

축구 전용구장의 천연잔디면 자연광량 예측

축구 전용구장이 가지는 여러 지붕구조의 특성에 따라 경기장 잔디면의 조도 및 자연광량을 몬테카를로 방법과 광선추적기법을 적용하여 개발된 컴퓨터 프로그램에 의해 예측하고, 설계안에 의해 부족한 잔디면의 자연광량을 보충할 수 있는 인공조명시설의 제작방법을 레디언스(Radiance) 프로그램을 이용한 시뮬레이션 결과로부터 도출하여 제시하였다.

송 규 동

최근 우리나라에서 2002년 월드컵을 위하여 건설중인 축구 전용 구장들은 대부분 막구조(membrane structure)의 지붕을 갖는 경기장으로서 우천시 관중석이 강우에 노출되는 것을 막아주고 여름철 과다한 직달일사를 차단하는 효과가 있을 것이다.

그러나 경기장 구조체와 막구조 지붕은 잔디면의 일부에 그림자를 드리워 잔디의 생육에 필요한 충분한 빛을 제공하지 못하여 잔디면이 고르게 자라지 못하는 문제를 발생시킬 수도 있다.

따라서 천연잔디면의 조도와 광자량에 영향을 미칠 것으로 판단되는 경기장 지붕재료의 광학적 투과율과 지붕 개구부의 면적 및 천공상태 등이 변화함에 따라 경기장내 잔디면에 어떻게 영향을 미치는지를 컴퓨터 시뮬레이션이

용하여 예측하였다. 그리고 잔디면을 여러 구역으로 나누어 각 구역별로 변수가 변화함에 따라 잔디면의 미치는 영향을 분석하였다.

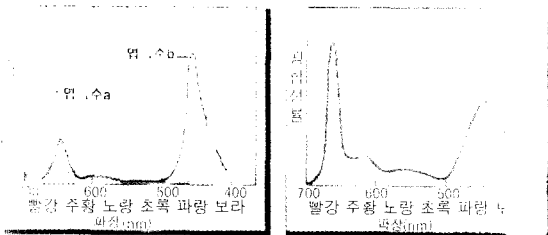
그리고 자연광량이 부족한 경기장의 경우 부족한 조도를 인공조명을 이용하여 잔디면에 충분한 조도를 확보할 수 있도록 하는 방안을 제시하였다.

식물의 광합성과 자연광 도달경로

식물의 광합성과 자연광

식물의 광합성은 앞에서 가시광선을 흡수하여 일어나는데, 이때 주로 광합성에 이용되는 스펙트럼은 그림 1의 (a)에 보인 것과 같이 430~470 [nm] 파장의 청색의 빛과 620~670[nm] 파장의 적색의 빛인 것으로 알려져 있다. 특히 적색의 빛은 그림 1의 (b)에서 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, 식 1을 사용하여 계산된 조도로부터 광자량을 환산할 수 있다.



(a) 흡수스펙트럼

(b) 작용스펙트럼

[그림 1] 빛의 파장에 따른 식물의 광합성

<표 1> 천연잔디의 광합성에 필요한 일조시간 및 광량

구 분	필 요 량
일조시간	최소치 8~12시간
	권장치 8 ~ 12시간
6시간 일조에 대한 광량	최소치 694 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ (152W/m ² 또는 38,000 lx)
	권장치 1,000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ (219 W/m ² 또는 55,000 lx)
자주 밟히는 잔디면 광량	12시간 동안 최소한 350 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ (77W/m ² 또는 19,000 lx)
별로 밟히지 않는 잔디면 광량	12시간 동안 최소한 230 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ (50W/m ² 또는 13,000 lx)

$$Q = 0.018E \quad \text{식(1)}$$

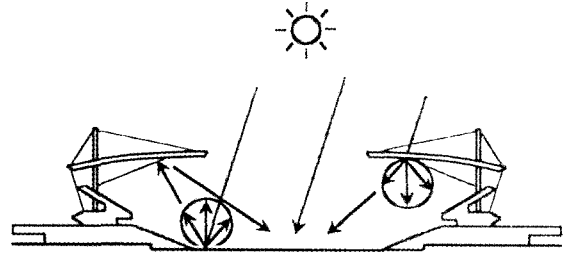
단, Q : 광자량 [$\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$]
E : 조도 [lx]

표 1은 천연잔디의 광합성에 필요한 일조시간과 광량을 나타내고 있다.

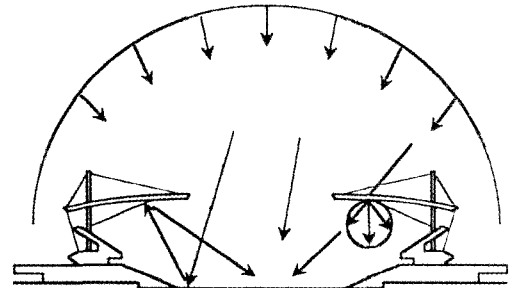
경기장 자연광 도달경로

광합성에 이용되는 자연광원은 크게는 태양으로부터의 직사일광과 천공의 확산광이 있다. 그리고 서울월드컵경기장과 같이 확산 투과성의 막구조 지붕을 갖는 곳에서 잔디면에 도달하는 자연광은 태양으로부터의 직사일광의 경우 직달성분, 확산투과 성분 및 내부 반사성분의 세가지로 나눌 수 있고, 천공확산광의 경우 천공성분, 확산투과성분 및 내부 반사성분으로 나눌 수 있다. 이러한 개념을 그림으로 나타내면 직사일광의 경우 그림 2와 같고, 확산천공광의 경우 그림 3과 같다.

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 천공확산광이 잔디면에 도달하는 양을 정확하게 계산하기 위해서는 막구조 지붕의 투과특성과 경기장 내부 반사율을 정확하게 모델링 해야 한다.



[그림 2] 직사일광 도달경로



[그림 3] 확산천공광 도달경로

서울 월드컵 경기장의 조도 및 광자량 예측

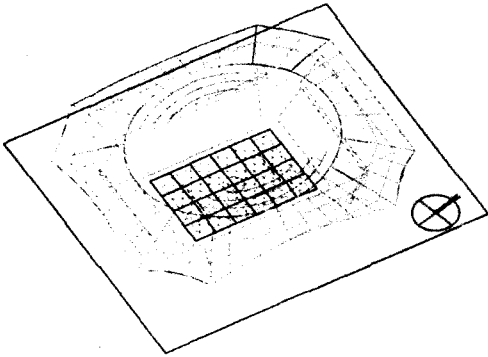
경기장의 개요

서울월드컵경기장의 도면을 바탕으로 AutoCAD의 3차원 도형 작성 기법을 적용하여 그림 4에 보인 것과 같이 경기장을 86개의 3차원 면으로 단순화한 후 각 면 꼭지점의 좌표(x, y, z)와 면의 방향벡터를 조도계산 프로그램의 입력 데이터로서 사용하였다. 그리고 그림 5와 같이 잔디구장을 24개의 구역으로 나누어 각 구역별로 조도를 구할 수 있도록 조도계산 대상으로 설정하였다.

천연잔디면에 도달하는 광자량과 관련한 변수설정

천연잔디면에 도달하는 광자량에 영향을 미치는 변수는 다음의 4가지로 요약될 수 있다.

- 태양의 위치 및 천공상태
- 지붕 개구부의 면적



[그림 4] 서울 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 5] 천연잔디면 조도계산 구역 설정

- 지붕 재료의 광학적 투과율 및 투과 특성
- 경기장 내부 반사율 및 반사 특성

경기장의 경우 개구부의 면적과 지붕의 높이에 따라서 자연광 입사량이 달라지므로, 경기장 지붕 개구부의 면적을 경기장 중앙점에서 계산된 입체각으로 나타내었다. 그림 6은 시뮬레이션에 적용된 개구부의 면적을 3가지로 분류하여 나타낸 것으로 1안은 입체각이 8.18sr, 2안은 입체각이 10.85sr, 3안은 입체각이 13.53sr으로 설정되었다. 또한, 멤브레인의 투과율 및 투과 특성도 경기장 내부로 유입되는 빛의 양과 방향성에 영향을 미친다. 투명한 재료는 직사일광의 방향을 그대로 투과시키는 반면, 반투명 재료는 직사일광을 확산시킴으로써 경기장 내부의 빛 환경을 변화시킬 수 있다. 지붕 재료인 멤브레인은 확산투과이므로 확산투과만을 대상으로 하였고 시뮬레이션은 투과율을

<표 2> 천연잔디면 자연광 조도예측 시뮬레이션에 입력된 변수

변수	세부내용
태양의 고도, 방위	4월 ~ 11월 21일, 9 ~ 20시
개구부 면적	입체각 8.18sr, 10.85sr, 3.53sr
투과율	10%, 20%, 30%
투과특성	확산투과
천공상태	청천공, 담천공

10%, 20%, 30%의 3가지 경우로 수행되었다.

천공 상태는 청천공에서 담천공에 이르는 다양한 변화를 보이며 경기장 내부의 천연잔디면에 도달하는 광자량에 큰 영향을 준다.

표 2는 천연잔디면의 자연광 조도예측을 위한 컴퓨터 시뮬레이션과 관련한 변수의 종류 및 값을 보인 것이다.

천연잔디면 자연광 조도예측 컴퓨터 시뮬레이션입력 데이터

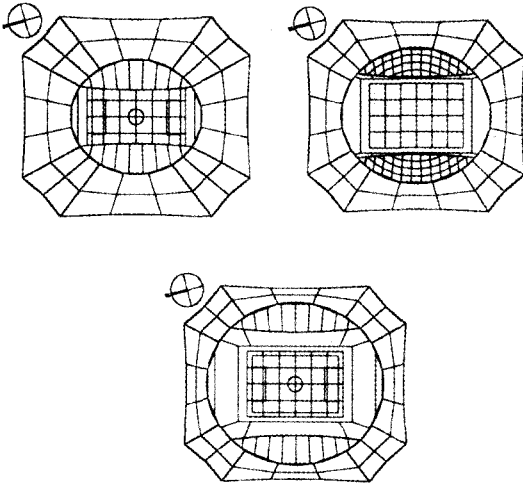
시뮬레이션을 수행하기 위한 입력 데이터들은 다음과 같이 설정하였다.

- 계산일은 잔디의 생육기간인 4월부터 11월 까지 매월 21일 일출부터 일몰까지 1시간 간격으로 계산하였다.
- 서울지역의 위도는 북위 37.5°, 경도는 127°이다.
- 조도계산 대상면은 잔디구장을 가로 6, 세로 4의 총 24 구역으로 나누어 계산하였다.
- 멤브레인의 투과율과 폴리카보네이트의 투과율은 다음 표 3과 같이 설정하였으며, 먼지 등의 낙하로 인해 투과율 저하를 고려하기 위하여 유지보수율 60%를 적용하였다.
- 청천공과 담천공시 일사량과 노점온도는 최근 20년간 기상자료에서 선정하였다.

이 외에도 조도계산 대상면 및 기타면들의 공간좌표, 그리드 수, 반사율, 투과율이 있다.

컴퓨터 시뮬레이션 결과

- 지붕 개구부의 면적에 따른 시뮬레이션 결과
개구부 면적의 변화에 따른 조도의 변화를 알기 위해 시뮬레이션을 하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 그림 7, 8은 투과율이 10%인 경우 4월 21일 12시 청천공과 담천공일 때 구역별로 조도의 결과를 보여주는 것이며, 1안의 평균 조도는 52,742 lx, 2안의 평균조도는 62114 lx, 3안의 평



[그림 6] 멤브레인의 면적에 따른 분류

균조도는 60,925 lx으로 3안 보다 2안이 더 높은 것으로 나타났으며 담천공의 경우도 각각 8,897 lx, 9,915 lx, 9,377 lx로 나타나 3안 보다 2안이 더 높은 것으로 나타났다.

• 지붕재료의 광학적 투과율에 따른 시뮬레이션 결과 투과율의 변화에 따라 잔디면의 조도 변화를 알기 위해 시뮬레이션을 하였다.

그림 9, 10은 1안의 경우 9월 21일 12시 청천공과 담천공시 구역별 조도 계산 결과를 나타낸 것이다. 청천공시 투과율이 10%일때 평균조도는 46,077 lx이며, 투과율이 20%일때 48,249 lx, 투과율이 30%일때 50,095 lx로 나타나 투과율이 높을수록 조도가 증가하는 것으로 나타났고, 담천공일때 각각 17,223 lx, 17,719 lx, 18,279 lx로 나타났다.

부산 월드컵경기장의 광자량 예측 및 보조 조명 시설 설계

부산 월드컵 경기장의 경우와 같이 설계안이 확정되어 시공단계에 있는 경우에 잔디면의 조도 및 광자량 예측결과가 부족하게 나타날 경우, 기존의 자연채광에 의해 부족한 조도를 보충할 수 있도록 보조 인공 조명시설을 설계하여

<표 3> 지붕재료의 광학적 투과율

재료	재료 고유 투과율	유지보수율	투과율	
멤브레인	10 %	0.6	6.0 %	
	20 %	0.6	12.0 %	
	30 %	0.6	18.0 %	
폴리카보네이트	입사각 0	75.7 %	0.6	45.4 %
	입사각 10	75.7 %	0.6	45.4 %
	입사각 20	75.7 %	0.6	45.4 %
	입사각 30	74.8 %	0.6	44.9 %
	입사각 40	73.9 %	0.6	44.3 %
	입사각 50	73.1 %	0.6	43.9 %
	입사각 60	67.1 %	0.6	40.3 %
	입사각 70	57.6 %	0.6	34.6 %
	입사각 80	34.4 %	0.6	20.7 %

제시하였다.

인공조명에 의한 조도분포 시뮬레이션은 레디언스 프로그램을 사용하였으며 진행방법은 다음과 같다.

보조 조명시설의 요구 광량 산출

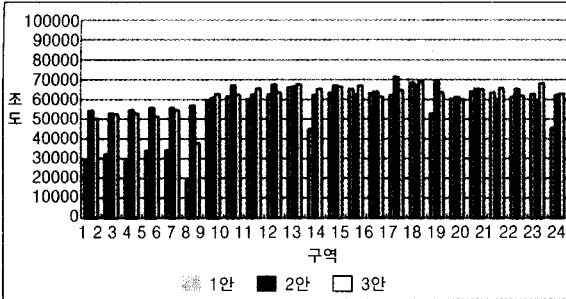
몬테카를로방법과 광선추적기법을 적용하여 개발된 자연광량 예측 프로그램을 적용하여 부산월드컵경기장 잔디면의 조도분포를 계산하고, 잔디면에 요구되는 광량과 비교하여 조명시설에 요구되는 조도를 산출하였다.

보조 조명시설과 조명기구의 제원

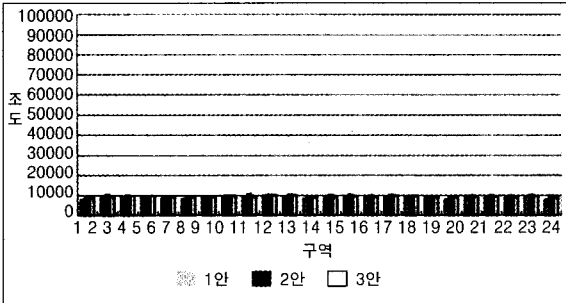
조명시설에 적합한 조명기구의 제원과 배광데이터를 확보하고, 시간과 경기장의 잔디면에 따라 추가조명을 할 수 있도록 이동이 가능한 조명시설의 제원을 결정하여, 레디언스의 입력데이터로 사용하였다.

레디언스프로그램을 이용한 모델링 및 평가

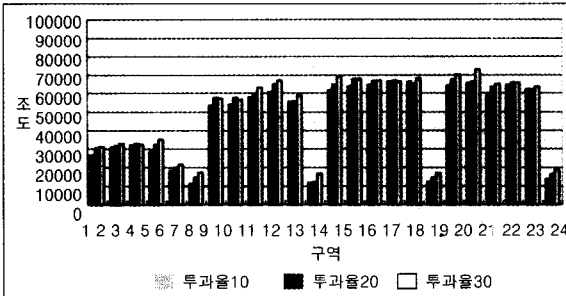
조명기구의 배광 분포와 조명 기구의 좌표를 레디언스 프로그램에 입력하여 모델링을 실시하고 조명기구의 조명방향에 따른 경기장 잔디면상의 조도분포 비교 평가하였다.



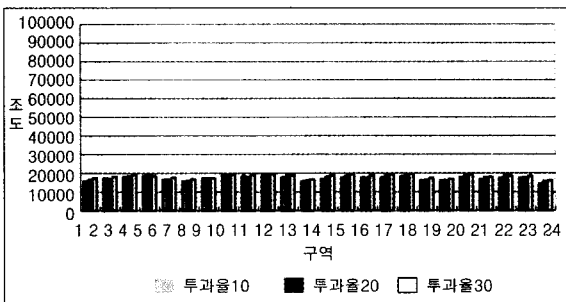
[그림 7] 투과율 10% 청천공 4월 21일 12시 결과



[그림 8] 투과율 10% 담천공 4월 21일 12시 결과



[그림 9] 1안 청천공 9월 21일 12시 결과



[그림 10] 1안 담천공 9월 21일 12시 결과

자료 분석 및 입력

• 부산월드컵경기장 잔디면의 조도분포

자연광량 시뮬레이션의 결과를 토대로 담천공과 청천공 상태에서의 잔디의 성장에 필요한 최소시간인 6시간(10~15시)동안의 경기장 잔디면 월별 평균조도값과 6시간 최소 요구 조도값인 38,000 lx를 표 4와 같이 비교하여 가장 큰 차를 나타낸 11월 담천공 상내에서의 월평균 요구 조도 30,190 lx를 조명시설의 기준으로 하였다.

• 조명기구의 배광분포

조명기구의 배광분포는 설치업체에서 제공한 조명기구(표 5)에 대한 각도별(0~90°) 배광분포 데이터(그림 11)을 사용하였다.

• 조명시설의 개요

조명시설의 크기는 이동이 편리하고 조명기구의 무게를 감안하여 조명기구를 설치하는 프레임을 기준으로 2m×4m×3m의 크기로 설정하였으며, 제원은 표 6과 같다.

또한, 조명시설은 조명기구의 조명각도에 따라 다음과 같이 2가지 경우로 구분하였다.

- 잔디면의 수직방향으로 조명하는 경우
- 잔디면에 경사각을 주어 조명하는 경우

경기장 잔디면 내부에서 잔디면의 수직방향으로 조명하는 경우에는 경기장 잔디면 내부에서 잔디면의 수직방향으로 조명하는 경우의 조명시설 형태는 그림 12~14와 같다.

경기장 잔디면에 경사각을 주어 조명하는 경우 경기장 잔디면에 경사각(30°, 40°)을 주어 조명하는 경우의 조명 시설 형태는 그림 15 ~ 17과 같다.

시뮬레이션 결과

조명 시뮬레이션 프로그램인 레디언스를 사용하여 위에서 제시한 조명시설의 조도분포를 시뮬레이션 하였다.

시뮬레이션은 조명기구의 조명각도(0°, 30°, 45°)에 따른 3가지 경우를 대상으로 하였으며, 조명시설 1개에 대한 상세 조도분포와 경기장 전체에 미치는 조도분포를 시뮬레이션하였다.

• 조도분포 비교

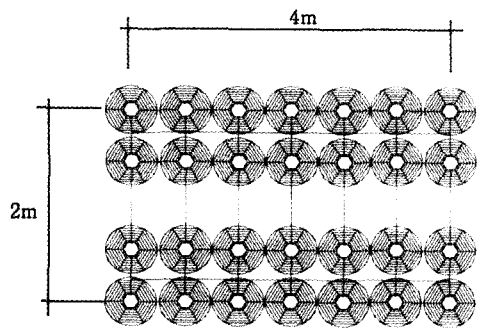
조명각도에 따른 3가지 경우의 조명시설을 시뮬레이션

<표 4> 월별 조도와 보강설계에 필요한 조도값 (lx)

구분	담 천 공	보강설계에 필요한 조도값	청 천 공	보강설계에 필요한 조도값
1월	8842	29158	22483	15517
2월	9534	28466	29113	8887
3월	10502	27498	36479	1521
4월	14790	23210	57459	0
5월	28622	9378	69630	0
6월	25895	12105	82973	0
7월	25244	12756	70958	0
8월	25032	12968	59965	0
9월	15803	22197	53323	0
10월	11096	26904	32805	5195
11월	7810	30190	22451	15549
12월	8289	29711	20126	17874

<표 6> 조명시설의 제원

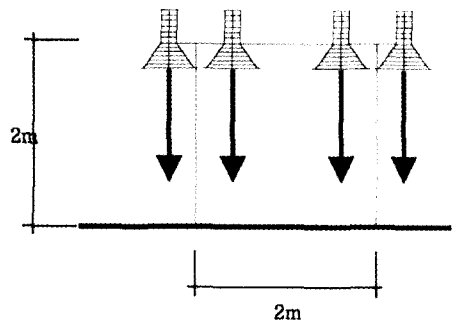
크 기	2m(폭) × 4m(길이) × 2m(높이)
조명기구 소요수량	28(set)
소요전력	42kW (28 × 2kW)
무 게	329.2kg ((14.2kg(조명기구)+15kg(Ballast)) × 21)



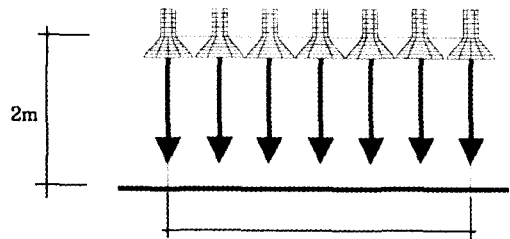
[그림 12] 잔디면의 수직방향으로 조명하는 경우의 배치도

<표 5> 조명기구의 개요

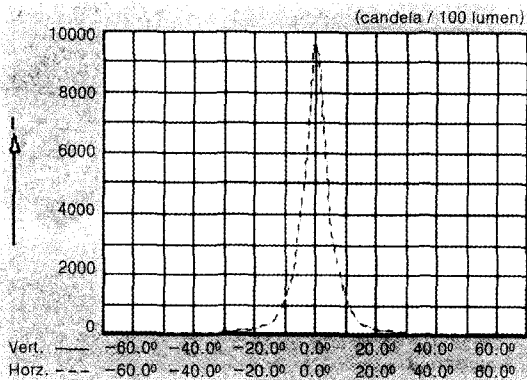
품 명	HPIT 2kW/220
출 력	2092W
총 광 속	189,000lm



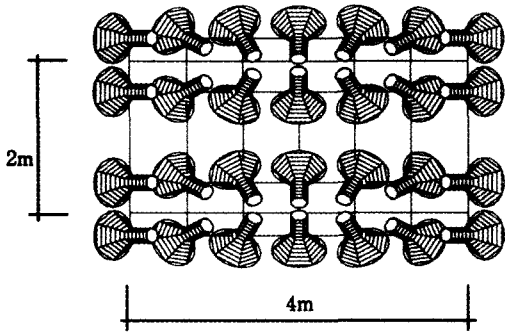
[그림 13] 잔디면의 수직방향으로 조명하는 경우의 측면도



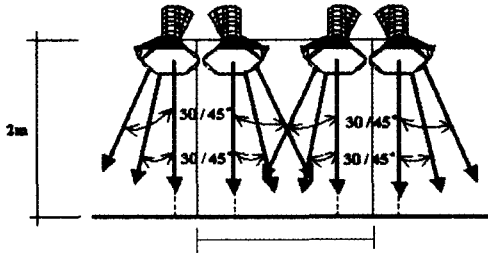
[그림 14] 잔디면의 수직방향으로 조명하는 경우의 정면도



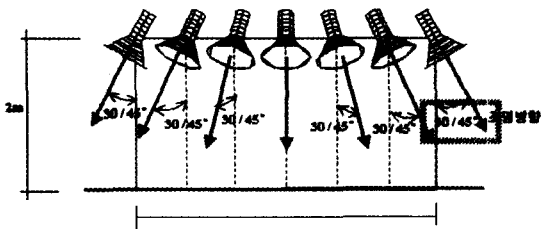
[그림 11] 조명기구의 배광분포



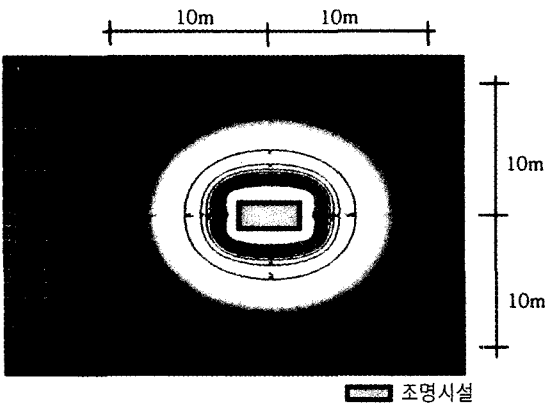
[그림 15] 경기장 잔디면에 경사각을 주어 조명하는 경우 배치도



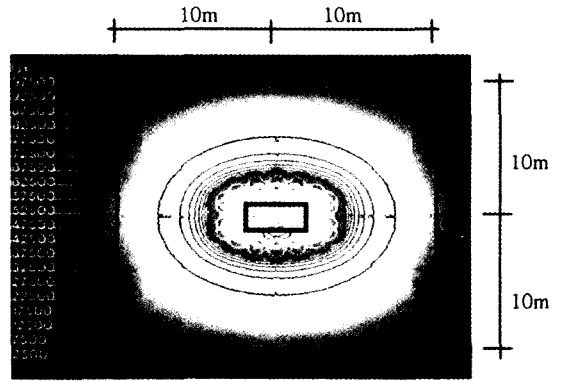
[그림 16] 경기장 잔디면에 경사각을 주어 조명하는 경우 배치도



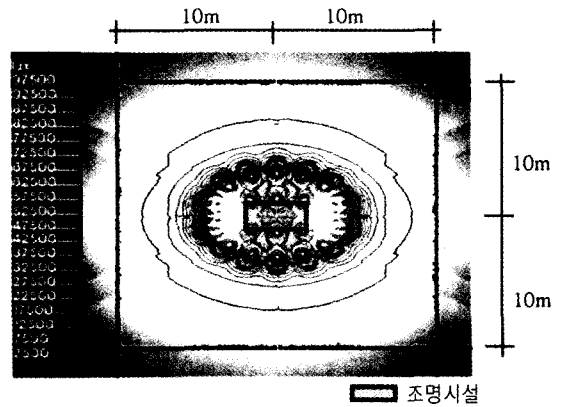
[그림 17] 경기장 잔디면에 경사각을 주어 조명하는 경우 배치도



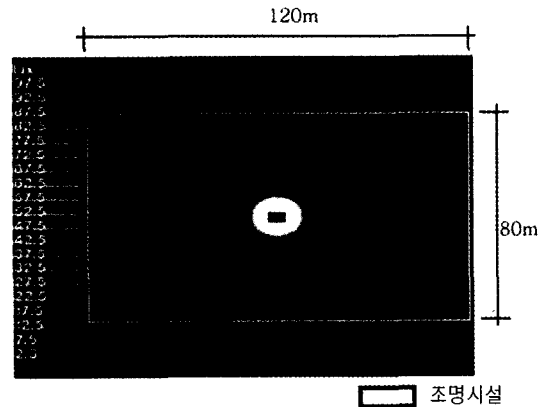
[그림 18] 경기장 잔디면에 수직방향으로 조명하는 경우 조도분포



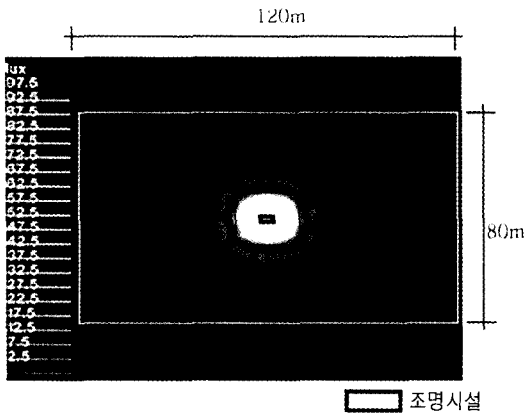
[그림 19] 30° 각도로 조명하는 경우의 조도분포



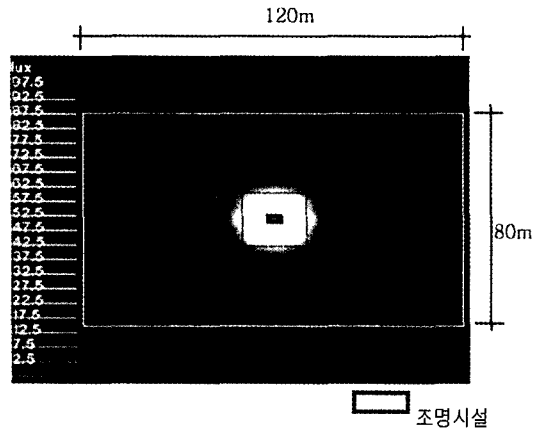
[그림 20] 45° 각도로 조명하는 경우의 조도분포



[그림 21] 경기장 잔디면에 수직방향으로 조명하는 경우 조도분포



[그림 22] 30° 각도로 조명하는 경우의 조도분포



[그림 23] 45° 각도로 조명하는 경우의 조도분포

한 결과 조명시설의 하단부에서 100,000 lx 이상의 높은 조도분포가 나타났으며, 경기장 잔디면에 45°의 각도로 조명하는 경우(그림 20)이 30°각도(그림 19)나 수직방향으로 조명하는 경우(그림 18) 보다 기준 조도값(30,190 lx) 이상의 조도를 보이는 지역이 상대적으로 넓게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

• 경기장 전체에 대한 조도분포

1개의 조명시설이 경기장 전체에 나타내는 조도분포를 그림 21 ~ 23과 같이 나타내었다.

그림에서와 같이 조명기구의 경사각을 주는 경우 조도값은 낮지만 상대적으로 넓은 지역에 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. (☉)