

도시도로 녹지의 도로 표면온도 저감 효과에 관한 연구

조혜진 · 임지현

한국건설기술연구원

The Effect of Urban Road Vegetation on a Decrease of Road Surface Temperature

Cho, Hye-Jin · Lim, Ji-Hyun

Korea Institute of Construction Technology

ABSTRACT

One of the major factors which increase urban temperature is roads. This paper is aimed to investigate the effect of urban roadside vegetation on the road surface temperature. For this, surface temperature was measured at 18 spots using the thermal imaging camera in terms of road components including use of roadside land use, roadway, sidewalk, roadside vegetation and vegetation median barrier. The size of the roadside vegetation and related urban road characteristics were also measured. In terms of the effect of roadside vegetation on a decrease in road surface temperature, the roadside land use as a green area or open space was the highest, followed by the size of vegetation median barrier and the size of roadside vegetation. Besides road surroundings, an increase in the green zone such as roadside vegetation and median strip vegetation has a significant impact on lowering road surface temperature. Therefore, a good solution for reducing urban heat island effects would be to increase the area of roadside vegetation and green areas along roads.

Key Words: Heat Island Effect, Road Side Vegetation, Urban Surface Temperature, Urban Road Design

국문초록

도시의 온도상승의 주요 인자 중 하나가 도시부 도로이다. 본 연구의 목적은 도시도로 녹지가 표면온도의 저감에 영향을 미치는 요인을 파악하는 것이다. 이를 위해 서울시 도로 18개 지점을 선정하여 도로횡단구성요소(주변토지이용, 차도, 보도, 식수대, 중앙분리대)별로 열화상카메라로 표면온도를 조사하고, 도시도로 녹지 면적을 측정하였다. 도시도로 녹지의 도로 표면온도 저감에 미치는 영향을 분석한 결과 도로 주변토지이용이 녹지 및 오픈스페이스일 경우 도로온도에 미치는 영향이 가장 크며, 식생중앙분리대의 면적, 식수대의 면적 순으로 표면온도를 저감시키는 것으로 나타났다. 도로 주변뿐만 아니라 도로설계의 구성요소 내에서 식수대, 중앙분리대 등의 녹지면적 증가는 도로의 표면온도 저감에 영향을 미친다. 도시의 고온화현상을 완화하기 위하여 도시도로 녹지 면적을 증가시키는 것도 한 방안이다.

주제어: 열섬현상, 도로식생, 도시표면온도, 도시도로 설계

Corresponding author: Hye-Jin Cho, Road Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea, Tel.: +82-31-910-0169, E-mail: hjcho@kict.re.kr

I. 서론

우리나라는 급속한 도시화로 인해 도시환경은 녹지훼손, 토지이용 및 지표면의 변화로 도시의 열섬화 등 도시기후의 변화를 초래하고 있다. 특히 도시화로 인한 도시내 불투수층 면적의 증가를 그 주요 원인으로 볼 수 있다. 이러한 도시의 불투수층 면적의 증가는 자연증발산을 막고 우수유출량을 증가시켜 도시 온도 상승에 영향을 미친다. 최근 이러한 문제점에 대한 개선책으로 도시부에 녹지를 확보하는 노력이 국내에서 활발하게 진행되고 있고, 녹지의 온도저감효과에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다.

도시화로 인해 변화되는 다양한 지표면의 변화 중 하나가 도로의 면적 증가이다. 예를 들면 서울의 경우 전체면적의 약 70%가 불투수면적이고, 이중 2/3를 차지하는 것이 도로이다. 이러한 도로면적의 증가는 교통량 증가로 이어져 도시의 온도 상승에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다. 그러나, 지금까지 도시의 열섬현상에 대한 연구 중 도로가 도시의 온도 증가에 미치는 영향에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 지금까지 도로는 계획단계부터 유지관리단계까지 원활한 교통만을 고려하여 설계되고 운영되었다. 도시내의 도로를 설계할 때 도로의 양쪽에 가로수를 설치하거나 중앙분리대에 식재를 해왔는데, 이 때 도로와 관련된 녹지는 대부분 경관적인 측면과 안전적인 측면을 고려하여 설치되었다.

도로의 횡단구성은 그림 1에서 보는 바와 같이 지방지역과 도시지역으로 나누어서 구성이 되며, 도로설계기준에서는 도시지역의 경우 가로수가 심어져 있는 부분을 식수대라고 명명하고 있다. 식수대는 양호한 보차분리, 통행환경 향상 등 도로교통 환경의 정비가 주요한 목적이고, 그 외에도 대기오염, 무단횡단방지 등 도로 주변에 대한 양호한 생활환경을 제공하는 기능을 수행한다(국토해양부, 2000). 그리고 중앙분리대의 유형 중 식수가 있는 유형은 식생중앙분리대이다.

최근 도시내의 녹지공간이 도시의 온도저감에 미치는 영향에 대해서 활발한 연구가 수행되고, 실제 도시내 녹지공간의 확보가 이루어지고 있다. 이와 더불어서 도로 주변을 따라 녹도라는 이름으로 가로수를 추가적으로 설치하는 사례도 늘고 있다.

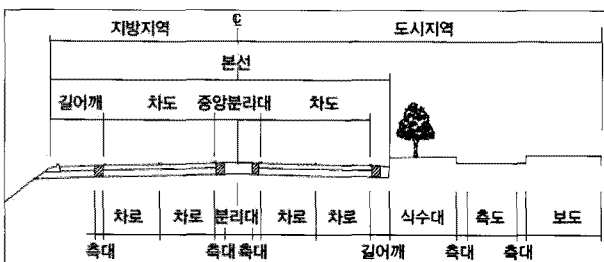


그림 1. 도로의 횡단구성
자료: 국토해양부, 2000: 53

공원과 같은 도시내 녹지공간의 온도저감효과에 관한 연구는 많이 수행되어 왔으나, 도시도로 녹지가 도시내 도로주변의 온도저감에 미치는 영향에 대한 연구는 매우 부족하였다.

본 연구에서는 도로설계자의 측면에서 도로의 중요한 횡단구성을 이루고 있는 도시부 도로의 녹지, 즉 도로주변의 식수대, 중앙분리대 등이 주변 온도저감에 미치는 영향을 현장측정 등을 통해서 살펴 보고, 도로의 녹지관련 변수가 온도저감에 미치는 영향을 예측하고자 한다.

본 연구를 통해서 기존 도로의 식수대 등의 녹지공간이 온도저감에 미치는 영향을 밝히고, 이를 통해서 앞으로 설계되는 도로에서의 식수대나 중앙분리대 등의 개선된 설계기준을 제시함으로써 도로가 도시 열섬현상에 미치는 악영향을 완화하는데 기여할 수 있으리라 생각된다. 이를 위해서 본 연구에서는 먼저 도로의 녹지공간의 표면온도를 측정하고, 도로녹지가 주변 온도에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

II. 이론적 고찰

최근 도시의 온도저감을 위한 녹지에 대한 많은 연구가 많이 진행되고 있다. 본 장에서는 녹지공간이 온도저감에 미치는 영향을 분석한 연구를 중심으로 기존문헌을 살펴보고, 본 연구의 주요 변수를 도출하고자 한다.

박인환 등(1999)은 대구·경주·포항 3개 도시의 추이대를 대상으로 식생지수, 지역기후, 조건과 도시열섬현상의 관계를 연구하였으며, 윤용한(2001)은 공원 및 주변지역의 온도와 풍향, 풍속, 녹지율, 수목본수 등에 관한 회귀식을 도출하여 녹지의 특성과 바람에 의한 기온저감효과를 설명하였다. 연구 결과, 녹지 내의 풍속과 관계없이 주변시가지보다 녹지가 저온의 경향을 보였고, 녹지내의 고온역은 포장면 및 나지에서, 저온역은 수림지에서 나타났다고 보고하였으며, 또한 녹지의 기온저감효과는 풍속이 강할 때-약할 때-가장 약할 때의 순으로 그 효과의 영향범위가 크게 확대되는 경향을 보였다고 보고하였으며, 풍속이 약할 때 일교차가 최대로 나타났다고 보고하였다. 기온저감효과는 토지피복비율 중 수림지율, 초지율이 높을수록 높게 나타났고 그 효과는 풍속이 약할 때, 강할 때, 가장 약할 때의 순으로 나타났다고 보고하였다.

조현길 등(2002)은 도시생활 환경에서 도시녹지가 대기 및 열섬현상 완화와 관련된 온도저감에 기여하는 효과를 규명하였다. 여름철 평균온도는 녹지가 전무한 장소에 비해 수목피도가 약 54%인 장소에서 평균 3.6℃, 100%인 수림지에서 4.5℃ 더 낮았다고 보고하였다. 일정 수준까지의 수목피도 10% 증가는 여름철 온도를 약 0.6℃씩 낮추는 효과가 있는 것으로 나타났다고 보고하였다. 또한, 서울시 자동기상관측망 자료와 녹지면적 분석에 근거하여 온도저감효과를 가장 잘 설명하는 독립변수는 수목

피도라고 보고하였다. 녹지의 온도저감 효과를 분석함에 있어 수목피도나 녹지면적 크기에 초점을 두어 연구를 하였다.

김수봉과 김해동(2002)은 가로수가 도시온도 저감에 미치는 영향을 분석하기 위하여 열수지 및 복사수지 해석을 통하여 태양복사에너지가 식피층 내외에 분배되는 에너지를 분석한 결과, 식피층에서는 지면도달 태양에너지의 대부분이 수증기 증발로 소모되어(약 70%), 태양에너지의 대부분의 온도상승으로 나타나는 나대지에 대하여 저온이 형성된다고 보고하였다. 이로부터 가로수의 증산작용으로 소모하는 에너지가 기온저하에 미치는 영향을 정량적으로 평가한 결과 일사가 강한 시간동안의 기온은 식피층 기온보다 1~2.5℃ 높았고, 열면온도는 식피층 기온보다 1~2℃ 낮게 나타났다고 보고하였다. 이는 열면의 증산작용이 식피층 내 저온이 형성되며, 식피층 내의 열을 빼앗아 기온저하를 유발시키기 때문이라고 보고하였다.

김학열과 김운수(2003)는 도시 내·외부의 등온도 분포곡선을 추정하여 지도화한 결과, 도시온도가 토지이용과 높은 상관관계가 있다고 보고하였다. 특히 도시 녹지지역의 온도가 다른 도심부의 온도와 비교하여 현저히 낮게 관측됨을 통하여 녹지의 기온저감효과를 확인하여 토지의 피복상태와 대기온도는 높은 상관관계가 있다고 보고하였다.

도시내 도로와 온도저감에 대한 연구로는 도로의 재질별 온도효과를 측정한 이은엽 등(1996)의 연구가 있다. 이 연구에서는 토지피복 중 특히 도로의 재질별 표면온도와 기온을 중심으로 온도변화를 측정하였다. 연구결과를 살펴보면 여름철의 지표온도는 잔디<나지<인터록킹블럭<콘크리트의 순서로 높게 나타났고 봄철 또한 동일하였다. 토지이용별로 기온을 측정할 결과, 또한 지표온도에서와 마찬가지로 잔디<나지<인터록킹블럭<콘크리트의 순서로 높게 나타났다. 자연재료(나지, 잔디)의 기온의 최고-최소 온도의 차이가 인공재료(포장면)에 비해 적게 나타나, 일교차의 완화효과가 있다고 보고하였다.

위의 연구들은 대부분 녹지가 도시 온도저감에 미치는 영향을 분석하였고 도시를 대상으로 하였으며, 녹지는 가로수, 잔디와 같은 소규모 녹지에서부터 도시공원 등 대규모 녹지까지를 대상으로 하였다. 연구결과와 대부분이 환경문제로 대두된 도시 고온화를 완화하고, 미기후 개선을 도모하기 위해 녹지(도시공원, 가로수, 잔디 등)를 조성할 것을 제시하였다.

대다수의 연구 결과, 토지피복상태와 녹지가 도시온도저감에 영향을 미쳤다는 점에 착안하여, 본 연구에서는 여름의 도시 내 고온화의 주요 원인이 되는 불투수층 중 가장 높은 비율을 갖는 도로를 중심으로 도로의 설계요소 내의 식수대, 중앙분리대, 도로주변토지이용 등의 녹지가 도로표면온도에 미치는 영향을 분석하였다.

III. 실험설계

본 연구의 실험설계는 현시선호 실험계획법(Stated Preference Method)

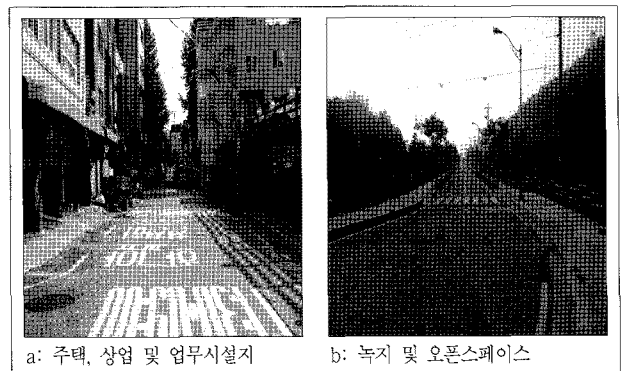
를 적용하였다. 현시선호 실험계획법은 대표적인 실험계획법으로 여러 가지 실험변수를 고려하여 실험실이 아닌 현장에서 실험을 할 경우에 반영하는 대표적인 실험계획법이다. SP 설계법은 다양한 실험조건을 만족시키는 현장에서 실험조건별로 설계하여 측정하는 데에 맞는 가장 적합한 방법이다(김감수, 2006). SP조사 설계방법 중 본 연구에서는 부분 배치요인 설계기법, 즉, 실험계획법을 이용하여 주어진 선택 대안 및 수준 수의 모든 조합을 고려하지 않고 교호작용의 일부 분만을 고려하는 설계 방법을 적용하였다. 실험설계를 위해 설명변수를 선정하고 각 변수별로 다양한 수준을 설계하였다. 이러한 변수별 수준의 변화는 설명변수의 변화로 인한 종속변수의 영향을 예측하는데 도움을 준다.

1. 실험 변수의 선정 및 설계

본 연구에서는 도로표면온도분포 분석에 대해 미시적인 접근을 시도하였다. 따라서 기존 연구 고찰에 근거해서 온도에 영향을 미치는 주요 변수로 토지이용, 식수대의 종류, 중앙분리대의 종류를 고려하여 설계하였다. 온도변화에 영향을 주는 요인을 선정하기 위해 도로 온도에 영향을 주는 요인순으로 구분하였다. 요인간의 상관관계를 고려하여 상관성이 큰 변수들을 중심으로 상관계수를 비교하여 큰 변수를 요인으로 채택하였다.

1) 토지이용 유형

기존 연구 결과에 따르면 도시열섬현상에 관한 연구 중 도시온도의 공간적 분포현상이 토지이용과 높은 상관관계가 있었다. 도시 녹지 지역의 온도가 다른 도심부의 온도와 비교하여 현저히 낮아 녹지의 기온저감효과가 뚜렷했다(김학열, 2003). 따라서, 본 연구에서는 도로온도분포의 요인으로 토지이용을 변수로 설정하고 도로주변 토지이용을 녹지와 건물로 구분하여 변수의 수준을 그림 2와 같이 설정하였다. 도로 주변의 토지이용은 보도의 양측의 토지의 이용이 주택, 상업 및 업무시설 지인지 녹지 및 오픈스페이스인지에 따라 구분하였다.



a: 주택, 상업 및 업무시설지 b: 녹지 및 오픈스페이스

그림 2. 토지이용 변수와 수준

2) 식수대의 유형

도로주변의 식수대의 온도저감효과를 살펴보기 위하여 식수대를 설명변수로 선정하였다. 문헌연구에서 살펴본 바와 같이 도시 내 녹지의 규모가 크면 클수록 녹지내외에 미치는 기온의 저감효과가 크다. 따라서 본 연구에서는 도로의 식수대의 유형 및 크기, 구성이 온도저감효과에 미치는 영향을 고려하기 위해서 식수대의 유형을 크기와 구성을 고려하여서 식수대가 수목만 설치되어 있는 경우와 잔디와 함께 설치되어 있는 경우로 구분하였고, 식수대의 크기에 따라서 다시 두 가지 유형으로 나누었다. 식수의 크기에 따라 유형을 분류하는 방법은 연구방법에 따라 약간의 차이를 보인다. 조현길과 안태원(1996)은 수고와 수관폭에 따라서 주거지 내의 수목의 크기를 소, 중, 대로 구분하였다. 본 연구의 대상은 가로수이고, 일반적으로 가로수의 경우 수목의 크기, 즉 수고가 높으면서 수관폭도 함께 커지고 대부분의 경우 수종이 다양하지 않다.

본 연구에서는 서울시에 식재되어 있는 수종을 조사한 결과를 반영하여 수고가 2m 이하인 경우 소형 식재, 3m 이상인 경우 대형 식재로 구분하였다. 따라서, 식수대 변수의 수준은 그림 3과 같이 네 가지 수준, 즉 소형 식수, 대형 식수, 잔디와 소형 식수, 잔디와 대형 식수로 구분하였다. 잔디를 유형에 포함한 이유는 식수만 있는 경우보다 잔디를 함께 한 경우 도로 횡단구성 중 일반포장면과 비교해서 표면적이 증가하고 온도저감에 영향을 미칠 것으로 기대되었기 때문이다.

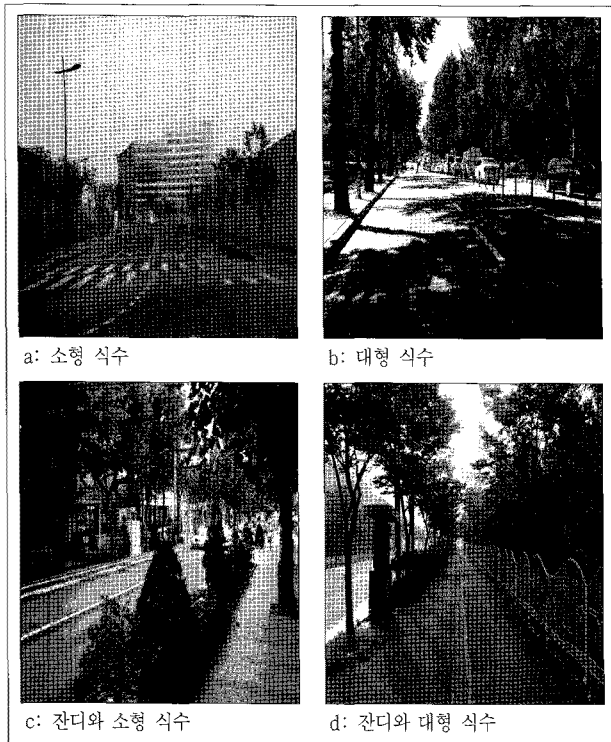


그림 3. 식수대 변수와 그 수준

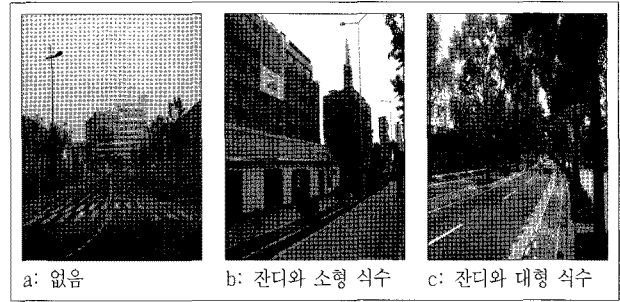


그림 4. 식생중분대 변수와 그 수준

3) 식생중양분리대의 유형

중양분리대는 차도를 통행의 방향에 따라 분리하고, 옆부분의 여유를 확보하기 위하여 도로의 중앙에 설치하는 분리대와 측대를 말한다. 중양분리대의 유형중 녹지형태의 중양분리대를 식생중양분리대라고 한다(국토해양부, 2000). 식생중분대는 야간 차량의 주행시 전조등의 불빛을 방지할 뿐만 아니라 식수로 인한 차도에 그늘을 만들고, 녹지로 인한 도로온도의 저감효과를 가져온다. 본 연구에서는 이러한 식생중분대의 유형 및 크기가 도로의 온도저감에 미치는 영향을 분석하고자 식생중분대를 설명변수로 선정하고, 분리대에 설치되는 식수를 그 크기와 형태에 따라 그림 4와 같이 세 가지 유형으로 분류하였다.

4) 차로수

위의 변수와 더불어서 도로의 특성을 반영하기 위하여 차로수 변수를 함께 고려하였다. 차로수는 도로의 폭원을 대표하는 값으로 도시내 도로의 경우 광로, 대로, 중로, 소로 등에 따라 다양한 차로폭이 존재한다. 본 연구에서는 서울의 도심 도로현황과 녹지가 도로온도저감에 미치는 효과를 고려하여 2, 4, 6차로의 세 가지 수준을 고려하였다.

2. 실험의 설계

위에서 선정한 설명변수와 그 수준을 근거로 SP 실험설계를 적용한 결과는 표 1과 같다. 실험은 SP 설계 중 부분배치설계기법을 적용하였다. 부분배치설계기법이란 실험변수와 그 수준이 많이 전체 조합을 모두 고려하기 어려운 경우, 통계적으로 가장 적절한 변수의 조합을 선택하여 실험에 반영하는 계획법이다.

본 연구에서는 실험설계표 계획을 위해 일반적으로 많이 사용되는 Kocur의 설계표를 적용하였다(Kocur et al., 1982). 실험계획표를 적용한 결과, 표 1과 같이 총 18개의 실험 대안을 도출하였다.

3. 실험대상지 선정

도시 열섬현상은 인구와 건물이 밀집되어 있는 도심지는 일

표 1. 실험계획법에 의한 직교배열표

실험 번호	차로수	주변 토지	식수대	식생증분대	위치
1	2차로	건물	없음	없음	종로구 이화동
2	2차로	건물	잔디와 대형식수	없음	종로구 종로 1, 2, 3, 4가동
3	2차로	건물	소형 식수	잔디와 대형식수	마포구 상암동
4	2차로	건물	소형 식수	없음	마포구 상암동
5	2차로	녹지	소형 식수	잔디와 소형 식수	종로구 종로 1, 2, 3, 4가동
6	2차로	녹지	잔디와 소형 식수	없음	종로구 삼청동
7	4차로	건물	없음	없음	마포구 상암동
8	4차로	건물	소형 식수	없음	종로구 종로 5, 6가동
9	4차로	건물	대형식수	없음	종로구 종로 1, 2, 3, 4가동
10	4차로	녹지	소형 식수	없음	마포구 상암동
11	4차로	녹지	잔디와 소형 식수	없음	종로구 종로 1, 2, 3, 4가동
12	4차로	녹지	잔디와 대형식수	잔디와 대형식수	종로구 청운효자동
13	6차로	건물	없음	없음	종로구 종로 5, 6가동
14	6차로	건물	잔디와 대형식수	잔디와 소형 식수	종로구 종로 1, 2, 3, 4가동
15	6차로	건물	소형 식수	잔디와 대형식수	성북구 성북동
16	6차로	녹지	소형 식수	없음	마포구 상암동
17	6차로	녹지	대형식수	없음	종로구 종로 1, 2, 3, 4가동
18	6차로	녹지	소형 식수	잔디와 소형 식수	마포구 상암동

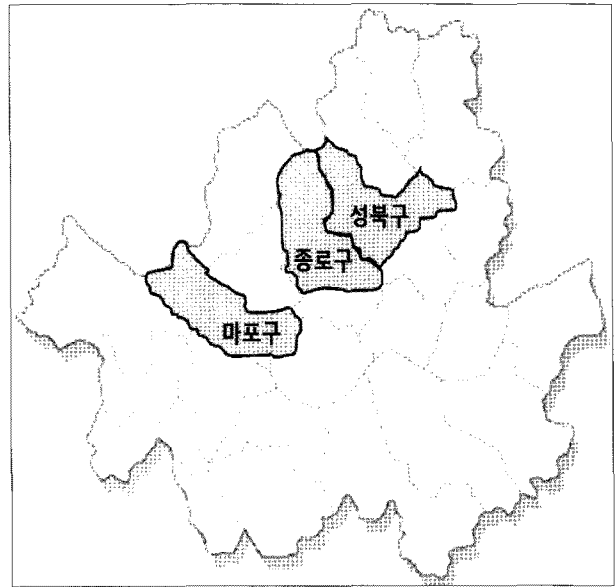


그림 5. 실험대상지 선정

IV. 자료 수집 및 분석

1. 자료 수집 및 측정

실증적이면서 객관화된 데이터를 사용하여 도로 녹지공간 및 토지이용이 도로온도분포에 미치는 영향을 분석하기 위하여 토지이용 및 녹지형태에 따른 도로온도분포의 실시간 자료를 측정하였다. 18개 지점에 대해서 서울시 도로의 짧은 교차로간 간격을 고려하여 한 지점의 종단거리를 50m로 설정하였고, 차로 수에 따른 횡단거리를 측정하였다. 도로의 횡단구성 요소의 길이 및 면적을 측정하였고, 식수대의 유형 및 구성, 면적을 측정하였다. 조사지점을 50m 단위의 대상구간으로 설정하고, 이에 대해서 식수대, 잔디, 토양, 콘크리트, 인터록킹블럭 등 모든 토지피복을 조사하였고, 그에 따른 온도를 측정하였다. 본 연구의 대상이 도로횡단구성요소별 온도저감이기 때문에 횡단지점의 온도를 모두 측정하였다.

보도와 차도의 색상이 온도에 미치는 영향을 고려하기 위하여 재질 및 색상을 조사하였고, 실험대상지 모두 차도의 포장 재질은 아스팔트 포장이고 검은색이었으며, 보도의 재질은 인터록킹블록으로 흰색이었다.

온도의 측정은 2009년 9월중 구름, 강우, 안개 등의 영향이 없는 맑은 날인 7일 동안 실험을 진행했다. 도시의 열섬현상은 도시의 열섬현상, 고온화, 열대야 현상은 여름(7, 8, 9월)에 최고조에 달하여 조사의 시간적 범위를 7~9월 중에 계획하였으나 2009년 7, 8월 중에 비, 소나기, 천둥 등 기상조건 악화로 7, 8월중 측정이 가능한 날이 매우 적었다. 상대적으로 9월 중에는 맑은 날이 연속되고 상대적으로 고온이 측정되어 시험을 9

반적으로 다른 지역보다 온도가 높게 나타나는 현상으로 주변의 온도보다 높은 특별한 기온현상을 나타내는 지역을 열섬이라 한다. 건물이나 도로, 콘크리트로 덮인 지표면은 수분을 포함한 흙보다 더 많은 태양열을 흡수·저장하고, 태양에너지를 반사하는 반사체의 역할을 하기도 하기 때문이다. 도시의 기온 특색인 열대야도 대부분 열섬에서 나타난다. 열섬현상은 건축물, 포장도로 증대에 따른 지표면 열수지의 변화, 연료소비에 따른 인공열, 오염물질의 방출량 증가, 대기오염물질에 의한 온실효과, 고층건물의 요철에 따른 환기의 어려움 등이 주요인인데, 우리나라의 수도인 서울시는 이러한 요인을 모두 갖추었다고 판단되어 본 연구의 대상지를 서울시로 선정하였다.

서울시에서 도시 열섬현상이 나타나는 서울시의 도심인 종로구, 성북구, 마포구를 대상으로 그림 5와 같이 선정하였으며, 실험계획법을 통해 선정된 18개의 실험대안과 이와 가장 유사한 도로 18개 지점을 선정하여 조사하였다.

월 중에 한달 동안 시행하였다.

온도의 측정은 국내외 문헌조사와 더불어 파일럿 조사를 통해서 온도의 변화가 가장 민감하게 나타내는 시간대를 중심으로 측정하였다. 하루 중 새벽(am 5~7), 오후(pm 1~3), 밤(pm 8~10)로 나누어 3시간 동안 측정하여 저장하였다. 오후 1~3시 사이가 가장 온도변화가 크게 나타나고, 저녁시간의 경우 지표가 냉각되면서 나타나는 변화, 그리고 새벽의 경우 지표표면이 모두 냉각된 초기치의 값을 비교하기 위해서 세 가지 시간대에 측정을 하였다.

온도의 측정을 위한 조사도구는 열화상 카메라(Infra Thermal Imager) TH7800를 사용하였다. 열화상카메라의 온도측정 주기는 매 300초로 설정하였으며, 온도측정은 카메라의 픽셀수가 320×240으로 본 측정에서는 각 셀별로 표면온도를 측정하고 저장하였다.

표면온도의 측정은 차도, 보도, 주변토지이용, 식수대, 식생중분대 등 도로의 구성요소별로 새벽(am 5~7), 오후(pm 1~3), 밤(pm 8~10)동안에 각각 3시간 동안 측정하여 저장하였다. 그림 6에서 보는 바와 같이 실화상 사진과 열화상 사진을 함께

측정하여 저장하였다.

열화상카메라에 내재된 센서를 통해 조사위치의 기온도 함께 측정하였다. 각 셀별로 측정된 데이터는 도로의 횡단구성요소별로 평균값을 도출하여 분석에 사용하였다. 예를 들어 식수대와 식생중분대는 평균온도를 분석하였으며, 분석시 오후의 차광효과에 따라 표면온도는 차광된 지점과 차광되지 않은 지점의 표면온도를 구분하여 분석하였다.

열화상카메라를 사용한 온도측정과 더불어 표 2와 같이 기상청의 서울시 시간대별 기상자료, 즉 기온, 지면온도, 지중온도도 함께 수집하였다.

2. 자료 분석

분석 방법은 열화상사진 분석 프로그램인 Thermal Wizard를 이용해 차도, 보도, 식수대, 중앙분리대, 주변토지이용에 따른 표면온도를 측정하였고, 데이터를 활용하여 기초통계분석과

표 2. 서울시 기상청 기상자료

구분		9/10	9/11	9/23	9/24	9/28	9/29	9/30	
기온	새벽	AM 5:00	17.9	17.9	16.1	15.7	17.7	17.8	18.4
		AM 6:00	17.5	17.5	15.7	15.5	17.9	17.7	18.2
		AM 7:00	17.8	17.8	15.6	15.2	17.7	17.7	18.2
	오후	PM 13:00	26.0	24.4	25.0	25.2	23.1	25.3	26.0
		PM 14:00	26.6	25.1	25.4	24.2	23.9	26.0	27.0
		PM 15:00	26.8	24.1	25.9	24.5	24.7	26.5	27.6
		PM 20:00	22.8	21.3	21.4	21.0	21.4	22.3	23.9
		PM 21:00	22.2	21.6	20.3	20.4	21.0	21.9	23.2
		PM 22:00	22.2	21.4	19.8	19.9	20.7	21.5	22.9
	밤	AM 5:00	17.4	16.5	13.8	13.8	17.7	16.4	16.9
		AM 6:00	16.7	16.3	13.6	13.5	17.7	16.2	16.5
		AM 7:00	17.0	17.3	13.7	13.7	17.6	16.5	16.5
PM 13:00		40.9	32.2	33.5	31.3	27.5	33.1	33.9	
PM 14:00		41.7	33.4	33.4	27.2	29.2	34.3	32.9	
PM 15:00		40.7	29.4	32.2	27.1	31.0	33.9	33.7	
PM 20:00		23.7	21.7	18.9	18.9	20.2	21.9	21.7	
PM 21:00		22.9	21.5	17.8	18.0	19.6	21.5	21.1	
PM 22:00		22.3	21.4	17.1	17.1	19.3	20.3	19.8	
지중온도	새벽	AM 5:00	24.9	24.8	21.2	21.6	21.3	21.7	22.2
		AM 6:00	24.8	24.6	21.0	21.5	21.2	21.6	22.0
		AM 7:00	24.6	24.5	20.9	21.3	21.1	21.5	21.9
	오후	PM 13:00	24.2	23.9	20.7	21.0	21.1	21.3	21.7
		PM 14:00	24.4	24.0	21.1	21.2	21.2	21.5	21.9
		PM 15:00	24.6	24.1	21.5	21.4	21.4	21.7	22.2
		PM 20:00	25.7	24.6	22.5	22.2	22.2	22.7	23.0
		PM 21:00	25.8	24.6	22.5	22.2	22.3	22.7	23.0
		PM 22:00	25.7	24.6	22.5	22.2	22.2	22.7	23.1
	밤	AM 5:00	24.9	24.8	21.2	21.6	21.3	21.7	22.2
		AM 6:00	24.8	24.6	21.0	21.5	21.2	21.6	22.0
		AM 7:00	24.6	24.5	20.9	21.3	21.1	21.5	21.9

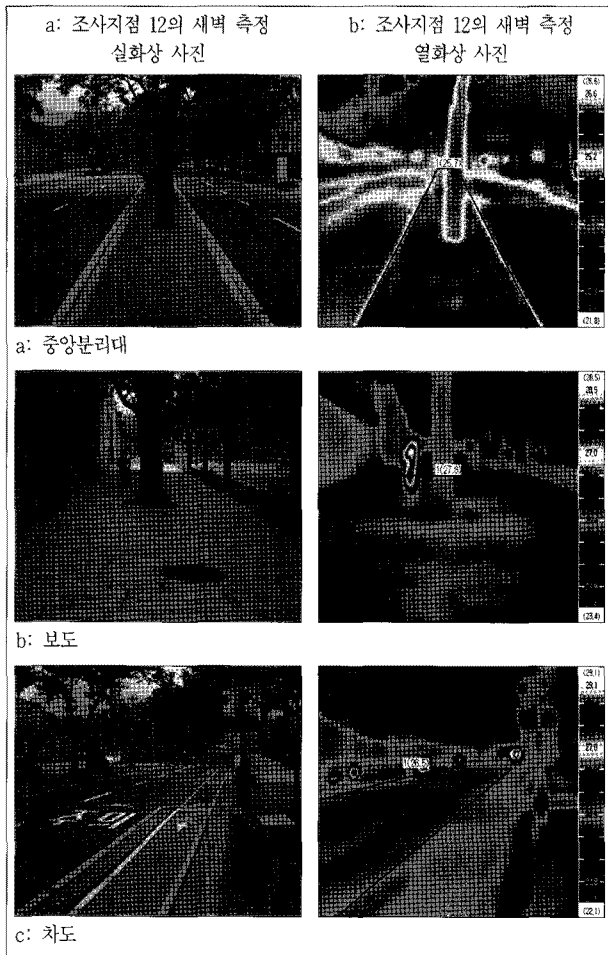


그림 6. 조사지점 12의 열화상 및 실화상 측정결과(예시)

자료: 기상청 전자민원센터, <http://minwon.kma.go.kr>

다중선형회귀분석을 실시하여 주변토지이용 및 식생면적에 따른 조사지점의 표면온도를 분석하였다. 도로의 횡단구성요소인 변수별로 평균온도를 분석하였으며, 분석시 오후의 차광효과에 따라 표면온도는 차광된 지점과 차광되지 않은 지점의 평균표면온도를 구분하여 분석하였다.

V. 결과 및 고찰

본 연구에서는 도로의 다양한 횡단구성 요소중 녹지가 도로 주변의 온도에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 도로의 차로수, 즉 폭원, 식수대 유형, 중분대 유형에 따른 온도저감 효과 및 토지이용에 따른 토지이용효과를 분석하였다. 본 절에서는 먼저 각 변수의 주요한 결과를 설명하고, 분석 결과에 근거하여 식수대, 식생중분대, 토지 이용 등에 도로온도저감에 미치는 영향을 예측하기 위하여 다중회귀 모형을 추정하였다.

1. 식수대의 온도저감 효과

데이터를 분석한 결과, 도로주변의 식수대는 그 면적이 상대적으로 좁음에도 불구하고, 표 3과 그림 7과 같이 온도저감에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

먼저 식수대가 있는 도로가 식수대가 없는 도로보다 표면온도저감 효과가 있는지를 살펴보았다. 표 3에서 보는 바와 같이 식수대가 있는 도로의 경우 평균 표면온도가 평균 -4.0℃(새벽 -4.3℃, 오후 -6.1℃, 밤 -1.7℃) 낮게 나타나, 식수대는 도로주변 표면온도저감에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 새벽, 오후, 밤 세 가지 측정시간대 중에서 온도가 높은 오후시간대에는 식수대로 인한 표면온도저감효과가 평균 6℃ 이상인 것으로 나타났다. 그리고 새벽의 온도를 비교하여 보면 식수대로 인한 표면온도저감효과가 약 4℃ 정도 차이를 나타내는 것을 볼 수가 있다.

식수대의 유무뿐만 아니라 처음 실험계획처럼 식수대의 형태에 따라서 온도저감효과가 있는지를 살펴보았다. 실험을 설계할 때에는 식수대의 높이뿐만 아니라 식수대의 구성도 온도에 영향을 미칠 것으로 예측하여 식수대의 유형을 네 가지 유형으로 나누었다. 그러나 온도측정결과, 잔디와 결합된 식수대 유형과는 온도차이가 거의 나지 않아 소형 식수대와 대형 식수

표 3. 식수대의 평균 표면온도 저감효과(℃)

구분 (식수대유형)	새벽(℃)	오후(℃)	밤(℃)
식수대 있음	18.2	33.5	21.5
식수대 없음	22.5	39.6	23.2
온도 차이	-4.3	-6.1	-1.7

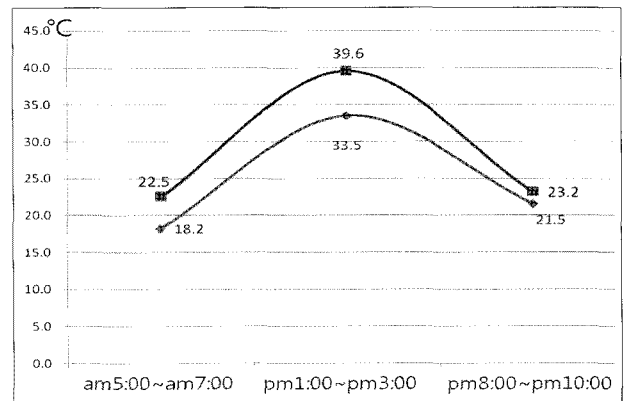


그림 7. 식수대의 온도저감효과

범례: ● 식수대 있음, ■ 식수대 없음

대로 구분하여 분석하였다.

식수대의 유형, 즉 식수대 식재의 높이에 따른 표면온도저감 효과를 살펴본 결과는 표 4 및 그림 8과 같다. 식수대가 없는 경우와 비교해 소형 식수대의 경우 오후에는 약 6℃가 낮았으며, 대형 식수대의 경우는 그보다 약 0.2℃ 정도 더 낮게 나타났다. 그러나, 새벽과 밤의 경우에는 식수대가 없을 때보다 식수대가 있는 경우 온도가 낮지만 소형 식수대의 온도저감이 대형 식수대보다 큰 것으로 나타났다. 이러한 연구결과는 식수대의 수목 높이에 따른 온도 저감효과는 크지 않은 것으로 해석할 수도 있다. 그러나, 그 온도차 값이 크지 않기 때문에 오히려 식수대의 높이와 연관된 다른 이유로 인해 온도에 영향을 미칠 수 있는 가능성도 배제하기는 어렵다. 이러한 결과를 해석하기 위해서 조사대상지를 중심으로 원인을 분석한 결과, 주변토지이용이 건물인 경우 대형 식수대가 60%, 소형 식수대는 40%이고, 대형 식수대인 경우 소형 식수대보다 새벽과 야간에 특히, 차량통행량이 많은 부근에서 표면온도가 높게 나타났다. 이와 같은 내용은 실험을 계획할 시에는 고려하지 못했던 사항이다. 따라서 차량통행, 주변토지이용 등 본 연구에 반영되지 못한 관련된 변수는 추후 연구에서 고려하는 것이 필요하다.

2. 식생중분대의 온도저감 효과

본 절에서는 식생중분대와 식생중분대의 식수의 유형이 온도저감에 미치는 영향을 분석하였다. 식생중분대의 유형별 표면온도 측정효과는 표 5와 그림 9에 나타나 있다. 식생중분대는 도로 횡단구성에서 좁은 면적을 차지하나, 식생중분대가 있

표 4. 식수대의 높이에 따른 온도저감효과

구분	새벽(℃)	오후(℃)	밤(℃)
식수대 없음	22.5	39.6	23.2
소형 식수대	17.7	33.6	20.9
대형 식수대	19.1	33.4	22.7

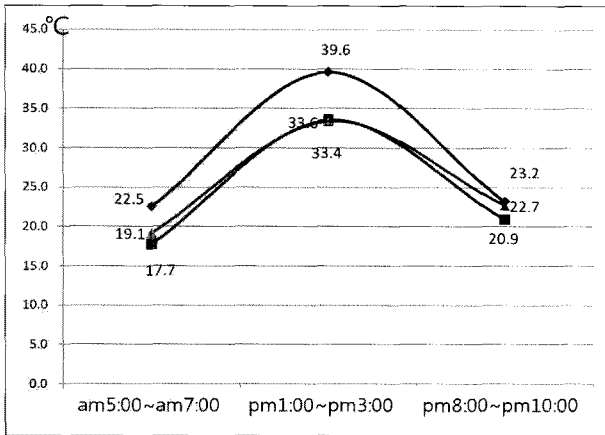


그림 8. 식수대의 높이에 따른 온도저감효과
 범례: ● 식수대 없음, ■ 소형 식수대, ▲ 대형 식수대

는 경우 표면온도는 평균 -2.1°C 정도 낮은 것으로 나타났다. 시간대별로 비교해 보면, 식생 중앙분리대가 있는 경우 새벽에는 1.6°C, 오후에는 3.6°C, 밤에는 1.2°C로 온도저감에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 효과는 식생중분대의 온도저감효과는 오후에 가장 크며, 식수대와 비슷한 정도의 온도저감효과를 나타내는 것을 알 수 있었다.

위에서 살펴본 식생중분대의 온도저감효과가 식생중분대의 식수유형에 따라 차별화되는지를 살펴보기 위해서 식생 중앙분리대 식수의 높이에 따른 표면온도변화를 비교하였다. 결과를 살펴보면, 표 6과 그림 10에서 보는 바와 같이 식수대 식수

표 5. 식생중분대의 온도저감효과

구분	새벽(°C)	오후(°C)	밤(°C)
식생중분대 없음	19.5	35.7	22.2
식생중분대 있음	17.9	32.1	21.0
온도 차이	-1.6	-3.6	-1.2

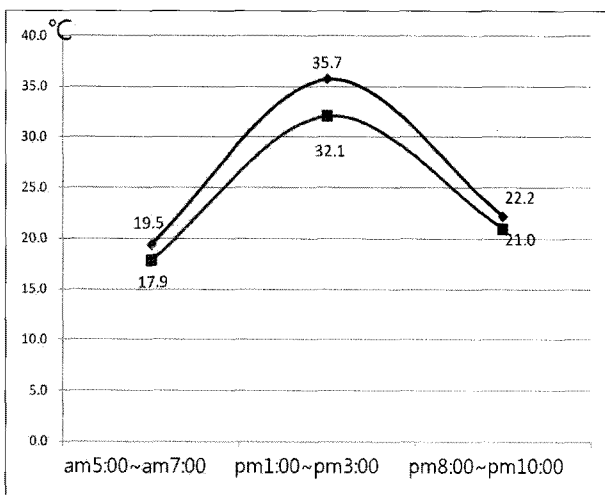


그림 9. 식생중분대의 온도저감효과
 범례: ● 식생중분대 없음, ■ 식생중분대 있음

표 6. 식생중분대 유형별 온도저감효과

구분	새벽(°C)	오후(°C)	밤(°C)
식생중분대 없음	19.5	37.4	22.2
잔디와 소형 식수	17.7	32.0	21.4
잔디와 대형 식수	18.0	32.2	20.6

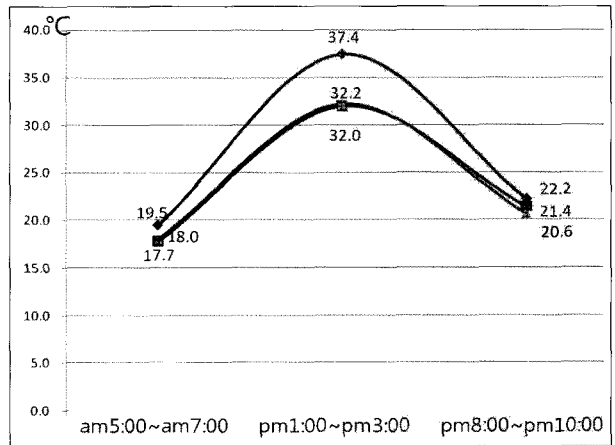


그림 10. 식생중분대 유형별 온도저감효과
 범례: ● 식수 없음, ■ 잔디와 소형 식수, ▲ 잔디와 대형 식수

의 높이가 낮을 경우 평균 2.7°C가 낮고 새벽에는 1.7°C, 오후에는 5.5°C, 밤에는 0.8°C가 낮은 것으로 나타났다.

식수대의 식수 높이가 높을 경우 표면온도는 식수대가 없는 경우와 비교해서 평균 2.8°C로 낮게 나타났으며, 시간대별로 살펴보면 새벽에는 1.5°C, 오후에는 5.2°C, 밤에는 1.6°C가 낮은 것으로 나타났다. 그러나, 식생중분대의 식생높이에 따른 비교, 즉, 식수대가 낮은 경우와 높은 경우는 새벽에는 0.3°C 차이, 오후에는 0.2°C, 밤에는 0.8°C 차이로 그 차이가 매우 적은 것으로 나타났다. 이는 위의 식수대의 유형별 온도저감 효과와 같은 맥락으로 식수대 식수의 높이, 즉 수고는 표면온도변화에 직접적인 영향을 크게 미치지 않는다고 해석할 수 있다.

3. 주변 토지이용의 온도저감 효과

데이터를 측정하고 분석하면서 도로횡단구성상의 식수뿐만 아니라 도로주변의 토지이용이 도로변 온도저감에 미치는 영향을 분석하였다. 도로 주변의 토지이용은 크게 수준으로 나누어서 분석하였다. 도로주변의 녹지 및 오픈스페이스의 영향을 살펴보기 위해서 보도의 양측의 토지의 이용이 주택, 상업 및 업무시설지인 경우를 비교하여 도로표면온도저감효과를 살펴 보았다. 연구대상지의 녹지 면적 및 체적 등을 고려하여서 모형추정을 시도하였으나, 유의하게 나오지 않았다. 그러나, 녹지나 오픈스페이스가 주변 온도저감에 영향을 미치는 결과를 반영하기 위해서 연속변수가 아닌 더미 변수를 모형에 추가하였다.

표 7. 주변토지이용에 따른 온도변화

구분	새벽(°C)	오후(°C)	밤(°C)
주택, 상업 및 업무시설지	20.0	36.1	22.0
녹지 및 오픈스페이스	17.7	32.6	21.6
온도 차이	-2.3	-3.5	-0.4

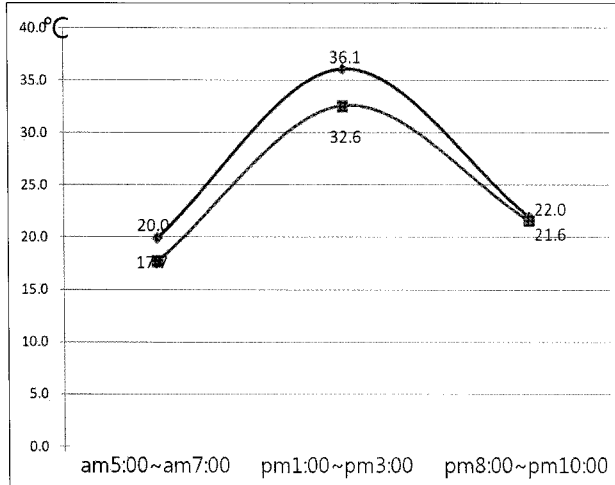


그림 11. 주변토지이용에 따른 온도변화

범례: 주택, 상업 및 업무시설지, 녹지 및 오픈스페이스

그 결과는 표 7, 그림 11과 같다.

도로주변에 녹지이거나 오픈스페이스인 경우는 도로주변이 주택, 상업, 업무시설 등으로 구성된 경우와 비교해 평균 2.1°C 가 낮은 것으로 나타났다. 시간대별로 비교해 보면 새벽은 2.3°C, 오후는 3.5°C, 밤에는 0.4°C의 평균 온도가 낮은 것으로 나타나, 도로주변의 토지이용의 특성이 도로주변 온도에 영향을 미치며, 특히 주변토지이용이 녹지인 경우 온도저감 효과가 높은 것으로 나타났다.

4. 도로 온도저감에 미치는 영향 예측

위에서 살펴본 바와 같이 도로주변의 토지이용, 식수대 유무, 식생 중앙분리대가 도로표면온도저감에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 식수대의 경우 식수의 높이나 중앙분리대 식수의 유형은 상대적으로 큰 영향은 없는 것으로 나타났다.

위의 분석결과에 근거하면 도로주변이 녹지나 오픈 스페이스이고 식수대에 가로수가 있고 중앙분리대에 식수가 있는 경우 오후의 평균 온도저감은 최대 6.2°C까지 가능한 것으로 나타났다. 식수대, 식생중분대, 토지이용 등이 도로 온도저감에 미치는 영향을 고려하여 도시부 도로의 횡단구성의 변화가 온도저감에 미치는 영향을 예측할 수 있는 모형을 개발하였다.

모형은 식생이 차지하는 면적, 즉 식수대의 면적, 식생중분대의 면적을 변수로 정량화하여 입력자료로 사용하였고, 토지이용은 도로주변에 녹지가 있는 경우를 고려한 더미변수를 사

표 8. 도시도로 온도예측 모형식

모형	비표준화 계수		t	유의 확률
	B	표준오차		
상수	37.592	0.758	49.566	0.000
주변토지이용*	-3.263	0.887	-3.679	0.002
식수대 면적(m ²)	-0.010	0.008	-1.888	0.155
식생중분대 면적(m ²)	-0.021	0.007	-3.135	0.007
수정된 R ²	0.620			

* 주택, 상업 및 업무시설=0, 녹지 및 오픈스페이스=1

용하였다. 세 가지의 측정시간대 중 오후 온도가 가장 높고 상대적으로 온도저감 효과도 뛰어나 여름철 오후의 온도저감을 모형의 종속변수로 설정하였다. 식수대 및 식생중분대의 면적(m²)과 주변토지이용(주택, 상업 및 업무시설=0, 녹지 및 오픈스페이스=1)를 고려해 다항회귀식을 추정한 도시도로의 오후 표면온도예측모형식은 다음 식 1, 표 8과 같다.

$$Y = -3.263X_1 - 0.009X_2 - 0.021X_3 + 37.592$$

여기서, Y = 맑은날 9월 서울시의 오후(PM1:00-3:00) 도로표면온도(°C)
 X_1 = 주변토지이용
 X_2 = 식수대의 면적(m²)
 X_3 = 식생중앙분리대의 면적(m²) 식 1

위의 예측모형을 살펴보면, 여름철 도시도로의 오후 온도는 주변토지이용이 녹지 및 오픈스페이스일 경우, 식수대 및 식생중분대의 면적이 증가함에 따라 온도는 감소하는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 앞으로 도시부 도로의 횡단설계를 할 경우, 식수대의 크기 및 식생 중앙분리대, 주변 토지이용 등을 고려하면 해당 도로의 횡단구성에 따른 온도저감을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

위에서 살펴본 바와 같이 도로주변의 토지이용, 식수대 유무, 식생 중앙분리대가 도로온도저감에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 도로주변뿐만 아니라 도로설계의 구성요소내에서 녹지면적의 증가는 도로의 표면온도 저감에 영향을 미치며, 도시의 온도의 고온화현상을 완화할 수 있는 도로측면에서의 방안이라고 할 수 있다.

VI. 결론 및 향후 연구

본 연구는 도시부 도로의 보도내 식수대, 차도내 중앙분리대 등의 녹지 및 도로 주변 토지이용이 도로표면온도저감에 미치는 영향에 대해서 분석하였다. 도시도로 녹지의 도로표면이 온도저감효과에 미치는 영향을 알아보기 위해 연구대상지는 주

변토지이용, 차로수, 식수대 종류, 중앙분리대의 종류를 고려한 실험계획법을 통해 서울시(종로구, 성북구, 마포구) 18개 도로 지점으로 설정하였고, 짧은 도시도로의 교차로 간격을 고려하여 종단길이 50m를 기준으로 조사지점의 표면온도 및 포장·녹지면적을 조사하였다.

실시간 표면온도 및 기온을 측정하여 열화상분석프로그램인 Thermal Wizard를 통해 표면온도를 도출하여 녹지의 온도저감효과를 분석하여 도시도로 9월의 온도저감예측모형식을 도출하였다. 도로구성요소별 표면온도분포와 도로구성요소별 면적의 분석결과, 주변토지이용과 식생(식수대, 식생중분대)의 면적이 표면온도저감에 영향을 미쳤다. 그러나 포장면적(차도, 보도)의 변화에 따른 온도변화는 유의하게 나타나지 않아 온도예측모형식에서 변수로는 제외하였다. 식수대의 크기에 따른 온도저감효과도 나타났지만 식수대 자체가 더 유의하게 나타났다. 이는 식수대표면의 토양 및 잔디가 여름철 도시도로의 표면온도 저감을 위해 효과적인 것으로 도출되었다. 도로횡단구성요소(주변토지이용, 차도, 보도, 식수대, 중앙분리대)가 도로표면온도분포에 미치는 영향 분석결과, 주변토지이용이 9월 오후의 서울 도로온도에 미치는 영향이 가장 크며, 식생중분대의 면적, 식수대의 면적 순으로 표면온도를 저감시키는데 영향을 미치는 것으로 나타났고, 자연재료(녹지, 토양, 잔디)가 포장재료(차도의 콘크리트, 보도의 인타록킹블록)보다 오히려 낮게 나타나 온도저감에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 도로 주변의 토지이용, 식수대 유무 및 크기, 식생 중앙분리대의 유무 및 크기가 도로표면온도저감에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 도로주변뿐만 아니라 도로설계의 구성요소내에서 주변토지이용, 식수대, 중앙분리대를 녹지로 대체하여 도로표면온도의 저감을 유도하고, 이를 통해 도시부 도로주변의 온도를 저감하도록 도로설계방법을 개선하는 것이 필요하다. 이와 더불어서 이러한 도로주변의 표면온도 저감이 도시의 열섬현상 저감에 기여하는 영향 정도를 분석하는

연구가 추후 진행되어야 할 것이다. 본 연구의 의의는 도시의 열섬현상 및 열대야현상과 같은 도시 고온화에 가장 큰 영향을 미치는 도시의 불투수층 중 가장 높은 점유율을 나타내는 도로의 표면온도분포를 분석하는데 초점을 둔 것이다. 본 연구에서는 도로 횡단구성 요소에 대해 각각의 표면온도를 측정해서 온도저감 효과를 극대화할 수 있는 도로횡단구성을 반영하는 설계기준을 만들고자 하였다.

향후 연구로 도시부 도로에서 가장 많은 인공열을 배출하는 차량과 도로온도 분포와의 관계 분석과 기상요소와 온도, 보행자의 체감온도 등과의 분석이 필요하겠다. 그리고 이러한 연구 결과는 도로표면온도 저감에 기여할 도로설계의 방안을 마련하는 데 기여할 것으로 판단된다.

인용문헌

1. 국토해양부(2000) 도로의 구조 시설 기준에 관한 규칙 해설 및 지침.
2. 김강수, 조혜진(2006) SP 조사설계 및 분석 방법론. 서울: 보성각.
3. 김수봉, 김해동(2002) 도시의 수목이 기온의 조절에 미치는 영향. 한국조경학회지 130(3): 25-34.
4. 김학열, 김운수(2003) 서울시 도시기온 변화에 관한 모델 연구. 한국조경학회지 31(3): 74-82.
5. 박인환, 장강수, 김종용(1999) 추이대를 중심으로 한 경상북도 3개 도시의 열섬평가. 환경영향평가 8(2): 73-82.
6. 윤용한(2001) 녹지에 의한 열섬현상의 저감효과에 관한 연구 - 풍속과의 관련성에 관해서-. 국토계획 36(2): 187-196.
7. 이은영, 문석기, 심상렬(1996) 도시녹지의 기온 및 지온 완화효과에 관한 연구. 국토계획 24(1): 65-78.
8. 조현길, 안태원(1996) 춘천시 주거 지구내 수목피도의 차이가 난방방에너지 이용 및 비용에 미치는 효과. 한국조경학회지 27(2): 19-28.
9. 조현길, 조용현, 안태원, 신수영(2002) 도시녹지의 대기정화 및 온도저감 효과. 한국조경학회 2002년도 추계학술논문 발표회 초록집 pp. 41-43.
10. Kocur, G. T., T. Adler, W. Hyman and B. Aunnnet(1982), Guide Forecasting Travel Demand with Direct Utility Assessment, U.S. Department of Transportation, Urban Mass Transportation Administration Report. No. UMITA-NH11-C001-82-1, Washington, D.C.
11. <http://minwon.kma.go.kr>

원 고 접 수 일: 2010년 10월 26일
 심 사 일: 2011년 1월 5일(1차)
 2011년 5월 9일(2차)
 개 재 확 정 일: 2011년 5월 16일
 4 인 의 명 심 사 필