

수문 · 수질모델링의 새로운 전환

김 성 준*

개 요

지난 20년 동안 수문 및 수질 모델들은 그 규모에 따라 복잡한 물리적 과정들을 평가하기 위한 수단으로서 지속적으로 개발, 적용되어 왔다. 대기순환모델과 결합한 대규모 수문모델들은 기후의 변화가 수자원에 미치는 영향을 예측하기 위하여 개발되어 왔다. 수자원 관리모델들은 다양한 토지이용과 관리가 환경에 미치는 영향을 평가하기 위하여 활용되어 왔다. 수문/수질모델들은 지표 및 지표하에서 물의 흐름과 이에 따른 오염물질의 이동기작을 예측하기 위하여 사용되어 왔다. 이러한 모델들의 지속적인 개발과 응용은 최근들어 컴퓨터 하드웨어와 소프트웨어의 기술이 급진적으로 발전한 것과 직접적으로 관련이 있다. 그 예로서 컴퓨터 하드웨어는 그 기능이 더욱 강력해지고 가격은 현저하게 저렴해졌다. 모델의 수행을 위하여 한 번에 몇 일이 걸리던 수학적 과정이 이제는 수시간내에 처리가 가능해졌으며, 하드웨어의 그래픽 성능은 모델의 입력과 출력을 대화식으로 가시화할 수 있게 하였다. 그러나 여기서 논의할 몇 가지 새로운 기법들과 컴퓨터 기술의 발전은 수문/수질모델링의 방향을 전환시키고 모델의 견고성을 향상시키는 데 기여할 것으로 본다.

주요어 : 모델링, 지리정보시스템, 수문, 수질
전문가시스템, 인공위성 영상처리

I. 서 론

“우리 과학자들은 자신의 존재를 보이기 위하여 새로운 착상과 지식을 깔끔하게 여과시켜 포장해보려고 끊임없이 시도하기 때문에 복잡하게 뒤얽힌 현상들을 이해하는 것 같다(W. M. Kohler, 1969).” 물의 흐름과 오염물질의 이동에 대한 수문학적 구조와 과정을 좀 더 이해하려고 해왔던 노력은 수문/수질모델을 하나의 영역으로 이룩하였다. 이러한 모형들은 유역 또는 포장단위로 복잡한 환경문제를 양적으로 접근하는데 있어 신뢰할만한 도구로 제공될 수 있다. 더우기 수문/수질모델은 ① 자연환경에 대한 지식을 코딩하여, ② 상호간의 지식이 상이한 부분은 보완할 수 있도록 개념을 체계화하고, ③ 주어진 시스템을 체계적으로 볼 수 있도록 물리적인 부분들에 대한 지식을 통합하여 구조화하고, ④ 토지의 이용과 관리방법이 수문학적, 환경적 과정에 미치는 영향을 추정할 수 있도록 도와준다(OTA, 1982).

대부분의 경우, 지금까지의 수문/수질모델들은 적용하려는 의도에 맞게 개발되었다고 볼 수 있다. 모델의 개발자들은 다양한 형태로 자신들의 모델을 사용자들의 분석도구로 제공하여 왔다. 일부 사용자들은 이러한 모델을 조작하여 믿음만한 분석과 기술적으로 타당한 결론을 도출해낸다. 그러나 일부 모델들은 사용하기에는 여러가지 결점을 지니고

* 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원

있다. Lee(1971)는 대유역단위 모델들의 기본적인 결점들을 다음과 같이 고전적으로 ① 과도한 포괄화(hyper-comprehensiveness); 광범위하게 적용할 수 있도록 포괄적인 프로그램을 만들려고 시도하는 경우, ② 그릇된 주도성(wrong-headedness); 모델이 복잡하여 모델의 한계와 오류를 찾을 수 없는 경우, ③ 맹렬성(hungriness); 자료의 습득과 관리가 어려운 대량의 자료를 요구하는 경우, ④ 비대화(grossness); 모델을 다루기 편하도록 너무 정교하게 만들어 보려고 하는 경우, ⑤ 복잡성(complicatedness); 사용자가 모델링과정을 따르다가 길을 잃어버릴 정도로 지나치게 자세한 내용을 포함한 경우, ⑥ 무의식성(mechanicalness); 모델의 수행을 위해서는 대용량의 컴퓨터가 요구되어 유지비용이 과도한 경우, ⑦ 비실현성(expensiveness); 모델의 개발과 유지, 입력매개변수들의 수집, 모델의 적용에 있어서 수행기간 및 개발비용이 현실과 동떨어지는 경우를 지적하였다. 수문수질모델의 사용자들은 이러한 모델들을 만났을 때 현실성이 없다는 불평을 늘어 놓는다. 따라서 모델 개발자들은 최근의 새로운 기법들을 도입하므로써 사용자들에게 보다 나은 기능을 갖춘 수문/수질모델을 제공할 필요가 있다.

지난 수십년동안 우리는 여러 문헌들을 통하여 수문/수질모델의 개발 및 적용과 관련된 수 많은 보고서, 논고, 논문들을 찾아볼 수 있다. 이들 중 몇가지 대표적인 예를 들어보면, 수문의 경향과 향후 방향(Burge, 1986), 지표수 수질모델링 연구의 고찰(Leavesley et al., 1990 and Rose et al., 1990), 수문시스템 모델링의 발전과정(O'Connell, 1991), 컴퓨터 기술의 발전이 수문연구에 미치는 영향(Dodson, 1993) 등이 있다. 한편 Dodge (1988)는 "수문의 과거와 현재"라는 고전적인 논고에서 수문과학의 발전에 대하여 흥미로운 관점들을 제시하였다. 이 논문의 목적은 현재까지의 수문/수질모델에 대한 고찰에 있는 것이 아니고 앞으로 수문/수질 모델링에 영향을 줄 수 있는 새로운 기법들에 대하여 논의하고자 한다.

이 논문은 다음과 같이 첫째, 수문/수질모델의 분류를 돕기 위한 모델링의 철학적 고찰, 둘째, 수문/수질모델링에 영향을 주고 있는 새로운 기법들

의 소개(지리정보시스템, 전문가/지식 시스템, 소프트웨어 공학, 원격탐사), 셋째, 수문/수질모델링에서 각 기법들의 장래 적용가능성을 타진해 보는 순으로 구성되어 있다.

II. 수문/수질모델링의 철학적 고찰

과학자들은 자연을 표현하기 위한 시도로서 모델이라는 매개체를 사용한다. 일반적으로 모델은 "현상의 이해를 목적으로 자연을 간략화한 구성체"라고 정의할 수 있다. 모델은 또한 자연(현실)의 간략화된 가상체라고도 말할 수 있다. 따라서 모델은 광역의 의미로서 자연 또는 현실의 비유라 할 수 있다(Batchelor, 1994).

기존의 모델들은 그 정의와 원칙의 필요성에 의하여 여러 범주로 분류되어 왔다. Woolhiser와 Brakensiek(1972)은 모델들을 물질적(physical) 모델과 형식적(formal) 모델의 두 분야로 구분하였다(Figure 1). 물질적 모델은 iconic, analog, scaled 모델로 분류되며, 이들은 이상적인 시스템과 유사한 성질을 가지지만 훨씬 단순화시켜 복잡한 시스템을 물리적으로 표현한 것이다(Woolshier and Brakensiek, 1972). 형식적 모델은 실제 물리적인 시스템의 중요한 구조적 성질을 가지도록 시스템을 상징적이고 수학적으로 표현한 것이다.

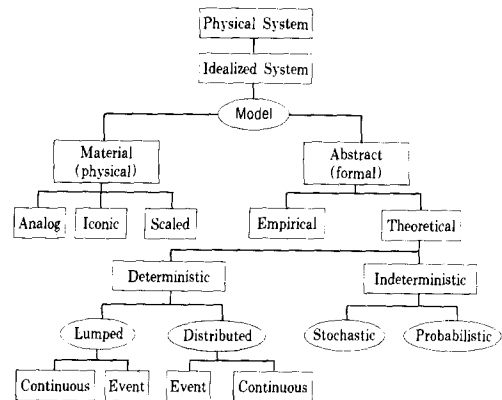


Figure 1. General classification of hydrological and water quality models

형식적 모델은 시스템에 영향을 주는 과정과 기작을 경험적 또는 이론적으로 처리한다. 경험적 모델은 시스템의 관계들을 공식화하기 위하여 관측자료를 이용하고, 이론적 모델은 시스템의 알고리즘을 개발하기 위하여 물리적인 법칙을 이용한다.

Chow(1972)에 의하면, 이론적 모델은 불확정적 모델과 확정적 모델로 구분된다. 확률 또는 추계학적 항으로 표현되는 불확정적 모델은 시스템의 과정을 불확실 또는 무작위함을 전제로 한다. 추계학적 모델은 시간영역에서 확률적으로 무작위한 요소들을 가지며, 그 결과는 평균과 확률의 범위내에서 표현될 수 있다. 확정적 모델은 시스템에서 무작위한 변이를 무시하므로써 사건의 결과가 불충분하지만 인정될 수 있도록 시스템을 정의한다.

확정적 모델은 공간의 처리에 따라 일괄형 모델과 분포형 모델로 구분된다. 일괄형 모델은 시스템 내에서 공간자료의 변이를 고려하지 않고 균질하다고 본다. 반면에 분포형 모델은 시스템을 소단위로 균일하게 나누고 각 단위는 균일한 특성을 가진다고 가정한다. 수문/수질분야에서 이 모델들은 시간의 규모에 따라 연속형 또는 사상형으로 구분된다. 예를 들어 일괄-사상형 모델은 입력 및 출력 매개 변수들이 시간에 따라 변하지 않는 것으로 가정하고 단일 입력자료(예, 강우)에 대한 시스템의 거동을 모사한다. 반면에 일괄-연속형 모델은 일단위에서 시간단위의 간격으로 일련의 과정을 모사하고 그 결과는 시계열로 제공한다.

Table 1은 포장 또는 유역단위로 개발된 대표적인 수문/수질모델들을 상기 분류에 의거하여 정리한 것이다. 모델의 다양성은 모델 상호간의 비교와 평가에 방해요인이 되고 있다. 최근의 논문들은 이러한 모델들을 대상으로 심도있게 검토한 바 있다 (Novotny, 1993 ; Ghadiri and Rosey, 1992).

III. 수문/수질 모델링의 새로운 경향

수문/수질 모델링은 과거 10년동안 계산의 측면에서 획기적인 발전을 보여왔다. 이러한 경향은 충분한 계산속도와 저장용량의 컴퓨터가 보편화되면서 가능해졌다. 모델링은 대형 컴퓨터시스템을 사용하여 개발하고, 궁극적으로는 개인용 컴퓨터에서

Table 1. Classification of theoretical models of hydrology and water quality.

Model Acronym	Space domain		Time domain		Potential for integration with GIS*
	Lumped	Distributed	Continuous	Event-based	
ACTMO	X		X		Low
AGNPS		X	X	X	High
ANSWERS		X		X	High
ARM(II)	X		X		Very Low
CNS	X		X		Very Low
CPM	X		X		Very Low
CPS	X		X		Very Low
CREAMS	X		X		Low
EPIC	X		X	X	Low
FESHM		X	X	X	High
GAMES	X			X	Low
GLEAMS	X		X		Low
HSPF	X	X	X		High
LEACHM	X		X	X	Moderate
NPS	X		X		Ver Low
NTRM	X		X		Low
NLEAP	X		X		High
OPUS	X		X		Low
PLIERS	X		X	X	High
PRMS II	X	X	X		High
PRZM	X		X		Low
ROTO		X	X		High
RUSLE	X	X		X	High
RZWQM	X		X		Low
SHE'2		X	X	X	High
SPAW	X		X		Low
SPUR	X	X	X		High
STORM	X		X		High
SWAT	X		X		High
SWM	X		X		Low
SWMM		X	X		Low
SWRRB	X	X	X	X	High
TOPMODEL		X	X	X	High
USDAHL	X		X	X	Low
WEPP	X	X	X	X	High

사용할 수 있도록 하는 과정으로 일반화되었다. 최근 컴퓨터 하드웨어와 소프트웨어의 발전은 향후 수문/수질 모델링 분야에 큰 영향을 줄 것이다. 여기서는 ① 지리정보시스템(geographic information systems, GIS), ② 전문가 시스템(expert systems, ES), ③ 사용자 인터페이스(user interfaces, UI), ④ 객체지향 모델링(object-oriented simulation modeling, OOSM), ⑤ 원격탐사(remote sensing, RS) 등의 기술을 중심으로 수문/수질 모델링에서 나타나는 새로운 경향들을 알아보고자 한다.

1. 자료관리기술-GIS

'80년대 중반부터 GIS의 개념과 그 적용성은 수문/수질 모델링의 새로운 시대를 예고하여 왔다. GIS와 모델간의 결합은 여러 가지 이유로 연구의 흥미를 유발시켜 왔다. GIS는 종전에는 가능하지 못했던 여러가지 방법으로 입력/출력자료들을 획득, 구성, 분석, 도시할 수 있는 기능들이 있다 (Burrough, 1989). GIS 사용자는 정보들을 여러 각도에서 가공해 볼 수 있고, 다양한 원칙하에서 주어진 문제를 다루고자 할 때 상관성이 없는 자료들을 통합할 수도 있다. 또한 GIS는 모델의 입력 자료를 편집, 변환, 합성, 선택할 수 있는 유연한 공간기능을 가지고 있다. 이로부터 대규모 수문과정의 분석과 다양한 토지관리체계가 수질에 미치는 영향을 효율적으로 평가할 수 있게 되었다.

GIS와 모델간의 결합과정과 이에 따른 장점들은 최근의 논문들로 부터 찾아볼 수 있다(Fedra, 1993; Tim et al., 1992a; Chou and Ding, 1992). Zhang 등(1990)은 GIS를 이용한 수문모델링에 대하여 전반적으로 고찰한 바 있다. 이후 Maidment(1993)는 수문모델링에서 GIS를 적용하기 위한 4단계를 재언급하였다. Tim과 Jolly (1994)는 각 단계별 장점과 한계를 제시하였다. Vieux(1991)는 농업유역에서 지표유출과 비점원 오염의 해석을 위하여 분산형 수문모델과 Arc/Info GIS를 결합시켰다. Frederickson(1993)은 홍수유출해석을 위하여 HEC-2 수문모델과 GRASS GIS를 결합시킨 바 있다. Tim과 Jolly (1994)는 유역에서의 비점원오염을 분석하기 위하여 AGNPS모델(Young 등, 1989)과 Arc/Info GIS의 결합을 기술한 바 있다. Tim 등(1992b)은 농업유역에서 오염부하량을 계산하기 위하여 VirGIS에 간단한 오염부하 산정모델을 결합시켰다. Srinivasan과 Arnold(1994)는 유역단위의 수질상황을 편리하게 파악할 수 있도록 Soil Water Analysis(SWAT)와 GRASS GIS의 결합을 연구한 바 있다. 이 외에도 수문/수질모델링에서 GIS의 활용성을 기술한 여러 논문들을 찾아볼 수 있다(Hession and Shanholtz, 1988; DeBarry, 1991; Srinivasan and Engel, 1994).

이러한 연구들은 수문/수질모델링에서 GIS의 잠재성과 이득을 보여주고 있다.

향후 GIS기술의 지속적인 발전은 수문/수질모델링 분야에 혁신적인 역할을 할 것으로 기대된다. 현재 수문/수질모델링에 있어서 GIS기술은 성숙기의 초기단계라 할 수 있다. 이러한 경향은 최근의 여러 실질적인 연구에서 찾아볼 수 있다 (Goodchild, 1993). 일부 연구들은 GIS와 수문/수질모델간의 결합으로 얻어낼 수 있는 효과 (Harlin and Lanfear, 1993)를 보여주고 있는 반면에, 완벽한 사용자 인터페이스를 개발하려고 시도한 연구들도 있다(Kovac and Natchnebel, 1993). 또한 효과적인 결합 및 구성에 대하여 회의적인 논문이 있는가 하면, 앞으로의 연구과제를 제시한 논문들도 있다. 이러한 모든 연구들은 새로운 연구분야에 대한 도약의 기회를 제공하였다고 볼 수 있다.

GIS의 기능이 점차 향상될수록 수문/수질모델링에 있어서 이의 사용은 일반화될 것이다. 현재 GIS 소프트웨어는 수문의 시간적 과정을 분석하는 기능이 미약하므로, 앞으로 시간을 고려한 분석 및 출력기능을 추가한다면 수문/수질모델링 분야는 급속히 발전하게 될 것이다. 수문모델링에서 비시간적 속성(유역 유출량, 유출기여지역 등)을 시간의 경과에 따라 보여주는 기능은 수문순환 모델링을 더욱 실용적으로 만들게 될 것이다. 또한 수문/수질모델링에 기여하게 될 몇 가지 GIS 연구가 진행되고 있다. 예를들어 GIS 공급자들은 소프트웨어 내에 동적 분석도구와 래스터모델링 기능을 한층 향상시키고 있는데, 이들은 궁극적으로 상업용 동적모델링 명령어와 툴킷으로 선을 보이게 될 것이다. 객체지향 프로그래밍, 객체 추출, 객체지향 모델링 등과 같은 새로운 공간자료 모델링 개념은 수문/수질 모델링 분야의 필수적인 요소가 될 것이다. 자료의 수집을 위한 GIS와 GPS(global positioning systems)간의 통합 또한 중요한 연구분야 중의 하나이다.

2. 인간과 컴퓨터간의 대화방식

모델링 시스템의 효력은 사용자가 어떻게 정보에

효과적으로 접근하는가에 달려 있다. 수문/수질 모델링에서 대부분의 사용자는 시스템의 하드웨어 구성에 관심이 있는 것이 아니라 별다른 어려움이나 혼돈없이 자신이 원하는 결과를 얻고자 한다. 그러나 수문/수질 모델링 시스템이 더욱 복잡, 정교해짐에 따라 사용자들은 개발자가 원했던 의도대로 따르지 못할 수도 있다. 이러한 문제는 모델의 사용욕구를 감소시킬 뿐만 아니라 초보자들은 모델의 사용자체를 꺼리게 되고, 심지어는 모델의 사용에 익숙한 사람도 모델을 효과적으로 이용하지 못하므로서 모델이 지니고 있는 잠재능력을 최대한으로 활용하지 못하게 된다. 최근 들어 인간과 컴퓨터간의 대화방식의 개발은 사용자가 모델링 시스템의 하드웨어와 소프트웨어 요소들과의 직접적인 대화를 가능하게 하므로서 모델사용의 과정, 대화, 기능 등의 규칙들을 제공한다. 여기서는 사용자 인터페이스를 중심으로 인간과 컴퓨터간의 전통적인 대화방식과 최근의 기술경향을 살펴보기로 한다.

가. 전통적인 사용자 인터페이스

사용자 중심의 모델링시스템은 1970년대 초반에 당시의 하드웨어와 소프트웨어의 기술지식을 바탕으로 모델의 입력자료를 편집할 수 있게 되면서부터 시작되었는데, 이에겐 명령어 인터페이스, 화면 인터페이스, 스프레드시트 인터페이스 등을 들 수 있다. 초창기 대다수의 수문/수질모델에서 사용되어온 명령어 인터페이스는 사용자가 한줄의 자료를 준비하여 시스템에 제공하도록 되어 있다. 이는 한 줄의 자료를 연이어 입력하는 형식과 입력자료를 파일로 제공하는 형식이 있다. 사용자는 자료를 제공한 후 시스템의 결과 내지는 오류메시지를 기다린다. GLEAMS, CREAMS, PRZM II, RZ-WQM 등이 이에 해당된다. 화면 인터페이스는 자료를 스크린상에서 보면서 수정할 수 있도록 하였다. 이와 같은 인터페이스는 입력과 모델링 조건을 선택할 수 있도록 계산환경이 구조화됨에 따라 가능해졌으며, 이는 팝업메뉴와 풀다운메뉴 등의 대화방식으로 등장하였다. NLEAP, PRMS, RUSLE 등이 이에 해당된다. 화면 인터페이스와 유사한 스프레드시트 인터페이스는 스크린상에서 특히 숫자자료를 대화방식으로 처리할 수 있도록

고안된 것이다. 이는 여타의 스프레드시트 소프트웨어와 마찬가지로 일련의 메뉴가 자료의 입력과 처리과정을 도와준다. 사용자는 입력자료를 편집하고 출력파일을 구조화하므로서 모델링시스템과 대화한다. AGNPS 모델이 유역역자자료의 의 입력과 편집시에 이를 도입하였다.

나. 그래픽 사용자 인터페이스

(Graphical User Interface, GUI)

모델링시스템에 있어서 그래픽 인터페이스의 개념은 그리 새로운 것이 아니다. GUI를 개발할 때 유념해야 할 최우선 사항은 사용자에게 대화방식을 최대한 명료하게 제공하는 것이다(transparency). 이외에도 GUI는 탄력성(resilience), 이식성(portability), 모듈화(modularity), 구성력(configurability), 지능화(intelligence), 반응도(responsiveness) 등의 속성을 가지는 것이 바람직하다(Sutcliffe, 1989).

최근까지만 해도 수문/수질 모델에서 사용자 인터페이스는 명령어 인터페이스 또는 화면 인터페이스가 주류를 이루어 왔다. 이내 키보드와 마우스에 의한 스프레드시트와 메뉴방식이 출현하였으며, 뒤이어 windows-icon-mouse-pop-up(WIMP) 메뉴모델을 사용한 GUI의 개발이 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 GUI는 인간의 강력한 시각처리 능력을 이용하여 사용자의 시스템 운영과 대화가 용이하도록 마우스와 같은 장치에 의존한다(Grudin, 1989). WIMP의 사용은 모델링 시스템을 더욱 직관적으로 사용할 수 있도록 "touch and feel"을 향상시키는데 주안점을 두었다. 대표적인 GUI의 예는 Apple Macintosh Interface, IBM OS/2, Microsoft Window 95, X-Windows상에서의 OSF/Motif 등이다. Graphic Kernel System(GKS)과 Computer Graphics Metafile(CGM)과 같은 표준그래픽은 GUI개발의 표준화에 사용되어 왔다.

지난 10년 동안 수문/수질 모델링의 응용을 위한 다양한 GUI가 개발되어 왔다. Fedra(1993)는 수자원의 계획과 관리모델의 GUI 개발에 대하여 기술하였다. 메릴랜드주 Beltsville에 위치한 ARS Water Data Center에서는 CD-ROM으로부터 강

우와 유출자료를 얻어내기 위한 GUI의 구조를 제시한 바 있다(Roberts and Thurman, 1993). Brewer(1993)는 지표수 네트워크모델과 INGRES 관계형 데이터베이스를 결합하고 하천유역 관리를 위한 모의지원시스템을 구성하기 위한 GUI에 대하여 기술하였다. 사용자 인터페이스는 X-윈도우시스템과 Motif를 이용하여 개발되었다. Liao와 Tim(1994)은 GIS 환경하에서 개발한 대화형 수질모델링 시스템을 기술한 바 있다. X-윈도우시스템과 Motif를 이용하여 개발된 GUI는 모델의 요소들로의 접근, 조건의 선택과 실행, 모델 결과의 가시화를 용이하게 해준다.

사용자 인터페이스의 문제점은 사용자가 모델의 알고리즘을 따라갈 때에 대화방식을 복잡하게 구성하므로써 발생하는데, 이는 결국 모델을 오용하게 되거나 충분히 활용하지 못하게 된다. 따라서 수문/수질 모델을 심분 활용하기 위해서는 이 분야의 꾸준한 연구 및 개선의 여지가 많다고 하겠다. 인간-컴퓨터간의 인터페이스 연구가 확대됨에 따라 수문/수질 모델링 연구에서 추구해야 할 일반적인 GUI의 형태는 다음과 같이 ①총괄적인 항목들을 그룹별로 보여주는 풀다운 메뉴, ②모델링 명령어와 함께 나타나는 팝업 메뉴, ③단어를 알아보기 쉬운 심볼로 대신하는 아이콘, ④키 치기 또는 마우스조작에 의한 소리 또는 진행과정을 알려주는 음향 인터페이스, ⑤입의의 시각에 화면상에서 치환 또는 편집해야 할 자료들을 보여주는 윈도우 등이다. 이와 더불어 대화방식에 있어서 획기적인 전환점이 될 음성 인터페이스가 기대되고 있지만 아직은 연구단계에 있다.

3. 과학적 가시화(scientific visualization)

이미지 파일의 관리를 위한 최근의 컴퓨터 하드웨어와 소프트웨어의 개발은 과학적 가시화를 실현 시키기에 이르렀다. 이제 컴퓨터는 모델 결과의 실시간 가시화 및 가상 도시를 지원하는 이미지 조작 툴들을 제공할 수 있게 되었다. 과학적 가시화의 응용은 스캐닝한 인체의 이미지를 3차원으로 분석하는 의료분야에서 건축분야의 가상모델링에 걸쳐 그 범위가 넓다. 지진학, 기상학, 기후학 및 GIS

분야에서 활발하게 응용되고 있는데 이 기법은 대상객체의 외부투시, 내부도 및 단면도의 생성이 가능하다.

자료의 그래픽 표현은 과거에 자료들을 도면화하던 시대로부터 꾸준히 지금의 과학적 가시화라는 고유영역을 형성한 것을 보더라도 그 중요성이 인정되고 있다. 과학적 가시화는 모델링기법과 이의 문제해결 또는 의사결정을 위한 인식/통신간의 관계를 어떻게 처리하느냐가 관심대상이다. 수문수질 모델링연구에서 과학적 가시화는 시·공간적으로 출력이미지를 연속도시하고 동화하는데 사용된다. 또한 가시화는 데이터베이스로부터 원하는 출력자료를 선정하여 시·공간적으로 다중 도시할 수 있도록 해준다. 지난 몇 년동안 과학적 가시화는 대용량의 다차원자료로부터 아이디어를 추출해낼 수 있도록 개발의 박차를 가해왔다. 그러나 시물레이션 모델에서 이러한 시각자료 탐구기법(visual data exploration techniques)은 초기단계라 할 수 있으며, 특히 수문/수질모델링과의 통합을 위해서는 많은 연구투자가 필요하다.

가. 동화기법(Animation)

과학자와 공학자 모두 일반적으로 매력을 느끼는 과학적 가시화 영역은 동화기법이다. 이 기법은 통신, 미디어, 교육분야 등 넓은 분야에 걸쳐 사용되고 있다. 동화장면들을 생성시키기 위한 과정 및 프로토콜은 이미 체계화되어 있으며 비디오와 연계한 동화기법은 보편화되어 있다. 장면특작영화가 그 대표적인 예이며 이제는 텔레비전 광고에서도 널리 사용되고 있다. 그러나 수문/수질 모델링에서 동화기법의 사용은 아직 연구단계에 있다. 이 분야에서 동화상은 수문 및 오염물질 이동과정을 실시간으로 보여주는데 유용하다. 특정한 유출사상 또는 지구화학적 과정을 효과적으로 보여주는 연구가 기대된다. 현재로서는 수문/수질 결과를 동화하는데 제작비용이 많이 들지만 수문학자가 의사결정을 위하여 모델링 결과를 이해하고 해석하는데 크게 도움을 주는 것이 사실이다.

동화기법은 또한 초반 디버깅부터 결과의 표현에 이르기까지 수문/수질 모델링에서의 기본적인 사항들을 향상시킬 수 있다. 컴퓨터 코딩에 있어서의

오류를 분리하여 제거하고자 하는 경우 또는 모델의 주요 제어논리를 시험해야 할 경우에 도움을 줄 수도 있다. 물론 수문/수질 모델링에서 가장 크게 기여하는 부분은 결과들을 실시간으로 표현한다는 것이다. Smith와 Platt(1987)은 “동화기법은 미속하거나 애매모호한 표와 그림을 그럴 듯하고 이해하기 쉽게 만들어 준다”고 말한 바 있다.

나. 가상 현실(Virtual Reality)

현재 개발되고 있는 과학적 가시화의 또 다른 영역은 가상현실이다. 이 기법은 촉감과 음향을 재현하기 위하여 헤드폰과 연결된 장비로서 조그마한 스크린에 투영된 컴퓨터 이미지를 사용하는데 사용자는 실세계에서 행동하는 것과 같은 느낌을 받게 된다. 컴퓨터 스크린상에서 눈앞 손의 움직임을 볼 수 있고 머리를 돌리면 디스플레이가 공간상에서 변하며 모델내의 물체를 만지면 촉감을 재현시켜 준다. 가상현실기법은 가상세계의 동화상과 컴퓨터 그래픽을 사용하는 것이다. 이러한 환경이 자연풍경과 수문 및 오염물질이동의 동화과정으로 대치될 수 있다면 실세계의 상황을 그대로 재현하게 될 것이다. 이 기법은 지금까지의 정보보다 훨씬 풍부한 정보들을 통합하므로써 사실적인 이미지를 생성하여 컴퓨터가 표현한 물리적 시스템과 상호 대화할 수 있도록 한다. 그러나 수문/수질모델에 이 기법을 도입하는데 있어 가장 큰 제약요인은 모델링 데이터베이스의 질, 모델의 구조, 가상정보를 해석할 사용자의 능력 등으로서 모델과의 통합을 위해서는 상당한 연구개발이 요구된다.

4. 지식 공학(Knowledge Engineering, KE) -전문가/지식베이스 시스템

수문/수질 모델링분야에서 널리 인정받고 있는 컴퓨터기법은 전문가시스템(ES) 또는 지식베이스 시스템(KBS)이다. 몇몇 문헌에서 ES와 KBS를 구별하여 왔지만 여기서는 이 용어들을 인공지능연구(특수영역에서 숙련된 인간이 일을 처리하는 것처럼 인간의 전문지식을 묘사하여 정상적으로 기능을 수행하도록 하는 것)의 한 부류로 사용할 것이다(Buchanan, 1986). 일반적으로 ES는 사용자와

프로그램간의 상호대화과정을 통하여 부실한 구조/배치 문제들을 해결할 수 있도록 전문가의 의사결정능력을 컴퓨터 프로그램에 제공하므로써 그 기능을 발휘한다. ES에 포함되는 인간의 전문지식은 지식, 경험, 판단 및 수년간의 훈련과 전문적인 경험을 통하여 습득한 문제해결능력 등을 포함한다.

ES의 조직은 자료와 프로그램의 두가지 단계로 구성되는 전형적인 컴퓨터 프로그램과는 다른 구조를 가진다. ES에서는 지식을 표현하는데 있어 생산규칙(production rules), 경계망(semantic rules), 정보단위(frames)의 세가지 조직구조가 사용된다. 생산규칙은 전제 또는 조건을 나타내는 “IF”와 행위 또는 결과를 얻는 “THEN”의 “IF-THEN”의 조건문으로 구성된다. “IF-THEN”규칙은 진단틀 또는 해석틀로 사용될 수 있는 규칙베이스 추론을 가능케 한다. 경계망은 객체사상 또는 개념간의 결합상태에 의거하여 비규칙베이스 또는 의사표명적인 지식을 표현하는데 사용된다. 정보단위는 수 많은 속성 또는 관련 매개변수들에 의하여 특성지워진 비규칙베이스 지식을 그룹화하거나 분류할 때 사용되며, 특정 객체 또는 사상에 대한 모든 지식이 저장된 다중 데이터베이스의 형태를 취한다. 경계망 또는 정보단위의 주요장점은 개개의 객체, 사상 또는 개념에 대한 적절한 정보가 모두 수집된다는 것이다. 이는 정보의 효율적인 접근과 조작을 도와준다.

1980년이전만 해도 ES는 의료와 화학 등의 분야에만 제한적으로 적용되었으나, '80년대 들어 여러 응용분야에서 ES를 구축하려는 열기는 대단하였다(Johnson, 1984; Buchanan, 1986; Plant and Stone, 1991). 수문/수질 모델링과 관련된 ES도 꾸준히 개발되어 왔다. 예로서 Davis와 Lenat(1982)는 농업, 임업, 환경관리 및 수자원 등 자연자원 모델링분야에서 ES의 적용을 위한 문헌목록을 수집하였다. Heatwole(1990)은 자원관리를 위하여 GLEAMS모델의 사용효율을 증대시키기 위하여 지식베이스 인터페이스에 대하여 기술하였다. LAM 등(1989)은 유역 산성화의 지역분석에 대한 ES를, Crowe와 Mutch(1992)는 지표 하 환경에서 농약의 영향을 평가하기 위하여 EXPRES라는 ES를 각각 구상한 바 있다. 이상의

적용에 있어서 ES와 KBS는 다음과 같이 ① 여러 가지 이용가능한 모델들 중에서 모델링의 목적에 가장 적합한 모델의 선택, ② 모델에 필요한 입력 변수와 매개변수들의 기술과 요구되는 적절한 자료가 없을 경우에 대한 대응방안, ③ 모델링 결과의 해석의 기능을 갖는다. 이러한 이유로 ES는 수문/수질 모델링 연구에 광범위하게 적용되어 왔다.

5. 소프트웨어 공학(Software Engineering, SE)-객체지향 시뮬레이션 모델링(Object-Oriented Simulation Modeling, OOSM)

소프트웨어 공학은 일반적으로 컴퓨터 소프트웨어를 생산하기 위하여 계획과 설계의 전통적인 공학적 원칙들을 응용하는 것으로 정의되는데, 이 분야에서 최근에 시도되고 있는 방법들은 시뮬레이션 모델링에서 중요한 의미를 가진다. 이 중에 하나가 객체지향 모델링 시스템의 개발을 이끌어 온 객체지향 프로그래밍(object-oriented programming, OOP)이다. OOP는 1980년대 초에 XEROX의 Palo Alto 연구센터(Goldberg and Robson, 1985)에서 Smalltalk™를 개발하면서 파생된 프로그래밍 기법이다. OOP의 기본개념은 객체에 영향을 주는 방법과 함수들로 이루어진 자료들의 논리적인 결합이다. 이러한 객체와 방법들간의 논리적인 결합은 객체 클래스들을 선언하므로써 이루어진다(Pascoe, 1986). OOP 기법은 물리적인 시스템과 이를 컴퓨터로 표현하는데 있어서의 간격을 좁혀 주려고 시도하는 것이다. 이는 이미 잘 이해되는 물리적인 시스템의 요소들을 그럴듯하게 모방하는 모델을 배우고 이해하는데 사용자가 최소한의 노력을 들이면 되도록 하는 기법이다(Cox, 1988; Sefik and Bobrow, 1986).

시뮬레이션 모델링에서 객체지향 기법을 이용하는 가장 기본적인 장점은 객체와 자료(속성)들을 개개의 모듈로 나누는 자연스러운 방법을 제공한다. 물리적인 시스템의 OOSM에서 모델은 시스템의 중요한 요소들로 표현되는 객체들을 배치하고, 정보와 운영이 흘러가도록 이들을 연결하므로써 작성된다. 이러한 접근은 물리적인 시스템의 복잡한 귀환성질(feedback behavior)을 쉽게 분석할 수

있도록 도와준다. 잘 설계된 OOSM은 모델개발의 시간 단축, 소프트웨어의 신뢰성 제고, 모델사용에 있어 편의를 도모한다. 이외의 장점으로는 ① 새로운 객체와 모델링 요소의 첨가를 용이하게 해주고, ② 자료의 관리를 향상시키고, ③ 모델링 코딩에 러의 수정시간을 줄여주고, ④ 모델링시스템의 모듈화를 촉진시키는 등이 있다(Mckim et al., 1993).

OOSM 기법은 물리적인 시스템을 모델화하고 공학 소프트웨어의 처리지향적인 속성을 개선하도록 개발되었기 때문에, 이들은 수문/수질 모델의 개발과정에 그 적용이 가능하다. 예를 들어 주어진 유역의 요소들은 자료와 조건의 조합으로 표현되는 객체로 간주될 수 있다. 여기서 유역자료는 토양의 종류, 수문 반응단위, 소유역 분류 등을 포함할 수 있다. 방법과 조작으로는 유출계산을 위한 방정식, 오염물질의 이동과 감소를 계산하는 함수 등이 될 수 있다. OOP와 OOSM의 잠재적인 가능성때문에 수문시스템에 이들을 적용해 보려는 연구가 다양하게 시도되어 왔다. 그 예로서 Wolfe와 Whittaker (1990)는 유역에서의 침투와 지표유출을 모의하기 위한 객체지향기법을 기술하였다. 객체는 HRUs로 표현하였으며, 각 객체들을 결합시키는 조작방법은 Green and Ampt(1911) 침투식을 기본으로 하였다. Crosby와 Clapman(1990)은 식물에서의 질소 기작을 모의하기 위하여 Small-talk™ 언어를 이용한 객체지향기법을 이용하였다. Sequeira 등 (1991)은 지역적인 농약오염과 면(cotton)의 수확량, 품질간의 상호작용을 검사하기 위한 객체지향적 면성장모델을 개발하였다. 이와 같은 연구에도 불구하고 수문/수질 모델링 연구에서 OOP기법의 적용은 아직 초기단계에 있다.

6. 원격 자료획득(Remote Data Acquisition) -원격탐사기법

수문/수질모델들이 컴퓨터 하드웨어와 소프트웨어의 기술적인 발전에 힘입어 최대의 이익을 얻고자 한다면 신뢰성있고 정교한 자료는 필수적이다. 모델과 자료는 모두 수문영역을 이해하고 인간의 활동이 수질에 미치는 영향을 증명하는데 그 기초

적용에 있어서 ES와 KBS는 다음과 같이 ① 여러 가지 이용가능한 모델들 중에서 모델링의 목적에 가장 적합한 모델의 선택, ② 모델에 필요한 입력 변수와 매개변수들의 기술과 요구되는 적절한 자료가 없을 경우에 대한 대응방안, ③ 모델링 결과의 해석의 기능을 갖는다. 이러한 이유로 ES는 수문/수질 모델링 연구에 광범위하게 적용되어 왔다.

5. 소프트웨어 공학(Software Engineering, SE)-객체지향 시뮬레이션 모델링(Object-Oriented Simulation Modeling, OOSM)

소프트웨어 공학은 일반적으로 컴퓨터 소프트웨어를 생산하기 위하여 계획과 설계의 전통적인 공학적 원칙들을 응용하는 것으로 정의되는데, 이 분야에서 최근에 시도되고 있는 방법들은 시뮬레이션 모델링에서 중요한 의미를 가진다. 이 중에 하나가 객체지향 모델링 시스템의 개발을 이끌어 온 객체지향 프로그래밍(object-oriented programming, OOP)이다. OOP는 1980년대 초에 XEROX의 Palo Alto 연구센터(Goldberg and Robson, 1985)에서 Smalltalk™를 개발하면서 파생된 프로그래밍 기법이다. OOP의 기본개념은 객체에 영향을 주는 방법과 함수들로 이루어진 자료들의 논리적인 결합이다. 이러한 객체와 방법들간의 논리적인 결합은 객체 클래스들을 선언하므로써 이루어진다(Pascoe, 1986). OOP 기법은 물리적인 시스템과 이를 컴퓨터로 표현하는데 있어서의 간격을 좁혀 주려고 시도하는 것이다. 이는 이미 잘 이해되는 물리적인 시스템의 요소들을 그럴듯하게 모방하는 모델을 배우고 이해하는데 사용자가 최소한의 노력을 들이면 되도록 하는 기법이다(Cox, 1988 ; Sefik and Bobrow, 1986).

시뮬레이션 모델링에서 객체지향 기법을 이용하는 가장 기본적인 장점은 객체와 자료(속성)들을 개개의 모듈로 나누는 자연스러운 방법을 제공한다. 물리적인 시스템의 OOSM에서 모델은 시스템의 중요한 요소들로 표현되는 객체들을 배치하고, 정보와 운영이 흘러가도록 이들을 연결하므로써 작성된다. 이러한 접근은 물리적인 시스템의 복잡한 귀환성질(feedback behavior)을 쉽게 분석할 수

있도록 도와준다. 잘 설계된 OOSM은 모델개발의 시간 단축, 소프트웨어의 신뢰성 제고, 모델사용에 있어 편의를 도모한다. 이외의 장점으로는 ① 새로운 객체와 모델링 요소의 첨가를 용이하게 해주고, ② 자료의 관리를 향상시키고, ③ 모델링 코딩에 러의 수정시간을 줄여주고, ④ 모델링시스템의 모듈화를 촉진시키는 등이 있다(Mckim et al., 1993).

OOSM 기법은 물리적인 시스템을 모델화하고 공학 소프트웨어의 처리지향적인 속성을 개선하도록 개발되었기 때문에, 이들은 수문/수질 모델의 개발과정에 그 적용이 가능하다. 예를 들어 주어진 유역의 요소들은 자료와 조작의 조합으로 표현되는 객체로 간주될 수 있다. 여기서 유역자료는 토양의 종류, 수문 반응단위, 소유역 분류 등을 포함할 수 있다. 방법과 조작으로는 유출계산을 위한 방정식, 오염물질의 이동과 감소를 계산하는 함수 등이 될 수 있다. OOP와 OOSM의 잠재적인 가능성때문에 수문시스템에 이들을 적용해 보려는 연구가 다양하게 시도되어 왔다. 그 예로서 Wolfe와 Whittaker (1990)는 유역에서의 침투와 지표유출을 모의하기 위한 객체지향기법을 기술하였다. 객체는 HRUs로 표현하였으며, 각 객체들을 결합시키는 조작방법은 Green and Ampt(1911) 침투식을 기본으로 하였다. Crosby와 Clapman(1990)은 식물에서의 질소 기작을 모의하기 위하여 Small-talk™ 언어를 이용한 객체지향기법을 이용하였다. Sequeira 등 (1991)은 지역적인 농약오염과 면(cotton)의 수확량, 품질간의 상호작용을 검사하기 위한 객체지향적 면성장모델을 개발하였다. 이와 같은 연구에도 불구하고 수문/수질 모델링 연구에서 OOP기법의 적용은 아직 초기단계에 있다.

6. 원격 자료획득(Remote Data Acquisition) -원격탐사기법

수문/수질모델들이 컴퓨터 하드웨어와 소프트웨어의 기술적인 발전에 힘입어 최대의 이익을 얻고자 한다면 신뢰성있고 정교한 자료는 필수적이다. 모델과 자료는 모두 수문영역을 이해하고 인간의 활동이 수질에 미치는 영향을 증명하는데 그 기초

를 제공한다. 또한 모델과 자료는 상호 보완적이고 직접적이다. 보다 나은 모델은 자료의 질을 돋보이게 해주고 특정연구과제를 해결하거나 지식이 부족한 취약지역을 지적하기 위한 실험설계를 한층 쉽게 해준다. 반면에 질 좋은 자료는 정교한 모델의 개발, 새로운 가정의 검사, 다른 상황에 대한 모델의 확장을 가능케 한다. 이러한 모델과 자료의 상호관계는 다음과 같이 Dunne(1982)에 의하여 강조된 바 있다: “현재 수문분야가 활발하고 세련되게 발전한 배경은 물리적 수학모델과 관련된 연구자들의 노력이 큰 몫을 하고 있다. 그러나 미개척 영역을 넓히려는 이러한 시도는 예견치 못한 수문현상의 발견, 익숙한 과정들에 대한 새로운 개념의 개발, 현장조건에 대한 물리적 통찰력으로 수학적 모델을 개발하기 위한 세련된 현장실험방법과 병행되지 못하면 무용지물이 될 것이다.”

최근 자료획득기술의 혁신적인 발전은 수문/수질 모델링 연구에 대한 엄청난 기회를 제공한다. 이러한 혁신은 바이오센서(예, 고주파 전자기복사를 공진시켜서 침입을 방지하는 기술), 원격탐사 및 GPS(global positioning systems) 분야에서 이루어지고 있다. 지면상의 이유로 여기서는 원격탐사기법에 대해서만 언급하기로 한다. Rango(1994)는 수문과 수자원에서 원격탐사기법의 이론과 적용에 대하여 자세한 언급을 한 바 있다.

원격탐사는 근본적으로 인공위성과 항공기로 부터 작성된 전자기복사의 반사 또는 방출을 측정하므로 지표하, 지표 및 대기의 성질을 추정한다. 원격탐사기법은 공간과 시간의 광범위한 영역에 걸친 수문자료를 획득하는데 있어 많은 기회를 제공한다. 이는 서로 다른 지상요소의 상호작용을 검사할 수 있도록 해주기 때문에 점차 수문과학의 필수 불가결한 부분이 되고 있다(Duchon and Nicks, 1990). 수문과정은 특정한 스펙트럼 영역에서 전자기 신호를 변경시키므로 원격탐사에 의하여 중요한 수문변수들을 획득할 수 있다. 예를 들어 가시광선, 근적외선, 열적외선 파장의 원격관측은 식생 피복의 유무, 생물자원 및 식생밀도를 포함한 식생 구조, 식물의 수분함유량과 같은 식물 스트레스, 토양구조, 눈의 피복분포와 그의 감소상태, 토양의 유기물과 같은 수문 매개변수들을 평가하는데 사용

할 수 있다.

원격탐사기법은 지난 10년동안 급속한 발전을 거듭해 왔고 앞으로도 계속 발전될 전망이다. 지난 몇 년동안에 발사된 수 개의 새로운 인공위성들은 수문/수질모델링을 위한 방대한 양의 자료수집에 엄청난 기회를 제공하여 왔다. Landsat과 SPOT은 고해상도의 토지피복과 토지이용분류를 위한 자료를 계속 제공하고 있다. 1.4GHZ로 작동하는 일본 지구자원위성(JERS-1)의 SAR(synthetic aperture radar)는 보다 정밀한 토양수분상태를 파악할 수 있도록 토양과 식생 깊숙히 침투한다. 6GHZ으로 작동하는 유럽 지구원격탐사(ERS-1) 위성의 SAR는 눈의 피복상태를 지도화하는데 믿을만한 자료를 제공하고 있다. 더 나아가 NOAA가 운영하는 차세대 기상레이더(NEXRAD)는 지상레이더로부터 정확한 실시간 강수량자료를 제공하고 있다.

최근의 여러 가지 센서기술들의 개발 또한 수문/수질모델링에 큰 영향을 주고 있다. 특히 지면침투 레이더와 단층촬영 기술과 같은 지중을 대상으로 하는 원격탐사 연구는 토양의 투수계수, 오염물질의 공간적 분포 등의 지중 수리특성들을 제공할 것이다. Dielectric probes와 TDR(time-domain reflectometry)와 같은 기술은 토양수분자료의 수집에 커다란 기여를 할 것으로 기대된다.

IV. 결 론

지난 수십년간 지구환경에서의 유체와 오염물질 흐름을 지배하는 과정을 좀 더 이해해 보려는 노력과 더불어 컴퓨터 성능의 엄청난 향상은 수문/수질 모델링연구를 급속히 팽창시켜 왔다. 이 기간동안 수문/수질모델링에 대한 새로운 방법적인 접근이 나타났고, 수많은 연구 프로그램들이 전 세계로 확산되었다. 이러한 연구는 iconic 모델로부터 연속분포형 모델에 이르기까지 수 없이 분류되는 모델의 과잉을 야기시켜 왔다.

지금까지 개발된 수문/수질 모델들은 각기 새롭고 흥미로운 방법으로 복잡한 수문과정을 검토하기 위한 기반을 제공하여 왔다. Horton, Saint Venant, Chow와 같은 학자들의 선구자적인 노력

에 힘입어 수문모델링 분야는 그 발전을 거듭해 왔으며 지금도 다양한 사용자들이 그들만의 독특한 사회를 형성하고 있다. 비록 지난 20여년동안 수문/수질 모델들이 나름대로 그 역량을 발휘하여 왔다 할지라도 사용자들의 기대는 따르지 못했던 것 같다. 수문/수질모델의 기능성과 응용성은 이러한 모델 사용자들의 기대에 부응하도록 앞으로 계속 개발되어야 할 것이다.

수문/수질모델의 성능을 개선하는 일이 더욱 힘들어짐에도 불구하고 최근의 기술발전은 이를 해결할 수 있을 것 같다. 이 논문에서는 수문/수질모델링 연구에 영향을 주는 몇가지 새로운 기법들(GIS, 사용자 인터페이스, 전문가 시스템, 원격탐사, 과학적 가시화, 소프트웨어 공학)을 소개하였다. 과거의 수문/수질모델링 연구를 보면 컴퓨터기술의 발전과 거의 병행하여 왔으므로 앞으로의 모델링도 이 논문에서 소개한 새로운 기술들을 통합시키는 노력이 필요할 것으로 본다. 이외에도 더욱 노력을 기울여야 할 연구들로는 모델 규모문제의 해결, 자료수집, 본 논문에서 소개한 기술들을 통합하는 포괄적인 의사결정지원시스템의 개발, 모델 매개변수의 불확실성의 특징을 찾아내는 효율적인 방법 등을 들 수 있다. 수문/수질모델을 보정하고 검증하기 위한 적절한 과정은 시공간자료의 부족과 더불어 중요한 연구과제로 남아 있다.

참 고 문 헌

Batchelor, P. 1994. Models as metaphors : the role of modeling in pollution prevention. *Waste Manage.* 14 : 243-251.

Brewer, M. S. 1993. HYDROSS simulation support system. *Proceedings of Federal Interagency Workshop on Hydrologic Modeling Demands for the 90s.* Water Resources Investigations Report, U.S. Geological Survey, Washington, DC.

Buchanan, B. G. 1986. Expert systems : working systems and the research literature. *Expert Systems* 3 : 32-51.

Burge, S. J. 1986. Trends and directions in

hydrology. *Water Resour. Res.* 22 : 1S-5S.

Burrough, P. A. 1989. Matching spatial databases and quantitative models in land resource assessment. *Soil Use Manage.* 5 : 3-8.

Chadiri, H. and C. W. Rose(eds.). 1992. Modeling chemical transport in soils-natural and applied contaminants. Lewis Publishers. Boca Raton, FL.

Chou, H-C and Y. Ding. 1992. Methodology of integrating spatial analysis/modeling and GIS. *Proceedings of the 5th International Symposium on Spatial Data Handling*, Charleston, SC.

Chow, V. T. 1972. Hydrologic modeling. *J. Boston Soc. Civ. Eng.* 60 : 1-27.

Cox, B. 1988. Object-oriented programming : an evolutionary approach. Addison-Wesley Publishing Co., Menlo Park, CA.

Crosby, C. J. and W. M. Clapham. 1990. A simulation modeling tool for nitrogen dynamics using object-oriented programming. *AI. Applications* 4 : 94-100.

Crowe, A. S. and J. P. Mutch. 1992. EXPRES : an expert system for assessing the fate of pesticides in the subsurface. *Environ. Monitor. Assess.* 23 : 19-43.

Davis, R. and D. B. Lenat. 1982. Knowledge-based systems in Artificial Intelligence. McGraw-Hill, Inc, New York, NY.

DeBarry, P. A. 1991. GIS applications in nonpoint source pollution. *Hydraulic Engineering, Proceedings of 1991 National Conference*, pp. 882-887, American Society of Civil Engineers, New York, NY.

DeCoursey, D. G. 1991. Integrated quantity/quality modeling-receiving waters. In : *Recent Advances in the Modeling of Hydrologic System*, p.323-353, D. S. Bowles and P. E. O'Connell(eds.), Kluwer Academic Publishers.

Dodson, R. D. 1988. Advances in hydrology. In : *Applied hydrology*, V. T. Chow, D. R. Maidment, and L. W. Mays(eds.), McGraw-Hill, Inc., New York, NY.

- Dodge, J. C. 1988. Hydrology past and present. *J. Hyd. Res.* 26 : 5-25.
- Duchon, C. E. and A. D. Nicks. 1990. Application of satellite remote sensing to hydrologic modeling. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union* 71 : 1348.
- Dunne, T. 1982. Models of runoff process and their significance. Scientific basis of water resources management. National Academy of Science, Washington, DC.
- Fedra, K. 1993. Models, GIS, expert systems : integrated water resources models. In : Application of geographic information systems in hydrology and water resources management, Kovar, K. and H. P. Nachtnebel(eds.), IAHS Publication No.211. International Association of Hydrological Science, Oxfordshire, UK.
- Frederickson, K. 1993. GIS-Hydrologic model interface for flood prediction and assessment. Tri-service CADD/GIS Training Symposium, Arlington, VA.
- Goldberg, A. and D. Robson, 1985. Smltalk-80 : the language and its implementation. Addison-Wesley Publishing Co., Menlo Park, CA.
- Goodchild, M. F., B. O. Parks, and L. T. Steyaert(eds.). 1993. Environmental modeling with GIS. Oxford University Press, New York, NY.
- Green, W. H. and G. A. Ampt. 1911. Studies on soil physics. 1. The flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.* 4 : 1-24.
- Grudin, J. 1989. The case against user interface consistency. *Communications in ACM* 32 : 1164.
- Harlin, J. M. and K. J. Lanfear(eds.). 1993. Geographic information systems and water resources. American Water Resources Association, Bethesda, MD.
- Heatwole, C. D. 1990. Knowledge-based interface for improving access to models as management tools. Proceedings of International Conference on Applications of GIS, Simulation Models and Knowledge-based Systems for Landuse Management. Virginia Tech, Blacksburg, VA.
- Hession, C. W. and V. O. Shanholtz, 1988. A geographic information systems for targeting nonpoint source agricultural pollution. *J. Soil Water Conserv.* 43 : 264-266.
- Johnson, T. 1984. The commercial applications of expert systems technology. *The Knowledge Eng. Rev.* 1 : 15-25.
- Kovar, K. and H. P. Nachtnebel (eds.). 1993. Application of geographic information systems in hydrology and water resources management. IAHS Publication No. 211. International Association of Hydrological Science, Oxfordshire, UK.
- Lam, D. C. L., D. A. Swayne, J. Storey, and A. S. Fraser. 1989. Watershed acidification models using the knowledge-based systems approach. *Ecol. Modell.* 47 : 131-152.
- Leavesley, G. H., D. B. Beaseley, H. B. Pionke, and R. A. Leonard. 1990. Modeling of agricultural nonpoint source surface runoff and sediment yield—a review from the modeler's perspective. In : Proceedings of International Symposium on Water Quality Modeling of Agricultural Non-Point Sources, pp. 171-194, D. G. DeCoursey(ed.), ARS-81, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC.
- Lee, D. B. 1973. Requiem for large-scale models. *J. Ame. Inst. Planners* 39 : 163-178.
- Liao, H. and U. S. Tim. 1994. Interactive water quality modeling within a GIS environment. *J. Comput. Environ. Urban Sys.* 18 : 343-363.
- Maidment, D. R. 1993. GIS and hydrologic modeling. In : Environmental modeling with GIS, M. F. Goodchild, B. O. Parks, and L. T. Steyaert(eds.), Oxford University Press, New York, NY.
- McKim, H. L., P. J. Lapotin, E. A. Cassell, and A. J. Bruzewicz. 1993. Object-oriented methods for hydrologic modeling and remote sensing. Proceedings of Federal Interagency Workshop on Hydrologic Modeling Demands

- for the 90s. Water Resources Investigations report, U.S. Geological Survey, Washington, DC.
- Novotny, V. and H. Olem. 1993. Water quality : prevention, identification, and management of diffuse pollution. Van Nostrand Reinhold, New York, NY.
- O'Connell, P. E. 1991. A historical perspective, In : Recent Advances in the Modeling of Hydrologic Systems, p. 3-30, D.S. Bowles and P.E. O'Connell(eds.), Kluwer Academic Publishers, New York, NY.
- Office of Technological Assessment. 1982. Use of models for water resources management, planning, and policy, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Pascoe, G. A. 1986. Elements of object-oriented programming. Byte 11 : 139-144.
- Plant, R. E. and N. D. Stone. 1991. Knowledge-based systems in agriculture. Biological Resource Management Series. McGraw-Hill, Inc., New York, NY.
- Rango, A. 1994. Application of remote sensing methods to hydrology and water resources. J. Hydrol. Sci. 39309-319.
- Roberts, R. T. and J. L. Thurman. 1993. A graphical user interface for ARS water data on CD-ROM. Proceedings of Federal Interagency Workshop on Hydrologic Modeling Demands for the 90s. Water Resources Investigations report, U.S. Geological Survey, Washington, DC.
- Rose, C. W., W. T. Dickenson, S. E. Jorgensen, and H. Ghardiri. 1990. Agricultural nonpoint-source runoff and sediment yield water quality(NPSWQ) models : modeler's perspective. In : Proceedings of International Symposium on Water Quality Modeling of Agricultural Non-Point Sources, pp. 145-170, D.G. DeCoursey(ed.), ARS-81, U.S. Department of Agriculture, Washington. DC.
- Sefik, M. J. and D. G. Bobrow, 1986. Object-oriented programming : themes and variations. AI Mag. 6 : 40-62.
- Sequeira, R. A. et al. 1991. Object-oriented simulations : plant growth and discrete organ to organ interactions, Ecol. Modelling 58 : 55-89.
- Smith, R. L. and L. Platt. 1987. Benefits of animation in the simulation of a machinery and assembly line. Simulation 48 : 28-30.
- Srinivasan, R. and B. A. Engel. 1994. A spatial decision support system for assessing agricultural nonpoint source pollution. Water Resour. Bull. 30 : 441-452.
- Srinivasan, R. and J. G. Arnold. 1994. Integrating a basin-scale water quality model with GIS. Water Resour. Bull. 30 : 453-462.
- Sutcliffe, A. 1989. Human-computer interface design. Springer-Verlag, New York, NY.
- Tim, U. S. and R. Jolly. 1994. Evaluating agricultural nonpoint-source pollution using integrated geographic information systems and hydrologic/water quality model. J. Environ. Qual. 23 : 25-35.
- Tim, U. S., M. Milner, and J. Majure. 1992. Geographic information system/simulation model linkage : processes, problems and opportunities. Paper No. 92-3610. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, ML.
- Tim, U. S., S. Mostaghimi, and V. O. Shanholtz. 1992b. Identification of critical nonpoint pollution source areas using geographic information systems and water quality modeling. Water Resour. Bull. 28 : 877-887.
- Vieux, B. E. 1991. Geographic information systems and nonpoint source water quality and quantity modeling. Hydrol. Processes 5 : 101-113.
- Wolfe, M. L. and A. D. Whittaker. 1990. Object-oriented simulation of hydrologic processes. Proceedings of Application of geographic information systems, simulation models, and knowledge-based systems for landuse management, Virginia Tech., Blacksburg, VA.
- Woolhiser, D. A. and D. L. Brakensiek. 1982.

- Hydrologic system synthesis. In : Hydrologic modeling of small watershed, pp. 3-16, Monograph No. 5, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI.
- Young, R. A., C. A. Onstad, D. D. Bosch, and W. P. Anderson. 19689. AGNPS : a nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. J. Soil Water Conserv. 44 : 168-173.
- Zhang, H., C. T. Haan, and D. L. Nofziger. 1990. Hydrologic modeling with GIS : an overview. Applied Engrg. in Agric. 6 : 453-458.

본 논문은 U. Sunday Time의 "*Emerging Issues in Hydrologic and Water Quality Modeling Research*" In : Proceedings of International Symposium on Water Quality Modeling, pp. 358-373, C. Heatwole(ed.), Orlando, Florida, 1995.를 번역한 것임.

