도심 가로 녹음의 습구흑구온도(WBGT) 측정을 통한 보행자 열쾌적성 효과 분석[†]

안동만* · 이재원** · 김보람*** · 윤호선** · 손승우** · 최유** · 이나래** · 이지영** · 김혜령**

*서울대학교 조경 · 지역시스템공학부 · **서울대학교 대학원 · ***서울대학교 대학원 · 경기개발연구원

An Analysis of Thermal Comforts for Pedestrians by WBGT Measurement on the Urban Street Greens

Ahn, Tong-Mahn* · Lee, Jae-Won** · Kim, Bo-Ram*** · Yoon, Ho-Seon** · Son, Seung-Woo** · Choi, Yoo** · Lee, Na-Rae** · Lee, Ji-Young** · Kim, Hae-Ryung**

*Dept. of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, Seoul National University

**Dept. of Landscape Architecture, Graduate School, Seoul National University

***Dept. of Landscape Architecture, Graduate School, Seoul National University · Gyeonggi Research Institute

ABSTRACT

This study aims to measure the thermal comfort effects of urban street trees. As the usual dry bulb air temperature does not indicate properly how the average pedestrian feels the heat of a typical summer day under the strong sunshine, we adopted the Wet Bulb Globe Temperature(WBGT). WBGT involves black globe temperature to measure the direct radiation of sun beams on our bodies, for example our heads.

We measured temperatures on very sunny and hot summer days, August 3, 4, and 7, 2012, on the urban streets of Seoul, Korea. Wet bulb, globe, and dry bulb temperatures were measured under direct sunlight from 1 O'clock to 5 O'clock pm. Globe and dry bulb temperatures were measured under street tree shades nearby during the same hours. Then the WBGTs were calculated with the formulae, one for sunny outdoor spaces, and the other for shaded outdoor spaces or indoor. The results are compared with the Korean Standards Association(KS A ISO 7243).

The major findings were: 1) On very sunny and hot summer days in Seoul, street tree shades lower the WBGT about 1 to 4 degrees, 2) during the hours of 3 and 4 O'clock in the afternoon, the WBGT under the tree shades are about 3 to 4 degrees lower compared to those under sunshines(approx. 29 to 32 degrees respectively), 3) This difference makes a major thermal comfort for urban pedestrians because senior citizens or weak persons are recommended to move indoor, and even healthy people are recommended stop outdoor sports and take rests in the shades when WBGT is about 32. On the other hand, if the WBGT is around 29, or 3 degrees lower, slower walking, light works or sports are allowable, 4) On site questionnaire survey confirms the thermal comforts under the tree shades, and we even could not get survey subjects on the sunny parts of the sidewalks, 5) We strongly recommend change of guidelines for urban street trees from "one row of street trees on 6m~8m intervals" to "street trees to make continuous shades".

Key Words: Urban Pedestrian Space, Thermal Comforts Index, Street Tree Guidelines

[†]: 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2012R1A1A2009347).

Corresponding author: Tong-Mahn Ahn, Dept. of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea, Tel.: +82-2-880-4874, E-mail: ahntm@snu.ac.kr

국문초록

본 연구는 서울시 도심 보행공간에서 가로수 녹음이 보행자 열쾌적성에 미치는 영향을 WBGT(Wet Bulb Globe Temperature-습구흑구온도) 분석을 통하여 밝히고자 하였다. 일사 영향을 많이 받아 열쾌적성이 저하되는 여름철(8월)에 측정하였으며, 보행공간 WBGT 지수는 한국표준협회 「KS A ISO 7243: 고온환경 WBGT 지수에 의한 열 스트레스 추정」과 일본국립환경연구소의 작업환경, 일상생활 및 운동 WBGT 지침을 활용하여 결과를 해석하였다.

강남구 테헤란로 4개 구간에 대해 측정한 결과, 가로수에 의해 일사가 차단된 녹음(shade)지점 WBGT 지수는 최저 27.40℃~최고 30.60℃로 나타났으며, 일사(sun)지점은 최저 28.45℃~최고 34.2℃로 나타났다. 모든 녹음 지점에서 보행환경에 적합한 열쾌적성을 보였으며, 구간 최고값을 비교해 보았을 때 녹음(shade)지점이 일사(sun)지점에 비해 4℃ 낮은 WBGT 지수를 나타내 가로수 녹음의 열쾌적성 개선 효과가 크다는 것을 알 수 있었다. 보행자를 대상으로 실시한 설문 및 행태조사 결과, 대부분 보행자는 일사를 피해 수목 하부 그늘 쪽 보행공간을 이용하는 것으로 나타났으며, 그늘을 이용하는 보행자의 75% 이상 녹음의 쾌적함을 보통 이상 쾌적하다고 평가하였다. 본 연구를 통해 가로수 녹음의 열쾌적성 향상 효과를 확인하였으며, 향후 가로수 식재시 열환경을 고려하여 연속적인 녹음이 형성될 수 있도록 정책적 변화가 필요하다.

주제어: 도심 보행공간, 열쾌적성 지수, 가로수 식재지침

I. 서론

전 지구적으로 도시열섬현상에 의한 피해가 증가하고 있으며, 도시기후변화에 대응하기 위한 연구가 활발하다. 일련의 연구들은 도시기후 개선을 위한 가장 중요한 수단으로 공원, 녹지대, 정원조성, 옥상녹화, 벽면녹화 등과 같은 녹화방식을 제시하고, 도시열섬현상을 해결하기 위해 녹지네트워크 구축이 필요함을 강조하고 있다(Landsberg, 1981; 김수봉 등, 2001; 김운수, 2002; 김기호 등, 2004).

가로수는 도시 내 다른 녹지들과 연계하여 그린네트워크 구축을 위한 필수 요소로 작용하며, 특히 보행공간에 식재한 가로수는 보행자의 쾌적성을 증진시키는 가장 중요한 요소 중 하나이다. 그러나 가로수 관리효율성 저하, 주변 상권과의 마찰, 보행환경 정비사업에 의한 제거 및 수종 변경 등으로 인해 그 영역이 점차 축소되고 있는 실정이다. 특히 쾌적성과 경관성 증진을 목표로 하는 가로환경 정비사업이 시설물(포장이나 가로시설물 중심)에 중점을 둔다는 지적도 있다(최을, 2011).

가로수가 지닌 환경적 기능 중 경관개선이거나 대기정화 효과, 에너지 절감 효과에 관한 연구는 다양하게 진행되어 왔다. 하지만 가로수 녹음이 주는 환경적 효과에 대한 연구는 미흡하다. 특히 가로수와 보행자 사이 열쾌적성 관계에 관련한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구는 가로수가 가진 다양한 환경적 기능 중 녹음의 효과를 열쾌적성 지수인 WBGT 지수 분석과 보행자 행태 및 설문조사를 통해 녹음이 보행자 열쾌적성에 미치는 영향을 밝혀 열환경을 고려한 가로수 식재 정책 시사점을 제안하고자 한다.

II. 연구사

1. 가로수 및 도시녹지 관련 연구

가로수 현황의 문제점에 대한 연구로 최재영(1992)은 전국 74개 도시 가로수 현황을 분석하여 수종 단순화 현상과 생육환경 불량 등을 지적하였다. 또한 가로수의 기능적인 면을 고려한 식재기준과 관리체계 마련이 시급함을 주장하였다. 김대관과 윤여창(1996)은 도시 가로수의 경관성, 쾌적성, 환경성 측면을 강조하며, 수종 선정시 향토수종 및 시목(市木)을 기준으로 삼고, 꽃가루가 날리거나 녹음이 불량한 수종은 배제해야 한다고 주장하였다. 성현찬(2003)은 가로수 수종 단순화 및 동일화를 지적하였고, 2열 식재 가능 지역(58.5%)을 완충녹지대와 연결하는 방안을 제안하는 등 도시 녹지네트워크의 중요성을 강조하였다.

가로수 및 도시 녹지의 환경적 기능과 효과에 대한 연구는 다양한 각도로 이루어지고 있다. 성현찬과 문다미(2003)는 도시 가로수 2열 식재와 하단관목을 동시에 식재하였을 경우 1열 식재보다 3배 정도 대기정화능력이 향상됨을 밝혔고, 가로수 6개 수종이 대기공해에 약한 수종이라 분석하였다. 김수봉 등(2006)은 대구시 중구지역 토지이용과 가로수 면적을 위성영상을 활용해 산출하고, 열밴드 분석을 통해 열섬현상을 파악, 도심 열섬현상 완화를 위해 가로수를 활용한 도시생태환경 네트워크 시스템 조성이 필요함을 강조하였다. 최동호와 이부용(2007)은 하절기 복사환경 관측을 통해 캠퍼스 내 수목과 일사차폐 막 구조물의 자연냉각효과를 분석하여 수목이나 일사차폐막 구조물이 여름철 외부환경 쾌적성을 증대시킬 수 있음을

밝혔다. 장동수와 McPherson(2006), Donovan과 Burty(2009), 조현길과 안태원(2010) 등은 도시 수목 그늘이 여름철 전력사용 및 에너지 절감에 효과가 있음을 밝히며, 에너지 절약을 위한 계획 및 설계요소로서 수목의 장점을 강조하였다. 윤용한(1999)은 도시 내 공원녹지가 주변 열환경에 미치는 영향에 관한 연구를 통해 녹지 내부의 기온은 주변 시가지보다 저온이었으며, 녹피율과 수목 주수의 증가가 기온 저하에 연관이 있음을 밝혔다. 권영아(2002)는 도시 녹지가 주변기온에 미치는 영향을 분석, 일정 규모의 도시녹지가 주변 기온에 영향을 미치는 범위와 강도를 분석하여 여름철 녹지 가장자리에서 떨어질수록 기온이 높아져 500m 떨어진 지점에서는 최저기온이 3~4℃ 높아짐을 확인하였다. 김수봉과 김해동(2002)은 도시 수목의 증산작용에 의한 온습도 조절 효과 검증을 통해 일사가 강한 시간(2~5시) 동안 엽면온도는 1~2.5℃ 낮음을 확인하였고, 식피층은 내대지에 비하여 저온이 형성됨을 확인하였다. 윤민호와 안동만(2009)은 위성영상을 활용하여 도시녹지의 기온저감 효과를 파악하였고, 녹지의 기온저감이 도시 거주민에게 주는 영향을 기온저감 수혜면적으로 분석하여 도시 녹지의 확보가 인간 열쾌적성 측면에서 중요함을 강조하였다.

가로수 관리체계에 관한 연구로 김재화(2004)는 가로수 관련 조례 한계점을 지적하고, 자치법규 제정 확대, 가로수 기본계획 보완, 경관개념 도입, 가로수 도면 전산화, 주민참여 확대 등을 제안하였다. 가로수 조성 및 관리 조례는 「산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률」에 의거하여 대부분 지자체에서 관련 조례를 제정하여 활용하고 있는 것으로 파악되었다(2012년 12월 현재, 행정안전부 자치법규정보시스템 <http://www.elis.go.kr> 지자체별 가로수 조성 및 관리 조례 검색). 그러나 대부분 동일한 내용을 기술하고 있으며, 지자체의 특성을 살리거나 가로 열환경 개선 측면을 반영하여 조례를 제정한 지자체는 찾아보기 힘든 실정이다.

이와 같이 가로수 및 도시 녹지와 관련한 연구를 검토해 본 결과, 가로수 현황 및 관리체계의 문제점을 지적하고 있으며, 가로수를 비롯한 도시 녹지의 대기정화 능력, 에너지 절감, 열섬현상 완화 등 환경적, 경제적인 측면에서 효과를 입증하고 있다. 그러나 대부분의 연구가 도시 규모의 효과에 주안점을 두고 있으며, 가로수 열쾌적성에 관한 직접적 효과에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

2. WBGT 관련 연구

WBGT 지수는 Yaglou와 Minard가 1957년 미군 훈련소에서 군인의 열 스트레스 측정을 위해 고안한 온열환경지표로서 여러 나라에서 각 나라 특성에 맞게 조정하여 활용하고 있다. 우리나라는 국방부, 노동부(작업 환경측정 및 정도 관리규정: 고

용노동부 고시 제2011-25호), 한국표준협회(KS A ISO, 2005 개정)등에서 그 기준을 정하고 있다. WBGT 지수는 흑구(복사열), 습구(습도와 바람), 건구(대기온도) 온도계 값을 기준식에 대입하여 도출한 값으로 나타나며, 각 지수값의 범위를 설정하여 인간의 열스트레스 적합한 온열환경 활동지침을 설정하고 있다. 이는 고온환경에서 작업자 또는 일상생활에서 인간 활동을 제한하는 방식으로 활용되어, 열적으로 안전하고 쾌적한 생활환경을 고려할 수 있는 지수로 활용될 수 있음을 의미한다.

그러나 Budd(2008)는 WBGT의 역사와 한계점을 소개하며, 지수를 도출하기 위해서는 흑구, 습구, 건구 온도값을 동시에 측정하여야 하며, 옥외환경에 따라 다른 식을 적용하여 지수값을 산출해야 하고, 간편하고 저렴하며 편하게 사용할 수 있는 기준 장비의 부재가 WBGT의 한계라고 설명하였다. 그러한 한계점 때문인지 WBGT를 활용한 국내외 연구는 아직 활발하지 않은 실정이다. 학술연구정보서비스(RISS)를 통해 'WBGT'를 검색한 결과(2012년 12월 현재), 국내 관련 학위논문은 7건으로 나타났으며, 해외 학술지 논문은 29건, 국내 학술지 논문 17건으로 나타났다.

국내 연구를 중심으로 관련 동향을 파악해 보면, 주민진(2004)은 대학 캠퍼스 내에 식재된 단일 수목에 대해 엽면적지수(LAI)와 WBGT 지수의 상관관계를 분석하였는데, 직접적인 상관관계는 매우 낮게 나타났으며, 두 지수 모두 흑구온도와 높은 상관관계를 나타내어 수목의 태양일사 차단이 온열환경조절에 효과가 있음을 파악하였다. 김석철(2008)은 흑구온도와 기온 증가에 따른 WBGT 지수가 흑구온도와 상대습도 증가에 따른 WBGT 지수보다 민감함을 파악하였으며, 지속적인 도시 대기환경을 파악하기 위하여 흑구온도를 활용해야 함을 주장하였다. 이춘석과 류남형(2010)은 조경공사에서 사용하는 다양한 종류의 포장(잔디, 석재잔디블럭, 중공잔디블럭, 석재블럭, 사괴석, 소형고압블럭, 점토벽돌, 나지, 쇠석, 수밀콘크리트 등 총 10종 인공 포장면)의 WBGT 지수를 측정한 결과, 포장재 종류에 따라 현실적으로 의미있는 차이가 도출되지 않음을 파악하고, 포장재 종류보다는 통풍이나 차광 영향이 외부 온열환경에 더 중요함을 파악하였다. 이상 기존 연구를 종합하면 WBGT 지수는 흑구온도에 민감함을 알 수 있으며, 통풍이나 차광이 외부 온열환경에 더 많은 영향을 미침을 알 수 있다. 그러나 기존 연구에서 WBGT 지수 범위에 의한 일상생활 활동지침을 고려한 연구는 부재한 것으로 나타났다.

박수국(2012)은 현재 기상청과 조경 및 도시계획, 건축 등에서 활용가능한 열환경 지수는 체감온도(wind chill), 불쾌지수(humidex), 열지수(heat index), WBGT 지수 등이 있으며, 이 지수들(체감, 불쾌, 열 지수)은 인간 열환경을 결정하는 기온과 습도, 풍속, 태양 복사에너지, 지구 복사에너지를 분석에 모두 포함시키지 않으므로 조경계획과 디자인에 적용하기에는 한계

가 있으며, WBGT 지수는 모든 기후요소를 분석에 이용하지만 아직 건설되지 않은 미래의 공간에 대한 분석은 할 수 없다고 정리하고 있다. 그러나 본 연구는 이미 조성되어 있는 가로 보행공간을 중심으로 WBGT를 측정하므로 종합적인 변수를 고려한 적합한 연구방법이라 사료된다.

III. 연구 범위 및 대상지

1. 연구범위

연구의 내용적 범위는 첫째, 관련 문헌을 통해 가로수 및 WBGT 지수에 대해 고찰하고, 가로 녹음의 쾌적성 분석을 위한 WBGT 지수 적용가능성을 파악한다. WBGT 지수 도출을 위해 흑구, 습구, 건구 온도를 측정한 후, 산출공식을 이용해 WBGT 지수 값을 도출하여 보행공간에 대한 열쾌적성을 평가한다. 둘째, 보행자 행태 및 설문조사를 통하여 실제 보행자가 느끼는 열쾌적성 정도를 파악하여 WBGT 결과와 비교한다. 셋째, 향후 가로수 식재정책 개선 시사점을 제안한다.

연구의 공간적 범위는 서울시내 간선도로 보행공간을 대상으로 여름철 태양고도와 건물 그림자 등을 고려하고, 측정시간 동안 일사시간이 긴 곳 등 기준을 적용하여 서울시 강남구 삼성동 포스코 사거리 주변 보행가로를 선정하였다. 측정지점은 연구 특성상 일사 영향을 받는 구간(sun 지점)과 가로수에 의해 녹음이 형성되는 곳(shade 지점)을 선정해야 하므로 보행공간 방향(태양 이동 방향에 따른 녹음 위치), 주변 건물 방향(건물 그림자 영향), 식재 열(녹음형성 여부, 2열 식재)을 고려하여 선정하였다(그림 1, 2 참조).

a: 전체 연구대상지 위치

b: A구간 장비설치 위치

c: B구간 장비설치 위치

d: C구간 장비설치 위치

e: D구간 장비설치 위치

그림 1. 연구대상지 위치(흑구, 습구, 건구온도 측정 구간)

범례: * 일사구간 측정지점 △ 녹음구간 측정지점

①→② 일사구간 측정 거치대 위치 변경

그림 2. 연구대상지(위) 및 측정장비 설치(아래) 현황(서울특별시 강남구 테헤란로)

표 1. 연구대상지 개요

구분	A구간	B구간	C구간	D구간
보행공간 폭	9m	9m	10m	10m
보행로 방향	동서	동서	남북	남북
식재수종	양버즘 느티나무	양버즘 느티나무	양버즘	느티나무
식재간격/배열	9m/2열	12m/2열	9m/2열	7m/2열
생육/녹음 상태	양호/양호	불량/불량	양호/양호	양호/양호

2. 연구대상지

A구간은 서울특별시 강남구 테헤란로 508번지 앞 9m 폭 보행공간으로 차도에 인접한 가로수는 양버즘나무(수관폭 약 8m, 수고 약 11m)가 9m 간격으로 식재되어 있으며, 건물에 인접한 수목은 느티나무(수관폭 약 7m, 수고 약 9m)로 6m 간격으로 식재되어 있다. 전체적으로 양버즘나무와 느티나무가 2열 식재되어 있어 하루 종일 녹음을 제공한다.

B구간은 서울특별시 강남구 테헤란로 503번지 앞 9m폭 보행공간으로 A구간과 마주 하고 있으며, 가로수는 A구간과 동일하게 차도에 인접한 곳에 양버즘나무(수관폭 약 7m, 수고 약 11m), 건물에 인접하여 느티나무(수관폭 약 4m, 수고 약 6m)가 약 12m 간격 2열 식재되어 있다. 다른 구간과 달리 생육상태가 불량하여 녹음 분포가 현저히 낮은 구간이다.

C구간은 서울특별시 강남구 테헤란로 504번지 옆 10m폭 보행공간으로, 차도와 건물에 인접한 모든 수종이 양버즘나무(수관폭 약 6m, 수고 약 10m)로 약 9m 간격 2열 식재되어 있다. 생육상태가 양호하여 전체적으로 녹음을 형성하는 구간이다.

D구간은 서울특별시 강남구 테헤란로 440번지 옆 10m폭 보행공간으로 C구간과 마주 하며, 차도와 건물에 인접하여 모두 느티나무(수관폭 약 7m, 수고 약 10m)가 7m 간격 2열 식재되어 있다. D구간 역시 느티나무 생육상태가 양호하여 전반적으로 녹음이 형성되는 구간이다(표 1 참조).

IV. 연구방법

1. WBGT 측정

측정 계절은 일사 영향을 많이 받는 여름철로 한정하여 2012년 8월 3일, 4일, 7일, 8일, 11일, 이상 5일 측정하였다. 측정일 대부분 기상청 AWS(Automatic Weather Station) 관측 결과, 기온이 31~37℃ 사이 고온으로 나타났으며, 평균풍속 2m/s 내외, 맑은 기상상태를 보였다. 다만 8월 8일은 운량 변동이 심하여 측정값 변화가 심하게 나타났으며, 8월 11일은 태풍 간접영향권에 들어 측정을 중단하였다. 측정시간은 매일 정오 12시부터 오후 5시까지 20분 간격으로 측정하였으며, 흑구온도계 열복

그림 3. WBGT 측정 장비

사 시간을 고려하여 측정 한 시간 전 모든 장비를 설치하였다.

측정장비는 건습구 온도계와 흑구온도계를 사용하였으며, 건습구 온도계는 일사의 영향을 받지 않게 하기 위해 지붕이 있는 삼각 거치대를 제작하여 온도계 하부 센서 위치가 지상 1.5m 높이에 위치하도록 설치하였다(그림 3 참조). 보행자 통행에 방해가 되지 않는 지점에 거치대를 설치하였고, 장비보호를 위해 측정 안내문을 장비에 부착하였다.

각 구간별 측정지점은 녹음 형성 유무에 따라 일사 차폐 지점(shade)과 일사 영향 지점(sun)으로 구분하여 측정하였다. 구간별 태양 이동에 따른 녹음위치 변동을 고려하여 B구간을 제외한 나머지 구간의 일사(sun)지점 거치대는 이동하여(그림 2 참조) 항상 일사를 받도록 하여 측정하였다.

2. WBGT 분석

1) WBGT 지수 산출

WBGT 지수는 열 스트레스 측정을 위해 고안한 열환경 지수로 습구온도(t_w), 흑구온도(t_g), 건구온도(t_a) 세 가지 온도값을 활용하여 산출하며, 일사환경에 따라 다음과 같은 공식을 적용한다(한국표준협회 KS A ISO 7243)¹⁾.

태양열이 있는 건물의 외부

$$WBGT = 0.7t_w + 0.2t_g + 0.1t_a \quad (\text{식 1})$$

태양열이 없는 건물의 내외

$$WBGT = 0.7t_w + 0.3t_g \quad (\text{식 2})$$

본 연구는 일사 영향을 받는 건물 외부 '일사(sun)지점'과 일사 영향을 받지 않는 건물 외부 '녹음(shade)지점'을 선정하여 측정하므로 (식 1)은 일사(sun)지점, (식 2)는 녹음(shade)지점 지수를 도출하는데 사용하였다.

2) WBGT 활용

국내의 경우, WBGT 지수를 국군장병 훈련강도 조절을 위해 사용 중이며, 노동부(노동부 고시 제 2011-25호)에서 고열폭로

노출기준의 형식, 한국표준협회(KS A ISO 7243) 작업자의 열 스트레스 추정 지수 등으로 사용 중이다. 또한 2008년 민간기업체인 케이웨더 열중증 예방센터에서 열사병 주의 발령을 위한 지수로 활용하기 시작하였고, 기상청은 폭염지수라는 명칭으로 WBGT 지수를 활용하고 있다.

국외의 경우 미국은 직업안전위생관리국(www.osha.gov)에서 작업과 휴식, 물 소비량(Work/Rest and Water Consumption Table)을 WBGT 지수를 기준으로 정하여 작업량과 휴식량을 정하고, 그에 따른 수분 흡수량을 제시하고 있다. 일본은 일본국립환경연구소(www.nles.go.jp)에서 일상생활, 운동, 작업으로 분류하여 각 환경에 맞는 WBGT 지수와 지침을 정하여 활용하고 있다.

본 연구는 앞서 열거한 WBGT 지수 중 우리나라와 일본에서 사용하는 WBGT 지수에 따른 행동지침을 파악하여 보행환경 열쾌적성 해석에 원용하였다. 작업환경 WBGT 지수는 한국표준협회와 일본국립환경연구소가 동일하게 제시하고 있으며, 인체 신진대사율 등급을 기준으로 작성하였다. 대사율 등급은 0(휴식), 1(낮은 대사율), 2(적정 대사율), 3(높은 대사율), 4(매우 높은 대사율)로 구분하여 사람의 작업환경 열 순응 정도에 따라 활동지침을 제시하고 있다(표 2 참조).

또한 일본국립환경연구소에서 제안하고 있는 일상생활 및 운동시 WBGT 지수는 표 3과 같다.

이상의 WBGT 지수값을 해석하면 WBGT 지수 31℃ 이상이 되면 외출을 삼가고 휴식을 취해야 하며, 28~31℃ 범위 내에서는 가벼운 활동이나 산책, 휴식 및 수분섭취를 동반한 이동이 가능한 정도로 해석할 수 있다. 각 행동지침은 약 3℃ 차이로 변화한다.

표 2. 작업환경 WBGT 지수와 활동지침(한국표준협회-KS A ISO 7243 및 일본국립환경연구소 동일)

대사율 등급	WBGT(℃)				지침
	열 순응		열 미 순응		
0	33		32		· 휴식
1	30		29		· 가벼운 인력작업 · 산책(3.5km/h)
2	28		26		· 지속적인 수작업 · 손수레 밀거나 당기기 · 걷기(3.5~5.5km/h)
3	a	b	a	b	· 중량물 운반 · 격렬한 작업 · 걷기(5.5~7km/h)
	25	26	22	23	
4	23	25	18	20	· 매우 격렬한 작업 · 빨리 걷기 또는 달리기(7km/h이상)

*a: 감지할 만한 공기 유동 없음, b: 감지할 만한 공기 유동 있음.

자료: 한국표준협회(2005. 9. 30 개정), 일본국립환경연구소 www.nles.go.jp (2012. 9. 25 검색) 발췌

표 3. 일상생활 및 운동 WBGT 지수(일본국립환경연구소)

일상생활시 WBGT(℃)		운동시 WBGT(℃)	
31 위험	· 고령자 위험 · 외출 삼가, 실내로 이동	31 이상 운동중지	· 피부온도보다 기온 상승 운동 중지
28~31 엄중경계	· 날씨에 따라 외출 삼가 · 실내 온도 상승에 주의	28~31 엄중경계	· 심한 운동, 오래 달리 기 자제 · 적극적인 휴식 및 수 분 섭취 · 더위에 익숙치 않으면 운동 중지
25~28 경계	· 운동이나 격렬한 작업시 정 기적으로 수분섭취	25~28 경계	· 열사병 위험 상승 · 운동시 30분 간격으로 휴식
25미만 주의	· 일반적인 위험 감소 · 심한 운동, 중노동 시 위험	21~25 주의	· 열사병 징후 주의 · 운동사이 적격적 수분 섭취
-	-	21까지 거의 안전	· 적절한 수분 보충 · 일반인 열사병 주의

자료: 일본국립환경연구소 www.nles.go.jp (2012. 9. 25 검색) 발췌

3. 보행자 행태 및 설문조사

옥외공간 인간 행태는 날씨 영향을 많이 받으며, 보행공간은 날씨 영향을 받는 대표적인 옥외공간이다. 가을이나 겨울보다는 날씨가 따뜻해지는 봄, 여름철에 보행자는 걷기, 잠시 서거나 앉아서 쉬는 머무름, 흡연이나 대화 등 다양한 행태를 보인다. 비, 바람, 폭염, 한파 등 극한 기후조건에서는 보행자 역시 예민한 행태를 보인다. 이러한 관점에서 여름철 고온 환경에서 보행자 행태를 파악하고, 보행자 설문을 통해 가로수 그늘이 제공하는 녹음 쾌적성 정도를 조사하였다.

보행자 행태분석은 측정기간 동안 측정구간을 이용하는 보행자 행동을 관찰하여 측정일지에 기입하는 방식으로 진행하였으며, 설문조사는 보행자 중 무작위로 선별하여 설문지에 응답하는 방식으로 진행하였다. 설문조사는 2012년 8월 11일 오후 3~4시 사이 실시, 총 47부 수거하였다.

V. 연구결과

총 5일에 걸쳐 측정한 데이터 중 운량변동이 심했던 8일과 태풍 영향으로 오후 측정을 중단했던 11일 데이터는 분석에서 제외하였으며, 20분 단위로 측정한 데이터는 온도 변화폭이 크지 않아 매 시간 측정값(60분 간격)만 분석하였다(표 5 참조).

A구간 WBGT 지수는 일사(sun)지점 최하 28.45℃, 최고 32.25℃, 녹음(shade)지점 최하 27.40℃, 최고 29.45℃로 나타났다. 일사지점은 일부시간을 제외하고 대부분 시간대에서 31℃를 초과하여 보행에 적합하지 않은 열쾌적성을 보이는 것으로 나타났다. 반면, 녹음지점은 가벼운 활동을 하거나, 산책이나

건기에 무리가 없는 열쾌적성을 나타냄을 알 수 있다.

B구간 일사(sun)지점 WBGT 지수는 최하 30.60℃, 최고 34.20℃ 범위로 대부분 31℃를 초과하여 보행환경에 부적합한 열쾌적성을 보이는 것으로 나타났다. 녹음(shade)지점은 최하 28.85℃, 최고 30.60℃로 보행환경에는 무리가 없는 열쾌적성으로 평가할 수 있으나, 다른 세 구간에 비해 좀 더 높은 값을 나타냈다. B구간 현황에서 보듯 가로 방향이 태양 이동방향과 일치하여 다른 구간에 비해 일사량이 더 많고, 가로수 생육상태가 불량하여 녹음이 부족한 때문으로 사료된다.

C구간 일사(sun)지점 WBGT 지수는 최하 29.08℃, 최고 32.62℃로 8월 3일을 제외하고, 대부분 WBGT 31℃를 초과하여 보행에 적절하지 않은 열쾌적성을 나타내는 것으로 나타났고, 녹음(shade)지점 WBGT 지수는 최하 28.40℃, 최고 29.89℃로 보행환경은 가능한 열쾌적성을 보여 녹음에 의한 보행자 열쾌적성 향상 효과를 확인할 수 있다.

D구간 일사(sun)지점 WBGT 지수는 최하 29.70℃, 최고 33.70℃로 다른 구간과 마찬가지로 대부분 WBGT 31℃를 초과하여 건기에 부적합한 열환경을 보였고, 녹음(shade)지점 WBGT 지수는 최하 28.46℃, 최고 29.70℃로 가법계 건기에는 무난한 열환경을 나타냈다.

네 구간 WBGT 분석결과 일사지점 전 구간에서 보행자 열쾌적성이 매우 나쁘게 나타났으며, 특히 가로수 생육과 녹음 모두 불량한 B구간이 더 높은 지수값을 나타냈다. 전체적인 WBGT 지수 분포는 가로수에 의한 녹음(shade)지점이 일사(sun)지점에 비해 1~4℃ 정도 낮은 WBGT 지수를 나타내어 가로수 녹음이 보행공간 열쾌적성을 향상시키는 것으로 확인되었다.

우리나라와 일본에서 사용 중인 WBGT 지수를 보면 약 3℃ 차이에 따라 활동지침이 달라지는데, 본 연구 결과, 측정일 3~4시 사이 녹음지점과 일사지점 WBGT 지수가 대부분 3℃ 내외 차이 임을 알 수 있다. 이는 녹음지점에서는 보행이나 담화, 가벼운 활동이 가능할 정도로 일사지점에서 금할 것을 권장하는 활동 제약이 완화됨을 의미한다.

이러한 결과는 보행자 행태 조사 중에 뚜렷하게 볼 수 있었다. 대부분 보행자가 일사를 피해 녹음 구간을 이용하는 것으로 나타났고, 설문 응답자 90%가 녹음구간에서 설문한 사람들이고, 일사구간에서는 설문 응답자를 구할 수 없을 정도로 보행자가 드물었다. 그리고 휴식을 취하거나 담화를 나누고, 흡연을 하는 주변 건물 사람들 역시 대부분 가로수 그늘을 이용하고 있었다(그림 4 참조). 이는 WBGT 측정 결과에서 보듯이 가로수 그늘이 주는 열쾌적성 향상 효과가 보행공간 이용행태에 뚜렷이 나타나고 있음을 알 수 있다.

설문조사는 대부분 응답이 녹음지점에서 이루어져 47부 중 일사지점에서 설문한 4부를 제외한 43부를 중심으로 분석하였

그림 4. 보행공간 녹음지점 이용행태

표 4. 녹음(shade)지점 설문조사 결과

질문	응답	응답자 수 (n=43)	비율 (%)
현재 걷고 있는 보행공간의 쾌적 여부	매우 쾌적함	2	4.65
	쾌적함	11	25.58
	보통	20	46.51
	쾌적하지 않음	9	20.93
	매우 쾌적하지 않음	1	2.33
현재 체감 온도	25~27℃	8	18.61
	28~31℃	22	51.16
	32℃*	8	18.60
	33℃~	5	11.63
가로수 기능	녹음기능	14	32.56
	미적기능	8	18.60
	대기정화기능	18	41.86
	생물다양성 증진기능	3	6.98
	기타	0	-

*32℃는 설문조사 당일 기상청 발표 최고기온과 동일한 온도임.

다. 남녀 응답자 비율은 거의 유사하게 나타났으며(남 55.8%, 여 44.2%), 연령별로 20대가 39%, 30대 33%로 많은 비율을 차지했다. 걷고 있는 보행공간의 쾌적 여부에 대한 응답으로 '보통 46.51%(20명), 쾌적 25.58%(11명), 매우 쾌적 4.65%(2명)'이라고 답하여 75%이상의 보행자가 녹음이 있는 보행공간을 쾌적하다고 느끼는 것으로 나타났다. 설문조사 당일 기상청 자료 최고기온은 32℃였으며, 체감온도 질문에 대한 응답은 기온보다 높은 응답이 30%(13명), 기온보다 낮은 응답이 70%(30명)여서 쾌적 정도에 대한 응답과 유사한 분포를 보였다. 가로수 기능 중 가장 중요하다고 생각하는 기능에 대한 질문은 대기정화기능 41.86%(18명), 녹음기능 32.56%(14명), 미적기능 18.6%(8명), 생물다양성 증진기능 7%(3명) 순으로 나타났다(표 4 참조).

연구결과를 종합해 보면, 첫째, 가로수에 의해 일사가 차단된 보행공간(녹음지점)의 열쾌적성 WBGT 지수는 최하 27.40℃, 최고 30.70℃로 일사지점에 비해 최고 4℃ 낮은 WBGT 지수를

나타냈다. 둘째, 일사지점과 녹음지점 WBGT 지수가 3℃ 이상 차이가 나는 것은 WBGT 지점 상 한 등급 차이가 있어 활동범위가 변화하므로 가로수가 식재되어 형성하는 녹음은 여름철 보행공간 열환경을 크게 개선하는 것이다. 셋째, 보행자 이용행태 분석 결과, WBGT 지수가 낮은 녹음구간 이용이 잦으며, 더 쾌적하게 느끼는 것으로 나타났고, 체감온도 또한 실제 기온보

다 낮게 분포하는 것으로 나타나, 녹음에 의해 개선된 WBGT 분포와 이용행태 사이에 연관이 있음을 확인할 수 있다.

VI. 결론

본 연구는 도심 가로 보행공간에서 가로수 녹음에 의한 열쾌

표 5. 각 구간별 일사(sun)지점과 녹음(shade)지점 흑구, 습구, 건구 온도 및 WBGT 산출 결과(℃)

각 구간별 측정값 및 WBGT																
측정일	시간	기온(℃)	A구간							B구간						
			일사(sun)지점				녹음(shade)지점			일사(sun)지점				녹음(shade)지점		
			흑구(t_g)	습구(t_w)	건구(t_a)	WBGT	흑구(t_g)	습구(t_w)	WBGT	흑구(t_g)	습구(t_w)	건구(t_a)	WBGT	흑구(t_g)	습구(t_w)	WBGT
2012. 8. 3	13:00	34.9	37.50	25.00	34.50	28.45	33.50	26.00	28.25	43.80	26.50	34.50	30.76	36.00	26.00	29.00
	14:00	35.3	36.00	26.00	35.50	28.95	34.00	26.00	28.40	47.00	27.00	36.00	31.90	37.00	27.00	30.00
	15:00	35.3	39.50	25.50	35.50	29.30	35.00	26.50	29.05	47.50	27.50	36.00	32.35	37.00	26.50	29.65
	16:00	35.3	41.00	26.00	37.00	30.10	35.50	26.50	29.20	46.00	27.00	36.00	31.70	37.00	27.00	30.00
	17:00	36.7	39.50	25.50	36.00	29.35	37.50	26.50	29.80	42.50	26.50	35.50	30.60	37.00	26.00	29.30
2012. 8. 4	13:00	35.2	42.00	26.00	35.00	30.10	34.50	25.00	27.85	49.50	28.00	39.50	33.45	38.00	27.00	30.30
	14:00	36.5	43.00	26.50	36.00	30.40	35.00	25.00	28.00	51.50	28.50	39.50	34.20	39.00	27.00	30.60
	15:00	36.7	46.50	26.50	37.00	31.55	36.00	25.50	28.65	51.50	28.00	39.00	33.80	39.50	26.50	30.40
	16:00	36.2	48.00	27.00	37.50	32.25	37.50	26.00	29.45	50.00	28.00	31.50	32.75	39.00	26.00	29.90
	17:00	37.1	47.50	26.00	37.00	31.40	38.00	26.00	29.60	47.00	27.50	36.00	32.25	38.50	26.50	30.10
2012. 8. 7	13:00	33.6	39.50	25.00	33.00	28.70	33.00	25.00	27.40	47.00	26.80	36.00	31.76	37.00	26.00	29.30
	14:00	35.3	37.50	25.50	34.50	28.80	33.00	25.50	27.75	49.50	27.00	37.00	32.50	38.00	26.00	29.60
	15:00	35.1	45.50	26.50	36.00	31.25	34.00	26.00	28.40	49.50	27.00	37.20	32.52	35.50	26.00	28.85
	16:00	35.1	47.00	26.00	36.00	31.20	35.00	25.00	28.00	50.00	27.00	37.50	32.65	38.00	26.50	29.95
	17:00	35.0	44.00	26.50	36.50	31.00	35.50	25.50	28.50	46.00	26.00	36.00	31.00	37.80	26.00	29.54
측정일	시간	기온(℃)	C구간							D구간						
			일사(sun)지점				녹음(shade)지점			일사(sun)지점				녹음(shade)지점		
			흑구(t_g)	습구(t_w)	건구(t_a)	WBGT	흑구(t_g)	습구(t_w)	WBGT	흑구(t_g)	습구(t_w)	건구(t_a)	WBGT	흑구(t_g)	습구(t_w)	WBGT
2012. 8. 3	13:00	34.9	37.00	26.00	34.80	29.08	35.00	26.00	28.70	36.00	27.00	34.00	29.70	34.50	26.00	28.50
	14:00	35.3	37.00	26.00	35.00	29.10	35.00	26.00	28.70	38.00	27.00	35.00	30.00	35.00	26.00	28.70
	15:00	35.3	41.00	26.50	35.80	30.33	35.00	26.00	28.70	42.50	27.00	35.50	30.95	35.50	26.00	28.85
	16:00	35.3	42.00	26.50	36.00	30.55	35.90	26.50	29.32	45.00	28.00	34.50	32.05	36.00	26.50	29.35
	17:00	36.7	43.80	26.50	36.50	30.96	36.50	26.20	29.29	48.00	26.50	37.50	31.90	37.00	26.00	29.30
2012. 8. 4	13:00	35.2	38.00	26.00	34.80	29.28	36.00	26.50	29.35	46.00	27.00	38.00	31.90	36.00	27.00	29.50
	14:00	36.5	47.00	27.00	37.00	32.00	36.50	26.50	29.50	50.50	28.00	40.00	33.70	36.50	26.50	29.50
	15:00	36.7	46.00	26.50	36.80	31.43	37.00	26.00	29.30	50.50	27.00	39.00	32.90	37.00	26.50	29.65
	16:00	36.2	46.00	26.70	37.00	31.59	37.20	26.00	29.36	50.00	28.00	40.00	33.60	37.00	26.00	29.30
	17:00	37.1	47.00	26.00	36.20	31.22	38.50	26.20	29.89	51.00	27.00	39.00	33.00	37.50	26.00	29.45
2012. 8. 7	13:00	33.6	44.00	26.80	35.00	31.06	34.00	26.00	28.40	41.00	26.50	35.50	30.30	34.20	26.00	28.46
	14:00	35.3	45.00	26.00	34.00	30.60	34.30	26.00	28.49	45.90	26.50	36.00	31.33	35.00	26.00	28.70
	15:00	35.1	48.50	27.00	36.80	32.28	35.20	26.50	29.11	48.50	27.00	38.00	32.40	36.00	26.00	29.00
	16:00	35.1	50.10	27.00	37.00	32.62	35.00	26.50	29.05	49.00	26.50	37.00	32.05	36.00	27.00	29.70
	17:00	35.0	49.50	26.50	36.70	32.12	36.80	26.30	29.45	50.00	27.50	38.00	33.05	36.00	26.00	29.00

*WBGT 지수 산출식: 일사(sun)지점=0.7 t_w +0.2 t_g +0.1 t_a , 녹음(shade)지점=0.7 t_w +0.3 t_g 적용

*기온: 본 연구대상지 최근집 기상청 AWS(위치: 서울시 강남구 삼성동 삼성초등학교) 당일 관측기온, 본 연구에서 측정된 건구온도와 비교할 참고자료로 제시함.

적성을 평가하였다. 다양한 열쾌적성 평가 지수 중 WBGT 지수를 활용하였고, 한국표준협회 KS A ISO 7243과 일본국립환경연구소 WBGT 지수와 지수별 작업/활동지침을 참고하였다.

연구 대상지는 서울시 강남구 삼성동 테헤란로 주변 보행로 중 네 개 구간으로 하루종일 그늘 영향을 받는 녹음(shade)지점과 태양 영향을 받는 일사(sun)지점을 선정하여 흑구, 습구, 건구 온도를 측정, WBGT 산출공식을 이용하여 지수값을 도출하고, 보행자가 느끼는 녹음에 대한 쾌적함 정도를 행태 분석 및 설문 등을 통해 조사하였다.

연구결과, 일사(sun)지점 WBGT 지수는 최저 28.45℃~최고 34.20℃로 일부 시간대를 제외한 대부분 시간대에서 WBGT 31℃를 초과하는 것으로 나타나, 열쾌적성이 저하되는 지점으로 휴식을 취하거나 보행을 자제해야 하는 것으로 나타났다. 반면, 가로수 녹음(shade)지점 WBGT 지수는 최저 27.40℃~최고 30.60℃로 나타나, WBGT 28~31℃ 범위에 포함되어 가벼운 보행 및 활동이 가능한 열환경을 보였다. 전체 분석 가로수 B구간은 일사(sun) 및 녹음(shade)지점 모두 높은 WBGT 지수를 나타냈는데, 이는 태양 이동방향이 일직함과 동시에 북측에 위치한 가로 공간이 더 많은 일사에 노출되었고, 가로수 생육환경이 불량하여 녹음면적을 확보하지 못한 결과로 사료되어 가로수 식재시 이러한 점을 고려해야 할 것으로 판단된다.

일사지점과 녹음지점 WBGT 지수는 평균 1~4℃ 차이를 보이며, 특히 3~4시 일사지점과 녹음지점 WBGT는 3℃ 내외 이상 차이를 보여 복사열이 최고조에 달하는 시간에 녹음에 의한 열쾌적성 개선 효과가 가장 크다는 것을 알 수 있다. WBGT 활동지침 상 한 등급이 약 3℃ 기준으로 변화하므로, 녹음이 열쾌적성을 크게 향상시키는 것을 알 수 있다. 보행자 행태 및 설문조사 결과 역시 녹음지점 이용이 더 활발하고, 체감온도도 실제기온보다 낮게 느끼고 있다.

연구의 정책적 시사점으로 여름철 보행공간 열쾌적성을 개선하기 위하여 가로수 식재 간격 기준을 일률적으로 6~8m로 규정하지 말고, 보행공간에 연속적인 녹음을 형성하도록 한다는 성능기준을 적용하는 것이 필요하다.

주 1. WBGT 공식은 한국표준협회에서 발한 KS A ISO 7243:2005에 제시된 공식을 활용하였다. "WBGT 지수는 두 가지 변수의 측정값, 즉, 통상의 습구온도(t_{gm})와 흑구온도(t_{g}), 그리고 상황에 따라서는 기본변수 측정값인 공기온도(t_a)(건구온도)를 결합시킨 것이다. (식 1)과 (식 2)는 변수들간의 관계를 보여준다." 태양열이 없을 건물의 내외부를 측정할 경우에는 기본적인 습구온도와 흑구온도만 활용하고(식 2), 태양열이 있는 건물 외부를 측정할 경우에는 건구온도를 포함(식 1)하여 지수값을 산출한다.

인용문헌

- 권영아(2002) 서울의 도심 녹지가 주변 기온에 미치는 영향. 건국대학교 대학원 지리학과 박사학위논문.
- 김기호, 김수봉, 정응호(2004) 도시열섬현상 저감을 위한 그린네트워크 구축 방안에 관한 연구. 한국환경과학회지 13(6): 527-535.
- 김대관, 윤여창(1996) 한국의 가로수 현황 및 관리체계에 관한 연구. 산림경제연구 4(2): 37-50.
- 김석철(2008) 하계 도심지에서의 흑구온도 특징과 활용방안에 관한 연구. 인제대학교 대학원 석사학위논문.
- 김수봉, 김기호, 조진희(2001) 도시열섬현상의 원인과 대책. 환경과학논집 6(1): 63-89.
- 김수봉, 김혜동(2002) 도시의 수목이 기온의 조절에 미치는 영향. 한국조경학회지 30(3): 25-34.
- 김수봉, 정응호, 김기호(2006) 대구광역시 중구의 가로수 및 열섬 모자이크 현황 분석. 한국환경과학회지 15(4): 325-332.
- 김운수(2002) 도시열섬 현상의 완화 방안. 도시문제 37(8): 58-73.
- 김재화(2004) 가로수관련 자치법규 현황 및 개선방향. 동아대학교 연구논문집 27(2): 1-5.
- 박수국(2012) 인간 열환경 지수를 이용한 조경계획 및 디자인 방법. 한국조경학회지 40(1): 1-11.
- 성현찬(2003) 가로환경복원을 위한 도시의 주요 가로유형별 가로수 실태에 관한 연구: 경기도내 7개 도시를 중심으로. 국토계획 38(3): 245-257.
- 성현찬, 문다미(2003) 도시녹지의 대기정화효과에 대한 분석적 연구. 한국환경복원녹화기술학회지 6(3): 17-28.
- 윤민호, 안동만(2009) 위성영상을 이용한 도시녹지의 기온저감 효과 분석. 한국조경학회지 37(3): 46-53.
- 윤용한(1999) 도시내 공원녹지가 주변 열환경에 미치는 영향. 건국자연과학연구지 10(2): 201-210.
- 이춘석, 류남형(2010) 조경조장이 옥외공간의 온열쾌적성지수(WBGT)에 미치는 영향: 통풍과 차광이 배제된 하절기 주간 조건에서. 한국조경학회지 38(2): 1-8.
- 장동수, McPherson, E. G(2006) 도시 주차장내 수목그늘의 경제적 이익 연구. 한국조경학회지 33(6): 98-108.
- 조현길, 안태원(2010) 열쾌적성과 에너지 절약을 위한 녹지계획 전략 연구. 한국조경학회지 38(3): 23-32.
- 주민진(2004) 도심 녹음수의 옥외 열환경 조절 효과: WBGT를 중심으로. 진주산업대학교 대학원 석사학위논문.
- 최동호, 이부용(2007) 하절기 복사환경 관측을 통한 수목과 일사차폐 막 구조물의 자연냉각효과. 한국태양에너지학회 논문집 27(4): 137-146.
- 최윤희(2011) 국내의 가로공간의 친환경요소 평가연구. 대한건축학회지연합회 논문집 13(2): 139-146.
- 최재영(1992) 도시 가로수의 현황과 관리에 관한 연구. 성균관대학교 대학원 석사학위논문.
- KS A ISO 7243:2005 고온환경-습구 흑구 온도(WBGT)지수에 의한 열스트레스 추정. 한국표준협회.
- Budd, M. G.(2008) Wet-bulb globe temperature(WBGT)-its history and its limitations. Journal of Science and Medicine in Sport 11: 20-32.
- Donovan, G. H. and T. B. David(2009) The value of shade: Estimating the effect of urban trees on summertime electricity use. Energy and Buildings 41: 662-668.
- Landsberg, H. E.(1981) The Urban Climate. New York: Academic Press.
- http://www.elis.go.kr
- http://www.nles.go.jp
- http://www.osha.gov

원 고 접 수 일: 2013년 3월 14일
심 사 일: 2013년 5월 28일(1차)
2013년 6월 12일(2차)
게 재 확 정 일: 2013년 6월 19일
4 인 의 명 심 사 필