하천방재

SLEUTH 모델을 이용한 기후변화에 따른 도시지역

침수분석

Inundation Analysis of Urban Area Considering Climate Change Using SLEUTH Model

김문모* · 김억기**

Kim, Munmo* and Kim, Uggi**

Abstract

In this study, inundation and impact assessment due to climate change and land coverage use change for the basin of Namyang-ju city and its vicinity. This study used three Global Climate Models (GCMs) over South Korea at 30 meter resolution based on IPCC SRES scenario. The SLEUTH model was utilized to predict land-use change modelling and its impact on discharge. As the results, rainfall for each scenario had been increased as the frequency was shorter and decrease ratio also increased relatively. Namely, increase ratio of 10-yr frequency was bigger than the ratio of 30-yr frequency in the same condition of 60-min duration. Possibility of inundation had significantly increased as the frequency shorter, therefore, urban planning in the plan should be reflect the result. In the case of climate change considered only and the case of climate change and forecasted landuse change, inundation characteristics value had been significantly increased in the section from C1 to C5 and a little changes had been shown in the section from C5 to C7. Thus, effective countermeasures for increased future damages for climate change and landuse change is necessary and considered. Future landuse change and climate change is a clear fact, therefore, evaluation of the runoff and the effect is necessary for the global change of hydrologic environment. And the result of this study can be applied to the establishment of adaptation strategy of urban planning for landuse change and climate change.

Key words : Climate Change Scenarios, Land Coverage Use, SLEUTH model, Inundation

요 지

본 연구에서는 남양주시 주변을 대상으로 기후변화와 토지이용변화를 고려한 도시지역의 침수분석을 실시하였다. IPCC SRES (Special Report in Emission Scenario)기반의 우리나라 30 m 해상도 기후모델(General Circulation Models, GCMs)을 이용하였다. 토지이용변화 예측을 위해서는 현재 도시지역의 토지이용변화 예측에 다양하게 적용되고 있는 SLEUTH 모형을 적용하였다. 분석결과, 시나리오에 따른 미래강우별 지속시간별 강우량 및 증감률 분석 결과 재현기간이 짧을수록 시나리오별 강우량 증가율은 커지고, 상대적으로 감소율도 커지는 경향이 나타났다. 즉, 동일한 지속시간 60분에 대해 재현기간 5년이 30년 보다 증가율은 크게 증가하는 경향을 보였다. 그러므로 침수가능성은 지속시간이 짧을수록 크게 증가하게 되므로 도시계획 시 이를 반영할 필요가 있다. 기후변화만을 고려한 경우와 기후변화 및 토지이용변화 예측 결과를 반영한 침수분석 결과 모두 침수특성치가 C1~C5까지 증가 후 C5~C7의 변화율은 작게 나타났다. 이는 확률강우량의 증가 추이와 유사하게 변화하는 경향이나 확률강우량의 경우 C1 시나리오 대비 C5의 증가율이 10년 빈도 약 25%, 30년 빈도 약 30%점을 고려할 경우 침수면적의 증가율이 상대적으로 큰 150% 이상으로 나타났다. 그러므로 도심지 침수피해지역은 기후변화 및 토지이용변화에 따라 향후 피해 규모가 증폭될 수 있는 점을 고려한 효과적이고 유의한 대응대책 수립이 필요하다. 토지이용변화를 고려한 침수해석 결과, 침수면적은 기후변화 시나리오에 따른 강우량의 변화만을 고려할 경우에 비하여 침수특성치의 증가율이 상대적으로 크게 나타났다. 미래 기후변화에 따른 배수체계의 성능 제고를 위해서는 반드시 도심지 토지이용변화예측을 반영한 침수해석을 통해 대안을 수립하는 것이 바람직할 것이다.

핵심용어 : 기후변화 시나리오, 토지이용변화, SLEUTH 모델, 침수

*교신저자. 정회원. 신구대학 토목공학과 교수(Tel: +82-31-740-1340, Fax: +82-31-740-1587, E-mail: munmo310@shingu.ac.kr)

Corresponding Author: Member, Professor, Department of Civil Engineering, Shingu University

**전 경기도 교통건설국장

Member, Pre. Director of Transportation and Construction in Gyeonggi-Do, Korea

1. 서 론

최근 기후변화에 따른 이상기상으로 각종 재난이 빈번하게 발생하여 사회경제적 피해가 날로 증가하고 있어 사회적으로 문제를 야기하는 중요한 이슈가 되고 있다. 이상 기후에 따른 극치 사상의 영향은 매우 광역적으로 분포하며, 이는 농업, 교통, 에너지, 산림, 환경, 보건, 수자원 등을 포함하여 경제에 이르기까지 다양한 분야에 영향을 미친다. 이렇게 볼 때, 극한 기후로 사회 전반에 대한 안정성이 더 취약하여 질 수 있음은 분명한 사실이다(Kunkel *et al.*, 1999). 우리나라도 2000년대 들어 벌써 수차례 겪은 바와 같이 태풍, 집중호우, 폭설, 가뭄 등 재해별 피해규모는 가히 상상을 초월하고 있다.

기후변화 시나리오에 대한 국내 연구로는 GCM을 이용하여 5대강 유역에 적용하여 유출량을 추정한 결과 평균적으로 약 25%정도의 유출 증가를 예측한 바 있다(Korea Environment Institute, 2011). 또한, Kim *et al.*(2004)은 YONU GCM을 이용하여 CO2 배증상태의 모의결과를 이용하여 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향을 SLURP(Semi-distributed Landuse based Runoff Processes) 모형을 사용하여 모의 하였다. Jeong *et al.*(2004)은 강수량에 대하여 국내 유역의 GCM 불확실성을 Kolomogorov-Smirnov 검정 방법을 사용하여 관측 값과 모의 값을 비교 분석하였다. 2007년 과학기술부의 “기후변화에 의한 수자원 영향평가 체계 구축” 연구에서는 IPCC 4차 평가보고서에서 활용된 온실가스배출시나리오(A2)와 GCM(ECHO-G)결과를 이용하여 우리나라 전역에 대해 기후변화에 따른 수자원 영향평가를 최초로 제시한 바 있다. 강우사상의 특성을 잘 반영하는 매개변수 추정에 관한 연구에서는 Keum *et al.*(2001)은 NSRPM의 매개변수 추정을 위한 최적화 기법중 비선형계획법(Nonlinear Programming, NLP)과 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)의 정확도 비교를 연구하였고, Jeong(2009)은 직접적인 매개변수 추정과 모멘트식을 이용한 매개변수 추정에 관한 정확도를 비교 분석하였다.

토지이용 변화 예측은 각각 다른 목적에 의해서 여러 가지 기법을 이용해서 분석할 수 있으며, 구축한 데이터에 따라서 여러 가지 기법을 적용(White *et al.*, 1997)하고 있다. Park and Cho(2008)는 다항로짓모형을 구축하여 대구광역시의 토지이용변화 확률을 예측하는데 순수하게 CA만 활용하기도 하나 마르코프 체인(Markov Chain)모형과 결합된 형태의 CA-Markov 모형을 활용한 CA 기반 무수한 해외 적용 사례가 있으며 Jantz *et al.*(2003)도 볼티모어/워싱턴지역을 대상으로 SLEUTH모형을 적용하여 토지이용변화를 예측하였고, 조대현(2008)은 셀룰러 오토마타에 기초한 토지이용 변화 관련 기존 연구들이 토지용도의 변화에만 중점을 두어왔음을 지적하고, 개발밀도를 고려한 모형을 개발하여 서울시 종로구 일대를 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. CA-Markov 모

형을 활용한 사례로는 Kim and Jung(2006)의 광주시 성정동 일대를 대상으로 CA-Markov 모형을 구축 등이 있다. Park *et al.*(2010)은 통계학적 인자와 CA(Cellular Automata) 기법이 결합된 CA-Markov 기법을 보다 현실적인 실정에 맞게 분석할 수 있는 개선된 CA-Markov을 이용하여 분석하였다. 현재까지의 토지이용변화 예측은 CA 기반 모형 중에서도 Markov 이론을 적용한 형태의 모형이 적용되어 왔으나, 다양한 연구 결과를 분석한 결과 CA-Markov 모형은 토지이용에 영향을 주는 다양한 인자(도로, 경사, 개발제한구역 등)의 영향을 배제하고 단순하게 확률론적 견지에서 예측하는 문제점 내포하고 있음이 알려져 있다.

강우-유출현상에 관한 보다 엄밀한 해석이 필요하게 되었고, 유출해석에 있어서 강우량의 시·공간적인 분포와 유출장인 유역 사면특성의 공간분포의 중요성이 부각되고 있다(Kim *et al.*, 2007). 불투수층의 증가, 홍수유출용적의 증대, 홍수도달 시간의 단축으로 인한 첨두유출량 증가는 현재 도시유역의 강우-유출 현상의 대표적인 특징이라 할 수 있다. 유출특성의 변화들은 도시방재 개념과 밀접한 관련이 있으므로 합리적인 도시유출모형 도입으로 신뢰성 있는 해석이 요구된다. 도시유역의 유출량을 산정하기 위한 모형 중에서 현재 가장 많이 활용되는 것은 SWMM모형이다. Hsu *et al.*(2000)은 관망의 절점에서 잉여수에 의해 발생하는 침수를 SWMM 모형을 적용하여 모의하였고, Phillips *et al.*(2005)은 XP-SWMM 모형과 TUFLOW 엔진을 이용한 1D/2D모델링을 하여 도시지역 2차원 침수해석에서 XP-SWMM의 적용성을 평가하였다. Smith *et al.*(2006)은 도시유역에서 홍수에 의해 발생하는 침수구역을 소구역별로 분할하여 구역별 배수구역을 산정하는 연구를 진행하였다. 국내에서도 Lee and Han(2007)는 GIS를 기반으로 도시지역 침수해석시 내배수시스템과 지하공간의 침수해석을 연계한 연구를 수행하였다. Hong *et al.*(2006)은 저폭 20m인 굴포천의 방수로로 80m로 확장하였을 때 방수로 구간에서의 수위 및 홍수량의 변화를 XP-SWMM을 이용하여 모의하였다. Shin *et al.*(2007)은 도시하천의 홍수량 산정 시에 도심지의 홍수량을 산정하기 위해 도시하천의 비시가지역은 HEC-HMS모형을 이용하여 홍수량을 산정하여 XP-SWMM모형의 상류경계조건으로 설정하고 도심지의 우수관로를 하천에 연결하여 홍수량을 산정하는 방법을 제시하여 도시홍수예방과 침수범람도를 작성하여 도시침수해석 및 치수대책수립에 기초자료를 제시하였다.

본 연구에서는 이상과 같이 기후변화와 토지이용변화를 개별적인 영향을 고려한 도시지역의 침수분석과는 달리 기후변화와 토지이용변화의 영향을 동시에 고려한 영향을 분석하고자 한다. 미래의 기후변화 및 토지이용변화를 고려한 수문환경에 대한 매개변수 구축 후 이를 기반으로 도시유출 모형을 활용하여 수문환경의 변화 예측의 적정성을 평가하는 것이 주요한 목적이다. 향후 미래에는 기후변화 및 토지이용의 변

화가 일어나는 것은 명확한 사실이므로 그에 따라 홍수량의 증가 및 도시배수시설의 성능 저하에 대한 평가를 통해서 선제적으로 도심지 침수방어 대안을 확보하는 전략 수립이 중요하며, 본 연구 결과는 향후 도시계획, 도심지 개발계획 등의 수립을 위한 기초적인 자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

2. 기후변화를 고려한 토지이용변화 예측 모델

2.1 기후변화를 고려한 확률강우량

우리나라 전역에 대해 기후변화에 따른 수자원 영향평가를 최초로 제시한 바 있는 전 지구 기후모델인 ECHO-G는 대기 모델인 ECHAM4와 해양 해빙 모델인 HOPE-G로 구성되어 있으며 속보정자료 OASIS가 사용된다. 해양모델인 HOPE-G(Legutke *et al.*, 1999)는 일정 해상도로 심해순환을 모의할 수 있는 장점이 있고 적도로 갈수록 고 분해능을 보여 적도파 및 용승지역을 잘 모의하는 특징이 있다. 그리고 대기와 해양 간의 결합은 소프트웨어 OASIS(Terray *et al.*, 1998)에 의해 수행된다. Table 1은 ECHO-G모델에 관한 제원을 보여주고 있다. 기상청 홈페이지를 통해 배포되는 ECHO-G모델의 기후변화 시나리오 자료는 A1B, A2, B1 총 3개 시나리오에 대해서 제공하고 있으며, 월별 평균온도, 최고온도, 최저온도, 강수량, 상대습도, 5개 변수에 대해서 자료를 2100년까지에 대해서 제공하고 있다.

일반적으로 ECHO-G 모델의 모의 결과를 시단위 강우로 상세화를 위해 널리 쓰이는 NSRPM(Neyman-Scott Rectangular Pulse Model)은 점(point) 과정을 활용한 강우생성 모형이다. NSRPM은 GCM(Global Circulation Model)과 같은 수치해석적인 방법으로 기후변화를 예측하고 수문학적으로 적용할 때 발생할 수 있는 시간 스케일의 문제점을 극복 할 수 있는 장점이 있다. 군집 점 과정(Clustered Point Process) 기법을 이용한 NSRPM(Neyman-Scott Rectangular Pulse Model)은 강우생성모형으로 구형펄스모형(Rectangular Pulse Model)에서는 반영하지 못하는 강우현상의 군집특성을 잘 반영하여 그 적용성이 뛰어나다는 평가와 함께 수문학 분야에서 널리 쓰이고 있다(Kim *et al.*, 2012).

점 과정을 이용한 강우생성 모형으로 Bartlett-Lewis(B-L)

Table 1. Property of ECHO-G Model (KMA)

Classification	Detail Contents
Data term	1860~2100 year
Scenarios	20C3M, A1B, B1, A2
lattice spacing	~400 km(~3.75°)
lattice information	87.159°S~873159°N, (0°~360°)
Provided variable	Temperature(Max., Min., Avg.), Precipitation, Relative Humidity
Data spacing	Mean Month

모형이 있으나 매개변수를 추정하기 위한 초기 값에 민감하며 NSRPM이 Bartlett-Lewis모형보다 더 현실적으로 적합한 강우를 생성한다(Velghe *et al.*, 1994). Rodriguez-Iturbe *et al.*(1987)은 기존에 수문학 분야에서 강수 생성을 위해 사용되었던 구형펄스모형(Rectangular Pulse Model)의 강수 자기상관구조를 표현하지 못하는 단점을 극복하고자 Neyman-Scott 과정을 추가한 NSRPM을 개발하였다.

NSRPM은 총 5개의 확률분포형으로 이루어져 있다. 우선 점과정(point process)를 이용하여 강우 군집의 시작점(origin)을 선정한다. NSRPM은 5개의 확률분포형으로 이루어져 있으며 구축하기 위한 과정은 다음과 같다(Kim *et al.*, 2012). ① 강우사상의 시작점(origin of storm)선정을 위한 확률분포를 구한다. 강우 시작점의 분포는 매개변수 λ 를 가지는 지수 분포를 따르며 I.I.D(Independent and Identically Distributed)이다. ② 기하함수를 이용하여 강우격자의 개수를 정한다. 이때 매개변수 μ 를 사용한다. ③ 지수분포를 사용하여 각 강우세포의 위치를 결정하며 매개변수 β 를 가진다. ④ 각각의 강우세포의 지속기간을 정한다. 강우세포의 지속기간은 η 를 매개변수로 하는 지수분포를 따른다. ⑤ 각각의 강우세포의 강우강도를 정한다. 강우세포의 강우강도는 ξ 를 매개변수로 하는 지수분포를 따른다. Downscaling된 강우량에 대하여 빈도 해석을 실시하였다. 빈도해석의 분포형으로는 Gumbel 분포형이 사용되었고, 매개변수 추정방법으로는 확률가중모멘트법이 적용되었다.

2.2 SLEUTH 토지이용변화 예측 모델

SLEUTH 도시성장 모델은 미국 캘리포니아 산타바바라 주립대학의 Clarke 교수가 개발한 도시성장 모델(Clarke Cellular Automaton Urban Growth Model)을 확장하고 개선한 도시성장과 토지이용변화를 모의하는 모델이다(Dietzel and Clarke, 2006). SLEUTH 모델은 입력 자료로 쓰이는 Slope, Land-use, Excluded, Urban, Transportation, Hillshade의 첫 글자를 따서 지어진 이름이며, 도시지역/비도시지역으로 도시성장을 모의하는 Clarke 도시성장 모델(Clarke Urban Growth Model, Clarke UGM)과 좀 더 다양한 토지피복변화를 모의할 수 있는델타트론 모델(Deltatron) 두 가지 모델로 구성되어 있다. UGM은 단독으로 모의가 가능하지만, Deltatron 모델은 UGM 모델과 함께 보정되어야 실행될 수가 있다.

SLEUTH 모델의 실행 기본 단위는 Growth cycle이며, 한 번의 Growth cycle은 1년의 기간을 의미한다. 1년의 Growth cycle은 Fig. 1과 같이 3단계로 구성이 되어 있다.

SLEUTH는 이러한 단위 Growth cycle을 종료 연도와 시작 연도의 차이 개수 만큼 연속 실행하여 도시성장 및 토지피복변화를 예측하게 된다. 예를 들어, 1980년에서 2000년까지 모의한다면 20개의 Growth cycle을 반복적 연산(iterative com-

Fig. 1. Simulation Process of Unit Growth Cycle.

putation)을 통하여 연속 실행하게 되는 것이다(Fig. 1).

SLEUTH는 네 가지의 성장유형을 단계별로 거쳐 도시성장을 예측하게 된다. 첫 번째 단계는 자발적 성장(spontaneous growth), 두 번째 단계는 중심지 주도형 성장(new spreading center growth), 세 번째 단계는 도시주변 성장(edge growth), 그리고 마지막 단계는 도로유발 성장(road-influenced growth)이다. 4개의 성장유형에는 확장(dispersion), 증식(breed), 확산(spread), 경사(slope), 도로중요도(road-gravity) 5개의 성장계수가 각각 관련되어 있다.

2.3 도시 유출해석 모형

SWMM 모형은 도시구역 내에서 강우사상으로 인한 유출량과 오염물질에 대한 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망에서의 유출량 추적, 저류량 산정, 오염물질의 처리와 비용계산 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형이다. SWMM은 배수구역의 구조를 네 가지 층으로 구분하여 유출을 모의한다. 이와 같은 유출모의를 위한 SWMM의 입력 자료는 크게 수문기상 자료군, 매개변수 자료군, 입출력 제어 자료군으로 구분한다.

수문기상 자료군은 강우, 강설 및 증발산과 관련된 자료이고, 매개변수 자료군은 물리적 매개변수(physical parameters)와 수문학적 매개변수(hydrological parameters)로 구분할 수 있다. 물리적 매개변수들로서는 소유역의 면적, 구역의 평균 경사, 불투수지역의 면적 등 소유역 관련 매개변수와 하도 및 관망의 길이, 관경 또는 하도의 폭, 하도의 경사 등 배수체계 관련 매개변수 등이며 이들의 대부분은 지형도나 항공사진, 관망도 및 하천도 등을 통하여 추정할 수 있는 매개변수들이다.

수문학적 매개변수들로서는 투수 및 불투수구역의 Manning 계수와 하도 및 관망의 Manning 계수, 지표면 저류(depression storage), 침투관련 매개변수, 그리고 구역 폭(characteristic width) 등이다. 입출력 제어 자료군은 프로그램의 수행과 결과의 출력형태를 결정하는 자료들로서 사용자의 목적에 따라 결정되는 자료들이다(Lee, 2001).

3. 모형의 적용 및 결과

기후변화에 따른 대상지점의 확률강우량 모의를 위해서 우선, 대상지점의 과거 관측 강우 자료 수집하고, 기상연구소에서 제공하는 전지구모형 결과를 수집한다. 기상연구소의 GCM 모의 결과로부터 상세화(downscaling)된 강우 자료는 일단위 자료이며, 금회 연구에서 요구되는 지속기간이 짧은 확률강우량을 구하기 위한 방법이 필요하다. 본 연구에서는 scaling 기법과 NSRPM(Neymann-Scott Rectangular Pulse Model)을 적용하여 시간 단위 확률강우량을 산정하였다. NSRPM의 매개변수 산정은 Jeong(2009)이 제안한 방법에 근거하였다. NSRPM에 의해 생성된 시간 단위 강우 자료에 기후변화를 반영하기 위해 본 연구에서 활용한 GCM 모의자료로부터 과거 관측 기간의 강우량에 대한 미래 모의 기간의 강우량의 비를 계산하여 NSRPM에 의해 생성된 자료에 반영하였다. 시간적 상세화기법으로 NSRPM을 이용한 매개변수 추정 방법을 이용하여 상세화 한 후 빈도해석을 통하여 미래의 7개의 기간에 대한 빈도별 지속기간별 확률 강우량을 산정한다. SLEUTH 모형을 활용하여 현 상태 유지의 시나리오에 대해, 2010년부터 2030년까지 남양주시 일부 구역에 대하여 고해상도(30m×30m) 토지이용변화 전망 모의를 수행하였다. 예측된 2010년 토지피복도를 활용하여 SWMM 모형 구동에 필요한 지형 입력자료를 ArcGIS를 활용하여 추출하고 기상입력 자료를 구축한 후에 소유역을 SWMM 모형의 기본인 기상관측소 자료를 이용하여 구분하고, 모형의 매개변수를 분석하여 일 유출량 계열을 모의한 후 실제 2010년 토지피복도를 활용한 유출량 분석 결과와 비교 검토하여 토지이용변화와 기후변화에 의한 강우량 변화가 구역의 침수현상에 미치는 영향을 분석한다.

위의 결과를 토대로 구역의 토지피복 변화에 따른 수문패턴의 변화 예측 가능성 평가를 통해 도시개발로 인해 변화되는 지형 및 토지이용 등의 각 요소들을 모형에 적용하여 도시개발에 따른 수문환경의 전반적인 변화로 인한 홍수량 영향 평가를 통해서, 최근 빈번한 도시지역의 내수침수재해에 대한 도시 및 비도시지역의 개발에 대한 방향을 제시하였다.

3.1 기후변화를 고려한 확률강우량산정

미래의 확률강우량을 모의하기 위해서는 미래의 강우량 모의 자료가 필요하다. 사용된 자료는 서울 기상청 지상관측소의 1961년~2011년 관측 시간 강수량을 사용하였다. 기후변화 모의 자료로는 A2 시나리오에 ECHO-G 모형으로 모의된 결과를 사용하였으며 모의자료는 기상청 기상연구소에서 제공받았다.

Downscaling 하기 위해서는 전지구모형의 모의결과인 미래 월강수량의 변화율을 산정하여야 한다. 기상청 기상연구소에서 제공받은 전지구모형 모의 결과는 1901~2000(현재기간)

Table 2. Rainfall(mm) and Variation(%) by Return Period-Rainfall Duration of Climate Change Scenarios

Return period		5yr. frequency			10yr. frequency			30yr. frequency		
Duration		60min.	120min.	180min.	60min.	120min.	180min.	60min.	120min.	180min.
2010yr.	rainfall	37.79	73.71	99.58	52.12	92.06	116.61	73.78	119.78	142.35
C1 (2011~2040)	rainfall	61.43	89.81	113.04	69.89	102.32	130.63	82.67	121.21	157.22
	change(%)	62.56	21.84	13.52	34.09	11.14	12.02	12.05	1.19	10.45
C3 (2031~2060)	rainfall	71.60	102.78	128.50	83.68	120.25	151.94	101.94	146.66	187.37
	change(%)	89.47	39.44	29.04	60.55	30.62	30.30	38.17	22.44	31.63
C5 (2051~2080)	rainfall	74.13	109.96	138.62	87.81	131.60	167.63	108.48	164.31	211.45
	change(%)	96.16	49.18	39.20	68.48	42.95	43.75	47.03	37.18	48.54
C7 (2071~2100)	rainfall	73.77	106.89	134.99	86.43	127.00	161.85	105.55	157.39	202.43
	change(%)	95.21	45.01	35.56	65.83	37.95	38.80	43.06	31.40	42.21

과 2001~2100(미래기간)으로 나누어 모의되어 있다. 변화율은 미래기간의 연평균 강우량을 현재의 연평균 강우량으로 나눔으로써 계산된다. 변화율을 계산 시 모의된 모든 기간을 사용하지 않고 일정 부분으로 나누어 계산한다. 현재 기간은 1971년~2000년까지 기간의 연평균 강우량을 사용한다. 본 연구에서는 미래기간을 구간으로 나누어 변화율을 계산하였다. 나누어진 세 구간은 P1(2011~2040), P2(2041~2070), P3(2071~2100)이다.

Downscaling된 시강우 시계열을 이용하여 지속기간별 연최대 강우량을 계산하였다. 총 27개 지속기간에 대하여 연최대 강우량을 산정하였으며, 산정된 연최대 강우량을 이용하여 확률강우량을 산정하였다. 연최대 강우량의 강우분포로는 Gumbel 분포형을 적용하였다. 분포형의 매개변수 추정 방법으로는 확률가중모멘트법을 적용하였다. 연최대 강우량의 지속기간과 확률강우량은 기존의 연구와 비교를 위하여 한강유역 종합치수계획에서 사용된 자료와 같은 지속기간과 분포형과 매개변수 추정방법을 적용하였다.

변화율은 세 기간(P1, P2, P3)으로 나누어 적용하였으나 확률강우량은 시간이 지남에 따른 변화를 보기 위하여 총 7구간(2011~2100, 30년씩)으로 나누어 적용하였고, 2011년부터 30년씩 자료를 이동평균하여 산정하였다. 본 연구에서 채택한 기후변화 시나리오 C1~C7에 대한 빈도·지속기간별 강우량 및 강우량 증감률은 Table 2와 같다. 강우량 증감률은 서울측 후소 2010년 빈도분석 결과를 기준으로 비교하였다. C7 시나리오의 강우량 및 증감율이 가장 크게 나타나며, 지속기간이 짧은 구간에서의 증감율이 비교적 크게 나타남을 알 수 있다.

3.2 토지이용변화예측 분석

금회 연구에서는 Clarke가 개발한 SLEUTH 모형의 단점을 보완한 SLEUTH3-r버전을 사용하여 토지이용변화를 예측하였다(Jantz *et al.*, 2010). 모형의 적합성 향상을 위해서 토지이용변화예측 시나리오를 작성하고 방안별 남양주시의 예측 정도를 평가하는 과정을 수행한 후 예측 정도가 우수한 방안

을 선정하여 적용하였다. 예측 정도의 평가는 전체정확도를 나타낼 수 있는 통계량인 Leesalee(Jeong *et al.*, 2002)와 일반적 OSM 수치를 활용하였으며, 실제 피복도와 예측 피복도의 검증을 위해 2010년 환경부 토지이용도를 활용하였다.

3.2.1 입력자료의 구축

SLEUTH의 입력자료는 모두 흑백 GIF 형태로 변환 입력되며, 본 연구에서는 ArcGIS 9.3을 이용하여 shape나 raster grid 형태의 자료들을 모두 8bit unsigned GIF 그림형태로 전환하였다. 입력 자료의 격자 값이 '0'일 때는 해당 값이 없거나 비활성화된 것을 의미한다. 또한 '0<x<255'범위 값이면 해당 값이 존재하는 것을 의미하는 것으로 예를 들면 도시영역도의 경우 비도시 지역은 격자값 0이며, 도시 지역은 그 외의 255이하의 값을 가진다.

SLEUTH 모형의 보정을 위해서는 최소한 4개 이상의 시기별 도시 범위도, 2개 이상의 도로망도 및 토지피복도 자료를 필요하다. 그 외의 경사도, 음영 기복도, 도시성장억제구역도 자료는 한 시기의 자료가 필요하다. 하지만, 개량된 SLEUTH3-r 모형의 경우, 도시영역 및 도로망도의 2개 이상의 입력 자료만 있어도, 모형을 수행할 수 있게 개선되었다. 본 연구에서는 1975, 1980, 1985, 1990, 1995, 2000, 2007년의 토지피복 자료를 사용하였다. 이 중 1975년부터 2000년까지의 토지피복 자료는 보정에서 사용하였고, 나머지 2010년의 자료는 검증으로 위해서 사용 하였다(Fig. 2).

1975~1995년 토지피복자료는 국토해양부 국가 수자원관리 정보 시스템(Water Management Information System: WAMIS)의 대분류 토지피복도 자료를 사용 하였다. 도시영역도 보정 시 관측 값의 역할을 하게 되어 보정시 모의 값의 정확도를 결정하는 자료이다. SLEUTH 모형은 4개 이상의 시계열 도시 영역도를 필요로 한다. 도시영역도는 1995년~2010년까지 5년단위로 도시영역도를 사용하였다. 본 연구에서는 보정 시 1995년부터 2000년까지 6개의 시계열 도시영역도를 사용하였고, 2010년은 입력 자료로 사용하지 않고 검증자료로 활용

Fig. 2. Land-use Classification and Urban Region Map of Namyangju-city.

하였다. 도로망도는 SLEUTH의 정밀한 보정을 위하여 입력해야 하는 필수자료로 도시 형성에 아주 중요한 영향을 미친다(Jeong *et al.*, 2002). 도로망도는 국가교통DB센터로부터 국토지리정보원이 1/5,000 축척으로 구축한 교통 주제도의 교통망데이터를 사용하여 Fig. 3(a,b)과 같이 고속국도, 도시고속국도, 일반국도, 특별·광역시도, 국가지원지방도, 지방도, 기타를 포함하는 도로망자료를 사용하였다.

도시성장의 가능여부를 판단하는 과정에서 사용되는 경사도는 국토지리정보원(National Geographic Information Institute, NGII)의 1:5,000 수치지형도를 바탕으로 작성한 DEM(Digital Elevation Model) 자료를 이용하여, ArcGIS 9.3 Spatial Analyst를 사용하여 경사도를 생산하였다. Fig. 3(c)와 같이 SLEUTH는 경사도의 격자 값으로 percent slope를 사용하므로, GIF Image의 격자별 픽셀 값은 percent slope 값을 의미한다. 음영기복도는 ArcGIS 9.3 Spatial Analyst와 DEM 자료를 이용하여 생산하였다. Fig. 3(d)의 도시성장억제구역은 물리적으로나 법제적으로 도시성장이 불가능한 지역을 의미한다. 이 입력 자료의 픽셀 값은 개발이 물리적으로나 법제적으로 불가능한 지역은 100 이상의 값을 가진다. 그 외 개발이

가능한 구역은 100 이하의 값을 가진다. 본 연구에서는 법제적으로 완벽히 개발이 제한되는 구역을 설정하기 위하여, 환경부의 국토환경성 평가 체계에서 법제적 평가 기준 중 1등급으로 지정되어 있는 구역을 추출하여 Fig. 3(d)과 같이 100 이상의 값을 갖는 도시성장 억제구역으로 설정하였다. 1등급으로 지정된 법제들은 자연환경부문 4개 법, 수질환경부문 3개 법, 기타 부문 6개 법이 포함이 된다.

3.2.2 모델 보정

보정의 목적은 연구대상지역의 과거의 도시성장 및 토지피복 변화를 잘 표현할 수 있는 다섯 개의 성장계수 값을 찾는 일이다. 기존의 SLEUTH 모델의 경우는 brute force 방법을 사용하며, 보정범위를 좁혀주기 위해서 입력 자료의 해상도를 Coarse, Fine, Final로 조절하여, 보정을 단계별로 실시한다. 최적 보정 값을 판단하기 위해서, SLEUTH3-r에서는 9개의 다른 통계량을 생산해 낸다. Jantz *et al.*(2010)의 최근 연구의 경우, 최적의 통계량으로 “군집상대차비율(Cluster Fractional Difference, CFD)”과 “격자상대차비율(Pixel Fractional Difference, PFD)”를 사용하였다. 본 연구에서는 최적 보정계수를

Fig. 3. Transportation, Slope, and Excluded Area of Namyangju-city.

찾기 위하여 Jantz *et al.*(2010)의 군집상대차 비율과 격자상 태차비율을 사용하였고 각 보정 시나리오의 5개의 보정 통계 량의 변화도 함께 분석하였다. 이때 선택된 5개의 보정 통계 량은 도시격자수(population), 군집수(Cluster), 평균 군집 크 기(cluster size), 총둘레(edges), Leesalee 계수이다. 이때 군집 수의 일치도는 영상의 산포의 일치도를 측정할 수 있으며, 총 둘레의 일치도는 두 영상 간의 일치도를 측정할 수 있다. Leesalee는 증가한 도시 셀 수 대비 두 영상간의 일치 셀 수의 비율을 나타내며, 대상지역 내의 셀 값이 도시와 비도시로 나 뉘므로 이 계수는 전체정확도를 나타낼 수 있는 통계량이다 (Jeong *et al.*, 2002).

3.2.3 모델 검정

본 연구에서는 최적의 보정 값을 찾기 위하여, 입력 자료를 바꾸거나, 변수를 다시 설정하거나 하는 방식으로 보정 방안 을 수립하였다. 보정 방안 Case1~Case3는 도시 영역의 모든 시계열 데이터를 사용하여 보정한 경우이다. Table 3과 같이 1975년부터 2000년까지 5년 단위의 자료를 모두 사용하여 1975~2000년까지의 25년간 장기간 성장 모의를 통해 보정한 경우이다.

보정 방안은 SLEUTH 모델의 자가변경 모드를 적용한 시 나리오이다. 이때 사용된 자가변경 모드 상수는 Table 4와 같 다. 각각 상수의 의미는 3장을 자세히 명시되어 있다. 예를 들

Table 3. Calibration Scenarios

Plan	Correction period	Land-use input data	Urban area input data	Dm value	SM application
Case1	1975-2000	1995, 2000	1975, 1980, 1985, 1995, 2000	0.011	◎
Case2	1995-2000	2005, 2010	1995, 2000, 2005, 2010	0.011	◎
Case3	1995-2000	2000, 2010	1995, 2000, 2005, 2010	0.011	◎

Table 4. Self Modification Constant Used in Validation

Constant	Value	Constant	Value
Critical Low	0.97	Bust	0.90
Critical High	1.30	Slope_Sensitivity	0.10
Boom	1.01	Road_gravity_Sensitivity	0.01

어, 이 상수에 따르면 SLEUTH는 보정 시 성장속도가 0.97보다 작으면, 침체성장주기로 들어가게 되어 10%씩 성장 속도를 줄이게 되고, 성장 속도가 1.3보다 크면, 증폭성장 주기로 들어가게 되어 성장속도가 1% 증가하게 된다. 반대로 짝수 번호의 시나리오는 자가 변경 모드를 사용하지 않고, 선형 선장으로 보정했을 때를 의미한다.

SLEUTH3-r의 경우 입력 자료가 2개 이상만 되도 보정을 할 수 있다는 이점을 이용하여, 시기별 도시 성장의 형태 및 특성 변화를 좀 더 자세히 살펴보기 위한 목적으로 보정을 실시하였다. 이때 토지 피복 및 도시영역 자료는 국토 해양부 WAMIS자료를 사용하였고, Dm 값은 0.11을 사용하였다. SLEUTH 모델의 검증은 최적보정계수를 이용하여 예측할 때 입력 자료와 보정계수의 변경 없이 2001년 이후 실측값이 존재하는 해까지 예측모드로 전망을 실시하고, 이때 모의 값과 실측값을 상호 비교 분석하였다. 본 연구에서는 2000년 이후 획득 가능한 토지피복자료가 환경부 EGIS 2005년 및 2010년 자료 활용이 가능하여 2010년을 검증 기준년도로 정하였다. SLEUTH 모델 결과 검증을 위해서 사용한 방법은 크게 두 가지로 하나는 연구대상지역 내에서 각 토지피복이 차지하는 비율을 비교하는 하는 방법이고, 다른 하나는 실제 관측에 의한 토지피복과 모의 값의 위치 일치도를 분석하는 방법을 사용하였다. Leesalee는 증가한 도시 셀 수 대비 두 영상간의 일치 셀 수의 비율을 나타내며, 대상지역 내의 셀 값이 도시와 비도시로 나뉘므로 이 계수는 전체정확도를 나타낼 수 있는 통계량으로, 일반적으로 SLEUTH3-r과 같이 도시화영역의 입력자료가 4개 미만으로 사용될 경우 OSM 수치 계산이 불가능하며, 이 경우 Leesalee 수치를 활용하여 정도 평가가 가능하다. 이와 같은 평가 결과를 토대로 남양주시를 대상으로

동일한 입력 형태를 구축하여 토지이용변화예측을 실시하게 된다. 본 연구에서는 토지이용변화 예측의 적합도 향상을 위해서 Table 5와 같이 구축된 다양한 방안을 통한 OSM과 Leesalee의 검토를 통해서 Case3 방안을 활용한 토지이용변화 예측을 채택 적용하였다.

3.2.4 토지이용변화 예측 결과

예측 정도의 평가는 전체정확도를 나타낼 수 있는 통계량인 Leesalee와 일반적 OSM 수치를 활용하였다. SLEUTH3-r 적용 결과 금회 연구에서 분석한 시나리오 중에서 AT3의 입력 자료 구축의 형태가 다소 높게 산정되는 것으로 나타나 이를 기준으로 적용하였다. 남양주시 토지이용변화에 대한 예측 정도를 판단하기 위해서 2010년 실측치와 예측치의 토지이용현황별 비교 매트릭스를 작성하였다. Table 6과 같이 전체적으로 실측치와 비교해서 평균적으로 시가지는 93.5%, 농경지 93.0%, 초지 90.4%, 산림 97.7%, 수역 92.1%, 습지 84.7%, 나지 88.8%의 예측 정도를 보였다.

SLEUTH3-r 모형의 분석 결과에 따라 남양주시 2030년 토지이용변화 예측치에 대한 비교 매트릭스를 작성하였다. 남양주시 토지이용현황별 예측정도에 대한 총괄표는 Table 7과 같고, 남양주시 토지이용현황별 2010년 실측치와 예측치 비교 결과이다.

전체적으로 2010년 대비 2030년에는 남양주시 시가지는 168.7%, 농경지 77.7%, 초지 77.0%, 산림 99.7%, 수역 86.8%, 습지 66.0%, 나지 71.57%로 변화가 예상된다. 비교적 시가와 지역이 크게 나타나는데, 이는 SLEUTH3-r 모형이 도시화산 모형이라는 점과 금회 분석 시에 도시지역을 포함한 기타지역의 변화 양상에 초점을 맞춘 분석 시행에 따른 영향이 지배적인 것으로 판단된다. 이상의 결과를 토대로 한 2020년, 2030년 남양주시 토지이용변화예측 결과는 Fig. 4와 같다.

3.3 도시유출모형 분석

기후변화분석 및 도시유출모형의 검증을 위해서는 대상지 인근의 기상관측소의 관측 자료가 필요하므로 남양주시 주변의 기상청 관할의 기상관측소인 서울측후소 자료를 활용하였

Table 5. Value of OSM and Leesalee in the Case of Landuse Variation Prediction

Plan	Urban area input data	OSM	Leesalee	Adoption
Case1	1975, 1980, 1985, 1995, 2000	0.5822	0.2509	
Case2	1995, 2000, 2005, 2010	0.488	0.4682	
Case3	1995, 2000, 2005, 2010	0.6578	0.5979	◎

Table 6. Comparison between Landuse Survey and Prediction result in 2010 of Namyangju-city

Classification	Landuse prediction result(%)						
Classification	Urban	Agricultural	Grassland	Forrest	Waters	Wetland	Bare land
Namyangju-city	93.5	93.0	90.4	97.7	92.1	84.7	88.8

Table 7. Prediction Comparison of Landuse Change in 2010 and 2030 of Namyangju-city

Classification		Prediction								2010yr. landuse area
		Urban	Agricultural (Agri.)	Grassland	Forrest	Waters	Wetland	Bare land	NoData	
Real	Urban	50,238	4,086	734	3,541	255	129	533	0	59,515
	Agri.	36,282	83,674	642	9,487	865	341	359	0	131,649
	Grassland	2,653	1,374	10,187	2,976	173	60	134	0	17,557
	Forrest	5,165	10,760	1,470	234,112	334	84	759	0	252,685
	Waters	2,296	847	184	311	10,611	358	139	0	14,746
	Wetland	1,496	541	60	100	426	2,203	96	0	4,921
	Bare land	2,279	893	248	1,309	141	72	5,323	0	10,266
	NoData	15	0	0	4	0	0	0	15	35
2030yr. landuse area		100,425	102,177	13,524	251,838	12,806	3,247	7,343		491,359
Maintaining	Cell no.	50,238	83,674	10,187	234,112	10,611	2,203	5,323		396,347
	ratio(%)	84.4	63.6	58.0	92.6	72.0	21.5	51.8		
Growth	Cell no.	50,186	18,503	3,337	17,726	2,195	1,044	2,020		95,011
	ratio(%)	84.3	14.1	19.0	7.0	14.9	1.3	19.7		
Landuse conversion	Cell no.	9,277	47,976	7,370	18,573	4,135	2,718	4,943		
	ratio(%)	15.6	36.4	42.0	7.4	28.0	55.2	48.2		
2030yr. area variation ratio(%)		168.7	77.6	77.0	99.7	86.8	66.0	71.5

Fig. 4. Prediction Result of Landuse Change in 2010 and 2030 of Namyangju-city.

다. 유출분석은 최근 남양주시에서 침수가 발생한 도농배수분구 주변을 대상으로 제한하였다. 남양주시는 계측유역이 아니므로 SWMM 모형의 매개변수의 선정은 모형의 정도를 향상하는데 매우 중요한 요소이다. 그러므로 2011년 침수피해가 발생한 도동배수분구 주변을 대상으로 실 강우사상을 토대로 침수심과 침수범위 및 우수관거의 흔적 홍수위를 토대로 모형의 매개변수를 보정하고 다양한 시행착오를 통해 매개변수를 선정하였다. 채택된 모형의 매개변수는 기후변화 시나리오를 고려한 침수해석과 기후변화 및 토지이용변화를 고려한 침수해석 방안 모두에서 동일하게 적용된다.

3.3.1 ALT1: 기후변화(Climage Change) 시나리오를 고려한 침수분석

기후변화 C1, C3, C5 시나리오를 고려하여 도시유출모형으로 분석한 침수면적을 계산한 결과를 도시하였다(Fig. 5). 대상지역의 도달시간이 짧아 각 빈도별 지속기간 6시간까지 침수면적이 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 지속기간 6시간을 초과하는 경우 침수가 발생하지 않는다.

기후변화 시나리오를 고려한 SWMM 모형으로 침수분석 후 최대 침수면적 산정 결과에 대하여 시나리오, 재현기간 및 지속기간별 비교 분석을 실시하였다. 최대침수면적을 결과를

Fig. 5. Inundation Area with Return Period-Duration Caused by Climate Change Scenario (ALT1).

살펴보면, C1 시나리오에 비해 C3와 C5의 침수면적이 빈도 · 지속기간별 침수면적이 증가하는 경향을 보였으며, 지속기간이 짧은 경우 침수면적의 증가폭은 크게 나타났다. 그리고 전 시나리오에서 지속기간 60분에서의 침수면적이 가장 크고, 빈도가 커질수록 침수범위는 확대되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 기후변화 시나리오에 따라 현 상태의 배수관거의

통수능은 크게 부족하여 내수침수의 범위가 확대될 것으로 분석되었다.

3.3.2 ALT2: 기후변화와 토지이용변화(Landuse Change)를 동시에 고려한 침수분석

SLEUTH3-r 모형의 분석 결과에 따라 남양주시 2030년 토

(a) C1 scenario

(c) C5 scenario

(b) 10yr. return period inundation area(C1)

(d) 10yr. return period inundation area(C5)

Fig. 6. Inundation Area with Return Period-Duration Caused by Climate and Landuse Change (ALT2).

지이용변화 예측치에 대한 비교 매트릭스를 작성 결과를 토대로 2010년 대비 2030년에는 남양주시 시가지는 168.7%, 농경지 77.7%, 초지 77.0%, 산림 99.7%, 수역 86.8%, 습지 66.0%, 나지 71.57%로 변화가 예상된 결과를 토대로 침수분석을 실시하였다. 여기서 기후변화 시나리오는 2100년까지를 반영한 C7 시나리오까지 검토되었으나, 토지이용변화 예측은 2100년까지의 예측 모의를 하더라도 결과의 신뢰도가 매우 부족하기 때문에 2030년까지의 토지이용변화만을 고려한 SWMM 침수분석을 실시하였다. 토지이용변화예측 결과와 기후변화 시나리오를 동시에 반영한 침수분석 흐름은 Fig. 6과 같다. 분석을 토대로 기후변화만을 고려한 결과와 비교를 실시하였다.

기후변화와 토지이용변화를 고려한(ALT2) 재현기간 및 지속기간별 침수면적 및 침수구역도 분석 결과를 Fig. 6에 도시하였다. ALT1 방법에 비해 지속기간별 최대침수면적이 다소 증가하며, 침수면적 변화 곡선이 완만해지는 것으로 나타났다. 전반적인 최대침수면적을 결과를 살펴보면, 기후변화의 양상과 동일하게 지속기간이 짧은 경우 침수면적의 증가폭은 크게 나타났다. 그리고 전 시나리오에서 지속기간 60분에서의 침수면적이 가장 크고, 빈도가 커질수록 침수범위는 확대되는 것을 확인할 수 있다.

4. 종합분석

SWMM 모형을 활용하여 기후변화 C1~C7 시나리오만을 반영한 방안(ALT1)과 기후변화 및 남양주시 2030년 토지이용변화를 동시에 반영한 방안(ALT2)에 대한 침수분석 후 최대침수면적 산정 결과에 대하여 시나리오, 재현기간 및 지속기간별 종합 비교 분석을 실시하였다. 최대침수면적의 비교를 위해서 2010년 확률강우강도식을 적용한 결과를 기준으로 하였다. 시나리오별 침수면적을 제시한 Fig. 7을 살펴보면 ALT1 경우와 유사하게 C1~C4 기후변화 시나리오의 침수면적은 빈도별 지속기간의 변화에 따라 지속적으로 증가하는 경향이 있으나, C5~C7 시나리오의 경우 침수면적이 지속기간에 따라 다소 감소하는 양상을 보이는 것으로 나타났다. C1~C4 시나리오보다 C5~C7 시나리오의 침수면적이 전체적으로 크게 발생하며, 전 시나리오에서 지속기간 60분에서의 침수면적이 가장 크고, 빈도가 커질수록 침수범위는 확대되는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 분석한 기후변화를 고려한 확률강우량의 빈도별 증가 패턴과 유사하게 최대침수면적이 증가하는 경향이 있으며, 기후변화만을 고려한 침수면적과 동일하게 전반적으로 C1~C5까지 증가 후 C5~C7의 변화율은 작기 때문에 C1~C5의 증가율을 Table 8에 제시하였다.

Fig. 7. Inundation Area Comparison with Return Period-Duration Caused by Climate Change(ALT1) and Landuse Change (ALT2).

Table 8. Inundation Area with Return Period-Duration Caused by CC and CC+CL

CASE			5yr. Return Period	10yr. Return Period	30yr. Return Period
2010yr.		Inundation area	9,252.0	18,504.0	62,820.0
C1	ALT1	Inundation area	24,948.0	52,272.0	74,340.0
		change(%)	169.6	182.5	18.3
	ALT2	Inundation area	27,648.0	54,288.0	77,688.0
		change(%)	198.8	193.4	23.7
C3	ALT1	Inundation area	56,988.0	77,112.0	118,080.0
		change(%)	516.0	316.7	88.0
	ALT2	Inundation area	42,840.0	65,952.0	103,392.0
		change(%)	363.0	256.4	64.6
C5	ALT1	Inundation area	61,344.0	88,092.0	131,040.0
		change(%)	563.0	376.1	108.6
	ALT2	Inundation area	63,108.0	90,252.0	129,636.0
		change(%)	582.1	387.7	106.4
C7	ALT1	Inundation area	61,056.0	83,844.0	122,760.0
		change(%)	559.9	353.1	95.4
	ALT2	Inundation area	62,820.0	87,408.0	127,440.0
		change(%)	579.0	372.4	102.9

(a) 10yr. Return Period(ALT1)

(b) 10yr. Return Period(ALT2)

(a) 30yr. Return Period(ALT1)

(b) 30yr. Return Period(ALT2)

Fig. 8. Inundation Area with Return Period-Duration Caused by Climate and Landuse Change (ALT2).

토지이용변화까지 포함하여 분석한 기후변화 시나리오에 따른 증가율을 검토한 결과 5년 및 10년 빈도 지속기간 60분에서 가장 증가율이 30년 빈도에 비하여 높게 나타났다. 이와 같은 경향은 기후변화만을 고려한 증가율 양상과 동일하지만 증가율은 상대적으로 작으며, 이는 기후변화를 고려한 침수면적이 상대적으로 크게 발생하므로 이로 인해 침수면적의 증가율이 둔화되는 것으로 판단된다.

ALT1과 ALT2 방법에 대한 침수분석을 통한 침수면적의 시나리오-지속기간별 증감률 변화 추이는 Fig. 8에 제시하였다. C3 시나리오를 제외하고 전반적으로 ALT1 방법에 비하여 토지이용변화까지를 반영한 ALT2의 경우에서 10년빈도 약 20% 이내, 30년빈도 약 10% 내외로 크게 발생하는 것으로 나타났다. 여기서 C3 시나리오의 경우에는 ALT1 방안이 크게 나타났다. 도시지역으로 도달시간이 짧기 때문에 지속기간이 짧은 60분에서의 증감률이 검토 대상 전체 빈도에서 상대적으로 크게 발생하였다. 이를 통해 향후 배수시설에 대한 안정성 확보를 위해서는 지속기간이 짧은 사상에 대해 대처가 중점적으로 필요할 것으로 판단된다. ALT1 방안의 지속기간이 긴 180분의 경우 비교 검토 기준인 2010년 확률강우사상 침수면적에 비해서 다소 감소하는 경향이 있으나 그 크기는 유의할만하게 수준은 아니며, 단지 C1 시나리오에서만 발생하므로 현재의 배수시설 기준으로 기후변화와 토지이용변화를 반영한 침수면적은 향후 크게 증가할 수 있음을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 기후변화와 토지이용변화에 따른 미래 도시 수문환경 변화에 대한 예측 분석을 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 시나리오에 따른 미래강우별 지속기간별 강우량 및 증감률 분석 결과 재현기간이 짧을수록 시나리오별 강우량 증가율은 커지고, 상대적으로 감소율도 커지는 경향이 나타났다. 즉, 동일한 지속기간 60분에 대해 재현기간 5년이 30년 보다 증가율은 크게 증가하는 경향을 보였다.
- 2) 기후변화에 따른 미래 강우를 고려한 연구 대상지의 침수해석 결과 침수면적은 시나리오별 지속기간 360분까지 침수가 발생하는 것으로 나타났으며, 지속기간이 짧은 강우사상에 대하여 침수총량의 증가율이 크게 나타났고, 2100년까지를 고려할 경우인 시나리오 C7의 증가율이 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 도시지역으로 도달시간이 짧기 때문에 지속기간이 짧은 60분에서의 증감률이 검토 대상 전체 빈도에서 상대적으로 크게 나타난 것으로 판단된다.
- 3) 침수면적은 시나리오별 재현기간이 증가할수록 그 증가폭은 크게 줄어드는 경향이 나타났다. 즉, 짧은 재현기간

에서의 침수 가능성이 크게 증가하므로 향후 도시계획 시 이와같은 경향을 고려하여 계획에 반영하는 것이 바람직할 것이다.

- 4) 기후변화만을 고려한 경우(ALT1)과 기후변화 및 토지이용변화 예측 결과를 반영한 침수분석(ALT2) 결과 모두 침수특성치가 C1~C5까지 증가 후 C5~C7의 변화율은 작게 나타났다. 이는 확률강우량의 증가 추이와 유사하게 변화하는 경향이나 확률강우량의 경우 C1 시나리오 대비 C5의 증가율이 10년 빈도 약 25%, 30년 빈도 약 30%점을 고려할 경우 침수면적의 증가율이 상대적으로 큰 150% 이상으로 나타났다. 즉, 도심지 침수피해지역은 기후변화 및 토지이용변화에 따라 향후 피해 규모가 증폭될 수 있는 점을 고려한 효과적이고 유의한 대응대책 수립이 필요하다.
- 5) 토지이용변화를 고려한 침수해석 결과, 침수면적은 기후변화 시나리오에 따른 강우량의 변화만을 고려할 경우에 비하여 침수특성치의 증가율이 상대적으로 크게 나타났다. 그러므로 미래 기후변화에 따른 배수체계의 성능 제고를 위해서는 반드시 도심지의 토지이용변화예측을 반영한 침수해석을 통해 대안을 수립하는 것이 바람직할 것이다.

References

- Cho, D.h. (2008) Cellular Automata Based Urban Landuse Change Modeling Considering Development Density, *J. of the Korean Geographical Society*, Vol. 43, No. 124, pp. 117-133.
- Dietzel, C. and Clarke, K.C. (2006) Decreasing computational time of urban cellular automata through model portability. *Geoinformatica*. Vol. 10, No. 2. pp. 197-211.
- Hong, J.B., Kim, B.S., and Yoon, S.Y. (2006) Evaluation of Accuracy of the Physics Based Distributed Hydrologic Model Using VfloTM Model, *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 6B, pp. 613-622.
- Hsu, M.H., Chen, S.H., and Chang, T.J. (2000) Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system, *Journal of Hydrology*, Vol. 234, pp. 21-37.
- Jantz, C.A., Goetz, S.J., and Shelley, M.K. (2003) Using the SLEUTH urban growth model to simulate the impacts of future policy scenarios on urban land use in the Baltimore-Washington metropolitan area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31, pp. 1-15.
- Jeong, C.S. (2009) Study of Direct Parameter Estimation for Neyman-Scott Rectangular Pulse Model, *J. of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 11, pp. 1017-1028.
- Jeong, C.S., Heo, J.H., and Bae, D.H. (2004) Uncertainty Analysis of GCM Information in Korea Using Probabilistic Diagnostics, *J. of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 3, pp. 173-184.
- Jeong, J.J., Lee, C.M., and Kim, Y.I. (2002) Developments of Cellular Automata Model for the Urban Growth, *Korea Planners Association*, Vol. 37, No. 119, pp. 27-43.

- Keum, J.H., Ahn, J.H., Kim, J.H., and Yoon, Y.N. (2001) Parameter Estimation of a Point Rainfall Model, Neyman-Scott Rectangular Pulse Model, Proceeding of Korea Water Resources Association, KWRA, pp. 206-211.
- Kim, B.S., Kim, H.S., and Seoh, B.H. (2004) Evaluation of the Evapotranspiration Models in the SLURP Hydrological Model, *J. of Korea Water Resources Association*, Vol. 37 No. 9, pp. 745-758.
- Kim, G.S., Cho, H.G., and Yi, J.E. (2012) Parameter Estimation of the Neyman-Scott Rectangular Pulse Model Using a Differential Evolution Method, *J. of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 4, pp. 187-194.
- Kim, M.M., Lee, J.W., and Yi, J.E. (2007) Development of Grid-Based Distributed Runoff Model in Urban Area, *J. of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 1, pp. 25-38.
- Kim, S.J. and Jung, I.K. (2006) Land Use Change Prediction using Cellular Automata and Markov Chain, *KCID Journal*, Vol. 13 No. 1, pp. 110-117.
- Korea Environment Institute (2004) Development of Integrated Impact Assessment System to Support Climate Change Mitigation and Adaptation Policy in Korea II.
- Korea Environment Institute (2011) Development of Future Land Use Scenarios Consistent with Climate Change Storylines.
- Korea Meteorological Administration (KMA) <http://ccs.climate.go.kr/index2.html>
- Kunkel, K.E., Pielke, R.A., and Changnon, S.A. (1999) Temporal fluctuations in weather and climate extremes that cause economic and human health impacts: A review. *Bulletin-american Meteorological Society*, 80, 1077-1098.
- Lee, B.H. (2001) Applications of Geographic Information System and Expert System for Urban Runoff and Quality Management, *J. of Korea Water Resources Association*, Vol. 34, No. 3, pp. 253-263.
- Lee, C.H. and Han, K.Y. (2007) GIS-based Urban Flood Inundation Analysis Model Considering Building Effect, *J. of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 176, pp. 223-236.
- Legutke, S. and Voss, R. (1999). The Hamburg atmosphere-ocean coupled circulation model ECHO-G, Tech. Rep. 18, Dtsch. Klimarechenzent., Hamburg, Germany.
- Park, G.A., Ahn, S.R., Park, M.J., and Kim, S.J. (2010) Assessment of the Contribution of Weather, Vegetation and Land Use Change for Agricultural Reservoir and Stream Watershed using the SLURP model (II) - Calibration, Validation and Application of the Model, *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 2B, pp. 121-135.
- Park, H.S. and Cho, G.Y. (2008) An Empirical Analysis of Land use Changes in Daegu metropolitan City by Using Probabilistic Choice Model, *The Korea spatial planning review*, No. 58, pp. 137-150.
- Park, M.J., Shin, H.J., Park, G.A., and Kim, S.J. (2010) Assessment of Soil Moisture for a Soyanggang Dam Watershed using SWAT and MODIS Satellite Image, *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30 No. 4B, pp. 337-346.
- Phillips, B.C., Yu, S., Thompson, G.R., and Silva, N.de. (2005) "1D and 2D Modelling of Urban Drainage Systems using XP-SWMM and TUFLOW." 10th International Conference on Urban Drainage, Copenhagen, Denmark, August 2005, pp. 21-26.
- Rodriguez-Iturbe, D.E. Cox, and Valerie, I. (1987) Some Models for Rainfall Based Stochastic Point Process, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, Vol. 410, No. 1839, pp. 269-288.
- Shin, S.C., Yim, T.K., Moon, Y.J., and Yoon, Y.S. (2007) Analysis of flood discharge in urban area, Proceeding of Korea Water Resources Association, KWRA, pp. 356-360
- Smith, J., Phillips, B.C., and Yu, S. (2006) Modelling Overland Flows and Drainage Augmentations in Dubbo. 46th Floodplain Management Authorities Conference, March 2006.
- Terray, L., Valcke, S., and Piacentini, A. (1998) The oasis coupler user guide. Version 2.2. Technical Report TR/ CMGC/98-05, CERFAS.
- Velghe, T., Troch, P.A., De Troch, F.P. and Van de Velde, J. (1994) Evaluation of cluster-based rectangular pulse point process models for rainfall. *Water Resource Research*. Vol. 30, No. 10, 2847-2857.
- White, R., Engelen, G., and Uljee, I. (1997). The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. *Environment and Planning B: Planning and Design* 24, pp. 323-343.

Received	■ April 2, 2014
Revised	■ April 7, 2014
Accepted	■ April 21, 2014