

2002년 월드컵 주경기장 천연잔디면 자연광량 예측

Predicting the Quantity of Natural Light on the Turf Grass Field of the 2002 Worldcup Main Stadium

○ 송 동 철* 송 규 동**

Song, Dong-Cheol Song, Kyoo-Dong

Abstract

It is a rigid requirement by the FIFA(Federation Internationale de Football Association) to have natural turf grass field to hold the worldcup football game. In addition, worldcup stadia are required to have roof structures to cover the VIP, the press and the spectator areas. These two FIFA's requirements conflict each other in terms of natural lighting on the turf grass field, because the turf grass need large quantity of natural light for photosynthesis, while the roof structures reduce the quantity of incoming natural light.

Therefore, it is very important to evaluate the quantity of natural light on the turf grass field in the early stages of the design process. This is because the roof structures need to be modified or redesigned, in terms of shape and the roof material, if the quantity of natural light has not been proven to be enough for the growth of the turf grass.

The purpose of this study was to predict the quantity of natural light(illuminance and quantum) on the turf grass field of the 2002 worldcup main stadium in Seoul. In this study, a computer simulation program which was based on the Monte Carlo method and ray-tracing technique was used.

키워드: 월드컵축구장, 천연잔디, 자연광량, 몬테카를로 방법, 광선추적 기법

Keywords: Worldcup Football Stadium, Turf Grass, Natural Light, Monte Carlo Method, Ray-tracing Technique

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

서울특별시 상암동에 신축될 예정인 월드컵 경기장은 막구조(Membrane structure)의 지붕을 갖는 경기장으로서 우천시 관중석이 강우에 노출되는 것을 막아주고 여름철 과도한 직달일사를 막아주는 효과가 있을 것이다.

그러나 경기장 구조체와 막구조 지붕은 잔디면의 일부에 그림자를 드리워 잔디의 생육에 필요한 충분한 빛을 제공하지 못하여 잔디면이 고

르게 자라지 못하는 문제를 발생시킬 수도 있다. 따라서 본 연구는 상암동에 건설중인 월드컵경기장을 대상으로 잔디면의 자연광 확보량을 예측하여 잔디의 생육에 충분한 양의 빛과 일조시간이 확보되는지의 여부를 판단하여 잔디설계에 반영할 수 있는 자료를 제시하고자 수행되었다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 서울 월드컵경기장 도면, 최근 20

* 정희원, 한양대학교 대학원 석사과정

** 정희원, 한양대학교 건축공학과 교수, 건축학 박사

본 연구는 (주)이공건축, (주)정림건축, (주)원양건축의 연구비 지원에 의해 수행되었음

년간 서울지역 기상자료, 막구조 멤브레인 샘플 등의 자료를 수집한 후, AutoCAD의 3차원 CAD기법을 이용하여 구조물의 수평 및 수직적 위치등을 정확하게 모델링하였다. 그리고 기존의 연구(유기형 1997)에 의해 정확성이 입증된 컴퓨터 모델을 이용하여 자연광량을 예측하였다. 이 컴퓨터 모델은 난수를 발생하여 확률적 방법으로 수학적 문제를 해결하는 몬테카를로 방법(김재삼 1997)과, 광자의 움직임에 따른 운동 방향과 크기를 벡터화시켜 공간 내에서 광자의 운동경로를 수학적으로 해석(권택연, 임정대 1976)할 수 있는 광선추적 기법, 서울지방 표준기상년(TMY)에서 제공되는 일사량과 노점온도를 적용시켜 외부수평면조도를 계산하는 Perez 천공모델(Perez, et al. 1990)로 이루어져 있다.

그림 1은 본 연구의 진행과정을 보인 것이다.

2. 경기장 자연광 도달경로

축구경기장의 잔디면에 도달하는 자연광은 크게는 태양으로부터의 직사일광과 천공의 확산광으로 구분할 수 있다. 그리고 서울 월드컵경기장과 같이 확산 투과성의 막구조 지붕을 갖는 곳에서 잔디면에 도달하는 자연광은 태양으로부터의 직사일광의 경우 직달성분, 확산투과성분 및 내부반사성분의 세가지로 나눌 수 있고, 천공확산광의 경우 천공성분, 확산투과성분 및 내부반사성분으로 나눌 수 있다. 그림 2와 3은 각각 직사일광과 확산천공광이 경기장의 잔디면에 도달하는 경로를 보여주는 것이다.

따라서 경기장 잔디면에 도달하는 빛의 양인 조도(lx) 및 광자량($\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$)을 정확하게 예측하기 위해서는 가장 먼저 외부의 조건인 천기의 상태 및 태양의 위치를 정확하게 계산해야 한다. 그리고 외부로부터의 직사일광과 천공 확산광이 잔디면에 도달하는 양을 정확하게 계산하기 위해서는 막구조 지붕의 투과특성과 경기장 내부 반사율을 정확하게 모델링해야 한다.

3. 식물의 광합성과 자연광

식물의 광합성은 앞에서 가시광선을 흡수하여 일어나는데 이때 주로 광합성에 이용되는 스펙트럼은 그림 4에 보인 것과 같이 430~470

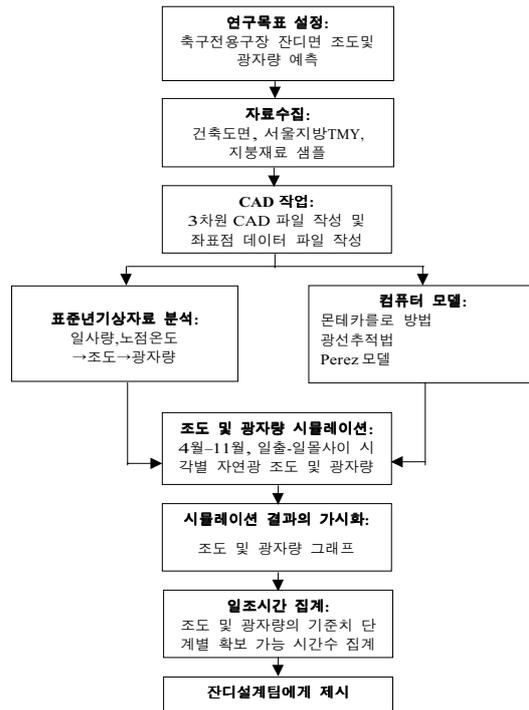


그림 1 연구의 진행과정

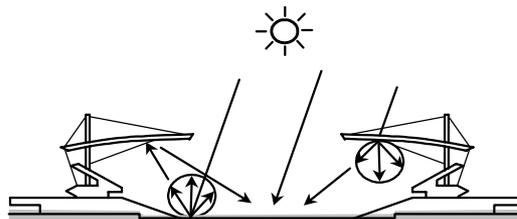


그림 2 직사일광 도달경로

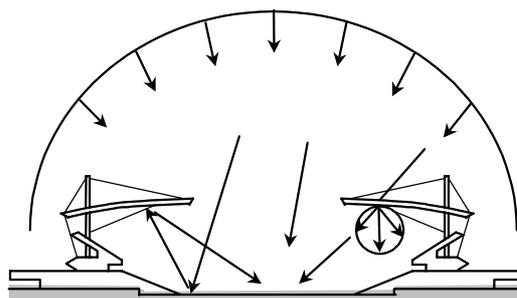


그림 3 확산천공광 도달경로

[nm]파장의 청색의 빛과 620~670[nm]파장의 적색의 빛인 것으로 알려져 있다. 특히 적색의 빛은 그림 4에서 보인 것처럼 광합성량이 최대로 일어나게 한다. 따라서 자연광은 청색계통에서 적색계통까지의 모든 스펙트럼을 포함하므로 식물의 광합성에 가장 적합한 빛이라 할 수 있다.

식물의 생육에 필요한 광량의 단위는 인체의 눈이 느낄 수 있는 밝기의 단위인 조도(lx)보다는 광합성 효율 측정시 일반적으로 사용되는 광자량($\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$)을 사용하는데 본 연구에서는 광자량 센서 제조회사인 LI-COR(LI-COR, 1991)사에서 제시한 조도와 광자량의 관계를 나타내는 식(1)을 사용하여 측정된 조도로부터 광자량을 계산하였다.

$$Q=0.018E \quad (1)$$

단, Q : 광자량[$\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$]

E : 조도[lx]

4. 경기장 모델링

4.1 서울 월드컵경기장의 개요

본 연구에서는 경기장 설계팀이 제공한 도면을 바탕으로 AutoCAD의 3차원 도형 작성 기법을 적용하여 그림 5에 보인 것과 같이 경기장을 86개의 3차원 면으로 단순화한 후 각 면 꼭지점의 좌표(x,y,z)와 면의 방향벡터를 조도계산 프로그램의 입력데이터로서 사용하였다. 그리고 그림 6과 같이 잔디구장을 24구역으로 나누어 조도계산 대상면으로 하였다. 월드컵경기장 지붕 최고높이는 50m, 좌석 최고높이는 30m, 그리고 경기장 장축의 방위는 남서 15°이다. 표 1은 지붕재료의 광학적 투과율을 보인것이다.

4.2 자연광원의 모델링

4.2.1 태양 위치 계산

본 연구에서 이용한 컴퓨터 프로그램에서는 Perez의 천공모델을 이용하여 천공회도분포와 외부조도를 계산하게 되는데 이를 위해 우선적으로 태양의 위치를 계산할 필요가 있다. 태양의 위치는 식(2)와 (3)의 고도(α)와 방위각(ϕ)으로 나타낼 수 있다.

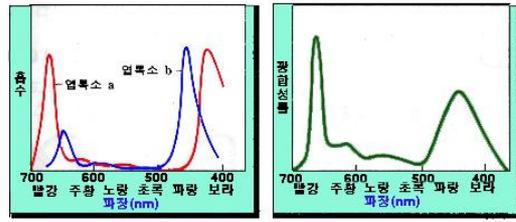


그림 4 빛의 파장에 따른 식물의 광합성

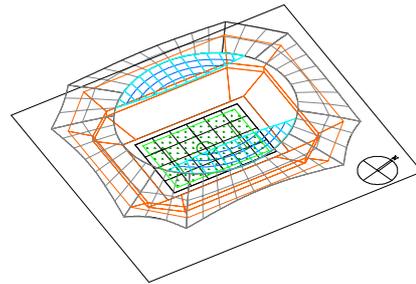


그림 5 월드컵경기장의 3차원 CAD도면

		동							
		1	2	3	4	5	6		
		7	8	9	10	11	12		
북		13	14	15	16	17	18	남	
		19	20	21	22	23	24		
		서							

그림 6 월드컵경기장의 조도계산 구역설정

표 1 지붕재료의 광학적 투과율

재료	재료 고유투과율	유지보수율	투과율
멤브레인	20%	0.6	12%
폴리카보네이트	입사각 0	75.7%	45.4%
	입사각 10	75.7%	45.4%
	입사각 20	75.7%	45.4%
	입사각 30	74.8%	44.9%
	입사각 40	73.9%	44.3%
	입사각 50	73.1%	43.9%
	입사각 60	67.1%	40.3%
	입사각 70	57.6%	34.6%
입사각 80	34.4%	20.7%	

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega) \quad (2)$$

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos \alpha}\right) \quad (3)$$

단, δ :태양적위 [°]
 φ :위도 [°]
 ω :시각(時角) [°]

4.2.2 조도의 계산

태양의 위치(고도, 방위각)가 계산되면 우선 태양으로부터의 직달성분을 모델링하기 위하여 그림 7과 같이 운동장을 전부 포함할 수 있는 가상의 광원면을 설정하게 되는데, 이는 태양광선의 직달성분이 평행광선이기 때문에 가능한 것이다.

가상 광원면의 크기가 결정되면 Perez 천공 모델에 의해 계산된 법선면 직사일광 조도를 이용하여 가상의 광원면에서 발생시켜야 할 광자의 개수를 결정한다. 광자의 개수가 결정되면 법선면 직사일광 조도를 광자수로 나누어 광자 한 개당의 세기를 결정한다. 그리고 가상 광원면에서의 광자의 발생위치는 몬테카를로 방법에 의해 난수(random number)를 발생하여 결정하고, 발생된 광자의 진행방향은 태양의 고도와 방위각에 의해 결정한다. 발생된 광자가 경기장 평면에 입사하지 않는 경우에 이 광자는 소멸시키고 가상 광원면에서 다음 광자를 발생시킨다. 그리고 지붕면에 도달한 빛은 일부는 반사 및 흡수되고 나머지가 확산투과 되므로 투과된 광자의 방향은 몬테카를로 방법에 의해 또 다른 새로운 방향을 결정하고 재료의 반사율과 투과율에 따라 광자의 소멸 여부를 결정하게 된다. 새로운 방향벡터를 가진 광자는 다른 평면에 입사하는지를 다시 검사하게 된다. 이 과정을 광자가 소멸될 때까지 반복한다. 그리고 계산대상면에 직접 도달하지 않은 광자는 경기장 내부의 각 표면에서 상호 반사한 다음 계산 대상면에 도달하게 되는데 이때의 광자의 방향과 진행방향도 몬테카를로방법과 광선추적기법에 의해 결정한다. 직사일광의 광자가 모두 발생되어 모두 소멸한 후에는 경기장의 각 구역별로 입사된 광자의 총 개수를 계산하여 각 구역의 직사일광에 의한 조도를 구한다.

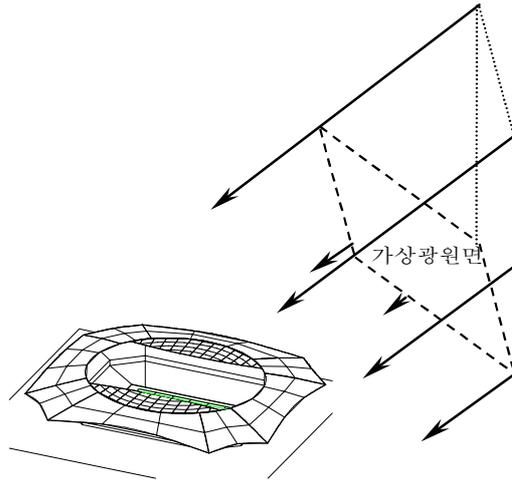


그림 7 직사일광 조도를 계산하기 위한 가상 광원면

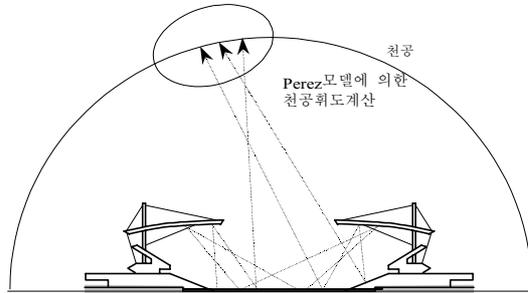


그림 8 확산천공광 조도를 계산하기 위한 광자의 개념

확산 천공광에 의한 조도 분포를 계산하기 위해서는 먼저 Perez 천공모델에 의한 외부 수평면 확산조도와 천공의 휘도분포를 구한다. 확산천공광에서는 발생하는 광자의 위치와 방향이 무작위성을 가지기 때문에 조도계산 대상면으로 들어오는 광자를 결정하기 힘들다. 따라서 직사일광의 경우와는 반대로 조도계산 대상면에서 광자를 발생시켜 외부 천공에 도달한 광자만을 대상으로 하여 조도를 계산한다. 그림 8은 계산대상면에서 발생된 광자가 외부 천공에 도달하는 예를 보인 것이다. 광자의 개수와 크기는 수평면 확산조도를 계산 대상면의 면적에 적용하여 총 광자의 세기를 결정하고 광자의 수에 따라 광자 한 개당 빛의 세기를 결정할 수 있게 된다. 외부 천공의 휘도분포에 따라 외부 천공에 도달한 광자에 가중치를 주어 천공의 휘도분

포에 따른 영향을 계산할 수 있다. 광자가 모두 발생되었으면 계산 대상면에 들어온 광자의 개수를 계산하여 확산 천공광에 의한 계산 대상면의 조도를 구할 수 있다.

5. 컴퓨터 시뮬레이션 조건

조도계산 프로그램에 필요한 입력자료는 위도, 경도, 측정시간, 일사량, 노점온도, 조도계산 대상면 및 기타면들의 공간 좌표, 그리드 수, 반사율, 투과율이 있다. 이들에 대한 값은 다음과 같다.

- 서울지역의 위도는 북위 37.5°이며, 경도는 동경 127°이다.
- 계산일은 잔디의 생육기간인 4월 1일부터 11월 30일 까지이며, 계산시간은 일출부터

일몰까지 1시간 간격으로 계산하였다.

- 조도계산 대상면은 잔디구장을 가로6, 세로4의 총 24구역으로 나누어 계산하였다.
- 경기장의 맴브레인과 폴리카보네이트의 투과율은 먼지 등의 낙하로 인하여 저하되는 것을 고려하기 위하여 표 1에서와 같이 유지보수율 60%를 적용한 값을 사용하였다.

6. 컴퓨터 시뮬레이션 결과

4월부터 11월까지 서울지방의 지난 1977년에서 1996년까지 20년간의 기상자료를 이용하여 표준년기상자료를 작성한 다음 일출에서 일몰까지의 조도를 계산한 후, 광자량으로 변환하여 각 구역별 일평균 조도와 광자량 확보시간을 구하였으며 그 결과는 표 2와 같다.

표 2 각 구역별 일평균 조도와 광자량 확보시간 [시간]

월	구역	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
		4	A	3.3	3.4	3.2	3.5	3.2	3.4	3.4	3.6	3.0	2.9	3.0	3.1	2.8	2.9	2.9	2.9	3.0	3.3	3.3	3.5	3.2	3.2
	B	4.4	4.4	4.3	4.3	4.7	4.2	4.4	4.0	4.3	5.0	4.3	4.2	4.5	4.2	4.5	4.7	4.5	4.3	4.2	4.4	4.1	4.3	4.4	4.2
	C	3.8	3.8	3.9	3.7	3.5	3.8	3.7	4.0	3.9	3.4	4.1	4.0	3.8	4.2	3.8	3.6	3.7	3.9	3.8	3.6	3.9	3.8	3.5	3.8
5	A	5.1	5.2	5.3	5.2	5.4	5.3	5.2	5.2	5.2	5.1	5.2	5.4	5.1	5.2	5.2	5.2	5.5	5.3	5.2	5.2	5.0	5.3	5.3	5.3
	B	3.6	3.9	3.9	3.8	3.9	3.6	3.9	3.6	3.6	4.1	3.6	3.8	3.7	3.7	3.9	3.8	3.8	3.4	3.8	3.8	3.7	4.0	4.0	3.8
	C	4.7	4.4	4.4	4.5	4.4	4.6	4.4	4.7	4.6	4.3	4.7	4.4	4.6	4.6	4.4	4.4	4.5	4.9	4.5	4.4	4.5	4.3	4.2	4.3
6	A	6.1	6.0	5.8	5.8	5.8	6.0	6.3	6.0	6.0	6.0	6.1	6.2	5.8	6.0	5.8	5.8	6.0	6.3	6.3	6.3	6.0	6.3	6.4	6.4
	B	3.8	3.8	4.1	4.1	4.0	4.0	4.0	3.9	3.9	3.8	3.9	3.8	4.0	3.7	3.9	3.9	4.0	3.7	3.5	3.6	3.7	3.6	3.8	3.8
	C	3.8	3.9	3.8	3.6	3.9	3.8	3.6	3.8	3.8	3.8	3.9	3.9	3.8	4.1	3.8	3.9	3.9	3.9	4.0	3.8	3.7	3.9	3.6	3.6
7	A	6.3	6.1	6.1	6.0	6.1	6.3	6.1	6.1	6.0	6.3	6.3	6.6	6.0	6.2	6.2	5.9	6.4	6.7	6.5	6.6	6.1	6.2	6.6	6.5
	B	5.0	5.0	5.2	5.3	5.1	5.0	5.0	5.0	5.1	5.3	5.1	4.9	5.0	4.9	4.9	5.1	5.0	4.7	4.6	4.7	4.7	4.7	4.9	4.9
	C	1.8	1.9	1.9	1.6	1.8	1.9	1.8	1.9	1.9	1.5	1.9	1.8	1.9	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9	2.0	1.8	1.9	1.9	1.6	1.7
8	A	4.6	4.5	4.5	4.7	4.6	4.8	4.7	4.5	4.5	4.3	4.5	4.8	4.4	4.4	4.3	4.5	4.5	4.5	4.5	4.6	4.5	4.4	4.6	4.6
	B	4.8	4.8	4.8	4.6	5.2	4.7	4.8	4.7	4.6	5.3	4.7	4.8	4.8	4.6	4.8	4.8	4.9	4.7	4.5	4.8	4.5	5.0	4.8	4.6
	C	2.7	2.5	2.6	2.7	2.3	2.6	2.5	2.7	2.6	2.2	2.7	2.5	2.6	2.8	2.6	2.5	2.5	2.7	2.8	2.5	2.7	2.4	2.4	2.6
9	A	3.8	3.8	3.6	3.7	3.8	4.0	3.8	3.8	3.7	3.7	3.9	3.9	3.7	3.7	3.8	3.7	3.7	4.0	3.9	3.9	3.9	3.7	3.9	3.8
	B	5.0	5.0	4.8	5.0	5.3	5.1	4.8	4.8	4.9	5.1	4.9	4.9	5.1	4.6	4.9	5.1	4.8	4.8	4.6	5.0	4.7	4.8	4.8	5.0
	C	2.4	2.4	2.7	2.4	2.2	2.3	2.5	2.6	2.5	2.3	2.4	2.4	2.3	2.8	2.3	2.2	2.6	2.5	2.6	2.2	2.4	2.4	2.3	2.3
10	A	4.4	4.3	4.3	4.3	4.2	4.3	4.3	4.3	4.2	4.3	4.1	4.2	4.2	4.1	4.1	4.2	4.2	4.2	4.0	4.2	4.3	4.2	4.4	4.2
	B	4.9	4.9	4.7	5.3	5.4	5.5	5.3	5.0	4.9	5.0	5.4	5.2	5.2	4.9	5.1	5.2	5.4	5.0	5.4	5.3	5.6	5.4	5.4	5.3
	C	1.3	1.4	1.6	1.0	1.0	0.9	1.0	1.1	1.5	1.3	1.2	1.2	1.2	1.5	1.4	1.2	1.0	1.4	1.2	1.1	0.7	1.0	0.8	1.1
11	A	4.3	4.1	4.3	4.4	4.4	4.5	4.2	4.1	4.2	4.2	4.3	4.6	4.1	4.0	4.0	4.1	4.1	4.7	4.1	4.1	4.2	4.0	4.3	4.5
	B	4.9	5.0	4.9	5.0	4.9	4.6	4.9	5.0	4.9	5.0	5.0	4.6	5.0	5.0	5.0	4.9	5.0	4.7	4.9	4.9	4.9	5.0	4.7	4.6
	C	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

- 단, A:조도 20,000lx 미만, 광자량 360 μ mol/m²s미만
- B:조도 20,000~50,000lx, 광자량 360~900 μ mol/m²s
- C:조도 50,000lx 이상, 광자량 900 μ mol/m²s이상

4월의 경우 50,000lx 이상($900 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 이상)이 확보될 수 있는 시간은 운동장 전체에 걸쳐서 하루평균 3.8시간 이었고, 20,000~50,000lx 사이($360 \sim 900 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 사이)가 확보되는 시간은 하루평균 4.4시간, 20,000lx 이하($360 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 이하)는 하루평균 3.2시간 이었다.

5월의 경우 50,000lx 이상($900 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 이상)이 확보될 수 있는 시간은 운동장 전체에 걸쳐서 하루평균 4.5시간 이었고, 20,000~50,000lx 사이($360 \sim 900 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 사이)가 확보되는 시간은 하루평균 3.8시간, 20,000lx 이하($360 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 이하)는 하루평균 5.2시간 이었다.

6월의 경우 50,000lx 이상($900 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 이상)이 확보될 수 있는 시간은 운동장 전체에 걸쳐서 하루평균 3.8시간 이었고, 20,000~50,000lx 사이($360 \sim 900 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 사이)가 확보되는 시간은 하루평균 3.8시간, 20,000lx 이하($360 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 이하)는 하루평균 6.1시간 이었다.

7월의 경우 50,000lx 이상($900 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 이상)이 확보될 수 있는 시간은 운동장 전체에 걸쳐서 하루평균 1.8시간 이었고, 20,000~50,000lx 사이($360 \sim 900 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 사이)가 확보되는 시간은 하루평균 5시간, 20,000lx 이하($360 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 이하)는 하루평균 6.3시간 이었다.

8월의 경우 50,000lx 이상($900 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 이상)이 확보될 수 있는 시간은 운동장 전체에 걸쳐서 하루평균 2.6시간 이었고, 20,000~50,000lx 사이($360 \sim 900 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 사이)가 확보되는 시간은 하루평균 4.8시간, 20,000lx 이하($360 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 이하)는 하루평균 4.5시간 이었다.

9월의 경우 50,000lx 이상($900 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 이상)이 확보될 수 있는 시간은 운동장 전체에 걸쳐서 하루평균 2.4시간 이었고, 20,000~50,000lx 사이($360 \sim 900 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 사이)가 확보되는 시간은 하루평균 4.9시간, 20,000lx 이하($360 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 이하)는 하루평균 3.8시간 이었다.

10월의 경우 50,000lx 이상($900 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 이상)이 확보될 수 있는 시간은 운동장 전체에 걸쳐서 하루평균 1.2시간 이었고, 20,000~50,000lx 사이($360 \sim 900 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 사이)가 확보되는 시간은 하루평균 5.2시간, 20,000lx 이하($360 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 이하)는 하루평균 4.2시간 이었다.

11월의 경우 50,000lx 이상($900 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 이상)이 확보될 수 있는 시간은 운동장 전체에 걸쳐서 나타나지 않았으며, 20,000~50,000lx 사이($360 \sim 900 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 사이)가 확보되는 시간은 하루평균 4.9시간, 20,000lx 이하($360 \mu \text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 이하)는 하루평균 4.2시간 이었다.

본 연구의 결과는 서울 월드컵 주경기장의 잔디설계팀에 제출되었다. 그리고 잔디설계팀은 각 구역별 조도와 광자량 확보량 및 일조시간을 고려하여 구역별로 다른 종류의 잔디를 심어 운동장 전체의 잔디가 고른 분포를 가질 수 있도록 하여 국제적 축구경기를 유치함에 부족함이 없고, 또한 잔디의 고사로 인해 향후 발생할 수 있는 유지관리비를 낮출 수 있는 잔디설계가 가능하게 되었다.

참고문헌

1. 유기형. 1997. "몬테카를로 방법과 광선추적 기법에 의한 아트리움의 자연채광 성능 예측에 관한 연구," 대한건축학회학술발표논문집 제 17권 제2호, pp.659~666.
2. 김재삼. 1997. 몬테카를로 방법의 물리학적 응용 1판, 민음사, 서울, pp.25~27.
3. 권택연, 임정대. 1976. 대수·기하학, 문운당, 서울, pp.203~204.
4. Perez, R.; P. Ineichen; R. Seals; J. Michalsky; and R. Stewart. 1990. "Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance," Solar Energy, Vol.44, No.5, pp.271~289.
5. LI-COR Radiation Sensors Instruction Manual.