

기후변화 영향을 고려한 도시지역의 확률강우량 전망

Prospect of Design Rainfall in Urban Area Considering Climate Change

손 아 룡* / 배 성 환** / 한 건 연*** / 조 완 희****

Son, Ah Long / Bae, Sung Hwan / Han, Kun Yeun / Cho, Wan Hee

Abstract

Recent inundation damage has frequently occurred due to heavy rainfall in urban area, because rainfall has locally occurred exceeding the capability of a flood control plan by the exiting design rainfall from the data of Seoul weather station. Accordingly the objective of this study is to predict new design rainfall in order to make a future flood control plan considering climate change. In this study, for considering spatial characteristics of rainfall in urban area, data of AWS was used and for retaining insufficient rainfall data, WGR model was estimated the application of target area. The results were compared with the observation data and consequently show reasonable results. In addition, to prepare for climate change, design rainfall was calculated by applying for various climate scenarios and the result would be used in order to establish future flood control plan.

Keywords : WGR model, climate change, design rainfall, urban area

요 지

최근 도시지역에서는 호우로 인한 침수피해가 빈번하게 발생하고 있다. 특히 치수계획 수립의 기초가 되는 확률강우량을 초과한 국지적인 집중호우는 도시지역 침수피해의 주요 원인이 된다. 따라서 강우의 지역적인 특성을 고려한 신뢰도를 향상시킨 확률강우량 산정이 요구된다. 그러나 현재의 확률강우량 산정에는 강우의 시·공간적인 특성을 고려하지 않고 기상청 강우관측소 지점의 자료를 모든 지역에 동일하게 적용하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 기후변화 영향 및 강우의 시·공간적인 특성을 고려한 확률강우량을 예측하였다. 강우의 공간적인 특성을 고려하기 위하여 AWS의 자료를 활용하였으며, 부족한 강우자료를 확보하기 위하여 강우발생 모형인 WGR 모형을 적용하였고, 기후변화 시나리오는 RCP 4.5와 RCP 8.5를 적용하였다. 본 연구의 결과는 향후 치수대책 수립을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : WGR 모형, 기후변화, 확률강우량, 도시지역

1. 서 론

기후변화에 따른 강우양상 및 패턴의 변화와 산업화,

도시화 등으로 인한 불투수면적 증가 및 하천저지대 개발 등으로 인하여 도시지역에서는 국지적인 홍수피해가 빈번하게 발생하고 있다. 따라서 극한 강우에 대한 시·공간적

* 경북대학교 공과대학 건축·토목공학부 박사수료 (e-mail: salong83@naver.com)

Ph.D., Candidate, School of Archi. and Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea

** 경북대학교 공과대학 건축·토목공학부 석사 (e-mail: bsh1125@hotmail.co.kr)

Master, School of Archi. and Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea

*** 경북대학교 공과대학 건축·토목공학부 교수 (e-mail: kshanj@knu.ac.kr)

Professor, School of Archi. and Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea

**** 교신저자, 한국수자원공사 물관리센터 선임위원 (e-mail: wanhee@kwater.or.kr, Tel: 042-629-3056)

Corresponding Author, Senior Researcher, Water Management Center, K-water, Daejeon 306-711, Korea

인 특성을 파악하고 기후변화의 영향을 고려한 확률강우량을 예측하는 것은 도시방재 측면에서 매우 중요하다고 할 수 있다. 그러나 서울과 같은 대도시지역에서는 중·소 규모나 국지적으로 발생하는 강우현상을 밝히기에는 관측소 자료가 부족하여 강우의 공간적 분포를 제대로 반영하지 못하고 있다. 특히 현재 주요 치수계획에는 도시지역의 시·공간적인 강우특성을 고려하지 못한 채 기상청 강우관측소 지점의 강우자료에만 의존해 빈도해석을 수행하고 그 결과로 산정된 확률강우량을 모든 지역에 동일하게 적용하고 있는 실정이다.

이러한 문제점을 보완하기 위하여 기상청에서 관할하는 강우관측소 지점 이외에 자동기상관측장비(Automatic Weather Station; AWS)를 이용해 강우의 공간적 분포를 확인할 수 있도록 운영 중에 있으나, 강우자료 보유년수가 20년 이하로써 강우분석을 통한 확률강우량의 신뢰도 충족에 요구되는 최소기간인 30년을 만족하지 못하고 있는 실정이다. 강우자료에 대한 통계적 분석을 실시하기 위해서는 충분한 강우자료가 확보되어야 하며, 강우자료가 충분하지 못할 경우 통계적 분석 결과의 신뢰성이 감소하게 된다. 이러한 강우자료의 부족을 보완하기 위하여 강우발생 모형을 적용한 강우자료의 확충 및 통계적 분석을 통한 확률강우량 산정과 관련한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 강우의 군집특성 및 이송·확산에 의한 시·공간적인 변화를 고려하는 다차원 강우발생 모형인 WGR (Waymire-Gupta-Rodriguez-Iturbe) 모형을 적용하여 과거 관측된 강우자료의 통계적인 특성에 기초하여 대상 AWS 관측소의 시간적, 공간적인 상관관계를 고려한 강우자료를 발생시켰고, 강우발생 모의를 통해 확충된 강우자료를 적용하여 대상지역에서의 보다 신뢰도를 향상시킨 확률강우량을 산정하고자 하였다.

또한 도시지역의 시·공간적 강우특성을 토대로 미래의 기후변화 영향 하에서 확률강우량이 어떻게 변할지 분석하는 것이 중요하지만 현재 여러 치수계획의 설계에 쓰이는 확률강우량은 과거 강우양상의 정상성을 기본 가정으로 하고 있으므로 기후변화나 장기적인 변동의 영향을 고려하지 하지 못하고 있다. 이에 따라 기후변화에 따른 강우의 비정상성을 고려한 강우량 증가와 이에 따른 확률강우량의 변화양상을 예측하고자 한다.

본 연구에서 적용한 다차원 강우발생 모형인 WGR 모형에 대한 연구로는 Waymire et al. (1984)이 WGR 모형을 개발한 이후 Valdes et al. (1985), Rodriguez Iturbe and Eagleson (1987), Islam et al. (1988) 등을 비롯한 많은 연구가 뒤를 이어 진행되어 왔으며(Valdes et al., 1990;

Koepsell and Valdes, 1991; Valdes et al., 1994), North and Nakamoto (1989)는 간단한 확산방정식에 기초한 NFD 강우모형(The Noise-Forced Diffusive Precipitation Model)을 개발하였고, Yoo et al. (1996)은 강우의 이송·확산의 물리적 특성을 반영하여 관측된 강우의 스펙트럼을 잘 재현할 수 있고 WGR 모형보다 구조가 간단하여 다른 목적으로의 적용에 대한 용이성을 개선한 모형을 개발하였다.

WGR 모형과 관련된 국내유역의 적용사례를 살펴보면, Yoo (1997)는 다차원 강우모형을 적용하여 관측오차 문제에 대한 연구를 수행하였고, Kim et al. (2000)은 WGR 모형의 시간적인 특성을 분석하여 NS-RPPM모형(Neymann-Scott Rectangular Rules Poisson Process Model)과 비교하는 연구를 수행하여 모형의 적용성을 확인하였으며, Jung et al. (2001)은 유전자 알고리즘을 이용하여 WGR 모형의 매개변수를 추정하였다. Yoo et al. (2002a)은 WGR 모형으로부터 모의된 공간적으로 분포된 강우자료를 수정 Clark 방법으로 유출 해석하여 면적평균강우의 추정에 따른 오차와 유출오차 사이의 관계를 분석하였다. Yoo et al. (2002b)은 WGR 모형을 적용하여 모의된 시·공간 강우자료를 KIMSTORM 모형으로 해석하여 강우계의 수에 따른 강우오차와 유출오차의 변화 및 관계를 분석하는 연구를 수행하였다. 또한 Cho (2011)는 잠천유역에 WGR 모형을 적용하여 대상관측소의 부족한 강우량을 확충하여 산정한 확률강우량을 선정해 대상유역의 홍수량을 계산하고, 소유역별 홍수량 자료 및 빈도별 계획홍수위 자료를 바탕으로 침수해석을 실시하여 홍수위험지도를 구축하는 연구를 수행하였다.

본 논문의 2장에서는 WGR 모형의 강우발생 알고리즘 및 강우발생 절차에 대하여 설명하고 3장에서는 본 연구의 대상유역인 탄천 하류부유역의 강우특성을 반영하는 WGR 모형의 매개변수를 산정하여 관측자료의 통계치와 비교·검증을 하였으며, WGR 모형을 통하여 확충한 강우자료를 적용하여 확률강우량을 산정하였다. 4장에서는 기후변화 영향을 고려한 확률강우량을 산정하여 앞서 산정된 확률강우량과 비교·분석하였으며, 5장에서는 본 연구를 통하여 얻어진 결론을 요약하여 정리하였다.

2. WGR 강우발생 모형

다차원 강우발생 모형인 WGR 모형은 두 개의 모형으로 구성된다. 첫 번째 모형은 관측소별 관측자료에 대한 통계적인 특성을 적용하여 강우발생을 위한 매개변수를

산정하는 모형이며, 두 번째 모형은 매개변수 추정 모형으로 산정된 대상구역의 매개변수를 바탕으로 강우를 발생시키는 모형이다. WGR 모형은 관측된 강우자료의 통계적인 특성에 기초하여 강우의 군집특성 및 이송·확산에 의한 시·공간적인 변화를 고려하는 강우자료를 모의 발생하는 모형으로, 본 연구에서는 WGR 모형을 적용하여 대상 관측소의 시·공간적인 상관관계를 고려한 강우자료를 모의 발생하여 부족한 강우자료를 확충함으로써, 대상구역에서의 확률강우량 산정에 있어서 신뢰도를 향상시키기 위한 방안을 제시하고자 하였다.

2.1 모형의 기본 이론

본 연구에 적용한 WGR 모형은 중규모 강우(호우범위 20~200 km)를 표현하기 위하여 개발된 모형이다. 이 모형은 개념적인 모형으로서 중규모 강우의 대기 동역학적 특성과 강우의 통계학적 특성이 비교적 잘 반영된 모형이다. 강우의 시·공간 표현으로서 이 모형은 호우 사상의 도달 메커니즘에 의해 시간적으로 특성화되어진다. 이 모형은 클러스터 포텐셜 중심 속에 포함되어있는 강우 cell의 생성 및 소멸로서 강우를 표현한다. 이 때 클러스터 포텐셜 중심은 다시 호우전선 속에 포함되어 있다. 호우전선의 도달 구조는 포아슨 과정에 의해 나타나게 되며 호우전선 내의 클러스터 포텐셜을 분포시키기 위하여 공간적 포아슨 과정이 적용된다(Yoo, 1997; Kim et al., 2000; Jung et al., 2001; Yoo et al., 2002a; Yoo et al., 2002b).

WGR 모형에서의 호우전선의 도달과정은 시간적으로 평균호우전선 도달률 λ_M 을 갖는 포아슨 과정의 무작위 발생으로 모의할 수 있다. 포아슨 과정에 의해 도달된 호우전선은 평균 클러스터 밀도 ρ_L 을 갖는 공간적 포아슨 과정의 무작위 발생을 통하여 호우전선의 영역 전반에 걸쳐 클러스터 포텐셜이 분포되게 되며, 다시 클러스터 포텐셜 내부에는 평균적으로 $E[\nu]$ 개의 강우 cell가 다음과 같은 확률로 시공간 상에 무작위 발생하게 된다. 시간 s 에 도달한 호우전선 내 강우 cell (τ, y) 의 발생은 cell의 생성 시간 τ 및 생성위치 y 로서 설명된다. 강우 cell은 시간적으로는 지수분포, 공간적으로는 2차원 정규분포를 따르는 것으로 정의된다. 따라서 WGR 모형에서의 시간 t 및 공간 z 에서의 강우강도 $\xi(t, z)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다(Waymire et al., 1984; Valdes et al., 1985; Rodriguez-Iturbe et al., 1987; Yoo et al., 1996; Yoo, 1997; Kim et al., 2000; Yoo et al., 2002a; Yoo et al., 2002b).

$$\xi(t, z) = \int g[t - \tau, \|z - (y + U_b(t - \tau))\|] X(dt, dy) \quad (1)$$

여기서, $X(t, y)$ 는 추계학적 점 과정에 의해 발생된 강우 cell의 발생 및 분포함수를 의미하고 있으며, 위와 같은 모형화를 바탕으로 Waymire et al. (1984)은 다음과 같이 강우강도에 대한 평균, 분산, 및 공분산을 유도하였다.

$$E[\xi(t, z)] = E[\nu] \rho_L \lambda_M E[i_0] 2\pi D^2 \alpha^{-1} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}[\xi(t, z)] = & \theta_1 + (\beta - \alpha)\theta_2 + \theta_3(4\pi)^{-1} \\ & \cdot [(D^2 + \sigma_1^2)(D^2 + \sigma_2^2)]^{-1/2} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{Cov}[\xi(t_1, z_1), \xi(t_2, z_2)]$$

$$= \theta_1 \exp(-\alpha|t_1 - t_2|)$$

$$\cdot \exp\left\{\left[\frac{1}{4D^2}[z_{11} - z_{21} - U_1(t_1 - t_2)]^2\right] + [z_{12} - z_{22} - U_2(t_1 - t_2)]^2\right\} \quad (4)$$

$$+ \theta_2 [\beta \exp(-\alpha|t_1 - t_2|) - \alpha \exp(-\beta|t_1 - t_2|)]$$

$$+ \theta_3 \eta(z_{11} - U_1(t_1 - t_2); 2D^2 + 2\sigma_1^2)(z_{21})$$

$$\cdot \eta(z_{12} - U_2(t_1 - t_2); 2D^2 + 2\sigma_2^2)(z_{22})$$

$$\cdot [\beta \exp(-\alpha|t_1 - t_2|) - \alpha \exp(-\beta\alpha|t_1 - t_2|)]$$

여기서, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 및 함수 $\eta(a; b^2)(x)$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\theta_1 = \frac{E[\nu] \rho_L \lambda_M E[i_0]^2 \pi D^2}{2\alpha} \quad (5)$$

$$\theta_2 = \frac{2\lambda_M \beta E[i_0]^2 E[\nu]^2 \rho_L^2 \pi^2 D^4}{\alpha(\beta^2 - \alpha^2)} \quad (6)$$

$$\theta_3 = \frac{2\lambda_M \beta E[i_0]^2 E[\nu]^2 \rho_L \pi^2 D^4}{\alpha(\beta^2 - \alpha^2)} \quad (7)$$

$$\eta(a; b^2)(x) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} b} \exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2b^2}\right) \quad (8)$$

대상지역 임의지점 Z 에서 t 시간 동안의 누가우량깊이 $h_T(t, Z)$ 는 다음 Eq. (9)와 같이 정의할 수 있으며, $h_T(t, Z)$ 의 2차 모멘트는 Eq. (9)의 양변에 기대값을 취하여 Eq. (2)와 결합함으로써 얻을 수 있다.

$$h_T(t, Z) = \int_{(i-1)T}^{iT} \xi(t, Z) dt \quad i = 1, 2, \dots \quad (9)$$

$$E[h_T(t, Z)] = \frac{E[\nu] \rho_L \lambda_m E[i_0] 2\pi D^2}{\alpha} T \quad (10)$$

2.2 모형의 매개변수의 추정

본 연구에 적용한 WGR 모형의 매개변수는 중규모 강우에서 관찰되는 물리적인 특징을 표현하고 있으며, 공간적으로 확장된 강우장 및 관측된 강우장의 특징 등을 설명할 수 있다. WGR 모형의 주요 매개변수는 Table 1과 같다.

그러나 WGR 모형은 모형의 구조가 매우 복잡하다는 것과 추정해야 할 매개변수의 수가 너무 많다는 것이 모형의 이용을 제한하는 단점으로 지적되고 있다. Kim et al. (2000)은 9개의 매개변수로 구성된 9개의 모멘트 식을 이용하여 Nelder and Mead의 Simplex 탐색법으로 최적해를 구한바 있으나, 본 연구에서는 WGR 모형의 매개변수 추정에 앞서 물리적으로 결정될 수 있는 매개변수와 자료로부터 추정될 수 있는 매개변수를 분리하는 과정을 선행하였다(Yoo et al., 2002b). Islam et al. (1988) 및 Koepsell and Valdes(1991) 또한 9개의 매개변수 중 D , σ , U 는 기상학적인 자료로부터 추정할 것을 추천한 바 있으며, Yoo et al. (2002a)은 기상레이더 관측자료를 근거로 하여 D , σ , U 를 적용하고 나머지 6개의 매개변수를 추정하는 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 총 9개의 매개변수 중 과거 관측자료에 기초하여 D , σ , U 를 결정하였고, 나머지 6개의 매개변수를 모멘트법의 절차에 따라 추정하였다. 앞에 제시된 WGR 모형의 평균, 분산, 공분산 식의 형태를 이용하여 6개의 매개변수로 표현되는 이론적인 식을 유도하고, 실제 자료를 적용하여 유도된 식의 값을 구하는 방법을 통하여

매개변수를 추정하게 된다. 본 연구에서는 Eq. (11)과 같은 목적함수를 사용한 비선형 최적화 기법을 이용하여 매개변수 최적화 과정을 실시하였으며, 제약조건이 없는 비선형 문제를 해결하기 위한 최적화 기법으로 널리 쓰이고 있는 DFP (Davidon-Fletcher-Powell)법 (Mays and Tung, 1992)을 적용하여 최적 매개변수 추정을 수행하였다. 또한 6개의 매개변수를 추정하기 위하여 Eq. (11)의 목적함수에 사용될 모멘트 및 집성시간의 조합(매개변수 조합)을 Table 2와 같이 구성하였다.

$$\text{Min.} \sum_{i=1}^6 \left(\frac{f_i(x)}{\theta_i} - 1 \right)^2 \quad (11)$$

여기서, $f_i(x)$ = 매개변수 추정 모형을 적용하여 추정된 통계적 특성

θ_i = 관측된 자료로부터 구한 통계적 특성

2.3 강우자료 발생

추정된 최적의 매개변수 조합을 적용하여 대상유역에 대한 강우발생 모의가 수행된다. Table 3은 강우발생에 적용되는 주요 입력자료를 보여준다. WGR 모형을 적용하여 대상유역에서의 강우를 발생시키기 위해서는 가장 먼저 유역 내·외의 강우관측소를 조사하고, 강우자료의 동일 기간 보유현황 및 미계측 자료의 여부 등을 조사하여 모형에 적용할 대상관측소를 선정하여야 한다. 선정된 관측소의 강우자료에 대한 집성시간(1시간, 6시간, 12시간)별 평균, 분산, 자기공분산 및 교차공분산 등 통계적인 특성을 분석하여 매개변수 추정을 위한 입력자료를 구축하고 모의로 계산된 목적함수 값의 비교를 통하여 유역의 대표 매개변수를 산정한다.

Table 1. Parameters of WGR Model

Parameter	Definition
λ_M	Rain Band Arrival Rate (<i>bands/hr</i>)
ρ_L	Mean Density of Cluster Potential (<i>clusters/km²</i>)
$E[\nu]$	Mean Number of Cells per Cluster (<i>cells</i>)
β	Cellular Birth Rate (<i>cells/hr</i>)
σ	Cell Location Parameter within Cluster Potential Region (<i>km</i>)
α	Parameter as a Measure of Mean Cell Age (<i>/hr</i>)
D	Spatial Range of Cell Intensity (<i>km</i>)
$E[i_0]$	Rain Cell Intensity at Cell Center at Time of Birth (<i>mm/hr</i>)
U_b	Rainband Speed Relative to Ground (<i>km/hr</i>)

추정된 유역의 대표 매개변수와 강우발생과 관련한 매개변수(강우장의 크기, 강우 cell의 반경, Random seed number 등)를 조합하여 관측기간의 강우발생 모의를 수행한다. 관측된 강우자료와 모의 발생된 강우자료의 비교·분석을 통하여 강우발생과 관련한 매개변수에 대한 검·보정을 수행한다. 매개변수 추정 모형을 적용한 유역의 대표 매개변수와 검·보정을 통하여 계산된 강우발생과 관련한 매개변수를 적용하여 대상유역에서의 해당기간 동안의 강우발생 모의가 수행된다.

3. 실제유역에 대한 적용

본 연구에서는 2010년, 2011년 집중호우에 의한 침수실적이 있는 탄천유역의 하류부를 대상유역으로 하였으며, 대상유역 내·외에 분포하는 강남, 서초, 송파 지점을 매개변수 추정을 위한 관측소로 선정하였다. 대상유역은 산지가 거의 없는 평탄한 지역이며 경기도 용인시에서 발원하여 서울 송파구와 강남구를 거쳐 한강으로 흘러드는 길이 35.6km의 탄천을 중심으로 좌측에 강남구를 끼고, 송파구를 우측으로 두고 있다. 본 연구의 대상유역인 탄천유역 하류부의 면적은 3,635 ha이다.

3.1 매개변수 추정

다차원 강우모형인 WGR 모형과 같이 강우의 시간과 공간적인 특성을 동시에 고려한 강우발생 모형의 매개변수를 추정하기 위하여 도시의 시·공간적인 특성을 파악할

필요가 있다. 이는 Bae (2012)가 기후변화의 영향을 고려한 도시지역의 강우특성분석에서 분석한 결과를 참고하였다. 본 연구에서는 대상유역 내·외에 분포하는 AWS 관측소 가운데 강우자료의 누락여부를 조사하여 WGR 모형의 대상 관측소로 서초, 강남, 송파 지점을 선정하였다.

WGR 모형의 매개변수 추정을 위한 입력자료 구축을 위해 강남, 서초, 송파 지점의 1997~2011년의 시강우자료를 수집하여 1차 및 2차 통계량을 계산하였다. 통계량 계산 시 적용된 집성시간은 1시간, 6시간, 12시간을 사용하였고 Table 4는 매개변수 산정 시 필요한 집성시간별 평균(mean), 분산(vari), 자기상관계수(corr), 교차상관계수(ccro) 등의 1차 및 2차 통계량을 보여준다.

매개변수의 추정에 적용된 Spatial Aggregation Level은 2×2km, 4×4km, 6×6km 및 8×8km의 4가지 Box Size로 구성하였다. Table 2에서 제시한 통계량 간의 조합을 통해 서초, 강남, 송파지점을 대상으로 각 지점마다 4가지의 Spatial Aggregation Level을 적용하여, 44가지의 조합을 구성하였다. 또한 서초, 강남, 송파 지점에 대한 총 132가지 조합을 적용하여 매개변수를 추정하였다. Tables 5~7에서 나타난 바와 같이 강남 지점을 기준으로 추정된 매개변수 조합(Set=8, 4×4km)에서 가장 작은 SSE (Sum of Square Error)값을 나타내고 있으므로 이를 해당 유역의 최적 매개변수로 결정하였다.

추정된 매개변수의 정확성을 확인하기 위하여 강남 지점에서 관측된 강우자료의 통계량과 모의 발생된 강우자료의 통계량을 Table 8에서 비교하였으며 WGR 모형으

Table 2. Combinations for Parameter Estimation

Set	Levels of Aggregation		
	1 hr	6 hr	12 hr
1	mean, corr, vari, ccro (a-b)	vari, corr	
2	mean, corr, vari, ccro (a-c)	vari, corr	
3	mean, corr, vari, ccro (a-b)		vari, corr
4	mean, corr, vari, ccro (a-c)		vari, corr
5	mean, corr, vari, ccro (a-b)	vari	vari
6	mean, corr, vari, ccro (a-c)	vari	vari
7	mean, corr, vari, ccro (a-b), ccro (a-c)	vari	
8	mean, corr, vari, ccro (a-b), ccro (a-c)		vari
9	mean, vari, ccro (a-b), ccro (a-c)	vari	vari
10	mean, vari, ccro (a-b), ccro (a-c)	vari, corr	
11	mean, vari, ccro (a-b), ccro (a-c)		vari, corr

a, b, c : observed point vari : variance
corr : auto-covariance($\tau=1$) ccro : cross-covariance

Table 3. Principal Input Data for Rainfall Generation

Input Data	Definition	Remarks
tsim1	Total Time of Simulative Generation (<i>year</i>)	
tr	Averaged Duration Time of Rainfall (<i>hr</i>)	
pmax	Averaged Intensity during Rainfall (<i>mm/hr</i>)	$E[i_0]$
beta	Creation Ratio of Rainfall Cell (<i>cells/hr</i>)	β
taum	Time Interval between Rainfall (<i>hr</i>)	$1/\lambda_M$
umeanx, umeany	Velocity of Rainfall (<i>km/hr</i>)	Direction
xnulms	The Number of Averaged Cluster Potential Center	$\rho_L \times \pi \times \text{radlms}$
xnucel	The Number of Averaged Cell	$E[\nu]$
radlms	Radius of Rainfall Field (<i>km</i>)	
radcel	Radius of Rainfall Cell (<i>km</i>)	
nx, ny	The Number of Cell on the x-axis, y-axis	
ix	Random Seed Number	
al	Duration Time Parameter of Rainfall Cell (<i>1/hr</i>)	α

Table 4. Statistics for Parameter Estimation

AWS	Levels of Aggregation		
	1hr	6hr	12hr
Seocho	mean=0.2446, vari=1.9810, corr=0.5936 ccro(sc-gn)=0.3506, ccro(sc-sp)=0.5375	vari=37.8513 corr=0.4271	vari=111.1616 corr=0.3121
Gangnam	mean=0.2819, vari=2.6876, corr=0.5617 ccro(gn-sc)=0.3506, ccro(gn-sp)=0.3670	vari=47.0432 corr=0.4429	vari=140.5685 corr=0.3128
Songpa	mean=0.2431, vari=2.1017, corr=0.5312 ccro(sp-sc)=0.5375, ccro(sp-gn)=0.3670	vari=37.5484 corr=0.4160	vari=111.6941 corr=0.2970

Table 5. Results of Parameter Estimation at Gangnam

Set	Sum of Square Error			
	2 × 2 km	4 × 4 km	6 × 6 km	8 × 8 km
1	0.1079	0.0215	0.0074	0.0095
2	0.1015	0.0113	0.0065	0.0064
3	0.1343	0.0674	0.0057	0.0032
4	0.1343	0.0095	0.0076	0.0055
5	0.0784	0.0764	0.0045	0.0024
6	0.0809	0.0037	0.0028	0.0030
7	0.0882	0.0083	0.0022	0.0020
8	0.0773	0.0018	0.0019	0.0022
9	0.0775	0.0491	0.0083	0.0039
10	0.0659	0.0185	0.0086	0.0108
11	0.0682	0.0081	0.0053	0.0053

Table 6. The Result of Parameter Estimation at Seocho

Set	Sum of Square Error			
	2 × 2 km	4 × 4 km	6 × 6 km	8 × 8 km
1	0.1126	0.0106	0.0042	0.0032
2	0.1966	0.0366	0.0271	0.0030
3	0.1292	0.0087	0.0092	0.0064
4	0.2364	0.0466	0.0453	0.0405
5	0.0945	0.0116	0.0035	0.0034
6	0.1585	0.0373	0.0272	0.0285
7	0.1892	0.0332	0.0283	0.0222
8	0.1609	0.0348	0.0286	0.0293
9	0.0286	0.0434	0.0277	0.0192
10	0.0349	0.0461	0.0276	0.0287
11	0.0728	0.0503	0.0483	0.0439

Table 7. The Result of Parameter Estimation at Songpa

Set	Sum of Square Error			
	2 × 2 km	4 × 4 km	6 × 6 km	8 × 8 km
1	0.0947	0.0120	0.0040	0.0049
2	0.1035	0.0187	0.0119	0.0160
3	0.1201	0.0273	0.0062	0.0059
4	0.0879	0.0068	0.0086	0.0084
5	0.0852	0.0065	0.0021	0.0032
6	0.1487	0.0064	0.0079	0.0111
7	0.1561	0.0271	0.0262	0.0263
8	0.1141	0.0260	0.0256	0.0257
9	0.0933	0.0264	0.0229	0.0240
10	0.1134	0.0383	0.0237	0.0253
11	0.1052	0.0329	0.0324	0.0310

Table 8. Comparison of Rainfall Statistics (Gangnam)

Statistic		Observed	Estimated	
Mean	Levels of Aggregation	1hr	0.3579	0.36
		6hr	2.1473	2.14
		12hr	4.3254	4.28
Variance	Levels of Aggregation	1hr	5.3379	5.35
		6hr	103.6782	98.51
		12hr	268.997	269.31
Auto-covariance	$\tau = 1$		0.5868	0.587
	$\tau = 2$		0.3837	0.399
	$\tau = 3$		0.2835	0.344

로 발생한 강우가 과거의 강우양상을 상당히 유사하게 재현하는 것으로 확인되었다.

3.2 강우자료 확충 및 확률강우량 산정

대상구역의 강우를 발생시키기 위하여 앞에서 산정된 구역의 대표 매개변수와 강우발생과 관련한 매개변수(강우장의 크기, 강우 cell의 반경, Random seed number 등)를 조합하여 모형의 입력 자료로 구성하여 강우발생 모의를 수행하였다. 강우발생에 적용된 격자크기는 1×1 km이고 가로방향 14 km, 세로방향 13 km의 총 182개의 격자에 대하여 강우발생 모의를 실시하였다. Fig. 1은 공간 분포된

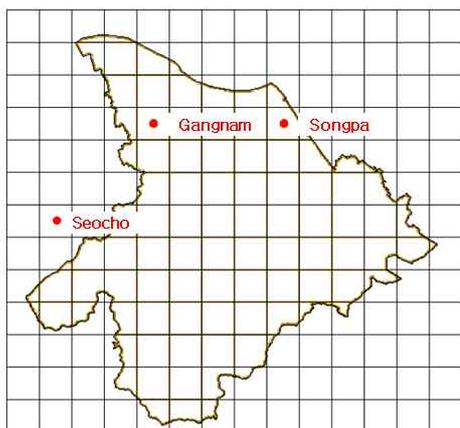


Fig. 1. Location of AWS and Grid for Rainfall Generation

강우를 모의하기 위한 격자망 및 격자망에서의 AWS 관측소의 위치를 보여주고 있다.

WGR 모형을 적용하여 AWS에서 관측된 강우자료의 보유기간과 동일한 15년간의 강우를 발생시키고, 관측된 강우자료와 모의 발생한 강우자료의 비교·분석을 통하여 강우발생과 관련한 매개변수를 산정하였다. Trial & Error 방법을 적용하여 강우장의 크기, 강우세포의 반경, Random seed number 등 강우발생과 관련한 매개변수를 산정하였고, 모형을 적용하여 15년 간 모의 발생한 강우의 수는 172개이며, 강우사이의 시간간격은 평균 129.94 hr로 확인되었다. WGR 모형은 구축된 매개변수를 바탕으로 하여 시·공간 상관관계를 바탕으로 강우를 발생시키기 때문에 강우의 진행 및 생성, 소멸 등을 표현할 수 있다. 이처럼 강우장의 형태로 발생한 강우를 격자별로 추출하여 지점강우를 산출할 수 있다.

Fig. 2는 강우발생 시간 2,624~2,640 hr에서의 강남, 서초, 송파 지점에서 발생한 강우를 보여주고 있으며, Fig. 3은 강우발생 시간 18,853~18,870 hr에서의 강남, 서초, 송파 지점에서 발생한 강우를 보여준다. Fig. 2의 강우발생 시간 2,624~2,640 hr에 나타난 강우와 같이 3개의 호우가 중첩되어 한 개의 호우사상으로 나타나는 경우도 확인되었다. 또한, 이러한 호우의 중첩으로 인하여 발생한 호우의 지속시간은 호우별로 4시간에서 21시간까지 다양하게 발생되었다. 그러나 지속시간 24시간 이상의 장기간 호우는 모의되지 않았음을 파악할 수 있었으며, 이는 WGR

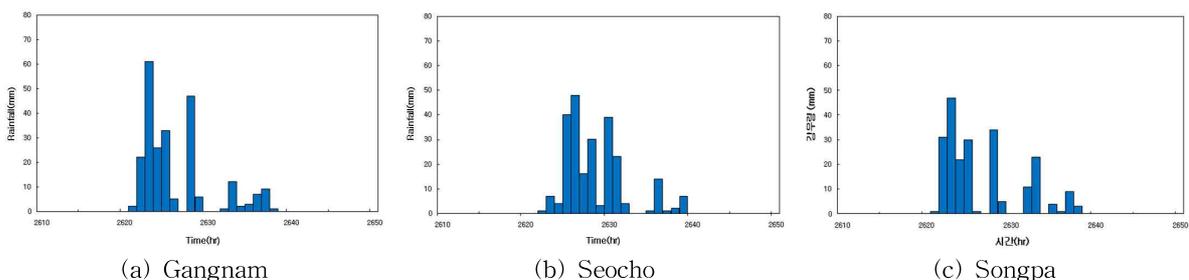


Fig. 2. Rainfall Distribution during 2,624 hr~2,640 hr

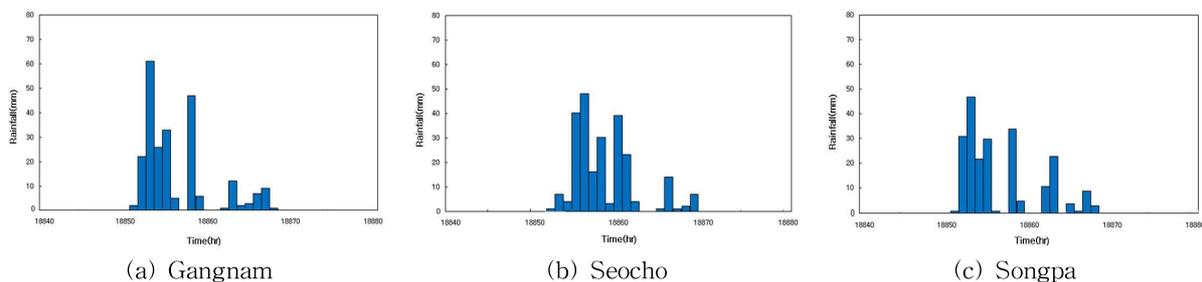


Fig. 3. Rainfall Distribution during 18,853 hr~18,870 hr

모형의 평균 강우발생 지속시간이 12시간 내외에서 결정되는 기본 구조로 인하여 장마와 같은 긴 지속시간을 갖는 강우현상을 모의할 수 없는 점에 기인한 것으로 파악된다(Yoo et al., 2002a).

본 연구에서는 강우발생을 통한 강우자료의 확충에 앞서, 강우자료의 보유기간에 따른 확률강우량의 변동을 파악하기 위해 관측자료에 기초하여 확률강우량이 수렴하는 최소한의 강우자료 보유기간을 찾는 작업을 선행하였다. 따라서 30년부터 10년 단위로 강우발생기간을 구분하여 강우를 발생시킨 결과에 대한 빈도해석을 실시하였다. 빈도해석에는 FARD 2006모형을 사용하였으며, 매개변수 산정에는 확률가중모멘트법을 적용하였고, 확률분포형은 Gumbel 분포형을 선택하였다. Fig. 4는 강우발생 기간에 따른 50, 80, 100, 150, 200년 빈도 확률강우량을 보여준다.

강우발생 기간에 따른 확률강우량 분석을 통하여 90년 이상의 강우자료 보유기간을 확률강우량 수렴에 요구되는 최소한의 강우자료 보유기간으로 판단하였다. 따라서 WGR 모형을 적용하여 확률강우량이 수렴하는 최소한의 강우자료 보유기간인 90년을 초과하는 100년의 강우자료를 발생시켜 대상구역에서의 확률강우량 산정을 위한 부족한 강우자료를 확충하였다.

Fig. 5와 같이 강남, 서초, 송파 지점에서의 100년간의 발생 강우자료에 대한 빈도해석 결과와 15년간 관측된 강

우자료에 대한 빈도해석 결과를 살펴보면, 강우의 재현기간이 증가할수록 빈도해석 결과의 차이도 함께 증가하는 것을 확인하였다. 도시지역 치수계획 수립 시 100년 빈도 이상의 확률강우량을 산정하는 경우 15년의 관측 보유년수로 인한 강우자료의 부족으로 산정된 확률강우량의 신뢰도가 떨어지고, 산정된 확률강우량이 과소 혹은 과대 추정될 수 있는 위험성을 가지고 있다. 따라서 강우자료를 확충함으로써 보다 정확하고 신뢰도가 향상된 확률강우량을 산정하는 것이 필요하다고 사료된다. Table 9는 강남, 서초, 송파 지점에서 관측된 강우자료의 빈도해석 결과와 WGR 모형을 통하여 발생한 100년간의 강우자료에 대한 빈도해석 결과에 지점별 Thiessen 가중치를 곱하여 계산한 대상구역의 지속시간 360분에 대한 확률강우량을 비교하여 정리한 것이다. 관측된 강우자료의 빈도해석 결과와 WGR 모형을 통하여 발생한 100년 기간의 강우자료에 대한 빈도해석 결과는 재현기간에 따라서 3~8%의 정도의 차이를 보였으며, 재현기간이 증가할수록 변화율이 증가하는 것을 확인하였다. 확충된 강우자료를 적용한 확률강우량 산정은 지점 특성에 따라 증가 또는 감소하는 것으로 나타나는데, 본 연구의 대상지점인 강남, 서초, 송파 지점에서는 재현기간이 30년 미만인 경우는 확률강우량이 증가하고, 재현기간이 30년을 초과하는 경우는 확률강우량이 감소하는 것으로 확인되었다.

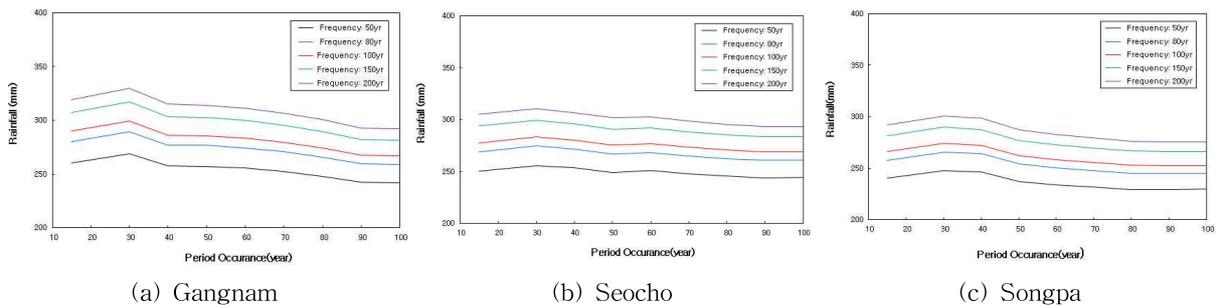


Fig. 4. Design Rainfall according to Duration of Generation

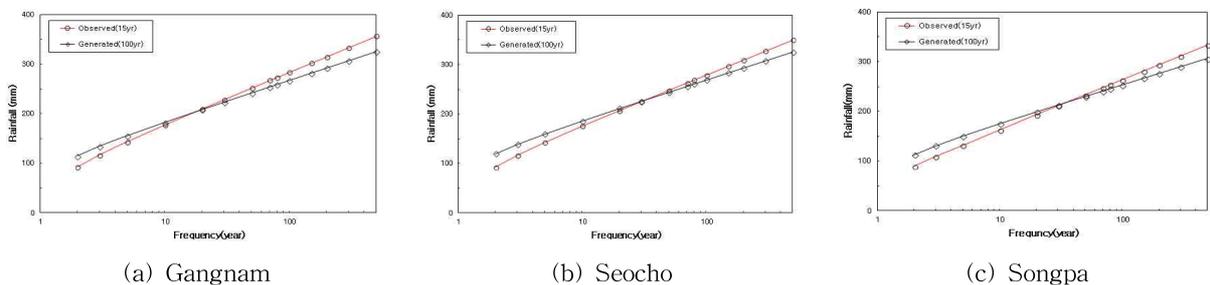


Fig. 5. Comparison of Frequency Analysis (Duration: 360 min)

Table 9. Results of Frequency Analysis in Tancheon Drainage Basin (Duration : 360min)

Frequency (yr)	Observed (15 yr)	Generated (100 yr)	Amount of Change (mm)
50	243.5	236.9	-6.6
70	258.2	248.5	-9.6
80	264.0	253.2	-10.8
100	273.7	260.9	-12.8
150	291.3	274.9	-16.3
200	303.7	284.8	-18.9
300	321.2	298.8	-22.4
500	343.3	316.4	-26.9

4. 기후변화를 고려한 확률강우량의 산정

기후변화로 인하여 집중호우가 증가하고 태풍의 내습이 빈번해짐으로써 홍수에 대한 위험과 피해규모도 증가하고 있다. 특히 도시지역에서는 강우규모가 배수시스템의 용량을 초과하거나, 하천수위 상승으로 관로 내에 역류가 발생하는 등 우수 배제 기능을 제대로 수행하지 못할 경우 지표침수로 인해 심각한 인명 및 재산피해가 발생하고 있다. 이에 따라 도시지역의 수리·수문학적인 조건의 악화로 인한 유출량 증가와 홍수도달시간 단축 등에 따른 도시지역의 홍수피해를 저감시키기 위한 연구가 요구되고 있으며, 이에 선행하여 지역적 강우특성 및 기후변화 영향을 고려한 확률강우량 산정에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4.1 기후변화 시나리오

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)는 2013년 발표될 5차 평가보고서를 위해 2007년 4차 평가보고서에 사용된 미래 사회구조를 중심으로 선정한 SRES (Special Report on Emissions Scenarios)를 대신하여 기후변화 대응정책과 연계하여 선정한 RCP (Representative Concentration Pathways)를 도입하였다. 한반도 기후변화 시나리오는 HadGEM2-AO의 전지구 기후변화 시나리오 자료에 기초해 지역기후모델 HadGEM3-RA를 이용하여 우리나라 지역에 대해 12.5 km 해상도로 산출되었다. IPCC 5차 평가보고서에 대응하기 위한 기후변화 시나리오 보고서(National Institute of Meteorological Research, Korea, 2011)에서 제시한 온실가스 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5에 의한 한반도 고해상도 기후변화 시나리오로부터 추정된 21세기 말 여름철 기후변화 전망 결과는 Table 10과 같이 요약할 수 있다.

Table 10. Climate Change according to RCP in Korea

Description	RCP 4.5 (540ppm)	RCP 8.5 (940ppm)
Temperature(℃)	+3.4℃	+6.0℃
Rainfall(%)	+17.3%	+20.4%

4.2 기후변화 시나리오 적용에 따른 확률강우량 산정

본 연구에서는 WGR 모형을 이용해 발생시킨 강우자료에 RCP 4.5와 RCP 8.5를 적용하여 기후변화를 고려한 미래 2100년의 확률강우량을 산정하였다. 1997~2011년의 기간은 WGR 모형을 통해 발생된 자료를 적용하고, 그 이후의 기간인 2012~2100년까지의 기간은 RCP에 제시된 강우량 증가율을 고려한 강우발생 자료를 적용하였다. 기후변화 영향을 고려한 강우자료 발생을 위하여 WGR 모형의 강우세포 발생시 평균 강우강도에 RCP 4.5와 RCP 8.5에 제시된 해당기간의 강우량 증가율을 고려하는 방법을 적용하였다. 기후변화 영향을 고려하지 않은 강남, 서초, 송파 지점에서의 1997~2100년간의 강우자료와 RCP를 적용한 1997~2100년의 강우자료에 대한 지속시간 360분에서의 연최대강우량은 Fig. 6과 같다.

Fig. 7에서는 WGR 모형을 통하여 모의 발생된 강남, 서초, 송파 지점에서의 1997~2100년의 강우자료와 RCP를 적용한 1997~2100년간의 강남, 서초, 송파 지점에서의 강우자료를 적용한 지속시간 360분에 대한 빈도해석한 결과를 비교하였다. 빈도해석에는 FARD2006 모형을 사용하였으며, 매개변수 산정을 위해 확률가중모멘트법을 적용하였고, 확률분포형은 Gumbel 분포형을 선정하였다. Table 11~13에서는 모의 발생된 강남, 서초, 송파 지점에서의 강우자료에 대한 빈도해석 결과를 비교하여 정리하였다. RCP 4.5를 적용한 경우 지점 및 재현기간에 따라 7.3~

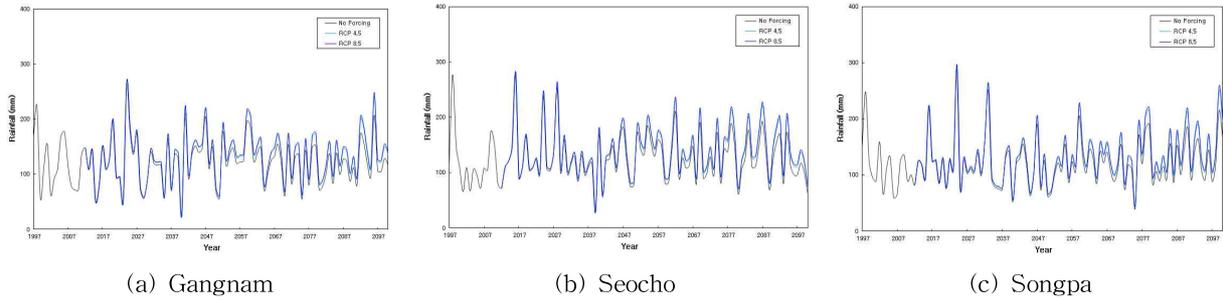


Fig. 6. Change in Annual Maximum Rainfall (Duration: 360min)

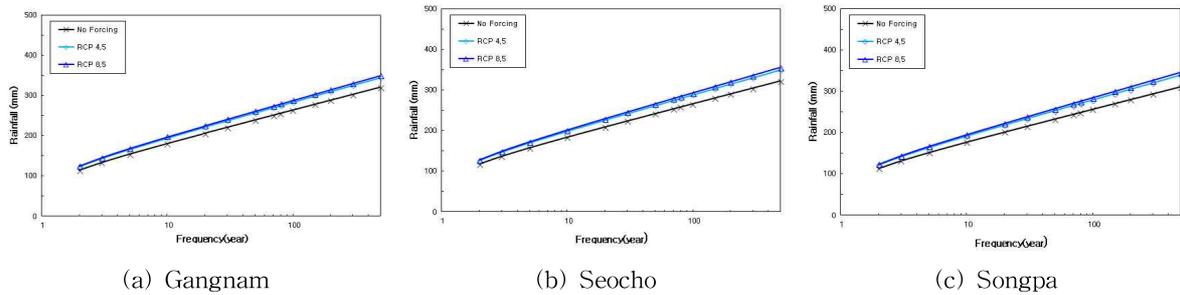


Fig. 7. Results of Frequency Analysis according to RCP (Duration: 360min)

Table 11. Results of Frequency Analysis at Gangnam (Duration: 360min)

Frequency (yr)	No Forcing	RCP 4.5		RCP 8.5	
	Rainfall (mm)	Rainfall (mm)	Amount of Change (mm)	Rainfall (mm)	Amount of Change (mm)
50	239.2	256.8	+17.6	260.7	+21.5
70	251.1	269.6	+18.5	273.7	+22.6
80	255.9	274.7	+18.8	278.9	+23.0
100	263.8	283.2	+19.4	287.5	+23.7
150	278.1	298.6	+20.5	303.1	+25.0
200	288.3	309.5	+21.2	314.2	+25.9
300	302.6	324.8	+22.2	329.8	+27.2
500	320.6	344.2	+23.6	349.4	+28.8

9.3%의 확률강우량이 증가하고, RCP 8.5를 적용한 경우 지점 및 재현기간에 따라 8.9~11.3%의 확률강우량이 증가하는 것으로 확인되었다.

Fig. 8과 Table 14에서는 앞에서 계산된 지점별 빈도해석 결과에 지점별 Thiessen 가중치를 적용하여 계산된 탄천배수구역의 지속시간 360분에 대한 확률강우량을 비교하였다. RCP 4.5를 적용한 경우 재현기간에 따라 8.3~8.6%의 확률강우량 증가를 보였고, RCP 8.5를 적용한 경우 10.1~10.4%의 확률강우량이 증가하는 것을 확인하였다.

WGR 모형을 통해 정상성에 바탕을 둔 탄천배수구역의 1997~2100년의 확충된 강우발생자료와 기후변화 RCP

4.5, RCP 8.5 시나리오를 동일기간에 대해 적용한 강우발생자료에 대한 빈도해석 결과를 검토하여 보았다.

4.3 비교 및 검토

도시지역의 지역적인 강우특성을 고려한 확률강우량을 산정하기 위하여 WGR 모형의 적용으로 AWS 관측소에서 부족한 강우자료를 확충함으로써 신뢰도를 향상시킨 확률 강우량을 산정하고, 확충된 강우자료를 바탕으로 미래의 기후영향을 고려한 확률강우량을 산정하였다.

빈도해석을 통해 산정된 확률강우량을 한국 확률강우량도 작성(Ministry of Construction and Transportation,

Table 12. Results of Frequency Analysis at Seocho (Duration: 360min)

Frequency (yr)	No Forcing	RCP 4.5		RCP 8.5	
	Rainfall (mm)	Rainfall (mm)	Amount of Change (mm)	Rainfall (mm)	Amount of Change (mm)
50	241.5	261.3	+19.8	265.6	+24.1
70	253.3	274.2	+20.9	278.8	+25.5
80	258	279.4	+21.4	284.0	+26.0
100	265.9	287.9	+22.0	292.7	+26.8
150	280.1	303.5	+23.4	308.5	+28.4
200	290.2	314.5	+24.3	319.8	+29.6
300	304.4	329.9	+25.5	335.5	+31.1
500	322.2	349.4	+27.2	355.4	+33.2

Table 13. Results of Frequency Analysis at Songpa (Duration: 360min)

Frequency (yr)	No Forcing	RCP 4.5		RCP 8.5	
	Rainfall (mm)	Rainfall (mm)	Amount of Change (mm)	Rainfall (mm)	Amount of Change (mm)
50	232.5	253.3	+20.8	257.8	+25.3
70	243.9	265.9	+22.0	270.7	+26.8
80	248.4	270.9	+22.5	275.8	+27.4
100	256	279.2	+23.2	284.3	+28.3
150	269.7	294.3	+24.6	299.7	+30.0
200	279.4	305.0	+25.6	310.6	+31.2
300	293	320.1	+27.1	326.0	33.0
500	310.2	339.1	+28.9	345.4	+35.2

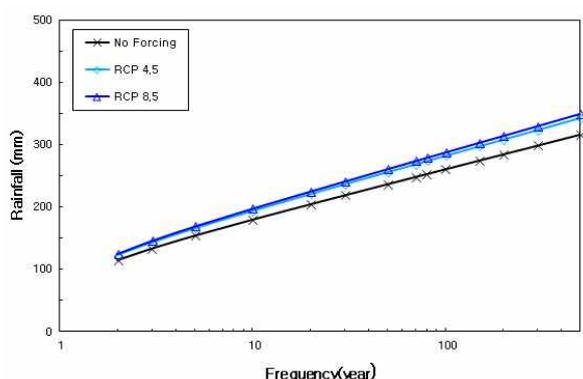


Fig. 8. Results of Frequency Analysis in Tancheon Drainage Basin (Duration: 360min)

Korea, 2000), 한강유역 종합치수계획 보고서(Ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs, Korea, 2008)에 제시된 확률강우량과 비교하였다. Table 15에서 확인되는 바와 같이 기상청 서울관측소 강우자료를 적용하여 산

정된 확률강우량과 AWS 관측소의 강우자료를 적용하여 산정한 확률강우량이 커다란 차이를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이는 강우의 지역적 특성, AWS 강우자료의 짧은 보유년수(15년), 2010년과 2011년에 발생한 집중호우의 영향으로 인하여 빈도해석 결과가 차이를 보이는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 서울시 AWS 강우자료의 시·공간적 통계적 특성을 바탕으로 WGR 모형을 적용하여 부족한 강우자료를 확충하고, 지역적이고 국지적인 도시지역의 강우특성을 반영하는 확률강우량을 산정하였다. 또한 기후변화 시나리오인 RCP를 적용한 강우발생 자료에 대한 확률강우량 변화를 제시하였다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

Table 14. Results of Frequency Analysis in Tancheon Drainage Basin(Duration: 360min)

Frequency (yr)	No Forcing	RCP 4.5		RCP 8.5	
	Rainfall (mm)	Rainfall (mm)	Amount of Change (mm)	Rainfall (mm)	Amount of Change (mm)
50	236.7	256.4	19.7	260.7	24.0
70	248.3	269.1	20.8	273.7	25.4
80	253.0	274.2	21.3	278.9	25.9
100	260.7	282.6	21.9	287.4	26.7
150	274.7	297.9	23.2	303.0	28.3
200	284.6	308.8	24.1	314.1	29.4
300	298.6	324.0	25.4	329.6	31.0
500	316.1	343.2	27.1	349.2	33.0

Table 15. Comparison of Design Rainfall

Frequency (yr)	Report ¹⁾	Report ²⁾	Observed (15yr)	No Forcing	RCP 4.5	RCP 8.5
50	206.5	233.6	243.5	236.9	256.4	260.7
80	221.7	250.2	264.0	253.2	274.2	278.9
100	228.9	258.1	273.7	260.9	282.6	287.4
200	251.3	282.6	303.7	284.8	308.8	314.1
500	280.7	314.8	343.3	316.4	343.2	349.2

¹⁾The Rainfall Frequency Atlas in Korea (2002)

²⁾Report on Comprehensive Flood Management Plan in Han River Basin (2008)

- 1) 강남, 서초, 송파 관측소의 통계적인 특성을 적용하여 WGR 모형의 매개변수를 추정하였고, 추정된 강우특성 매개변수는 관측자료의 통계적 특성을 적절히 반영하고 있는 것으로 확인되었다. 산정된 대표 매개변수와 강우발생과 관련한 매개변수를 산정하여 강우발생 모형의 입력자료를 구성하였다. 대상지역의 강우특성이 반영되고 신뢰도가 향상된 확률강우량을 산정하고자 하였다.
- 2) WGR 모형을 적용하여 최근 15년간의 강우특성 및 경향을 가지는 정상성을 근거로 대상 관측소의 시·공간적인 상관관계를 고려한 100년간의 강우자료를 발생하였고, 확충된 강우자료를 적용하여 도지지역의 강우특성을 고려한 확률강우량을 산정하였다. 100년간의 강우자료 확충을 통하여 계산된 확률강우량은 재현기간에 따라 약 3~8% 감소하는 것을 확인하였으며, 재현기간이 증가할수록 감소율이 증가하는 것을 확인하였다.
- 3) WGR 모형을 통해 강우특성이 일정하게 유지된다

는 추계학적 정상성에 바탕을 둔 1997~2100년의 확충된 강우발생자료와 기후변화 시나리오를 동일 기간에 대해 적용한 강우발생자료에 대한 빈도해석 결과를 비교·검토하였다. 2100년의 확률강우량은 RCP 4.5 적용 시 재현기간에 따라 약 8%, RCP 8.5 적용시 재현기간에 따라 약 10%의 확률강우량 증가가 나타나는 것을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-0008716).

REFERENCES

Bae, S.H. (2012). *Analysis of Design Characteristics Rainfall in Urban Area Considering Climate Change.*

- MS. dissertation, Kyungpook National University, Daegu, Korea.
- Cho, W.H. (2011). *Flood Hazard Mapping by Applying WGR Rainfall Generation Model*. Ph.D. dissertation, Kyungpook National University, Daegu, Korea.
- Islam, S., Bras, R.L., and Rodriguez-Iturbe, I. (1988). "Multi-dimensional Modeling of Cumulative Rainfall : Parameter Estimation and Model Adequacy through a Continuum of Scales." *Water Resources Research, AGU*, Vol. 24, No. 7, pp. 985-992.
- Jung, K.S., Yoo, C., and Kim, J.H. (2001). "Estimation of the WGR Multi-dimensional Precipitation Model Parameters using Genetic Algorithm." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 34, No. 5, pp. 473-486.
- Kim, S.D., Yoo, C., Kim, J.H., and Yoon, Y.N. (2000). "A Study of Temporal Characteristics From Multi-Dimensional Precipitation Model." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 33, No. 6, pp. 783-791.
- Koepsell, R.W., and Valdes, J.B. (1991). "Multi-dimensional Rainfall Parameter Estimation from Sparse Network." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 117, pp. 832-850.
- Mays, L.W., and Tung, Y.K. (1992). *Hydrosystems Engineering and Management*. McGraw-Hill, Inc.
- Ministry of Construction and Transportation, Korea (2000). *The Rainfall Frequency Atlas in Korea*.
- Ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs, Korea (2008). *Report on Comprehensive Flood Management Plan in Han River Basin*.
- National Institute of Meteorological Research, Korea (2011). *Report on Climate Change Scenarios for the IPCC 5th Assessment Report*.
- North, G.R., and Nakamoto, S. (1989). "Formalism for Comparing Rain Estimation Designs." *Journal of Atmospheric Oceanic Technology, AMS*, Vol. 6, pp. 985-992.
- Rodriguez-Iturbe, I., and Eagleson, P.S. (1987). "Mathematical Models of Rainstorm Events in Space and Time." *Water Resources Research, AGU*, Vol. 23, No. 1, pp. 181-190.
- Rodriguez-Iturbe, I., Cox, D.R., and Isham, V. (1987). "Some Models for Rainfall Based on Stochastic Point Processes." *Proceedings of the Royal Society of London, Royal Society*, Vol. A410, No. 1839, pp. 269-288.
- Valdes, J.B., Ha, E., Yoo, C., and North, G.R. (1994). "Stochastic characterization of space-time rainfall : Implications for remote sensing." *Advances in Water Resources*, Vol. 17, pp. 47-99.
- Valdes, J.B., Nakamoto, S., Shen, S.S.P., and North, G.R. (1990). "Estimation of Multi-dimensional Precipitation Parameters by Areal Estimates of Oceanic Rainfall." *Journal of Geophysical Research, AGU*, Vol. 95(D3), pp. 2101-2111.
- Valdes, J.B., Rodriguez-Iturbe, I., and Gupta, V.K. (1985). "Approximations of Temporal Rainfall from a Multi-Dimensional Model." *Water Resources Research, AGU*, Vol. 21, No. 8, pp. 1259-1270.
- Waymire, E., Gupta, V. K., and Rodriguez-Iturbe, I. (1984). "A Spectral Theory of Rainfall Intensity at the Meso- β Scale." *Water Resources Research, AGU*, Vol. 20, No. 10, pp. 1453-1465.
- Yoo, C. (1997). "Application of Multi-Dimensional Precipitation Models to the Sampling Error Problem." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 30, No. 5, pp. 441-447.
- Yoo, C., Valdes, J.B., and North, G.R. (1996). "Stochastic modeling of multi-dimensional rainfall fields considering spectral structure." *Water Resources Research, AGU*, Vol. 32, No. 7, pp. 2175-2187.
- Yoo, C., Kim, S.D., and Yoon, Y.N. (2002a). "Estimation Error of Areal Average Rainfall and Its Effect of Runoff Computation." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 35, No. 3, pp. 307-319.
- Yoo, C., Kim, S.D., Ha, E., and Kim, S.J. (2002b). "Rainfall Error and Runoff Error-(II) Rainfall Generation and Error Analysis-." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, Vol. 22, No. 6B, pp. 765-775.

논문번호: 13-027	접수: 2013.03.04
수정일자: 2013.03.25/04.06	심사완료: 2013.04.06