

신뢰도 분석방법의 수문모형에의 적용

김문모 (신구전문대학 토목과 조교수)

1. 서론

공학적인 설계에 자주 사용되고 있는 신뢰도 분석 방법은 주로 구조물의 안전여부를 판단하기 위하여 구조공학자들에 의해 주로 발전되어 왔다. 그러나, 최근에는 수자원 시스템에 대한 수문학적 사상의 영향을 평가하고 적절하게 수행되도록 시스템의 주요 변수를 결정하는 과정인 수문학적 설계에도 적용되고 있다. 예로 부터 인류는 인재에 의한 것이든 천재에 의한 것이든 여러가지 요인들에 의하여 홍수피해를 입어오고 있다. 특히, 근간의 급격한 산업화와 도시화에 따라 유출특성이 변화 (도달시간이 단축되고 침투 유량은 증가) 하고 있으며, 인구, 재산의 밀집으로 호우시 그 피해규모는 대단히 커지고 있다. 따라서, 홍수피해를 방지하기 위해서 여러가지 인위적인 수공구조물을 하천에 설치하며, 대하천에 있어서는 피해를 다소라도 줄이기 위해 홍수예경보 시스템을 설치, 운영하고 있다. 이러한 수공구조물의 설계나 평가에는 여러가지 강우 - 유출 모형에 의해 유출수문곡선을 구해 안정성과 경제성을 판단하게 된다. 또한, 자연하천에서의 홍수경보나 홍수방어를 위한 시스템의 실시간 예측을 위해서는 여러가지 수문모형을 필요로 하게 되는데 이러한 수문모형의 적용상에는 많은 불확실성이 내포되어 있다. 수문모형의 신뢰도 분석에서 불확실성이 발생하는 요인으로는 다음과 같이 크게 4가지로 나눌 수 있다.

- a. 자연적인 것
- b. 수문자료 자체에 포함된 것

- c. 모형의 매개변수에 포함된 것
- d. 모형의 구조에 포함된 것

이러한 불확실 성분은 기설 또는 신설 수공구조물의 평가나 설계에 영향을 주게 되는데, 이와 같이 수문사상에 영향을 미치는 불확실 성분을 고려한 신뢰도 분석기법으로는 다음과 같은 4가지 방법이 있다.

- a. Direct Integration Method (직접적분법)
- b. Monte Carlo Simulation Method (Monte Carlo 모의법)
- c. Mean Value First - Order Second Moment Method (MVFOSM 법)
- d. Advanced First - Order Second Moment Method (AFOSM 법)

위의 분석기법들은 나름대로의 장단점을 가지고 있으며, 이와 같은 분석기법을 통하여 홍수사상을 보다 정확하게 정량화함으로써 하천홍수량의 실시간 예측과 예보를 가능하게 하며, 이는 종합적인 치수·방재에 기여할 수 있을 것이다.

2. 신뢰도 분석방법의 수문모형에의 적용

2.1 일반적인 구조

수문모형의 신뢰도와 수문사상의 예보, 예측을 수행하기 위하여 수문모형을 신뢰도분석과 결합하는 과정의 기본적인 구조는 그림 1 과 같이 나타낼 수 있다. 이것은 신뢰도 분석과정과 의사결정을 위한 수문

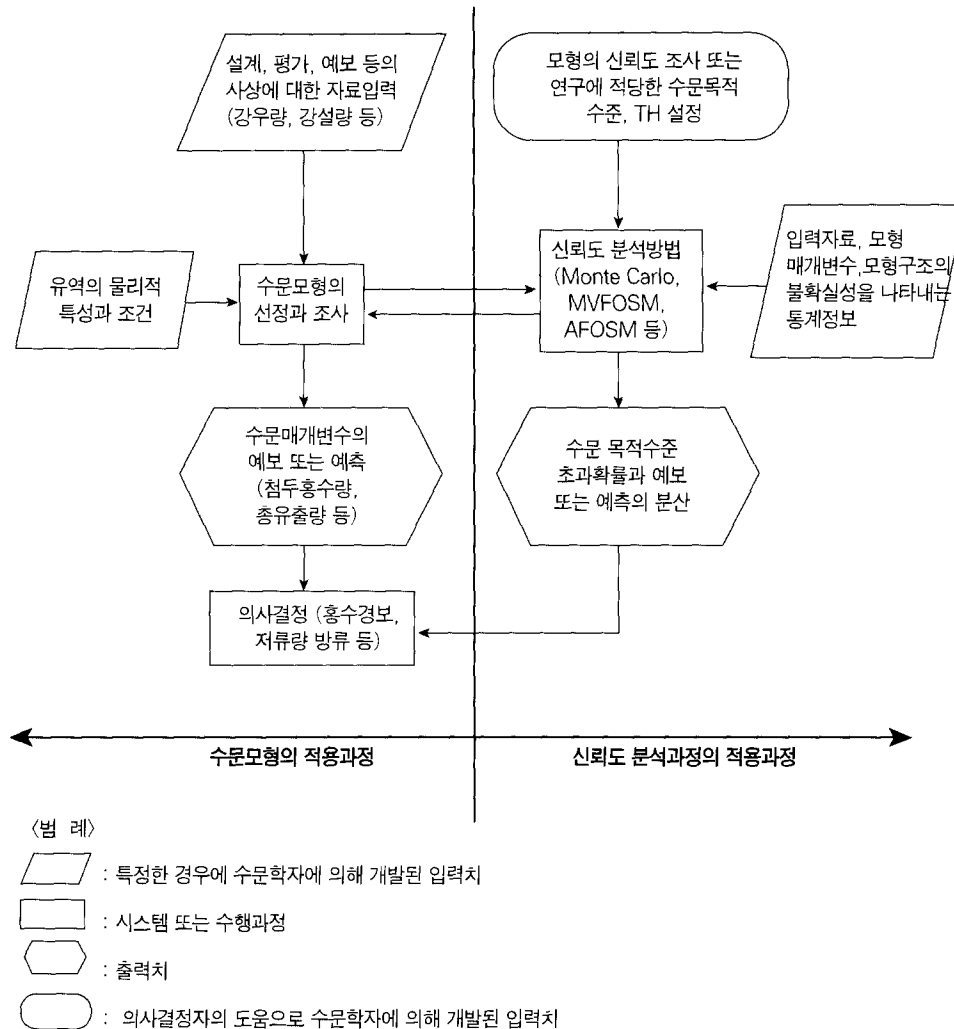


그림 1. 의사결정을 위한 신뢰도 분석방법과 수문모형의 결합에 대한 흐름도

모형의 적용사이에 상호관계를 나타내는 흐름도이다. 신뢰도 분석방법과 수문모형 사이의 이 중 화살표는 두개 사이에 상호작용을 하는 것을 나타내고, 여기에서 신뢰도 분석방법은 유용성과 불확실성이 계산되어지는 시스템의 실행을 나타내기 위하여 수문모형을 사용한다. 이러한 일반적인 구조는 직접적으로 비선형 편미분방정식 (예를 들어, Dynamic Wave Flood Routing) 을 포함하지 않는 어떤 수문모형에도 적용이 가능하다. 그러므로 이와 같은 구조에 알맞는 수문모형들은 실시간 홍수예보나 설계수문곡선 산정에 사

용되게 된다. 일반적인 과정에 사용되는 가장 중요한 가정은 수문모형과 기본변량 (입력자료, 모형의 매개변수, 모형구조 보정계수) 들의 불확실성이 자연적인 강우 - 유출 과정에서 실제의 변동성을 적절하게 묘사한다고 보는 것이다. 특정한 수문목적 수준이 사전예보에 의해 초과하거나 예측설계 수문곡선을 만나는 실제 확률을 계산하기를 원한다면 이러한 가정은 올바른 것이되며, 만일 모형의 상대적인 신뢰도나 설계의 경우를 예측, 예보, 비교하는 모형의 신뢰도를 평가하기 원한다면, 상기의 가정은 근사될 필요가 없다.

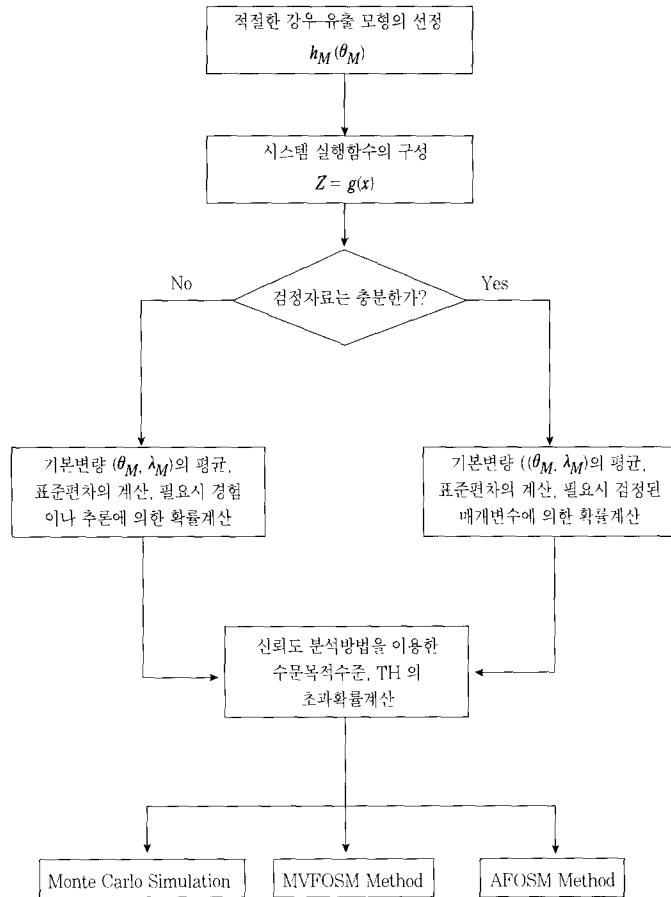


그림 2. 수문모형에 신뢰도 분석방법을 사용하는 과정의 흐름도

이러한 경우에, 기본변량의 불확실성의 설명은 정확하고 일관성 있게 결정되어야 한다. 그림 2는 수문목적 수준 초과확률을 결정하기 위하여 신뢰도 분석을 사용하기 위한 일반적인 과정의 흐름도를 나타낸다.

이러한 신뢰도 분석기법을 적용하기 위한 접근방법의 첫 단계는 수문학자들이 사용하기 편하다고 느끼거나 문제에 적합하다고 생각되는 모형을 선택하는 것이다. 두번째 단계는 시스템 실행함수, Z 를 결정하는 것이다.

$$Z = T_H - \lambda_m h_M(\theta_M) \quad (1)$$

또는

$$Z = \ln \left\{ \frac{T_H}{\lambda_m h_M(\theta_M)} \right\} \quad (2)$$

여기서,

T_H = 초과확률을 갖게되는 수문목적 수준

λ_m = 모형의 최적실행과 계산된 수문정보의 참값 사이에 상호관계를 나타내는 모형보정계수

$h_M(\cdot)$ = 해당 수문정보의 모형의 계산치를 나타내는 함수

θ_M = 모형 기본변량의 벡터 - 모형구조 보정계수 즉, θ_M 은 입력자료와 모형의 매개변수를 포함한다

만일, 계산되는 수문정보가 호우사상(실제호우 또는 설계호우)으로 부터 결과되는 첨두홍수량이라면, 목적수준 T_H 는 모형예보 또는 예측의 신뢰도를 조사하기 위해서 실측첨두홍수량과 같게 둔다. 또한, 이것은 홍수수준 초과확률을 계산하기 위해서 한계홍수위와 같게 놓는다. 예측 또는 예보의 신뢰도를 산정하는데 있어서, 실측 첨두 초과확률은 신뢰도의 측정치가 아니다. 반면에, 신뢰도는 초과확률로부터 결정될 수 있는 정규화된 예보

표준편차의 향으로 실측첨두와 예보첨두 사이의 차이로 나타내어 진다. 이러한 접근은 수문곡선 첨두계산에 제한되지는 않으며 또 다른 수문정보, 예를 들어 유출량, 홍수와 도달시간 등과 같은 모형계산치의 신뢰도 검사에도 적용될 수 있다.

가장 중요한 세번째 단계는, 모형의 기본변량 각각의 불확실성을 나타내는 측정치를 계산하는 것이다. 공학 시스템에서 불확실성을 분석하기 위해서, MVFOSM 방법은 시스템 응답에 영향을 주는 여러 가지 인자들 (즉, 기본변량들)의 평균과 표준편차를 알아야 한다. AFOSM 방법도 기본변량의 평균과 표준편차를 알아야 하며, 만일 확률분포를 알 수 있다면 이것을 사용할 수 있다.

Monte Carlo Simulation 법에서는 기본 변량 분포에 대한 가정을 필요로 한다. 그러나, 기본변량의 확률분포를 계산하기는 무척 어렵다. 검정된 모형에서, 만일 대표적이고, 균일하게 검정된 자료가 충분히 있다면, 검정된 매개변수 값에 대하여 통계적으로 분포를 적합하는 것이 가능하다. 검정되지 않은 물리모의 모형에서는, 개인적인 경험이나 책에 포함된 제안들에 기초하여 분포를 가정하여야 한다. 예를 들어, Rajendran 등 (1982)1) 은 유역 전반에 걸친 수리전도율 K_H 의 변동성을 설명하기 위하여 유역평균 수리전도율 K_H 에 대하여 대수정규분포의 축척계수를 적용하였다. 따라서 수리전도율은 대수정규분포를 하는 것으로 가정할 수 있다.

네번째 단계는 채택된 수문목적 수준에서 초과확률을 계산하는 것이다. 이 계산은 이용된 특정한 신뢰도 분석방법의 과정을 따라하게 된다.

2.1.1 Monte Carlo Simulation 법에서의 확률계산

Monte Carlo Simulation 법에서, 무작위 기본변량값은 그 변량의 대응 확률분포에 따라 발생된다. 모형의 Simulation 은 이러한 기본변량값을 사용해 수행되며, 실행함수가 계산된다. 수문목적수준 초과확률은 초과횟수 ($Z < 0$) 를 모의횟수로 나눈 비율로 계산된다. Monte Carlo Simulation 에 의해 계산된 위험도는 일정하지 않으나 시행횟수가 충분히 크면 참값에 아주 근사시킬 수 있다.

2.1.2 MVFOSM 법에서의 확률계산

MVFOSM 방법에서 신뢰도지수, β 는 다음과 같이 주어진다.

$$\beta = \frac{E[Z]}{\sigma_Z} \quad (3)$$

실제적인 여러가지 관점에서, β 는 정규분포를 따른다고 가정할 수 있으며, 수문목적수준 초과확률, P_E 는 대략 다음과 같다.

$$P_E = 1 - \phi(\beta) \quad (4)$$

강우 - 유출과정의 간단한 수치모형에서 편도함수, C_i 는 수치적으로 얻어질 수 있다. 예를 들어, 만일 합리식이 침투홍수량, Q_P 를 산정하기 위해 사용된다면

$$Q_P = C i_r A \quad (5)$$

C = 유역의 유출계수
 i_r = 강우강도 (in/hr)
 A = 배수면적 (acre)

시스템의 실행함수는 다음과 같다.

$$Z = T_H - \lambda_m C i_r A \quad (6)$$

또는

$$Z = \ln \left[\frac{T_H}{\lambda_m C i_r A} \right] \quad (7)$$

또한, 편미분의 결과는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z}{\partial \lambda_m} &= - C i_r A && \text{(식 6에서)} \\ &= - \frac{1}{\lambda_m} && \text{(식 7에서)} \\ \frac{\partial Z}{\partial C} &= \lambda_m C i_r A && \text{(식 6에서)} \\ &= - \frac{1}{C} && \text{(식 7에서)} \end{aligned} \quad (8)$$

해당 수문정보를 계산하기 위해 보다 복잡한 함수 관계를 사용하는 수문모형에서는, 편미분 값은 수치적으로 구할 수 없다 (λ_m 을 제외하고). 입력자료와 모형의 매개변수에서 편미분 값은 평균에서의 전방차분에 의해 근사된다.

$$\frac{\partial Z}{\partial x_1} \Big|_{\bar{x}} = \frac{Z(\bar{x}_j, \bar{x}_i + \Delta x_i) - Z(\bar{x})}{\Delta x_i} \quad (9)$$

여기서, \bar{x}_i 는 다른 모든 기본변량들이 그들의 평균에서 고정되어 있다는 것을 나타낸다. 적절한 Δx_i 의 선택은 특정한 모형과 기본변량에 대한 실행함수 민감도의 함수로 나타난다.

2.1.3 AFOSM 법에서의 확률계산

AFOSM 방법에서 신뢰도지수, β 는 변환된 정규 기본변량들의 경우에 다음과 같이 주어진다.

$$\beta = \frac{g(\underline{x}^*) + \sum_{i=1}^p C_i(x_i^N - x_i^*)}{\sum_{i=1}^p C_i \alpha_i \sigma_i} \quad (10)$$

여기서, 모든 기본변량들을 대응하는 정규분포로 변환하여야 하는 것은 아니다. β 는 식 (10)에서 \bar{x}_i^N 과 σ_i^N 대신에 기본변량들의 평균과 표준편차를 사용함에 의해 분포에 대한 가정 없이도 계산될 수 있다. 또한, 편미분값은 MVFOSM 법에서 처럼 계산될 수 있다. 전방차분법이 사용되어야 하는 경우에 x_w, x_{jw}, x_{iw} 는 \underline{x}^* 를 찾기 위해 사용된 반복에서의 점인 w 점에서 취해진 부분을 나타내기 위해서 식 (9)에서 \bar{x}, \bar{x}_i, x_i 를 대신하여 사용된다.

2.1.4 모형신뢰도의 평가

모형의 신뢰도 평가를 위해서는 계산된 확률계산치를 사용한다. 만일, 제안된 신뢰도 분석기법의 검정을 위한 자료가 충분하다면, 수문목적 수준을 측정된 첨두치와 같게 놓는다. Monte Carlo Simulation 법, MVFOSM 방법, AFOSM 방법을 사용하여 측정된 첨두치, β_M 에 대한 초과확률과 신뢰도지수를 결정한다. Monte Carlo Simulation 법에서, Z 는 정규분포로 가정되므로 β_M 은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\beta_M = \phi^{-1}(1-P_E) \quad (11)$$

예보의 변동성이라는 측면에서, β_M 값은 예보치와 측정치 사이에 표준화된 가장 짧은 거리가 된다. 만일, β_M 이 작다면, 예보는 추계학적 예보라는 점에서

아주 신뢰도가 있다고 볼 수 있다. 그러나, 만일 β_M 이 작고 예보치와 측정치 사이의 거리의 절대치가 크다면, 이러한 경우 예보의 편차가 아주 크기 때문에 실제적인 측면에서 아주 믿을 만한 것은 못된다. 대신에, 측정치를 포함하는 예보 신뢰구간으로 정의되는 β_M 을 생각할 수 있다.

MVFOSM 방법에서는, 예표준편차가 다음과 같이 근사된다.

$$\sigma_z = \left[\sum_{i=1}^p (C_i^2 \sigma_i^2) \right]^{1/2} \quad (12)$$

또한, AFOSM 방법에서 예표준편차는 다음과 같이 근사된다.

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^p C_i \alpha_i \sigma_i^N \quad (13)$$

2.2 모형선택과 불확실성 분석

실시간 홍수예보에 사용되는 여러가지 수문모형들은 다음과 같이 세 가지 형태로 나눌 수 있다.

Abstract Model (추상 모형)

Physical - Conceptual Model (물리 - 개념 모형)

Physical Simulation Model (물리 모의 모형)

일반적으로, 홍수예보 체계에 적용시키기 위한 모형의 선택은 유역의 크기, 유역에서 얻을 수 있는 관측자료, 수문학자의 개인적 선호도와 경험 등에 따라 하게된다. 어떠한 크기의 유역에서도, 사용되는 수문모형의 결정에 영향을 주는 주요 인자는 유역에서 얻을 수 있는 강우 - 유출 자료의 양이다. 만일, 관측 자료를 합리적인 양으로 얻을 수 있다면, Abstract Model 이나 덜 복잡한 모형인 Physical - Conceptual Model (HEC-1, RORB 모형 등)을 선택하게 된다. 이러한 모형들은 강우 - 유출과정을 아주 단순한 관점에서 취급하며, 단순화를 보충하기 위해서 매개변수의 검정을 실시하게 된다. 단순화된 특성 때문에 이들 모형은 일반적으로 덜 복잡하며

Physical Simulation Model 이나 보다 복잡한 Physical - Conceptual Model (Stanford Model, SSARR 모형 등) 보다 매우 간단하다. 때문에, 만일 검정할 자료가 충분히 있다면, 추계학적 모형, 개념모형 또는 보다 덜 복잡한 물리 - 개념 모형을 사용하는 것이 바람직하다. 일반적으로, 이러한 모형들 사이의 선택은 유역조건이나 개인적인 선호도에 따라 좌우된다. 검정을 위해 사용되는 자료의 양이 요구되는 것보다 약간 적은 경우에, 물리 - 개념 모형은 수문학자들이 비슷한 유역에서 이러한 모형들을 사용하여 얻은 지식과 경험을 바탕으로 검정에 대한 정보를 보충할 수 있기 때문에 추천될 수도 있다. 예를 들어, Muskingum 홍수추적계수는 물리적인 개념과 합성 단위유량도 계수로 처리되어 온 지역화한 연구로부터 계산될 수 있다²⁾. Physical Simulation 모형은 최소한의 검정을 하여 합리적인 수문곡선을 산정할 수 있다. 모형의 매개변수는 유역의 물리조건 (지형, 지질, 식생 등) 을 고려하고, 토양 수리전도율, 공극률, 모세관장력 등과 같은 유역의 물리적 특성을 측정함으로써 계산될 수 있다. 물리적인 측정, 이론적인 추측, 개인적인 경험, 평균 표면유출경사와 같은 유역의 전체적인 조건으로부터 유도되는 매개변수는 검정에 의해 결정되는 것보다 매우 불확실하다. 때문에, 물리모의 모형들은 검정자료가 부족하거나, 도시화 등으로 인하여 유역이 계속적으로 변화하고, 이전에 검정한 매개변수가 더이상 유효하지 않은 경우에 마지막으로 사용되는 수단이다. 모형화에 따른 불확실성의 특성은 검정된 모형과는 반대로 물리 모의모형에서는 아주 다르게 나타난다. 때문에, 자료, 모형 매개변수, 모형구조의 불확실성을 평가하기 위해 두 가지로 나누어 검토하게 되는데, 하나는 물리모의모형에 대한 것이고, 다른 하나는 검정된 추상모형과 물리 - 개념 모형 (이후에는 검정된 모형이라 함) 이다. 검정된 모형만을 고려한 사례연구는 수문모형화에서 불확실성에 대한 신뢰도 분석의 유용성을 보여주기에는 충분하다.

2.3 자료의 불확실성 산정

거의 대부분의 강우 - 유출 모형은 4 가지 성분을 종합한 자료를 필요로 한다. 즉, 강우량, 하천유출량, 증발산량, 유역지형량이다. 이러한 각각의 인자에 있어서 오차나 불확실성의 기본적인 원인은 다음에 다루기로 하고, 물리모의 모형이나 검정된 모형을 사용할 때 이러한 불확실성을 설명하는 방법들에 대해 알아 보기로 한다.

2.3.1 강우자료의 불확실성

유역에서 실제강우를 묘사하기 위해 지점강우 측정치를 사용할 때 포함되는 오차나 불확실성의 주요 원인에는 다음과 같은 8 가지로 요약할 수 있다.

- a. 작동미비로 인한 기계 자체의 측정오차
- b. 강우측정 지점에서 표고 강수량의 유역 대표성
- c. 기기의 위치, 예를 들어 유역평균보다 상대적으로 높거나 낮은 값을 나타내는 곳에 위치한 기기
- d. 계기망의 평균면적 강우량과 실제 평균면적 강우량
- e. 강우의 공간적 변동성의 영향
- f. 강우의 시간적 변동성의 영향
- g. 강우와 하천계기 사이에 시간의 불일치
- h. 유역내 여러가지 강우계기 사이에 시간의 불일치

2.3.2 하천유량자료의 불확실성

하천유출량 측정에서 불확실성과 수문모형화 신뢰도에 대한 자료의 영향은 강우량측정에서 불확실성보다는 일반적으로 아주 작다. 이것은 하천유출자료가 유역시스템의 복잡한 강우 - 유출과정의 종합으로 나타나는 반면에, 강우자료는 단지 유역시스템 전체에 복잡한 강우과정중 지점측정만을 하기 때문이다. 그럼에도 불구하고, 많은 불확실성이 하천유출자료 내에 존재하며 이는 다음의 세가지 주요 요인으로 볼 수 있다.

- a. 계기측정에서 불확실성

- b. 유도된 수위 - 유량 관계의 유용성에 대한 불확실성
- c. 수위 - 유량 관계의 유도에 사용한 유출측정치에 대한 불확실성

2.3.3 증발산과 토양수분자료의 불확실성

일반적으로, 증발산의 효과는 홍수와 같은 단기간의 수문사상에서는 무시할 만한 것으로 간주된다. 따라서, 실시간 홍수예보를 위해 제안된 대부분의 수문모형은 증발산을 고려하지 않는다. 그러나 몇몇 물리-개념모형과 모든 물리모형에서는 토양수분에 대한 계산을 하여야 한다. 대부분의 유역에서, 토양수분에 대한 자료가 매우 적으므로 증발산, 선행강수, 토양모세관 저류 등과 관계된 다른 종류의 선행강수지수(API)를 사용하여 계산하게 된다.

2.3.4 유역지형의 불확실성

실시간 홍수예보를 위해 사용하는 많은 수문모형, 특히 물리 모형이나 물리-개념모형에서는 총면적, 지표흐름의 경사와 길이, 수로경사와 길이 등과 같은 유역지형의 여러가지 면에 대한 정보가 필요하다. 이러한 매개변수들의 결정에는 여러가지 불확실성과 오차가 포함된다.

2.4 모형매개변수의 불확실성 산정

2.4.1 검정된 모형에서 모형매개변수 불확실성의 취급

검정된 모형에서, 매개변수의 불확실성은 특정사상에서 매개변수값을 계산하는데 따른 불확실성 뿐만 아니라, 검정과정에 의해 매개변수로 변환된 자료의 불확실성의 측정을 포함하여 반영할 뿐만 아니라 검정과정은 각 매개변수의 실제값이 존재하는 값의 범위에 대한 많은 양의 중요한 정보를 제공한다.

2.4.2 물리모형에서 매개변수 불확실성의 취급

물리모의 모형에서, 매개변수는 검정을 하지 않거나 최소한의 검정을 하여 결정될 수 있도록 하기 위하여 유역의 물리특성, 예를 들어 토양의 형태, 식생과

북, 수로형태 등에 직접적으로 연관되어 진다. 이전의 미계측 유역에 대해서도, 매개변수에 대한 정보는 여러지점에서 물리적인 측정, 유사한 상태의 연구로부터 준비된 표 (예를 들어, USDA 토양조사), 수문-수리 매개변수에 공통적으로 사용된 항으로 물리특성을 나타내기 위하여 개발된 어떤 관계도 (예를 들어, 수로조건을 Manning의 n 값과 연관시킨 그림, Ramser, 1929 ; Scobey, 1939 ; Barnes, 1967)^{(3), (4), (5)}로 부터 얻을 수 있으며 이러한 정보를 사용하여 각 매개변수에서 물리적으로 타당한 범위는 결정될 수 있다.

2.5 모형구조의 불확실성 산정

모형구조의 불확실성은 유역의 물리적 유출과정을 수문모형이 제대로 나타내지 못하기때문에 발생한다. 추계학적 수문모형에서, 유출과정은 강우와 하천유출, 상류와 하류유출 사이의 상관과 하류유출에서의 자기상관에 의해 적절히 묘사된다고 가정한다. 개념적인 수문모형에서는, 지정된 확정함수가 강우-유출과정을 나타낸다고 가정한다. 물리모형과 물리-개념모형에서는, 계산을 실제적으로 하기 위해서, 유역특성과 입력자료, Kinematic Flow Routing 등의 시공적 Lumping 과 같은 자연유출과정의 여러가지 단순화를 가정한다. 이러한 가정에 의해 도입된 불확실성은 예측수문곡선의 형태, 체적, 크기와 첨두도달시간에 영향을 준다. 따라서, 예측수문곡선에 대한 모형구조의 불확실성의 총영향을 고려하거나 설명하기는 어렵다.

2.5.1 검정모형에서 모형구조 불확실성의 취급

Garen 과 Burges (1981)⁽⁶⁾는 만일 광범위한 유역반응을 대표하고 통계학적으로 중요한 표본을 형성하는데 충분히 긴 유출자료가 있다면, 불확실성을 측정하기 위해 모의된 유출과 측정된 유출의 비교는 결과적으로 모형예측에서 불확실성을 계산하기 위해 외삽될 수 있다고 하였다. Troutman (1982b)⁽⁷⁾은 실제 입력자료와 매개변수를 사용한 측정유량과 계산유량 사이에 분산은 전적으로 모형구조의 부적정성에

의한다고 하였다. 검정모형에서, 실측유량과 계산유량 사이에 분산은 실제로 모형구조의 부적정성 때문만은 아니지만, 오차를 포함한 자료와 매개변수에 기인한 계산치의 편기는 검정과정에 의해 최소화된다. 따라서 넓은 범위의 호우사상에 대해 취해진 측정침두유량과 검정침두유량 사이에 나타난 차이의 기대값과 표준편차는 Δ_m 의 합리적인 계산치와 불확실성을 제공한다.

2.5.2 물리모형에서 모형구조 불확실성의 취급

일반적으로, 물리모형에서, 검정자료가 대상유역에서 계산침두유량과 측정침두유량의 비교를 통해 모형구조 불확실성을 근사하도록 하기 위해 이용가능한 경우는 거의 없다. 그러나 다른 유역에 대한 자료에서 모형을 검정함으로써 모형구조의 불확실성은 근사될 수 있다. (물리모형을 검정할 때, 모형구조 부적정성의 영향을 규정하기 위하여 물리적으로 합리적인 한계가 매개변수에 주어져야 한다.) 이러한 모형구조 불확실성의 변환은 도시화와 같은 이유로 계속적으로 변화하는 유역에서, 실시간 홍수에보시 사용되는 물리모형의 경우에도 적용된다. 이러한 유역에서 이전 자료의 검정은 모형구조 불확실성의 영향, λ_m 과 이것의 분산을 결정하기 위해 사용된다. 만일 대상유역이나 다른 유역에서 검정자료를 쉽게 구할 수 없다면, 모형구조의 불확실성은 모형내에서 행해진 물리적인 근사가 다른 여러가지 모형에서 행해진 개념적 또는

추계학적 근사와 거의 같다는 가정에 의해 개략적으로 근사될 수 있다. 따라서, 다른 모형에서의 경험으로부터 얻어진 모형구조 불확실성의 계산치는 현재 문제에도 적용될 수 있다.

3. 결 언

수문모형의 신뢰도 분석을 위하여 먼저 신뢰도 분석방법에 대하여 알아보았다. 신뢰도 분석방법으로는 직접적분법 Monte Carlo Simulation Method, MVFOSM Method, AFOSM Method 등이 있으며, 이러한 방법들은 여러 가지 장단점이 있으므로 적용되는 분야의 특성에 따라 잘 이용하여야 할 것이다. 또한, 수문모형의 신뢰도 분석을 위하여, 수문모형을 추상모형, 물리 - 개념모형, 물리모형으로 나누어, 실시간 홍수예경보에 많이 사용되고 있는 물리모형과 검정된 모형 (검정된 추상모형과 물리 - 개념모형)에 대하여 불확실성의 발생원인을 제시하였다. 여기에는 수문자료 자체에 포함된 것, 모형의 매개변수에 포함된 것, 모형의 구조에 포함된 것으로 나눌 수 있으며, 수문자료에 포함된 불확실성으로는 강우자료, 하천유량자료, 증발산과 토양수분자료, 유역지형자료 등이 있다. 이와 같은 불확실성이 파악되면 이를 이용하여 홍수시 치수·방재를 위하여 운용되고 있는 실시간 홍수예경보 등에 사용될 수 있을 것이다. 🍀

<참 고 문 헌>

- Rajendran, R., and Mein, R. D., and Laurenson, E. M., "A Spacial Model for the Prediction of Losses on Small Rural Catchments," Australian Water Resources Council Technical Paper No. 75, Australian Government Publishing Service, Canberra, 1982.
- Singh, K. P., "Derivation and Regionalization of Unit Hydrograph Parameters for Illinois (Dam Safety Program)," Illinois State Water Survey Contract Report No. 258, June 1981.
- Ramser, C. E., "Flow of Water in Drainage Channels," U. S. Department of Agriculture, Technical Bulletin No. 129, November 1929.
- Scobey, F. C., "Flow of Water in Irrigation and Similar Canals," U. S. Department of Agriculture, Technical Bulletin No. 652, February 1939.
- Barnes, H. H., Jr., "Roughness Characteristics of Natural Channels," USGS Water - Supply Paper 1849, U. S. Geological Survey, Washington, DC, 1967.

- Garen, D. C., and Burges, S. J., "Approximate Error Bounds for Simulated Hydrographs", *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 107, No. HY11, pp. 1519-1534, 1981.
- Troutman, B. M., "Runoff Prediction Errors and Bias in Parameter Estimation Induced by Spatial Variability of Precipitation", *Water Resources Research*, Vol. 19, No. 3, pp. 791-810, 1983.
- U. S. Water Resources Council, "Guidelines for Determining Flood Flow Frequency," *Hydrology Committee Bulletin No. 17B*, September 1981.
- S. T. Cheng, "Overtopping Risk Evaluation for an Existing Dam", Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana - Champaign, 1982.
- Ang, A. H-S., Tang, W. H., "Probability Concepts in Engineering Planning and Design : Vol. I Basic Principles, Vol. II. Decision, Risk, and Reliability", John Wiley & Sons, 1984.
- Laurenson, E. M., and O'Donnell, T., "Data Error Effects in Unit Hydrograph Derivation", *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 95, No. HY6, pp. 1899-1917, 1969.
- International Organization for Standardization, *Measurement of Liquid Flow in Open Channels*, ISO Standards Handbook 16, Geneva, Switzerland, 1983.
- Jackson, T. J., and Schmutge, T. J., "Passive Microwave Remote Sensing of Soil Moisture," *Advances in Hydrosience*, Vol. 14, edited by B. C. Yen, Academic Press, New York, pp. 123 - 159, 1986.
- Yen, B. C., Wenzel, H. G., Jr, Mays, L. W., and Tang, W. H., "Advanced Methodologies for Design of Storm Sewer Systems," *Research Report No. 112*, Water Resources Center, University of Illinois in Urbana - Champaign, August 1976.
- Wood, E. F., "An Analysis of the Effects of Parameter Uncertainty in Deterministic Hydrologic Models", *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 5, pp. 925-932, 1976.
- Mein, R. G., and Brown, B. M., "Sensitivity of Optimized Parameters in Watershed Models", *Water Resources Research*, Vol. 14, No. 2, pp. 299 - 303, 1978.
- Sittner, W. T., "Determination of Flood Forecast Effectiveness by the Use of Mean Forecast Lead Time," NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO - 36, Silver Spring, Maryland: National Weather Service, Office of Hydrology, August 1977.
- Melching, C. S., "A Reliability Analysis on Flood Event Forecasting With Uncertainties," Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana - Champaign, 1987.
- Lasdon, L. S., Waren, A. D., and Ratner, M. W., *GRG - 2 User's Guide*, University of Texas at Austin, February 1982.
- Dawdy, D. R., Lichty, R. W., and Bergmann, J. M., "A Rainfall - Runoff Simulation Model for Estimation of Flood Peaks from Small Drainage Basins," *USGS Professional Paper 506 - B*, U. S. Geological Survey, Washington, D. C., 1972.
- Troutman, B. M., "The Effect of Input Errors in Using Precipitation - Runoff Models for Runoff Prediction," *Statistical Analysis of Rainfall and Runoff*, edited by V. P. Singh, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, pp. 305 - 314, 1982a.
- Troutman, B. M., "An Analysis of Input Errors in Precipitation-Runoff Models Using Regression with Errors in the Independent Variables", *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 4, pp. 947-964, 1982.