

환경 관리를 위한 전문가시스템의 개발

이길성 (서울대학교 공과대학 토목공학과 교수)

이범희 (한국해양연구소 연안·항만공학센터 연수연구원)

“새로운 상황이나 환경에 대처하기 위하여 배우고, 이해할 수 있는 능력”을 지능이라 정의할 때(김재희, 1988), 인공지능(Artificial Intelligence, AI)이란 컴퓨터에 지능을 부여하기 위하여 다방면으로 노력한 결과 이루어진 새로운 과학 분야를 말하며, 이러한 인공지능은 자연어의 이해, 로봇틱스, 자동 프로그래밍, 컴퓨터의 시각·청각 인식, 자동 정리 증명, 지능적 교육 시스템 및 전문가시스템 등 광범위한 분야를 포함한다. 특히, 전문가시스템(Expert System, ES)은 인공지능이 실용화되는 단계에서 가장 각광을 받고 있는 분야로서 이의 정의를 확실히 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 전문지식을 수집·정리하여 그 분야에 대하여 전문성이 없는 일반인 혹은 의사 결정의 고도화를 이루고자 하는 사람들을 위하여 개발된 대화식 컴퓨터 프로그램”(Levin et al., 1986) 등으로 정의하기도 한다. 결국, 전문가시스템은 지적인 컴퓨터 프로그램, 즉 인간만이 가질 수 있다고 믿어 왔던 지적 행위, 언어 및 대화의 이해·학습·추론 등을 행할 수 있는 시스템의 구성을 목표로 하는 전산학의 한 분야이며, 이러한 시스템은 현재의 문제로부터 목적 상태에 이르기 위하여 경험적인 결과를 근거로 검색 공간의 크기를 효율화하려는 시도와 많은 인간의 지식이 사실 및 규칙들로서 간단히 표현될 수 있다는 가정들을 기반으로 하여 성공적인 개발이 가능하게 되었다. 더구나, 근래에 들어와서는 개인용 컴퓨터의 보급과 데이터베이스 관리 시스

템의 진보, 소프트웨어의 급속한 발전에 따라 전문가시스템의 적용 사례가 급격히 늘어날 것으로 기대되고 있으며, 다양한 정보와 여러 가지 분석 방법들을 적용하여 종합적이고, 체계적인 계획 수립 및 평가가 필요한 환경 관리 분야에 대해서는 전문가시스템의 적용 필요성이 더욱 증가할 것으로 보이므로, 본 기사에서는 전문가시스템의 역사와 기본 개념에 대하여 알아보고 Hushon(1990)의 “Expert Systems for Environmental Applications”와 Ortolano 등의 “New Expert Systems in Environmental Engineering”을 중심으로 환경 분야로의 적용 방안 및 미래에 대하여 논의하고자 하였다.

1. 전문가시스템의 역사 및 기본 구조

일반적으로 인공지능에 대한 연구의 시초로는 MIT대학의 John McCarthy가 최초의 인공지능 언어인 LISP를 만들었던 1960년경(김기태와 김상용, 1987)으로 보고 있으나, 인간의 지능을 흉내내어 생각할 줄 아는 컴퓨터 프로그램을 개발하려고 하였던 인공지능의 연구는 초기 컴퓨터의 용량 부족과 접근 방식의 비효율성으로 인하여 진전에 큰 어려움을 겪게 되었고, 1970년대 말에 이르러서야 비로소 자연 언어의 처리 및 지식의 표현 기법 등 특정 분야에서의 성공으로 말미암아 세계 최초의 인공지능 프로그램인 MYCIN과 PROSPECTOR등을 개발할 수 있게 되었다. 이러한 전문가시스템의 장점으로서의 유용성과 편의성을 들 수 있으나, 전문 기술에 대한 일반 대중들의 호응이 인간 전문가에 비하여 아직도 상대적으로

로 낮음을 볼 때, 관련된 문제에 대하여 전문가와 초보자를 돕거나 자문하는 정도의 역할을 담당하는 정도로서 주로 사용되고 있다. 전문가시스템과 인간 전문가 사이의 장·단점을 Table 1 에서와 같이 비교할 수 있으며, 일반 프로그램과의 특징을 Table 2 와 같이 비교할 수 있다. 이러한 전문가시스템의 적용 가능한 작업 분야는 Table 3 과 같이 구분할 수 있으며 농

경, 제조, 화학, 수학, 컴퓨터, 의료, 전자, 기상학, 공학, 군사 과학, 지질, 물리학, 정보처리, 천문학, 법률 등 다방면으로 응용될 수 있다.

전문가시스템의 기본 구조는 Fig. 1에 제시한 바와 같이 지식 베이스(knowledge base), 추론 엔진(inference engine), 지식 획득 부시스템(knowledge acquisition sub-system), 설명 부시스템(explanation sub-system)과 사용자 인터페이스(user interface) 등으로 구성되어 있다. 이중에서 전문가시스템의 핵을 이루고 있는 부분은 지식 베이스와 추론 기관을 들 수 있으며, 사용자 인터페이스를 통해 입력된 사용자의 명령에 대하여 전문지식을 이용한 추론 과정을 통하여 답을 출력하게 된다. 이들과 각 부분에 대한 설명은 다음과 같다.

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 저렴	소멸 가능 전달의 어려움 지식의 추가 수정이 어려움 의견의 일관성 부족 고가
단점	창조성이 부족 지침을 받아야 함 심벌에 의한 입력 작은 범위에 적용 기술적 적용	창조적 적응적 감각에 의한 경험 광범위하게 적용 상식적 적용

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

일반 프로그램	전문가시스템
데이터를 표현하고 처리	지식을 표현하고 처리
알고리즘을 사용	휴리스틱을 사용
반복적인 처리	추론적인 처리
대규모의 데이터베이스의 효과적 처리	대규모의 지식 베이스를 효과적으로 처리

Table 3. Applications of Expert System (Kim, 1995)

범 주	문 제	사 례
해석 (interpretation)	관찰된 자료를 통한 상황의 추론	신호의 이해 및 화학 구조의 설명
예측 (prediction)	상황 및 사건으로부터 결과를 추론	일기예보 및 금융 예측
진단 (diagnosis)	증상으로부터 시스템의 고장을 추론	의학, 기계, 전자
설계 (design)	조건을 만족하는 객체의 서술	전자 및 기계 회로의 설계, 기계 설비의 배치
계획 (planning)	목표 달성에 필요한 일련의 활동을 산출	로봇의 작업 및 경로 계획
관측 (monitoring)	시간의 흐름에 따라 달라지는 시스템의 행위를 관찰	교통 제어, 동력 제어 등
교정 (debugging)	오류 수정 및 교육 담당	프로그래머의 지원 시스템
수정 (repair)	시스템의 오류 발견 및 시정	항공 전자 시스템, 컴퓨터 네트워크 시스템
교육 (instruction)	학생들의 그릇된 개념 진단 및 교정	컴퓨터 보조 학습 프로그램
제어 (control)	문제의 예측과 해결책의 계획 및 필요 활동의 수행 관리	전쟁 관리, 첩보활동 제어 등

(가) 지식 베이스 - 전문가의 전문지식이 파일 형

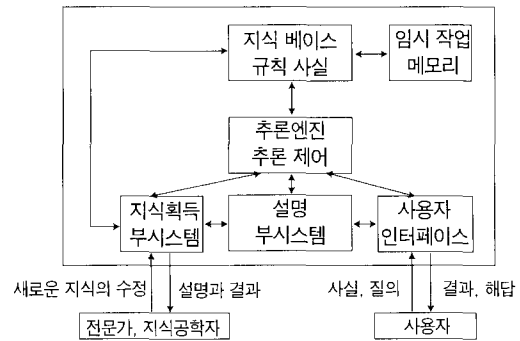


Fig. 1 Structure of Expert System(Kim et al., 1987)

태로 저장되는 곳으로, 지식 베이스에는 데이터가 “사실(facts)”과 이를 근거로 결정을 내리는 “규칙(rules)”의 두 가지 형태로 이루어진다.

(나) 추론 엔진 - 사용자의 입력 자료를 지식 베이스와 비교, 탐색하여 결론을 이끌어 내는 부분으로 지식의 표현 방법에 따라 적합한 추론 방법을 사용하되, 추론의 형태에 따라 결정적 추론(deterministic chaining)과 확률적 추론(probabilistic chaining)으로 구분하고 추론의 방향에 따라 순방향추론(forward chaining)과 역방향추론(backward chaining)으로 구분할 수 있다. 여기에서 결정적 추론은 참과 거짓(true or false)의 두 가지 상황만이 존재하는 경우이며, 확률적 추론은 확신의 정도가 수치로 계산되는 것을 말하는 것으로 현실에서 일어나는 사건들은 주로 확률적으로 표현되는 것이 보통이다.

(다) 지식 획득 부시스템 - 전문가시스템이 인간이나 다른 지식 제공자로부터 지식을 획득하는 부분으로서, 지식 베이스의 구축이나 수정이 이루어지는 부분이다. 이러한 방법으로 가장 많이 쓰이는 방법은 주로 전문가와의 인터뷰이다.

(라) 설명부시스템 - 이는 추론 기관이 지식 베이스의 지식과 사용자의 정보로부터 현재의 결론에 이르는 일련의 추론 과정을 설명하는 기능으로 현재 내려진 결론이 어떠한 추론 과정과 지식들을 바탕으로 추론되었는가를 사용자에게 알려줌으로써 주어진 결론을 받아들일 것인지의 여부를 결정할 수 있도록 한다.

(마) 사용자 인터페이스 - 전문가시스템과 사용자가 실제로 접촉할 수 있는 부분으로서 디스플레이의 제어나 대화 기능을 수행하는 부분이다. 사용자가 전문가시스템과 질의·응답식 대화를 하

는 부분으로 자연 언어·메뉴 방식·그래픽 기능 등을 사용한다.

2. 전문가시스템의 개발 도구

전문가시스템은 특정 분야의 문제를 해결하기 위한 프로그램 및 지원 부분(support environment)의 결합체로서, 이를 단순히 전문가 프로그램이라 칭하지 않고 시스템이라 부르는 이유도 바로 여기에 있다. 이러한 전문가시스템의 효율적 구성을 위해서는 프로그래밍 언어, 지식 공학 언어, 시스템 개발 보조 및 지원 설비 등 여러 가지 유용한 도구들을 사용할 수 있다 (김재희, 1988).

(가) 프로그래밍 언어 (programming language)

전문가시스템의 개발을 위한 프로그래밍 언어들로서는 FORTRAN, PASCAL 및 C와 같은 문제 지향적 언어(problem oriented language)와 LISP 및 PROLOG 등과 같은 심볼처리언어(symbol manipulation language)의 두 가지로 구분할 수 있으나, 문제 지향적 언어는 특정 문제의 해석을 위하여 설계된 언어로써 과학, 수학 및 통계 분야의 문제에

Table 4. Examples of Knowledge Engineering Language (Kim, 1988)

연구 시스템			
도구	지식 표현	실행 언어	개발자
AL/X	규칙 프레임	PASCAL	Intelligent Terminal Ltd.
EMYCIN	규칙	INTERLISP	Stanford University
EXPERT	규칙	FORTRAN	Rutgers Univ.
LOOPS	규칙 프로시듀어(서술적) Object	INTERLISP-D	Xerox PARC
MRS	규칙 논리	INTERLISP	Stanford University
OPS5	규칙	BLISS MACLISP FRANZ LISP	Carnegie-Mellon University
ROSIE	규칙 프로시듀어 영어 형태	INTERLISP	The Rand Corporation
SRL	프레임	FRANZ LISP	Carnegie-Mellon University

Table 5. Examples of Commercial Expert System (Kim, 1988)

상업용 시스템					
도구	용도	지식 표현	하드웨어	개발자	프로그래밍
언어	INTERLISP-D	범용 목적	프로시듀어	Xerox 1100	Xerox Corporation
	LISP	범용 목적	프로시듀어	Lambda machine	LISP Machine Inc.
	PROLOG	범용 목적	논리 프로시듀어	DEC10 system DEC20 system	Quintus Computer Systems, Inc.
	SMALLTALX-80	범용 목적	Object	Tektronix 4404	Xerox Corporation
	ZETALISP	범용 목적	프로시듀어	Symbolics 3600	Symbolics Inc.
시스템 개발 보조	EXPERT EASE	지식 획득	결정 트리 (decision tree)추론	IBM PC, IBM-XT Victor 9000 DEC RainbowIn	Export Software ternational
	PLUME	자연 언어 인터페이스 개발	인터페이스 개발용	Symbolics 3600 VAX-11 system	Carnegie Group, Inc.
	RULE-MASTER	지식 획득	소프트웨어 도구	VAX-11 system Apollo system	Sun system Radian Corporation
	TIMM	지식 획득	예로부터 규칙을 추론	VAX-11/780 Prime 400	General Research Corporation
지식 공학 언어	ART	범용 목적	규칙 프레임 프로시듀어	CADR machines Symbolics 3600	Inference Corporation
	DUCK	범용 목적	논리 규칙	Symbolics 3600 DEC VAX	Smart Systems Technology
	KEE	범용 목적	규칙 프레임 프로시듀어 Object	Xerox 1100 Symbolics 3600	Intellicorp
	KES	범용 목적	규칙 프레임	DEC VAX system operating under UNIX or VMS	Software Architecture & Engineering Inc.
	M.1	범용 목적	규칙 영어-유사 구문	IBM PC	Teknowledge
	OPS5	범용 목적	규칙	VAX-11 systems	Digital Equipment Corporation
	OPS5e	범용 목적	규칙	Symbolics 3600	Verac Corporation
	OPS83	범용 목적	규칙 프로시듀어	VAX-11 systems	Production Systems Technologies Inc.
	PERSONAL CONSULTANT	진 단	규칙	TI Professional Computer	Texas Instruments
	S.1	범용 목적	규칙 프레임 프로시듀어 지향	Xerox 1100 Xerox 1108	Teknowledge
	SeRIS	진 단	규칙	IBM PC	SRI-International
	SRL+	범용 목적	프레임	Symbolics 3600 VAX-11 systems	Carnegie Group, Inc.

잘 적용할 수 있으며, 심볼처리 언어의 경우 LISP는 미국에서, PROLOG는 유럽과 일본에서 주로 사용되고 있다.

(나) 지식 공학 언어 (knowledge engineering language)

지식 공학 언어는 전문가시스템을 개발하기 위한 정교한 도구로서, 언어 및 광범위한 지원 부분으로 이루어지는 것이 보통이다. 이러한 지식 공학 언어들은 골격 시스템 (skeletal system)과 범용 시스템 (general system)으로 구분되는데, 골격 시스템은 이미 완성된 전문가시스템의 특정 지식을 제거하고 남

은 추론 기관 및 지원 부분들로 구성되어 시스템의 개발이 쉬운 장점과 일반성 및 유연성이 부족하다는 단점을 지니고 있다. 이러한 예로서는 PROSPECTOR와 MYCIN으로부터 구성된 KAS와 EMYCIN 등을 들 수 있다. 이에 반하여, 범용 시스템은 다양한 형태의 문제 분야를 다룰 수 있어 일반성과 유연성이 매우 다양하다는 장점에도 불구하고 사용하기가 다소 어렵다는 단점을 지니고 있다.

(다) 시스템 개발 보조 (system building aids)

시스템 개발 보조 기기는 전문가의 지식을 얻고 표현하는 프로그램 부분을 가리키는 것으로서 최근에는 비로소 실용적으로 사용되기 시작할 정도로 상당히 어려운 부분이다.

(라) 지원 설비 (support facilities)

프로그래머의 설계를 지원하기 위한 부분으로서 여러 수정을 위한 부분, 지식 베이스를 편집하는 부분, 입·출력 기능 및 최종적인 시스템 기능 향상 등을 포함하는 4가지 부분을 포함한다.

연구 시스템으로 제공되는 지식 공학 언어의 예 및 상업용 시스템의 예들을 Table 4 및 Table 5에 소개하였다.

3. 환경 관리 전문가시스템의 연구 동향

전문가시스템에 대한 연구가 이미 30여 년간 지속되고 있음에도 불구하고, 환경 관리를 위한 전문가시스템의 응용 시도가 최근에는 비로소 이루어지고 있음은 환경문제를 해결하기 위한 기초과학의 발전이 상대적으로 더딘 이유와 함께, 소수의 전문가가 해결하기엔 환경문제가 너무 복잡하다는 두 가지 이유에 의한 것으로 보이나, 연구의 진행에 따라 지속적으로 개선되고 있는 시스템의 발달과 축적되어 온 지식들이 사용자에게 전달되는 과정을 통하여 기존의 컴퓨터 프로그램에 의한 해석 결과보다 상위의 해법을 제시할 수 있다는 가능성은 전문가시스템의 지속적인 발전을 예측하게 한다. 이에 따라 환경 관리 전문가시

스템의 연구 동향도 초기에는 배수 처리장의 운영과 같은 소규모의 한정된 주제에 대하여 진행되었으나, 연구의 진행에 따라 규모의 증가와 함께 보다 다양한 불확실성을 포함하는 문제들까지도 대상으로 포함하게 되었으며, 연구의 주체도 초기에는 대학이 중심이 되어 이루어 졌으나, 최근에 와서는 정부 혹은 전문 기업 중심의 연구 형태로 변환되어 가는 추세를 보여 주고 있어 표준화와 방법의 개선이 이루어지는 양상과 함께, 다음과 같이 다양한 분야에 대하여 전문가시스템이 적용되고 있음을 소개할 수 있다.

(a) 환경 자료의 추출, 해석 및 검증을 위한 전문가시스템의 구성

환경 관리를 위한 기본 자료의 추출, 해석 및 검증에 관한 의사 결정의 필요성을 보완하기 위하여 전문가시스템을 구성하고자 하는 연구들이 다각적으로 이루어져 왔으며, 이러한 전문가시스템의 적용례로서 Fig. 2 와 같은 과정을 제시할 수 있다(Olivero와 Bottrell, 1990). 이는, 환경 자료들의 표준 발생 과정에서 발생하게 되는 여러 의사 결정 과정을 보완하기 위하여 EPA에서 개발 중인 전문가시스템의 예로서 환경 자료의 수집 과정을 크게 구분하면, (1) 과업에 필요한 자료의 수준(Data Quality Objective, DQO)을 결정하는 과정 (2) 현장 관측 과정 (3) 수집 자료의 해석 과정 (4) 자료의 검증 과정과 함께 (5) 초기 DQO와의 비교를 통하여 자료의 가용성 여부를 검토하는 과정으로 구분할 수 있다.

결국, 환경 자료 추출 전문가시스템(Environmental Sampling Expert System, ESES)의 구성은 현장에서의 다양한 자료 추출 대안들을 결합하여 효율적이면서도 일관성 있는 자료의 추출이 가능하도록 하는 목적 외에도, 초보 사용자의 의사 결정 과정을 보완해 줌으로써 자기 훈련 도구로서의 활용이 가능하도록 구성하였다. 이에 따라, ESES의 적용은 적절한 자료 추출 방법을 보다 빠르게 선정할 수 있다는 장점 외에도 보다 적절한 DQO의 선정이 가능해 졌다는 점과 노력의 절감, 추후 연구 영역의 개념화 등 개선 효과를 기대할 수 있게 되었다.

적절한 환경 자료의 수준은 의사 결정과 관측 및 개선 방안의 근거가 되므로, 표준화 및 적절한 설명, 신속한 응답의 필요성에 따라 정부와 사기업 분야에 전문가시스템을 적용함으로써 최소 비용으로 환경 개선 및 자료의 일관성을 유지하고자 하였다. 특히, 폐기물 처리장에 대한 연구는 계획·관리·자료의 수집과 위험도 평가, 적절한 기술의 선택 등에서 매우 광범위한 내용을 다루고 있으므로 이에 대한 의사 결정을 소수의 전문가들이 효과적이며 신뢰성 있게 처리하기란 매우 어려운 작업이다. 이는, 많은 경험을 필요로 하는 과정과 더불어 특별한 결정을 위하여 많은 양의 자료를 필요로 하는 경우가 발생하기도 하며, 문제의 본질이 다양하다는 등의 많은 요구들을 내재하고 있기 때문이다. 다만, 이러한 요구에 대하여 컴퓨터의 급속한 개발과 다양한 적용 추세는 많은 과업들을 신속히 처리하고, 과업의 자동화를 위하여 인공지능 기법을 적용하는데 큰 도움이 되고 있다.

특정 지역에 대한 오염물의 농도, 오염 발생의 제어, 적정 해결 방안의 선정과 개선안의 결정 등을 위해서는 사용 의도에 적당한 정성적·정량적 자료의 확보가 필수적이며, 효율적인 해석과 적절한 적용 과정을 통해서 건설한 의사 결정과정을 시행할 수 있다. 이에 따라 EPA에서는 환경공학, 위생, 화학, 지구과학, 통계, 구조 공학, 경영 및 법률 분야에 이르는 다방면의 전문가들을 접촉하여 단순한 교육과정만이 아닌 다양한 경험과 전문적 훈련에 의하여 획득한 전문 기술들을 수집하였고, 전문가시스템 혹은 지식 체계로 인식되는 소프트웨어들을 구축하여 인간 전문가의 지식과 의사 결정을 결합함으로써 정확도의 향상 및 시간 절감, 의사 결정 과정의 일관성 등을 갖추도록 하였다. 결국, 환경 관리를 위한 전문가 시스템 적용은 입력 및 의사 결정 과정에서의 다양한 근거를 제시하는 자료의 질에 상당히 의존하게 되므로 효율적이고 일관성 있는 자료 생성 과정에 대한 연구가 필요하게 되었다. 여기에서, 실

험실 및 현장에서의 자료 해석 기술은 계속 발전되고 있음에 반하여 자료 추출 과정은 그 복잡성과 다양성으로 개선이 어려움에 따라 ESES (Environmental Sampling Expert System)의 구축은 빠르고도 효율적인 자료 추출 방법의 선택과 노력 절감 등의 효과를 얻을 수 있도록 하였다.

이러한 연구의 적용례로서 복잡한 도시 수문 및 수질 모의 모형에 대한 적절한 적용을 위하여 숙달되지 않은 사용자가 많은 변수에 대하여 이해하고, 영역의 반응을 검토하여 적용 결과를 향상시키기 위한 의사 결정 과정이 제시된 바 있다(이범희, 1998). 이를 위해서 대상 영역 및 모형의 매개변수 특성에 따른 민감도 분석 등을 시행하였고, 전문가시스템의 구성을 위한 매개변수 개선 규칙이 설정되었다. 이에 따르면, 갈수록 복잡해져가는 도시 유출 및 수질 현상에 대하여 보다 정확히 대처하기 위한 입력 정보의 정확성 확보와 풍부한 경험을 가진 전문가의 도움을 받지 못하는 경우에도 신뢰성 있는 모의 결과를 얻을 수 있는 보조 시스템의 적용성을 제시할 수 있었다.

(b) 수중 오염 예측을 위한 전문가시스템의 응용

때로는 독성학적 지식이 거의 없는 초보자의 경우라도 화학적 수질 위험이 발생할 가능성이 있는 경우, 실험실 혹은 현장 실험 결과가 제시되기 이전이라도

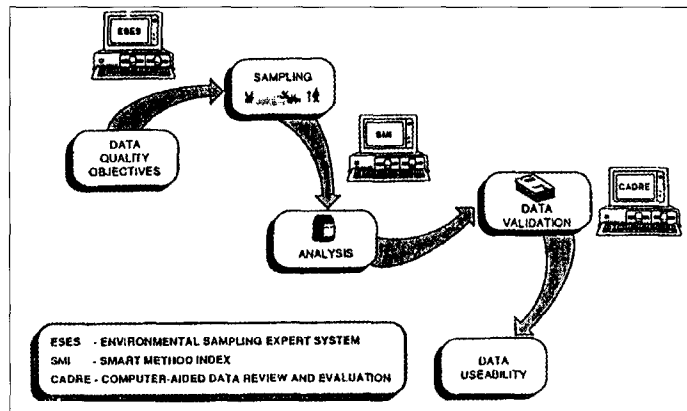


Fig. 2 Expert System Being Developed to Support the EPA Environmental Data Generation Process. (Olivero and Bottrell, 1990)

적절한 대응 조치를 취해야 할 필요성이 발생할 수 있으며, 특히 생물학적 해석이나 독성, 화학적 경험이 부족한 경영자들을 대신하여 의사 결정을 수행할 수 있는 접근 방법의 하나로 정량적 자료들을 처리할 수 있는 컴퓨터 프로그램이 필요한 경우, 전문가시스템의 정의에 따라 특정한 문제에 대한 인간 전문가들의 해결 과정을 모방하고자 하는 특별한 목적의 프로그램을 구성하려 하였다. 이를 위하여 EPA에서는 SMILE (Simplified Molecular Input Line Entry System)이라는 전문가시스템을 개발하였으며, 본 시스템은 프로그램 언어

mulLISP에 의하여 작성되고, IBM PC 및 동등 환경에서 수행될 수 있도록 구성되었다(Hickey 등, 1990). 여기에서 시스템은 크게 3부분으로 구분할 수 있는데 이는 (1) 혼합물의 화학적 기본 구조를 결정하는 부분과 (2) 각 변수 값들의 추정 부분, 그리고 (3) 혼합물의 독성치 예측 부분으로 구분하여 적용할 수 있으며, 여기에 더하여 처리장 주변의 위생 및 환경 피해를 저감하기 위한 각종 조건 등의 예측 시스템들을 포함하기도 하고, 이에 따라 화학 구조상의 각종 변수들을 예측할 수 있도록 구성하였다.

이곳에서는 LSER(Linear Solvation Energy Relation)방법을 사용하여 각 오염 물질들의 독성이 다음과 같은 3가지의 항에 의하여 간단히 표현될 수 있다고 보았다. 즉,

$$\text{toxicity} = \text{cavity term} + \text{dipolar term} + \text{hydrogen bonding terms} \quad (1)$$

으로 전문가시스템에서 사용한 일반적 형식의 식으로 표현하면,

$$\log_{10}(\text{toxicity}) = mV_1/100 + s\pi + b\beta + a\alpha \quad (2)$$

여기에서, m , s , b , a 는 상수이고, $mV_1/100$ 은 용

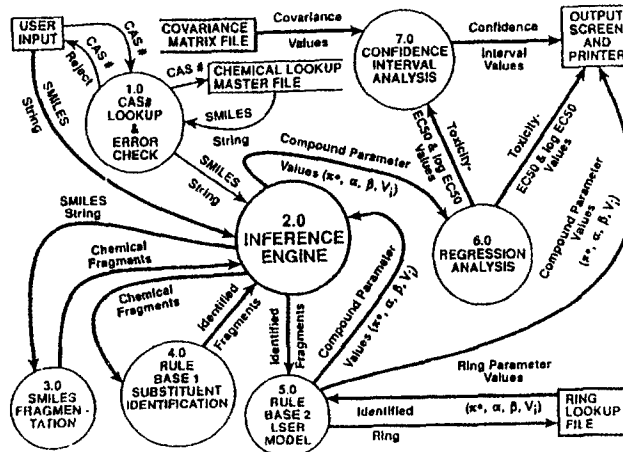


Fig. 3 Physical Data Flow Diagram(Hickey et al., 1990)

제 분자와의 분리를 위하여 필요한 자유에너지항을, s π 는 양극성/극성화항으로 π 는 분자의 안정화 능력을 나타내는 척도이며, $b\beta$ 와 $a\alpha$ 는 hydrogen bonding term을 의미한다. 따라서, 이러한 관계에 따른 물리적 자료의 흐름을 정리하면 Fig. 3 과 같이 제시할 수 있다.

매우 다양한 종류의 화학적·환경적 거동으로 모든 경우에 대하여 일률적이며 최적인 모형은 존재할 수 없으며, 모든 경우를 대표할 수 있는 최적의 관측 생물 종을 선정할 수도 없으므로, 소프트웨어의 개발과 더불어 오염물 및 대상 생물군, 예측 특성 등에 따라 최적의 모형을 선정할 수 있도록 전문가시스템을 구성함으로써 최종적으로 사용자 친화적인 전문가시스템이 구성되도록 하였다.

결국, 전문가시스템의 적용을 통하여 생물학적 분석을 행하기 이전에 화합물들의 독성치 및 범위를 추정할 수 있어 시험 시간의 단축을 기대할 수 있으며, 위험도 평가 기법의 일부분으로 표본 자료로부터 혼합물의 독성치를 평가하려는 시도가 가능할 것으로 보인다. 다만, 이 기법의 적용시 해석의 불확실성 및 동질 이성체에 대한 문제점들을 포함할 수 있다는 등의 한계점들을 지니고 있어 이에 대한 개선 연구가 필요하다.

국내에서도 이러한 연구 예로서 수중에 어떤 오염

의 징후가 발견되었을 때 이러한 오염의 징후로부터 수질오염의 원인을 파악하거나, 수체에 서식하고 있는 조류의 종류에 따라 수질을 평가하는 것으로 수질에 대한 전문적인 지식이 없는 사람일지라도 수질오염의 진단 및 수질오염의 대책이 가능하도록 구성된 연구가 발표된 바 있다(서울대학교 보건대학원, 1995).

(c) 전문가시스템을 응용한 위험 경고 체계의 구성

1986년 위험방재 및 공공의 알권리에 관한 시행령(SARA Title III, The third title of the Superfund Amendments and Reauthorization Act)이 통과된 이후, 시민들은 위험한 상황에서 그들 자신들이 받아들일 수 있는 위험의 한도를 스스로 결정할 수 있어야 한다는 가정에 근거하여 위험에 대한 경고 혹은 대응 방안을 위한 많은 수의 인공지능 소프트웨어들이 개발되어 왔다. 그 중의 한 예로서 EPA의 주관에 의하여 CAMEO II system (Computer Aided Management of Emergency Operations)이 개발되어 사용 중에 있으며, 이러한 시스템을 통하여 건강에 심각한 영향을 미치는 위험 물질들의 발생에 관한 정보가 공공에 제공될 수 있게 되었고 이에 의한 대응 방안을 구성할 수 있도록 하였다(Hadden, Jr, 1990). 따라서, CAMEO II 프로그램에서는 다음과 같은 3가지의 중요한 목적을 포함하고 있는데, 이는 (1) 각 화학 물질마다 방재절차 및 감소 도구 등 적절한 대응 절차에 관한 정보를 제공하려는 것이며, (2) 각 화학 물질에 의한 유사한 경우들을 비교하여 정보를 개선하려 하였고, (3) 피해 감소 방안의 하나로 대기 중에서의 화학 물질 분산을 계산하여 위험지역에서의 철수 여부를 판단하도록 하였다. 다만, 시민들의 환경 위험에 대한 관심 분야는 매우 한정된 부분에 집중되어 있는데, 예를 들면 "그러한 변화가 나의 생활, 재산, 이웃에 어떠한 영향을 미칠 것인가?"라든가 혹은 "그러한 오염 물질이 얼마나 주변에 존재하게 될 것인가?" 등이 중심적인 문제로 제기되고 있으며, 따라서, 이들 내용을 중심으로 설명할 수 있는 상호 대

화 형식으로 구성되어 시민들의 접근이 유리하도록 제시하려 하였다.

결국, 모든 종류의 환경 자료에 접하고자 하는 시민들의 요구 사항이 증가될수록 자료들 사이의 관련 사항을 명백히 함으로써 이해하기 쉽도록 제시하여야 할 필요성도 계속적으로 증가하게 되며, 자료들에 대한 합당한 설명을 제시할 수 있어야 하고, 자료에 대한 접근의 어려움으로 인하여 시민들이 불편해 하는 일이 없도록 시스템을 구성하여야 한다. 즉, 위험 경고 체계의 구성을 위한 전문가시스템의 미래는 환경 위험에 대한 대응 방안을 결정할 수 있도록 각 전문가들을 보조하는 역할만이 아니고, 각 전문가들의 결정에 의하여 영향을 받게 되는 시민들이 그 변화 상황을 이해할 수 있도록 충분한 정보를 제시할 수 있어야 하며, 공공 교육 등의 역할을 할 수 있도록 발전해 나가야 할 것이다.

(d) 공공 처리장 운영의 한계 요소 진단을 위한 전문가시스템의 적용

공공 처리장의 최적 운영을 위하여 EPA와 Eastern Research Group은 경제적, 비 구조적 접근 개념에 의한 평가 전문가시스템인 POTW(Publicly Owned Treatment Works) EXPERT를 구성하였고(Berkman 등, 1990), 각종 징후에 대한 관측과 경험 규칙들을 통하여 처리장의 최적 운영을 방해하는 요인들이 무엇인지 인지할 수 있는 보조 기능을 담당하려는 것으로 자료의 분류 기법과 검토 및 선정 방법의 재발견적 구성 등 시스템의 지식 공학적 검증이 이루어지도록 하였다.

수중 산소를 감소시키고, 바람직하지 않은 수중 생물들을 증가시키거나, 위생 및 건강에 악영향을 미치게 되는 오·폐수의 근원으로는 생활 및 거주 지역, 상업 지역, 산업 지역에서의 유출과 함께 강우 및 지하수 등을 들 수 있으며, 처리장의 최적 운영 평가를 위하여 제시된 여러 기법들 가운데 가장 성공적인 것으로 알려져 있는 CPE/CCP(Comprehensive Performance Evaluation/ Composite Correction Program)법은 필요 처리 용량에 대한 평가와 함께

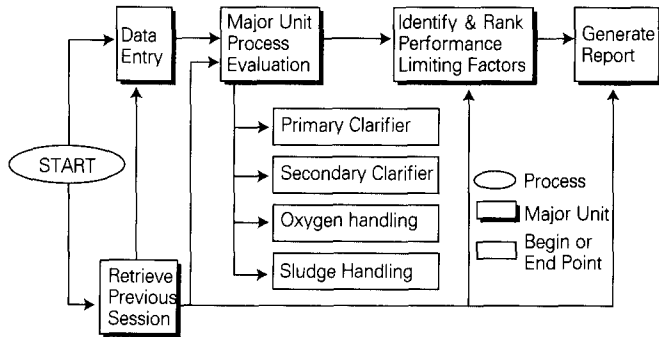


Fig. 4 POTW EXPERT top architecture (Berkman et al., 1990)

비구조적 지향의 비용 효율화를 기본으로 하고 있어, 주요 단위 처리 방안에 대한 평가와 운영 관련 각종 요소들의 우선 순위를 결정하고 주어진 유출량 및 오염 부하량에 대한 기존의 생물학적·화학적 처리 과정이 수질 목표의 달성에 적절한 지의 여부를 평가하게 된다.

전체적인 구조를 살펴보면, 크게 (1) 자료의 입력 부분, (2) 주요 단위 처리 평가 부분, (3) 실행 한계 요소의 평가 부분, (4) 결과의 제시 부분 등 4개의 구성 부분으로 이루어지며(Fig. 4), 이 시스템을 적용함으로써 오염원의 처리 방법이 효과적으로 사용될 수 있는 여러 방법들을 논리적이고, 구조적으로 제시할 수 있다는 장점을 지니게 된다.

(e) 활성 오니 처리 시스템의 구성

ASAP(Activated Sludge Advisor Prototype)는 오염물 처리장의 운영을 보조하기 위하여 설계된 전문가시스템으로, 그 이름이 의미하는 바와 같이 활성 오니의 처리 과정에서 미생물을 사용함으로써 분해 속도를 향상시키려는 생물학적 방법을 주로 사용하고 있으나, 그 운영상에 많은 문제점들이 발생할 수 있어 전문가의 도움을 기대할 수 없는 상황에서 비전문적 운영자들이 당면하게 될 여러 문제점들을 해결하고자 구성되었다(Schmuller와 Morlino, 1990).

처리 시설들은 크게 오염물의 수집·처리·배출의 3단계 과정으로 구성되며, 여기에서 처리 과정으로는

큰 덩어리나 모래·자갈 등을 물리적으로 걸러 내는 전처리 과정과 침전 및 부유물질의 제거를 위한 1차 처리 과정, 그리고 생물학적·화학적 및 물리학적 처리 기법 등을 통하여 부유 및 용존물질들을 제거해 내는 2차 처리 과정 등이 있다.

활성오니는 용존산소가 존재하는 환경에서 미생물의 성장으로 인하여 오수에 발생하게 되는 입자들을 의미하는 것으로, “활성”이란 입자에 존재하게 되는 고농도의 박테리아, 진균류 및 원생 생

물 군들을 의미한다. 따라서, 투입된 미생물들이 활성 오니들을 섭취하여 이들의 분리를 향상시키게 되는 원리로 진행되는 2차 처리 단계의 안정적인 진행을 위해서는 폭기조 등을 통한 용존산소의 지속적인 공급이 있어야 하며, 이의 조절은 오니의 색과 혼탁액의 표면에서 발생하는 난류의 정도를 경험에 의해 판단하여야 한다.

결국, 이러한 경험으로부터 전문가시스템을 구성하기 위하여 20년 이상의 오염물 처리 경험을 바탕으로 ASAP를 구성하였다. 물론, 현재까지의 연구 상황은 기초적인 연구 단계에 머물고 있으나, ASAP가 이미 처리장 운영에 대한 훈련 도구로서의 역할을 담당할 수 있으며, 사용자의 물음에 대화 식으로 응답할 수 있도록 구성할 수 있다는 점, 그리고, 필요한 정보들을 추가적으로 지원할 수 있다는 점들과 지식 베이스의 추가적 확장 등을 통하여 지속적 연구의 가능성을 보여주고 있다.

(f) 지역 특성에 따른 방재 우선 순위의 결정

대상 지역에 따른 위험물질의 분포 등을 고려하여 인간 건강 및 환경에 대한 잠재적 위험도를 추정하고자 하는 노력으로 방재순위 추정 모형(Defense Priority Model, DPM)이 개발되었으며, 오염 물질의 양과 독성도의 심각한 정도를 판별하기 위하여 유출 가능한 오염원, 오염 경로 등에 대하여 고려하였다(Hushon, 1990).

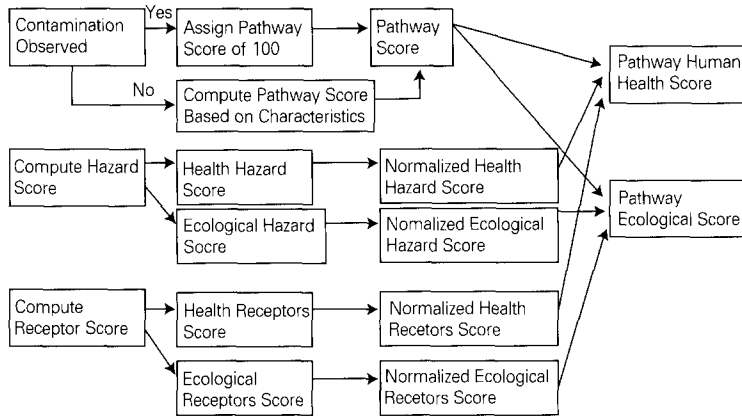


Fig. 5 How Pathway Scores are Computed (Hushon, 1990)

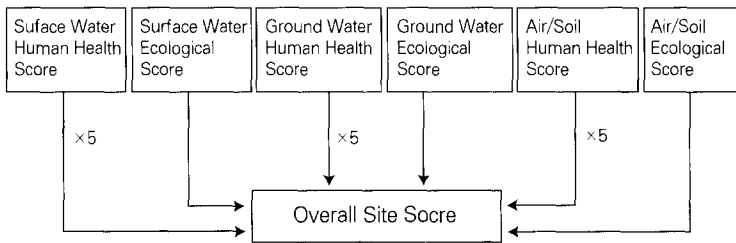


Fig. 6 How Site Scores are Computed (Hushon, 1990)

이를 위하여 지리학자 및 환경공학자 등의 전문가 집단에 의하여 여러 종류의 대상 유역에 대한 위험 정도를 평가해 보고, 각 평가 결과의 차이 원인들을 분석하였는데 이에 따르면, 평가 결과의 차이는 각 평가자의 이용 가능한 자료의 차이에 의하여 발생하는 것으로 다른 집단이 갖고 있는 자료가 없거나 본인만의 특별한 지식에 의하여 결론을 추론해 내는 경우에 발생할 수 있고, 단위의 변환이나 정의의 불확실성 등에 의하여 평가 집단 각각의 평가 결과를 비교하기 어려울 수도 있었으며, 평가 집단마다 자료의 취득 방법이 다르므로 인하여 발생할 수도 있었다. 이에 더하여, 대기 및 토양 오염 유출 경로 등을 포함하여 고려하거나, 위험 정도의 평가를 대상 유역의 거리만이 아니고 인구에 의한 함수나 기상학적 자료를 포함하여 확장하는 경우까지도 고려해 주는 것이 필요할 수도 있었다.

전반적인 모형의 구조를 살펴 보면, 각각의 대상 유역에 대한 평가를 위해 3가지의 유출 경로 (지표수 유출, 지하수 유출, 먼지 및 기화 오염물 등의 대기 중 유출)와 2가지의 수용체 (인간 건강에 대한 위험도, 생태학적 위험도)를 포함한 6가지 경로에 대하여 Fig. 5 와 같이 평가한 예를 볼 수 있으며, 최소자승법에 의하여 정상화된 값들을 결합하여 각각의 대상 유역별 평가를 실시하되 (Fig. 6), 인간 건강에 대한 위험도의 평가 결과를 생태학적 위험도의 평가 결과에 비하여 높은 가중치를 두어 계산하고 있음을 볼 수 있어 결국, 이러한 평가 방법에 따라 환경 개선에 대한 우선 순위 결정 방안의 논리적 검토가 가능해질 수 있다는 장점을 기대할 수 있었다.

(g) 환경 개선 비용 산정을 위한 전문가시스템

화학 폐기물의 환경 피해 방지 기금(Superfund)에 따라 유역별 환경 개선 방안 및 비용 산정을 위하여 CORA(Cost of Remedial Action)모형이 미 EPA에서 개발되었다(Chenu와 Crenca, 1990). 이는 마이크로컴퓨터를 원용한 2개의 독립적인 모형을 포함하고 있는데, 하나는 환경 개선을 위한 권고들을 포함하는 자문용 지식 베이스이며, 다른 하나는 특정 지역에 대하여 전문가시스템의 권고를 충족시키기 위한 비용을 추정하는 데이터베이스 관리 시스템이다. 따라서, 이 시스템을 적용하게 되면, 과거 연구 영역 이외의 문제일지라도 그 해결 시간과 비용을 절약시켜 줄 수 있을 뿐만 아니라 일관성 있는 개선이 이루어 질 수 있도록 도움을 줄 수 있을 것이다.

이들을 일반적인 흐름도에 따라 분석해 보면, Fig. 7 과 같이 나타낼 수 있다. 여기에서, CORA 전문가

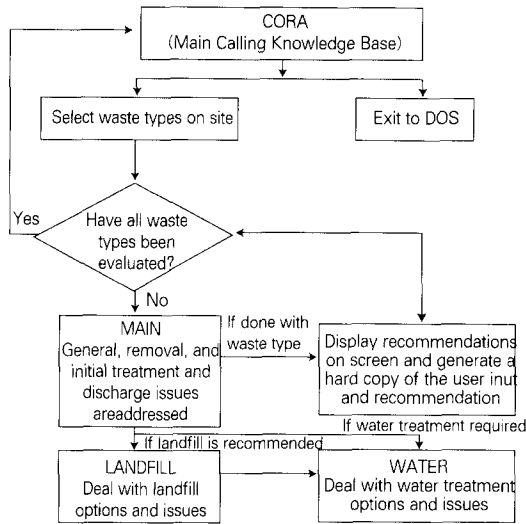


Fig. 7 Expert System Program Flow (Chenu and Crenca, 1990)

시스템은 4개의 지식 베이스(CORA, MAIN, LANDFILL, WATER)를 가지고 있으며, 이중 첫 번째 지식 베이스인 CORA는 각 오염 유역에 대한 오염 형식에 따라 두 번째 지식 베이스인 MAIN을 호출함으로써 전체 프로그램에 대한 관리 기능을 담당하고, MAIN은 오염 물질의 제거·처리·매립·적재 및 자연 감소 등에 대한 적절한 규칙들로 구성되어 있다. 세 번째 지식 베이스인 LANDFILL에서는 처리에 의하여 생성되는 부산물들의 매립 관련 규칙들을, 네 번째 지식 베이스인 WATER에서는 MAIN 또는 LANDFILL에 의하여 제안된 처리에 따라 생성된 액체들을 다루는 규칙들이 소개되어 있다. 이외에도, EPA를 비롯한 각 주에서의 환경 개선 전략 추정이나 대안들의 평가, 환경 안정 방안을 위한 비용 효과의 해석 등에 CORA 모형이 지속적으로 사용될 것으로 기대된다.

(h) 개선 방안의 우선 순위 결정 및 다중 매질 오염원 평가 시스템

개선 방안의 우선 순위 결정 시스템(RAPS, Remedial Action Priority System)과 다중 매질 오염원 평가 시스템(MEPAS, Multimedia Environmental

Pollutant Assessment System)은 인간의 건강에 영향을 미치는 화학 및 방사능 유출에 대하여 평가하려는 하나의 목적에 의하여 PNL(Pacific Northwest Laboratory)에서 구성한 전문가시스템이며, 표준 평가 원칙 및 기술에 근거하고 대기, 지하수 및 지표수를 사용하여 성분의 감소와 영향에 대하여 모의하였다(Droppo, Jr.와 Hoopes).

위험물질의 유출에 따른 환경의 오염 정도를 이해하기 쉽도록 평가한다는 것은 매우 어려운 일이나, 일관적인 결과를 통하여 그 적용성이 매우 우수한 평가 방법으로 MEPAS를 연구하였다. 이에 따라 MEPAS의 특징으로는 (1) 사용자가 특정한 경우에 적용하고자 할 때, 총체적인 데이터베이스를 제공할 수 있으며, (2) 사용자가 상호 대화식으로 문제들을 정의할 수 있고 문제들을 해석할 수 있으며, (3) 문제별 작업 공간을 구성할 수 있다는 장점과 함께, (4) 자동 자료 입력 과정과 오류의 검토, 설명의 제시 등이 이루어지고 (5) 대상 유역의 자료에 쉽게 접근할 수 있으며, 오염 물질의 유출에 따른 환경 영향 평가 및 그 처리가 쉽다는 특징을 지니고 있다.

많은 경우의 환경문제에 대한 평가에 적용하기 위하여 인간의 건강에 대한 잠재성을 바탕으로 MEPAS를 개발하였으며, MEPAS는 여러 환경문제들 중에서 상대적으로 중요한 경우들을 과학적이며, 목적에 충실할 수 있도록 추출해 낼 수 있는 적절한 도구로 제시할 수 있었다.

4. 환경 관리를 위한 새로운 전문가시스템의 개발

이 곳에서는 환경공학적 입장에서 최근에 개발되고 있는 전문가시스템에 대하여 논의하도록 하였다. 즉, 전문가시스템의 범주를 환경공학적 입장으로 크게 나누어보면 (1) 독성폐기물의 관리분야와 (2) 용수공급 및 오수관리분야, 그리고 (3)수치모형의 추정 및 적용 분야로 구분할 수 있는데(Ortolano et al., 1987), 이들의 특성을 살펴보면 전문가시스템의 대부분이 독성 폐기물의 관리를 목적으로 처리시설의 적지선정, 안정 운영, 오염물 관측 및 방재 등을 다루고 있으며

Table 6. New Hazardous Waste Management Systems (Ortolano et al., 1987)

Domain(name)	Purpose	Software	Hardware
Spill crisis (Spillmap)	Act as response too for containment of accidental spills	ILISP	Micro
Hazardous waste facilities closures	Guide reviewers of closure plans under Resource Conservation and Recover Act (RCRA)	Undecided	Micro
Waste analysis plans	Assist EPA reviewers of hazardous waste facilities permit applications	PROLOG	Micro
Superfund remedial action	Identify and screen tech. feasible for a given site	PROLOG	Micro
Underground storage tanks	Identify need for external leak detection monitoring	LISP-based	Micro
Hazardous waste facility siting	Assist in siting near wetlands environments	M.1	Micro
Chemical identification	Analyze unknown contents of waste containers	C	Micro
Trace organics probe analysis	interpret groundwater sample data from a mass spectrum analysis	Undecided	Micro
Dredge material disposal	Evaluate impacts of dumping hazardous dredged materials	Undecided	Micro
Leaking underground storage tanks	Provide remedial action advice for controlling leaks	Gespc	Micro
Cost of remedial action (CORA)	Select and price remedial tech. at Superfund sites to forecast budget needs	Insight 2 +	Micro
Chemical crises (First Responders Expert System)	Assist federal and state emergency response teams	KES	Micro
Support services selection	Help response teams select providers of treatment tech. at Superfund sites	KES	Micro

Table 7. New Water Supply and Wastewater Management Systems (Ortolano et al., 1987)

Domain(name)	Purpose	Software	Hardware
Tricking filter plants (Sludge Cadet)	Assist plant operators by diagnosing failures and suggesting remedies	KEE	LISP workstations
Anaerobic digester	Improve operation of processes and diagnose problem due to poor stability in small treatment plants	M.1	Micro
French water treatment plants	Schedule pumping operations, considering projected water demand and energy costs	GURU	Micro
New York water treatment plant	Assist plant operators in assessing water quality and quantity; suggest required maintenance	KEE	Mainframe (eventually Micro)
Water system loss	Analyze survey data collected from scan of water distribution system; determine points of leakage	undecided	Micro
Activated sludge plants	Assist plant operators in diagnosing problems and improving plant performance	M.1	Micro
Multi-use watershed management (MUMS)	Operate reservoirs to maximize hydropower and mitigate adverse environmental impacts	KES	Micro

(Table 6), 용수의 공급과 오수관리를 위한 전문가시스템의 구성을 통해서 처리 및 유출방지, 저수지의 운영 등의 사항을 포함하고 있다(Table 7). 마지막으로 수치모형의 추정 및 적용분야를 통해서 초보사용자의 교육 등을 포함한 다양한 관점에서의 수치모

형 구성 및 적절한 모형의 선정, 현장자료를 바탕으로 한 매개변수들의 적절한 추정 등을 목표로 개발되고 있다(Table 8).

다양한 관점과 목표를 통하여 새롭게 구성되고 있는 환경관리 전문가시스템들을 살펴봄으로써 대상유

Table 8. New Systems for Calibration and Use of Models (Ortolano et al., 1987)

Domain(name)	Purpose	Software	Hardware
Mixing zone analysis	Select mathematical model to predict water quality where wastewater discharge mixes with receiving water	M.1	Micro
Groundwater flow analysis	Use groundwater flow models and calibrate model parameters using field data	PROLOG	Micro
Water resources laboratory aide	Tutor laboratory students and act as a "front end" to large computer programs	EXSYS	Micro
Hydrologic model calibration	Assist nonexperts in use and calibration of EPA's Storm Water Management Model	PROLOG OPSS, KES	Micro

역 및 적용목적에 따른 신중한 평가 선행되어야 하며, 이를 통하여 전문가시스템의 선정에 위한 참고가 될 수 있기를 바란다.

5. 환경 관리를 위한 전문가시스템의 미래

여러 가지의 경우에 대하여 전문가시스템이 적용되고 있는 예들을 설명하였으나, 다른 경우에서와 마찬가지로 환경 분야에 대한 전문가시스템의 연구 역사는 그리 길지 않으며, 또한, 초기 의사 결정 시스템에 대한 연구에서는 전문가시스템의 사용에 대한 유용성이나 가능성의 평가 정도가 주된 관심 대상으로 초기의 연구 분야 역시 공학이나 기술적인 관점에 한정되었다. 그러나, 최근에 들어와 시스템의 연구 분야가 법률, 행정관리까지도 포함되게 되는 등 그 발전 속도가 더욱 빨라지고 있음은 주목할 만하나, 아직도 전문가시스템의 연구는 의사 결정을 위한 주된 도구로서의 위치를 차지하고 있지는 못하다. 이는 아직도 많은 의사 결정권자들이 전문가시스템에 친숙하지 못하다는 점과 전문가시스템이 의미 있고 신뢰성 있는 보조

도구라는 점에 회의적이기 때문일 것이다. 결국, 전문가시스템이 상대적으로 생소한 기술이라는 점과 근본적으로 전문가시스템이 할 수 있는 분야와 할 수 없는 분야의 구분이 명확하지 못하다는 점, 인간 전문가의 판정 과정을 기계가 정확히 재현하지 못한다는 이유에 의하여 전문가시스템의 추론 과정에 관한 신뢰성이 부족하다는 점등은 앞으로의 사용 여부에 대해서도 전문가시스템의 단점으로 작용할 것으로 보인다.

그러나, 상식의 정의가 모호한 이유에도 불구하고 상식을 코드화 하려는 여러 분야의 시도가 성공적으로 진행되고 있음과 함께 전문가시스템의 적용이 많은 분야에서 성공적으로 적용되었던 예로부터 지속적인 발전과 확대가 가능할 것으로 예측되며, 앞으로의 세대가 컴퓨터와 친숙한 환경 하에서 성장하고 있음을 볼 때, 전문가시스템의 적용을 통한 담군의 효율적 운영, 병원에서의 치료와 수술, 도로에서의 자동차의 자동 운행, 자원의 탐사, 도시 관리 및 자동 농업의 적용 등 다양한 분야로의 적용이 가능한 시대가 그다지 멀지 않았을 것으로 기대하게 된다. ●

< 참고 문헌 >

김기태, 김상용 (Kim et al., 1987). 인공지능 - 컴퓨터비전, 자연언어이해, 전문가 시스템. 안국출판사.
 김성식 (Kim, 1995). 인공지능 기법. 홍릉과학출판사, p. 267
 김재희 (Kim, 1988). 인공지능의 기법과 응용. 교학사.
 서울대학교 보건대학원 (1995). 수질정보 종합관리 시스템 개발 - 수역 수질관리를 위한 수질예측 모형과 의사결정 지원시스템 개발에 관한 연구, 환경부 제1단계 3차년도 최종 보고서.
 이범희 (1998). 지리정보체계 및 전문가시스템을 이용한 도시유출 및 수질모형의 개발, 박사학위논문. 서울대학교.
 조동섭 (1988). "전문가 시스템의 개관." 마이크로 소프트웨어 (9월호), (주)정보시대, pp. 146-149.

- Berkman, L., Lennon, M., and Law, K. (1990). "*An expert system to diagnose performance limiting factors at publicly owned treatment works.*" Expert Systems for Environmental Applications, American Chemical Society, pp. 120 - 138.
- Chenu, M.T. and Crenca, J.A. (1990). "*The cost of remedial action model: expert system applications.*" Expert Systems for Environmental Applications, American Chemical Society, pp. 162 - 175.
- Droppo, Jr. J.G. and Hoopes, B.L. (1990). "*Remedial action priority and multimedia environmental pollutant assessment system.*" Expert Systems for Environmental Applications, American Chemical Society, pp. 193 - 205.
- Hadden, Jr. W.J. (1990). "*A citizen's helper for chemical information.*" Expert Systems for Environmental Applications, American Chemical Society, pp. 108 - 119.
- Hickey, J.P., Aldridge, A.J., May, D.R., Passino, D.R.M., and Frank, A.M. (1990). "*An expert system for prediction of aquatic toxicity of contaminants.*" Expert Systems for Environmental Applications, American Chemical Society, pp. 90 - 107.
- Hushon, J.M. (1990). "*The defense priority model for department of defense remedial site ranking.*" Expert Systems for Environmental Applications, American Chemical Society, pp. 206 - 216.
- Levin, R.I., Drang, D.E., and Edelson, B. (1986). A comprehensive guide to AI and expert systems. McGraw-Hill Book Company, p. 3.
- Olivero, R.A., and Bottrell, D.W. (1990). "*Expert systems to support environmental sampling, analysis, and data validation.*" Expert Systems for Environmental Applications, American Chemical Society, pp. 69 - 81.
- Ortolano, L., and Steinemann, A.C. (1987). "*New expert systems in environmental engineering.*" Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 1 (4), ASCE, pp. 298 - 302.
- Schmuller, J., and Morlino, M.R. (1990). "*The activated sludge advisor prototype.*" Expert Systems for Environmental Applications, American Chemical Society, pp. 139 - 145.