

# 수문모형의 과학적 근거와 한계에 대한 세계기상기구의 입장<sup>1)</sup>

WMO Statement on the Scientific Basis for,  
and Limitation of, Hydrological Modeling (Draft)

세계기상기구 수문위원회

## 머리말

P.0

우리의 귀중한 수자원에 대한 수요가 갈수록 증가하면서 가용한 수자원을 산출하고 홍수위나 침수지역을 예측하는데 관련되는 과학적 불확실성에 대한 문제가 더욱 중요해지고 있다. 최근 세계기상기구는 기상과 기후 예보의 과학적 근거와 한계에 대하여 성명을 발표한 바 있다. 기상과 기후는 당연히 수문 예측과 예보의 불확실성에 직접적인 영향을 미칠 수밖에 없다.

수문모델링에서는 입력자료와 모델링을 위한 가정 때문에 본래부터 불확실성이 내재될 수밖에 없다는 것이 잘 인식되어 있다. 이와 같은 불확실성은 당연히 이해되고, 평가되고 또한 투명한 형태로 보고됨으로써 계획단계의 중요 인자로 이용될 수 있어야 하며, 수문 연구는 이와 같은 역할을 담당해야 한다.

## 수문분석

P.0

일반적으로 수문분석은 수문동력학, 열역학, 그리고 정력학과 같은 이미 잘 정립된 원칙을 바탕으로 하고 있다. 그렇지만 수문분석의 핵심 문제는 이와

같은 원칙을 비균질적이고 성긴 표본을 가지고 있는 자연환경에 적용하는 데서 발생한다. 표본으로 추출된 사상들은 대개는 비계획적이고 비통제적인 것이다. 분석은 변수에 대한 시공간적 정보, 지역 일반화, 그리고 변수간의 관계를 얻기 위해서 수행된다. 자주 적절한 성분은 직접적으로 측정되지 않는다.

분석은 확률론적, 모수적(parametric), 비모수적, 확률적, 그리고 추계학적 방법과 같은 여러 다른 방법으로 수행된다. 확률론적 접근에 근거한 분석은 물리와 화학적 과정을 나타내는 법칙을 따른다. 모수적 접근 방법에서는 서로 다른 지점과 시간에 기록된 수문자료를 상호 비교하는 것으로 분석이 수행된다. 확률론적 접근 방법에서는 수문변수의 서로 다른 크기별 발생 빈도가 분석된다. 추계학적 접근 방법에서는 서로 다른 크기의 발생에 대한 연속되는 순서와 빈도가 함께 분석된다.

변수 중에는 수위나 유속과 같이 직접 측정되거나 유량과 같이 측정치로부터 직접 계산되는 것들도 있다. 변수 중에는 유역 전반에 대한 강우량처럼 직접 관측치의 표본치로 계산되는 것도 있다. 호소 증발과 같은 다른 변수들에 대한 평가는 아직 간접적으로만 가능하다.

1) 이 자료는 2004. 10. 20~29 스위스 제네바에서 개최된 세계기상기구 수문위원회 회의자료를 번역한 것임.  
(수자원의지속적확보기술개발사업단 김승 / skim@kict.re.kr)



제12차 WMO 수문위원회가 개최된 제네바 레만호에서 바라본 몽블랑 정상  
(정면의 만년설이 덮인 희미한 높은 봉우리)

많은 경우 측정된 변수들은 분석을 위해 가장 적절한 것이 아니다. 예를 들어 직접유출을 분석할 경우, 유량곡선(hydrograph)은 어떤 특정한 강우 사상과 관련된 부분은 유량곡선의 나머지와 구별되도록 성분별로 분리된다. 이와 같은 분리는 물리적인 측정정보보다 해석 모형에 근거한 계산에 의해 수행된다. 분석은 사례 연구와 다량의 자료에 대한 통계 검토를 포함한다. 통계분석은 자료를 빈도 분포와 회귀 또는 시계열 해석으로 모수 모형에 적합시키는 것을 포함한다. 도출된 관계의 신빙성은 독립적인 자료로 시험되어야 한다. 유량곡선의 재구성은 전형적인 수문 시험이다.

분석에 대한 구체성과 정확성은 가용한 자료의 질과 표본의 적절성, 그리고 해석의 적용에 요구되는 정확도와 일관성이 있어야 한다. 분석에 소요되는 비용 및 시간과 그로부터 기대되는 수익과의 관계도 고려되어야 한다. 많은 경우 도시적이나 비교적 간단한

계산 방법들이 좀더 정교한 방법들보다 비용측면에서 효과적이며, 자료와 목적을 고려할 경우 충분히 정확할 것이다.

## 수문 모델링

수문시스템의 모델링이라는 용어는 대개는 흐름 특성들(출력변수)과 흐름-구성 인자들(입력변수)과의 정량적인 관계를 정의하는 수학적 또는 논리적인 표현의 적용을 의미한다. 이것은 일반적인 정의로서 이와 같은 접근 방법들을 모두에게 적용될 수 있다. 극단적인 경우는 완전히 경험적인 접근인데, black-box 기법이다. 즉, 내적 구조나 유역의 반응에 대한 모형을 전혀 시도하지 않고 유역 시스템의 입력과 출력을 일치시키는 기법이다.

또 다른 극단적인 경우는 수문 과정을 지배하는 물리적 법칙과 이론적 개념에 근거한 수식들의 복합적

인 시스템을 포함한 접근 방법-소위, 수문동력학적 모형-이다. 이 두 극단적인 경우 사이에는 다양한 개념 모형이 있다. 이들 모형들은 단순한 개념 요소의 논리적인 고려라고 할 수 있는데, 예를 들면 유역에서 발생하는 과정을 모의하는 선형 또는 비선형 저수지나 수로 같은 것이다. black-box 개념 또는 수문동력학 모형들은 출력을 생산하지만 이와 관련된 확률을 제시하지는 않는다. 이런 이유 때문에 이들은 가끔씩 확정론적 모형으로 불린다.

그러나 수문시스템의 모델링이라는 용어는 가끔은 추계학적 모델링을 포함하는 것으로 간주되는데, 그 경우 수문 시계열의 통계적 특성을 재생하는 것이 강조되어 있다. 입력-출력의 관계를 모델을 시도하는 것은 아니다.

완전히 경험적이고 black-box 관계가 일부 여건에서는 매우 유익하다고 입증되었거나 지속적으로 입증될 것이다. 그러나 과거 경험하지 못했던 여건에도 의존해야 할 경우 심각한 오류를 범하기 쉽다. 이론적인 개념을 통해서 개발된 모형들은 변하면서 상호 작용하는 수문 과정을 다룰 때 그와 같은 극한적인 조건에서 좀더 신뢰감을 주며, 더욱이 관련 실험은 과학의 발전을 보장해 준다. 확정론적 모형들을 수문동력학적, 개념적, 또는 black-box 모형으로 구분하려는 어떤 시도도 어느 정도 경험적 결정을 수궁하도록 요구하는 것이다. 그럼에도 불구하고, 확정론적 모형을 다루는데 이와 같은 구분을 따르는 것은 상당히 적절하다.

수문시스템의 모델링에서 개발은 컴퓨터와 적용기술의 등장과 밀접하게 관련되어 있다. 전산 컴퓨터의 가용과 관련 수치 방법의 개발은 수문학자가 많은 자료를 사용하는 복잡하고 반복적인 계산을 가능하게 해주었다. 하천흐름의 모델링은 용수공급과 통계의 계획과 관리, 그리고 하천 예보와 경보 서비스를 제공하는 데 중요한 요소가 되었다.

수자원관리 계획을 개발할 때 수문 연구는 그 시점에서 가용한 최선의 과학을 바탕으로 하는 것이 필수적이다. 최근의 과학과 기술을 파악하기 위해서 기술자문 패널은 좋은 모형이라고 할 수 있다.

## 수문예보

수문예보란 미래의 수문현상의 상태를 추정하는 것이다. 이와 같은 예보의 필요성은 한 국가의 경제와 수자원의 이용이 늘어 갈수록 증가하는데, 이것은 이들 자원의 최선의 관리를 의미한다. 그러나 수문예보는 모든 국가 개발 단계에서 홍수, 가뭄과 같은 자연재해를 저감하는데 필수적이다.

수문 예보와 경보는 돌발홍수와 같은 단기 사상에서부터 관개나 수력발전 또는 내륙주운을 위한 가능수자원 공급에 대한 계절 전망과 같이 다양한 목적을 가지고 발령된다. 예보기술은 간단한 경험식이나 상관관계식에서부터 하천유역에 대한 모든 과정의 물수지를 나타내는 복잡한 수학적 모형의 사용까지 큰 범위에 걸쳐 있다.

미래의 어떤 특정한 시간에 대한 수문체계의 특정한 요소에 대한 양을 산정하는 것이 통계 계산과 수문예보가 확연하게 다른 점이다. 통계 계산에서는 수문학자들은 단지 어떤 요소에 대한 기대확률을 계산할 뿐이다. 수문 과정은 동력은 기상 요소에 의해 가동된다. 그러나 이러한 요소의 변동이 곧바로 체계의 변동으로 나타나는 것은 아니다. 예를 들면 강수에 의해 유발되는 유출기간은 자주 강우 자체의 기간보다도 몇 배나 긴 경우가 많으며, 유발인자인 기온의 상승과 응설, 그리고 이에 따른 하천수위의 상승 간에는 시간지체의 간격이 존재한다. 수문 현상이 상대적으로 느리게 발달하고 상대적으로 빠른 기상 현상보다 한 템포 지체되기 때문에 수문순환의 몇 개 요소를 예보할 수 있는 것이다.

수문예보의 가치는 크게 말해서 예보의 정확도에 달려 있다. 정확도의 요구는 예보의 사용에 적절해야 한다. 그러나 정확도는 예보의 적시성과 함께 고려되어야 한다. 예보를 평가하는 범위에는 정확도와 적시성이 함께 포함되어야 한다. 정확성과 적시성은 수문 및 기상 정보의 신뢰도와 양, 그 같은 정보가 예보센터에 제공되는 속도, 하천 유역의 지체 시간, 사용되는 예보 방법 또는 모형의 종류, 그리고 사용자에게

예보를 전달하는 데 필요한 시간에 좌우된다.

측정 오차, 모형 한계, 그리고 수문시스템에 대한 기상 입력의 자연적 변동성들이 수문예보의 불확실 요인이다.

다음과 같은 방법이 이미 개발되어 있다.

- (a) 수문계측의 정확도를 평가하는 것.
- (b) 수문시스템에 대한 기상 입력의 자연적 수문학적 변동성을 정량화하는 것, 확률분포로 또는 추계학적 절차로 하든지.
- (c) 수문모형의 정확도를 계산된 결과를 관측된 자료와 비교함으로써 경험적으로 평가하는 것.

이 같은 방법을 바탕으로 예보자는 전체 오차를 추정해 이 정보를 사용자에게 필히 제공해야 한다. 그러나 이와 같은 평가의 주 수혜자는 예보 절차의 가능한 개선을 제안할 수 있으므로 예보자 자신이다. 예보에 따라 취할 대책을 결정하는 것과 관련된 위험을 평가해야 하는 일부 사용자에게는 확률예보가 또한 유용하다.

정량적 강수 예보(quantitative precipitation forecasts, QPF)는 확률예보로 받아들일 수 있다. 미래 조건에 대한 불확실성이 특히 강수의 발생, 수문예보 불확실성의 주요 원인이다. 예를 들면 레이더, 인공위성, 기상 관측과 예보, 그리고 지표면 관측 등 모든 출처의 자료를 최대한 사용하기 위한 새로운 방법들이 개발되고 있다.

## 결론

II

20세기 중반 이후 수문 모델링 및 예보 기술이 상당히 발전했다. 이것은 상당 부분 계산, 관측, 그리고 통신시스템의 발전으로 가능했다. 그리고 이것은 수문학자들과 의사결정자들이 출력물을 사용하는 방대한 경험을 축적함으로써 촉진되었다. 그럼에도 불구하고 수문 모델링, 예측, 그리고 예보의 과학과 기술 안에 있는 각 요소에는 그 자체의 불확실성이 존재한다. 이것들의 일부는 완전한 이해의 부족과 관련되어 있거나 고도로 복잡한 과정에 대한 원천적인 한계와 관련되어 있다. 다른 것들은 아직 관측이나 계산 기술의 발전의 필요성과 관련되어 있거나 연구와 운영간의 부적절한 기술이전과 관련되어 있다. 마지막으로 충분한 상급교육을 받은 사용자들에 대한 예보를 포함해서 적절하게 의사교환이 가능한 수문산출물의 중요성을 과소평가해서는 안 된다.

의심할 것도 없이 과학적 연구와 여기에서 얻은 지식을 수문 모델링과 예보 실무에 적용시키는 지속적인 관심을 기울이면 상당한 혜택을 받게 될 것이다. 더욱이 수문 모델링이나 예보의 입력인 기상 예보와 기후 전망의 한계를 인식하고, 가능하다면 불확실 정도를 추정하면, 의사 결정자들이 예보와 다른 수문 정보를 이해하고 사용하는 것을 개선하게 될 것이다. 궁극적 목적은 과학자와 사용자 커뮤니티가 함께 일함으로써 더욱 큰 혜택을 실현시킬 수 있다.