

Bootstrap 방법 및 SIR 알고리즘을 이용한 예상홍수피해액의 불확실성 분석

이 건 행 *⁺ / 이 정 기** / 김 수 전*** / 김 형 수****

Uncertainty Analysis of Flood Damage Estimation Using Bootstrap Method and SIR Algorithm

Keon Haeng Lee*⁺ / Jung Ki Lee** / Soo Jun Kim*** / Hung Soo Kim****

요약 : 본 연구에서는 수문자료와 수문해석과정에 포함되어 있는 불확실성을 고려함으로써 현재 하천 시설물에 적용되고 있는 안전율 혹은 여유고에서 고려하고 있는 불확실성과 비교 검토하였다. 불확실성을 고려하기 위하여 연최대 강우량자료를 Bootstrap 방법, SIR 알고리즘을 통해 재추출함으로써 불확실성을 고려한 확률강우량을 산정하였다. 산정된 현재의 확률강우량과 불확실성을 고려한 경우의 확률강우량을 이용하여 HEC-HMS를 통해 홍수량을 산정, HEC-RAS를 통해 지점별 홍수위를 산정하였다. 예상홍수피해액의 산정은 다차원홍수피해산정방법(MD-FDA)을 이용하였다. 그 결과 SIR 알고리즘을 이용한 경우 예상홍수피해액의 최대값은 현재의 확률강우량을 이용한 경우의 1.22배, Bootstrap 방법에 의한 최대값은 0.92배의 값을 보였다. SIR 알고리즘은 자료의 재추출시 가중치 부여를 위한 우도함수의 영향을 크게 받으며, 이로 인한 불확실성의 구간이 커져 가장 큰 예상홍수피해액이 도출되었다. 따라서 자료의 적정 위치에 우도를 결정하는 것이 매우 중요하게 작용하는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 불확실성분석, Bootstrap 방법, SIR 알고리즘, 예상홍수피해액

Abstract : We estimated the expected flood damage considering uncertainty which is involved in hydrologic processes and data. Actually, this uncertainty represents a freeboard or safety factor in the design of hydraulic structures. The uncertainty was analyzed using Bootstrap method, and SIR algorithm then the frequency based rainfalls were estimated for each method of uncertainty analysis. Also the benefits for each uncertainty analysis were estimated using 'multi-dimensional flood damage analysis(MD-FDA). As a result, the expected flood damage with SIR algorithm was 1.22 times of present status and Bootstrap 0.92 times. However when we used SIR algorithm, the likelihood function should be selected with caution for the estimation of the expected flood damage.

Keywords : *Uncertainty, Bootstrap method, SIR algorithm, Expected flood damage*

1. 서 론

불확실성은 많은 공학적인 문제에 존재하고 있으며, 이를 해석하고 감소시키기 위한 연구가 지

속적으로 이루어져 왔다. 특히 수자원 관련 분야와 같이 인명, 재산에 직접적으로 관련이 있는 분야의 경우 불확실성은 더욱 크게 부각된다. 따라서 치수분야에 있어서 불확실성을 고려하는 것이

* 정회원 · 국립환경과학원 수질통합관리센터 · E-mail : ggun@me.go.kr
** 정회원 · 인하대학교 토목공학과 박사과정 · E-mail : jungki5425@hanmail.net
*** 정회원 · 인하대학교 토목공학과 박사후과정 · E-mail : soojuny@empal.com
**** 정회원 · 인하대학교 사회기반시스템 공학부 교수 · E-mail : sookim@inha.ac.kr

재해에 대비하기 위한 안전한 방책이라 할 수 있다. 그러나 지금까지의 수공구조물의 설계와 기존 시설의 안전도 평가시 수문, 수리 및 경제학적 함수들에서 발생하는 불확실성을 설명하기 위하여 안전율 혹은 여유고를 증가시키거나 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, 수문 현상이 가지는 추계학적 특성보다 확정론적인 근거로부터 안전설계 개념이 개발되었다. 수자원 계획시 고려되는 부하와 저항은 확정론적인 고정값이 아니라 시간에 따라 변하고 동적이며, 무작위적이므로 확률변수로서 고려되어야 한다(서영민 등, 2007). 우리는 관측된 자료를 통하여 수문해석과정에서의 불확실성을 고려할 수 있다.

하천설계기준·해설(한국수자원학회, 2009)에서는 계획홍수량에 따른 여유고를 제안하고 있으나, 둘 사이의 관계는 경험적으로 설정된 값이다. 즉, 계획홍수량 크기의 범위에 따라 여유고를 제안하였지만, 두 변수가 범위로 주어져 있어 제안된 값이 효율적인 값이라고 판단하기는 어렵다. 또한 이에 추가하여 하천과 제방의 중요도, 제내지의 상황, 주변접속도로, 사회 및 경제적 여건 등을 고려하여 여유고를 확보하도록 하고 있으나, 이를 정량적으로 평가하여 여유고를 산정하도록 하는 방안은 제시되어 있지 않다.

이에 외국의 경우 수자원 계획에 있어서 불확실성을 고려한 위험도 분석의 개념을 도입하고 있다. 미국에서는 3ft의 여유고를 일률적으로 고려하여 왔으나 1990년대 이러한 일률적인 여유고 개념이 잘못되었음을 인식하기 시작하였다. 즉, 불확실성은 매우 국부적으로 지역적인 특성에 따라 매우 다르다는 것을 인지하게 되었고, 이러한 지역적 특색을 반영한 불확실성을 고려하기 위해서 통계적 기법을 이용하여 분석을 수행하기 시작하였으며, 많은 연구와 적용이 진행 중에 있다(김형수, 2003). 특히, 기후변화로 인한 이상홍수, 집

중호우 등의 이상기상 현상을 고려할 때 임의의 설계빈도에 대한 안전율이나 여유고 보다 불확실성을 고려한 제방고의 개념이 필요하고 이를 평가하는 기준이 필요하다.

국내의 경우, 박명관(1989)이 기능 수행함수를 구성하는 변수들의 분포형을 설정하고 AFOSM 방법에 의한 우수관거의 신뢰도 분석을 실시한 바가 있으며, 김문모(1994)는 신뢰도 분석기법을 이용해 우수관거의 위험도를 산정하여 신뢰도에 기초한 최적설계 방안을 제시하였다. 이홍래 등(1998a)은 하도 내 홍수추적에 포함된 불확실성 해석을 위해 Monte Carlo 모의 기법을 DAMBRK 모형과 연계하여 홍수와 해석에 적용하였다. 또한 이홍래 등(1998b, c)은 하도에서의 홍수해석 모형에 불확실성 해석기법으로 Monte Carlo모의 기법을 이용해 제방 월류에 대한 위험도 분석을 실시하였다.

국외에서는 Bodo and Unny(1976)가 홍수량 추정의 개선을 위해 매개변수의 불확실성과 모형의 불확실성을 산정하였으며, Afshar and Marino(1999)는 설계홍수량의 불확실성을 통해 여수로 크기의 최적화 방안에 대한 연구를 수행한 바가 있다. Warwick and Wilson(1990)은 STORM 모형을 이용한 홍수유출량 계산과 유출 모형 변수의 영향을 Monte Carlo 모의 기법을 이용 결과와 비교하였고, USACE(1996)에서는 홍수피해경감계획의 편익을 계산하여 계획 수행의 타당성을 판단하는 데 각종 불확실성과 홍수위험도를 고려하고자 하였다.

이에 본 논문에서는 불확실성을 고려한 경우의 예상홍수피해액(Expected Flood Damage)과 현재 상태에서의 예상홍수피해액을 비교함으로써 수공구조물 설계시 불확실성을 설명하기 위한 안전율 혹은 여유고를 근본적인 개념에서 검토하고자 하였다.

2. 기본 이론 및 연구 방법

2.1 불확실성의 개념

불확실성이라는 용어는 수문학분야에서 뿐만

아니라, 공학을 비롯한 사회현상에도 널리 쓰이고 있다. 사전적으로는 확실하지 아니한 성질, 또는 그런 상태를 의미하며, 해석적으로는 어느 양에 대해서 관측하거나 계산한 값이 그 양의 참값에서 벗어나 있다고 추정되는 벗어남 값, 또는 계통적 오차와 측정 방법의 부적합에서 발생하는 랜덤 오차를 함께한 것에 대하여 주어져야 할 허용값으로 정의된다.

과거 수공구조물의 설계홍수량을 결정하기 위해서 설계빈도와 같은 확정론적 방법을 사용해 왔으며, 각 매개변수에 포함되어 있는 불확실성에 대한 영향은 고려하지 못하였다(Mcbean and Penel, 1984; Plate, 1986; Melching, 1987). 그러나 이는 아주 오랜 과거의 경우이며, 불확실성의 개념이 고려되기 시작한 이래 이를 고려하고 감소시키려는 많은 연구가 수행되었다. 즉, 어떠한 변수가 가지고 있는 무작위성, 이론식과 경험식에 포함된 오차, 데이터의 부정확성에 의한 불확실성 문제가 존재한다는 것을 인정한 것이다 (Tung and Mays, 1980).

2.2 불확실성 분석 방법

2.2.1 Bootstrap 방법

Bootstrap은 통계량의 표본 분포를 효과적으로 예측하는 계산적 방법의 일종이다. 특히 추출된 샘플이 모집단에 대한 대표성을 가진다는 일반적인 가정이 타당성을 가질 때, 그리고 관측치들이 독립적이고 연속적인 분포일 때에 통계량의 샘플링 분포를 예측하는 비매개변수적 Bootstrap을 이용할 수 있다. 이는 단순히 resampling 절차를 취함으로써 원표본이 추출된 근원적인 모집단에 대한 사전 분포의 가정에 의존하지 않는 비매개변수적 방법이다(권현한과 문영일, 2004)

2.2.2 SIR 알고리즘

Weighter Bootstrap Sampling 이라고도 불리는 SIR(Sampling Importance Resampling) 알

고리즘은 Monte Carlo 베이저안 기법의 한 종류로서 기존의 고전적인 분석방법에 비해 유용한 사전정보의 사용을 가능하게 하고 표본의 크기가 작을 때에 상대적으로 더 신뢰성 있는 분석을 할 수 있는 방법이다. SIR 알고리즘의 주된 목적은 관심 있는 모수(parameter)의 사후밀도함수(posterior density function)를 사전밀도함수(prior density function)와 우도함수(likelihood function)로부터 구하는 것이다(강승호와 박태성, 1996). 본 논문에서는 연최대치의 강우사상을 이용하여 우도함수를 선정하였다. Rubin(1987)이 제시한 SIR 알고리즘의 방법은 $g(\theta)$ 라는 확률분포로부터 표본값을 직접 모의하기 어려울 때 $g(\theta)$ 와 유사하고 모의가 비교적 쉬운 $h(\theta)$ 를 결정하고, 결정된 사전 확률분포 $h(\theta)$ 로부터 크기가 n 인 표본 $X=(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ 을 설정한 후 표본 X 의 가중치 $w(\theta_i)$ 를 계산한다. 여기서 표본 X 로부터 θ_i 가 선택될 확률이 $w(\theta_i)$ 에 비례한다는 가정을 하고 $X^*=(\theta_1^*, \theta_2^*, \dots, \theta_n^*)$ 를 생성하게 된다. 이러한 과정을 통상 SIR 알고리즘이라고 한다(문기호, 2010).

$w(\theta_i)$ 는 가중치로서 다음과 같은 방법으로 구할 수 있다. θ 는 우리가 알고자 하는 매개변수이고, 사후밀도함수 $\pi(\theta|data) = k \cdot \pi(\theta) \cdot L(\theta)$ 로부터 구해진다. 여기서 $\pi(\theta)$ 는 사전밀도, $L(\theta)$ 는 우도함수, k 는 비례상수이며, 사전밀도함수로부터 표본을 취하는 것이 비교적 어렵지 않다는 가정하에 계산된다. SIR 알고리즘에서 $h(\theta) = \pi(\theta)$ 이고, $g(\theta) = \pi(\theta|data)$ 로 놓으면 가중치에 대한 함수는 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$w(\theta) = g(\theta)/h(\theta) = \frac{\pi(\theta|data)}{\pi(\theta)} = k \cdot L(\theta) \quad (1)$$

여기서, $X=(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ 를 사전밀도함수 $\pi(\theta)$ 로부터의 표본이라하면, 이로부터 우리는 사전밀도함수의 표본 $X=(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ 를 특정한 가중확률 $L(\theta_i) = (L(\theta_1), L(\theta_2), \dots, L(\theta_n))$ 를 갖

고 대체하는 사후밀도함수의 대략적인 표본 $X^* = (\theta_1^*, \theta_2^*, \dots, \theta_n^*)$ 를 얻을 수 있다. 자료를 관측하기 이전에 각 θ_i 는 모두 $1/n$ 만큼의 가중치를 갖고 있다. 이러한 가중치는 우도함수와의 곱을 통해 재정리된다(이명우 등, 2005)

2.2 예상홍수피해액 산정 방법

우리나라의 치수경제성 평가는 1985년의 하천 시설기준(건설부)에서 제시된 방법을 하천시설기준(건설부, 1993)까지 그대로 적용하여 사용하였으며, 이 후 ‘수자원개발의 경제성 분석모델 개발-다목적댐 편익산정을 중심으로(한국수자원공사, 1998)’가 발간되기 전까지도 별 다른 수정없이 사용하여 왔다. 2000년 하천설계기준(건설교통부, 2000)이 발간되었으나 마찬가지로 개선사항은 거의 없었으며, ‘치수사업 경제성분석 개선방안 연구(건설교통부, 2001)가 발간되고 나서야 기존 방법의 문제점을 지적하고 개선하였다.

현행 국내의 치수경제성 분석은 ‘치수사업 경제성분석 방법 연구(건설교통부, 2004)에서 제시된 다차원 홍수피해 산정방법(Multi-Dimensional Flood Damage Analysis; 이하 다차원법)을 이용

하고 있으며, 본 연구에서도 다차원법을 이용하여 예상홍수피해액을 산정하였다.

3. 적 용

3.1 대상유역 및 강우해석

본 연구에서는 안양천유역을 대상으로 연구를 수행하였다. 안양천은 유역면적 286km², 유로연장은 32.5km로 유역평균폭이 8.8km인 중규모 하천이다. 안양천 유역내에는 지속기간별 확률강우량을 얻기 위한 충분한 관측기간을 보유한 관측소가 없으므로 인근 관측소인 서울, 수원 관측소에 대한 확률강우량을 산정하여 활용하였다. 수원 및 서울 관측소 강우자료의 통계특성은 표 1과 같다.

표 1. 관측자료의 기본 통계 특성

통계량	표준편차 (mm)	분산 (mm ²)	평균 (mm)	최대값 (mm)
수원 관측소	84.56	7149.68	167.39	451.5
서울 관측소	87.93	7731.63	174.12	446.80

표 2. 수원 및 서울관측소의 확률강우량

재현 기간	수원 관측소				서울 관측소			
	60분	180분	360분	1440분	60분	180분	360분	1440분
5	51.3	101.1	140.4	233.6	60.1	114.6	151.6	238
10	59.8	120.5	167	283.3	70.9	134.3	178.4	287.8
30	72.6	149.8	207.3	358.5	87.3	164.1	218.9	362.9
50	78.5	163.1	225.7	392.8	94.8	177.8	237.4	397.3
70	82.3	171.9	237.8	415.3	99.7	186.7	249.6	419.8
80	83.9	175.4	242.5	424.2	101.6	190.2	254.4	428.7
100	86.4	181.2	250.5	439	104.8	196.1	262.4	443.6
150	91	191.7	265	466	110.7	206.9	276.9	470.6
200	94.3	199.1	275.2	485.1	114.9	214.5	287.2	489.7
300	98.9	209.6	289.7	512	120.8	225.2	301.8	516.6
500	104.7	222.8	307.8	545.9	128.1	238.6	320	550.6

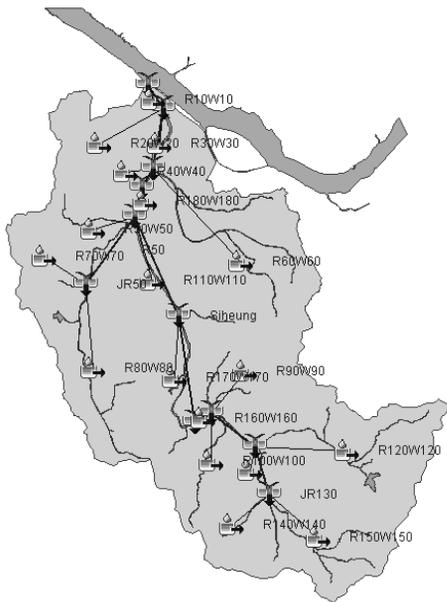


그림 1. 안양천 유역 HEC-HMS구성

빈도해석 프로그램인 FARD 2006을 이용하여 재현기간에 따른 지속시간별 확률강우량을 산정하여 표 2에 제시하였으며, 이를 Huff의 4분위법을 이용하여 시간분포하였다. 본 연구에서는 표 2의 재현기간 200년, 지속시간 24시간의 확률강우량을 이용하였다.

확률홍수량은 강우-유출 모형인 HEC-HMS를 이용하였으며, 산정된 확률홍수량을 HEC-RAS에 이용하여 지점별 홍수위를 산정하였다. 지반고가 산정된 홍수위보다 낮은 경우 침수되는 경우로 간주하여 침수구역을 설정하였다. 이를 위하여 각 측정위치에 하천의 법선방향으로 측선을 도시하여 각각에 홍수위값을 부여하였다(그림 2). 측선의 길이를 충분히 길게 하여 산정된 제외지의 홍수위

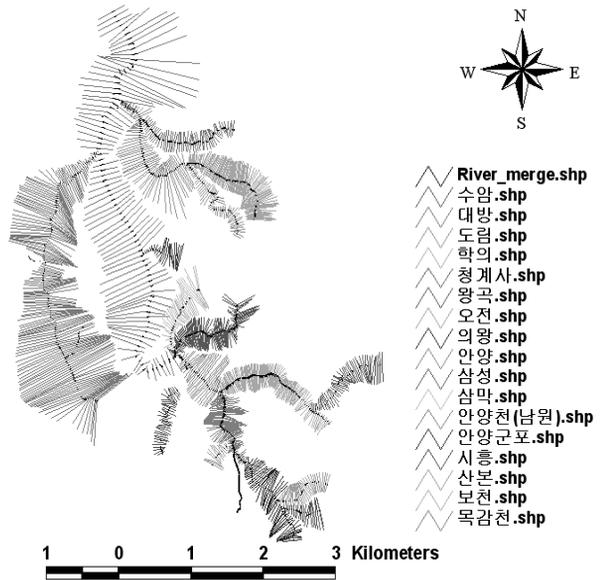


그림 2. 홍수위 적용을 위한 하천횡단면 측선

를 제내지까지 연장한다.

3.2 현재의 확률강우량을 이용한 예상홍수피해액

유역내 행정구역의 자산과, 앞서 제시된 행정구역도와 토지피복도를 중첩한 레이어, 그리고 침수구역도를 다시 중첩하면, 행정구역별 침수심별 피해액을 산정할 수 있으며, 각 침수심별 피해율을 곱하여 피해액을 산정할 수 있다.

본 연구에서는 순현재가(NPV)를 비교하는 것을 목적으로 하므로 200년 빈도 확률강우량에 대한 피해액만을 제시하였다. 현재 확률강우량을 이용하여 안양천 유역의 예상홍수피해액을 산정한 결과 총 피해액은 약 11,634,693 백만원으로 추정되었다.

표 3. 현재확률강우량에 대한 동별 자산종류별 피해액 (계속)

구	동	피해액	구	동	피해액	구	동	피해액
구로구	구로2동	78	동작구	신대방1동	146930	광명시	광명1동	1
구로구	구로2동	3527	동작구	신대방2동	64	광명시	광명1동	0.03
구로구	구로본동	10295	구로구	신도림동	18953	구로구	구로2동	4076
영등포구	대림1동	47135	관악구	신림8동	13759	구로구	구로본동	397

표 3. 현재확률강우량에 대한 동별 자산종류별 피해액

구	동	피해액	구	동	피해액	구	동	피해액
영등포구	대림3동	30995	영등포구	양평1동	105	영등포구	당산1동	138346
동작구	대방동	42525	구로구	가리봉1동	260	영등포구	당산2동	131075
영등포구	문래2동	253	구로구	가리봉2동	0.29	금천구	독산1동	4534
영등포구	문래2동	8419	구로구	가리봉2동	15409	금천구	독산1동	587
동작구	상도3동	132	금천구	가산동	5663	양천구	목1동	473
동작구	상도4동	4543	구로구	개봉2동	2977	양천구	목6동	1442
영등포구	신길5동	900	구로구	개봉3동	6247	양천구	목6동	699.02
영등포구	신길6동	10886	시흥시	과림동	11	안양시	박달2동	17297
동작구	신대방1동	28978	광명시	광명1동	0	부천시	범박동	0.51
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴

그림 3은 현재의 확률강우량에 대한 예상침수 구역역을 보여주고 있으며, 이에 따른 침수심별 침수면적을 표 4에 나타내었다.

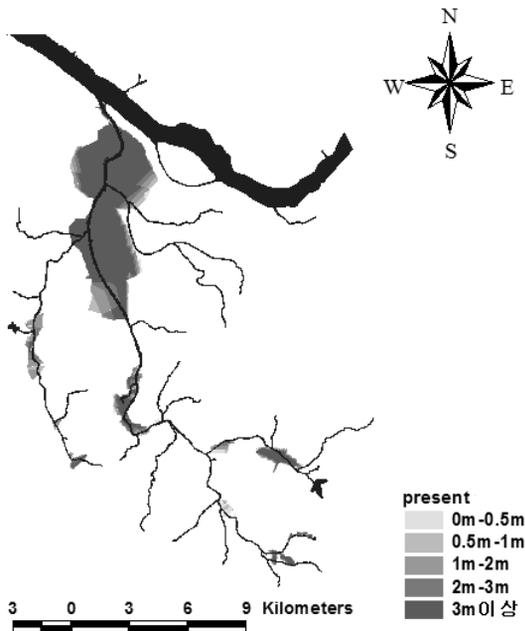


그림 3. 현재의 확률강우량을 이용한 예상침수구역

표 4. 현재의 확률강우량을 이용한 예상침수면적 (단위: m²)

침수심	침수면적
0.0m~0.5m	1,408,494
0.5m~1.0m	1,675,491
1.0m~2.0m	4,509,517
2.0m~3.0m	4,088,315
3.0m이상	23,576,877
소계	35,258,694

3.3 불확실성을 고려한 연평균 예상홍수 피해액

3.3.1 Bootstrap 방법에 의한 예상홍수피해액

Bootstrap 방법에 의하여 발생한 표본에 대한 적합도 검정 결과, Gumbel 분포형을 선정하였으며, 발생시킨 1000개의 자료를 300회 모의하여 빈도별 확률강우량을 계속적으로 추출하였다. 그림 4와 그림 5는 Bootstrap 방법에 의해 모의된 자료이다. 최초 모의 횟수에는 제한을 두지 않았으나, 300회 이상 반복모의의 한 결과 불확실성의 범위가 수렴하는 것으로 판단되어 300회 모의하였다. 이러한 모의횟수는 연구의 종류와 목적에 따라 다르게 변할 수 있다.

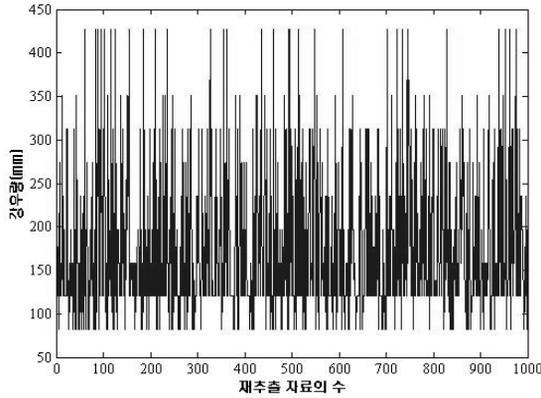


그림 4. Bootstrap resampling data(수원)

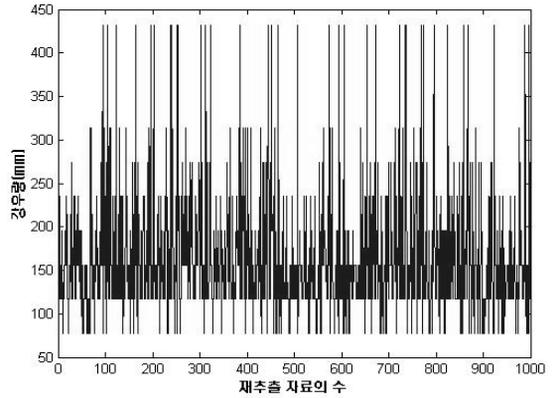


그림 5. Bootstrap resampling data(서울)

표 5. Bootstrap 표본의 기본 통계 특성

통계량	표준편차(mm)	분산(mm)	평균(mm)	최대값(mm)
수원관측소	79.34	6294.68	167.97	451.50
서울관측소	83.73	7011.11	175.36	446.77

표 5는 그림 4와 그림 5에 대한 통계 특성을 보여주고 있다.

표 1의 관측자료에 대한 통계 특성과 비교할 때, 모든 통계치가 비슷한 값을 보이고 있다. 이는 Bootstrap 방법은 표본 재추출시 관측자료의 특성을 그대로 반영한다는 것을 보여준다.

이와 같이 1000개의 자료를 300번 모의한 결과에 대하여 빈도해석을 수행하여 관측소의 빈도에 따른 확률강우량 평균 및 최대, 최소값을 산정하여 표 6에 나타내었으며, 확률강우량값에 대한 범위를 그림 6과 그림 7에 도시하였다.

표 6. Bootstrap방법을 통한 확률강우량

재현기간 (year)	수원관측소			서울관측소		
	최소(mm)	평균(mm)	최대(mm)	최소(mm)	평균(mm)	최대(mm)
2	148	153	159	153	159	166
5	203	212	221	214	224	238
10	239	251	263	254	266	285
20	273	288	303	292	307	330
50	318	337	354	341	360	389
80	341	361	381	366	387	419
100	352	373	393	378	400	433
150	371	394	416	400	423	459
200	385	409	432	415	440	477
300	405	430	455	437	463	503
500	429	456	483	464	492	535

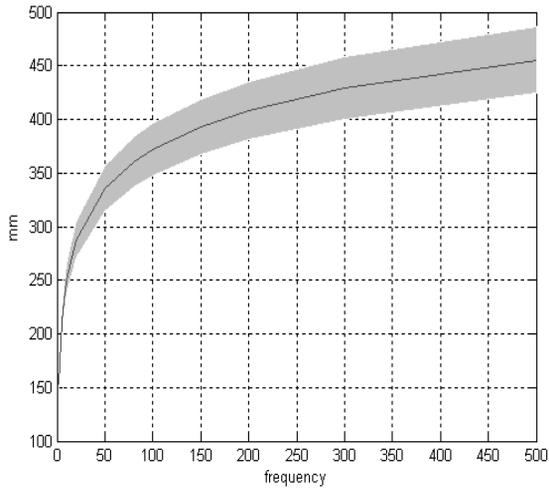


그림 6. Bootstrap 방법을 이용한
확률강우량 범위(수원)

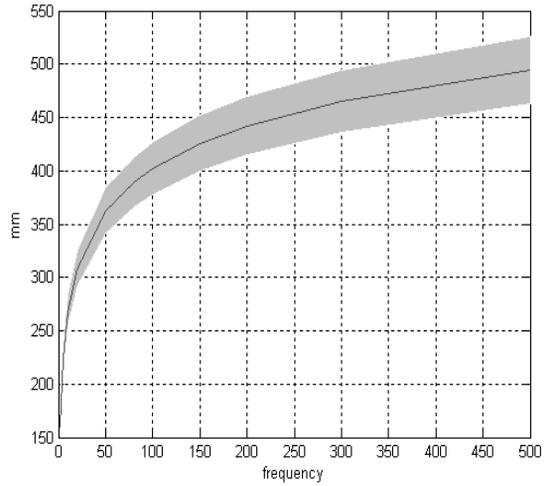


그림 7. Bootstrap 방법을 이용한
확률강우량 범위(서울)

서울 관측소의 확률강우량이 전반적으로 크게 산정된 것은 24시간 지속기간에 대한 연최대 강우량의 최대값이 서울 지점 446.8mm, 수원 지점 451.5mm로 수원 지점의 최대값이 더 크나, 평균은 서울 지점 174.18mm, 수원 지점 167.39mm로 서울 지점의 강우량이 전반적으로 크기 때문인 것으로 판단된다.

Bootstrap 방법을 이용하여 산정된 두 관측소의 확률강우량을 Huff의 4분위법을 이용하여 시간분포하고 HEC-HMS에 입력 후, 홍수량을 산정, HEC-RAS를 이용하여 홍수위를 산정하였다.

그림 8의 침수심 범위에 따른 예상침수면적은 표 7과 같다.

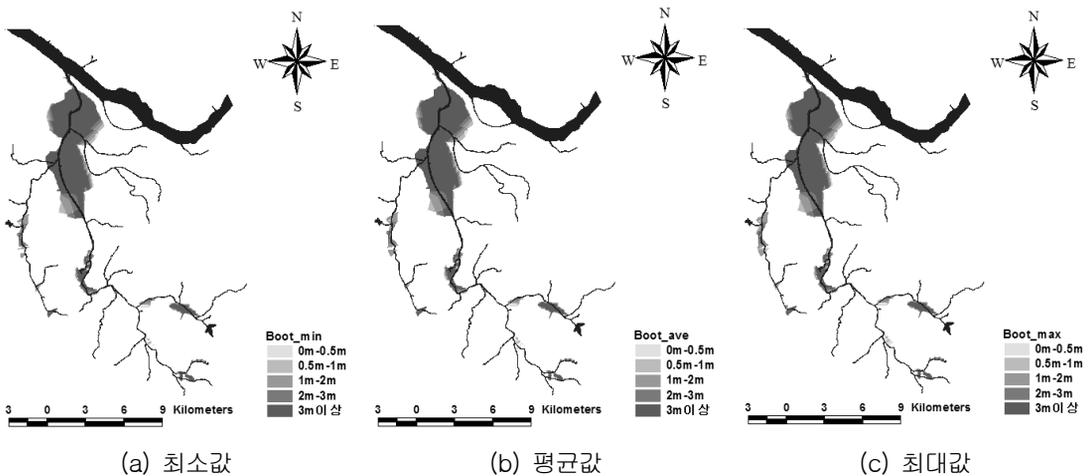


그림 8. Bootstrap 방법에 의한 예상침수구역

표 7. Bootstrap 방법에 의한 예상침수면적

(단위: m^2)

침수심	최소값	평균값	최대값
0.0m~0.5m	1,321,978	1,740,329	1,857,383
0.5m~1.0m	1,611,219	1,372,499	1,740,495
1.0m~2.0m	4,343,809	4,274,376	3,808,975
2.0m~3.0m	3,902,262	4,055,700	3,597,177
3.0m이상	22,533,916	23,571,183	23,838,197
소 계	33,713,184	35,014,087	34,842,227

각 침수심 범위에 따른 침수편입률과 행정구역별 자산을 이용하여 산정된 예상홍수피해액은 표 8과 같다.

표 8. Bootstrap 방법에 의한 예상홍수피해액

(단위: 백만원)

확률강우량범위	최소값	평균값	최대값
예상홍수피해액	9,019,213	9,425,684	9,848,818

3.3.2 SIR 알고리즘에 의한 예상홍수피해액

SIR 알고리즘의 핵심은 우도함수의 선정이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 연최대치 강우사상의 상위 10%의 강우사상을 이용하여 우도함수를 선정하였다. 먼저, 표본의 재추출을 위하여 1000개의 자료를 재추출하고 300회 모의하였다. 그림 9와 그림 10은 SIR 알고리즘에 의해 모의된 자료이다.

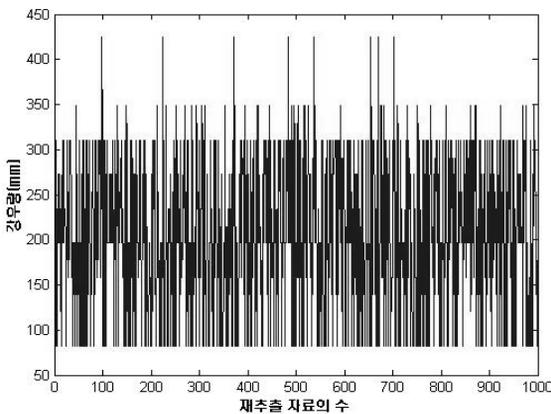


그림 9. SIR resampling data(서울)

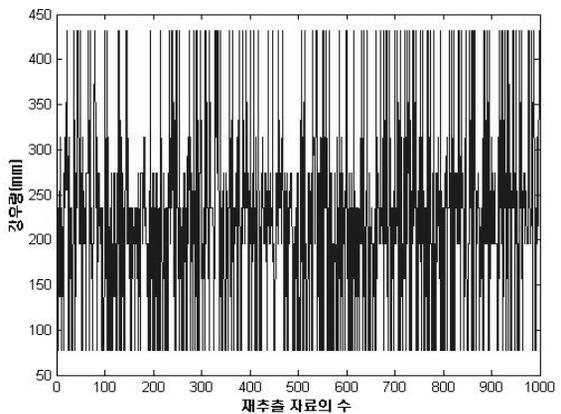


그림 10. SIR resampling data(수원)

표 9. SIR 표본의 기본 통계 특성

통계량	표준편차(mm)	분산(mm)	평균(mm)	최대값(mm)
수원관측소	103.61	10734.21	212.84	451.40
서울관측소	89.44	8000.00	207.40	446.62

표 9는 그림 9와 그림 10에 대한 통계 특성을 보여주고 있다.

SIR 알고리즘을 통하여 재추출된 표본은 기존의 자료에 비하여 분산과 평균은 크고 최대값은 비슷한 특성을 띠고 있다. 이는 데이터의 범위, 최대, 최소값보다 사후분포 선정시 설정한 우도함수에 의한 영향이 크게 작용하기 때문이다.

이와 같이 1000개의 자료를 300번 모의한 결과에 대하여 빈도해석을 수행하여 관측소의 빈도에 따른 확률강우량 평균 및 최대, 최소값을 산정하여 표 10에 나타내었다.

표 10. SIR 알고리즘을 이용한 확률강우량 (상위10%)

재현기간 (year)	수원관측소			서울관측소		
	최소(mm)	평균(mm)	최대(mm)	최소(mm)	평균(mm)	최대(mm)
2	176	196	214	180	193	207
5	267	297	327	269	285	307
10	326	363	402	326	346	374
20	382	427	474	380	404	439
50	455	509	567	451	480	522
80	492	551	614	487	519	564
100	509	570	637	504	537	584
150	541	606	677	535	570	621
200	563	632	706	557	594	647
300	595	668	747	587	627	683
500	635	713	798	626	668	729

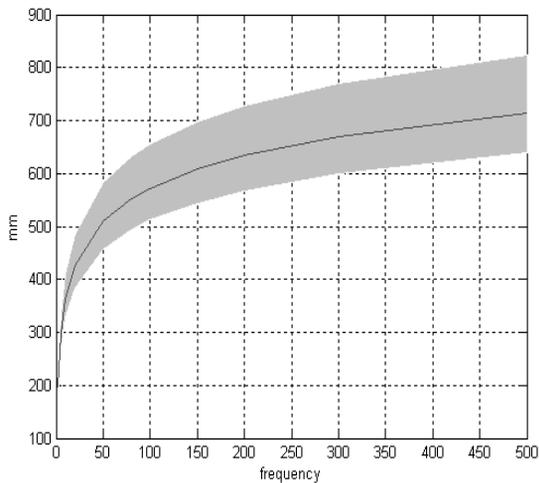


그림 11. SIR 알고리즘을 이용한 확률강우량 범위(수원, 상위10%)

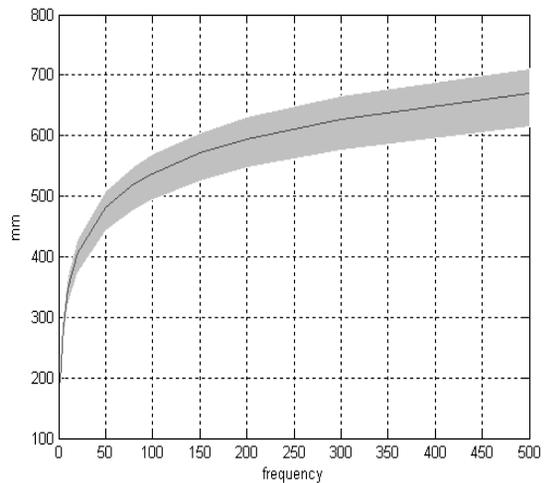


그림 12. SIR 알고리즘을 이용한 확률강우량 범위(서울, 상위10%)

SIR 알고리즘에 의하여 산정된 확률강우량값은 전반적으로 수원 관측소가 서울 관측소에 비하여 큰 값을 보여주고 있다. 이는 관측데이터의 평균

은 수원 관측소 176.44mm, 서울 관측소 183.73 mm로 서울 관측소의 값이 더 컸으나, 최대값은 각각 446.8mm, 451.5mm로 수원 관측소가 더 크

기 때문에 우도값 또한 큰 값이 주어졌기 때문인 것으로 판단된다.

이와 같이, SIR 알고리즘은 수집한 표본의 어느 부분에 가중치를 부여하는가의 문제, 즉 우도 함수의 설정에 크게 영향을 받는다. 따라서, 적정 수준의 불확실성을 부여하기 위해서는 적정 수준의 가중치를 부여할 위치를 선정해야 한다. 이를

위하여 본 논문에서는 연최대 강우량 표본자료에 대하여 다양한 우도를 적용하여 보았으며, 그 결과 상위 15%에 가중치를 부여하여 자료를 추출 하였을 때의 확률강우량이 현재의 확률강우량과 비슷한 값을 보인다는 것을 확인하였다. 표 11에 상위 15%의 우도를 통해 산정된 수원과 서울관측소의 확률강우량을 나타내었다.

표 11. SIR 알고리즘을 이용한 확률강우량 (상위15%)

재현기간 (year)	수원관측소			서울관측소		
	최소(mm)	평균(mm)	최대(mm)	최소(mm)	평균(mm)	최대(mm)
2	120	159	190	137	159	183
5	177	232	265	195	225	254
10	214	281	321	233	268	301
20	250	328	376	270	310	348
50	297	387	447	318	364	410
80	321	417	484	342	392	442
100	332	432	501	354	405	457
150	353	458	532	374	428	484
200	367	477	554	389	445	504
300	387	502	585	410	469	531
500	413	535	624	436	498	565

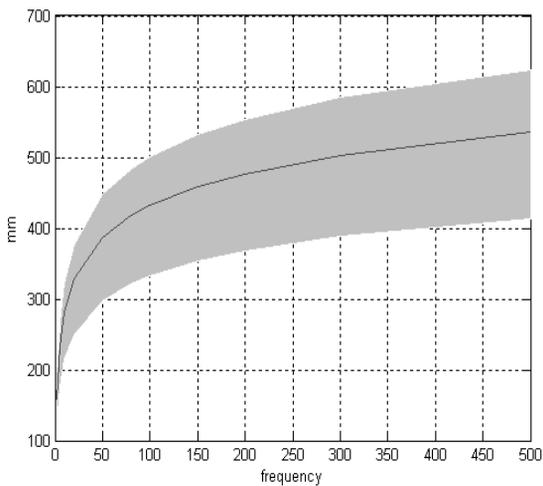


그림 13. SIR 알고리즘을 이용한 확률강우량 범위(수원, 상위15%)

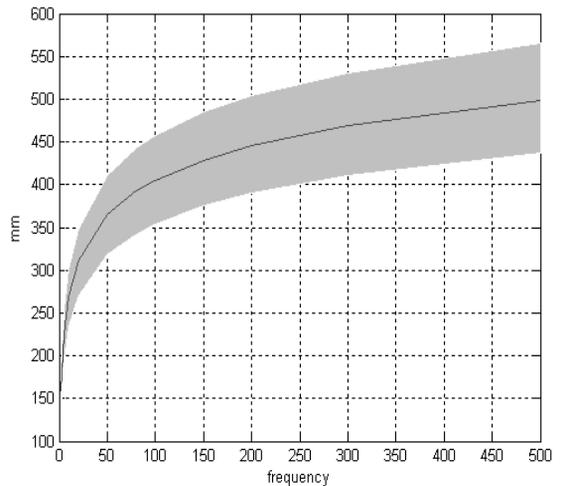


그림 14. SIR 알고리즘을 이용한 확률강우량 범위(서울, 상위15%)

SIR 알고리즘의 가장 중요한 부분이 되는 우도함수의 설정은 오히려 이를 결정하는데에 따른 어려움으로 인하여 불리하게 작용될 수도 있다. 본 논문에서는 재추출된 표본의 평균이 확률강우량과 비슷하게 산정되도록 가중치를 부여하였으나, 여기에는 자료의 기간에 따른 분산, 최소값과 최대값의 차이 등 활용하는 자료에 의한 영향이 크게 작용하므로 적절한 우도함수를 설정하는 것이 중

요한 문제이다.

본 연구에서는 표 11의 200년 빈도의 확률강우량에 대한 예상홍수피해액을 산정하여 불확실성에 의하여 증가하게 되는 피해액 정도를 검토하였다. SIR 알고리즘을 이용하여 산정된 두 관측소의 확률강우량을 Huff의 4분위법을 이용하여 시간분포하고 HEC-HMS에 입력 후, 홍수량을 산정, HEC-RAS를 이용하여 홍수위를 산정하였다.

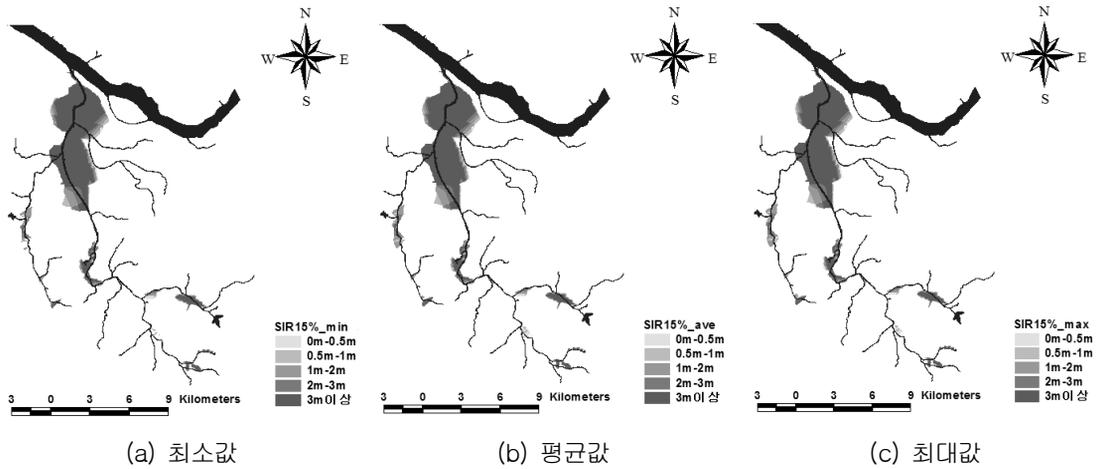


그림 15. SIR 방법에 의한 예상침수구역

표 12. SIR 알고리즘에 의한 예상침수면적

(단위: m^2)

침수심	최소값	평균값	최대값
0.0m~0.5m	657,613	1,324,893	1,943,370
0.5m~1.0m	1,340,144	1,685,055	1,821,071
1.0m~2.0m	4,103,461	4,540,040	3,985,311
2.0m~3.0m	4,030,999	4,082,084	3,763,708
3.0m이상	23,562,690	23,576,284	24,941,780
소 계	33,694,907	35,208,356	36,455,240

표 13. SIR 방법에 의한 예상홍수피해액

(단위: 백만원)

확률강우량범위	최소값	평균값	최대값
예상홍수피해액	8,725,498	11,241,259	14,436,378

그림 15의 예상침수구역에 따른 예상홍수피해액은 표 13과 같다.

본 연구에서는 연최대 강우량 자료에 대한 불확실성 구간을 추정된 것으로 불확실성 구간의 최소값이나 평균값보다는 최대값을 비교하는 것이 안전측면에서 합당하다고 할 수 있다. 표 14에 현재의 확률강우량에 대한 예상홍수피해액, Bootstrap 방법과 SIR 알고리즘에 의한 예상홍수피해액의 최대값을 나타내었다.

표 14. 예상홍수피해액의 비교

확률홍수량	현재	Bootstrap	SIR
예상홍수 피해액	11,634,693	9,848,818	14,436,378

SIR 알고리즘을 통해 산정된 확률강우량의 최대값을 이용한 예상홍수피해액이 가장 큰 값을 보이고 있으며 Bootstrap 방법을 이용한 경우는 현재보다는 작은 값을 보이거나 확연한 차이를 보이지는 않고 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 현재의 확률강우량을 이용한 예상홍수피해액과 불확실성을 고려한 예상홍수피해액을 산정하여 비교하였다. 불확실성을 고려하기 위하여 연최대강우량에 Bootstrap 방법과 SIR 알고리즘을 이용하여 불확실성을 추가하고 그에 따른 확률강우량을 산정하여 이에 따른 예상홍수피해액을 산정하였다. Bootstrap 방법을 연최대 강우량에 적용한 결과, 사전 표본의 통계특성을 그대로 반영하여, 빈도해석을 통해 산정된 확률강우량에도 크게 차이가 없음을 확인하였다. 이에 비하여 SIR 알고리즘은 우도함수의 선정에 따라 재추출된 모의값에 많은 변화가 발생하게 된다. 따라서 최초 극한 강우를 고려하기 위하여 연최대강우자료의 상위 10%에 해당하는 값에 우도를 선정하여 SIR 알고리즘을 수행한 결과, 활용하기에는 부적절한 비현실적인 매우 큰 확률강우량이 산정되었으며, 이에 따라 현재의 확률강우량과 비슷한 수준의 값을 도출하는 수준의 우도를 결정하고

자 반복적인 시행을 통하여 상위 15%의 값에 가중치를 부여하여 추출된 표본들의 평균값이 현재의 확률강우량과 근사한 값을 보이는 것을 확인하였다. 따라서 연최대강우량의 상위 15%에 우도를 설정하여 불확실성이 고려된 확률강우량을 산정하였다. 산정된 확률강우량을 이용하여 추정된 예상홍수피해액은 현재의 확률강우량을 이용한 경우 11,634,693백만원, Bootstrap 방법에 의한 최대값은 9,848,818백만원, SIR 알고리즘에 의한 최대값은 14,436,378백만원으로 추정되었다.

많은 공학분야에서 불확실성에 대한 연구는 오래전부터 계속되어 왔다. 이는 불확실성이 위험도와 직결되어 있는 문제이기 때문이며, 위험도로 인한 실패(failure)는 많은 문제를 야기할 수 있다. 특히 수자원 분야는 그 특성상 사업의 규모가 크고, 수자원정책은 인간의 생명과 재산에 직접적으로 연관되어 있어 이러한 불확실성은 필히 고려되어야 한다. 치수사업에 있어서 이러한 불확실성을 대변하기 위하여 안전율, 여유고의 개념을 이용하여 확정론적으로 대변하여 왔다. 본 연구에서 비교한 예상홍수피해액을 통하여 효율적이고 경제적인 수공구조물 설계가 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

강승호, 박태성 (1996). 몬테칼로 베이시안 분석과 응용사례, 한국통계학회 논문집, 한국통계학회, 제3권, 제1호, pp. 169-177

건설부 (1985). 하천시설기준

건설부 (1993). 하천시설기준

건설교통부 (2000). 하천설계기준

건설교통부 (2001). 치수사업 경제성 분석 개선방안 연구

건설교통부 (2004). 치수사업 경제성분석 방법 연구: 다차원홍수피해 산정방법

권현한, 문영일 (2004). 수문시계열의 Bootstrap 신뢰구간 추정기법 응용, 대한토목학회 논문집, 제24권, 6B호, pp.567-576

김문모 (1994). 신뢰도 분석기법을 이용한 우수관

- 거의 안전성 해석, 연세대학교, 박사학위 논문
김형수, 김유진, 이지원 (2003). 불확실성을 고려한 연피해 기대치 산정, 한국습지학회논문집, 제5권, 제1호
- 문기호 (2010). SIR 알고리즘의 극한강우사상 유도함수를 고려한 확률강우량 산정, 인하대학교, 석사학위논문
- 박명관 (1989). 호우시 배수관망의 신뢰성 분석, 연세대학교, 석사학위 논문
- 서영민, 김성범, 장관진, 지홍기, 이순탁 (2007). 불확실성을 고려한 홍수량 추정, 한국수자원학회, 한국수자원학회 2007년도 학술발표회 논문집, pp.1900-1904
- 이명우, 이충성, 김형수, 심명필 (2005). bootstrap 방법과 SIR 알고리즘을 이용한 확률강우량 결정과 위험도 분석, 대한토목학회 논문집, 제25권, 제5B호, pp. 365-373
- 이홍래, 한건연, 조원철 (1998a). 댐 붕괴 홍수모의에 대한 불확실도 해석, 한국수자원학회 논문집, 제31권, 제3호, pp. 337-345.
- 이홍래, 한건연, 김상호, 최현상 (1998b). 하천 홍수범람해석을 위한 수치모형의 개발: I. GIS와의 연계해석, 한국수자원학회 논문집, 제31권, 제4호, pp. 415-427
- 이홍래, 한건연, 김상호 (1998c). 하천 홍수범람해석을 위한 수치모형의 개발: II. 불확실도 해석, 한국수자원학회 논문집, 제31권, 제4호, pp. 429-437
- 한국수자원학회(2009). 하천설계기준-해설
- Afshar, A. and Marino, M.A. (1990). Optimizing Spillway Capacity with Uncertainty in Flood Estimator, *Journal of Water Resources Planning and Management Division*, ASCE, Vol. 116, No. 1, pp. 71-84.
- Bodo, B. and Unny, T.E. (1976). Model Uncertainty in Flood Frequency Analysis and Frequency-based Design, *Water Resources Research*, Vol. 12, pp. 1109-1117.
- McBean, E.A. and Penel, J. (1984). Uncertainty Analysis of Delineated Flood plain, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 71, pp. 385-387.
- Melching, C.S. (1987). A Reliability Analysis on Flood Event Forecasting with Uncertainty, Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urban a-Champaign
- Plate, E.J. (1986). Reliability Analysis in Hydraulic Design, *Stochastic and Risk Analysis in Hydraulic Engineering*, edited by Yen, B.C, Water Resources Publication, Littleton, Colorado, pp. 37-47.
- Rubin, D. B. (1987). A noniterative Sampling/Importance Resampling Alternative to the Data augmentation Algorithm for Creating a Few Imputation Are Modest; The SIR Algorithm, *Journal of the American Statistical Association*, American Statistical Association, Vol. 82, pp. 543-546
- Tung, Y.K. and Mays, L.W. (1980). Optimal risk-based design of water resource engineering projects, Tech. Rep. CRW R-171, Center for Res. in Water Resource, Univ. of Tes, Austin
- USACE(1996). Engineering and Design Risk-based Analysis for Flood Damage Reductions Studies, EM 1110-2-1619
- Warwick, J.J. and Wilson, J.S. (1990). Estimating Uncertainty of Stormwater Runoff Computations, *Journal of Water Resources Planning and Management Division*, ASCE, Vol. 116, No. 2, pp. 187-204.

- 논문접수일 : 10년 12월 20일
- 심사의뢰일 : 10년 12월 20일
- 심사완료일 : 11년 01월 10일