韓國水資源學會論文集
第42卷 第7號 · 2009年 7月
pp. 547~558

DOI: 10.3741/JKWRA.2009.42.7.547

# 신뢰도 지수를 적용한 하천제방의 위험도 평가

## Risk Assessment of Levee Embankment Applying Reliability Index

안 기 홍* / 한 건 연** / 김 병 현***

Ahn, Ki Hong / Han, Kun Yeun / Kim, Byung Hyun

### Abstract

General reliability assessment of levees embankment is performed with safety factors for rainfall characteristics and hydrologic and hydraulic parameters, based on the results of deterministic analysis. The safety factors are widely employed in the field of engineering handling model parameters and the diversity of material properties, but cannot explain every natural phenomenon. Uncertainty of flood analysis and related parameters by introducing stochastic method rather than deterministic scheme will be required to deal with extreme weather and unprecedented flood due to recent climate change. As a consequence, stochastic-method-based measures considering parameter uncertainty and related factors are being established. In this study, a variety of dimensionless cumulative rainfall curve for typhoon and monsoon season of July to September with generation method of stochastic temporal variation is generated by introducing Monte Carlo method and applied to the risk assessment of levee embankment using reliability index. The result of this study reflecting temporal and regional characteristics of a rainfall can be used for the establishment of flood defence measures, hydraulic structure design and analysis on a watershed.

***keywords*** : risk assessment, rainfall variation, Monte Carlo method, levee embankment, reliability index

### 요 지

일반적인 하천제방의 안정성 평가는 확정론적 분석결과를 토대로 강우특성, 매개변수 등에 대한 불확실성을 안전계수를 도입하여 실시하고 있다. 이러한 안전계수는 모형의 매개변수 및 재료 속성의 다양성을 다루는 공학에 폭넓게 이용되나 임의의 자연 현상의 모든 것을 설명해주지는 않는다. 특히 근래에 들어 발생되는 지구온난화에 따른 이상기후 현상과 사상 유래가 없는 홍수들의 발생은 확정론적인 방법에 의존하기 보다는 추계학적 방법을 도입한 수문량 확충 및 매개변수의 불확실성 분석의 필요성이 증대되고 있다. 이에 전 세계적으로 매개변수와 특성인자의 불확실성을 고려하고 인자들 간의 상관관계를 고려한 추계학적 방법 기반의 대책 수립이 추진되고 있는 상황이다. 본 연구에서는 추계학적 강우변동 생성기법을 이용하여 태풍기와 장마기에 해당하는 6월, 7월과 8월, 9월에 발생 가능한 다양한 무차원 누가강우량곡선을 Monte Carlo 기법을 도입하여 생성하였고 신뢰도 지수를 이용하여 하천제방의 위험도를 평가하였다. 본 연구결과는 강우의 지역적 특성 및 시간적 특성을 반영할 수 있어 해당 유역의 홍수대책 수립, 수공구조물 설계 및 분석 등 활용성이 매우 클 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 위험도 평가, 강우변동, Monte Carlo 기법, 하천제방, 신뢰도 지수

* 한국수자원공사 댐 · 유역관리처 공동연구원
Co-researcher, Dam & Watershed Dept., K-Water, Daejeon 306-711, Korea
** 경북대학교 공과대학 건축 · 토목공학부 교수
Professor, School of Archi. & Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu, 702-701, Korea
*** 교신저자, 경북대학교 공과대학 건축 · 토목공학부 BK21사업단 박사후연구원
Corresponding Author, Post-Doc., School of Archi. & Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu, 702-701, Korea
(e-mail: hydrobk@knu.ac.kr)

## 1. 서 론

수리학적 설계에서 구조물의 신뢰도는 구조물이 service period 동안 본래의 목적을 수행하는데 있어서 파괴되지 않을 확률 개념으로 정의되고 위험도는 이와는 상반된 개념을 가진다. 일반적인 하천제방의 안정성 평가는 확정론적 분석결과를 토대로 강우특성, 매개변수 등에 대한 불확실성을 안전계수를 도입하여 실시하고 있다. 이 안전계수는 모형의 매개변수 및 재료 속성의 다양성을 다루는 공학에 폭넓게 이용되나 그 이론은 임의의 자연 현상의 모든 것을 설명해주지는 않는다. 또한 최근 지구온난화에 따른 이상기후 현상과 급격한 도시화 및 산업화에 따른 유출양상의 변화 등으로 인해 사상 유래가 없는 홍수들이 빈발하고 있어 설계빈도의 무조건적인 상향조정에 따른 확정론적인 방법에 의존하기 보다는 추계학적 방법을 도입한 수문량 확충 및 매개변수의 불확실성 분석의 필요성이 증대되고 있다. 이에 전 세계적으로 매개변수와 특성인자의 불확실성을 고려하고 인자들 간의 상관관계를 고려한 추계학적 방법 기반의 대책 수립이 추진되고 있는 상황이다.

Hromadka and McCuen(1987)은 수문 분석이나 설계시의 불확실성의 영향을 조사하기 위하여 추계학적 적분식을 도입하였고 Thorndahl *et al.*(2007)은 도시지역의 침수확률 산정을 위해 추계학적 우량주상도를 생성하였다. 그리고 Gui *et al.*(1998)은 설계홍수량을 확률변수를 통해 산정하여 제방에 대한 신뢰도 분석을 실시하였고, 이를 토대로 수문학적 불확실도가 수리학적 불확실도보다 제방의 신뢰도에 더 큰 영향을 미침을 밝혔으며 Wu *et al.*(2006)은 강우양상 생성을 통해 강우의 불확실성을 반영하려 하였다.

수공구조물에 대한 신뢰도와 위험도의 개념은 미 육군 공병단의 경우 1920년대 이래로 홍수 피해 저감 프로젝트를 수행함에 있어 불확실성을 고려한 위험도를 평가하기 위하여 신뢰도 분석의 개념을 도입하고자 하였으며, 활발한 연구가 시작된 계기는 1990년대 초 하천제방의 여유고 개념이 지역에 따른 지리 및 수문학적인 차이를 설명할 수 없다는 의문을 갖기 시작하면서이다. 일반적으로 수공구조물에 대한 위험도 분석은 Manning 식을 이용하는데 Mays and Tung(1992)은 Manning 식에서 계산되는 유량의 불확실성을 분석하였고 Lee and Mays(1986)는 제방용적의 불확실성을 결정하는데 FOSM 분석을 실시하였으며, Johnson(1996)은 선행 연구사례를 종합하여 수리학적 매개변수들의 불확실도를 추정하였다. 그리고 Merkel and Westrich(2008)는 조도계수와 같은 수리매개변수에 대한 불확실성에 Monte Carlo 기법을 적용하여 제방의 위험도를 산정하는 방안에 대해 연구하였다.

한편 국내에서의 하천 수공구조물에 대한 위험도분석에 관한 연구로는 윤광석과 김규호(2006)가 수공학적 측면에서의 하천제방의 안정성에 대해 조사하였는데, 국내에 발생된 제방붕괴 사례를 검토하여 제방붕괴 원인 및 유형을 분류하였으며, 건설교통부(2002)는 하천시설물 설계시 신뢰도 분석 개념을 도입하기 위해 월류시 제방 위험도 산정 및 치수경제성 분석을 실시하였다.

이제까지 이 분야에 대한 연구는 연구사례가 적고, 수문학적 불확실성 인자를 설계홍수량의 분포형에서만 찾고 있어 실제 강우의 특성을 제대로 반영하지 못하고 있어 실제 하천제방의 위험도 산정에 관한 연구모형 개발과 적용은 아직까지 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실제 강우자료를 활용하여 발생 가능한 강우양상을 생성하고 이를 토대로 하천제방의 위험도를 평가할 수 있는 체계를 구축하며 이에 대한 적용성을 규명하고자 한다.

## 2. 강우변동 생성기법

### 2.1 부하-저항 해석

지금까지 수공구조물의 신뢰도 평가는 안전율로 평가되어왔으며, 이는 부하(load)와 저항(resistance)의 비로 표현된다. 하지만 안전율은 여러 실행방안에 대한 구조물의 상대적 신뢰도만을 평가하는 한계점을 가진다. 즉, 물리적 변수, 외력 및 저항 등과 같은 주요 매개변수들이 하나의 값으로 할당될 때, 변수가 갖고 있는 불확실성으로 인해 이러한 한계점은 더욱 두드러져 보이게 될 것이다. 일반적으로 하나의 값으로 정의된 접근법을 결정론적 접근법이라 하며, 기술자의 판단과 형태조건 등을 고려하여 변수값을 결정하게 된다. 하지만, 또 다른 접근법인 확률론적 접근법은 안전율 개념에 매개변수의 불확실성을 포함시켜 판단하게 된다. 이 불확실성은 기존 자료의 통계 분석을 통하여 정량화되거나 또는 기술자의 판단에 의해 정해진다. 비록 판단에 의해 정해진다 하더라도 기술자는 각 매개변수에서 그들의 판단에 대한 불확실성의 평가를 제공하기 때문에 확률적 결과는 결정론적인 분석보다 더 의미가 있을 수 있다.

시스템 혹은 구성요소가 그 능력을 초과할 확률을 부하(수요, 외력)와 저항(용량)의 관계 정립을 통해 모델이 실패하거나 실행이 불만족스러울 확률로 나타낸 것을 부하/저항 모델이라 한다. 부하와 저항은 단일 실행함수로 결합되고 이 부하량이 저항량과 같을 때를 한

계 상태로 본다. 결국 위험도는 용량이 한계상태를 넘을 확률이 되는 것이다.

부하-저항 모델의 개념은 Fig. 1에 나타나 있다. 하천 제방의 경우 부하는 홍수량, 홍수위가 될 수 있고 저항은 이에 대한 통수능, 제방고 등이 될 수 있다. 결국 부하 확률변수 $L$과 저항 확률변수 $R$의 기댓값과 표준편차를 사용하여 안전계수($F_S$)의 기댓값과 표준편차가 계산될 수 있다. 만약 안전계수가 대수정규분포라 가정한다면 안전계수의 자연로그는 정규 분포가 된다. 실행함수는 안전계수를 로그변환하게 되며 한계상태는 $\ln(F_S)=0$의 조건으로 취해진다. 실패할 확률 조건은 $\ln(F_S)<0$ 이다. 결국 실패할 확률은 표준 통계표를 이용하여 얻을 수 있다.

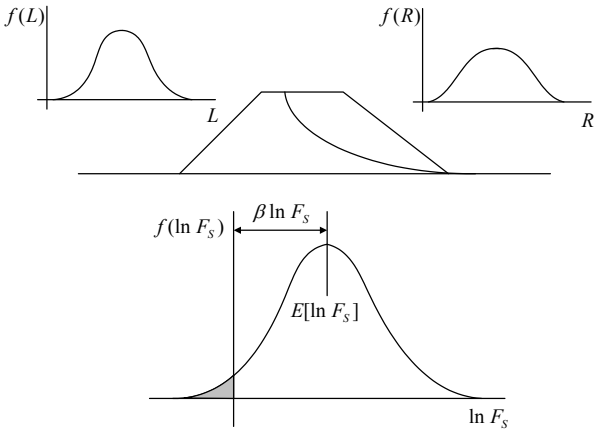



Fig. 1. Risk Analysis using Load-resistance Model

그러므로 수리시스템에 대한 위험도 분석은 외력과 저항의 관계를 정립함으로써 이루어질 수 있다. 위험도는 시스템이 설계된 기능을 수행하지 못할 확률 또는 파괴의 확률로서 정의될 수 있다. 결국 위험도 분석은 시스템 및 구조물의 실패 확률 $P_f$을 발견하는 것에 의의가 있다. 만약 실패하지 않는다면 시스템이 신뢰성 있다고 고려됨에 따라 이 신뢰도와 실패 확률은 합하여 그 총합이 1이 된다. 위험도 $P_f$는 Eq. (1)과 같이 저항과 하중으로 나타낼 수 있다. 신뢰도 지수는 $\sigma_{\ln F_S}$로 나타낸 0에서부터 $E[\ln F_S]$까지의 거리로 정의된다.

$$P_r+P_f=1 \qquad P_f=1-P_r=P(L>R) \tag{1}$$

여기서, $P(x)$ : 사상 $x$의 발생 확률, $L$ : 하중
$R$ : 저항, $\beta$ : 신뢰도 지수

Eq. (1)은 실행변수 $Z$의 항으로 다시 기술될 수 있으며, 여기서 $Z$는 음의 값이 시스템의 파괴를 의미하는 $R-L$, $(R/L)-1$, $\ln(R/L)$과 같이 정의될 수 있다.

$$P_f=P(Z<0) \tag{2}$$

따라서, 실행변수 $Z$를 이용한 위험도 $P_f$는 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f=P(Z<0)=\int_{-\infty}^{0} f_Z(z)dz \tag{3}$$

만약 $Z$가 정규 분포라고 하면 $P_f$는 다음과 같다.

$$P_f=\Phi(-\beta)=1-\Phi(\beta) \tag{4}$$

여기서, $\beta$ : $\mu_Z/\sqrt{Var[Z]}$, $\mu_Z$ : 평균, $Var[Z]$ : 분산
$\Phi(\beta)$ : 신뢰도 지수 $\beta$에서 산정된 누가 정규분포함수

## 2.2 강우변동 생성기법

강우량은 장소와 시간에 따라 다양하기 때문에 실제 강우량 자료를 통해 각각의 강우변동을 생성하기 위해선 먼저 각 강우사상별 시간에 따른 양상을 분류해야 되는데 이를 위해 무차원화를 실시하여 4가지 형태의 강우변동 양상을 구분하였다. 무차원화된 누가강우량 곡선의 각 절점은 상관관계를 가지고 0보다 크고 전체의 합이 1이여야 되는 제약조건을 가지며 비정규분포형태를 띄게 된다. 결국 강우변동 생성을 위해선 이러한 절점의 특성을 반영하는 Monte Carlo 기법이 필요하게 된다.

본 논문에서는 먼저 제약조건 극복을 위해서 Aitchison(1986)이 제안한 log-ratio 기법을 도입하였다. log-ratio 변환은 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_i=\log\left(\frac{P_i}{P_{i^*}}\right), \quad 1\le i\le D-1,\ i\ne i^* \tag{5}$$

여기서, $P_{i^*}$ : 분석자료의 임의 요소

$i=1,2,\cdots,D$에 대해 $0\le P_i\le 1$이기 때문에 변환된 $Y_i$는 $-\infty$에서 $\infty$까지 범위를 갖게 된다. 여기서 $P_i$와 $P_{i^*}$ 둘 다 0이 되지 않도록 주의해야 한다. log-ratio 방법의 역 변환을 통해서 Eq. (5)로부터 (6)을 구할 수 있다.

$$P_i=\frac{\exp(Y_i)}{1+\exp(Y_1)+\cdots+\exp(Y_{D-1})}, \tag{6a}$$

$$1\le i\le D-1,\ i\ne i^*$$

$$P_{i^*}=\frac{1}{1+\exp(Y_1)+\cdots+\exp(Y_{D-1})} \tag{6b}$$

여기서, $0\le P_i\le 1$, $\sum_{i=1}^{D}P_i=1$

앞서 실시한 무차원화 시킨 강우자료의 각 성분은 강우양상의 전체적 양상을 파악하려는 본 연구의 목적과, 양의 값을 갖고 총 합이 1이 되는 구성비자료 비율분석의 제약조건과도 부합된다. 이러한 무차원화 시킨 강우양상 형태는 log-ratio 방법을 통해 0과 1사이의 값들로 구성되어 있으며 항상 증가하는 값을 가지는 제약조건으로부터 벗어날 수 있게 된다. 즉, 제약조건이 있고 비정규분포를 가지는 다변량 문제를 제약조건이 없는 비정규 다변량 문제로 변환시킬 수 있게 된다. 그러나 강우의 시간적 양상을 나타내고 있는 무차원 누가강우량도의 절점은 다변량 비정규분포의 형태를 갖고 있기 때문에 Aitchison(1986)이 제안한 $Y_i$를 다변량 정규분포함수로 가정한 접근방법은 본 연구와는 차이가 있어 본 연구에서는 벡터 $Y=(Y_1, Y_2, \cdots, Y_D)^T$의 무작위 변수의 주변분포(marginal distribution)를 위해 다음과 같은 Johnson 분포를 활용하였다.

$$S_L:\ Z=\gamma+\delta\log(X-\xi),\quad X>\xi \tag{7}$$

$$S_U:\ Z=\gamma+\delta\sinh^{-1}\left(\frac{X-\xi}{\lambda}\right) \tag{8}$$

$$S_B:\ Z=\gamma+\delta\log\left(\frac{X-\xi}{\xi+\lambda-X}\right),\quad \xi<X<\xi+\lambda \tag{9}$$

그리고 확률변수 생성을 위해 Monte Carlo 기법을 이용하였는데 Monte Carlo 모의수행은 실제에 대한 가정과 이에 대한 모형과의 일련의 조합에 기초로 하여 실제 상황을 반복수행하는 모의발생 과정이다. 공학적인 목적을 위해서 모의수행은 시스템의 실행이나 반응을 예측 또는 조사하는데 적용될 수 있다. 많은 연구자들에 의해서 Monte Carlo 기법에 대한 연구결과는 기대되는 반응이 동일한 시스템에 대해 확정론적인 해와 상이할 수 있다는 것을 제시한 바 있고, Monte Carlo 해석 결과가 확정론적 결과에 비하여 더욱 안정된 해를 제시하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 난수의 발생은 Eq. (10) 그리고 Eq. (11)과 같은 Park와 Miller(1988)가 제시한 multiplicative congruential generator를 이용하였다.

$$X_{i+1}=aX_i(\mathrm{mod}\ m) \tag{10}$$

$$U_i=\frac{X_i}{m} \tag{11}$$

여기서, $a$ : 초기치, 16807, $m$ : $2^{31}-1$

$(\mathrm{mod}\ m)$ : modules $m$ 에 의한 나머지 값

$X_i$ : 균등난수를 발생시키기 위한 초기값

$U_i$ : 균등분포에 의한 난수

결국 log-ratio 방법과 Johnson 분포를 이용한 무차원 누가강우량 곡선을 생성과정은 다음과 같이 정리할 수 있다.

(ⅰ) 무차원 누가강우량 곡선의 절점자료의 log-ratio 변환을 위해 $i^*$와 $P_{i^*}$ 선정

(ⅱ) log-ratio $Y_i$의 통계적 모멘트와 상관계수 산정

(ⅲ) $Y_i$ 별 적정 Johnson 분포 결정($i\neq i^*$)

(ⅳ) 제약조건이 없는 다변량 비정규분포의 확률변수 생성

(ⅴ) 역변환을 통한 무차원 누가강우량 곡선의 절점자료 $P_1, P_2, \cdots, P_k$ 생성

### 2.3 하천제방의 위험도 평가 모형

일반적으로 계획 규모 이상의 홍수가 발생하여 제방고보다 높은 홍수위가 나타날 때 월류(overtopping)에 의한 제방붕괴가 이루어진다. 이에 본 연구에서는 하천제방고보다 높은 수위가 발생될 때 제방붕괴가 발생된다고 가정하였다. 다양한 조건하에서 수치모형을 활용하여 홍수위를 계산하고, 앞서 소개한 신뢰도 지수를 적용하여 제방파괴의 위험도를 계산할 수 있다.

하도 내 각 계산단면에 대한 실행함수($W_k^o$)는 Eq. (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$W_k^o=g_k(d_p,t,p_p,h_b)-h_{k,l} \tag{12}$$

여기서, $g_k(\bullet)$ : 모형의 수치해석 결과, $h_{k,l}$ : 제방고

$d_p$ : 강우량(mm), $t$ : 지속시간(h)

$p_p$ : 무차원 누가우량곡선의 첨두강도

$h_b$ : 하류단 수위, $k$ : 하도내 단면번호

$k$ 단면에서의 제방 파괴 확률($P_{f,k}^o$)은 Eq. (13)을 통해 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned}P_{f,k}^o&=\Pr(H_{\max,k}>h_{k,l})\\&=\Pr\left[h_{k,l}-g_k(d_p,t,p_p,h_b)<0\right]\\&=\Pr\left[W_k^o(d_p,t,p_p,h_b,h_{k,l})<0\right]\end{aligned} \tag{13}$$

여기서, $H_{\max,k}$ : $k$ 단면에서의 최고 모의수위값

Eq. (12)와 같은 실행함수를 알고 있다면 신뢰도 해석방법을 통해 제방 파괴 위험도를 산정할 수 있다. 본 연구에서는 Eq. (14)를 통해 제방 파괴에 대한 위험도($P_{f,k}^{o}$)를 근사적으로 산정하였다.

$$P_{f,k}^{o} = \Phi(-\beta_k) = \Phi\left(-\frac{\mu_{W_k}}{\sigma_{W_k}}\right) \quad (14)$$

여기서, $\beta_k$ : $k$ 단면에서의 신뢰도 지수

$\mu_{W_k^o}$ : $k$ 단면에서의 실행함수 $W_k^o$ 의 평균값

$\sigma_{W_k^o}$ : $k$ 단면에서의 실행항수 $W_k^o$ 의 표준편차

## 3. 적용 및 검토

### 3.1 대상유역

본 연구에서는 태풍 '루사'와 '매미' 등으로 많은 침수피해를 입은 바 있는 낙동강의 주요지류중 하나인 감천유역의 하천제방 위험도를 평가하였다. 강우양상 생성을 위해 먼저 30년 이상의 관측년수를 가진 유역 인근에 위치한 기상청 관할의 강우관측소 자료를 수집하였다. 이는 시우량 자료의 관측년수가 짧으면 빈도해석 결과의 신뢰도를 보증할 수 없기 때문이다. 이에 본 연구에서는 추풍령관측소(1937~2008), 구미관측소(1973~2008), 거창관측소(1972~2008)의 강우량 자료를 활용하여 시간에 따른 강우 양상을 분석하였다. 수집된 강우자료로부터 강우사상의 분리 기준은 무강우 최대기간 6시간 이상, 최소 지속 시간 4시간 이상, 최소 강우량 10 mm 이상, 시간강우 고이상치 기각 기준 200 mm 이상이다.

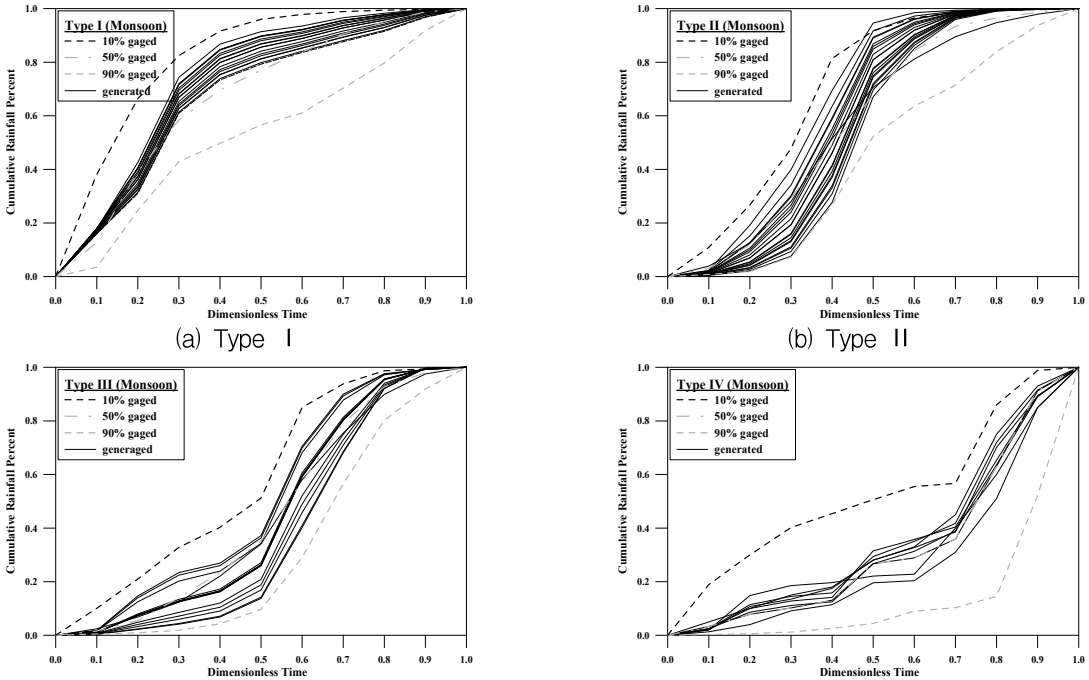
### 3.2 추계학적 강우변동 생성

강우변동 생성기법을 이용하여 감천유역에 대해 실제 장마와 태풍 발생 사례를 토대로 안기홍 등(2009)이 도입한 장마기(6월, 7월)와 태풍기(8월, 9월)로 구분하여 발생가능한 시간에 따른 강우변동 양상을 생성하였다. 이를 위해 각 강우사상을 Huff의 4분위법을 이용하여 강우량의 최대치가 존재하는 위치에 따라 4가지 형태의 무차원 누가강우량 곡선형태로 구분하였으며 무차원 누가강우량 곡선의 각 절점은 강우변동 특성을 나타내는 변수로서 이용되었다. 무차원 누가강우량 곡선의 제약조건을 극복하기 위해 먼저 log-ratio 방법을 적용하였고 Hill *et al.*(1976)이 개발한 1~4 통계적 모멘트를 이용하여 적정 Johnson 분포형을 결정하였다. 그리고 각 강우양상별 표준 정규값의 상관행렬을 Cholesky decomposition을 통해 변환행렬 $T$를 생성하였으며, 각 Johnson 분포형별 발생시킨 확률변수를 변환행렬을 이용하여 상관성을 가지는 확률변수로 재변환하였다. 얻어진 상관성을 갖는 확률변수는 log-ratio 역 변환을 통해 각 절점간의 상관성을 갖는 변수로 변환되었다. 일련의 과정을 통해 산정된 값들은 결국 각 Type별 무차원 수문곡선의 절점이 된다. 이에 본 연구에서는 무차원 수문곡선의 수를 장마기와 태풍기 각 Type별 실제 발생비율을 고려하여 생성하였으며, 이 생성된 자료는 수문분석의 입력자료로 활용되어 제방붕괴 해석에 이용되었다. Fig. 2와 Fig. 3은 장마기와 태풍기에 대한 각 Type별 추계학적 발생가능한 강우변동 형태의 예를 나타내고 있다.

### 3.3 유역 홍수량 및 홍수위 분석

대상유역에서의 홍수량을 산정하기 위하여 산정된 무차원 누가강우량 곡선을 사용하여 Clark 유역추적 방법 및 Muskingum 하도추적 방법을 사용하여 유출모의를 수행하였다. 수집된 강우자료에 대한 확률분포형 검정은 FARD2006 모형을 이용하였고 검정방법은 $\chi^2$검정, PPCC검정을 사용하였다. 또한 산정된 각 적정 분포형 중에서 '한국 확률강우량도 작성(건교부, 2000)'에서 모든 관측소에 대해 하나로 통일하여 채택한 바 있는 Gumbel 분포를 채택하여 이를 통해 확률강우량을 산정하였다. 매개변수 추정방법으로는 확률가중 모멘트법을 사용하였으며, 확률강우강도식은 편차에 있어서 특정계수법보다 편차가 작게 나타나는 최소자승법을 통하여 각 재현기간별 확률강우강도식을 유도하여 이 중 편차가 제일 적게 나타난 Sherman형을 채택하였다. 대상유역의 하천제방은 100년 빈도로 구성되어 있어 본 연구에서는 100년의 재현기간을 사용하여 구성하였다. Fig. 4는 18개의 소유역 구분과 각 소유역의 주요 수문학적 제원들을 나타내고 있고, Table 1은 각 재현기간별 확률강우강도식을 나타내고 있다.

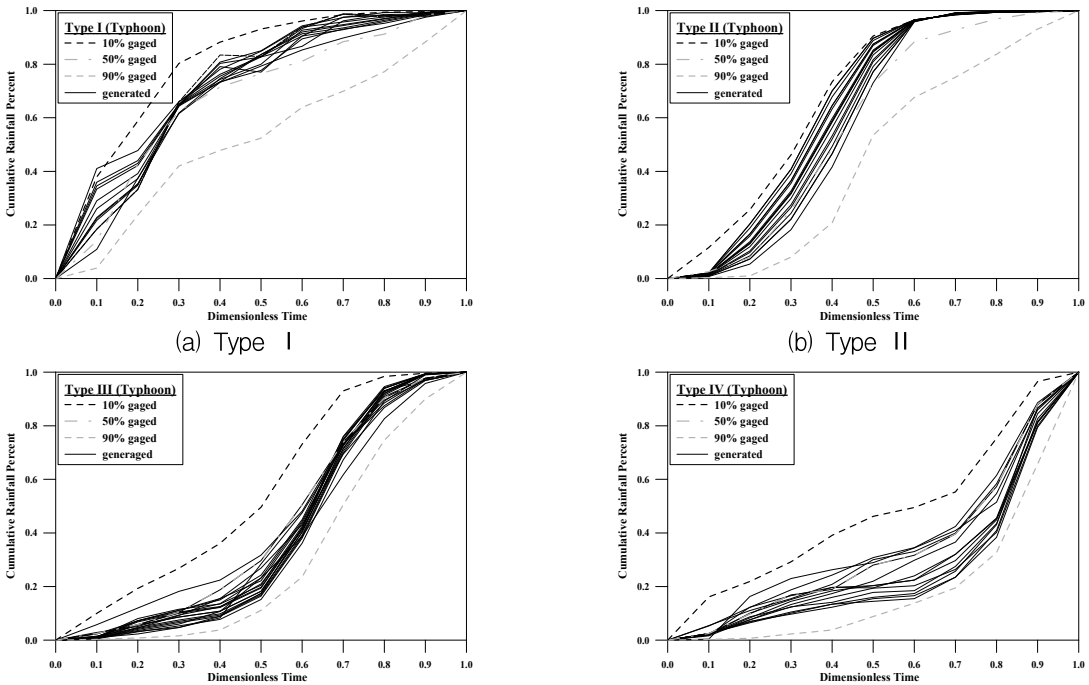
유역의 유효우량 산정은 유역의 토양상황, 토지이용상태 등을 고려한 SCS방법을 사용하였으며 본 연구에서의 유역 유출지수는 토지사용 용도를 구분하고 최근 집중호우 성향을 고려하여 AMC-Ⅲ 조건을 적용하였다. 유출해석을 위한 도달시간 $T_c$는 각 소유역의 유역면적에 해당하는 유역길이 및 평균경사를 이용하여 결정하였고 Kirpich 공식, Kerby 공식, Kraven(Ⅰ) 공식. Kraven(Ⅱ) 공식 및 Rziha 공식을 적용한 결과 중 각 공식의 제한사항과 대상 유역의 유역면적 및 하도경사 등을 검토한 결과 Kraven(Ⅱ) 공식이 가장 적절하게 부합되어 유출모형에 적용하였다. 저류상수 $R$은 Linsley 공식, Clark 공식, SCS 공식 및 Sabol 공식과 $T_c$-$R$의




(a) Type Ⅰ (b) Type Ⅱ

(c) Type Ⅲ (d) Type Ⅳ

Fig. 2. Stochastic Temporal Rainfall Variation in Monsoon




(a) Type Ⅰ (b) Type Ⅱ

(c) Type Ⅲ (d) Type Ⅳ

Fig. 3. Stochastic Temporal Rainfall Variation in Typhoon

관계식을 이용하여 계산하였고 계산된 값들 중 Kraven(Ⅱ) 공식으로 산정한 $T_c$와 $R/(T_c+R)=0.7$의 관계식을 이용하여 계산된 저류상수를 채택하였다. 그리고 Muskingum 하도추적 방법의 매개변수인 저류상수 $K$는 Kirpich, Kerby, Kraven(Ⅰ), Kraven(Ⅱ) 및 Rziha 경험공식을 이용하여 계산하였으며, 그 중에서 Kraven(Ⅱ) 공식에 의한 계산결과를 사용하여 모의를 수행하였다. 이는 2005년과 2006년의 호우와 태풍사상에 대한 유출모의 결과와 이들 세 값으로 산정된 홍수량이 잘 일치하는 결과를 얻었기 때문이다. 이러한 유역의 홍수량 산정결과는 하천에 대한 부정류 모의에 있어 경계조건 및 측방유입량으로 반영되었다.

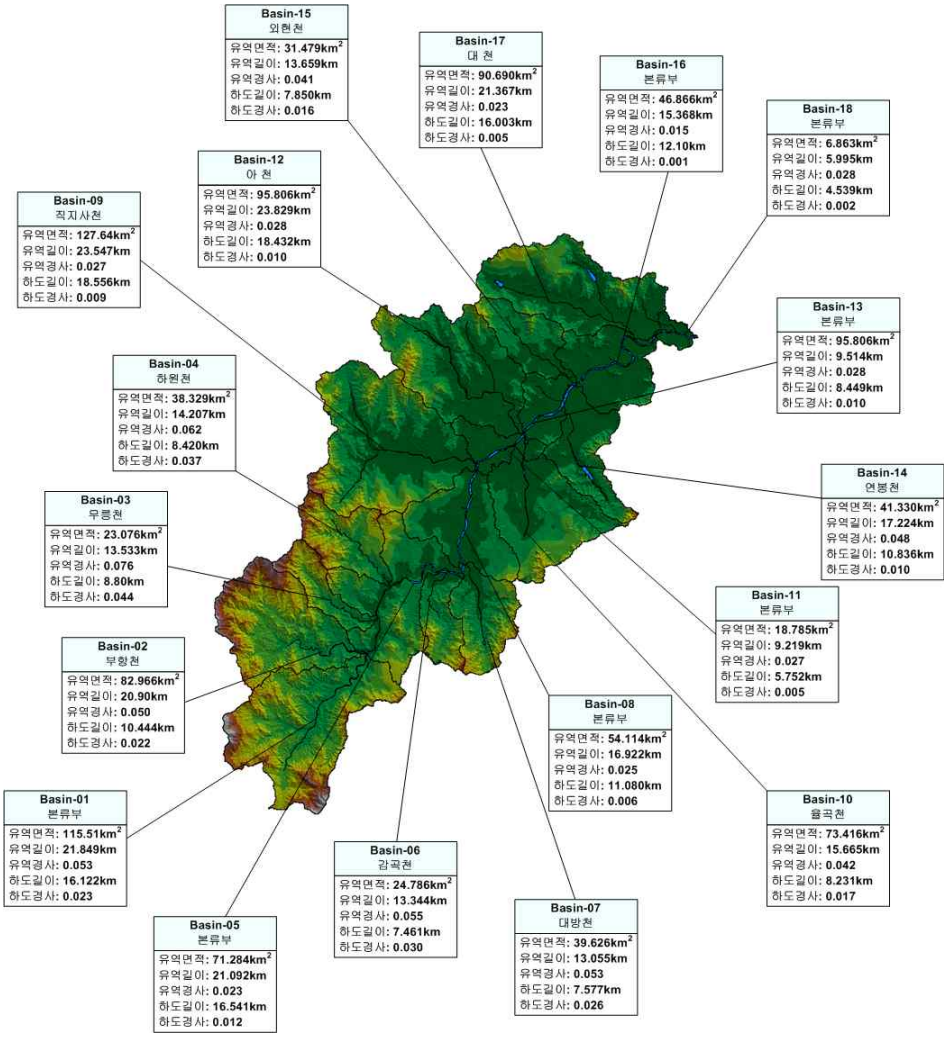



Fig. 4. Characteristics of River Basins

Table 1. Probable Rainfall Intensity Formula

| Return Period (yr) | Probable Rainfall Intensity Formula in monsoon (mm/h) | Standard Deviation | R | Return Period (yr) | Probable Rainfall Intensity Formula in typhoon (mm/h) | Standard Deviation | R |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 50 | $I=\frac{228.398}{t^{0.4462}}$ | 0.47 | .99371 | 50 | $I=\frac{208.366}{t^{0.4150}}$ | 0.34 | .99668 |
| 80 | $I=\frac{238.976}{t^{0.4429}}$ | 0.50 | .99342 | 80 | $I=\frac{218.374}{t^{0.4106}}$ | 0.35 | .99671 |
| 100 | $I=\frac{247.829}{t^{0.44434}}$ | 0.51 | .99365 | 100 | $I=\frac{222.954}{t^{0.4087}}$ | 0.41 | .99610 |
| 150 | $I=\frac{249.778}{t^{0.4370}}$ | 0.56 | .99319 | 150 | $I=\frac{231.044}{t^{0.4051}}$ | 0.42 | .99615 |
| 200 | $I=\frac{258.174}{t^{0.4369}}$ | 0.57 | .99310 | 200 | $I=\frac{241.361}{t^{0.4060}}$ | 0.46 | .99601 |

산정된 감천유역의 홍수량 결과를 바탕으로 수리학적 하천 홍수위 해석을 실시하였다. 본 연구에서의 주된 관심사는 제방의 월류가 일어날 수 있는 수위를 산정하는 것이다. 이를 위해 실제 강우자료를 토대로 시간에 따른 강우양상의 특성을 반영하여 8개의 지류로부터 발생빈도를 고려한 120개의 수문곡선이 생성되었으며, 이는 120개의 하류부 수위곡선과 함께 상·하류부 경계조건으로 활용되었다. 조도계수 및 확대·축소계수

등의 수리학적 매개변수의 불확실도는 고려되지 않았으며, 1차원 부정류 하천해석을 위해 1차원 하천흐름 해석모형인 FLDWAV 모형(Fread, 1998)을 사용하였다. Fig. 5는 하천 흐름해석을 위한 유역에서의 하도망 구성도를 나타내고 있다.

연구결과의 적용을 실시하기 전에 먼저 수리모형의 적용성을 검토하였다. 이를 위해 2005년 7월에 발생하였던 장마와 2006년에 발생하였던 태풍 '에위니아'의 사례를 토대로 모형 매개변수의 보정 및 검정을 실시하였다. 하지만 대상유역의 수위표는 김천수위표와 선산수위표만 존재하여, 적용성의 재고를 위해 낙동강 본류지점의 낙동수위표 지점에서 왜관 수위표 지점까지의 구간을 추가하여 계산을 실시하였다. Fig. 6은 2005년 7월에 발생하였던 강우사상에 대한 상·하류단 경계조건인 유량 및 수위수문곡선을 나타내고 있다. 대상유역에 적용된 수리해석모형의 검증을 위해 주요 수위표 지점에서 관측된 수위수문곡선과 계산된 수위수문곡선을 비교하였다. Fig. 7은 일선교수위표, 구미수위표, 선산수위표 지점에서의 실측치와 비교한 결과를 나타내고 있다. 일선교수위표의 경우 최대수위와 RMSE(Root Mean Squared Error)가 각각 0.135 m, 0.149 m, 구미수위표의 경우 0.066 m, 0.254 m, 선산교수위표의 경우 0.196 m, 0.285 m로 나타났으며 그림에서 보는 바와 같이 전체적 발생양상도 하도에서의 흐름해석 결과와 관측된 수위수문곡선이 잘 일치하고 있어 대상유역에 대한 적용성은 충분히 높음을 알 수 있었다.

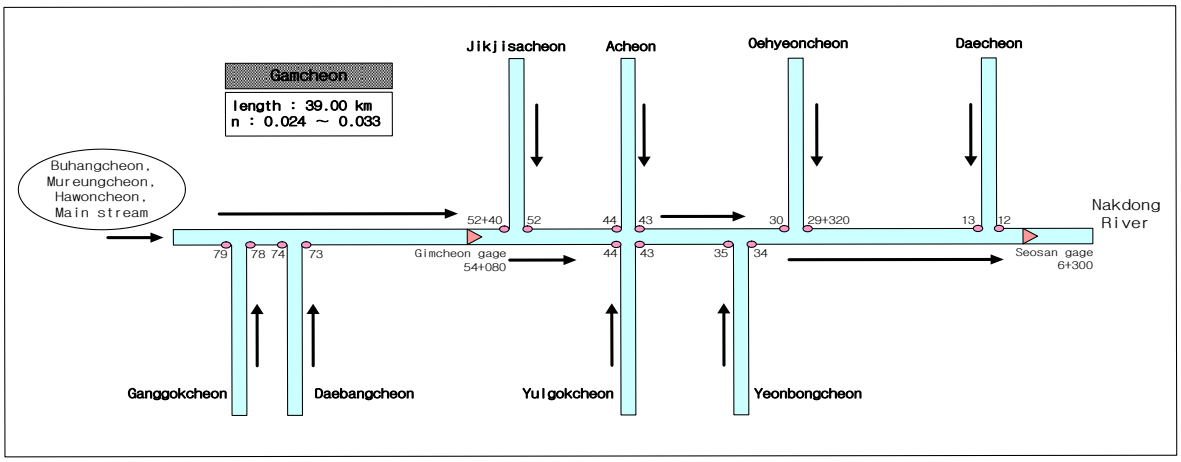
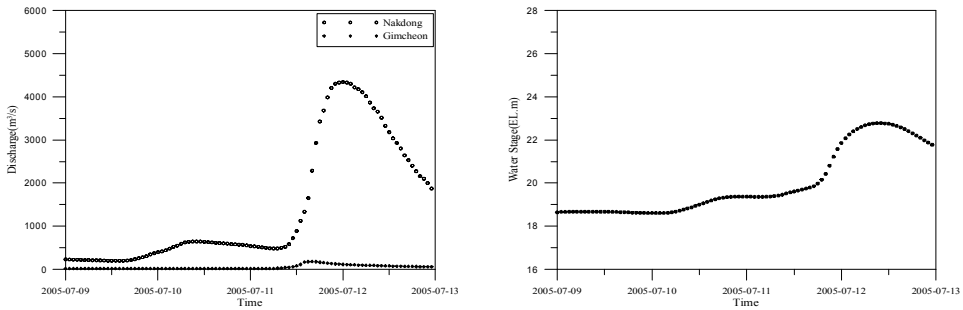



Fig. 5. River Channel Network for Hydraulic Analysis




(a) Nakdong and Gimcheon Gage (b) Waegwan Gage

Fig. 6. Flow and Stage Hydrograph

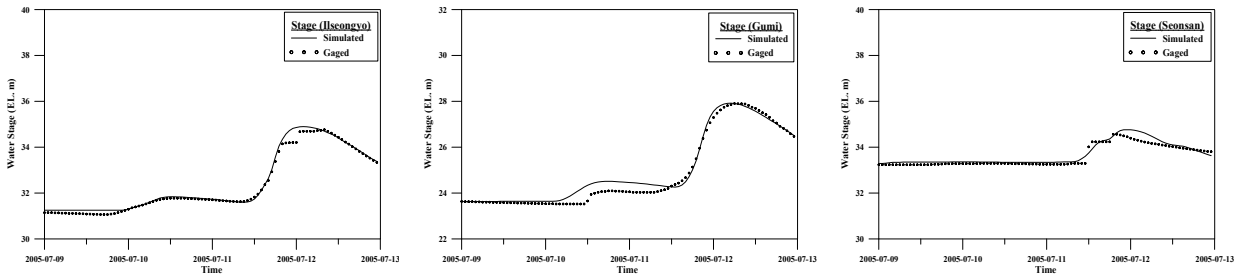
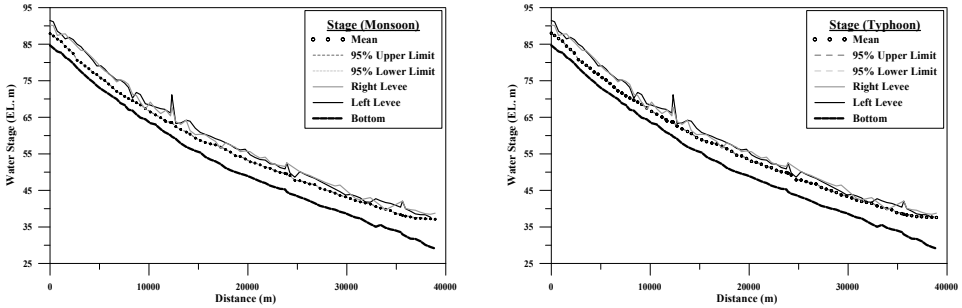
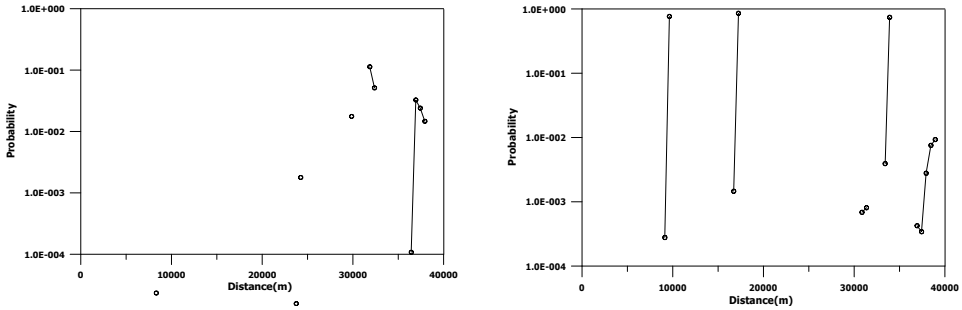



Fig. 7. Verification of Hydraulic Model



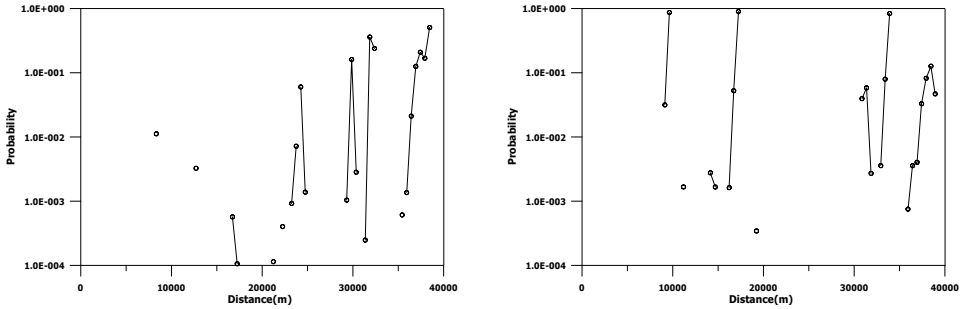

(a) Monsoon (b) Typhoon

Fig. 8. Water Surface Profile with Rainfall Variation




(a) Left Levee (b) Right Levee

Fig. 9. Probability of Levee Failure in Monsoon Season




(a) Left Levee (b) Right Levee

Fig. 10. Probability of Levee Failure during Typhoon Season

### 3.4 하천제방의 위험도 평가

제방의 파괴는 주로 하천수위에 기인하고 있다. 이를 위해 강우의 변동특성이 반영된 강우량을 이용하여 Monte Carlo 기법으로 120개의 홍수량이 산정되었으며, 이를 활용하여 하도 각 단면의 제방고를 기준으로 제방 파괴확률 해석을 실시하였다. 안정성 평가를 위한 실행함수는 부하-저항 모형을 활용하여 생성하였고, 안정성 평가 지수로서 신뢰도 지수를 활용하였다. Fig. 8은 장마기와 태풍기의 강우양상에 따른 수면의 종단도로서 수리해석결과의 평균값과 95% 신뢰수준의 상·하한값을 각각 좌·우측 제방과 비교하여 나타내고 있다. 그리고 Fig. 9와 Fig. 10은 장마기와 태풍기의 좌측 및 우측제방에 대한 파괴 확률을 나타내고 있고 Table 2는 주요 단면에서의 제방파괴 위험도를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 장마기보다는 태풍기에 파괴 확률이 높게 산정되었고 100년 빈도 홍수위 보다 낮게 구축된 제방고에 대해 최대 0.899의 매우 높은 위험도를 확인함으로서 해당 단면에 대한 보완이 필요할 것으로 판단된다. 본 모형은 하천제방의 파제 예상지점을 선정할 수 있고 해당 지점의 위험도를 정량적으로 파악할 수 있어 수공구조물 안정성 평가 및 홍수재해 대책 수립에 그 적용성이 매우 클 것으로 사료된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 추계학적 강우변동 생성기법을 이용하여 감천유역에 대해 태풍기와 장마기에 해당하는 6월, 7월과 8월, 9월에 발생가능한 다양한 무차원 누가강

Table 2. List of Channel Cross-sections with Probability of Levee Failure

| # | RKM(km) | monsoon | | typhoon | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | left | right | left | right |
| 80 | 38.20 | | | | $8.83\times10^{-5}$ |
| 61 | 30.60 | $2.34\times10^{-5}$ | | $1.12\times10^{-2}$ | |
| 59 | 29.80 | | $2.78\times10^{-4}$ | | $3.16\times10^{-2}$ |
| 58 | 29.30 | | $7.64\times10^{-1}$ | | $8.68\times10^{-1}$ |
| 55 | 27.75 | | | | $1.66\times10^{-3}$ |
| 52 | 26.22 | $1.80\times10^{-6}$ | | $3.25\times10^{-3}$ | |
| 51 | 25.72 | | | | $1.13\times10^{-5}$ |
| 49 | 24.78 | | $1.40\times10^{-6}$ | | $2.77\times10^{-3}$ |
| 48 | 24.24 | | $2.00\times10^{-7}$ | | $1.66\times10^{-3}$ |
| 45 | 22.71 | | | | $1.62\times10^{-3}$ |
| 44 | 22.21 | | $1.46\times10^{-3}$ | $5.69\times10^{-4}$ | $5.25\times10^{-2}$ |
| 43 | 21.69 | | $8.56\times10^{-1}$ | $1.06\times10^{-4}$ | $8.99\times10^{-1}$ |
| 42 | 21.20 | | | $1.72\times10^{-5}$ | |
| 39 | 19.70 | | | | $3.44\times10^{-4}$ |
| 36 | 18.22 | | | $3.13\times10^{-5}$ | |
| 33 | 16.68 | | | $4.02\times10^{-4}$ | |
| 31 | 15.68 | | | $9.22\times10^{-4}$ | |
| 30 | 15.18 | $1.57\times10^{-5}$ | | $7.18\times10^{-3}$ | $2.23\times10^{-5}$ |
| 29 | 14.68 | $1.78\times10^{-3}$ | | $6.01\times10^{-2}$ | |
| 28 | 14.18 | $7.00\times10^{-7}$ | | $1.38\times10^{-3}$ | |
| 24 | 12.18 | | | $3.11\times10^{-5}$ | |
| 19 | 9.62 | | | $1.04\times10^{-3}$ | |
| 18 | 9.07 | $1.76\times10^{-2}$ | | $1.61\times10^{-1}$ | |
| 17 | 8.57 | $1.60\times10^{-6}$ | | $2.82\times10^{-3}$ | |
| 16 | 8.07 | | $6.86\times10^{-4}$ | | $3.96\times10^{-2}$ |
| 15 | 7.57 | | $8.07\times10^{-4}$ | $2.48\times10^{-4}$ | $5.81\times10^{-2}$ |
| 14 | 7.07 | $1.13\times10^{-1}$ | | $3.60\times10^{-1}$ | $2.71\times10^{-3}$ |
| 13 | 6.55 | $5.13\times10^{-2}$ | | $2.39\times10^{-1}$ | |
| 12 | 6.00 | | | | $3.58\times10^{-3}$ |
| 11 | 5.52 | | $3.93\times10^{-3}$ | | $7.94\times10^{-2}$ |
| 10 | 5.02 | | $7.41\times10^{-1}$ | | $8.38\times10^{-1}$ |
| 7 | 3.50 | | | $6.11\times10^{-4}$ | |
| 6 | 3.00 | | | $1.36\times10^{-3}$ | $7.52\times10^{-4}$ |
| 5 | 2.50 | $1.08\times10^{-4}$ | $1.80\times10^{-6}$ | $2.11\times10^{-2}$ | $3.56\times10^{-3}$ |
| 4 | 2.00 | $3.26\times10^{-2}$ | $4.24\times10^{-4}$ | $1.25\times10^{-1}$ | $4.03\times10^{-3}$ |
| 3 | 1.50 | $2.40\times10^{-2}$ | $3.42\times10^{-4}$ | $2.09\times10^{-1}$ | $3.29\times10^{-2}$ |
| 2 | 1.00 | $1.47\times10^{-2}$ | $2.78\times10^{-3}$ | $1.68\times10^{-1}$ | $8.19\times10^{-2}$ |
| 1 | 0.47 | $2.02\times10^{-1}$ | $7.56\times10^{-3}$ | $5.06\times10^{-1}$ | $1.26\times10^{-1}$ |

우량곡선을 Monte Carlo 기법을 도입하여 생성하였다. 실제 강우의 발생 빈도를 고려하여 무차원 누가강우량 곡선을 통한 확률강우량을 산정한 결과 전반적으로 장마기에 비해 태풍기에 강우량이 크게 산정되는 것으로 나타났고 이는 제방의 위험도 평가 모형의 입력자료로 활용되었다. 하천제방의 위험도는 홍수위가 하천제방을

초과시 붕괴가 일어난다는 가정하에 실행함수를 구성하였으며 신뢰도 지수를 활용하여 하천제방의 파괴확률을 산정하였다. 수위의 영향에 대해 매우 큰 민감도를 보였으며 100년 미만의 재현기간을 갖는 일부 단면에서 0.838~0.899의 매우 높은 위험도를 보였다. 또한 장마기보단 태풍기에서 더 높은 파괴확률을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 강우변동 양상을 하나의 형태로 가정하여 이를 토대로 실시되는 확정론적 하천제방의 안정성 평가와 달리 실제 강우의 변동 특성을 반영한 강우양상을 생성하고 이를 이용하여 산정된 홍수위와 하천제방고의 관계를 부하-저항 모형에 적용하여 제방 파괴에 대한 위험도를 산정하였다. 본 연구는 실제 강우의 변동 특성을 반영할 수 있고 이를 이용하여 하천제방의 파제 예상지점을 선정할 수 있으며 해당 지점의 위험도를 정량적으로 파악할 수 있어 수공구조물 안정성 평가 및 홍수재해 대책 수립에 그 적용성이 매우 클 것으로 판단된다. 또한 강우량 자료의 특성을 가공없이 반영할 수 있어 해당 유역의 특성을 정확히 반영할 수 있고 수공구조물의 붕괴 및 침수피해가 국내의 경우 주로 태풍기에 발생한다는 점에서 본 연구결과는 강우의 지역적 특성 및 시간적 특성을 반영하고 있어 해당 유역의 홍수대책 수립, 수공구조물 설계 및 분석 등 활용성이 매우 클 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

건설교통부 (1993). **낙동강 하천정비기본계획(보완III).**

건설교통부 (1998, 1999). **한국수문조사연보.**

건설교통부 (1999). **수자원관리기법개발연구조사보고서.**

건설교통부 (2000). **한국 확률강우량도 작성.**

건설교통부 (2001). **유역종합치수계획수립 지침작성.**

건설교통부 (2002). **하천시설물 설계시 신뢰도 분석 개념 도입에 관한 연구.**

건설교통부 (2007). **홍수량 산정기법 가이드라인(보완).**

건설교통부 낙동강홍수통제소 (1999a). **낙동강수계 유량.**

건설교통부 낙동강홍수통제소 (1999b). **낙동강수계 유량측정조사 보고서.**

건설교통부 부산지방국토관리청 (1997). **감천 하천정비기본계획(보완).**

경상북도 (2003). **감천 (지방2급) 하천정비기본계획.**

소방방재청 (2006). **FARD2006 매뉴얼.**

소방방재청 (2007). **2007년도 주요통계 및 자료**, pp. 316-317.

윤광석 (2007). 월류에 대한 하천제방 안전성 평가 기법 연구, **한국수자원학회, 물과 미래**, Vol. 40, No. 9, pp. 13-17.

윤광석, 김규호 (2006). 하천제방 안정성(수공학적 측면), **물과 미래,** 한국수자원학회, Vol. 39, No. 5, pp. 14-19.

한국수자원학회 (2002). **2002년 홍수피해 종합조사보고서.**

Aitchison, J. (1986). *Statistical analysis of compositional data,* Champman & Hall Inc., NY, USA

Ang, A.H.S. (1973). "Structural Risk Analysis and Reliability - Based Design." *J. the Struc. Div.*, ASCE, Vol. 99, No. STP, pp. 1891-1910.

Ang, A.H.S. and Tang, W.H. (1975). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design,* Vol. I - II, John Wiley & Sons, Inc.

Apel, H., Thieken, A.H., Merz, B., and Bloschl, G. (2006). "A probabilistic Modelling System for Assessing Flood Risks." *Natural Hazard,* No. 38, pp. 79-100.

Fread, D.L. (1998). *NWS FLDWAV,* NWS Reports, National Weather Service(NWS), Maryland, USA.

Gui, S., Zhang, R., and Wu, J. (1998). "Simplified Dynamic Reliability Models for Hydraulic Design." *J. Hydraul. Eng.,* ASCE, Vol. 124, No. 3, pp. 329-333.

Hartford, D.N.D. and Beacher, G.B. (2004). *Risk and Uncertainty in Dam Safety,* Thomas Telford.

Hill, I.D., Hill, R., and Holder, R.L. (1976). "Algorithm AS 99. Fitting Johnson curves by moments." *Appl. Stat.,* Vol. 25, pp. 180-189.

Hromadka, T.V., McCuen, R.H., and Yen, C.C. (1987). *Computational Hydrology in Flood Control Design and Planning,* Lighthouse Publications.

IMPACT (2004). *Investigation of Extreme Flood Process & Uncertainty - Identifying Potential Breach Location*, WP2: Deliverable D 2.4.1.

Johnson, P.A. (1996). "Uncertainty of Hydraulic

Parameters." *J. Hydraul. Eng.,* ASCE, Vol. 122, No. 2, pp. 112-114.

Kanning, W., Baars, S.V., and Vrijling, J.K. (2008). "The Stability of Flood Defenses on Permeable soils : The London Avenue Canal Failures in New Orleans." *6th Int. Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering,* No. 2.72, pp. 1-9.

Kuo, J.T., Yen, B.C., Hsu, Y.C., and Lin, H.F. (2007). "Risk analysis for dam overtopping-Feitsui Reservoir as a case study." *J. Hydraul. Engrg.*, ASCE, Vol. 133, No. 8, pp. 955- 963.

Lee, H.L. and Mays, L.W. (1986). "Hydraulic uncertainties in flood levee capacity." *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, Vol. 112, No. 10, pp. 928-934.

Mays, L.W. and Tung, Y.K. (1992). *Hydrosystems engineering and management,* McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, N.Y.

Merkel, U. and Westrich, B. (2008). "PC-River - Probabilistic Reliability Analysis for River Dikes." *4th Int. Symp. on Flood Defence,* pp. 110-116.

National Research Council. (2000). *Risk Analysis and Uncertainty in Flood Damage Reduction studies,* National Academy of Science, pp. 1-202.

Park, S.K. and Miller, K.W. (1988). "Random Number Generators : Good Ones Are Hard to Find.": *CACM,* No. 10, Vol. 31, pp. 1192-1201.

Rabinovich, S.G. (2000). *Measurement Errors and Uncertainties - Theory and Practice, 2nd edition, Springer-Verlag, New York, NY.*

Ramos, M.C. (2001). "Divisive and hierarchical clustering techniques to analyse variability of rainfall distribution patterns in a Mediterranean region." *Atoms. Res.,* Vol. 57, pp. 123-138.

Thorndahl, S. and Jensen, K.S. (2007). "Comparative Analysis of Uncertainties in Urban Surface Runoff Modelling." *6th Int. Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management*, Lyon, France, Vol. pp. 16331-1638.

Tung, Y.K. and Yen, B.C. (2005). *Hydrosystem engineering uncertainty analysis,* McGraw-Hill Book Company, NY, USA.

Vrijling, J.K. (2000). *Probabilistic Design - Lecture Note,* IHE Delft.

Wu, S.J. and Tung, Y.K. (2006). "Stochastic generation of hourly rainstorm events." *J. Stoch. Environ. Res. Risk. Asssess.,* Vol. 21, pp. 195-212.

(논문번호:09-049/접수:2009.04.28/심사완료:2009.06.09)