불확실성을 고려한 홍수량 추정

Flood Estimation Considering Uncertainty

서영민*·김성범**·장광진***·지홍기****·이순탁*****

Seo, Young Min·Kim, Sung Bum·Jang, Kwang Jin·Jee, Hong Kee·Soontak Lee

요 지

지금까지 수공구조물의 설계와 기존 시설의 안전도를 평가시 수문, 수리 및 경제학적 함수들에서 발생하는 불확실성을 설명하기 위하여 안전율 또는 여유고를 증가시키거나 이들 정보의 양과 질을 증가시켜 데이터베이스를 확장하고 측정오차를 최소화시키며, 전통적인 통계해석을 적용하였다. 공공의 안전을 확보하기 위하여 설계과정에 안전율 또는 여유고가 도입되었으나 이것은 단순히 보다 높은 재현기간의 적용을 의미하며, 수문현상이 가지는 추계학적 특성보다 확정론적인 근거로부터 안전설계 개념이 개발되었다. 수자원 계획시 고려되는 부하와 저항은 확정론적인 고정치가 아니라 시간에 따라 변하고 동적이며, 무작위적이므로 확률변수로서 고려되어야 한다.

이에 따라 최근 수자원 계획과정에서 불확실성 해석에 의한 위험도 분석 개념이 도입되고 있으며, 특히 이상기후 및 집중호우의 빈발, 급격한 도시화로 인한 유출양상의 변화 등으로 급증하고 있는 홍수피해를 감안할 때 설계빈도의 상향조정과 같은 확정론적인 방법보다는 매개변수 또는 함수의 불확실성을 고려한 위험도 해석의 필요성이 더욱 증대되고 있는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 수자원 계획시 입력자료 및 매개변수의 불확실성과 불확실성의 분리를 고려한 홍수량의 산정 및 각 매개변수의 영향을 평가하여 홍수위험도 해석에 있어서 모델 매개변수의 영향 규명과 처리방안을 제시하고자 한다.

핵심용어 : 불확실성, 불확실성의 분리, 홍수량, 매개변수, 2차원 Monte Carlo 모의

1. 서 론

지금까지 수공구조물의 설계와 기존 시설의 안전도를 평가시 수문, 수리 및 경제학적 함수들에서 발생하는 불확실성을 설명하기 위하여 안전율 또는 여유고를 증가시키거나 이들 정보의 양과 질을 증가시켜 데이터베이스를 확장하고 측정오차를 최소화시키며, 전통적인 통계해석을 적용하였다. 공공의 안전을 확보하기 위하여 설계과정에 안전율 또는 여유고가 도입되었으나 이것은 단순히 보다 높은 재현기간의 적용을 의미하며, 수문현상이 가지는 추계학적 특성보다 확정론적인 근거로부터 안전설계 개념이 개발되었다. 수자원 계획시 고려되는 부하와 저항은 확정론적인 고정치가 아니라 시간에 따라 변하고 동적이며, 무작위적이므로 확률변수로서 고려되어야 한다.

이에 따라 최근 외국의 경우 수자원 계획과정에서 불확실성 해석에 의한 위험도 분석 개념이 도입되고 있으며, 특히 이상기후 및 집중호우의 빈발, 급격한 도시화로 인한 유출양상의 변화 등으로 급증하고 있는 홍수피해를 감안할 때 설계빈도의 상향조정과 같은 확정론적인 방법보다는 매개변수 또는 함수의 불확실성을 고려한 위험도 해석의 필요성이 더욱 증대되고 있는 실정이다.

* 정회원·영남대학교 건설환경공학부·박사과정·E-mail : elofy@hanmail.net
** 정회원·영남대학교 건설환경공학부·석사과정·E-mail : ambitious_kim@hanmail.net
*** 정회원·영남대학교 건설환경공학부·석사과정·E-mail : kwang-jin7948@hanmail.net
**** 정회원·영남대학교 건설환경공학부·교 수·E-mail : hkjee@yu.ac.kr
***** 정회원·영남대학교 건설환경공학부·석좌교수·E-mail : leest@yu.ac.kr

따라서 본 논문에서는 수자원 계획시 입력자료 및 매개변수의 불확실성과 불확실성의 분리를 고려한 홍수량의 산정 및 각 매개변수의 영향을 평가하여 홍수위험도 해석에 있어서 모델 매개변수의 영향 규명과 처리방안을 제시하고자 한다.

2. 불확실성의 개념

불확실성(uncertainty)은 크게 자연적 불확실성(natural uncertainty)과 지식의 불확실성(knowledge uncertainty or epistemic uncertainty)으로 크게 구분할 수 있다. 자연적 불확실성은 추계학적 과정(stochastic process)의 변동성(variability)으로 인하여 발생되며(시스템의 특성을 반영), 지식의 불확실성은 시스템에 대한 불충분한 지식으로 인하여 발생된다(분석자의 특성을 반영)(Bruno Merz & Annegret H. Thieken, 2005).

자연적 불확실성은 변동성(variability), 우연적 불확실성(aleatory uncertainty), 객관적 불확실성(objective uncertainty), 고유의 불확실성(inherent uncertainty), 무작위성(randomness) 및 A형 불확실성(type-A uncertainty)이라고도 하며, 시공간, 개별 또는 객체들의 모집단에 따라 변하는 양에 있어서 자연적 불확실성을 설명하기 위하여 추계학적 또는 확률론적 모델이 채택된다(Bruno Merz & Annegret H. Thieken, 2005).

지식의 불확실성은 주관적 불확실성(subjective uncertainty), 부족한 지식의 불확실성(lack-of-knowledge), 제한된 지식의 불확실성(limited-knowledge uncertainty), 무지(ignorance), 설정오류(specification error), 예측오류(prediction error) 및 B형 불확실성(type-B uncertainty)이라고도 하며, 시스템을 설명하기 위하여 수학적 모델을 사용할 경우 지식의 불확실성은 모델의 불확실성(model uncertainty)과 매개변수의 불확실성(parameter uncertainty)으로 구성될 수 있다(Bruno Merz & Annegret H. Thieken, 2005).

3. 불확실성의 표현 및 전파기법

3.1 불확실성의 표현 및 전파기법

불확실성을 표현하는 기법에는 확률론적 접근(probabilistic approach), 구간표현(interval representation), 확률경계접근(probability bounds approach), 퍼지표현(fuzzy representation) 등이 있다(Marcis Abrahamsson, 2002). 확률론적 접근은 어떤 변량에 관계된 추계학적 또는 지식의 불확실성을 나타내는데 사용되는 가장 일반적인 접근방법으로서 확률분포를 이용하여 불확실성을 설명하는 것이며, 불확실성에 대한 구간표현은 어떤 변량의 범위에 대해서는 확실하지만 그 외에 다른 것에 대한 지식이 없는 상황에 유용한 방법으로서 모델의 입력치와 매개변수에 대한 불확실성을 나타내기 위한 범위를 이용하여 모델 결과의 가능한 범위를 추정하는데 사용될 수 있다. 확률경계접근은 불확실성에 대한 확률분포의 특정한 형태를 설정할 수 없을 경우 확률경계를 구축하는 것이 가능하며, 이러한 경우 경험적 정보에 일치하는 가능분포에 대한 확률경계가 발생된다. 확률경계는 불확실한 변수와 관련된 다양한 정보의 집합에 대해 유도된다. 퍼지연산은 구간해석의 일반화로서 간주될 수 있는데 세부적인 경험적 정보가 요구되지 않으며, 주관적으로 할당된 분포들을 사용할 수 있다(Marcis Abrahamsson, 2002).

불확실한 입력치가 모델의 결과치에 미치는 영향을 조사하기 위한 기법으로는 민감도 분석(sensitivity analysis), 불확실성 전파(uncertainty propagation), 중요도 측정(importance measure) 등이 있으며, 확률론적 구조를 이용한 불확실성 전파기법이 널리 사용되고 있다(Marcis Abrahamsson, 2002).

불확실성 전파기법은 크게 해석적 기법과 샘플링 기법으로 나눌 수 있는데 해석적 기법은 모멘트법이라 불리는 함수의 Taylor 급수전개에 기초를 두고 있으며, 계산을 단순화하기 위하여 가우스 근사공식(Gaussian approximation formula)과 같이 통상 고차항을 무시하고 1차 항만을 고려하는 1차 근사(first order approximation)를 주로 사용한다. 샘플링 기법은 해석적 기법의 한계, 개인용 컴퓨터의 급속한 발달로 인하여 매개변수와 관련된 불확실성을 설명하는 확률분포를 이용한 불확실성 해석에 있어서 각광을 받고 있으며, Monte Carlo 샘플링 및 Latin hypercube 샘플링 등이 널리 사용되고 있다.

3.2 불확실성의 분리

어떤 시스템의 총 불확실성(total uncertainty)은 두 개의 요소, 즉 자연적 변동성 및 지식의 불확실성의 조합이다(Hattis and Burmaster, 1994; Rai et al., 1996; Vose, 2000). 지식의 불확실성은 그 시스템에 대한 분석자의 지식의 부족을 나타내며, 그것은 더 많은 측정 또는 연구를 통하여 감소될 수 있으나, 반면에 자연적 변동성은 추가적인 측정 또는 연구에 의해 감소될 수 없는 어떤 모집단에서의 무작위적 불균질(random heterogeneity)을 나타내며, 그 시스템을 변화시킴으로써 감소시킬 수 있다(Anderson and Hattis, 1999; Vose, 2000). 지식의 불확실성 및 자연적 변동성 모두 확률밀도함수에 의해 설명될 수 있으며, 따라서 몇 개의 확률분포들은 모델 매개변수들에 대한 불확실성을 반영하고 나머지 확률분포들은 그 시스템의 추계학적 속성을 반영하는 Monte Carlo 위험도 평가에 지식의 불확실성 및 자연적 변동성을 포함한다. 그러나 결과로 생기는 단일 확률분포는 결과해석에 있어서 기술적 어려움이 따르고 총 불확실성에 대한 지식의 불확실성 및 자연적 변동성의 개별적 기여에 관하여 정보의 손실이 발생한다. 자연적 변동성 분포가 마치 지식의 불확실성 분포로 사용될 때 이 둘을 혼합하는 것보다 더 큰 문제가 발생할 수 있으며, 이러한 경우 단일 그림으로 표시되는 결과가 의미없는 분포로 대체되는 것과 같이 어떤 변수를 불확실한 매개변수로 잘못 취급할 수 있다(Vose, 2000). 따라서 위험도 평가에서 지식의 불확실성 및 자연적 변동성을 분리할 필요성이 크게 강조되고 있다(Hoffman and Hammonds, 1994; Frey and Rhodes, 1996; Rai and Krewski, 1998; Nauta, 2000; Mitchell and Csillag, 2001). 지식의 불확실성 및 자연적 변동성의 분리는 총 불확실성을 감소시킬 수 있는 단계들을 확인할 수 있게 하고 정보 및 잠재적 시스템 변화의 가치를 측정할 수 있게 하며, 변수 및 매개변수를 혼합함으로써 발생하는 심각한 오류를 피할 수 있게 한다(Bruno Merz & Annegret H. Thieken, 2005).

3.3 2차원 Monte Carlo 기법

2차원 Monte Carlo 모의기법(two-dimensional Monte Carlo simulation)은 두 개의 일반적인 Monte Carlo 모의를 포함한 것으로서 하나의 Monte Carlo 모의를 다른 것에 포함시키며, 내부모의(inner simulation)와 외부모의(outer simulation)로 구성된다. 전형적으로 내부모의는 물리적 및 생물학적 과정의 자연적 변동성을 나타내고, 반면에 외부모의는 내부모의에서 사용된 특정 매개변수에 대한 분석자의 불확실성을 나타낸다.

2차원 Monte Carlo 모의기법은 그림 2와 같이 시스템에 대한 지식의 불확실성 및 자연적 변동성을 분리하여 불확실성을 전파시키는데 사용된다(Bogen and Spear, 1987; Hoffman and Hammonds, 1994; Hession et al., 1996; Burmaster and Wilson, 1996; Nauta, 2000; Vose, 2000; Sanga et al., 2001; Moschandreas and Karuchit, 2002; Pouillot et al., 2003). 2차원 Monte Carlo 모의기법은 모델 매개변수들의 다중 현실화(multiple realization) 및 입력변수들의 반복으로 구성된 중첩 또는 이중루프절차(nesting or double looping procedure)를 포함한다. 2차원 Monte Carlo 모의기법의 결과는 불확실성 및 변동성을 동시에 나타내는 누가분포함수들(CDFs) 또는 인과관계들에 대한 하나의 집합(collection)으로 나타난다.

4. 적용

본 연구에서는 불확실성의 분리 및 전파를 위한 1차 및 2차 Monte Carlo 모의기법의 적용성을 평가하기 위하여 IHP 대표유역 중 하나인 위천유역(유역면적 A=475.53km^2, 유로연장 L=42.83km)을 대상으로 불확실성을 고려한 홍수량 산정 및 평가를 위한 모델을 그림 1 및 2와 같이 구축하였다. 앞서 언급한 바와 같이 총 불확실성을 입력 강우량의 변동성(자연적 불확실성) 및 모델 매개변수의 불확실성(지식의 불확실성)으로 분리하여 그림 2와 같이 중첩된 이중루프를 구성하였으며, 각 루프를 1,000회 반복하여 샘플링하였다. 균등난수(uniform random number)발생을 위하여 Minimal Standard, ran1 난수발생기(random number generator)(Park and Miller, 1988)를 사용하였으며, 강우유출모델로는 비교적 구조가 단순한 Snyder 모델을 사용하였다.

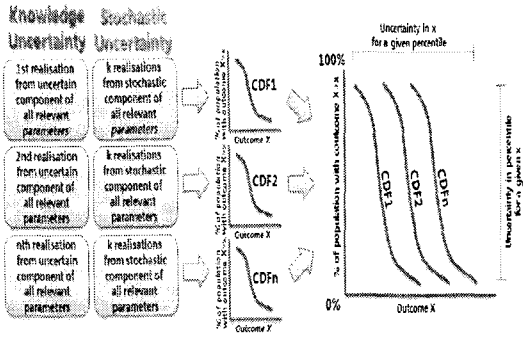


그림 1. 2차원 Monte Carlo 모의구조

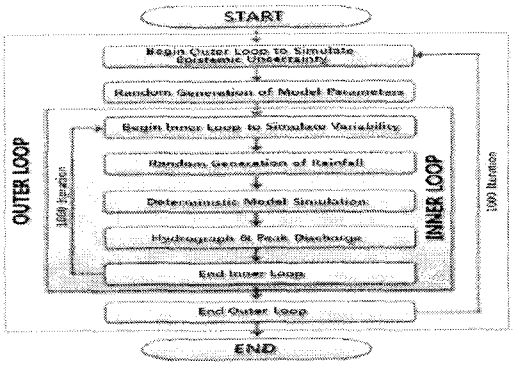
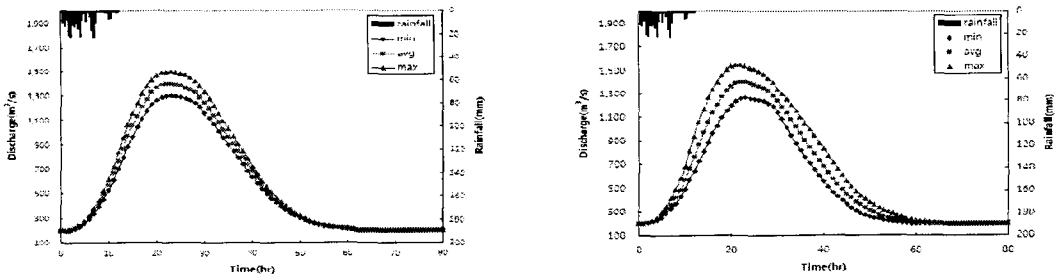


그림 2. 2차원 Monte Carlo 모의 과정

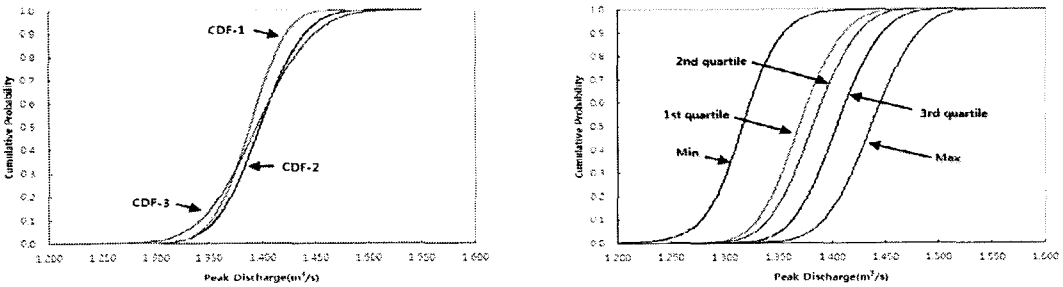
본 연구에서는 불확실성을 고려한 홍수량을 추정하기 위해서 입력 강우량 및 매개변수의 불확실성을 확률분포로 나타내었으며, 이를 바탕으로 샘플링을 실시하여 반복적인 강우유출모의를 실시하였다. 입력 강우량의 경우 불확실성의 정량화 또는 오차분포에 대한 정보를 얻는데 어려움이 있기 때문에 입력치를 평균으로 하고 그 값의 10%를 표준편차로 가정한 정규분포로부터 입력 강우량을 무작위 발생시켰으며, Snyder 모델의 매개변수 Cp 및 Ct는 각 매개변수가 가지는 일반적인 범위에 대한 평균값을 바탕으로 하는 정규분포로부터 각 매개변수를 발생시켜 그림 3과 같은 홍수수문곡선을 산정하였다. 그림 3은 강우량의 변동성 및 매개변수의 불확실성을 고려한 홍수수문곡선으로서 강우량의 불확실성만을 고려한 경우(1차원 Monte Carlo 모의) 매개변수들이 확정적인 값을 가지는 반면 강우의 변동성이 반영되고 있으며, 내부 모듈로 Snyder 합성단위도를 사용하였기 때문에 결과된 홍수수문곡선이 선형적인 특성을 보여주고 있다. 한편, 강우량 및 매개변수의 불확실성을 고려한 경우(1차원 Monte Carlo 모의) 강우량의 변동성, 유역의 지체 및 저류특성이 반영된 홍수수문곡선의 특성을 보여주고 있다.



(a) 강우량의 불확실성을 고려 (b) 강우량 및 매개변수의 불확실성을 고려

그림 3. 강우량의 변동성 및 매개변수의 불확실성을 고려한 홍수수문곡선

앞서 언급한 바와 같이 강우량의 변동성 및 매개변수의 불확실성이 결과 수문곡선에서의 총 불확실성에 대한 영향을 검토하기 위하여 두 유형의 불확실성을 분리하였으며, 이를 모의하기 위하여 중첩루프구조의 형태로 구성된 2차원 Monte Carlo 해석을 실시하였다. 두 유형의 불확실성에 대한 기본가정 및 확률분포의 매개변수값은 앞의 1차원 Monte Carlo 해석과 동일하게 유지하였고 내·외부루프 각각 1,000회(1,000×1,000회) 반복계산을 통하여 모의발생 및 유출모의를 실시하였으며, 첨두홍수량에 대한 결과를 그림 4와 같이 나타내었다. 그림 4-(d)는 2차원 Monte Carlo 해석결과로서 첨두홍수량에 대한 누가확률분포를 최대, 최소 및 각 분위별로 나타내고 있다. 여기서, 각 누가확률분포는 강우량의 변동성에 대한 불확실성의 전파 양상을 나타내고 있으며, 누가확률분포들에 대한 퍼짐의 정도는 모델 매개변수에 대한 지식의 불확실성을 나타내고 있다.



(a) CDF-1, CDF-2, CDF-3 (MC1)　　(b) CDF-4 (MC2)

그림 4. 첨두홍수량에 대한 Monte Carlo 해석결과

※ CDF-1 : 강우량의 변동성만 고려(MC1), CDF-2 : 모델 매개변수의 불확실성만 고려(MC1), CDF-3 : 강우량의 변동성 및 모델 매개변수의 불확실성 고려(MC1), CDF-IV : 강우량의 변동성 및 모델 매개변수의 불확실성 고려(MC2)

※ MC1 : 1-dimensional Monte Carlo simulation, MC2 : 2-dimensional Monte Carlo simulation

5. 결 론

본 논문에서는 수자원 계획시 매개변수의 불확실성을 고려한 홍수량의 산정 및 각 매개변수의 영향을 평가하여 홍수위험도 해석에 있어서 모델 매개변수의 영향 규명과 처리방안을 제시하고자 입력자료 및 모델에서의 불확실성의 전파 및 양상을 평가할 수 있는 홍수량 산정에 있어서의 불확실성 해석 모델을 구축하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 총 불확실성을 자연적 불확실성과 지식의 불확실성으로 구분하였으며, 분리된 불확실성을 처리할 수 있는 2차원 Monte Carlo 해석 모델을 구축하였다.

(2) 2차원 Monte Carlo 해석기법의 적용성을 평가하기 위하여 불확실성을 분리하지 않은 1차원 Monte Carlo 해석 기법과 비교하였으며, 그 결과 2차원 Monte Carlo 해석기법의 경우 불확실성의 원인규명 및 향후 처리방향수립에 있어서 유용한 분석기법임을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Marcus Abrahamsson(2002). Uncertainty in Quantitative Risk Analysis - Characterisation and Methods of Treatment, Report 1024, Department of Fire Safety Engineering Lund University, Sweden.
2. Scott Ferson(2005). Bayesian Methods in Risk Assessment, Applied Biomathematics.
3. Bruno Merz, Annegret H. Thieken(2005). Separating Natural and Epistemic Uncertainty in Flood Frequency Analysis, Journal of Hydrology, pp. 114-132.
4. H. Apel, A. H. Thieken, B. Merz, G. Bloschl(2004). Flood Risk Assessment and Associated Uncertainty, Natural Hazards and Earth System Sciences, pp. 295-308.
5. H. Apel, A. H. Thieken, B. Merz, G. Bloschl(2006). A Probabilistic Modelling System for Assessing Flood Risks, Natural Hazards and Earth System Sciences, pp. 79-100.
6. A. Ramachandra Rao, Khaled H. Hamed(1999). Flood Frequency Analysis, CRC Press.
7. William H. Press, saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, Brian P. Flannery(1992), Numerical Recipes in C Second Edition - The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press.
8. Park, S.K, Miller, K.W.(1988). Communications of the ACM, vol. 31, pp. 1192-1201.
9. Hattis, Burmaster(1994). Assessment of variability and uncertainty distributions for practical risk analyses. Risk Anal. 14, 713-730.