3차원 미기상모형 ENVI-met을 활용한 가로수목 식재박스의 도심 온도저감효과 분석에 관한 연구

Study on Impact Analysis of Reducing Temperature in Central Business Area by Installation of Tree Box Using ENVI-met

양인철* · 황환철** · 이유화*** · 임지현****

Yang, Inchul · Hwang, Hwan-Chul · Lee, Yuhwa · Lim, Ji-Hyun

Abstract

A tree box provides an efficient water circulation environment, and stores more soil moisture content than typical trees along sidewalks due to its special-design concept. It is expected that the tree box has more reducing temperature effect since evaporation process consumes latent heat to reduce air temperature around. In this regard, a three dimensional micro-climate model, ENVI-met, was employed to run a scenario-based simulation to evaluate the effect of reducing temperature of the tree box. The outcomes showed that the tree box has a positive effect on mitigation of the heat island effects in urban area by reducing air temperature. It also turns out that comfort index improves when the tree boxes are installed despite a relative humidity increase.

Key words : Urban heat island, Tree box, Microclimate model, ENVI-met

요 지

가로수목 식재박스는 도로의 수목 공간을 활용하여 효율적인 물순환 환경을 구축하고, 식재된 수목에 충분한 수분 공급이 이루어지도록 특별히 설계되어 기존 가로수목에 비해 많은 지중 수분량을 유지할 수 있다. 수분은 기화현상을 통해 잠열을 소비하여 주변의 기온을 낮추는 역할을 하기 때문에 가로수목 식재박스는 일반 가로수목에 비해 온도저감효과가 클 것으로 기대된다. 이에, 본 연구에서는 가로수목 식재박스 설치가 도심 열섬현상 저감에 미치는 효과를 분석하기 위해 3차원 미기상모형인 ENVI-met을 활용한 시뮬레이션을 수행했다. 시뮬레이션 분석 결과에 의하면 가로수목 식재박스는 도심의 기온 저감에 효과가 있는 것으로 나타났는데, 특히 가장 더운 오후 시간대에는 2~3°C의 온도저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한, 증발산 증가에 따른 상대습도의 증가에도 불구하고 쾌적성이 향상되는 효과도 있는 것으로 나타났다. 따라서 가로수목 식재박스의 도심 온도저감 기능은 기존 가로수목에 비해 우수하며, 이는 열섬/열대야 현상을 경감하여 더위로 인한 재난에 대해 방재 효과가 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 도심열섬효과, 가로수목 식재박스, 미기상모형, ENVI-met

1. 서 론

2012년 7월말부터 20여일이 넘게 지속된 폭염과 열대야는 국민 생활에 많은 지장을 초래했다. 무더위로 인한 기력 저하는 물론이고, 열섬현상과 열대야로 인한 수면 방해는 일상 생활에까지 부정적인 영향을 미치고 있다. 더구나 보건복지부에서 실시한 「12년 폭염 건강피해 사례감시」 결과에 따라

2012년에 폭염으로 인한 온열질환자 수는 984명으로 2011년 443명의 두 배에 달하고, 사망자도 14명으로 2011년에 비해 8명이나 증가하여 폭염이 심각한 사회적인 문제가 되고 있음을 시사하고 있다.

열섬은 인구와 건물이 밀집되어 주변 지역의 온도보다 높은 특별한 기온현상을 나타내는 지역을 말하는데, 포장도로와 인공건축물, 콘크리트 지면의 증가로 인한 열수지 변화, 고층

*정회원. 한국건설기술연구원 도로연구실 수석연구원(E-mail: ywinter75@kict.re.kr)

Member. Ph.D, Senior Researcher, Highway Research Division, Korea Institute of Construction Technology

**연세대학교 토목공학과 학부생

Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

***교신저자. 정회원. 한국건설기술연구원 도로연구실 수석연구원 (Tel: +82-31-910-0763, Fax: +82-31-910-0161, E-mail: ylee@kict.re.kr)

Corresponding Author. Member. Ph.D, Senior Researcher, Highway Research Division, Korea Institute of Construction Technology

****한국건설기술연구원 도로연구실 전임연구원

Researcher, Highway Research Division, Korea Institute of Construction Technology

건물로 형성된 심한 요철로 인한 환기의 어려움 및 풍속감소에 의한 현열 수송 악영향, 도시활동에 의해 배출되는 열, 대기오염물질로 인한 온실효과, 투수성의 감소에 따른 증발량 감소, 식물의 감소 등이 그 원인으로 지목되고 있다. 특히, 도로나 건물 등의 밀집으로 인해 태양열의 흡수와 저장이 증가하고 이로 인해 지표의 방출 복사열의 감소로 열적 평형 상태가 깨지면서 열대야 현상이 심해지고 있다. 이러한 열섬 현상과 열대야의 효과적인 저감을 위한 노력으로 건물 옥상과 벽면 녹화, 쿨 루프(Cool Roof), 쿨 페이브먼트(Cool Pavement), 녹지 배치 변화, 쿨 스팟(Cool Spot), 가로수 설치 등의 다양한 연구·개발이 이루어지고 있다. 이 중 가로수 설치의 경우, 흔히 가로수의 열환경 완화 효과는 일사차단과 증산 때문이므로 주로 낮 기온을 저하시키는데 효과가 있다고 인식되고 있으나, 가로수에 의한 낮의 일사차단과 증산효과는 가로 공간에 대한 축열(heat storage)도 경감하기 때문에 야간의 열섬 현상 완화에도 공헌 한다(모리야마 외, 2011).

최근 한국건설기술연구원은 배수 및 오염물질 정화 기능을 갖는 새로운 가로수목 식재박스에 대한 설계 및 개발을 수행하였다(한국건설기술연구원, 2010). 또한 식재박스에 대한 효과 검증을 알아보기 위해 주진걸 외(2012)는 해당 식재박스의 효과를 SWMM모형을 이용하여 인천 청라지구를 대상으로 장기 우수유출 저감효과를 분석하였다. 분석 결과, 식재박스의 설치로 인하여 단기적으로 침투유출 저감 등의 치수 효과와 초기우수의 저감 등의 수질개선효과가 기대되며, 장기적으로는 도시하천 건전화 방지, 지하수위 상승 등 도시지역의 건전한 물순환 기능 회복에 효과적이라고 나타났다.

가로수목 식재박스의 몸체는 공극이 큰 여재로 채워져 있고 박스 공간 내에 물 저장을 위한 집수 공간이 존재한다. 이로 인해 식생 토양층에 기존 가로수목에 비해 많은 수분이 존재하기 때문에 수분 증발 작용이 증가하고 이로 인해 여름철 폭염 시 도시 가로의 열 저감에 효과가 있을 것으로 기대된다. 양금철 외(2007)는 일반 가로수목이 열 저감 효과가 있다고 했는데, 본 연구에서는 특별히 설계된 가로수목 식재박스의 설치가 기존 가로수목에 비해 열 저감 효과가 우수한지를 분석하였다. Nakayama(2010)는 신소재로 만들어진 물을 머금은 포장재(water-holding pavements)는 지표 온도뿐만 아니라 지상의 기온까지 낮춘다고 주장했으며, 가로수목 식재박스도 증가된 토양 수분량으로 인해 이와 같은 효과가 있을 것으로 기대된다. 이러한 분석을 위해 도시 미기상 연구에 많이 활용되는 수치 시뮬레이션 모형을 활용하였다. 즉, 수목과 토양 등에 대한 미세한 제어가 가능한 3차원 미기상 모형인 ENVI-met을 활용하여 토양층의 수분이 풍부한 가로수목 식재박스의 설치에 따른 도심 온도저감 효과를 분석하였다.

2. 기존 문헌 고찰

2.1 도시 미기상 수치 시뮬레이션 모형

기상과 기후라는 용어는 우리에게 매우 친근하나 그 구분

을 명확히 하는 경우는 드물다. 기상(meteorology)은 대기 중에서 일어나는 각종 물리 현상으로서 바람·비·구름·눈·무지개 등 대기 중에서 일어나는 여러 가지 대기 현상을 말하는 반면, 기후는 어떤 지역에서 규칙적으로 되풀이되는 일정 기간의 평균 기상 상황을 의미한다. 따라서 도심의 열섬현상과 열대야와 같이 일부 지역에 동적으로 나타나는 현상은 기상의 변화로 해석하는 게 일반적이며, 그 중에서도 지표면으로부터 지상 1.5 m 내에 존재하는 접지기층(接地氣層)의 기상을 미기상으로 분류하여 연구가 진행된다. 미기상은 수평적으로는 수 m에서 수 km의 범위에 걸치는 경우가 많으며, 시간적으로도 분단위에서 1/100초 단위를 이루며, 난류에 의한 열교환, 공기의 압축성, 지면 마찰, 복사 등의 영향이 크게 나타난다.

최근 도시의 양적 팽창으로 인해 도시 미기상 변화가 심각해지고, 이로 인한 사회적·경제적 피해가 증가함에 따라 도시 계획 단계에서부터 도시 미기상 변화를 고려하기 위한 다양한 방법들이 제시되고 있다. 특히, 도시 미기상 변화를 계량화하여 이를 지역별로 일정한 특징을 갖는 도시 미기후를 도출하는 일련의 과정에 대한 방법론들이 많이 제시되고 있는데, 현장측정, 장거리 확인방법, 풍동연구, 수치 시뮬레이션 모형 등이 있으며, 이 중 시간과 비용의 제약으로부터 비교적 자유로운 수치 시뮬레이션 모형이 주로 많이 활용된다.

도시 기후 연구를 위해 많이 사용되는 수치 시뮬레이션 모형으로는 일본 규슈대학에서 개발한 AUSSSM(Hagishima, 2001), 독일에서 개발된 UBIKLIM(Friedrich, 2001), FITNAH(Nielinger, 2001), ENVI-met(Bruse, 2004) 등이 있다.

AUSSSM 모형은 Multi-layer model로, Surface-layer scheme, Single-layer model에 비해 건물에 의한 공기역학 및 열 영향을 더 정확하게 고려할 수 있는 특징을 갖는다. 이 모형은 자연 상태의 지표면, HVAC(Heating, Ventilation, and Air Conditioning)시스템이 있는 건물 동역학 열시스템 등으로부터의 잠열 유속(flux) 산정이 가능한 몇 개의 sub-model로 구성되는데, 1) urban atmospheric sub-model, 2) soil sub-model, 3) building sub-model 등이 있다.

UBIKLIM 모형은 GIS(Geographic Information System) 기술을 사용하여 토지 이용도에 기초한 도시경계층(Urban Boundary Layer)¹의 열환경을 시뮬레이션하여 생기후²의 지역분포도를 도면에 제시하는데, 입력자료로 1) 10 m 해상도의 수치표고모델, 2) 토지이용/토지구조에 대한 정보, 3) 지역 바람장 자료 등을 요구한다.

FITNAH 모형은 중규모의 비유체정역학적(non-hydrostatic) 예보 모형으로, 복잡지형의 3차원 기상장의 계산이 가능하고 정확한 풍속 프로파일을 제공한다. 25 m~400 m의 높은 공간 해상도로 바람장 계산이 가능하고 토지이용(거칠기) 및 기복에 따르는 영향 분석, 육지·해풍 또는 하강·상승하는 바람

¹도시경계층 : 도시 구조물에 의해 형성된 경계층

²생기후(生氣候) : 생물이 생활하고 있는 장소의 기후를 말한다. 인간과 관련된 기후를 포함하여, 생기후라고도 한다. 기후 차이 및 변동이 생물의 생육, 생태에 큰 영향을 줌과 동시에 생물의 생육상태가 생물기후에 영향을 주어 그곳에서 특징적인 생물기후가 나타난다.

과 같은 지역(국지) 유동시스템에 대한 시뮬레이션이 가능하다.

ENVI-met 모형은 건물·지형·지물 등 소규모 환경과 미기후 사이의 상호작용을 시뮬레이션하는 모형으로, 지표면과 토양의 유형, 건물배치, 식물에 대한 선택이 가능하고, 지표면과 벽, 지붕, 식물 등에서 발생하는 열역학 과정을 이용하여 바람의 흐름, 난류 등과 같은 유체역학 파라미터를 산정한다. 식물과 건물외관에서 발생하는 그늘, 반사, 열을 포함하는 장·단파 복사, 식물에서 공기 중으로 발생하는 증발, 증산, 현열 유속, 식물생리요인, 지상 및 건물외관의 표면온도, 물과 에너지 간 균형 등을 고려하여 시뮬레이션을 수행한다.

이 외에도 Mihalakakou et al.(2004)는 인공신경망 이론을 이용한 지능형 데이터 기반 모형을 사용하여 그리스 아테네시에 대한 도시 열섬 현상의 모의실험을 수행하였다. 23개 지역에서 관측된 데이터(태양복사에너지, 낮/밤 기온, 최고 기온 등)를 이용해서 모형을 학습시켰는데, 모형을 통한 분석 결과 열섬 현상은 기후조건, 주변의 지배적인 기상 조건, 국지적인 지형 효과, 지역 도시화 효과 등에 매우 종속적임을 확인했다. Shrestha et al.(2009)는 일본 오사카를 대상으로 WRF(Weather Research and Forecasting) 모형을 이용하여 도시 열섬 현상을 모의실험했고, Saitoh(1996)는 일본 동경을 대상으로 관측 데이터와 3차원 도시 열 시뮬레이션 모형을 이용하여 도시 열섬 현상을 분석했다.

이와 같이 도시 미기상의 변화를 수치 시뮬레이션으로 분석한 연구는 많은 연구자들에 의해 다각도로 이루어지고 있다. 개별 시뮬레이션 모형은 각각의 특징을 가지는데, 본 연구에서는 그 중에서 수목과 토양 등에 대한 미세한 제어가 가능한 ENVI-met 모형을 이용하였다.

2.2 가로수목의 역할

가로수목은 국토녹화, 경관조성, 공해방지, 시민보건 등을 위하여 시가 및 강변지역 등의 가로와 노변에 조화있게 심는 나무를 말한다(서울특별시, 1984). 이러한 정의와 같이 가로수목은 그 역할이 다양하며, 가로수로 활용 가능한 수종 또한 다양하다. 양금철 외(2007)는 가로수목이 열 저감 외에도 산소공급, 부유먼지의 중금속 흡착·제거, 대기오염물질 속의 질소산화물, 환산화물, 오존 등을 제거하는 능력이 있기 때문에 적재적소에 알맞은 수종을 선정하여 식재해야 하는 필요성을 주장했다. Kikuchi et al.(2007)는 일본 센다이시의 중심에 위치한 두 개의 가로(히로세길과 조젠지길)를 대상으로 기온, 바람의 방향과 세기, 구온도(Globe Temperature), NOx 농도 등의 실측을 통해 가로수와 교통량이 기류 분포(Airflow Distribution)와 대기 오염물질의 난류 확산(Turbulent Diffusion), 열 환경 등에 미치는 영향을 분석했다. 가로수 밀도 차이에 따른 기온 변화 분석을 통해 느티나무가 4열로 구성되어 그늘 효과가 큰 조젠지길의 기온이 은행나무 3열로 구성된 히로세길에 비해 훨씬 낮게 나타남을 발견했다.

기존 가로수목 관련 문헌에서 밝혀진 바와 같이 가로수목

은 열 저감 효과가 있다. 본 연구에서는 특별히 설계된 가로수목 식재박스가 기존 일반 가로수목에 비해 열 저감 효과가 우수한 지에 대한 분석을 수행하였다.

3. 모형의 구성 및 적용

3.1 가로수목 식재박스 개요

가로수목 식재박스³⁾는 도로의 수목 공간을 활용하여 1) 효율적인 물순환 환경을 구축하고, 2) 비점오염물질의 효율적인 처리가 가능하며, 3) 식재된 수목에 충분한 수분 공급이 이루어지도록 하고, 4) 강우유출수의 선택적인 처리가 가능한 기술이다. 개발된 가로수 식재박스는 박스형 가로수목 식재박스 몸체(10), 집수 공간(S2)을 가지는 박스형 집수챔버(20), 수목식생층(30), 상층 여재층(41), 하층 여재층(42), 토양층(50), 월류통로(60), 배수통로(70), 투수통로(80), 지중투수통로(90), 단위모듈(100), 결합턱(110)으로 구성되어 있으며, 구조는 Fig. 1과 같다. 이는 구조적으로 기존 가로수목에 비해 많은 지중 수분량을 유지할 수 있으며, 따라서 도심의 기온 저감에 효과가 있을 것으로 기대된다. 이에, 본 연구에서는 가로수목 식재박스 설치가 도심 열섬현상 저감에 미치는 효과에 대해 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

3.2 ENVI-met 모형 개요

미기상을 연구할 때 가장 정확한 방법은 모든 변수들을 고려할 수 있는 현장 실측값을 이용하는 것이다. 하지만 이는 시공간적으로, 그리고 경제적으로 많은 제약을 갖는다. 실제로 광범위한 지역에 대해 다양한 도시 정책을 검증하는 방법으로 현장 실측값은 고려의 대상이 되지 못한다. 하지만, 모형의 경우 광범위한 시공간을 대상으로 다양한 시나리오에

Fig. 1. Structure of tree box

³⁾출원번호 10-2011-0137212 국내특허출원 중

Fig. 2. Data flow diagram of ENVI-met

대해 시뮬레이션이 가능하기 때문에 많은 연구에 활용이 되고 있다. ENVI-met 모형은 3차원 미기상 모형으로, 이를 이용해서 도시 환경 내에서 지표면과 초목, 공기 간의 상호작용을 모의 실험할 수 있다. 또한, 건물과 식생에 의한 그늘, 반사, 그리고 재복사에 따른 장파 및 단파 복사 플럭스, 식물의 물리학적 변수들의 모사를 포함하는 증발산 및 현열 플럭스, 각 격자점과 벽면에 대한 지표와 벽면 온도, 물과 토양 내부의 열 교환 등을 고려할 수 있는 장점을 갖는다. 특히, 이 모형은 초목과 토양, 습도, 바람 등의 입력 자료에 대한 제어가 가능하고, 다른 모형에 비해 소규모 환경과 미기후 사이의 상호작용을 잘 묘사하며 특히 개발 전(前) 상황에 대하여 개발 후(後) 변화를 예측하는 연구에 주로 사용된다(정우식 외, 2006). 따라서 가로수목 식재박스 설치 여부에 따른 도심 기온 변화 분석을 위한 가장 적합한 모형으로 판단되어 본 연구의 미기상 시뮬레이션 모형으로 이용하였다.

Fig. 2는 ENVI-met 모형의 데이터 흐름을 도식화한 모습을 보여준다. ENVI-met 모형의 구동을 위해서는 Area input file(.In)과 Configuration file(.CF)이라는 두 가지 입력 자료가 필요하다. Area input file은 시뮬레이션 대상 지역의 위치정보를 입력하는 파일이다. 대상 지역을 일정 규격의 격자로 분할하고, 건물의 위치와 높이, 재질, 식생의 위치와 종류, 토양 정보 등을 입력한다. 프로그램 내 제공되는 Area input file editor 기능을 이용하면 직접 정보들을 입력하여 쉽고 편리하게 자료를 구축할 수 있다. Configuration file에는 지역, 시간, 온도, 습도, 풍향, 풍속 등 시뮬레이션에 대한 환경 정보를 입력한다. 입력 자료에 대한 메타정보들은 별도의 데이터베이스 파일로 저장된다.

시뮬레이션의 출력 자료로는 ENVI-met 시뮬레이션을 통해 계산된 온도, 습도 등의 정보를 담고 있는 Main data files (.EDI/.EDT), 사용자가 지정한 점(point) 공간의 정보만을 포함하는 Receptor files, 1차원 모형의 정보를 담고 있는 1D-Model files 등이 있다. 출력 자료들은 대부분 ASCII 파일

형태이며, 이 형식의 자료들은 쉽게 이용 및 분석이 가능하다. 하지만 일부 출력 파일은 binary 파일이므로 ENVI-met 내에 내장된 Xtract 프로그램을 이용하여 ASCII 파일로 변환하거나 LEONARDO라는 그래픽 인터페이스 프로그램을 이용하여 수치자료를 시각화 하여 자료를 분석 할 수 있다.

3.3 시뮬레이션 모형 구축

태양복사 에너지는 지표면에 흡수되어 일부는 현열(Sensible Heat), 일부는 수분의 증발에 의한 잠열(Latent Heat)의 형태로 공기 중으로 전달된다. 현열은 지표면근 공기층의 기온 상승에 많은 영향을 주는 반면, 잠열은 물의 상태 변화(액체 → 기체)에 소비되는 에너지이기 때문에 주변 기온을 오히려 낮추는 역할을 한다. 그러므로 수분의 증발량이 많을수록 주변의 기온은 떨어지게 된다. 가로수목 식재박스는 일반적인 침투시설과 비슷한 구조를 갖추고 있는데, 강우초기에 신속하게 침투가 발생하는 시점까지는 우수를 저류하고, 저류공간이 포화된 이후에는 월류관을 통하여 유출됨을 가정하여 모형을 구성하였다. 즉, 일반적으로 식재박스의 토양층에 더 많은 수분이 포함되어 있으며, 집수공간에는 일정량의 우수가 저류되어 있기 때문에 물의 기화현상으로 인해 소비되는 잠열이 일반 가로수보다 많다. 따라서 가로수목 식재박스가 설치된 현장은 기화열 소비로 인한 주변 기온의 저감 효과가 있을 것으로 기대되며, 이를 모형으로 구성하기 위해 ENVI-met의 soil 데이터(지중 습도 포함)를 일부 수정하여 시뮬레이션을 수행했다. ENVI-met 모형은 다양한 연구에서 그 유효성이 검증되었기 때문에(고은아(2010), 문수영 외(2012)) 모형 자체에 대한 추가적인 검증은 불필요할 것으로 판단된다. 시공간적 대상범위에 대한 ENVI-met 모형의 정산은 기상청의 과거 관측 자료 중 최저/최고/평균기온 등 하루 중 기온 변화 패턴을 이용하였다. 본 연구의 목적이 가로수목 식재박스 설치 전후의 기온 변화 분석임을 감안할 때 실제 관측 기온을 이용한 세밀한 정산까지는 필요하지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 3. Simulation test site and associated ENVI-met network model

연구의 시간적 범위는 2012년 8월 중 하루(24시간)이고, 공간적 범위는 고양시 일산서구 일산경찰서 건너편에 위치한 연면적 71,232 m²에 해당하는 도심일대이다(Fig. 3). 이 지역은 고층 건물이 운집에 있으며 중심부에는 아스팔트로 덮인 주차장이 위치해 있고, 상대적으로 녹지 면적이 매우 부족한 전형적인 도심 형태를 갖는다.

고층 건물이 밀집되어 있는 대상 지역에 대한 위치 입력 자료를 정확하게 구축하기 위하여, 국토지리정보원에서 제공하는 항공 LiDAR 정사영상 자료를 활용하였다. 먼저 대상지역을 포함하는 500×500m 범위의 항공 LiDAR 정사영상을 TerraScan 프로그램을 이용하여 건물, 식생, 토지 등 각각의 등급으로 분류하였고, 이후에 분류 작업이 완료된 자료를 별도로 개발된 툴을 이용하여 격자 정보로 변환하였다. LiDAR 영상을 통해 구축한 초기 입력 정보의 식생과 토양의 분포는 실제 대상 지역의 분포와 다소 차이가 있으며 이를 직접 수정 해주는 과정이 필요하다. 이는 현장 답사를 통하여 실제 식생 분포에 대한 확인 작업을 거쳐 식생과 토양, 포장에 대한 정보를 수정·입력하여 초기 입력 정보(.IN)를 구축하였다. Fig. 3의 우측 그림은 대상지역을 ENVI-met으로 코딩한 결과를 보여주며, 4개 지점(A~D)을 선택하여 기온의 변화를 측정했다.

3.4 시뮬레이션 결과 및 분석

본 연구에서는 현재 상태를 나타내는 일반 가로수목

(Typical Tree) 시나리오(Case1)과 가로수목 식재박스(Tree Box) 시나리오(Case2)를 ENVI-met 모형으로 구축하여 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과를 활용하여 가로수목 식재박스가 주변 기온에 미치는 효과를 분석하였다. Fig. 4는 시나리오별로 각 지점의 오전 8시부터 오후 8시까지의 기온 변화를, Fig. 5는 기온 분포 변화를 나타낸다.

두 시나리오 모두 오후 3~5시경에 최고 기온을 보이고, 오후 8시까지 30°C를 넘는 열대야 현상이 나타난다. 이는 실제 2012년 8월의 기온의 패턴과 유사한 것으로(기사청 자료에 의하면 2012년 8월 1일의 최고 기온은 오후 3시경 35.1°C임), 시뮬레이션이 일반적인 기온 상황을 적절하게 포착함을 보여준다. 기온이 가장 높은 오후 시간대의 경우 일반 가로수목이 설치된 Case1보다 가로수목 식재박스가 설치된 Case2의 기온이 약 2~3°C 정도 낮음을 볼 수 있다. 이러한 현상이 가로수목 식재박스가 일반 가로수목에 비해 지중에 포함하는 수분의 양이 많기 때문에 태양복사열로 인한 온도 상승 저감 효과를 가져 오기 때문인 것으로 판단된다. Nakayama(2010) 연구에 의하면, 신소재로 만들어진 물을 머금은 포장재는 지표 온도뿐만 아니라 지상의 기온까지 낮추는 것으로 분석되었는데, 일반 잔디보다 1~2°C 낮추고, 일반 옥상보다는 3~5°C 낮추는 것으로 나타났다. 가로수목 식재박스 역시 여과재로 인한 공극율 증가에 따라 지중에 저장된 수분이 높기 때문에 지표층에서 발생하는 잠열효과로 인해 동일한 결과가 도출된 것으로 판단된다. 다만, 이러한 결과는

Fig. 4. Air temperature change at each point by scenario

Fig. 5. Change of air temperature distribution

가로수목 식재박스 몸체가 포화되어 최고의 효율을 발휘하는 것을 가정한 것이기 때문에 오랜 기간 비가 오지 않을 경우 기온 저감 효과는 감소할 것으로 판단된다.

일반 가로수목으로 표현되는 Case1의 경우 오후 5시경 지점C에서 가장 높은 기온(36.95°C)을 보이는데, 이는 지점C의 공간적 위치 때문이다. 지점C는 아스팔트 도로 상에 위치하고 태양 복사열에 직접적으로 영향을 받기 때문에 다른 세 지점에 비해 높은 기온을 유지한다. 그러나 지점 B의 경우도 아스팔트 도로에 위치하지만, 주변의 고층 건물로 인해 태양 복사열이 차단되는 효과 때문에 지점C보다는 낮은 기온을 나타낸다(Fig. 5 참조).

Fig. 6은 두 개의 시나리오에 대해 시간 별 상대습도의 변화를 보여준다. 상대습도는 일반적으로 기온과 음의 상관관계를 가지기 때문에 오후 시간대로 갈수록 값이 낮아지고 밤이 깊어질수록 다시 올라가는 현상을 보인다. 가로수목 식재박스는 그 특성 상 일반 가로수목에 비해 증발산 효과가 크기

Fig. 6. Relative humidity change by scenario

때문에 상대습도가 높게 나온다. 이는 다습으로 인한 쾌적성 저해 요소가 될 수 있다. 가로수목 식재박스의 이러한 문제 점을 확인하기 위해 실제 온열쾌적감(Predicted Mean Vote,

Fig. 7. PMV Distribution by scenario

PMV)⁴의 분포를 Fig. 7과 같이 확인하였다. 분포도에서 볼 수 있듯이, Case2의 경우가 Case1보다 전체적으로 쾌적한 상태인 것으로 나타났는데, 이는 가로수목 식재박스 설치로 인한 습도상승보다 온도저감이 쾌적성에 미치는 효과가 크기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

전 지구적인 기후변화로 인해 한반도에는 여름 내내 무더위가 가승을 부렸고, 폭염과 열대야는 1,000명에 이르는 온열질환자와 가파르게 증가하는 사망자 수를 야기하는 등 기후문제를 넘어 사회·경제적 문제로 확대되고 있다. 이러한 문제의 해결책으로서 도시의 열섬효과를 완화시키는 수목공간화는 온도저감 효과가 클 뿐만 아니라 도심 미관 향상, 휴식 공간 제공 등의 장점을 동시에 제공한다. 본 연구에서는 수목공간 창출에 있어서 수목에 추가적인 기능을 갖는 가로수목 식재박스의 역할과 온도저감 효과를 3차원 미기상 시뮬레이션 모형을 이용해서 분석하였다.

가로수목 식재박스는 도로의 수목 공간을 활용하여 1) 효율적인 물순환 환경을 구축하고, 2) 비점오염물질의 효율적인 처리가 가능하며, 3) 식재된 수목에 충분한 수분 공급이 이루어지도록 하고, 4) 강우유출수의 선택적인 처리가 가능한 기술이다. 관련 선행 연구인 주진걸 외(2011)의 연구에서는 가로수목 식재박스가 치수와 수질개선, 물순환 기능 회복 측면에서 효과적임이 밝혀졌다. 이와 더불어 본 연구를 통해 가로수목 식재박스는 도시의 기온 저감에도 효과가 있는 것으로 확인되었는데, 특히 가장 더운 오후 시간대에는 2~3°C의 온도저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한, 증발산 증가에 따른 상대습도의 증가에도 불구하고 쾌적성(PMV)이 향상되는 효과도 있는 것으로 나타났다. 기온의 저감에도 불구하고 상대습도가 지나치게 증가할 경우 오히려 도심 환경에 부정적인 영향을 미칠 수 있는데, 가로수목 식재박스는 그런 현상은 발생하지 않는 것으로 나타났다. 따라서 가로수목 식재박스의 도심 온도저감 기능은 기존 가로수목에 비해 우수하며, 이는 열섬/열대야 현상을 경감하여 더위로 인한 재난에 대해 방재 효과가 있는 것으로 나타났다. 열섬/열대야 현상은 국가 재난 상황 단계까지 이르고 있으며, 이에 대한 해결책으로 다양한 도심 수목공간화 정책이 제시되고 있다. 이러한 시점에서 우수한 유출수 처리 능력과 동시에 기온 저감 효과 또한 뛰어난 가로수목 식재박스는 매우 의미있는 기술임에 틀림없다. 이는 향후 도심 녹화에 대한 연구 시 가로수목 식재박스와 같이 수목 개체에 대한 미시적인 연구가 함께 이루어질 필요가 있음을 시사한다.

위에서 제시한 연구의 성과에도 불구하고 본 연구는 몇 가지 한계점을 갖는다. 첫 번째, 식재박스의 규모, 조합, 공간적 분포 등 다양한 시나리오에 대한 분석이 부족하다. 향후 보다 다양한 시나리오에 대한 시뮬레이션을 통해 기온과 상대

습도의 변화를 세밀하게 관측하고, 상대습도 증가로 인한 쾌적성 저해 문제 여부를 확인할 필요가 있으며, 쾌적성 저해가 발생하는 시나리오의 경우 이를 해결할 수 있는 방안에 대한 모색이 요구된다. 그리고 연구를 위해 활용된 ENVI-met의 경우 소규모 환경만을 대상으로 하기 때문에 향후 대규모 환경에 대한 가로수목 식재박스 적용 연구를 위해서는 다른 모형에 대한 고려가 필요하다. 마지막으로, 가로수목 식재박스의 잠열효과와 실제 주변 온도의 저감에 대한 실측이 수반되지 않은 것은 본 연구의 한계로 지적되며, 향후 이를 보완할 수 있도록 실측에 근거한 실험이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발 연구개발사업의 연구비지원(11첨단도시G06)에 의해 수행되었습니다.

References

- Bruse, M. (2004) ENVI-met 3.1 Online Manual, Bochum, Germany (<http://www.envi-met.com>) accessed on 31 August 2012.
- Fanger, P.O. (1970) *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*, Copenhagen: Danish Technical Press.
- Friedrich, M., Gratz, A., and Jendritzky, G. (2001) Further development of the urban bioclimate model UBIKLIM, taking local wind systems into account, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 10, No. 4, pp. 267-272.
- Hagishima, A., Tanomoto, J. Katayama, T., and Ohara, K. (2001) An organic analysis for quantitative estimation of heat island by the revised Architecture Urban Soil Simultaneous Simulation Model, AUSSSM. Part 1. Theoretical frame of the model and results of standard solution, *J. Archit. Plan. Environ. Eng.*, 550, pp. 79-86.
- Joo, J.G., Lee, Y.H., Cho, H.J., and Kim, J.H. (2012) Analysis of Long-term Runoff Reduction Effects by Installation of Street Tree Box, *Journal of KOSHAM*, Vol. 12, No. 2, pp. 193-197.
- Jung, W-S, Park, J-K, and Lee, H.W. (2006) An Analysis on Influence of Geographical Variation Induced by Development Affecting to the Local Scale Wind Environment, *J. KOSAE*, Vol. 22, No. 6, pp. 888-903.
- Kikuchi, A., Hataya, N., Mochida, A., Yoshino, H., Tabata, Y., Watanabe, H., and Jyunimura, Y. (2007) Field study of the influence of roadside trees and moving automobiles on turbulent diffusion of air pollutants and thermal environment in urban street canyons, *Proceedings of the 6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings*, pp. 137-144.
- Ko, E.-A. (2010) Wind Simulation and Optimal Building Allocation Wind Simulation and Optimal Building Allocation, *Master Thesis, Hanbat Univ.*
- Korea Institute of Construction Technology, (2011), Development of Low Temperature Road Technologies in Urban Area(IV).
- Mihalakakou, G., Santamouris, M., Papanikolaou, N., Cartalis, C., and Tsangrassoulis, A. (2004) *Pure and Applied Geophysics*, 161, pp. 429-451.
- Moon, S.Y. and Jang, D.H. (2012) Wind Simulation and Optimal Building Allocation Wind Simulation and Optimal Building Allocation, *Journal of KIEAE*, Vol. 12, No. 2, pp. 65-75.

⁴온열쾌적감(PMV)은 쾌적지표(comfort index)의 한 종류로, 주위 환경간의 열적 반응에 대한 인체의 열평형을 기초로 제안된 이론식으로 표현된다. 주로 -0.5~0.5 상태를 쾌적범위로 간주한다.

- Moriyama, Masakazu (2011) *Heat Island*, Purungilbook.
- Nakayama, T. and Fujita, T. (2010) Cooling effect of water-holding pavements made of new materials on water and heat budgets in urban areas, *Landscape and urban planning*, Vol. 96, pp. 57-67.
- Nielinger, J. and Kost, W.-J. (2001) Simulation of realistic location-related wind distributions with the mesoscale model FITNAH, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 10, No. 4, pp. 235-238.
- Saitoh, T.S., Shimada, T., and Hoshi, H. (1996), Modeling and simulation of the Tokyo urban heat island, *Atmospheric Environment*, Vol. 30, No. 20, pp. 3431-3442.
- Seoul (1984) *Manual of Roadside Trees in Seoul*, Seoul.
- Shrestha, K.L., Kondo, A., Maeda, C., Kaga, A., and Inoue, Y. (2009) Numerical simulation of urban heat island using ridded urban configuration and anthropogenic heat data generated by a simplified method, *Proceedings of the 7th International Conference on Urban Climate*, 29 June ~ 3 July 2009, Yokohama, Japan.
- Yang, G.C. and Kim, J.G. (2007) Role of Roadside Trees on Road Pollutants, *International Journal of Highway Eng.*, Vol. 9, No. 2, pp. 37-40.
- © 논문접수일 : 2012년 11월 30일
 © 심사의뢰일 : 2012년 12월 03일
 © 심사완료일 : 2013년 01월 04일