

분포형 수문모형의 연구동향과 적용사례



허 옹 구
 퍼듀대학교 농공학과 /박사후 연구원
 yher@purdue.edu

1. 머리말

수문모형은 물의 순환과정과 기작을 표현하는 수식의 집합체로 특정 시공간에서 발생하는 수문현상을 재현하거나 예측하기 위해서 사용되며, 유역관리계획을 수립하기 위해 필요한 정보를 생산하거나 수문순환을 연구하고 교육하는데 필요한 도구로써 넓게 활용되고 있다. 수문모형은 침투유량을 추정하기 위한 합리식(rational method)과 유출수문곡선을 합성하기 위한 단위도법(unit hydrograph method)과 같은 간단한 형태에서 시작해서 유량과 유사뿐만 아니라 영양물질, 박테리아, 대장균, 중금속 등 여러 오염물질의 운송과정을 모의하기 위해 보다 복잡한 형태로 발전되고 있다. 이러한 수문모형개발의 전개과정에는 수문학적 발견뿐만 아니라 계산기(computer) 및 계산 기법(technique/algorithm)의 발전도 큰 역할을 하였다고 할 수 있는데, 그 대표적인 예로 수문모형의 전산화(computerization), 수치계

산법(numerical method)을 이용한 수문현상모의, 최적화기법(optimization algorithm)을 이용한 수문모형 매개변수 보정, 복수의 컴퓨터 프로세서를 이용한 병렬 연산기법(parallel computing) 등을 들 수 있다. 또한, 정보통신기술의 발전과 더불어 수문모의에 필요한 정보 또한 거의 대부분 전산화(digitization)되고 있으며, 방대한 양의 자료('big data')로 부터 새로운 정보를 찾아내거나('data mining'), 해당 수문모형과 모의대상 및 목적에 적합한 자료를 찾아내는 것이 수문모형을 이용한 수문분석에서 점점 중요한 과정이 되고 있다. 특히, 최근 원격탐사(remote sensing)기술의 발전으로 전 지구적 규모에서 수문현상의 관측이 가능해지고 다양한 종류의 수문관측자료가 일반에 공개되고 있어, 이들 자료를 수문분석과 수자원정책결정 과정에 활용하려는 연구가 활발하게 진행 중이다.

계산 기술과 정보통신기술의 발전은 수문모형, 특히 분포형(distributed) 모형의 이용을 용이하게 하고 있

다. 일괄형(또는 집중형, lumped)과 분포형모형의 필요성, 유용성 및 불확실성에 대한 논의는 아직도 진행 중이지만, 분포형 모형이 일괄형 모형보다 공간적으로 보다 구체적(detailed)이고 해석적인(explicit)인 모의를 가능하게 한다는 점은 명확하다. 이러한 분포형 모형의 장점은 모의 대상의 공간특성과 그 변화를 표현하는데 유리하며, 특히 비점원오염(non-point source pollution) 및 최적관리기법(BMP: best management practice)의 모의에 유용하다. 과거 분포형 모형은 모의 대상의 공간적 특성을 보여줄 수 있는 입력자료가 부족했고, 많은 계산량을 적정한 시간 내에 소화할 수 있는 계산기에 대한 접근이 제한되었으며, 복잡한 수문기작을 구현하는 계산기법이 사용하기 어려워 널리 이용되지 못했다. 하지만, 앞서 언급한 계산 기술과 정보통신 기술의 발전으로 최근에 이러한 문제들은 상당부분 해소되어 가고 있어 앞으로 분포형 모형이 보다 폭 넓게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

이에 필자는 본고에서 분포형 수문모형과 관련된 최근의 연구동향과 적용사례를 살펴보고 분포형 모형을 이용한 수문분석기법의 발전을 위한 연구방향을 전망해보았다. 본고에 소개된 내용이 분포형 모형과 관련된 모든 연구범위를 포함하고 있지는 않지만 최근 연구현황 및 방향에 대한 대강의 흐름을 간략하게 보여줄 수 있을 것으로 기대한다. 본고에서 모형은 수학적 모형(mathematical model)을 의미하고, 모의대상은 유역(watershed)의 수문현상, 특히 지표수로 한정함을 미리 밝힌다.

2. 분포형 수문모형의 개발 및 연구동향

수문모형은 각기 다른 방식으로 다양한 수문현상을

모의하는데, 알려진 수문기작을 적용하여 모의대상의 거동을 구체적으로 재현하는 process-based 접근법과, 단순화된 모의대상의 거동특성을 관찰된 자료를 이용하여 구체화한 다음 강수현상에 대한 모의대상의 전체적인 반응을 예측하는 black-box 접근법으로 구분된다. 또한, 수문모형은 모의하고자하는 대상의 공간적 규모에 따라 크게 유역(watershed) 또는 경지(field)단위 모형으로, 대상이 가지는 특성의 공간변화 고려여부에 따라 분포형(distributed)와 일괄형 모형으로 구분한다. 일반적으로 distributed 모형은 process-based 접근법을, lumped 모형은 black-box 접근법을 취하는 경우가 많다.

수문모형은 모의의 목적, 사용가능한 자료의 종류와 양, 모형에 대한 이해도, 모형의 적용성 등 여러 가지 요인을 고려하여 선택된다. 보통, 분포형 모형이 일괄형 모형보다 그 구조가 복잡하고 많은 입력자료를 요구하고 있어 사용하기가 어렵고 모의결과에 불확실성이 큰 반면, 모의결과의 정확도가 일괄형 모형의 그것 보다 항상 나은 것은 아니라서 꼭 필요한 경우를 제외하고는 자주 이용되고 있지는 않다. 하지만 분포형 모형은 유역의 각 부분이 유역의 전체적인 거동에 미치는 영향을 해석적(explicit)으로 고려할 수 있어 보다 객관적으로 유역 특성변화를 모의에 고려할 수 있다는 장점이 있으며, 토지이용 또는 구조물의 위치정보를 모의에 해석적으로(explicitly) 반영할 수 있어 공간배치 최적화에 유용하게 활용될 수 있다. 그리고 분포형 모형은 유역의 수문 과정의 공간적 변화를 구체적으로 재현할 수 있어 수문 과정에 대한 이해를 높이기 위한 효과적인 도구가 되기도 한다. 한편, 최근 발전하고 있는 GIS(Geographic Information System)/RS(Remote Sensing) 기술과 함께 다양하고 많은 공간정보를 이용할 수 있게 됨에 따라

수문모의에서 해당 자료의 활용도와 중요도가 높아질 것으로 예상된다. 특히, 분포형 모형은 일괄형 모형에 비해 수문모의시 공간자료에 담겨있는 정보의 손실을 크게 줄일 수 있어 정보의 이용효율을 극대화 할 수 있고, 따라서 모의결과의 정확도가 공간정보기술의 발달과 더불어 향상될 것으로 기대되고 있다.

분포형 모형은 유역특성의 공간변화를 서로 다른 매개변수 값을 이용해서 고려하는 분포형 매개변수(parameter)모형과, 이에 더해 유량, 유사, 영양염류 등의 물질이 유역내 특정지점에서 유역의 출구로 이동하는 과정을 흐름방향에 따라 구체적으로 묘사할 수 있는 분포형 유역추적(routing)모형으로 구분할 수 있다. 대표적인 분포형 매개변수 모형으로 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)이 있는데, 이모형은 HRU(Hydrologic Response Unit)개념을 이용하여 소유역내에서 서로 다른 토지이용, 토양 및 지형특성을 가진 HRU들을 상호작용 없는 독립된 개체로 취급한다. 따라서 어떤 소유역에 대한 모의결과는 해당 소유역내 모든 HRU단위의 결과를 합한 것이 된다. 한편, 일반적으로 일괄형으로 알려진 HEC-HMS(Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System)는 유역특성의 공간변화가 소유역단위에서 고려된다는 점에서 분포형 매개변수 모형으로 구분되기도 한다.

분포형 매개변수 모형은 유역을 최소모의단위(소유역, HRU, 또는 경지)의 집합으로 표현하고, 이들 모의단위에서 발생한 유량이 해당 소유역에 도달하는 과정을 일괄형 모형과 같은 방식으로 모의한 다음, 소유역의 출구로 부터 유역전체의 출구에 도달하는 과정을 하천추적(channel routing)기법을 이용하여 모의하는 것이 일반적이다. 반면 분포형 추적모형은 유역을 정방형 격자(grid cell, pixel) 또는 비정형 삼각망(irregular

triangle cell)의 집합으로 표현하고 이들 최소모의단위에서 발생한 유량이 지표 또는 하천의 흐름방향에 따라 유역의 출구로 유하되는 과정을 지표(overland) 또는 하천추적기법을 이용하여 모의한다. 이와 같이 유량이 유역내 어떤 지점에서 지표면의 흐름방향을 따라 수리학적으로 가장 가까운 하천까지 도달하는 과정을 모의하는 방법이 분포형 매개변수와 분포형 추적모형의 가장 큰 차이라고 할 수 있다. 분포형 추적모형으로는 MIKE-SHE(System Hydrologique European), CASD2D(Cascade 2-Dimensional) 또는 GSSHA(Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis), Vflow™, tRIBS(TIN-based Real-time Integrated Basin Simulator), DHSVM(Distributed Hydrology Soils and Vegetation Model)등이 있다. 분포형 추적모형에서 최소모의단위 내부의 토지이용, 토양 및 지형은 균질(homogeneous)한 것으로 가정되며, 적절한 격자크기에 대한 연구는 많이 있어왔지만 모든 모형과 모의에 적용할 수 있는 일반적인 결론이나 지침은 아직 없는 실정이며, 보통 입력자료의 정밀도와 계산의 효율성 또는 모의의 목적에 따라 결정된다.

분포형 추적모형은 지표수의 흐름을 묘사하는 지배방정식(governing equation)을 수치해석방법을 이용해 풀어내어 모의하거나, 각 격자 또는 삼각망에서 발생하는 유효우량(또는 직접유출량)을 계산한 뒤 이를 흐름방향에 따라 위치한 인접 격자로 전달하는 과정을 통해 모의한다. 지배방정식으로 St. Venant식으로 불리는 천수방정식(shallow water equation) 또는 단순화된 형태인 확산파(diffusive wave) 및 운동파(kinematic wave)방정식 등이 이용되며, 지표수의 흐름은 이들 식을 유한차분/요소/체적(finite difference/element/volume)등의 방법을 이용해 풀어내면서 해석된다. 이

러한 수치해석법은 크게 음해법(implicit)과 양해법(explicit)으로 구분되는데, 음해법은 계산이 어렵고 계산량 또한 많은 반면, 양해법은 풀이과정의 수치적 안정성(numerical stability)을 확보하기 위해 계산시간간격이 격자크기에 따라 제한(Courant condition)되기 때문에 큰 유역의 수문모의에는 비효율적이다. 특히, 격자의 크기가 작은 경우에는 계산시간간격이 초단위로 제한되기도 하며, 이렇게 작은 모의시간단위에서 발생하는 현상은 수문학적 모의의 관심대상이 아닌 경우가 많다. 또한 수치해석을 이용한 모의방법은 모형을 준비하는 과정이 어렵고 복잡한 단점이 있으며, 폭우사상별로 토양 수분 등의 초기조건을 따로 결정해야 해서 연속(continuous) 또는 장기(long-term)유출모의에 불리하다. MIKE-SHE, CAS2D2D, Vflow™ 등의 모형이 이러한 지배방정식의 풀이를 통해 지표유출을 모의하는 방법을 채택하고 있으며, 폭우사상의 홍수파 및 수문곡선을 구체적으로 모의하는데 주로 이용된다.

지배방정식을 이용하지 않고 지표유출의 흐름을 모의하기 위해서 격자간 유량의 이동을 지형의 함수로 표현한 경험식이 이용되기도 한다. DHSVM과 tRIBS의 경우 지표에서 유량의 속도를 격자의 경사도 또는 배수면적의 경험적 함수로 계산하여 직접유출량의 격자간 흐름(상류에 위치한 격자에서 발생한 유효우량의 직하류 격자로의 이동)을 모의한다. 이들 모형은 폭우사상 내에서 시간에 따른 유량의 속도변화를 고려하지 못해 계산된 유량 및 도달시간에 오차가 포함되기 쉽다. 또한, 계산시간간격에 대한 제약이 적은 반면, 상류에서 이동된 유량이 유역출구에 도달하기 전 하류지역에 재침투('re infiltration')하는 과정을 무시하는 문제가 있다. 최근에 새로 개발된 시간-면적방법(time-area method: HYSTAR-Hydrology and Sediment simulation

using Time-Area method)은 매 계산시간간격별로 유역내 모든 격자에서 유량의 변화에 따라 유량의 속도를 재계산하고, 각 격자의 침투량 계산에서 유효우량과 상류에서 유하된 유량을 동시에 고려하므로써 이러한 문제점들을 해결하고자 하였다. 또한, 기존의 분포형 추적모형이 공통적으로 계산시간의 크기에 상관없이 각 격자에서 발생한 유량을 바로 인접한 하류 격자에만 전달(cell-to-cell)되는 것으로 가정하는 것에 반해, 상류 격자의 유량이 수리학적 계산에 의해 파악된 복수의 하류격자에 이동(cell-to-cells)할 수 있도록 하여 격자의 크기에 따른 계산시간의 제약을 해소하고 모의의 효율성을 높였다.

수문모의에 많이 사용되는 분포형 매개변수 또는 일괄형 모형 중 SWAT과 HEC-HMS모형에 분포형 추적모형의 기능을 추가하기 위한 연구가 진행되고 있는 것으로 알려져 있다. SWAT모형의 경우 HRU 기반의 분포형 매개변수를 이용한 모의방법 이외에, 흐름방향에 따라 인접한 하천까지의 거리를 바탕으로 지표면을 분류하고 이를 바탕으로 유량이 하천으로 전달되는 과정을 묘사하는 방법(catena method)과 격자를 기반으로 한 유역추적 방법이 소개된 바 있다. 특히, 새로 개발된 SWAT의 격자기반 유역추적방법은 각 격자에서 생성된 유량을 하천추적하는 방식으로 실제 유역에 적용하는 단계에 있다. 또한, 경지단위(field-scale)모형인 APEX(Agricultural Policy/Environmental eXtender)를 유역단위(watershed-scale)모형으로 전환하여 SWAT모형과 연계하여 사용할 수 있도록 하기 위한 연구도 진행 중인 것으로 알려져 있다. HEC-HMS의 경우 Mod-Clark방법을 이용하여 유역특성의 공간분포를 모의에 고려할 수 있는 방법이 있지만, 최근 이를 확장하여 격자단위의 흐름추적이 가능하도록 하는

연구와 동시에 유사운송을 모의할 수 있는 기능을 추가하는 연구가 진행 중인 것으로 알려져 있다.

분포형 모형의 이용과 개발이 활발해짐과 동시에 분포형 모형의 불확실성, 보정방법 그리고 모의의 효율성에 대한 논의도 계속되고 있다. 앞서 언급한 바와 같이, 분포형 모형은 그 모의 방법의 특성상 많은 입력자료와 매개변수를 필요로 하고 모형 구조가 상대적으로 복잡하다. 이러한 특징들 때문에 일괄형 모형에 비해 그 모의과정과 결과의 불확실성이 높아질 가능성이 크다고 알려져 있다. 몇몇 연구들이 분포형 모형의 불확실성을 산정하고자 하였으나, 수문자료의 특성상 불확실성 분석을 위한 통계적 방법의 기본가정 ('iid': independent and identically distributed)을 만족시키지 못하거나 (MCMC: Markov Chain Monte Carlo) 통계적 방법 자체의 한계 (GLUE: Generalized Likelihood Uncertainty Estimator)로 인해 정립된 분석방법이 아직 없는 실정이다.

수문현상의 실측자료는 유역의 출구에서 관측된 수문곡선이 유일한 경우가 많으며, 분포형 모형 매개변수의 보정은 유역출구를 대상으로만 이루어지는 것이 일반적이다. 이 경우 모형의 보정은 관측치에 담긴 정보가 특정 매개변수를 특정하기에 부족하여 불량조건문제(ill-posed problem) 또는 다대일(many to one)문제가 되기 쉽고, 결과적으로 보정결과에 대한 신뢰도가 낮아지는 결과가 초래된다. 이러한 현상을 등결과성(equifinality, nonuniqueness, or nonidentifiability) 문제라고도 하며 GLUE와 같은 방법으로 분석하기도 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 유역의 내부에서 관측된 수문과정에 대한 정보를 분포형 모형의 보정에 활용하는 방안이 연구되고 있다. 특히, 원격탐사기법을 이용해서 측정된 토양수분을 분포형 모형의 보정에 이

용하는 연구가 진행되고 있으며, 통계적 기법(Kalman Filter 등)을 이용하여 관측자료와 모의자료를 융합하여 모형을 이용한 예측에 활용하는 자료동화(data assimilation)기법에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

분포형 모형은 모의과정의 특징으로 인해 일괄형 모형에 비해 많은 입력자료가 필요하고 계산량이 많아 모형을 구축하는데 뿐만 아니라 구동하는데 에도 많은 시간이 소요된다. 최근 임의추출(random sampling)기법에 기반한 최적화 알고리즘이 전역 최적해(global optimum)를 찾기 위한 방법으로 많이 개발되고 있으며, 진화알고리즘(evolutionary algorithm)의 한 종류인 유전자알고리즘 (GA: genetic algorithm), SCE(Shuffled Complex Evolution)과 같은 최적화기법은 수문모형의 보정에도 많이 사용되고 있다. 이러한 확률적 임의추출이론에 기반한 최적화 기법은 보통 많은 수의 매개변수 추출과 모형 구동을 필요로 하는데, 이때 모형구동 시간은 최적화 기법을 이용한 매개변수 보정 결과에 영향을 미친다. 즉, 모형구동시간이 짧은 경우 같은 시간이 주어졌을 때 최적화 알고리즘이 최적해를 찾을 수 있는 기회가 늘어나게 되어 결과적으로 보다 나은 해를 찾아낼 가능성이 높아진다. 이러한 이유로 최근 모형의 보정에 병렬계산(parallel computing)기법을 이용하여 모형의 전체 구동시간을 단축하기 위한 연구가 진행되어오고 있다. 최근 개인용 컴퓨터에서도 복수의 프로세서가 탑재된 경우가 일반적이고, 여러 학문 분야에서 슈퍼컴퓨터(super computer 또는 HPC: high performance computing)의 사용이 보편화됨에 따라 수문모형의 구동과 보정에서도 병렬계산기법의 활용도가 높아질 것으로 기대되고 있다.

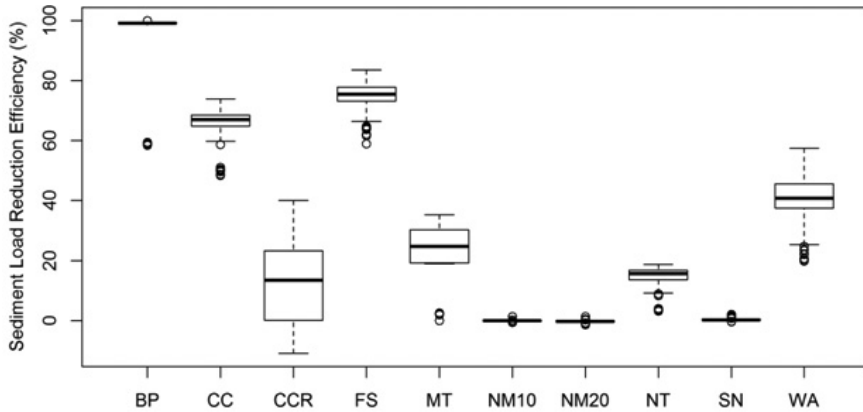


그림 1. 유사발생량 감소효율의 경지별 및 BMP별 변동 (BP: biomass planting, CC: cover crop, CCR: conservation crop rotation, FS: filter strip, MT: mulch till, NM10: nutrient management 10% reduction of fertilizer, NM20: nutrient management 20% reduction of fertilizer, NT: no-till, SN: split N application, and WA: WASC0B).

3. 분포형 모형의 적용사례

분포형 모형을 이용한 수문분석과 문제점을 극복하기 위한 연구 예를 살펴보고 분포형 모형의 적용 및 발전 가능성을 확인해 보고자 한다. 앞으로 언급되는 분포형 모형의 적용례는 필자의 경험에 근거한 것으로 특정 분포형 모형을 이용한 모의 및 연구 결과임을 밝힌다. 본고에서는 분포형 모형의 적용례로 BMP의 유사감소효과 모의, 옥수수 대(corn stover)수거 비율의 공간최적화, 수문과정의 시공간에 따른 변화 분석, 분포형 모형의 매개변수 보정에 따른 불확실성, 그리고 분포형 모형 매개변수 보정의 병렬연산 등이 제시되었다.

그림 1은 BMP를 이용하여 달성할 수 있는 유사발생 감소량이 경지별 및 BMP별로 얼마나 달라질 수 있는지를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 경지에 기존의 옥수수와 콩 대신 유사발생량 저감 및 3세대 바이오매스를 얻기위한 방편으로 swithgrass를 재배하였을 때

(그림 1에서 'BP') 모든 경지에서 높은 유사발생효과를 얻을 수 있는 반면, 옥수수-콩의 2년 주기 윤작에 밀을 추가하였을 때 (옥수수-콩-밀: 'CCR') 어떤 경지에서는 오히려 유사량이 증가할 수 있음을 보여준다. 본고에는 소개되지 않았지만, 무경운('NT')은 경우 많은 경지에서 용해성 인의 발생 및 유출량을 증가시키는 것으로 나타났다. 이처럼, 분포형 모형은 일관된 입력자료와 모의기작을 이용하여BMP의 효과의 공간적 분포를 보여주므로써 현재 BMP분포의 적절성을 평가하고 추후 BMP배치계획에 중요한 정보를 제공할 수 있다. 최근에는 분포형 모형과 다목적 최적화 알고리즘(multi-objective optimization)을 결합하여 농업활동이 환경에 끼치는 부정적 영향을 최소화하는 동시에 최대의 바이오매스 또는 농업생산량을 얻어 농경지활용의 효율성을 극대화 할 수 있는 최적 영농방식을 찾으려는 연구도 진행 중이다. 그림 2는 바이오매스 생산을 최대화하는 동시에 유사발생량을 최소화할 수 있는 옥수수 대의 수

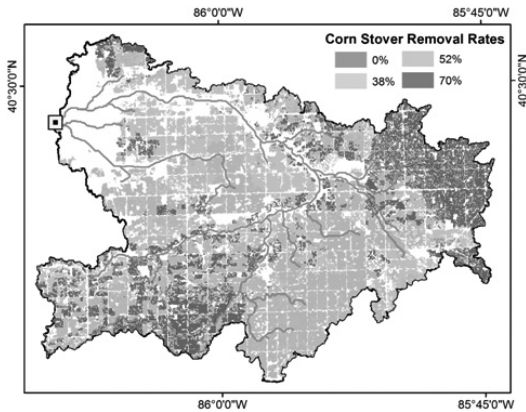


그림 2. 최적화된 옥수수 대 수거 비율의 공간분포 (유역내에 하얀색으로 표시된 부분은 SWAT모형에서 HRU가 정의되지 않은 지역을 뜻하는데, 이들 지역의 토지이용 및 토양특성은 모의에서 고려되지 않음).

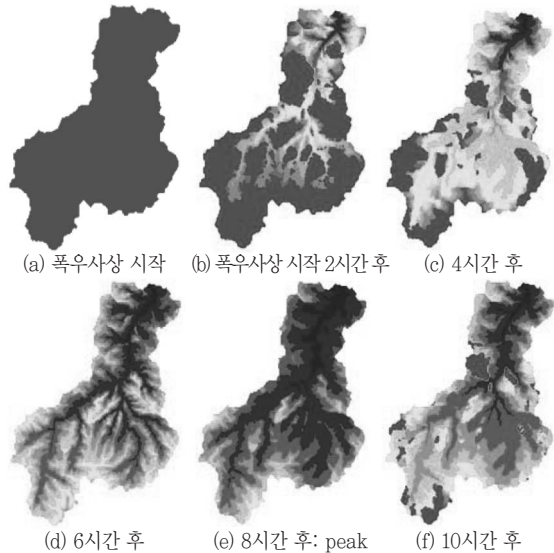


그림 3. 분포형 모형으로 모의된 직접유출량 도달시간의 시공간에 따른 변화 (도달시간이 짧을수록 파란색, 길수록 빨간색).

거비율의 공간분포 중 하나를 보여준다.

분포형 모형은 앞서 본 바와 같이 현실적인 문제해결을 위해 이용 될 수 있을 뿐만 아니라 수문과정을 분석하고 그에 대한 이해를 높이기 위한 기초 연구에도 유용하게 활용될 수 있다. 그림 3은 한 폭우사상에 대해 모의된 유출량의 도달시간의 시공간적변화를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이, 강우초기에는 유역출구와 가까운 하천 주변 지역에서 발생한 유출량이 다른 지역보다 비교적 빨리 유역출구의 직접유출량 수문곡선에 기여하게 되지만, 시간이 지날수록 하천망과 가까운 상류 지역에서 발생한 유출량의 도달 시간도 점점 짧아지게 되면서 어떤 시점에서는 유역전체가 유역출구의 유출량에 기여하게 되면서 유출곡선은 정점에 이르게 된다. 이러한 모의 결과는 포화초과(saturation excess)지표유출 시작에 기반한 가변유출원(variable source area)이론을 잘 뒷받침하고 있으며, 수변구역이 유출량에 미치는 영향을 정량적이고 구체적으로 보여준다. 도달시간

이외에도 직접유출량과 토양수분의 시공간에 따른 변화를 보여주는 모의결과가 있으나 본고의 지면이 제한된 관계로 생략한다.

분포형 모형은 많은 입력자료 뿐만 아니라 많은 매개변수를 필요로 하기 때문에, 앞서 언급한 바와 같이 모형의 결과가 매개변수의 보정에서 등결과성에 따른 불확실성의 영향을 받기 쉽다. 그림 4는 분포형 모형의 매개변수 보정과정에 있어 파악된 매개변수의 불확실성이 모형의 불확실성에 미치는 영향을 보여주는 예로, 비록 behavioral 매개변수(최대 목적함수의 값과 가까운 목적함수 값을 주는 매개변수)가 목적함수(본 예에서는 NSE: Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient가 이용되었음) 값에는 5%의 작은 차이를 보일지라도 실제 유출수문곡선에서는 약 40%의 차이를 가져올 수 있음을 보여준다. 이러한 등결과성은 매개변수 보정에서 모의

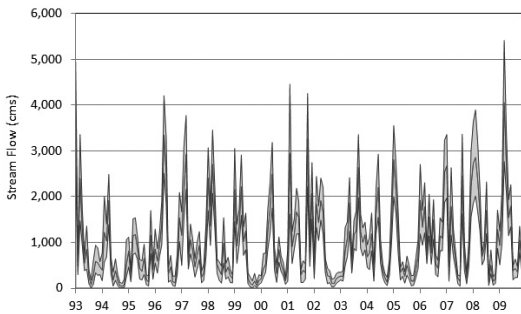


그림 4. 진화 알고리즘을 이용한 분포형 모형의 보정에서 behavioral 매개변수에 의해 모의된 월 유출량 수문곡선의 통계학적 변동범위 (behavioral 매개변수의 Nash-Sutcliffe 계수는 최적 매개변수의 그것과 5% 이내의 차이를 가지고 있음; 파란색 부분은 5% 유의수준(significance level of 95%)에서 정의된 신뢰구간; 평균 월유출량 수문곡선은 빨간색으로 표시됨).

치와 비교되는 관측치의 양이 많을수록 그리고 매개변수의 수가 적을수록 줄어드는 것으로 알려져 있다. 이러한 결과는 분포형 모형의 적용에서는 최대한 많은 양의 관측치를 확보해서 최적 매개변수의 변동 범위를 줄이고 모형의 구조를 간략(parsimony)하여 모의결과의 불확실성을 줄이는 노력이 필요함을 보여준다.

분포형 모형의 매개변수 보정은 보통 많은 시간과 계산이 필요한데, 병렬연산은 이러한 문제점을 해결하기 위한 간단한 방법이 될 수 있다. 그림 5는 분포형 모형의 매개변수 보정에서 병렬연산을 이용했을 때 절약할 수 있는 시간과 효율성을 보여준다. 예를 들어, 2개와 4개의 프로세서를 이용하였을 때 1개를 이용했을 때 보다 매개변수 보정에 걸리는 시간이 각각 약 50% 및 75%가 줄어든다. 보정에 걸리는 시간이 줄어들어 따라 연구자는 매개변수 보정에 다른 방법과 자료를 이용하거나 보정결과를 면밀하게 살펴볼 수 있는 기회를 가지게 되고, 전체적으로 모형 구동에 걸리는 시간을 절약함으로써

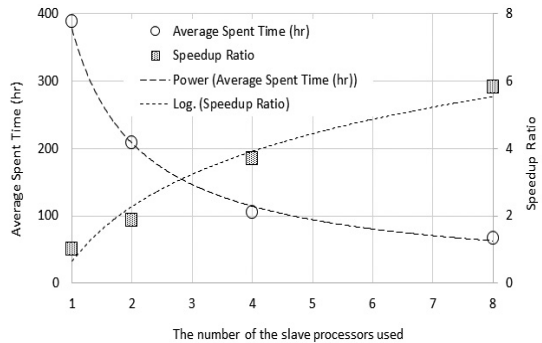


그림 5. 병렬계산 기법을 이용한 분포형 모형의 보정에서 사용된 컴퓨터 프로세서의 숫자에 따른 매개변수 보정에 걸린 전체 시간 및 효율(speed-up ratio)의 변화.

모형결과의 해석에 집중 할 수 있다. 또한, 같은 시간이 주어졌을 때 임의추출기법을 이용한 보정 알고리즘이 매개변수공간(parameter space)을 탐색 수 있는 시간이 늘어남에 따라 결과적으로 보다 나은 매개변수를 찾을 가능성이 높아진다. 일반 컴퓨터의 기능이 급격히 발전함에 따라 병렬연산은 현재 몇몇 상용 소프트웨어뿐만 아니라 수문모형의 보정에도 기본 기능으로 도입되고 있다. 수문모의의 대상이 지역(regional), 대륙(continental), 전 지구(global)로 광대해지고 생태 및 기후분야의 모형과 결합하여 사용되는 등 그 적용범위도 넓어지고 있으며, 다양하고 정밀한 원격탐사자료의 사용도 일반화됨에 따라 수문모의의 계산 효율성이 더욱 중요해 질 것이다. 이에 병렬연산은 향후 수문모형의 개발 및 적용에서 필수적인 요소가 될 것으로 예상된다.

4. 마치면서

관측 및 정보통신기술이 발전함에 따라 이전에 없었던 많은 양의 정보와 자료가 생산되는 지금, 이들을 최대한 활용하여 보다 구체적인 정보를 생산할 수 있는 분

포형 수문모형이 주목받고 있다. 분포형 모형은 유역특성의 공간분포 및 토지이용의 변화를 수문모의에 해석적으로 고려할 수 있고 유역의 각 부분에서 일어나는 수문과정을 구체적으로 모의할 수 있어 다양한 수문모의의 필요에 부응할 수 있다. 또한, 계산기와 계산기법이 급격히 발전함에 따라 분포형 수문모형을 활용할 수 있는 여건도 계산되고 있으며, 분포형 모형의 불확실성을 정량화하고 정확도를 개선할 수 있는 통계적 기법들도 개발되고 있어 분포형 모형의 활용도가 점차 높아질 것으로 예상된다.

이러한 분포형 모형은 농공학 분야에서 활발하게 연구되고 있는 비점원오염 연구에서 보다 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 특히, 분포형 모형의 모의 기법은 지표면에서 발생하고 지표면 및 하천을 따라 이동하면서 퇴적, 분해, 변화, 흡착, 흡수, 침출 등의 과정을 거치는 비점원오염물질의 특성 및 운반기작을 구체적으로 표현하기에 적합하다. 또한, 최근 생태계가 사람에게 제공하는 서비스(ecosystem service)의 중요성이 주목받고 있으며 이를 정량화하기 위해서 수문모형과 생태환경모형(ecological models)을 통합(integrate) 또는 연결(link)하여 수문과정과 생태환경 간의 상호작용을 규명하고 모의하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 생태계(ecosystem)는 동식물과 그 주위의 환경이 서로 밀

접한 관계를 맺으며 형성되는 것으로 이들의 공간적으로 분포는 생태계의 특성을 결정하는 중요한 인자이다. 따라서 분포형 모형의 모의 기작은 생태환경을 모의하기 위해 필수적인 생태계의 공간적 다양성을 표현하고 수문과정과 생태계 사이의 상호작용을 모의하는데 유리하다. 이러한 장점을 지닌 분포형 모형은 앞으로 보다 다양한 부문에서 널리 사용될 것으로 기대된다.

수문모형은 수문학적 지식과 경험을 집약한 분석 도구이자 수문학적 이해의 총체로 수문모형을 이용한 모의는 단순히 연속적인 계산과정이 아니라 이들 지식과 경험 및 이해를 바탕으로 필요로 하는 정보를 생산하는 과정이라고 할 수 있다. 이렇게 생산된 정보는 새로운 수문학적 발견을 견인하고 수자원의 효과적인 이용에 필요한 정책판단의 근거가 되어 궁극적으로 우리 사회의 지속가능한 발전에 기여한다. 인구가 증가하고 전반적인 생활수준이 높아짐에 따라 수자원에 대한 수요는 증가하는 동시에 다양해 질 것이며, 이에 수자원 관리를 위해 필수적인 수문모형의 역할 또한 중요해질 것으로 예상된다. 이에 분포형 모형이 가지고 있는 장점을 잘 활용하고 단점을 개선하는 노력을 통해 수자원을 효율적으로 이용할 수 있는 우리의 능력을 증진시킬 수 있을 것으로 기대한다.