



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

레크리에이션용 스포츠 設備에 對한
照明 解析 및 設計

The seal of Cheju National University is a large, faint watermark in the background. It features a central shield with the Korean characters '제주대' (Jeju National University) inside. The shield is surrounded by a laurel wreath. The outer ring of the seal contains the text 'CHEJU NATIONAL UNIVERSITY' at the top and 'SINCE 1952' at the bottom.

濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科

電氣工學 專攻

權 純 球

2007

碩士學位論文

레크리에이션용 스포츠 設備에 對한

照明 解析 및 設計

The seal of Cheju National University is a large, faint watermark in the background. It is circular with the text 'CHEJU NATIONAL UNIVERSITY' around the top and 'SINCE 1952' around the bottom. In the center is a shield-shaped emblem containing a book and a torch.

指導教授 吳 性 寶

濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科

權 純 球

2007

레크리에이션용 스포츠 設備에 對한
照明 解析 및 設計

指導教授 吳 性 寶

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2007年 6月 日

濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科 電氣工學 專攻

權 純 球

權純球의 工學 碩士學位 論文을 認准함.

2007年 6月 日

委員長

印

委 員

印

委 員

印

목 차

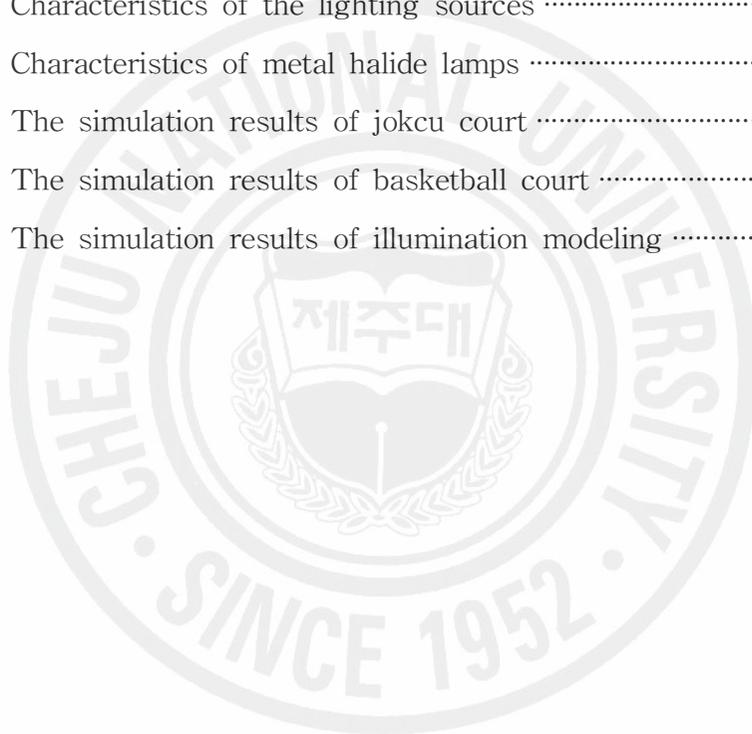
| | |
|-------------------------------|-----|
| LIST OF FIGURES | ii |
| LIST OF TABLES | iii |
| SUMMARY | iv |
| | |
| I. 서 론 | 1 |
| II. 스포츠시설 조명현황 분석 | 3 |
| 1. 조도 기준 | 3 |
| 2. 등기구 설치 현황 | 4 |
| 3. 그리드의 구성에 따른 조도측정과 계산 | 6 |
| III. 조명 모델 설계 | 13 |
| 1. 등기구 선정 | 13 |
| 2. 등기구 배열 및 폴 높이 선정 | 19 |
| 3. 등기구 에이밍 | 23 |
| IV. 조명 시뮬레이션 | 24 |
| | |
| V. 결과 및 고찰 | 28 |
| | |
| VI. 결 론 | 30 |
| | |
| 참고 문헌 | 31 |
| | |
| 부 록 | 32 |

LIST OF FIGURES

| | |
|---|----|
| Fig. 1 Luminaire arrangement of sports facility in front of Cheju National University Student Hall | 5 |
| Fig. 2 The number of grid by sports area | 7 |
| Fig. 3 The number of grid at jokcu court | 8 |
| Fig. 4 The number of grid at basketball court | 9 |
| Fig. 5 The measurement of illuminance value at jokcu court | 10 |
| Fig. 6 The measurement of illuminance value at basketball court | 11 |
| Fig. 7 Distribution curve of luminous intensity [400W] | 17 |
| Fig. 8 Distribution curve of luminous intensity [1kW] | 18 |
| Fig. 9 Distribution curve of luminous intensity [1.5kW] | 19 |
| Fig. 10 Dimensions of tennis courts showing typical column layouts | 20 |
| Fig. 11 Recommended mounting heights for outdoor tennis courts | 22 |
| Fig. 12 Recommended mounting heights of back area | 22 |
| Fig. 13 Luminaire aiming angles | 23 |
| Fig. 14 Distribution of horizontal illuminance and uniformity at jokcu court | 26 |
| Fig. 15 Distribution of horizontal illuminance and uniformity at basketball court | 27 |

LIST OF TABLES

| | | |
|---------|---|----|
| Table 1 | Standard illuminance of KS | 4 |
| Table 2 | Lighting specifications of recreational sports facility | 6 |
| Table 3 | The illuminance caculation of sports facility | 12 |
| Table 4 | Characteristics of the lighting sources | 14 |
| Table 5 | Characteristics of metal halide lamps | 15 |
| Table 6 | The simulation results of jokcu court | 25 |
| Table 7 | The simulation results of basketball court | 25 |
| Table 8 | The simulation results of illumination modeling | 29 |



Lighting Analysis and Design for Recreational Sports Facility

Soun-Guo Gwun

Department of Electronic and Electrical Engineering

Graduate School of Industry

Cheju National University

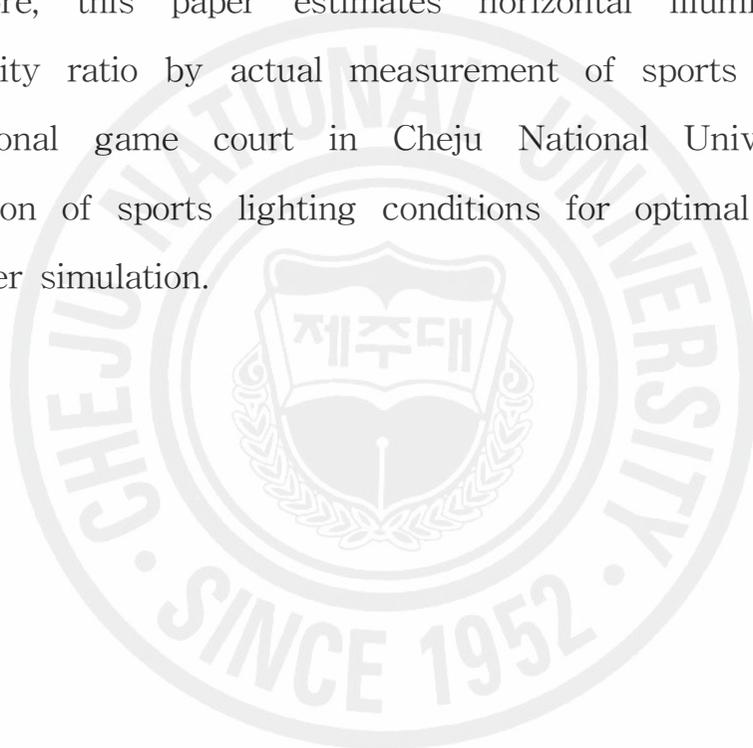
Supervised by professor Seong-Bo Oh

Summary

This paper presents the simulations on the lighting design and actual measurement analysis for recreational sports facility. Based on illumination requirements, sports may be divided into two groups - aerial sports and ground level sports - and within these two group, they can be further divided into multidirectional sports and unidirectional sports. Typical multidirectional aerial sports include basketball and tennis. For

aerial sports, the players and spectators view the playing object from multiple positions, normally looking downward or horizontally, but occasionally upward. These sports require well distributed horizontal illumination and uniformity according to aiming.

Therefore, this paper estimates horizontal illuminance and uniformity ratio by actual measurement of sports lighting at recreational game court in Cheju National University and evaluation of sports lighting conditions for optimal design by computer simulation.



I. 서 론

현대사회는 물질문명이 발달하고 그로 인한 인간생활의 여유로움과 더불어 삶의 질을 추구하고자 하는 웰빙(well-being)의 욕구가 모든 분야에 있어서 증가하는 추세이다. 그에 따라 보다 윤택한 삶과 즐거움을 영유하기 위하여 레저 스포츠에 많은 관심을 갖게 되었다. 한편 산업기술이 발전함에 따라 조명기술이 발전하게 되고 스포츠의 활동 시간대도 주간에서 야간으로 확대되는 현실에 부응하여 야간 스포츠 활동을 가능하게 하는 각종 옥외 스포츠를 위한 조명기술이 개발되고 있다[1].

스포츠 종목의 특성에 따라 야간조명 기법으로 스포츠를 구분하여 보면, 경기면 즉 수평면 조명을 강조하는 지상 스포츠와 경기면 위의 공간조명 즉, 수직면 조명을 강조하는 공간 스포츠로 나눌 수 있다. 이것은 다시 다 방향 스포츠와 일정한 경기진행 방향을 갖는 단 방향 스포츠로 나눌 수 있다.

다 방향 공간 스포츠에서는 구기 운동을 대표적인 예로 들 수 있으며 운동기구인 볼의 추적을 위한 수직면 조도의 확보가 절대적으로 필요하다. 따라서 개당 광출력이 크고 수명이 긴 광원을 선정하여야 한다. 또한 광색과 연색성이 우수한 것이 바람직하며 주위온도의 변동에 대해서도 안정적인 것이 좋다.

아울러 옥외 스포츠 조명에 있어서는 경기 영역과 경기 영역 상부의 공간 전반에 걸쳐 어느 정도 균일한 조도를 갖추는 것이 중요하다. 공이 움직이는 경기 공간의 한 부분과 다른 부분의 조도가 급격하게 차이가 나면 마치 공이 상승하거나 하강하는 것처럼 보일 수도 있다. 조명 빔이 부적절하게 겹쳐질 때 이러한 현상이 발생하게 된다. 그리고 다음으로 선수와 관객의 시야의 변화에 따른 조명광원의 직접 글레어(glare)를 방지하는 것 또한 중요한 과제라 할 수 있다. 반면 단 방향 공간 스포츠의 예들인 골프, 사격, 스키점프 등은 정해진 목표지점으로 일정하게 진행하여 나아가는 대표적인 단 방향 공간 스포츠로서

조명광원의 빛이 경기자의 시야에 직접 들어오지 않도록 에이밍의 방향과 경기진행 방향은 순방향으로 유지하여야 한다[2].

스포츠 시설을 위한 조명 설계는 사용자 네 그룹을 위해 보다 주의 깊게 설계가 이루어져야 한다. 즉, 경기자, 관계자, 관중 및 경기중계자들에게 경기를 아무런 불편 없이 치를 수 있어야 하고 이러한 경기를 사람들에게 아무런 거부감 없이 중계를 할 수 있도록 보다 나은 서비스를 제공하기 위하여 주의 깊게 배려해야 한다. 이를 위하여 적절한 스포츠 조명기준은 스포츠 별로 여러 측면에서 고려되는데 이들은 수평면 조도, 수직면 조도, 균제도, 글레어지수 및 연색성에 대하여 고려하여야 한다[1].

대학캠퍼스는 젊은이들이 꿈과 낭만을 키워나갈 수 있어야 하며 진취적 기상을 연마할 수 있는 다양한 스포츠 설비를 갖추고 있어야 한다.

대학의 스포츠 시설에는 지역사회에 기여할 수 있는 공식적 대회를 치를 수 있음은 물론 레크리에이션용 스포츠설비를 다양하고 안전하게 활용할 수 있어야하고 야간에도 학과 또는 동아리 단위의 스포츠 활동을 원활하게 진행할 수 있는 적절한 조명 설비를 갖추어 안락하고 안전한 경기가 되도록 하여야 한다.

이 논문에서는 대학에서 대다수 학생들이 즐기고 많이 애용하는 제주대학교 학생회관 앞 한라터 레크리에이션 스포츠 설비인 야외 족구장과 농구장의 조명상태를 실측에 의해 수평면 평균조도 및 균제도를 분석 평가하여 야간의 야외 레크리에이션 설비로 활용할 수 있는 안정된 조명 설계를 통하여 광원의 선정, 등기구의 배치와 조사(aiming) 등을 고려한 대학 스포츠 시설의 조명설계 모델을 제시 하고자 한다.

Ⅱ. 스포츠시설 조명 현황 분석

이 장에서는 측정 및 해석에 관련된 KS A3011[3]의 조도 기준에 따른 족구장과 농구장의 수평면조도와 균제도에 대하여 제시하였으며 정확한 현장 측정 데이터의 신뢰도를 확보하기 위하여 족구장과 농구장의 넓이를 실측하고 주변의 등기구 설치 현황을 조사하였다.

그리고 정확한 측정을 위하여 직사각형으로 구분된 그리드(grid)로 나누어, 족구장은 120개의 그리드로 농구장(반코트 포함)은 152개의 그리드로 나누어 측정오차를 최소화 할 수 있는 방법으로 조도를 측정하고 수평면 평균조도 및 균제도를 구하여 현재 현황을 정확하게 분석하였다.

1. 조도기준

체육 행사 및 문화 행사를 효율적으로 운용하기 위해서는 선수 및 진행 관계자, 관객과 같은 활동 주체 및 환경 등을 고려해야 한다. 경기진행의 주체인 선수, 심판, 경기 관계자가 최고의 능력을 발휘하기 위해서는 경기장에서 일어나는 모든 사항을 분명하게 인식 할 수 있도록 하여야 하고 관객들은 쾌적한 환경에서 선수들의 동작과 경기진행 사항을 관전할 수 있어야 하며 또한 조명은 비상시 관객들이 안전하게 시설물에 입·출입할 수 있는 안전 보장이 선행되어야 한다[4].

이 요구사항은 여러 가지 조도기준을 고려하여 계획하여야 하며 이러한 조도기준을 바탕으로 경기 대상물을 잘 보며 쾌적하고 안전한 경기를 하기 위해서는 조도가 높고 균일한 것이 좋다. 그리고 경기에 중대한 지장을 주지 않도록

록 조명기구로부터 직접 눈부심을 가능한 줄이도록 하여야 하며 방전등을 상용주파수로 점등하는 경우에는 스트로보스코픽(stroboscopic) 현상을 될수 있는 한 줄이도록 한다. 조도기준이 경기 종류와 장소에 따라 KS A3011에 추천되고 있다[3]. 조도기준과 균제도가 조명기구의 배치와 부착높이를 결정하게 된다. 경기영역 내에서 평균조도와 최소 조도의 비가 클수록 좋은데, 대개 일반경기에서는 2:1 이상이 이상적이다. Table 1에 족구장 규격에 해당하는 옥외 테니스 코트와 농구장에 대한 수평면 평균조도와 균제도에 대한 KS기준치를 나타내고 있다.

Table 1 Standard illuminance of KS

| Sports Class | Horizontal average illuminance[lx] | Uniformity [$\frac{\min.}{avg.}$] |
|------------------------------|------------------------------------|--|
| Tennis or jokcu (outdoor) | 250 or more | 0.5 or more |
| Basketball (outdoor) | 100 or more | 0.5 or more |

2. 등기구 설치 현황

현재 제주대학교 학생회관 앞에 있는 한라터 레크리에이션용 경기장에는 족구장 가로 17.8[m]와 세로 15.8[m]이고 농구장 가로 11.81[m]와 세로 31.1[m]의 규격을 갖추고 있다. 그리고 야간 경기를 위한 조명등은 Table 2와 같이 학생

회관 벽면에 메탈 헬라이드등 1[kW] 1개와 고압 수은등 250[W] 3개의 투광기가 설치되어 있으며 경기장 주위에는 등기구 폴(pole) 높이가 4[m]인 고압 나트륨등 150[W] 5개가 조명에 이용되고 있고 Fig. 1 에서 경기장 배치와 규격 그리고 등기구가 배치된 위치를 알 수 있다.

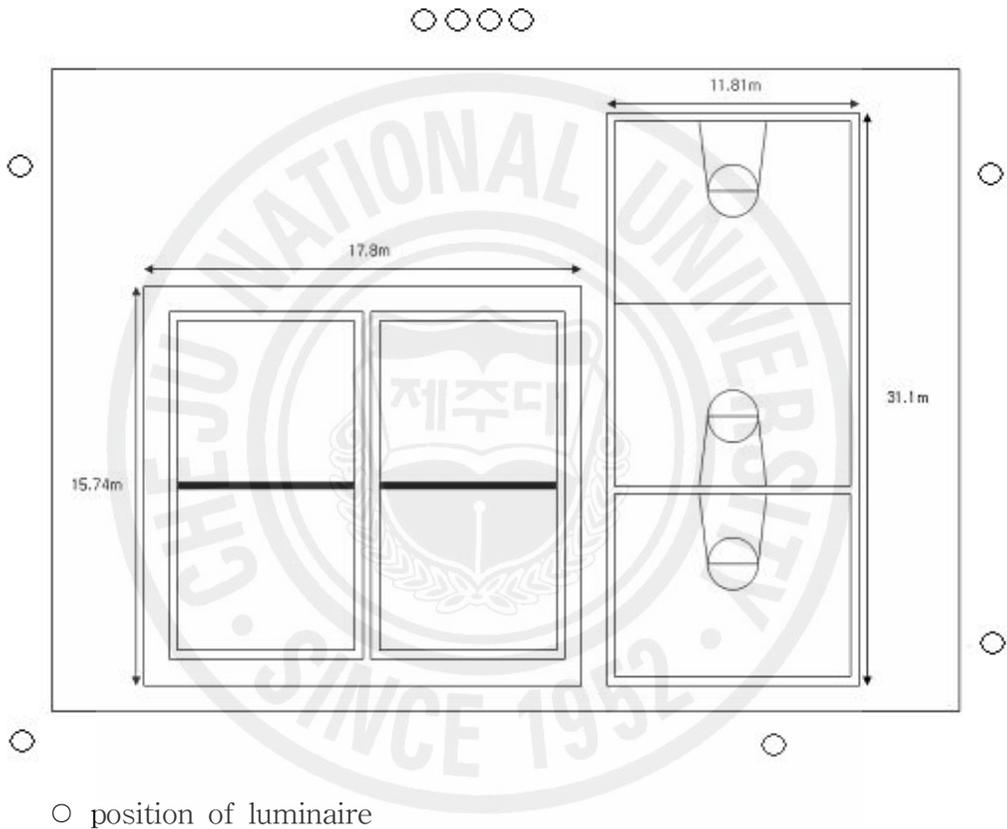


Fig. 1 Luminaire arrangement of sports facility in front of Cheju National University Student Hall

Table 2 Lighting specification of recreational sports facility

| Place | Light source |
|--|--|
| Wall of Cheju National University Student Hall | 1000[W] metal halide lamp, 1ea. 250[W] mercury lamp, 3ea. |
| Surrounding of playing area | 150[W] sodium lamp, 5ea. |

3. 그리드의 구성에 따른 조도측정과 계산

일몰과 동시에 등기구를 모두 켜놓고 달이 없는 기간을 정하여 밤 9시부터 레크리에이션 경기장의 조도를 측정 하였고, 측정에 사용한 조도계는 YOKOGAWA 51001 디지털 조도계를 사용하였으며, 측정 시 수평면 조도는 경기장 바닥면의 조도 값을 측정하였다.

1) 조도측정

정확한 조도측정을 위하여 옥내외 설치의 스포츠 영역은 직사각의 그리드로 구분되어야 하고, 각 그리드의 측정과 계산은 각각의 직사각형의 중앙에서 이루어져야 한다. 측정되어진 조도값과 계산된 값의 비교는 각각 하나하나에 대해서 이므로 그리드 배치는 각각에 대해 똑같아야 한다. Fig. 2는 측정 영역의 크기에 따라 고려되어진 그리드점의 실제적인 개수의 대략적인 표시를 보여주고 있다[5].

조도 실태 조사를 통한 측정에서 족구장의 면적이 17.8×15.8 [m] 이므로 가로 1.48[m] 12등분, 세로 1.58[m] 10등분하고 조도측정은 120그리드로 구분한 후에 조도 측정을 하였으며 농구장의 면적이 11.81×31.1 [m] 이므로 가로 1.89[m]

8등분, 세로 1.94[m] 19등분 하고 조도 측정은 152그리드로 구분한 후에 조도 측정을 실시하였다.

단위구역의 평균조도를 구하는 데는 여러 가지 방법이 있으나 이 논문에서는 레크리에이션 경기장 전체를 한 단위구역으로 보고 Fig. 3와 Fig. 4와 같이 직사각형의 그리드로 구분한 후 조도 측정하여 평균조도 산출법을 사용하여 계산하였다.

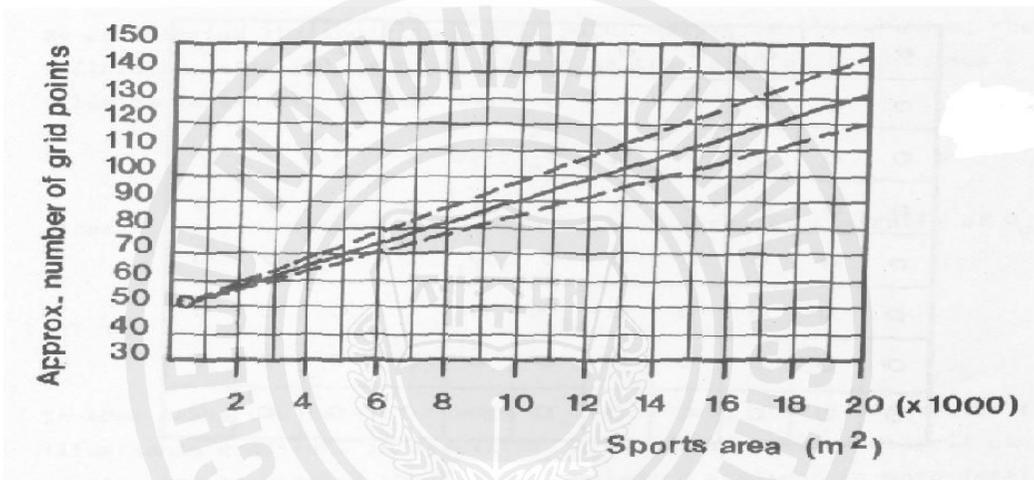


Fig. 2 The number of grid by sports area

최종적인 그리드 수는 조명되어지는 영역의 경계들이 고려되거나 닫힌 직사각형의 길이와 폭에 따른 점의 다수로 선정되어야 하고 그리드의 형태는 각각이 대략 정방형이라야 더욱 적절하다.

그러므로 실측시의 그리드를 축구장과 농구장을 1.48×1.58[m]과 1.89×1.94[m]로 하여 가능한 정방형으로 나누었고, 그리드 수도 Fig. 2의 스포츠영역의 면적과 그리드 수 보다 많은 분할을 통하여 오차를 최소화 하도록 하였다.

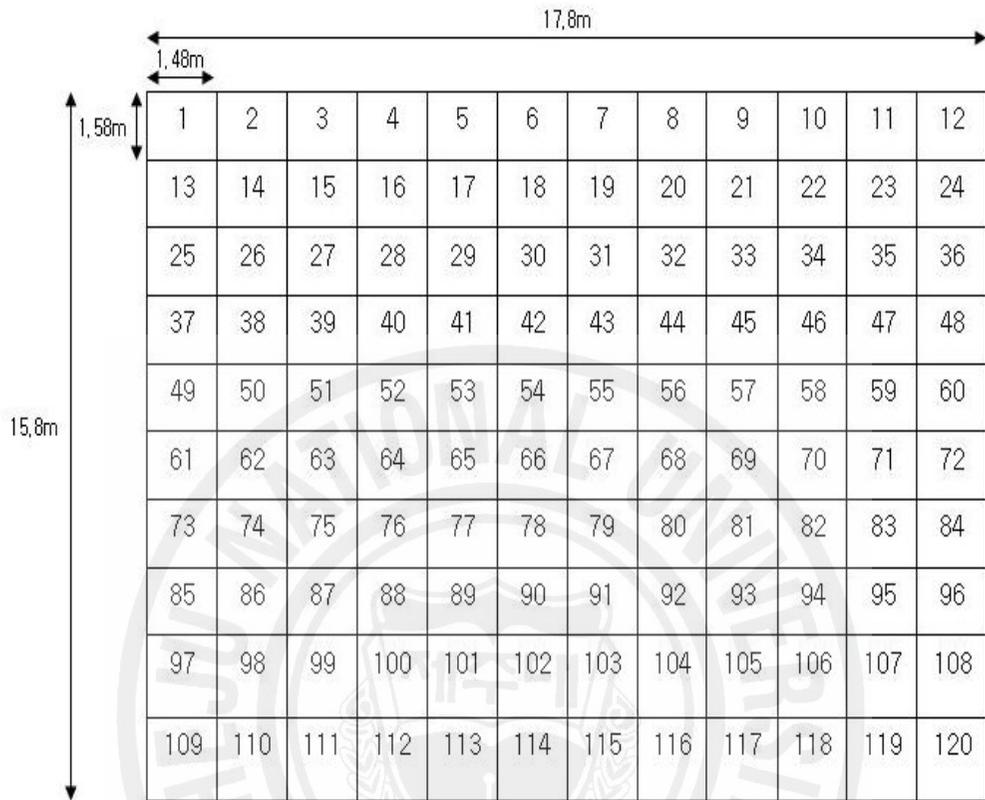


Fig. 3 The number of grid at jokcu court

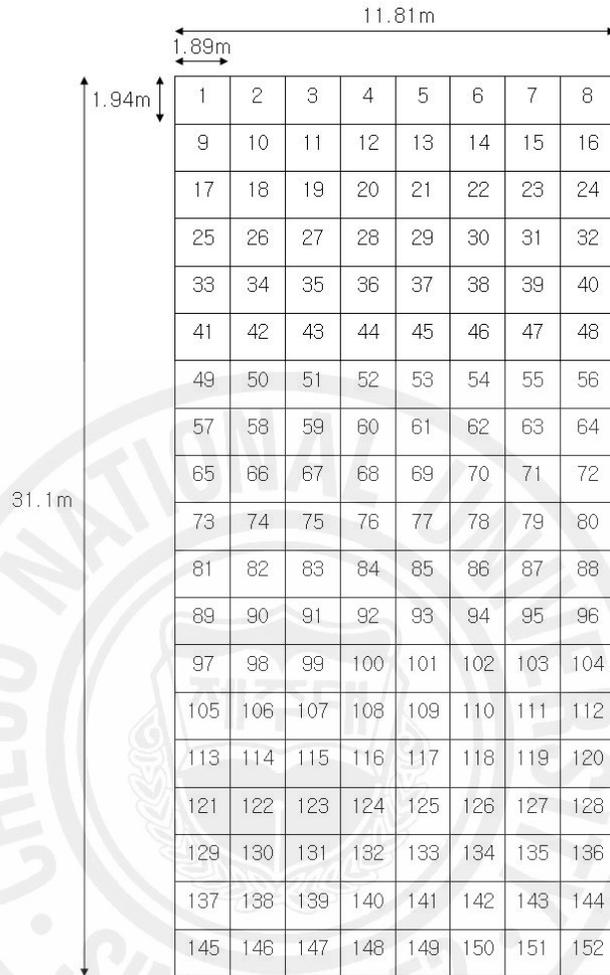


Fig. 4 The number of grid at basketball court

족구장의 120개 그리드로 구획한 각 점에서 실측한 수평면 조도값을 Fig. 5에 나타내고 있으며 이때의 최대조도값은 26.1[lx]이고 최소조도값은 4.0[lx]로 측정되었다.

그리고 농구장 152개의 그리드로 구획된 지점내에서 실측한 수평면 조도값은 Fig. 6에 나타내고 있으며 이때의 최대조도값은 36.4[lx]이고 최소조도값은

3.4[lx]로 측정되었다. 따라서 이 두 코트의 최대조도값과 최소조도값이 현격한 차이가 있음을 보여 주고 있으며, 조도분포가 불규칙하고 경기장 내외가 전반적으로 조도기준에 미달되어 조명실태가 열악함을 알 수 있었다.

| | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 21.1 | 23 | 26.1 | 24.5 | 25.7 | 23.7 | 24 | 16 | 21.3 | 23.9 | 23.7 | 21.1 |
| 18 | 19 | 22.6 | 19.4 | 20.4 | 20.2 | 20.5 | 16.7 | 24.4 | 25.9 | 22.3 | 17.8 |
| 17.3 | 16.6 | 19.6 | 16.3 | 15.8 | 19.2 | 17.5 | 17.3 | 23 | 22.4 | 17.2 | 16 |
| 13.5 | 13.5 | 16.1 | 15.5 | 15.3 | 15.1 | 16.0 | 18.6 | 21.5 | 19.4 | 15.6 | 14.4 |
| 12.1 | 13.3 | 13 | 14.1 | 12.5 | 13 | 12.7 | 14.6 | 17.6 | 14.9 | 13.6 | 13 |
| 11.8 | 12.4 | 12.3 | 13.5 | 10.4 | 10.7 | 11.7 | 13.4 | 15.1 | 9.4 | 10.6 | 9.9 |
| 10.2 | 11.5 | 11.4 | 11.6 | 10.1 | 8.8 | 9.5 | 9.7 | 11.7 | 10.8 | 10 | 9.5 |
| 4.0 | 10.2 | 9.4 | 10.3 | 8.5 | 8.4 | 8.9 | 8.2 | 9.8 | 10.2 | 9.3 | 8.7 |
| 7.9 | 9.3 | 7.3 | 8.7 | 7.8 | 7.5 | 7.8 | 8.4 | 8.5 | 9.2 | 8.3 | 7.9 |
| 7.4 | 8.2 | 6.3 | 7.7 | 6.7 | 6.7 | 7.6 | 7.9 | 7.9 | 8.7 | 7.0 | 6.7 |

Fig. 5 The measurement of illuminance value at jokcu court

| | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| 36.4 | 30.0 | 22.5 | 18.2 | 11.0 | 9.4 | 9.4 | 8.6 |
| 31.9 | 26.6 | 21.0 | 17.2 | 10.2 | 10.6 | 8.3 | 8.8 |
| 30.7 | 24.2 | 19.2 | 15.1 | 10.0 | 10.4 | 7.1 | 7.8 |
| 28.4 | 21.9 | 18.7 | 15.5 | 10.4 | 10.4 | 5.3 | 7.1 |
| 28.2 | 21.3 | 18.2 | 14.0 | 10.1 | 8.8 | 6.6 | 6.6 |
| 26.1 | 20.8 | 17.0 | 13.4 | 10.2 | 8.2 | 6.5 | 5.5 |
| 24.4 | 20.4 | 15.2 | 12.2 | 10.2 | 8.1 | 6.1 | 5.3 |
| 22.7 | 18.2 | 14.0 | 12.1 | 8.1 | 8.0 | 6.1 | 4.7 |
| 21.9 | 18.9 | 15.6 | 10.4 | 7.8 | 7.6 | 5.2 | 4.3 |
| 21.1 | 17.0 | 12.7 | 9.5 | 7.2 | 6.9 | 4.8 | 3.9 |
| 20.2 | 16.4 | 11.4 | 9.4 | 7.5 | 6.4 | 4.5 | 4.0 |
| 17.0 | 16.2 | 9.9 | 8.3 | 7.8 | 6.4 | 4.7 | 4.1 |
| 13.6 | 13.3 | 8.7 | 6.3 | 5.9 | 5.9 | 4.3 | 3.7 |
| 11.0 | 11.2 | 7.8 | 6.2 | 4.9 | 5.5 | 4.1 | 3.5 |
| 8.6 | 8.9 | 7.4 | 6.1 | 4.9 | 5.1 | 4.0 | 3.4 |
| 7.9 | 7.5 | 6.7 | 5.5 | 4.9 | 4.5 | 3.9 | 3.6 |
| 7.4 | 8.0 | 7.2 | 5.4 | 5.3 | 4.5 | 4.1 | 3.4 |
| 7.3 | 6.1 | 5.5 | 5.2 | 4.9 | 4.4 | 4.0 | 3.5 |
| 6.4 | 5.9 | 5.7 | 4.7 | 5.1 | 4.3 | 3.4 | 4.2 |

Fig. 6 The measurement of illuminance value at basketball court

2) 조도계산

다수 점의 조도 측정치에서 측정범위내의 평균조도를 산출하려면 측정범위를 적당한 등면적의 그리드로 나누고, 우선 그리드마다의 실측조도치를 합하여 그리드 수로 나누어서 구하며 식 (1)과 같다.

$$E_{ha} = \frac{1}{n}(E_{h1} + \dots + E_{hn}) \quad (1)$$

여기서 E_{ha} 는 수평면 조도 평균값이고, n 은 그리드 수이며 $E_{h1} \dots E_{hn}$ 은 측정된 n 점에서의 수평면 조도값이다.

식 (1)에 의한 평균조도 및 균제도의 계산 결과는 Table 3과 같다.

족구장 120그리드 측정 후 수평면 조도를 계산한 결과 평균조도는 13.8[lx]이고 균제도는 0.24임을 알 수 있었고, 농구장 152 그리드로 분할하여 측정 후 수평면 조도를 계산한 결과 평균조도는 10.5[lx]이고 균제도는 0.37로 Table 1에 제시한 KS조도 기준치에 현격한 차이가 있음을 보여주었다.

그러므로 측정결과 해석을 통하여 한라터 레크리에이션용 스포츠 코트의 조명시설은 매우 열악한 상태를 보여줌으로써 체계적인 설계모델 제시를 통하여 개선이 요구되어지고 있다.

Table 3 The illuminance caculation results of sports facility

| Sports Class | Horizontal average illuminance[lx] | Uniformity [$\frac{\min.}{avg.}$] |
|------------------------------|------------------------------------|--|
| Tennis or jokcu (outdoor) | 13.8 | 0.24 |
| Basketball (outdoor) | 10.5 | 0.37 |

III. 조명 모델 설계

이 장에서는 사용 장소에 따른 광원의 특성을 나타내고 레크리에이션 경기장에서 사용하는 광원 및 조명기구를 선정하였다. 레크리에이션 경기장의 각 영역별 조도기준에 적합한 조도를 확보하기 위해 필요한 조명 설비를 적절하게 설계 배치하여 에이밍(aiming)에 따른 시뮬레이션을 실시하였다.

1. 등기구 선정

1) 광원의 종류 및 특성

Table 4는 각종 광원의 특성에 대하여 나타내었다. 고압 수은 램프(high pressure fluorescent mercury lamp : HF)는 휘도가 높으며 한 등당 전력 및 광속이 크고 배광제어가 용이하다. 또한 수명이 길고 효율이 백열 전구에 비해서 높아 도로 조명, 고천장 공장조명, 투광 조명에 이용한다. 고압 수은 램프의 용량은 40~1,000[W]이며 효율은 40~45[lm/W]이고, 수명은 약 10,000[h]이다. 색온도는 3,300~4,200[K]이며 연색성은 23~58[Ra]이고, 전광속은 14,000~80,000[lm]이다.

메탈 할라이드 램프(metal halide lamp : MH)는 고휘도이고 한 등당 광속이 많고 배광제어가 용이하며 수명이 길다. 또한 효율이 높고 자연광에 가까운 광색을 낼 수 있으므로 기존의 고압수은등을 대체하여 옥외조명이나 공장조명, 그리고 공공시설 등에 있어서 옥내 고조도 조명에 사용되고 있으며, 소형인 경우 전시조명용으로 많이 사용된다. 이와 같은 일반 조명용 외에도 특수한 첨가 금속을 이용하여 집어등용, 방사기용, 광화학용, 동식물육성용 등에 광범위하게 사용되고 있다[6].

Table 4 Characteristics of the lighting sources

| Lighting source | Luminous flux | Luminous efficacy | Life span | Color rendering | Control of luminous intensity distribution | Lumen maintenance |
|-----------------|---------------|-------------------|-----------|-----------------|--|-------------------|
| IL | ★★ | ★ | ★ | ★★★★ | ★★★★ | ★★ |
| HF | ★★★ | ★★ | ★★★★ | ★★★★ | ★★ | ★★ |
| MH | ★★★★ | ★★★ | ★★★ | ★★★ | ★★★ | ★★★ |
| NH | ★★★★ | ★★★★ | ★★★★ | ★★ | ★★★ | ★★★★ |

IL : Incandescent Lamp

★ The more symbols, the better characteristics.

메탈 헬라이드 램프의 용량은 70~2,000[W]이며 효율은 70~80[lm/W]이고 수명은 약 3,000~10,000[h]이다. 색온도는 4,500~6,000[K]이며 연색성은 80~90[Ra]이고 전광속은 13,000~185,000[lm]이다.

고압 나트륨 램프(high pressure sodium lamp : NH)는 백색광원 중에서 가장 효율이 높고 황백색의 광색은 따스한 느낌을 주므로 도로조명이나 광장조명과 같은 옥외조명에 많이 사용되고 있다. 경우에 따라서는 메탈 헬라이드등과 조합하여 스포츠조명과 같은 용도에서 효율을 향상시키려는 목적으로 사용된다.

고압 나트륨 램프의 용량은 20~1,000[W]이며 효율은 100~150[lm/W]이고 수명은 약 16,000~24,000[h]이다. 색온도는 2,200[K]이며 연색성은 28[Ra]이고 전광속은 6,000~133,000[lm]이다.

상기에서 광원에 대하여 비교해 본 결과에 따라 연색성이 중요시되는 스포

츠 조명이나 옥외조명에 많이 이용되는 메탈 헬라이드 램프를 시뮬레이션에 사용할 조명으로 선정하였다[4].

메탈 헬라이드 램프중에 400[W], 1[kW], 1.5[kW]를 사용하여서 시뮬레이션을 구동시켜 보았다.

2) 메탈 헬라이드 램프의 특성

메탈 헬라이드 램프는 앞에서 살펴 본 바와 같이 고휘도 방전등(high intensity discharge lamp : HID) 중의 하나로써 조명 효율이 비교적 높다. 한등당 광속이 많고 배광제어가 용이하며, 경제적으로는 수명이 길며 특별한 연색성의 능력을 가지고 있다. 특히 색깔을 필요로 하는 곳에는 가장 적당하다. 다만 평균수명이 수은 램프 보다 낮으며 다른 광원에 비해 가격이 약간 비싼 편이다.

Table 5 에서는 메탈 헬라이드 램프의 규격별 특성을 알 수 있다.

Table 5 Characteristics of metal halide lamps

| Char. Spec. | Input voltage [V] | Tube current [A] | Tube voltage [V] | Luminous flus [lm] | Life span [h] |
|-----------------|-------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|------------------|
| 150[W] | 220 | 1.0 | 100 | 13,000 | 9,000 |
| 175[W] | 220 | 1.5 | 130 | 14,000 | 9,000 |
| 250[W] | 220 | 2.1 | 130 | 21,500 | 9,000 |
| 400[W] | 220 | 3.25 | 135 | 40,000 | 10,000 |
| 1,000[W] A Type | 220 | 7.5 | 145 | 90,000 | 9,000 |
| 1,000[W] B Type | 220 | 4.5 | 250 | 109,000 | 9,000 |
| 1,500[W] | 220 | 6.4 | 250 | 145,000 | 3,000 |
| 2,000[W] | 220 | 9.2 | 230 | 185,000 | 6,000 |

3) 조명기구 특성

조명기구의 선정은 조명의 질을 결정하는데 매우 중요하므로 조명기구의 효율과 조명율이 높아야 하며, 눈부심의 제한에 특히 유의 하여야 한다. 스포츠 시설에 사용하는 조명기구는 각각 단독 또는 복수개로 구성된 장치를 사용하며 불 등의 스포츠 용구가 충돌하여 조명기구에 손상을 입히지 않도록 적당한 보호망 등을 부착하는 것이 좋다. 또한 조명기구에서 발생하는 눈부심 효과를 줄이기 위해 다음과 같은 사항을 고려하는 것이 바람직하다. 정확한 시각적 통계를 위해 광원 크기가 작은 램프를 사용해야 하고 빔의 퍼짐각을 참조해야 한다. 빔의 퍼짐각이 너무 크면 빛이 낭비되고 관객들의 눈부심이 증가하게 된다. 빛을 받은 표면으로부터 등기구까지의 거리가 증가할수록 동일한 경기장 표면을 비추기 위해 빔의 퍼짐각이 감소되어야만 한다. 그리하여 시뮬레이션에 사용한 조명기구는 경기장 주변에는 컷오프(cutoff)형, 학생회관 벽면 조명등은 조명거리가 길어 배광곡선이 한쪽으로 좁게 향한 투광기를 사용하는 것으로 선정하였다. Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9는 각각 400[W], 1[kW], 1.5[kW]의 배광곡선과 광원의 특성을 나타내고 있다.

Test: 1193051801
Manufacturer: LITHONIA ARCHITECTURAL OUTDOOR
TYPE 5, SHORT, CUTOFF
Luminaire catalog: KSF2 400M R5S
Lamp: 400 WATT METAL HALIDE (ED-28 ENVELOPE)
Lamp catalog: MH400/U/ED28

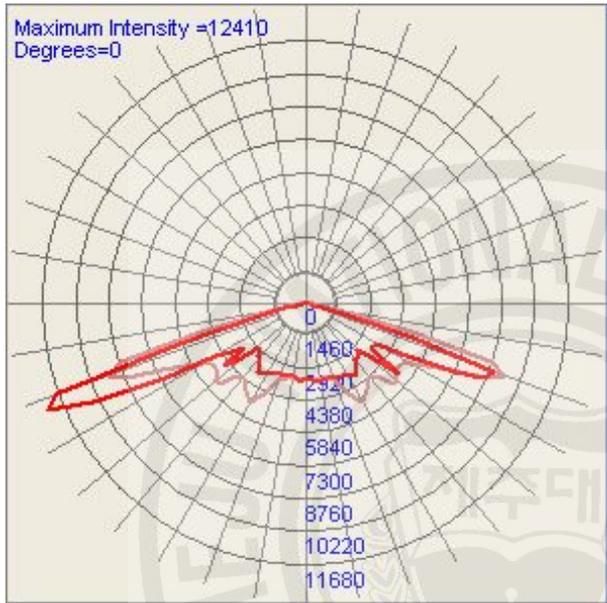


Fig. 7 Distribution curve of luminous intensity [400W]

Test: 1193022601
Manufacturer: LITHONIA ARCHITECTURAL OUTDOOR
TYPE 5, SHORT, CUTOFF
Luminaire catalog: KSF3 1000M R5S
Lamp: 1000 WATT METAL HALIDE - BT-37 ENVELOPE
Lamp catalog: M1000/U/BT-37

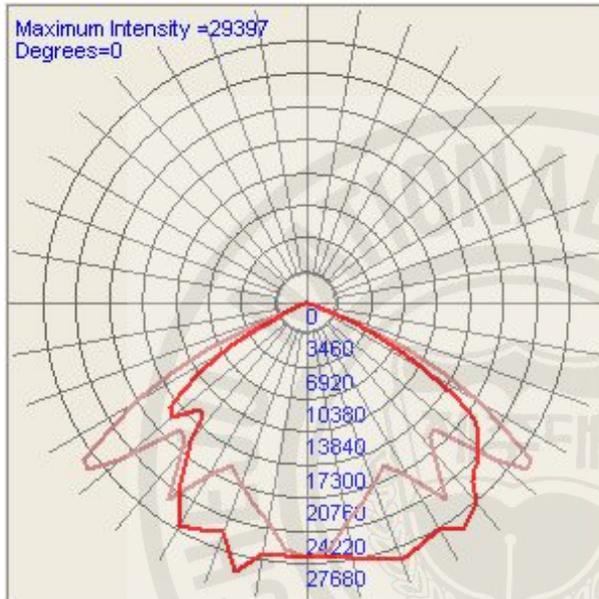


Fig. 8 Distribution curve of luminous intensity [kW]

Test: 98120902
 Manufacturer: LITHONIA LIGHTING
 SPORTSLIGHTER W/DIFFUSE REFLECTOR, FLUX MANAGER, CLEAR GLASS
 Luminaire catalog: TSP 1500M GP24WFX
 Lamp: ONE 1500-WATT CLEAR BT-56 METAL HALIDE, HORIZONTAL POS.
 Lamp catalog: M1500/BU-HOR

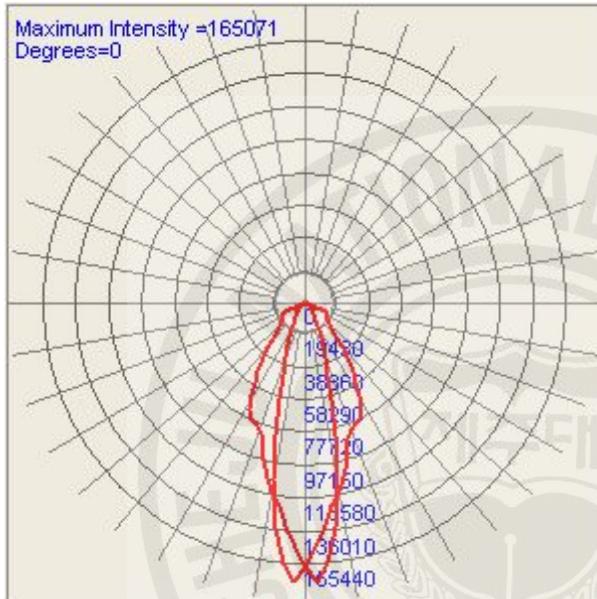


Fig. 9 Distribution curve of luminous intensity [1.5kW]

2. 등 기구 배열 및 폴 높이 선정

투광 조명등 높이가 너무 높으면 광 사용에 있어 손실이 생기고 조명의 균 일성이 깨지게 된다. 만약 너무 낮으면 빛이 낭비되고 관객들 눈 및 경기장에 인접한 지역에 눈부심 현상이 발생하며 공중에 뜬 공이 보이지 않게 된다. 족 구 코트의 조명 범위는 펜스, 스탠드 등으로 둘러싸인 테니스 경기를 위해 사

용되는 경기면과 같이 전체 영역으로 한다.

그리고 조명 기구의 배치는 테니스(족구) 코트의 조명에 있어서, 조명 기구는 원칙적으로 사이드라인과 평행하게 배치하는 것으로 한다. 다만 다수의 코트가 병렬로 연속하여 있는 경우에는 베이스 라인 후방의 코트 중간에 닿는 위치에, 2면 코트가 세로로 연속하는 경우에는 평행하게 코트마다 경계 부근에 배치해도 좋다. 배치의 기준은 Fig. 10과 같다[4].

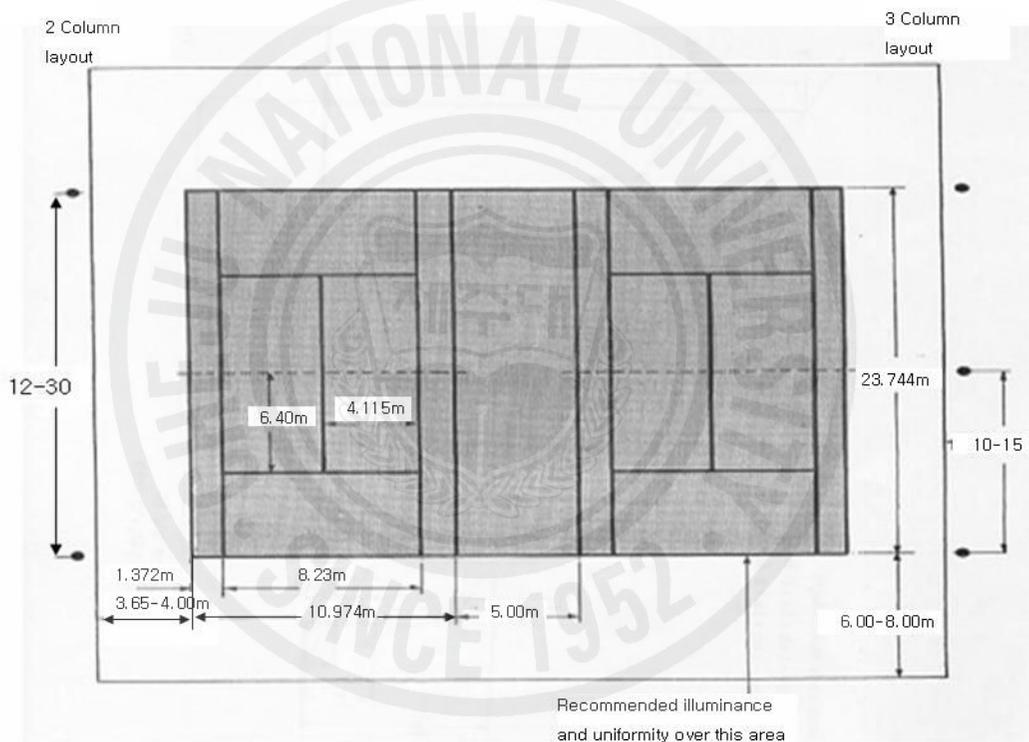


Fig. 10 Dimensions of tennis courts showing typical column layouts

Fig. 10의 왼쪽 등기구 배열처럼 등기구를 4개 배치하는 경우와 오른쪽 배열처럼 6개를 배치하는 경우가 있다. 학교 족구장은 정식 규격보다 규모가 작고 레크리에이션 경기를 하기 위해서 설계하였기 때문에 등기구 4개를 사용하여

배치하였다. 이 논문에서는 2면 코트 사이드라인상 평행으로 배열하였으므로 Fig. 11의 방법을 적용하여 폴 높이를 산정하였다. 그리고 테니스 코트에서의 조명기구 부착 높이는 식 (2)에 의해 결정하며 다만 최저 높이는 8[m]로 한다 [7].

$$H \geq 3 + 0.4L \quad (2)$$

여기서 H는 레크리에이션의 경우, 조명기구 최하단의 부착 높이[m]이며 L은 조명기구의 부착 간격[m]이다.

Fig. 11는 테니스 코트에서의 등기구 선정 방법에 대한 식 (2)를 설명하기 위한 입체적으로 도식하였다.

Fig. 12는 2면 코트에서의 베이스라인 후방의 코트사이에 배치하는 경우에 폴 높이산정을 위한 조명 폴과 코트 중심선 까지의 거리 L을 나타내는 방법을 제시하고 있다. 그러므로 학생회관 앞의 레크리에이션 경기장중 17.8×15.8[m]의 면적을 가지고 있는 족구장의 조명기구 배치 간격은 Fig. 11에서 L의 길이는 11.5[m]가 나왔으므로 폴의 높이는 레크리에이션 경기의 기준을 사용하고 식 (2)를 적용하여 산출한 결과에 따라 8[m]의 높이로 설정하였다.

General rule for mounting height
 Competition - $h_{min} = 7m + 0.4a$
 Recreation - $h_{min} = 3m + 0.4a$

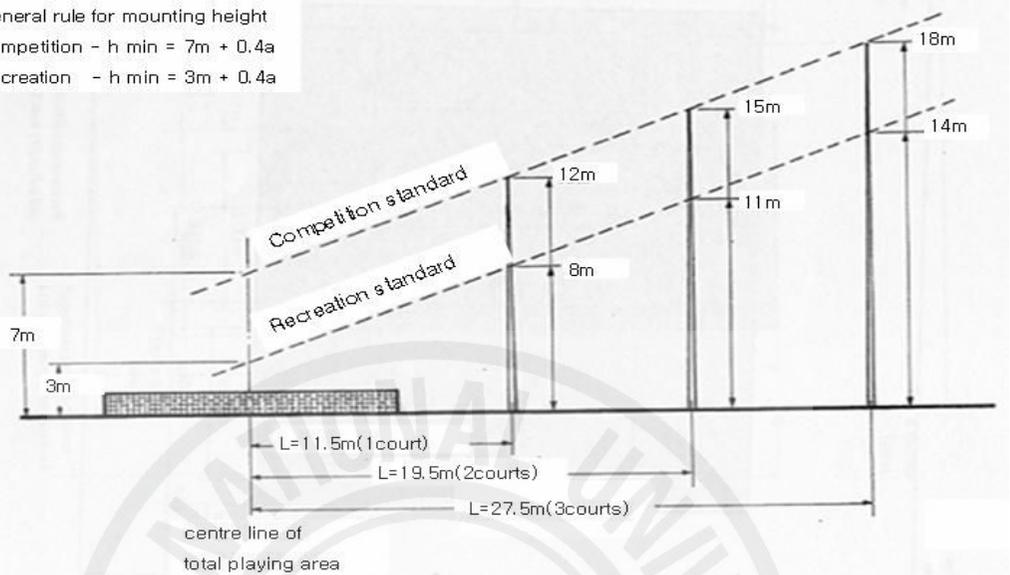


Fig. 11 Recommended mounting heights for outdoor tennis courts

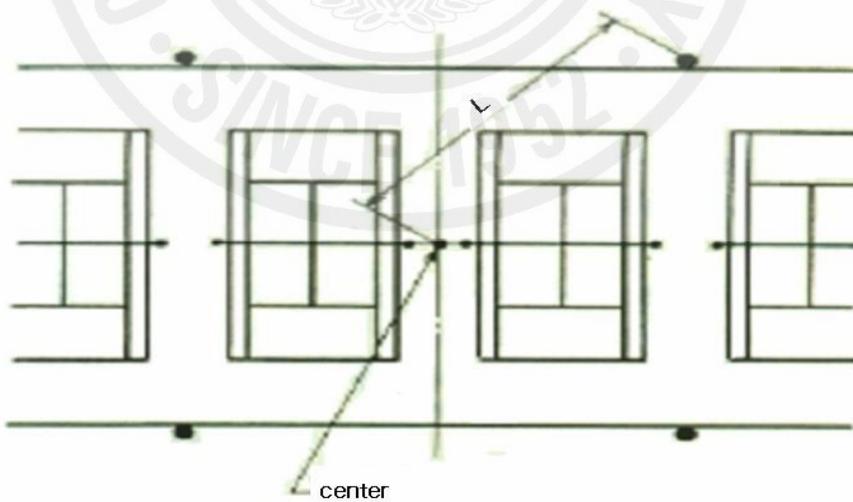


Fig. 12 Recommended mounting heights of back area

3. 등기구 에이밍

적절하고 균일한 조명설계를 위하여 등기구의 선정, 등기구 배열 및 폴 높이 선정도 중요하나 선정된 광원의 특성과 배광곡선을 고려한 등기구의 에이밍도 중요하다.

그러므로 에이밍 변화에 따라 조명코자하는 장소와 해당 영역에 필요로 하는 균일한 조도 확보는 물론 여러등을 설치시에 등기구 상호간 위치에 따른 에이밍의 고려는 충분히 검토하여야 보다 적절한 조명설계에 기여할 수 있다.

Fig. 13은 에이밍 조절을 하기 위한 방위각(orientation angle) 스펀각(spin angle)과 경사각도(tilt angle)를 나타내고 있으며 경사각도는 등기구가 향하는 최하점에서 올려서 조사되는 각도를 정의한다.

양의 경사각도는 북쪽 방향으로 향하게 등기구를 조사하는 것이고 음의 경사각도는 남쪽 방향으로 향하게 등기구를 조사할 때를 의미한다[8].

이 논문에서는 양의 경사각도를 적용하여 에이밍시 경사각도 10°, 15°, 20°의 조사 방향을 고려하여 시뮬레이션을 실시하였다.

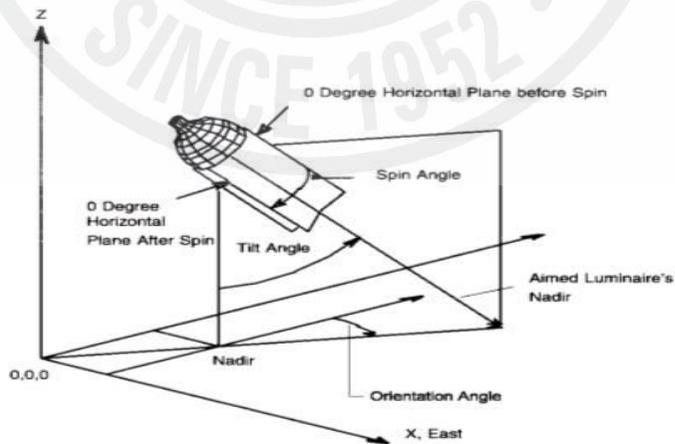


Fig. 13 Luminaire aiming angles

IV. 조명 시뮬레이션

시뮬레이션은 Lighting Technologies Inc.의 Lumen Designer를 이용하였다. 족구장과 농구장 방면에 각각 세 개의 등기구가 있는데 이 등기구들에 1[kW]와 1.5[kW]의 메탈헬라이드등 한 개를 이용해서 에이밍을 각각 10°에서 20°까지 변화를 주고 0.4[kW]와 1[kW] 메탈헬라이드 2등 병용한 등을 설치하여 앞서와 마찬가지로 에이밍을 각각 10°에서 20°변화를 주는 것으로 조명 시뮬레이션을 하여 각각 12가지 총 24가지의 경우에 대하여 해석하였다. 그리고 학생회관 벽면에 기 설치되어 있는 투광기를 활용하여 메탈헬라이드등 1.5[kW] 3개를 배치하고 각각 30°의 에이밍을 주고 고정하였다.

시뮬레이션 결과 등기구 갯수 및 에이밍 방법에 따라 해석한 결과 족구장의 경우는 1[kW] 1등 설치시는 Table 6에서 알수 있듯이 에이밍 20°인 경우가 수평면 평균조도 300[lx], 균제도 0.80으로 기준치를 만족하였다.

그리고 농구장의 경우는 Table 7에서와 같이 0.4[kW] 2등 설치시 에이밍 15°인 경우가 수평면 평균조도 170[lx], 균제도 0.55로 기준치를 만족하여 양호한 설계모델으로 타당하다고 사려되었고 시뮬레이션에 따른 조도분포도 및 계산은 Fig. 14 과 Fig. 15 에 나타내었다.

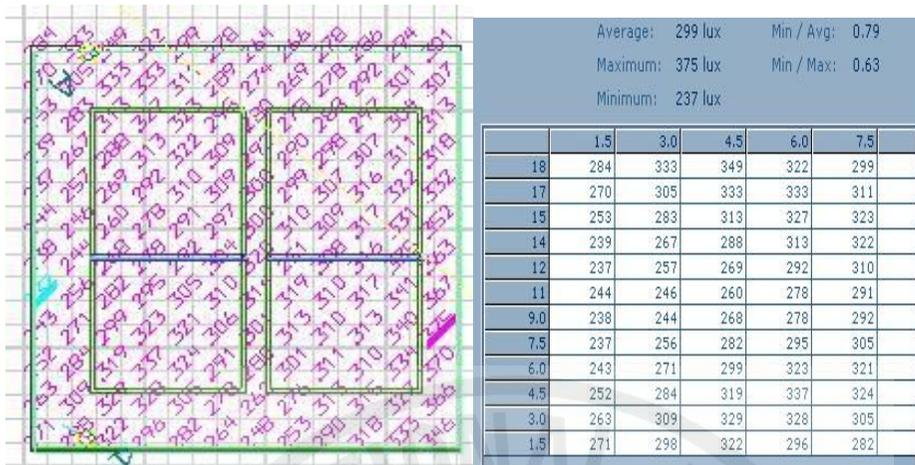
그리고 그 외의 시뮬레이션에 대한 조도분포도 및 계산은 부록에 제시하였다.

Table 6 The simulation results of jokcu court

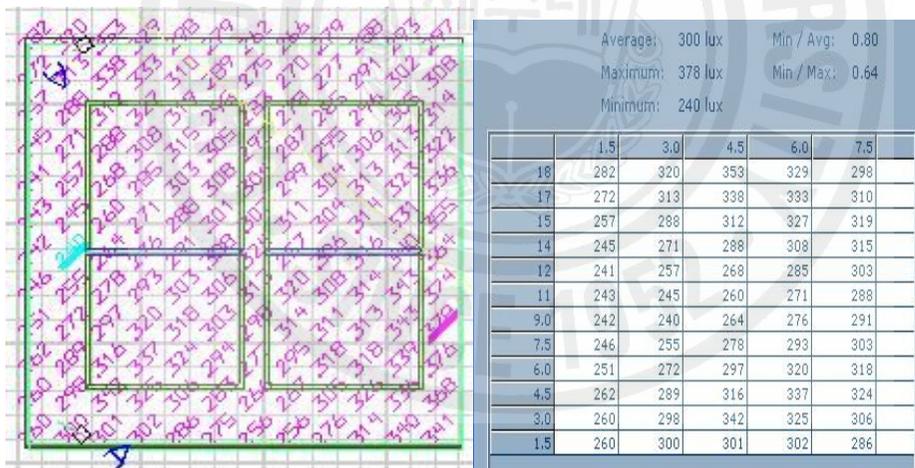
| Jokcu court | | Aiming (tilt angle; 10°) | | Aiming (tilt angle; 15°) | | Aiming (tilt angle; 20°) | |
|---------------------|---------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------|
| | | Illuminance [lx] | Uniformity | Illuminance [lx] | Uniformity | Illuminance [lx] | Uniformity |
| Luminaire (1ea.) | 1000[W] *3 | 282 | 0.57 | 299 | 0.79 | 300 | 0.80 |
| | 1500[W] *3 | 268 | 0.1 | 318 | 0.16 | 364 | 0.21 |
| Luminaire (2ea.) | 400[W] *3 | 114 | 0.72 | 113 | 0.72 | 112 | 0.72 |
| | 1000[W] *3 | 549 | 0.61 | 555 | 0.60 | 555 | 0.62 |

Table 7 The simulation results of basketball court

| Basketball court | | Aiming (tilt angle; 10°) | | Aiming (tilt angle; 15°) | | Aiming (tilt angle; 20°) | |
|---------------------|---------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------|
| | | Illuminance [lx] | Uniformity | Illuminance [lx] | Uniformity | Illuminance [lx] | Uniformity |
| Luminaire (1ea.) | 1000[W] *3 | 361 | 0.62 | 366 | 0.62 | 368 | 0.62 |
| | 1500[W] *3 | 506 | 0.51 | 460 | 0.27 | 500 | 0.33 |
| Luminaire (2ea.) | 400[W] *3 | 171 | 0.33 | 170 | 0.55 | 170 | 0.54 |
| | 1000[W] *3 | 497 | 0.53 | 505 | 0.53 | 506 | 0.51 |

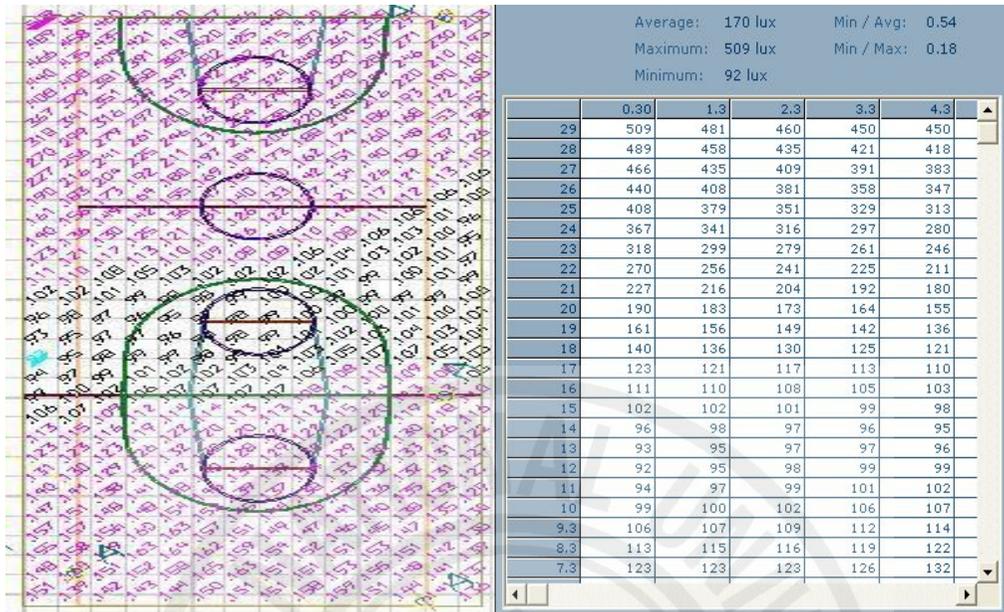


(a) Aiming (tilt angle 15°)

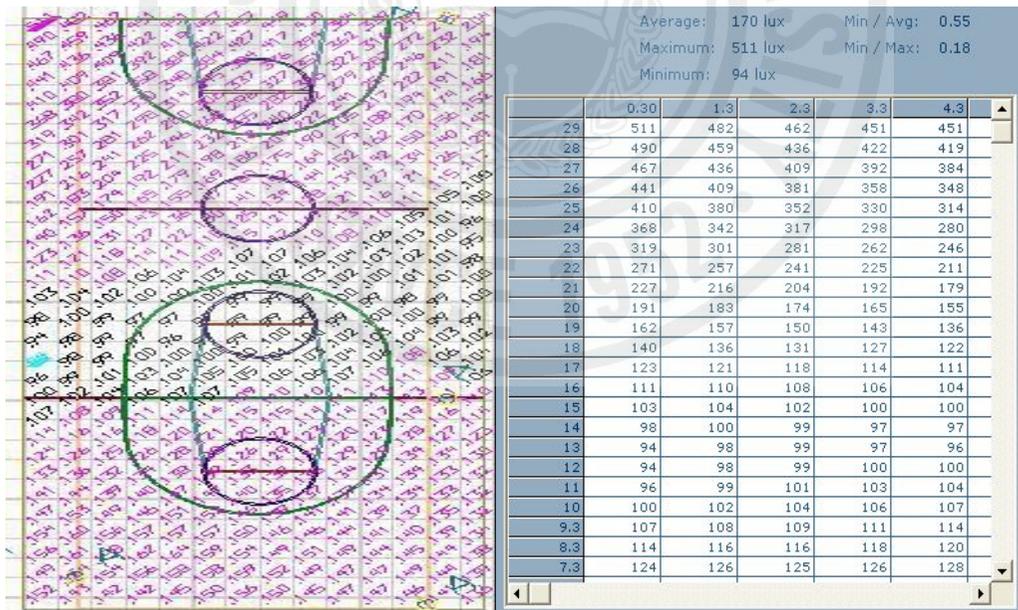


(b) Aiming (tilt angle 20°)

Fig. 14 Distribution of horizontal illuminance and uniformity at jokcu court



(a) Aiming (tilt angle 20°)



(b) Aiming (tilt angle 15°)

Fig. 15 Distribution of horizontal illuminance and uniformity at basketball court

V. 결과 및 고찰

제주대학교 학생회관 앞 한라터 레크리에이션 경기장 내의 야외 족구장과 농구장을 대상으로 넓이 실측 및 등기구 설치 현황 조사를 실시한 후 정확한 조도측정을 위하여 정방형에 가까운 직사각형으로 Fig. 3과 Fig. 4와 같이 그리드를 구분하여 측정오차를 최소화 하였다.

이를 바탕으로 수평면 평균조도 및 균제도를 계산한 결과 족구장은 평균조도 13.8[lx], 균제도 0.24이고, 농구장은 평균조도 10.5[lx], 균제도 0.37로 KS A3011에서 제시된 기준조도에 현저히 미달되는 조명 시설로, 체계적인 설계모델 제시를 통한 개선이 요구 되어 지고 있음을 알 수 있었다.

시뮬레이션에 이용한 광원은 Table 4에서 비교해 본 결과에 따라 연색성 및 효율이 좋으며 스포츠조명이나 옥외조명에 많이 이용되는 메탈 헬라이드 램프를 선정하였다. 또한 등기구는 조명의 질을 결정하는데 매우 중요하므로 조명기구의 효율과 조명율이 높으며 눈부심을 제한할 수 있는 배광곡선을 가진 것으로 선정하였고, 조명등 높이 및 배치는 학교 경기장이 정식 규격보다 규모가 작고 레크리에이션 경기에 사용되기 때문에 등기구 높이는 8[m]로 하였으며 등기구 배치는 경기 코트 경계부근에 4개를 배치하는 것으로 설계하였다.

시뮬레이션은 메탈 헬라이드등 0.4[kW], 1[kW], 1.5[kW]을 1등용 또는 2등용하여 24가지 경우에 대하여 모델링 하였다.

시뮬레이션 결과 Table 6과 Table 7에서 보는 바와 같이 학생회관 벽면에 기 설치되어있는 투광기를 활용하여 메탈 헬라이드등 1.5[kW] 3개를 설치하고 에이밍은 30°로 고정시킨 상태에서 족구장에는 메탈 헬라이드등 1[kW] 1등용 3개를 설치하고 에이밍 15°일 때 수평면 평균조도는 299[lx], 균제도 0.79이고 에이밍 20°일 경우는 수평면 평균조도 300[lx], 균제도 0.80으로 2개 모델 모두가 기준치를 만족하나 평균조도와 균제도가 양호한 에이밍 20°를 선택하였고

농구장에는 메탈 헬라이드등 0.4[kW] 2등 병용 3개를 설치하고 에이밍 15°일 때 수평면 평균조도 170[lx], 균제도 0.55이고 에이밍 20° 경우에는 수평면 평균조도 170[lx], 균제도 0.54로 에이밍 20°보다 에이밍 15° 경우가 균제도가 우수한 모델로 해석되었다.

따라서 레크리에이션 경기장에 가장 적절한 시뮬레이션 모델은 Table 8과 같다.

또한 농구장에는 한 폴에 1[kW] 1등용을 사용하지 않고 0.4[kW] 2등 병용을 설치하여 제시된 기준치를 만족하면서 에너지 절약도 가능하도록 설계하였다.

Table 8 The simulation results of illumination modeling

| Model type | Sports class | Horizontal average illuminance [lx] | Uniformity [$\frac{\min.}{\text{avg.}}$] |
|------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|--|
| MH 1000W*1, 3ea. (aiming : 20°) | Tennis or jokcu | 300 | 0.80 |
| MH 400W*2, 3ea. (aiming : 15°) | Basketball | 170 | 0.55 |

VI. 결 론

대학의 야간 스포츠 행사에 레크리에이션 경기장을 활용하여 보다 활력이 넘치고 안정적으로 경기를 진행함은 물론 관중들에게 박진감 넘치는 경기 상황을 보여 주기 위하여 대학 스포츠 설비의 조명계획이 요구되어 진다.

이 논문에서는 제주대학 학생회관 앞 레크리에이션 경기장의 족구장과 농구장에 대한 현재의 조명실태를 파악하기 위한 실측해석을 통하여 적절한 레크리에이션 스포츠 설비의 조명 설계를 모델링 하였다.

스포츠 설비의 현장실측을 통하여 해석한 결과 KS A3011 조도기준에 현격하게 미달되어 조명실태가 아주 열악함을 보여주었다. 스포츠 설비의 조명설계 시 고려되어야 할 사항은 수평면 조도, 균제도 그리고 에이밍 이므로 에이밍에 따른 수평면 조도와 균제도를 24가지 시뮬레이션을 실시하였다.

시뮬레이션을 통하여 얻은 결과는 학생회관 벽면에 기 설치된 투광기에 메탈 헬라이드등 1.5[kW] 3개를 설치하고 에이밍 30°로 고정시킨 조건에서 족구장에는 등기구 높이 8[m] 폴에 1[kW] 1등용 등기구 3개를 설치하고 에이밍 20°일 경우가 기준치를 만족하였으며 농구장은 등기구 높이 8[m] 폴에 0.4[kW] 2등 병용 3개를 설치하고 에이밍 15°일 경우가 기준치를 충족하는 모델로 도출되었다.

이 최적설계를 바탕으로 주변시설과 수목 등 주변환경에 잘 부합되는 조명 계획 도출이 요망되며, 이를 토대로 다른 스포츠 설비의 조명 계획 및 설계에 기여하리라 판단된다.

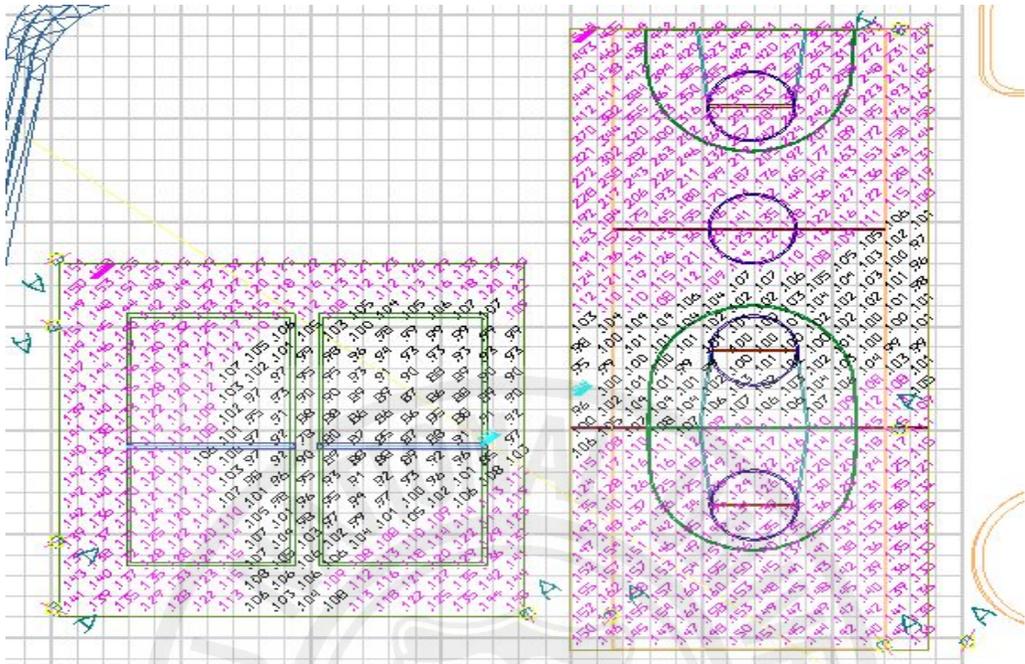
참고문헌

- [1] 권순구·오성보, 스포츠 설비의 조명 모델링, 대한전기학회·대한전자공학회·한국통신학회 제주지부 2006 합동학술 발표회, pp. 50-53, 2006.
- [2] 강영신, 골프장 야간경기 조명모델 설계, 제주대학교 산업대학원 석사 학위 논문, pp. 1-2, 2004.
- [3] 한국산업규격 (KS A3011), 조도기준, 한국표준협회, pp. 2-4, 1998.
- [4] 최홍규 외 7인, 조명설비 및 설계, 성안당, pp. 5~47 - 5~48, 2004.
- [5] Members of Technical Committee4.4, Guide for The Photometric Specification and Measurement of Sports Lighting Installations, CIE, pp. 2-3, 1986.
- [6] 지철근 외 4인, 조명환경원론, 문운당, pp. 199-216, 2004.
- [7] Members of Technical Committee.4.4, Technical Report(Lighting for Tennis), CIE, pp. 16-23, 1978.
- [8] Lighting Technologies INC, Lumen Designer Manual, pp. 141-142, 2004.

부 록

조명설계를 위한 시뮬레이션 안





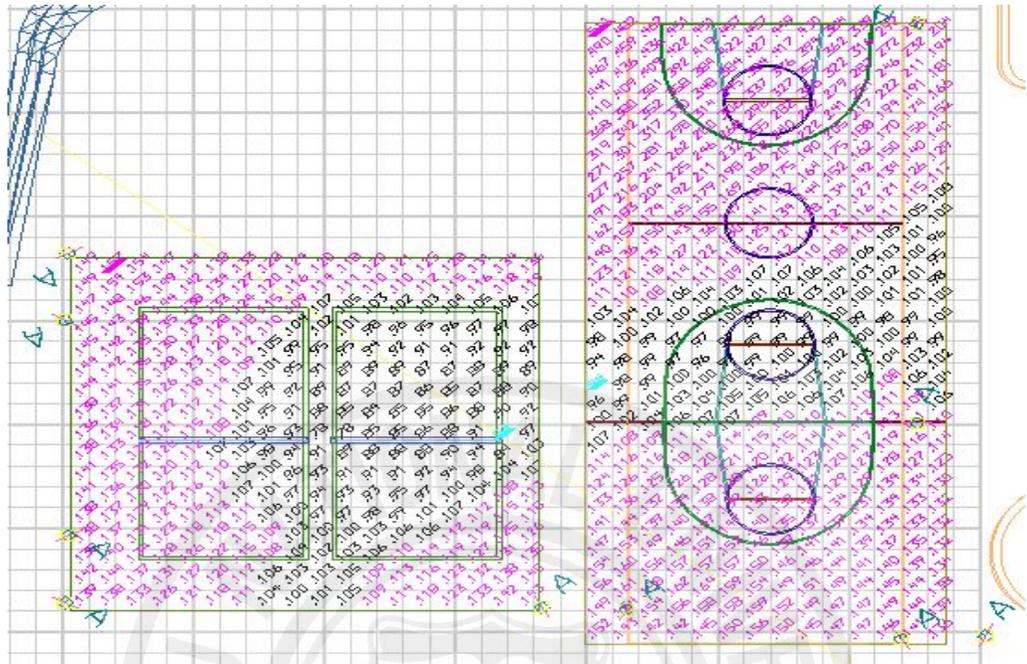
Average: 114 lux Min / Avg: 0.48
 Maximum: 158 lux Min / Max: 0.35
 Minimum: 55 lux

| | 0.30 | 1.3 | 2.3 | 3.3 | 4.3 |
|------|------|-----|-----|-----|-----|
| 16 | 151 | 158 | 155 | 151 | 145 |
| 15 | 150 | 153 | 151 | 148 | 144 |
| 14 | 149 | 148 | 144 | 142 | 140 |
| 13 | 151 | 145 | 140 | 135 | 132 |
| 12 | 149 | 146 | 137 | 130 | 129 |
| 11 | 147 | 144 | 136 | 130 | 124 |
| 10 | 143 | 141 | 135 | 128 | 120 |
| 9.3 | 139 | 140 | 133 | 122 | 117 |
| 8.3 | 141 | 138 | 120 | 119 | 115 |
| 7.3 | 140 | 136 | 125 | 121 | 112 |
| 6.3 | 142 | 139 | 132 | 120 | 113 |
| 5.3 | 142 | 140 | 130 | 121 | 117 |
| 4.3 | 142 | 136 | 129 | 124 | 120 |
| 3.3 | 139 | 137 | 131 | 125 | 122 |
| 2.3 | 139 | 138 | 132 | 128 | 128 |
| 1.3 | 143 | 140 | 137 | 135 | 133 |
| 0.30 | 141 | 139 | 135 | 129 | 128 |

Average: 171 lux Min / Avg: 0.55
 Maximum: 514 lux Min / Max: 0.18
 Minimum: 94 lux

| | 0.30 | 1.3 | 2.3 | 3.3 | 4.3 |
|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| 29 | 514 | 485 | 464 | 452 | 452 |
| 28 | 493 | 462 | 438 | 424 | 420 |
| 27 | 470 | 438 | 412 | 394 | 385 |
| 26 | 444 | 411 | 384 | 361 | 350 |
| 25 | 412 | 382 | 355 | 333 | 316 |
| 24 | 370 | 344 | 320 | 300 | 282 |
| 23 | 321 | 302 | 282 | 263 | 246 |
| 22 | 272 | 258 | 243 | 226 | 211 |
| 21 | 228 | 217 | 206 | 193 | 180 |
| 20 | 192 | 184 | 175 | 165 | 155 |
| 19 | 163 | 157 | 151 | 143 | 136 |
| 18 | 141 | 136 | 131 | 126 | 121 |
| 17 | 124 | 121 | 119 | 115 | 112 |
| 16 | 112 | 110 | 110 | 108 | 106 |
| 15 | 103 | 104 | 104 | 104 | 104 |
| 14 | 98 | 100 | 101 | 101 | 101 |
| 13 | 95 | 99 | 100 | 100 | 99 |
| 12 | 94 | 100 | 101 | 101 | 101 |
| 11 | 96 | 102 | 104 | 104 | 104 |
| 10 | 100 | 105 | 107 | 108 | 107 |
| 9.3 | 106 | 108 | 110 | 111 | 112 |
| 8.3 | 115 | 117 | 116 | 116 | 118 |
| 7.3 | 124 | 128 | 126 | 125 | 125 |

Fig. A1 Distribution of horizontal illuminance and uniformity
 (400W*2, aiming ; tilt angle 10°)



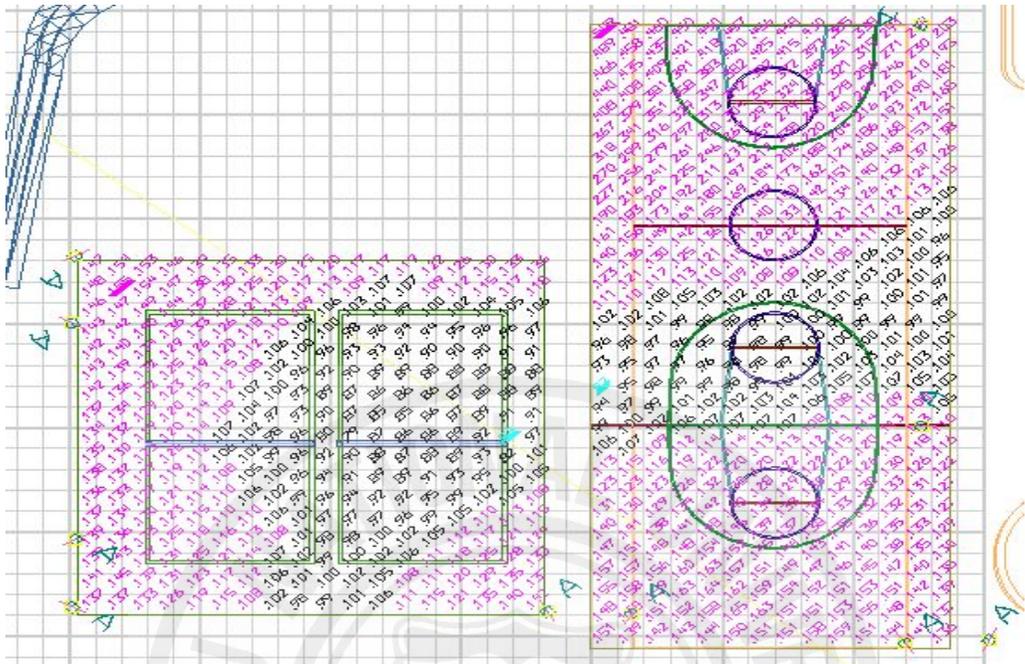
Average: 113 lux Min / Avg: 0.48
 Maximum: 157 lux Min / Max: 0.34
 Minimum: 54 lux

| | 0.30 | 1.3 | 2.3 | 3.3 | 4.3 |
|------|------|-----|-----|-----|-----|
| 16 | 149 | 157 | 154 | 147 | 141 |
| 15 | 149 | 154 | 153 | 149 | 142 |
| 14 | 147 | 148 | 146 | 144 | 138 |
| 13 | 145 | 143 | 139 | 135 | 133 |
| 12 | 145 | 142 | 135 | 130 | 127 |
| 11 | 144 | 142 | 135 | 128 | 123 |
| 10 | 144 | 141 | 135 | 126 | 118 |
| 9.3 | 138 | 137 | 131 | 122 | 117 |
| 8.3 | 136 | 134 | 118 | 121 | 115 |
| 7.3 | 138 | 133 | 125 | 120 | 112 |
| 6.3 | 141 | 135 | 132 | 120 | 112 |
| 5.3 | 141 | 136 | 130 | 122 | 116 |
| 4.3 | 138 | 137 | 129 | 123 | 116 |
| 3.3 | 138 | 137 | 131 | 123 | 118 |
| 2.3 | 138 | 140 | 134 | 128 | 126 |
| 1.3 | 142 | 144 | 137 | 131 | 127 |
| 0.30 | 139 | 138 | 133 | 126 | 121 |

Average: 170 lux Min / Avg: 0.55
 Maximum: 511 lux Min / Max: 0.18
 Minimum: 94 lux

| | 0.30 | 1.3 | 2.3 | 3.3 | 4.3 |
|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| 29 | 511 | 482 | 462 | 451 | 451 |
| 28 | 490 | 459 | 436 | 422 | 419 |
| 27 | 467 | 436 | 409 | 392 | 384 |
| 26 | 441 | 409 | 381 | 358 | 348 |
| 25 | 410 | 380 | 352 | 330 | 314 |
| 24 | 368 | 342 | 317 | 298 | 280 |
| 23 | 319 | 301 | 281 | 262 | 246 |
| 22 | 271 | 257 | 241 | 225 | 211 |
| 21 | 227 | 216 | 204 | 192 | 179 |
| 20 | 191 | 183 | 174 | 165 | 155 |
| 19 | 162 | 157 | 150 | 143 | 136 |
| 18 | 140 | 136 | 131 | 127 | 122 |
| 17 | 123 | 121 | 118 | 114 | 111 |
| 16 | 111 | 110 | 108 | 106 | 104 |
| 15 | 103 | 104 | 102 | 100 | 100 |
| 14 | 98 | 100 | 99 | 97 | 97 |
| 13 | 94 | 98 | 99 | 97 | 96 |
| 12 | 94 | 98 | 99 | 100 | 100 |
| 11 | 96 | 99 | 101 | 103 | 104 |
| 10 | 100 | 102 | 104 | 106 | 107 |
| 9.3 | 107 | 108 | 109 | 111 | 114 |
| 8.3 | 114 | 116 | 116 | 118 | 120 |
| 7.3 | 124 | 126 | 125 | 126 | 128 |

Fig. A2 Distribution of horizontal illuminance and uniformity
 (400W*2, aiming ; tilt angle 15°)



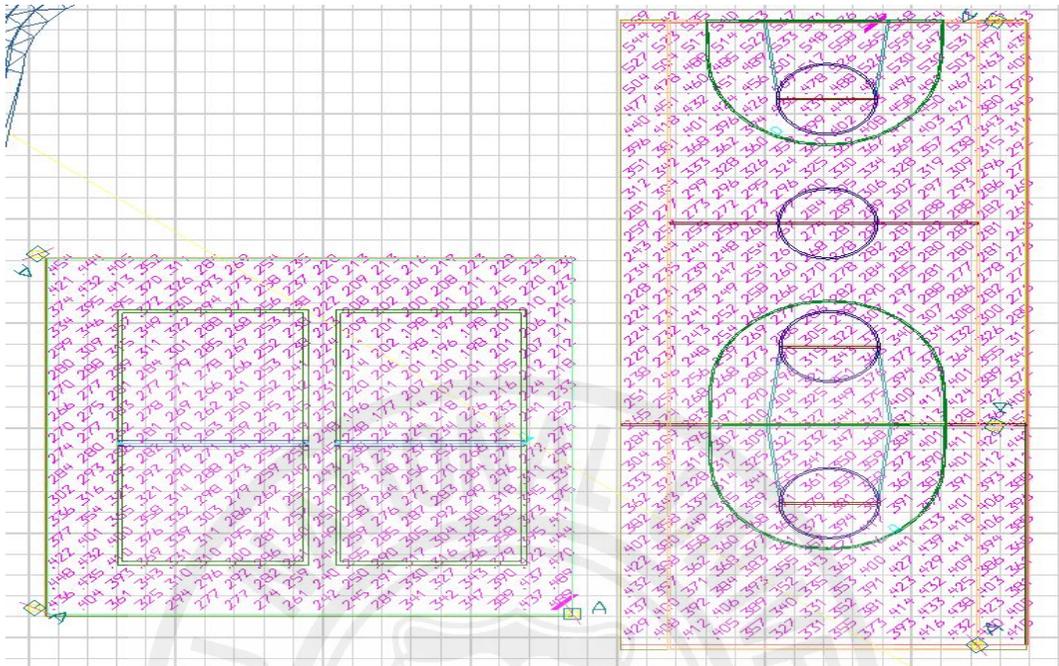
Average: 112 lux Min / Avg: 0.48
 Maximum: 155 lux Min / Max: 0.35
 Minimum: 54 lux

| | 0.30 | 1.3 | 2.3 | 3.3 | 4.3 |
|------|------|-----|-----|-----|-----|
| 16 | 147 | 154 | 153 | 146 | 139 |
| 15 | 148 | 155 | 154 | 147 | 138 |
| 14 | 146 | 147 | 149 | 144 | 137 |
| 13 | 143 | 142 | 140 | 136 | 133 |
| 12 | 142 | 140 | 134 | 129 | 126 |
| 11 | 143 | 139 | 132 | 125 | 119 |
| 10 | 142 | 136 | 132 | 123 | 115 |
| 9.3 | 137 | 134 | 129 | 120 | 114 |
| 8.3 | 134 | 132 | 119 | 120 | 114 |
| 7.3 | 135 | 130 | 123 | 120 | 112 |
| 6.3 | 138 | 132 | 127 | 119 | 112 |
| 5.3 | 136 | 133 | 127 | 121 | 114 |
| 4.3 | 137 | 134 | 130 | 123 | 115 |
| 3.3 | 139 | 136 | 133 | 125 | 118 |
| 2.3 | 139 | 143 | 137 | 131 | 125 |
| 1.3 | 141 | 145 | 139 | 131 | 123 |
| 0.30 | 137 | 137 | 133 | 126 | 119 |

Average: 170 lux Min / Avg: 0.54
 Maximum: 509 lux Min / Max: 0.18
 Minimum: 92 lux

| | 0.30 | 1.3 | 2.3 | 3.3 | 4.3 |
|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| 29 | 509 | 481 | 460 | 450 | 450 |
| 28 | 489 | 458 | 435 | 421 | 418 |
| 27 | 466 | 435 | 409 | 391 | 383 |
| 26 | 440 | 408 | 381 | 358 | 347 |
| 25 | 408 | 379 | 351 | 329 | 313 |
| 24 | 367 | 341 | 316 | 297 | 280 |
| 23 | 318 | 299 | 279 | 261 | 246 |
| 22 | 270 | 256 | 241 | 225 | 211 |
| 21 | 227 | 216 | 204 | 192 | 180 |
| 20 | 190 | 183 | 173 | 164 | 155 |
| 19 | 161 | 156 | 149 | 142 | 136 |
| 18 | 140 | 136 | 130 | 125 | 121 |
| 17 | 123 | 121 | 117 | 113 | 110 |
| 16 | 111 | 110 | 108 | 105 | 103 |
| 15 | 102 | 102 | 101 | 99 | 98 |
| 14 | 96 | 98 | 97 | 96 | 95 |
| 13 | 93 | 95 | 97 | 97 | 96 |
| 12 | 92 | 95 | 98 | 99 | 99 |
| 11 | 94 | 97 | 99 | 101 | 102 |
| 10 | 99 | 100 | 102 | 106 | 107 |
| 9.3 | 106 | 107 | 109 | 112 | 114 |
| 8.3 | 113 | 115 | 116 | 119 | 122 |
| 7.3 | 123 | 123 | 123 | 126 | 132 |

Fig. A3 Distribution of horizontal illuminance and uniformity
 (400W*2, aiming ; tilt angle 20°)



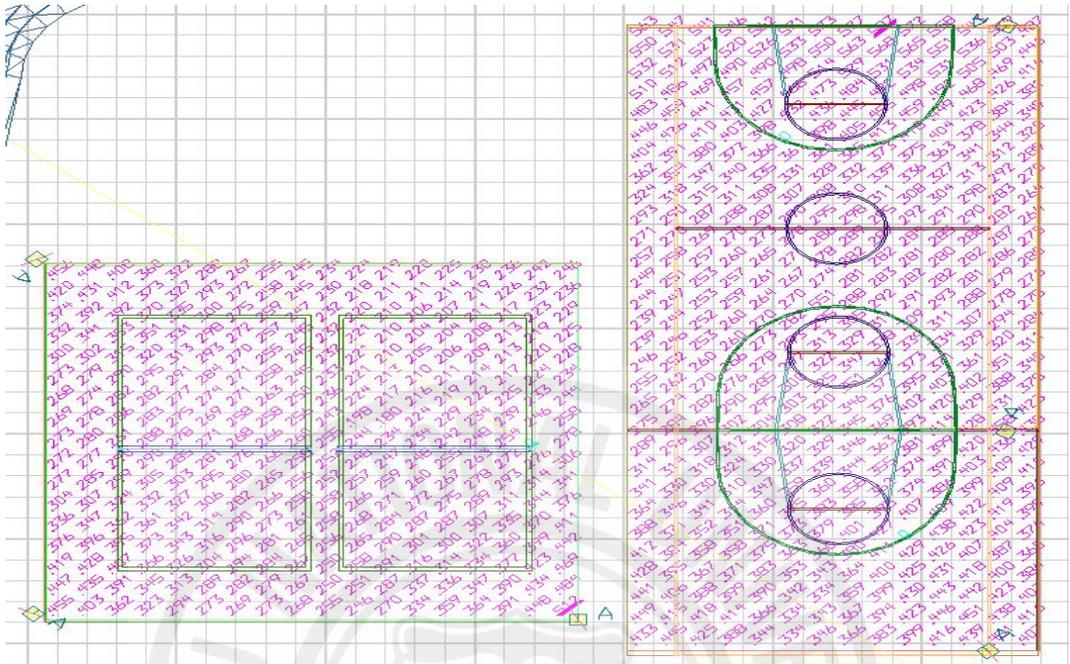
Average: 282 lux Min / Avg: 0.00
 Maximum: 489 lux Min / Max: 0.00
 Minimum: 0.08 lux

| | 0.31 | 1.3 | 2.3 | 3.3 | 4.3 |
|------|------|-----|-----|-----|-----|
| 16 | 454 | 444 | 405 | 352 | 311 |
| 15 | 421 | 432 | 413 | 370 | 326 |
| 14 | 374 | 395 | 395 | 372 | 330 |
| 13 | 334 | 346 | 357 | 349 | 322 |
| 12 | 299 | 309 | 315 | 311 | 301 |
| 11 | 280 | 288 | 289 | 284 | 279 |
| 10 | 270 | 277 | 281 | 277 | 271 |
| 9.3 | 266 | 275 | 283 | 278 | 269 |
| 8.3 | 270 | 277 | 262 | 281 | 270 |
| 7.3 | 274 | 280 | 286 | 282 | 276 |
| 6.3 | 284 | 293 | 295 | 292 | 290 |
| 5.3 | 302 | 316 | 323 | 321 | 314 |
| 4.3 | 336 | 354 | 365 | 358 | 332 |
| 3.3 | 377 | 401 | 400 | 376 | 339 |
| 2.3 | 422 | 432 | 410 | 369 | 331 |
| 1.3 | 448 | 435 | 393 | 343 | 310 |
| 0.31 | 436 | 404 | 361 | 325 | 294 |

Average: 361 lux Min / Avg: 0.00
 Maximum: 586 lux Min / Max: 0.00
 Minimum: 0.00 lux

| | 0.31 | 1.3 | 2.3 | 3.3 | 4.3 |
|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| 29 | 559 | 542 | 535 | 540 | 553 |
| 28 | 544 | 523 | 513 | 514 | 522 |
| 27 | 527 | 504 | 488 | 485 | 489 |
| 26 | 504 | 478 | 460 | 451 | 456 |
| 25 | 477 | 451 | 432 | 424 | 426 |
| 24 | 440 | 418 | 401 | 396 | 394 |
| 23 | 396 | 381 | 368 | 362 | 360 |
| 22 | 351 | 342 | 333 | 328 | 326 |
| 21 | 312 | 304 | 299 | 296 | 295 |
| 20 | 281 | 277 | 273 | 272 | 273 |
| 19 | 259 | 257 | 255 | 256 | 260 |
| 18 | 243 | 244 | 244 | 248 | 254 |
| 17 | 234 | 235 | 239 | 247 | 254 |
| 16 | 228 | 231 | 239 | 249 | 258 |
| 15 | 224 | 231 | 241 | 252 | 266 |
| 14 | 224 | 232 | 243 | 254 | 269 |
| 13 | 229 | 237 | 248 | 259 | 273 |
| 12 | 238 | 246 | 256 | 268 | 280 |
| 11 | 251 | 259 | 268 | 279 | 290 |
| 10 | 265 | 274 | 283 | 291 | 300 |
| 9.3 | 284 | 289 | 296 | 302 | 309 |
| 8.3 | 304 | 307 | 314 | 317 | 325 |
| 7.3 | 333 | 327 | 328 | 314 | 344 |

Fig. A4 Distribution of horizontal illuminance and uniformity
 (1000W*1, aiming ; tilt angle 10°)



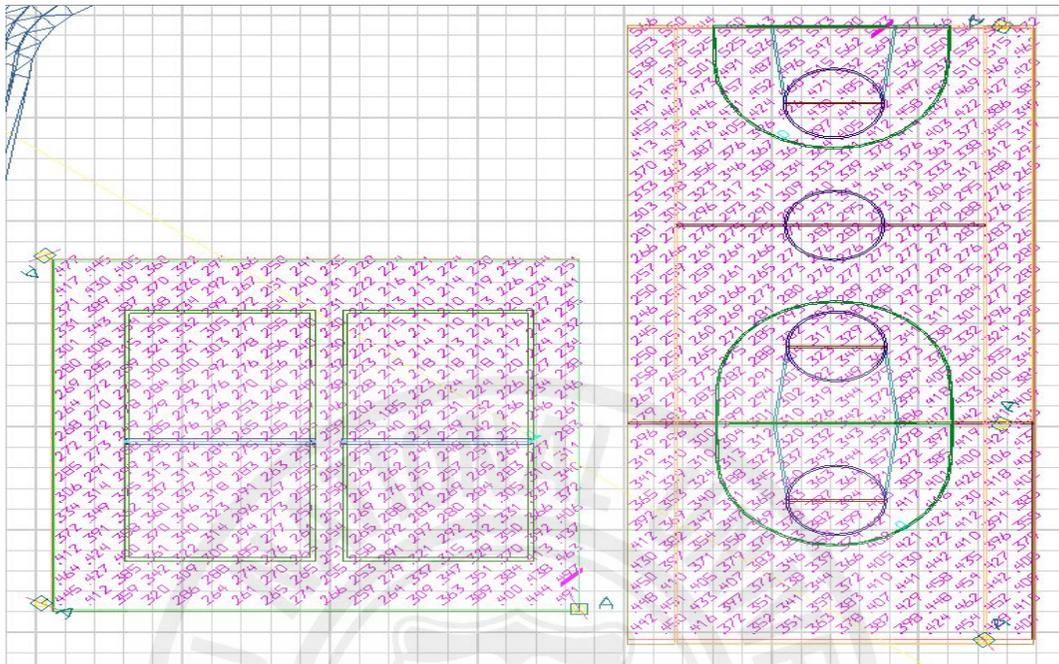
Average: 286 lux Min / Avg: 0.00
 Maximum: 512 lux Min / Max: 0.00
 Minimum: 0.09 lux

| | 0.31 | 1.3 | 2.3 | 3.3 | 4.3 |
|------|------|-----|-----|-----|-----|
| 16 | 456 | 448 | 408 | 360 | 322 |
| 15 | 420 | 431 | 412 | 373 | 327 |
| 14 | 374 | 392 | 392 | 370 | 335 |
| 13 | 332 | 341 | 353 | 351 | 331 |
| 12 | 300 | 302 | 315 | 320 | 313 |
| 11 | 273 | 279 | 290 | 295 | 291 |
| 10 | 268 | 274 | 282 | 282 | 277 |
| 9.3 | 269 | 278 | 286 | 283 | 275 |
| 8.3 | 273 | 280 | 261 | 288 | 278 |
| 7.3 | 272 | 277 | 290 | 290 | 285 |
| 6.3 | 277 | 285 | 299 | 305 | 303 |
| 5.3 | 304 | 307 | 324 | 332 | 327 |
| 4.3 | 336 | 347 | 362 | 361 | 342 |
| 3.3 | 376 | 396 | 395 | 373 | 343 |
| 2.3 | 419 | 428 | 407 | 366 | 326 |
| 1.3 | 447 | 435 | 391 | 345 | 313 |
| 0.31 | 455 | 403 | 362 | 323 | 294 |

Average: 366 lux Min / Avg: 0.00
 Maximum: 587 lux Min / Max: 0.00
 Minimum: 0.00 lux

| | 0.31 | 1.3 | 2.3 | 3.3 | 4.3 |
|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| 29 | 563 | 547 | 541 | 546 | 562 |
| 28 | 550 | 531 | 523 | 520 | 526 |
| 27 | 532 | 512 | 497 | 490 | 490 |
| 26 | 510 | 486 | 469 | 457 | 457 |
| 25 | 483 | 459 | 441 | 431 | 427 |
| 24 | 446 | 426 | 410 | 403 | 398 |
| 23 | 404 | 391 | 380 | 372 | 366 |
| 22 | 362 | 354 | 347 | 340 | 335 |
| 21 | 324 | 318 | 315 | 311 | 308 |
| 20 | 293 | 290 | 287 | 288 | 287 |
| 19 | 271 | 270 | 269 | 270 | 273 |
| 18 | 257 | 258 | 257 | 260 | 265 |
| 17 | 249 | 251 | 253 | 257 | 261 |
| 16 | 244 | 247 | 253 | 259 | 264 |
| 15 | 239 | 244 | 252 | 260 | 270 |
| 14 | 239 | 246 | 253 | 260 | 273 |
| 13 | 246 | 252 | 260 | 266 | 278 |
| 12 | 255 | 262 | 270 | 276 | 285 |
| 11 | 265 | 274 | 282 | 290 | 295 |
| 10 | 275 | 284 | 296 | 302 | 304 |
| 9.3 | 289 | 296 | 307 | 312 | 315 |
| 8.3 | 314 | 314 | 318 | 324 | 330 |
| 7.3 | 341 | 330 | 330 | 310 | 347 |

Fig. A5 Distribution of horizontal illuminance and uniformity (1000W*1, aiming ; tilt angle 15°)



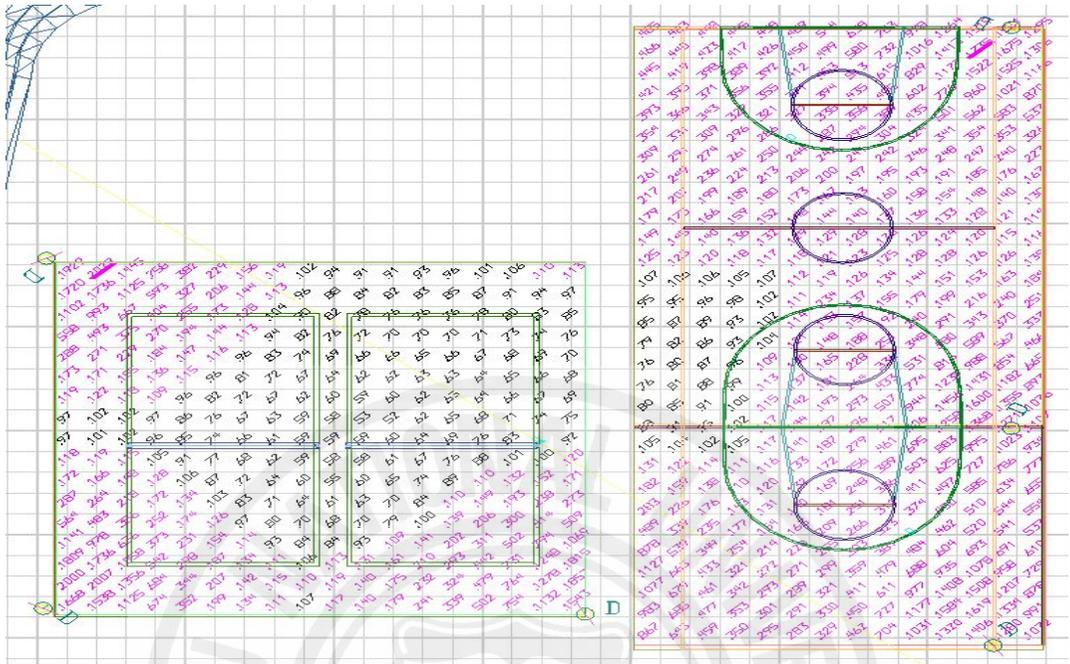
Average: 286 lux Min / Avg: 0.00
 Maximum: 497 lux Min / Max: 0.00
 Minimum: 0.09 lux

| | 0.31 | 1.3 | 2.3 | 3.3 | 4.3 |
|------|------|-----|-----|-----|-----|
| 16 | 477 | 445 | 405 | 360 | 322 |
| 15 | 417 | 430 | 409 | 370 | 326 |
| 14 | 371 | 389 | 387 | 368 | 334 |
| 13 | 331 | 343 | 354 | 350 | 332 |
| 12 | 301 | 308 | 315 | 324 | 321 |
| 11 | 280 | 285 | 289 | 300 | 300 |
| 10 | 269 | 272 | 278 | 284 | 282 |
| 9.3 | 264 | 270 | 278 | 279 | 273 |
| 8.3 | 268 | 272 | 249 | 285 | 276 |
| 7.3 | 272 | 273 | 288 | 295 | 292 |
| 6.3 | 285 | 291 | 299 | 313 | 314 |
| 5.3 | 306 | 314 | 325 | 337 | 337 |
| 4.3 | 334 | 349 | 362 | 360 | 346 |
| 3.3 | 372 | 391 | 388 | 370 | 340 |
| 2.3 | 412 | 424 | 400 | 361 | 322 |
| 1.3 | 464 | 427 | 385 | 342 | 309 |
| 0.31 | 445 | 412 | 359 | 320 | 286 |

Average: 368 lux Min / Avg: 0.00
 Maximum: 593 lux Min / Max: 0.00
 Minimum: 0.00 lux

| | 0.31 | 1.3 | 2.3 | 3.3 | 4.3 |
|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| 29 | 566 | 550 | 544 | 550 | 563 |
| 28 | 553 | 535 | 525 | 525 | 526 |
| 27 | 538 | 518 | 501 | 491 | 487 |
| 26 | 517 | 493 | 473 | 457 | 452 |
| 25 | 491 | 467 | 446 | 431 | 424 |
| 24 | 455 | 435 | 416 | 405 | 396 |
| 23 | 413 | 399 | 387 | 376 | 367 |
| 22 | 370 | 363 | 356 | 346 | 338 |
| 21 | 333 | 328 | 323 | 317 | 311 |
| 20 | 303 | 300 | 296 | 293 | 290 |
| 19 | 281 | 279 | 276 | 275 | 275 |
| 18 | 266 | 266 | 264 | 264 | 266 |
| 17 | 257 | 259 | 259 | 261 | 265 |
| 16 | 250 | 254 | 260 | 266 | 273 |
| 15 | 246 | 251 | 258 | 269 | 281 |
| 14 | 245 | 251 | 260 | 271 | 285 |
| 13 | 250 | 257 | 265 | 275 | 288 |
| 12 | 258 | 265 | 273 | 282 | 291 |
| 11 | 267 | 274 | 283 | 290 | 294 |
| 10 | 279 | 283 | 291 | 299 | 301 |
| 9.3 | 296 | 296 | 300 | 304 | 312 |
| 8.3 | 319 | 310 | 310 | 313 | 323 |
| 7.3 | 341 | 329 | 324 | 288 | 345 |

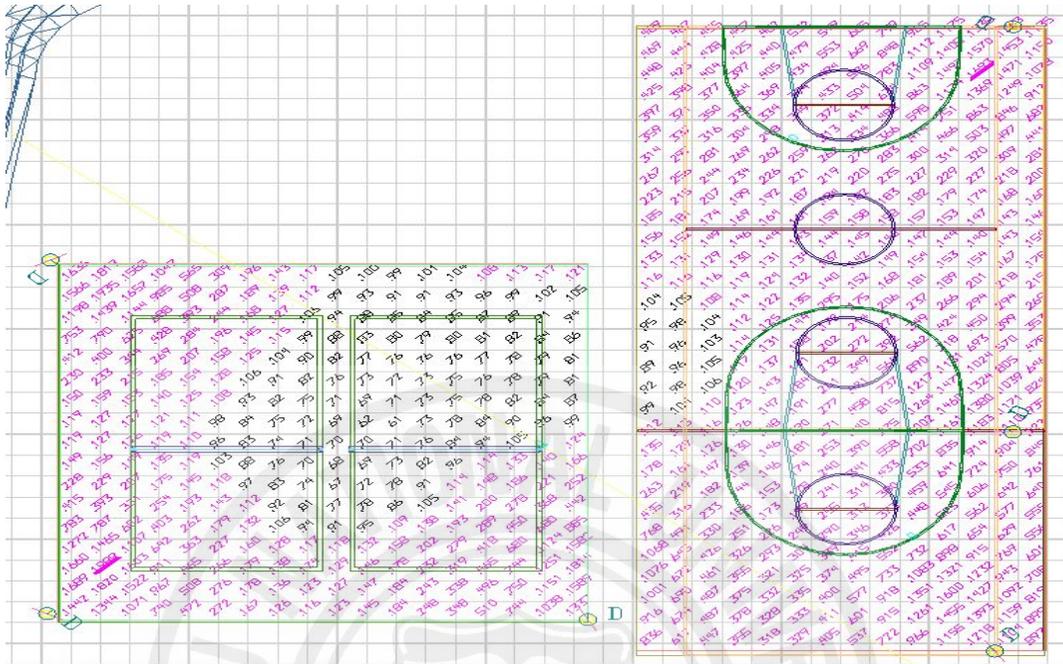
Fig. A6 Distribution of horizontal illuminance and uniformity
 (1000W*1, aiming ; tilt angle 20°)



| Average: 268 lux Min / Avg: 0.00 | | | | | |
|--------------------------------------|------|------|------|-----|-----|
| Maximum: 2029 lux Min / Max: 0.00 | | | | | |
| Minimum: 0.03 lux | | | | | |
| | 0.31 | 1.3 | 2.3 | 3.3 | 4.3 |
| 16 | 1929 | 2029 | 1445 | 758 | 382 |
| 15 | 1720 | 1736 | 1125 | 593 | 327 |
| 14 | 1102 | 993 | 667 | 404 | 255 |
| 13 | 558 | 493 | 375 | 270 | 194 |
| 12 | 288 | 271 | 229 | 184 | 147 |
| 11 | 173 | 171 | 155 | 136 | 115 |
| 10 | 119 | 122 | 118 | 109 | 96 |
| 9.3 | 97 | 102 | 102 | 97 | 86 |
| 8.3 | 97 | 101 | 102 | 96 | 85 |
| 7.3 | 118 | 119 | 115 | 105 | 91 |
| 6.3 | 172 | 166 | 148 | 129 | 106 |
| 5.3 | 287 | 264 | 218 | 172 | 134 |
| 4.3 | 564 | 483 | 356 | 252 | 174 |
| 3.3 | 1141 | 978 | 636 | 373 | 231 |
| 2.3 | 1809 | 1736 | 1058 | 542 | 298 |
| 1.3 | 2000 | 2007 | 1356 | 684 | 344 |
| 0.31 | 1668 | 1538 | 1125 | 674 | 352 |

| Average: 416 lux Min / Avg: 0.00 | | | | | |
|--------------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|
| Maximum: 1735 lux Min / Max: 0.00 | | | | | |
| Minimum: 0.00 lux | | | | | |
| | 0.31 | 1.3 | 2.3 | 3.3 | 4.3 |
| 29 | 485 | 463 | 448 | 445 | 458 |
| 28 | 466 | 440 | 423 | 417 | 426 |
| 27 | 445 | 419 | 398 | 389 | 392 |
| 26 | 421 | 393 | 371 | 356 | 355 |
| 25 | 393 | 366 | 343 | 327 | 321 |
| 24 | 354 | 331 | 309 | 296 | 286 |
| 23 | 309 | 291 | 274 | 261 | 250 |
| 22 | 261 | 249 | 236 | 224 | 213 |
| 21 | 217 | 207 | 199 | 189 | 180 |
| 20 | 179 | 173 | 166 | 159 | 152 |
| 19 | 149 | 145 | 140 | 136 | 132 |
| 18 | 125 | 123 | 120 | 118 | 117 |
| 17 | 107 | 106 | 106 | 105 | 107 |
| 16 | 95 | 95 | 96 | 98 | 102 |
| 15 | 85 | 87 | 89 | 93 | 102 |
| 14 | 79 | 82 | 86 | 93 | 104 |
| 13 | 76 | 80 | 87 | 96 | 109 |
| 12 | 76 | 81 | 88 | 99 | 113 |
| 11 | 80 | 85 | 91 | 100 | 115 |
| 10 | 88 | 91 | 95 | 102 | 117 |
| 9.3 | 105 | 104 | 102 | 105 | 117 |
| 8.3 | 131 | 122 | 114 | 111 | 116 |
| 7.3 | 182 | 159 | 138 | 110 | 120 |

Fig. A7 Distribution of horizontal illuminance and uniformity
(1500W*1, aiming ; tilt angle 10°)



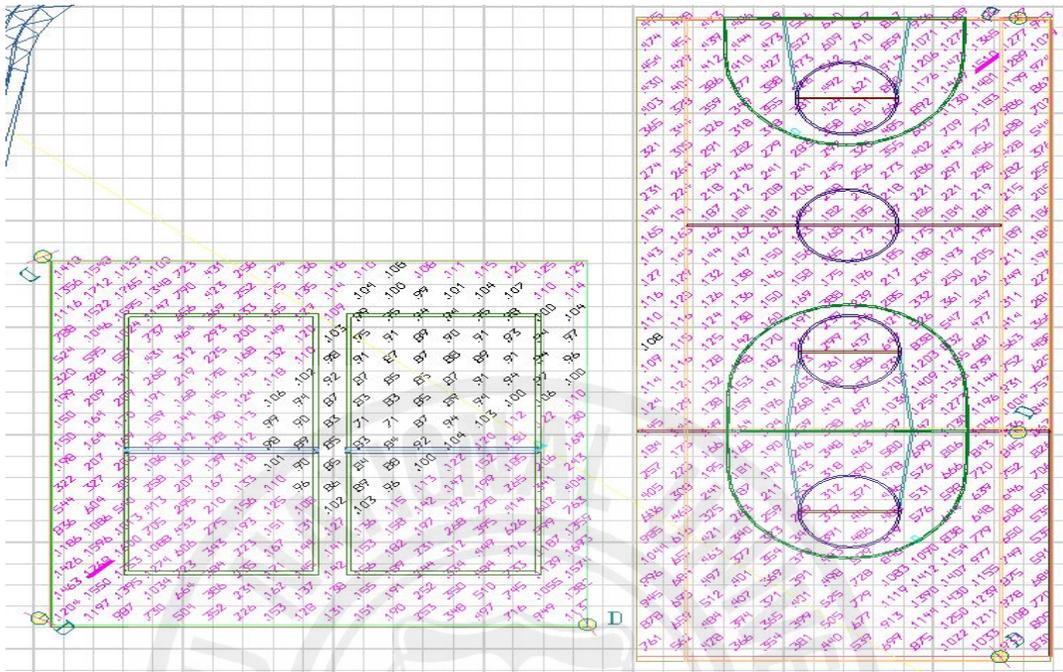
Average: 318 lux Min / Avg: 0.00
 Maximum: 1989 lux Min / Max: 0.00
 Minimum: 0.04 lux

| | 0.31 | 1.3 | 2.3 | 3.3 | 4.3 |
|------|------|------|------|------|-----|
| 16 | 1636 | 1819 | 1588 | 1047 | 565 |
| 15 | 1566 | 1935 | 1657 | 985 | 508 |
| 14 | 1198 | 1439 | 1144 | 688 | 393 |
| 13 | 753 | 790 | 625 | 428 | 284 |
| 12 | 412 | 400 | 344 | 269 | 207 |
| 11 | 230 | 233 | 215 | 185 | 154 |
| 10 | 150 | 159 | 153 | 140 | 125 |
| 9.3 | 119 | 127 | 127 | 121 | 111 |
| 8.3 | 119 | 127 | 126 | 119 | 110 |
| 7.3 | 149 | 156 | 149 | 135 | 119 |
| 6.3 | 228 | 229 | 207 | 175 | 145 |
| 5.3 | 415 | 393 | 331 | 254 | 193 |
| 4.3 | 783 | 787 | 602 | 403 | 262 |
| 3.3 | 1272 | 1465 | 1107 | 642 | 363 |
| 2.3 | 1660 | 1989 | 1603 | 911 | 465 |
| 1.3 | 1689 | 1820 | 1522 | 967 | 508 |
| 0.31 | 1442 | 1344 | 1071 | 740 | 472 |

Average: 460 lux Min / Avg: 0.00
 Maximum: 1693 lux Min / Max: 0.00
 Minimum: 0.00 lux

| | 0.31 | 1.3 | 2.3 | 3.3 | 4.3 |
|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| 29 | 489 | 467 | 455 | 457 | 482 |
| 28 | 469 | 444 | 428 | 425 | 440 |
| 27 | 448 | 423 | 404 | 397 | 405 |
| 26 | 425 | 398 | 377 | 364 | 369 |
| 25 | 397 | 371 | 350 | 336 | 334 |
| 24 | 359 | 337 | 316 | 304 | 298 |
| 23 | 314 | 297 | 281 | 269 | 262 |
| 22 | 267 | 256 | 244 | 234 | 226 |
| 21 | 223 | 215 | 207 | 199 | 192 |
| 20 | 185 | 181 | 174 | 169 | 164 |
| 19 | 156 | 152 | 149 | 146 | 144 |
| 18 | 133 | 131 | 129 | 130 | 131 |
| 17 | 116 | 116 | 116 | 119 | 124 |
| 16 | 104 | 105 | 108 | 114 | 122 |
| 15 | 95 | 98 | 104 | 112 | 125 |
| 14 | 91 | 96 | 103 | 114 | 131 |
| 13 | 89 | 96 | 105 | 117 | 137 |
| 12 | 92 | 98 | 106 | 120 | 143 |
| 11 | 99 | 104 | 110 | 123 | 147 |
| 10 | 112 | 113 | 116 | 126 | 148 |
| 9.3 | 135 | 129 | 126 | 130 | 146 |
| 8.3 | 178 | 161 | 147 | 139 | 146 |
| 7.3 | 263 | 219 | 182 | 144 | 153 |

Fig. A8 Distribution of horizontal illuminance and uniformity
 (1500W*1, aiming ; tilt angle 15°)



Average: 364 lux Min / Avg: 0.00
 Maximum: 1768 lux Min / Max: 0.00
 Minimum: 0.05 lux

| | 0.31 | 1.3 | 2.3 | 3.3 | 4.3 |
|------|------|------|------|------|-----|
| 16 | 1418 | 1548 | 1439 | 1100 | 723 |
| 15 | 1356 | 1712 | 1765 | 1348 | 790 |
| 14 | 1116 | 1522 | 1595 | 1147 | 656 |
| 13 | 788 | 1046 | 1024 | 737 | 464 |
| 12 | 524 | 595 | 551 | 431 | 312 |
| 11 | 320 | 328 | 311 | 268 | 219 |
| 10 | 199 | 209 | 209 | 191 | 168 |
| 9.3 | 150 | 164 | 170 | 159 | 144 |
| 8.3 | 150 | 164 | 169 | 158 | 142 |
| 7.3 | 198 | 207 | 206 | 186 | 161 |
| 6.3 | 322 | 327 | 305 | 258 | 207 |
| 5.3 | 544 | 604 | 540 | 413 | 295 |
| 4.3 | 836 | 1086 | 1013 | 705 | 433 |
| 3.3 | 1186 | 1596 | 1600 | 1088 | 606 |
| 2.3 | 1426 | 1768 | 1753 | 1274 | 723 |
| 1.3 | 1463 | 1550 | 1395 | 1034 | 664 |
| 0.31 | 1204 | 1197 | 987 | 730 | 504 |

Average: 500 lux Min / Avg: 0.00
 Maximum: 1510 lux Min / Max: 0.00
 Minimum: 0.00 lux

| | 0.31 | 1.3 | 2.3 | 3.3 | 4.3 |
|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| 29 | 495 | 478 | 473 | 486 | 519 |
| 28 | 474 | 451 | 439 | 444 | 473 |
| 27 | 454 | 429 | 412 | 410 | 427 |
| 26 | 430 | 404 | 386 | 377 | 388 |
| 25 | 403 | 378 | 359 | 349 | 355 |
| 24 | 365 | 344 | 326 | 318 | 318 |
| 23 | 321 | 305 | 291 | 282 | 279 |
| 22 | 274 | 264 | 254 | 246 | 241 |
| 21 | 231 | 224 | 218 | 212 | 208 |
| 20 | 194 | 191 | 187 | 184 | 181 |
| 19 | 165 | 163 | 162 | 162 | 162 |
| 18 | 143 | 143 | 144 | 147 | 150 |
| 17 | 127 | 129 | 132 | 138 | 146 |
| 16 | 116 | 120 | 126 | 136 | 150 |
| 15 | 110 | 116 | 124 | 138 | 160 |
| 14 | 108 | 115 | 125 | 142 | 170 |
| 13 | 109 | 116 | 128 | 148 | 182 |
| 12 | 114 | 121 | 132 | 153 | 191 |
| 11 | 124 | 129 | 138 | 159 | 196 |
| 10 | 145 | 144 | 149 | 164 | 194 |
| 9.3 | 184 | 173 | 166 | 168 | 190 |
| 8.3 | 257 | 223 | 195 | 181 | 194 |
| 7.3 | 405 | 308 | 241 | 187 | 211 |

Fig. A9 Distribution of horizontal illuminance and uniformity
 (1500W*1, aiming ; tilt angle 20°)

감사의 글

본 논문이 나오기까지, 부족함이 많으며 보직변경에 따른 학업여건 변화로 힘들어 하는 저에게 따뜻한 배려와 끊임없는 지도로 이끌어 주신 오성보 지도 교수님께 진심으로 존경과 감사를 드립니다.

연구와 강의 등으로 바쁘신 가운데도 논문심사를 흔쾌히 맡아주시고 조언을 아끼지 않으신 좌종근 교수님, 김호찬 교수님 그리고 입학시부터 많은 격려와 용기를 북돋아 주신 이개명 교수님, 김일환 교수님과 새로운 학문에 대한 연구차 미국에 가계신 김세호 교수님께도 감사드립니다.

또한 대학원 과정을 동문수학한 부윤섭 동기, 박사과정중이신 김덕구 교수님 및 이상근, 김영환, 고성필, 고영진 선배님과 현동주, 강보승, 김동현, 김민철, 송기혁, 이춘우, 허성훈 후배님, 본 논문의 자료수집 및 현장실측과 시뮬레이션에 많은 도움을 준 조명연구실 강일영, 김대현, 고윤혁, 변익수, 임정구, 변준영 학생에게도 감사의 뜻을 전하며 학업기간중의 추억과 고마움은 마음속 깊이 간직하고 살아가겠습니다.

아울러 늦게 시작한 대학원 생활을 무사히 마칠 수 있도록 배려와 용기를 주신 한국공항공사 이근표 사장님, 성시철 부사장님, 권형우 감사님, 김희선 전략기획본부장님, 함용빈 운영지원본부장님, 위성창 시설안전본부장님, 김충기 서울지역본부장님과 조직개편으로 바쁜 업무중에도 끝까지 성원해준 건설사업추진단 직원을 비롯한 동료 및 선·후배 직원 여러분들께도 진심으로 감사를 드립니다. 그리고 학업에 대한 동기를 부여 해준 김두홍 과장과 원생들의 뒷바라지에 물심양면으로 도와주신 전기공학과 근무자분들께도 감사의 마음을 전합니다.

그리고 어려운 환경에서도 항상 곁에서 대학원 생활을 잘 할수 있도록 내조해준 사랑하는 아내 하복용에게 미안함과 고마움을 전하고 싶고 경쟁사회에 첫 발을 내딛은 믿음직한 아들 용직이와 용균이에게도 힘들때 용기를 주는 지팡이가 되었으면 합니다. 끝으로 언제나 자식 잘 되기만을 노심초사하시는 연로하신 어머님과 작고하신 아버님 전에 이 논문을 바칩니다.