

## 고해상도 기후시나리오를 이용한 서울지역 배수시스템의 기후변화 영향 분석

### Climate Change Impact Analysis of Urban Inundation in Seoul Using High-Resolution Climate Change Scenario

이 문 환\* / 김 재 표\*\* / 배 덕 효\*\*\*

Lee, Moon-Hwan / Kim, Jae-Pyo / Bae, Deg-Hyo

#### Abstract

Climate change impact on urban drainage system are analyzed in Seoul by using high-resolution climate change scenario comparing 2000s (1971~2000) with 2020s (2011~2040), 2050s (2041~2070) and 2080s (2071~2100). The historical hourly observed rainfall data were collected from KMA and the climate change scenario-based hourly rainfall data were produced by RegCM3 and Sub-BATS scheme in this study. The spatial resolution obtained from dynamic downscaling was 5×5 km. The comparison of probability rainfalls between 2000s and 2080s showed that the change rates are ranged on 28~54%. In particular, the increase rates of probability rainfall were significant on 3, 6 and 24-hour rain durations. XP-SWMM model was used for analyzing the climate change impacts on urban drainage system. As the result, due to the increase of rainfall intensities, the inundated areas as a function of number of flooded manhole and overflow amounts were increasing rapidly for the 3 future periods in the selected Gongneung 1, Seocho 2, Sinrim 4 drainage systems. It can be concluded that the current drainage systems on the selected study area are vulnerable to climate change and require some reasonable climate change adaptation strategies.

**Keywords** : Climate change, Seoul, Drainage system, High-resolution climate scenario

#### 요 지

본 연구에서는 고해상도 기후시나리오를 이용하여 국내 대표 도시 지역인 서울특별시를 대상으로 기준기간(1971~2000년) 대비 미래기간 2020s (2011~2040년), 2050s (2041~2070년), 2080s (2071~2100년)의 기후변화에 따른 배수시스템의 영향을 평가하였다. 이를 위해 과거 관측 강수량 자료는 기상청 관할 기상관측소와 자동기상관측망 자료를 이용하였으며, 기후변화 시나리오는 RegCM3과 Sub-BATS 기법을 통해 역학적 상세화된 5×5km 해상도 기반의 시단위 강수량 자료를 생산하였다. 과거기간 대비 미래기간 확률강우량의 변동성을 비교한 결과 과거기간 대비 2080s의 확률강우량 증가율은 28~54%로 나타났으며, 특히 지속시간 3시간, 6시간, 24시간 확률강우량의 증가폭이 크게 나타났다. 또한 배수시스템의 기후변화 영향을 직접적으로 분석하기 위해 XP-SWMM을 이용하여 유출해석을 수행하였다. 평가 결과, 강우강도 증가로 인해 과거기간 대비 미래 3기간에 공릉1, 서초2, 신림4 배수분구의 침수발생 맨홀 수와 월류량이 크게 증가하였다. 이러한 결과는 현재 구축되어 있는 서울시 배수시스템은 기후변화에 취약함을 나타내고 있으며, 이에 대응하기 위해 다양한 기후변화 적응대책이 요구됨을 의미한다.

**핵심용어** : 기후변화, 서울특별시, 배수시스템, 고해상도 기후시나리오

\* 세종대학교 건설환경공학과 박사수료 (e-mail: yclemh@daum.net)

Ph.D Candidate, Department of Civil & Environmental Engineering Sejong University, Seoul, Korea

\*\* 제일엔지니어링(주) 수자원사업부 대리 (e-mail: kawasaki0754@naver.com)

Senior Engineer, Water Resources Business Div., Cheil Engineering, Seoul, Korea

\*\*\* 교신저자, 세종대학교 건설환경공학과 교수 (e-mail: dhbae@sejong.ac.kr, Tel: 82-2-3408-3814)

Corresponding Author, Professor, Department of Civil & Environmental Engineering Sejong University, Seoul, Korea

## 1. 서론

최근 전 세계적으로 이상기후가 발생하고 있으며, 국내에서도 국지성 집중호우의 빈도 및 강도가 증가하는 경향이 있는 것으로 보고되었다(Bae et al., 2008a; Jung et al., 2011). 특히 도시지역은 관망 등의 배수시스템으로 구성되어 있어 1~2시간의 짧은 지속시간을 가지는 집중호우에 의한 내수침수 피해가 급증할 수 있다. 실례로 2010년 9월 서울 광화문에서 발생한 시간당 100 mm 이상의 집중호우와 2011년 7월 서울 강남지역에서 발생한 시간당 110 mm의 집중호우 등으로 인해 많은 재산 피해를 겪은 바 있다. 현재 이들 호우사상이 기후변화의 영향인지 아닌지 단정하기는 어렵지만, 이러한 이상기후로 인한 악영향을 최소화하기 위해서는 기후변화에 따른 도시지역의 배수시스템의 영향을 면밀히 분석하고, 그에 따른 적응대책 수립이 요구된다. 특히 도시지역은 인구 및 자산밀도가 높기 때문에 작은 재해/재난에도 큰 피해가 발생할 위험이 높다. 뿐만 아니라 도시지역에 설치하는 배수시스템은 지하에 설치하고 관리하기 때문에 설치 및 관리에 따른 유지비가 많이 소요된다. 따라서 도시계획을 수립하고 실행하는데 있어 여러 위험요소 및 불확실성 등을 고려할 필요가 있으며, 기후변화에 따른 도시지역 배수시스템에 대한 연구가 필요한 실정이다.

전세계적으로 기후변화에 따른 도시지역 배수시스템을 평가한 사례는 2006년부터 수행되고 있으며, 주로 도시 유출모형을 이용하고 있다. Denault et al. (2006)은 캐나다의 Mission 지역과 Wagg 지역에 대해 기후변화에 따른 도시지역의 배수관망의 영향을 SWMM 모형을 통해 평가하였다. Semadeni-Davies (2008)은 기후변화에 따른 도시지역 합류관로의 영향을 MOUSE 모형을 이용하여 평가하였다. Olsson et al. (2009) 역시 MOUSE 모형을 이용하여 기후변화에 따른 스웨덴 Kalmar city의 배수시스템을 평가하였다. Huong and Pathirana (2013)은 베트남 Can Tho시의 기후변화와 도시화에 의한 도시침수 영향을 평가하였다. 평가에 사용된 수문모형은 EPA-SWMM5이고, 도시의 성장(도시화)을 고려하였다. 또한 도시 내수침수 피해를 최소화하기 위한 적응 연구가 시도되고 있다. Karamouz et al. (2011)은 도시 배수시스템의 능력을 향상시킬 수 있는 방법으로 적응 비용 대비 배수시스템의 능력을 최대로 할 수 있는 최적화 모델을 개발하였으며, Olsson et al. (2013)은 기후변화에 따라 변화될 극한 사상에 대비하기 위한 스웨덴의 Arvika 시의 배수시스템의 증설 계획의 적절성을 평가하였다.

국내 연구로는 Kim et al. (2008)은 기후변화가 극한강우에 어떠한 영향을 미치는지를 평가하기 위해 극한강우의 I-D-F 분석을 수행하였으며, 현재에 비해 지속시간이 길어질수록 강우강도가 증가한다고 제시하였다. 또한 Son et al. (2010)은 기후변화에 따라 미래 확률강우량 산정기법을 제안하였고, 산정된 확률강우량을 이용하여 확률홍수량, 확률홍수위를 HEC-1과 HEC-RAS를 이용하여 분석한바 있다. 평가 결과 확률강우량은 13.0~15.1%, 확률홍수량은 29.1~33.5%, 확률홍수위는 12.6~13.6% 증가한다고 제시하였다. Kim (2010)은 기후변화가 도시유역(우이천 유역)의 유출에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 국내 기상청에서 제공하는 KMA RCM A1B 시나리오 자료를 이용하여 기후변화가 서울지역 확률홍수량에 미치는 영향을 평가하였다. 확률강우량 산정결과 대체적으로 증가하는 경향이 나타났으며 SWMM을 이용한 유출특성 분석 결과 침투홍수량은 약 10% 증가한다고 제시하였다. Kang et al. (2012)은 XP-SWMM을 이용하여 인천시 계양구 일대의 도시배수시스템의 영향을 평가하였다.

기존의 연구에서 사용된 기후시나리오는 국립기상연구소에서 생산된 27 km 격자로 서울지역에 2~4개 정도의 격자로 구성되어 우리나라와 같이 지형적으로 복잡하고 아격자(sub-grid) 규모의 강제효과가 우월한 지역에서의 지역적인 강우 변동성에 따른 영향평가에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 RegCM3의 Sub-Bats를 통해 역학적 상세화된 고해상도 기후시나리오를 생산하고, 이를 이용하여 기후변화가 서울시 배수시스템에 미치는 영향을 평가하고자 한다. 고해상도 기후시나리오는 서울시 지역의 공간적인 패턴을 분석할 수 있을 것으로 판단되며, 그에 따른 지역별 배수시스템의 영향을 분석할 수 있다. 이를 위해 현재 서울시에서 사용하고 있는 배수시스템의 설계 강우량의 변화를 평가하고, 실제 XP-SWMM 모형을 이용하여 배수시스템의 침수 발생 횟수, 월류량의 변화 등을 평가하고자 한다.

## 2. 연구수행 방법

본 연구의 수행절차 및 내용은 Fig. 1과 같다. 전지구기후모형(Global Climate Model, 이하 GCM)으로부터 생산된 기후시나리오 자료를 기반으로 RegCM3의 sub-bats scheme을 이용하여 지표면의 5×5 km, 1시간 단위의 고해상도 기후시나리오를 생산한다. 이러한 고해상도 기후시나리오를 이용하여 짧은 지속시간을 갖는 도시지역의

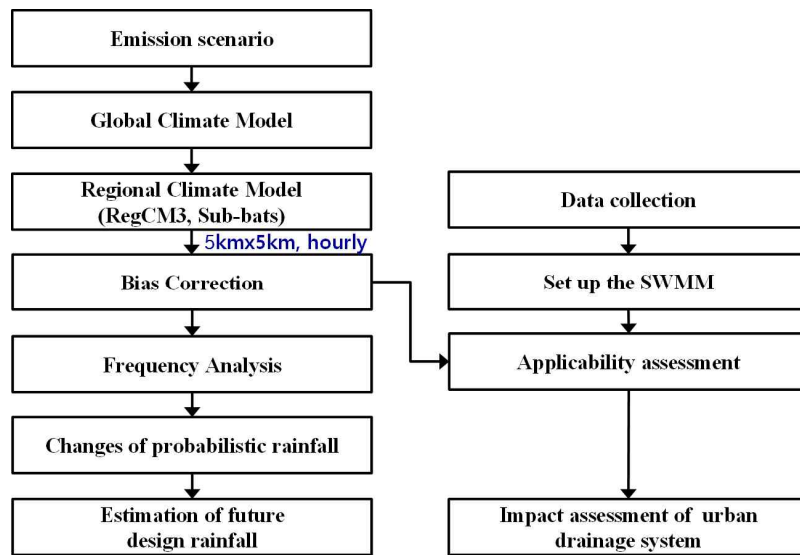


Fig. 1. Schematic Diagram of Study Procedure

강우특성을 분석하고 그에 따른 도시침수의 영향을 평가하고자 한다. 기후모형을 이용하여 모의되는 과정에서 발생하는 오차를 편의보정(bias correction) 방법을 통해 보정하고, 기준 2000s (1971~2000년) 기간 대비 미래 2020s (2011~2040년), 2050s (2041~2070년), 2080s (2071~2100년) 기간의 확률강우량을 산정하여 미래 확률강우량 및 설계강우량의 변화를 분석한다. 또한, 도시 유출모형을 선정 및 구축하고 기준기간 및 미래기간의 모의결과를 바탕으로 기후변화가 도시 배수시스템에 미치는 영향을 정량적으로 제시하고자 한다.

## 2.1 기후시나리오

우리나라는 복잡한 지형으로 구성되어 지형적 영향에 의한 국지 규모의 다양한 기후특성을 가지고 있다. 따라서 GCM이 가지고 있는 많은 유용한 정보에도 불구하고 그대로 활용되기 어렵다는 점에서 상세화 기법(downscaling method)이 요구된다. 본 연구를 위해 전지구 기후시나리오는 우리나라와 독일에서 공동으로 개발한 ECHO-G와 A2 시나리오를 이용하였다. 대기-해양 결합모델인 ECHO-G는 대기모델인 ECHAM4와 해빙-해양 모델인 HOPE로 구성되어 있으며, 대기모델은 수평해상도가 약 400 km로 규모가 크며 해양모델은 해상도가 약 300 km이다(Meteorological Research Institute, 2004). ECHO-G의 기후시나리오를 지역기후 모델인 RegCM3를 이용하여 동아시아 지역을 60 km까지 상세화 과정을 수행하였다. 상세화된 동아시아 지역의 결과를 one-way double-nested system을 이용하여 한반도를 중심으로 20

km까지 상세화하여 고해상도 기후시나리오를 생산한다(Im et al., 2006).

20 km의 시나리오는 한반도와 같은 중규모 지역의 기후를 분석하는 것에는 유용하지만 도심지역의 세밀한 분석의 경우에는 어려움이 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 본 연구에서는 RegCM3에서 제공하고 있는 Sub-BATS기법을 이용하여 5 km의 고해상도 기후 시나리오를 생산하였다. Sub-BATS는 상세화 결과에 대하여 지형, 토지이용, 토양의 특징에 의하여 더욱 상세화된 자료를 생성해 주는 방법이다. 태양복사, 강수량, 기온, 수증기, 풍속, 기압, 밀도 등이 입력 자료로 들어가며, 이러한 입력 자료를 이용하여 대상지역의 고도, 토지이용, 토양종류 등의 특징을 고려하여 기온, 수증기, 강수량, 증발산량, 강설, 유출, 기압 등을 추출하는 기법이다(Giorgi et al. 2003). Sub-BATS를 이용한 기후시나리오 생성은 Im et al. (2010)에서 유럽의 알프스 지역에 적용하여 효율성이 검증되었다.

본 연구에서는 60 km자료를 20 km로 상세화하는 과정에서 20 km 결과에 대하여 Sub-BATS 기법을 이용하여 4배로 상세화한 5 km의 고해상도 기후시나리오를 생성한다. 역학적 상세화는 1971~2100년으로 설정하여 130년을 모의하였다. 본 연구에서는 세밀한 지형과 토지이용의 특징을 반영하기 위하여 2분 자료를 사용하였다. 또한 모델의 계산시간은 60초로 하였으며, 모델의 결과는 1시간 간격으로 생산하였다. RegCM3에서는 대기와 지면, 복사 등의 자료를 산출하고 있으며, 본 연구에서 사용한 Sub-BATS 기법은 지면자료에 대하여 고해상도의 자료를 생산해 주

며, 기본적인 지면자료에 비하여 산출자료는 적다. Sub-BATS를 이용한 고해상도 기후시나리오 산출 변수는 10 m 풍속, 2m 기온, 강수량, 증발산량, 강설량 등을 생산하며, 본 연구에서는 강수량 자료를 이용하였다.

## 2.2 편의보정기법

역학적 상세화를 통해 생산된 기후시나리오를 이용하여 대상지점의 연최대치 자료를 구축하면 전반적으로 과소모의하는 경향을 보인다. 그 이유는 기후시나리오가 생산되는 과정에서 불확실성을 내포하고 있을 뿐 아니라, 기후모형의 모의과정에서 평활화(smoothing)효과가 발생되기 때문에 관측치보다 항상 과소모의하는 경향이 나타난다(Bae et al., 2007; Bae et al., 2008b). 이러한 불확실성을 개선하여 보다 정량화된 결과를 도출하기 위해 편의보정(bias correction) 과정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 미래 확률강우량 변동성 평가와 미래 도시배수시스템 영향 평가를 위해 각각 편의보정 방법을 이용하여 보정하였다.

미래 확률강우량의 변동성 평가를 위해 사용한 편의보정 방법은 기후시나리오와 관측치를 최소값부터 최대값 순으로 나열한 뒤 해당되는 순서별로 관측치와 기후시나리오 모의치의 잔차를 산정하고, 모의치에 대한 잔차의 2차 회귀방정식을 Eq. (1)과 같이 추정한다. 산정된 회귀식을 이용하여 Eq. (2)에 대입하면 편의보정된 기후시나리오를 생산하게 된다(Lee et al., 2012).

$$e_i = m_0 + m_1 \times \underline{y}_i + m_2 \times \underline{y}_i^2 \quad (1)$$

$$y_i = \underline{y}_i + e_i \quad (2)$$

여기서,  $y_i$ 는 보정된 연최대치 강수량,  $\underline{y}_i$ 는 기후시나리오의 연최대치 강수량  $m_0$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ 는 2차회귀식의 계수를 의미한다. 보정된 기후시나리오를 토대로 기준 및 미래기간 2000s (1971~2000), 2020s (2011~2040), 2050s (2041~2070), 2080s (2071~2100)의 확률강우량을 산정한다. 산정된 확률강우량의 과거기간 대비 미래기간의 변화율을 산정하고, 산정된 변화율을 과거 관측자료를 통해 산정된 확률강우량에 적용하면 최종 미래기간의 지속시간에 따른 재현기간별 확률강우량이 산정된다.

또한 본 연구에서는 미래 배수시스템 영향 평가를 위해 적용대상 도시지역에 존재하는 AWS 강우관측소 지점의 과거 강우 관측자료와 기후모형을 토대로 기후시나리오를 생산하였으며, Alcamo et al. (1997)이 사용했던 편의보정 기법을 Eq. (3)과 같이 적용하여 보정하였다.

$$P'_{GCM,fut} = P_{GCM} \times (\bar{P}_{mean,past} / \bar{P}_{GCM,past}) \quad (3)$$

여기서,  $P'_{GCM,fut}$ 는 보정된 미래의 강수량이며,  $P_{GCM}$ 은 GCM의 모의된 미래의 강수량,  $\bar{P}_{mean,past}$ 는 과거 10년 동안의 월평균 강수량,  $\bar{P}_{GCM,past}$ 는 과거 10년 동안의 모의된 GCM 월평균 강수량을 의미한다.

## 2.3 미래 설계 강우량 변화 평가 방법

미래 확률강우량의 변동성 평가를 위해 과거기간 대비 미래기간의 확률강우량을 산정하여 비교하고자 한다. 먼저 지역기후모형(RegCM3)을 이용한 역학적 상세화 과정을 거쳐 1971~2100년까지의 기후시나리오 자료를 생산하고 해당 도시지역에 위치한 강우관측소 지점의 1971~2000년의 과거 관측강우자료를 수집한다. 그 후 각 지속시간별 연최대치계열을 산정하여 생산된 미래 기후시나리오의 1971~2000년 강우 연최대치 자료와 편의보정을 수행한다. 편의보정된 기후시나리오의 연최대치 자료를 이용하여 빈도분석을 수행하였다. 매개변수 추정 방법으로는 최근 들어 가장 보편적으로 쓰이고 있는 확률가중모멘트법을 사용하였으며, 최적분포형으로 관측자료와 적합성이 뛰어난 Gumbel 분포형을 채택하여 각 기간에서의 확률강우량을 산정하였다. Gumbel 분포의 확률밀도함수는 Eqs. (4) and (5)와  $\mu$  같으며 여기서는 위치매개변수(location parameter),  $\sigma$ 는 크기매개변수(scale parameter)를 의미한다. Gumbel 확률지는 Gumbel 분포의 누가밀도함수(Eq. 6)를 선형화하여 Eqs. (7) and (8)과 같이 표현하였다. 여기서 F는 Gumbel 누가밀도함수로부터 산정되는 확률값을 의미한다.

$$f(t) = \frac{1}{\sigma} e^{z-e^z} \quad (4)$$

$$z = \frac{x-\mu}{\sigma} \quad (5)$$

$$F(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\frac{(x-\mu)}{\alpha}\right]\right\} \quad (6)$$

$$y = \ln(-\ln(1-F)) \quad (7)$$

$$x = x \quad (8)$$

## 2.4 도시 배수시스템 평가 방법

기후변화가 도시지역의 내수침수에 미치는 영향분석을 위해서는 유역 특성에 적합한 수문모형을 선정하는 과정이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 도시 유역에 적용 가능한 모형들 중 인위적인 배수체계에 대한 적용뿐만 아니

라 소규모 배수 유역으로부터 대규모 배수유역까지의 적용이 가능하고 수공구조물의 월류, 배수 및 압력류 등이 계산 가능하다는 점을 들어 XP-SWMM을 선정하였다. XP-SWMM은 미국 XP software사에서 EPA SWMM을 사용자의 편의확보를 위해 윈도우화한 것으로 기본적인 해석방법이나 구조는 SWMM과 동일하다. SWMM은 기본적으로 도시유역이나 인위적인 배수계통을 갖는 유역에 대해 유출모의가 가능한 모형으로 단일·연속 강우에 의한 계산이 가능하고, 강우간격은 임의로 설정할 수 있으며, 연산시간 간격은 강우사상에 대해 임의조정이 가능하다. 공간적 특성은 작은 배수유역에서 큰 배수유역까지 적용이 가능하다. 도시 유역내에 강우사상으로 인해 발생하는 유출량과 오염물질에 대한 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망에서의 유출량 추적, 저류량 산정 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형이다.

### 3. 대상유역 및 자료구축

본 연구에서는 서울시를 대상유역으로 선정하였다. 미래 설계강우량 변화 및 도시 배수시스템 평가를 위해 서울 기상관측소 및 기상청 관할 27개 AWS 지점의 관측 기상자료를 수집하였다. 각 강우관측소 지점의 수집된 과거 관측치 자료를 이용하여 각 지속시간 별 연최대치의 평균값 및 연평균 강수량을 산정하고 서울시 각 강우관측 지점의 호우패턴을 분석하였다. 또한 기후변화를 고려한 영향평가를 위해 미래기후변화 시나리오 생산 기법에 대해 제시하였으며, 생산된 기후시나리오 자료를 이용하여 과거기간 대비 미래기간 강우량의 공간 변동성을 분석하고 배수시스템 영향평가를 위한 서울시 지역의 3곳의 배수분구를 선정하였다. 선정된 배수분구는 공릉1 배수분구, 서초2 배수분구, 신림4 배수분구로 서울시 전반의 특성을 살펴보기 위해 각기 다른 지역을 선정하였다.

### 3.1 기상자료 수집 및 분석

서울시의 확률강우량의 변동성 분석 및 배수시스템 영향 평가를 위해서는 기본적으로 강우자료가 필요하다. 이에 본 연구에서는 서울에 위치한 강우 관측소를 조사하였으며, 해당 관측소별 관측여부 및 자료 가용여부를 검토하였다. 서울시 관내 우량관측소는 국토해양부 4개소, 기상청 27개소, 서울시 47개소를 운영하고 있으며, 강우 관측자료 보유기간은 대부분 10~20년으로 총 78개소가 운영 중에 있다. 이 중 본 연구에서는 양질의 자료와 비교적 장기간 관측자료를 보유하고 있는 기상청 관할 기상관측소를 채택하였다. 자료기간은 서울기상관측소 지점 1971~2010년(40년), 나머지 26개 AWS 지점은 1997~2010년(14년)이다.

본 연구에서는 서울시 내의 강우 공간분포를 분석하기 위해 1997~2010년 동안의 각 지속시간 별 연최대치 평균값 및 연평균 강수량을 산정하여 분석하였다. Fig. 2와 같이 연평균 강수량은 도봉관측소에서 1,563 mm로 가장 높게 나타났으며, 구로관측소에서 1,245 mm로 가장 낮게 분석되었다. 그러나 1시간 연최대치 강수량의 평균값은 마포 관측소와 관악 관측소에서 53.6 mm, 41.7 mm, 3시간 최대강우량은 마포관측소 104.6 mm, 강북관측소 78.6mm, 24시간 최대강우량은 도봉관측소 212.7mm, 성동관측소 170.7 mm로 서울시 내에서도 지역적으로 호우의 패턴이 상이하게 분석되었다. 따라서 고해상도 기후시나리오를 이용하여 평가해야할 필요가 있다.

### 3.2 미래 기후변화 시나리오

5×5 km 격자로 생산된 기후시나리오를 이용하여 강우 변동성을 평가하였다. Fig. 3은 과거 2000s기간 대비 미래 2020s, 2050s, 2080s기간에 1시간 단위 강수량의 증가율을 나타낸 것이며, 서울시 전 지역에 걸쳐 강우가 증가할 것으로 예상된다. 우선, 가까운 미래 2020s는 변화 범위는 8~31%의 범위를 가지며, 특히 도봉구의 변화율

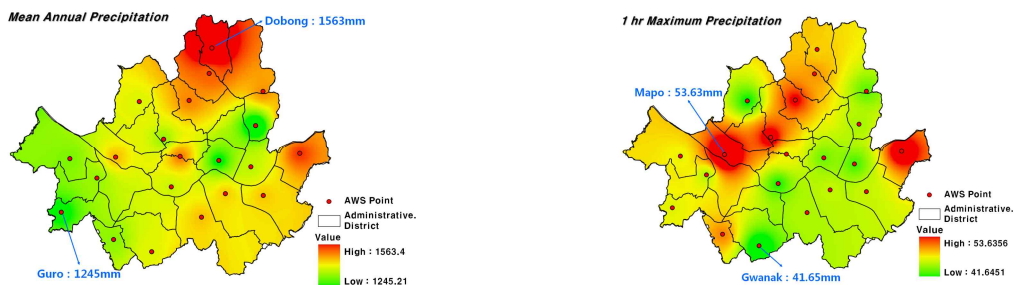


Fig. 2. Spatial Distribution of Observed Rainfall in Seoul

이 가장 크게 나타났다. 반면 2050s에는 13~21%의 강우 변화율을 보이며, 전 유역에 걸쳐서 강우량은 증가하나 2020s기간에 비해 약간 감소하는 경향을 보였다. 2080s기간에는 평균적으로 31~43%의 강우 변화율로 3 기간 중 가장 큰 변화 양상을 띠고 있으며 특히 관악, 금천구의 강우량이 크게 증가하는 경향을 보인다.

### 3.3 배수분구 선정 및 입력자료 구축

대상유역은 강우 변동성 평가 결과를 반영하여 선정하였다. 과거대비 미래 기간의 강우변동성이 가장 큰 지역인 강북과 강서지역의 공릉1 배수분구, 신림4 배수분구와 강남지역의 서초2 배수분구를 대상유역으로 선정하였다. XP-SWMM 모형구축을 위해 우선 입력자료 구축에 필요한 GIS 및 CAD 형태의 지형자료를 수집하였다. 수집된 지형자료 형태는 DEM, 토양도, 토지이용도, 배수분구도, 하수관망도 및 맨홀도 등이다. 이를 활용하여 Fig. 4와 같이 전체 배수유역을 소유역으로 분할하였고, 관망의 연결 및 흐름방향을 고려하여 관망을 단순화하였다. 우선 전체관망도 및 맨홀 자료의 원활한 활용을 위해 직경 800 mm 이상 및 3차 지류관망을 기준으로 하여 단순화 작업을 수행하였고, 이를 통해 관경, 관길이, 관형태, 관고도,

경사 등의 관망 속성정보를 추출하였다. 이러한 관망자료와 앞서 수집된 지형자료를 RUNOFF 및 EXTRAN 블록의 입력자료를 구성하였다. RUNOFF 블록의 입력자료는 지반고, 관저고, 소유역 면적, 소유역 구배, 소유역 별 유역폭, 불투수율, 조도계수, 표면지류, 침투능이 있으며 소유역별 관망 및 하천망도 속성, 소유역으로 분할된 지형자료들을 통해서 추출하였다. 또한 EXTRAN 블록의 입력자료는 관경, 관길이, 조도계수, 맨홀 위치고도 자료, 하천형상자료들이 있으며, 소유역별 관망, 맨홀 및 하천망도, 하천단면 등을 통해 추출하였다.

## 4. 평가 결과 및 분석

### 4.1 미래 확률강우량 산정

서울 기상관측소의 관측자료와 기후시나리오의 지속시간 1, 2, 3, 4, 6, 9, 12, 15, 18, 24시간의 연최대치 자료를 구축하였다. Fig. 5는 편의보정 과정 및 결과를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 관측된 일 최대강수량과 기후시나리오 일 최대강수량과의 분포도를 나타낸 것으로 1차 선형 회귀식 기울기가 0.37~0.65로 나타나 일반적으로 35~60% 정도 과소 모의하는 것으로 나타났다. 두 방법으로 생산

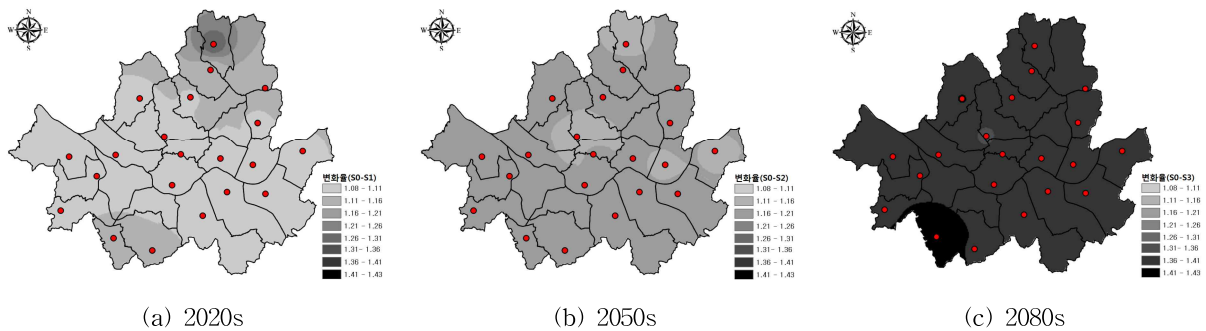


Fig. 3. Rainfall Variabilities for the 3 Future Periods under A2 Scenario

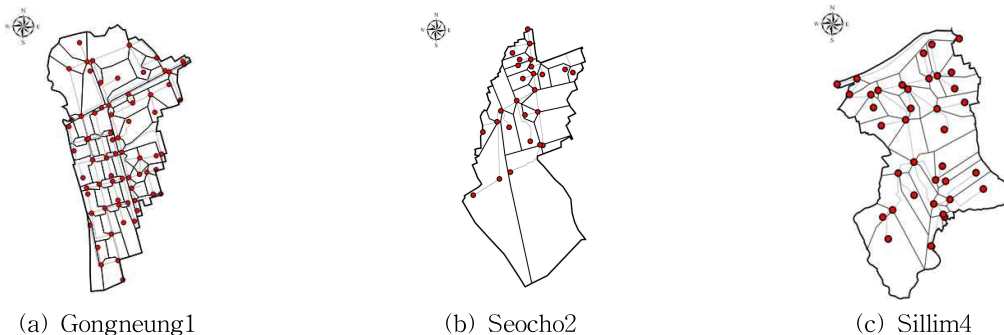
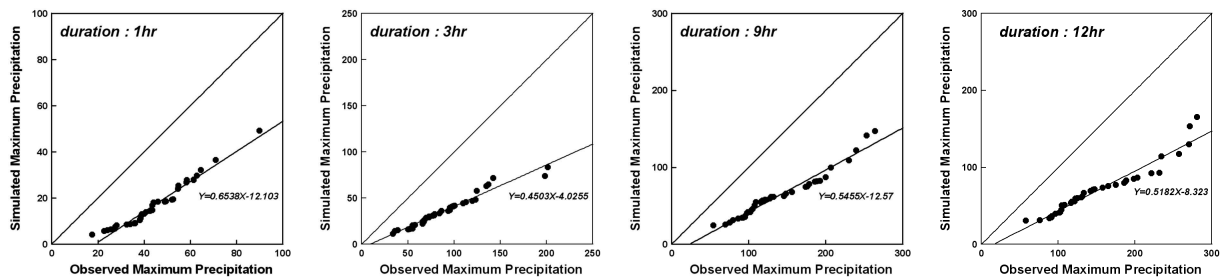


Fig. 4. Drainage System at the Selected Study Areas

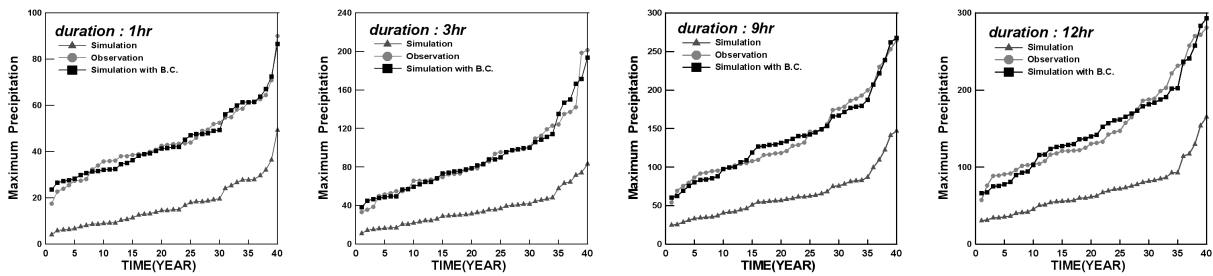
된 연최대치 강수량을 각각 순차적으로 나열한 뒤 같은 순위의 관측치와 모의치의 잔차를 구할 수 있다. 또한 Fig. 5(b)는 관측치와 편의보정 전후의 기후시나리오를 나타낸 것으로 편의보정 후 기후시나리오가 관측치에 유사한 결과를 갖는 것을 확인할 수 있다. 보정된 기후시나리오와 관측자료를 이용하여 산포도를 도시하고, 선형회귀식의 기울기를 산정한 결과 기울기가 0.91~0.98 정도로 보정되어 관측치에 근접한 결과를 얻을 수 있는 것을 확인하였다.

기후변화에 따른 서울지점의 재현기간별 확률강우량의 변화를 분석한 결과 대체적으로 미래기간으로 갈수록 확률강우량은 지속적으로 증가하는 경향을 보였으며, 특히, 재현기간이 증가함에 따라 증가폭은 더 커지는 것으로 분석되었다. 과거기간 대비 2080s기간의 확률강우량의 평균 증가율은 28.0~54.0%로 나타났으며, 지속시간 3시간, 6시

간, 24시간에 확률강우량의 증가폭이 크게 나타났다. 3시간 지속시간인 30년 빈도 강우의 경우 과거기간의 확률강우량은 172.1 mm/hr이었으나, 미래 2020s, 2050s, 2080s기간에서는 226.6 mm/hr, 237.2 mm/hr, 303.8 mm/hr로 각각 증가할 것으로 나타났으며, 변화율은 31.7%, 37.8%, 76.5%로 높게 나타났다. 또한 6시간 지속시간 확률강우량의 경우 과거기간의 확률강우량 산정치는 259.7 mm/hr이었으나, 미래 3기간에서 279.4 mm/hr, 293.2 mm/hr, 334.8 mm/hr로 각각 증가하며 변화율은 7.6%, 12.9%, 28.9%로 분석되었다. 24시간 지속시간 확률강우량은 과거기간에 400.5 mm/hr이었으나 미래 3기간에서 609.1 mm/hr, 565.5 mm/hr, 701.4 mm/hr로 변화율은 52.0%, 41.2%, 75.1%로 각각 나타났다. 따라서 확률강우량은 미래에 크게 증가하는 것을 볼 수 있으며, 특히 Table 1에서 보는 바와 같이 향후 30년 빈도의 값이 2020s기간의



(a) Scatter Diagram between Simulated and Observed Daily Maximum Rainfalls



(b) Comparison of Daily Maximum Rainfalls Before and After Bias Correction

Fig. 5. Bias Corrections for the Annual Maximum Daily Rainfall

Table 1. Design Rainfall in the Reference (2000s) and Future (2020s) Periods

(Unit : mm)

Durations		60 (min)	120 (min)	180 (min)	360 (min)	2880 (min)
Periods	Return Periods (yr)					
2000s	10	64.2	104.2	140.4	190.1	326.0
	30	76.3	125.5	172.1	233.4	400.5
	50	81.8	135.2	186.5	253.2	434.6
2020s	10	80.5	128.1	177.2	221.4	470.0
	30	99.3	158.5	226.6	275.5	609.1
	50	107.9	172.4	243.3	300.2	672.7



10년 빈도와 유사하게 나타나 현재 배수시스템의 설계기준에 지대한 영향이 있는 것으로 나타났다.

#### 4.2 도시 배수시스템 영향 평가 결과

공릉1, 서초2, 신림4 배수분구의 과거기간 대비 미래기

간의 침수 발생지점 수의 변화를 평가한 결과는 Fig. 6 및 Table 2와 같다. Table에 제시된 바와 같이 3개 지역 모두 2050s기간 보다 2020s기간에 극한 경우가 배수시스템에 미치는 영향이 더 크게 나타났으며, 특히 서초2 배수분구의 경우 총 모의기간 중 2020s기간에 가장 많은 침수지역

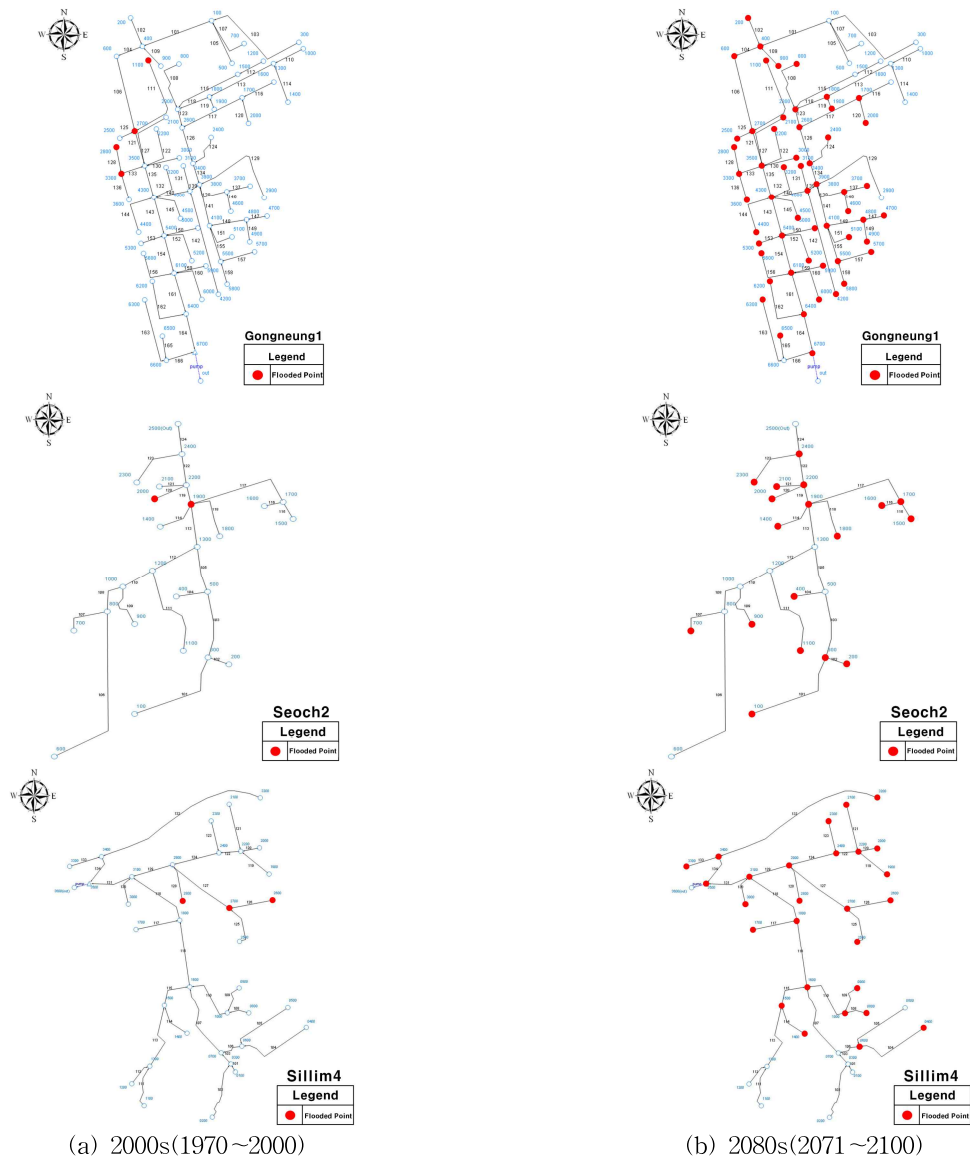


Fig. 6. Inundation Impact Assessment on Urban Drainage Simulations due to Climate Change

Table 2. Number of Flooded Nodes for Reference and 3 Future Periods

Watershed	Number of Flooded Nodes			
	2000s	2020s	2050s	2080s
Gongneung1	4/66	52/66	43/66	55/66
Seocho2	2/24	21/24	13/24	18/24
Sillim4	3/33	25/33	22/33	27/33



이 발생하였다. 공릉1 배수분구는 2000s기간에 4개 지점, 2020s, 2050s, 2080s기간에는 52개, 43개, 55개 지점에서 침수가 발생하였으며, 각각 48개, 19개, 51개 지점에서 추가로 침수가 발생하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 공릉1 배수분구의 공간적인 침수경향을 살펴보면 2000s기간에는 유역 중상류 지역의 지선관거에서 침수가 발생하고, 2080s기간으로 갈수록 하류지역으로 침수지역이 확대되었으며, 유역하류에 설치되어있는 펌프장의 시설용량 또한 부족해지는 것으로 분석되었다.

서초2 배수분구의 배수시스템 평가 결과 침수발생 지역이 2000s기간에 2개 지점, 2020s, 2050s, 2080s기간에는 21개, 13개, 18개 지점으로 각각 19개, 11개, 16개 지점이 추가로 침수가 발생하였으며, 공릉 배수분구와는 달리 유역하류의 간선관거에서 통수능력 부족으로 인해 침수가 먼저 일어났다. 이와 같은 하류지역의 통수능력 부족은 상류지역의 간선관거 및 지선관거 용량 부족을 야기시켜 침수를 발생시키는 것으로 분석되었다. 또한 신림4 배수분구 침수발생은 2000s기간에 3개 지점, 2020s, 2050s, 2080s기간에는 25개, 22개, 27개 지점으로 각각 22개, 19개, 24개 지점이 추가로 침수가 발생하였으며, 2020s, 2080s기간에는 유역 전반적으로 유입 관거의 우수배제 용량 초과에 따른 침수가 발생한 것으로 확인되었다. 2080s기간에 유역 하류에 위치한 신림 펌프장 인근 지역의 침수는 펌프 용량을 초과하는 호우로 인한 대응능력의 저하로 분석되었다.

Fig. 7은 침수가 발생하는 횟수를 구간(1~5회, 6~15회, 16~35회) 별로 나누어 나타낸 것이다. 공릉1 배수구역의 경우 1~5번 침수가 발생하는 지점의 수가 2000s기간에는 2개 지점이었으나, 미래 2020s, 2050s, 2080s기간에서는 33개, 27개, 35개 지점에서 침수가 발생하였으며, 2000s기간 대비 2020s, 2050s, 2080s기간에 각각 31개, 25개, 33개 침수 지점이 증가하였다. 또한 6~15번 침수가 일어난 맨홀 지점은 2000s기간에 1개 지점, 2020s, 2050s, 2080s기간에서 13개, 12개, 14개 지점으로 12개, 11개, 13개 지점이 증가하였으며, 16~35번 침수가 일어난 맨홀 지점은 2000s기간에 1개 2020s, 2050s, 2080s기간에 6개,

4개, 6개 지점으로 각각 5개, 3개, 5개 침수 맨홀 지점이 증가하였다. 신림4 배수구역 경우도 공릉1 지역과 마찬가지로 시간의 변화에 따른 침수 맨홀지점의 증가하는 경향이 비슷하게 나타났으나, 서초2 배수분구의 경우 2020s기간의 침수 지점이 2080s기간보다 더 많이 발생하였는데 이는 기후시나리오에서 2020s기간의 극한 호우사상이 2080s기간보다 더 크게 생산되어 침수지점이 더 많이 발생한 것으로 나타났다.

한편, 공릉1, 서초2, 신림4 배수분구의 과거 2000s기간 대비 미래 2020s, 2050s, 2080s기간의 월류량은 Table 3과 같다. 공릉1 배수분구의 경우 2000s기간에 침수되는 지점의 평균 월류량이 176.0 m<sup>3</sup>, 2020s기간에 231.0 m<sup>3</sup>, 2050s기간에 216.0 m<sup>3</sup>, 2080s기간에 284.0 m<sup>3</sup>으로 모의되었으며

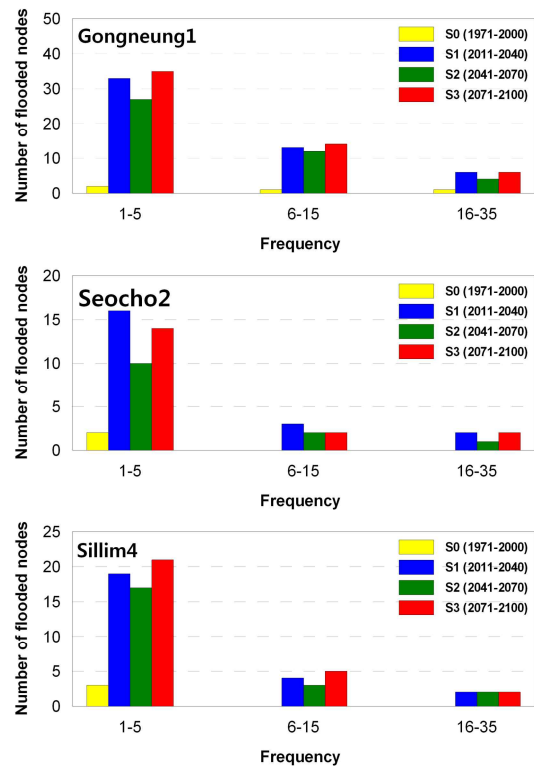


Fig. 7. Distribution of Flooded Node Number according to the Frequency Interval at Each Drainage Basin

Table 3. Estimated Overflow Amounts for the Reference and 3 Future Periods at the Selected Drainage System

Watershed	2000s (m <sup>3</sup> )	2020s (m <sup>3</sup> )	2050s (m <sup>3</sup> )	2080s (m <sup>3</sup> )
Gongneung1	704	12,015	9,296	15,620
Seocho2	682	10,674	5,544	11,000
Sillim4	891	10,900	8,548	13,481

2000s기간 대비 2020s기간의 평균 월류량 변화율은 31.3%, 2000s기간 대비 2050s기간은 22.7%, 2000s기간 대비 2080s기간에는 61.4% 증가하였다. 서초2 배수분구의 2000s기간 대비 2020s, 2050s, 2080s기간의 월류량 증가율은 49.0%, 25.0%, 79.2% 증가하였다. 또한 신림4 배수분구의 2000s기간 대비 2020s, 2050s, 2080s기간의 월류량 증가율은 46.8%, 30.6%, 68.0% 증가하는 것으로 분석되었으며, 공릉1 배수분구, 서초2 배수분구 및 신림4 배수분구의 과거 대비 미래 3기간 월류량 평균 증가율은 38.5%, 51.0%, 48.5%로 서초2 배수분구의 평균 월류량의 변화가 가장 크게 증가하는 것으로 나타났다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 역학적 상세화 기법을 통해 생산된 고해상도 기후시나리오를 이용하여 기후변화가 도시지역 배수시스템에 미치는 영향을 평가하였다. 대상지역은 국내 대표 도시지역인 서울시를 선정하였으며, 과거 2000s기간 대비 미래 2020s, 2050s, 2080s기간의 확률강우량의 변화를 평가하고, 시단위 기후시나리오 자료를 이용하여 도시 배수시스템의 영향을 평가하였다. 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 기후변화에 따른 서울 지점의 재현기간별 확률강우량의 변화를 분석한 결과, 대체적으로 미래기간으로 갈수록 확률강우량은 지속적으로 증가하는 경향을 보였으며, 특히 재현기간이 증가함에 따라 증가폭은 더 커지는 것으로 나타났다. 과거기간 대비 2080s기간의 확률강우량 평균 증가 폭은 28~54%로 나타났으며, 지속 시간 3시간, 6시간, 24시간에 확률강우량의 증가폭이 크게 나타났다.
- 2) 서울시 배수시스템의 기후변화에 따른 시공간적 영향을 평가하기 위하여 공릉1, 서초2, 신림4 배수분구를 대상지역으로 선정하였으며, 평가 결과 미래 2020s, 2050s, 2080s기간으로 갈수록 침수 발생 지점 및 빈도가 증가하는 것으로 분석되었다.
- 3) 각 배수분구 월류량의 과거기간 대비 미래기간의 변화율을 분석한 결과 미래기간으로 갈수록 각 배수분구에서 월류량이 크게 증가하였으며, 2000s기간 대비 2020s, 2050s, 2080s기간의 월류량의 평균 증가율은 42.4%, 26.1%, 69.5%로 나타났다.

본 연구의 결과에서 보는 바와 같이 인구와 재산이 밀집해 있는 서울지역의 경우 기후변화에 따른 강수량의 증가로 인해 미래기간으로 갈수록 확률강우량이 크게 증가

하는 경향을 보였으며, 이는 현재 구축되어 있는 배수시스템의 설계빈도를 크게 상회하는 값으로 수해관리에 많은 어려움이 발생할 것으로 예상된다. 또한 모형을 통한 배수시스템 평가 결과 강수량 및 강우강도의 증가로 인해 침수발생 맨홀지점과 월류량이 크게 증가한다는 결론을 도출할 수 있었다. 이러한 결과는 현 도시 배수시스템의 대응능력 부족에서 기인된 것이며, 침수피해를 최소화하기 위해서는 현재 취약한 지점들에 대한 국가차원의 투자 및 구조적·비구조적 대책 마련이 필요할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리사업의 연구비지원(14AWMP-B082564-01)과 2011년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2011-0030040).

## References

- Alcamo, J., Doll, P., Kaspar, F., and Siebert, S. (1997). "Global change and global scenarios of water use and availability: An application of WaterGAP 1.0." Report A9701. Kassel, Germany: University of Kassel, Center for Environmental Systems Research.
- Bae, D.H., Jung, I.W., and Kwon, W.T. (2007). "Generation of High Resolution Scenarios for Climate Change Impacts on Water Resources (I): Climate Scenarios on Each Sub-basins." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 40, No. 3, pp. 191-204.
- Bae, D.H., Jung, I.W., and Chang, H. (2008a). "Long-term trend of precipitation and runoff in Korean river basins." *Hydrological Processes*, Vol. 22, pp. 2644-2656.
- Bae, D.H., Jung, I.W., and Chang, H. (2008b). "Potential changes in Korean water resources estimated by high-resolution climate simulation." *Climate Research*, Vol. 35, pp. 213-226.
- Denault, C., Millar, R.G., and Lence, B.J. (2006). "Assessment of possible impacts of climate change in an urban catchment." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 42, pp. 685-697.
- Giorgi, F., Francisco, R., and Pal, J. (2003). "Effects of a subgrid-scale topography and land use scheme

- on the simulation of surface climate and hydrology. Part 1: Effects of temperature and water vapor disaggregation." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 4, pp. 317-333.
- Huong, H.T.L., and Pathirana, A. (2013). "Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can tho city, Veitam." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 17, pp. 379-394.
- Im, E.S., Park, E.H., Kwon, W.T., and Giorgi, F. (2006). "Present climate simulation over Korea with a regional climate model using a one-way double-nested system." *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 86, pp. 187-200.
- Im, E.S., Giorgi, F., and Bi, X. (2010). "Validation of a high-resolution regional climate model for the Alpine region and effects of a subgrid-scale topography and land use representation." *Journal of Climate*, Vol. 23, pp. 1854-1873.
- Jung, I.W., Bae, D.H., and Kim, G. (2011). "Recent trends of mean and extreme precipitation in Korea." *International Journal of Climatology*, Vol. 31, pp. 359-370.
- Kang, N.R., Kim, S.J., Lee, K.H., Kim, D.G., Kwak, J.W., Noh, H.S., and Kim, H.S. (2012). "Impact of Climate Change on An Urban Drainage System." *Journal of Korean Wetlands Society*, Vol. 13, No. 3, pp. 623-631.
- Karamouz, M., Hosseinpour, A., and Nazif, S. (2011). "Improvement of urban drainage system performance under climate change impact: Case study." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 16, pp. 395-412.
- Kim, K.W. (2010). A Study on Runoff Analysis of Woo-I Stream Basin Based on Climate Change, Mater degree thesis, University of Seoul.
- Kim, B.S., Kim, B.K., Kyung, M.S., and Kim, H.S. (2008). "Impact Assessment of Climate Change on Extreme Rainfall and I-D-F Analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 41, No. 4, pp. 379-394.
- Lee, M.H., Shin, S.H., and Bae, D.H. (2012). "The Application Assessment of Future Design Rainfall Estimation Method Using Scale Properties." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 3, pp. 253-262.
- Lee, S., and Bae, D.H. (2012). "Local effects of climate change over South Korea with a high-resolution climate scenario." *Climate Research* Vol. 54, No. 1, pp. 85-93.
- Meteorological Research Institute (2004). "The Development of Regional Climate Change Scenario for the National Climate Change Report(III)." Meteorological Research Institute, KMA. (In Korean)
- Olsson, J., Berggren, K., Olofsson, M., and Viklander, M. (2009). "Applying climate model precipitation scenarios for urban hydrological assessment: A case study in Kalmar City, Sweden." *Atmospheric Research*, Vol. 92, pp. 364-375.
- Olsson, J., Amaguchi, H., Alsterhag, E., Daverhog, M., Adrian, P.E., and Kawamura, A. (2013). "Adaptation to climate change impacts on urban storm water: a case study in Arvika, Sweden." *Climatic Change*, Vol. 116, pp. 231-247.
- Semadeni-Davies, A., Hernebring, C., Svensson, G., and Gustafsson, L.G. (2008) "The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden : Combined sewersystem." *Journal of Hydrology*, Vol. 350, No. 1-2, pp. 100-113.
- Son, K.H., Lee, B.J., and Bae, D.H. (2010). "Assessment on Flood Characteristics Changes Using Multi-GCMs Climate Scenario." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 43, No. 9, pp. 789-799.

paper number : 14-112

Received : 14 November 2014

Revised : 26 January 2015 / 30 March 2015

Accepted : 30 March 2015