

분포형 수문모델에 대한 고찰

김성준 (건국대학교 농업생명과학대학 농공학과 조교수)

1. 서론 : 수문학에서 분포형 모델에 대한 긍정적 견해

컴퓨터 성능의 향상과 더불어 지리정보시스템의 발전 그리고 수치고도모델의 획득·사용이 가능하게 되므로 수문학(또는 생태학)에서의 분포형 모델은 1969년 Freeze와 Harlan이 처음으로 물리적인 기반의 분포형 모델을 소개한 이후로 그 발전을 거듭하고 있다. 이러한 모델의 개발을 위한 그 기술적인 실현이 가능해짐에 따라 Beven and O'Connell(1982), Abbott et al.(1986), Bathurst and O'Connell(1992) 등에 의하여 제안된 바와 같이 공간적인 예측에 대한 공감대가 형성되면서 지속적인 개발의 노력이 있어 왔다. 그 결과 Systeme Hydrologique Europeen(SHE, Abbott et al., 1986; Bathurst et al., 1995; Refsgaard and Storm, 1995)과 Institute of Hydrology Distributed Model(IHDM, Beven et al., 1987; Calver, 1988; Calver and Wood, 1995) 등과 같이 실질적인 응용에 사용될 수 있도록 개발된 여러 시스템들을 우리는 알고 있다. 이러한 모델들은 원칙적으로 물리적인 개념을 추구하면서 개발되었으며, 현장에서 측정이 가능한 물리적인 매개변수들로 구성하고자 하였다.

분포형 수문모델의 현 위상에 크게 기여한 논문들(Beven, 1987, 1989ab, 1993)과 분포형 모델의 적용을 도모했던 논문들(예, Bathurst, 1986; Bathurst and O'Connell, 1992)을 찾아볼 수 있다. 이들은 수문의 실제과정들을 공간적으로 묘사·구성

하는 기본적인 문제를 제시한데 그 의미가 크다고 말할 수 있겠다.

물리적인 기반의 지표하 흐름은 불포화 흐름조건에서 Darcy 법칙 또는 Richard 방정식에 근거를 두고 있다. 이는 토양이 잘 섞인 토양주(soil column) 실험에서의 흐름을 잘 묘사하는 것으로 알려져 있다. 그러나 토양주내에서의 차별습윤(differential wetting)과 선택흐름(preferential flow)과 같은 흐름방향에 대해서는 동수경사가 음의 값을 가지므로 불포화 토양주의 흐름은 제대로 묘사하지 못한다. 따라서 Darcy의 묘사가 이와 같은 토양주 내에서 어느 정도의 소구간에서 유효한지, 토양주규모 또는 포장규모에서 유효하지는 않은지(Luxmoore et al., 1981; Schulin et al., 1987; Hornberger et al., 1991; Flury et al., 1994), 궁극적으로는 수십 m 또는 km의 규모로 균등하게 매개변수와 변수들을 적용하는 분포형 수문모델과 같은 격자규모에 유효하지 않은지에 대하여 논의할 만 하다(Jain et al., 1992).

현재의 물리적 모델들은 적용하는 지배방정식들이 현장에서의 수문학적 거동을 묘사하는데 있어 잘못된 방정식들을 사용하지는 않는지에 대하여 거론되고 있다. 물리적 모델의 매개변수들은 원칙적으로 현장에서 측정이 가능하지만 실제로는 현장측정이 드물게 행해지기 때문에 이들을 적당히 조절하므로서 원하는 결과를 얻어낼 수 있다. 모델이 요구하는 규모로 매개변수들의 값을 제공하는 측정기법은 아직 없다. 따라서 개념적 모델을 보정하는 일반적인 과정과 마찬가지로 실측치와 모의 발생치를 비교하므로서 물리적 모델의 매개변수들을 보정하여야 한다. 사실 기존의

집중형 모델들이 유역단위인 반면에 분포형 모델은 격자단위로 처리되지만, 현재의 물리적 기반의 분포형 모델들도 개념적 집중형 모델일 뿐이라는 그럴듯한 논의도 있다(Beven, 1989).

수문에서 분포형 모델들은 Morton(1993)이 “조정 모델(mediating model)”이라 정의한 바 있는 영역에 속한다. 기초적인 이론간의 조정은 부분적으로 정성적이거나 그럴듯한 사실에 근거하여 정량적인 예측을 가능하게 한다. Morton이 논의한 바에 의하면 이 모델들은 다음과 같은 일반적인 특징을 보인다: 이들은 잘못되었거나 거짓으로 알려진 가정을 사용한다(Darcy법칙과 관련된 논의: Schrader-Frechette, 1989, Hofmann and Hofmann, 1992 and Oreskes et al., 1994); 이들은 특정 매개변수들을 조작하는 경향이 있고 목적과는 다르게 보조조건을 사용하곤 한다; 이들은 물리적인 직관적 사실을 반영하지만 어떤 면에서는 다소간 임의적인 요소들을 내포한다; 이들은 어느 정도 설명이 가능하지만 전체적으로 이론적인 구조를 가진 모델로 발전시킬 수 없다. 이 모델들은 나름대로 역사적 발전과정이 있어 모델의 구조가 형성되어 지속적으로 다듬어져 왔다. 그러나 이러한 모델들의 예측결과와 매개변수들은 특정한 모델구조의 범위를 벗어날 경우 모델의 재검증이 요구된다.

물론 수문과정에 대한 우리의 이해가 향상되면서 이 모델들은 더불어 향상되기를 기대하여야 한다. 현재로서는 이러한 기대가 정당화된다는 것이 불확실하다. 수문시스템에는 특히 지표면 아래에서의 흐름과정과 같이 알 수 없는 여러 가지 요소들이 있다. 원칙적으로는 완벽한 물리적인 묘사가 가능하며, 토양구조의 기하학적인 충분한 지식 그리고 습윤각에서의 상이한 유기물의 피복도와 지표면의 조도와 같은 요소를 제어하는 매개변수들을 주면 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 토양공극을 통한 흐름을 해석할 수 있다. 모관압 효과, 미생물 효과, 지표면 밀봉(surface sealing) 등 시간적 변화를 고려하는 과정들 또한 적어도 간단한 경우에 있어서는 모델화할 수 있다. 이와 같은 인자들을 모두 고려하면 컴퓨터의 부담

이 문제될 수 있으며, 계산시간과 공간의 규모가 작아지면 작아질수록 또 다른 알 수 없는 문제가 야기되어 결국 원점으로 돌아가게 된다.

보다 실질적인 대안으로는 대표 기본체적(representative elementary volume, REV)의 규모로 Darcy 법칙을 적용하는 것이다. 이는 공극수 포텐셜이 국지적으로 평형상태라고 가정하여 포텐셜의 변화율을 포함한 연속성이 받아들여질 만한 규모이다. 이는 아무도 실제토양의 REV 규모를 결정하지 않았더라도, 현재의 분포형 모델의 격자규모보다는 훨씬 더 작을 것으로 판단된다. 이러한 조건에서 Darcy-Richards 방정식이 적용할 수 있는 규모가 될 것이다. 따라서 이와 같은 규모는 토양의 불균질성을 고려할 경우 더욱 많은 매개변수들이 필요하며 컴퓨터의 계산시간도 상당히 요구되는 조건을 감안하면 현재 일반적으로 적용하고 있는 분포형 모델에서의 격자규모보다는 훨씬 더 작아야만 한다. 물론 현재의 측정기술이 대부분 교란상태에서 행해지기 때문에 우리가 원하는 시스템을 그대로 구현할 수 있도록 모든 매개변수들을 측정한다는 것은 불가능하다. 따라서 매개변수들은 고정 시스템일지라도 부득이 본질적으로는 알 수 없는 상태가 된다. 시간적인 변화도 문제를 악화시키게 될 것이다. 따라서 분포형 수문모델은 본질적으로 천이과학(transcientific) 문제라고 할 수 있다(Weinberg, 1972; Philip, 1978).

지표하흐름에 대하여 최선으로 기대할 수 있는 것은 작은 규모의 측정결과를 통계처리하는 것이다. 이러한 예가 주어지면 REV 규모의 통계처리로부터 예측이 요구되는 격자규모로 전환시키는 그 어떤 이론이 필요하게 된다. 이와 같은 규모이론은 지하수 시스템에서 중요한 연구과제로 다루어져 왔다. 이는 큰 격자규모에 요구되는 효과적인 매개변수 값이 다양한 가정(프랙탈 공극매체 포함)하에서 작은 규모의 이질성을 표현하는 Darcy매개변수의 통계모델로부터 유도될 수 있다고 본 것이다(예, Dagan, 1986; Wheatcraft et al., 1990). 효과적인 매개변수들은 규모에 의존하며 불확실성을 내포한다고 연구결과들은 제시하고 있다.

두 가지 서로 다른 수문과정을 결합하는 데에는 문제가 있다. Binley 등(1989)의 연구에 따르면 지표흐름과 지표하흐름을 결합할 경우에 일반적으로 적용할 수 있는 매개변수들을 찾는다는 것은 불가능하다는 견해를 보인 바 있다. 이질성은 두 흐름을 결합시켰을 때 그 반응을 제어하는 것이 중요하다.

지금까지 논의한 모든 문제들이 있음에도 불구하고 물리적인 기반을 두고 개발된 모델들이 적용 가능하다고 제시하는 여러 연구들이 있다. 그러면 어떻게 이들이 가능할 수 있는가? 이는 아마도 모델수행의 평가를 유출로 조정하고, 유역규모의 수문시스템에서 유출반응이 모델링하기에 상대적으로 쉽기 때문이라고 판단된다(이는 수문단위도가 부적합한 표현이라는 비판이 있음에도 불구하고 반세기 가 지난 지금 아직도 공학적인 도구로서 사용되고 있는 것과 마찬가지로 말할 수 있다). 강우가 발생하면 하천유량은 유역에서 발생하는 여러 복잡한 수문과정들을 반영하면서 어떤 특징을 가지고 증가하였다가 감소하게 된다. 특정 강우사상에 대한 총유출량은 유역이 지니고 있는 이질성과 초기조건으로 인한 비선형성 그리고 가용 입력 자료의 제한으로 인해서 예측하기가 더욱 어렵다.

수문과정을 모델링한다는 것은 유출계수와 초기조건간의 관계를 타당성있게 예측하고, 시간경과에 따라 유출을 추적하거나 그 결과를 분포시키는 적절한 방법을 요구한다. 이는 자료분석기법에 근거를 둔 상대적으로 간단한 일괄형 모델들을 이용하여 어느 정도의 정확성을 가지고 해결할 수 있다. 물리적인 기반의 분포형 모델들은 관측유량을 보정할 수 있는 충분한 매개변수들로 구성된 함수를 제공한다. 분포형 모델이 지니는 가장 두드러진 특징은 이들이 격자규모에서 내부상태변수들을 예측한다는 것이지만, 이러한 변수들을 관측하여 예측치와 비교한 예는 드물다. 사실 관측되는 상태변수는 격자규모보다 작은 규모이기 때문에 모델의 매개변수와 마찬가지로 이러한 관측에도 문제점이 있다.

이상을 요약하면 분포형 모델들이 격자규모에서 수문현상을 묘사하는데 있어 적절한 수식들을 사용하고 있는지에 대해 의문이 간다. 이는 격자규모에서 구한

모델의 매개변수들이 대표성을 가지는지, 그리고 만약 관측유량과의 보정과정에서 매개변수들이 과도하게 결정되었을 경우에 유역규모의 모델이 지니는 기본적인 장점인 내부상태변수들이 제대로 모의되지 않는다는 것을 의미한다. 이러한 문제들은 여러 문헌(Beven, 1985, 1989, 1993; Grayson et al., 1992)에서 심도 있게 논의되어 왔다. 이와 같은 문제들이 있다고 할지라도 분포형 모델링의 실용성을 따져 볼 때 엄청난 잠재력과 가치를 지니고 있다는 것은 의심할 여지가 없다. 다음 절에서는 이러한 문제들을 고려하여 분포형 모델링을 한 차원 향상시킬 수 있는 방법에 대해 논의하고자 한다.

2. 유역규모에서 성공적으로 검증된 분포형 모델의 예가 있는가?

분포형 모델링의 문제점에 대한 답변으로서 이들이 연구초반에 생각했던 것보다는 그렇게 나쁘지 않다는 것이다. 이미 언급한 바와 같이 유역규모에서 유출을 예측하는데 있어 성공적으로 평가받고 있는 SHE나 IHDM 등과 같은 모델들이 그 예라 할 수 있다. 이들은 적용성이 높고 최소한 수문예측결과를 받아들일만하다는 것이다(Bathurst, 1986; Calver, 1988). 수문과정의 내부상태변수(internal state variable)들을 예측하는 강우-유출모델로서 검증과정을 거친 모델은 아직 손으로 꼽을 정도이다. 분포형 모델의 검증과정은 최근의 수문관련 문헌들(쓰레기매립지와 지하수오염과 관련된 프로그램 개발, 현장조사 및 논쟁과 관련된 연구에서 지표하흐름을 모델링하는데 초점을 둔 지하수관련 논문)에서 큰 관심을 끌어왔다. 잘 알려진 지하수 수문학자들은 다수의 지하수모델링 연구에서 초기예측에 심각한 문제가 있음을 밝힌 반면에(Anderson and Woessner, 1992), 근본적으로 지하수모델들은 검증될 수 없다고 제시한 바 있다(Konikow and Bredehoeft, 1992). 이들을 철학적인 관점에서 논의한 논문들도 있다. 예를 들어 Oreskes 등(1994)은 지하수모델링에서 정당성(validation), 검증(verification), 확증

(confirmation), 반증(falsification)과 같은 용어의 의미와 그 사용에 대하여 논의한 바 있다.

이와 유사한 논쟁들이 유역모델링 연구문헌에서 꾸준히 지속되어 왔다. Beven(1989)과 Grayson 등(1992)은 현재 분포형 모델의 한계와 이를 극복할 수 있는 보정전략의 필요성에 대하여 집중적으로 논의한 바 있다. 이에 대한 반응은 다양하였다. 예를 들어 Smith 등(1994)은 검증 가능한 동수역학적 개념에 근거를 두고 통제되는 실험조건에서 관측된 자연현상을 수학적으로 접근하는 것(제 1유형의 모델)과 이러한 개념을 수치해석과 더불어 경계조건에서의 오차 및 배제할 수 없는 코딩오류의 가능성을 가지고 컴퓨터 프로그래밍하는 것(제 2유형의 모델)과는 구별하는 것이 중요하다고 제안한 바 있다. 이들은 이질성과 불확실성의 면에서 제 2유형의 모델의 어려움과 실패 가능성을 제 1유형의 모델이 실패하는 경우와 비교하지 말아야 한다고 지적하였다. 개개의 포장실험에 대한 반응은 토양과 강우의 정보만으로는 예측이 어렵다고 말할 수 있으며, Smith 등(1994)은 “우리는 왜 자연으로부터 기대하는 것보다 제 2유형의 모델에서 더 많은 것을 기대하는가?”라고 진지하게 반문하였다.

분포형 모델의 성공적인 사례는 Jensen 등(1993)이 MIKE-SHE의 3차원 지표하흐름과 이송부분을 이용하여 Denmark Jutland지역의 사질대수층에서 추적모의한 경우이다. 투수계수는 현장의 시추공에서 slug시험에 의하여 관측되었으며, 분산도는 보정되었다. 한 차례 추계학적으로 발생시킨 투수계수를 사용하였고, 나머지는 세 개의 흐름층으로 구분하여 각 층마다 유효투수계수를 사용하였다. 이는 모델의 예측 결과를 흐름영역에서 내부상태변수값과 비교한 보기 드문 논문이다. 이들은 1차원 Darcy 불포화흐름모델로부터 유도된 지하수충진량을 이용하여 수개월간의 지하수위를 성공적으로 모의하였다(불포화지역에서의 매개변수들을 어떻게 유도하였는지 명확하지 않음).

이들 예에서 보는 바와 같이 모델의 정당성, 확증, 수용성에 대한 확실한 답변은 없다고 말할 수 있다.

사실 이들은 본질적으로 모델의 이산성, 매개변수의 추정과 보정, 초기 및 경계조건 설정 등의 문제와 밀접한 관계가 있다. 좀 더 시야를 넓히면 또 다른 문제점들이 있다. Beck 등(1995)은 모델이 지니는 본질과 더불어 모델의 정당성과 관련된 두 가지 관점에 대하여 논의하였다. 이 두 관점은 예측하여야 하는 일의 성격과 모델의 예측을 근거로 잘못된 의사결정에 의한 위험도이다. 이들은 만약 주어진 일이 이전에 경험해 보았던 것과 유사하거나 잘못된 의사결정에 의한 위험도가 낮을 경우에는 모델의 정당성(또는 수용성)에 대한 판단은 상대적으로 쉽게 해야한다고 제시하였다. 반면에 주어진 일이 새롭고 그릇된 의사결정에 대한 대가가 클 경우에는 그 일은 엄격히 다루어져야 하며 수용성에 대한 결정은 더욱 신중해야 한다는 것이다. 엄격한 과정을 거치면 거칠수록 잘못된 모델이 받아들여지는 기회는 줄겠지만 실제로는 좋은 모델임에도 불구하고 사장되는 경우도 발생할 것이다. 따라서 이러한 결정은 모델의 구조와 흐름에 대한 개념적 모델에 대한 심도있는 평가와 같은 보다 질적인 정보에 달려있다. 전문가들은 모델링의 접근방법에 있어 서로 다른 의견을 보일 수 있고, 적지분석에 대한 개념적 모델을 구성함에 있어 전문가들마다 상이한 수준의 정보를 이용하는 최근 연구들은 이러한 관점에서 너무 신뢰하지 말아야 한다는 것이다.

3. 보다 향상된 매개변수 결정과정이 가능한가?

이미 제안한 바와 같이 현재 물리적인 기반의 분포형 모델에 사용되고 있는 작은(“REV”)규모의 방정식이 이질성의 구조화된 흐름영역에 쉽게 적용할 수 없다면, 보다 나은 매개변수 결정방법이 가능한가? 여기에는 적어도 두 가지 문제가 있다는 것을 상기하는 것이 중요하다. 그 하나는 비록 작은 규모의 방정식이 지역규모에서 적용 가능하다고 할지라도 규모의 변화와 매개변수의 이질성 문제와 관련이 있다는 것이다. 만약 이 문제만 있다면 규모이론(theory of scaling)으로부터 유도가 가능할지도 모른다. 이는 이질성을 표현할 수 있는 통계모델의 지식을 바탕으로 규모에

의존하는 매개변수들을 개발할 수도 있다는 것을 말한다(Dagan, 1986). 그러나 또 다른 문제가 있다. 두 번째 문제로는 작은 규모의 방정식이 지역규모에 적합하지 않을 수도 있다는 것이다.

따라서 "물리적인 기반의" 분포형 모델링에 근본적인 딜레마가 존재한다는 것이다. 만약 지배방정식의 한계가 인정된다면, 여러 매개변수들로 구성된 더욱 복잡한 매개변수들을 도입할 필요가 있다. 이러한 매개변수들은 쉽게 관측될 수 없을지도 모르며, 공간적 변이의 정도와 중요성을 해결하기 위하여 엄청난 관측이 필요한 이질성의 문제를 겪을지도 모른다. 그리고 아직 강우에 의한 반응은 그다지 복잡하지가 않다. 강우가 발생하면 지표 및 지표하 흐름이 증가하고, 결국 전체적인 수문곡선을 얻는다. 유역규모에서 전체적인 반응의 대표적인 양상을 재현하는 것은 그다지 어렵지 않고, 몇 개의 매개변수들로 구성된 상대적으로 단순한 모델을 요구한다. 이러한 교훈을 어떻게 하면 분포형 모델의 경우에도 적용할 수 있을까? 분포형 반응을 묘사할 수 있는 최소한의 모델은 무엇일까? 이는 현실적으로 현재의 분포형 모델보다 단순할 수 있을까?

본 저자는 이 마지막 질문에 긍정적인 기대를 하고 있지만, 적절한 관측이 없이는 증명하기가 쉽지 않다. 이러한 딜레마의 해답으로서 확실한 것은 모델을 보다 세부적으로 묘사하여 매개변수와 상태변수들에 대한 자료수집을 확보하는 것이 아니라는 것이다. 해답은 적절한 규모에서 자료를 수집하여 보다 단순한 분포형 모델을 구성하는데 있다고 본다. 예로서 유역내 임의 지점의 주변과 그 상류지역에 대한 수문반응을 지하수위로 표현하게 되면, 그 경로를 따르는 기본적인 성분(building block)은 시간에 따른 지하수위의 반응으로 나타낼 수 있다. 그러나 기존의 관측자료에 신규 관측치가 추가된다면 지역 이질성을 설명하는 모델의 지역 보정이 재차 요구되기 때문에 어떠한 과정으로 이러한 모델을 개발하는 것이 최선인지 그 한계를 결정하는 것은 명확하지 않다. 더욱 불분명한 것은 지역(특히 관측규모가 모델의 격자크기보다 훨씬 작은 지역)보정에 요구되는 내부관측정보가 충분히

제공되었는지, 모델의 구조요리가 지역보정요리와 분류할 수 있는지에 대한 사항이다. 시스템의 지역반응을 반영하는 이러한 자료의 가용성은 분포형 모델을 단위요소화(disaggregation)할 수 있게 된다. 이는 궁극적으로 오늘날 수문이론의 기초가 되는 작은 규모의 매개변수정보를 모으는 것보다 훨씬 기대되는 접근방법이 될 것이다.

4. 분포형 모델링의 미래상: 자료를 중심으로

본 저자는 주어진 규모에 맞게 매개변수 값을 잘 적용하면 모델링이 가능하다는 가정 하에서 작은 규모에서의 물리학적 방정식도 대규모에 적용하고 있는 현재의 물리적인 기반의 분포형 모델링 기법이 모델링 과정의 한계를 한 단계 뛰어 넘는 하나의 방법으로 인정해야만 한다고 지적하고 싶다.

모든 분포형 모델(물리적인 기반으로 구성되었어도)이 집중형 개념적 모델이라고 한다면, 현재 가지고 있는 문제해결에 적절한 모델검정의 범위 내에서 매개변수를 최소화하고도 실제계를 구현할 수 있는 새로운 개념의 접근방법도 있을 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 모델은 규모의 변경시 수문반응의 변화와 모델의 매개변수들의 조정시 유효한 가변자료를 직접적으로 반영하여 주어지는 규모에 맞게 적용될 수 있도록 개발되어야 한다.

이제 다음과 같은 가상 시나리오를 생각해 보자. 병렬 워크스테이션이 사용가능하다는 것은 실질적으로 컴퓨터의 계산시간에 있어 그 한계가 없어졌다라는 것을 의미한다. 필요하다면 수행이 재 생성될 수 있으므로, 모든 결과의 저장한계 또한 문제가 되지 않는다. 미계측유역에서의 모델링 또한 가능하다. 레이더 강우, 기상자료, Landsat, SPOT, 위성탐재 레이더 이미지 등과 함께 토양, 토지이용에 대한 GIS 데이터베이스가 구축되고 있다. 기존의 모든 분포형 수문모델과 각 모델의 개념화에 도입된 모든 매개변수들은 유역을 모의할 수 있는 잠재력을 지니고 있다. 이제는 모델의 수준을 보장함에 있어 BIHS(Bureau of International Hydrological Standards)가 제안하였

듯이 “자신의 모델은 1의 사전우도를 가지고, 타 모델은 0의 사전우도를 가진다”는 발상은 받아들여지지 않는다. 사전 판단과 전문가적 경험은 모델을 구성하고 매개변수를 찾는 데 큰 도움이 되며, 가능성이 비치는 모델이지만 사전에 기각할 때에는 보다 신중하게 검토하여야 한다. 다양한 매개변수 집합으로 충분히 모델의 수행이 필요하며, 사전 수행기준 또는 우도계측(likelihood measure)에 따라서 평가가능한 자료와 비교되어야 한다.

가장 중요한 판단은 모델의 기각을 “non-behavioural”로 보는 경우이다(hydroinformatics를 포함하여 모델개발시 다양한 분야에서 연구되고 있는 “evolutionary” 또는 “genetic” 기법과 유사성이 있다). 나머지 모델(이들 중에서도 일부 모델들은 높은 우도치를 보여 타 모델들보다 좀 더 “behavioural”할 지라도)들은 모두 어떤 의미에서는 “behavioural”하다고 할 수 있다. 관측값이 많아지게 되면 기각의 경우도 증가하게 되고 “behavioural” 집단을 감소할 것이다. 이제 자료의 가치는 모델이 “behavioural”인지 “non-behavioural”인지를 구별하는 능력에 있다. 물론 모델의 가능성에 대한 범위를 검사하는 것은 모델을 보정하는 형식이며, 두 가지 중요한 장점이 있다. 그 하나는 가용자료와 조화를 이루는 “behavioural”의 가능성에 대한 궁극적인 차별화는 불가능하다는 것을 인식하고, 다른 하나는 자료에 초점을 맞추어 가상의 골격 내에서 자료가 사용된다는 것이다. “behavioural” 모델의 범위가 주어진다면 대상모델 또는 매개변수 집합이 “non-behavioural”이라는 것을 보여주므로써 그 범위를 최대한 줄이기 위한 자료가 수집되어야 한다.

미계측유역에서도 사용 가능한 자료를 살펴보면 사실 사용할만한 자료는 극히 제한되어 있다. 토양과 식생정보가 매개변수의 범위를 결정하는데 사용될 수 있다. 하류방향 투과율의 윤곽과 수분저항에 대한 반응을 제어하는 식물 매개변수들을 분류하는 것은 앞으로 희망적으로 향상될 것이지만, 이러한 범위는 아직도 상대적으로 불명확하다. 강우와 기상자료가 입력자료로 사용된다. 능동 또는 피동 극초단파 자료가

지표토양수분의 지표토 제공될 수 있지만, 이는 단지 수문거동을 애매모호하게 관측한 것이라고 말할 수 있겠다. 분명한 것은 이러한 경우에 모델간의 차별화는 제대로 이루어지지 않을 것이며, 미래 거동의 예측 범위는 커지게 된다. 따라서 프로젝트에 관측비용이 책정된다면, 어떠한 관측항목이 가능성 있는 모델로 평가될 수 있을지를 고려해야 한다. 어떠한 자료가 “non-behavioural”에 속하는 모델로서 기각의 판단 기준이 될 수 있을까?

이 질문에 대한 답변은 명확하지 않다. 모델 보정의 목적을 위하여 관측해야 할 매개변수(특히 작은 규모의 관측일 경우)들을 정하는 것은 단순한 질문이 아니다. 그 대답은 일부는 모델의 개념화, 수문반응의 대상 그리고 모델링의 목적에 맞게 다르다고 말할 수 있다. 잘 구성된 모델은 유역에서 유출에 기여하고 회귀수가 발생하는 지역으로서 토양이 포화된 지역을 예측할 수 있다. 이는 상대적으로 쉽고 값싸게 알아볼 수 있다. 또한 대표지점(하나 또는 하나이상)에 수위계를 설치하여 다수의 수위검사로 하나 이상의 수문곡선을 얻어냄으로써 모델간의 차별화에 경제성을 부여할 수 있을 것이다(앞으로는 자연단면에서 유속장을 초음파 단층촬영기법을 이용하게 될 것).

분포형 수문모델의 현 세대가 다른 유형의 모델과는 달리 간단한 매개변수를 가지고 개념화하여 분석 과정에서 설득력을 발휘할 수 있을까? 수집된 자료와 이를 이용한 시험이 지나치게 차별화되지 않는 한, “behavioural”한 모의라고 할 수 있다; 그리고 과학적으로 받아들일만한 가설기법을 따라야 하는 어려움에 놓여 있다. 만약 “behavioural”수행의 기준이 너무 엄격하다면 모든 모델과 매개변수 집합은 “non-behavioural”로 기각될 것이다. 현재의 시험들을 너무 엄격하게 해서 이와 같은 경우가 발생되지 않아야 하겠다. 이는 비단 수문모델에서의 문제만은 아니다. 현재 기후에 대한 지역규모 예측의 정확성 기준이 적용된다면 현 세대의 지구대기순환모델들은 모두 기각되어야 할 것이다(이들을 이용한 미래 지구온난화 예측). 대부분의 환경, 지구화학 및 생태학적 모델들은 이러한 점에서 취약성을 보이고 있다(Beck, 1987;

van Straten and Keesman, 1991). 물론 앞으로의 발전은 향상된 매개변수 결정방법에 있어 그 과정을 이해하는 초석으로서 이러한 모델들의 정확도를 향상시킬 것이다…… 또는 향상시킬 필요가 있는 “모델링 과정” 그 자체의 이해인가?

한편 모델의 기각은 제안된 골격내에서의 문제로만 제기되지는 말아야 한다. 지금 예측이 필요하다면 기각의 기준은 현재 이해의 한계내에서 모델이 “behavioural”로 간주될 수 있도록 여유를 주어야 한다. 따라서 예측의 범위는 현재 이해의 한계를 허용하도록 그 폭이 넓어야 한다. 또한 기각의 이유는 모델링과 자료수집 간의 관계를 적절하게 공생하는 방향으로 유도하는 새로운 개념의 개발에 대한 통찰력을 제공한다든 관점에서 검토될 수 있다. 모델수행을 평가하는 학습앰고리듬을 바탕으로 컴퓨터의 성능을 활용하여 새로운 매개변수 결정방법을 발생시킬 수 있는 흥미로운 가능성이 이미 진행되고 있다(Babovic and Minns, 1994). 그러나 이러한 개발은 자료, 특히 사전의 이론전개보다는 적절한 자료수집기법에 그 주안점을 두어야 한다.

사실 본 저자는 “수문과학과 수문학적 이론의 개발이 새로운 관측의 개발, 특히 현재의 원격탐사기능으로부터의 그 것보다는 좀 더 나은 공간에서의 이질적인 수문반응들을 신속하게 예측하고 평가하는 방법을 기다리고 있다”고 이미 언급한 바 있다(Beven, 1995). 시험할 적절한 가설의 정의는 이러한 기법의 개발을 고양하는 하나의 기능이 될 수도 있다.

여기서 제시하고 있는 방법은 모델을 묘사함에 있어 결정 또는 미결정의 관념으로부터 출발된다. 모델링의 과학적 기법에 대한 수많은 철학적 골격과 이론의 개발사이에는 약간의 쉽지 않은 부분이 있다. 대부분의 수문학자들은 모델 또는 이론의 확증이 경험적 정확도에 관한 문제라고 인식을 같이 할 것이다(van Fraassen, 1980; Oreskes et al., 1994). 그러나 어떤 면(보다 많은 정보가 확보될 때 부수적인 조건의 지속적인 조정 또는 수정이 요구되는, 정확도면에서 제한적이고 조건부일 경우)에서는 “적절한” 다양한 묘사가 있다는 것을 받아들일 필요가 있다. 우도계측

을 통하여 가용한 모델의 순위를 매기는 생각은 수문 시스템의 모델링문제에 대한 상대주의적인 순수한 태도에서 기인한 것이라고 볼 수 있다(Feyerabend (1975)의 관점으로 이론과 실재사이에 필요한 일치 또는 조화가 요구되지 않는 과학사상(Beven, 1987)의 개발을 고집하는 상태). 하지만 이는 많은 수문 과학자들에게 받아들여지지 않고 있다.

예측을 기준으로 볼 때 모델과 이론을 구별하는 것이 가능하지 않다면 이는 단지 수준이하의 모델이라고 하는 견해가 있다. 따라서 모델 또는 가설 또는 매개변수 집합이 받아들여지느냐 마느냐를 결정짓는 관측과 가설시험의 과정을 개발하는 것이 수문과학자들의 목표가 되어야 한다(Haines-Young and Petch, 1983). 이러한 관점은 기각이 예측의 불확실성을 제약하고 모델구조를 향상시키는 기본적인 과정이라고 이미 언급한 방법과 상반되지 않는다. 하지만 본 저자는 관심 있는 시스템을 정의할 때 미지의 그리고 불확실한 결과로서 환경시스템을 모델링함에 있어 등가결정(equifinality)은 본질적인 것으로 판명될 것이며, 수문학자들은 이를 정복하기 위한 방법들을 찾아야만 할 것이다.

5. 결 론

수문에 있어 분포적 예측은 앞으로 지속적으로 요구될 것이지만, 분포형 모델링이 신중하게 접근되어야만 한다는 것이다. 현재의 모델에서 사용되고 있는 과정의 묘사는 부적절할 수도 있다는 것을 보여주었다: 격자규모에 유효한 매개변수 값의 이용은 항상 수용될 수 있는 것이 아니다: 적절한 매개변수 값은 격자규모에 따라 변화될 수 있다; 매개변수의 평가기법이 종종 부적절한 규모에서 적용되고 있다; 이러한 모델들은 모델구조의 불확실성과 실제 적용시 공간분할 문제 등으로 정당성을 확보하는데 있어 매우 어렵다. 이러한 문제들로 인해서 개발자는 판이하게 다른 모델의 구조와 매개변수들로 유역시스템을 표현하는 다수의 가능성 있는 모델들이 있을 수 있다는 것을 인식해야 한다. 그러나 이들은 받아들일만한 수준에서 유

역거동의 어떠한 관측도 재생성할 수 있어야 한다. 이와 같은 모델의 등가결정은 모델예측에 있어서의 불확실성에 기인하며, GLUE 과정과 같은 기법으로 평가될 수 있다.

이러한 모델들을 차별화하기 위해서는 어떠한 모델을 기각할만한 자료가 요구된다. 이러한 관점에서 대규모 시스템의 분포적 반응을 반영하는 자료수집기법은 격자규모보다 작은 규모에서 현장관측하는 것보다 훨씬 높은 가치를 발휘할 것이다.

마지막으로 앞으로의 분포형 모델의 발전은 지금의 분포형 모델들이 기반을 두고 있는 작은 규모의 이론

과 매개변수 값들을 모아서 향상시키기보다는 직접적인 대규모 관측을 통한 부격자규모(sub-grid element)의 매개변수 결정방법을 개발하는데 놓여 있다. 이와 같이 되면 새로운 매개변수를 도입하거나 모델을 복잡하게 만들지 않고도 보다 간단하고 견고하게 그리고 보다 쉽게 보정할 수 있을 것이다. 따라서 분포형 모델링의 발전은 주어진 규모에서 반응의 변이성을 적절하게 반영하는 새로운 관측기술(새로운 이론의 형성이 수반됨)의 개발에 달려있다고도 말할 수 있다. ●

〈참고 문헌〉

- Abbott, M B, Bathurst, J C, Cunge, J O, O'Connell, P E and Rasmussen, J, 1986, An introduction to the European Hydrological System-Système Hydrologique Européen(SHE), J. Hydrol., 87, 45-59.
- Anderson, M P and Woessner, W W, 1992, The role of the post-audit in model validation, Adv. Wat. Resour., 15, 167-173.
- Babovic, V and Minns, A W, 1994, Use of Computational adaptive methodologies in Hydroinformatics, in V Verwey, A W Minns, V Babovic and C Maksimovic(Eds.), Proc. 1st International Conference on Hydroinformatics, Blakema, Rotterdam, 201-210.
- Bathurst, J C, 1986, Physically-based distributed modelling of an upland catchment using the Système Hydrologique Européen, J. Hydrol., 87, 79-102.
- Bathurst, J C and O'Connell, P E, 1992, The future of distributed modelling: the Système Hydrologique Européen, Hydrol., Process., 6, 265-277.
- Bathurst, J C, Wicks, J M and O'Connell, P E, 1995, The SHE/SHESED basin scale water flow and sediment transport modelling system, in V P Singh(Ed.), Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications, Colorado, 563-594.
- Beck, M B, 1987, Water quality modelling: a review of the analysis of uncertainty, Wat. Resour. Res., 23, 1393-1442.
- Beck, M B, Mulkey, L A, Barnwell, T O, and Ravetz, J R, 1995, Model validation for predictive exposure assessments, preprint.
- Beven, K J, 1985, Distributed Models, in M G Anderson and T P Burt(Eds.), Hydrological Forecasting, Wiley, Chichester.
- Beven, K J, 1987, Towards a new paradigm in hydrology, in Water for the Future: Hydrology in Perspective, IAHS Pub. No. 164, 393-403.
- Beven, K J, 1989a, Changing ideas in hydrology: the case of physically-based models, J. Hydrol., 105, 157-172.
- Beven, K J, 1989b, Interflow, in H J Morel- Seytoux (Ed.), Unsaturated Flow in Hydrologic Modelling, Proc. NATO ARW, Arles, France, Reidel, Dordrecht, 191-219.
- Beven, K J, 1995, Linking parameters across scales: subgrid parameterisations and scale dependent hydrological models, Hydrol. Process., 9, 507-525.
- Beven, K J, Calver, A and Morris, E M, 1987, The Institute of Hydrology Distributed Model, Institute of Hydrology Report 98, Wallingford, UK.
- Binley, A M, Beven, K J and Elgy, J, 1989, A physically based model of heterogeneous hillslopes. 2. Effective hydraulic conductivities, Wat. Resour. Res., 25(6), 1227-1233.
- Calver, A, 1988, Calibration, sensitivity and validation of a physically-based rainfall-runoff model, J. Hydrology, 103, 103-115.

- Calver, A and Wood, W L, 1995, The Institute of Hydrology Distributed Model, in V P Singh(Ed.), Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications, Colorado, 595-626.
- Dagan, G, 1986, Statistical theory of groundwater flow and transport: pore to laboratory, laboratory to formation and formation to regional scale, *Wat. Resour. Res.*, 22(9), 120s-134s.
- Feyerabend, P K, 1975, *Against Method: Outline of an Anarchist Theory of Knowledge*, New Left Books, London.
- Flury, M, Flühler, H, Jury, W A and Leuenberger, J, 1994, Susceptibility of soils to preferential flow of water: a field study, *Wat. Resour. Res.*, 30, 1945-1954.
- Freeze, R A and Harlan, R L, 1969, Blueprint for a physically-based digitally simulated hydrologic response model, *J. Hydrol.*, 9, 237-258.
- Grayson, R B, Moore, I D and McMahon, T A, 1992, Physically-based hydrologic modeling. 2. Is the concept realistic?, *Wat. Resour. Res.*, 28(10), 2659-2666.
- Haines-Young, R H and J R Petch, 1983, Multiple working hypotheses: equifinality and the study of landforms, *Trans. Instn. Brit. Geogr.* 8, 458-466.
- Hofmann, J R and Hofmann, P A, 1992, Darcy's law and structural explanation in hydrology, in D Hull, M Forbes and K Okruhlik (Eds) *PSA 92*, 1, 23-35, Philosophy of science Association, East Lansing, Mich.
- Hornberger, G M, P F Germann and K J Beven, 1991, Throughflow and solute transport in an isolated sloping soil block in a forested catchment, *J. Hydrol.* 124, 81-99.
- Jain, S K, Storm, B, Bathurst, J C, Refsgaard, J-C and Singh, R D, 1992, Application of the catchments in India. 2. Field experiments and simulation studies on the Kolar subcatchment of the Marmada river, *J. Hydrology*, 140, 25-47.
- Konikow, L F and Bredehoeft, J D, 1992, Groundwater Models cannot be validated, *Adv. Wat. Resour.*, 15, 75-83.
- Luxmoore, R J, Grizzard, T and Patterson, M R, 1981, Hydraulic properties of Fullerton Cherty Silt Loam, *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 45, 692-698.
- Morton, A, 1993, Mathematical models: questions of trustworthiness, *Brit. J. Phil. Sci.*, 44, 659-674.
- Oreskes, N, Schrader-Frechette, K, Belitz, K, 1994, Verification, validation and confirmation of numerical models in the Earth Sciences, *Science*, 263, 641-646.
- Philip, J R, 1978, Some remarks on science and catchment prediction in T G Chapman (Ed.), *Prediction in Catchment Hydrology*.
- Refsgaard, J-C and Storm, B, 1995, MIKE SHE, in V P Singh (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, Colorado, 809-846.
- Schrader-Frechette, K S, 1989, Idealized laws, antirealism and applied science: a case in hydrogeology, *Synthese*, 81, 329-352.
- Schulin, R, van Genuchten, M Th, Flühler, H and Ferlin, P, 1987, An experimental study of solute transport in a stony field soil, *Wat. Resour. Res.*, 23, 1785-1794.
- Smith, R E, Goodrich, D R, Woolhiser, D A and Simanton, J R, 1994, Comment on "Physically-based hydrologic modelling. 2. Is the concept realistic?" by R B Grayson, I D Moore and T A McMahon, *Wat. Resour. Res.*, 30, 851-854.
- van Fraassen, B C, 1980, *The Scientific Image*, Clarendon, Oxford, 235pp.
- Weinberg, A M, 1972, Science and trans-science, *Minerva*, 10, 209-222.
- Wheatcraft, S W, Sharp, G A and Tyler, S W, 1990, Fluid flow and solute transport in fractal heterogeneous porous media, in *Dynamics of Fluids in Hierarchical Porous Media*, J H Cushman (Ed.), Academic Press, 305-326.

* 본 논문은 Keith J Beven의 "A Discussion of Distributed Hydrological Modelling" In: *Distributed Hydrological Modeling* edited by M. B. Abbott and J. C. Refsgaard, pp. 255-278, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1996. 를 일부 발췌하여 번역한 것임.