



논문

# 기후변화가 반영된 도시 열환경 시뮬레이션 모델의 연구

## A Study on the Urban Heat Simulation Model Incorporating the Climate Changes

강종화, 김완수, 윤정임, 이주성, 김석철\*

(주)볼트시뮬레이션

Jonghwa Kang, Wansoo Kim, Jeongim Yun, Joosung Lee, Seogcheol Kim\*

BOOLT Simulation, Inc.

접수일 2018년 10월 1일  
 수정일 2018년 10월 11일  
 채택일 2018년 10월 16일

Received 1 October 2018  
 Revised 11 October 2018  
 Accepted 16 October 2018

\*Corresponding author

Tel : +82-(0)2-3477-1963  
 E-mail : sckim@boolt.co.kr

**Abstract** A fast running model comprising the climate change effects is proposed for urban heat environment simulations so as to be used in urban heat island studies and/or the urban planning practices. By combining Hot City Model, a high resolution urban temperature prediction model utilizing the Lagrangian particle tracing technique, and the numerical weather simulation data which are constructed up to year of 2100 under the climate change scenarios, an efficient model is constructed for simulating the future urban heat environments. It is applicable to whole city as well as to a small block area of an urban region, with the computation time being relatively short, requiring the practically manageable amount of the computational resources. The heat environments of the entire metropolitan Seoul area in South Korea are investigated with the aid of the model for the present time and for the future. The results showed that the urban temperature gradually increase up to a significant level in the future. The possible effects of green roofs on the buildings are also studied, and we observe that green roofs don't lower the urban temperature efficiently while making the temperature fields become more homogeneous.

**Key words:** Climate change scenario, Urban temperature field calculation, Morphological model, Micro-meteorology

### 1. 서론

지구온난화로 인한 기후변화는 도시 열환경에 큰 변화를 가져오는 요인으로 미래 기후의 변화를 예측하기 위한 다양한 기후변화 모델이 제시되고 있다. 기후는 해양 및 빙하의 변화와 지표 변화를 포함한 긴 시간 규모의 현상으로 기후변화 모델은 일반적인 기상예측 한계보다 더 긴 시간 규모를 고려한다.

오늘날 개발되고 있는 기후변화 모델은 목적에 따라 각기 다른 수준의 복잡성을 가진 모델 시스템으로 더욱 전문화되고 있는 추세이다. 기후변화 모델의 선

행 연구 사례로는 중국에서 개발된 인간 활동에 따른 탄소 배출원을 모델에 도입하여 기후변화에 대한 인위적인 영향을 시뮬레이션하는 BCC-CSM 모델(Wu, 2014)과 노르웨이에서 개발된 RCP 시나리오를 토대로 기후변화의 영향을 분석한 NorESM 모델(Iversen, 2013) 등이 있다.

기후변화 시나리오는 다양한 기후변화 모델의 총합으로 다양한 기후변화 경로를 몇 가지 특징으로 묶어 시간의 흐름에 따른 기후변화 양상을 정리한 것이다. 기후변화에 따른 도시 열환경 개선을 위해서는 현재의 도시계획과 기후변화 시나리오에 따른 미래

의 도시 열환경 변화를 선제적으로 파악하여 상황에 맞는 대책을 수립·시행하여야 한다.

도시 열환경 시뮬레이션 관련 선행연구사례를 살펴보면 외국의 주요 도시들에서 AWS (Automatic Weather System) 관측자료를 이용한 정확성이 향상된 도심 온도분포 시뮬레이션 모델들이 개발되어 사용되고 있는데 대만 북부지역과 일본 주요 도시의 열환경 연구에서는 미국에서 개발한 WRF 모델이 이용되었으며(Lin, 2016; Kusaka, 2012), 유럽의 기후변화 연구에서는 ENVI-met이 사용되었다(Huttner, 2009). 국내에서는 국립기상연구소가 베를린 공대와 공동으로 개발한 CAS (Climate Analysis Seoul) 모델(Yi, 2011)과 (주)볼트시뮬레이션이 한국건설기술연구원의 의뢰로 개발한 ACM (Air-City Model)이 있다(KICT, 2012).

기존의 도시 열환경 분석 모델들은 기후변화 시나리오가 반영되지 않은, 곧 AWS 관측자료를 이용하여 WRF나 ENVI-met과 같은 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics : CFD)을 기반으로 한 모델들을 적용하는 경우가 대부분으로 CFD에 기반한 분석 모델은 계산 부하가 크고 기술적 접근성이 떨어져 도시 계획이나 정책 입안을 목적으로 사용할 경우 큰 제약이 따른다. 또한 지금까지 살펴본 모델들 외에도 대부분의 연구들에서 주어진 조건에서 열환경을 분석하는 모델들이 주를 이루고 있는데 효율적인 도시 열환경 개선 연구뿐만 아니라 기후변화 관련정책을 수립 및 시행하기 위해서는 기후변화 시나리오와 도시계획의 특성에 따른 열환경 변화를 파악할 수 있는 분석 모델이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 CFD 모델링 기법에 의존하지 않고 도시 열환경 분석 시뮬레이션 모델에서 기후변화 시나리오를 반영하는 하나의 방안을 제시하였다. 또한 이를 활용하여 기후변화 시나리오가 주어졌을 때, 도시 공간 내 미시규모에서 발생하는 열환경 변화를 도출하고 도시계획 및 도시관리 분야에서 참고할 수 있는 정보를 신속하게 생성하는 모델을 개발하였다. 이를 토대로 기후변화에 따른 도시 열환경 변화 특성을

파악하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

## 2. 모델 구성

본 연구에서는 선행연구를 통하여 개발된 HCM (Hot City Model)을 개량하여 기후변화 효과를 고려할 수 있는 열환경 시뮬레이션 모델도구를 개발하였다. HCM은 도시계획 등에 활용하기 위해서 개발된 고속계산용 미기상 모델(low fidelity model)로, 미시와 거시규모의 열환경 모델링을 동시에 수행할 수 있는 모델이다(Kim, 2011). 과학계산용 언어인 Fortran 2003으로 작성된 HCM은 1) 열원모듈, 2) 기류모듈, 3) 열확산모듈, 그리고 4) 역추적모듈로 구성되어 있다. 각각의 모듈은 차례대로 1) 도시공간 내에서 현열이 발생하는 과정, 2) 현열을 대기 중으로 이동시키는 기류가 형성되는 과정, 3) 기류에 의해서 현열 에너지 입자가 확산되는 과정을 계산한다. 4) 역추적모듈은 HCM에 의해 계산된 기온분포가 관측온도에 부합하도록 역추적 모델링 기법을 이용하여 열원 분포를 보정함으로써 모델링 정확도를 향상시킨다.

열원모듈은 모델링 공간에 위치한 물체 표면에서 발생하는 현열을 계산하는 부분으로 국내 관측데이터에 맞추어 보정된 De Bruin and Holtslag (1982)의 경험식을 사용하였다. 도시공간에서 열원모듈의 정확도를 향상시키기 위하여 본 연구에서는 기존 HCM 열원 모듈에 몇 가지 현상요소를 추가하였다. 즉, 그림자에 의한 태양복사열 차단, 복사열 냉각 혹은 가열에 관여되는 천공율(sky view factor) 효과, 그리고 콘크리트나 수공간 등에서 발생하는 열의 저장 효과를 추가함으로써 기존 HCM 열원모듈을 개량하였다. 모델링 공간 내에 건물이 많고 음영 지형이 있는 경우 그림자를 계산하는 과정에는 많은 연산이 요구된다. 본 연구에서는 Lindberg and Grimmond (2010)가 제시한 방법을 적용하여 격자로 정의된 모델링 공간에 대한 그림자 계산 알고리즘을 구현하였다. 천공율은 건물 등에 의해서 하늘이 차단되는 비

올로 하늘 전체에 가상의 태양이 떠 있다고 가정하고 보이는 태양의 개수를 전체 가상 태양의 개수로 나누어 천공율이다. 가상 태양의 그림자 내에 있는 관찰자는 해당 가상 태양을 볼 수가 없다. 따라서 가상 태양에 의한 그림자를 계산하면 이로부터 주어진 위치에서 해당 태양이 보이는지 여부를 알 수 있다. 결국 그림자 계산알고리즘으로써 천공율을 계산할 수 있다. 이에 본 연구에서는 천공율 계산모듈에도 그림자 계산 알고리즘을 동일하게 이용하였다. 천구면에 균등하게 배치된 가상의 태양으로부터 형성되는 모든 그림자를 계산하였다. 누적된 그림자 계산결과로부터 최종적으로 천공율을 산정하였다.

HCM에서 기류는 Monin-Obukhov 상사법칙(similarity law)을 적용하여 계산된다. HCM의 기류 계산 모듈은 지상 기상관측자료를 입력자료로 활용하며 상층 기상관측자료는 선택적으로 입력한다. 상사법칙이 성립되는 연직분포에서는 한 점(지상기상관측소, 예컨대 AWS의 측정점)의 풍향·풍속으로부터 모든 고도의 풍향·풍속이 결정될 수 있다(BOO-LT Inc., 2010). 도시공간에서 풍속은 건물배치에 의해 영향을 받게 되는데 HCM에서 도시공간의 풍속 분포는 morphological 모델로부터 산출된다. Morphological 모델에서 건물형상이 기류에 미치는 영향은 개별건물 단위로 고려되지 않고 일정 범위 내의 건물형태에 대한 통계량, 곧 morphological 파라미터의 함수로만 고려된다. HCM의 모델링 해상도는 morphological 파라미터를 정의한 공간 크기에 의해서 결정되는데 O(10)m 수준이다. 일반 PC 사양에서 HCM을 운용할 경우 수십 분 이내로 1개의 온도장을 생성할 수 있는 모델링 격자수는 O(10<sup>8</sup>)이다. 대기혼합층을 적절히 분석하기 위해서는 연직방향으로 100개 정도의 격자점이 대체로 적당하다. 따라서 최대해상도를 유지한 상태에서 HCM으로 PC에서 계산할 수 있는 도시공간의 수평범위는 가로 세로 각각 O(10)km 정도이다. 이는 서울시 정도의 규모를 O(10)m 해상도로 분석할 수 있는 수준이다. 대표적인 정밀 계산용 도구(high fidelity model)로 알려진 CFD 모델

과 비교하여 morphological 모델의 기류계산 정확도는 상대적으로 낮다. 반면 연산속도가 빠르고 모델링 비전문가가 운용하기에 용이하다는 장점이 있다.

대기 중에서 열이 확산되는 현상은 기류에 의해 발생한다. HCM에서는 라그랑지안 모델링 기법을 적용하여 열 입자를 추적함으로써 현열의 난류확산 과정을 모의한다(Kim, 2017). HCM을 구성하는 각 모듈은 열확산 모델링의 관점에서 그 기능을 요약할 수 있는데 열원모듈에 의해서 생성된 열 입자의 움직임은 기류모델에 의해 구성된 바람장을 토대로 열확산 모듈이 추적한다. 열 입자의 이동은 분 단위 혹은 그 이하로 추적하지만 열원과 기류를 갱신하는 주기는 1시간이다. 그 결과 HCM에서 생성되는 기온변화의 최소단위는 1시간이다. HCM 모델링 대상공간의 최대범위는 대도시 규모이고 기온변화를 추적하는 최소시간 단위는 1시간이다. 이에 반해 기후변화는 시·공간적으로 훨씬 큰 규모의 현상이다. 현상의 공간범위는 전지구적이며 현상변화의 시간단위는 년 단위 이상이다. 두 현상의 규모에 큰 차이가 있다는 점을 고려하여 본 연구에서는 기후변화 규모의 현상에 미치는 HCM 모델링 규모의 영향은 무시하였다. 참고로, 큰 규모의 기상현상에 포함된 작은 규모현상을 해석함에 있어서 상호작용을 단방향 작용으로 근사한 선행 연구사례(Oke, 1987)가 있다. 단방향 작용으로 근사할 경우 규모가 큰 기후변화는 상대적으로 규모가 작은 HCM 모델링에는 영향을 미치지 않지만 반대는 성립되지 않는다. 이러한 가정에 따라 HCM에 기후변화 효과를 반영하는 절차는 단순화된다. HCM과 연계되지 않고 진행된 기후변화 해석결과를 HCM에 적용할 수 있기 때문이다. HCM 모델링의 관점에서 기후변화 시나리오 데이터는 기상관측자료와 동일하다. 미래에 예상되는 기상관측자료인 셈이다. 본 연구에서는 널리 채택되고 있는 기후변화 시나리오를 HCM 모델링의 기상 입력자료로 사용하였다.

## 2.1 기후변화 시나리오

기후변화 시나리오는 기후변화 모델을 적용하여

산출된 기후자료로써 구체적으로 정의된다. 기후변화에 대한 미래 대응은 한가지로 확정될 수 없고 기후변화를 예측하는 과학적 모델 또한 다양하기 때문에 하나 이상의 기후변화 시나리오가 존재한다. 현재 채택되고 있는 기후변화 시나리오는 UN 산하 국제연합 기후변화에 관한 정부간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC)에서 제공하는 시나리오이다. IPCC는 2000년도에 발간된 보고서, Special Report on Emissions Scenarios (Nakicenovic, 2000)를 통해서 처음으로 RCP (Representative Concentration Pathway)를 배포하였다. 최근에는 2014년 IPCC AR5 (IPCC, 2014)를 통해 온실기체 농도에 따른 기후예측 시나리오 RCP를 공개하였다. 가장 최근에 배포된 RCP 시나리오를 국내에 적용하여 생산된 기상데이터가 기상청(기상청 기후정보포털, <http://www.climate.go.kr>)에서 일반에 제공되고 있다. 본 연구에서는 HCM의 기후변화 시나리오로 기상청 자료를 사용하였다.

RCP 시나리오는 인간 활동이 대기에 미치는 영향을 온실가스 농도에 따른 복사량 변화 추이를 통해 설명하는 시나리오로 RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5의 4가지 경로로 기후변화를 예측하고 있다. RCP 시나리오를 명명하는 숫자는 온실가스 등으로 에너지의 평형을 변화시키는 영향력의 정도를 의미하는 양으로 단위는  $W/m^2$ 이다. 지상에 도달되는 태양복사는 약  $238 W/m^2$ 이며 RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5의 복사강제력은 입사 태양복사량의 약 1.1%, 1.9%, 2.5%, 3.6%에 해당한다.

### 2.1.1 기후변화 시나리오 데이터

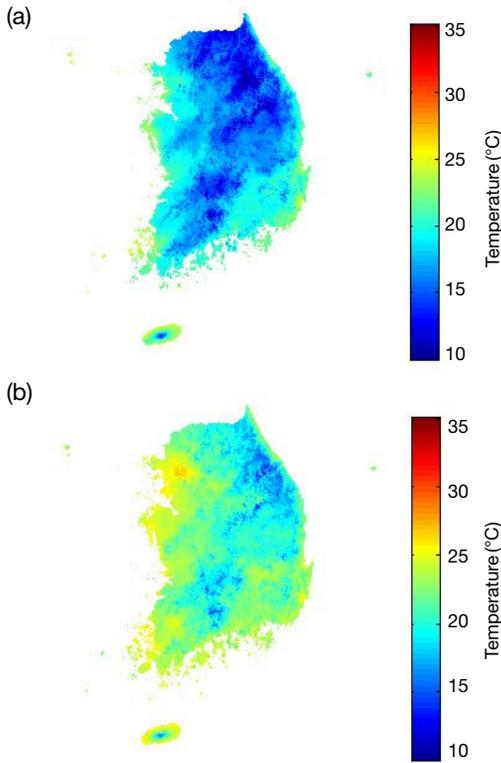
기상청 기후변화 시나리오 데이터는 격자단위로 구분된 공간에 대한 강수량, 일 최저기온, 일 평균기온 및 일 최고기온으로 구성되어 있다. 격자크기는 약  $1 km \times 1 km$ 이며 2011년부터 2100년까지 90년간 총 32,872일의 데이터가 각 시나리오를 구성한다. 그림 1은 RCP 2.6 시나리오에서 2030년과 2050년 8월 14일의 최저온도를 격자위치에 맞추어 색상으로 표

시한 것이다. 그림 2는 최고온도이다. 기후변화 시나리오 데이터는 위도  $33^\circ \sim 44^\circ$ , 경도  $123^\circ \sim 133^\circ$  범위의 한반도 전역을 경도방향 742개, 위도방향 1,258개의 등간격 격자로 나누어 격자별 기후자료를 제공하는데 유효데이터는 군사분계선 이북을 제외한 대한민국 전역을 포함한다. 그림 1과 그림 2에 제시된 연도별 8월 14일의 최저온도와 최고온도는 시간이 지날수록 높아지는 경향이 현저하다. 우리나라 전체 데이터, 곧 넓은 규모의 데이터에서는 기후변화 경향이 잘 드러난다.

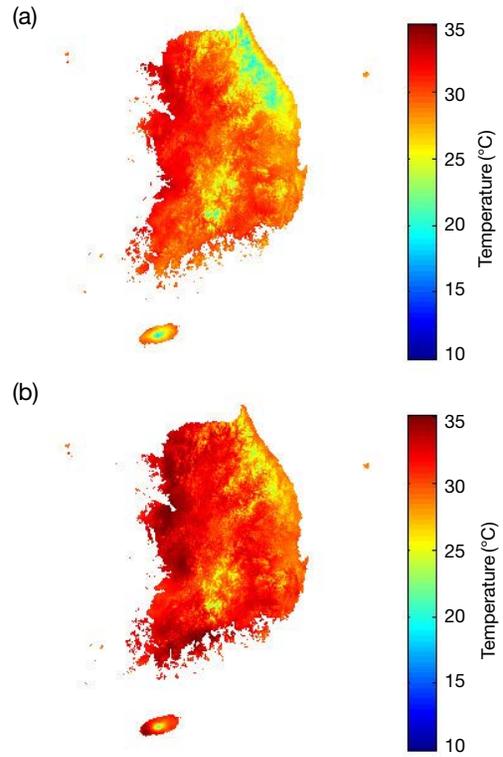
그림 3은 2011년부터 2100년까지 4개의 RCP 시나리오별로 8월 14일 하루에 대한 서울의 최저기온과 최고기온의 연도별 변화추이를 제시한 것이다. 서울시에 위치한 1,288개 격자에서 기후변화 시나리오 데이터를 추출한 후 평균하여 최저기온과 최고기온을 산출하였다. 이는 서울시 전체에 대한 공간평균기온에 해당한다. 긴 시간 추이를 살펴보면 서울에서 8월 14일 하루 최저 및 최고기온은 시간이 흐를수록 점차 증가하고, 증가의 정도는 RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5 순서대로 높게 나타난다. 긴 시간에 대한 추이에서 증가 경향이 상대적으로 뚜렷한 것과는 대조적으로 짧은 기간 동안의 변동은 불규칙하고 변동 폭도 크다.

공간적으로 넓거나 시간적으로 긴 데이터에서 기후변화 경향이 잘 드러나는데 이는 기후변화 데이터의 특징이다. 기후변화 시나리오 데이터에서 서울과 같은 공간규모는 상대적으로 협소해 단기적 변화는 기후변화의 경향보다는 기상시스템의 단기 변동성에 더 크게 영향을 받는다. HCM의 대상이 되는 모델링 공간범위는 서울규모 이하이다. 따라서 기후변화 시나리오 데이터가 적용된 HCM 결과를 해석할 경우 국지적 단기 변동을 기후변화에 의한 변동으로 오인하지 않도록 주의가 필요하다.

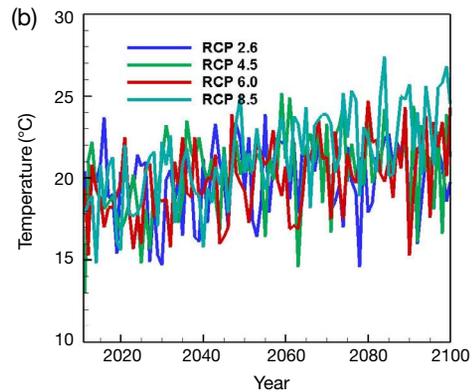
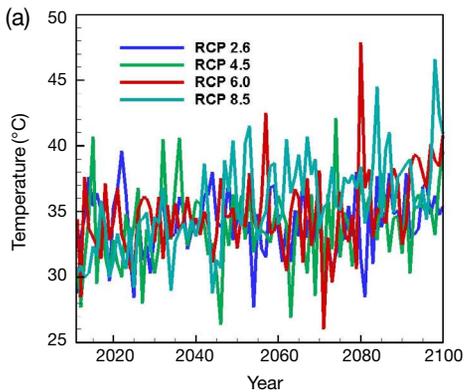
기후변화 시나리오 원본 자료는 1년 단위의 데이터가 1개의 파일로 제공되므로 파일크기가 방대하다. HCM 모델링에서는 모델링 영역 내에 있는 격자자료만 필요하므로 원본자료의 작은 일부, 곧 일부



**Fig. 1.** Daily minimum temperature in South Korea according to the RCP 2.6 scenario on August 14, 2030 (a) and August 14 2050 (b).



**Fig. 2.** Daily maximum temperature in South Korea according to the RCP 2.6 scenario on August 14, 2030 (a) and August 14, 2050 (b).



**Fig. 3.** Daily maximum temperature (a) and daily minimum temperature (b) of the metropolitan Seoul, August 14 from year of 2011 to 2100.

시간, 좁은 지역의 자료만 사용된다. 따라서 원본 파일에서 데이터를 추출하는 추가작업이 필요하며 이

를 위해 많은 시간이 소요되는 문제점이 있다. 이에 본 연구에서는 원 자료를 날짜별로 분리하여 기후변

화 시나리오 DB를 구성하고 이를 HCM 시스템에 적용하였다.

### 2.1.2 HCM 기후변화 시나리오 입력

기후변화 시나리오 데이터는 하루 단위로 구성되어 있는 반면 HCM에 사용하는 기상관측자료는 시간단위로 구성되어 있다. HCM에 기후변화 시나리오를 적용하기 위해서는 기후변화 데이터의 시간 해상도를 HCM의 분석시간 단위에 맞추어야 한다. 따라서 기후변화 시나리오의 1일 최저, 최고온도 값으로부터 시간단위 온도변화를 추정하는 기후변화 시나리오 적용 절차를 구성하였다.

기후변화 시나리오와 기상청 AWS의 기온 실측치와의 차이  $dT$ 는 다음 식으로 정의된다.

$$dT(t) = T_{RCP}(t) - T_{AWS}(t) \quad (1)$$

여기서,  $t$ 는 하루에 대한 시간으로 0과 23 사이의 정수이다. HCM에서 고려된 각 AWS의 위치에서 기후변화 시나리오 데이터로부터 같은 날짜에 대한 최저온도( $T_{RCP_{min}}$ ), 최고온도( $T_{RCP_{max}}$ )를 추출한 뒤, AWS 관측치와 비교하여 온도차를 다음과 같이 계산한다.

$$dT_{min} = T_{RCP_{min}} - T_{AWS_{min}} \quad (2)$$

$$dT_{max} = T_{RCP_{max}} - T_{AWS_{max}} \quad (3)$$

여기서,  $T_{AWS_{min}}$  과  $T_{AWS_{max}}$  는 AWS 실측치의 최소, 최고 값이며  $dT_{min}$  과  $dT_{max}$  는 두 데이터의 최소, 최고 값들의 차이이다.  $T_{AWS}(t)$ 는 시간이  $t_{min}$ ,  $t_{max}$  일 때에  $T_{AWS_{min}}$  과  $T_{AWS_{max}}$  이고 동일한 시간에  $T_{RCP}(t)$ 가  $T_{RCP_{min}}$ ,  $T_{RCP_{max}}$  이다. 이러한 조건으로부터 현재 일자의  $[t_{min}, t_{max}]$  혹은  $[t_{max}, t_{min}]$ 에서의  $dT$ 값을 선형보간법으로 추정하였다.  $t_{min}$ ,  $t_{max}$  사이 외의 시간대에는 전날 RCP 데이터의 최소, 최고 값 중 현재날짜 0시와 가까운 시간의 값과 뒷날 RCP 데이터의 최소, 최고 값 중 현재날짜 23시와 가까운 시간의 값을 이용하여 나머지 시간대의  $dT$ 를 직선 보간법을 적용하여 계산하였다. 하루 24시간의  $dT$ 를 적용한 온도  $T$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$T(t) = dT(t) + T_{AWS}(t) \quad (4)$$

이러한 방법으로 RCP 시나리오가 반영된 온도값은 기존의 AWS 기온 실측치를 대신하여 HCM에 입력된다. HCM에서는 새로운 온도값을 기준으로 계산을 수행하고 기후변화 시나리오를 반영한 온도분포가 생성된다.

## 3. 시뮬레이션 실험 및 결과 고찰

기후변화 시나리오가 적용된 HCM의 성능을 살펴보기 위해 사례지역에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 계산부하가 가장 높은 경우를 살펴보기 위해서 수도권을 사례지역으로 선정하였다. 서울을 중심으로 동서 방향으로 40 km, 남북 방향으로 30 km를 모델링 대상공간으로 설정하였다. 현열분포의 계산에 필요한 토지피복 정보는 30 m 공간해상도의 환경부 데이터를 사용하였고 기류계산을 위한 지형고도와 morphological model에 필요한 3차원 건물형상 및 위치정보는 국토지리정보원에서 제공하는 30 m 해상도의 DEM과 건물 데이터를 사용하였다. 지적도 정보는 사용하지 않았다.

시뮬레이션 영역에는 약 60만개의 건물이 포함되어 있다. 건물의 수평단면은 수치지도에서 제공되는 건물외곽선 각각의 꼭지점 좌표를 m 단위로 변환하여 사용하였다. 국토지리정보원 수치지도에는 건

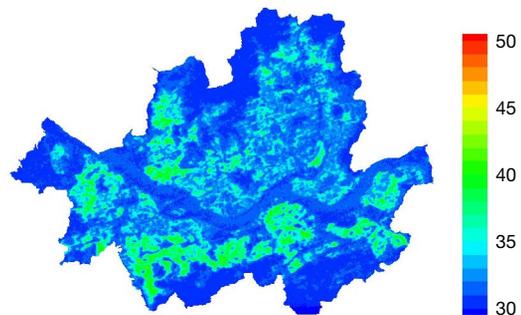


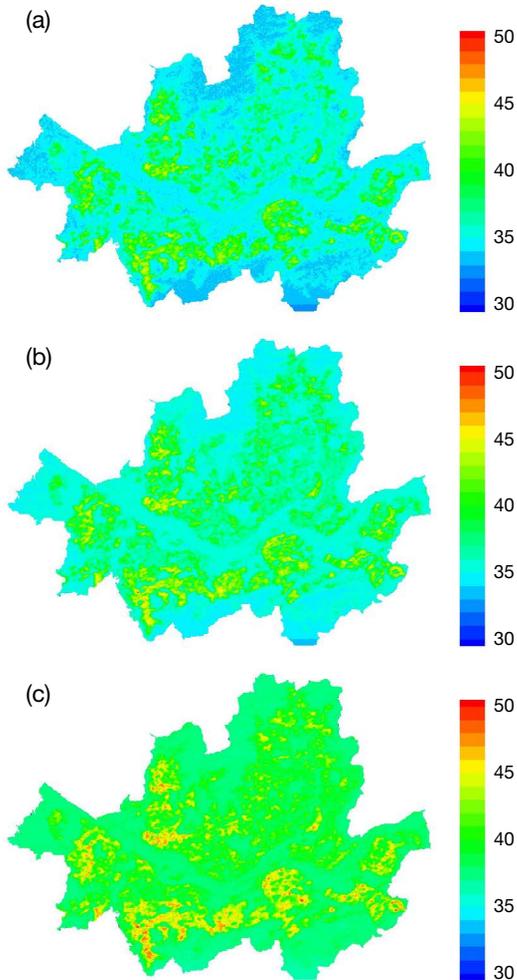
Fig. 4. HCM-calculated temperature (°C) distribution in the metropolitan Seoul, 14:00 August 14, 2015.

물의 층수는 포함되어 있으나 건물 높이가 제공되지 않는다. 따라서 건물의 층고를 일괄적으로 3 m로 가정하여 건물높이를 계산하였다. 기후변화 시나리오는 가장 현저한 차이를 보일 것으로 예상되는 RCP 2.6과 RCP 8.5를 적용하였다.

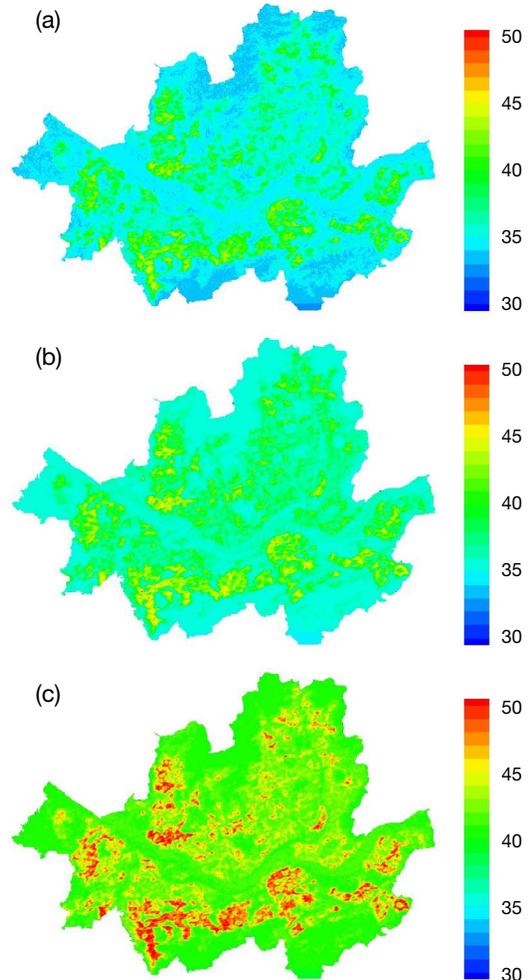
기상관측 데이터베이스에서 기온이 높았던 시간대를 임의로 선택하여 HCM으로 온도분포를 계산하였다. 그림 4는 2015년 8월 14일 오후 2시부터 3시까지 1시간 평균 기온을 HCM으로 계산한 결과이다. 동일

시간대의 기온분포임에도 불구하고 지역별 변화가 크다. 서울 도심의 건물 밀집지역에서 기온이 상대적으로 높고 한강과 같은 수변지역, 그리고 남산, 관악산, 북한산 등의 산지에서 기온이 상대적으로 낮게 나타났다.

HCM 모델결과로부터 서울에 대해 공간평균된 온도와 온도편차를 계산하면, 평균 기온은 32.52°C이며 표준 편차는 2.28°C이다. 기상청 국가기상종합정보 포털 날씨누리에서 확인한 결과 2015년 8월 14일 하



**Fig. 5.** RCP2.6 HCM-calculated temperature (°C) distribution in the metropolitan Seoul, 14:00, August 14 in the year of 2030 (a), 2050 (b), 2100 (c).



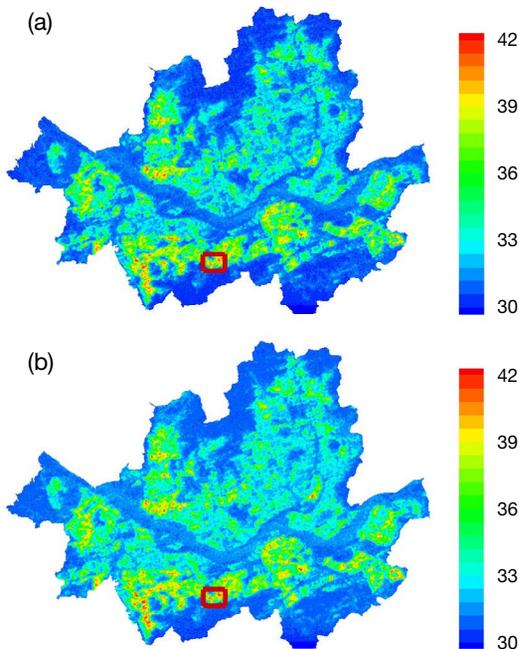
**Fig. 6.** RCP8.5 HCM-calculated temperature (°C) distribution in the metropolitan Seoul, 14:00, August 14 in the year of 2030 (a), 2050 (b), 2100 (c).

루 중 서울의 최고 온도는 32.5°C였다. HCM 모델결과와 비교하면 거의 일치하는 기온이다.

기후변화 시나리오를 적용할 때 서울의 온도 분포 변화 양상을 확인하기 위해 가장 뚜렷한 차이를 보이는 RCP 2.6 모형과 RCP 8.5 모형을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 2030년, 2050년, 2100년의 같은 날, 같은 시간, 곧 8월 14일 오후 2시 서울의 온도분포

**Table 1.** Mean and standard deviation of temperature in Seoul in 2015 and in 2030, 2050, 2100 following RCP 2.6 and 8.6.

Case	Avg. [°C]	Std. [°C]
2015	32.52	2.28
RCP 2.6 2030	35.92	2.30
RCP 2.6 2050	36.92	2.32
RCP 2.6 2100	39.20	2.32
RCP 8.5 2030	35.92	2.30
RCP 8.5 2050	37.32	2.31
RCP 8.5 2100	42.52	2.36

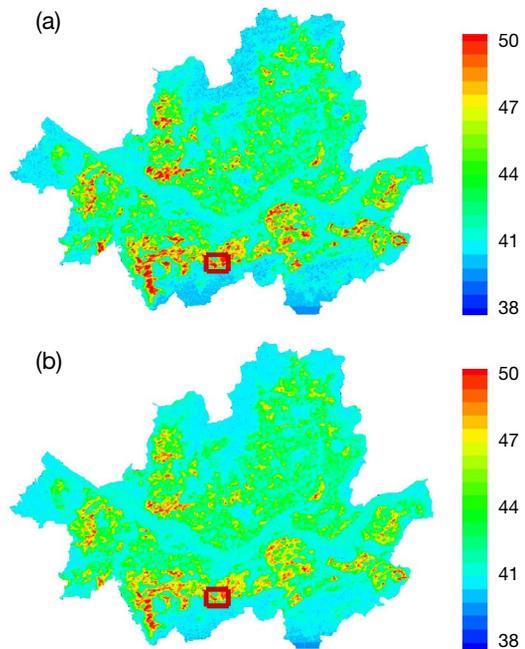


**Fig. 7.** HCM-calculated temperature (°C) distribution in the metropolitan Seoul, 14:00, August 14, 2015, when the entire buildings have all gray roofs (a) or when have all ideal green roofs (b).

를 계산하였다. 그림 5와 그림 6은 각각 RCP 2.6 모형과 RCP 8.5 모형을 적용하였을 때의 예측결과이다.

표 1은 그림 3부터 그림 5까지 제시된 각각의 시물레이션으로부터 산정된 공간평균온도와 온도편차를 제시한 것이다. RCP 2.6 모형에 의하면 서울의 8월 14일 오후 2시 지역평균 온도는 2030년 35.92°C에서 2100년 39.20°C로 3.28°C 만큼 상승한다. RCP 8.5 모형을 따를 경우 2030년 35.92°C에서 2100년 42.52°C로 6.6°C 상승한다.

공간평균 기온이 기후변화 시나리오에 따라 증가 정도가 상당히 다르게 나타난 것과는 대조적으로 서울 시내 지역간 기온편차, 곧 더운 곳과 시원한 곳의 온도차는 기후변화 시나리오와 비교해 상대적으로 더 둔감한 것으로 나타났다. 기온편차 또한 시간이 지날수록 증가하였으나 그 값은 평균온도와 비교하면 훨씬 작게 나타났다. RCP 2.6 모형에서는 평균온



**Fig. 8.** RCP8.5 HCM-calculated temperature (°C) distribution in the metropolitan Seoul, 14:00, August 14, 2100, when the entire buildings have gray roofs (a) or when have all ideal green roofs (b).

도가 3.28°C 만큼 상승하는 동안 온도편차는 0.02°C 만큼 상승하고, RCP 8.5 모형에서는 평균온도가 무려 6.6°C 만큼 상승하는 동안 온도편차는 0.06°C 만큼 상승한 것으로 나타났다.

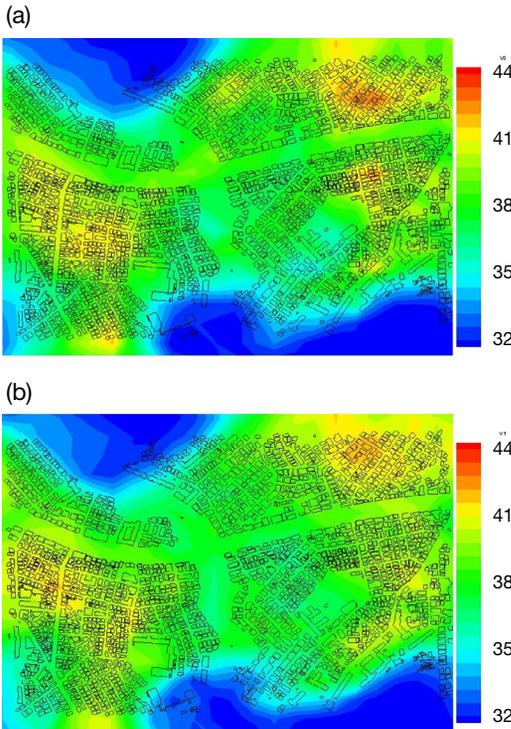
RCP 2.6 모형에 비해 RCP 8.5 모형의 평균온도 상승이 더 두드러지게 나타났으나 이는 8월 14일 오후 2시에 대한 결과이므로 해석에 주의가 필요하다. 기후변화에 의한 장기효과를 살펴보기 위해서는 1시간이 아닌 보다 긴 기간에 대한 시뮬레이션 결과를 분석하여야 한다.

도시 설계 요소가 열 환경에 미치는 영향을 살펴보기 위해 서울시 건물전체에 옥상녹화를 적용한 극단적인 경우를 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 반대로 극단적인 경우, 즉 어떤 건물에도 옥상녹화가 적용되지 않은 경우 역시 비교를 위하여 시뮬레이션

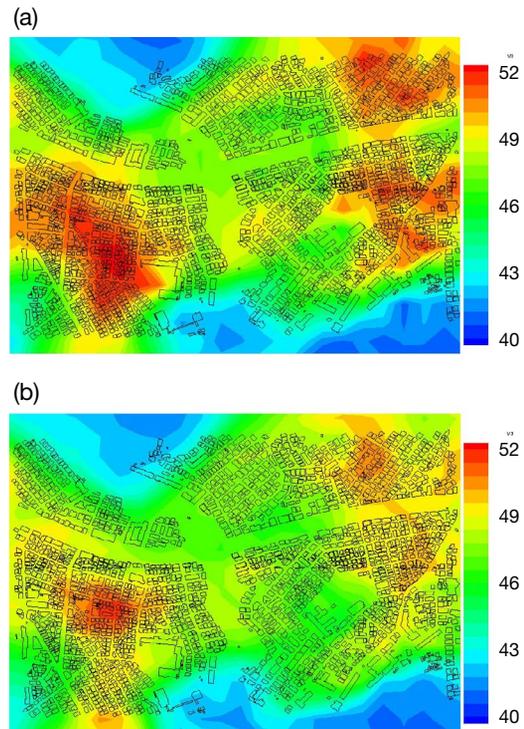
하였다. 그림 7은 2015년 8월 14일 오후 2시의 기온분포로 (a)와 (b)는 각각 옥상녹화를 적용하지 않은 결과와 적용한 결과이고 그림 9는 그림 7에 사각형으로 표시된 지역을 확대하여 나타낸 것이다. 두 경우의 결과를 비교하면 전반적인 기온분포가 옥상녹화 유·무에 크게 영향받지 않는 것으로 나타났다.

기후변화가 진행되는 상황 하에서 옥상녹화의 영향을 확인하기 위하여 RCP 8.5 시나리오를 적용하여 2100년 서울의 온도 분포를 계산하였다. 그림 8에 제시된 결과에 따르면 전반적으로 건물의 옥상녹화가 온도분포를 크게 변화시키지는 않으나 그림 10에 제시된 결과와 같이 건물이 밀집된 공간의 기온을 감소시키는 효과는 기후변화가 진행될 경우에 더 크게 나타났다.

표 2는 그림 7과 그림 8에 제시된 각각의 시뮬레이



**Fig. 9.** HCM-calculated temperature (°C) distribution inside the red rectangle of Fig. 7 enlarged, 14:00, August 14, 2015, when the entire buildings have gray roofs (a) or when have all ideal green roofs (b).



**Fig. 10.** RCP8.5 HCM-calculated temperature (°C) distribution inside the red rectangle of Fig. 8 enlarged, 14:00, August 14, 2100, when the entire buildings have gray roofs (a) or when have all ideal green roofs (b).

**Table 2.** area-averaged temperatures and temperature variations in the metropolitan Seoul, calculated by HCM.

Case	Avg. [°C]	Std. [°C]
2015	32.52	2.28
2015GR (all buildings have the green roofs)	32.79	2.24
RCP8.5 2100	42.52	2.36
RCP8.5 2100GR (all buildings have the green roofs)	42.52	2.11

선 결과를 토대로 공간평균기온과 기온편차를 계산한 결과이다. 2015년의 경우, 옥상녹화를 시행함에 따라 공간평균 온도는 0.27°C 상승하고 기온편차는 0.04°C 감소한다. RCP 8.5 모형을 적용한 2100년의 결과를 비교해 보면 옥상녹화 시행시 공간평균 온도에는 변화가 없고 기온편차는 0.25°C 감소한다.

HCM은 도시 재개발이나 관리계획에 따른 건물과 도로의 배치변화, 옥상녹화, 쿨루프(cool roof) 등에 의한 피복면 성질변화 등의 도시계획적 활동이 기온에 미치는 영향을 시뮬레이션할 수 있다. 한 가지 사례로 본 연구에서는 서울전체의 건물을 옥상녹화했을 때 특정 시간의 기온에 미치는 효과를 정량화된 시뮬레이션 결과로 제시하였다. 옥상녹화가 도시 열환경을 모든 조건 하에서 개선시킬 것이라는 통념에 반해 그림 8과 표 2에 제시된 바와 같이 옥상녹화 이후 8월 14일 오후 2시의 공간평균 온도는 오히려 상승하였다. 또한 옥상녹화를 적용할 경우 2015년과 2100년 모두 서울시의 지역간 온도편차는 소폭으로 감소하였다.

이상의 시뮬레이션은 일반사양의 PC에서 수행하였다. 운영체제는 윈도우 10이며, CPU는 Intel (R) Core (TM) i7-3770K (3.5GHz), RAM은 32GB이다. 수평격자는 796 × 592개를 적용하였다. 기후변화 시나리오를 활성화했을 경우, 계산완료까지 약 581초 소요되었다. 동일한 계산조건을 유지한 상태에서 기후변화 시나리오 모델을 비활성화했을 경우에는 약 567초가 소요되었다. 기후변화 효과를 고려하기 위해서 14초가 더 소요되는 것으로 나타났다.

## 5. 결 론

기후변화를 고려한 도시계획용 열환경 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 기후변화 시나리오 데이터를 미래의 기상관측 자료로 간주함으로써 개발된 도시 미기상 모델의 분석기능을 기후변화 시나리오가 존재하는 임의의 미래시점까지 확장하였다.

서울시 전역이 포함되는 모델링 공간에 대해 사례 계산을 수행한 결과, 고해상도를 유지하면서도 기온 계산이 빠르고 안정된 형태로 수행되는 것을 확인하였다.

본 연구에서 개발한 도시 열환경 시뮬레이션 모델의 장점은 기후변화가 진행되는 미래 도시에 대해서 1시간 단위의 고해상도 기온 계산이 가능하다는 점을 들 수 있다. 또한 WRF로 다루기에는 너무 협소하고 ENVI-met으로 모델링하기에는 너무 광범위하여 다루지 못하였던 도시 규모에 대한 열환경 분석이 가능하다. 그러나 이와 같은 장점에도 불구하고 morphological 모델의 한계로 인해 정확도가 다소 떨어지는 단점이 있다. 따라서 향후 기류계산의 불확실성을 극복하고 열원과 온도 분포에 대한 모델링 정확도를 향상시킬 수 있는 추가적인 연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 18AUDP-B1024 06-04).

## References

- BOOLT simulation Inc. (2010) Development of Urban Micrometeorological Model Air-City Model (Phase 2 Study), BOOLT Report submitted to KICT, 55-67. (in Korean)
- De Bruin, H.A.R., Holtslag, A.A.M. (1982) A simple parameterization of the surface fluxes of sensible and latent heat during daytime compared with the Penman-

- Monteith concept. *Journal of Applied Meteorology*, 21(11), 1610-1621.
- Huttner, S., Bruse, M., Dostal, P., Katzschnner, A. (2009) June. Strategies for mitigating thermal heat stress in Central European cities: The project KLIMES. In The Seventh International Conference on Urban Climate, 49.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014) Climate Change 2014 Synthesis Report, [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_wcover.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf) (accessed on Feb. 26, 2018).
- Iversen, T., Bentsen, M., Bethke, I., Debernard, J.B., Kirkevag, A., Seland, O., Drange, H., Kristjansson, J.E., Medhaug, I., Sand, M., Seierstad, I.A. (2013) The norwegian earth system model, NorESM1-M-Part2: Climate response and scenario projections, *Geoscientific Model Development*, 6, 389-415.
- Kim, B., Lee, C., Joo, S., Ryu, K., Kim, S., You, D., Shim, W. (2011) Estimation of roughness parameters within sparse urban-like obstacle arrays, *Boundary-Layer Meteorology*, 139, 457-485.
- Kim, S. (2017) Study on Urban temperature prediction method using Lagrangian particle dispersion model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(1), 45-53. (in Korean with English abstract)
- Korea Institute of Civil engineering and building Technology (KICT) (2012) Technologies on Developing Eco-Housing Estate that Countermeasures Urban Climate Changes(V), <http://www.ndsl.kr/ndsl/commons/util/ndslOriginalView.do?dbt=TRKO&cn=TRKO201300035779&rn=&url=&pageCode=PG18> (accessed on Feb. 26, 2018).
- Kusaka, H., Hara, M., Takane, Y. (2012) Urban climate projection by the WRF model at 3-km horizontal grid increment: dynamical downscaling and predicting heat stress in the 2070's August for Tokyo, Osaka, and Nagoya metropolises, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 90B, 47-63.
- Lin, C.Y., Su, C.J., Kusaka, H., Akimoto, Y., Sheng, Y.F., Huang, Jr, C., Hsu, H.H. (2016) Impact of an improved WRF urban canopy model on diurnal air temperature simulation over northern Taiwan, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(3), 1809-1822.
- Linderg, F., Grimmond, C.S.B. (2010) Continuous sky view factor maps from high resolution urban digital elevation models, *Climate Research*, 42, 177-183.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Grubler, A., Riahi, K., Roehrl, R.A., Rogner, H.H., Victor, N. (2000) Special report on emissions scenarios (SRES), a special report of Working Group III of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press.
- Oke, T.R. (1987) *Boundary Layer Climates*, 2nd Ed., Methuen, London, 435pp.
- Wu, T., Song, L., Li, W., Wang, Z., Zhang, H., Xin, X., Zhang, Y., Zhang, L., Li, J., Wu, F., Liu, Y., Zhang, F., Shi, X., Chu, M., Zhang, J., Fang, Y., Wang, F., Lu, Y., Liu, X., Wei, M., Liu, Q., Zhou, W., Dong, M., Zhao, Q., Ji, J., Laurent, L., Zhou, M. (2014) An overview of BCC climate system model development and application for climate change studies, *Journal of Meteorological Research*, 28, 34-56.
- Yi, C.Y., Eum, J.H., Choi, Y.J., Kim, K.R., Scherer, D., Fehrenbach, U., Kim, G.H. (2011) Development of Climate Analysis Seoul (CAS) maps based on landuse and meteorological model, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 14(1), 12-25. (in Korean with English abstract)

## Authors Information

- 강종화 (주)볼트시뮬레이션 연구원)  
 김완수 (주)볼트시뮬레이션 선임연구원)  
 윤정임 (주)볼트시뮬레이션 책임연구원)  
 이주성 (주)볼트시뮬레이션 선임연구원)  
 김석철 (주)볼트시뮬레이션 대표이사)