

서울 지역의 미래 홍수취약도 평가

성 장 현* / 백 회 정** / 강 현 석*** / 김 영 오****

The Assessment of Future Flood Vulnerability for Seoul Region

Jang Hyun Sung* / Hee-Jeong Baek** / Hyun-Suk Kang*** / Young-Oh Kim****

요약 : 본 연구의 목적은 미래 확률강우량을 통계적으로 전망하고 홍수취약도 모형을 통하여 미래 서울 지역의 홍수취약도를 정량적으로 가늠해 보는 것이다. 비정상성(non-stationarity)을 고려한 확률강우량 전망을 위하여 서울 지점의 연최대 일강우량을 초기 30년 자료 이후로 1년씩 누적하며 General Extreme Value (GEV) 분포의 매개변수를 추정하였다. 시간 대 위치, 규모 및 형상 매개변수의 선형정도를 비교하여 시간에 따른 위치 매개변수의 선형회귀식을 구성하고, 선형회귀분석에 의한 위치 매개변수를 이용하여 2030년의 확률강우량을 산정하였다. 이 확률강우량을 장옥재와 김영오 (2009)가 제안한 홍수취약도 분석의 모델의 입력자료로 하여, 2030년 서울지역의 홍수취약도를 평가하였다. 연구 결과, 2030년에 재현기간 100년의 강우가 발생한다면 현재에 비해 지역 평균 5 %정도 취약도가 증가하리라 전망되었다.

핵심용어 : 비정상성, GEV 분포, 홍수취약도

Abstract : The purpose of this study is to statistically project future probable rainfall and to quantitatively assess a future flood vulnerability using flood vulnerability model. To project probable rainfall under non-stationarity conditions, the parameters of General Extreme Value (GEV) distribution were estimated using the 1 yr data added to the initial 30 yr base series. We can also fit a linear regression model between time and location parameters after comparing the linear relationships between time and location, scale, and shape parameters, the probable rainfall in 2030 yr was calculated using the location parameters obtained from linear regression equation. The flood vulnerability in 2030 yr was assessed inputted the probable rainfall into flood vulnerability assessment model suggested by Jang and Kim (2009). As the result of analysis, when a 100 yr rainfall frequency occurs in 2030 yr, it was projected that vulnerability will be increased by spatial average 5 % relative to present.

key words : non-stationarity, GEV distribution, flood vulnerability

1. 서 론

지구온난화와 도시화는 홍수나 가뭄의 실제적인 원인이다. 일례로 태풍 및 장마전선에 따른 2006년 7월 강우는 지난 1973년 관측시작 이래 강우량 중 최고치를 기록하였으며, 각 댐마다 적게는 300 mm 이상, 많게는 900 mm에 가까운

집중호우가 내려 남한강 여주지역과 한강하류의 범람이 우려되는 국가적인 위기상황에 직면하기도 하였다(황필선 등, 2006). 또한, 배수시설이 잘 갖춰져 있어서 내수침수에 안전하게 여겨졌던 서울은 2010년 9월 21일, 추석 연휴 첫날에 내린 259.5 mm의 집중호우로 도심인 광화문, 청계천 부근에도 큰 피해를 가져왔다. 그 이듬해인 2011년

+ Corresponding author : jhsung1@korea.kr

* 교신저자, 국립기상연구소 기후연구과

** 국립기상연구소 기후연구과

*** 국립기상연구소 기후연구과

**** 서울대학교 건설환경공학부 교수

7월 27일 중부지방에 발생한 호우는 서울 서초구에 오전 6시 50분부터 8시 50분까지 164 mm의 강우를 기록하여 지속시간 2시간 100년 빈도에 해당하는 156.1 mm를 초과하였다(서초구, 2011).

최근 발생하는 극한강우는 기존 확률밀도함수(Probability Density Function: PDF)의 상위 꼬리부분 쪽으로 이동하고 있어서 앞으로 발생하게 될 여러 재해는 빈도와 강도가 현재에 비하여 증가하리라 여겨지고 있다(이창환 등, 2010). 하지만 현재 수공 구조물 설계에 쓰이는 확률강우량 또는 홍수량은 기후변화나 장기적 변동에 영향을 받지 않는 정상성(stationarity)을 가정하고 있어서 정상성의 가정이 유효한가에 대한 점검과 비정상성을 고려한 빈도해석의 필요성을 절감하게 하고 있다(Jain and Lall, 2000; 2001, Sankarasubramanian and Lall, 2003). 미래 극한강우 변화를 전망하는 연구로는 과거 극한강우 시계열 자료의 비정상성을 고려하기 위하여 확률 분포형의 매개변수(parameter)를 시간의 함수로 구성하여 미래 극한사상의 초과확률을 예측하는 연구(권영문 등, 2009; 이창환 등, 2010; He et al., 2006)가 대표적이다. 이들 대부분의 선행 연구에서는 공통적으로 우리나라 미래 극한강우의 크기가 증가할 것이라는 결론을 제시하고 있다.

극한강우의 위협이 커질수록 이로부터 자유롭고자 하는 대중의 욕구는 점차 증가하고 있어서 이에 선진국에서는 국가 주요 시설물 설계에서 위험도 기반 설계(risk-based design)의 필요성이 제시된 이후로 재해와 인적재해로부터 안전한 지역을 계획하기 위해 위험도 평가(risk assessment) 및 관리 과정을 체계화하려는 노력이 지속적으로 이뤄지고 있다(Ikeda, 2006). 우리나라에서도 이미 위험도 평가의 중요성을 인지하여 이와 관련된 연구가 꾸준히 이뤄지고 있다. 지금까지의 위험도 평가는 전문가의 주관적 의견을 반영하는 방법과 과거 자료 분석을 통한 방법이 주를 이루고 있다(장옥재와 김영오, 2009). 국내에서는 2001년부터 유역종합수계계획을 세워 본격적으로 홍수피해 잠재능(Potential Flood Damage: PFD)로 대표되

는 홍수위험도 평가를 수행하고 있는데 PFD는 각 인자들의 가중치 산정에 전문가의 오판이 개입될 수 있다는 단점이 있었다(장옥재와 김영오, 2009). 반면에 과거 자료를 분석하여 재해 위험도를 평가하는 방법은 정량적인 자료를 분석하여 위험도를 평가하기 때문에 분석가의 주관적 의견이 포함될 여지가 적다는 장점이 있다. 위와 같은 이유로 장옥재와 김영오는 2009년도에 과거 자료를 분석하여 취약도를 평가하는 정량적인 분석방법을 제안한 바 있다.

이 연구에서는 기후변화 및 기후변동으로 인한 서울지역의 강우량 및 강우강도 증가와 더불어 수문 환경변화에 따른 대응방안을 모색하기 위해서 현재와 미래의 홍수취약도를 분석하였다. 미래 홍수취약도 평가를 위하여 비정상성을 고려하여 구한 현재와 미래의 확률강우량을 입력자료로 하여 장옥재와 김영오가 2009년에 제안한 홍수취약도 모델로 가능홍수 피해금액을 추정하고, 가능홍수 피해금액을 지역 총자산으로 나눈 현재 및 미래의 FVI (Flood Vulnerability Index)를 전망하였다. 미래 홍수취약도 평가에는 미래 확률강우량 외에 다른 조건들은 현재와 동일하다고 가정하였다.

2. 연구방법

2.1 연구 내용 및 절차

본 연구는 연최대 일강우량(annual maximum daily rainfall)의 빈도해석(frequency analysis)에서 비정상성(non-stationarity)을 고려하여 2030년의 확률강우량을 구하고 이를 장옥재와 김영오(2009)가 제안한 홍수취약도 평가모형의 입력자료로 하여 미래 홍수취약도를 구하는 과정을 다루고 있다. 본 장에서는 연구 방법의 개략적인 설명을 시작으로 연최대 일강우량의 빈도해석과 홍수취약도 평가모형의 기본 이론에 대해 설명하겠다. 우선, 본 연구의 절차를 살펴보면 Fig. 1과 같다. 즉, 연최대 일강우량의 비정상성을 고려하여 빈도해석하고 이를 지역회귀분석(regional regression

analysis)을 기본으로 하는 홍수취약도 평가모형에 넣어 현재와 미래의 홍수취약도를 평가하는 것이다.

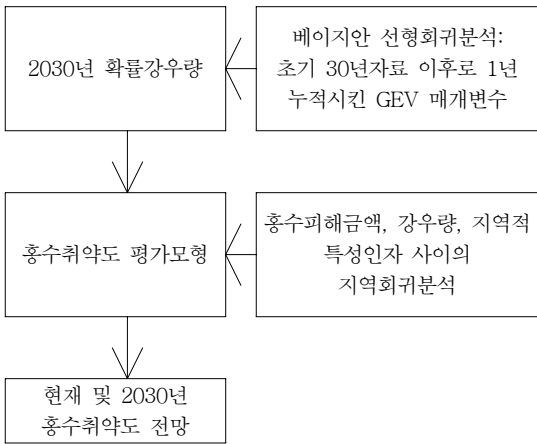


Fig. 1. 미래 홍수취약도 평가 방법

2.2 GEV 분포와 비정상성을 고려한 빈도해석

GEV 분포는 Jenkinson에 의해 1965년에 제안되었으며 강우량, 온도 및 파고 등의 빈도해석에 적용성이 높다(Hosking 등, 1985). 이는 GEV 분포는 상위 꼬리부분이 두텁기 때문이며, 형상(shape) 매개변수에 크기에 따라 상위 꼬리부분의 두텁기가 달라진다(Fig. 2).

GEV 분포의 누가분포함수(Cumulative Distribution Function: CDF)는 식 (1)과 같다

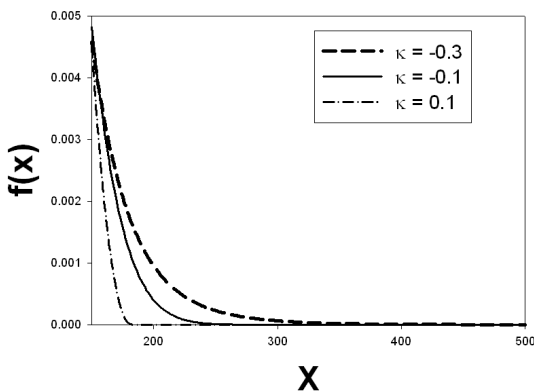


Fig. 2. 형상 매개변수에 따른 PDF의 상위 꼬리 형태

(Stedinger et al., 1993).

$$F(x) = \exp[-(1 - \kappa \frac{x - \xi}{\alpha})^{1/\kappa}], \kappa \neq 0$$

$$= \exp[-\exp(-\frac{x - \xi}{\alpha})], \kappa = 0 \quad (1)$$

여기서 ξ , α , κ 는 각각 위치(location), 규모(scale), 형상에 관련된 매개변수이다. GEV 분포는 3개의 극치분포가 결합된 것으로 형상 매개변수 κ 에 따라 극치 Type I($\kappa = 0$), Type II($\kappa < 0$), Type III($\kappa > 0$) 분포로 나눌 수 있으며, Type I은 Gumbel, Type III는 Weibull 분포로 불리기도 한다. 식 (1)에서 변수 x 의 범위 역시 형상계수 κ 에 따라 달라지는데, $\kappa < 0$ 일 때는 $\xi + \alpha/\kappa \leq x < \infty$, $\kappa = 0$ 일 때는 $-\infty < x < \infty$, $\kappa > 0$ 일 때는 $-\infty < x \leq \xi + \alpha/\kappa$ 가 된다(Stedinger et al., 1993).

기존의 빈도해석은 정상성을 가정하여 자료의 분포가 기상상태에 영향을 받는 정도가 통계적으로 유의하지 않음을 가정하고 있다. 그러나 최근의 많은 경우에 있어서 관측값들은 주기를 갖거나 증가 또는 감소하는 경향을 보이고 있어 정상성에 대한 가정이 더 이상 유효하지 않음을 보여주고 있다(Olsen 등, 1999). 비정상성을 고려하기 위한 대표적인 방법은 PDF의 매개변수를 시간의 변수로 해석하는 것이다. 국내에서도 이러한 방법론을 바탕으로 비정상성을 고려한 빈도해석 관련 연구가 많이 수행되고 있다(정대일 등, 2008; 권현한 등 2009, 이창환 등, 2010). 본 연구에서는 Coles가 2001년 제안한 방법 중에서 GEV 분포의 위치 매개변수를 시간의 변수로 가정하고, PDF의 매개변수를 선형회귀식으로 추정하는 방법을 이용하였다.

2.3 홍수취약도 평가모형

본 연구에서 사용된 홍수취약도 평가모형은 장욱재와 김영오(2009)가 제안한 방법으로써 아래 설명은 해당 논문을 인용하였다. 지역회귀분석의 절차로는 먼저 계측지역(과거 홍수 피해금액 자료

가 충분한 지역)에서는 홍수 피해금액과 시강수량 자료를 바탕으로 비선형 회귀분석을 실시하고, 다음으로 이 회귀식의 계수를 다시 해당 지역의 인문·사회 경제학적 인자들로 표현한다. 이러한 방법으로 지역적 인자들이 홍수 피해에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있으며 궁극적으로 미계측지역(과거 자료가 충분하지 않은 지역)에서도

지역적 인자들을 통해 특정 빈도에 발생 가능한 홍수 피해금액을 추정할 수 있다. 또한 추정된 홍수 피해금액과 지역 총 자산의 비를 FVI라 하여 이를 이용하여 특정빈도 강우로 인하여 도시 내에서 피해를 입을 수 있는 재산의 범위를 추정할 수 있다. 홍수취약도 평가의 기본개념은 Fig. 3과 같이 두개의 함수로 나타낼 수 있다.

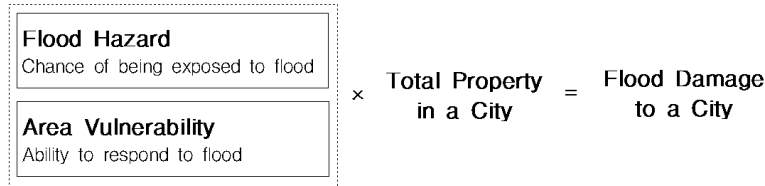


Fig. 3. 홍수취약도 평가의 기본개념(장옥재와 김영오, 2009)

만약 한 도시의 홍수위험도를 분석한다면 먼저 첫 번째 함수는 ‘이 도시에서 홍수가 얼마나 자주 발생하는가?’와 ‘홍수가 발생한다면 몇 년 빈도의 홍수가 발생할 것 인가?’에 대한 함수이다. 이는 그 동안 많은 연구자들에 의해서 연구된 홍수빈도 해석과 관련된 내용이다. 본 홍수취약도 평가모형의 핵심은 같은 홍수가 발생했을 때에 도시 내 지역들이 취약도에 따라 달리 나타내는 피해양상에

대한 사항으로 이는 분명 두 지역 간 차이가 있는 물리적, 인문·사회적 요인에 기인한다는 것이다. 예를 들어 한 지역이 다른 지역보다 배수설비나 우수 펌프장 설비를 잘 갖추고 있다면 같은 홍수가 발생 하더라도 피해를 입는 지역은 현저하게 줄어들 것이다. 지역적 특성 차이로 인해 발생할 수 있는 홍수 피해금액의 차이를 추정하기 위해 본 홍수취약도 평가모형은 Fig. 4와 같은 절차를 따른다.

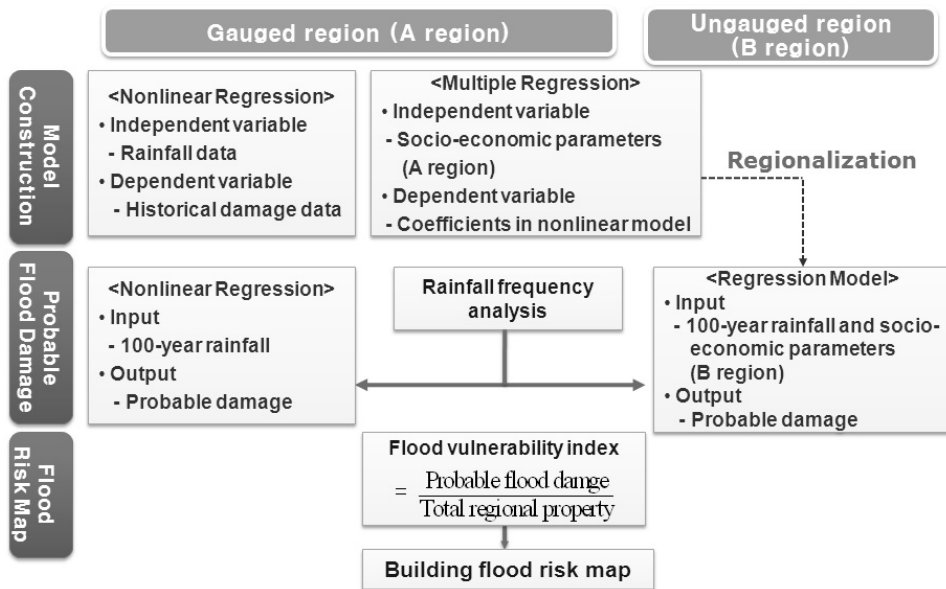


Fig. 4. 홍수취약도 모형의 분석 절차(장옥재와 김영오, 2009)

여기에서는 편의상 과거 홍수 피해금액과 강수량 자료 등 분석에 필요한 자료가 충분한 지역을 계측지역, 그렇지 못한 지역을 미계측지역이라 하면 먼저 계측지역에서 식 (2)과 같이 과거 홍수 피해자료와 강수량 사이에 회귀분석(regression analysis)을 실시한다.

$$(홍수\ 피해금액) = f_1(총\ 강수량, 강우강도, \dots) \quad (2)$$

다음으로 회귀식 f_1 에서 발생한 계수를 a, b, c 라고 한다면 이들과 계측지역에서의 지역적 변수들과 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 실시한다.

$$a, b, c = f_2(\text{계측지역의 인문·사회 경제학적 인자}) \quad (3)$$

계측지역에서 다중회귀분석을 실시한 결과를 이번에는 미계측지역에 적용한다. 이는 미계측지역의 유출량을 결정할 때 강우-유출모형에서 매개변수들을 지역적 특성으로 회귀분석하고 이를 다른 지역에 전이하여 사용하는 것과 비슷한 개념이다. 즉, 미계측지역에서는 지역적 특성값을 식 (3)에 대입하여 식 (2)의 계수를 찾고 이를 통해 최종적으로 미계측지역에서도 회귀식 f_1 을 결정하는 것이다. 마지막으로 홍수빈도해석에서 결정된 강우량을 계측지역에서는 홍수 피해금액과 강우량의 관계에서 유도된 회귀식에 바로 대입하고, 미계측지역에서는 지역회귀를 통해 결정된 회귀식에 적용하여 가능홍수 피해금액을 추정한다. 이 값과 지역 총자산과의 비를 통해 각 지역별로 홍수에 취약한 자산의 비율을 파악할 수 있다.

3. 결 과

3.1 빈도해석 결과

Fig. 5는 서울 관측소의 연최대 일강우량을 10년 단위로 평균한 상자그림(boxplot)을 보여주고

있다. 그림을 보면 1900년대 중반 이후로 평균(mean)이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

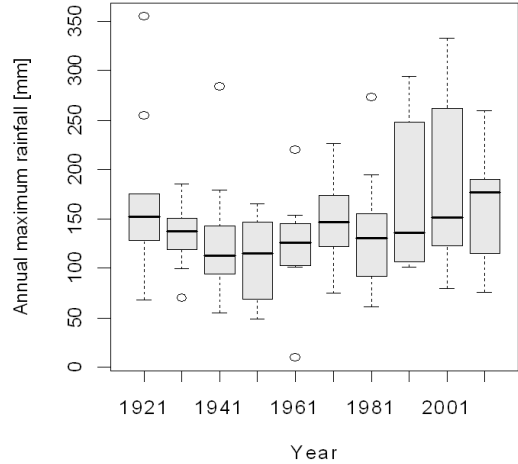


Fig. 5. 10년 단위 연최대 일강우량의 box plot

기상청 산하 서울 관측소(관측기간: 1908년~2009년)의 비정상성을 확인하기 위하여 Mann-Kendall test를 적용하였다. Mann-Kendall test 결과, 서울 관측소의 데이터에서 경향성이 확인되었으며, 최근의 홍수피해 이력을 고려할 때 대상 지역으로 적절하리라 판단되었다. 비정상성을 고려하여 미래 연최대 일강우량을 추정하기 위하여 GEV 분포의 매개변수를 초기 30년을 기준으로 1개년씩 누가하여 추정하였다. 초기 30년 자료에 1년씩 누가하면 최근 강우패턴이 잘 표현된다는 장점이 있다. Fig. 6은 앞서서 말한 방법으로 구한 GEV 분포의 위치, 규모 및 형상 매개변수를 보여 주고 있다. 그림을 보면 위치 매개변수는 초기 30년 자료에 16년치 자료를 더한 부분에서부터 증가하고 있고, 이는 곧 평균값의 증가를 의미한다. 규모 매개변수는 증감을 반복하고 있고, 규모 매개변수의 증가는 변동성의 커지고 있음을, 감소는 그 반대를 의미한다. 형상 매개변수의 증가는 초기 30년 자료에 30년치 자료를 더한 부분에서 감소하고 있으며, 이는 상위 꼬리부분이 두터워지는 것을 의미한다. 상위 꼬리부분의 두터워지는 것은 극치사상의 발생 확률의 증가를 의미한다.

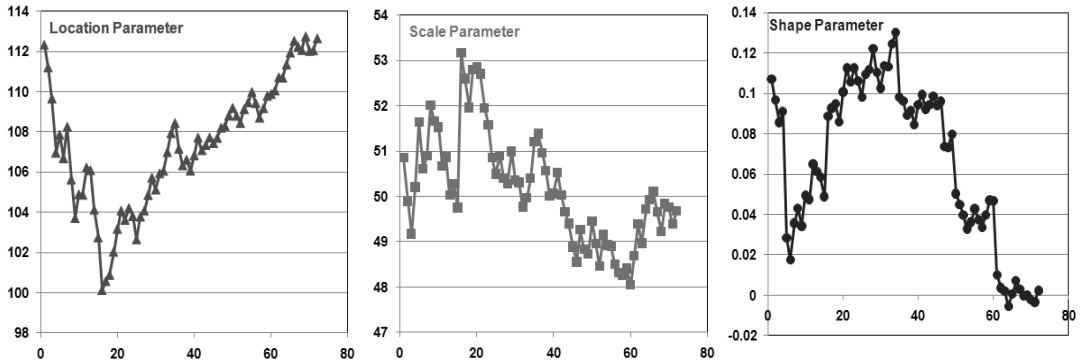


Fig. 6. 초기 30년을 기준으로 1년씩 추가하여 추정된 GEV 분포의 매개변수

Fig. 6으로부터 시간에 따른 평균의 유의미한 증가를 확인하여 본 연구에서는 Coles (2001)의 방법 중 평균의 개념인 위치 매개변수 시계열을 응답변수(response variable)로 시간을 설명변수(explanatory variable)로 하는 1차 선형회귀식(linear regression)을 구성하였다(식 (4)). 여기서 y 는 위치 매개변수, x_1 는 시간이다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \epsilon, \quad \epsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (4)$$

본 연구에서는 선형회귀식의 매개변수 추정에 베이지안(Bayesian) 회귀분석을 이용하였는데, 이는 베이지안 회귀분석이 선형성(linearity), 정규성(normality) 등의 가정이 필요 없고, 자료수에 크게 영향을 받지 않기 때문이다. 특히, 연최대 강우량은 전체적으로는 경향성을 보인다 하더라도 무작위(randomness)한 성향도 커서 모수의 분포 추정을 통하여 불확실성(uncertainty) 범위를 합리적으로 나타낼 필요가 있기 때문이다. 식 (5)는 선형회귀에 이용된 계층적 베이지안으로 여기서 y 는 위치 매개변수, x 는 시간이다. 식 (6)은 무정보적 사전분포(prior distribution)로 Sorensen and Gianola (2002)가 제안한 균일분포(uniform distribution)를 사용하였다. 이와 같은 균일분포는 회귀계수에 대한 사전정보를 전혀 알 수 없다는 것을 반영한 것으로써 사전분포가 모형의 분산에만 관련되어짐을 나타낸 것이다. 식 (7)은 결합 사후분포(posterior distribution)로 우도함수와 사

전분포의 곱이 사후분포에 비례함을 의미한다.

$$y_i | \beta_0, \beta_1, \sigma^2 \sim N(\beta_0 + \beta_1 x_i, \sigma^2) \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$\pi(\beta_0, \beta_1, \sigma^2) \propto \frac{1}{\sigma^2} \quad (6)$$

$$p(\beta_0, \beta_1, \sigma^2 | y) \propto (\sigma^2)^{-n/2} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2\right] \sigma^{-2} \quad (7)$$

GEV 분포의 위치 매개변수의 미래 전망값 \tilde{y} 를 구하기 위해서는 사후예측분포를 구하여야 하는데 이 때 미래 예측값 \tilde{y} 는 식 (8)과 같은 모형을 따른다고 가정한다.

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 \tilde{x} + \tilde{\epsilon}, \quad \tilde{\epsilon} \sim N(0, \sigma^2) \quad (8)$$

랜덤 표본 \tilde{y} 를 아래와 같이 생성함으로 사후예측분포 $p(\tilde{y}|y)$ 를 모의하여 구할 수 있다. $j = 1, \dots, N$ 에 대하여,

(i) 결합사후분포 $p(\beta_0, \beta_1, \sigma^2 | y)$ 로부터 $\beta_0^{(j)}, \beta_1^{(j)}, \sigma^{2(j)}$ 를 생성한다.

(ii) $N(\beta_0^{(j)} + \beta_1^{(j)} \tilde{x}_i, \sigma^{2(j)})$ 을 따르는 \tilde{y} 를 생성한다.

위와 같은 방법에 따라 미래 위치 매개변수를 예측하였고, 예측값의 히스토그램은 Fig. 7과 같다. 예측된 위치 매개변수들의 평균과 표준편차는 각 116.783 mm, 0.995 mm이다.

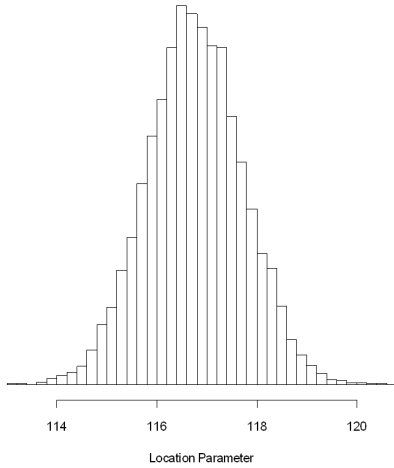


Fig. 7. 베이지안 회귀분석으로 전망된 미래 위치 매개변수

GEV 분포 세 개 매개변수의 정상성을 가정해 구한 현시점의 확률강우량(청색 점)과 위치 매개변수의 비정상성을 가정하고, 규모 및 형상 매개변수의 정상성을 가정해 구한 2030년의 확률강우량(적색 점)은 Fig. 8과 같다. 여기서 녹색 점은 모든 매개변수의 정상성을 가정하여 구한 현시점의 확률강우량에 대비한 위치 매개변수의 비정상성을 고려해 구한 2030년 확률강우량의 증가비율이다.

3.2 홍수취약도 평가결과

장옥재와 김영오(2009)는 22년(1985~2006년) 동안 서울지역에서 발생한 피해에 대한 자료를 구

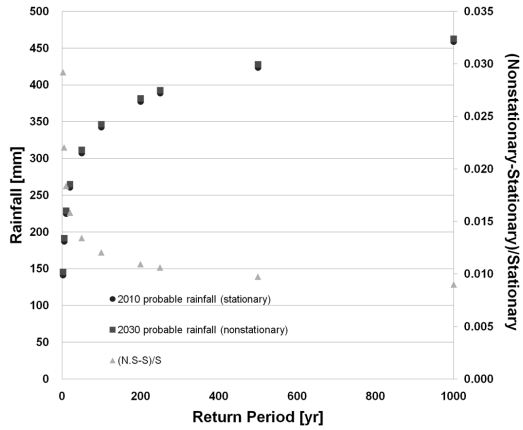


Fig. 8. 현재 확률강우량과 미래 2030년 확률강우량

축하였으며 피해금액은 2006년 기준으로 환산하였다. 각 피해가 발생한 시기의 강우량은 각 도시 주변에 분포하고 있는 강우관측소의 자료를 획득하고 비선형(nonlinear) 회귀분석을 실시하여 식 (9)를 제안하였다.

$$y = \frac{c}{1 + \exp[a + b_1 \cdot (P_{>15}) + b_2 \cdot (P_{peak\ 5hr})]} \quad (9)$$

여기서 y 는 홍수 피해금액(천원), $P_{>15}$ 는 15 mm 이상 강우량, $P_{peak\ 5hr}$ 는 5시간 침투강우량이다. 위의 회귀식으로 추정된 서울지역의 각 자치구 회귀계수는 Table 1과 같다.

Table 1. 서울 지역 각 자치구의 회귀계수

시	자치구	c	a	b_1	b_2	R^2
서울특별시 (11 지역)	강동구	1,787,087	11.6693	-0.0411	-0.0149	0.996
	강북+도봉구	19,016,110	8.0602	-0.0197	-0.0076	0.998
	강서구	4,363,684	14.2370	0.0011	-0.1304	0.993
	관악구	19,775,505	12.3773	0.0085	-0.0970	0.997
	광진+성동구	3,807,285	11.8323	-0.0184	-0.0609	0.973
	구로+금천구	8,397,435	8.1583	0.0020	-0.0706	0.920
	서대문구	1,581,116	4.9020	-0.0108	0.0020	0.969
	성북구	4,201,446	11.7550	-0.0089	-0.0900	0.971
	용산구	8,822,412	8.5768	-0.0074	-0.0255	0.906
	은평구	2,016,934	5.2676	-0.0162	0.0048	0.998
	종로구	803,309	9.7327	-0.0398	-0.0041	0.886

미계측지역의 홍수위험도 평가를 위해 장옥재와 김영오(2009)는 지역 특성인자 값들과 식 (2)의 회귀계수인 c , a , b_1 , b_2 사이의 지역회귀분석

을 실시하였는데 지역회귀분석에 사용된 지역 특성인자는 아래와 같았다.

Table 2. 미계측지역의 지역 특성 인자

구분	지표	출처
인구/주택지수	총 인구수/총 가옥수	통계청 인구 총 조사 (1985~2005년) (http://www.nso.go.kr/)
	인구밀도(인/km ²)	
	기초생활수급자 수	
	15세 미만/65세 이상 인구수	
	층별 가옥수 (지상, 반지하, 옥탑방 등)	
	가옥의 평균연령	
자산지수	주택의 점유형태 (자가, 무보증 월세, 사글세 등)	각 지자체별 통계연보
	재정 자립도(%)	
	제조업 생산액(백만원)	
토지이용지수	재산세액(백만원)	국가수자원 종합정보 홈페이지 (http://www.wamis.go.kr/)
	토지이용현황 (도시면적, 녹지면적, 중요시설면적 등)	
홍수방어지수	유출관련 인자 (불투수층 면적, 평균경사 등)	소방방재청 홈페이지 (http://www.nema.go.kr/)
	배수면적(ha), 모터용량(HP), 유수지 면적(m ²) 등	

지역회귀분석 분석결과로 얻은 지역 특성인자와 c , a , b_1 , b_2 사이의 관계식은 식 (10) ~ 식 (13)과 같다.

$$\begin{aligned}
 c = & 9.520 \cdot SP + 341.309 \cdot PH \\
 & - 308,465 \cdot AHA + 15,533 \cdot UA \\
 & + 36.15 \cdot UH + 5,607,598 \\
 & (N=17, R^2= 0.965) \quad (10)
 \end{aligned}$$

여기서 SP 는 65세 이상 인구수, PH 는 취약가옥수(사글세 가옥수), AHA 는 가옥평균연령, UA 는 도시면적, UH 는 반지하가옥수이다.

$$\begin{aligned}
 a = & -0.1 \times 10^{-4} \cdot TP - 2.64 \times 10^{-4} \cdot PD \\
 & - 114.484 \cdot SR \\
 & + 9.592 \times 10^{-5} \cdot Tax \\
 & + 2.18 \times 10^{-4} \cdot UH + 21.499 \\
 & (N=16, R^2= 0.906) \quad (11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 b_1 = & 0.807 \cdot SR + 3.793 \times 10^{-7} \cdot TH \\
 & + 2.372 \times 10^{-6} \cdot PH \\
 & - 1.12 \times 10^{-6} \cdot UH - 0.010 \cdot AHA \\
 & + 0.005 \cdot Pump - 0.025 \cdot IA + 0.086 \\
 & (N=17, R^2= 0.863) \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 b_2 = & 4.225 \times 10^{-7} \cdot TP - 9.04 \times 10^{-6} \cdot PP \\
 & + 2.777 \cdot SR - 4.23 \times 10^{-6} \cdot UH \\
 & - 0.195 \cdot UR + 0.015 \cdot PR \\
 & + 2.228 \cdot IR - 0.003 \cdot Pump - 0.460 \\
 (N=17, R^2= 0.912) & \quad (13)
 \end{aligned}$$

여기서 TP 는 총 인구수, PD 는 인구밀도(인/km²), SR 는 65세 이상 인구비율, Tax 는 재산세 납부액(백만원), UH 는 반지하가옥수, TH 는 증가옥수, PH 는 취약가옥수, AHA 는 가옥평균연령, $Pump$ 는 우수펌프장의 수, IA 는 중요시설면적, PP 는 기초생활수급자 수, UR 은 도시면적 비율, PR 은 녹지면적 비율, IR 은 중요시설면적 비율이다.

미계측지역은 각 지역 특성인자들을 식 (10) ~ (13)에 대입하여 c, a, b_1, b_2 를 구해 식 (9)를 완성하고, 식 (9)에 앞에서 구한 2030년 확률강우량을 대입하여 미래 가능홍수 피해금액을 계산하였다. 계측지역은 Table 2의 c, a, b_1, b_2 로 식 (9)을 구성하고, 미계측지역과 마찬가지로 관계식에 확률강우량을 대입하여 가능홍수 피해금액을 계산하였다. 통상적으로 재해의 복구속도는 특정 지역의 자산정도에 비례하며 또한 특정 지역의 총 자산과 가능홍수 피해금액을 비교하면 어느 정도의 자산이 홍수에 취약한가를 측정할 수 있다. 따라서 서울지역내 각 자치구의 홍수취약도를 상대적으로 비교하기 위하여 장옥재와 김영오(2009)와 제안한 FVI를 이용하였다(식 (14)).

$$\begin{aligned}
 FVI &= \text{가능홍수 피해금액} / \text{지역 총 자산} \\
 &= \text{가능홍수 피해금액} / (\text{표준공시지가, 천원} \\
 &\quad / \text{m}^2) \times (\text{자치구 총 면적, m}^2) \quad (14)
 \end{aligned}$$

Fig. 9는 2030년 서울지역에 재현기간 100년

의 강우가 발생하였을 때의 FVI를 보여주고 있다. 비교를 위하여 현재에 재현기간 100년의 강우가 발생하였을 때의 FVI도 함께 도시하였다. Fig. 9와 Table 3을 지역적으로 살펴보면 구로구, 금천구, 강서구, 성북구, 동대문구 및 중랑구가 비교적 취약한 지역으로 판단되었다. 여기서 '1'은 안전지역을 의미한다. 이는 재해위험지구로 지정되어 있는 안양천과 중랑천 유역으로 본 연구에서 계산된 취약도 지수가 재해위험지구를 비교적 잘 찾아내고 있음을 보여주는 결과이다. 홍수취약도를 시간적으로 평가해 보면 2030년 재현기간 100년의 강우량이 발생한다면 지역별로 편차가 있겠지만 현재에 비해 약 5%정도 홍수피해금액이 증가하고 홍수에 대한 취약성 역시, FVI 분석 결과로 더 커짐을 알 수 있었다. 본 연구에서는 전망된 확률 강우량을 홍수위험도 평가모형의 입력자료로 하여 미래 홍수위험도를 평가하였기 때문에 FVI는 Fig. 7에서 추정된 강우량 분포 만큼의 불확실성 범위를 가진다고 할 수 있겠다. 따라서, Fig. 9는 평균 값만을 이용하여 도시하였다.

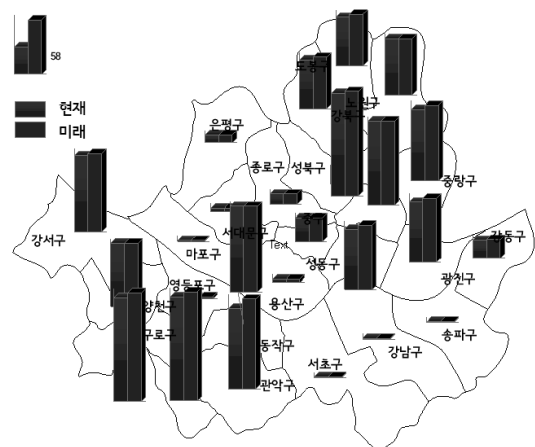


Fig. 9 현재와 미래의 홍수취약도 지수

Table 3. 자치구별 현재와 미래의 홍수취약도 지수 [10^{-6}]

자치구	현재	미래	자치구	현재	미래
강동구	18.821	20.005	강남구	1.000	1.000
강북, 도봉구	51.605	54.959	노원구	59.844	59.845
강서구	81.182	82.506	동작구	91.308	91.309
관악구	85.265	95.092	동대문구	89.435	89.435
광진, 성동구	64.488	68.046	마포구	1.000	1.000
구로, 금천구	110.173	114.524	서초구	1.000	1.000
서대문구	3.793	3.894	송파구	1.000	1.000
성북구	108.923	110.903	양천구	67.153	67.153
용산구	3.592	3.813	영등포구	1.418	1.564
은평구	7.800	8.077	중구	24.869	24.905
종로구	10.541	11.036	중랑구	75.806	79.925

4. 결 론

본 연구의 핵심은 미래 확률강우량을 통계적으로 전망하고, 전망된 확률강우량을 홍수취약도 평가모형의 입력자료로 하여 미래 홍수위험도를 정량적으로 가늠해 보는 것이다. 이 논문에서는 미래 확률강우량을 구하기 위하여 GEV 분포의 매개변수를 시간에 따른 변수로 가정하고 선형회귀식으로 추정한다는 점에서는 기존의 방법과 같다. 선행 논문들에서는 확률분포형의 매개변수와 시간과의 선형회귀식을 구성하기 위하여 최소제곱법을 이용한 결정론적 값을 제시하여 미래의 확률분포형을 결정하게 된다. 본 연구는 확률분포형의 위치 매개변수와 시간과의 선형회귀식을 구성할 때 베이지안 방법을 사용하여 미래 위치 매개변수의 발생가능 확률을 함께 제시하였다는 점에서 기존 연구와 차별화된다. 구체적으로 설명하면 미래 확률강우량 전망을 위하여 서울지점의 연최대 일강우량을 초기 30년 자료 이후로 1년씩 누적하며 GEV 분포의 매개변수를 추정하였다. 시간 대 위치, 규모 및 형상 매개변수의 선형정도를 평가하여 시간에 따른 위치 매개변수의 선형회귀식을 구성하였다. 이 때 선형회귀식의 모수는 구간 추정으로 불확실성 표현이 가능한 베이지안 방법을 이

용하였다. 이렇게 비정상성을 고려한 빈도해석에서 얻은 2030년의 확률강우량은 재현기간에 따라 다르지만 현재에 비해 1% ~ 3% 정도 증가함을 알 수 있었다.

위와 같이 증가하리라 예상되는 확률강우량으로부터 미래 홍수취약도를 객관적으로 평가하기 위하여 장옥재와 김영오(2009)의 지역회귀분석을 바탕으로 한 홍수취약도 평가모형을 이용하였다. 지역적 특성으로부터 가능홍수 피해금액을 추정하고 가능홍수 피해금액을 지역 총자산으로 나눈 FVI를 계산하였다. FVI를 보면 기왕의 홍수피해 실적과 비교적 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었는데 특히 안양천 및 중랑천 유역에 포함되어 있는 자치구가 비교적 홍수에 취약하리라 판단되었다. FVI를 시간적으로 볼 때, 2030년에 재현기간 100년의 강우가 발생한다면 지역별로 편차가 있겠지만 현재에 비해 약 5%정도 가능홍수 피해금액과 취약도가 증가하리라 전망되었다.

본 연구를 통하여 계산된 특정 재현기간에 대한 서울지역의 홍수취약도 지수는 서울의 2006년까지 홍수피해 자료를 사용했으므로 최근의 홍수 대비 상황이 반영되지 않았다는 한계가 있다. 또한 본 연구의 홍수취약도는 각 지역의 홍수 피해액이 아니라, 사회 기반이 홍수에 얼마나 취약한

가를 나타내는 지수이다. 따라서 홍수취약도가 큰 경우에는 사회기반 투자가 더욱 확충되어야 하는 정책결정이 필요함을 의미한다.

본 연구에서는 관측자료의 내재적 경향성 기반으로 한 통계적인 방법으로 미래 확률강우량을 전망하였다. 하지만 미래 강우 확률밀도함수를 구할 때에 과거와 현재까지의 관계식이 미래에도 유효하리라 가정하기 때문에 기후변화를 연구하는데 약간의 모순을 포함하고 있다. 기후변화에 관한 정부간협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 제5차 평가보고서는 새로운 온실가스 농도 시나리오로 확정된 대표농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP, Moss et al., 2008)를 기반으로 미래 기후변화를 전망하도록 권장하고 있다. 향후에는 기후변화의 예상되는 증거를 물리적인 인과관계를 갖춘 지구시스템 모형으로부터 찾고, 또한 최근까지 서울지역에서 발생한 피해 자료로 업데이트 하여 홍수취약도 분석을 수행하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 “NIMR-2012-B-2(기후변화 예측기술 지원 및 활용연구)”의 지원과 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 건설기술혁신사업(과제번호:09CCCTI-B054362)의 지원에도 감사를 드립니다.

참고 문헌

건설교통부 (2001). 수자원장기종합계획 (2001 ~ 2020) 보고서. 조사보고서.
 국립기상연구소 (2008). 기후변화협약대응 지역기후시나리오 활용기술개발(IV). 연구보고서.
 국립기상연구소 (2009). 기후변화 이해하기Ⅲ. 서울의 기후변화.
 권영문, 박진원, 김태웅 (2009). “강우의 증가 경향성을 고려한 목표연도 확률강우량 산정.” 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 29(2B),

pp. 131-139.
 권현한, 문영일, 박래건, 박세훈 (2009). “국내 수문자료의 비정상성 특성 검토 및 Bayesian 비정상성 강수 빈도해석 기법 개발.” 한국수자원학회 학술발표대회 논문집, 한국수자원학회, pp. 214-219.
 서초구 (2011). 2011년도 수해복구 현안업무 보고. 1pp
 이창환, 안재현, 김태웅 (2010). “비정상성 강수빈도해석법에 의한 확률강우량의 평가.” 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 43(2), pp. 187-199.
 정대일, 제리 스테딘저, 성장현, 김영오 (2008). “기후변화를 고려한 홍수 위험도 평가.” 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 28(1B), pp. 55-64.
 장옥재, 김영오 (2009). “지역회귀분석을 이용한 홍수피해위험도 작성.” 한국방재학회 논문집, 한국방재학회, 9(4), pp. 71-80.
 황필선, 박진현, 심명필, 최승안 (2006). “2006년 7월 집중호우에 따른 여주지점 홍수조절 효과 분석.” 한국수자원학회지, 40(4), pp. 48-55.
 Coles, S. (2001). An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer-Verlag, Great Britain.
 He, Y., Brdossy, A., and Brommundt, J. (2006). “Non-stationary flood frequency analysis in southern Germany.” The 7th International Conference on HydroScience and Engineering, Philadelphia.
 Hosking J. R., Wallis J. R., and Wood E. F. (1985). “An appraisal of the regional flood frequency procedure in the UK flood studies report.” Hydrological Sciences Journal, Vol. 30, pp. 85-109.
 Ikeda, S. (2006). An integrated risk analysis framework for emerging disaster risks: Toward a better risk management of flood disaster in urban communities. Terrapub,

- Tokyo.
- IPCC (2007), Climate Change 2007: The Physical Science Basis—Summary for Policymakers. R. Alley et al. (<http://ipcc-wg1.ucar.edu/>).
- Jain, S., and Lall, U. (2000). “Magnitude and timing of annual maximum floods: Trends and large-scale climatic associations for the Blacksmith Fork River.” *Water Resources Research*, 36(12), pp. 3641–3651.
- Jain, S., and Lall, U. (2001). “Floods in a changing climate: Does the past represent the future?.” *Water Resources Research*, 37(12), pp. 3193–3205.
- Moss, R., M. Babiker, S. Brinkman, E. Calvo, T. Carter, J. Edmonds, I. Elgizouli, S. Emori, L. Erda, K. Hibbard, R. Jones, M. Kainuma, J. Kelleher, J. F. Lamarque, M. Manning, B. Matthews, J. Meehl, L. Meyer, J. Mitchell, N. Nakicenovic, B. O’Neill, R. Pichs, Keywan Riahi, Steven Rose, Paul Runci, Ron Stouffer, Detlef van Vuuren, John Weyant, Tom Wilbanks, J. P. van Ypersele, and M. Zurek, 2008: Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 132 pp.
- Olsen, J. R., Stedinger, J. R., Matalas, N. C., and Stakhiv, E. Z. (1999). “Climate variability and flood frequency estimation for the Upper Mississippi and Lower Missouri Rivers.” *Journal of the American Water Resources Association*, 35(6), pp. 1509–1524.
- Sankarasubramanian, A., and Lall, U. (2003). “Flood quantiles in a changing climate: Seasonal forecasts and causal relations.” *Water Resources Research*, 39(5), pp. 1134.
- Sorensen, D. and Gianola, D. (2002). *Likelihood, Bayesian, and MCMC methods in Quantitative Genetics*. Springer-Verlag, New York.
- Stedinger, J. R., R. M. Vogel and E. Foufoula-Georgiou. (1993). *Handbook of Hydrology: Frequency Analysis of Extreme Events*. McGraw-Hill, New York.
- 논문접수일 : 2012년 04월 23일
 - 심사의뢰일 : 2012년 04월 26일
 - 심사완료일 : 2012년 06월 14일