

중규모 기상모델(WRF-ARW)을 활용한 서울시 옥상녹화와 쿨루프의 기온저감 효과 분석*

김희주** · 오규식*** · 이승재****

The Effects of Green and Cool Roofs on Temperature Reduction in Seoul using a Mesoscale Meteorological Model (WRF-ARW)

Heeju Kim** · Kyushik Oh*** · Seung-Jae Lee****

요약 : 도시열섬현상은 도시환경을 악화시키는 심각한 문제로 떠오르고 있다. 옥상녹화와 쿨루프는 도시 열섬현상 완화에 중요한 수단이며, 효과 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 연구에서는 서울시를 대상으로 옥상녹화와 쿨루프 조성이 가능한 건축물을 선정하고, 조성가능면적을 산정하는 알고리즘을 구축하였다. 그리고 중규모 기상모델 WRF를 활용하여 옥상녹화와 쿨루프 적용에 따른 기온저감 효과를 정량 분석하였다. 분석 결과, 2015년 기준 서울시 전체 건축물의 옥상면적 중 옥상녹화 조성이 가능한 면적은 54.7%였고, 쿨루프 조성이 가능한 옥상면적은 96.3%로 산정되었다. WRF 모델링으로 기온저감효과 분석 결과, 옥상녹화는 주로 야간(21시, 0.5℃)에 쿨루프는 주로 주간(15시, 2℃)에 기온저감 효과가 높게 나타났다. 또한 옥상녹화는 용산구·성동구·도봉구·노원구가, 쿨루프는 용산구와 송파구가 기온저감 효과가 큰 것으로 분석되었다. 이러한 연구 결과는 도시열섬 완화를 위한 도시계획·관리 대책 수립 시 기초자료로 활용될 수 있다. 그리고 이러한 수치모델을 활용한 과학적 분석 연구는 도시공간별 열환경 특성에 적합한 기온저감 대책 수립과 의사결정에 기여할 것이다.

주제어 : 도시열섬현상, 옥상녹화, 쿨루프, 도시기온저감, WRF

ABSTRACT : This study focuses on the city of Seoul where the effects of UHI occurs frequently. The algorithm was constructed to include the process that is selected buildings with a roof that is designed to be green and specially paved for cooling from existing buildings, and the area of green and cool paved roofs was calculated. For quantitatively analysis the effects of air temperature reduction by green and cool roofs, we employed the Weather Research and Forecasting (WRF) model. As a result, the roof area of the selected buildings for greening is 54.7% of the total roof area in Seoul. The roof area of the selected buildings for cool paving is 96.3% of the total roof area in Seoul. Simulations revealed from the WRF model analysis that there were noticeable effects of temperature reduction at different times. In case of night time, green roofs were found to be more efficient than cool roofs. On the other hand, the air temperature reduction effects of cool roofs appeared in the day time.

Key Words : Urban Heat Island, Green Roof, Cool Roof, Urban Temperature Reduction, WRF(Weather Research and Forecast)

* 이 연구는 국토교통부 /국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 18AUDP-B102406-04).

** 한양대학교 도시공학과 박사과정(Ph.D. Candidate, Department of Urban Planning and Engineering, Hanyang University)

*** 한양대학교 도시공학과 교수(Professor, Department of Urban Planning and Engineering, Hanyang University),
교신저자(E-mail: ksoh@hanyang.ac.kr Tel: 02-2298-5410)

**** 국가농림기상센터 연구개발부 책임연구원(Principal Researcher, National Center for AgroMeteorology)

I. 서론

1. 연구 배경 및 목적

인구의 도시 집중과 토지이용의 고밀화로 도시 지역에서 세계 에너지 자원의 75%가 소비되고 있다. 이 에너지의 일부는 열의 형태로 방출되고, 일부는 도시구조 내에서 축적되어 느린 속도로 방출되면서 도시지역의 기온이 주변지역보다 기온이 높은 도시열섬현상을 발생시킨다(Gago, 2013; Landsberg, 1981; Oke, 1982; Santamouris, 2001). 도시열섬현상은 국내외 다양한 연구에서 기온상승과 통풍불량 등의 환경악화를 유발하여 도시민 건강과 삶의 질에 부정적인 영향을 미치는 중요한 문제로 다루고 있다(Norton, 2015; 김운수, 2001; 명수정, 2009; 오규식 외, 2005).

도시열섬현상을 완화하기 위해 잠열량 증가, 열 유출을 증가시키거나 유입을 감소시켜 도시 에너지 균형을 목적으로 하는 공원·녹지 조성, 수목·식생녹화, 옥상녹화 등 녹지공간 확충, 알베도를 조절한 건물 지붕의 차열포장, 도시 지표면 마감재의 차열·투수 포장 같은 다양한 기법들이 제안되고 있다(Gago et al., 2013; Santamouris, 2014). 그러나 이러한 도시열섬 현상 저감기법의 적용은 개별 건물이 아닌 지역차원에서 적용이 필요하고, 이미 조성된 도시 형태와 물리적 요소의 변경은 많은 비용과 시간, 다양한 이해관계가 얽혀 있어 쉽지 않다. 이에 많은 연구가 건물 지붕면의 녹화와 차열포장을 적용한 쿨루프를 손쉽게 적용 가능한 대안으로 제시하고 있다(Zoulia et al, 2009; 강정은 외, 2012; 서응철, 2007).

한편, 최근에는 도시열섬현상을 포함하여 기후 변화로 발생하는 광범위한 지역문제 해결을 위해 수치모델 활용 연구가 활발하게 진행되고 있으며,

신뢰한 만한 결과를 보여주고 있다(Mirzaei et al., 2010; Ban-Weiss et al., 2015; Chen et al., 2013; Giannaros et al., 2013; Li et al., 2014; Peng et al., 2013; Rosenfeld et al., 1995; Rosenzweig et al., 2009; 김정호 외, 2010).

이 연구는 도시 기온저감 기법 적용을 위해 옥상녹화와 쿨루프 조성가능지 분석 알고리즘을 구축하고, 구축된 알고리즘에 따라 건축물을 도출한다. 그리고 도출된 건축물의 저감기법별로 수치모델을 활용하여 기온저감 효과를 정량적으로 분석한다. 이러한 결과를 바탕으로 도시열섬현상 완화를 위한 옥상녹화와 쿨루프 등 기온저감 기법의 공간적 입지 의사결정을 지원하기 위한 과학적 근거를 제시하고자 한다.

2. 연구 범위 및 방법

1) 연구 범위

대부분의 지역이 고온으로 도시열섬현상이 빈번하게 발생하는 서울시는 대한민국 전체인구의 20%이상이 거주하고 있는 대도시로, 지속적 기온 증가 시 열 인명피해가 클 것으로 예상되고 있다. 기상청(2015)에 따르면 서울의 2015년 6월 평균 기온은 23.6℃, 최고기온은 29.5℃로 기상관측이 시작된 1908년 이후 기온이 지속적으로 상승하고 있는 것으로 나타났다.

특히 최근 4년간(2011~2014년) 폭염일이 27일, 온열질환자 수가 2012년 119명에서 2014년 239명으로 2년간 120명이 증가하는 등 관련 피해가 지속적으로 증가하고 있다. 이러한 서울시를 대상으로 기상특성을 고려하여 수치모델 분석기간을 선정하였다. 열섬 피해가 큰 여름기간(6~8월)중 기온 외 다른 기상요인이 주는 영향을 최소화하기 위해 안정된 대기 상태로, 기온 변화가 급격하게

〈표 1〉 분석일 기상특성(기상청)

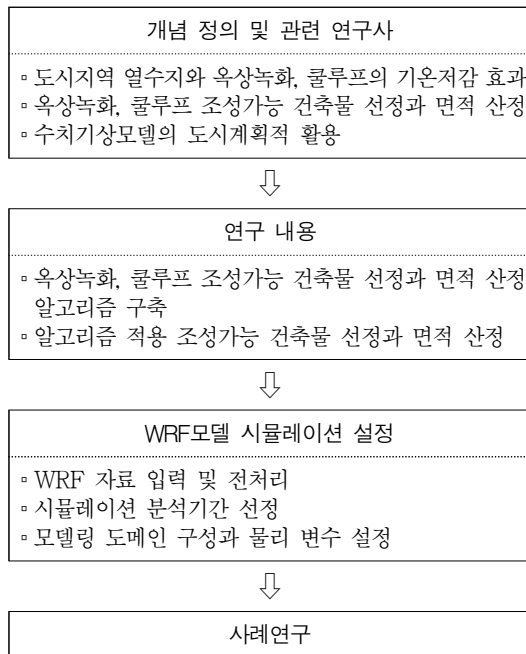
구분	기상특성
관측일	2015년 6월 10일
기온(℃)	17.6~34.9(일 평균:25.3)
평균운량	2.6
평균풍속	2.2m/s
일강수량	없음

운량: 강수현상이나 강수유무와 관계없는 하루 평균 구름의 양. 맑음(0~2), 구름조금(3~5), 구름많음(6~8), 흐림(9~10 이상)

발생하지 않고 분석일 전후로 강수가 없으며, 바람이 잔잔하고, 구름양 또한 거의 없는 일자를 찾아 다음과 같이 선정하였다(〈표 1〉 참조).

2) 연구 방법

옥상녹화와 쿨루프의 기온저감 효과가 가져오는 도시열섬현상 완화 효과를 알아보기 위해 도시 열수지와 열수지 측면에서 옥상녹화와 쿨루프의



〈그림 1〉 연구 흐름도

역할과 옥상녹화와 쿨루프의 실현가능성을 고려한 물리적 조성 기준, 수치모델을 활용한 정량 분석과 분석결과와 도시계획·설계, 관리 유용성을 살펴보았다(〈그림 1〉 참조)

3. 개념 정의 및 관련 연구사

1) 도시지역 열수지와 옥상녹화, 쿨루프의 기온저감 효과

지구 차원에서 열수지는 균형을 이루고 있고, 지표면에 입사되는 태양복사에너지는 지표면과 대기 사이의 온도차로 발생하는 현열, 상태변화로 발생하는 잠열, 지표면으로 이동되어 저장되는 열의 합과 평형을 이룬다(권병혁 외, 2009).

$$Q^* = Q_H + Q_E + Q_S$$

Q^* 는 태양 순복사에너지, Q_H 는 현열, Q_E 는 잠열, Q_S 는 저장열을 의미한다(Oke, 1987). 그러나 도시지역은 인공 피복면 증가로 열 저장용량과 전도율의 상승, 공원·녹지 면적 감소와 포장면 증가로 잠열이 줄어들었다. 이로 인해 지표면에서 대기 밖으로 배출되지 못한 열이 주변 대기로 전달되어 현열량이 증가하였다. 그리고 인간활동에 따른 에너지 소비량 증가도 열섬 현상을 가중시켜 열수지 불균형이 발생하게 되었다. 따라서 도시 열수지 측면에서 도시열섬현상을 방지하기 위해 각각의 에너지 평형요소가 유지될 수 있도록 도시 공간 내 잉여에너지의 적절한 소비 또는 공간 밖으로의 배출이 필요하다(Takebayashi et al., 2009; 서응철, 2007; 배웅규 외, 2011).

이 연구의 주 분석대상인 옥상녹화는 에너지의 잠열형태 사용으로 현열량 증가를 억제한다. 태양 복사에너지가 가장 먼저 도달하는 건물 지붕을 녹

화하여 식물로 태양복사에너지의 흡수를 낮추거나 차단하고, 식물과 토양의 증발작용 시 잠열 형태로 대기 중의 에너지를 사용하여 현열 증가를 억제시켜 주변 대기의 기온상승을 낮춘다. 다음으로 쿨루프는 건물 지붕으로 유입되는 현열량을 감소시켜 도시 기온을 낮추는 것이다. 즉, 건물 지붕을 흰색이나 밝게 채색하여 건물 지붕표면 알베도를 높여 태양복사에너지를 반사하거나 차단하여 흡수와 저장을 최소화하는 것이다. 태양복사에너지 중 열 작용이 강한 적외선을 반사하여 현열량을 감소시켜 일반지붕보다 건물 지붕과 주변 기온을 낮게 유지되도록 한다.

2) 옥상녹화와 쿨루프 가능 건축물의 선정과 조성가능 면적의 산정

노출된 도시공간에서 높은 곳에 위치한 건물 지붕면은 태양 복사에너지가 가장 먼저 유입되고, 개별면적은 작지만 총합은 도시지역에서 많은 면적을 차지하고 있다(Gaffin et al., 2009).

Susca et al.(2011)은 뉴욕시의 도시열섬 현상이 발생하는 4개 지역을 모니터링한 결과 옥상녹화 면적에 따라 기온차가 2℃ 나타났고, 기온저감에 긍정적인 효과를 나타낸다고 하였다. 이러한 기온저감 효과에도 불구하고 박은진 외(2012)에 따르면 옥상녹화는 중요성에 비해 활성화되지 않았고 가용 가능한 옥상면적의 일부만 녹화되어 있다. 특히 서울 같은 대도시는 대지 부족과 높은 지가로 도심지 내 녹지 확보가 어렵고, 도심 내 버려진 옥상을 녹지로 활용하는 것은 공간창출 측면에서도 중요한 의미가 있다(서울특별시, 2000).

옥상녹화와 쿨루프 조성가능 선정 관련 연구를 살펴보면 평지붕 건축물 중 선정된 건축물을 대상으로 일부 실측 또는 수치자료의 도형면적 산정 후 비율로 추정하는 등 객관적 기준과 근거가 부족하다(〈표 2〉 참조). 또한 관련 연구의 대부분이 경량형, 중량형, 혼합형 등 옥상녹화 유형, 토심에 따른 녹화 모듈, 식생종 선정(Grant et al., 2008; 류남형 외, 2013; 서울특별시, 2000; 이빛나라 외,

〈표 2〉 옥상녹화 조성가능 건축물 및 면적 분석 방법 관련 연구

출처	활용자료	선정 기준	면적 산정	대상지
박은진 외(2012)	건축물관리대장	건물 노후도: 1980년 이후 녹화 용이성: 평지붕 녹화 효과성: 주거시설, 교육시설, 공공시설, 의료시설, 업무시설, 판매시설	가정: 건축물용도별 건축형태가 유사 시 건축면적과 옥상면적 비율은 일정함 산정: 건물용도별 건축면적에 대한 옥상면적 비율로 추정	경기도
박효석 외(2014)	도시생태현황도 항공사진	평지붕 공공부문: 공공청사, 도서관, 문화시설, 체육시설, 교육시설(학교) 민간부문: 상업·업무 용도	산정: 샘플 건축물의 옥상시설물 면적 제외한 녹화가능 면적 실측, 건축면적 대비 옥상녹화 가능면적비의 평균값 적용	서울시
안지연 외(2016)	수치지도 (1:1,000)	85㎡ 이상의 건축물	산정: 건축물 도형 면적에서 건축물 경계부 2m 버퍼면적 제외	광진구
이현우 외(2010)	도시생태현황도 항공사진	평지붕	산정: 건축물 면적의 30%	서울시, 6대 광역시

2015), 관련 지침과 지원사업에서 옥상녹화의 설계와 시공 유의사항 제시에 그치는 등 실제적인 옥상녹화 가능 건축물의 선정과 면적 산정 연구가 많이 부족한 실정이다.

또한 쿨루프도 옥상녹화 대비 빠른 시공과 높은 경제성, 설치의 어려움이 없는 데도 불구하고 조성 기준과 조성가능 면적 산정 연구가 국내·외에서 전무하다. 미국의 캘리포니아 에너지 위원회는 지붕 경사에 따른 태양에너지 반사도 또는 반사지수로 쿨루프 알베도의 최소 기준을 초기 0.65, 3년 이상 0.5가 유지되도록 ENERGY STAR¹⁾에서 제시하고 있다(DOE, 2010)(〈표 3〉 참조).

3) 수치기상모델의 도시계획적 활용

도시열섬 현상을 포함하여 도시 기후변화로 발생하는 문제를 해결하기 위해 지난 20년 동안 많은 수확모델이 개발되었고, 최근에는 컴퓨터 기술의 발달에 따른 빠른 시간, 정확해진 성능으로 신뢰할 만한 결과를 보여주고 있다.

수치모델(Numerical Model)은 컴퓨터기반 시뮬레이션으로 일련의 현상을 수학적 방정식으로 해석하는 과정이다(기상청). 수치모델은 분석 목적에 따라 기상 예측을 목적으로 하는 수치기상예측모델(Numerical Weather Prediction Model:

NWP)과 불규칙한 난류 흐름 분석을 목적으로 하는 전산유체역학모델(Computational Fluid Dynamics Model: CFD)로 간단히 구분할 수 있다.

NWP모델은 대기현상의 역학과 물리적 원리 지배방정식을 연속적으로 수치적분하여 현재 대기상태와 미래 대기상태를 정량적으로 예측한다. 가장 폭넓게 활용된 모델은 1970년대 초반 펜실베이니아 주립대학과 미국 기상연구소가 공동개발한 MM5(Mesoscale Meteorological Mode version 5)와 이를 보완해 미국 국립대기환경연구소(National Center For Atmospheric Research: NCAR)에서 개발하여 운영 중인 WRF(Weather Research and Forecasting) 중규모 모델이 있다. WRF 모델은 기상예보와 대기 연구를 지원하기 위해 고안된 차세대 모델로 다양한 역학적 코어와 3DVAR(Three-dimensional variational assimilatution) 자료 동화 시스템과 병렬 연산을 고려한 모델을 제공하고 있다(서지현 외, 2013). 오픈소스 기반의 비상업적 개발로 기존모델 대비 사용이 쉽고, 대규모 영역부터 시작하여 관심 영역까지 계산을 하는 쌍방향 격자계(Two-way Nesting) 사용으로 예측 정확도가 높은 장점이 있다(국립환경연구원, 2013; 박세영 외, 2002; 함수련 외, 2005).

반면, CFD 모델은 도시지역에서 미세규모 이하

〈표 3〉 미국 캘리포니아 에너지위원회 쿨루프 알베도 기준(DOE, 2010)

Roof Type	Solar Reflectance (3-year aged)	and Thermal Emittance (new)	or Solar Reflectance Indices(SRI) (3-year aged)
Low sloped	0.55	0.75	64
Steep sloped	0.20	0.75	16

1) 1992년 미국 EPA와 협약을 맺은 기관과 기업에서 생산한 제품의 저비용, 에너지 절약성 기후변화 예방제품임을 인증하는 프로그램으로 ENERGY STAR 기준은 ASTM(American Society for Testing and Materials) 실험 결과에 따른 것으로 일반적인 흰색지붕의 태양반사도는 0.55~0.65 사이로 CRRC(Cool Roof Rating Council) 평가에 따른다(GCCA, 2012). <https://www.energystar.gov>

〈표 4〉 CFD모델별 공간규모(Hanna et al., 2006)

구분	CFD-Urban	FLACS	FEM3MP	FEFLO-Urban	FLUENT-EPA
도메인 크기	3.5km×3.1km×0.6km	외부: 10km×7.5km×1km 내부: 3km×3km	1.75km×1.2km× 0.8km	동-서: 3.3km, 남-북: 2.6km, 연직: 0.6km	2km×2km×1.2km
해상도 (수평, 수직)	3m × 1(40~600)m	10m × 5m	5m × 2~8m	2m이내 가로	건물로부터 1~2m 거리의 주변부

의 건물과 주변 지형의 영향에 따른 상세한 대기흐름 모사가 가능하고, CFD-Urban, FLACS, FEM3MP, FEFLO-Urban, FLUENT-EPA 등의 모델이 있다(Hanna et al., 2006)(〈표 4〉 참조). 그러나 수 km 이내의 미세규모 분석이라는 공간적 제약과, 분석수행 시간이 과도하게 소요되는 문제가 있다.

따라서 대규모 기상과 미규모 기상의 상호작용을 함께 고려할 수 있는 WRF와 같은 중규모 모델로 도시 구조 변화에 따른 도시 기상변화를 예측할 필요가 있고(변재영 외, 2010), 관련 정책 수립과 정책 효과 분석을 위한 과학적 도구로 수치모델링 시스템은 필수적이다. 특히 우리나라처럼 산악지형이 많은 곳에서는 WRF와 같은 예측모델을 사용하는 것이 바람직하다(국립환경연구원, 2013).

Myrup(1969)은 도시열섬 현상 분석 시 NWP 모델 활용이 현재와 미래 도시기후 개선에 유용하고, 변재영 외(2010)는 기상 재해의 피해를 최소화하기 위해 도시의 기상 예측이 필요하다고 하였다. 그 결과, 시뮬레이션 분석 결과를 바탕으로 광역 범위에서 도시열섬의 공간적 분포와 특성 분석 연구(Giannaros et al., 2013; Chen et al., 2013; 변재영 외, 2010; 이보라 외, 2015)와 기온저감 대안 효과 분석연구(Rosenfeld et al., 1995; Rosenzweig et al., 2009; Li et al., 2014; Peng et al., 2013; Ban-Weiss et al., 2015; 김대욱 외, 2013; 제민희

외, 2015) 등에 폭넓게 활용되고 있다.

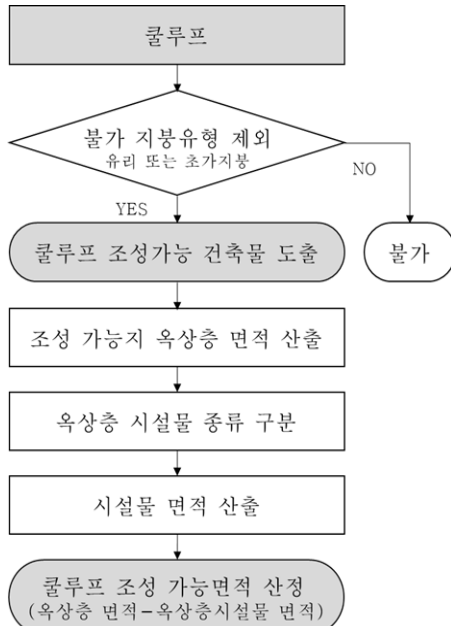
II. 연구 내용

1. 옥상녹화 조성가능 건축물 선정과 면적 산정 알고리즘 구축

옥상녹화는 기존 또는 신축 건축물의 최상층에 위치되는 것으로 조성 시 건축물의 구조적 안정성과 가능성을 고려하는 것이 필수적이다. 이 연구는 사례분석 대상지인 서울시에 다음과 같은 기준을 반영하여 옥상녹화 조성가능 건축물의 선정과 면적 산정 알고리즘을 구축하였다(〈그림 3〉 참조).

건축물의 구조적 안정성은 「도시 및 주거환경정비법 제2조 노후·불량 건축물 기준」을 적용하여 사용승인일로부터 건축연한 30년 미만으로 식생과 토양 하중 영향을 고려하였다. 구조적 가능성은 선행연구(〈표 2〉 참조)와 「옥상녹화시스템 설계 및 설계도서 작성지침(서울시, 2013)」에서 제시하는 것처럼 평평하게 조성되어야 하기 때문에 다음과 같이 건축물 지붕형태와 구조를 구분하였다(〈표 5〉 참조).

조성가능면적은 옥상(층)면적에서 기존 시설물 면적을 제외한 면적을 조성가능면적으로 산정하였다.



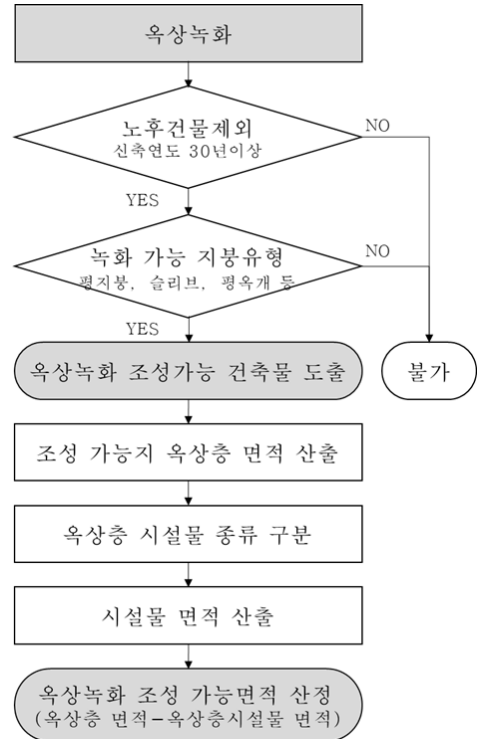
〈그림 2〉 쿨루프 조성가능 건축물 및 면적 산정

〈표 5〉 옥상녹화 조성가능 지붕형태 및 구조

지붕형태 및 구조
• ‘평지붕’의 의미를 가진 형태 • 슬라브(평슬라브, 슬래브, 스라브, 슬라브 이음, 슬라브जू, 슬라브조, 라멘조, 평옥개) • (철근)콘크리트, 경량철골콘크리트, 철골조

2. 쿨루프 조성가능 건축물 선정과 면적 산정 알고리즘 구축

쿨루프는 앞서 설명한 것처럼 옥상녹화 대비 빠른 시공과 높은 경제성이 장점이며, 조성의 어려움이 적다. 지붕형태와 구조 중 초가지붕, 유리 지붕, 기타지붕(비닐 또는 천막 지붕, 넥산지붕) 등을 제외하고는 옥상녹화가 어려운 건축물에도 적용이 가능하며 건축물의 구조적 안정성에 제약을 받지 않는다. 일부 초가지붕, 유리지붕 등 지붕 형태를 고려하는 건축물 구조적 가능성을 반영하



〈그림 3〉 옥상녹화 조성가능 건축물 및 면적 산정

여 쿨루프 조성가능 건축물 선정과 면적 산정 알고리즘을 구축하였다(〈그림 2〉 참조).

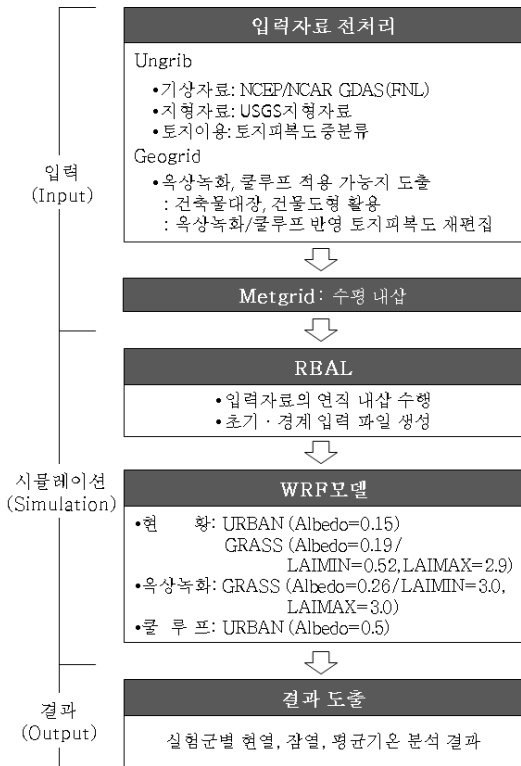
3. WRF 모델 시뮬레이션 설정

1) WRF 시스템 구성

WRF는 입력자료를 전처리하는 WPS(WRF Preprocessing System)와 시뮬레이션을 수행하는 WPF 모델 본체로 구성되어 있다. 이 연구에서는 모델링 시스템에 맞추어 자료 입력과 입력자료 전처리, 모델링 도메인의 구성, 시뮬레이션 물리변수 설정과 실행을 하고, 분석결과물은 GIS S/W를 활용하여 가시화하였다(〈그림 4〉 참조).

2) 자료 입력 및 전처리

WRF 모델 실행에서 초기·경계장의 해상도와



〈그림 4〉 WRF모델 시뮬레이션 분석방법

정확도는 모델의 기상모사 능력에 중요한 요소로 작용해 모델링 결과의 정확도가 좌우된다. 모델의 초기·경계 입력자료는 미국 국립기상연구소(NCAR)에서 제공한 격자간격 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 의 수평해상도 NCEP/NCAR GDAS(FNL) 분석자료로, 이는 27개의 연직층을 가지는 격자 형태의 전구 기상자료이다. WRF에서 기본 제공하는 USGS(U.S Geological Survey)는 최근의 서울 현황을 반영하지 못하고 있다.

옥상녹화와 쿨루프 조성가능 건축물 선정 알고리즘으로 선정된 각각의 건축물자료를 GIS S/W를 활용해 경위도좌표로 변환 후 환경부 토지피복도 중분류자료(2013)를 바탕으로 공간과 속성 정보를 수정·편집하였다. 속성 정보는 토지피복코드 22개 항목을 USGS의 13개 항목으로 재분류하고, WRF에서 활용되는 3초 간격 0.00083333(약 90m)으로 격자크기를 조정하여 ASCII파일로 변환하였다. 그리고 geogrid.tbl과 namelist.wps를 수

〈표 6〉 도메인 구성과 모델링 물리 변수 설정

항목	도메인1	도메인2	도메인3	도메인4	도메인5	도메인6
Integration period	2015.06.09,00 UTC ~ 2015.06.11,00 UTC (총 48시간)					
Resolution (m)	21,870	7,290	2,430	810	270	90
Topography and Land Use data	30"	30"	30"	1/3"	1/3"	1/3"
Initial condition	NCEP/NCAR GDAS(FNL) analysis (6-hourly)					
Experiments	현황(Exist Condition) : URBAN (ALBEDO=0.15), GRASS (ALBEDO=0.19 / LAIMIN=0.52, LAIMAX=0.29) 옥상녹화(Green Roof) : GRASS(ALBEDO=0.26 / LAI=3.0) 쿨루프(Cool Roof) : URBAN (ALBEDO=0.5)					
Land Process Scheme	Noah LSM(Land Surface Model)					
Shortwave radiation scheme	Goddard shortwave					
Longwave radiation scheme	RRTM(Rapid RadiativeTransfer Model scheme)					
Microphysics	WSM 6 scheme					
Cumulus parameterization	New Kain-Fritsch	New Kain-Fritsch	off	off	off	off
Planetary boundary layer	YSU(Yonsei University Scheme) PBL					

정하고, WRF에 입력 가능하도록 geogrid.exe를 실행하여 파일을 생성하였다.

3) 시뮬레이션 설정

2015년 6월 10일의 기온변화 수치모의를 위해 UTC기준 2015년 6월 9일 00시부터 6월 11일 00시까지 1시간 단위로 총 48시간을 수행하였다. 이는 모델 시작 후 초반 약 6시간 이전자료는 초기입력 기온의 영향을 받기 때문이다.

기상요소 예측의 정확도에 영향을 주는 수평격자 해상도는 모델링 오차를 최소화하기 위해 한반도, 중국, 일본을 포함하는 6개 도메인으로 구성하였다. 고해상도 시뮬레이션 수행을 위한 WRF 모델의 도메인 구성과 물리 변수 설정은 Lee et al(2016)을 참고하였다(〈표 6〉 참조). 지표면모델은 NCEP에서 개발된 Noah LSM(Land Surface-Model)이자 에너지 방정식과 물수지 방정식기반 모형으로 토양수분, 토양온도, 지표면온도, 에너지 플럭스 등을 모의하여 정확한 지역적 특성을 반영한다(장애선 외, 2013). 단파복사 물리화 과정으로는 Goddard scheme, 장파복사 물리화 과정은 RRTN(Rapid Radiative Transfer Model) scheme을 사용했다. 구름 미세 물리화 과정은 WSM(WR F-Single Momentum) 6 scheme, 적운 물리화 과정 New Kain-Fritsch scheme을 사용하고, 대기 경계층 물리화 과정은 국내 실정에 적합하도록 고안된 YSU(Yonsei University) scheme을 사용하였다.

실험군별 변수는 다음과 같이 설정하였다. 대부분의 도시지역은 아스팔트 피복면으로 아스팔트 알베도는 0.1~0.15 사이의 값을 가지고(Sweeney et al., 2011), 수목알베도는 0.12~0.18, 초지알베도는 0.16~0.26(Oke, 1987)으로 알려져 있다. 이 연구는 현황 실험군의 도시알베도는 0.15, 초지알

베도는 0.19, 옥상녹화의 초지알베도는 태양반사를 최대화할 수 있는 수종을 식재한다는 가정하에 0.26, 엽면적지수는 식물군락 밀생 지역이 3~7 사이의 범위로(생명과학대사전, 2008) 도시지역임을 고려하여 3.0으로 설정하였다. 쿨루프의 도시알베도는 3년 이상 유지돼야 인정하는 ENERGY STAR의 기준 0.5로 하였다.

III. 결과 및 고찰

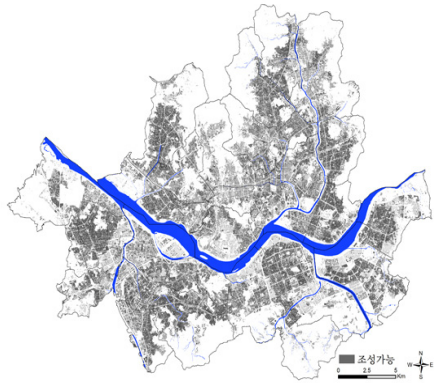
1. 서울시 옥상녹화 조성가능 건축물 선정 및 면적 산정 결과

서울시를 대상으로 현실적으로 적용 가능한 건축물의 선정과 정확한 면적 산정을 위해 건축물 대장자료를 활용하였다. 건축물 구조적 안전성은 건축물 승인일 정보를 활용하여 2015년 기준 30년 미만인 건축물을 추출하고, 건축물의 구조적 가능성은 가능성 지붕형태 정보를 활용하였다. 그리고 해당층의 면적과 설치된 시설물 종류와 면적은 동별 최상층 높이 정보의 동별개요와 층별개요 자료를 활용하였다.

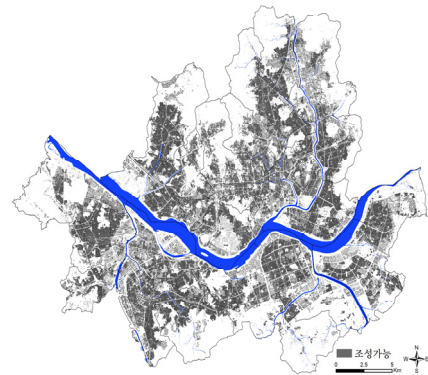
앞에서 구축한 알고리즘을 적용하여 서울시의 옥상녹화 조성가능 건축물과 면적을 분석한 결과, 조성가능 건축물은 330,529동으로 서울시 전체 건물의 51.6%이다. 선정된 건축물 330,529동의 옥상(층)면적은 38,873,810㎡, 옥상층 내 옥탑, 다락, 창고, 계단실, 물탱크실(저수조), 엘리베이터 기계실, 종탑 등의 시설물 면적은 2,167,385㎡로 분석됐다. 서울시내 옥상녹화 조성가능 면적은 36,706,424㎡로 서울시 전체 면적의 54.7%로 분석되었다(〈표 7〉, 〈그림 5〉 참조).

〈표 7〉 서울시 옥상녹화 및 쿨루프 조성가능 건축물과 면적

기법	건축물(동), (%) ²⁾	면적(m ²), (%)
옥상녹화	330,529(51.6%)	36,706,424(54.7%)
쿨루프	620,291(96.8%)	64,631,382(96.3%)



〈그림 5〉 옥상녹화 조성가능 건축물



〈그림 6〉 쿨루프 조성가능 건축물

2. 서울시 쿨루프 조성가능 건축물 선정 및 면적 산정 결과

쿨루프는 건축물의 구조적 가능성에서 지붕마감재 중 초가, 유리, 기타 등을 제외하고는 옥상녹화 같은 구조적 안전성의 제약이 없고, 신규 건축물뿐만 아니라 기존 건축물에도 적용이 용이하다. 서울시를 대상으로 쿨루프 조성가능 건축물을 찾고 면적을 산정하기 위해 옥상녹화와 마찬가지로 건축물 대장자료를 활용하고 구축된 알고리즘을 적용하여 조성가능 건축물을 선정하고 면적을 산정하였다.

분석 결과, 조성불가 지붕형태 11,933동을 제외하고 628,875동이 가능하고 이는 서울시 전체 건축물의 98.14%이다. 선정된 건축물 620,291동 중

조성이 불가능한 초가지붕 236,007㎡, 유리지붕 12,441㎡, 기타지붕 733,188㎡와 옥상(층)시설물 면적 2,611,597㎡를 제외한 쿨루프 조성가능 면적은 64,631,382㎡로 서울시 전체 면적의 96.3%로 분석되었다(〈표 7〉, 〈그림 6〉 참조).

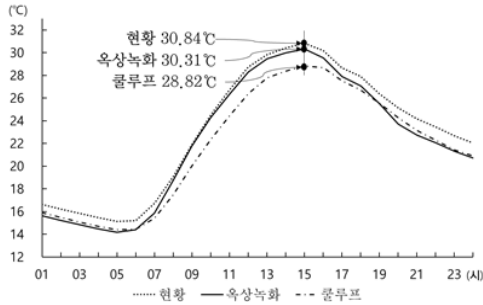
3. WRF모델 시뮬레이션 결과

1) 일 평균기온 변화

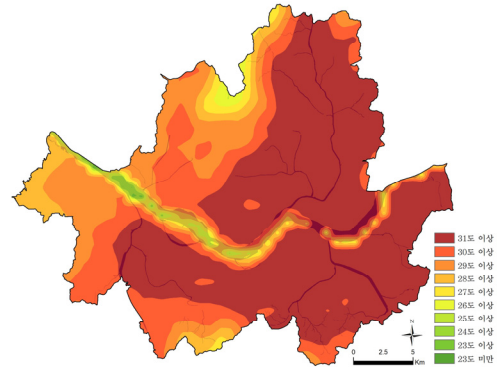
앞에서 구축한 알고리즘을 활용하여 옥상녹화와 쿨루프 조성가능 건축물을 도출하고 옥상녹화와 쿨루프 조성 시뮬레이션을 수행하였다.

2015년 6월 10일의 평균기온 변화를 살펴보면 현황, 옥상녹화, 쿨루프 모두 오전 6시부터 기온이 상승하기 시작하여 15시를 정점으로 기온이 하강

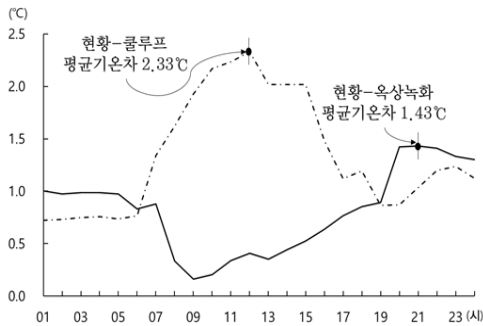
2) 2015년 기준, 서울시 전체 건축물은 640,808동, 시설물 면적을 제외한 옥상층 면적은 67,128,199㎡이다.



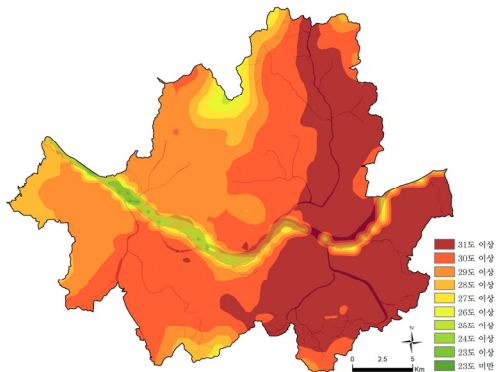
〈그림 7〉 시간대별 평균기온 변화



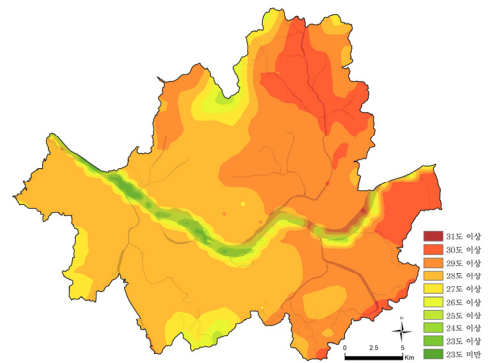
〈그림 9〉 현황 평균기온 분포(15시)



〈그림 8〉 현황과 옥상녹화, 쿨루프의 평균기온 차



〈그림 10〉 옥상녹화 평균기온 분포(15시)



〈그림 11〉 쿨루프 평균기온 분포(15시)

하였다. 하루 중 현황의 평균기온이 전 시간대에 걸쳐 높았고, 쿨루프, 옥상녹화 순으로 평균기온이 낮았다(〈그림 7〉 참조).

시간대별로 현황과 두 실험군 간 평균기온차를 살펴보면, 쿨루프는 12시에 2.33°C, 옥상녹화는 21시에 1.43°C로 기온차가 최대로 나타났다. 즉 쿨루프는 가장 많은 양의 태양복사에너지가 도달하는 주간에 건축물 지붕면의 알베도 변화로 태양복사 에너지를 반사하고, 저장과 흡수를 최소화하여 도시 기온상승 억제 효과가 있는 것을 확인하였다. 옥상녹화는 주간에는 그 효과가 미미하나, 야간에 식물 증발작용에 따라 도시 기온저감에 기여하는 것을 알 수 있다(〈그림 8〉 참조).

기온이 가장 높게 나타난 15시를 기준으로 현황과 옥상녹화, 쿨루프의 서울시 평균기온 공간분

포는 다음과 같다(〈그림 9〉, 〈그림 10〉, 〈그림 11〉 참조). 현황 평균기온이 30.84°C일 때, 옥상녹화는 약 0.5°C, 쿨루프는 약 2°C의 기온저감 효과가 나

〈표 8〉 자치구별 전체면적 대비 옥상녹화 및 쿨루프 조성가능 면적이 나타내는 기온저감 효과

구	현황			옥상녹화				쿨루프			
	구면적 (㎡)	평균기온(℃)		조성가능		기온차(℃)		조성가능		기온차(℃)	
		15시	21시	면적(㎡)	비(%)	15시	21시	면적(㎡)	비(%)	15시	21시
종로구	23,910,000	29.96	23.43	811,088	3.39	0.73	1.04	2,374,602	9.93	1.51	0.71
중구	9,960,000	31.70	24.57	640,169	6.43	1.65	2.06	2,040,555	20.49	2.70	1.27
용산구	21,870,000	30.45	24.33	929,724	4.25	0.93	1.74	2,277,417	10.41	2.46	1.34
성동구	16,860,000	31.78	24.89	1,007,925	5.98	0.91	2.17	1,870,565	11.09	2.61	1.35
광진구	17,060,000	31.84	25.25	1,522,919	8.93	0.49	2.38	2,358,883	13.83	2.38	1.45
동대문구	14,220,000	32.38	25.35	1,173,359	8.25	1.07	2.68	2,587,693	18.20	2.60	1.41
중랑구	18,500,000	32.05	25.15	1,524,351	8.24	0.59	2.45	2,436,385	13.17	2.21	1.40
성북구	24,580,000	31.06	24.22	1,630,586	6.63	0.93	1.68	3,188,024	12.97	1.87	0.91
강북구	23,600,000	30.18	23.80	1,280,012	5.42	0.46	1.31	2,245,071	9.51	1.04	0.68
도봉구	20,670,000	31.01	24.19	1,172,411	5.67	0.60	1.62	1,797,181	8.69	1.34	0.81
노원구	35,440,000	31.76	24.87	1,506,988	4.25	0.71	1.64	2,190,593	6.18	1.98	1.29
은평구	29,700,000	29.57	23.17	1,903,326	6.41	0.19	0.58	3,263,858	10.99	0.82	0.31
서대문구	17,610,000	30.19	23.84	1,117,884	6.35	0.69	1.43	2,303,817	13.08	1.55	1.00
마포구	23,840,000	29.30	23.72	1,405,497	5.90	0.57	1.23	2,492,072	10.45	1.46	0.99
양천구	17,410,000	30.41	24.19	1,425,310	8.19	0.66	1.34	2,221,541	12.76	2.10	1.41
강서구	41,440,000	29.05	23.02	2,364,730	5.71	0.13	0.62	3,316,595	8.00	0.80	0.61
구로구	20,120,000	30.65	23.94	1,436,659	7.14	0.42	1.15	2,514,449	12.50	2.45	1.27
금천구	13,020,000	30.50	23.66	1,080,594	8.30	0.27	0.89	1,947,667	14.96	2.13	0.84
영등포구	24,530,000	30.27	24.35	1,422,472	5.80	0.56	1.61	2,908,211	11.86	2.35	1.38
동작구	16,350,000	31.16	24.30	1,422,718	8.70	0.79	1.65	2,402,816	14.70	2.77	1.25
관악구	29,570,000	30.26	23.14	2,246,181	7.60	0.23	0.68	3,195,034	10.80	2.45	0.57
서초구	46,980,000	31.32	23.78	1,675,680	3.57	0.32	0.76	3,003,651	6.39	2.59	0.72
강남구	39,500,000	31.86	24.65	2,525,799	6.39	0.36	1.54	4,052,080	10.26	2.82	1.16
송파구	33,880,000	31.92	25.17	2,067,289	6.10	0.32	1.72	3,203,534	9.46	2.50	1.30
강동구	24,590,000	31.81	25.32	1,412,753	5.75	0.40	2.44	2,439,087	9.92	1.94	1.64
계	605,210,000	-	-	36,706,425	-	-	-	64,631,382	-	-	-

타난 것으로 분석됐다.

자치구별 현황 평균기온을 살펴보면, 15시는 동대문구 32.38℃, 중랑구 32.05℃, 송파구 31.92℃ 순으로 기온이 높았으며, 마포구가 29.30℃로 기온

이 낮게 나타나 동대문구와 평균기온 차이가 3.0℃였다. 21시에는 동대문구 25.35℃, 강동구 25.32℃, 광진구 25.25℃ 순으로 기온이 높았고, 강서구는 23.02로 기온이 낮게 나타나 동대문구와의

〈표 9〉 WRF 평균기온 분석결과

평균기온(℃)	현황	옥상녹화	쿨루프
15시	30.84	30.31	28.82
현황과 기온차	-	0.52	2.02

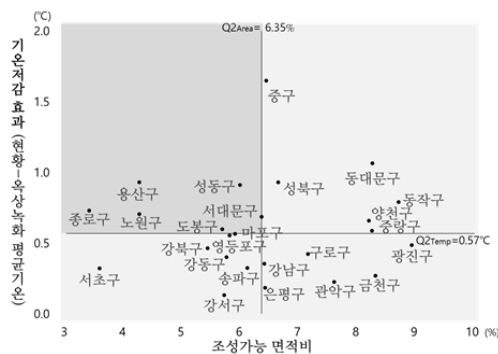
평균기온 차이가 2.33℃였다(〈표 9〉 참조). 특히 동대문구는 15시와 21시 모두 서울시 내 다른 자치구보다 높은 평균기온이 나타나는 것으로 분석되었다.

2) 자치구별 옥상녹화, 쿨루프 조성가능 면적과 기온저감 효과

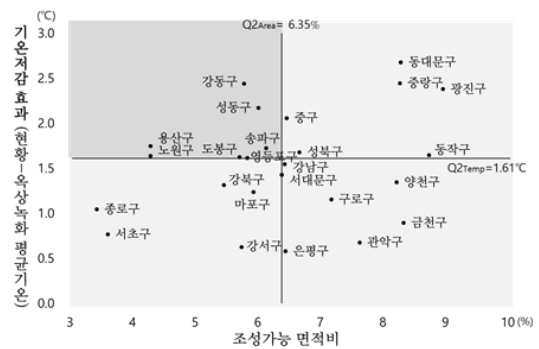
서울시 자치구별로 옥상녹화는 강남구 2,525,799㎡, 강서구 2,364,730㎡, 관악구 2,246,181㎡, 쿨루프는 강남구 4,052,080㎡, 은평구 3,263,858㎡, 강서구 3,316,595㎡ 순으로 조성가능 면적이 크게 나타났다. 그러나 자치구별 전체면적 대비 옥상녹

화·쿨루프 조성가능 면적비율로 살펴보면, 옥상녹화는 광진구 8.93%, 동작구 8.70%, 금천구 8.30%, 쿨루프는 중구 20.49%, 동대문구 18.2%, 금천구 14.96% 순으로 조성가능 면적비율이 크게 나타났다(〈표 9〉 참조).

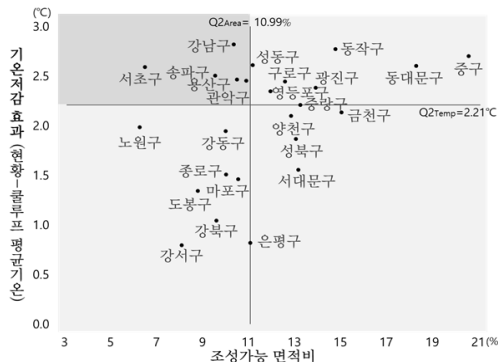
옥상녹화와 쿨루프의 기온저감 효과가 높게 나타난 15시와 21시를 기준으로 살펴보았다. 먼저, 옥상녹화는 15시에는 중구 1.65℃, 동대문구 1.07℃, 용산구와 성북구는 0.93℃ 순으로 나타났고, 21시에는 동대문구 2.68℃, 중랑구 2.45℃, 강동구 2.44℃ 순으로 기온저감 효과가 크게 나타났다. 쿨루프는 15시에는 강남구 2.82℃, 영등포구 2.77℃,



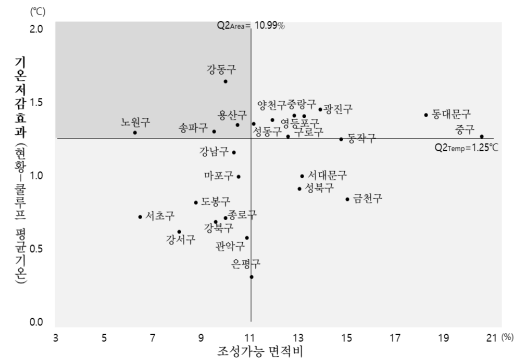
〈그림 12〉 자치구별 전체면적 대비 옥상녹화 조성가능 면적이 나타내는 기온저감 효과(15시)



〈그림 13〉 자치구별 전체면적 대비 옥상녹화 조성가능 면적이 나타내는 기온저감 효과(21시)



〈그림 14〉 자치구별 전체면적 대비 쿨루프 조성가능 면적이 나타내는 기온저감 효과(15시)



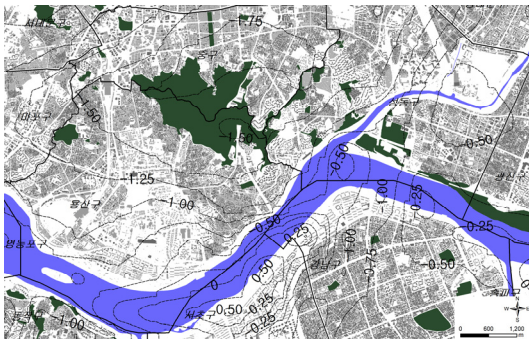
〈그림 15〉 자치구별 전체면적 대비 쿨루프 조성가능 면적이 나타내는 기온저감 효과(21시)

중구 2.70℃, 21시에는 강동구 1.64℃, 광진구 1.45℃, 동대문구와 마포구가 1.41℃ 순으로 기온저감 효과가 크게 나타났다(<표 9> 참조).

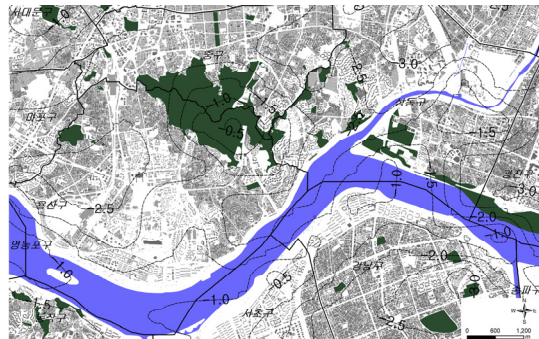
3) 자치구별 전체면적 대비 옥상녹화, 쿨루프 조성 가능 면적이 나타내는 기온저감 효과

옥상녹화나 쿨루프 조성에는 적지 않은 비용이 소요되고, 조성 면적이 작더라도 기온저감 효과가 최대화될 수 있는 지역을 우선 고려하는 것이 효율적이다. 자치구별 면적, 기온저감 기법별 조성 가능 면적비, 기온저감 효과의 값은 다양한 범위로 분포되어 사분위수를 사용하여 분석하였다(<그림 12~15> 참조).

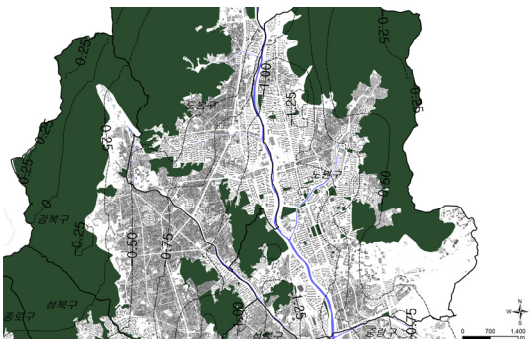
옥상녹화는 15시에 용산구가 구 면적의 4.25% 조성 시 0.93℃, 성동구는 구 면적의 5.98% 조성 시 0.91℃, 종로구는 구 면적의 3.39% 조성 시 0.73℃, 노원구는 구 면적의 4.25% 조성 시 0.71℃, 도봉구는 구 면적의 5.67% 조성 시 0.60℃의 기온저감 효과가 나타났다(<그림 12> 참조). 21시에는 강동구가 구 면적의 5.73% 조성 시 2.44℃, 성동구는 구 면적의 5.98% 조성 시 2.17℃, 용산구가 구 면적의 4.25% 조성 시 1.74℃, 노원구는 구 면적의 4.25% 조성 시 1.64℃, 도봉구가 구 면적의 5.67% 조성 시 1.62℃의 기온저감 효과를 나타냈다(<그림 13> 참조). 옥상녹화는 용산구, 성동구, 노원구, 도봉구에서 다른 지자체보다 기온저감 효과가 지



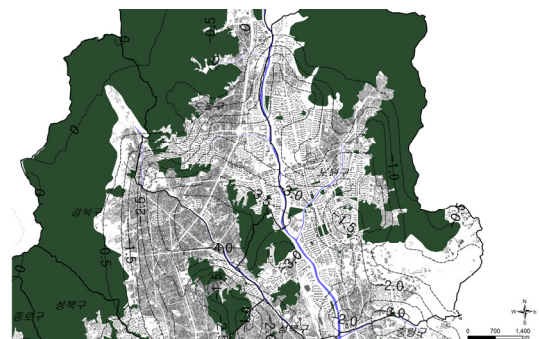
<그림 16> 용산구, 성동구의 옥상녹화 조성에 따른 기온저감 효과(15시)



<그림 17> 용산구, 성동구의 옥상녹화 조성에 따른 기온저감 효과(21시)



<그림 18> 도봉구, 노원구의 옥상녹화 조성에 따른 기온저감 효과(15시)



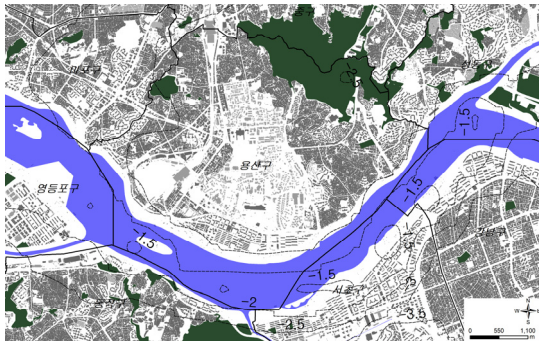
<그림 19> 도봉구, 노원구의 옥상녹화 조성에 따른 기온저감 효과(21시)

속적으로 나타나는 것으로 분석되었다.

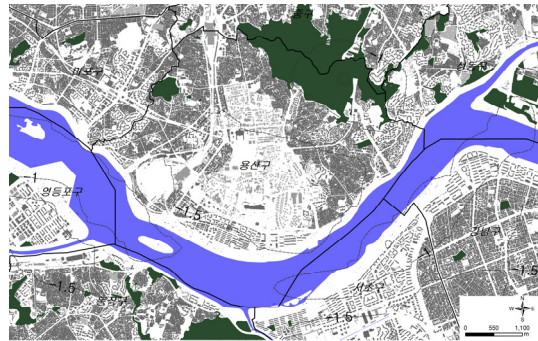
쿨루프는 15시에 강남구가 구 면적의 10.26% 조성 시 2.82℃, 서초구가 구 면적의 6.39% 조성 시 2.59℃, 송파구는 구 면적의 9.46% 조성 시 2.50℃, 용산구는 구 면적의 10.41% 조성 시 2.46℃, 관악구는 구 면적의 10.80% 조성 시 2.45℃의 기온저감 효과가 나타났다(〈그림 14〉 참조). 21시에는 강동구가 구 면적의 9.92% 조성 시 1.64℃, 용산구는 구 면적의 10.41% 조성 시 1.34℃, 노원구가 구 면적의 6.18% 조성 시 1.29℃, 송파구는 구 면적의 9.46% 조성 시 1.30℃의 기온저감 효과를 나타냈다(〈그림 15〉 참조). 쿨루프는 용산구, 송파구에서 다른 지자체보다 기온저감 효과가 지속

적으로 나타나는 것으로 분석되었다.

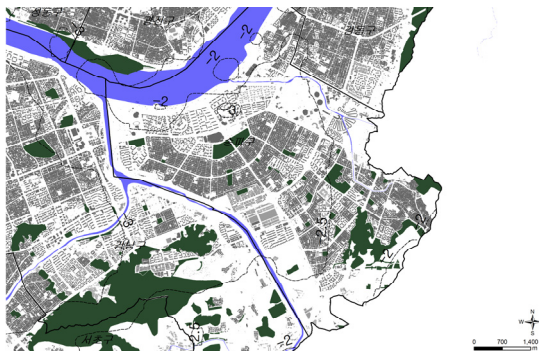
적은 면적으로도 옥상녹화의 기온저감 효과가 크게 나타난 용산구, 성동구, 도봉구, 노원구를 살펴해보았다(〈그림 16~19〉). 15시에 용산구는 옥상녹화 건물로 인해 남산의 기온이 최대 -1.77℃, 성동구는 응봉근린공원 주변에 위치한 옥상녹화 건물을 중심으로 주변기온이 최대 -1.75, 도봉구는 초안산과 중랑천 사이의 옥상녹화 건축물 주변으로 최대 -1.0℃, 노원구는 수락산역 부근, 봉화산 주변, 중계역 주변 아파트단지를 중심으로 최대 -1.25℃의 기온저감 효과가 나타났다. 21시에는 용산구는 전쟁기념관 주변으로 최대 -2.5℃, 성동구는 청계천주변 왕십리뉴타운 지역 주변으로 최대



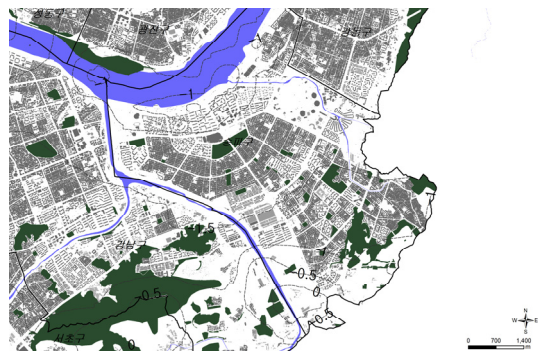
〈그림 20〉 용산구의 쿨루프 조성에 따른 기온저감 효과(15시)



〈그림 21〉 용산구의 쿨루프 조성에 따른 기온저감 효과(21시)



〈그림 22〉 송파구의 쿨루프 조성에 따른 기온저감 효과(15시)



〈그림 23〉 송파구의 쿨루프 조성에 따른 기온저감 효과(21시)

-3.0℃, 도봉구는 강북구와 인접한 초안산 주변으로 최대 -4.0℃, 노원구는 초안산과 월계근린공원 주변지역이 최대 -3.0℃의 기온저감 효과를 나타냈다.

쿨루프 적용에 따른 기온저감 효과가 지속적으로 나타난 용산구, 송파구는 다음과 같이 분석되었다(〈그림 20~23〉 참조). 15시에 용산구는 전지역에 걸쳐 -2.0℃, 송파구는 신천어린이교통공원 주변에서 -3.0℃ 기온저감 효과가 나타났다. 21시에는 용산구는 캐피탈호텔의 녹지 주변 기온이 -1.5℃, 송파구는 석촌호수와 오금공원 사이의 건축물 밀집지역에서 -1.5℃의 기온저감 효과가 나타났다.

IV. 결론

이 연구는 도시열섬현상이 빈번하게 발생하고 있는 서울시를 대상으로 도시열섬현상 완화를 위해 옥상녹화와 쿨루프의 도시 기온저감 효과를 정량 분석하고자 하였다.

먼저 옥상녹화와 쿨루프의 조성가능 건축물 선정과 면적 산정 분석 알고리즘을 구축하였다. 구축된 알고리즘을 적용하여 실제 건축물을 선정하고 면적을 산정하기 위해 국토교통부 건축물대장 자료를 활용하였다. 2015년 건축물대장을 기준으로 서울시내 옥상녹화가 가능한 건축물은 330,529동, 서울시 전체 건축물의 51.6%, 면적은 36km²로 서울시 전체 건축물 옥상층 면적의 54.7%였다. 쿨루프는 620,291동, 서울시 전체 건축물의 96.8%, 면적이 64km²로 서울시 전체 건축물 옥상층 면적의 96.3%가 조성 가능한 것으로 선정되었다.

선정된 옥상녹화 및 쿨루프 조성가능 건축물을 중규모 기상모델 WRF를 활용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 모든 실험군에서 최고 평균

기온을 기록한 15시에 옥상녹화는 0.5℃, 쿨루프는 2℃의 기온저감 효과를 나타냈다. 최대 기온저감 효과는 옥상녹화는 21시, 쿨루프는 12시에 높게 나타나는 것으로 분석됐다.

그리고 옥상녹화는 용산구·성동구·도봉구·노원구, 쿨루프는 용산구와 송파구에서 자치구별 전체면적 대비 옥상녹화·쿨루프 조성가능 면적이 나타내는 기온저감 효과가 큰 것으로 분석되었다. 이 중에서도 기존 공원과 녹지, 하천 주변의 건축물에 옥상녹화나 쿨루프 같은 저감 기법을 적용하면 기온차가 크게 나타나 효과가 큰 것으로 조사됐다. 또한 옥상녹화와 쿨루프 기법 적용 시 기존 공원·녹지와 하천주변에 인접한 건축물 주변 기온의 저감 효과가 큰 것으로 나타났다.

현실적으로 옥상녹화나 쿨루프 조성에는 적지 않은 비용이 소요된다. 이러한 분석 과정은 자치구별로 더 작은 면적 조성으로 최대의 기온저감 효과를 낼 수 있는 기법을 선정할 수 있고, 적용이 필요한 지역을 도출할 수 있다. 이러한 수치모델을 활용한 모의 결과를 토대로 도시열섬 완화를 위한 기온저감 기법의 선정, 열환경 개선이 필요한 지역의 도출, 도시계획·개발 사업에 따른 열환경 변화 예측의 기초 및 과학적 근거자료로 도시계획과 관리 대책 수립 시 합리적 방안 마련을 위한 의사결정에 기여한다.

그러나 이 연구에는 다음과 같은 한계가 있었다. 수치모델 운용상 난이도와 분석의 장시간 소요로 다양한 기상상황의 차별적 고려와 저감 기법별 지속시간에 따른 기온변화 분석 등 추가 시뮬레이션 연구가 필요하다. 그리고 지금까지 개발된 수치모델의 분석 기간과 공간해상도로 인한 도시열섬이 특히 심각한 지역이나 열 취약지역 등의 상세 변화를 분석하기에는 어려움이 있다. 마지막으로 도시열섬현상 저감대책 수립 시 저감기법의

적용에 따른 조성비용과 기온저감 효과 등이 종합적으로 반영되어 대안 제시가 가능한 정교한 도시 열환경 예측·분석시스템의 개발이 필요하다.

참고문헌

- 권병혁·김근희·김광호·강동환, 2009, “접지층에서 대기난류의 역할과 에너지 평형”, 『한국습지학회지』, 11(1): 105~113.
- 강정은 외, 2012, 『기후변화 적응형 도시구현을 위한 그린인프라 전략 수립』, 한국환경정책·평가연구원.
- 김대욱·정응호·차재규, 2013, “대구광역시 저층주거지역의 옥상녹화 조성에 따른 주변 열환경 변화 모의실험”, 『한국주거학회논문집』, 24(3): 45~53.
- 김운수, 2001, 기후특성을 고려한 도시계획제도의 도입과 적용 가능성에 관한 연구, 『서울도시연구』, 2(1): 1~21.
- 김정호·손원득·윤용한, 2010, “CFD 시뮬레이션을 이용한 건축물 및 녹지배치가 외부 열환경에 미치는 영향 예측”, 『한국환경과학회지』, 21(1): 69~81.
- 기상청, <http://www.kma.go.kr>.
- 서울특별시, 2000, 『건물옥상녹화 학술용역』, 한국건설기술연구원.
- 국립환경과학원, 2013, 『대기모델링 정보지원 시스템을 위한 표준자료 구축 연구(III)-기상 모델 차이에 따른 대기질 모사 결과 영향 분석』, 환경부.
- 류남형·이춘석, 2013, “저토심 경사지붕과 평지붕 녹화모델의 저류 및 증발산 특성”, 『한국조경학회지』, 41(6): 107~116.
- 명수정, 2009, 『도시지역의 기후변화적응을 위한 열섬현상 완화방안 연구』, 한국환경정책·평가연구원.
- 박세영·정성훈·장동원·최정희, 2002, “2002년 8월의 WRF 모델과 MM5 모델의 수치실험 비교 검증”, 한국기상학회 2002년 가을 학술발표회.
- 박은진·남미아·강규이, 2012, “경기도의 옥상녹화 가용면적 추정과 이의 정책적 함의”, 『한국환경복원기술학회지』, 15(1): 107~117.
- 박효석·오규식·이상현, 2010, “도시 그린인프라 확충에 따른 탄소저감 증진효과 분석: 서울시를 대상으로”, 『도시행정학보』, 27(4): 1~23.
- 배용규·송두삼, 2011, “열섬현상 완화를 위한 주거지 공간 위계별 설계요소 도출 연구”, 『대한건축학회 논문집-계획계』, 27(6): 195~204.
- 변재영·최영진·서범근, 2010, “WRF-UCM(Urban Canopy Model)을 이용한 서울 지역의 도시기상 예보 평가”, 『한국기상학회』, 20(1): 13~26.
- 서지현·심창섭·홍지연·강성대·문난경·황윤섭, 2013, “WRF V3.3 모델을 활용한 CESM 기후 모형의 역학적 상세화”, 『한국기상학회 대기』, 23(3): 347~356.
- 서응철, 2007, “도시열섬 완화를 위한 제도개선”, 『한국생태환경건축학회 논문집』, 7(2): 17~22.
- 생명과학대사전, 2008, 아카데미서적.
- 안지연·정태웅·구지희, 2016, “공간정보를 이용한 옥상녹화 가용면적 추정”, 『한국환경복원기술학회지』, 19(5): 11~17.
- 오규식·홍재주, 2005, “도시공간 구성요소와 도시열섬현상의 관련성 연구”, 『한국도시계획학회지』, 6(1): 47~63.
- 이보라·이대근·남경엽·이영곤·김백조, 2015, “WRF-UCM을 활용한 수도권 지역의 열환경 변화 연구: 2000년과 2009년의 비교”, 『한국기상학회』, 25(3): 483~499.
- 이빛나라·김예슬·이은희, 2015, “옥상녹화의 온도조절효과에 적합한 세덤류 분석”, 『한국환경복원기술학회지』, 18(2): 53~64.
- 이현우·김호석·김관규·이윤정, 2010, 『도시농업의 온실가스 저감효과 및 정책방안』, 한국환경정책·평가연구원.
- 장애선·문희원·황석환·최민하, 2013, “Noah LSM을 이용한 지표 플럭스 산정 및 한반도에서의 적용성 검토”, 『한국습지학회지』, 15(4): 50~518.
- 제민희·오규식, 2015, “옥상녹화와 쿨루프에 의한 도시 열환경 개선효과 분석”, 대한민국토·도시계획학회 추계 학술대회.

- 함수련·박선주·방철한·정병주·홍성유, 2005, "WRF, MM5, RSM 모형에서 모의한 2004년 7월 11-19일의 동아시아 몬순의 비교", 『한국기상학회지』, 15(2): 91~99.
- Ban-Weiss, G. A., Woods, J., Millstein, D., and Levinson, R. 2015, "Using remote sensing to quantify albedo of roofs in seven California cities, Part 2: Results and application to climate modeling", *Solar Energy*, 115: 791~805.
- Chen, F., Kusaka, H., Bornstein, R., Ching, J., Grimmond, C. S. B., Grossman Clarke, S., and Sailor, D., 2011, "The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems", *International Journal of Climatology*, 31(2): 273~288.
- Gago, E. J., Roldan, J., Pacheco-Torres, R., and Ordoñez, J., 2013, "The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25: 749~758.
- Gaffin, S. R., Khanbilvardi, R., and Rosenzweig, C., 2009, "Development of a green roof environmental monitoring and meteorological network in New York City", *Sensors*, 9(4): 2647~2660.
- GCCA, 2012, *The Practical Guide to Cool Roofs and Cool Pavements*.
- Giannaros, T. M., Melas, D., Daglis, I. A., Keramitsoglou, I., and Kourtidis, K., 2013, "Numerical study of the urban heat island over Athens (Greece) with the WRF model", *Atmospheric Environment*, 73: 103~111.
- Grant, Elizabeth J., and James R. Jones., 2008, "A decision-making framework for vegetated roofing system selection", *Journal of Green Building* 3.4, 2008: 138~153.
- Hanna, S. R., Brown, M. J., Camelli, F. E., Chan, S. T., Coirier, W. J., Hansen, O. R., and Reynolds, R. M., 2006, "Detailed simulations of atmospheric flow and dispersion in downtown Manhattan: An application of five computational fluid dynamics models", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(12): 1713~1726.
- Lee, S.-J., J. Song, and Y. Kim, 2016, "The NCAM Land-Atmosphere Modeling Package (LAMP) Version 1: Implementation and Evaluation", *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 18(4): 307~319.
- Li, D., Bou-Zeid, E., and Oppenheimer, M., 2014, "The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies", *Environmental Research Letters*, 9(5): 055002.
- Mirzaei, P. A. and Haghighat, F., 2010, "Approaches to study urban heat island - abilities and limitations", *Building and Environment*, 45(10): 2192~2201.
- Myrup, L. O., 1969, "A numerical model of the urban heat island", *Journal of Applied Meteorology*, 8 (6): 908~918.
- Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., and Williams, N. S., 2015, "Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes", *Landscape and Urban Planning*, 134: 127~138.
- Oke, T. R., 1982, "The energetic basis of the urban heat island", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455): 1~24.
- Oke, T. R., 1987, *Boundary Layer Climates*, Routledge.
- Peng, Lilliana L. H. and C. Y. Jim, 2013, "Green-roof effects on neighborhood microclimate and human thermal sensation", *Energies*, 6(2): 598~618.
- Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Bretz, S., Fishman, B. L., Kum, D. M., Sailor, D., and Taha, H., 1995, "Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates", *Energy and buildings*, 22(3): 255~265.
- Rosenzweig, C., Solecki, W. D., Cox, J., Hodges, S., Parshall, L., Lynn, B., and Watson, M., 2009, "Mitigating New York City's heat island: Integrating stakeholder perspectives and scientific evaluation", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(9): 1297~1312.

- Susca, T., Gaffin, S. R., and Dell’Osso, G. R., 2011, Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs, *Environmental Pollution*, 159(8): 2119~2126.
- Sweeney, A., West, R. P., O’Connor, C., 2011, “Parameters Affecting The Albedo Effect in Concrete. Department of Civil, Structural and Environmental Engineering”, *Trinity College*, Dublin, 2:1~8.
- Takebayashi, H., and Moriyama, M., 2007, “Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island”, *Building and Environment*, 42(8): 2971~2979.
- DOE(The U.S Department of Energy), 2010, *Guidelines for Selecting Cool Roofs*.
- NCAR, 2016, *WRF-ARW Modeling User’s Guide*.
- Zoulia, I., Santamouris, M., and Dimoudi, A. 2009, “Monitoring the effect of urban green areas on the heat island in Athens”, *Environmental monitoring and assessment*, 156(1): 275~292.

원 고 접 수 일 : 2017년 12월 20일
1차심사완료일 : 2018년 1월 11일
2차심사완료일 : 2018년 5월 2일
최종원고채택일 : 2018년 6월 29일

