

ORIGINAL ARTICLE

기후변화 및 폭염대응 증발냉각시스템 적용에 따른 내·외부 열환경 변화 연구

김정호 · 김학기 · 윤용한 · 권기욱^{1)*}

건국대학교 녹색기술융합학과, ¹⁾바이오환경기술연구센터

Thermal Environment Transition of Response Climate Change and Heat Wave Application Evaporative Cooling System

Jeong-Ho Kim, Hak-Gi Kim, Yong-Han Yoon, Ki-Uk Kwon^{1)*}

Department of Green Technology Convergence, Konkuk University, Chungju 27478, Korea

¹⁾Environmental Biotechnology Research Center, Seoul 04936, Korea

Abstract

This study evaporative cooling system a heat wave climate change and reduction of the inside and outside thermal environment change research. Measurement items included micro meteorological phenomena and measured comfort indices. A micro meteorograph of temperature, relative humidity, surface temperature, and the comfort indices of WBGT, UTCI, and PMV were measured. The difference in inside and outside temperatures were compared for different land types, with the largest difference found in Type A (4.81 °C), followed by Type B (4.40 °C) and Type C (3.12 °C). Relative humidity was about 10.43% higher inside due to water injection by the evaporative cooling system. Surface temperature was inside about 6.60 °C higher than the outside all types. WBGT were Type A (3.50 °C) > Type B (2.71 °C) > Type C (1.88 °C). UTCI was low heat stress inside than outside all types. PMV was analysed Type C for inside predicted percentage of dissatisfied 75%, other types was percentage of dissatisfied 100% by inside and outside. Correlation analysis between land cover type and temperature, surface temperature, pmv, utci. T-test analysed inside and outside temperature difference was significant in all types of land.

Key words : Mist, Microclimate, Comfort index, Nozzle

1. 서론

최근 기후가 변화함에 따라 온난해진 기후는 폭염, 폭한, 호우, 폭설 등과 같은 극한 기후재해를 빈번하게 발생시켜 사회경제시스템과 자연환경에 커다란 영향을 미치고 있다. 이에 따라 국내 대도시를 중심으로 증가하고 있는 폭염현상은 건물에너지 사용량을 증가시

킬 뿐 아니라, 온도상승에 따른 대기의 오존 농도를 증가시켜 대기오염을 가중시킨다(Kim et al., 2015).

이러한 기후변화와 연계하여 인간의 여름철 핵심 이슈는 폭염, 태풍, 집중호우 등 이상기후 현상의 영향 및 대응이라 할 수 있다. 2012년의 우리나라 기온은 한 여름 날씨를 방불케 하는 매우 높은 기록을 유지하면서 기후변화에 기인하는 폭염 발생에 대한 경각심

Received 8 August, 2016; Revised 26 August, 2016;

Accepted 26 August, 2016

*Corresponding author : Ki-Uk Kwon, Environmental Biotechnology

Research Center, Seoul 04936, Korea

Phone : +82-31-535-5567

E-mail : kko101911@gmail.com

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

을 불러 일으켰다. 지구 온난화에 따른 영향의 가장 큰 현상 가운데 하나는 최근의 폭염과 같은 기상현상의 발생이다. 미국의 경우 80년대 후반부터 2003년까지 기상재해 중 폭염과 가뭄으로 인한 피해가 기상재해 중 91.6%를 차지하였고(Heo and Song, 2012), 우리나라 또한 매년 사망자가 늘어나고 있는 실정이다.

최근 우리나라의 지구온난화, 도시열섬 그리고 폭염 등의 기후변화는 여름철 냉방 전력의 소비 급증을 야기시켜 블랙아웃에 대한 우려가 고조되는 등 전력수급에 국가적 문제가 발생이 예상되고 있다. 이에 대한 국가적 대응으로 2012년도부터 여름철 실내 온도를 28℃로 제한하였으며, 에어컨의 과도한 사용으로 인한 호흡기와 피부질환도 증가하고 있다(Hong, 2013). 이처럼 폭염의 발생빈도 및 강도가 점차 심화되고 발생시기의 불확실성이 가중됨에 따라 그 피해는 더욱 커지고 있는 실정이다.

우리나라에서도 현재보다 더 빈번하고 극단적인 폭염과 한파에 직접적으로 노출될 수 있으므로 대응방안에 대해 중장기적인 접근이 요구되는 시기이다. 현재까지 폭염현상을 대응방법으로는 건물지붕 및 외벽의 열 흡수량을 저감 시키는 방법, 도시도로의 열 흡수량을 저감 시키는 방법, 도시 내 녹지 및 녹색 공간 조성, 물 순환체계 형성방법 등이 사용되고 있는 실정이다(Kim et al., 2015). 그러나 최근 폭염의 영향 및 피해에 대한 적절한 대응방안으로 물 입자 분사를 이용한 증발냉각효과에 따른 기온저감에 관심이 모아지고 있는 실정이다.

이러한 증발냉각시스템의 기존 연구는 물입자를 이용한 쿨링시스템을 활용하여 필드실험에 의한 성능평가 결과 증발냉각효과 시스템의 설치 시에 외기 온도가 3~4℃ 냉방효과가 있음을 제시하였다(Yoon et al., 2008). 2류체 미분무수 시스템의 냉각효과에 관한 실험적 연구에서는 미분무수의 증발잠열로 인한 냉각효과를 알아보기 위하여 실내와 실외로 구분하여 연구하였다. 실내외 공간에서 냉각효과를 증명하였으며 실내공간은 잠열의 외부방출에 어려움이 있어 효과가 미미하였으나, 실외공간의 경우 최대 10℃ 온도저감을 나타냈음을 보고하였다(Baek et al., 2009). 일사 차광막 및 미스트 분무가 단동 플라스틱 하우스에 미치는 냉각효과를 검증한 연구에서는 증발냉각시스

템을 통하여 4.6℃의 온도저감효과를 보고하였다(Lee et al., 2000).

워터미스트를 이용한 쿨링시스템의 특성에 관한 연구는 한 개 노즐을 이용하여 분무압력과 워터미스트 액적 크기의 변화 및 냉각온도 측정에 대해 연구하였으며, 분무압력과 워터미스트 액적 크기에 대하여 규명하였으며, 또한 물입자의 중심부와 경계면의 온도와 습도에 관하여 규명하였다(Hong, 2013). 현재 국내에서 증발냉각시스템의 연구는 미흡한 실정이나, 물을 이용하여 폭염을 대응할 수 있는 최적의 대안으로 제시되고 있다(Kim et al., 2015). 또한, 이처럼 폭염과 같은 기상현상의 변화에 대응하는 옥외에서의 미세 물분사에 대한 필요성 증가하고 있으나, 국내에서의 실적용 및 관련연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구는 폭염 등 기후변화에 대응하여 미세한 물입자의 증발잠열을 이용한 증발냉각시스템의 개발 및 실증 연구를 통하여 향후 기후재해로 나타날 폭염 및 열환경 완화효과에 기초자료로 활용하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상지

기후변화 및 폭염대응 증발냉각시스템의 열환경변화를 분석하고자 연구대상지는 충북 충주시에 위치한 건국대학교 글로벌캠퍼스 체육관 앞 부지에서 실시하였으며, 미기상의 변화를 최소화하기 위하여 하나의 장소에서 3가지 토지피복유형이 나타나는 부지를 선택하였다(Fig. 1). 또한, 연구기간은 2015년 3월부터 9월까지 진행되었다. 증발냉각시스템의 열환경변화를 규명하고자 토지피복유형별로 측정하였으며, 대리석 등으로 지표가 포장되어있는 불투수포장지 유형(이하 Type A), 주변이 개방되어있고 잔디피복이 이루어진 초지 유형(Type B), 초지에 수고 7 m 이상의 느티나무가 식재되어있는 초지 및 식재혼합지 유형(Type C), 총 3개 유형으로 나누어 조사를 실시하였다(Fig. 2). 측정기간 중 평균기온과 일사량이 가장 높게 나타나며, 폭염시기에 대응하고자 개발된 증발냉각시스템의 내·외부 열환경 변화를 비교하기 위하여 월평균 기온이 다소 높은 7~8월에 집중 조사하였다.

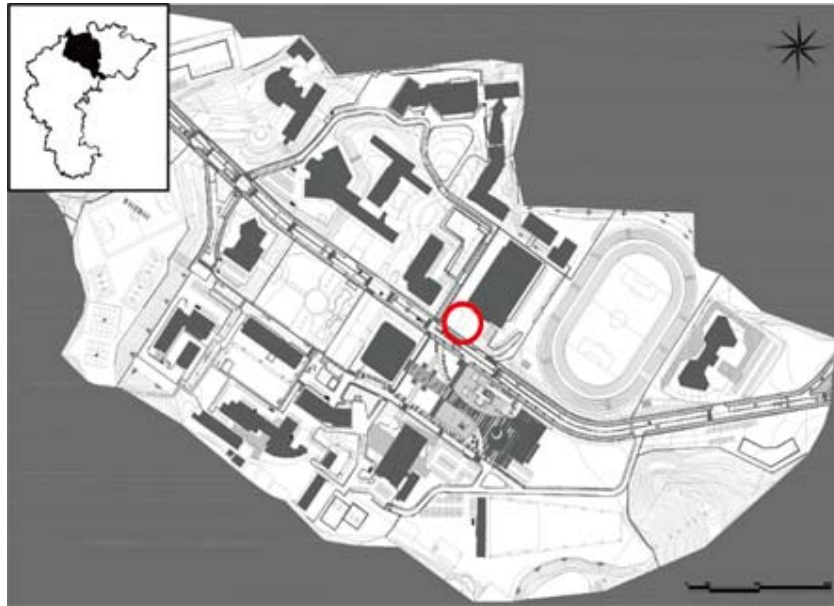


Fig. 1. Study on site and measurement points location map.



Type A



Type B



Type C

Fig. 2. Land cover status target area by views.

2.2. 조사분석방법

본 연구는 미세물입자가 토지피복유형에 따른 증발냉각효과를 규명하기 위하여, 미세물 분사기의 내부와 외부에서 측정을 실시하였다. 연구를 진행하기 위한 실험장치는 Fig. 3과 같으며, 6방향의 육각형 구조의 Pipe에 각 2개씩 총 12개의 분사노즐을 설치하였으며 설치 및 이동에 용이하게 제작하였다. 미세물분사 노즐은 1분당 0.03 L의 물을 분사하며, 총 12개를

설치하여 1분당 분사량은 0.36 L/min을 분사하도록 조성하였다.

또한 증발냉각시스템의 효과검증을 위하여 토지피복유형별로 불투수포장지, 초지, 초지 및 식재혼합지로 나누어 측정하였으며, 증발냉각시스템은 10:00에서 16:00까지 가동하여 1시간별로 측정하였다. 측정지점으로는 증발냉각시스템 내부와 증발냉각시스템의 영향을 받지 않은 2 m이상 떨어진 외부지점(이하

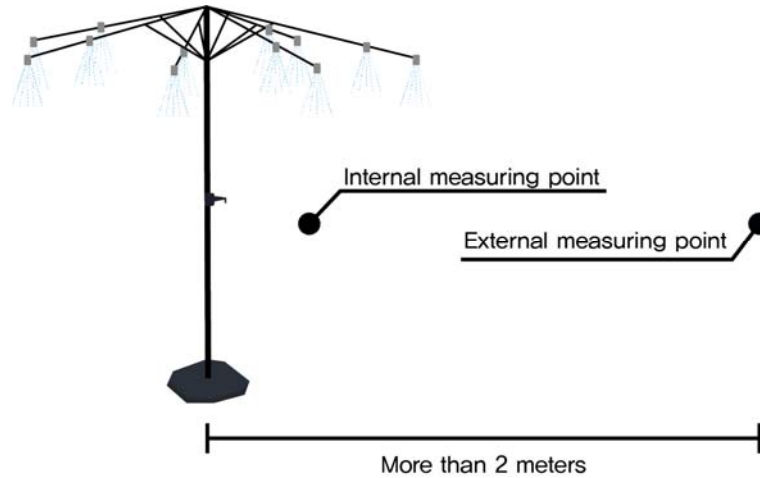


Fig. 3. Experiment device modeling for study.

외부)에서 측정하였다.

측정항목으로는 미기상 및 열쾌적지표를 나누어 측정하였으며, 미기상은 일사량, 기온, 상대습도, 지표면온도 등을 측정하였다. 측정장비로는 종합적인 측정이 가능한 자동기상관측기 Watch Dog 2000 (Spectrum Technologies Inc, USA)의 경우 LCD를 통해 현재 상태 및 비휘발성 메모리에 기록된 데이터를 확인할 수 있으며, 내부 센서로 기온, 상대습도, 일사량 등을 측정할 수 있다. 일사량의 경우 $1\sim 1,250 \text{ W/m}^2$ 범위에서 $300\sim 1,100 \text{ nm}$ 측정범위 내 측정이 가능하며, 기온은 $-32\sim 100^\circ\text{C}$ 의 범위를 측정할 수 있으며, 오차 범위 $\pm 0.6^\circ\text{C}$ 이내이다. 또한 기온, 풍속, 상대습도는 열선풍속계 TSI-9535(TSI Inc, USA)로 측정하였으며 반응속도가 빠르고 측정 및 오차범위는 $-17.8\sim 93.3^\circ\text{C}$, $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 이다. 또한, 일사량을 측정할 수 있는 일사계 LP02(Hukeselux Inc, Netherlands)와 일사계에서 측정된 데이터를 저장하는 데이터로거 LI19(Hukeselux Inc, Netherlands)를 사용하였다. 보조장비로 사용한 일사계 LP02는 ISO 등급 Second Class이며, 파장범위는 $0\sim 1,600 \text{ Wat/m}^2$ 또는 $2,000 \text{ Wat/m}^2$ 으로 사용 온도 범위 $-40\sim 80^\circ\text{C}$ 범위 내에서 사용이 가능하다. 측정일의 일사를 분석하기 위해 자동기상관측기와 일사계를 이용하여 측정값을 보정하였다.

열쾌적지표로는 습구흑구온도지수(WBGT, wet-bulb globe temperature), 예상온열감(PMV, predicted mean vote), 일반적 온열기후지수(UTCI, universal thermal climate index)를 측정하였으며, 습구흑구온도지수는 흑구온도, 습구온도, 건구온도 등을 고려하여 산출하였으며, 예상온열감과 일반적 온열기후지수는 기온, 상대습도, 풍속, 평균복사온도, 착의량, 대사량 등을 고려하여 산출하였다. 측정된 자료는 증발냉각시스템의 내·외부의 차이를 파악하기 위하여 통계분석은 SPSS PASW Statistics 18을 활용하여 상관성분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 토지피복유형별 기상현황

실험진행에 있어서 데이터 간의 명확한 분석을 위하여 기온이 높고 맑은 날을 선정하여 측정하였다. 측정기간 중 평균기온은 32.00°C 이상, 평균일사량 950.00 Wat/m^2 이상, 평균상대습도 60.0% 이었다.

연구대상지의 토지피복유형별 기상현황은 Table 1과 같으며, 일평균 기온의 경우 불투수포장지 유형은 37.5°C 로 측정되었으며 초지 유형은 37.30°C , 초지 및 식재혼합지 32.00°C 로 분석되었다.

일간 평균 상대습도의 경우 Type A은 62.70% , Type B는 53.50% , Type C는 66.10% 로 측정되었으며,

Table 1. The results of the weather characteristic of land cover type

Division	Site area (m ²)	Air temperature (°C)	Relative humidity (%)	The surface temperature(°C)	Solar radiation (Wat/m ²)	Globe temperature (°C)
Type A (Water Impervious site)	176.8	37.5	62.7	47.4	1121.1	47.9
Type B (Grassland site)	160.9	37.3	53.5	39.7	950.4	44.2
Type C (Grassland & Planting site)	489.0	32.0	66.1	29.0	977.1	33.2

평균 일사량의 경우 Type A 1121.10 Wat/m², Type B 950.40 Wat/m², Type C 977.10 Wat/m²로 조사되었다. 평균 지표면온도는 Type A 47.40°C, Type B 39.70°C, Type C 29.00°C로 나타났으며, 평균 흑구온도는 Type A 47.9°C, Type B 44.2°C, Type C 33.2°C로 측정되었다.

기온, 지표면온도, 흑구온도의 경우 토지피복유형에 따라 불투수포장지 유형이 가장 높게 나타났으며, 이는 녹지의 양에 따른 결과로 판단되며(Yoon and Kim, 2004), 또한, 피복상태에 따른 알베도의 차이로 사료되었다. 알베도 변화는 토양 수분량, 식생, 태양광의 입사각도, 적설 등의 변화를 포함하여 지구 복사균형과 그것이 기후와 식생변화에 미치는 영향력을 이해할 수 있는 결정적인 변수로 작용한다(Gao et al., 2006).

3.2. 토지피복유형별 증발냉각시스템 내·외부 미기상 특성

3.2.1. 기온

토지피복유형별 증발냉각시스템의 내·외부 기온 결과는 Fig. 4와 같다. 토지피복유형 중 불투수지역인 Type A의 외부기온은 최대기온 42.00°C, 최소기온 35.00°C, 평균기온 37.54°C로 분석되었으며, 내부기온은 최대기온 37.80°C, 최소기온 28.80°C, 평균기온 32.73로 분석되었다. 외부기온 대비 내부기온이 평균 4.81°C 낮게 나타났다. 초지유형인 Type B의 경우 외부기온은 최대기온 39.80°C, 최소기온 31.10°C, 평균기온 37.29°C로 분석되었으며, 내부기온은 최대기온 36.40°C, 최소기온 27.70°C, 평균기온 32.84°C로 분석되었다. 외부기온대비 내부기온이 평균 4.45°C 낮았

다. 초지와 식재지의 혼합유형인 Type C의 외부기온은 최대기온 33.70°C, 최소기온 29.20°C, 평균기온 32.03°C로 분석되었으며, 내부기온은 최대기온 32.70°C, 최소기온 26.00°C, 평균기온 28.91°C로 분석되었다. 외부기온 대비 내부기온이 평균 3.12°C 낮게 나타났다.

상기의 측정결과에서 보듯이 모든 유형에서 내부기온이 낮게 나타났으며, 그 차이값은 외부기온대비 내부기온이 평균 4.13°C 낮게 나타나고 있어 미세 물분사로 인한 증발냉각시스템 효과는 약 4°C 이상 저감되는 것으로 판단되었다.

토지피복유형별 기온 저감량의 비교 시 Type A(4.81°C) > Type B(4.45°C) > Type C(3.12°C)로 나타나 불투수포장지역인 Type A에서 가장 양호한 효과가 나타난 것으로 판단되었다. 증발냉각효과는 분사와 동시에 온도하강이 시작되며 분사 전·후 비교 시 4°C 이상 온도차이가 나타나며, 물입자와 분사량을 증가시킨다면 증발냉각효과 훨씬 높일 수 있을 것이다(Lee and Kim, 2011). 또한 토지피복유형 중 불투수포장지에서 내·외부 온도차이가 크게 나타난 것은 토지피복 상태에 따른 알베도의 차이도 다소 영향을 미쳤을 것으로 판단되었다(Yoon et al., 2008).

3.2.2. 상대습도

증발냉각시스템의 내·외부의 상대습도 결과는 Fig. 5와 같다. 토지피복유형별 중 불투수지역인 Type A 외부상대습도의 경우, 최대상대습도 73.00%, 최소상대습도 54.20%, 평균상대습도 62.75%로 분석되었으며, 내부 상대습도의 경우, 최대상대습도 79.80%, 최소상대습도 62.60%, 평균상대습도 72.53%로 분석

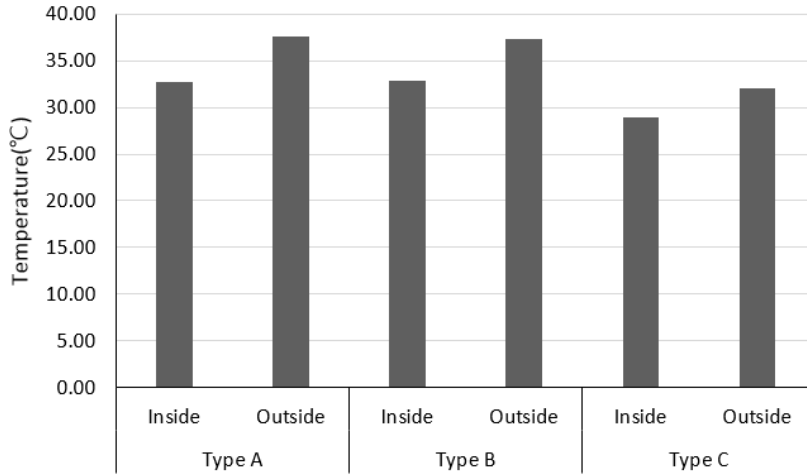


Fig. 4. The result of the land cover type's temperature.

되었다. 외부상대습도 대비 내부상대습도가 평균 9.78% 높게 나타났다.

초지유형인 Type B의 외부상대습도는 최대상대습도 58.10%, 최소상대습도 50.00%, 평균상대습도 53.51%로 분석되었으며, 내부 상대습도는 최대상대습도 74.70%, 최소상대습도 55.60%, 평균상대습도 64.69%로 분석되었다. 외부상대습도 대비 내부상대습도가 평균 11.18% 높게 나타났다.

초지와 식재지 혼합유형인 Type C의 외부상대습

도는 최대상대습도 73.20%, 최소상대습도 54.50%, 평균상대습도 63.62%로 분석되었으며, 내부 상대습도는 최대상대습도 80.10%, 최소상대습도 63.80%, 평균상대습도 73.96%로 분석되었다. 외부상대습도 대비 내부상대습도가 평균 10.35% 높게 나타났다.

모든 유형에서 평균상대습도가 내부상대습도 (70.39%) > 외부상대습도(59.96%)의 결과를 보였으며, 그 차이값은 10.43%로 내부상대습도가 높게 나타났다. 증발냉각시스템에서의 물분사로 인해 외부보다

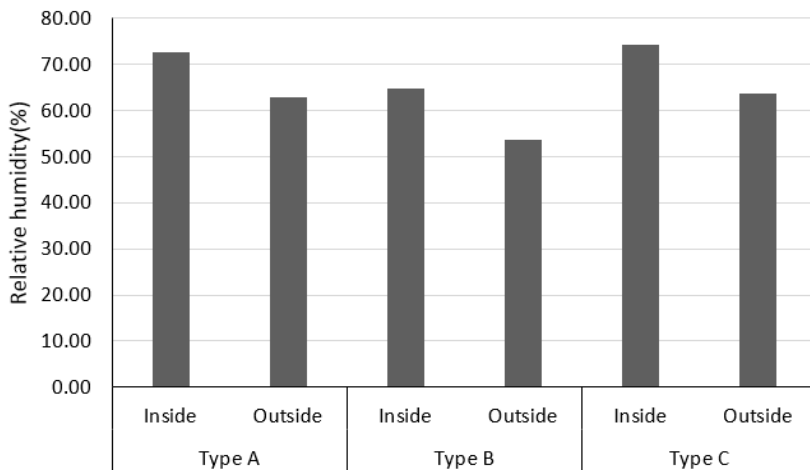


Fig. 5. The result of the land cover type's relative humidity.

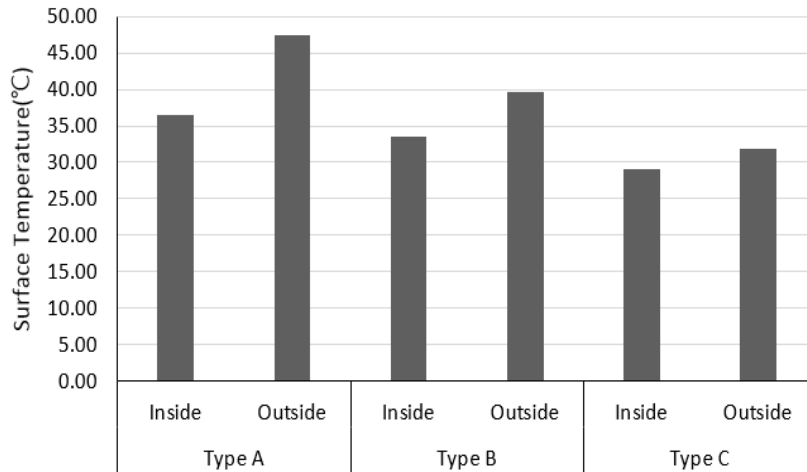


Fig. 6. The result of the land cover type's surface temperature.

내부의 상대습도가 높게 나타난 것으로 사료되었으며, 향후 상대습도의 변화가 주변 기상인자에 미치는 영향을 규명하는 연구가 필요할 것으로 사료되었다.

3.2.3. 지표면온도

토지피복유형별 중 불투수지역인 Type A 외부지표면온도의 경우, 최대온도 52.80°C, 최소온도 37.80°C, 평균온도 47.38°C로 분석되었으며, 내부지표면온도의 경우, 최대온도 38.20°C, 최소온도 33.60°C, 평균온도 36.53°C로 분석되었다. 외부지표면온도대비 내부지표면온도가 평균 10.86°C 낮게 나타났다.

초지유형인 Type B의 외부지표면온도는 최대온도 46.40°C, 최소온도 28.00°C, 평균온도 39.66°C로 분석되었으며, 내부지표면온도는 최대온도 38.50°C, 최소온도 27.60°C, 평균온도 33.52°C로 분석되었다. 외부지표면온도 대비 내부지표면온도가 평균 6.14°C 낮게 나타났다.

초지와 식재지 혼합유형인 Type C의 외부지표면온도는 최대온도 34.90°C, 최소온도 27.90°C, 평균온도 31.81°C로 분석되었으며, 내부지표면온도의 경우, 최대온도 31.40°C, 최소온도 26.20°C, 평균온도 29.00°C로 분석되었다. 외부지표면온도대비 내부지표면온도가 평균 2.81°C 낮게 나타났다.

모든 유형에서 외부지표면온도(39.62°C) > 내부지표면온도(33.02°C)로 분석되었으며, 내부지표면온도

가 약 6.60°C 낮게 나타났다. 이는 공기중 물입자와 일부 낙하된 물입자의 복합작용에 의해 지표면 온도차이가 발생한 것으로 판단되었다(Hong, 2013). 향후 다양한 물입자의 크기와 분사량에 대한 연구가 지속적으로 이루어져 토지이용 혹은 토양피복유형에 따라 그리고 도시 열섬 및 폭염의 강도에 따라 물입자 크기와 분사량에 대한 효과 증발냉각효과 또한 규명되어야 할 것이다.

3.3. 토지피복유형별 증발냉각시스템 내·외부 열쾌적지표 특성

3.3.1. 습구흑구온도지수(WBGT)

습구흑구온도지수는 흑구(복사열), 습구(습도와 바람), 건구(대기온도) 온도계 값을 기준식에 대입하여 도출한 값으로 나타나며, 각 지수값의 범위를 설정하여 인간의 열스트레스에 적합한 온열환경 활동지침을 설정하고 있다. 이는 고온환경에서 작업자 또는 일상 생활에서 인간 활동을 제한하는 방식으로 활용되어, 열적으로 안전하고 쾌적한 생활환경을 고려할 수 있는 지수로 활용될 수 있음을 의미한다(Ann et al., 2013). 또한 체육분야, 군사훈련분야, 노동분야 등에서 적용되고 있으며, 특히 군사훈련시 많이 활용되고 있고, 31°C 이상이 되면 옥외훈련 및 활동이 제한되고 있다(Park et al., 2008).

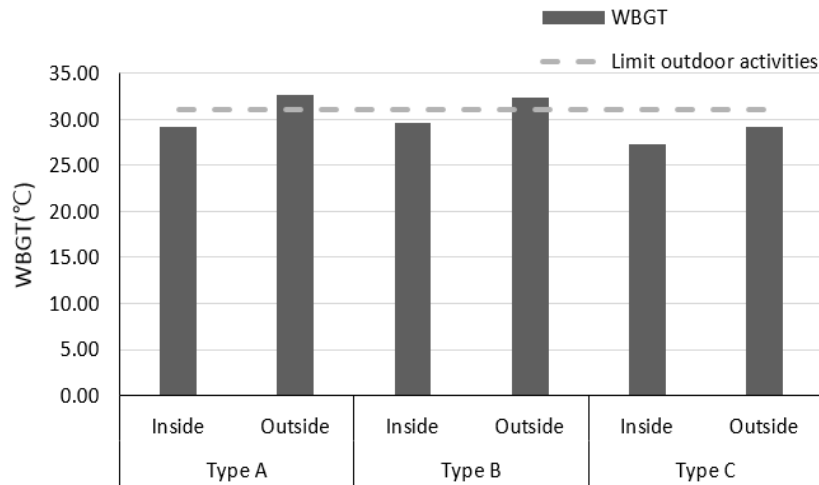


Fig. 7. The result of the land cover type's WBGT.

토지피복유형별 증발냉각시스템의 내·외부 습구흑구온도지수 결과는 Fig. 6과 같다. 토지피복유형별 증발냉각지역인 Type A의 외부 습구흑구온도지수는 최대 34.36°C, 최소 29.26°C, 평균 32.72°C이었으며, 내부 WBGT는 최대 30.64°C, 최소 25.20°C, 평균 29.2°C로 나타나 외부 습구흑구온도지수 대비 내부 습구흑구온도지수가 평균 3.50°C 낮게 측정되었다.

초지유형인 Type B의 외부 습구흑구온도지수는 최대 34.82°C, 최소 28.99°C, 평균 32.31°C로 분석되었으며, 내부 WBGT의 경우, 최대 31.81°C, 최소 26.62°C, 평균기온 29.59°C로 분석되었다. 외부 습구흑구온도지수 대비 내부 습구흑구온도지수가 평균 2.71°C 낮게 나타났다.

초지와 식재지 혼합유형인 Type C의 외부 습구흑구온도지수는 최대 33.59°C, 최소 25.70°C, 평균 29.13°C 이었고 내부 습구흑구온도지수는 최대 29.93°C, 최소 24.49°C, 평균 27.25°C로서 외부 습구흑구온도지수 대비 내부 습구흑구온도지수는 평균 2.75°C 낮은 것으로 분석되었다.

토지피복유형별 외부 습구흑구온도지수는 평균 31.39°C이었고 내부는 28.69°C이었다. 즉, 외부의 경우 습구흑구온도지수 활동지수 기준에서 규정하고 있는 31°C를 초과하여 옥외활동이 제한되는 결과로 나타났다. 내부 습구흑구온도지수는 외부 대비 평균

2.70°C 낮게 나타나 옥외활동이 가능한 수준이었다.

토지피복유형별 내·외부 저감량은 Type A(3.50°C) > Type B(2.71°C) > Type C(1.88°C)로 분석되었다. 이중 불투수포장지에서 가장 큰 효과를 나타낸 것은 불투수포장면의 복사열 및 태양 일사를 직접적으로 받아 흑구온도의 상승으로 나타난 결과로 판단되었으며, Type B와 C는 초지 및 식재지로 지표면의 반사되는 복사열의 차이로 사료되었다(Ju et al., 2004). 또한 기후변화 및 폭염으로 인한 고온피해 저감을 위해 여름철 외부공간에서 식재만으로도 습구흑구온도지수를 낮출 수 있으며(Yamada et al., 2000), 향후 수목과 증발냉각시스템의 혼합을 통한 열환경 더 나아가 열 오염에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

3.3.2. 일반적 온열기후지수(UTCI)

일반적 온열기후지수는 일반적 온열기후지수로 적용범위는 추위와 열을 고려하여 총 10개 등급으로 구분되며(Hoppe, 2002), 9~26°C를 쾌적범위로 설정한 후 26~33°C는 일반적인 열스트레스, 33~38°C는 강한 열 스트레스, 38~46°C는 매우 강한 열 스트레스, 46°C를 초과하는 경우 극심한 열 스트레스로 분류하고 있다(Kim et al., 2015). 열뿐만 아니라 추위에 대한 등급 사례는 본 연구목적과 부합되지 않기 때문에 제시하지 않았다.

토지피복유형별 증발냉각시스템의 내·외부 일반적

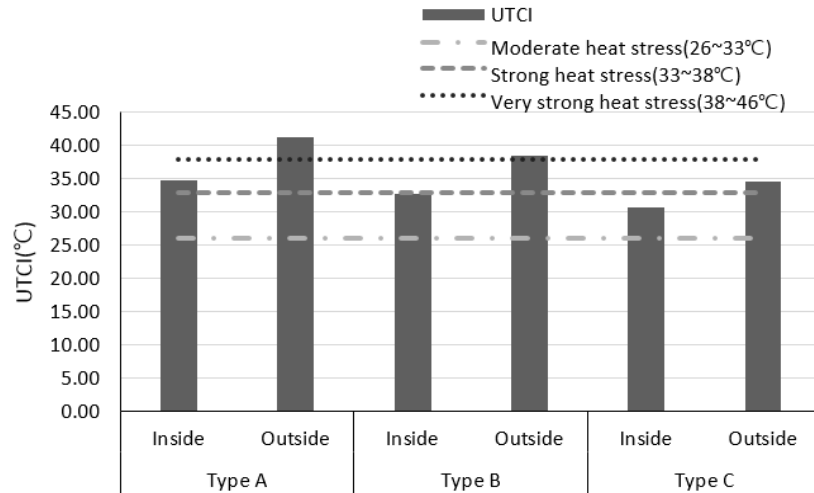


Fig. 8. The result of the land cover type's UTCI.

온열기후지수 결과는 Fig. 7과 같다. 불투수지역인 Type A의 외부 일반적 온열기후지수는 최대 47.50℃, 최소 35.30℃, 평균 41.18℃, 내부 일반적 온열기후지수는 최대 38.80℃, 최소 32.10℃, 평균 34.77℃ 등으로 나타나 외부 일반적 온열기후지수 대비 내부 일반적 온열기후지수가 평균 6.41℃ 낮은 수준이었다. 불투수 포장지역의 평균 외부 일반적 온열기후지수는 매우 강한 열스트레스의 범위인 38~46℃의 범위에 속하였으며 내부 일반적 온열기후지수는 강한 열스트레스 범위인 33~38℃에 속하였다. 증발냉각효과로 인하여 쾌적범위는 낮아졌으나, 폭염시 증발냉각시스템의 양호한 효과를 위한 다양한 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

초지유형인 Type B의 외부 일반적 온열기후지수는 최대 48.00℃, 최소 30.60℃, 평균 38.52℃, 내부 일반적 온열기후지수는 최대 37.80℃, 최소 27.90℃, 평균 32.66℃로 나타나 외부 일반적 온열기후지수 대비 내부 일반적 온열기후지수가 평균 5.85℃ 낮은 수준이었다. 일반적 온열기후지수 등급을 고려해 보면 Type B에서 나타난 수치의 경우 외부는 매우 강한 열스트레스의 범위, 내부는 일반적인 열스트레스 범위에 속하는 수준이었다.

초지와 식재지 혼합유형인 Type C의 외부 일반적 온열기후지수는 최대 39.00℃, 최소 30.20℃, 평균

34.53℃이었고 내부 일반적 온열기후지수는 최대 33.80℃, 최소 26.60℃, 평균 30.77℃로 분석되어 외부 일반적 온열기후지수 대비 내부 일반적 온열기후지수가 평균 3.76℃ 낮게 나타났다. 이는 외부 일반적 온열기후지수의 경우 강한 열스트레스의 범위에 속하였으며, 내부 일반적 온열기후지수는 일반적인 열스트레스 범위에 속하였다. 여름철 열스트레스가 가장 심할 때 녹지에서는 일반적인 열스트레스 이하의 수치를 나타낸다고 보고하고 있으나(Cheung and Hart, 2014), 본 연구에서는 강한 열스트레스 범위에 속하였으며, 폭염 시 측정된 온도가 기존연구보다 높게 나타나 인간이 이용하는 녹지에서는 증발냉각시스템의 도입을 고려하여야 할 것으로 판단되었다. 또한 일반적 온열기후지수의 개발이 국외의 기준으로 계산된 값으로 국내실정에 맞는 다양한 요소에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다(Kim et al., 1999).

3.3.3. 예상온열감(PMV)

예상온열감은 덴마크 공과대학의 Fanger 교수가 1967년에 개발한 이론으로 ISO 7730으로 채택되어 세계적으로 널리 쓰이고 있다. 인간의 온열감에 대한 이론을 정량화시킨 것으로 인체의 열평형을 기초로 한 쾌적 방정식에 대입하여 인체의 온열감을 이론적으로 예측한 것이다. 즉, 예상온열감은 온열환경 6요소를 쾌적 방정식에 대입시켰을 때의 산열량과

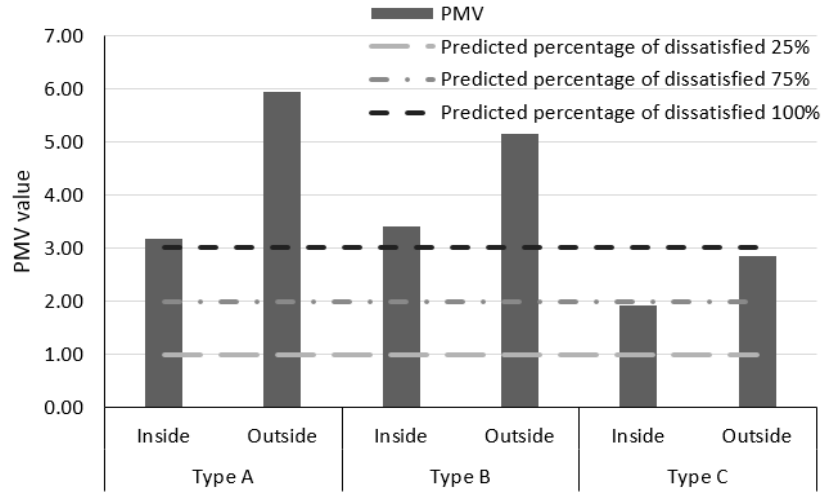


Fig. 9. The result of the land cover type's PMV.

방열량의 불평형분(인체 열부하)과 사람의 온열 감각을 피험자 실험을 통해 나타낸 지표이다. 분류 척도는 -3~3까지 총 7개로 구분되며, 0일 때 불만족율 5%, $-1 < PMV < 1$ 일 때 불만족율 25%, $-2 < PMV < 2$ 일 때 불만족율 75%, $-3 < PMV < 3$ 일 때 불만족율 100%에 해당한다(Kim et al., 2014).

불투수포장지역인 Type A의 예상온열감은 외부 평균 5.93, 내부 평균 3.18로 예상 불만족율 100%에 해당하였다. Type B는 외부 평균 5.14, 내부 평균 3.41로 예상불만족율 100%에 해당하였으며, Type C는 외부평균 2.86으로 예상불만족율 100%에 해당하였으나, 내부 평균 1.91로 예상불만족율 75%에 해당하였다. 증발냉각시스템을 가동하였을 경우 초지에 비해 초지 및 식재지에서 예상불만족율이 낮게 나타난 것은 동일한 녹지지역에서도 녹지의 밀도, 녹지량에 따라 온열쾌적감이 달라진다는 결과(Harazono et al., 1990)와 유사한 것으로 판단되었으며, 국내에서는 폭염이 가중되고 있는 실정에서 녹지를 이용하는 인간의 열쾌적성을 위하여 증발냉각시스템의 도입이 필요할 것으로 사료되었다. 또한 예상온열감은 실내 환경을 기준으로 작성된 온열쾌적감지표로 옥외공간의 평가에 적용할 경우 열적인 불쾌적감에 대해 과대평가가 발생하므로, 외부공간의 열쾌적감 지표로는 한계점으로 판단되었다. 따라서 이에 대한 국내에 적

용가능한 평가지표의 개발이 요구되며, 외부에서 증발냉각시스템의 평가가 가능한 지표의 개발 및 실증 연구가 다수 진행되어야 할 것이다.

3.4. 통계분석

3.4.1. 상관분석

토지피복유형별 증발냉각시스템 내·외부의 차이값에 대한 분석을 위하여 상관분석을 실시하였다. 상관분석에 앞서 토지피복유형의 경우 측정된 데이터와 통계적인 비교를 위하여 불투수포장유형 : 1, 초지유형: 2, 초지 및 식재지유형: 3의 가변수로 지정하여 상관분석을 실시하였다(Table 2).

상관분석결과, 기온의 경우 토지피복유형별로 내·외부 차이는 0.05의 유의수준이 있는 것으로 분석되어 기온의 경우 토지피복유형과 기온의 내·외부 차이가 상관성이 없다는 귀무가설을 기각하고, 토지피복유형과 기온의 내·외부기온차이는 상관성이 있다는 대립가설을 채택하게 되었다($P < 0.05$). 상관계수의 경우 $-0.288(P < 0.05)$ 으로 부의 상관관계인 것으로 분석되어 불투수포지유형일수록 기온의 차이값이 크게 나타나는 것으로 판단되었다. 토지피복유형과 지표면 온도, 예상온열감, 일반적 온열기후지수의 항목에서 상관관계인 것으로 분석되었으며, 불투수포장유형일수록 내·외부의 차이값이 크게 나타나 증발냉각

Table 2. The results of the land cover type and thermal environment correlation analysis

	Land cover type	Air temperature	Relative humidity	Surface temperature	WBGT	PMV
Air temperature	-.288*					
Relative humidity	.061	.107				
Surface temperature	-.333*	.326*	.107			
WBGT	-.193	.189	-.171	.358**		
PMV	-.323*	.686**	.098	.716**	.549**	
UTCI	-.267*	.511**	.225	.559**	.366**	.719**

*: $P < 0.05$, **: $P < 0.01$, $N=55$

시스템이 불투수유형일 때 가장 효과가 양호할 것으로 사료되었다.

3.4.2. 토지피복유형별 증발냉각시스템 내·외부 기온차이

토지피복유형별 증발냉각시스템의 내·외부의 기온 차이를 검증하기 위하여 독립표본 T검정을 실시하였다(Table 3). 분석에 앞서 다른 열환경 측정항목은 기온을 포함하여 산출되었기 때문에, 내·외부의 열환경 차이를 규명하기 위하여 기온을 대상으로 분석하였다.

분석결과, 토지피복유형 중 불투수포자유형인 Type A 내·외부 기온의 측정값 차이는 통계적으로 유의한 것으로 분석되었다. Levene의 등분산 검정결과, 유의확률 0.215로 내·외부 기온 표본의 분산은 같지 않다는 대립가설을 기각하고, 귀무가설을 채택하여 분산이 동일한 것으로 분석되었으며, 이에 따른 T검정결과 t값이 5.856으로 두 집단의 내·외부 기온의 평균값은 같지 않다는 대립가설을 채택하였다. 따라서, 불투수포자유형에서 증발냉각시스템이 폭염에 대응

하여 효과가 양호할 것으로 판단되었다. Type B 내·외부 기온의 측정값 차이는 통계적으로 유의한 것으로 분석되었다. Levene의 등분산 검정결과, 유의확률 0.010로 기온 표본의 분산은 같지 않다는 대립가설을 채택하고, 그에 따른 T검정결과 t값이 5.598로 두 집단의 내·외부 기온의 평균값은 같지 않다는 대립가설을 채택하였다. Type C 내·외부 기온의 측정값 차이는 통계적으로 유의한 것으로 분석되었으며, Levene의 등분산 검정결과, 유의확률 0.00으로 기온 표본의 분산은 같지 않다는 대립가설을 채택하였다. 이에 따른 T검정결과 t값이 5.141로 두 집단의 내·외부 기온의 평균값은 같지 않다는 대립가설을 채택하였다. 따라서 초지 및 식재지 유형에서도 증발냉각시스템의 효과가 양호할 것으로 판단되었다.

4. 결론

본 연구는 기후변화 및 폭염대응 증발냉각시스템의 내·외부 열환경 변화를 규명하여 그 효과를 정량적

Table 3. T-test of mean difference on land cover type and temperature

	Levene statistic		<i>t</i>	<i>df</i>	Sig.	Mean difference	Std. error	95% confidence interval	
	<i>F</i>	Sig.						Minimum	Maximum
Type A	1.602	.215	5.856	32	.000	4.45294	.76046	2.90394	6.00194
Type B	7.610	.010	5.598	27.050	.000	5.00588	.89423	3.17122	6.84054
Type C	16.990	.000	5.141	23.960	.000	3.08235	.59961	1.84471	4.31999

으로 제시하고자 하였다. 열환경 측정항목은 미기상 및 열쾌적지표를 구분하였는데, 미기상은 기온, 상대 습도, 지표면온도를, 열쾌적지표는 습구흑구온도지수, 일반적 온열기후지수, 예상온열감을 각각 측정하였다. 내·외부 열환경 차이에 따른 측정값의 유의성을 검증하기 위해 상관분석 및 독립표본 T검정을 실시하였다.

토지피복유형별 외부 대비 내부의 기온 저감량은 Type A(4.81℃) > Type B(4.45℃) > Type C(3.12℃)로 불투수포장유형에서 가장 높은 저감량을 보였다. 상대습도는 증발냉각시스템의 물분사로 인하여 내부 상대습도가 약 10.43% 높게 나타났으며, 지표면온도는 내부가 외부 대비 약 6.60℃ 낮았다. WBGT의 외부 대비 내부의 저감값은 Type A(3.50℃) > Type B(2.71℃) > Type C(1.88℃)로 불투수포장 유형에서 가장 효과가 큰 것으로 판단되었다. 일반적 온열기후지수의 경우에도 외부 대비 내부의 저감값은 3.76~6.41℃로서 불투수포장 유형인 Type A에서 가장 효과가 크게 나타났다. 증발냉각시스템의 내·외부 열환경 차이에 따른 토지피복유형별 상관성 분석결과 기온, 지표면온도, 예상온열감, 일반적 온열기후지수가 상관성을 나타내었으며, 기온을 대상으로 독립표본 T검정결과 내·외부 기온의 차이는 모든 토지피복유형에서 통계적으로 유의한 것으로 분석되었다. 본 연구는 물분사를 기반으로 한 증발냉각시스템의 효과를 규명하기 위해 증발냉각시스템의 내부와 외부의 미기상과 열환경 차이만을 규명하였고 향후 증발냉각시스템의 노출입자별 분사량에 따른 열환경 변화와 실제 인체가 느끼는 온열쾌적감에 대한 비교 검증이 함께 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2014R1A1A2058239).

REFERENCES

- Ann, D. M., Lee, J. W., Kim, B. R., Yoon, H. S., Son, S. W., Choi, U., Lee, N. R., Lee, J. Y., Kim, H. R., 2013, An Analysis of thermal comforts for pedestrians by WBGT measurement on the urban street greens, *J. KILA*, 41(3), 22-30.
- Baek, G. J., Jang, G. S., Song, M. J., Shin, H., Kook, C., 2009, An experimental study on the cooling effect of water mist spray system, *KIEAE Journal*, 9(1), 187-190.
- Cheung, C. S. C., Hart, M. A., 2014, Climate change and thermal comfort in Hong Kong, *Int. J. Biometeorol.*, 58(2), 137-148.
- Gao, W. Q., Lu, Z., Gao, W., Wud, B., Duf, J., Slusser, 2006, Analysis of temporal variations of surface Albedo from MODIS, 6298, 62981G-1 - 62981G-7.
- Harazono, Y., Murakami, T., Hayashi, Y., 1990, Thermal environmental characteristics of the shaded area of dense and sparse red pine canopies, *J. JILA*, 53(5), 233-238.
- Heo, B. Y., Song, J. W., 2012, Countermeasures on heat wave related disasters increasing due to climate change, *J. Kosham*, 12(6), 171-177.
- Hong, K. B., 2013, A Study on the characteristics of cooling system using water mist, *Proceedings of the Korea National University of Transportation, Korea*, 48, 27-32.
- Hoppe, P., 2002, Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort, *Energy Buildings*, 34(6), 661-665.
- Ju, M. J., Lee, C. S., Ryu, N. H., 2004, The effect of urban shade trees on the WBGT (Wet Bulb Globe Thermometer Index), *J. KILA*, 32(3), 51-59.
- Kim, H. J., Yoon, D. Y., Son, J. Y., 1999, PMV-PPD assessment of environmental control in summer, *Proceedings of J. KSLES*, 1, 39-40.
- Kim, J. H., Kwon, K. U., Yoon, Y. H., 2015, Analysis of UTCI, PMV, WBGT maximum temperature according to the characteristics of green in schools green space, *J. Korean Soc. People Plants Environ.*, 18(5), 363-370.
- Kim, J. H., Lee, M. H., Yoon, Y. H., 2015, A verification study on the temperature reduction, Effect of Water Mist Injection, *KIEAE Journal*, 14(3), 5-14.
- Lee, C. S., Huh, J. C., Choi, D. H., Lim, J. H., Hwang, K. S., 2000, An examination on cooling effects on single span plastic greenhouses by solar shade and/or mist spray, *Proceedings of the Korean Society for*

- Bio-Environment Control Conference, Korea, 9(1), 26-29.
- Lee, H. W., Kim, Y. S., 2011, Application of low pressure fogging system for commercial tomato greenhouse cooling, *Protected Hort. Plant Fac.*, 20(1), 1-7.
- Park, J. K., Jeong, W. S., Kim, E. B., Kim, S. C., 2008, Application of HI and WBGT for estimate of thermal environment, *Proceedings of the Korean Atmospheric Environment Conferences, Korea*, 586-587.
- Yamada, H., Yabu, S., Nakashima, A., Nakao, S., 2000, Estimation of the summer seasons heat stresses in several types of outdoor areas on the different ground surface structures, *J. JILA*, 63(5), 534-546.
- Yoon, G., Yamada, H., Okumiya, M., Tsujimoto, M., 2008, Validation of cooling effectiveness and CFD simulation, *J. Environ. Eng.*, 73(633), 13-20.
- Yoon, Y. H., Kim, W. T., 2004, A study on the field survey of plant species of elementary school -The case study on 10 elementary schools in Chungju city-, *J. Korean Env. Res. Tech.*, 7(6), 1-11.
- Yoon, Y. H., Park, S. H., Kim, W. T., Kim, J. H., 2014, Analyses on comparison of UTCI, PMV, WBGT between playground and green space in school, *Korean J. Environ. Ecol.*, 28(1), 80-89.