

# 조명시뮬레이션 소프트웨어의 적합한 사용을 위한 기초적 연구

(A Fundamental Study for Proper Application of Lighting Simulation Software)

김유신\* · 원슬기 · 박병철 · 최안섭\*\*

(Yu-Sin Kim · Seul-Ki Won · Byoung-Chul Park · An-Seop Choi)

## 요 약

조명시뮬레이션 소프트웨어는 크게 조명기구의 광학설계를 위한 소프트웨어와 조명계획안의 예측 및 평가를 위한 소프트웨어로 구분할 수 있으며, 그 사용이 점차 증가하고 있다. 조명기구의 광학설계를 위한 시뮬레이션 소프트웨어로는 Photopia 2.0이 대표적이며, 조명계획안의 적합성을 판단하기 위한 시뮬레이션 소프트웨어는 Lumen-micro 2000, Relux 2006, Lightscape 3.2와 AGI 32 등이 있다. 이러한 시뮬레이션 소프트웨어는 측정값과 시뮬레이션 결과값, 그리고 소프트웨어별 시뮬레이션 결과값이 상이하게 나오는 경우가 발생한다. 따라서 본 연구는 임의의 조명기구 측정배광데이터와 Photopia 2.0의 시뮬레이션 배광데이터를 비교하고, 공간의 규모, 배광데이터, 마감재 등의 같은 조건하에 Lumen-micro 2000, Relux 2006, Lightscape 3.2와 AGI 32의 시뮬레이션 결과를 비교하여 차이점의 원인에 분석하고자 한다.

## Abstract

Use of various lighting simulation software has been increased. Lighting simulation software can be categorized into two types. One is for optical design while the other is for estimation and analysis of lighting design. Photopia 2.0 is typical software for optical design of a luminaire and Lumen-micro 2000, Relux 2006, Lightscape 3.2 and AGI 32 are software for lighting design. Through using various lighting simulation software some different results can be found under the same conditions. Therefore, the purpose of this paper is to compare measured and simulated photometric data of different types of luminaires and to compare simulated values from Lumen-micro 2000, Relux 2006, Lightscape 3.2 and AGI 32 under the same conditions. In addition, the reasons for such differences are analyzed.

Key Words : Simulation Software, Lighting Design, Optical Design, Illuminance, Photometric Data

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경

과거 조명기구의 광학설계 및 공간에 적합한 조명 설계를 하기 위해 광자(Photon)의 거동 예측과 조도

\* 주저자 : 세종대학교 건축공학과 박사과정  
\*\* 교신저자 : 세종대학교 건축공학과 교수  
Tel : 02-3408-3761, Fax : 02-3408-3671  
E-mail : aschoi@sejong.ac.kr  
접수일자 : 2007년 2월 15일  
1차심사 : 2007년 3월 2일, 2차심사 : 2007년 6월 1일  
심사완료 : 2007년 6월 14일

계산을 수계산으로 하였고, 실제 제작 및 측정을 통해 검증이 이루어졌다. 그러나 수계산을 통한 광학설계 및 조명설계는 많은 시간이 소비되는 방법이며, 이러한 방법은 컴퓨터를 이용한 조명시뮬레이션 소프트웨어의 개발과 상용화가 되기 전까지 지속되었다.

최근 컴퓨터의 발달과 더불어 조명기구의 광학설계 및 공간에 적합한 조명설계를 위한 소프트웨어가 개발되고 상용화되었다. 이러한 조명시뮬레이션 소프트웨어는 AutoCAD를 비롯한 3D 모델링 소프트웨어와 호환이 가능하며, 조명기구의 광학설계 및 공간에 적합한 조명계획안을 예측하기 위한 소프트웨어로 널리 활용되고 있다. 또한 그 종류가 다양하며, 소프트웨어에 따라 결과물의 도출 시간이나 가시화된 이미지의 차이가 있다.

다양한 조명시뮬레이션 소프트웨어 중에는 소프트웨어 자체에 모델링 기능이 포함되어 간편한 모델링을 한 후 빠른 시간에 시뮬레이션을 할 수 있는 소프트웨어가 있는 반면, 외부의 3D 모델링 소프트웨어와 호환하여 가시화도구로서 활용 가능한 소프트웨어가 있는데, 이 경우 상대적으로 긴 시간을 필요로 한다. 다양한 조명시뮬레이션 소프트웨어는 효율적인 조명설계를 위한 조도, 휘도 등의 예측 및 그 효과를 검증하는 것으로서 그 활용이 점차 증가하고 있다.

## 1.2 연구의 목적

조명시뮬레이션 소프트웨어는 크게 조명기구의 광학설계를 위한 소프트웨어와 조명계획안 예측을 위한 소프트웨어로 구분할 수 있다. 먼저 Photopia 2.0은 전자의 대표적인 소프트웨어이다. Photopia 2.0을 활용한 시뮬레이션 시 조명기구의 형상, 재질 및 광원의 위치에 따라 그 결과가 실측배광데이터와 차이를 보인다.

후자의 대표적인 소프트웨어로는 Lumen-Micro 2000, Relux 2006, Lightscape 3.2와 AGI 32 등의 소프트웨어가 있는데, 동일한 공간의 조건 및 배광데이터를 활용하여 조명계획안을 시뮬레이션하였을 때 상이한 결과가 도출된다. 이러한 오차는 조명시

뮬레이션 소프트웨어에 사용된 계산 알고리즘에 인한 것으로 다양한 결과 비교를 통해 서로 상이한 결과값의 보정이 가능할 것이다.

따라서 본 연구는 조명기구의 광학설계를 위한 소프트웨어인 Photopia 2.0을 활용하여 재질과 광원의 위치에 따른 시뮬레이션 배광데이터와 실측배광데이터를 비교·분석하였고, 이를 통해 차후 조명기구를 실제 제작하였을 때 배광데이터의 오차를 줄이는 것을 목적으로 한다. 그리고 적합한 조명계획안의 예측을 위한 시뮬레이션 소프트웨어인 Lumen-Micro 2000, Relux 2006, Lightscape 3.2와 AGI 32를 이용하여 동일한 조건에서 시뮬레이션 하여 도출된 그 결과를 비교·분석하여 그 차이점의 원인을 분석하고자 한다.

## 1.3 연구방법 및 절차

본 연구는 조명시뮬레이션 소프트웨어의 적합한 활용을 위해 조명기구의 광학설계에 사용되는 Photopia 2.0과 조명설계에 사용되는 Lumen-Micro 2000, Relux 2006, Lightscape 3.2와 AGI 32를 선정하여 시뮬레이션을 하였고, 선정된 소프트웨어 중 공개된 알고리즘과 특징을 이해하기 위한 이론고찰을 하였다. 그리고 각기 다른 형태의 4가지 조명기구를 선정하고, 조명기구의 모델링과 광학부품의 재질 및 조건을 설정하여 광학설계 시뮬레이션을 통해 도출된 배광데이터와 조명기구의 측정 배광데이터와 비교하였다.

또한 조명설계 시뮬레이션을 위해 임의의 동일한 공간과 공간의 조건을 설정하고, 광학설계 시뮬레이션에서 사용된 4가지 조명기구를 활용하여 각각의 소프트웨어별로 시뮬레이션하였다. 그리고 소프트웨어별 오차를 비교하여 Lightscape 3.2의 공개된 알고리즘과 비교·분석하였다. 그림 1은 본 연구의 방법 및 절차를 도식화한 것이다.

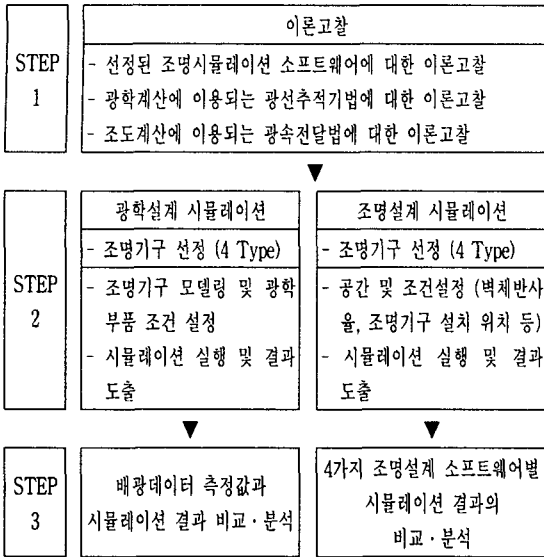


그림 1. 연구의 방법 및 절차  
Fig. 1. Research method and procedure

## 2. 이론고찰

### 2.1 광선추적기법(Raytracing)

광선추적기법이란 광자의 움직임은 운동 방향과 크기로 벡터화 시킨 후, 공간 내에서 이동한 궤적을 수학적 계산에 의해 예측할 수 있는 기법으로 일반적으로 3차원 직교계를 사용하여 광자를 벡터화시킨다. 이러한 광선추적기법을 통해 광자가 진행하면서 일어나는 반사, 굴절, 투과, 흡수 등의 복잡한 광학적 움직임을 계산하여 광자의 최종 위치를 추적할 수 있다. 광자들의 최종 위치를 종합하여 각 공간의 최종 광량으로 전환되며, 이를 통해 필요한 조도계산을 수행한다[1]. 또한 광자의 최종 방향을 광도로 전환하여 조명기구의 배광데이터를 형성할 수 있다.

### 2.2 광속전달법(Radiosity)

광속전달법은 조도를 직접성분과 간접성분으로 나누어 계산한다. 조도의 직접성분은 조명기구로부터 면의 반사를 거치지 않고 계산 면으로 직접 도달되는 광속을 의미하며, 간접성분은 조도의 직접성분을 제외한 실내 면의 반사를 거치고 계산 면에 도달

되는 광속을 의미한다. 이때 광속이 반사되는 면은 완전확산면(Lambertian surface)으로 가정하고, 이 면을 다수의 유한요소(Finite element)로 나누어 계산함으로써 보다 정확한 계산값을 도출할 수 있다.

#### (1) 직접성분

직접성분은 역자승법칙(ISQL : Inverse square law)에 의하여 계산되며, 역자승법칙이란, 점광원에 의한 조도가 광원으로부터의 거리 제곱에 반비례하며 감소된다는 법칙을 의미한다. 역자승법칙은 식 (1)과 같이 정의될 수 있다. 그리고 역자승법칙을 이용할 때에는 광속을 발산하는 조명기구의 장변이 광속을 받는 실내 면의 유한요소까지의 거리가 조명기구 장변 치수의 5배 이상일 때 조명기구의 유한요소를 점광원으로 가정하는 5 Times-rule이 성립되어야 한다[2].

$$E = \frac{I(\phi, \psi) \times \cos \theta}{r^2} \quad (1)$$

여기서,  $E$  : 조도의 직접성분([lumen/m<sup>2</sup>])

$I(\phi, \psi)$  : 각도  $(\phi, \psi)$ 에 대한 광도([cd])

$\theta$  : 계산면으로 입사되는 입사각

$r$  : 조명기구의 유한요소의 중앙점에서부터 계산 면의 유한요소의 중앙점까지 거리([m])

#### (2) 간접성분

간접성분의 계산을 위해 먼저, 반사되는 면을 5 Times-rule을 이용하여 유한요소로 나누고, 역자승법칙을 이용하여 반사면의 직접성분을 구한다. 그리고 직접성분을 받는 반사면의 반사율에 의한 초기 광속발산도를 구하고, 그 면에서 발산된 광속을 실내의 다른 면과 주고받는 과정에서 생기는 계산면의 광속을 간접성분이라 할 수 있다. 유한요소끼리 서로 반복되는 반사와 재반사의 계산은 Flux balance equation에 의해 수렴된 값으로 간접성분을 계산할 수 있다[3].

### 2.3 조명시뮬레이션 소프트웨어의 특징

Photopia는 광선추적기법을 기반으로 하며, 조명 기구의 광학설계를 할 때 조명기구의 배광분포를 분석하고 설계하는 소프트웨어이다[4]. Photopia를 이용하여 광학설계를 하기 위해 조명기구의 광학적 형상(3D CAD모델링), 재질의 광학특성(반사율·투과율·굴절률 등)과 광원의 종류 등의 조건 설정이 필요하며, 이러한 조건의 설정에 따라 시뮬레이션의 결과가 달라진다.

그리고 Lightscape는 광속전달법의 알고리즘을 사용하여 인공조명기구에 의한 조도 계산 및 분석을 하며, 이때 사용되는 계산 알고리즘은 “Progressive Refinement Radiosity” 알고리즘으로 유한요소끼리 발생하는 Form factor의 계산 과정이 4번 이상으로 이루어진다. 그리고 벽면의 유한요소는 조명기구로부터 직접 받는 광속이 높을수록 보다 세분하게 나누어져 계산이 이루어지는 특징이 있으며, 면을 세밀하게 쪼개는 기능과 정확도를 조절(0~1 사이)하는 기능이 있다[5]. 그리고 모델링 측면에서 외부 소프트웨어를 활용한 Lightscape는 광속추적기법을 이용한 렌더러(Renderer)로서 정밀하고 사실적인 이미지를 만들 수 있다[6].

또한 Lumen-Micro는 광속전달법의 알고리즘을 사용하여 인공조명기구에 의한 조도 계산 및 분석을 한다. 그리고 Lumen-Micro 소프트웨어 자체에 내포된 모델링 기능을 사용하여 간단한 모델링을 할 수 있고, 비교적 짧은 시간 내에 시뮬레이션 결과와 간단한 이미지를 도출해 낼 수 있다[7]. Relux는 다른 소프트웨어와 달리 광속전달법을 기반으로 하는 독자적인 계산 알고리즘(Point-to-Point Calculation)을 사용한다. 이 알고리즘은 조도계산과정에서 시간을 단축하기 위해 개발된 것으로 하나의 유한요소로부터 받은 광속을 다른 유한요소로 재방사 할 때, 그 차이가 일정한 값 이하가 되면 계산을 끝내는 방식으로 되어 있다. 이 때 일정한 값은 Relux의 계산 알고리즘에 의한 것으로 광속전달법의 직접성분이 가장 밝은 유한요소에 의해 결정되어지는 기준 벡터값이다[8].

AGI는 Lightscape와 같이 광속추적기법과 광속전


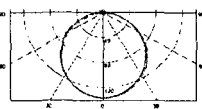

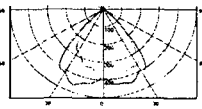

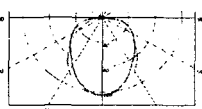

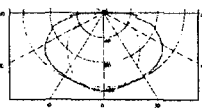
달법을 이용하며, 시뮬레이션을 통해 조도, 휘도 및 주광률 등 다양한 분석이 가능하다. 그리고 Lightscape와 같이 외부로부터 3D 모델링의 호환이 가능하며, 빠르고 뛰어난 조명분석과 더불어 조명효과 이미지가 매우 뛰어나다[9]. 그리고 각 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션을 할 때, 결과 값 보정을 위해 변수 설정이 가능하다. 그러나 본 연구에서는 각 소프트웨어의 기본적으로 설정된 변수 값을 이용한 변수 설정에 따른 다양한 변수를 최대한 제어하여 시뮬레이션 결과값을 비교하였다.

## 3. 광학설계 시뮬레이션

### 3.1 조명기구 선정 및 시뮬레이션 조건

광학설계 시뮬레이션을 하기 위해서는 조명기구의 모델링이 중요하다. 그러나 본 연구에서는 모델링에 의한 변수를 줄이기 위해 제조사에서 모델링이 제공되는 조명기구를 선정하였다. 그리고 조명기구의 형태에 따른 시뮬레이션 결과를 비교하기 위해 표 1과 같이 형태가 서로 다른 4가지 조명기구를 선정하였다.

표 1. 조명기구 선정  
Table 1. Selections of luminaires

Type	기구이미지	배광데이터
A		
	광원 : FL 1×35[W]	
	크기 : 90×1,170[mm]	
B		
	광원 : TC-D 2×26[W]	
	크기 : Φ 263[mm]	
C		
	광원 : TC-L 1×24[W]	
	크기 : 370×300[mm]	
D		
	광원 : TC-L 1×55[W]	
	크기 : 596×596[mm]	

그리고 Photopia 2.0을 이용하여 광학설계를 하기 위해서는 조명기구에 사용된 광학부품의 광학적 특성을 알아야 한다. 표 2는 본 연구에서 선정한 조명기구의 제조회사 카탈로그에 명시된 광학부품의 재질을 나타낸 것으로 광학부품의 재질에 대한 정확한 정보를 제공하지 않는다. Photopia 2.0 소프트웨어의 시뮬레이션 시 광학부품의 재질 특성은 한정된 라이브러리에서 선택하는데, 광학부품의 특성에 따라 시뮬레이션의 결과가 상이하기 때문에 광학부품 재질의 선택에 있어서 유의해야 한다.

표 2. 광학부품의 재질  
Table 2. Material of optical parts

Type	광학부품	재 질
A	반사판	painted galvanized sheet steel
	커버	diffuse opaline polycarbonate
B	반사판	super-pure aluminium
C	반사판	aluminium
	커버	diffuse glass
D	반사판	white paint aluminium
	커버	diffuse acrylic

### 3.2 광학설계 시뮬레이션 결과분석

본 연구에서는 효율적인 광학설계 시뮬레이션을 위해 Photopia 2.0의 시뮬레이션 결과와 측정배광데이터를 비교하였다. 표 3은 Type A 조명기구의 광학부품 재질 특성에 따른 시뮬레이션 결과를 나타낸 것으로, 결과와 같이 광학부품의 광학적 특성에 따라 상이한 시뮬레이션 결과가 도출됨을 알 수 있다. 이와 같이 Photopia 2.0을 이용하여 적합한 광학설계를 수행하기 위해서는 실제 조명기구의 재질과 유사한 광학특성을 가진 재질의 선택이 필요하다.

그리고 Photopia 2.0의 시뮬레이션 시 광학부품의 재질 선택과 더불어 광원과 광원의 위치 선택이 매우 중요하다. 그러나 조명기구 제조회사에서 제공하는 카탈로그는 도면과 광원의 위치가 정확히 명시되지 않는 실정이기 때문에 본 연구에서는 조명기구 제조회사에서 제공하는 모델링과 도면을 통해 광원의 위치를 유추하여 시뮬레이션 하였고, 시뮬레이션

결과와 배광데이터를 비교하였다. 표 1의 4가지 조명기구 중 사용 광원이 하나인 Type A, C, D의 경우는 광원의 위치가 중앙일 때 유사한 결과를 보였으며, 사용 광원이 두 개인 Type B의 경우 표 4의 Test 6과 같이 광원 사이의 간격이 40[mm], 광원의 위치가 중심에서 아래로(-) 10[mm] 떨어진 지점에서 시뮬레이션한 경우 측정값과 유사한 결과를 나타냈다.

표 3. 재질에 따른 시뮬레이션 결과-Type A  
Table 3. Results of simulation by material-Type A

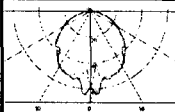
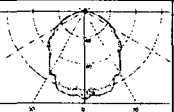

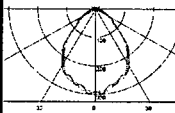
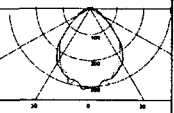
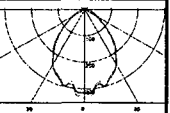

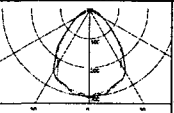
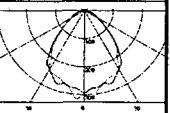
Test 1	Test 2	Test 3
		
반사판 : White steel 92[%]	반사판 : White aluminium 82[%]	반사판 : White steel 92[%]
커버 : White poly. 58[%]	커버 : White acrylic 73[%]	커버 : Opal white poly. 67[%]

표 4. 광원의 위치에 따른 시뮬레이션 결과-Type B  
Table 4. Results of simulation by position of lamp-Type B

Test 1	Test 2	Test 3
광원사이 30[mm](중심)	광원사이 40[mm](중심)	광원사이 50[mm](중심)
		
Test 4	Test 5	Test 6
중심 + 5[mm] (광원사이 40[mm])	중심 + 10[mm] (광원사이 40[mm])	중심 - 10[mm] (광원사이 40[mm])
		

### 3.3 소 결

본 연구는 선정한 4가지 조명기구의 배광데이터와 가장 유사한 결과를 도출하기 위해, 시뮬레이션 설정 조건을 반복·변화시키며 유사한 시뮬레이션 결

과를 갖는 재질과 광원의 위치를 도출하였다(표 5). Type B와 D의 경우 오차가 크게 나타났는데 이는 곡면 형태인 조명기구의 3D 모델링에 있어서 곡면 부분에 절곡이 발생하며, 이는 조명기구의 실제 곡면과 다르기 때문에 시뮬레이션 결과에서 차이가 발생한 것이다.

이와 같이 Photopia 2.0을 이용하여 조명기구의 광학설계를 하고, 조명기구를 제작하기 전에 배광데이터 예측을 위해서는 조명기구의 형상과 광학부품 재질의 특성, 광원의 종류·위치가 실제 제작할 조명기구와 같아야 한다. 그 결과 제작된 조명기구의 배광데이터와 유사한 시뮬레이션 결과를 도출할 수 있으며, 이는 조명기구 광학설계의 오차를 줄일 수 있다.

표 5. 시뮬레이션 결과와 측정값 비교  
Table 5. Comparisons of simulation results and measured value

Type	배광데이터	시뮬레이션 결과
A		
	광원위치 : 조명기구의 중심	반사판 : White steel 92[%] 확산판 : Opal white poly. 67[%]
B		
	광원위치 : 광원사이(40[mm]), 광원높이 (중심에서-10[mm])	반사판 : Specular al. 94[%]
C		
	광원위치 : 조명기구의 중심	반사판 : White al. 82[%] 확산판 : White acrylic 65[%]
D		
	광원위치 : 조명기구의 중심	반사판 : White al. 82[%] 확산판 : White acrylic 51[%]

## 4. 조명설계 시뮬레이션

### 4.1 시뮬레이션 조건

본 연구에서는 표 6과 같이 시뮬레이션 조건을 설정하였다. 벽체의 반사율은 시뮬레이션에서 사용되는 일반적인 반사율로 설정하였고, 직접성분의 측정 시에는 모든 벽체의 반사율을 '0'으로 설정하였다. 그리고 간접성분은 시뮬레이션 조건의 반사율을 적용한 결과에서 직접성분과의 차를 이용하여 산출하였다.

표 6. 시뮬레이션 공간의 조건  
Table 6. Simulation conditions

구분	직접+간접성분	직접성분	
반사율	천정	0.8	0.0
	벽체	0.5	0.0
	바닥	0.2	0.0
광손실률(LLF)	0.8		
실 크기	3.6 × 3 × 2.4[m]		

그림 2와 같이 조도의 측정면은 바닥면으로 설정하였으며, 측정 지점은 벽에서 0.3[m] 떨어지고, 가로·세로 0.3[m] 간격으로 지정하여 총 99지점의 측정값을 도출하였다. 그리고 조명기구는 실의 정중앙에 위치하며, 설치높이는 4가지 조명기구(표 1) 모두 매입형으로 2.4[m](천정고)이다.

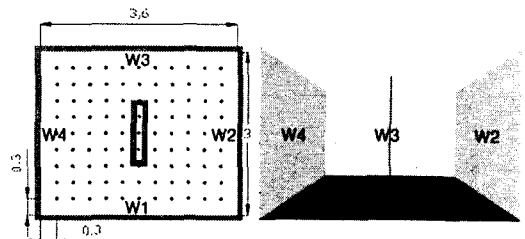


그림 2. 시뮬레이션 실의 평면 및 투시도  
Fig. 2. Plane and perspective plane of the room

조명설계 시뮬레이션 과정에서 광손실률(LLF : Light loss factor)을 지정해주는 Lumen-Micro 2000 과 Relux 2006, AGI 32 소프트웨어와는 달리

Lightscape 3.2 소프트웨어의 시뮬레이션 과정에는 광손실률을 지정해주지 않는 차이점이 있다. 따라서 Lightscape 3.2 소프트웨어 시뮬레이션 과정에서는 조명기구의 총 광속에 광손실률(0.8)을 곱한 값을 적용하였다.

### 4.2 조명설계 시뮬레이션 결과 분석

#### (1) 조도 분석

표 7은 4가지 조명기구를 선정된 조명시뮬레이션 소프트웨어를 이용한 결과이다. 표 7에서와 같이 Lightscape 3.2는 다른 소프트웨어에 비해 평균·최소·최대조도의 결과가 대체로 낮게 나타났다. 본 연구에서는 소프트웨어별 오차를 분석하기 위해 계산알고리즘이 공개되어진 Lightscape 3.2의 결과를 기준으로 표 8과 같이 평균·최소·최대조도의 오차율을 비교하였으며, 조명기구에 따라 소프트웨어별 오차가 다양한 패턴으로 분석되었다.

표 7. 조명설계 소프트웨어 시뮬레이션 결과(Ilx)  
Table 7. Results of simulation for lighting design software(Ilx)

Type	Lumen-Micro 2000	Relux 2006	AGI 32	
A	Ave(%)	8.4	4.8	6.3
	Min(%)	11.4	9.1	4.7
	Max(%)	5.0	-0.7	6.3
B	Ave(%)	4.9	4.9	5.1
	Min(%)	7.4	22.1	-6.4
	Max(%)	3.4	0.9	9.5
C	Ave(%)	5.0	5.8	6.1
	Min(%)	3.6	4.9	-1.2
	Max(%)	3.2	1.1	8.8
D	Ave(%)	7.7	6.1	7.4
	Min(%)	10.5	13.6	8.8
	Max(%)	5.1	0.0	7.3

평균조도의 결과를 살펴보면, Type A를 제외한 Type B, C, D의 경우평균조도의 오차율이 Lightscape 3.2를 제외한 3가지 소프트웨어별로 유사하였다. 이와 같이 평균조도의 경우 Lightscape 3.2를 제외한 소프트웨어간 차이가 적음을 알 수 있으며, Lightscape 3.2와 다른 소프트웨어와의 오차율이

10[%]에 못 미치는 것을 알 수 있다.

최소조도의 결과를 살펴보면 Lumen-Micro 2000과 Relux 2006은 Type C의 시뮬레이션 결과를 제외하고 약 10[%]안팎의 오차율을 보였으며, Type B인 경우는 Relux 2006의 오차율은 22.1[%]로 매우 컸다. 그리고 AGI 32인 경우는 대체로 약 5[%]안팎의 오차율을 보였으며, Type C인 경우는 3가지 소프트웨어의 결과 모두 5[%]이내의 적은 오차율을 보였다. 최대조도의 결과를 보면 모든 시뮬레이션에서 AGI 32의 오차율이 약 6~10[%]로 가장 컸으며, Lumen-Micro 2000은 약 5[%]안팎의 오차율을 보였다. 그리고 Relux 2006은 약 1[%]안팎의 가장 적은 오차율을 보이며 Lightscape 3.2와 유사한 결과를 나타냈다.

#### (2) 직접성분

본 연구에서는 조도의 차이를 직접성분과 간접성분으로 구분하여 비교하였다. 표 9는 천정, 벽체, 바닥면의 반사율을 '0'으로 설정하여 시뮬레이션한 직접성분 결과이다. 그리고 표 9에서의 '[%]'는 Lightscape 3.2를 기준으로 각 소프트웨어의 오차율을 나타낸 것이다. 직접성분의 시뮬레이션 결과 Lightscape 3.2와 AGI 32의 오차율이 Type D의 최소·최대조도의 결과를 제외하고는 약 1[%] 안팎의 거의 동일한 결과를 나타냈다.

그리고 Lumen-Micro 2000의 경우는 Type A와 Type D의 평균·최대조도에서 약 2~5[%]정도의 오차율을 보였으며, 다른 결과에서는 Lightscape 3.2와 동일한 결과를 나타냈다. 그리고 Relux 2006의 경우에는 평균조도와 최대조도에서는 약 2~5[%]의 오차율을 보였으나, 최소조도의 오차율이 약 10~20[%]의 큰 오차율을 보였다.

본 연구에서는 각 소프트웨어의 직접성분 결과에서 발생하는 오차의 원인을 분석하기 위해 위의 표 10과 같이 조명기구 직하부의 직접성분을 식 (1)과 5 Times-rule을 이용하여 수계산하였다. 그 결과 AGI 32의 경우 5 Times-rule을 적용하지 않은 값과 동일한 결과를 보였으며, Lightscape 3.2도 5 Times-rule을 적용하지 않은 값에 근접했으나 AGI 32에 비해 다소 높게 나타났다.

표 8. 조명설계 소프트웨어 시뮬레이션 결과(〔lx〕)  
Table 8. Results of simulation for lighting design software(〔lx〕)

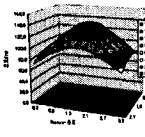
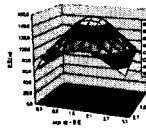
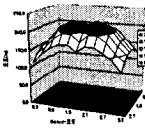
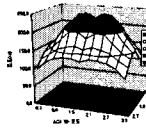
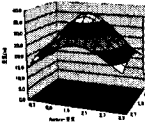
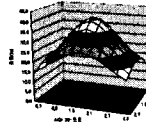
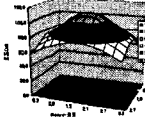
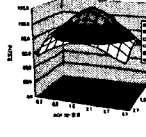
Type	Lightscape 32		Lumen-Micro 2000		Relux 2006		AGI 32	
A	Ave(〔lx〕)	102.5	111.1	107.4	109.0			
	Min(〔lx〕)	66.0	73.5	72.0	69.1			
	Max(〔lx〕)	143.0	150.2	142.0	152.0			
	Min/Ave	0.64	0.66	0.67	0.63			
	Min/Max	0.46	0.49	0.51	0.45			
B	Ave(〔lx〕)	165.7	173.8	173.8	174.1			
	Min(〔lx〕)	95.0	102.0	116.0	88.9			
	Max(〔lx〕)	222.0	229.6	224.0	243.0			
	Min/Ave	0.57	0.59	0.67	0.51			
	Min/Max	0.43	0.44	0.52	0.37			
C	Ave(〔lx〕)	25.3	26.6	26.8	26.9			
	Min(〔lx〕)	16.2	16.8	17.0	16.0			
	Max(〔lx〕)	37.6	38.8	38.0	40.9			
	Min/Ave	0.64	0.63	0.63	0.60			
	Min/Max	0.43	0.43	0.45	0.39			
D	Ave(〔lx〕)	79.9	86.1	84.8	85.8			
	Min(〔lx〕)	53.7	59.3	61.0	58.4			
	Max(〔lx〕)	110.0	115.7	110.0	118.0			
	Min/Ave	0.67	0.69	0.72	0.68			
	Min/Max	0.49	0.51	0.55	0.49			

표 9. 조명설계 시뮬레이션 결과-직접성분  
Table 9. Results of simulation-direct component

Type	Lightscape 32	Lumen-Micro 2000		Relux 2006		AGI 32		
	[lx]	[lx]	[%]	[lx]	[%]	[lx]	[%]	
A	Ave	76.6	74.7	-2.5	78.8	2.9	76.0	-0.7
	Min	41.1	41.0	-0.4	47.0	14.4	41.0	-0.2
	Max	119.0	112.4	-5.5	113.0	-5.0	117.0	-1.7
B	Ave	145.6	145.8	0.1	154.0	5.7	145.3	-0.2
	Min	74.1	74.1	0.0	96.0	29.6	74.2	0.1
	Max	205.0	204.7	-0.1	207.0	1.0	207.0	1.0
C	Ave	18.9	18.9	0.0	20.0	5.5	18.8	-1.0
	Min	9.7	9.7	0.0	10.9	12.7	9.5	-1.8
	Max	31.3	31.0	-0.9	31.1	-0.6	31.1	-0.6
D	Ave	55.6	54.4	-2.2	58.4	5.0	55.6	0.1
	Min	31.2	31.0	-0.5	36.9	18.3	32.9	5.4
	Max	85.9	82.4	-4.0	82.8	-3.6	83.9	-2.3

표 10. 직접성분의 수계산과 시뮬레이션 결과 비교  
Table 10. Comparison of calculation values and simulation results for direct component

Type	5 Times-rule 적용	계산 값 (〔lx〕)	소프트웨어	결과 (〔lx〕)
A	적용 안 됨(유한요소x)	117.1	Lightscape 32	119.0
	적용 안 됨(2등분)	114.6	Lumen-Micro 2000	112.4
	적용됨(4등분)	114.0	Relux 2006	113.0
			AGI 32	117.0
B	적용됨(유한요소x)	195.6	Lightscape 32	196.0
	적용됨(2등분)	- (원형)	Lumen-Micro 2000	196.1
	적용됨(4등분)	-	Relux 2006	196.0
			AGI 32	195.0
C	적용됨(유한요소x)	31.1	Lightscape 32	31.3
	적용됨(2등분)	31.0	Lumen-Micro 2000	31.0
	적용됨(4등분)	28.1	Relux 2006	31.1
			AGI 32	31.1
D	적용 안 됨(유한요소x)	83.9	Lightscape 32	85.9
	적용됨(2등분)	83.6	Lumen-Micro 2000	82.4
	적용됨(4등분)	76.3	Relux 2006	82.8
AGI 32			83.9	



그리고 Relux 2006, Lumen-Micro 2000의 결과는 5 Times-rule을 적용한 값과 유사한 결과를 보였다. 이와 같이 Lightscape 3.2와 AGI 32의 직접성분이 높게 나타난 이유는 5 Times-rule이 적용되지 않았기 때문이며, Relux 2006의 경우는 독자적으로 개발한 계산알고리즘에 의해 오차가 크게 나타난 것으로 판단된다.

(3) 간접성분

본 연구에서는 간접성분을 분석하기 위해 각 측정 지점의 조도와 직접성분의 차를 이용하였고, 표 11은 그 결과이다. 간접성분을 Lightscape 3.2를 기준으로 비교해 본 결과 다른 3가지 소프트웨어의 결과가 대체로 높게 나타났다. 특히 Lumen-Micro 2000의 경우는 Type C를 제외하고는 약 30[%]안팎의 오차를 보였으며, AGI 32의 경우는 평균·최대조도에서 약 30~40[%]의 오차를 보였다. 그러나 Relux 2006의 경우에는 약 10[%] 안팎의 작은 오차를 보였다.

표 11. 조명설계 시뮬레이션 결과-간접성분([lx], [%])  
Table 11. Results of simulation - indirect component([lx], [%])

Type	Lightscape 3.2	Lumen-Micro 2000		Relux 2006		AGI 32		
	[lx]	[lx]	[%]	[lx]	[%]	[lx]	[%]	
A	Ave	25.9	36.4	40.5	28.6	10.5	32.9	27.2
	Min	24.0	32.5	35.2	25.0	4.2	27.9	16.3
	Max	28.4	38.2	34.5	30.0	5.6	36.0	26.8
B	Ave	20.1	28.0	39.4	19.8	-1.3	28.8	43.6
	Min	17.0	24.3	42.9	17.0	0.0	14.7	-13.5
	Max	25.0	33.3	33.2	24.0	-4.0	37.0	48.0
C	Ave	6.4	7.7	20.9	6.8	6.6	8.1	27.0
	Min	6.2	7.1	15.2	6.1	-1.6	6.5	4.8
	Max	6.6	8.0	20.9	7.1	7.6	9.8	48.5
D	Ave	24.4	31.7	30.3	26.5	8.7	30.2	24.0
	Min	22.5	28.2	25.5	23.9	6.2	25.5	13.3
	Max	25.5	33.5	31.3	27.5	7.8	34.1	33.7

이러한 간접성분의 차이는 소프트웨어에 사용된 계산 알고리즘의 차이에서 기인하는 것으로 4가지

소프트웨어의 계산 알고리즘이 모두 광속전달법을 기반으로 하지만 Relux 2006은 재반사 계산 과정에 제한을 두었기 때문에 다소 낮은 결과를 나타내는 것으로 판단된다. 즉 재반사 계산 과정에 사용되는 Form factor와 Flux balance equation의 계산알고리즘이 다르기 때문에 오차가 발생하는 것이다.

4.3 소 결

조명설계 시뮬레이션 결과를 직접성분과 간접성분으로 나누어 조도값을 비교·분석하였다. 직접성분인 경우 Lightscape 3.2와 AGI 32의 결과가 높게 나타났으며, 그 원인을 분석하기 위해 조명기구 직하부의 시뮬레이션 결과와 수계산 결과의 비교하였다. 그 결과 Lightscape 3.2와 AGI 32는 5 Times-rule을 적용하지 않은 결과와 유사하였으며, 이는 5 Times-rule을 적용한 결과와 유사한 Lumen-Micro 2000과 Relux 2006보다 다소 높은 값이었다. 따라서 직접성분의 오차는 5 Times-rule의 적용여부에 의해 발생함을 알 수 있었다. 그리고 독자적인 계산알고리즘을 사용하는 Relux 2006인 경우 최소조도에서 오차가 크게 나타났다.

간접성분의 경우 Lightscape 3.2와 Relux 2006의 결과가 Lumen-Micro 2000과 AGI 32에 비해 낮은 결과를 보였는데, 이는 재반사 계산알고리즘의 특성에 기인한 것이다. 그리고 이러한 직접성분과 간접성분의 조합에 의해 시뮬레이션 결과에서 각 소프트웨어별 오차가 발생하였다.

5. 결 론

본 연구는 조명기구 광학설계 시뮬레이션 소프트웨어인 Photopia 2.0으로 4가지 조명기구의 시뮬레이션 배경데이터와 측정배광데이터를 비교하였다. 시뮬레이션에 사용된 조명기구 3D 모델링은 제조회사에서 제공한 것으로 각진 형상의 조명기구는 광학부품 재질의 특성 및 광원의 위치가 주요한 변수이고, 곡면 형상의 조명기구는 광학적 형상, 광학부품 재질의 특성 및 광원의 위치가 주요한 변수로 작용했다. 또한 광원이 하나 이상인 조명기구는 광원과

광원 사이의 거리도 주요한 변수로 작용하였다. 따라서 Photopia 2.0으로 조명기구의 광학설계 시 광학적 형상, 광학부품 재질의 특성 및 광원의 위치에 관한 정확한 정보가 필요하다.

조명시뮬레이션 소프트웨어 중 선정된 Lumen-Micro 2000, Relux 2006, Lightscape 3.2와 AGI 32로 동일한 조건하에 조도를 직·간접성분으로 구분하여 시뮬레이션 하고 그 결과를 비교·분석하였다. 직접성분의 경우 수계산과 시뮬레이션 결과 비교를 통하여 Lightscape 3.2와 AGI 32의 경우 5 Times-rule이 적용되지 않음을 알 수 있었다. Lightscape 3.2와 Relux 2006의 결과가 다른 소프트웨어에 비해 다소 낮은 결과를 보였다. 이러한 직·간접성분의 조합에 의해 각 소프트웨어별 조도 결과의 오차 원인을 알 수 있었다.

본 연구는 조명시뮬레이션 소프트웨어를 광학설계와 조명계획안의 예측에 관한 두 가지 측면으로 비교·분석하였다. 연구의 결과는 광학설계 시 주의해야 할 변수와 조명계획 안에 적합한 시뮬레이션 소프트웨어의 선정에 관한 기초적 자료로 활용될 수 있을 것이며, 향후 실제 공간에서의 측정값과 시뮬레이션 결과값과의 비교·분석이 이루어져야 할 것이다.

이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 '2단계 BK21사업'의 지원비를 받았음.

## References

- (1) 유기형, "몬테카를로 방법과 광선추적기법에 의한 아트 리움의 자연채광 성능 예측에 관한 연구", 한양대학교 대학원 석사학위논문, 1997.12.
- (2) IESNA Lighting Handbook, Ninth Edition, Illuminating Engineering Society of North America, 1993.
- (3) 최안섭, 실내 조명계산에서의 Form Factor 계산메카니즘의 효율성과 정확성에 관한 연구, 대학건축학회논문지, 제18권 6호, 2002.
- (4) Photopia 2.0, User's Guide.
- (5) Steven Gortler 외2, Radiosity and Relaxation Methods, IEEE Computer Graphics and Application, 1994. 11.
- (6) Lightscape 3.2, User's Guide.
- (7) Lumen-Micro 2000, User's Guide.
- (8) Relux 2006, User's Guide.
- (9) AGI 32, User's Guide.

## ◆ 저자소개 ◆

### 김유신 (金有信)

1981년 1월 2일생. 2005년 세종대 건축공학과 졸업. 현재 세종대 건축공학과 석사과정.

### 원슬기 (元슬기)

1983년 2월 16일생. 2005년 세종대 건축공학과 졸업. 현재 세종대 건축공학과 석사과정.

### 박병철 (朴炳哲)

1977년 6월 16일생. 2004년 세종대 건축공학과 졸업. 2006년 세종대 건축공학과 건축환경설비 전공 졸업(석사). 현재 세종대 건축공학과 박사과정.

### 최안섭 (崔安燮)

1967년 10월 4일생. 1991년 한양대 건축공학과 졸업. 1993년 The Pennsylvania State University 건축공학 건축조명시스템 전공 졸업(석사). 1997년 The Pennsylvania State University 건축공학 건축조명시스템 전공 졸업(박사). 현재 세종대 건축공학과 교수.