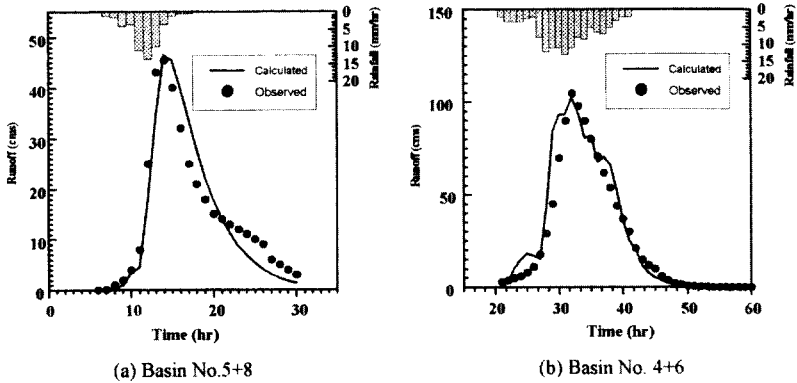


Fig. 5. Hydrographs of Study Area for Parameter Estimation

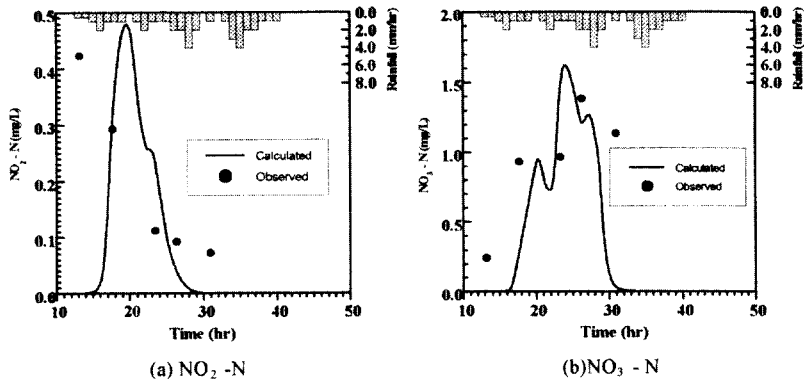


Fig. 6. Pollutographs of Study Area for Parameter Estimation(Basin No.11)

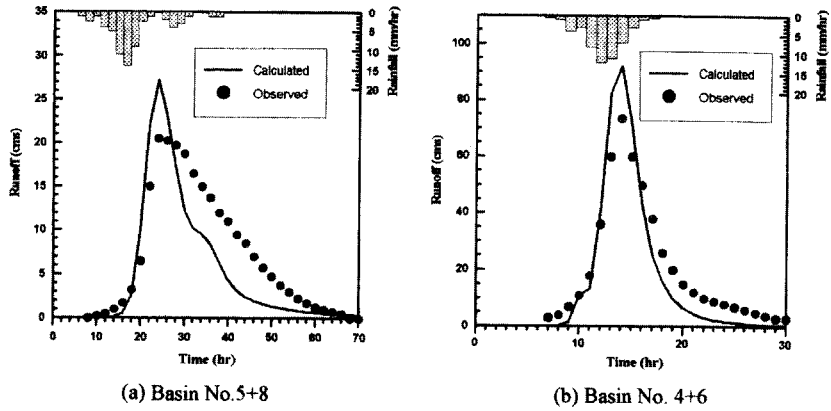


Fig. 7. Hydrographs of Study Area for Parameter Verification

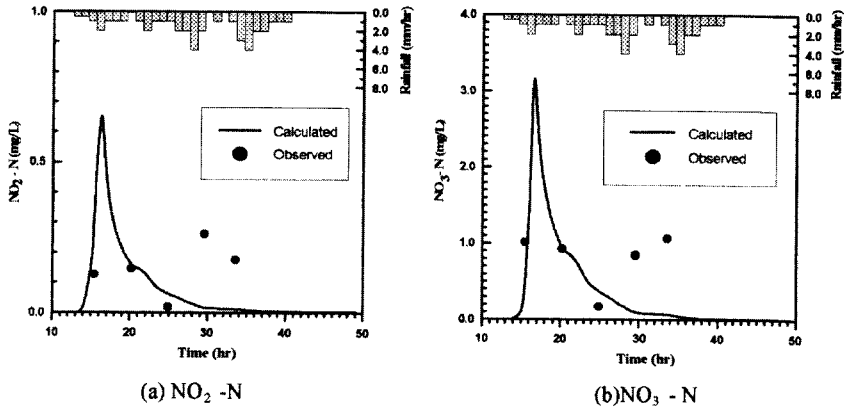


Fig. 8. Pollutographs of Study Area for Parameter Estimation (Basin No. 4+6)

키면서 모의 값들의 변화를 살펴보면, Fig. 9와 Fig. 10과 같았다. 즉, 각 매개변수들의 변화에 따른 유출현상의 변화를 살펴보면 최소침투용량, 투수지역 지표조도계수의 증가에 따라서는 침투유량 및 총유출량이 감소하는 형태를 나타내고 있으며, 이와 반대로 유역경사, 불투수면적, 유역폭의 증가에 따라 침투유량 및 총유출량이 증가하는 형태를 나타내고 있다. 이외에 불투수지역 지표조도계수 및 하도 경사에 관한 변화는 상대적으로 다른 요인들의 변화에 비하여 민감하지 못한 것으로 나타났다. 마찬가지로 방법으로 각 대상유역별 침투수질 및 총부하량의 변화를 살펴보면, 축적계수 및 쓸림계수, 선행건기일수 등의 증가에 대해서는 선형적으로 증가하는 모습을 보여주고 있음에 반하여 축적지수 및 쓸림지수 등에 대해서는 지수적으로 증가 및 감소의 형태를 보여주었고, 축적한계량의 변화에 의한 영

향은 거의 없는 것으로 나타났다.

3.3 추정규칙의 구성

앞에서와 같은 매개변수들의 거동특성들을 바탕으로 유출 및 수질관측 자료로부터 역으로 모형의 매개변수들을 효과적으로 추정할 수 있는 전문가시스템의 결정법칙들을 Table 5와 Table 6에서와 같이 체계화시킬 수 있었다. 즉, 침투유출시간이 너무 늦는 경우에는 유역폭, 유역경사 및 하도경사 매개변수 값 등을 증가시키거나, 불투수 및 투수유역의 Manning n 값을 감소시켜주어야 하고, 총오염부하량이 너무 큰 경우에는 선행건기일수, 축적지수 및 축적계수 등을 감소시키거나 쓸림계수 등을 증가시켜줌으로써 모의값을 측정값에 접근시킬 수 있음을 제시하였다. 이에 따르면, 관측된 현상과 임의 추정된 모의결과를 비교하여 그 결과에 영향

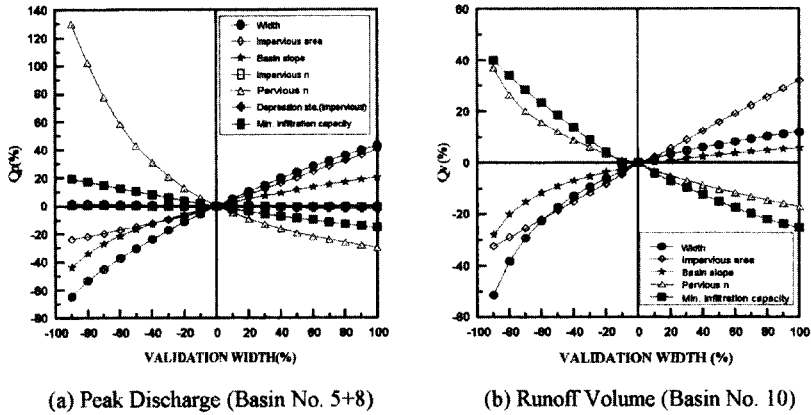


Fig. 9. Sensitivity Analysis of SWMM(Quantity)

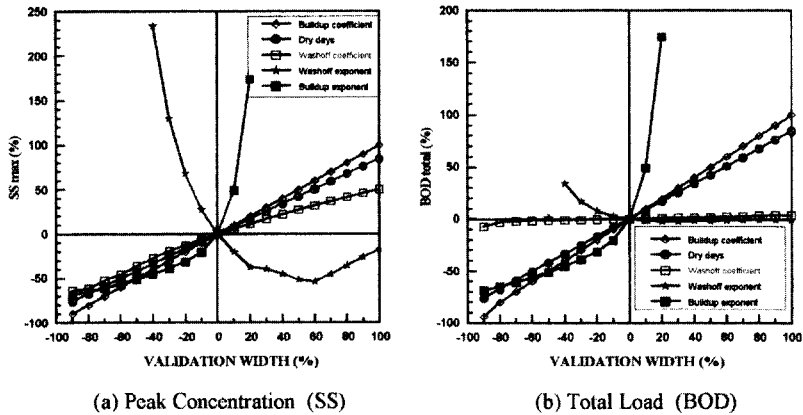


Fig. 10. Sensitivity Analysis of SWMM(Quality)

을 미치는 매개변수들을 선정하고, 그 차이를 감소시킬 수 있는 방향으로 매개변수들을 변화시켜, 나감으로써 적절한 매개변수들을 추정할 수 있음을 제시하였다.

전문가시스템의 구성을 통한 모형의 매개변수 추정 과정을 두 단계로 정리하면 첫 번째 과정으로서 각 매개변수들의 의미, 적용가능범위 및 민감도분석 등에 대한 검토와 추정이 어려운 여러 매개변수(depression storage와 침투계수 등)들에 대한 연구를 SWMM 매뉴얼 및 각종 문헌 등을 통하여 정리하여야하고, 추정 매개변수들의 초기값으로는 각 매개변수들의 적용범위로부터 중간 값을 사용하도록 한다. 이후의 과정으로서 는 앞에서 결정된 각 변수들을 적용범위 내에서 변화 시키면서 관측값과 모의값을 근사시키기 위한 시도를 반복적으로 시행할 수 있는데, 이 경우 민감도가 높은 매개변수로부터 낮은 매개변수의 순으로 추정해 가는

방법이 가장 효율적인 방법으로 알려져 있으나, 이러한 매개변수의 민감도는 적용하는 대상과 매개변수 추정과정에 따라 변화하는 것으로 알려져 있어 일반적인 민감도의 순위를 제시하기는 어렵다(Baffaut 등, 1987). 유출모형의 매개변수 추정과정은 모의된 수문곡선과 관측치와의 차이가 일정한 범위 이내로 좁혀진 경우 종결하도록 하는데, 이러한 한계값(criteria)들로는 다음과 같은 값들이 많이 사용되고 있다(Baffaut 등, 1987). 즉, N개의 경우사상을 사용하여 추정하는 경우,

- (1) 부피의 비교 관측유출량 V_m 과 모의유출량 V_s 의 부피를 비교

$$\text{Volume difference} = \frac{1}{N} \sum \frac{V_m - V_s}{V_m} \quad (1)$$

Table 5. Strategies for Parameter Improvement on the Hydrological Appearances

Parameters Appearances	Impervious Area Percentage	Char- Width	Basin Slope	Channel Slope	Dep. Storage Impervious	Dep. Storage Pervious	Impervious -n	Pervious- n	Max. Infiltration Capacity	Min. Infiltration Capacity
Volumes are too big	▼	▼	▼	-	△	-	-	△	-	▼
Volumes are too small	△	△	△	-	▼	-	-	▼	-	△
Peaks are too high	▼	▼	▼	-	-	-	-	△	-	▼
Peaks are too low	△	△	△	-	-	-	-	▼	-	△
Peaks are too soon	-	▼	▼	▼	-	-	△	△	-	-
Peaks are too late	-	△	△	△	-	-	▼	▼	-	-

△ : Increase ▼ : Decrease - : No effect

Cha width : Characteristic width

Dep. Storage Impervious : Deperssion Storage in Impervious Area

Dep. Storage Pervious : Depression Storage in Pervious Area

Impervious-n : Manning's n in Impervious Area

Pervious-n : Manning's n in Pervious Area

Table 6. Strategies for Parameter Improvement on the Contaminational Appearances

Parameters Appearances	Dry Days	Buildup Limit	Buildup Coefficient	Buildup Exponent	Washoff Coefficient	Washoff Exponent
Total loads are too big	▼	-	▼	▼	-	△
Total loads are too small	△	-	△	△	-	▼
Max. concentration are too high	▼	-	▼	▼	▼	△
Max. concentration are too low	△	-	△	△	△	▼

(2) 침두값의 비교 : 관측 침두량 P_m 과 모의 침두량 P_s 의 침두값을 비교

$$\text{Peak difference} = \frac{1}{N} \sum \frac{P_m - P_s}{P_m} \quad (2)$$

(3) 침두시간의 비교 : 관측 침두량 P_m 과 모의 침두량 P_s 의 침두발생 시간, T_m , T_s 를 비교

$$\text{Time difference} = \frac{1}{N} \sum (T_m - T_s) \quad (3)$$

(4) 측정 유출량과 모의 유출량과의 차이를 부피의 비와 가중오차로 비교

Weight error =

$$\frac{1}{N} \sum \left[a \frac{\frac{1}{n_i} \sqrt{\sum_{j=1}^{n_i} (m_j - b_j)^2}}{m_i} + b \left| \frac{V_m - V_s}{V_m} \right| \right] \quad (4)$$

여기서, 사건 i 에서의 자료 수를 n_i , i 번째 수문 곡선에 대한 측정 및 모의 유출값 ($j = 1, n_i$)을 m_j , b_j 로, m_i 는 사건 i 에서의 평균유출량을 의미하며, 이러한 수치비교를 통하여 추정과정의 진행 및 매개변수들의 민감도를 검토하는 기준으로 사용하였다.

수질요소의 매개변수 추정과정을 위한 한계값으로는 앞에서 제시한 4개의 한계값 이외에도 측정부하량

(L_m)과 모의 부하량(L_s)의 차이를 비교하는 방법을 사용할 수 있다.

$$\text{Load difference} = \frac{1}{N} \sum \frac{L_m - L_s}{L_m} \quad (5)$$

3.4 전문가 시스템의 구성

앞서의 연구들을 통하여 제시된 각종 규칙들을 (Baffaut 등, 1987; Baffaut와 Delleur, 1989) 참고하고, 적용범위 및 개선방안 등의 보안을 통하여 유출 및 수질모의 매개변수들의 추정규칙들을 크게 4가지의 집단으로 나누어 구성하였다. 즉, (1) 주어진 상태에 대한 평가규칙, (2) 평가 내용 및 사실 등으로부터 개선 방향의 선정규칙, (3) 매개변수의 개선방법 및 (4) 매개변수 추정상태의 검토 및 추정과정의 종료와 관련된 규칙 등으로 구분할 수 있다. 이에 따르면, (1) 주어진 상태의 평가부분에서는 관측값과 모의값의 차이를 비교하여 현 상태를 평가하는 부분으로서 앞에서 제시하였던 한계값들을 이용하여 그 의미를 제시하고 있다. 예를 들면,

Rule 3: evaluate of p 'p = peakcriteria':
 if p gt 0.1 then peaks = peak_are_too_low (6)

의 경우 침투한계치의 값이 0.1보다 클 때, 실제 침투 모의값이 관측값보다 매우 작음을 의미하는 것으로서 이러한 침투모의값을 증가시킬 수 있도록 매개변수를 개선시켜야 한다.

두 번째 집단으로서 (2) 평가내용 및 사실 등으로부터 개선방향의 선정규칙은 앞에서 시행하였던 민감도특성을 이용하여 구성한 것으로서 앞에서 평가된 상태의 개선을 위하여 매개변수의 증가 혹은 감소내용을 결정하는 부분이다. 예를 들면,

Rule 10:
 impervious_area_percentage_has_to_be_increase:
 if impervious_area_percentage lt 81 and
 volumes = volumes_are_too_small or
 peaks = peaks_are_too_low
 then
 action =
 impervious_area_percentage_has_to_be_increased (7)

의 경우, 유출량이 너무 적거나, 침투발생시간이 너무 늦는 경우 불투수면적을 증가시키는 방향으로 개선시킬 것을 제안하는 부분으로서, 이 때 불투수조건인 경우 0 - 90 % 이내의 범위에서 변화될 수 있고 각 매개변수의 변화값을 10 %로 개선하는 방법을 뒤에서 사용하고 있으므로 첫 번째 조건으로 81 % 보다 작아야 함을 규정하였다.

세 번째 집단으로서 (3) 매개변수의 개선방법으로서 기존의 매개변수에 대하여 변화의 요구가 있는 경우 기존의 매개변수에 대하여 10 % 씩 증가 혹은 감소시키는 방법을 사용하였다. 이를 위한 기본 정보를 제공하기 위하여 매개변수의 민감도를 분석할 때, 10 % 씩 변화하는 경우의 영향도를 검토하였다. 이의 예로서,

Rule 24: to adjust impervious_area_percentage:
 if action =
 impervious_area_percentage_has_to_be_increased
 then
 imp_area_new = imp_area + (0.1*imp_area) (8)

는 불투수면적의 증가가 요구되는 경우 새롭게 추정되는 불투수면적 비는 기존의 값에 대하여 10 % 가 증가된 값을 사용한다. 마지막 네 번째의 집단으로서 (4) 매개변수 추정상태의 검토 및 추정과정의 종료부분은 각 한계치의 상태를 파악하여 조건을 만족하는 매개변수들의 추정상태 여부를 검토하게되고 유출량, 침투시간, 침투값 및 오염부하량의 경우를 모두 만족하는 경우 추정이 완료되었음을 제시하는 기능을 하게 된다.

이상의 규칙들을 이용하여 실제의 연산을 시행하기 위한 전문가시스템을 구성하기에 앞서 각 조건에 따른 계산의 진행상황을 규칙들 상호간의 관련성을 고려하여 의사결정 계통도(decision tree)를 구성해 보는 것이 매우 중요하다. 이는 각 규칙들이 독립적으로 존재하는 것이 아니고, 각 조건에 따라 시행되어야 할 규칙들이 서로 복잡하게 연결되어 짐으로 인하여 사전에 고려치 못한 오차가 발생할 수도 있어 실제 계산에 필요하지 않은 부수적 활동이 포함되는 경우 등을 배제함으로써 효율적인 전문가시스템의 구성이 가능할 수 있기 때문이다. 이에 따라 본 연구에서 구성한 전문가시스템은 목표상태(매개변수들의 적절한 개선상태)에 도달하기 위하여 필요한 선행조건들을 단계적으로 해결하여야 하는 문제의 특성에 따라 후향생성 시스템(backward

production system)으로 구성하였다.

도시유출 및 수질모의모형과의 결합을 위한 전문가 시스템을 구성하기 위하여 본 연구에서는 앞에서 제시 하였던 추정곡선들을 바탕으로 구분된 4개의 집단으로 구성하되 초기치의 입력과정을 추가하여 ESPE (Expert System for Parameter Estimation)를 구성하였다(이범희, 1998). 즉, 초기치의 선정시 강우 및 증·발산 등 Hydrometeorologic parameter의 경우에는 관측자료들을 사용하고, 유역의 면적, 기울기 등 Physical parameter의 경우에는 지리정보체계 등으로 부터 취득한 자료를 사용하였으며, 침투 및 수질반응 등 유역의 반응과 같은 Process parameter의 경우에는 그 유역의 특성을 사용자가 판단하여 매개변수의 존재범위 내에서 선정하였다.

4. 적용 및 검토

4.1 유출 및 수질 매개변수의 추정 및 검토

이와 같이 구성된 전문가시스템을 사용하여 Table 4에서 제시한 대상유역별 관측강우 및 유출자료에 대하여 적용하였으며, 계산의 편의를 위하여 유출 및 수질 한계치를 각각 10 %와 30 % 이내로 임의로 선정·적용하였다. 수질모의를 위해서는 1993년 4월 27일의 강우 및 수질관측자료(서울시정개발연구원, 1993)들을 사용하여 적용하였고, 이의 적용결과를 살펴보면, Fig. 11과 Fig. 12에 제시된 바와 같으며, 이의 결과를 살펴볼 때, 유출 사건에 관한 인간에 의한 결과 및 전문가 시스템에 의한 결과가 거의 일치하여 따로 표시하지 않았으며, 전문가시스템의 매개변수 추정결과를 매

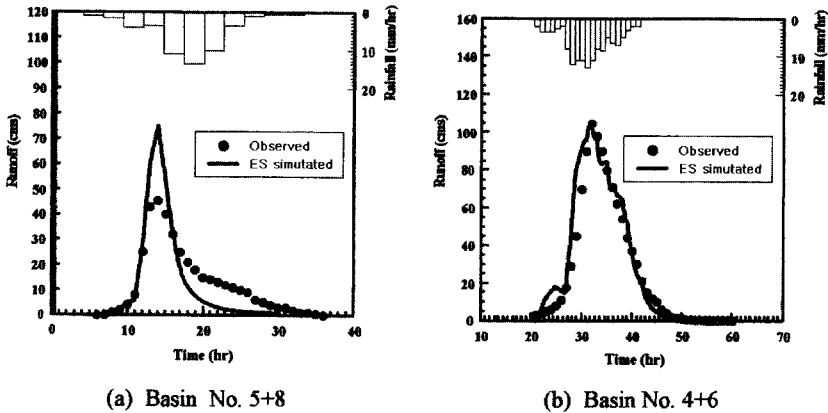


Fig. 11. Comparison of the Hydrograph

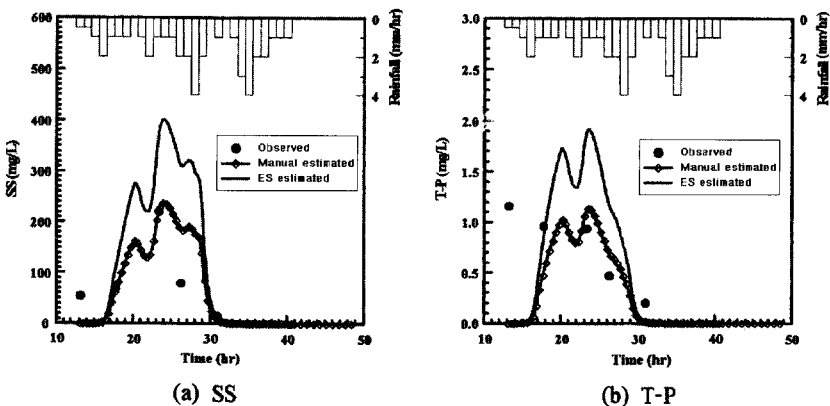


Fig. 12. Comparison of the Pollutograph(Basin No. 11)

Table 7. Estimation Results of Runoff Parameters

대상	반복계산	1	2	3	4	5	6	7	Manual Est.
	매개변수								
11 번 유 역	p	0.18	0.12	0.07	0.02	0.02	-0.05	-0.08	-
	t	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-
	v	0.20	0.18	0.16	0.14	0.12	0.10	0.09	-
	하도경사	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
	유역폭	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	9556
	불투수면적	20.0	22.0	24.2	26.6	29.3	32.2	35.4	23.9
	유역경사	0.20	0.22	0.24	0.27	0.29	0.32	0.35	0.24
	투수유역 n	0.16	0.14	0.13	0.12	0.11	0.09	0.09	0.13
	투수유역저류	0.27	0.24	0.22	0.20	0.18	0.16	0.14	0.15
	최소침투용량	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	1.50
5 + 8 번 유 역	p	-0.23	-0.14	-0.22	-0.14	-0.22	-0.13	-	-
	t	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
	v	0.04	0.10	0.05	0.11	0.06	0.11	-	-
	하도경사	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	-	0.08
	유역폭	8576	8576	8576	8576	8576	8576	-	8576
	불투수면적	50.0	45.0	49.0	44.6	49.0	44.1	-	40.8
	유역경사	0.20	0.18	0.19	0.18	0.20	0.18	-	0.12
	투수유역 n	0.16	0.18	0.16	0.17	0.16	0.17	-	0.08
	투수유역저류	0.27	0.27	0.24	0.24	0.22	0.22	-	0.20
	최소침투용량	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	-	5.50

p : peakcriteria difference
 t : time difference
 v : volume difference

우 근사한 결과를 보이고 있으나, 수질모의에 의한 적용결과는 SS 및 T-P의 모의에서 침투값의 발생시간이 더디게 추정되는 결과를 보여주고 있어 이에 대한 문제점의 보완이 필요하다. 다만, 이외의 수질요소들에 대한 매개변수 추정결과들은 그 침투치의 모의가 다소 과장되게 추정됨에 반하여 그 경향들은 매우 근사한 결과를 보여주었다.

4.2 전문가 시스템의 적용 결과

전문가시스템을 이용한 매개변수의 추정과정을 계산의 진행과정을 통하여 살펴보면 Table 7, Table 8과 같이 제시할 수 있으며, 이를 살펴보면 각 한계치들의 크기가 정해진 범위 이내로 수렴되어 가는 과정들을 살펴볼 수 있었다. 결과적으로 유출량의 모의를 위한 매개변수의 추정에서는 사람이 직접 추정한 매개변수와 거의 유사한 결과를 제시하고 있으나, 수질 매개변수의

추정에서는 T-P의 경우 그 결과에서 다소의 차이를 보이고 있는데 이는 수질매개변수의 추정을 위한 비교 한계치가 오염침투치 및 오염부하량의 두 가지 현상에만 의존하는 관계로 정보의 부족에 의한 결과 일 수도 있으며, 계산과정에서 발생하는 오차원인들을 각 매개변수들에게 합리적으로 분배할 수 있는 기법이 부족한 원인으로도 볼 수 있다. 그러나 모형이 복잡해져 감에 따라 풍부한 경험을 가진 전문가 이외에는 그 접근이 어려웠음을 고려한다면 숙달되지 않은 사용자가 많은 변수에 대하여 이해하고, 모형의 적용을 통하여 유출 및 수질모의에 대한 좋은 결과와 계산시간의 단축 등 매개변수 추정방안의 개선책을 제시할 수 있었다는 점에서 큰 성과를 제시할 수 있었으며, 앞으로의 연구를 통하여 보다 효율적인 전문가시스템의 구성이 가능할 것이다.

Table 8. Estimation of Water Quality Parameters

대상	반복계산		1	2	3	4	5	6	7	Manual Est.
	매개변수									
SS	q-peak		-1.50	-0.85	-0.41	-0.10	-0.35	-0.05	-0.29	-
	q-load		-1.30	-0.29	0.18	0.44	0.22	0.46	0.25	-
	선행건기일수		5.00	4.50	4.05	3.65	4.01	3.61	3.97	3.00
	축적지수		1.00	0.90	0.81	0.73	0.80	0.72	0.79	1.00
	축적계수		20.0	18.0	16.2	14.6	16.0	14.4	15.9	26.5
	이송계수		10.0	9.00	8.10	7.29	7.29	6.56	6.56	5.00
	이송지수		5.00	5.50	6.05	6.66	5.99	6.59	5.93	3.00
T-P	q-peak		-27.7	-20.2	-15.2	-11.6	.....	-1.42	-0.33	-
	q-load		-6.66	-3.31	-1.72	-0.85	.....	-0.14	-0.04	-
	선행건기일수		5.00	4.50	4.05	3.65	.....	2.15	1.94	3.00
	축적지수		1.00	0.90	0.81	0.73	.....	0.43	0.39	1.00
	축적계수		1.00	0.90	0.81	0.73	.....	0.43	0.39	0.11
	이송계수		10.0	9.00	8.10	7.29	.....	4.30	3.87	5.50
	이송지수		5.00	5.50	6.05	6.66	.....	10.7	9.65	2.70

q-peak : quality peak difference

q-load : quality load difference

5. 결론 및 향후 연구과제

급속한 도시화의 영향에 따른 수자원 및 환경문제를 종합적이고 체계적으로 해석하기 위하여 전문가시스템의 구성 및 적용방안을 제시하여 보았다. 이를 위하여 도시유역의 유출 및 수질에 영향을 미치는 주요 매개변수들을 선별하고 그 거동특성을 제시하였으며, 이러한 특성들을 바탕으로 효과적 매개변수 결정법칙 등을 제안하였다.

CLIPS 6.0을 적용하여 사실과 규칙으로 표현되는 전문가 시스템 ESPE를 구성하였으며, 이의 적용을 통하여 매개변수의 추정과정을 개선하였다. 본 시스템의 적용에 따라 유출모의 매개변수는 그 추정결과가 매우 근사하여 적용성이 높음을 보여주었으나, 수질모의 매개변수의 추정결과는 경향의 근사한 모의에도 불구하고 접두치가 과장되게 모의되는 현상이 나타나는 등 그 모의과정에 대한 복잡성과 의사결정규칙의 부족 등으로 인한 개선의 여지가 있음을 보여주었다.

전문가 시스템 기법을 수문 및 수질모형에 효율적으로 적용하기 위해서는 정확한 관측자료의 확보가 우선적으로 이루어져야 하고, 모의 및 의사결정 시스템 상호간의 종합적 적용을 위한 통합관리 체계의 연구가 필요할 것으로 보이며, 특히, 전문가 시스템의 구성에 필요한 기술적인 접근과 함께 매개변수의 추정을 위한

실제 전문가들의 접근 행동특성 등을 조사하여 전문가 시스템의 구성에 이를 반영하도록 하여야 할 것으로 보인다. 최종적으로 지식의 충돌관리 방안 등을 포함하는 시스템의 효율적인 추론방안 및 지식제어 방안에 대한 연구가 추가되어야 할 것으로 본다.

참고 문헌

강관원, 박찬영, 김주환 (1992). “패턴인식방법을 적용한 하천유출의 비선형 예측.” 한국수문학회지, 한국수문학회, 제25권, 제3호, pp. 105-113.

건설부 (1982). 안양천 유역종합 치수대책조사(II) 보고서.

건설부 (1983). 안양천 유역종합 치수대책 보고서.

김기태, 김상용 (1987). 인공지능 - 컴퓨터비전, 자연 언어이해, 전문가 시스템. 안국출판사.

김재희 (1988). 인공지능의 기법과 응용. 교학사.

김주환 (1993). 신경회로망을 이용한 하천유출량의 수문학적 예측에 관한 연구. 박사학위논문, 인하대학교.

서울대학교 보건대학원 (1995). 수질정보 종합관리 시스템 개발 - 수역 수질관리를 위한 수질예측 모형과 의사결정 지원시스템 개발에 관한 연구, 환경부 제1단계 3차년도 최종 보고서.

서울시정개발연구원 (1993). 도시하천 수질관리 방안

- 을 위한 연구 (안양천을 중심으로), 시정연 93-R-15.
- 성기원 (1990). 오염된 지하수처리와 추적을 위한 엑스퍼트 시스템의 개발. 석사학위논문, 서울대학교.
- 영등포구청(1991). 안양천 및 도림천 제방보강공사 실시설계 보고서.
- 오남선 (1996). 신경망 이론과 Kalman Filter 강우에 측도형의 비교연구. 박사학위논문, 서울대학교.
- 이범희 (1998). 지리정보체계 및 전문가시스템을 이용한 도시유출 및 수질모형의 개발. 박사학위논문, 서울대학교.
- 전경수, 이길성 (1993). "영향계수를 이용한 QUAL2E 모형의 반응계수 추정." 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제13권, 제4호, pp. 163-176.
- 조동섭 (1988). "전문가 시스템의 개관." 마이크로 소프트웨어 (9월호), (주)정보시대, pp. 146-149.
- Baffaut, C., Benabdallah, S., Wood, D., Delleur, J., Houck, M., and Wright, J. (1987). *Development of an expert system for the analysis of urban drainage using SWMM(Storm Water Management Model)*. Water Resources Research Center Technical Report No. 180, Purdue University.
- Baffaut, C., and Delleur, J.W. (1989). "Expert system for calibrating SWMM." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 115, No. 3, pp. 278-298.
- Brown, L.C., and Barnwell, Jr. T.O. (1987). *The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-Uncas: Documentation and user's manual*. EPA.
- Doneker, R.L., and Jirka, G.H. (1991). "Expert systems for mixing-zone analysis and design of pollutant discharges." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 117, No. 6, pp. 679-697.
- Fleming, G. (1977). *Computer simulation techniques in hydrology*. Elsevier North-Holland, Inc., pp. 54-97.
- Giarratano, J.C. (1993). *CLIPS user's guide*. Software Technology Branch, Lyndon B. Johnson Space Center.
- Huber, W.C., and Dickinson, R.E. (1988). *Storm water management model, Version 4: user's manual*. U.S. Environmental Protection Agency.
- Jewell, T.K., Nunno, T.J., and Adrian, D.D. (1978). "Methodology for calibrating stormwater models." *Journal of the Environmental Engineering Division*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 104, No. EE3, pp. 485-501.
- Levin, R.I., Drang, D.E., and Edelson, B. (1986). *A comprehensive guide to AI and expert systems*. McGraw-Hill Book Company, pp. 3.
- Liong, S.Y., Chan, W.T., and Lum, L.H. (1991). "Knowledge-based system for SWMM runoff component calibration." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 117, No. 5, pp. 507-524.
- Liong, S.H., and Ibrahim, Y. (1994). "Estimation of peak flow and runoff volume with response surface method." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 120, No. 2, pp. 161-175.
- Nix, S.J. (1994). *Urban stormwater modelling and simulation*. Lewis Publishers, pp. 92-109.

(논문번호:98-041/접수:1998.07.13/심사완료:1998.09.25)