

# Bayesian 기법을 이용한 홍수피해액 산정

## Estimation of Flood Damage Using Bayesian Approach

유종현\* / 이충성\*\* / 김형수\*\*\* / 심명필\*\*\*\*

You, Jong Hyun / Yi, Choong Sung / Kim, Hung Soo / Shim, Myung Pil

### 요 지

최근 들어 지구온난화에 따른 이상기후 및 집중호우 빈발 그리고 급격한 도시화와 산업화는 예측하기 어려운 수문현상의 변화를 유발시키고 있다. 이에 따른 유출양상의 변화는 수문분석에 의한 기존의 설계기준에도 변화를 요구하고 있다.

즉, 설계빈도의 무조건적인 상향조정에 따른 확정론적인 방법에 의존하기보다는 수문량의 변화를 통계학적으로 반영할 수 있도록 불확실성 분석이 필요하게 되었다. 따라서 설계홍수량에 따른 범람면적별 홍수피해액을 산정할 때 설계홍수량에 대한 불확실성 분석을 수행함으로써 안전율을 고려한 범람과 홍수피해액을 추정할 수 있는 것이다.

본 연구에서는 Bayesian에 의해 불확실성을 고려한 빈도별 설계홍수량을 산정하였으며, HEC-GeoRAS와 HEC-RAS 및 ArcView GIS 3.2a를 이용해 홍수범람면적을 수치지형도에 도시하고, 범람면적별 홍수피해액을 산정하였다.

또한, 불확실성을 고려하지 않은 경우에 대해서는 L-모멘트법을 이용해 설계홍수량을 구하고 홍수범람면적과 홍수피해액을 산정하였다. 불확실성의 고려 여부에 따른 설계홍수량과 예상 홍수피해액을 비교·분석한 결과 불확실성을 고려한 경우가 불확실성을 고려하지 않은 경우에 비해 설계홍수량은 7~33%, 예상 홍수피해액은 1~4%정도 차이를 보였다.

**핵심용어 : 홍수피해액, 불확실성, 베이즈 이론**

## 1. 서 론

홍수량과 치수경제성분석을 수행할 때 불확실성을 고려하는 것은 계산과정의 오차 뿐 만 아니라 지역적인 특성도 함께 고려하려는 것이다. 즉, 기존에는 적정 설계빈도를 산정하고 이에 안전율을 고려하기 위하여 여유고의 개념을 이용하였다. 그러나 이 여유고의 개념은 지역적 특성이나 수문량의 변화에 따른 안전율을 고려하는 것이 아니라 일률적인 안전율의 적용을 의미한다. 따라서, 불확실성 분석은 수문량의 변화나 지역적 특성을 반영하여 설계빈도를 설정하는 것이다. 본 연구는 홍수량을 산정하는데 있어 불확실성을 고려하기 위해 베이시안 기법과 L-모멘트법을 이용하고 이들 결과에 의한 홍수량과 GIS 틀을 이용하여 홍수범람면적을 획득한다. 본 연구의 목표는 최종적으로 홍수범람면적별 홍수피해액을 산정하여 베이시안 기법과 L-모멘트법에 의한 결과를 비교하고자 한다.

\* 정회원 · (주)현대엔지니어링 수자원부 · E-mail : triumph@hec.co.kr  
\*\* 정회원 · 인하대학교 환경토목공학부 박사과정 · E-mail : g2021533@inhavision.inha.ac.kr  
\*\*\* 정회원 · 인하대학교 환경토목공학부 조교수 · E-mail : sookim@inha.ac.kr  
\*\*\*\* 정회원 · 인하대학교 환경토목공학부 교수 · E-mail : shim@inha.ac.kr

## 2. 본 론

### 2.1 대상유역 및 HEC-HMS를 이용한 홍수량 산정

금학천은 경안천의 상류부 좌안측에 유입되는 하천으로 동경127°09'05"~127°12'48", 북위37°13'13"~37°15'19"에 걸쳐 위치하고 있으며, 남서쪽으로는 안성천 유역과 접해 있다. 유역면적 14.30km<sup>2</sup>에 유로연장 5.50km이며, 용인시(EL.324.0m)에서 발원하여 남서방향으로 유하하는 소하천 먹조현천과 합류한 후 유향을 동으로 바꾸어 큰 만곡부 없이 일직선으로 유하하여 경안천에 합류되는 지방2급 하천으로 유역의 하류부는 용인시의 시가지이고, 상류부는 산지 및 농경지로서 유로 경사가 급한 하천이다. 그림 1의 a는 경안천 유역과 티센망도이다. 원형으로 표시된 곳이 금학천이며, 그림 1(b)와 1(c)는 1/5,000 수치지형도의 등고선에서 추출한 금학천 유역의 수치표고모형(DEM; Digital Elevation Model) 및 불규칙 삼각망(TIN; Triangulated Irregular Network)이다.

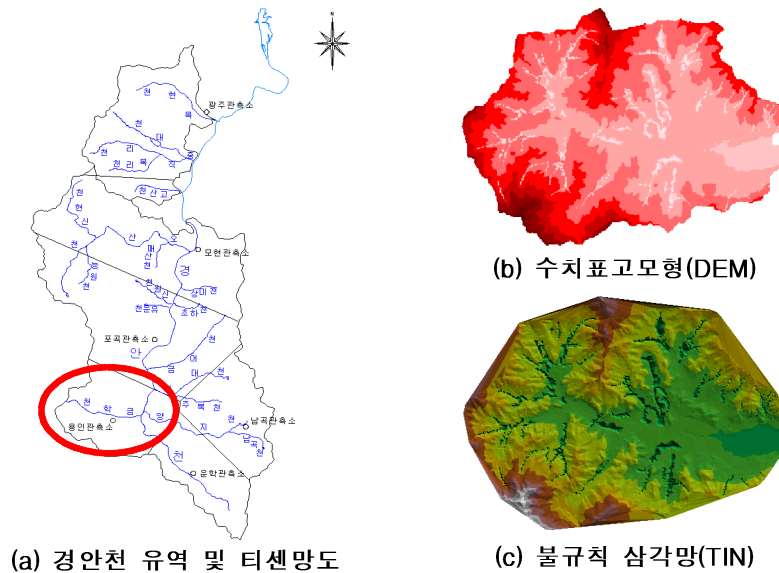


그림 1. 금학천 유역의 티센망도 및 공간정보 추출

본 연구에서는 한국건설기술연구원의 D/B로부터 획득한 용인우량관측소의 시수량 자료(1975~2000)를 이용하여 강수량 자료를 구축하였으며, 각 연도별 호우사상을 선정하여 HEC-HMS모형의 입력자료로 사용하였다. 대상 유역의 HEC-HMS에 의한 홍수량 모의에 필요한 요소들의 계산 방법들은 유효우량계산을 위해 SCS 유출곡선지수법, 단위도 변환에는 Clark 단위도법, 기저유량은 지수함수적 감소방법, 하도추적을 위해 Muskingum방법, 강우분석은 티센가중치 방법을 택하였다. 그 결과 산정된 연도별 지점 홍수량은 그림 2와 같다.

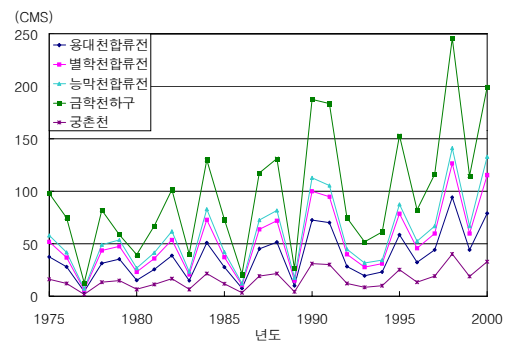


그림 2 연도별 지점 홍수량 추이

### 2.2 베이시안 기법을 이용한 빈도별 설계홍수량 산정

하천의 확률론적 설계는 항상 설계홍수량의 추정량에 기초한다. 설계홍수량과 같은 극한 위수(extreme quantile)는 가능한 관측치에서 다양한 확률분포를 조정함으로써 결정된다. 확률 도시와 적합도 검정(goodness of fit test)은 일반적으로 적당한 분포형을 채택하기 위해 사용된다.

확률분포를 조정함에 있어서 중요한 실제적인 어려움은 극한 위수를 결정하기 위해 사용되는 자료의 양이다. 일반적으로 재현기간은 관측치의 기간과 비교하여 크다. 그러므로 극한 위수를 추정함에 있어 이러한 관측치를 사용할 때 통계학적 불확실성이 포함된다(Noortwijk et. al, 2003). 불확실성은 자연적인 불확실성(natural uncertainty)과 지식의 불확실성(knowledge uncertainty)으로 구분할 수 있는데, 자연적인 불확실성은 자연에서의 무작위성 또는 변화성을 표현한다. 예를 들어, 충분한 자료의 사상에서조차, 다음 해에 발생할 최대 홍수량을 예측할 수 없다. 지식의 불확실성은 물리적인 시스템에 대한 지식의 부족을 표현한다. 본 연구에서는 시간에 따른 유량의 변동과 같은 자연적인 불확실성과 모수의 불확실성과 분포형의 불확실성을 포함하는 통계학적 불확실성을 연구하기 위해 베이시안 통계방법을 사용하였다. 베イズ 이론은 본질적인 불확실성과 통계학적 불확실성을 모호화하며 조합한 통계학적 이론이다.  $\theta$ 와  $\mathbf{D}$  두 임의의 변량(random variables)을 생각해 보자. 이들은

$$p(\theta)p(\mathbf{D}|\theta) = p(\mathbf{D}, \theta) = p(\mathbf{D})p(\theta|\mathbf{D})$$

이므로, 다음 식 (1)과 같이 된다.

$$p(\theta|\mathbf{D}) = \frac{p(\theta)p(\mathbf{D}|\theta)}{p(\mathbf{D})} \quad (1)$$

식 (1)의 해석은 다음과 같다. 임의의 변량  $\theta$ 가 우리가 알고자 하는 모수(parameter)이고, 이것이 일어나는 사전확률(prior probability),  $p(\theta)$ 을 가지고 시작한다. 그리고 임의의 변량  $\mathbf{D}$ (자료)를 관측하고, 관측된  $\mathbf{D}$ 의 조건 하에서, 사전확률을 갱신하여  $p(\theta|\mathbf{D})$ 인  $\theta$ 의 사후확률(posterior probability)을 얻는다. 갱신은 그 비율  $p(\mathbf{D}|\theta)/p(\mathbf{D})$ 을 곱한 것이다. 이 비율이 1보다 크면, 관측되는  $\mathbf{D}$ 는  $\theta$ 의 확률을 증가시킬 것이다. 여기서,  $p(\mathbf{D}|\theta)$ 를 우도함수(likelihood function),  $p(\mathbf{D})$ 를 주변밀도함수(marginal density function)라 한다.

관측치  $\mathbf{D}$ 가 주어졌을 때, 모수  $\theta$ 의 사후분포는 다음 식 (2)와 같다.

$$p(\theta|\mathbf{D}) = \frac{L(\theta|\mathbf{D})p(\theta)}{\int L(\theta|\mathbf{D})p(\theta)d\theta} \quad (2)$$

연최대 홍수량  $q$ 의 베이시안 분포는 전확률정리(total probability theorem)에 의하여 식 (3)과 같은 확률밀도함수를 산출한다.

$$g(q|\mathbf{D}) = \int_{\theta} f(q|\theta)p(\theta|\mathbf{D})d\theta \quad (3)$$

설계홍수량  $q_T$ 의 초과확률은 다음 식 (4)와 같이 정의된다.

$$P(q > q_T|\mathbf{D}) = \int_{q_T}^{\infty} g(q|\mathbf{D})dq = \frac{1}{T} \quad (4)$$

식 (3)을 식 (4)에 대입하면 다음 식 (5)와 같이 된다.

$$P(q > q_T|\mathbf{D}) = \int_{\theta} \left( \int_{q_T}^{\infty} f(q|\theta)dq \right) p(\theta|\mathbf{D})d\theta = \int_{\theta} P(q > q_T|\theta)p(\theta|\mathbf{D})d\theta \quad (5)$$

여기서,  $P(q > q_T|\theta)$ 는  $q_T$ 를 초과하는  $q$ 의 확률이다. 식 (5)를 중요비 추출(importance sampling)을 사용하여 계산하면,  $1-p$ 의 확률을 가진 적당한 설계홍수량은 식 (6)과 같다.

$$E[q_T(\theta)|\mathbf{D}] = \int_{\theta} q_T(\theta)p(\theta|\mathbf{D})d\theta \quad (6)$$

### 2.3 L-모멘트법에 의한 빈도별 설계홍수량 산정

확률가중모멘트법은 변수값과 변수의 평균치와의 차를 모멘트 차수에 따라 누승하여 모멘트를 산정하고 이를 이용하여 매개변수를 추정하는 방법이다. 확률분포의 매개변수를 추정하기 위한 확률가중모멘트는 다음 식 (7)과 같이 정의한다.

$$\beta_r = E[X\{F(X)^r\}] \quad (7)$$

여기서,  $F(X)$ 는 오름차순으로 정렬한 순차통계치  $X$ 의 확률누가분포함수이며,  $r$ 은 모멘트 차수이다. L-모멘트법은 확률가중모멘트법의 선형조합으로서 차수가 다른 몇 개의 확률가중모멘트를 선형으로 가중하여 편의가 제거된 모멘트를 구하는 방법이다. 표본추정량은 순차로 정리된 관측치의 선형조합이므로 일반 모멘트방법에서 산정된 변동계수, 왜곡도, 첨도계수는 표본의 크기가 작은 경우 매우 편의(bias)되는데 반하여, L-모멘트 방법으로 산정된 무차원화된 변동계수나 왜곡도의 추정치는 거의 편의 되어있지 않으며 정규분포에 가깝다. 그러므로 L-모멘트법은 다양한 수문자료에 대하여 특성과 분포형의 매개변수를 나타내는 간단하고 비교적 효율적인 방법이다(이동진 등, 2001). L-모멘트를 확률가중모멘트의 선형조합으로 표시하면 다음과 같다.

$$\lambda_1 = \beta_0 \quad (8)$$

$$\lambda_2 = 2\beta_1 - \beta_0 \quad (9)$$

$$\lambda_3 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0 \quad (10)$$

$$\lambda_4 = 20\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0 \quad (11)$$

식 (8)~(11)을 일반적인 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\lambda_{r+1} = \sum_{k=0}^r d^*_{r,k} \beta_k, \quad r = 0, 1, \dots, n-1 \quad (12)$$

여기서,  $d^*_{r,k} = (-1)^{r-k} \binom{r}{k} \binom{r+k}{k} = \frac{(-1)^{r-k} (r+k)!}{(k!)^2 (r-k)!}$  이다.

### 2.4 기법별 산정된 설계홍수량의 비교

불확실성의 고려 유무에 따른 설계홍수량 비교를 표 1에 나타내었다. 불확실성을 고려한 베이지안 기법이 불확실성을 고려하지 않은 L-모멘트법보다 약 7~33%정도 큰 홍수량이 산정됨을 알 수 있다.

표 1. 지점별 설계홍수량 비교 (단위 : CMS)

지점	산정방법	재현기간				
		10년	20년	50년	100년	200년
궁촌천	L-Moment	29.4	35.0	42.1	47.4	52.7
	Bayesian	31.3	38.4	49.5	60.5	75.3
용대천 합류전	L-Moment	69.1	82.3	99.3	112.0	124.6
	Bayesian	78.3	95.8	122.8	149.6	185.7
별학천 합류전	L-Moment	95.5	113.9	137.6	155.4	173.1
	Bayesian	121.4	148.8	191.1	233.1	289.4
능막천 합류전	L-Moment	107.7	128.3	155.1	175.2	195.2
	Bayesian	143.3	175.6	225.8	276.1	344.5
금학천 하구	L-Moment	178.3	213.5	259.5	294.2	329.1
	Bayesian	190.1	236.0	309.4	384.7	487.5

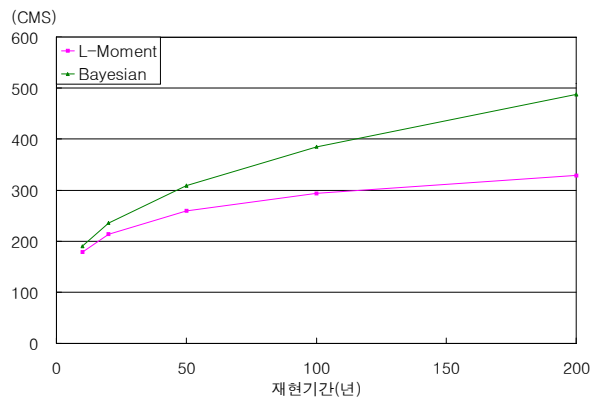


그림 3. 금학천 하구 지점의 설계홍수량 비교

## 2.5 홍수범람모의 및 홍수피해액 산정

본 연구에서는 하천의 홍수범람 모의를 위하여 ArcView GIS, HEC-GeoRAS, HEC-RAS를 연계한 모형을 이용하였으며, 모형의 전체적인 연계구조는 그림 4와 같다. 유역경계를 추출하기 위하여 1/5,000 수치지형도를 이용하여 금학천 유역의 DEM을 추출하였으며, TIN으로 변환하여 HEC-GeoRAS의 PreRAS 과정을 수행하였다. DEM에서 추출된 횡단면의 자료는 관심지역의 하도구간에 대해서는 등고선이 없어 낮은 정확도의 좌표값을 가지므로, 실측된 하천의 측량 자료를 이용하여 좌표값을 보정한다. 이렇게 좌표값을 보정하기 위해 HEC-GeoRAS 작업시 횡단면을 정의할 때 실측된 좌표가 있는 횡단면을 선택하도록 한다.

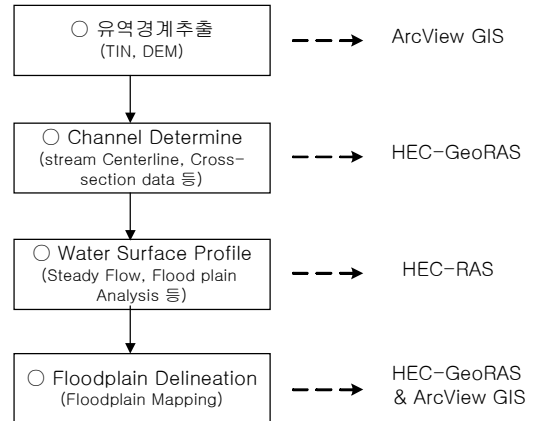


그림 4. 홍수범람 모의절차

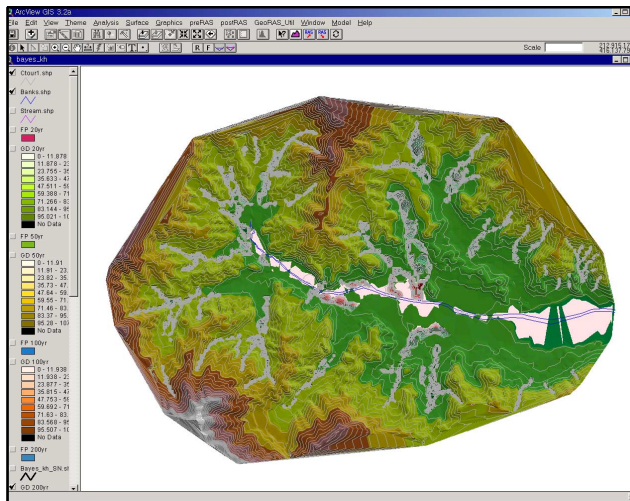


그림 5. 산정된 홍수범람구역

Geometric Data의 구축이 끝나게 되면 흐름 조건을 입력한다. 흐름조건은 앞서 산정한 빈도별 지점 홍수량을 입력하였다. 각 자료의 구축이 완료된 후 HEC-RAS의 정류모의를 실시하여 제방의 높이를 초과하는 수위의 유량을 홍수터로 흐르게 함으로써 범람구역을 설정한 결과를 GIS format으로 Export시켜 HEC-GeoRAS의 PostRAS 과정을 수행하면 그림 5와 같다.

경기도 용인시는 1996년 3월 1일 용인군이 도농복합형태의 시로 설치되었으며, ‘치수사업 경제성 분석 개선방안 연구(건설교통부, 2001)’의 도시 유형에서 ‘인구 증가 등으로 인해 군 전체가 시로 승격된’ 전원도시(田園都市)로 구별되고 있다. 그러나, ‘재해연보(행정자치부, 2001)’에서 발생 피해액에 대한 국고 지원을 구분하는 피해우심 시·군·

구 현황에서는 중소도시의 구분에 준하는 지역으로 분류된다. 그러므로, 본 연구에서는 용인시를 중소도시로 구분하여 피해액을 산출하였으며, 그 결과를 표 2에 나타내었다.

표 2. 빈도별 침수피해액 (단위 : 백만원)

산정방법	빈도 (년)	침수 면적 (ha)	건물	농경지	공공 시설물	기타 시설물	인명 손실	이재민 손실	농작물 손실	합계
L-Moment	20	53.29	20.77	87.84	1,266.47	2.88	55.42	16.83	77.03	1,527.24
	50	59.34	20.82	87.99	1,267.13	2.93	61.71	18.75	85.77	1,545.10
	100	63.37	20.85	88.11	1,267.61	2.97	65.90	20.02	91.60	1,557.06
	200	67.25	20.89	88.22	1,268.10	3.02	69.94	21.24	97.20	1,568.61
Bayesian	20	57.95	20.81	87.96	1,266.97	2.92	60.27	18.31	83.76	1,541.00
	50	66.69	20.89	88.20	1,268.03	3.01	69.36	21.07	96.39	1,566.95
	100	74.79	20.97	88.46	1,269.14	3.10	77.78	23.63	108.10	1,591.18
	200	85.96	21.10	88.86	1,270.88	3.25	89.40	27.15	124.25	1,624.89

### 3. 결 론

홍수피해액의 산정에 가장 중요한 요소는 설계홍수량의 산정이다. 본 연구에서는 홍수피해액을 산정하기 위해 Bayes 이론을 적용하여 불확실성을 고려한 빈도별 설계홍수량을 산정하였고, HEC-GeoRAS와 HEC-RAS, ArcView GIS를 이용하여 범람구역을 추정해 범람구역의 면적별 홍수피해액을 산정하였다. 또한 L-모멘트법을 이용해 불확실성을 고려하지 않은 경우의 홍수량을 구한 후 홍수피해액을 추정하여 불확실성을 고려한 경우와 비교하였다. 불확실성을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 빈도별 설계홍수량은 약 7~33%의 차이를 보였으며, 각 산정된 홍수량을 기준으로 빈도별 홍수피해액을 산정한 결과 1~4%정도 차이로 불확실성을 고려한 경우가 고려하지 않은 경우에 비해 약간 크게 산정되었다. 또한, 홍수피해액의 산정에 있어 지역 유형 구분에 따른 침수면적-피해액 관계식을 이용하였고 인명 손실, 이재민 손실, 농작물 피해는 원단위를 사용하여 계산하였다. 중소도시로 구분한 결과가 전원도시로 구분한 결과보다 약 46%정도 크게 산정되었으며, 홍수피해액 산정시 지역 유형 구분은 중요한 선결요건이라 사료된다.

### 참 고 문 헌

1. 건설교통부 (2001). **치수사업 경제성 분석 개선방안 연구**.
2. 이동진, 허준행 (2001). "L-모멘트법을 이용한 한강유역 일강우량자료의 지역빈도해석", **한국수자원학회논문집**, Vol. 34, No. 2, pp. 199-130.
3. Daniel Snead and David R. Maidment (2000). "Floodplain Visualization Using HEC-GeoRAS", *Terrain Model and Hydrologic Data Provided by Esteban Azagra-Camino Center for Research in Water Resources*, October, 2000.
4. J.M. van Noortwijk, H.J. Kalk and E.H. Chbab. In T. Bedford and P.H.A.J.M. van Gelder (2003). "Bayesian Computation of Design Discharges" *Safety and Reliability, Proceedings of ESREL 2003-European Safety and Reliability Conference 2003*.