

Monte Carlo 기법에 의한 하천제방의 안정성 평가

Evaluation of Levee Reliability by Applying Monte Carlo Simulation

전민우* · 김지성** · 한건연***

Jeon, Min Woo · Kim, Ji Sung · Han, Kun Yeun

Abstract

The safety of levee that depends on the river flood elevation has been regarded as very important keys to build up various flood prevention systems. However, deterministic methods for computation of water surface profile cannot reflect the effect of possible inaccuracies in the input parameters. The purpose of this study is to develop a methodology of uncertainty computation of design flood level based on steady flow analysis and Monte Carlo simulation. This study addresses the uncertainty of water surface elevation by Manning's coefficients, design discharges, river cross sections and boundary condition. Monte Carlo simulation with the variations of these parameters is performed to quantify the variations of water surface elevations in a river. The proposed model has been applied to the Kumho-river. The reliability analysis was performed within 38.5 km (95 sections) reach considered the variations of the above-mentioned parameters. Overtopping risks were evaluated by comparing the elevations of the flood condition with the those of the levees. The results show that there is a necessity which will raise the levee elevation between 1 cm and 56 cm at 7 sections. The model can be used for preparing flood risk maps, flood forecasting systems and establishing flood disaster mitigation plans as well as complement of conventional levee design.

Keywords : levee reliability, Monte Carlo simulation, uncertainty analysis, overtopping risk

요 지

홍수범람 수위에 따른 제방의 안전은 홍수방지 시스템 구축에 있어서 매우 중요한 요소이다. 그러나, 기존의 확정론적인 방법을 통한 홍수위의 계산은 입력매개변수들이 내포한 불확실성을 반영할 수 없다. 본 연구의 목적은 Monte Carlo 기법을 활용한 부등류 해석에 의하여, 설계홍수위 불확실도 계산방법의 개발에 있다. 제방의 신뢰도분석 모형에서, 본 연구에서는 Manning 조도계수, 설계유량, 하천의 단면좌표, 기점수위에 의한 홍수위의 불확실성을 고려하였으며, 정량화된 입력매개변수들의 변동성으로부터 하천홍수위의 변동성을 정량화하였다. 본 모형을 대구시를 관류하는 금호강 38.5 km 구간(95개 단면)에 적용하여, 각 단면에서 계산된 홍수위와 기설 제방고의 표고를 비교함으로써 월류 위험도를 분석하였다. 분석 결과, 기설 제방고와 비교하여 7개 단면에서 제방의增高가 필요할 것으로 판단되었으며, 그 크기는 최소 1 cm에서 최대 56 cm로 계산되었다. 본 연구는 기존의 제방고 설계방법의 보완 및 홍수위험지도 제작, 홍수예측 시스템, 홍수피해완화 계획 수립 등에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 제방 신뢰도, Monte Carlo 모의, 불확실도 분석, 월류 위험도

1. 서 론

최근 우리나라는 기상이변으로 인한 대규모의 자연재해가 늘어나고 있으며 국지적인 집중호우의 발생으로 하천 홍수량이 급격히 증가하여 제방이 붕괴되고 이에 따른 인명 및 재산상에 피해가 커지고 있다(감사원, 2003). 따라서 홍수위험도의 경감, 홍수제어 구조물의 설계 등 다양한 홍수방지 시스템의 구축에 대한 필요성이 대두되고 있으며, 특히 수면곡선의 정확도는 하천정비의 가장 기본적인 부분으로 상당히 중요한 의미를 갖는다. 홍수재해 보험, 홍수위험 경감계

획 수립뿐만 아니라, 제방 및 배수 시스템 등의 설계 등 다양한 공학적 용도로 해마다 수없이 많은 수면곡선이 계산되고 있으며, 계산된 수위는 홍수제어 구조물의 계획과 설계, 목표하는 바의 경제적인 가능성을 결정하고 토지의 개발 여부를 결정하는 중요한 요소이다. 기존의 확정론적 홍수위 계산은 계산과정에서 불확실도를 포함하고 있기 때문에 여유고의 개념으로 제방고 결정을 보완하고 있다. 우리나라는 여유고설계를 위하여 홍수량의 규모에 따라 최저치로 획일적인 여유고를 규정하고, 하천과 제방의 중요도, 제내지 상황, 사회경제적 여건 등을 고려하여 결정하고 있는데(한국수자원

*정회원 · 충북대학교 토목공학과 교수(E-mail : minwoo@chungbuk.ac.kr)

**정회원 · 경북대학교 토목공학과 박사과정(E-mail : jisungk@gmail.com)

***정회원 · 경북대학교 토목공학과 교수(E-mail : kshanj@knu.ac.kr)

학회, 2002) 이는 다소 주관적이어서 경우에 따라 매우 높은 신뢰도를 제공할 수도 있지만, 반면에 매우 높은 위험도를 줄 수 있다. 특히, 홍수재해 보험의 경우, 홍수위험도가 정량화되어야 할 것으로 판단된다.

수면곡선 계산의 오차 원인과 홍수위의 불확실도에 대한 연구는 Yen과 Ang(1971)이 수공구조물의 불확실도를 산정하기 위해 신뢰도 개념을 도입하면서 시작되었다. Chiu와 Lee(1972)는 하천 단면의 지형적 불규칙성을 불확실도의 원인으로 간주하고 특성선법을 사용하여 연속 방정식과 운동량 방정식을 해석하였고, Willis 등(1989)은 Manning 조도계수를 부등류 해석 불확실도의 유일한 원인으로 가정하고 정규분포를 사용하여 1차원 부등류 흐름방정식을 추계학적으로 해석하였다. Cesare(1991)는 1차 오차해석을 사용하여 설계유량과 Manning 조도계수를 임의변수로 모의하였고, Yen과 Yen(1992)은 하도단면형상의 변화가 부등류 해석에 미치는 영향을 연구하였다. Mizumura와 Ouazar(1992)는 위험도 분석을 이용하여 개수로의 추계학적 특성을 연구하였으며, 하도단면, 하상경사와 Manning 조도계수는 서로 독립적이고 정규 분포를 가지는 것으로 가정하였다. Muhammad(1995)는 Monte Carlo 모의 기법을 사용하여 개수로 부등류 흐름방정식을 추계학적으로 해석하였다.

국내의 경우, 이정규와 전세호(2004)는 조도계수의 불확실도가 홍수위에 미치는 영향을 분석하였고, 이을래 등(2005)은 한강 단면의 변화가 홍수위 계산에 미치는 영향을 연구하였다.

본 연구의 목적은 하천 수면곡선 계산에 있어서의 오차의 원인을 분석하고 이에 따라 추계학적 홍수위 계산을 실시함으로써 제방의 월류 위험도를 산정하여 안전한 제방고의 설계를 위한 기초자료를 제시함에 있다. 본 연구에서는 미 육군 공병단에서 개발한 HEC-2 프로그램을 수정하여 프로그램 내부에서 하천홍수위의 변동성을 계산할 수 있는 Monte Carlo 기법이 수행되도록 하였고, 수면곡선 계산의 불확실도 해석과 각 매개변수들에 관한 민감도, 기여도를 평가하였으며, 관련된 불확실도로부터 신뢰도 해석을 실시함으로써 하천제방의 월류위험도를 산정하고 기 제방의 안정성을 분석하였다.

2. HEC-2 불확실도 해석 모형

수면곡선 계산 프로그램인 HEC-2 모형(<http://www.hec.usace.army.mil>)은 1966년 미 공병단에서 개발한 프로그램으로, 자연하천이나 인공하천에서 정상류 상태의 점변류 수면곡선을 계산하기 위해서 개발되었으며, 상류(常流)와 사류(射流) 상태의 수면곡선이 모두 계산가능하고 교량, 암거, 웨어, 홍수터의 구조물과 같은 여러 수공구조물의 영향을 수면곡선 계산에 반영할 수 있다. 본 연구에서는 추계학적 수면곡선 해석을 위하여 HEC-2 모형에 Monte Carlo 기법을 도입하여 수정하였다.

2.1 HEC-2 모형의 지배방정식

하천 부등류 해석시 각 단면에서의 미지의 수위를 계산하기 위하여 다음의 방정식을 표준축차법에 의해서 반복적으

로 계산하게 된다. 식 (1)은 정상상태의 일차원 점변류를 계산하는 식으로 임의 구간의 수위를 시행착오적으로 구한다.

$$Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_f + h_o \quad (1)$$

$$h_f = L S_f \quad (2)$$

$$h_o = C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (3)$$

여기서, Z_1, Z_2 는 구간 양단에서의 수위, V_1, V_2 는 구간 양단에서의 평균유속, α_1, α_2 는 구간 양단에서 흐름의 유속계수, g 는 중력가속도, h_f 는 구간의 마찰 에너지 손실, h_o 는 구간의 단면 확대수축 에너지 손실, L 은 구간거리, S_f 는 구간의 마찰경사, C 는 단면변화 손실계수이다.

2.2 추계학적 수면곡선 분석

하천에서 지금까지의 대부분의 연구는 모형에 사용된 각종 매개변수들의 변동성이 고려되지 않은 상태로서 모형 계산치에 포함되어 있는 오차의 어떠한 정량적인 추정도 실시하지 않은 상태인 확정론적인 값으로서 수립하도록 구성되어 있다. 그러나 확정론적 방법에 의한 흐름 해석은 실제 현상에 대한 근사적인 표현으로서 많은 불확실한 요소를 내포하고 있기 때문에 모형에 의한 계산결과와 실제 관측치간에 완전한 일치를 도출한다는 것은 거의 불가능하다. 그러므로 확정론적 방법에서와 같이 모든 계수들에 대하여 하나의 확정론적 값을 사용하는 것 대신에 이들 계수들의 변동성이나 불확실성을 고려해주는 과정이 반드시 필요하다.

2.2.1 Monte Carlo 기법

Monte Carlo 기법은 실제에 대한 가정과 이에 대한 모형과의 일련의 조합을 기초로 하여 특정 오차분포형으로부터 임의로 난수를 추출하여 실제 상황에 대한 충분히 많은 횟수의 반복수행으로 기대값과 불확실도를 산정하여 공학적 문제를 해결하는 방법이다. 반복적인 모의에 의존한 Monte Carlo 기법은 입력 매개변수의 통계학적 분포형이 알려져 있을 때 본질적으로 유한 오차 해석에 비해 더욱 상세하고 정확한 불확실성 해석이 가능하므로, 고차의 비선형 시스템을 검토하는데 매우 효율적인 방법이다(Wadsworth, 1990). Monte Carlo 기법을 통한 부등류 흐름 방정식을 분석하는 과정은 그림 1과 같다.

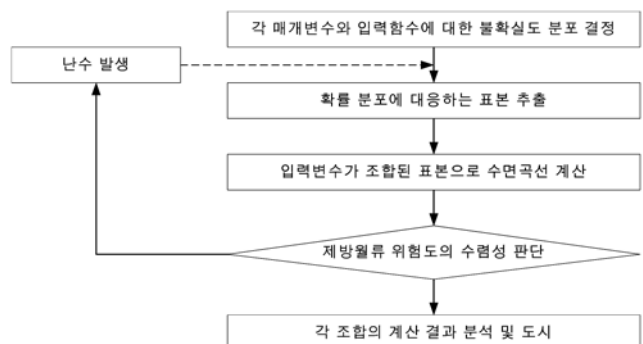


그림 1. Monte Carlo 기법을 이용한 부등류 흐름해석 과정

2.2.2 난수 발생

확률분포에 대응하는 난수들로 조합된 하나의 표본은 현실의 가정 및 상상된 모형에 바탕을 두고 현실 세계를 모방하는 과정이며, 모형을 이용한 모의의 목적이 현실의 모방이기 때문에 모의발생은 시스템 성능에 대한 서로 다른 설계의 영향을 산정하는데 유용한 도구가 될 수 있다(건설교통부, 2002). 난수발생을 위해 사용되는 가장 일반적인 방법은 선형조화법(Linear Congruential method)으로, Lehmer(1951)가 처음 사용한 이래 표준적으로 사용되어져 왔다.

$$Z_i = \{aZ_{i-1}\}(\text{mod } m) \quad (4)$$

여기서, Z_i 는 $\{aZ_{i-1}\}$ 를 정수 m 으로 나눈 나머지고, a 는 승수, m 은 정수 계수이며, Z_0 은 초기값이다. 식 (4)에서 알 수 있듯이 원하는 난수가 연속적인 균등분포를 가지기 위해서는 가능한 잘게 나뉘어 질수록 좋다. 본 연구에서는 Park와 Miller(1988)가 제안한 것과 같이 승수(a)로는 $7^5=16807$ 을 사용하였고, 계수(m)로는 컴퓨터가 표현하는 최대 정수값으로 일반적인 $2^{31}-1$ 을 대입하여 사용하였다. 생성된 임의 수 Z 를 지정된 계수 m 으로 나누면 0에서 1사이의 난수를 얻을 수 있다.

선형조화법으로 모의 발생된 난수(r_i)와 각 확률변수의 평균값(μ_X), 표준편차(σ_X) 또는 최소값(a) 및 최빈값(b)와 최대값(c)로부터 모집단의 분포를 따르는 표본을 추출하였다. 정규분포의 경우 중심극한정리에 근거한 식 (5), 삼각형 분포의 경우 누가분포함수(CDF)의 역함수로부터 식 (6)과 같이 표본을 추출할 수 있으며, 계산의 효율성을 위하여 K값을 12로 하였다(Tung과 Yen, 2005).

$$X = \sigma_X \frac{12}{K} \left(\sum_{j=1}^K r_j - \frac{K}{2} \right) + \mu_X \quad (5)$$

$$X = \begin{cases} a + \sqrt{r_i(b-a)(c-a)} & \text{if } (b-a)/(c-a) \leq r_i \\ c - \sqrt{(1-r_i)(c-a)(c-b)} & \text{if } (b-a)/(c-a) > r_i \end{cases} \quad (6)$$

2.2.3 민감도와 기여도 분석

민감도 분석은 모형 매개변수를 하나씩 변동시킴에 따라, 계수에 대한 불확실성의 변화 양상을 검정하는 가장 보편적인 불확실성 해석방법이다. 민감도는 식 (7)과 같이 구할 수 있으며, 식 (8)과 같은 정규화된 형태로 사용되기도 한다.

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (7)$$

$$S_N = \frac{\Delta Y/Y}{\Delta X/X} \quad (8)$$

여기서, X 는 입력 매개변수의 기본값이고, Y 는 출력변수의 기본값, ΔX 는 입력 매개변수에 대한 변화량, ΔY 는 출력 변

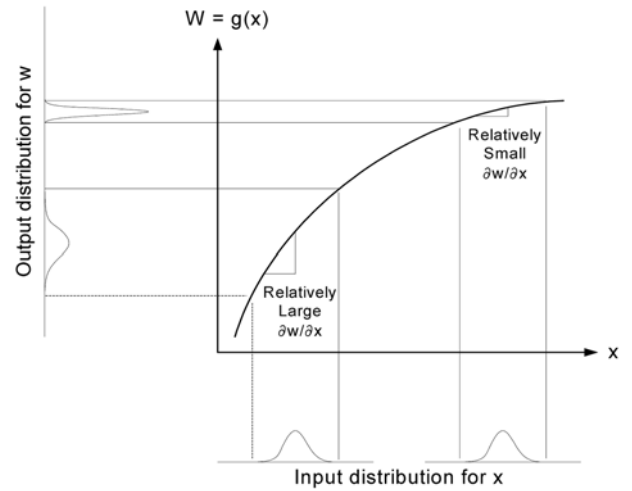


그림 2. 모형 입력력의 불확실도 영향(Vardeman, 1994)

수에 대한 변화량이다. ΔX 와 ΔY 는 X 와 Y 값에 대한 조그만 변화량으로 간주되기 때문에 불확실성 분석이라는 관점에서 민감도만으로는 많은 정보를 주지 못한다. 그림 2와 같이 민감도 특징이 입력매개변수의 변동영역에 따라 비선형적으로 변화되는 모형에 있어서, 임의 특정 영역을 입력매개변수의 변동폭으로 고려할 경우 민감도 분석 결과는 입력 매개변수와 출력매개변수의 전반적인 거동을 완전히 반영할 수 없다.

K 개의 입력 매개변수를 사용하여, M 회 반복 수행되는 Monte-Carlo 기법과 표준추출법으로 수위를 계산하는 과정은 그림 3과 같다.

여기서, Q_m 은 초기유량, Y_m 은 기점수위, $A_{i,m}$ 은 i 단면의 흐름 단면적, $P_{i,m}$ 은 단면의 윤변, $n_{i,m}$ 은 단면의 조도계수, 그리고 $y_{i,m}$ 은 단면의 계산된 수위이다. 계산된 수위는 각 입력 매개변수에 의해 비선형적인 출력을 나타내게 되며, 이러한 경우 입력 매개변수의 변화에 따른 출력변수의 불확실성 영향을 완전하게 파악할 수 없다. n 개의 입력자료로 구성된 함수 $G(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 의 임의점 $P(x_{1p}, x_{2p}, \dots, x_{np})$ 에서 2차 이상의 고차항을 절단한 Taylor 급수전개는 식 (9)와 같이 기술된다.

$$Y = G(x_{1p}, x_{2p}, \dots, x_{np}) + \sum_{i=1}^n (X_i - x_{ip}) \left(\frac{\partial G}{\partial X_i} \right)_p \quad (9)$$

여기서, 아래첨자 p 는 임의점 p 에서 계산되는 것을 의미한다. 일차 근사해에 의한 Y 의 분산은 각 입력자료가 통계학적으로 독립이라고 가정하면 식 (10)과 같다(Tung과 Yen, 2005).

$$\text{Var}(Y) = \sum_{i=1}^n \text{Var}(X_i) \left(\frac{\partial G}{\partial X_i} \right)_p^2 \approx \sum_{i=1}^n \text{Var}(X_i) \left(\frac{\Delta Y_i}{\Delta X_i} \right)_p^2 \quad (10)$$

식 (10)으로부터 전체 출력분산에 대한 하나의 입력변수의

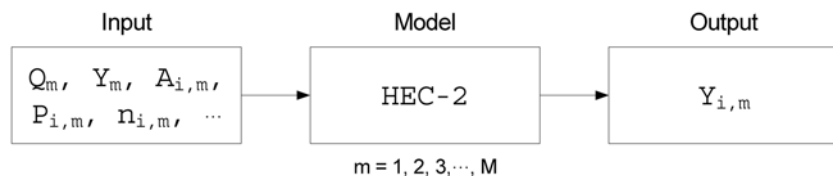


그림 3. 추계학적 홍수위 계산 과정

기여도는 식 (11)과 같이 계산될 수 있으며, 이를 통하여 출력결과에 영향력이 큰 입력매개변수를 결정할 수 있다.

$$Contribution(\%) = \frac{S_i}{Var(Y)} \times 100 \quad (11)$$

여기서, S_i 는 식 (10)에서 고려된 i 번째 분산요소를 의미한다.

3. 입력매개변수의 변동성

홍수위는 주로 특정 재현기간을 가진 설계유량을 정상상태로 가정하고, 정상류의 수리학적 모형이 홍수시 수위를 결정하는데 사용된다. 그러나 불완전하고 부정확한 자료의 수집과 부정확한 자료의 추정 등으로 인해 계산입력자료에 오차가 생길 수 있으며, 본 연구에서는 불확실한 자료의 수집에 의한 오차로서 단면의 종방향좌표와 유량, 기점수위의 불확실도를 고려하였고, 부정확한 자료의 추정에 의한 오차로 Manning 조도계수의 불확실도를 고려하여 모형을 수행하였다.

3.1 설계유량과 기점수위의 불확실성

마찰경사의 분산은 구간길이와 에너지손실의 분산으로 나타낼 수 있다. 그러나 본 연구에서 구간길이는 불확실성이 적은 확정된 값으로 가정하여 임의변수에 포함시키지 않았고, 에너지손실의 영향을 고려하기 위해 계산에 사용되는 수직거리인 기점수위의 값에 빈도별 수위를 고려하여 0.69%의 변동성을 부여하였다. 홍수위는 주로 특정 재현기간을 가진 확률강우에 의한 설계유량으로 계산되는데, 설계유량 산정시 유출해석의 불확실도 뿐만 아니라 댐 붕괴나 산사태 등 재해로 인한 경우는 고려되지 않으므로, 특정 빈도의 강우에 대하여 홍수를 방어하기 위해서는 설계유량에 대한 불확실도 또한 고려되어야 한다. 유량에 대한 입력자료에는 빈도별 유량을 고려하여 상대적으로 큰 2.84%의 변동성을 고려하였다. 우리나라 강우에 대한 대표 확률분포형은 GEV 분포, 또는 Type III 극치 분포 등(이재준과 이정식, 1999) 정규분포가 아니지만, 특정 지속시간과 재현기간으로 산정되는 설계유량은 그 분포가 알려져 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 설계유량과 기점수위의 분포형을 정규분포로 가정하였다.

3.2 단면좌표의 불확실성

흐름단면적과 윤편의 변동성은 단면좌표의 변동성으로 나타낼 수 있으며, 본 연구에서는 단면좌표의 변동성을 산정하

기 위해서 금호강 하천정기기본계획(건설교통부, 1997)에 제시된 최심하상고의 변화로부터 단면좌표의 변동성을 산정하였다. 1983년과 1994년의 실측자료와 1983년 실측하상기준 1994년 HEC-6 하상예측 자료, 1994년 실측하상 기준 2004년 하상예측 자료, 1994년 실측하상 기준 2014년 하상예측 자료로부터 평균(μ)과 표준편차(σ)를 계산하여 금호강 단면좌표의 변동계수(σ/μ)는 3.86%로 산정하였고, 분포형은 정규분포로 가정하였다.

3.3 Manning 조도계수의 불확실성

하천에 있어서의 조도계수는 하도저항의 정도를 나타내는 계수로서 하도의 중횡단 하상변화, 인위적인 하상준설 및 개수, 식생, 유사량 및 유량 등 많은 요인에 의해 변화하므로 정확한 값을 구하는 것은 상당히 어려운 일이다. 실제홍수가 발생한 후에 역산 조도계수 산정에 의해 Manning 조도계수를 구할 수 있다고 하더라도 이는 실제로 발생한 하나의 유량조건에 대한 부등류해석 결과를 기초로 한 것이기 때문에 제한적일 수밖에 없다. 즉 현장답사나 검증과 보정 등의 방법을 거쳐 산정된 조도계수라 할지라도 완전히 신뢰할 수는 없다(Chow, 1959).

본 연구에서 조도계수의 변동성은 Chow가 제시한 조도계수 산정기준에서 굴착 혹은 준설된 하천에서 하상재료가 토양인 직선 단일 수로의 네 가지 경우를 바탕으로 최소값 0.0195, 최빈값 0.023, 최대값 0.027으로부터 계산하였다. 분포형은 Tung과 Mays(1980)의 연구와 같이 삼각형 분포로 가정하였고, 삼각형 분포인 조도계수의 변동계수는 산정된 최소값, 최빈값, 최대값과 식 (12)와 (13)을 사용하여 6.6%로 산정하였다. 산정된 결과는 추계학적 흐름 추적을 위하여 추천되는 조도계수의 변동계수 25% 값(Muhammad, 1995) 보다 작아서 적절한 값으로 판단된다.

$$\bar{n} = \frac{1}{3}(a + b + c) \quad (12)$$

$$V_n = \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{6n^2}(ab + bc + ca) \right]^{1/2} \quad (13)$$

여기서 a 는 최소값이며, b 는 최빈값, c 는 최대값이다.

3.4 제방 신뢰도를 고려한 제방고 결정

1997년 3월, 미 육군 공병단은 제방이 100년 빈도 홍수를 견딜 수 있을 것으로 평가된 확률에 기초하여 표 1과 같은

표 1. 제방고 결정을 위한 추계학적 방법

조건	결정 제방고	설명
$A > B$	B	과대설계(95% 조건부 비초과확률 수위로 제방고 결정)
$C < A < B$	A	기존 방법에 의한 제방고의 결정
$A < C$	C	과소설계(90% 조건부 비초과확률 수위로 제방고 결정)

(주) A : 기설 제방고 표고 (계획 홍수위 + 여유고)

B : 조건부 비초과확률 95% 홍수위

C : 조건부 비초과확률 90% 홍수위

새로운 지침서(USACE, 1997)를 제시하였다. 이러한 제방 검증 기준에 따르면 100년 빈도 홍수사상에 대하여 기존에 좀 더 낮은 제방고로 계산되었던 어떤 홍수위험 지구에 대해서 더 높은 제방 여유고가 필요하였으며, 기존에 좀 더 높은 제방고로 계산되었던 다른 홍수위험 지구에 대해서는 더 낮은 제방 여유고가 필요하였다.

4. 모형의 적용 및 결과

금호강 제방의 위험도를 산정하기 위하여 오로천 합류점에서 낙동강 합류부까지 38.5 km 구간을 대상구간으로 선정하였다. 전체 단면의 개수는 95개이며 평균적인 계산거리간격은 500 m이다. 대상구간에 유입하는 지류들 중에서 유역면적이 크고 홍수시 본류의 유량에 큰 영향을 미친다고 판단되는 오로천, 신천, 팔거천, 이연천을 고려하였다. 또한 도시를 관류하는 구간(대구시 구간 No. 24~No. 61)에 있어서는 하천

연변에 주거지 등이 밀집되어 있어 홍수피해 발생시 인명, 재산 등 막대한 피해가 예상되므로 200년 빈도의 계획홍수량을 사용하여 분석하였다. 모의대상구간은 그림 4와 같다.

대상구간에서의 빈도별 홍수량과 기점홍수위, 조도계수를 금호강 하천정비계획(건설교통부, 1997)을 참조하여 표 2에 나타내었다. 기점수위는 낙동강 하천정비기본계획(보안III)(건설교통부, 1993)에 수록된 363번 지점의 빈도별 홍수위를 사용하였고, 3.1절에서 100년 빈도의 값을 기준으로 150년 빈도의 값을 초과하지 않을 확률이 99%가 될 수 있도록 제시된 변동성에 따라 발생된 설계유량과 하류단 기점수위를 그림 5로 나타내었다.

4.1 적정 반복모의횟수의 결정

Monte Carlo 기법을 사용하면서 주의해야 할 점은 계산시간의 단축과 자료의 효율적인 정리를 위해 적절한 반복횟수를 결정하는 것이다. 이를 위해 각 단면에 대해서 모의횟수

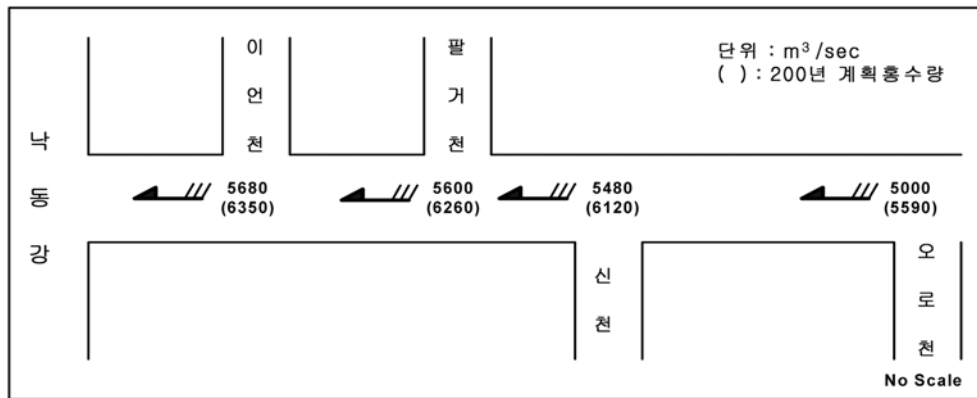


그림 4. 대상구간

표 2. 금호강 본류의 빈도별 홍수량/기점홍수위와 구간별 조도계수

산정지점		빈도					구간	조도계수
		50년	80년	100년	150년	200년		
홍수량	오로천 합류 후	4400	4800	5000	5340	5590	하구~팔거천 합류후 (No. 0~No. 28)	0.025
	신천 합류 후	4810	5250	5480	5840	6120	팔거천 합류전~신천 합류후 (No. 28+480~No. 37)	0.027
	팔거천 합류 후	4920	5370	5600	5980	6260		
	이연천 합류 후	4990	5450	5680	6070	6350	신천 합류전~오로천 합류후 (No. 37+430~No. 77)	0.031
기점홍수위		24.40	24.90	25.12	25.53	25.80		

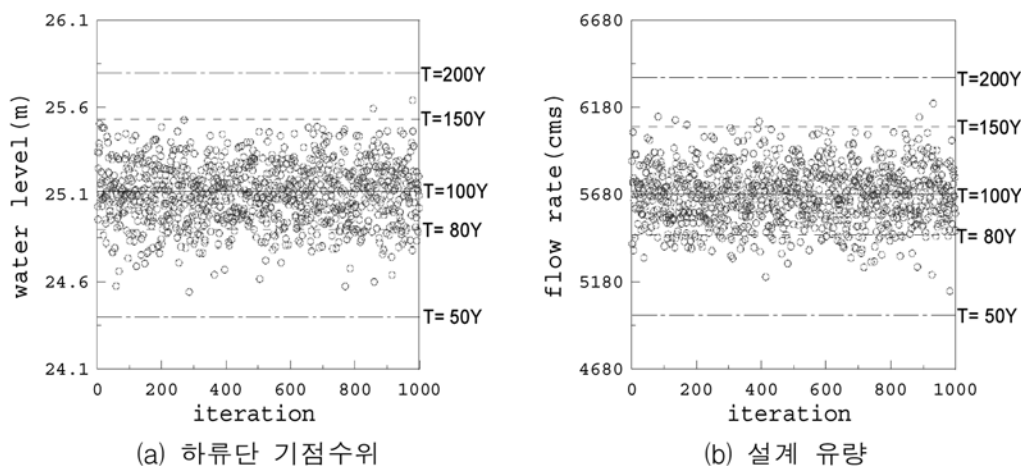


그림 5. 모의에 사용된 기점수위와 설계유량

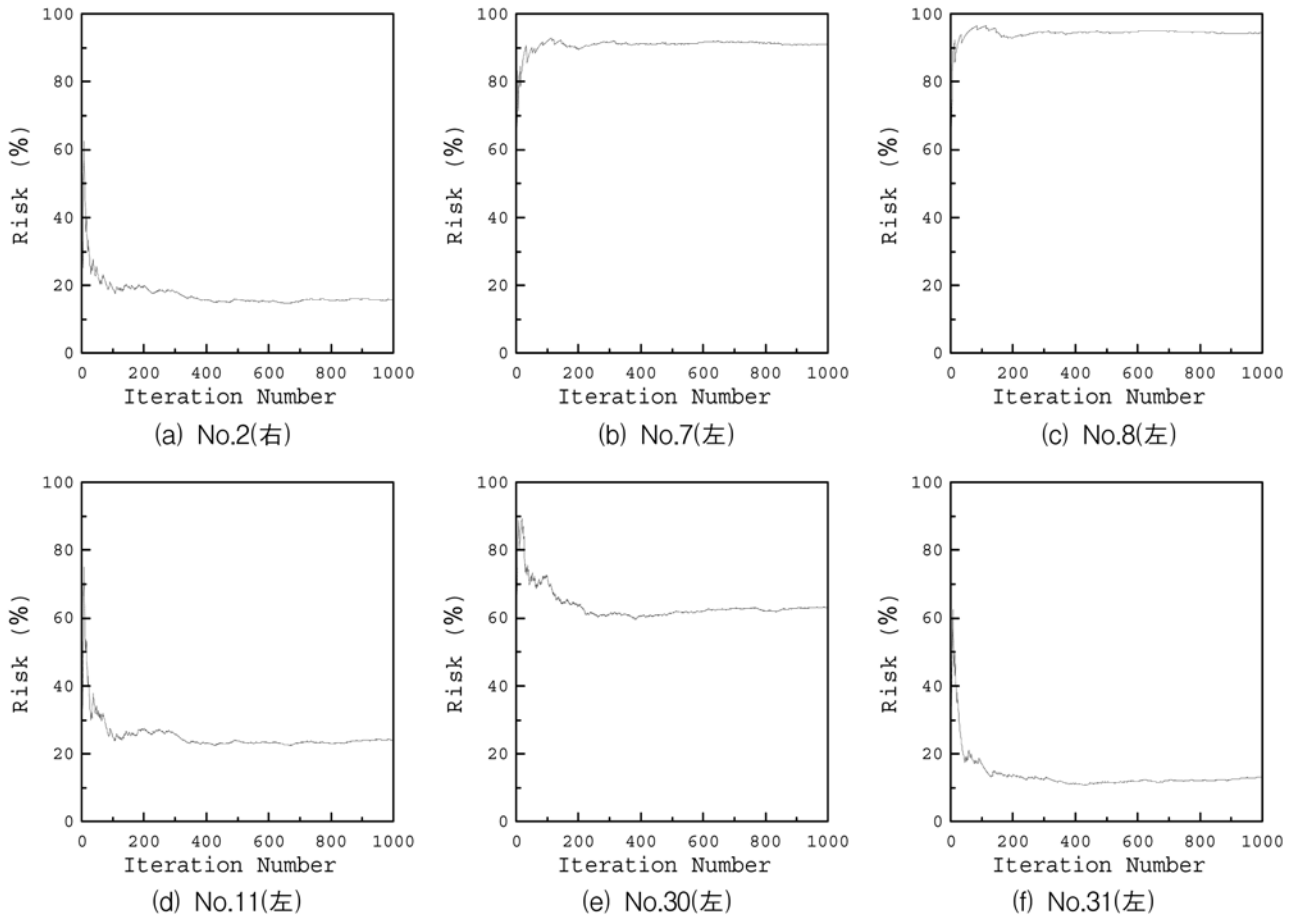


그림 6. 각 단면에서의 월류위험 수렴도

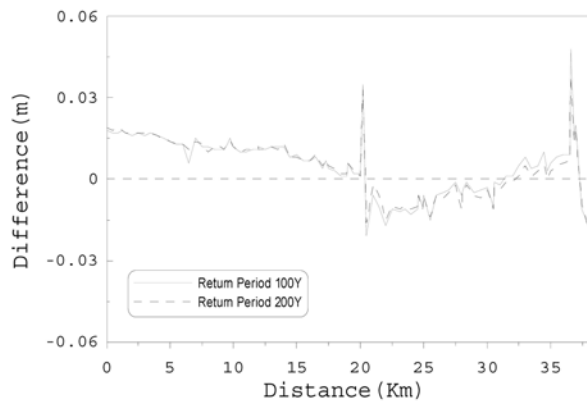
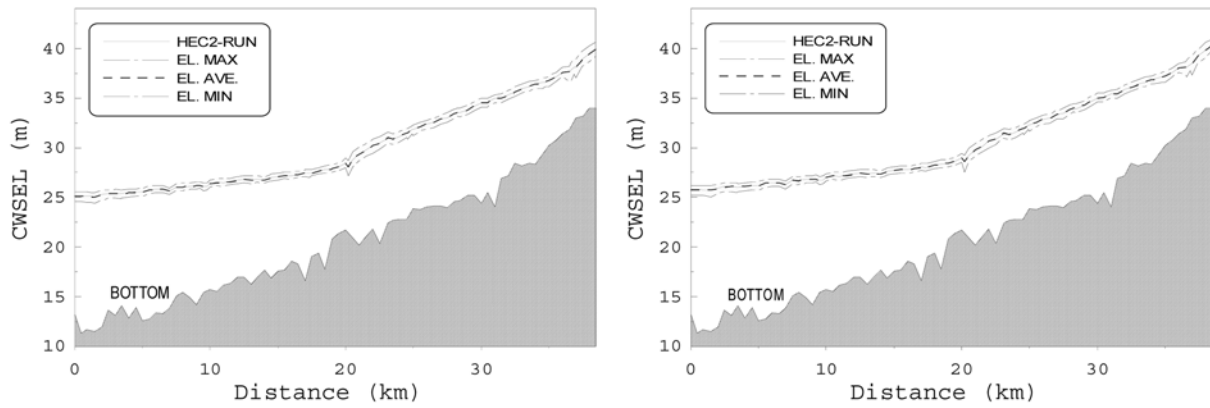


그림 7. HEC-2와 본 모형(평균값)의 결과 비교

획(건설교통부, 1997)에 수록된 단면번호를 참조하여 그림 6에 나타내었다. 그림에서 나타내듯이 각 단면마다 계산이 수렴하는 횟수는 각기 다르지만 대부분의 단면이 약 600회 정도에서 수렴하므로 본 모형의 오로천 합류 후~낙동강 합류부 구간에 대한 반복모의횟수는 600회로 결정하였다. 이 때 위험도(P_f)는 식 (14)로 산정하였다.

$$P_f = \frac{N_f}{N} \quad (14)$$

여기서, N_f 는 계산수위가 기설제방고보다 큰 빈도수이고, N 는 반복계산수이다.

4.2 모형의 타당성 검증

본 모형의 타당성을 검증하기 위해서 재현기간 100년과 200년의 계획홍수량과 기점홍수위로 기존의 HEC-2 모형을 사용하여 계산된 수면곡선과 본 모형에서 네 개 입력변수의 변동성을 모두 고려한 경우의 홍수위 평균값을 비교하여 그림 7에 나타내었다. 추계학적모형의 적용결과와 평균값은 기존 HEC-2의 수면곡선 계산결과와 비교하여 상류방향으로 36.6 km 지점에서 최대 4.8 cm의 차이를 나타내고 있지만, 그 밖의 구간에서 3.0 cm 이내로 거의 일치하는 것으로 나타나므로 Monte Carlo 기법의 도입을 위한 HEC-2 프로그램 개선에 대한 타당성을 검증할 수 있었다.

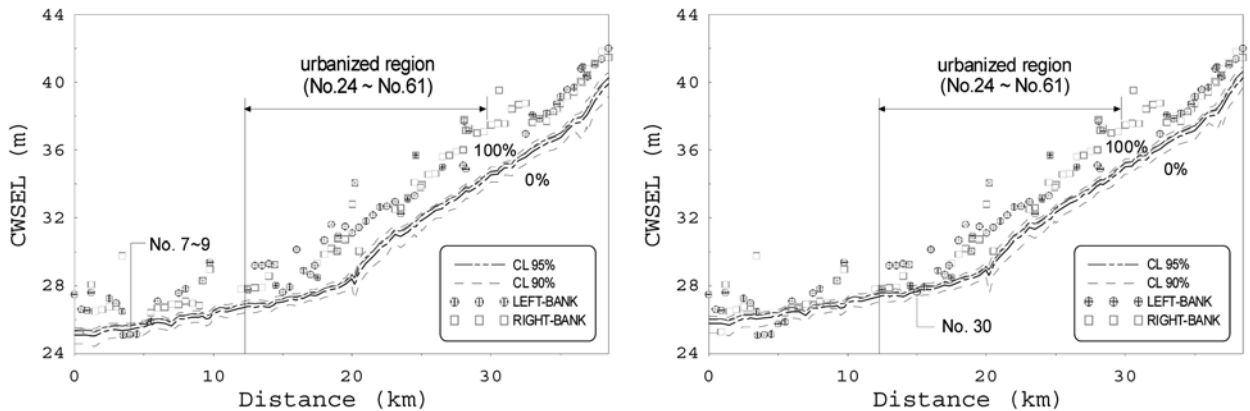
4.3 제방 월류위험도와 추계학적 제방고 산정

대상구간에 대해 불확실도를 고려한 수위 계산결과와 기설 제방고를 비교함으로써 각 단면별 월류위험도를 산정하였다. 기설제방고는 금호강 하천정비기본계획을 참고하였으며, Monte Carlo 기법을 적용하여 계산된 수면곡선을 실제 제방고와 비교하여 그림 8에 나타내었다. 해석결과 금호강 본류의 제방은 고려된 95개 지점 중 7개 지점에서 제방증고의 필요성이 있었으며, 그 밖의 대부분 구간에서 안정적으로 건설되어 있음을 알 수 있다. 계산된 수위가 제방을 월류하는 위험도와 3.5절에서 언급한 추계학적 제방고를 표 3에 주요 위험 단면별로 나타내었다.

대구광역시 구간(No.24~No.61) 중 No.30 지점의 경우 대도시 구간 내 다른 지점에 비해 위험도가 높아 19 cm의 제방증고가 필요한 것으로 분석되었고, 재현기간 100년의 계획홍수량으로 계산된 금호강 상습침수구역인 세천잠수교 부근 No.7, No.8, No.9 지점은 위험도가 95% 이상으로 49~56의 제방증고가 필요한 것으로 계산되었다.

4.4 민감도 분석

입력 매개변수에 대한 민감도를 살펴보기 위하여 변동성을 가질 것으로 예측된 4개의 입력 매개변수 모두에 대해 민감도 분석을 실시하였고, 출력 매개변수로는 지정된 지점에서의 수위 계산결과를 고려하였으며, 대도시 구간 중 제방월류



(a) 재현기간 100년 계획 홍수량

(b) 재현기간 200년 계획 홍수량

그림 8. 불확실도 해석 결과와 기 제방고의 비교

표 3. 단면별 우측 제방 월류위험도

단면 번호	계획 홍수량 (cms)	확정론적 수위 (m)	위험도(%)		기설제방고(A)		(B)	(C)	추계학적 제방고			제방증고		
			좌안	우안	좌안 (m)	우안 (m)	CL 95%	CL 90%	select	좌안 (m)	select	우안 (m)	좌안 (cm)	우안 (cm)
2	5680	25.11	0.00	15.17	26.54	25.27	25.36	25.30	B	25.36	C	25.30		3.0
7	5680	25.38	96.67	-	25.08	산	25.60	25.57	C	25.57	-	-	49.0	-
8	5680	25.45	98.50	-	25.11	산	25.67	25.63	C	25.63	-	-	52.0	-
9	5680	25.53	99.50	-	25.14	도로	25.75	25.71	C	25.71	-	-	56.0	-
10	5680	25.56	6.67	-	25.75	도로	25.77	25.73	A	25.75	-	-	0.0	-
11	5680	25.78	23.17	0.00	25.87	26.42	25.98	25.95	C	25.95	B	25.98	7.0	
25	6350	27.44	0.17	0.00	27.75	27.84	27.64	27.59	B	27.64	B	27.64		
30	6260	27.68	62.00	-	27.63	고속도로	27.86	27.82	C	27.82	-	-	19.0	-
31	6260	27.81	11.83	-	27.94	고속도로	28.00	27.95	C	27.95	-	-	1.0	-

(주) □ 재현기간 100년 적용구간 ◻재현기간 200년 적용구간

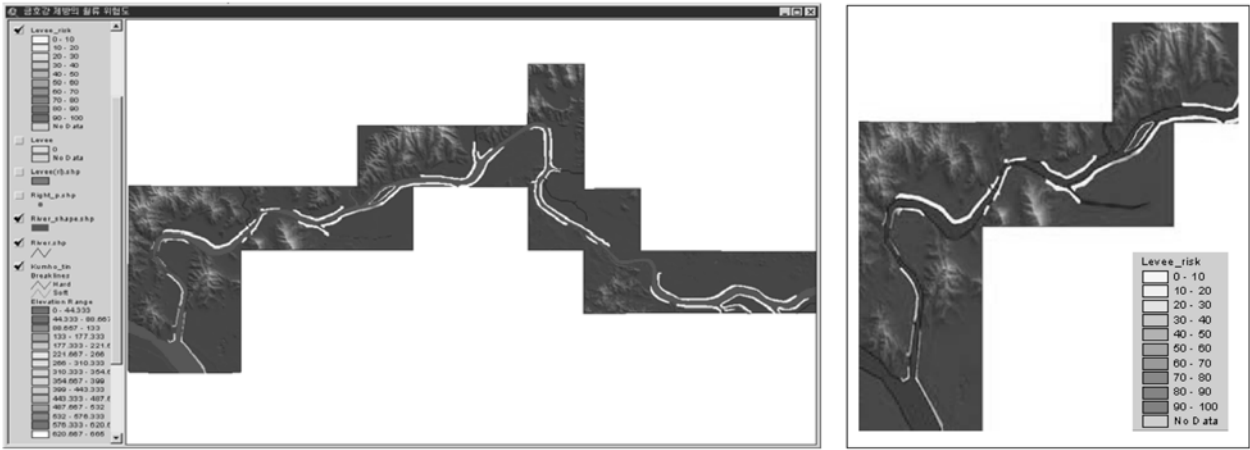


그림 9. 하천 제방의 월류 위험도 계산 결과

표 4. 민감도 분석결과 (팔달교 지점)

	민감도	정규화된 민감도	분산요소 ($\times 10^{-4}$)	기여도 (%)
기점수위(m)	0.4671	0.4353	40.703	94.8937
조도계수	21.0000	0.0205	0.0859	0.2002
설계유량(m^3/s)	0.0004	0.0978	1.9906	4.6407
단면좌표(m)	0.0280	0.0251	0.1138	0.2653

위험이 있을 것으로 예상된 No.30 지점(팔달교)에서 분석하였다. 입력 매개변수들의 불확실도는 본 연구에서 사용되었던 변동범위를 벗어나지 않는 범위에서 0.5%의 변동계수를 가지는 정규분포로 지정하였고 분석결과를 표 4에 나타내었다. 여기서 민감도는 식 (7)을 사용하였고, 정규화된 민감도는 식 (8)을 사용하였으며, 식 (11)과 같은 기여도를 이용함으로써 수위계산에 미치는 입력 매개변수의 영향력을 산정하였다. 표 4에서 계산된 수위에 대한 네 개의 입력 매개변수의 민감도와 기여도를 살펴 볼 때, 민감도가 클 경우 기여도도 반드시 크지 않다는 것을 알 수 있으며, 이를 통하여 기여도 산정의 필요성을 알 수 있다. 민감도 분석의 결과, 낙동강에서 14.5 km 떨어진 팔달교 지점의 제방월류 위험도는 기점수위에 그 영향력이 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 부등류의 수면곡선 계산 프로그램인 HEC-2 모형에 Monte Carlo 기법을 도입하여 홍수위 계산의 불확실도를 해석하고 계산된 수위를 실제 제방고와 비교하여 그 월류위험도를 산정한 것으로, 주요 연구결과는 다음과 같다.

1. 본 연구에서는 부등류 수면곡선 계산에 사용되는 매개변수의 불확실도를 고려하기 위해 HEC-2 모형을 수정함으로써, 프로그램 내부에서 Monte Carlo 분석에 의한 하천 제방 위험도 및 신뢰도를 정량적으로 평가할 수 있는 수치모형을 개발하였고, 600회에 걸쳐 반복 수행한 추계학적 홍수위의 계산 값들의 평균값이 기존 HEC-2 모형의 계산결과와 거의 일치함을 보임으로써 본 모형의 적용성을 입증하였다.

- 홍수위의 변동성과 실제 제방고외에 의한 실행함수를 구성하여 각 지점별 제방월류 위험도를 산정하였다. 그 결과 상습침수구역인 낙동강 합류부에서 상류방향으로 3.5 km, 4 km, 4.5 km 지점은 그 위험도가 95% 이상으로 나타났으며, 제방 신뢰도를 고려한 추계학적 제방고 결정에서도 0.5 m 이상의 제방증고가 필요한 것으로 분석되었다.
- 민감도 분석을 통하여 관심 위험단면의 제방월류 위험도 계산에 대해 기여도가 큰 입력매개변수들을 결정함으로써 확실적인 하천관리보다 효과적인 치수관리가 수행될 수 있을 것으로 판단되었다. 또한, 본 연구에서는 하천제방의 월류위험도를 추계학적으로 산정할 수 있도록 프로그램을 확립하였으므로, 제방고의 결정 및 유지보수 등의 분야에 적용하여 치수계획수립에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- 감사원(2003) 자연재해 대비실태 감사결과.
 건설교통부(1993) 낙동강 하천정비기본계획 보고서(보안III).
 건설교통부(1997) 금호강 하천정비기본계획 보고서.
 건설교통부(2002) 하천시설을 설계시 신뢰도 분석 개념 도입에 관한 연구.
 이을래, 김원, 김상호(2005) 수리학적 인지에 의한 한강에서의 홍수위 영향 분석, 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제38권 2호, pp. 121-131.
 이재준, 이정식(1999) 우리나라 도시배수 시스템 설계를 위한 확률강우강도식의 유도, 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제32권 4호, pp. 403-415.
 이정규, 전세호(2004) 부정류 모형을 이용한 한강의 수리학적 홍수추적에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제 24권 제4B호, pp. 301-310.
 한국수자원학회(2002) 하천설계기준.
 Cesare, M.A. (1991) First-order analysis of open-channel flow, *J. Hydr. Engrg.* ASCE, Vol. 117, No. 2, pp. 242-247.
 Chiu, C.L. and Lee, T.S. (1972) Reliability and uncertainty in predicting transport processes in natural streams and rivers, *Proceedings of the Int. Symp. on Uncertainties in Hydrologic and Water Resour. Systems*, Univ. of Arizona, Tucson, Ariz.
 Chow, V.T. (1959) *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Book

- Co.
- Lehmer, D.H. (1951) Good parameters and implementations for combined multiple recursive random number generators, *Operation Research*, 47-1 pp. 159-164.
- Mizumura, K. and Ouazar, D. (1992) Stochastic characteristics of open channel flow *Proc. of the Sixth IAHR International Symp. on Stochastic Hydraulics*, Taipei, Taiwan, China, pp. 417-423.
- Muhammad, A. A-Z. (1995) *Stochastic Modeling of Unsteady open-Channel Flow*, Ph.D. Thesis, Civil Eng. Dept., Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado.
- National Research Council (1995) *Flood Risk Management and the American River Basin : An Evaluation*. National Academy Press.
- National Research Council (2000) *Risk analysis and uncertainty in flood damage reduction studies*. National Academy Press.
- Oegema, B.W. (1985) *Uncertainty Analysis for delineated Flood-plains*. Master's Thesis, University of Waterloo, pp. 7-76
- Park, S.K. and Miller, K.W. (1988) Random Number Generators : Good Ones are Hard to Find, *Communications of the ACM*, V. 31. No. 10, pp. 1192-1201.
- Tung, Y.K. and Mays, L.W. (1980) Risk analysis for hydraulic design, *J. of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 106, No. HY5, pp. 893-913.
- Tung, Y.K. and Yen, B.C. (2005) *Hydrosystems Engineering Uncertainty Analysis*, McGraw-Hill Publishing Co., N.Y.
- USACE. (1997) *Guidance on Levee Certification for the National Flood Insurance Program*, CECW-P/CECW-E, Washington, D.C.
- Vardeman, S.B. (1994) *Statistics of Engineering Problem Solving*, PWS Publishing Company, Boston, MA.
- Wadsworth, H.M. Jr. (1990) *Handbook of Statistical Methods for Engineers and Scientists*, McGraw-Hill Publishing Co., N. Y.
- Willis, R., Finney, B.A., Mckee, M., and Militello, A. (1989) Stochastic analysis of estuarine hydraulics:1. One dimensional steady flow, *Stochastic Hydrol. Hyraul.*, pp. 71-84.
- Yen, B.C. and Ang, A. H-S. (1971) Risk analysis in design of hydraulic projects, *Stochastic hydraulics, Proc. first Inter. Symp.*, University of Pittsburgh, Pennsylvania, pp. 694-701.
- Yen, B.C. and Yen, C.Y. (1992) Stochastic perspective of open channel equations, *Proc. of the Sixth IAHR International Symp. on Stochastic Hydraulics*, taipei, Taiwan, China, pp. 401-407.
- Xiao-Liang, Yang and Chen-Shen Kung (1994) Parameter Uncertainty in Dam-Break Flood Modeling, *River Flood Hydraulics*, March, pp. 22-25.

(접수일: 2006.2.7/심사일: 2006.5.30/심사완료일: 2006.7.24)