

분포형 수문모델의 구축, 보정 및 검증

Construction, calibration and validation of distributed hydrological models

김성준 (건국대학교 지역건설환경공학과 조교수)

1. 서론

본 고에서는 기존 모델과 분포형 모델을 대상으로 ① 수문학적 모의에서 발생하는 오차의 여러 가지 유형들에 대한 개요와 더불어, ② 적합도와 정확도 기준, ③ 매개변수화를 포함한 모델 구축의 과정, ④ 모델의 보정시에 적용되는 다양한 방법, ⑤ 모델의 검증시에 고려하여야 할 사항들에 대하여 다루고자 하며, ⑥ 마지막으로 포괄적인 모델링 시스템의 신빙성에 대하여 논의하고자 한다.

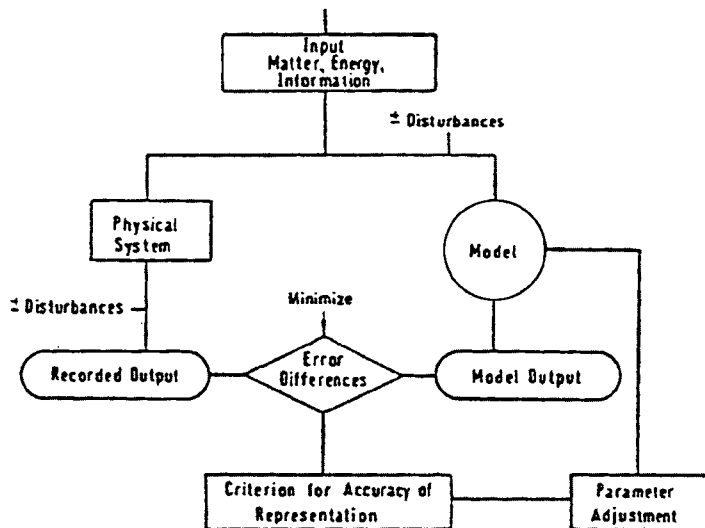


그림 1. 결정론적 수학 모델링의 개념 (Fleming, 1975이후)

2. 수문 모델링에서 불확실성의 원인

2.1 결정론적 모델링 개념

결정론적인 수학적 모델링의 개념은 그림 1에서 보는 바와 같다. 여기서 물리적 시스템인 유역은 왼쪽에, 물리적 시스템을 기호로 표시한 수학적 시스템은 오른쪽에 위치하고 있다. 모니터링을 통한 물리적인 시스템의 정량화나 수학적 모델링에 의한 표현 모두 오차를 포함하고 있다.

유입량, 유출량, 내부 상태들에 대한 시간적, 공간적 변이는 여러 지점에서 관측된 자료로부터 정량화된다. 그러나 이러한 관측 자체만으로는 유역 내에서 발생되고 있는 전반적인 상황을 제공해주지 못할 뿐만 아니라 유역과 그 주변간의 질량, 에너지 그 외의 교환과 관련된 사항을 이해하는데 도움을 주지 못한다. 그 이유로는 첫째, 흐름 및 상태변수들의 시간적, 공간적 변이를 모두 관측한다는 것은 불가능하며, 둘째로는 관측자체가 오차를 포함하고 있기 때문이다.

결론적으로, 모델은 어느 정도의 표본오차를 포함하는 대략의 자료들을 사용하게 되는 것이다. 한편 물리적인 시스템은 정의되는 바와 같이, 실제 자료를 획득하여 이들 자료에 의하여 반응을 보이게 되지만, 이 반응 또한 어떠한 불확실성을 가지고 관측된다는 사실에 주의하여야 한다.

물리적인 시스템의 거동을 모의하는데 있어 수문 모델은 주어진 대략의 입력자료에 영향을 받은 출력 자료를 생성하게 된다. 개발된 모델의 정확도를 검증하기 위해서는 모의된 결과는 불확실성을 포함하고 있는 관측자료와 비교하게 된다. 관측변수와 모의변수간에 만족할만한 일치치를 보일 때까지 모델의 매개변수들을 변화시켜가면서 원하는 모델의 정확도를 달성한다. 이러한 매개변수 조정과정을 “모델의 보정과정”이라고 한다.

2.2 불확실성의 원인

관측자료와 모델 모의결과 간의 차이는 근본적으로 다음의 네 가지 불확실성에 의하여 발생된다:

- (1) 유역의 시간과 공간에 걸친 입력조건으로 사용되는 강수, 기온, 증발산 등 입력자료의 임의 또는 시스템 오차.
- (2) 모의 결과와의 비교 시에 사용되는 하천수위, 지하수위, 유출량 등 관측자료의 임의 또는 시스템 오차.
- (3) 비 최적매개변수로 인한 오차.
- (4) 불완전한 또는 왜곡된 모델의 구조로 인한 오차.

상기의 네 가지 오차원인들이 복합되어 모의결과와 관측자료간의 불일치가 발생하더라도, 보정과정 중에는 (3)의 오차만을 최소화시킬 수 있다. 관측오차인 (1)과 (2)는 모의결과에 대한 최대한의 일치치를 결정하는 “배경 오차” (background noise)이다. 매개변수 값 또는 모델구조는 (1)과 (2)로 인하여 발생된 오차를 줄이기 위하여 논리적인 범위를 벗어나면 서까지 보정되어서는 안 된다. 따라서 보정과정의 목적은 오차 (3)을 자료오차인 (1), (2)와 비교하여

무시할 정도로 작아질 때까지 줄이는 것이다.

보정과정 중에 무엇보다도 중요한 것은 서로 다른 오차간의 구별이 명확해야 한다는 것이다. 따라서 자료오차를 매개변수 조정에 의하여 상쇄시키려는 것과 같이, 어떠한 오차를 다른 원인에 의한 오차와 혼합한 보정을 시도해서는 안 된다. 오차간의 확실한 구분이 없는 보정은 주어진 보정기간에는 양호한 결과를 얻을 수 있다고 하더라도, 결국은 신뢰할 수 없는 예측결과만을 초래하게 된다.

모델 개발자는 자신이 선택한 모델링 기법의 한계를 명확히 숙지하여야 한다. 수학적 구성에 문제가 없다고 판단하여 물리적인 시스템의 개념적인 표현을 강제적으로 시도하려고 해서는 안 된다.

3. 적합도 및 정확도 기준 (goodness of fit and accuracy criteria)

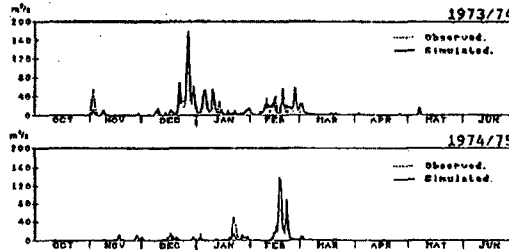
보정과정 중에 모의 및 관측자료간의 비교에는 다양한 정확도 판단기준을 사용할 수 있다. 이는 모델의 결과와 관측자료가 가장 일치할 수 있도록 하는 모델 매개변수들과 관련된 적합도를 목적에 맞게 측정하도록 해 준다. 그러나 적절한 기준의 선택은 2절에서 논의한 바와 같이 다양한 오차원인들의 변이에 의하여 그렇게 쉽지는 않다. 또한 이는 모의 (예, 홍수유출 또는 평시 유출)의 목적에 따라, 그리고 지하자연수위, 토양수분함량, 하천유량 또는 수위와 같은 모델의 결과변수들을 검사할 수 있는 정보에 따라 좌우된다.

모든 변수들에 적합한 단일기준은 없으며, 단일변수에 대하여 만족할만한 기준을 설정한다는 것도 항상 쉽지만은 않다. 따라서 다양한 기준들이 개발되어 왔다. Green과 Stephenson (1986)은 이 문제와 관련하여 심도있게 고찰하였는데, 단일사상의 모의에 대하여 모의목적, 모의조건의 범위 등에 따라 사용할 수 있는 21개의 방법을 나열하였다. 장기모의와 관련된 시스템 오차를 감지하는 기준은 Aitken (1973)이 논의한 바 있다.

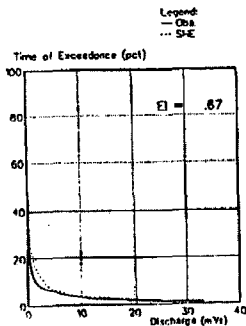
모델은 하나의 기준을 두고 최적화하면서 보정하

Annual Water Balance

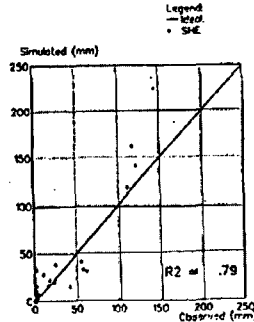
YEAR	RAIN	Evap	Obs	Qsim	DIFF
1973/74	910	1800	84	130	77
1974/75	270	2201	7	73	81
1975/76	1365	1638	144	518	48
1976/77	1013	1708	219	893	48
1977/78	887	1244	89	308	13
Average	913	1848	171	813	44



Flow Duration curves



Monthly Discharges



Maximum Annual Discharges

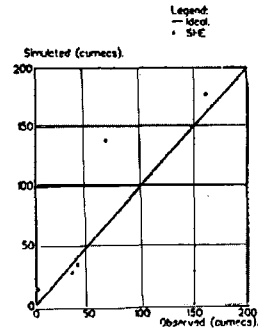


그림 2. 수치 및 그래픽 기준을 함께 보여주는 예. MIKE SHE에 의한 짐바브웨 Lundi 대표유역의 검증 예

는 것이 가능하다. 그러나 단일 수치기준에 의한 맹목적 최적화 (blind optimization)는 물리적으로 현실에 부합하지 않는 매개변수 값으로 보정된다. 이는 보정기간 이외의 시간에 대해서는 형편없는 모의 결과를 보여주게 될 것이다. Green과 Stephenson (1986)은 수문모델링 이외에 타 목적도 만족시키면서 계산 및 관측 수문곡선을 적절하게 평가하고자 할 경우에 단일기준으로는 충분하지 못하다고 결론지었다. 이와 함께 기준은 단지 모델에 의하여 발생된 수문변수들의 평가가 올바른지를 검사하는 것이지, 모델 자체가 수문학적으로 타당하다는 것을 증명하는 것이 아님을 인지하여야 한다. 따라서 보정에서는 수치기준이 단지 하나의 지침으로만 사용되어야 한다.

마지막으로, 예를 들어 모의 및 관측 수문곡선 간의 그래픽 비교를 통하여 얻어낼 수 있는 내용에 유의하여야 한다. 그래픽 비교는 분석측면에서 주관적이기는 하지만, 모델의 전반적인 능력을 제시하는데 좋은 지표가 된다. 이는 이해를 보다 쉽게 해주며, 통

계적인 함수만으로 제공되는 정보보다 더욱 실질적인 정보를 전달할 수도 있다. 그림 2는 유출자료 수치와 그래프로 비교한 예이다. 그림에서 유하기간 곡선 오차지수 EI (error index)는 모의 및 관측 일 유출량의 유하기간곡선 간의 차이를 수치적으로 표현한 것이다 (EI의 완전 일치 = 1). R2는 관측 및 모의 월 유출량 계열을 가지고 계산한 Nash-Sutcliffe 계수를 말한다.

4. 모델의 구축

모델의 구축은 처음 작성한 모델로 보정을 수행할 수 있도록 코드에 의거하여 입력 요구자료 파일들을 구성하여 적용하기 위한 자료의 준비과정이다.

경험적인 방정식에 대한 약간의 매개변수들만을 필요로 하는 개념적 집중형 모델코드 또는 이와 유사한 모델코드에 대해서는 모델의 매개변수들이 유역의 특성만에 의하여 바로 추정될 수 있는 것이 아니

라, 보정을 통하여 평가되어야 한다. 따라서 필요로 하는 자료는 매우 작으며, 자료의 준비는 통상적으로 시계열 기상입력자료와 이에 상응하는 시계열 제어 자료를 포함한 파일(예: 하천유출량)들을 준비하면 되는 정도이다. 이들은 매우 쉽게 준비될 수 있다.

물리적인 기반의 분포형 모델에 대해서는 자료의 준비단계가 상대적으로 매우 복잡하며, 대부분 포괄적인 프로그래밍 작업을 요구한다. 완벽한 물리적인 기반의 분포형 모델은 현장자료로부터 획득/평가될 수 있는 매개변수들로만 구성하므로써, 원칙적으로는 충분한 자료만 확보된다면 모델의 보정이 필요 없게 된다. 실제로는 물리적인 기반의 분포형 모델이 매개변수 값들을 직접 획득/평가할 수 없는 규모에서 적용되기 때문에 보정이 필요한 실정이다. 그러나 일단 보정이 이루어지면 경험적 또는 집중형 모델의 매개변수 값들과 비교하여 볼 때 매개변수들의 변이 허용범위는 상대적으로 매우 좁힐 수 있다.

분포형 모델은 유역의 특성을 공간적인 변이로 나타내며, 격자망으로 입력자료를 준비한다. 충분히 자세한 정보를 확보하기 위해서는 수천 개의 격자점들 자료를 필요로 한다. 원칙적으로는 격자점마다 매개변수 값들이 서로 달라야 하지만, 이는 가능하지도 않으며 또한 바람직하지도 않다. 대신에 주어진 매개변수 (토양종류, 식생종류, 지질층에 대한 대표성 있는 매개변수)는 현장수집이 가능한 자료로서 시스템 변이를 충분히 반영하여야 한다. 이와 같이 매개변수 값들의 공간적인 형태를 정의하는 과정 즉, 매개변수화 (parametrisation)는 보정과정에서 조정될 필요가 있는 매개변수의 총 개수를 효과적으로 줄여준다.

인도의 한 유역에 SHE 모델을 구축하기 위하여 사용한 매개변수화 과정의 예는 Refsgaard 등 (1992), Jain 등 (1992)에서 찾아볼 수 있는데, 820 km²의 Kolar 유역에 대하여 3가지 토양종류와 10가지 토지이용 및 토양깊이를 매개변수화 하였다. 토양종류에 대해서는 불포화지역의 투수계수가 보정되었다 (각 토양종류별로 3가지 토지이용에 대한 투수계수가 존재하여 9개의 매개변수 값으로 처리되었다). 토지이용 및 토양깊이에 대해서는 보정 매개변

수가 토양깊이 (10개의 매개변수)와 4가지 토지이용에 따른 Strictler 지표흐름 계수 (4개의 매개변수)로 각각 이루어졌다. 3가지 매개변수 (포화지역의 투수계수, 통과계수, 지표면 저류계수; 이들 모두는 유역 전체에 대하여 상수로 처리하였다)들도 보정되었다. 총 26개의 보정 매개변수들이 현장자료로부터 추정되지 못하였다고 하더라도, 모델의 보정을 통하여 수정하여야만 했으며, 보정과정을 통한 매개변수 값들의 물리적인 적합성은 가용 현장자료들로부터 평가될 수 있었다. 덴마크 Aarhus 근처의 800 km²지역을 대상으로 지표수/지하수 결합모델을 이용한 매개변수화의 예는 Refsgaard 등 (1994)에서 제시한 바 있다.

모델의 보정과 검증과정에서 수반되는 방법론적인 문제들을 피하기 위하여 정밀하고도 엄격한 매개변수화 과정은 매우 중요하다. 다음은 매개변수화 과정에서 고려해야 하는 중요한 사항이다:

- ① 목적에 맞게 상호 연관성이 있는 매개변수의 종류 (토양종류, 식생종류, 기상지배구역, 지질층 등)가 선정되어야 하며, 이 매개변수 값들은 가용 현장자료로부터 최대한 확보되어야 한다.
- ② 현장자료만으로 매개변수들이 결정될 수 있도록 일련의 보정을 통하여 명확하게 평가되어야 한다. 보정과 관련된 매개변수들은 물리적으로 타당한 매개변수의 범위가 제시되어야 한다.
- ③ 실질적이고 방법론적인 관점에서 보정 매개변수들의 수는 최소한으로 줄여야 한다. 이는 예를 들어, 매개변수 값을 공간적으로 분포시킨 상태에서 보정을 통하여 이들 값을 수정하므로써 가능해진다.

5. 보정방법

현장자료로부터 직접 획득할 수 없는 매개변수들은 보정과정에서 평가하여야 한다. 원칙적으로 3가지 종류의 보정방법이 적용될 수 있다:

- ① 시행오차에 의한 매개변수 보정.
- ② 자동보정에 의한 매개변수 최적화.
- ③ ①과 ②의 혼용.

5.1절에서는 상기의 세 가지 방법 및 장단점에 대하여 기술하고, 5.2 및 5.3절에서는 집중형 및 분포형 모델링 분야에서 보정기법을 정리하고자 한다.

5.1 시행오차 및 자동보정의 장단점

5.1.1 시행오차에 의한 매개변수 보정

시행오차 방법은 수많은 모의를 통하여 수작업으로 매개변수를 평가하는 것이다. 이 방법은 지금까지도 가장 널리 사용되고 있으며, 모델이 복잡할수록 가장 추천할만한 방법이다. 모델결과를 그래픽으로 표현하여 확인하는 것은 이 방법의 필수적인 사항이다.

5.1.2 매개변수 자동 최적화

매개변수 최적화는 주어진 매개변수의 최극치를 찾아주는 수치 알고리즘을 이용한다. 이 방법의 목적은 가능한 한 많은 수준의 매개변수 조합 및 순열을 통하여 정확도 기준을 만족하는 최적의 매개변수 집합을 찾는 것이다. 이 방법의 장점은 다음과 같다:

- ① 자동 최적화는 대부분의 일이 컴퓨터에 의하여 수행되므로 빠르다.
- ② 자동 최적화는 수문학자가 수문곡선을 보고 개인적으로 판단하는 시행오차 방법보다는 객관적이다.

이 방법의 단점으로는 다음을 들 수 있다.

- ① 최적화를 위한 기준은 단일변수에 대하여 단일 수치기준을 가져야 한다. 3절에서 논의된 바와 같이, 이와 같은 제약조건 하에서 적절한 기준을 선정한다는 것은 복잡하고도 매우 주관적인 내용이다.
- ② 모델이 꽤 많은 매개변수를 가진다면, 최적화는

아마도 전구간 최적치 (global optimum) 대신에 일부구간 최적치 (local optimum)를 찾아 줄 것이다.

- ③ 탐색 알고리즘에 대한 대부분의 이론은 모델의 매개변수들간에는 상호독립적이라고 가정한다. 이 가정은 일반적으로 정당하지 않다.
- ④ 자동보정은 2절에서 언급한 여러 오차 발생원들을 서로 구별하지 못한다. 따라서 자동보정 알고리즘은 매개변수를 조정하므로써 자료오차를 상쇄시키려고 할 것이며, 이는 매개변수 값들을 비현실적으로 보정하여 보정기간 이외의 기간에 대한 적용시에는 엉뚱한 모의결과를 초래할 것이다.

여기에 기술적인 고찰이 일반적인 단점으로 추가될 수 있다 (Todini, 1988). 목적함수의 최적화를 통하여 모델의 매개변수들을 보정하는 것은 모델의 물리적인 특성을 완전히 무시한 상태에서, 잔여오차의 분석에 기반을 두는 통계기법 (최소자승, 선형 또는 비선형 회귀, 최우도 등)을 적용하는 것을 의미한다. 다시 말하면, 자동보정 과정은 모델구조에 내재되어 있는 사전지식을 이용하기보다는 이를 피하여 모든 통계분석에서 자연발생하는 불확실성을 강조한다는 것이다.

5.1.3 두 가지 방법의 혼합방식

혼합방식은 예를 들어, 자료의 추정범위를 줄여주기 위하여 시행오차에 의하여 초기 조정을 거친 후 현실적인 범위내에서 자동 최적화를 수행하는 것이다. 반대 경우 또한 가능하다. 주요 매개변수들을 선정하기 위하여 자동 최적화에 의한 예민도 분석을 수행한 후에 시행오차를 통하여 보정하는 방법. 혼합방식은 매우 유용하다고 판단되지만, 아직은 널리 활용되지 않고 있다.

5.2 개념적 집중형 모델의 보정

현재 개념적인 강우-유출 모델을 보정하기 위하여 가장 많이 사용되고 있는 방법은 시행오차 방법이다.

이러한 유형의 모델들은 간단하고도 빠르게 적용할 수 있다. 그러나 이들의 보정을 위해서는 경험이 많은 사용자가 필요하다. 경험이 있는 수문학자라면 수문곡선을 확인하면서 보통 5-15회의 시행오차를 거치면 보정을 완료할 수 있다.

지난 20년 동안 전형적인 탐색 알고리즘에 기반을 둔 적절한 자동보정 방법을 구축하려는 연구가 많이 수행되어 왔다. 1970년대에 유행하였던 가장 오래된 방법 중의 하나는 Rosenbrock 방법 (Rosenbrock, 1960)이다. 다양한 최적화 탐색기법들의 비교 그리고 자동보정과 관련된 문제들은 Gupta와 Sorooshian (1985), Sorooshian 등 (1993)이 고찰한 바 있다.

지난 수년동안에 등장한 새로운 방법은 전문가 시스템에 기반을 둔 기법이다. 전문가 시스템은 1차 술어논리구조 (predicate logical frame)에 지식을 도입하여 전문가 차원에서 이를 조작하도록 하는 컴퓨터 프로그램으로 정의할 수 있다. 이 방법의 아이디어는 경험있는 사용자로 하여금 차기수행 전에 매개변수 조정에 대하여 사용자가 어떻게 결정하여야 할지를 컴퓨터에게 가르치는 것이다. 규칙기반의 전문가 시스템의 예는 Azevedo 등 (1993)에서 찾아볼 수 있다.

매개변수 자동최적화는 1970년대에 활발하게 시도되었으나, 5.1절에서 지적한 바와 같은 문제점 때문에 현재로서는 그다지 많이 활용되지 못하고 있다.

5.3 물리적인 기반의 분포형 모델의 보정

지난 10년동안 지하수 모델링에서는 매개변수 자동 최적화기법 (역추적 모델링이라고 함)을 정립하기 위한 여러 연구들이 있어왔다 (Keidser와 Rosbjerg, 1991). 2차원 흐름문제에 적용할 수 있는 역추적기법 컴퓨터 프로그램들이 많이 있지만, 그렇게 많이 활용되지는 않는다. 용해물질 이동 및 3차원 모델에 대한 역추적 기법은 아직 연구단계에 있다.

MIKE SHE와 같은 분포형 유역 수문모델링 시스템에 대해서는 이 모델이 수많은 유역으로 구성되어 있고 이들간에 동적인 상호작용이 있기 때문에, 아직

적당한 최적화 기법이 없으며 연구가 진행되고 있지도 않다. 이와 같이 복잡한 모델에 최적화 기법을 적용하기에는 많은 문제가 있다. 가장 중요한 문제는 예를 들어, 유역내 여러 지점을 대상으로 한 유출, 토양수분, 지하수위를 참조할 수 있는 다기준 목적함수를 작성할 필요가 있다는 것이다.

또한 기상 또는 해양과 같은 다른 분야에서의 역추적 기법도 대대적인 투자를 통하여 수문분야에 적용할 수 있는 도구로 제공될 수 있기를 기대한다. 분명 현재로서는 역추적 기법이 다음 세대의 분포형 수문 모델을 실용화시킬 수 있는 가장 확실한 방법이다.

6. 모델의 검증

6.1 개요

모델이 많은 수의 매개변수를 가지고 있다고 하더라도, 짧은 모의기간에 대하여 관측자료와 모의결과간에 수용할만한 일치를 가져다 줄 수 있는 매개변수의 조합을 찾아내는 것은 가능하다. 이는 모델의 구조가 불완전하거나 또는 수문시스템을 개념적으로 잘못 접근하였다 하더라도 가능하다. 결과의 일치는 제대로 된 매개변수들의 조합을 찾았다는 것을 반드시 보장하지는 않는다. 그 이유는 보정을 통한 매개변수 값들이 물리적으로 타당하다는 것을 고려하지 않고, 단지 곡선의 모양을 맞추는 과정을 통하여 평가되기 때문이다. 이는 동일한 모델을 여러 사람이 보정을 수행하더라도 서로 다른 매개변수 값의 조합으로 모두 좋은 보정결과를 얻어낼 수 있다는 사실로 알 수 있다.

보정된 모델을 다음에 사용해도 문제가 없다는 것을 평가하기 위해서는 보정에 사용된 자료와 다른 자료들을 대상으로 검증되어야 한다 (Stephenson과 Freeze, 1974). Klemes (1986)는 "모의모델은 특별히 의도하는 작업들을 제대로 수행할 수 있는지를 보여주기 위하여 검증이 반드시 필요하다"고 언급하였다.

모델의 검증은 "특정지역에 부합하는 모델이 어떠

한 연구에 대하여 수행기준에 명시된 정확도 범위 내에서 모의결과를 얻어낼 수 있다”는 것을 입증하는 것이다. 이를 위하여 6.2절에서는 검증의 일반적인 방법을 설명하고, 6.3절에서는 집중형 및 분포형 모델의 검증에 필요한 내용들을 다루고자 한다.

6.2 체계적인 검증을 위한 방법

Klemes (1986)는 수문학적 모의모델의 검증절차를 체계화하기 위하여 체계적인 방법을 제안하였다. 계층적이라고 하는 이유는 모델링 작업이 복잡해질수록 검증과정도 동시에 많아지기 때문이다. 이 방법은 원래 강우-유출 모델링을 개발되었지만, 범용적으로 적용될 수 있다.

Klemes (1986)는 보정에 사용된 유역에 대하여 수행한 모의와 미계측 유역에서 수행한 모의를 구분하였다. 그는 또한 유역조건 (기상, 토지이용, 지하수 채수 등)이 정상상태인 경우와 그렇지 않은 경우를 구분하였다.

이와 같은 구분으로 모델 검증방법은 다음과 같이 4가지 기본적인 유형으로 정리할 수 있다:

- A: 기간분할 검증 (Split-sample test): 3-5 년 간의 자료를 이용한 모델의 보정 → 비슷한 기간의 타 기간에 대한 검증
- B: 시차 기간분할 검증 (Differential split-sample test): 유역의 변화가 발생되기 전에 대한 모델의 검증 → 변화를 특성화하는 매개변수의 조정 → 변화 후의 기간에 대한 검증
- C: 대표유역 검증 (Proxy-basin test): 직접적인 보정을 수행하지 못할 경우에 타 계측유역의 정보 활용. “계측유역과 유사한 성질을 보이도록 검증유역 구성 → 초기보정 → 검증유역의 실제 조건을 반영하는 매개변수의 조정을 포함한 모델 전이 → 검증” 순으로 구성한 검증
- D: 시차 기간분할 대표유역 검증 (Proxy-basin differential split-sample test): 직접적인 보정을 수행하지 못할 경우에 타 계측유역의 정보 활용. “계측유역의 초기보정 → 검증유역에

모델전이 → 변화 전후의 기간을 대표하는 두 매개변수 집합의 선정 → 두 기간에 대한 순차적 검증”으로 구성한 검증

6.2.1 기간분할 검증

기간분할 검증은 보정과 검증을 위한 장기간의 충분한 자료가 있고, 유역의 조건이 변화하지 않은 경우에 적용가능한 전형적인 방법이다.

사용가능한 자료는 두 부분으로 나누어진다. 보정은 두 부분 각각에 대하여 차례로 수행한 후, 다른 한 부분에 대하여 검증한다. 보정과 검증은 모두 적합한 결과를 보여야 한다.

이 검증방법에 있어서의 문제점은 모든 자료를 보정에 활용하지 않는다는 것이다. 따라서 두 부분으로 나눌 때, 이 부분들이 충분한 보정을 수행할 수 있는 기간의 자료이어야 한다. 한편 두 보정기간에 대하여 만족할만한 검증이 된다면, 모델은 최종적으로 전 기간의 자료에 대하여 보정된 것이다.

6.2.2 시차 기간분할 검증

이 방법은 계측유역의 가용자료에 대응하는 변수들과는 다른 조건하에서 유출량, 지하수위, 기타 변수들을 모의하기 위하여 적용할 필요가 있다. 이 방법은 모델링의 자체 특성과 관련된 여러 가지 변수들을 대상으로 한다.

예를 들어, 기후변화에 따른 영향을 모의하고자 할 경우에 다음과정을 거쳐야 한다. 과거자료를 이용하여 강수량이 많은 기간과 적은 기간과 같이 기후 매개변수 값이 서로 다른 두 기간으로 구분한다. 습윤 기후 시나리오에 대하여 하천유출을 모의하고자 한다면, 과거자료를 토대로 건조기간에 대하여 보정한 후에 습윤기간에 대하여 검증하여야 한다.

토지이용의 변화에 따른 예측, 지하수 채수에 의한 영향 등과 같은 유사한 변수들에 대해서도 마찬가지로 과정이 요구된다. 모델의 수행능력은 천이기간에 대한 검증을 통하여 증명되어야만 한다.

■ 학술기사

분포형 수문모델의 구축, 보정 및 검증

6.2.3 대표유역 검증

이 방법은 유역의 보정을 위한 자료가 충분히 확보 되지 못한 경우에 적용한다. 예를 들어, 미계측 유역 Z에 대하여 하천유출을 예측할 경우에, 두 계측유역 X와 Y를 선정한다. X 유역에 대하여 모델을 보정하고, Y 유역에 대하여 검증한다. 또한 반대의 경우에 대하여 수행한다. 두 검증결과가 수용할 만하고 유사

한 형태를 보인다면, Z 유역에 대하여 하천유출을 모의할 수 있는 기본적인 능력이 생겼다고 말할 수 있다.

6.2.4 시차 기간분할 대표유역 검증

이 방법은 대상유역의 보정을 위한 준비자료가 없고, 비정상 상태에 대한 예측을 목적으로 하기 때문

표 1. 분포형 모델의 검증을 위하여 대기준 및 대규모 기준을 도입해야 하는 필요성 예시

구 분	개념적 집중형	물리적인 기반의 분포형
결 과	단일 지점: * 유출 → 단일 변수	다 지점: * 유출 * 지표수 수위 * 지하수 수위 * 토양수분 → 다 변수
성공 기준 (어떠한 통계기준을 사용하여야 할지에 대한 선정문제는 제외)	관측치 vs. 모의발생치 * 유출, 단일 지점 → 단일 기준	관측치 vs. 모의발생치 * 유출, 다 지점 * 수위, 다 지점 * 지하수위, 다 지점 * 토양수분, 다 지점 → 다 기준
전형적인 모델의 적용	강우-유출 * 정상 조건 * 보정자료 존재	강우-유출, 불포화지역, 지하수, 수질모델링, 인간활동에 의한 영향 * 때로는 비정상 조건 * 보정자료가 항상 존재하는 것은 아님
검증방법	일반적으로 기간검증으로 충분함 → 잘 정립된 방법 존재함	보다 향상된 검증방법 요구됨 * 시차 기간분할 검증 * 대표유역 검증 → 엄격한 방법이 요구됨
모델링 규모	모델: 유역규모 현장자료: 유역규모 → 단일 규모	모델: 격자 해상도에 따라 다름 현장자료: 다양한 규모 → 대규모 문제

에 수문모델이 거쳐야 할 가장 강력한 검증방법이다.

6.3 집중형 및 분포형 모델의 검증시 차이점

집중형 및 분포형 모델의 검증과정은 기본적으로 동일하지만, 모델구조, 계산방식, 적용목적이 다르기 때문에 분포형 모델이 훨씬 더 포괄적인 검증을 요구한다. 유역출구에서 관측유량과 모의 유량을 비교하는 전형적인 검증은 아직도 대개의 경우 실질적인 방법으로 활용된다. 그러나 Rosso (1994)가 지적한 바와 같이, 이 방법은 공간적으로 분포하는 모델링에서는 부족한 면이 많다. 표 1은 두 모델간의 차이점을 제시하면서 다기준 (multicriteria), 다규모 (multi-scale)에서의 검증기준이 필요하다는 것을 보여주고 있다.

표에서 분포형 모델이 연구목적과 출력사항들을 보다 많이 요구하기 때문에, 검증기준은 보다 엄격하여야 한다. 한 유량관측소의 하천흐름을 모의하는 것이 목적이라면 그 지점 (예: 유역 출구점)에서의 검증만으로 충분하지만, 유역내에서의 흐름상태를 표현하는 데에는 이러한 검증만으로는 충분하지 못하다. 단일 유량관측소에 근거하여 전체적인 물수지는 맞게 모의될 수 있겠지만, 예를 들어, 증발산량의 과소추정은 유역전체 또는 일부에 대하여 비현실적인 지하수위의 분포를 초래할 것이다.

기본적으로 우리가 예측하고자 하는 각각의 변수들을 충족시킬만한 검증기준이 필요하다. 공간적인 분포를 예측하고자 한다면, 다 지점 (multi-site)을 대상으로 하는 보정과 검증이 요구되며, 유역내 부시스템들의 거동을 예측하고자 한다면, 상호 연관성이 있는 여러 변수 (multi-variable)들을 확인하는 것이 요구된다. Styczen과 Storm (1995)은 질산염의 누출을 추정하기 위하여 모의된 지하수 충전율이

맞게 모의되었는지를 확인하기 위해서는 하천유출량과 지하수위의 경향을 함께 보정하는 것이 필요하다는 것을 보여주었다.

관개지구에서 지하수위의 변동을 모의하기 위하여 Storm과 Punthakey (1995)은 MIKE SHE를 활용하였다. 보정을 위하여 매우 상세한 지하수위 관측망 자료들이 사용되었지만, 배수와 관련된 자료는 준비되지 못하였다. 따라서 지하수로의 실제 이동량이 제대로 모의되었는지는 확신할 수 없었다.

7. 포괄적인 모델링 시스템의 현실성

원칙적으로 모델링 시스템은 결코 검증될 수 없다. 완벽한 검증이라는 말보다는 "대상 모델링 시스템의 신뢰도"로 표현하여 검증의 정도로 생각할 수는 있다. 모델링 시스템의 검증정도는 모델링 시스템을 통하여 지금까지 구축하여 온 모든 모델들의 성공적인 검증들의 집합이라고 표현해도 좋을 듯 싶다. 성공적인 모델의 개수가 늘어날수록, 시스템 자체의 신뢰도는 높아지게 된다.

사실 대부분의 피상적인 관점에서 보면, 모델링 시스템은 운영경험에 따라서 향상된다는 가정을 가지고 있다: 시장에서 기능을 제대로 발휘하고, 시장의 요구도를 따라가면서, 시장으로부터 배워 간다는 것이다. 이러한 관점에서 모델링 시스템의 발전은 종료되는 또는 완성되는 생산물로 이끌어 가는 것이 아니라, 오히려 진화를 통한 적응과정이라고 할 수 있다. 따라서 모델링 시스템이 부차적인 생산물일지라도, 이는 끊임없이 진화하며 이러한 진화는 하나의 과정이라 할 수 있다. 이러한 발전의 일반적인 원칙들은 Floyd (1987) 이후부터 논의되어 왔다. 🌱

〈 참고문헌 〉

- AitKen, A.P.(1973) Assessing systematic errors in rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology*, 20, 121-136.
- Azevedo, L.G, Fontane, D.G. and Porto, R.L. (1993) Expert system for the calibration of SMAP. *Water International*, 18, 103-109.
- DHI(1993) Validation of hydrological models, Phase II. Unpublished research report. Danish Hydraulic Institute, Horsholm.
- Fleming, G. (1975) *Computer Simulation Techniques in Hydrology*. Elsevier.
- Floyd, C. (1987) Outline of a paradigm change in software engineering. In Bjerknes, G., Eha, P. and Kyng, M. (Eds.) *Computers and democracy*. Avebury, Aldershot, UK, and Brookfield, USA.
- Green, I.R.A. and Stephenson, D. (1986) Criteria for comparison of single event models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(3), 395-411.
- Gupta, V.K. and Sorooshian, S. (1985) The automatic calibration of conceptual catchment models using derivative-base optimization algorithms. *Water Resources Research*, 21, 473-486.
- Jain, S.K., Storm, B., Bathurst, J.C., Refsgaard, J.C and Singh, R.D. (1992) Application of the SHE to catchments in India - Part 2: Field experiments and simulation studies on the Kolar Subcatchment of the Narmada River. *Journal of Hydrology*, 140, 25-47.
- Keidser, A. and Rosbjerg, D. (1991) A comparison of four inverse approaches to groundwater flow and transport parameter identification. *Water Resources Research*, 27, 2219-2232.
- Klemes, V. (1986) Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31, 13-24.
- Nash, I.E. and Sutcliffe, I.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models, Part I. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- Refsgaard, A., Refsgaard, J.C., Jorgensen, G.H., Thomsen, R. and Sondergaard, V. (1994) A hydrological modelling system for Join analyses of regional groundwater resources and local contaminant transport. Unpublished note. Danish Hydraulic Institute, 28pp.
- Refsgaard, J.C., Seth, S.M., Bathurst, J.C., Erlich, M., Storm, B., Jorgensen, G.H., and Chandra S. (1992) Application of the SHE to catchment in India-Part 1: General results. *Journal of Hydrology*, 140, 1-23.
- Rosenbroch, K.H. (1960): An automatic method for finding the greatest or least value of a function. *The Compute Journal*, 7(3).
- Rosso, R. (1994) An introduction to spatially distributed modelling of basin response. In Rosso, R., Peano, A., Becchi, I. and Bemporad, G.A. (Eds): *Advances in Distributed Hydrology*, Water Resources Publications, 3-30.
- Sorooshian, S., Duan, Q. and Gupta, V.K. (1993) Calibration of rainfall-runoff models : Application of global optimization to the Sacramento soil moisture accounting model. *Water Resources Research*, 29, 1185-1194.
- Stephenson, G.R. & Freeze, R.A. (1974) Mathematical simulation of subsurface flow contributions to snowmelt runoff, Reynolds Creek Watershed, Idaho. *Water Resources Research*, 10, 284-294.
- Storm, B. and Punthakey J.F. (1995) Modelling of environmental change in the Wakool Irrigation District. MODSIM 95, International Conference, Newcastle, Australia.
- Styczen, M. and B. Storm (1995): Modelling the effects of Management Practices on Nitrogen in

soils and Groundwater. In : P.E. Bacon (Ed.)
Nitrogen Fertilization in the Environment. Marcel
Dekker. Inc. New York.

Todini, E. (1988) Rainfall-runoff modelling : past,
present and future. Journal of Hydrology, 100,
341-352.