

운동장 포장재료가 인간 열환경에 미치는 영향†

현철지* · 조상만* · 박수국**

*제주대학교 생명자원과학대학 생물산업학부 원예학과 대학원 석사졸업

**제주대학교 생명자원과학대학 생물산업학부 원예환경전공 · 아열대농업생명과학연구소 · 친환경농업연구소 부교수

Influence of Playground Land Covers on the Human Thermal Sensation

Hyun, Cheolji* · Jo, Sangman* · Park, Sookuk**

*Master Graduate in Horticultural Science, College of Applied Life Sciences, Jeju National University

**Associate Professor, Horticultural Science, College of Applied Life Sciences · Research Institute for Subtropical Agriculture and Animal Biotechnology · SARI, Jeju National University

ABSTRACT

In order to investigate the effect of various pavement materials (artificial grass, natural grass, and clay sand) on the human thermal environment, the microclimate data in early autumn (air temperature, humidity, wind speed, and shortwave and longwave radiation) were measured and compared on each surface. The mean air temperature, humidity and wind speed of the pavement materials did not differ significantly and showed the greatest difference in the mean radiant temperature. Natural grass, which has the highest albedo, has the highest amount of shortwave radiation. The artificial turf had the highest surface temperature and the highest amount of longwave radiation. In the human thermal environment index PET, artificial grass > clay sand > natural grass. Natural grass had a maximum 2/3 level lower and a mean 1/2 level lower in PET as compared to artificial grass. The clay sand pavement had a maximum 2/3 level lower and a mean 1/3 level lower than the artificial grass. Natural grass had a maximum 1/3 level lower than the clay sand pavement. Their UTCIs showed smaller differences than the PETs. Therefore, it is necessary to carefully choose materials from the planning stage when designing outdoor spaces, including playgrounds.

Key Words: Human Thermal Comfort, Surface Material, Microclimate, Radiation, PET, UTCI

국문초록

다양한 운동장 포장재료(인조잔디, 천연잔디, 마사토)가 인간 열 환경에 미치는 영향을 알아보기 위해 초 가을철 미기후자료(기온, 습도, 풍속, 태양 및 지구복사에너지)를 측정하여 비교분석하여 보았다. 그 결과, 포장재료에 따른 기온, 습도, 풍속은 평균적으로 차이가 크지 않았으며, 평균복사온도에서 가장 큰 차이를 보여주었다. 태양복사에너지에서는

† : 이 논문은 2019학년도 제주대학교 교육·연구 및 학생지도비 지원에 의해서 연구되었음.

Corresponding author: Sookuk Park, Associate Professor, Horticultural Science, College of Applied Life Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Korea, Tel: +82-64-754-3326, E-mail: sooland@jejunu.ac.kr

태양복사에너지 반사율(알베도)이 가장 높았던 천연잔디에서, 지구복사에너지에서는 지표면 온도가 가장 높았던 인조잔디에서 가장 높은 복사에너지를 인체에 보내는 것으로 나타났다. 인간 열환경지수 PET에서는 인조잔디>마사토>천연잔디 순으로 나타났으며, 천연잔디포장이 인조잔디포장보다 최대 2/3 단계 평균적으로 1/2 단계 낮은 열환경을, 마사토 포장은 인조잔디포장보다 최대 2/3 단계 평균적으로 1/3 단계 낮은 열환경을 조성할 수 있는 것으로 나타났다. 천연잔디포장은 마사토 포장에 비해 최대 1/3 단계 낮은 열환경을 조성할 수 있는 것으로 나타났다. UTCI에서는 PET보다 더 작은 차이를 보이는 것으로 나타났다. 그러므로, 운동장을 포함한 옥외공간 설계 시 계획단계에서부터 재료 선정에 신중을 기하여야 할 것이다.

주제어: 인간 열쾌적성, 포장재료, 미기후, 복사에너지, PET, UTCI

1. 서론

학교 운동장은 학생들이나 운동선수만이 이용하는 것이 아닌 인근 주민들도 이용하는 하나의 여가, 문화, 체육 공간이다(National Law Information Center, 2009). 2011년도 전국 시도별 운동장 조성 현황을 살펴보면, 서울특별시는 1,311개 학교 중 인조잔디운동장 조성 학교는 14.3%, 천연잔디운동장 조성 학교는 1.4%로 나타났다(Korea Landscape Architecture Newspaper 172, 2011). 경기도도 유사하게 2,187개 학교 중 12.5%의 학교가 인조잔디였으며, 1.7%의 학교가 천연잔디였다. 대부분 전국 시도별 학교 운동장 피복현황은 인공잔디가 천연잔디에 비해 월등히 많은 편이었으나, 제주도의 경우에는 반대로 184개 학교 중 23%의 학교가 인공잔디인 반면에, 천연잔디인 학교는 58%로 나타났다. 2014년도에는 인조잔디의 유해성 물질(중금속, 발암물질 등)의 검출로 문화체육관광부에서 검출 학교 전체에 대해서 개보수 지원사업을 벌이기도 하였다(Ministry of Culture, Sports and Tourism, 2014).

운동장은 개방된 공간으로 포장재료에 따라 다양한 열환경이 조성될 수 있으므로, 포장재료가 그 공간을 이용하는 사람들이 느끼는 열환경에 미치는 영향을 비교 분석해 볼 필요가 있을 것이다. 선행연구로서 국외에서 포장재료에 따른 인간 열환경에 대한 연구결과로는 Chudnovsky *et al.*(2004)의 동일한 포장재료라도 하늘시계지수(Sky View Factor: SVF)에 따라 표면온도가 다를 수 있으며, 수목으로 피복된 경우에도 구성형태에 따라 다양한 표면온도를 나타내는 것으로 밝혀졌다. Doulos *et al.*(2004)의 연구에서는 포장재료의 색깔, 표면 거칠기, 크기, 두께에 따른 인간 열환경에 미치는 영향을 조사한 결과, 포장재료가 밝은 색이며, 부드러운 표면을 가질수록 낮은 열환경을 조성하는 것으로 나타났다. Égerházi *et al.*(2013)의 연구에서는 어린이 놀이터를 대상으로 이용자들의 열환경을 조사한 결과, 인간 열환경에 미치는 기후요소들 중에 태양 및 지구복사에너지의 영향을 가장 많이 받으며, 공간의 목적에 맞게 쾌적한 열환경에서 이용할 수 있도록 선호도가 높은 공간에 그늘을 만들어 주는 게 효율적이라는 결과를 보여주었다.

국내에서는 포장재료가 인간 열환경에 미치는 영향에 대한 연구는 거의 없는 편이다. 인간 열환경지수를 이용한 연구에는 Han *et al.*(2006)은 조경용 투수성 블록포장의 열특성을 연구하여 도시 열환경을 개선하기 위해서는 포장재료의 알베도(albedo)를 높여야 한다는 결론을 제시하였지만, 포장재료의 알베도 값을 높이면 도시공간 안에 축적되는 태양복사에너지량을 줄여 기온을 낮출 수는 있으나, 오히려 반사되는 태양 복사에너지량이 늘어남으로써 인간 열환경을 악화시킬 수 있을 것이다. Joo *et al.*(2008)의 토지피복현황이 인간 열쾌적성에 미치는 영향에 대한 연구에서는 설문조사를 통해 식재지에서 인간 열쾌적성이 가장 높은 것으로 나타났으나, 각각의 기상요소들과 열쾌적성의 비교만 이루어져 종합적인 인간 열환경지수[예: PET(Perceived Equivalent Temperature: Höppe, 1999), UTCI(Universal Thermal Climate Index: Bröde *et al.*, 2012)]를 통한 비교·분석은 이루어지지 못하였다. Lee and Ryu(2010)의 여름철 10가지의 포장재료가 옥외공간에서 온열쾌적성지수(Wet-Bulb Globe Temperature: WBGT)에 미치는 영향에 관한 연구에서는 포장재별 WBGT 비교 시 잔디 포장면이 가장 높게, 석재·콘크리트 블록·잔디를 혼합한 포장면이 가장 낮게 나타났다. 그러나 포장면 실험구(1.5×2.0m)가 높이 1.2m에 위치한 흑구온도계에 미치는 시계지수(view factor)가 작아 포장면의 영향을 크게 받지 못하였다는 점과 통풍을 차단하였다는 점이 포장재에 따른 WBGT의 명확한 차이를 나타내지 못한 원인으로 보인다. Park(2013)의 도시·조경계획 및 디자인을 위한 인간 열환경지수 적용방안에 대한 연구에서는 기후요소 중 여름철 인간 열환경지수에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 태양 직사광선으로 그늘조성이 가장 효과적인 열환경 개선방법으로 나타났으며, 포장재료의 알베도를 낮추었을 때 여름철 인간 열환경이 개선되는 것으로 나타났다. Yoon *et al.*(2014)의 연구에서는 학교의 옥외공간 중 녹지공간과 운동장을 대상으로 학생들이 느끼는 열쾌적성을 비교·분석한 결과, UTCI, PMV(Predicted Mean Vote: Fanger, 1972), WBGT 모두 운동장이 녹지공간에 비해 매우 불쾌적인 수준으로 나타났다. 그러나 수목 그늘의 영향을 포함한 녹지의 구성관

계를 고려하지 않고 단순히 녹피율과 녹지용적계수와와 상관 성만을 분석한 결과, 녹피율과 녹지용적계수가 A학교보다 낮았던 B학교가 UTCI와 PMV에서 더 낮은 결과를 보이는 현상이 나타났다. Lim *et al.*(2015)의 연구에서는 대표적인 학교운동장 포장재료인 인조잔디, 천연잔디 및 마사토가 기온 및 인간 열환경에 미치는 영향을 실측과 컴퓨터 시뮬레이션 (ENVI-met 3.1)을 이용하여 조사한 결과, 천연잔디가 인조잔디와 마사토 포장보다 기온 저감 및 열쾌적성 효과가 가장 높은 것으로 나타났다. 그러나 실측자료와의 비교는 기온에만 국한되어 인간 열쾌적성 PMV 분석 결과에 대한 신뢰성이 떨어진다고 할 수 있겠다. 이와 같이 인간 열환경에 미치는 포장재료의 영향에 대한 연구가 진행되어 오고 있지만, 실외공간에서 인간 열환경에 가장 크게 영향을 미치는 태양 및 지구복사에너지를 구체적으로 분석한 연구는 없는 실정이다.

따라서 본 연구는 학교운동장의 포장재료에 대한 미기후 자료(microclimatic data), 알베도, 표면 온도(surface temperature) 자료를 측정하여 운동장의 포장재료에 따른 인간 열환경지수를 미기후적으로 종합적인 비교 분석을 해보고자 한다.

II. 연구방법

국내 학교운동장과 공원의 포장재료로 많이 사용되고 있는 천연잔디(natural grass), 인조잔디(artificial grass), 마사토(clay sand) 포장에서 미기후자료(기온, 상대습도, 풍속, 태양 및 지구복사에너지)를 측정하여 포장재료에 따른 인간 열환경지수를 비교·분석하였다.

연구 대상지는 제주특별자치도에 위치한 학교와 어린이 공원 중 3가지 포장재료가 인접하게 위치한 지역을 선정하였으며, 천연잔디는 제주시 이도 2동에 위치한 동여자중학교(33.50°N, 126.54°E), 인조잔디는 이도 2동에 위치한 인화초등학교(33.51°N,

126.54°E)를 선정하였고, 마사토 포장은 이도 2동에 위치한 제 42호 어린이 공원(33.50°N, 126.55°E)으로 선정하였다(Figure 1 참조). 각 연구 대상지는 포장재료가 인간 열환경에 미치는 직접적인 영향을 조사하기 위한 목적으로, 주변 건물의 영향이 거의 없어 하늘시계지수(SVF)가 높은 오픈스페이스(open space)로 선정하였다(Figure 2 참조).

측정시기는 인간 열환경지수가 모든 포장재료에 very hot(매우 더움)으로 나오는 더운 여름대신 학생들이 2학기를 시작하는 초 가을철인 9월 초로 정하였으며, 포장재료별 차이가 가장 크게 발생하는 맑은 날이었던 2015년 9월 3일과 4일 동안 10:00부터 17:00까지 미기후 자료를 측정하였다(Table 1 참조). 미기후 측정 장치를 옥외공간에서 신체의 평균 가슴높이인 1.2m를 기준으로 해당 공간 중심부에 설치하여 기온, 상대습도, 풍속, 태양 및 지구복사에너지를 1분 단위로 측정하였으며, 표면 온도도 같은 높이에서 30분 단위로 측정하여 이용하였다. 연구 대상지에서 측정한 미기후 자료들 중 태양 및 지구 복사에너지를 이용하여 평균복사온도(Mean Radiant Temperature; T_{mrt})를 계산하였으며(Park, 2011), 기온, 상대습도, 풍속, T_{mrt} 를 RayMan Pro 2.2(Matzarakis *et al.*, 2010; <http://www.urbanclimate.net/rayman>)에 입력하여 전 세계적으로 옥외공간 인간 열환경 분석에 가장 많이 이용되고 있는 인간 열환경지수인 PET와 UTCI 값들을 산출하였다. 미기후 자료 및 인간 열환경지수 비교·분석은 Microsoft Office Excel 2010(<https://www.office.com>)과 IBM SPSS Statistics Version 20을 이용하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 포장재료에 따른 미기후 요소 비교

인간이 체감하는 열환경 기준인 지상 1.2m 높이의 미기후요



Figure 1. Study sites

Legend: ● Inha elementary school-artificial grass ● No. 42 Children's park-clay sand ● Dong girls' middle school-natural grass

Source: Maps from <http://map.daum.net>

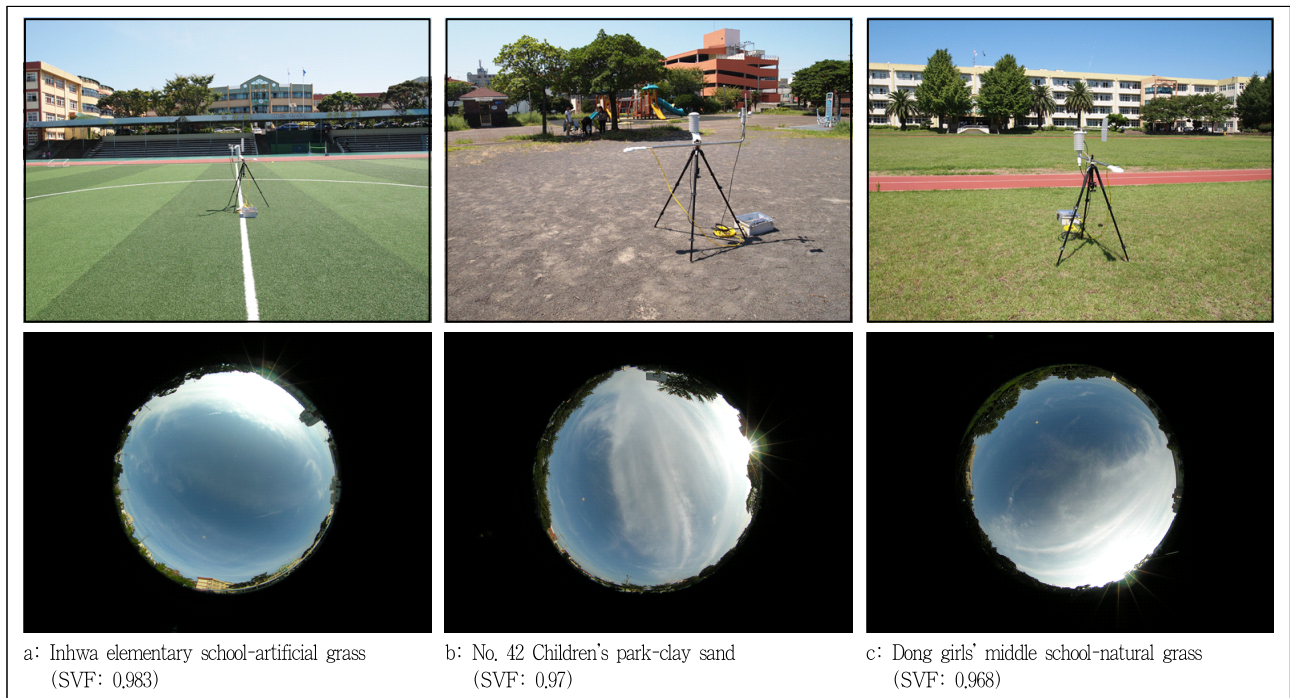


Figure 2. Photographs and fisheye lens photographs of the three study sites. Fisheye lens photographs were taken using Nikon Coolpix 8800 camera with Nikon FC-E9 Fisheye converter lens and Nikon UR-E18 converter adapter, and sky view factors (SVF) of the photographs were calculated with BMSky-view (Gál *et al.*, 2007)

Table 1. Instruments for microclimatic data

Instrument			
Data	Name	Accuracy	Manufacture
Radiation	CNR4 Net Radiometer	$\leq 1\%$ ($-40\sim 80^{\circ}\text{C}$)	Kipp & Zonen Inc
Air temp. and relative humidity	HMP155A	· Air temp.: $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ($-80\sim 60^{\circ}\text{C}$) · Relative humidity: 2% ($0\sim 90\%$) 3% ($90\sim 100\%$)	Campbell Scientific Inc
Wind speed and direction	Met one 034B-L Windset	· Wind speed: $\pm 0.1\text{ ms}^{-1}$ ($\leq 10.1\text{ ms}^{-1}$) $\pm 1.1\%$ ($\geq 10.1\text{ ms}^{-1}$) · Wind direction: $\pm 4^{\circ}$	
Datalogger	CR1000	$\pm 0.06\%$ ($0\sim 40^{\circ}\text{C}$)	
Surface temperature	Fluke-62 Max+	$\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ or $\pm 1.0\%$ ($0\sim 650^{\circ}\text{C}$) $\pm 2.0\%$ ($-10\sim 0^{\circ}\text{C}$) $\pm 3.0\%$ ($-30\sim -10^{\circ}\text{C}$)	Fluke Co.

소 비교결과, 9월 3일 포장재료에 따른 평균기온을 보면 인조잔디, 마사토, 천연잔디 순으로 각각 27.7°C , 27.3°C , 27.1°C 로 나타나, 그 차이는 최대 0.6°C 로 크지는 않았다(Figure 3 참조). 포장재 별로 기온의 최고 온도는 인조잔디가 14:30에 28.4°C , 마사토는 14:00에 28.0°C , 천연잔디는 14:30에 27.9°C 로 가장 높게 나타났다. 평균상대습도는 기온과 반대로 기온이 높은 인조잔디가 63.3%로 가장 낮았으며, 마사토 65.5%, 천연잔디 66.4% 순으로 기온이 가장 낮은 천연잔디가 인조잔디보다 3.1% 높게 나타났으나, 평균절대습도(mean absolute humidity)로 분석해 본 결과, 인조잔디 16.9gm^{-3} , 마사토 17.1gm^{-3} , 천연잔디

17.2gm^{-3} 로 나타나 차이는 거의 없었다. 평균풍속은 인조잔디와 마사토가 2.3ms^{-1} 로 동일하게 나타났으며, 천연잔디가 2.8ms^{-1} 로 나타났다. 표면의 거칠기 정도로 보면 천연잔디가 마사토와 인조잔디에 비해 더 거칠어 풍속이 더 낮을 것으로 예상되었지만 주변환경의 영향으로 상반되는 결과가 나왔다.

9월 4일 평균기온을 비교해 보면 인조잔디와 마사토가 26.7°C 로 동일한 결과를 보였으며, 천연잔디가 26.4°C 로 가장 낮은 값을 보였다. 그러나 그 차이는 3일의 0.6°C 보다 작은 0.3°C 로 아주 미미한 결과를 보여주어, 이 연구결과에서는 기온이 높아질수록 포장재가 인간 열환경에 미치는 영향은 커지는 경

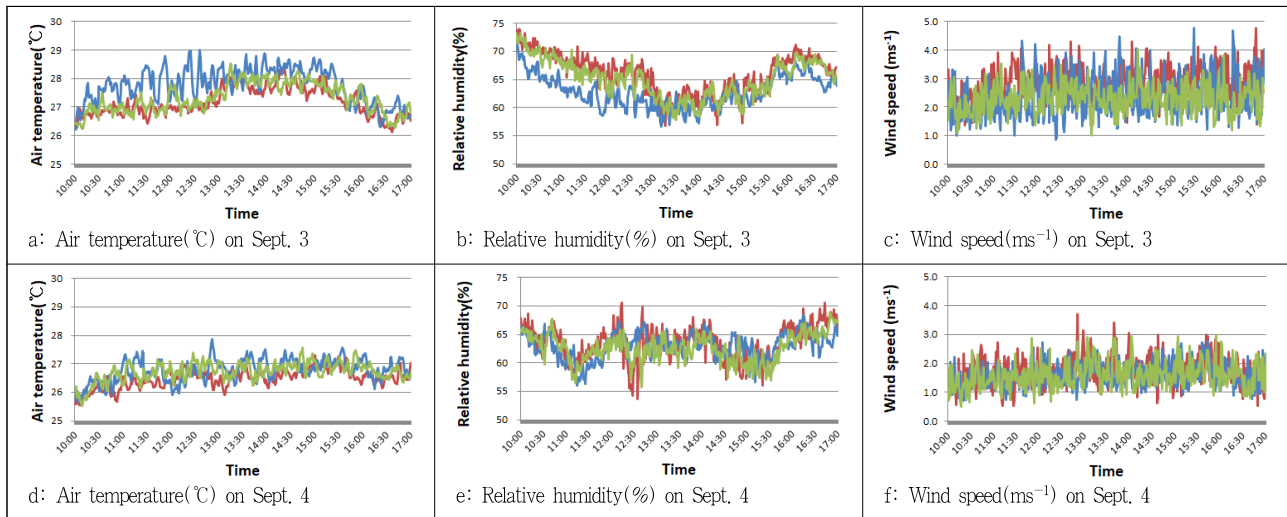


Figure 3. The measured microclimatic data

Legend: — Natural grass — Artificial grass — Clay sand

향을 보이지만, 실제 영향은 미미한 것으로 나타났다. 포장재별 최고기온은 인조잔디가 14:00에 27.1°C, 마사토가 15:00에 27.1°C, 천연잔디가 15:30에 27.0°C로 가장 높게 나타나, 마사토와 천연잔디는 3일과 동일한 경향을 보였으나, 인조잔디는 평균기온이 높았던 3일과 반대로 제일 빠르게 최고기온을 나타냈다. 평균상대습도는 마사토가 62.9%로 가장 낮게 나타났으며, 인조잔디가 63.2%, 천연잔디가 63.7%순으로 높게 나타났으나, 평균절대습도에서는 마사토와 천연잔디가 15.9gm⁻³로 동일하게 나타났고, 인조잔디가 16.0gm⁻³으로 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 이것은 인위적인 관수가 없을 때에는 포장재에 의한 습도의 차이는 거의 없다는 것을 보여주었다. 평균풍속은 인조잔디와 마사토가 1.6ms⁻¹, 천연잔디가 1.7ms⁻¹로 3일에 비해 매우 작은 차이를 보였으며, 3일과 동일하게 천연잔디에서 더 높은 풍속이 나타나 주변환경의 영향에 의한 요인임을 알 수 있었다.

2. 포장재료에 따른 태양 및 지구복사에너지

지표면 온도 비교 시 9월 3일에는 인조잔디가 평균온도 48.1°C로 가장 높게 나타났으며, 마사토 45.0°C, 천연잔디 36.0°C순으로 낮게 나타났었다(Figure 4 참조). 인조잔디와 마사토는 12:30에 각각 55.1°C, 51.4°C로 최고 온도를 나타냈으며, 천연잔디는 13:30에 42.0°C까지 올라갔다. 4일에도 인조잔디가 평균 온도 53.9°C로 가장 높게 나타났는데, 이것은 천연잔디(42.0°C)보다 11.9°C 높았으며, 마사토(49.3°C)보다도 4.6°C 높은 결과를 보여주었다. 인조잔디의 최고온도는 13:30에 61.4°C, 마사토는 13:00에 54.4°C 가장 높았고, 천연잔디는 12:00에 50.4°C로 나타났다. 마사토는 17:00로 갈수록 인조잔디와 비슷한 결과를 보여준 반면, 천연잔디는 빠르게 온도가 떨어지는 경향을 보

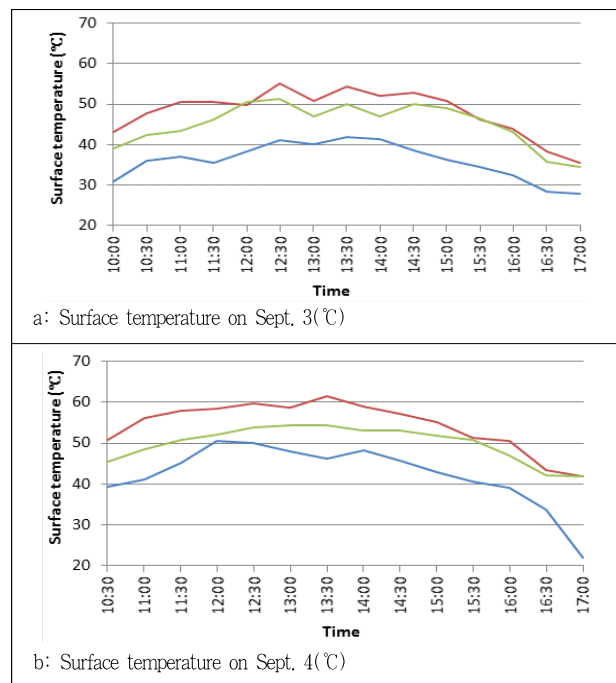


Figure 4. The measured surface temperature

Legend: — Natural grass — Artificial grass — Clay sand

여주었다. 4일이 3일에 비해 하늘반구(sky hemisphere)에서 내려오는 태양복사에너지량이 포장재료에 따라 51~64Wm⁻² 많아 지표면 온도가 높게 나타났으며(Figure 5-a, 5-b 참조), 그 결과 지표면에서 방출되는 지구복사에너지량도 4일이 3일에 비해 19~22Wm⁻² 많은 것으로 나타났다(Figure 5-g, 5-h 참조).

평균 복사에너지량을 비교해 보면, 9월 3일 하늘반구에서 내려오는 태양복사에너지(S_{up})는 인조잔디가 682Wm⁻²로

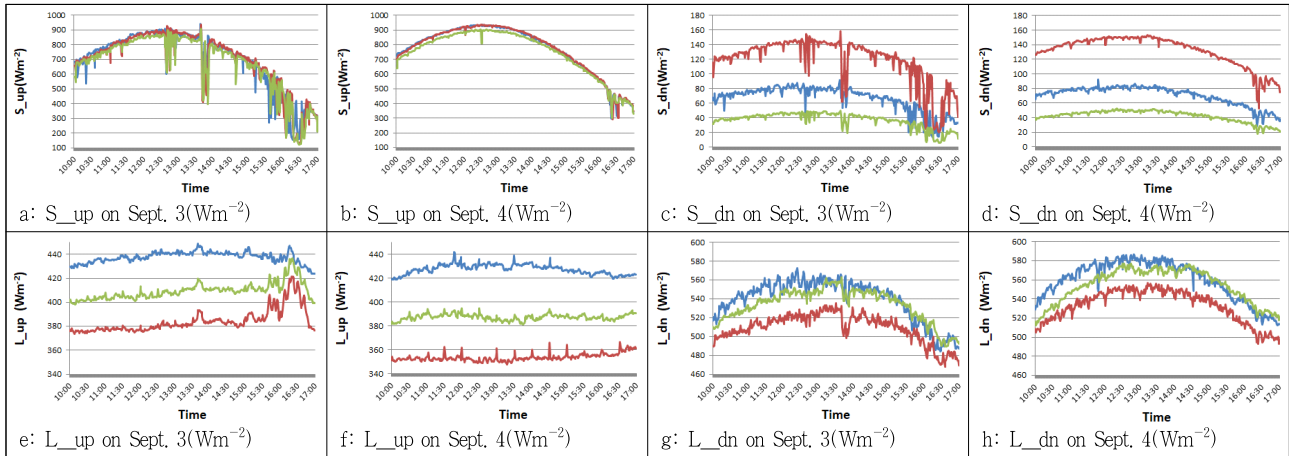


Figure 5. The measured solar(shortwave) radiation and terrestrial(longwave) radiation. S and L mean shortwave and longwave radiation, respectively, and up and dn mean from sky hemisphere and from ground hemisphere, respectively

Legend: — Natural grass — Artificial grass — Clay sand

가장 높게 나타났으며, 천연잔디 672Wm^{-2} , 마사토 654Wm^{-2} 순으로 나타났다(Figure 5 참조). 지표면반구(ground hemisphere)에서 반사되는 태양복사에너지(S_{dn})는 천연잔디 118Wm^{-2} , 인조잔디 66Wm^{-2} , 마사토 36Wm^{-2} 순으로 마사토가 가장 낮게 나타났다. 태양복사에너지 반사율인 알베도(albedo)는 천연잔디가 가장 높은 0.19(19%)를 나타냈으며, 인조잔디 0.1(10%), 마사토 0.06(6%) 순으로 낮은 결과를 보였다(Figure 6 참조). 하늘반구에서 방출되는 지구복사에너지(L_{up})는 인조잔디가 가장 높은 437Wm^{-2} , 마사토 409Wm^{-2} , 천연잔디 384Wm^{-2} 로 가장 낮은 결과를 보여주었고, 지표면반구에서 방출되는 지구복사에너지(L_{dn})도 인조잔디 538Wm^{-2} , 마사토 532Wm^{-2} , 천연잔디 508Wm^{-2} 순으로 L_{up} 과 동일한 결과를 나타냈다.

9월 4일 S_{up} 은 천연잔디와 인조잔디가 734Wm^{-2} , 733Wm^{-2} 로 가장 높았으며, 마사토가 719Wm^{-2} 으로 조금 낮게 나타났다. 이 결과는 3일과는 조금 다르게 나타났는데, 이론적으로는 하늘시계지수(SVF)가 가장 높은 인조잔디에서 가장 높은 값을 나타내어야 하지만(Figure 2 참조), 주변건물과 수목의 위치에 따라 달라질 수 있는 태양복사에너지 반사량(reflected solar radiation)과, 가까운 지점이라고 하더라도 구름의 위치와 형태 등 대기상태에 따른 영향에 의해 S_{up} 의 양이 달라질 수 있을 것이다. S_{dn} 은 천연잔디가 130Wm^{-2} 으로 가장 높게 나타났으며, 인조잔디 69Wm^{-2} , 마사토 42Wm^{-2} 순으로 낮게 나타났다. 그에 따른 알베도도 3일 결과와 유사하게 천연잔디 0.22(22%), 인조잔디 0.11(11%), 마사토 0.07(7%) 순으로 나타났다. L_{up} 도 인조잔디 427Wm^{-2} , 마사토 387Wm^{-2} , 천연잔디 354Wm^{-2} 로 3일과 동일한 순서를 나타냈으며, L_{dn} 에서도 인조잔디 557Wm^{-2} , 마사토 551Wm^{-2} , 천연잔디 530Wm^{-2} 순으로 3일과 동일하게 나타났다. L_{up}

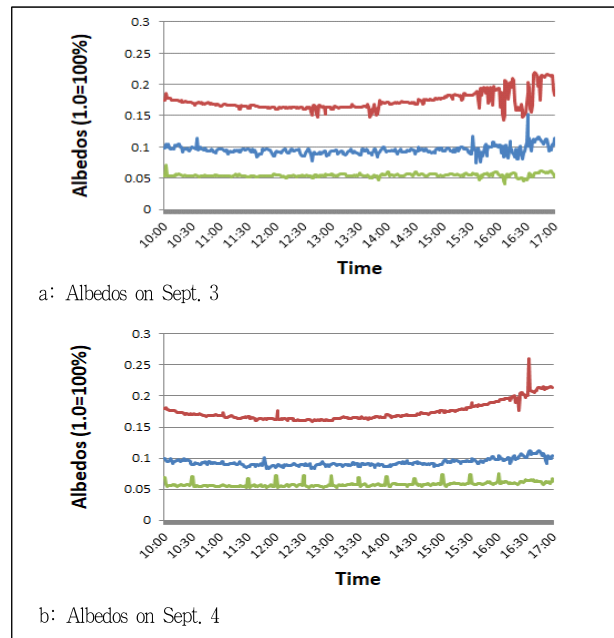


Figure 6. The measured albedos(1.0=100%)

Legend: — Natural grass — Artificial grass — Clay sand

은 기온의 영향이 큰 것으로 보이며, L_{dn} 은 지표면 온도가 주요인이라고 할 수 있겠다.

즉, 총 태양복사에너지량은 알베도가 가장 높았던 천연잔디 운동장이 가장 높게 나왔으나, 지구복사에너지량 부분에서 지표면 온도가 마사토와 천연잔디보다 인조잔디 운동장에서 가장 높게 나와(Figure 4 참조), 총 태양 및 지구복사에너지량을 비교해 볼 때 인조잔디>천연잔디>마사토 순으로 높은 결과를 보였다. 그러므로 학교 운동장 포장재료가 주는 열환경적 영향은 태양복사에너지 반사율인 알베도보다 지구복사에너지가 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. T_{mrt} 는 조경공간에서

인간 열환경지수를 산출하기 위해 고려해야 하는 가장 중요한 요소들 중 하나이다. 9월 3일과 4일의 T_{mrt} 결과는 인조잔디가 58.1°C, 57.7°C로 가장 높은 값을 보였으며, 다음으로 천연잔디가 53.6°C, 53.8°C로, 마사토가 53.3°C, 53.1°C로 가장 낮은 값을 보였다(Figure 7 참조). 그러나 S_{up} 에서 인조잔디에 비해 천연잔디와 마사토가 9월 3일 각각 $10Wm^{-2}$ ($\approx 0.4^\circ C T_{mrt}$), $28Wm^{-2}$ ($\approx 1.2^\circ C T_{mrt}$), 9월 4일에 각각 $1Wm^{-2}$, $15Wm^{-2}$ ($\approx 0.7^\circ C T_{mrt}$) 적은 값을 보였으므로 위 결과를 이용하여 T_{mrt} 를 보정한다면 천연잔디는 54.0°C, 53.8°C로, 마사토는 54.5°C, 53.8°C로 나와, 인조잔디>마사토>천연잔디의 순으로 높은 T_{mrt} 를 보이는 것으로 나타났다. T_{mrt} 보정에 S_{dn} 의 재료별 차이는 알베도를 감안하였을 때, 천연잔디와 마사토가 각각 $1.9Wm^{-2}$ 와 $1.7Wm^{-2}$ 의 차이밖에 보이지 않으므로 계산에 포함시키지 않았으며, L_{up} 과 L_{dn} 은 각각 주로 기온과 지표면 온도의 영향을 받는 결과로서 천연잔디와 마사토의 S_{up}

차이에 의해 영향은 있을 것이나, 정확한 수치로 계산할 수 없어 보정에는 포함시키지 않았으며, 인조잔디와의 차이를 조금 줄여줄 것으로 생각된다.

3. 포장재료에 따른 인간 열환경지수 비교

PET 산출결과, 9월 3일 인조잔디는 30.7~38.8°C로 warm(따뜻함)에서 hot(더움)정도의 범위에 속하는 것으로 나타났으며, 마사토는 30.1~36.4°C로 인조잔디보다는 조금 낮은 값을 나타내었으며, 동일하게 warm에서 hot까지의 범위에 속하였다(Table 2, Figure 8 참조). 천연잔디는 가장 낮은 28.9~35.2°C로 slightly warm(약간 따뜻함)에서 hot정도의 범위를 나타내었다. 4일 인조잔디 35.6~38.2°C, 마사토 34.5~36.3°C, 천연잔디 33.2~36.2°C로 나타나 모두 warm에서 hot정도의 범위에 속하는 열환경을 보여주었으며, 3일에 비해 평균적으로 조금 더 더운 열환경을 보였고, 시간대별 범위도 좁게 나타났다.

UTCI 결과는 3일 인조잔디는 31.1~36.2°C로 moderate heat stress(적당한 열스트레스)에서 strong heat stress(강한 열스트레스) 정도의 범위까지 나타났으며, 마사토와 천연잔디는 30.8~34.8°C, 29.8~34.0°C로 인조잔디에 비해 조금 낮은 결과를 보였으나, 동일한 열환경 스트레스 범위에 속하는 것으로 나타났다.

Table 2. The levels of physiological equivalent temperature(PET) and universal thermal climate index(UTCI) (Jo, 2017)

Thermal perception	PET (°C)	UTCI (°C)	Grade of physiological stress
Very cold	<4	<-40	Extreme cold stress
		-27~-40	Very strong cold stress
Cold	4~8	-13~-27	Strong cold stress
Cool	8~13	0~-13	Moderate cold stress
Slightly cool	13~18	9~0	Slight cold stress
Neutral	18~23	9~26	No thermal stress
Slightly warm	23~29		Slight heat stress
Warm	29~35	26~32	Moderate heat stress
Hot	35~41	32~38	Strong heat stress
Very hot	>41	38~46	Very strong heat stress
		>46	Extreme heat stress

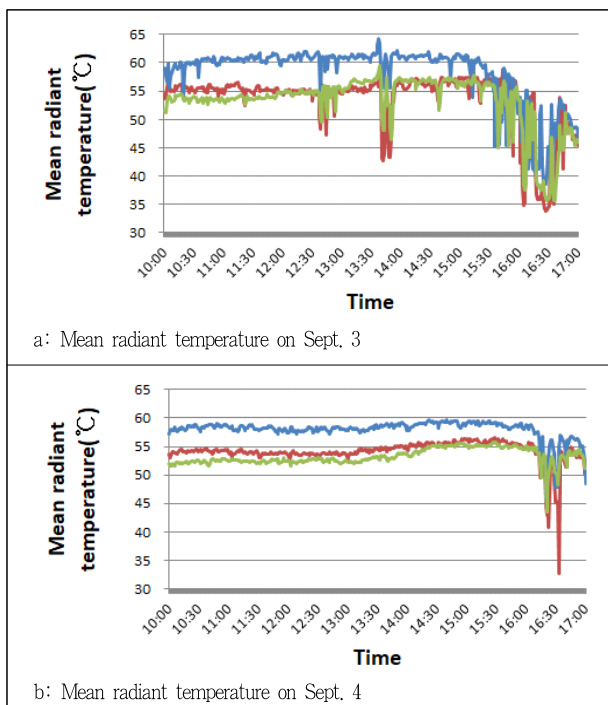


Figure 7. Mean radiant temperature results

Legend: — Natural grass — Artificial grass — Clay sand

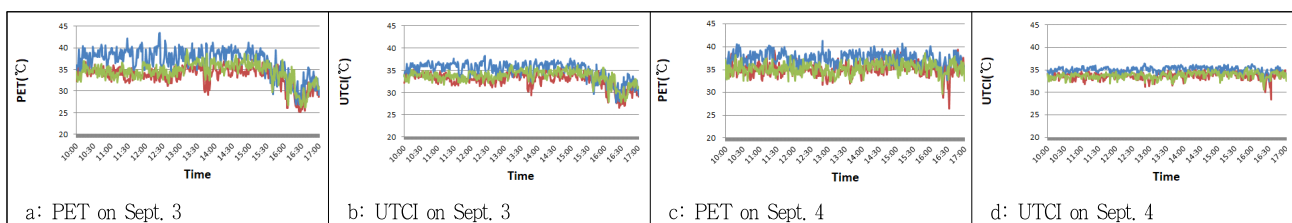


Figure 8. PET and UTCI results

Legend: — Natural grass — Artificial grass — Clay sand

4일 인조잔디는 33.8~35.6℃로 strong heat stress 범위의 결과로 가장 높은 열환경을 보였으며, 마사토와 천연잔디는 33.3~34.4℃, 32.7~34.3℃로 인조잔디보다 조금 더 나은 열환경을 보였다.

인간 열환경지수인 PET와 UTCI 값들을 비교해 보았을 때, PET분석에서는 천연잔디가 인조잔디에 비해 3일에는 최대 4.8℃(평균 3.3℃), 4일에는 최대 3.3℃(평균 2.3℃) 낮은 결과를 보였고, 마사토가 인조잔디에 비해 3일에는 최대 4.5℃(평균 2.4℃), 4일에는 최대 3.4℃(평균 2.0℃) 정도 낮은 결과를 보였다(Table 3, Figure 8 참조). 천연잔디를 마사토에 비교해 보았을 때 3일에는 최대 2.1℃(평균 0.9℃), 4일에는 최대 2.1℃(평균 0.3℃) 정도 낮은 결과를 보였다. 특히, 기온이 조금 더 높았던 3일이 4일에 비해 각 포장재료들의 차이가 더 크게 나타났으며, T_{mrt} 에서 마사토보다 0.3~0.7℃ 높게 나왔던 천연잔디는 마사토보다 0.2~0.3℃ 낮게 나온 기온과 0.1~0.5ms⁻¹ 높게 나온 풍속의 영향으로 PET에서는 더 낮은 결과를 보여주었다. UTCI 분석에서는 PET에 비해 작은 차이값들을 보였는데, 천연잔디가 인조잔디에 비하여 3일 최대 2.9℃(평균 2.0℃) 4일 2.2℃(평균 1.3℃) 낮게 측정되었고, 인조잔디와 마사토를 비교하였을 때 3일 최대 2.6℃(평균 1.3℃), 4일 최대 2.0℃(평균 1.2℃) 낮게, 천연잔디와 마사토를 비교하였을 때 3일 최대 1.6℃(평균 0.7℃), 4일 최대 1.1℃(평균 0.1℃) 낮게 측정되었다.

S_{up}과 풍속에 의한 인조잔디와 천연잔디의 차이를 보정한

다면 평균 0.2℃ T_{mrt} 와 0.3ms⁻¹의 풍속 차이(Table 4 참조)는 각각 0.07℃ PET와 0.06℃ UTCI, 0.39℃ PET와 0.33℃ UTCI의 차이를 만듦으로(Jo, 2017), 9월 3일과 4일의 실제 PET와 UTCI의 평균 차이는 2.9℃ PET와 1.7℃ UTCI에서 0.5℃ PET와 0.4℃ UTCI 만큼 줄어든, 2.4℃ PET와 1.3℃ UTCI로 나타났다. 인조잔디에 대한 마사토의 S_{up}을 보정한다면 평균 1.0℃ T_{mrt} 의 차이가 0.4℃ PET와 0.3℃ UTCI의 차이를 생성하므로, 위에서 보인 결과보다 차이가 줄어 인조잔디에 비해 2.0℃ PET와 1.0℃ UTCI의 차이를 보이는 것으로 나타났다.

이 결과들은 운동장 피복재료로서 천연잔디가 인조잔디에 비해 최대 2/3단계, 평균적으로 1/2단계 낮은 단계의 쾌적한 열환경을 조성한다는 것을 보여주며, 마사토 또한 인조잔디에 비해서 최대 2/3 단계 평균적으로 1/3단계 낮은 열환경을 조성하는 것으로 나타났다. 천연잔디와 마사토를 비교하였을 때는 천연잔디가 최대 1/3 단계 낮은 열환경을 조성할 수 있는 것으로 나타났다. 이 차이들은 인조잔디에 비해 천연잔디는 최대 1/2 단계, 평균 1/4 단계 이하의 열스트레스 저감 효과를 나타내며, 마사토는 최대 1/3 단계, 평균 1/6 단계의 개선효과를 보이는 것으로 나타났다.

4. 인간 열환경지수에 미치는 미기후 요소들의 영향

포장재료별 이들간의 자료를 이용하여 SPSS의 One-way

Table 3. The maximum and mean values of PET and UTCI differences between the ground surface materials

	PET (Sept. 3)				UTCI (Sept. 3)			
	℃		%		℃		%	
	Max	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max	Mean
Artificial grass-natural grass	4.8	3.3	12.3	8.7	2.9	2.0	8.0	5.7
Artificial grass-clay sand	4.5	2.4	11.6	6.3	2.6	1.3	7.2	3.7
Clay sand-natural grass	2.1	0.9	6.0	2.6	1.6	0.7	5.0	2.0
	PET (Sept. 4)				UTCI (Sept. 4)			
	℃		%		℃		%	
	Max	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max	Mean
Artificial grass-natural grass	3.3	2.3	8.7	6.2	2.2	1.3	6.3	3.7
Artificial grass-clay sand	3.4	2.0	8.9	5.4	2.0	1.2	5.6	3.4
Clay sand-natural grass	2.1	0.3	6.0	0.8	1.1	0.1	3.3	0.3

Table 4. The results of One-way ANOVA analysis of microclimatic results and human thermal sensations(PET and UTCI) on September 3 and 4(all 842 data). T_a, RH, μ , T_{mrt} mean air temperature, relative humidity, wind speed and mean radiant temperature

	Mean±standard deviation					
	T _a (℃)	RH(%)	μ (ms ⁻¹)	T_{mrt} (℃)	PET(℃)	UTCI(℃)
Natural grass	26.8±0.54 ^a	64.7±3.5 ^c	2.3±0.78 ^b	53.9±3.86 ^b	34.3±2.14 ^a	33.3±1.41 ^a
Artificial grass	27.3±0.71 ^c	62.9±2.6 ^a	2.0±0.72 ^a	58.1±3.93 ^c	37.2±2.41 ^c	35.0±1.47 ^c
Clay sand	27.0±0.52 ^b	63.8±3.2 ^b	1.9±0.60 ^a	53.2±3.47 ^a	34.8±1.93 ^b	33.7±1.16 ^b

^a Duncan analysis used harmonic mean sample size=842($p<0.05$)

ANOVA 분석을 실시한 결과, 풍속에서 인조잔디와 마사토 포장만 유의성이 없는 것으로 나타났고, 기온, 상대습도, T_{mrt} , PET와 UTCI에서 95%의 유의성 범위에서 3가지 포장재료별 유의성이 있는 것으로 나타났다(Table 4 참조).

Jo(2017)의 여름철 PET와 UTCI에 미치는 미기후 요소들의 민감도 분석에서 기온 1℃는 0.42℃ PET나 0.98℃ UTCI를 변화시킬 수 있으며, 상대습도 1%는 0.05℃ PET나 0.25℃(상대습도 20~100%일 때) UTCI, 풍속 0.1ms^{-1} 는 0.21℃[0.44℃(풍속 1.0ms^{-1} 이하일 때) - 0.13℃(풍속 1.0ms^{-1} 보다 높을 때)] PET나 0.11℃ UTCI, T_{mrt} 1℃는 0.36℃ PET나 0.3℃ UTCI의 변화를 만들 수 있다고 하였다. PET와 UTCI에서 가장 큰 차이를 보였던 천연잔디와 인조잔디의 미기후 요소들의 차이를 비교해 보면(Table 4 참조), 평균기온이 0.5℃ 높게 나온 인조잔디는 0.21℃ PET나 0.49℃ UTCI 만큼 높은 인간 열환경을 조성하였으며, 평균상대습도가 1.8% 더 낮게 나온 인조잔디는 0.09℃ PET나 0.45℃ UTCI 저감효과를 보였으며, 평균풍속이 0.3ms^{-1} 높게 나온 천연잔디는 0.39℃ PET(이 연구에서는 평균풍속이 1.0ms^{-1} 이상이었어서 $0.13^\circ\text{C}/0.1\text{ms}^{-1}$ 적용)나 0.33℃ UTCI 저감효과를 보였으며, T_{mrt} 가 4.2℃ 낮게 나온 천연잔디는 1.51℃ PET나 1.26℃ UTCI 저감효과를 보이는 것으로 나타났다. 그러므로 인조잔디에 비해 천연잔디가 열환경적으로 더 쾌적한 환경을 만든 미기후 요소는 태양 및 지구복사에너지에 의해 조성되는 T_{mrt} 의 영향이 가장 크게 작용한다는 것을 알 수 있다.

IV. 결론

운동장 포장재료가 인간 열 환경에 미치는 영향을 알아보기 위해 국내에서 가장 많이 이용되고 있는 포장재료인 인조잔디, 천연잔디, 마사토를 제주특별자치도에 있는 학교와 어린이공원을 대상으로 3곳을 선정하여 초 가을철(9월 3~4일) 동안 미기후 자료를 수집하여 비교·분석해 보았다.

인조잔디가 천연잔디에 비해 평균기온이 0.3~0.6℃ 높게, 마사토에 비해 0~0.4℃ 높게 나왔지만 그 차이는 크지 않았으며, 습도도 포장재료에 따른 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 풍속은 표면저절기가 가장 높은 천연잔디에서 풍속이 더 높게 나와서, 주변환경의 영향이 크게 영향을 미친 것으로 판단된다. 복사에너지 중 태양복사에너지에서는 지표면의 알베도가 가장 높았던 천연잔디가 가장 많은 태양복사에너지를 인체에 보내는 것으로 나타났으며, 지구복사에너지에서는 지표면 온도가 가장 높았던 인조잔디에서 가장 많은 지구복사에너지를 인체에 보내는 것으로 나타났다. T_{mrt} 는 인조잔디가 마사토에 비해 3.6~3.9℃, 천연잔디에 비해 3.9~4.1℃ 높은 결과를 보였다. 그리고 인간 열환경지수 PET에서 천연잔디포장이 인조잔디포

장보다 최대 3.3~4.8℃(평균 2.3~3.3℃) 낮은 결과를 보여, 최대 2/3 단계 평균적으로 1/2 단계 낮은 열환경을 조성할 수 있는 것으로 나타났다. 마사토 포장은 인조잔디포장보다 최대 3.4~4.5℃(평균 2.0~2.4℃) 낮은 결과를 보여, 최대 2/3 단계 평균적으로 1/3 단계 낮은 열환경을 조성할 수 있는 것으로 나타났다. 천연잔디포장과 마사토포장을 비교하였을 때는 최대 2.1℃(평균 0.3~0.9℃)로, 천연잔디포장이 최대 1/3 단계 낮은 열환경을 조성할 수 있을 것이다. UTCI에서는 PET보다 더 작은 차이를 보이는 것으로 나타났다.

그러므로 운동장에서의 인간 열환경은 포장재료에 따라 영향을 받으며, 미기후 요소 중 태양 및 지구복사에너지에 의해 조성되는 T_{mrt} 의 영향이 가장 크다고 할 수 있겠다. 향후, 운동장을 포함한 옥외공간에서의 조경계획 및 디자인 시 포장재료가 열환경에 지대한 영향을 끼칠 수 있으므로, 계획단계에서부터 재료 선정에 신중을 기하여야 할 것이다.

본 연구는 4계절 중 초 가을철 미기후 자료만을 측정하여 비교하였기 때문에 포장재료에 따른 인간이 받는 열스트레스의 차이가 생각보다는 크지 않았다. 열환경이 더 높은 한 여름철에도 자료를 추가로 측정하여 비교한다면 더운 기간 동안의 운동장 포장재료별 이용계획을 세우는데 좋은 자료가 될 것이다.

이 연구결과는 계절적·지역적·환경적 한계성을 가지고 있다고 하겠다. 계절에 따라, 제주시가 아닌 타 시·도에서는 포장재료별 비교결과와 차이가 달라질 수 있을 것이다. 환경적으로는 특히 천연잔디 같은 경우에는 강우나 관수에 의한 잠열(latent heat flux density)의 영향으로 더 큰 차이가 발생할 수 있을 것이다. 이 연구의 방법을 이용하여 전국의 다양한 지역에서 계절별 자료를 측정한다면 조경계획 시 포장재료 선정에 위한 더욱 객관적이고 충분한 자료 구축이 가능할 것이다.

References

- Bröde, P., D. Fiala, K. Blazejczyk, I. Holmér, G. Jendritzky, B. Kampmann, B. Tinz and G. Havenith(2012) Deriving the operational procedure for the universal thermal climate index (UTCI), International Journal of Biometeorology 56: 481-494.
- Chudnovsky, A., E. Ben-Dor and H. Saaroni(2004) Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements, Energy and Building 36: 1063-1074.
- Doulos, L., M. Santamouris and I. Livada(2004) Passive cooling of outdoor urban spaces, The role of materials, Solar Energy 77(2): 231-249.
- Égerházi, L. A., A. Kovács and J. Unger(2013) Application of microclimate modelling and onsite survey in planning practice related to an urban micro-environment, Advances in Meteorology 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/251586>.
- Fanger, P. O.(1972) Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering, McGraw-Hill, New York.
- Gál, T., M. Rzepa, B. Gromek and J. Unger(2007) Comparison between sky view factor values computed by two different methods in an

- urban environment, *ACTA Climatologica et Chronologica, Universitatis Szegediensis, Tomus* 40-41: 17-26.
7. Han, S., N. Ryu and J. Kang(2006) Thermal environment characteristics of permeable block pavements for landscape construction, *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 34(2): 18-25.
 8. Höppe, P.(1999) The physiological equivalent temperature-a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment, *International Journal of Biometeorology* 43: 71-75.
 9. Jo, S.(2017) Analysis of the Influence of Street Trees and Single Trees on Human Thermal Sensation in Summer, Master Thesis, Jeju National University.
 10. Joo, C., Y. Yoon, B. Park and T. Kim(2008) The influence of land cover types on thermal comfort in urban openspace, *Journal of Korean Society for People, Plants and Environment* 11(3): 59-65.
 11. Korea Landscape Architecture Newspaper(2011) <http://www.latimes.kr/news/articleView.html?idxno=10956>
 12. Lee, C. and N. Ryu(2010) The influence of landscape pavements on the WBGT of outdoor spaces without ventilation or shade at summer midday, *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 38(2): 1-8.
 13. Lim, J., H. Yu, J. Lee and K. Lee(2015) Comparison of thermal effects of different school ground surface materials, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 18(2): 28-44.
 14. Matzarakis, A., F. Rutz and H. Mayer(2010) Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the RayMan model, *International Journal of Biometeorology* 54(2): 131-139.
 15. Ministry of Culture, Sports and Tourism(2014) https://www.mcst.go.kr/web/s_notice/press/pressView.jsp?pSeq=13977
 16. National Law Information Center(2009) <http://yeslaw.com/lims/front/page/fulltext.html?pAct=view&pPromulgationNo=180006>
 17. Park, S.(2011) Human-Urban Radiation Exchange Simulation Model, Ph.D. Dissertation, University of Victoria, Victoria, B.C., Canada.
 18. Park, S.(2013) A way for creating human bioclimatic maps using human thermal sensation (comfort) and applying the maps to urban and landscape planning and design, *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 41(1): 21-33.
 19. Yoon, Y., S. Park, W. Kim and H. Kim(2014) Analyses on comparison of UTCI, PMV, WBGT between playground and green space in school, *Korean Journal of Environment and Ecology* 28(1): 80-89.

Received : 16 April, 2019

Revised : 09 May, 2019

Accepted : 09 May, 2019

3인익명 심사필